**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ZEMİN ÇİVİLİ DUVAR PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Armağan Simge CESUR**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği**

**Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN**

**KASIM 2010**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ZEMİN ÇİVİLİ DUVAR PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**Armağan Simge CESUR**
**(501061304)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :** 13 Eylül 2010
**Tezin Savunulduğu Tarih :** 22 Kasım 2010

**Tez Danışmanı :** Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN (İTÜ)
**Diğer Jüri Üyeleri :** Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK (İÜ)

**KASIM 2010**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, farklı zeminlerde uygulanan zemin çivili iksa duvarlarının deformasyon davranışlarının belirlenmesindeki eksikliklere katkı olması amacıyla hazırlanmıştır.

Bu çalışma sırasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım sayın Doç. Dr. M. Tuğrul Özkan'a teşekkür ederim.

Eylül 2010

Armağan Simge CESUR

İnşaat Mühendisi

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

**ÖNSÖZ** ... **iii**
**İÇİNDEKİLER** ... **v**
**KISALTMALAR** ... **ix**
**ÇİZELGE LİSTESİ** ... **xi**
**ŞEKİL LİSTESİ** ... **xiii**
**SEMBOL LİSTESİ** ... **xv**
**ÖZET** ... **xvii**
**SUMMARY** ... **xix**
**1. GİRİŞ** ... **1**
**2. ZEMİN ÇİVİLİ ESNEK İSTİNAT DUVARLARI** ... **3**
2.1 Giriş ... 3
2.2 Zemin Çivili Duvarların Gelişimi ... 4
2.3 Zemin Çivili Duvarlar Hakkında Uluslararası Tasarım Çalışmaları ... 6
2.3.1 Fransız uygulaması – Clouterre projesi ... 6
2.3.2 İskandinav uygulaması – Nordic handbook ... 6
2.3.3 Birleşik Devletler uygulaması – FHWA ... 7
2.3.4 Hong Kong uygulaması ... 7
2.4 Zemin Çivili Duvarların Uygulanmasında Zemin Koşullarının Etkisi ... 8
2.4.1 Kohezyonlu zeminler ... 9
2.4.1.1 Yumuşak killer ve siltler 9
2.4.1.2 Orta katı – katı killer 9
2.4.1.3 Kohezyonlu zeminlerde uygulanılan zemin çivili duvarlarda karşılaşılan sorunlar 10
Rötre ve şişme 10
Örselenmiş zemin ve şevin stabil olmaması 10
Derecelenmenin etkisi 10
2.4.2 Granüler zeminler ... 11
2.4.2.1 Granüler zeminlerde uygulanılan zemin çivili duvarlarda karşılaşılan sorunlar 12
Geçici stabilite sorunlari 12
Enjeksiyon kaybi 12
2.4.3 Zayıf kayalar ... 12
2.4.3.1 Zayıf kayalarda uygulanılan zemin çivili duvarlarda karşılaşılan sorunlar 13
Ters tabakalanma 13
Ayrışma etkisi 13
2.4.4 Dolgular ... 13
2.4.4.1 Dolguların oluşma biçimleri 14
2.4.4.2 Mühendislik dolguları 14
2.4.4.3 Mühendislik dolgularında uygulanılan zemin çivili duvarlarda karşılaşılan sorunlar 15
2.4.4.4 Tarihi dolgular 16
2.4.4.5 Kontrolsüz dolgular 16
2.5 Zemin Çivili Duvar Elemanları ... 19
2.5.1 Çivi donatilari ... 19
2.5.2 Çivi başliği ... 19

2.5.3 Enjeksiyon ..... 20
2.5.4 Merkezleyiciler ..... 21
2.5.5 Yüzey kaplamaları ..... 21
2.5.6 Drenaj Sistemi ..... 21
2.6 İnşaat Adımları ..... 21
2.6.1 Kazı kademesi ..... 22
2.6.2 Deliklerin açılması ..... 23
2.6.3 Çivilerin yerleştirilmesi ve enjeksiyonu ..... 23
2.7 Zemin Çivili Duvarların Davranışları ..... 23
2.7.1 Zemin çivili sistemler ..... 23
2.7.2 Zemin Çivisinde Yüklerin Oluşması ..... 25
2.7.3 Eğilme ve kesme dayanimi ..... 27
2.7.4 Kaplama ..... 28
2.7.5 Deformasyon ..... 29
2.7.6 Limit denge analizi ile tasarim ..... 29
2.7.6.1 Dayanım sınır durumu 29
2.7.6.2 Servis sınır durumu 30
2.7.7 Genel gereklilikler ve güvenlik katsayilari ..... 31
2.8 Zemin Çivili Duvarların Tasarım Esasları ..... 32
2.8.1 Giriş ..... 32
2.8.2 Tasarım yaklaşimlari ..... 33
2.8.2.1 Yük ve direnç faktörü tasarımı (LFRD) 33
2.8.2.2 Servis yükü tasarımı (SLD) 33
2.8.3 Zemin çivili duvarlarin stabilitesi ..... 33
2.8.4 Tasarım Temeli ..... 34
2.8.5 İç stabilite – çivi ..... 39
2.8.5.1 Çivi tendonunun yapısal gerilme dayanımı 39
2.8.5.2 Zemin – enjeksiyon kenetlenmesi 39
2.8.5.3 Enjeksiyon – tendon kenetlenmesi 40
2.8.6 İç Stabilite – çivi kafasi ..... 40
2.8.7 Dış stabilite ..... 40
2.8.8 Güncel zemin çivisi tasarim yöntemleri ..... 41
2.8.8.1 Çivi tasarımı 41
2.8.8.2 Kaplama tasarımı 41
2.9 Zemin Çivili Duvarların Tasarımı ..... 42
2.9.1 Giriş ..... 42
2.9.2 Zemin çivili duvarlar ön tasarim esaslari ..... 42
2.9.2.1 Duvar yerleşimi 42
2.9.2.2 Zemin çivisi düşey ve yatay aralığı 43
2.9.2.3 Zemin çivisi düzeni 44
2.9.2.4 Zemin çivisi eğimi 45
2.9.2.5 Zemin çivisi boyu ve dağılımı 47
2.9.2.6 Diğer ön tasarım esasları 50
2.9.3 Tasarım abaklari ile ön tasarim ..... 50
2.9.4 Son tasarim ..... 51
2.9.4.1 Dış göçme modelleri 51
Toptan göçmeye karşi stabilite kontrolü 51
Kaymaya karşi stabilite kontrolü 51
Taşıma gücü kontrolü 52
2.9.4.2 İç göçme modelleri 52

2.9.4.3 Kaplama tasarımı 52
2.9.5 Diğer tasarim esaslari ... 52
2.10 Özel Tasarım Konuları ... 53
2.10.1 Basamaklı yapilar ... 53
2.10.2 Kompozit yapilar ... 54
**3. ZEMİN ÇİVİLİ ESNEK İSTİNAT DUVARLARINA AİT İKİ VAKA ANALİZİNİN İNCELENMESİ ... 57**
3.1 Giriş ... 57
3.2 Zemin Özellikleri ... 58
3.3 Uygulanan Tasarım ... 58
3.3.1 Parsel 1 – kesit 1 ... 59
3.3.2 Parsel 1 – kesit 2 ... 61
3.3.3 Parsel 2 – kesit 3 ... 63
3.3.4 Parsel 2 – kesit 4 ... 66
3.3.5 Parsel 2 – kesit 5 ... 69
3.4 Zemin Çivili Duvarların Deformasyon Tahimini ... 72
3.5 Sahada Oluşan Deformasyonların Gözlenmesi ... 73
3.6 Performans Değerlendirmesi ... 79
3.7 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Deformasyon Analizi ... 81
3.7.1 Parsel 1 – 1 kesiti analiz sonuçlari ... 83
3.7.2 Parsel 1 – 2 kesiti analiz sonuçlari ... 83
3.7.3 Parsel 2 – 3 kesiti analiz sonuçlari ... 84
3.7.4 Parsel 2 – 4 kesiti analiz sonuçlari ... 85
3.7.5 Parsel 2 – 5 kesiti analiz sonuçlari ... 87
3.8 Analiz Sonuçları ... 88
**4. SONUÇLAR ... 91**
**KAYNAKLAR ... 95**
**EKLER ... 97**

## KISALTMALAR

**FEM** : Sonlu Elemanlar Yöntemi
**FHWA** : Federal Highway Administration
**FS** : Güvenlik Katsayısı
**LFRD** : Yük ve Direnç Faktörü
**MSE** : Mechanically Stabilised Earth
**NATM** : Yeni Avusturya Tünel Metodu
**RQD** : Kaya Kalitesi Değeri
**SLD** : Servis Yükü Tasarımı
**SPT** : Standart Penetrasyon Deneyi

## ÇİZELGE LİSTESİ

**Sayfa**

**Çizelge 2.1 :** Zemin çivili duvarlar için tasarım aşamaları (FHWA, 2003)……... 42
**Çizelge 3.1 :** Birimlere ait geoteknik parametreler..... 58
**Çizelge 3.2 :** Zemin şartlarına bağlı $(\delta_h/H)_i$ ve C değerleri (FHWA, 2003)..... 73
**Çizelge 3.3 :** Kazı yükseklikleri ve sahada belirlenen deformasyon değerleri..... 79
**Çizelge 3.4 :** Zemin çivili duvarların tasarım ve performans değerlendirmesi ..... 80
**Çizelge 3.5 :** Yüzey kaplaması malzeme parametreleri ..... 82
**Çizelge 3.6 :** Zemin çivisi malzeme parametresi..... 83
**Çizelge 3.7 :** Analiz sonuçları..... 89
**Çizelge 4.1 :** Zemin çivili duvarların tasarım ve performans değerlendirmesi ..... 92
**Çizelge 4.2 :** Analiz sonuçları..... 93
**Çizelge 4.3 :** Sahada ölçülen ve hesaplanan yatay deformasyon – performans değerlendirmesi..... 94
**Çizelge A.1 :** Zemin parametreleri ……99

## ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa**

**Şekil 2.1 :** Fransa Notre Dame de Commier barajına ait taşkın savaklarına ait tip kesit,1961 (Bonazzi ve Colombet, 1961) ..... 4
**Şekil 2.2 :** Yeraltı kazılarında kullanılan geleneksel yöntem ile Yeni Avusturya Tünel Metodu karşılaştırması (Bruce ve Jewell, 1986) ..... 5
**Şekil 2.3 :** Versailles Fransa'daki ilk zemin çivili duvar kesiti (Rabejac ve Toudic, 1974) ..... 5
**Şekil 2.4 :** Delgide karşılaşılabilecek stabilite kayıpları ..... 11
**Şekil 2.5 :** Ters tabakalanmaya bağlı stabilite sorunları ..... 13
**Şekil 2.6 :** Zemin çivili duvarlara ait tipik kesit (FHWA, 2003) ..... 20
**Şekil 2.7 :** Zemin çivisine ait detaylı kesit (Porterfield *et* al., 1994) ..... 20
**Şekil 2.8 :** Çivili duvarların inşaat adımları (FHWA, 2003) ..... 22
**Şekil 2.9 :** Zemin çivili şevin şematik gösterimi (Barley et al., 1997) ..... 24
**Şekil 2.10 :** Zemin çivi arayüzündeki bağ kuvvetinin olası dağılımı (Barley et al., 1997) ..... 25
**Şekil 2.11 :** Dik bir şevin inşaatı süresince kazı aşamalarında zemin çivilerinde oluşan çekme kuvvetleri ve deformasyonun gelişimi (Pedley et al., 1990) ..... 26
**Şekil 2.12 :** Zemin çivisi ile güçlendirilmiş mevcut şevlerde deformasyon oluşumu ve yüklerin mobilize olması (Phear et al., 2005) ..... 26
**Şekil 2.13 :** Zemin çivili duvarlar için dayanım sınır durumunun şematik gösterimi (Phear et al., 2005) ..... 30
**Şekil 2.14 :** Zemin çivili durumlarda servis sınır durumunun şematik gösterimi (Phear et al., 2005) ..... 31
**Şekil 2.15 :** Zemin çivili duvarlar için araştırılacak olası göçme biçimleri (FHWA, 1998) ..... 34
**Şekil 2.16 :** Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı (LFRD) ile tekil donatılı zemin çivili duvar tasarımı (FHWA, 1998) ..... 35
**Şekil 2.17 :** Servis Yükü Tasarımı (SLD) ile tekil donatılı zemin çivili duvar tasarımı (FHWA, 1998) ..... 36
**Şekil 2.18 :** Çoğul donatılı zemin çivili duvar tasarımı (FHWA, 1998) ..... 37
**Şekil 2.19 :** Çivi destek şeması (FHWA, 1998) ..... 38
**Şekil 2.20 :** Dış göçme biçimleri (FHWA, 1998) ..... 41
**Şekil 2.21 :** Duvar yüzü zemin çivisi düzeni (FHWA, 2003) ..... 44
**Şekil 2.22 :** Düşey olmayan duvarlar için zemin çivisi yerleşimi (FHWA, 2003) ..... 45
**Şekil 2.23 :** Altyapı elemanlarına bağlı olarak çivi eğimlerinin değişmesi (FHWA, 2003) ..... 46
**Şekil 2.24 :** Köşelerde çivi yerleşimi plan görünüşü (FHWA, 2003) ..... 47
**Şekil 2.25 :** Çivi boylarındaki değişimin etkisi (FHWA, 2003) ..... 49
**Şekil 2.26 :** Basamaklı zemin çivili duvar örneği (Byrne et al., 1988) ..... 53
**Şekil 2.27 :** Kompozit duvar kesiti (Byrne et al., 1998) ..... 54
**Şekil 2.28 :** Çok sıra ankraj destekli kompozit duvar kesiti (Byrne et al., 1998) ..... 55

**Şekil 3.1 :** Parsel 1 – Kesit 1 ..... 60
**Şekil 3.2 :** Parsel 1 – 1 Kesiti uygulaması ..... 61
**Şekil 3.3 :** Parsel 1 – Kesit 2 ..... 62
**Şekil 3.4 :** Parsel 1 – 2 kesitinin uygulaması ..... 63
**Şekil 3.5 :** Parsel 2 – Kesit 3 ..... 65
**Şekil 3.6 :** Parsel 2 – 3 kesitinin uygulaması ..... 66
**Şekil 3.7 :** Parsel 2 – Kesit 4 ..... 68
**Şekil 3.8 :** Parsel 2 – 4 kesitinin uygulaması ..... 69
**Şekil 3.9 :** Parsel 2 – Kesit 5 ..... 71
**Şekil 3.10 :** Parsel 2 – 5 kesitinin uygulaması ..... 72
**Şekil 3.11 :** 1 Kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları ..... 74
**Şekil 3.12 :** 2 kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları ..... 75
**Şekil 3.13 :** 3 kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları ..... 76
**Şekil 3.14 :** 4 kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları ..... 77
**Şekil 3.15 :** 5 kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları ..... 78
**Şekil 3.16 :** 1 kesiti deformasyon grafiği ..... 83
**Şekil 3.17 :** 2 kesiti deformasyon grafiği ..... 84
**Şekil 3.18 :** 3 kesiti 31.9 m kazı derinliği için deformasyon grafiği ..... 85
**Şekil 3.19 :** 3 kesiti 13.9 m kazı derinliği zemin çivili duvar için deformasyon grafiği ..... 85
**Şekil 3.20 :** 4 kesiti 31.0 m kazı derinliği için deformasyon grafiği ..... 86
**Şekil 3.21 :** 4 kesiti 13.0 m kazı derinliği zemin çivili duvar için deformasyon grafiği ..... 87
**Şekil 3.22 :** 5 kesiti 30.1 m kazı derinliği için deformasyon grafiği ..... 88
**Şekil 3.23 :** 5 kesiti 12.1 m kazı derinliği zemin çivili duvar için deformasyon grafiği ..... 88

## SEMBOL LİSTESİ

**A** : Kesit Alanı
**$A_t$** : Çelik Donatı Kesit Alanı
**$B_r$** : Bağ Oranı
**C** : Zemin koşullarına Bağlı Deformasyon Katsayısı
**c** : Zeminin Tasarım Kohezyonu
**$c_u$** : Zeminin Drenajsız Kayma Mukavemeti
**$D_{DH}$** : Delik Çapı
**$D_{DEF}$** : Yatay Deformasyon Etki Alanı
**E** : Elastisite Modulü
**F** : Güvenlik Katsayısı
**$f_y$** : Çelik Donatı Akma Dayanımı
**H** : Duvar Yüksekliği
**I** : Atalet Momenti
**i** : Zemin Çivisinin Yatayla Yaptığı Açı
**$i_d$** : Drenaj Borusunun Yatayla Yatığı Açı
**$l_d$** : Drenaj Boyu
**L** : Çivi Boyu
**$L_r$** : Boy Oranı
**N** : Normal Kuvvet
**$P_r$** : Performans Oranı
**$P_{r'}$** : Hesaplanan Performans Oranı
**$Q_d$** : Tasarım Sıyrılma Direnci
**$Q_N$** : Çivi Tendonu Direnç Faktörü
**$Q_U$** : Son Sıyrılma Direnci
**R** : Toplam Yük
**S** : Direnen Kayma Kuvveti
**$S_h$** : Yatay Çivi Aralığı
**$S_{hd}$** : Drenaj Yatay Aralığı
**$S_r$** : Dayanım Oranı
**$S_v$** : Düşey Çivi Aralığı
**$S_{vd}$** : Drenaj Düşey Aralığı
**T** : İzin Verilen Çivi Yükü
**$T_F$** : Tasarım Çivi Kafası Dayanımı
**$T_{FN}$** : Nominal Çivi Kafa Dayanımı
**$T_{max-s}$** : Maksimum Normalize Tasarım Çekme Kuvveti
**$T_N$** : Tasarım Çivi Tendonu Dayanımı
**$T_{NN}$** : Nominal Çivi Tendonu Dayanımı
**$T_0$** : Çivi Kafası Çekme Kuvveti
**W** : Servis Yükü
$\alpha$ : Duvar Yüzünün Düşeyşe Yaptığı Açı
$\beta$ : Duvar Üzeri Şev Açısı
$\delta_h$ : Sahada Ölçülen Yatay Deformasyon

$\delta_h'$ : Hesaplanan Yatay Deformasyon
$\phi_U$ : İçsel Sürtünme Açısı
$\Phi_C$ : Kohezyon Direnç Faktörü
$\Phi\phi$ : İçsel Sürtünme Açısı Direnç Faktörü
$\Phi_F$ : Çivi Kafası Direnç Faktörü
$\Phi_N$ : Çivi Tendonu Direnç Faktörü
$\Phi_Q$ : Sıyrılma Direnci Faktörü
$\Gamma w$ : Yük Faktörü
$\gamma$ : Zeminin Birim Hacim Ağırlığı
$\eta$ : Çivi Yoğunluğu
$\mu$ : Normalize Tasarım Sıyrılma Direnci
$\nu$ : Poisson Oranı
$\omega$ : Oturma Faktörü

## ZEMİN ÇİVİLİ DUVAR PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

## ÖZET

Son yıllarda sanayi ve ticaretin ilerlemesiyle nüfus yoğunluğu artan bölgelerde, büyük şehirlerde ve şehir merkezlerinde inşaat talebini karşılayamayacak duruma gelen arsaların ekonomik değeri hızla artmaktadır. Bu artan değer yüksek katlı yapılara ve çok katlı bodrumlara ihtiyaç yaratmaktadır. Bodrum inşaatı için gereken derin kazılar zeminin kendini yeterli miktarda tutamaması komşu bina, yol ve arsaların stabilitesini olumsuz etkilemektedir. Bu durum inşaat sektöründe iksa sistemlerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir.

İstanbul şehrinin kontrolsüz büyümesi sırasında temel kazısı hafriyat atıklarının kontrolsüz ve denetimsiz şekilde depolandığı sahalar oluşmuş, zamanla bu sahaların şehir merkezinde kalması sebebiyle inşaat alanı olarak kullanılması söz konusu olmuştur. Bu sebeple kalınlığı 30 m'ye varan kontrolsüz dolgu birimde iksa sistemlerinin uygulanması gerektiren durumlarla karşılaşılmaktadır

Gelişen çalışmalarla iksa projelendirme ve uygulama sistemlerinde çalışma süreleri optimize edilmekte ve daha ekonomik çözümlere ulaşılmaktadır.

İksa sistemleri içinde zemin çivili duvarlar ekonomik oluşları, uygulama süresi ve minimum çalışma alanı ihtiyacı ile diğer iksa sistemlerine göre avantaj sağlamaktadır. Sağladığı avantajlarla uygulamaları yaygınlaşmaktadır.

Hesap esasları limit denge analizlerine dayanmakta ve deformasyon tahminleri eksiklikler içermektedir. Bu sebeple deformasyon analizlerinde sayısal modelleme yöntemlerinden sonlu elemanlar programı Plaxis tercih edilmektedir.

Bu tez kapsamında kontrolsüz dolgu zeminde uygulanan zemin çivili bir duvar örneği için tasarıma esas alınan zemin mukavemet parametreleri ve sahada ölçülen deplasman değerleri kullanılarak zeminin deformasyon parametreleri geri analiz ile elde edilmiştir.

## PERFORMANCE ANALYSIS OF SOIL NAILED WALLS

## SUMMARY

With the development of industry and trade in the last years, the economic value of lands insufficient to meet the construction demand in densely populated regions, big cities and city centers. This steep rise in the economic value creates a demand for high-rise buildings and multi-story basements. The deep excavations required for basement construction adversely affects the stability of neighboring buildings, roads and lands. This necessitates the use of retaining structures in the construction sector.

During uncontrolled development of Istanbul some regions of non-engineering fills occur in city center. These fills are made of foundation excavations. Nowadays one by one these areas in the city center become constrution sites and a demand of excavation support systems for fill materials up to 30 m depth occur.

The developed studies optimize the working periods of retaining structure design and application processes, and also enable more economic solutions.

Among the types of retaining structures, soil nailed walls come forth due to their advantages such as being economic, shorter application periods and ability to work in restricted areas. They are getting more preferred by the day due to their advantages.

Their calculation principle is based on limit equilibrium analysis. Therefore their deformation estimations do not provide exact figures. Hence, in their deformation analysis, finite element program Plaxis is used as a numeric modeling method.

In the scope of this thesis, a soil nailed wall on a non-controlled fill is evaluated. The soil deformation parameters have been achieved via back analysis by using soil strength parameters which formed the basis for design, and the deformation values measured at site.

# 1. GİRİŞ

Sanayi ve ticaretin ilerlemesiyle nüfus yoğunluğu artan bölgelerde, büyük şehirlerde ve şehir merkezlerinde inşaat talebini karşılayamayacak duruma gelen arsaların ekonomik değeri hızla artmaktadır. Bu artan değer yüksek katlı yapılara ve çok katlı bodrumlara ihtiyaç yaratmaktadır. Bodrum inşaatı için gereken derin kazılar zeminin kendini yeterli miktarda tutamaması komşu bina, yol ve arsaların stabilitesini olumsuz etkilemektedir. Bu durum inşaat sektöründe iksa sistemlerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir.

İstanbul şehrinin kontrolsüz büyümesi sırasında temel kazısı hafriyat atıklarının kontrolsüz ve denetimsiz şekilde depolandığı sahalar oluşmuş, zamanla bu sahaların şehir merkezinde kalması sebebiyle inşaat alanı olarak kullanılması söz konusu olmuştur. Bu sebeple kalınlığı 30 m'ye varan kontrolsüz dolgu birimde iksa sistemlerinin uygulanması gerekmiştir.

Detaylı bir geoteknik çalışma ile iksa sistemleri güvenli olarak projelendirilirler. Gelişen bilimsel çalışmalarla iksa projelendirme ve uygulama sistemlerinde çalışma süreleri optimize edilmekte ve daha ekonomik çözümlere ulaşılmaktadır.

Tünel kazılarılarını desteklemek amacı ile geliştirilen zemin çivisi sistemi ekonomik oluşu, uygulama süresi ve kısıtlı alanlarda çalışma imkanı ile diğer iksa sistemlerine göre avantaj sağlamaktadırlar. Sağladığı avantajlarla uygulamaları yaygınlaşmaktadır.

Bu tez kapsamında öncelikle zemin çivili esnek istinat duvarları hakkında genel bilgi verilmiştir. İksa sistemini oluşturan elemanlar ve inşaat adımları açıklanmıştır. Zemin çivili duvarların boyutlandırılmasında esas alınan tasarım prensipleri anlatılmıştır.

Bu tez kapsamında örnek bir vakaya ait zemin çivili iksa duvarının deformasyon davranışları incelenmiştir. İksa kesiti sonlu elemanlar programı PLAXIS ile analiz edilmiştir. Elde edilen deformasyon değerleri, sahada ölçülen değerler ve literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.

# 2. ZEMİN ÇİVİLİ ESNEK İSTİNAT DUVARLARI

## 2.1 Giriş

Zemin çivisi tekniği doğal zemini veya mevcut dolgu malzemesinin zemin çivisi denilen çelik çubuklarla desteklenmesi şeklinde açıklanabilir. Zemin çivisi, yamaçlarda kalıcı ve geçici duraylılığın sağlanmasında, mevcut donatılandırılmış zemin duvarların onarılmasında, kara ve demiryollarının yarma kesimleri ile tünellerde geçici destek amaçlı kullanılmaktadır. Zemin çivileri önceden delinmiş deliklere yerleştirilip enjeksiyonlaranarak, delme ve enjeksiyonlama işlemi eş zamanlı yapılarak ya da çakma-sürme ile önceden enjeksiyonlamadan kullanılmaktadır. Genellikle yatayla açı oluşturacak şekilde yerleştirilirler. Düşey yüzeyde esnek ya da esnek olmayan kaplama kullanılır. Zemin çivisi sistemi zemin dışında yumuşak kaya ve ayrışmış kaya zeminlerde de uygulanmaktadır.

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

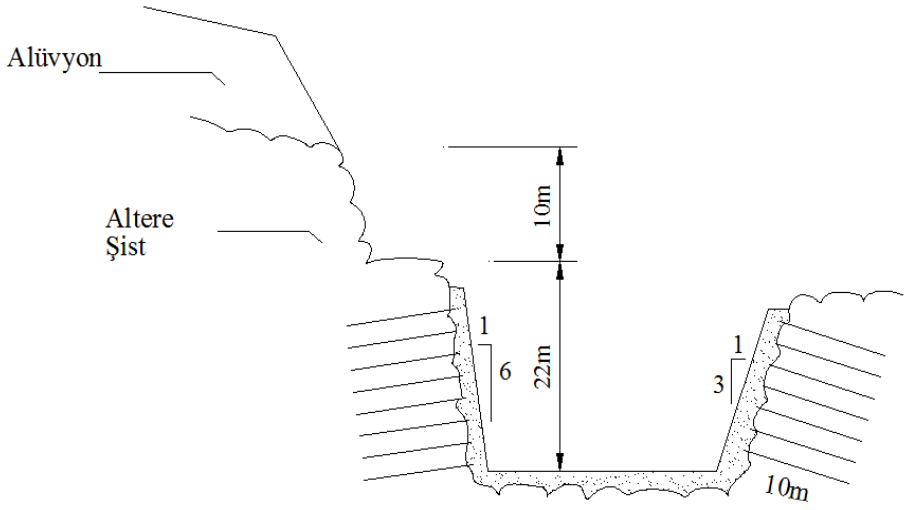
Zemin çivisi yöntemi genellikle mevcut şevlerin ya da kazıların desteklenmesinde diğer kazı destek sistemlerine göre avantajlı bulunduğu durumlarda tercih edilir. Yöntemin ankrajlı sistemlere karşı en önemli tercih edilme sebepleri ekonomik oluşu, imalat süresini kısaltması ve özellikle şehir içi imalatlarda küçük ekipmanla çalışma olanağı vermesidir.

Zemin çivili sistemler esnek ve ekonomik oluşları, şehir içi kısıtlı alanlarda imalatı mümkün kılamasının yanı sıra yeni ve mevcut yarma ve dolgu şevlerinin stabilize edilmesinde ve mevcut istinat duvarlarının onarılmasında kullanılabilmeleriyle avantaj sağlayarak son yıllarda önem kazanan bir yöntem haline gelmiştir.

## 2.2 Zemin Çivili Duvarların Gelişimi

Zemin çivisi yöntemi kaya-ankrajları ve çoklu ankraj sistemleri için geliştirilen yöntemler ve donatılandırılmış zemin için geliştirilen yöntemler kullanılarak üretilmiştir (Clouterre, 1991)

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 kaplasından oluşan bir sistem inşa edildi (Bonazzi ve Colombet, 1984). Kullanılan tip kesit Şekil 2.1'de sunulmuştur.

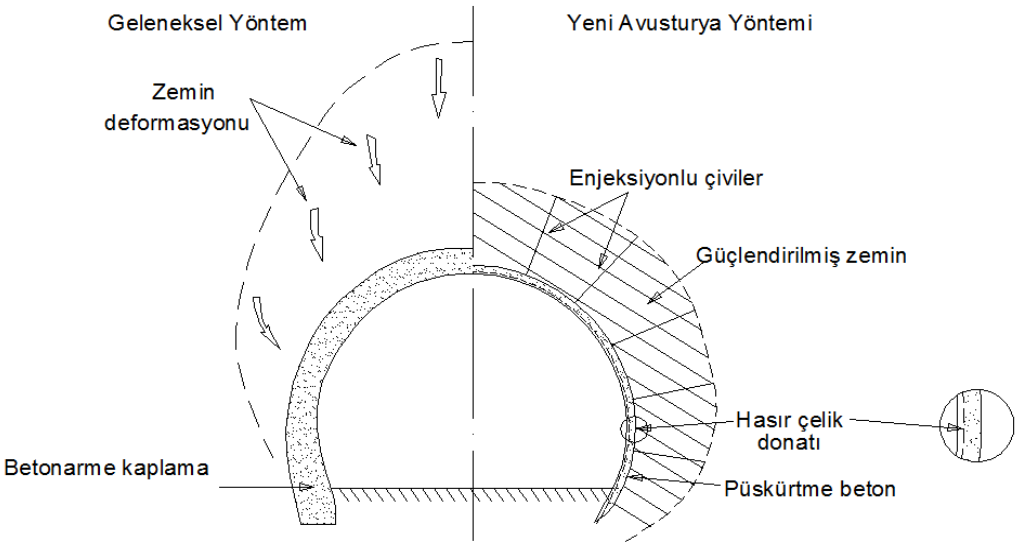



**Şekil 2.1 :** Fransa Notre Dame de Commier barajına ait taşkın savaklarına ait tip kesit,1961 (Bonazzi ve Colombet, 1961)

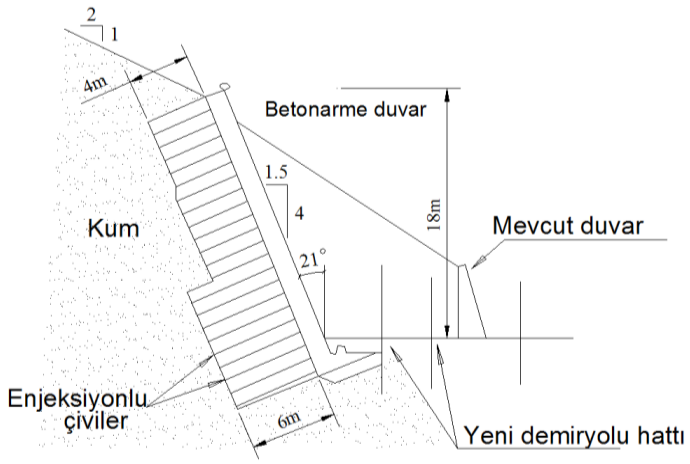
1964 yılında Rabcewicz tünel ve yeraltı galerini desteklemek amacıyla Yeni Avusturya Tünel Metod'unu (NATM) geliştirdi. Bu yöntem kazı aynasının kazılmasından sonra zeminin pasif ankarajlarla güçlendirilmesinden oluşmaktadır. Bu şekilde Rabcewicz 3m – 6m arasında değişen boylarda çiviler kullanarak son kaplama betonunun miktarında önemli bir azalma sağladı. Geleneksel metod ve yeni avusturya metodunun arasındaki farkı gösteren ayrıntılı bir kesit Şekil 2.2'de verilmiştir. Zemin çivili sistemler bu metodun bir uygulaması sayılabilirler.

Yeni Avusturya Tünel Metodu ile benzer tekniğin yumuşak kaya ve zemin şevler geçici ve kalıcı kazı destek sistemi olarak kullanılabileceği düşünülmüştür. Kayıtlara göre ilk zemin çivili duvar 1972 Fransa Versailles'de demiryolu genişletme çalışmalarında karşılaşılan yarma kesitlerde uygulanmıştır (Rabejac ve Toudic, 1974). Şekil 2.3'de şekli verilen 18m'lik bu geçici iksa sisteminde 4m – 6m

boyundaki zemin çivileri düşeyde sık aralıklarla sıkı, iyi derecelenmiş Fontainbleau kumunda imal edilmiştir.




**Şekil 2.2 :** Yeraltı kazılarında kullanılan geleneksel yöntem ile Yeni Avusturya Tünel Metodu karşılaştırması (Bruce ve Jewell, 1986)




**Şekil 2.3 :** Versailles Fransa'daki ilk zemin çivili duvar kesiti (Rabejac ve Toudic, 1974)

1975 – 1981 yılları arasında zemin çivileri ile ilgili ilk ana araştırma programı Almanya Karlsruhe Universitesinde yürütülmeye başlandı (Gässler ve Gudehus, 1981; Schlosser ve Unterreiner, 1991). Ardından 1986 yılında Fransa'da Clouterre araştırma programı başlatıldı. Bu araştırmanın 1991 yılında yayınlanan sonuçları Fransa'da zemin çivili duvar tasarımının temeli oluşturdu ve diğer ülkeler tarafından kullanılmaya başlandı.

En belirgin avantajı ekonomik olmasının yanı sıra inşaat aşamasında esneklik sağlaması, kısıtlı çalışma alanlarında çalışma olanağı sağlaması ve özel koşullarda

adapte edilerek kullanılabilmesi zemin çivili duvarların tasarım ve uygulama açısından önemli bir yer kazanmasını sağlamıştır.

## 2.3 Zemin Çivili Duvarlar Hakkında Uluslararası Tasarım Çalışmaları

Bu tez çalışmasında incelenen zemin çivili duvarların tasarımları FHWA tarafından yayınlanan Birleşik Devletler uygulaması esas alınarak yapılmıştır. Zemin çivili duvar tasarım esasları ile ilgili yapılan ve uluslararası geçerliliği olan diğer çalışmalar aşağıda anlatılmıştır.

### 2.3.1 Fransız uygulaması – Clouterre projesi

Fransa'da zemin çivili duvar uygulamaları Fransız Ulusal Araştırma Projesi Clouterre tarafından basılan Clouterre Projesi'ne bağlı olarak yapılmaktadır. İngilizce tercümesi 1993 yılında hazırlanmıştır. Clouterre kelimesi "çivili zemin" anlamına gelmektedir.

Bu doküman 1986 ile 1990 yılları arasında yapılan, toplam bütçesi yaklaşık 3 milyon dolar olan Fransız Ulusal Araştırma Projesi Clouterre'in sonucu hazırlanmıştır. Bu dokümanda zemin araştırması aşamasından sahada kalite kontrol aşamasına kadar tüm tasarım teorisi ve imalat aşamaları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Geniş kapsamlı bir doküman olmasına rağmen sadece püskürtme beton rijit kaplamalı düşey duvarlar ve dik şevlerin tasarım ve uygulaması anlatılmaktadır ve uygulama örneklerine yer verilmemiştir (Ciria, 2005).

### 2.3.2 İskandinav uygulaması – Nordic handbook

İşveç, 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 anlatışmıştır. 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. Kaplamalar konusunda kısıtlı bilgi içermektedir (Ciria, 2005).

### 2.3.3 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 açıklıyor. Zemin çivili duvarların tüm kavramlarıyla ilgili seçim, tasarım, ayrıntılandırma ve inşaat konularına kılavızluk 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 sağlanıyor.

Bu bahsedilen üç doküman zemin çivli duvarlar hakkında geniş kapsamlı bilgi sağlamasına rağmen uygulama alanları Clouterre gibi püskürtme beton kaplamalı düşey duvarlar ve dik şevler ile kısıtlı kalmaktadır (Ciria, 2005).

### 2.3.4 Hong Kong uygulaması

Hong Kong'da imal edilen zemin çivili duvarların genel uygulama konusu mevcut şevlerin iyileştirilmesidir. 1970 ve 1980'lerde felaketlere 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 dayalıdır. Watkins ve Powell şev stabilitesi analizi ve zemin çivisi tasarım yöntemlerini güvenlik sayıları ile birlikte özetlemişlerdir (Ciria, 2005).

## 2.4 Zemin Çivili Duvarların Uygulanmasında Zemin Koşullarının Etkisi

Tüm zemin koşulları zemin çivili duvarların imalatı için uygun değildir. Bazı zeminlerde zemin çivili duvarların uygulanması imalat aşamasında ya da uzun dönemde ekonomik ve güvenli olmayan çözümler olabilir. Bu durumun önceden belirlenmesi proje açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple projelendirme aşamasından önce detaylı saha araştırması yapılarak sahanın jeolojik özelliklerinin belirlenmesine özen gösterilmelidir.

Bu bölümde farklı zemin koşullarının zemin çivili duvar imalatına uygunluğu incelenecektir. En yaygın gözlemlenen zemin koşulları olan kohezyonlu zeminler, granüler zeminler, zayıf kayaçlar ve dolgu birimler incelenmiştir. Bu bölümde verilen bilgiler tasarımcı, araştırmacı ve uygulamacı firma ve kişilerin deneyimlerine dayanılarak elde edilmiştir.

Zemin çivili duvarların başarılı uygulamaları çivi ile zemin arasında bağ kuvvetlerinin oluşmasının bir sonucudur. Zemin çivili duvar uygulamalarının ekonomik hale gelmesi için ise bu bağın yeterli dayanıma sahip olması gerekir.

Mevcut bir şevin dikleştirilmesinde ya da zemin çivileri ile yeni bir duvar oluşturulmasında kademeli kazılar yapılır. Çivilerin imalatı için püskürtme beton kaplamanın imalatından önce zeminde 1 – 2 m yüksekliğinde kendi kendini tutabilen yarmaların açılması gerekmektedir. Zeminde buna imkan sağlayacak yeterli görünür kohezyon ya da çimentolaşma mevcut olmalıdır.

Çeşitli zeminlerin zemin çivili duvar uygulaması için uygunlukları ve uygulamada alınabilecek önlemler açıklanmıştır.

Orta katı – katı, düşük plastisiteli killer zemin çivili duvar uygulamaları için uygun zeminlerken krip deformasyonu oluşumuna yatkın yumuşak kohezyonlu ve organik zeminler aynı oranda uygun değildir. Bu birimlerin iyileştirilerek zemin çivili duvar uygulamasına daha uygun hale getirilmesi mümkün değildir. Yüksek plastisiteli ve donmaya karşı duyarlı zeminler ve kayalarda zemin çivili duvar uygulaması için çok uygun olmasalar da ıslanma ve kurumaya karşı yeterli koruma sağlanması halinde uygulama yapılabilir.

Görünür kohezyon özelliği olan ve çivi imalatına engel olacak iri çakıllar barındırmayan iyi derecelenmiş zeminler, ince – orta kumlar, siltli kumlar ve orta

sıkı – sıkı kumlar ve çakıllar zemin çivili duvar uygulaması için uygun zeminlerdir. Görünür kohezyon özelliği göstermeyen, gevşek ve temiz kum ve çakıllarda ön enjeksiyonlama ya da zemin dondurma yöntemleri kullanılarak geçici şev stabilitesi sağlanabilir veya kazı genişlik ve yükseklikleri azaltılarak bu tür zeminler zemin çivisi uygulamaları için daha uygun hale getirilebilirler.

Ters tabakalanma gözlenmeyen kayalar zemin çivili duvar uygulamaları için uygun koşullar sağlarken ters tabakalanma gösteren kayalar bu uygulama için daha az uygunluk gösterir.

Doğal veya üniform, agresif olmayan malzemeden seçilmiş, dikkatle sıkıştırılarak yukarıda anlatılan zeminlere benzer doğal zemin özellikleri kazandırılmış mühendislik dolguları zemin çivili duvar uygulamarı için uygundurlar. Değişken zemin özellikleri gösteren, agresif, ayrışabilir, göçme ve farklı oturma davranışı göstermeye yatkın kontrolsüz dolgular ise zemin çivili duvar uygulamaları için daha az uygundurlar. 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 yapılabilir.

### 2.4.1 Kohezyonlu zeminler

#### 2.4.1.1 Yumuşak killer ve siltler

Kesme dayanımı düşük olan yumuşak killer ve siltlerde zemin çivili duvar uygulamaları genellikle uygun değildir. Bu durum imalat için açılan yarmanın stabilitesinde sorun oluşmasına sebebp olur. Ayrıca zemin çivisi ile zemin arasında oluşan bağ kuvveti zayıf olacağı için zemin çivisi yerleşimi çok sık olacaktır. Son olarak oluşacak deformasyonların kabul edilebilir sınırıların üzerine olması beklenmektedir.

#### 2.4.1.2 Orta katı – katı killer

50 kPa'dan daha büyük drenajsız kesme dayanımı olan orta katı – katı killer genel olarak zemin çivili duvarlar için daha uygundurlar. Kuru oldukları durumlarda imalat için gerekli olan süre boyunca desteksiz stabilitelerini koruyabilirler. Ayrıca çivi delgisinde muhafaza borusu gerektirmezler ve yeterli stabilite sağlarlar. Çivilerdeki çekme kuvvetlerinin az olduğu durumlarda genellikle yeterli bağ kuvveti sağlanır.

### 2.4.1.3 Kohezyonlu zeminlerde uygulanılan zemin çivili duvarlarda karşılaşılan sorunlar

**Rötre ve şişme**

Yüksek plastisiteli, aşırı konsolide killer ıslanma ve kuruma gibi olaylarla bünyelerindeki su muhtevasının değişmesine bağlı olarak hacim değişimi göstermeye yatkındırlar. Bu tür zemin koşullarında imal edilen zemin çivili duvarlarda tekrarlı mevsimsel ıslanma ve kuruma çevrimleri killerde şişme ve rötre oluşmasına sebep olur. Bu olaylar sonucu özellikle şev üstü ve/veya kaplamada parçalanmalar oluşabilir. Ayrıca çivi yüklerinde değişiklikler ve dalgalanmalar oluşabilir ve şev yüzünde bölgesel oturmalar gözlenebilir. Su püskürtmeli delgi killerde yumuşamaya sebep olabileceği için tercih edilmemelidir. Düşük plastisiteli killerde ise smektit kil minerallerinin (montmorillonite) daha az görülmesi şişme ve rötre davranışını azaltmaktadır.

Yüksek plastisiteli killerin mevsimsel rötre/şişme davranışları bitkilendirme ve ağaçlandırma ile daha büyük zararlar oluşturacak durumlara gelebilir. 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 ileryen durum göçme sebep olabilir.

**Örselenmiş zemin ve şevin stabil olmaması**

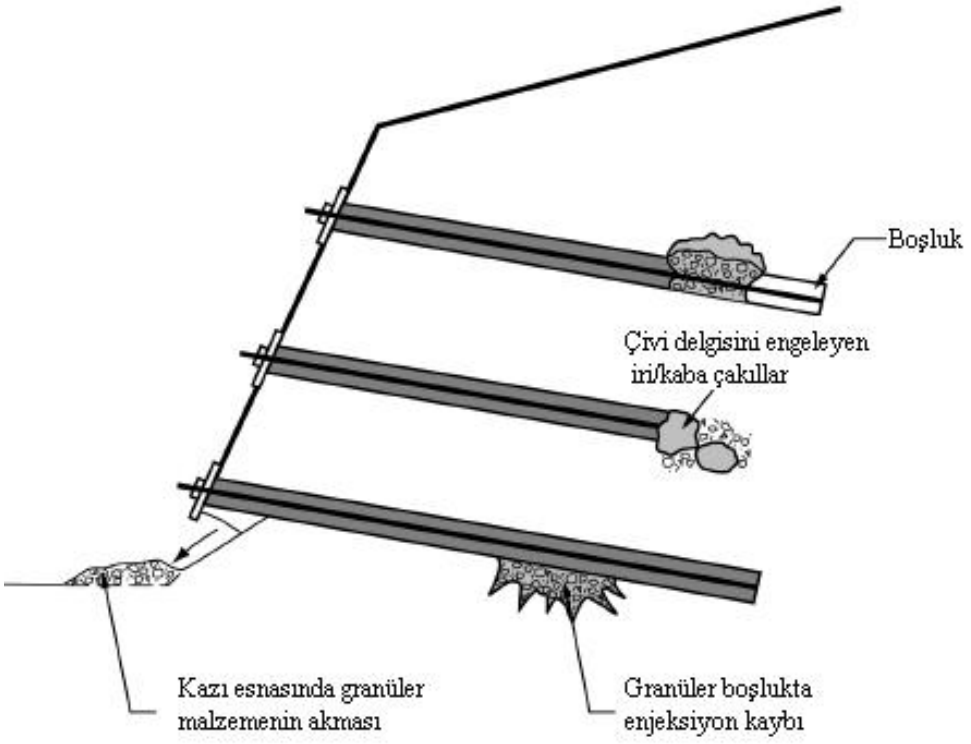
Yüksek plastisiteli killer diğerlerine göre daha duyarlıdır. Rezidüel ya da yeniden yoğrulmuş numunelerin pik dayanımları örselenmemiş numunelere göre daha düşük olur. Duyarlı killerin tasarıma esas kesme dayanımı parametrelerinin seçiminde daha önceki örselenmelerini öngörmek gereklidir.

**Derecelenmenin etkisi**

Kohezyonlu zemin içerisinde gözlenen kaba daneli malzeme zemin çivili duvarların imalatında ve uzun dönem performansı açısından sorun yaratabilir. Tabakalı killerin boşluk suyu basıncı değişimine tepkisi çok daha hızlıdır özellikle tabakaların ince olduğu bölgelerde ve kısa dönem davaranışlarında drenajlı şartlar elde edilebilir. Bu durum geçici kazı stabilitesini etkileyebilir.

İnce malzemelerin aralarında kaba malzemelere de rastlamak mümkündür.Zemin çivili sistemler ince ve kaba malzemenin bir arada görüldüğü zemin türlerinde

uygulamaya uygun sistemlerdir. Yinede kaba malzemenin varlığı bazı şekillerde delgi stabilite kayıplar oluşmasına ve buna bağlı düşük bağ kuvvetlerinin elde edilmesine sebep olabilir. Örnek durumlar Şekil 2.4'te gösterilmiştir.




**Şekil 2.4 :** Delgide karşılaşılabilecek stabilite kayıpları (Ciria, 2005)

Yer altı suyunun sızma etkisine bağlı olarak zemindeki ince malzeme yıkanabilir, yine sızmaya bağlı olarak kohezyonlu birimde yumuşama oluşabilir bu iki durumda delgi stabilitesinin kaybı ile sonuçlanır ve delgide göçme oluşabilir. Böyle durumlarda öngörüşen çivi boyu enjeksiyonlanamaz ve düşük bağ kuvvetleri elde edilir. İri ve kaba çakıllar öngörülen delgi boyuna ulaşılmasını engelleyebilir, sürme çivi uygulalarında ise çivilerde eğilmeye sebep olabilirler. Yine yer altı suyunun sızma hareketi ile enjeksiyon karşılaşılan granüler boşluklara doğru yıkanabilir ve öngörülen bağ kuvvetlerinin elde edilememesine sebep olur. İnce malzeme içermeyen, temiz granüler birimlerde yapılan kazılarda yüzeysel malzeme akması ile karşılaşılabilir.

### 2.4.2 Granüler zeminler

Doğal yollarla oluşmuş granüler birimlerin çoğu zemin çivili duvar uygulamaları için uygundur. Yüksek kesme dayanımı açısına sahiptirler ve oluşan bağ kuvvetleri yüksektir. Granüler birimlerin zemin çivilere tam uygunluğu sağlaması için kısa

dönem stabilitesi sağlamaları gerekmektedir. Gerekli geçici stabilite ince malzemenin varlığı ile oluşan kohezyon ile sağlanır. Görünür kohezyon aynı zamanda daneler arasındaki kapiler çekme ile oluşabilir. İnce malzeme içermeyen granüler birimlerde sadece kapiler çekme kuvvetleri yarma stabilitesini koruma açısından yeterli olmamaktadır.

SPT N sayısı 10'dan küçük ve göreli sıkılıkları %30'dan az olan gevşek, temiz granüler birimler zemin çivili duvar uygulamaları için uygun değildirler. Yeterli süre boyunca yarma stabilitesini sağlayamazlar ve zemin/çivi arayüzünde oluşan bağ kuvveti düşük olur (FHWA, 1998).

#### 2.4.2.1 Granüler zeminlerde uygulanılan zemin çivili duvarlarda karşılaşılan sorunlar

**Geçici stabilite sorunlari**

Görünür kohezyon olmadığı durumlarda muhafazalı delgi yapılması gerekir.

Görünür kohezyon yeraltı suyu ile yok olabilir. Yeraltı su seviyesinin üzerinde bile tünek suyun sızması ile bu olay oluşabilir. İmalat aşamasında zeminin su muhtevesının değişmemesi sağlanmalıdır.

Çok sıkı olmayan üniform boylanmış granüler zeminlerde kazı yüzeyinde bozulma ve akmalar oluşmasına meyillidir. 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.

**Enjeksiyon kaybi**

Temiz kaba granüler birimlerde zemin çivili uygulamasında çivi enjeksiyonlanması esnasında ince malzeme olmaması durumunda enjeksiyonun boşluklarda kaybolmasına sebep olabilir. Bunun önüne geçmek için viskozitesi yüksek enjeksiyon kullanılması mümkündür.

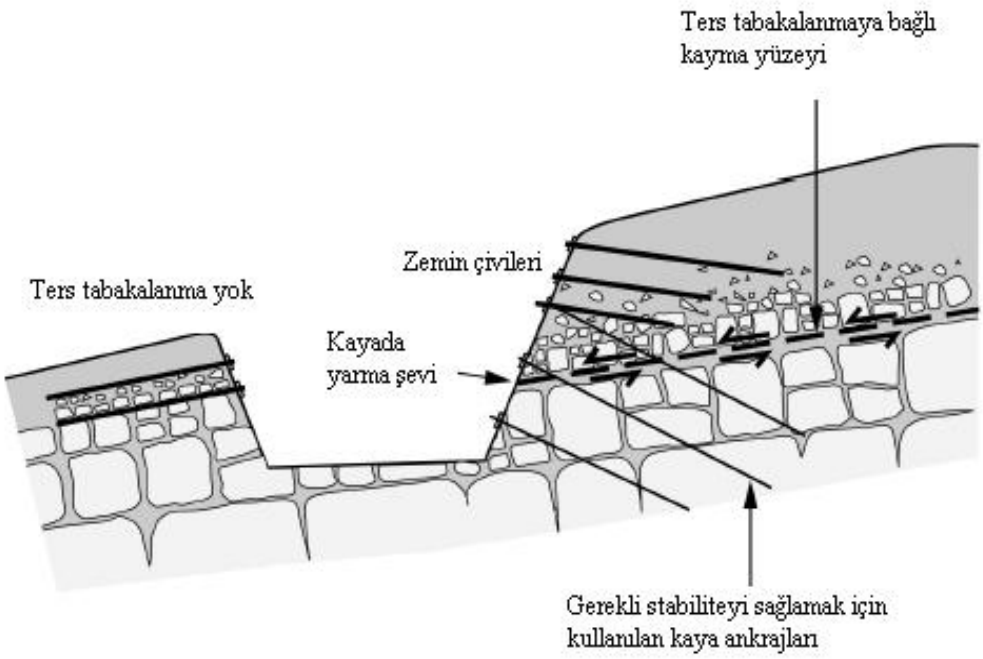
### 2.4.3 Zayıf kayalar

Zayıf ya da ayrışmış kayalar zemin çivili uygulamalar için gerekli uygun koşullara sahiptirler. Uygulamada tabakaların değişen sertliklerine uygun delgi metodu seçilmelidir. Genellikle yüksek bağ kuvvetleri elde edilir.

### 2.4.3.1 Zayıf kayalarda uygulanılan zemin çivili duvarlarda karşılaşılan sorunlar

**Ters tabakalanma**

Tabakalanma yüzeylerinin düşük mukavemetli ince malzeme içermesi durumunda ters tabakalanma ile karşılaşılan ayrışmış kayaçlarda uygulanılan zemin çivili duvarların kısa ve uzun dönemli davranışlarında stabilite sorunları gözlenir. Bu durum Şekil 2.5 ile örneklenmiştir.




**Şekil 2.5 :** Ters tabakalanmaya bağlı stabilite sorunları (Ciria, 2005)

**Ayrışma etkisi**

Aşırı ayrışmış kayalar ve zayıf kayalar ince malzemeye doğru ayrışır ve bunun sonucunda ince malzemelerle aynı avantaj ve dezavantajları gösteririler.

### 2.4.4 Dolgular

Dolgu birimler genellikle derecelenmiş, seçilmiş, yerleştirilmiş ve kontrollü sıkıştırılmış zemin çivili duvarların uygulanması için uygun homojen birimler oluştururlar. Bunlara mühendislik dolgusu adı verilir. Son zamanlarda yapılan arazi ıslahı, otoyol ve demiryolu dolguları mühendislik dolguları tanımına uygundur.

Bunların dışında daha yaygın olarak dolgular zaman içerinde oluşmuş ve depolanmış, özellikleri ve davranışları belirlenmiş kontrolsüz birimlerdir.

Aşağıda sıralanan özelliklerin bir çoğuna sahiptirler;

- Değişiken davranış özellikleri gösteren heterojen birimler
- Yumuşak ve zayıf
- Bozunabilir
- Yeterli sıkıştırma yapılmadığı için gevşek
- Kötü derecelenmiş

Dolgu birimlerin zemin çivili duvarlar ile iyileştirilebilmesi aşağıdakilere bağlıdır;

- Genellikle dolgu malzemesinin kaynağına bağlı olan dolgu malzemesi boyutları ve derecelenmesi
- Dolgunun yaşına, yerleştirilmesine, sıkıştırılmasına ve malzeme bileşenlerine bağlı olarak oluşan sıkılık ve mukavemet özellikleri

#### 2.4.4.1 Dolguların oluşma biçimleri

Dolgular birçok farklı şekilde oluşmuş olabilirler. Tipik dolgu oluşum biçimleri;

- İnşaatlarda kullanılmak üzere taş ocaklarından getirilerek depolanmış ya da inşaat sahalarının temel kazılarından çıkan hafriyat atıklarından oluşan zemin ve kayalardan oluşan doğal dolgular
- Maden atığı malzemelerden ve maden kazılarından çıkan malzemelerden oluşan dolgular
- Kimyasal ve endüstriyel işlemlerin sonucu oluşan atıkların depolanmasından oluşan dolgular
- Şehir merkezinde yeni binaların yapılması için mevcut binaların yıkımı sonucu oluşan malzemenin depolanması ile oluşan dolgular
- Ticari ve evsel atıkların depolanmasından oluşan dolgular

#### 2.4.4.2 Mühendislik dolguları

Mühendislik dolguları seçilmiş dolgu malzemesinin belirli bir yere teknik şartnamelere uygun olarak sıkıştırılarak yayılması ile oluşturulan ve gerekli mühendislik davranışlarını sergileyen zeminleri tanımlamak için kullanılır (Charles ve Watts, 2001). Mühendislik dolguları genellikle taş ocakları gibi doğal kaynaklardan alınan malzemelerle oluşturulur. Kazılardan çıkan malzemelerin de ilgili şartnamelere uygunluğu kontrol edilerek kontrollü dolgu malzemesi olarak

kullanılabilmesi mümkündür. Farklı kullanım amaçları söz konusu olduğunda endüstriyel atıkların ve bina yıkım atıklarının dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesinden bahsedilebilir.

#### 2.4.4.3 Mühendislik dolgularında uygulanılan zemin çivili duvarlarda karşılaşılan sorunlar

Kontrollü sıkıştırılarak imal edilen bir dolgunun zemin çivisi uygulaması için uygunluğu dolgu birimi oluşturan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Doğal granüler bir birimde zemin çivili duvar uygulamasında karşılaşılan avantaj ve dezavantajlar granüler dolgu birim içinde geçerlidir. Aynı şekilde kohezyonlu bir dolgu birim kohezyonlu zeminlerde zemin çivili duvar uygulamalarında karşılaşılan avantaj ve dezavantajları sergileyecektir. Bunlara rağmen kazılıp, farklı bir yere götürüldükten sonra dolgu malzemesi olarak yerleştirip kontrollü sıkıştırılan doğada mevcut duruma kıyasla farklı mühendislik özellikleri gösterecektir.

- Kazı sürecinde kazının yapıldığı alan dar ve kısıtlı olmasına rağmen zemin tabakalandığı birimlerle karışacaktır. Kazı ve kepçe ile taşıma aşamasında zemin örselenecek ve derecelenmede değişiklikler meydana gelecektir.
- Granüler birimlerde kazı görünür kohezyonun yok olmasına ve yeniden serilip sıkıştırıldığında gözlemlenememesine sebep olacaktır. Granüler birimlerde kayaların yeniden yerleştirilip sıkıştırılması işlemi sırasında daha önceki sıkılığın kazanılması sırasında malzeme boyutlarını küçülmesine sebep olacak parçalanma ve ayrışmaların oluşması mümkündür. Bir çok sıkı kum formasyonunun tekrar aynı özellikleri gösterecek şekilde sıkıştırılması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple doğal zemin için tahmin edilen bağ kuvvetlerinin bu birimlerin taşınıp tekrar sıkıştırılmalarıyla oluşturulan dolgularda oluşmasını beklemek gerçekçi olmamaktadır. Güvenli desteksiz kazı yüksekliği ve kazının kendini tutabileceği süreler orijinal birime göre daha düşük olmaktadır.
- Kohezyonlu birimler öbekler ve parçalar halinde kazılır. Yerleştirilir ve sıkıştırılırken kil öbekleri deforme olur, yeniden yoğrulmanın sonucu ile kil malzeme zayıflar. Genellikle öbekler arasında boşluklar kalır. Bu boşluklar bazı ince malzemenin yardımı ile kısmen dolsa bile tamamın bu durum gözlenemez. Bu boşluklar düşün bağ kuvvetlerinin gözlenmesine sebep olur. Ayrıca bu boşluklara doğru enjeksiyon kaybı oluşur.

- Dolgu birimin homojenliği yerleştirme ve sıkıştırma aşamasındaki imalatın kalitesine bağlıdır. Saha uygulamalarında beklenenden çok daha farklı sıkılık derecelerinin elde edildiği görülmüştür. Bu durum uyguluma esnasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biridir.

Dolgu birimler malzeme kaynaklarından bağımsız olarak oluşturuldukları bölgelerde değerlendirilmeli ve sahip oldukları mühendislik özellikleri tekrar belirlenmelidir.

#### 2.4.4.4 Tarihi dolgular

Dolguların davranış ve mühendislik özelliklerinde oluşturulma zamanları da belirleyicidir. Eski dolguların tasarım ve imalat teknikleri mevcut yöntemlerden oldukça farklıdır. Bir otoyol veya demiryolu için mühendislik sorunlarına karşı çözüm için inşa edilmiş dolgular güncel yöntemlere göre seçilmemiş, yerleştirilmemiş ve sıkıştırılmamış olabilirler. Eski dönemlerde imal edilen bir çok dolguda kül ve doğal kaynaklardan elde edilen malzeme kamyonlardan kontrolsüzce dökülerek imal ediliyordu. Bu durum gevşek ve eksik derecelenmiş dolguların oluşmasına sebep olmaktadır. 19.yy'ın başlarında imal edilen demiryollarına yönelik toprak işlerinde kullanılan inşaat yöntemleri ve bu imalatların içerdiği sorunlarla ilgili Skempton 1996 yılında bir araştırma yayınlamıştır. Bu gibi mevcut dolgu şevlerinin birçoğunda iyileştirme amaçlı ya da geçici destek anlamında zemin çivili duvar uygulaması yapılmıştır (Pedley, 2000). Yine de temel olarak mevcut dolguların zemin çivili duvar uygulamasına uygunluğu dolgu malzemesinin özelliklerine bağlı olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca zemin çivili duvarların daha rijit fore kazıklı sistemlerle karşılaştırıldığında uzun dönem kabul edilebilir deformasyon davranışı tasarım şartlarına bağlıdır.

Örnek olarak bir çok eski demiryolu dolgusu yüksek plastisiteli aşırı konsolide killerden yapılmıştır. Zaman içinde oluşan bitki örtüsü ile mevsimsel yağışlardan çok daha fazla etkilenen dolgu birimde büyük deformasyonlara sebep olan rötre/şişme davranışı gözlenmektedir. Bu gibi yüksek plastisiteli killerden kurulu şevlerde zemin çivili duvar tasarımı detaylı özen gösterilmesini gerektirir, kimi koşullarda zemin çivili duvar uygulaması uygun olmayabilir ve farklı yöntemler araştırılmalıdır.

#### 2.4.4.5 Kontrolsüz dolgular

Kontrolsüz dolgular herhangi bir mühendislik uygulaması olmaksızın yerleştirilmiş dolgular olarak tanımlanır (Charles ve Watts, 2001). Kontrolsüz dolgular genellikle

sıkıştırılmamış, gevşek ve çoğunlukla karışık atık malzemeden oluşurlar. Çoğunlukla kamyonlarla gelişi güzel serildikleri için kalınlıkları bölgesel olarak belirgin farklılıklar gösterir. Bu değişkenlik genel olarak kontrolsüz dolguları zemin çivili duvar uygulaması için uygun olmayan zeminler haline getirir. Hong – Kong'da gevşek dolgu şevlerinin zemin çivili duvar uygulamaları ile stabilize edilmelerine dair uygulamalar mevcuttur (Hong – Kong Institution of Engineers, 2003). Bu çalışmalarda muhafazakar, güvenli tarafta kalan zemin tasarım parametreleri uygulanmıştır. Şevin aşağı doğru hareketine karşı tüm şev zemininin güçlendirilmesi amacı ile çivi kafalarının sağlam bir şekilde sabitlendiği bir donatı ve birlikte çalışan bir kaplama sistemi kullanılmalıdır.

Kontrolsüz dolguların genel çeşitleri açık maden ocağı dolguları, kömür madeni hafriyat atıkları, öğütülmüş yakıt külü depoları, endüstriyel ve kimyasal atıklar, bina molozları, ticari ve evsel atık depolarıdır. Bu birimlerin özellikleri ve zemin çivili duvar uygulaması için uygunlukları aşağıda her birim için açıklanmıştır.

Açık maden ocağı dolguları genellikle maden çalışmalarından kalan doğal malzeme ve bazen dışarıdan getirilen malzemelerin karışımından oluşur. Çoğunlukla kontrollü biçimde sıkıştırılmadığı için değişken sıkılıktadır. Dolgunun gevşek olduğu bölgelerde geçici yarma şevlerinin stabilite sorunları ile karşılaşılacaktır. Değişken malzeme derecelenmesi ve sıkılığına bağlı olarak bağ kuvvetlerinde de değişkenlik gözlenecektir. Yer altı suyunun yükselmesi durumunda göçme oturmasının oluşması beklenir. Kaba malzemenin delgi veya çivi sürme sırasında sorun yaratması olasıdır.

Kömür madeni hafriyat atıkları kömür yakını çevresinde kazılan Karbonifer yaşlı çamurtaşı, silttaşı ve kumtaşlarından oluşur. Depolanmaları belirli bölgelerden düzensiz şekilde kamyondan boşaltılarak olur. Dolgunun gevşek olduğu bölgelerde geçici yarma şevlerinin stabilite sorunları ile karşılaşılacaktır. Değişken malzeme derecelenmesi ve sıkılığına bağlı olarak bağ kuvvetlerinde de değişkenlik gözlenecektir. Yer altı suyunun yükselmesi durumunda göçme oturmasının oluşması beklenir. Kaba malzemenin delgi veya çivi sürme sırasında sorun yaratması olasıdır. Zeminin agrasifliğine bağlı olarak sülfat atak ve oksidasyon riski mevcuttur. Dolgu birimin tamamında patlama riski değerlendirilmelidir.

Yakılarak öğütülmüş kömür atık ürünleri üniform boylanmış kaba silt ve ince kumlardan oluşur. Yüksek oranda metal oksitler içerir. Genellikle yol imalatlarında

düşük ağırlıklı dolgu malzemesi olarak kullanılır. Bu sırada su muhtevasının kontrol edilmesi önemlidir. Kısa dönem yarma şevlerinin stabilitesi zeminin su muhtevasına bağlıdır. Donmaya karşı duyarlıdır, donmaya dayanıklı kaplama kullanılmadığı durumlarda ayrışma davranışı sergiler. İçerdiği toksik izleri ve toz güvenlik açısından risk yaratmaktadır.

Endüstriyel ve kimyasal atıklar geniş bir malzeme çeşitliliği ve özellikleri tanımlamaktadır. Kum temel için kullanılabilecek sert ve kaba malzemelerden, ince siltlere kadar bir çok malzeme çeşiti bu gruba dahil olabilir. Dolgunun zemin çivisi uygulamasına uygunluğu temel olarak malzemeye bağlıdır. Dolgunun gevşek olduğu bölgelerde geçici yarma şevlerinin stabilite sorunları ile karşılaşılacaktır. Değişken malzeme derecelenmesi ve sıkılığına bağlı olarak bağ kuvvetlerinde de değişkenlik gözlenecektir. Yer altı suyunun yükselmesi durumunda göçme oturmasının oluşması beklenir. Kaba malzemenin delgi veya çivi sürme sırasında sorun yaratması olasıdır. Zeminin agrasifliğine bağlı olarak sülfat atak ve oksidasyon riski mevcuttur. İçerdiği toksik malzemeler sağlık ve güvenlik açısından risk oluşturmaktadır.

Bina molozları ve hafriyat atıkları binaların yıkımından oluşan beton ve tuğla parçalarından oluşur. Kontrolsüz depolanırlar. Tahta parçaları, tekstil ürünleri, plastik malzemeler, metal donatılar, kablo ve daha büyük parçalar içerebilirler. Dolgunun gevşek olduğu bölgelerde geçici yarma şevlerinin stabilite sorunları ile karşılaşılacaktır. Değişken malzeme derecelenmesi ve sıkılığına bağlı olarak bağ kuvvetlerinde de değişkenlik gözlenecektir. Malzemelerin parçalanmasına bağlı olarak oturmalar gözlenebilir. Kaba malzemenin delgi veya çivi sürme sırasında sorun yaratması olasıdır.

Ticari ve evsel atıklar aralarında büyük boşluklar olan parçalanabilir organik malzemeler, kağıt ve plastik parçaları içeren dolgular oluştururlar. Dolgunun gevşek olduğu bölgelerde geçici yarma şevlerinin stabilite sorunları ile karşılaşılacaktır. Değişken malzeme derecelenmesi ve sıkılığına bağlı olarak bağ kuvvetlerinde de değişkenlik gözlenecektir. Yer altı suyunun yükselmesi durumunda göçme oturmasının oluşması beklenir. Parçalanabilir malzemelere bağlı olarak oturmalar oluşabilir. Esnek ve kaba malzemelerin delgi veya çivi sürme sırasında sorun yaratması olasıdır. Zemin koşulları yüksek ihtimalle agresif özellik gösterecektir (Ciria, 2005).

## 2.5 Zemin Çivili Duvar Elemanları

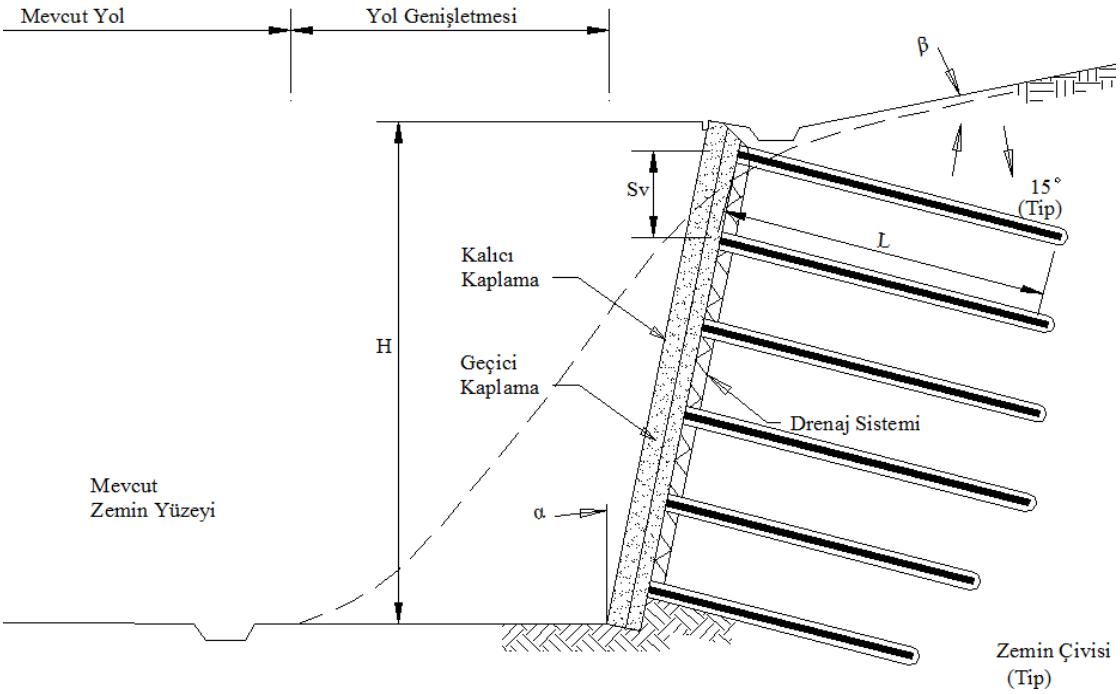
Uygulamada farklı sistemlerle karşılaşılsa da en yaygın imalat şekli delme – enjeksiyonlama yöntemidir. Bu yöntem önceden delinen zemine çelik donatının yerleştirilmesi ve daha sonra enjeksiyonlanmasından oluşmaktadır. Delme – enjeksiyonlama yöntemi ile imal edilen zemin çivili duvarlara ait tipik kesit Şekil 2.6'da verilmiştir. Zemin çivili duvarları oluşturan elemanlar temel olarak zemin çivileri, drenaj sistemi ve kaplamadır. Zemin çivileri ise Şekil 2.7'de görüldüğü gibi çelik donatı, enjeksiyon, çivi kafası, somun, sızdırmazlık contası, çivi başlığı, merkezleyici ve kalıcı zemin çivili durvar uygulamalarında kullanılan korozyon önleyici kılıflardan oluşmaktadır.

### 2.5.1 Çivi donatilari

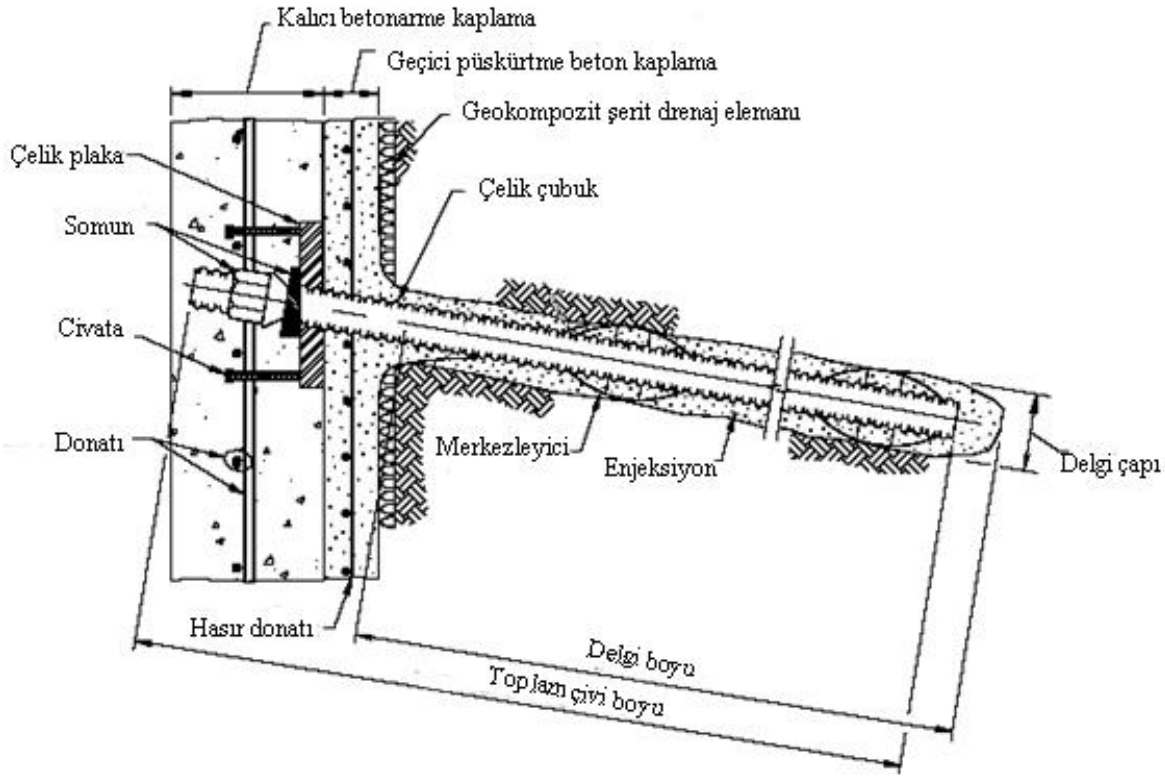
Zemin çivili duvar sistemlerinin ana birleşenleri önceden delinmiş zemine yerleştirilerek yerinde enjeksiyonlanan çelik donatılardır. Alt seviylerdeki kazı işlemleri sırasında oluşan deformasyon sebebiyle oluşan çekme gerilmesi çivilere pasif olarak aktarılır (FHWA, 2003).

### 2.5.2 Çivi başliği

Çivi başlığı zemin çivisinin duvar kaplamasından dışarı çıkan kısmıdır. Çivi başlığı iki kısımdan oluşmaktadır, başlık plakası, somun ve sızdırmazlık contası; ve saplama. Bu bölümler Şekil 2.7'de görülmektedir. Başlık plakasının amacı çivi sonundaki kuvvetin geçici püskürtme betonu kaplamaya ve kaplamanın arkasındaki zemine yayılmasını sağlamaktır (Porterfield ve diğ., 1994).




**Şekil 2.6 :** Zemin çivili duvarlara ait tipik kesit (FHWA, 2003)




**Şekil 2.7 :** Zemin çivisine ait detaylı kesit (Porterfield ve diğ., 1994)

### 2.5.3 Enjeksiyon

Delinmiş zemine çivi yerleştirildikten sonra enjeksiyonlama yapılır. Enjeksiyon zemindeki gerilmeyi çiviye aktarma işini görür. Enjeksiyon aynı zamanda çiviyi

korozyona karşı koruma görevide görür. Zemin çivilerinde kullanılan enjeksiyon malzemesi genellikle çivi ve çevre zemini dolduracak saf çimento şerbeti şeklindedir. Enjeksiyon özellikleri enjeksiyon – zemin arası etkileşimle toplam bağ kuvvetinde belirleyicidir. Zeminde göçme olmaması için delme işleminden kısa bir süre sonra zemin çivileri yerleştirilmeli enjeksiyonlama işlemi yapılmalıdır. Enjeksiyon delik ve çivi arasında boşluk kalmaması için kesintisiz yapılmalıdır (FHWA, 2003).

### 2.5.4 Merkezleyiciler

PVC'den yapılan merkezleyiciler genellikle 2,50 m'den fazla olmayan aralıklarla başlangıç ve son uçtan 0,50 m uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilirler (FHWA, 2003).

### 2.5.5 Yüzey kaplamaları

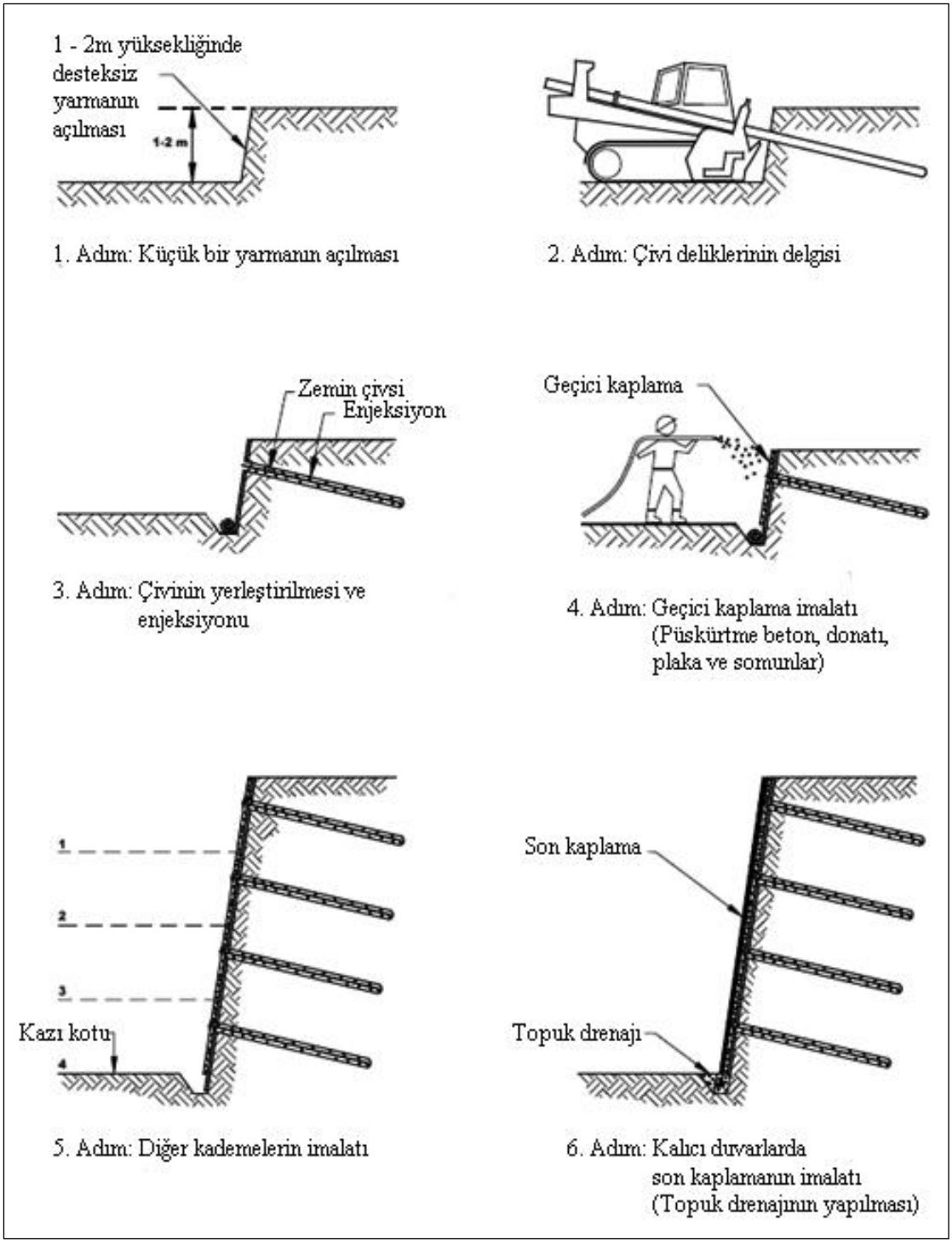
Kaplamanın ana görevi zemin çivilerinin arasındaki zeminin duraylılığını sağlamaktır. Aynı zamanda erozyona karşı koruma sağlanmış olur. Üç çeşit yüzey kaplaması mevcuttur: yumuşak kaplamalar, esnek kaplamalar ve sert yapısal kaplamalar (FHWA, 2003).

### 2.5.6 Drenaj Sistemi

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

## 2.6 İnşaat Adımları

Zemin çivili duvarların inşaatında en çok karşılaşılan yöntem delme enjeksiyonlama yöntemidir. Şekil 2.8'de bu yöntem şematik olarak gösterilmiştir.




**Şekil 2.8 :** Çivili duvarların inşaat adımları (FHWA, 2003)

### 2.6.1 Kazı kademesi

İnşaat boyunca yüzey sularının inşaata zarar vermeden kontrolünün sağlanması ve uzaklaştırılması için toplama hendekleri açılmalıdır.

İlk kazı kademesi birinci sıra çivinin biraz altında seçilir. Bu derinlik zeminin kendini 24 – 48 saat arasında tutabilme yeteneğine bağlıdır, yaklaşık olarak 1 m – 2

m kabul edilir. Duraylılık sorunları daha çok bozulmuş ve örselenmiş malzemenin bulunduğu yüzeye yakın kazı kademelerinde gözlenir, bu gibi durumlarda duraylılığın sağlanması için zemin yüzeyine püskürtme beton uygulaması seçilebilir. 10 m genişliğindeki bir platform delgi aygıtının yerleşerek çalışabilmesi için yeterlidir.

### 2.6.2 Deliklerin açılması

Tasarımda belirlenen yerlere, belirlenen uzunluk ve eğimde zemine uygun delme yöntemi kullanılarak çivi delikleri açılır. Duraylılığı yüksek zeminlerde döner veya basınçlı hava ve kuru burgu kullanılarak döner – kırma aletleriyle kılıfsız delgiler uygulanabilir. Duraylılık sorunu yaşanan bölgelerde tekil ince borulu, su/hava akım ile çift yönde döner aletler veya içi boş boru şeklindeki burgular kullanılarak kılıflı delgilerin uygulanması tercih edilir.

### 2.6.3 Çivilerin yerleştirilmesi ve enjeksiyonu

Çivinin delik içinde yerleştirilmesinde merkezleyiciler kullanılır. Çivilerin içi boş burgularla yerleştirildiği durumlarda çökme değeri 200 mm'den az olan enjeksiyon karışımı çivinin yere çökmesini engellemek için kullanılır. Çivilerin genel çapı 19 – 35 mm ve akma dayanımı 420 – 500 N/mm² arasında değişen çelikten oluşmaktadır. Enjeksiyonda kullanılan çimento şerbeti su/çimento oranı (w/c) 0,4 – 0,5 kullanılır. Enjeksiyon yerçekimi veya aşağıdan yukarı doğru düşük basınç yardımıyla gerçekleştirilir.

## 2.7 Zemin Çivili Duvarların Davranışları

### 2.7.1 Zemin çivili sistemler

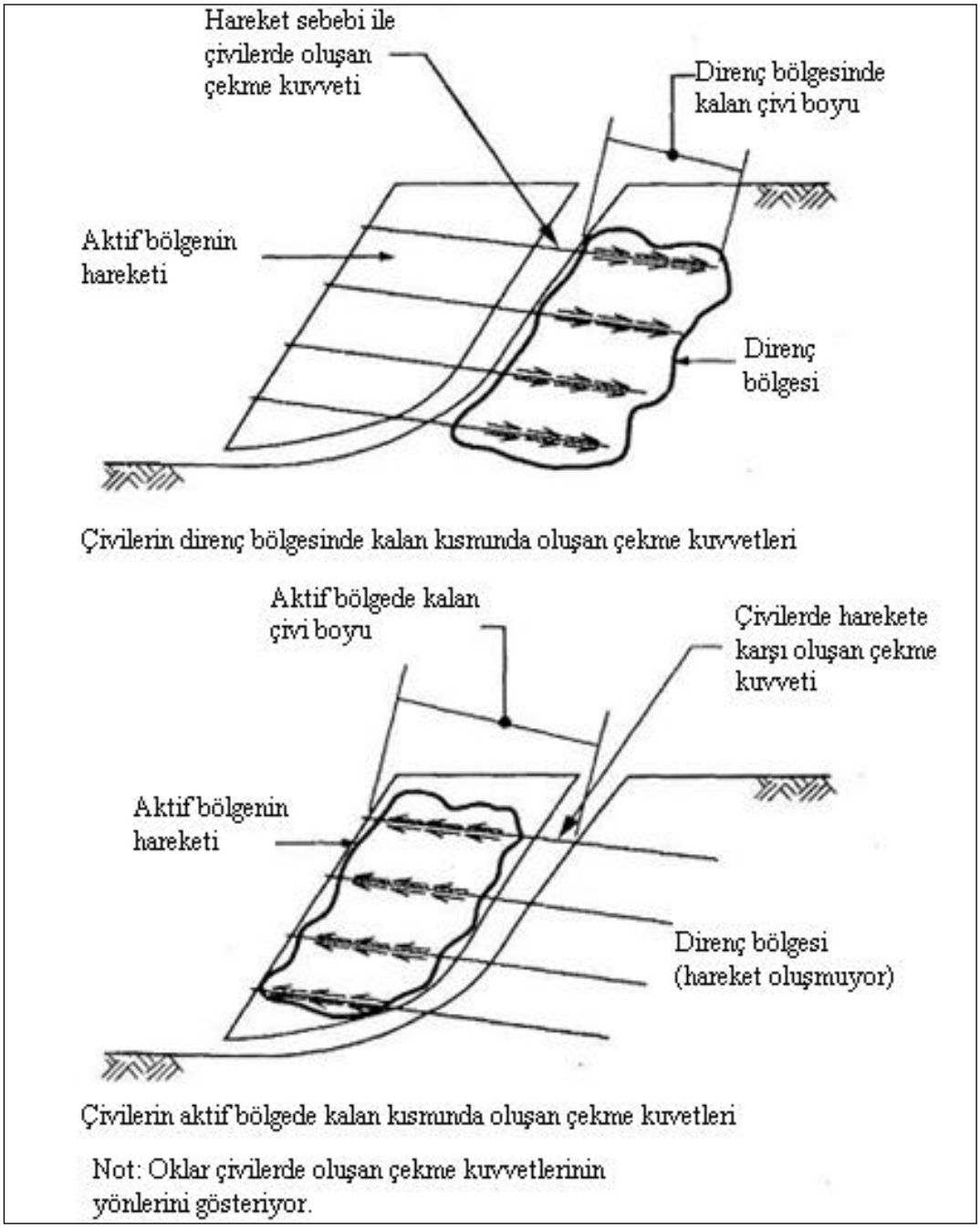
Zemin çivisi yöntemi toprak itkisi ve sürşarj gibi dış yüklere ve çivi yükleri gibi iç yüklere karşı zeminin güçlendirilmesiyle blok dayanımı sağlanmasıdır.

Zemin/çivi ara yüzeyinde mobilize olan kayma dayanımı ile stabilite sağlanır. Denge bozucu kuvvetlere karşı direnç kuvvetlerinin mobilize oluşu ile denge sağlanması sebebiyle zemin çivileri genel olarak pasif olarak adlandırılır (Phear ve diğ., 2005).

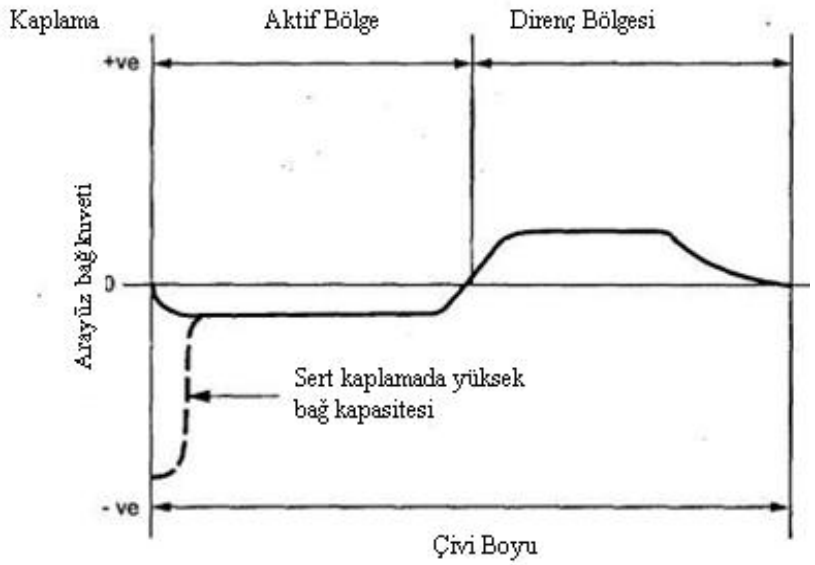
Zemin çivili duvar sistemlerinin iç stabiliteleri potansiyel kayma dairesi ile ayrılmış iki bölüm halinde incelenir. Bu durum Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Potansiyel kayma dairesinin dışlında kalan kısım pasif bölge olarak adlandırılır ve donatının

sıyrılmasına karşı koyar. Kaplama ile potansiyel kayma dairesi arasında kalan kısım ise aktif bölge olarak adlandırılır. Arayüzde oluşan bağ kuvvetinin yönü aktif ve pasif bölgelerde farklıdır. Bu durum Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

İç stabiliteye bağlı göçme aktif ya da pasif zonlarda üç şekilde olabilir; zemin çivisi çekme kapasitesine ulaşır ya da bazı olası durumlarda çekme ve eğilme kapasitesine ulaşır ve kopar, enjeksiyon/çivi arayüzünde bağ kapasitesine ulaşılır veya çivi/zemin arayüzünde bağ kapasitesine ulaşılır.




**Şekil 2.9 :** Zemin çivili şevin şematik gösterimi (Barley et al., 1997)




**Şekil 2.10 :** Zemin çivi arayüzündeki bağ kuvvetinin olası dağılımı (Barley ve diğ., 1997)

### 2.7.2 Zemin Çivisinde Yüklerin Oluşması

Zemin çivisinde yük oluşmasını sağlamak için şev yüzünün hareket etmesi gereklidir. Bu hareketin oluşmasını sağlayacak durumlar kazı ile imal edilmiş duvarlar ya da şevler ve mevcut şevlerin stabilitesinin sağlanaması durumları için aşağıda açıklanmıştır. Bu iki durum arasındaki temel farklılık zemin çivilerinin yük alması durumudur (Phear ve diğl., 2005).

Kazı ile imal edilen dik şevler ve duvarlarda zemin çivileri kazı aşamalarının imalatı süresinde yük alırlar

Mevcut şevlerin zemin çivileri kullanılarak stabilize edilirken herhangi hareket olmaması durumunda zemin çivileri yük almayacaktır. Zemin çivilerinin yük alması için gerekli hareketin oluşması uzun zaman alabilir ya da hiç gerçekleşmeyebilir.

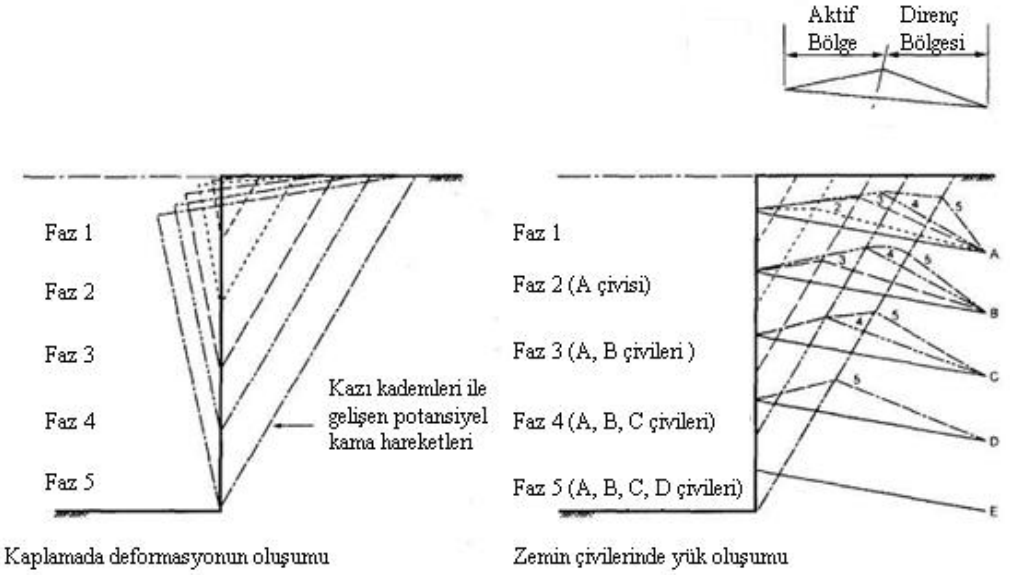
Zemin çivili duvarların imalatı aşamalı inşaat ve takip eden kazı işleri ile gerçekleşir. İnşaat süreci boyunca zemin – çivi arayüzünde oluşan bağ kuvveti dağılımı değişir ve kaplamada deformasyonlar oluşur. Bu durum Şekil 2.11'de gösterilmiştir.

İlk çivi sırasının imalatı sonrasında şevde çok küçük yatay ve düşey bir hareket meydana geleceği için oluşan aktif zon kısıtlı kalacak ve zemin çivisi neredeyse hiç yük almayacaktır. İkinci kademe kazısı ile şevde deformasyon meydana gelecek ve aktif zon genişleyecektir. Bu hareket ile sadece çivinin son ucunda gerilme meydana gelecektir. Aktif zonun bu başlangıç konumunda gerilmenin çivi boyunca oldukça

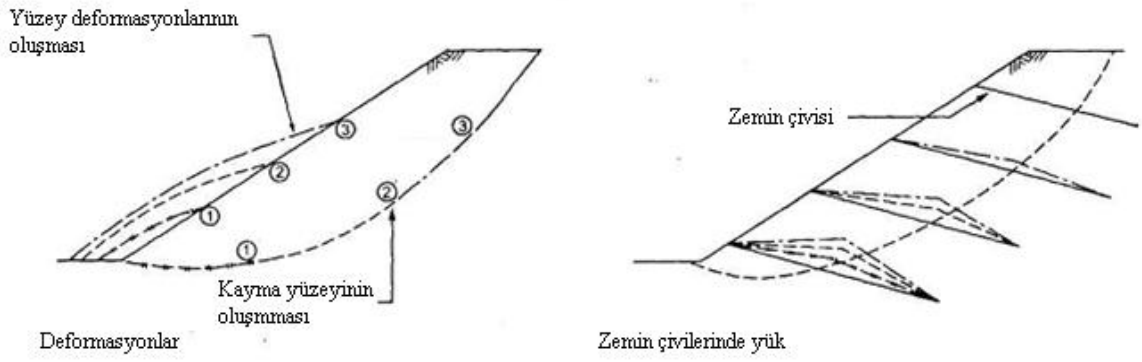
düzgün yayılması beklenmektedir (Barley ve diğ., 1997). Kazı devam ettikçe, aktif zon genişleyecek, deformasyon artacak ve gerilme daya büyük bir toprak hacmine etkiyecektir.

Çalışan zemin çivilerinde gerilme dağılımı bir çok laboratuar ölçekli santrifüj deneyinde ve arazi deneylerinde araştırılmıştır (Gassier ve Gudehus, 1981 ve Davies ve diğ., 1997).

Zemin çivisi ile stabilize edilmiş mevcut şevlerde zemin/çivi arayüzünde oluşan bağ kuvveti dağılımı sadece şev yüzünde deformasyon meydana gelmesi ve zeminde gerilme oluşması durumunda oluşur. Bu durum Şekil 2.11'de gösterilmiştir.




**Şekil 2.11 :** Dik bir şevin inşaatı süresince kazı aşamalarında zemin çivilerinde oluşan çekme kuvvetleri ve deformasyonun gelişimi (Pedley ve diğ., 1990)




**Şekil 2.12 :** Zemin çivisi ile güçlendirilmiş mevcut şevlerde deformasyon oluşumu ve yüklerin mobilize olması (Phear ve diğ., 2005)

Herhangi bir çivi boyunca maksimum çivi yükü genellikle orta noktada oluşur. Bu nokta herhangi bir duvar geometrisi için duvardaki çivinin yerine bağlı olarak değişir. Şevin düşeyle yaptığı açının küçük olduğu ve şev arkası yatay olan duvarlarda maksimum gerilme çizgisinin eğrisel olduğu ve duvar arkasında duvar yüksekliğinin %30 – %35'i uzaklıkta zemin yüzeyi ile kesiştiği kabul edilir. Çivi boylarının duvar yüksekliğinin %70 – %100'ü oranında seçildiği kabul edilirse zemin çivili duvarın üst bölgesinde yer alan zemin çivilerinde maksimum gerilmenin çivi ortasına yakın bir yerde oluştuğu söylenebilir. Alt bölgedeki zemin çivilerinde ise zemin özellikleri temel zemini özelliklerine yaklaştığı ve zeminin şekil değiştirdiği bölge kazı yüzeyine yaklaştığı için maksimum gerilmenin oluştuğu bölgenin çivi üzerinde duvar yüzüne doğru yaklştığı kabul edilir. Kaplama yüzündeki gerilme çoğunlukla maksimum çivi gerilmesinden azdır. Ayrıca çivi kafası yükünün maksimum çivi yüküne oranı kazı işlemi sürdükçe ve çiviler yerleştirildikçe azalma eğilimine girer. Çivi gerilmeleri ise kazı işlemi sürdükçe ve çiviler yerleştirildikçe yavaş yavaş artar. İnşaat aşamalarında yapılan gözlemler çivi gerilmelerinin büyük bölümünün ilk üç kazı adımı ve bunu izleyen zemin çivisi yerleştirme işlerinin ardından oluştuğunu göstermektedir. Duvarın alt kısmında bulunan çiviler için çivi gerilmesini mobilize edecek kayma kuvvetlerini (zemin – çivi ara kesitinde) oluşturacak zemin şekil değiştirmesi yetersi kalacaktır. Bu durumun sonucunda duvarın alt kısmında yer alan çiviler duvarın tamamlanmasıyla birlikte daha az yüklenmiş olacaktır (FHWA, 1998).

### 2.7.3 Eğilme ve kesme dayanimi

Zemin çivilerinin çekme dayanımının yanı sıra eğilme ve kesme dayanımıda mevcuttur. Birçok zeminde kesme dayanımının mobilize olması kesit özelliklerine bağlıdır, ve büyük deformasyonlar gerektirir. Servis durumunda meydana gelmesi beklenmemektir (Clouterre, 1991 ve FHWA, 1998). Zemin çivilerinin yatayla 5°-20° açı yapacak şekilde yerleştirildiği tipik zemin çivili duvarlar ve şevlerde pratik açıdan zemin çivilerinde oluşacak eğilme ve kesme kuvvetleri ihmal edilebilir (Pedley ve diğl., 1990).

Zemin çivilerinin 20°'den yatık açı ile yerleştirilmesi durumunda potansiyel kayma düzlemini neredeyse dik açı ile kesecek ve bu durum eğilme kuvvetinin mobilize

olmasına sebep olacaktır (Jewell ve Pedley, 1992). Fakat limit durumda dahi çekme dayanımı baskın olacaktır, eğilme/kesme dayanımı ikinci derecede etkin olacaktır.

Yaklaşık 0,1 m kalınlığında püskürtme betondan oluşan kaplamaların kullanıldığı zemin çivili uygulamalarda, çiviler kaplamanın kendi ağırlığını kaplama – zemin – çivi kesiti arasındaki bir sürtünme ve mukavemet birlikteliğiyle tekil çivilerin çevresindeki zemine karşı destekleyebilir. Fakat daha kalın kaplamaların tercih edildiği uygulamalarda (kalıcı zemin çivili duvarlar) ve daha olumsuz zemin koşullarında kaplamanın kendi ağırlığının duvarda aşağı ve dışarı doğru bir hareket oluşmadan karşılanması olanaksızdır. Bu gibi durumlarda destek çivisi veya zemin dikişi kullanılarak ek düşey destek sağlanabilir. Destek çivileri kısa boyda ve yatayla büyük açı yapan çivilerdir ve ana çivilerin aralarına yerleştirilirler. Zemin dikişi ise düşeyde yerleştirilen ek çiviler olup kaplamanın kayma ve eğilme mukavemetine destek sağlar (FHWA, 1998).

### 2.7.4 Kaplama

Mevcut şevlerin stabilize edilmesi ya da yeni bir şev ya da duvar imalatı durumlarında zemin çivileri zemin yüzeyini stabilize etmez. Zemin yüzeyinin stabilize edilmesi kaplama ve/veya çivi başlıkları ile olur. Kaplama sert, esnek ya da yumuşak olabilir. İçsel göçme sistemi kaplama kuvveti, şev açısı ve/veya mevcut göçme sistemlerine bağlıdır (Phear ve diğl., 2005). Bağ kuvvetlerinin çivi boyunca oluşması sırasında, kaplamanın çeşidi ve rijitliğine bağlı olarak kaplama tarafından taşınan gerilme belirlenir. Kaplama tasarımı servis yükü altında oluşan kaplama yükünün büyüklüğü, dayanma yapısı ve son kaplama dayanımına bağlıdır

Kazı devam ederken oluşan yanal deformasyonlar sonucu zemin – kaplama ara kesitinde toprak basıncı oluşur. Zemin – kaplama ara yüzeyinde oluşan toprak basıncı çivi kafasında kendine eşit miktarda ancak zıt yönde oluşan gerilmeler tarafından dengelenir. Çivi kafasında oluşan gerilme yükünün büyüklüğü çivinin yerleştirilme zamanına, zeminin sıkılık özelliklerine, çivinin gerilme dayanımına, zemin – çivi ara kesitinin rijitliğine, çivi enjeksiyonu – zemin ara kesitinin rijitliğine ve de kaplamanın rijitliğine bağlıdır (FHWA, 1998).

Zemin çivili duvarların teknik açıdan en önemli avantajı yüzey kaplamasının diğer sistemlere göre daha basit olmasıdır. İnşaat aşamalarında düşünüldüğünde kaplamanın imalatından önce donatı – zemin ilişkisi kurulması sebebiyle ankrajlı

veya geleneksel iksa yapılarına oranla daha düşük kaplama gerilmeleri oluşur (FHWA, 1998).

Günümüzde kaplamaya gelen yükün büyüklüğü hakkında çivinin kendisinde oluşan yük hakkındaki bilgiler kadar bilgi edinilememiştir. Bunun temel sebebi saha gözlemlerinden elde edilen verilerdeki kalitenin yetersizliğidir. Çivi kafasaına gelen yükünün bulunmasında en güvenilir yöntem yük hücresi kullanmaktır (FHWA, 1998).

### 2.7.5 Deformasyon

Zemin çivili şevin deformasyonu sadece zemin çivilerinin boyları ve aralıklarına bağlı değildir, aynı zamanda inşaat aşamalarına bağlıdır. Şev kazılarında uygulanan sert kaplamalarda maksimum deformasyonun duvarın en üst kısmında olması beklenmektedir. Mevcut şevlerin iyileştirilmesi durumunda ya da yumuşak ya da esnek kaplama ile imal edilmiş şev ve duvarlarda maksimum deformasyonun şev topuğunda oluşması beklenmektedir. Zeminin jeolojik özellikleri ve mukavemeti, şev açısı, çivilerin yatayla yaptığı açı, çivi boyları ve aralıkları zemin çivili şevlerin ve duvarların deformasyon özelliklerini belirleyen temel özelliklerdir.

### 2.7.6 Limit denge analizi ile tasarim

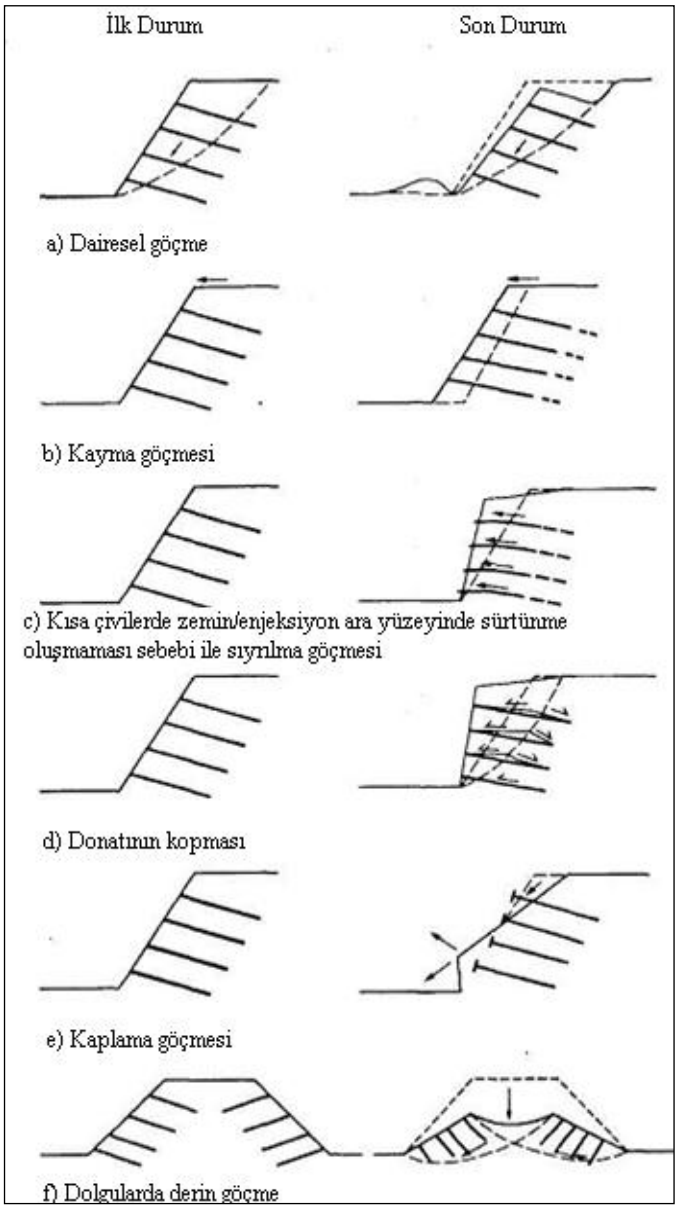
Zemin çivili bir şev ya da duvar performans kriterlerini karşılayamadığı durumda limit denge durumuna ulaştığı kabul edilir. Bir çok dayanım sınır durumu ve servis sınır durumu tasarım aşamasında düşünülür ve bunların oluşması önlenir. Zemin çivili duvar ve şevlerin deformasyonlarını tasarım aşamasında belirlemek güç olmaktadır. Yeterli güvenlik faktörlerinin uygulandığı durumda ve uygun imalat yapılması durumunda deformasyonların güvenli sınırlar içerisinde kalacaktır (Phear ve diğ., 2005).

#### 2.7.6.1 Dayanım sınır durumu

Dayanım sınır durumu zemin çivili sistemde ya da sistemin temel elemanlarında göçme oluşabilmesi durumu olarak açıklanabilir. 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 sünekliğe sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Zemin çivili şev ve duvarlar için dayanım sınır durumunun gösterildiği durum Şekil 2.13'de verilmiştir. Her kademede dış stabilite kayıpları dönme, kayma ve temel taşıma gücü göçmeleridir. İç stabilite kayıpları zemin/çivi arayüzünde sıyrılma oluşması, zemin çivisinin kopması, kaplamanın devrilmesi, kaplamada eğilme yada zımbalama oluşması, çivi başlık plakalarında zımbalama ve taşıma gücü göçmeleridir.

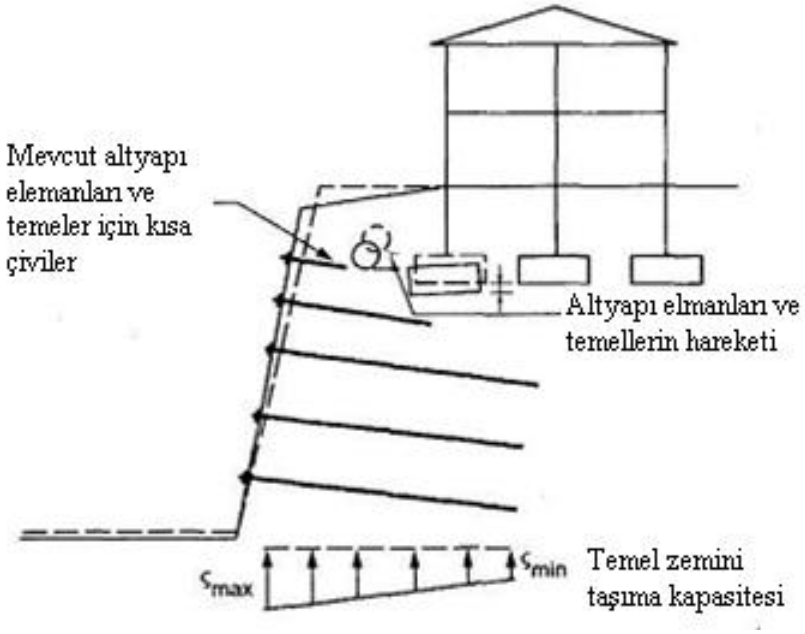



**Şekil 2.13 :** Zemin çivili duvarlar için dayanım sınır durumunun şematik gösterimi (Phear ve diğ., 2005)

### 2.7.6.2 Servis sınır durumu

Zemin çivili şev ya da duvarda meydana gelen aşırı deformasyon sonucu sistemin servis durumunda oluşan kayıplara denir. Ayrıca iksa sistemi ile desteklenen diğer

yapıların durumu değerlendirilmelidir. Tasarım süresi servis koşullarının karşılandığı zaman aralığıdır. Genel servis sınır durumları Şekil 2.14'de gösterilmiştir. Aşırı gerilme veya deformasyon sonucu kaplamada meydana gelen çatlamalar gibi görsel sorunlara sebep olabilir. Ayrıca şev üzerinde yada altında toplam ya da farklı oturmalara sebep olarak çevre binaların yada altyapıların servis durumunu etkileyecek öngörülemez sorunlara sebep olabilir.




**Şekil 2.14 :** Zemin çivili durumlarda servis sınır durumunun şematik gösterimi (Phear ve diğ., 2005)

### 2.7.7 Genel gereklilikler ve güvenlik katsayilari

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 toplamıdır. Karşı koyan kuvvetlerin mobilize olması için gerekli hareket genellikle dikkate alınmaz. Bu yaklaşım basit güvenlik katsayısı tanımına dayanır ve karşı koyan kuvvet ya da momentlerin yayılı kuvvet ya da momentlere oranı olarak tanımlanır.

## 2.8 Zemin Çivili Duvarların Tasarım Esasları

### 2.8.1 Giriş

FHWA – Zemin çivili duvar tasarım yöntemi tam ve gerçekçi bir yaklaşım sağlamaktadır (FHWA, 1998). Bu yöntemin esasları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kayma yüzeyi sınırlı denge kavramına dayanmaktadır.
- Çivinin donatı etkisi, çivi kafasının kaplamayla bağlantısı, tendonun kendi dayanımı ve zemin – enjeksiyon ara kesitinde sıyrılma direnci dikkate alınmaktadır.
- Esnek veya rijit, kalıcı veya geçici shotcrete veya beton kaplamalar için kaplama ve kaplama – çivi bağlantı sistemininde oluşan nominal gerilmesinin belirlenmesinde gerçekçi bir yaklaşım oluşturur.
- Kaplama ve çivi kafası tasarım sistemlerinde kullanılan toprak basıncı hesapları mevcut yapıların gözlemi ve zemin – yapı arasındaki etkileşime dayanmaktadır.
- "Servis Yükü Tasarımı" (SLD) ve "Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı" (LFRD) olarak iki ayrı tasarım yöntemi mevcuttur.
- Servis yükü tasarımı (SLD) yönteminde zemin dayanımına uygulanması önerilen güvenlik katsayılarıyla birlikte izin verilebilen tendon yükü, çivi kafası sistemi ve sıyrılma direnci elde edilmektedir.
- Yük ve direç faktörü tasarımı (LFRD) yönteminde tendon, çivi kafası sistemi, sıyrılma direnci ve zemin dayanımı için önerilen tasarım dayanımları (nominal ve son dayanıma uygulanacak olan direnç faktörleri)ve yük faktörleri verilmektedir. Bu tasarım önerileri kritik yapılar ve geçici yapım koşulları için hem olağan servis yükü hem de sismik yük için geliştirilmiştir.
- Stabilite şartlarının sağlanması ve sınır şekil değiştirmelerinin kontrolü için yerleştirilen çivilerin uygun biçimde dağıtılması sağlanmaktadır.
- Kaplama ve çivili duvarların yapısında kullanılan tüm donatılara ait ayrıntılar tanımlanmaktadır.
- Zemin çivileri ve duvar kaplamasının birlikte çalıştığı bir tasarım sunmaktadır.

### 2.8.2 Tasarım yaklaşimlari

Zemin çivili duvarların tasarımda yaygın olarak limit denge analizlerine dayanan Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı (LFRD) ve Servis Yükü Tasarımı (SLD) yöntemleri kullanılmaktadır.

#### 2.8.2.1 Yük ve direnç faktörü tasarımı (LFRD)

Dayanım sınır durumu gözönüne alınarak zemine ve zemin çivisine ait tasarım dayanımlarının uygulanan yüklerden fazla olması şartı sağlanır. Tasarım dayanımları uygun yük faktörleri ile çarpılır. Çivi kapasitesi yapısal açıdan (tendon tasarım dayanımı) ve geoteknik açıdan (tasarım sıyrılma direnci) belirlenir. Zemin direncine bir direnç faktörü uygulanarak son zemin dayanımı belirlenir. Servis sınır durumu ise donatılandırılmış ve desteklenmiş zeminin genel yer değiştirmesi ile araştırılır.

#### 2.8.2.2 Servis yükü tasarımı (SLD)

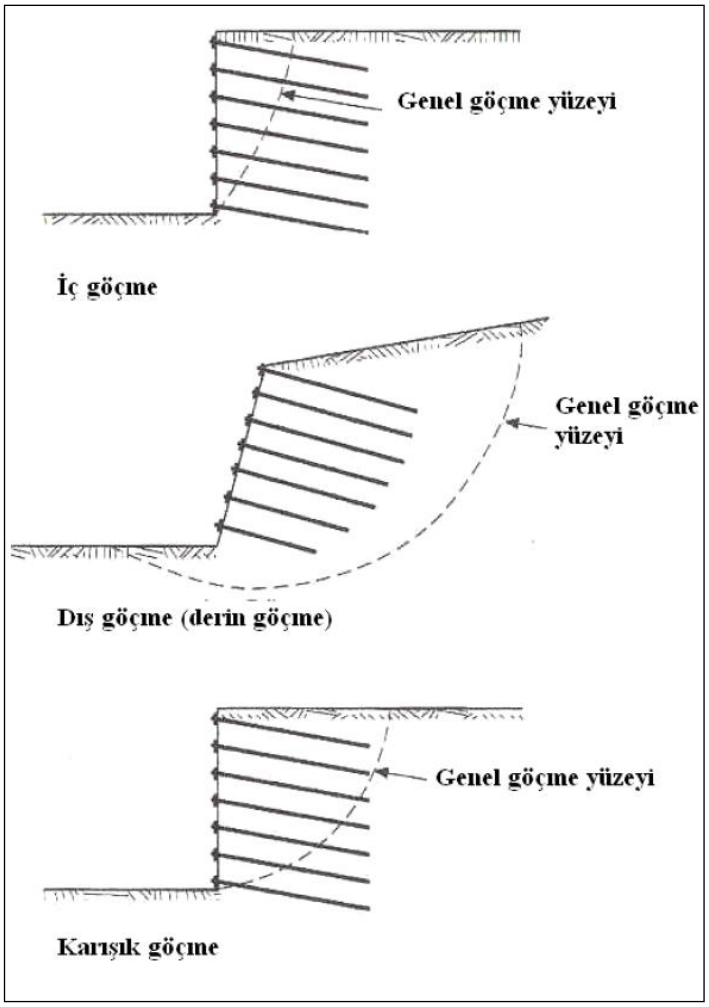
Genel olarak Yük ve Direnç Faktörü Tasarım yöntemi ile benzer bir yöntemdir. İzin verilebilir çivi yükünün ve azaltılmış zemin dayanımının uygulanan yükü aşması prensibine dayanır. İzin verilen çivi yükü yapısal (izin verilen tendon gerilmesi yükü) ve geoteknik (izin verilen sıyrılma direnci) açısından belirlenir. Zemin dayanımına uygulanan güvenlik katsayısı ile son zemin dayanımı belirlenir. Servis sınır durumu ise Yük ve Direnç Faktörü Tasarımında olduğu gibi donatılandırılmış ve desteklenmiş zeminin genel yer değiştirmesi ile araştırılır.

### 2.8.3 Zemin çivili duvarlarin stabilitesi

Zemin çivili duvarların dayanım sınır durumunu belirlemek için tüm göçme biçimlerinin incelenmesi gerekir. Bunlar; donatılarla kesişmeyen dış göçme biçimleri, donatı tendonlarının, kaplamanın veya her ikisinin birlikte göçmesini içeren iç göçme biçimleri ve donatılandırılmış bölgede oluşarak güçlendirilmiş zemin bloğunun dışına uzanan karışık göçme biçimleridir. Bu durumlar şematik olarak Şekil 2.15'te gösterilmiştir. İç ve karışık göçme biçimlerinde çivinin akması veya kopması, sıyrılması, duvar kaplamasının veya duvarın çiviye olan bağlantısının göçmesi gözden geçirilmelidir.

Zemin çivili duvar inşaatı sırasında kazı aynasının stabilitesi en önemli noktalardan biridir. Bu göçme biçimi genel stabilite tahkikinden bağımsız olmakla birlikte, arazi deney kazısı ile belirlenebilir. Bu şekilde kazı aynasının çivi yerleşimi ve kaplama

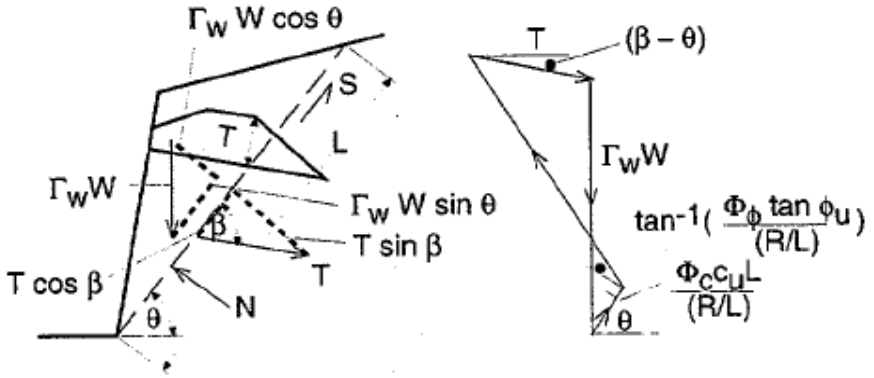
imalatına izin verecek kadar süre stabilitesini koruyabilmesi araştırılmaktadır. Gevşek dolgu ve çevre koşullarından etkilenmiş malzemelerin bulunduğu bölgelerde yapılan bu gibi sığ kazı derinliklerinde ani gelişen yerel kopmalar sıklıkla görülmektedir (FHWA, 1998).




**Şekil 2.15 :** Zemin çivili duvarlar için araştırılacak olası göçme biçimleri (FHWA, 1998)

### 2.8.4 Tasarım Temeli

Limit denge durumu analizlerine dayanan Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı (LFRD) ve Servis Yükü Tasarımı (SLD) yöntemleri ile tekil ve çoğul donatılı şev çözümleri yapmak mümkündür. Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı (LFRD) yöntemi ile tekil donatılı şevin kayma yüzeyinde oluşacak kuvvetler dengesi Şekil 2.16'da gösterilmiş ve (2.1), (2.2) ve (2.3) numaralı denklemler ile açıklanmıştır.




**Şekil 2.16 :** LRFD yöntemi ile tekil donatılı zemin çivili duvar tasarımı (FHWA, 1998)

$$\frac{R}{L} = \frac{S}{\Gamma_w W \sin\theta - T\cos\beta} \qquad \textbf{(2.1)}$$

$$\frac{R}{L} = \frac{\Phi_c c_u L + N\Phi_\phi \tan\phi_u}{\Gamma_w W \sin\theta - T\cos\beta} \qquad \textbf{(2.2)}$$

$$\frac{R}{L} = \frac{\Phi_c c_u L + (\Gamma_w W\cos\theta + T\sin\beta)\Phi_\phi \tan\phi_u}{\Gamma_w W \sin\theta - T\cos\beta} \qquad \textbf{(2.3)}$$

LRFD için kullanılan terimler :

W: Servis yükü

$\Gamma_W$: Yük faktörü

$c_U$: Zeminin drenajsız kayma mukavemeti, drenajlı durumda zeminin kohezyonu

$\phi_U$: Zemin danelerinin içsel sürtünme açısı

$\Phi_C$: Kohezyon direnç faktörü

$\Phi_\phi$: İçsel sürtünme açısı direnç faktörü

$c = \Phi_C$ x $c_U$ : Zeminin tasarım kohezyonu

$Ø = \tan^{-1}(\Phi_\Phi$ x $\tan\phi_U)$ : Zemin danelerinin tasarım içsel sürtünme açısı

R/L: Genel direncin yüke oranı

$T_{FN}$: Nominal çivi kafa dayanımı

$\Phi_F$: Çivi kafası direnç faktörü

$T_F = \Phi_F$ x $T_{FN}$ : Tasarım çivi kafası dayanımı

$T_{NN}$: Nominal çivi tendonu dayanımı

$\Phi_N$: Çivi tendonu direnç faktörü

$T_N = \Phi_N$ x $T_{NN}$ : Tasarım çivi tendonu dayanımı

$Q_U$: Son sıyrılma direnci

$\Phi_Q$: Sıyrılma direnci faktörü

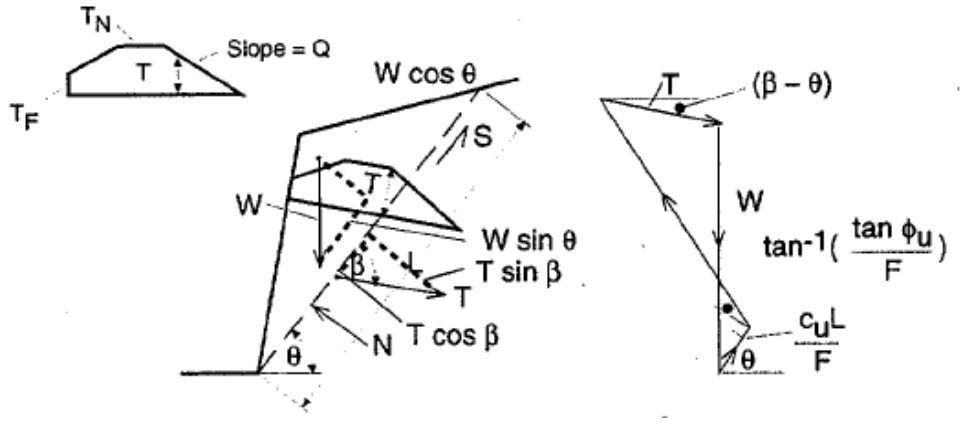
$Q_d = \Phi_Q$ x $Q_u$ : Tasarım sıyrılma direnci

T: İzin verilebilir çivi yükü

S: Direnen kayma kuvveti

N: Normal kuvvet

Servis Yükü Tasarımı (SLD) yöntemi ile tekil donatılı şevin kayma yüzeyinde oluşacak kuvvetler dengesi Şekil 2.17'de gösterilmiş ve (2.4), (2.5) ve (2.6) numaralı denklemler ile açıklanmıştır.




**Şekil 2.17 :** SLD yöntemi ile tekil donatılı zemin çivili duvar tasarımı, (FHWA, 1998)

$$F = \frac{S}{W\sin\theta - T\cos\beta} \qquad \textbf{(2.4)}$$

$$F = \frac{c_u L + N\tan\phi_u}{W\sin\theta - T\cos\beta} \qquad \textbf{(2.5)}$$

$$F = \frac{c_u L + (W\cos\theta + T\sin\beta)\tan\phi_u}{W\sin\theta - T\cos\beta} \qquad \textbf{(2.6)}$$

SLD için kullanılan terimler :

W: Servis yükü

$c_U$: Zeminin drenajsız kayma mukavemeti, drenajlı durumda zeminin kohezyonu

$\Phi_U$: Zemin danelerinin içsel sürtünme açısı

F: Zeminin kayma dayanımı için genel güvenlik sayısı

$T_{FN}$: Nominal çivi kafası dayanımı

$T_F = \alpha_F$ x $T_{FN}$ : İzin verilebilir çivi kafası yükü

$T_N = \alpha_N$ x $T_{NN}$ : İzin verilebilir çivi tendonu yükü

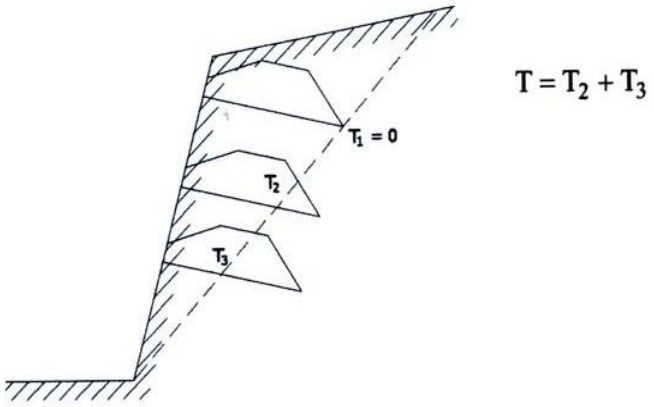
$Q_U$: Son sıyrılma direnci

$Q_d = \alpha_Q$ x $Q_U$ : İzin verilebilir sıyrılma direnci

T: İzin verilebilir çivi yükü

S: Direnen kayma kuvveti

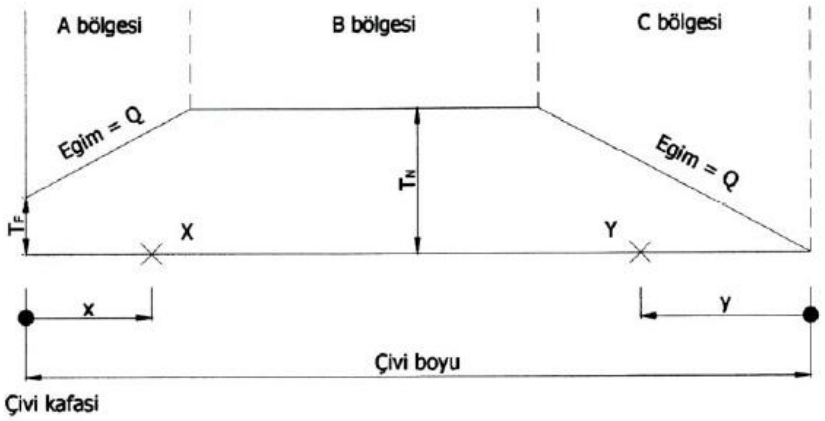
Çoğul donatılı zemin çivili duvar tasarımında düzlemsel kayma yüzeyinde oluşan kuvvetler Şekil 2.18'de gösterilmiştir.




**Şekil 2.18 :** Çoğul donatılı zemin çivili duvar tasarımı (FHWA, 1998)

Genel olarak düzlemsel bir kayma yüzeyinde elde edilen karşı koyan kuvvet ya da momentlerin yayılı kuvvet ya da momentlere oranı tanımalanan güvenlik katsayısı olarak kabul edilir.

Zemine yerleştirilen zemin çivisinin amacı, kayan bloktaki stabilite ve buna bağlı güvenlik katsayısını arttırmaktır. Güvenlik katsayısı serbest kütle diagramından ya da kuvvetler poligonundan bulunabilir. Donatılandırma ile normal kuvvet ve kayma yüzeyi boyunca kayma direnci arttırılır ve kayma yüzeyi boyunca kaydırıcı kuvvetler azaltılarak stabilite arttırılır.




**Şekil 2.19 :** Çivi destek şeması (FHWA, 1998)

Şekil 2.19'da çivi dayanım şeması görülmektedir. Herhangi bir kayma kaması için çivinin donatılandırılmaya 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 duyarlılığında herhangi bir çivinin en az çivi gerilme dayanımı kadar veya kayma yüzeyinin ardındaki boyun sıyırma direnci kadar ya da çivi kafası dayanımı ve kayma yüzeyi ile duvar arasındaki boyda oluşan sıyrıma dayanımı kadar katkısı olmalıdır.

Şekil 2.19'da A bölgesinde X gibi bir noktada kayma yüzeyi ile kesişen bir çivinin desteği ile $X = ( T_F + Q_X )$ olacaktır. B bölgesi için $B = T_N$ ve C bölgesindeki Y noktası için de $Y = ( Q_Y )$ olacaktır. $T_F$ çivi kafası kaplama bağlantısının dayanımı olup, SLD için izin verebilir çivi kafa yükü; LRFD için de tasarımı çivi kafa dayanımı olarak tanımlanır. $T_N$ çivi tendonu gerilme dayanımı olup, SLD için izin verilebilir çivi tendon yükü; LRFD içinde tasarım çivi tendon dayanım olarak tanımlanır. Q ise çivi – zemin sıyırma direnci olup, SLD için izin verilebilir sıyrıma direnci; LRFD için de tasarım sıyrılma direnci olarak tanımlanır.

Şekil 2.18'de belirli bir kayma yüzeyi için en üstte çivi kayma yüzeyi ile kesişmediğinden bloğun duyarlılığına herhangi bir katkı sağlayamamaktadır. Ancak en üstteki çivi daha sığ kayma yüzyelari 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 sıyırma direncine eşittir.

### 2.8.5 İç stabilite – çivi

Çivilerin ayrı ayrı maksimum donatı katlıları aşağıda belirtilenle sınırlandırılmıştır:

- Çivi tendonunun yapılsal gerilme dayanımı
- Sıyrılma veya beklenmeyen krip davranışı tarafından belirlenen tendon – enjeksiyon kenetlenmesi
- Zemin – enjeksiyon kenetlenmesi

#### 2.8.5.1 Çivi tendonunun yapısal gerilme dayanımı

Uygulanan çivi yükü, çivi tendonunun yapısal dayanımından daha büyük olursa çelik çivide akma ve onu izleyen kopma gerçekleşebilir. Nominal tendon dayanımı olan $T_{NN}$, maksimum yapısal gerilme dayanımını tanımlamada denklem (2.7) yardımıyla hesaplanacaktır.

$$T_{NN} = A_t F_y \qquad \textbf{(2.7)}$$

Burada $A_t$ değeri çelik donatının nominal alanı, $f_y$ ise çelik donatının akma dayanımıdır. Daha önce de sözü edildiği gibi, zeminin büyük şekil değiştirmelerinde oluşabilecek kesme/eğilme katkılarının çivi üzerindeki etkisi göz ardı edilmemelidir.

#### 2.8.5.2 Zemin – enjeksiyon kenetlenmesi

Ekonomik bir zemin çivili duvar tasarımında enjeksiyon – zemin ara kesitinde uygun kenetlenme sağlanabilmesi önemli rol oynar. Sıyrılma dayanımının az olması, duvar yüksekliğine oranla daha uzun boyda çiviler ve/veya birim boydaki sıyrılma direncini arttırmak amacıyla daha büyük çapta gelgiler gerektirir. Zemin – enjeksiyon ara kesitindeki son kenetlemeyi en çok etkiliyen etkenler zemin

özellikleri (platisite, dayanım, dane dağılımı), delgiyöntemleri ile enjeksiyon basıncıdır.

#### 2.8.5.3 Enjeksiyon – tendon kenetlenmesi

Nervürlü donatılarda enjeksiyon – çivi tendonu arasındaki kenetlenme mekanik kilitlenmenin bir sonucudur. Bu kilitlenme sırasında enjeksiyon çelik çubuğun şekil değiştirmesine karşı kendi kayma dayanımını mobilize eder ve böylelikle tendonda son dayanıma ulaşılır. Havayla kısa süreli etkileşim sonucunda çelik çubukların üzerinde oluşan pas tozlarının bu enjeksiyon – tendon kenetlenmesinde kayda değer bir etkisi yoktur. Birim çivi boyundaki yük açısından bakıldığında enjeksiyon – tendon kenetlenmesi, enjeksiyon – zemin kenetlenmesinden daha büyüktür ve bu nedenle doğru enjeksiyon karışımı ve yerleştirme tekniği uygulandığında zemin çivisi uygulamaları için az kritiktir.

### 2.8.6 İç Stabilite – çivi kafasi

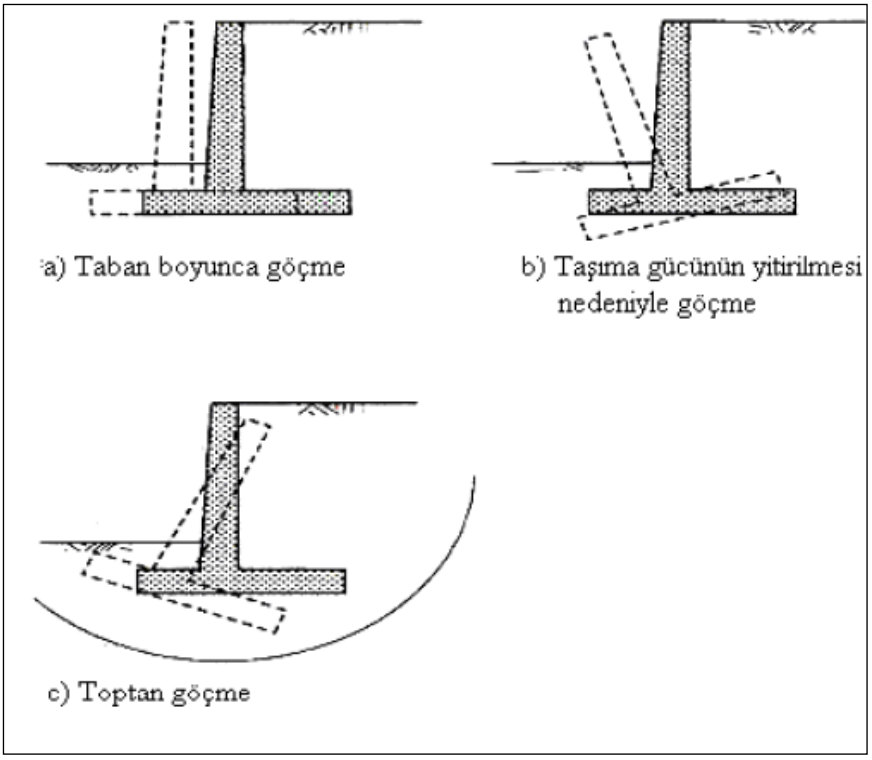
Çivi kafasının dayanımı esnek duvar kaplamasının dayanımı, kaplamanın ve bağlantı elemanlarının zımbalama ve kalıcı duvarların bağlantısında kullanılan başlıklı civataları taşıma gücü tarafından kontrol edilebilir.

### 2.8.7 Dış stabilite

Dış stabilite geleneksel ağırlık ve betonarme istinat duvarlarındaki potansiyel şekil değiştirme biçimleriyle ilgilidir ve aşağıdakilerin göz önüne alınmasını gerektirir.

- Yanal toprak basıncı altında, dayanma yapılarının taban boyunca yatay olarak kayması
- Yapının kendi ağırlığı ve yanal toprak basıncı altında dönerek temel taşıma dayınımının aşılması
- Dayanma yapısının üzerinde olduğu şevin genel duraylılığı

Bu göçme biçimleri Şekil 2.20’de verilmiştir.




**Şekil 2.20 :** Dış göçme biçimleri (FHWA, 1998)

### 2.8.8 Güncel zemin çivisi tasarim yöntemleri

#### 2.8.8.1 Çivi tasarımı

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

#### 2.8.8.2 Kaplama tasarımı

Kaplamanın, zemin çivili yapılarda bir çok işlevi vardır. Çiviler arasındaki zemine yanal bir sınırlandırma getirir ve dekoratif amaçlı paneller gibi dış yükleri taşıyabilir. Zemin yerel olarak her çivi arasında desteklenmektedir. Çiviler aralıksız olarak peşi sıra 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 oluşur. Bu etkiler zemin çivili duvarlar için geçerli olan esnek kaplamalar açısından büyük önem taşımaktadır.

## 2.9 Zemin Çivili Duvarların Tasarımı

### 2.9.1 Giriş

Bu bölümde zemin çivili duvar tasarımına esas alınan hesap yöntemi adım adım anlatılmıştır. Tasarım yönteminin 5 ana bölümü ve bunlara bağlı alt bölümler Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Bölümün devamında bu başlıklar ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

**Çizelge 2.1 :** Zemin çivili duvarlar için tasarım aşamaları (FHWA, 2003).

| |
|---|
| 1. Zemin Çivili Duvarlar Ön Tasarım Esasları<br>A. Duvar yerleşimi<br>B. Zemin çivisi düşey ve yatay aralığı<br>C. Zemin çivisi düzeni<br>D. Zemin çivisi eğimi<br>E. Zemin çivisi boyu ve dağılımı<br>F. Diğer ön tasarım esasları |
| 2. Tasarım Abakları ile Ön Tasarım |
| 3. Son Tasarım<br>A. Dış göçme modelleri<br>i. Toptan göçmeye karşı stabilite kontrolü<br>ii. Kaymaya karşı stabilite kontrolü<br>iii. Taşıma gücü stabilite kontrolü<br>B. İç Göçme Modelleri<br>D. Kaplama Tasarımı |
| 4. Diğer Tasarım Esasları |

Çizelge 2.1'de verilen aşamaların tasarımına başlamadan 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).

### 2.9.2 Zemin çivili duvarlar ön tasarim esaslari

#### 2.9.2.1 Duvar yerleşimi

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

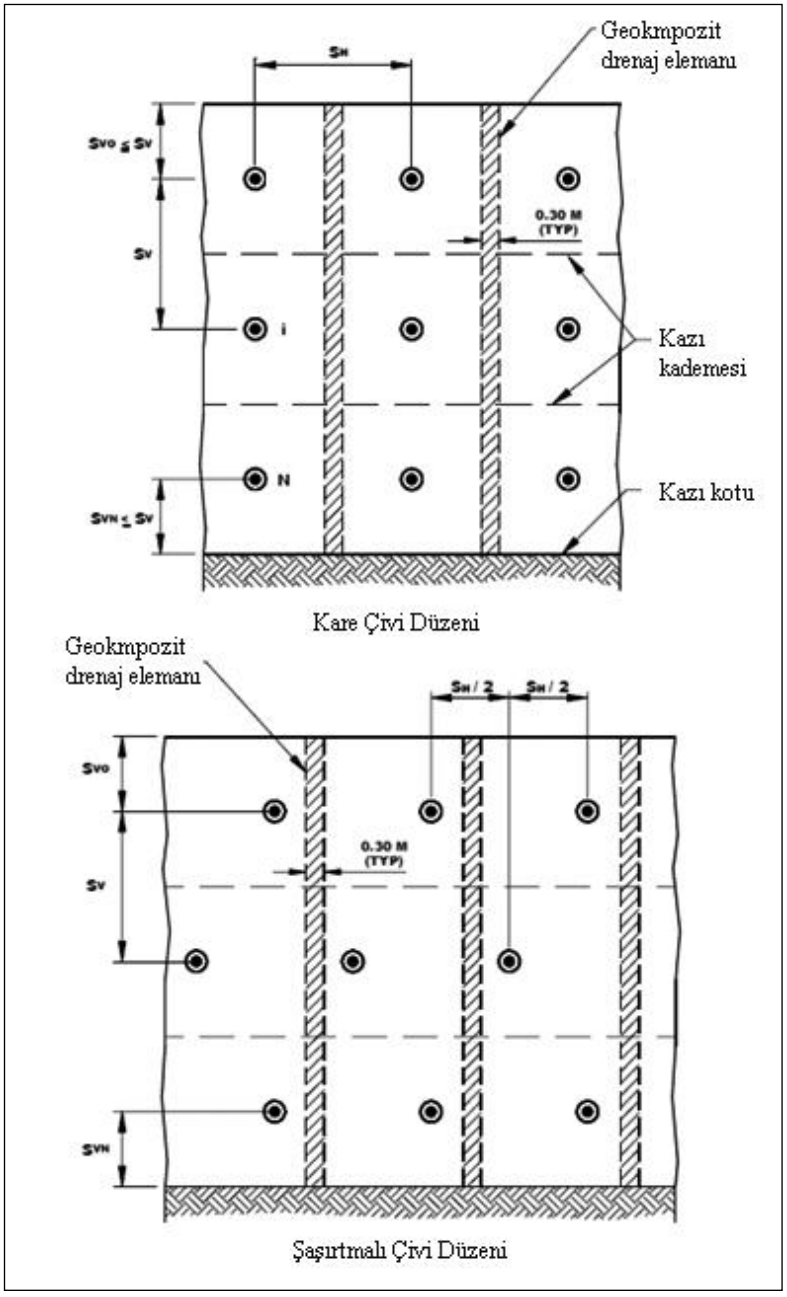
yerleşiminin belirlenmesi sırasında ayrıca duvarın boy profili çıkartılır, trafik bariyerleri, altyapı elemanları ve drenaj sistemi gibi detaylar tespit edilir ve arazi sınırları belirlenir.

Duvar yüzünün eğimli seçilmesi geçici kazı yüzeyi stabilitesini arttırır ve eğimli bir yüzeyde duvara daha düşük kuvvetler etkiyeceği için daha kısa zemin çivilerinin seçilebilmesine olanak sağlanır. Malzeme tasarrufu ile sağlanan kazanç eğimli yüzeyin kazısında artan yarma maliyetini dengeleyecektir. 10°'den düşük eğimler genellikle estetik sebeplerle tercih edilir ve muhtemelen geçici kazı yüzeyi stabilitesini arttırırlar. 10°'den büyük duvar eğimlerinde stabilitenin artmasına sağlar (FHWA, 2003).

#### 2.9.2.2 Zemin çivisi düşey ve yatay aralığı

Yatay çivi aralığı, $S_H$, genel olarak düşey çivi aralığı, $S_V$, Şekil 2.19'da gösterildiği gibi aynıdır. 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 düşebilir. 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 değişebilir.

Yatay ve düşey zemin çivisi aralıkları seçilirken her zemin çivisinin etki alanı $S_H$ x $S_V \leq 4$ $m^2$ 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 kuvvetlerinin 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 göreli kolay imalatının sağlanması ve yatay toprak basınçları ve etkiyen sürşarj yüklerinin efektif bir şekilde desteklenmesi amacı ile belirlenmiştir (FHWA, 2003).




**Şekil 2.21 :** Duvar yüzü zemin çivisi düzeni (FHWA, 2003)

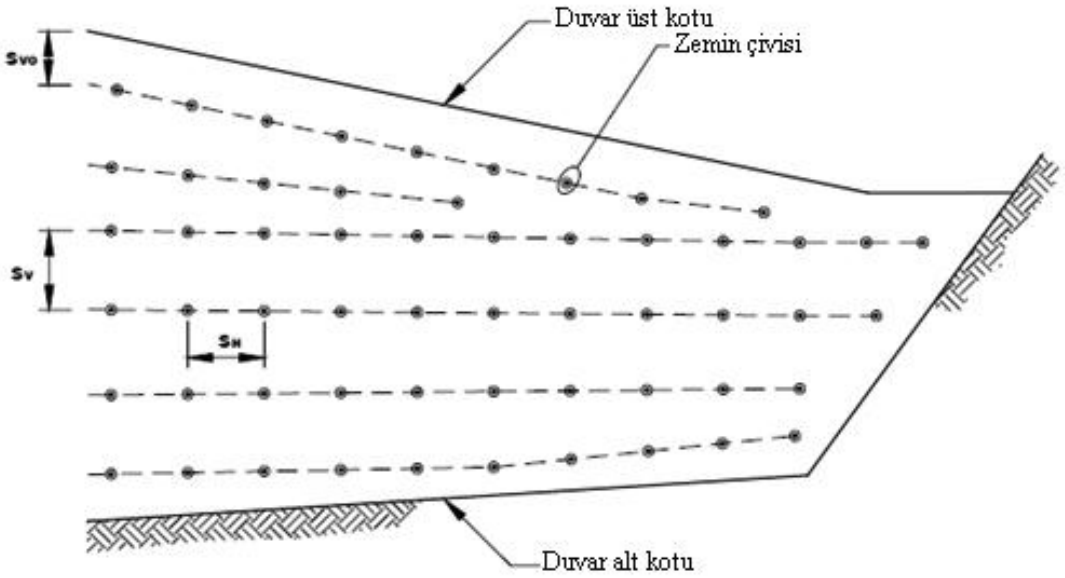
### 2.9.2.3 Zemin çivisi düzeni

Zemin çivileri Şekil 2.21'de gösterildiği gibi genel olarak: i. kare; ii. şaşırtmalı, iii. düzensiz (limit bölgelerde) olarak yerleştirilir.

Kare çivi düzeni ile düşeyde zemin çivisi kolonları elde edilir ve düşey birleşimlerle püskürtme beton kaplama veya prekast beton kaplama elemanların imalatı kolaylaşır. Kare çivi düzeni aynı zamanda sürekli düşeyde geokompozit drenaj elemanlarının sürekli olarak kaplama arkasında imal edilmesini kolaylaştırır. Uygulamada kare çivi düzeni sıklıkla kullanılmaktadır.

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.

Sabit çivi aralığı seçimi imalat ve kalite kontrolü kolaylaştırmaktadır. Fakat proje bazlı geometrik kısıtlar zemin çivisi aralıklarının bölgesel olarak düzensizleşmesine sebep olabilir. Örneğin zemin çivili duvar üst ve/veya alt kotlarının sabit olmadığı durumlarda zemin çivilerinin aralıkları duvar geometrisine bağlı olarak değişebilir. Böyle durumlarda yatay olmayan kenara paralel bir yada iki sıra zemin çivisi yerleştirilmesinden sonra bir geçiş bölgesiyle düzenli dizilime geçilir, geçiş bölgesinde yatay sıraya ulaşıncaya kadar zemin çivileri düşeyde daha sık yerleştirilebilir. Aynı şekilde köşe bölgelerde zemin çivisi yatay aralıkları azaltılarak geçiş bölgeleri oluşturulabilir (FHWA, 2003). Zemin çivilerinin yerleştirilmesi Şekil 2.22'de detaylı olarak gösterilmiştir.



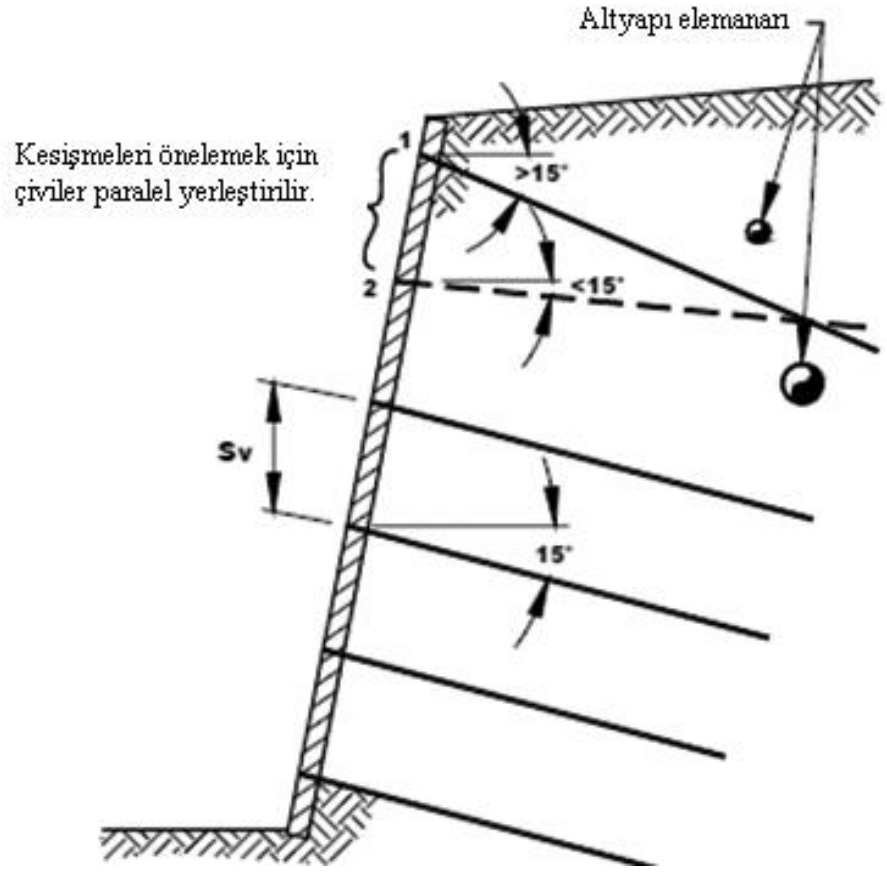

**Şekil 2.22 :** Düşey olmayan duvarlar için zemin çivisi yerleşimi (FHWA, 2003)

### 2.9.2.4 Zemin çivisi eğimi

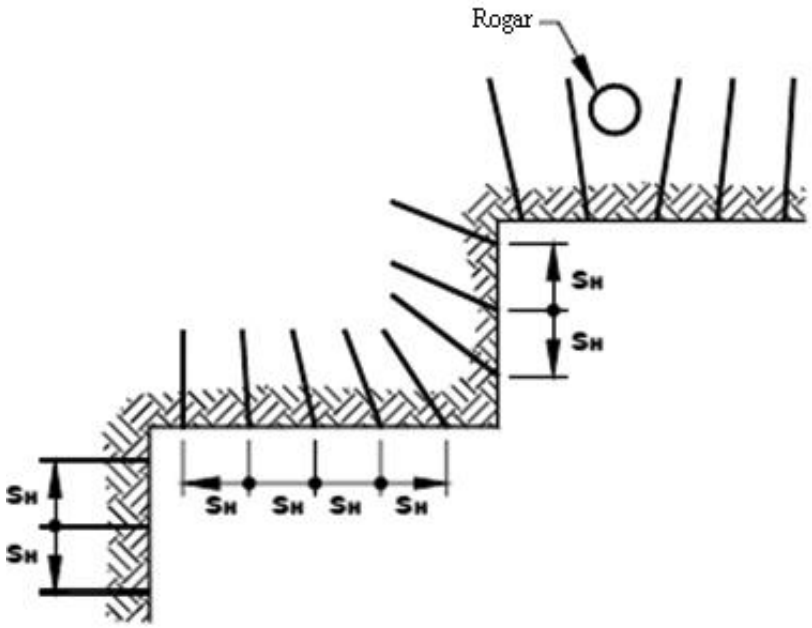
Zemin çivileri yatay ile 10° – 20° açı yapacak şekilde, genel olarak 15° ile yerleştirilirler. Bu açı aralığı tipik delgi çapı, zemin çivisi boyutları ve klasik

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 2.23'de öngörülen zemin çivisi bölgesinde mevcut altyapı tesisleri gösterilmektedir. Bu durum genellikle üst 1 veya 2 sıra için sözkonusu olmaktadır. Aynı zamanda dış duvar köşelerinde kalan zemin çivilerinin kesişmelerini önlemek amacı ile bir cephede kalan zemin çivileri farklı açılarla imal edilebilir. Şekil 2.24'de dış duvar köşesinde kalan zemin çivilerinin kesişmesini önlemek için planda yaptıkları açının değiştirildiği durum gösterilmiştir.




**Şekil 2.23 :** Altyapı elemanlarına bağlı olarak çivi eğimlerinin değişmesi (FHWA, 2003)




**Şekil 2.24 :** Köşelerde çivi yerleşimi plan görünüşü (FHWA, 2003)

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 katsayıları önemli şekilde azalmaktadır (FHWA, 2003).

### 2.9.2.5 Zemin çivisi boyu ve dağılımı

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

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.

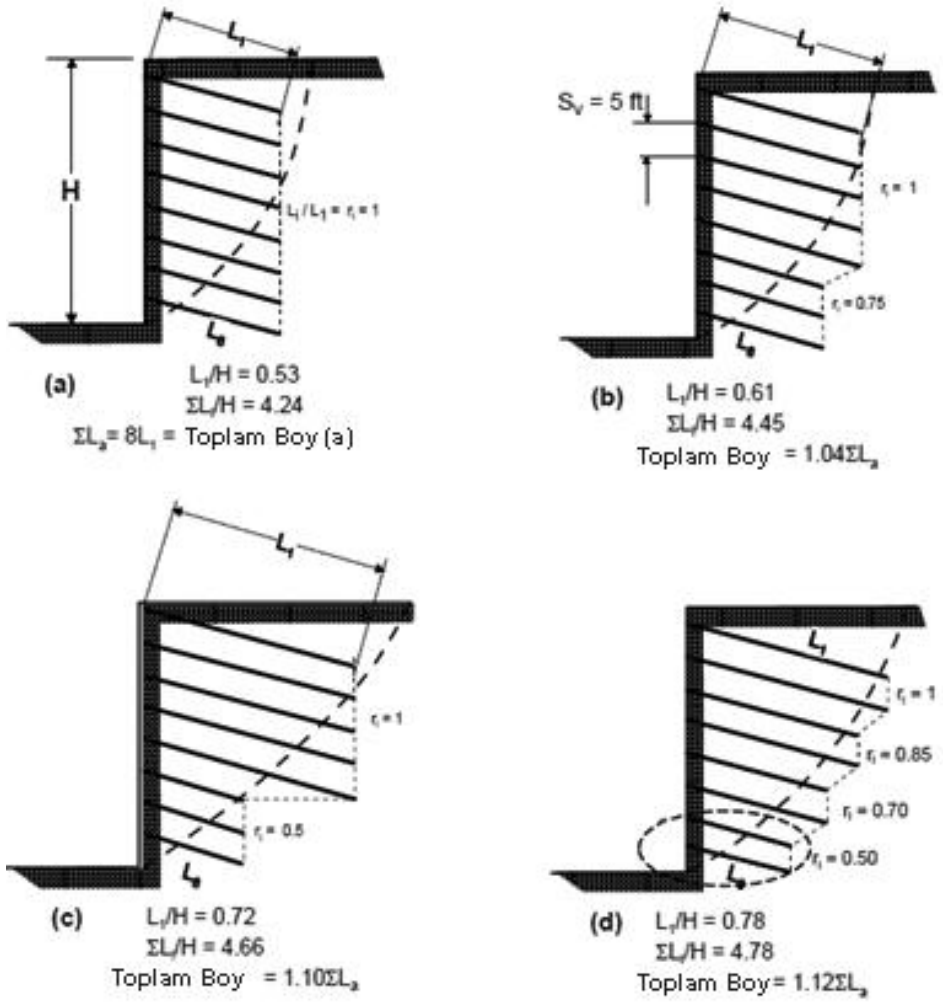
Şekil 2.25'de aynı yükseklikteki zemin çivili duvarların 1,35 güvenlikli tasarımında farklı zemin çivisi boyu dağılımları gösterilmiştir. (a) durumunda çözüm yapılırken sabit çivi boyu kullanılmıştır. Değişen çivi boyu ile tasarım yapılan (d) durumunda (a) durumuna göre toplam çivi boyunun %12 daha fazla 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.

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 2.25'teki durumlar incelendiğinde (c) ve (d) durumlarında duvar üst bölgesinde daha düşük deformasyonları elde edilmiştir.

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.




**Şekil 2.25 :** Çivi boylarındaki değişimin etkisi (FHWA, 2003)

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.

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

#### 2.9.2.6 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.

### 2.9.3 Tasarım abaklari ile ön tasarim

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 yapılabilir. FHWA tarafından ön çivi boyu ve maksimum çivi çekme kuvvetini belirlemekte kullanılacak tasarım abakları hazırlanmıştır.

Bu abaklar farklı duvar yüzü açıları ($\alpha$), duvar üstü şev açıları ($\beta$), efektif sürtünme açıları ($\phi'$) 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 sıyrılma direncinin, $\mu$, bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. İzin verilebilir normalize sıyrılma direnci denklem (2.8) ile hesaplanır (FHWA, 2003).

$$\mu = \frac{q_u D_{DH}}{FS_P \gamma S_H S_V} \qquad \textbf{(2.8)}$$

$q_u$: son sıyrılma direnci

$D_{DH}$: delgi çapı

$FS_P$: sıyrılma direnci güvenlik katsayısı

$S_H$: yatay çivi aralığı

$S_V$: düşey çivi aralığı

$\gamma$: zeminin birim hacim ağırlığı

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

İkinci tip abakta tüm çiviler için maksimum normalize tasarım çekme kuvveti ($T_{max-s}$) izin verilebilir normalize sıyrılma direncinin ($\mu$) bir fonksiyonu olarak toptan güvenlik katsayısı 1,0 için verilmiştir. Maksimum normalize tasarım kuvveti denklem (2.9) ile hesaplanır (FHWA, 2003).

$$t_{max-s} = \frac{T_{max-s}}{\gamma H S_H S_V} \quad \textbf{(2.9)}$$

Seçilecek çivi kesiti denklem (2.10) ile bulunur (FHWA, 2003).

$$A_t = \frac{T_{max-s} FS_T}{f_y} \quad \textbf{(2.10)}$$

$A_t$: gerekli çivi kesit alanı

$T_{max-s}$: maksimum normalize tasarım kuvveti

$FS_T$: çivi çekme kuvveti için güvenlik faktörü

$f_y$: çivi akma dayanımı

### 2.9.4 Son tasarim

#### 2.9.4.1 Dış göçme modelleri

**Toptan göçmeye karşi stabilite kontrolü**

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

**Kaymaya karşi stabilite kontrolü**

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

**Taşıma gücü kontrolü**

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

### 2.9.4.2 İç göçme modelleri

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

### 2.9.4.3 Kaplama tasarımı

Çivi kafasında oluşan çekme kuvveti ($T_o$) denklem (2.11) ile hesaplanır (FHWA, 2003).

$$T_o = T_{\max-s}\left[0.6 + 0.2(S_V - 1)\right] \quad \textbf{(2.11)}$$

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

### 2.9.5 Diğer tasarim esaslari

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 sebebp olacaktır ve uzun dönem performansı etkileyecektir. Sahadaki suların kontrol altına alınamadığı 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 önerilir (FHWA, 2003).

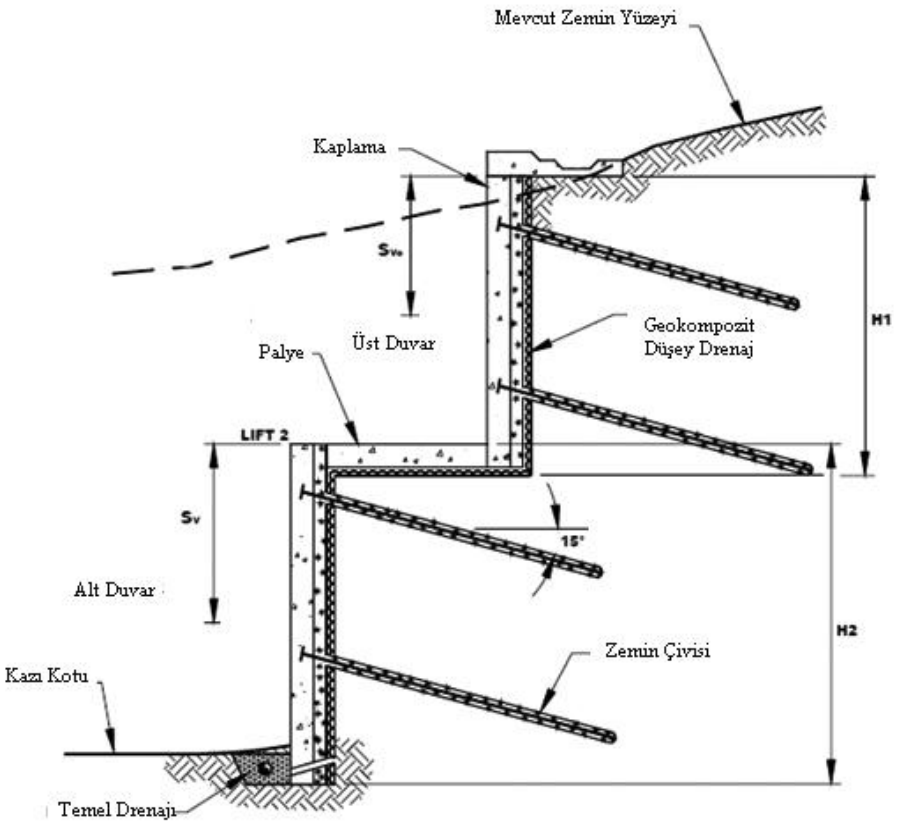
## 2.10 Özel Tasarım Konuları

### 2.10.1 Basamaklı yapilar

Bazı durumlarda duvar kaplama kesitleri arasında yatay palyelerin bırakıldığı basamaklı yapıların tercih edilmektedir. Basamaklı çivili duvar örneği Şekil 2.26'da verilmiştir. Palye genişliğinin basamakların yüksekliğine oranla küçük olduğu durumlarda tüm yapı eşdeğer eğimli bir duvar gibi davranmaktadır. MSE duvarlar şartnamesinde palye genişliğinin toplam duvar yükseliğinin %20'sinden az olduğu durumlarda yapının %3 eşdeğer eğimli duvar davranışı sergilediği belirtilmektedir.

Palye genişliğinin alt duvar yükseliğinden, $H_2$, büyük olduğu durumlarda her iki duvar birbirinden bağımsız davranış sergileyecektir. Bu sebeple her iki duvarın ayrı ayrı analiz edilerek boyutlandırılması gereklidir.

Palye genişliğinin alt duvar yüksekliğinden, $H_2$, küçük olduğu durumda üst duvar alt duvarın üzerine sürşarj etkisi yapacaktır. Yapılan boyutlandırma ve stabilite analizlerinde bu yükün gözönüne alınması gereklidir (FHWA, 2003).

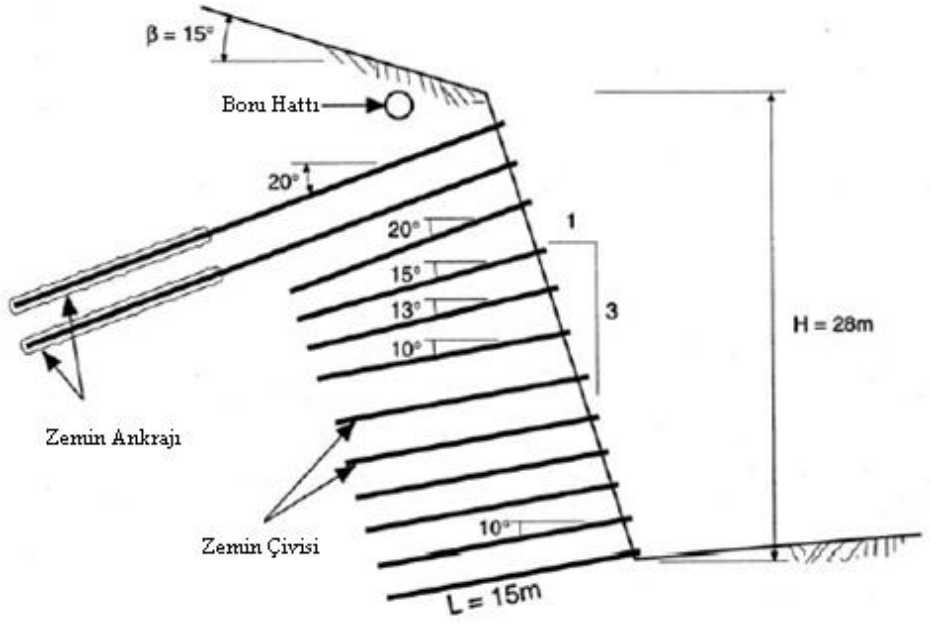



**Şekil 2.26 :** Basamaklı zemin çivili duvar örneği (Byrne ve diğ., 1988)

### 2.10.2 Kompozit yapilar

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 2.27'de verilmiştir. Yukarıdan aşağı doğru imalat devam ettikçe zemin çivileri ile birlikte zemin ankrajlarıda yerleştirilmektedir. Zemin ankrajlarının kullanılmasının asıl amacı toplam stabilitenin arttırılmasıdır. Ayrıca zemin ankrajlarının duvarın üst bölümünde uygulanması ile duvar deformasyonları belirgin şekilde azaltılmış olacaktır.

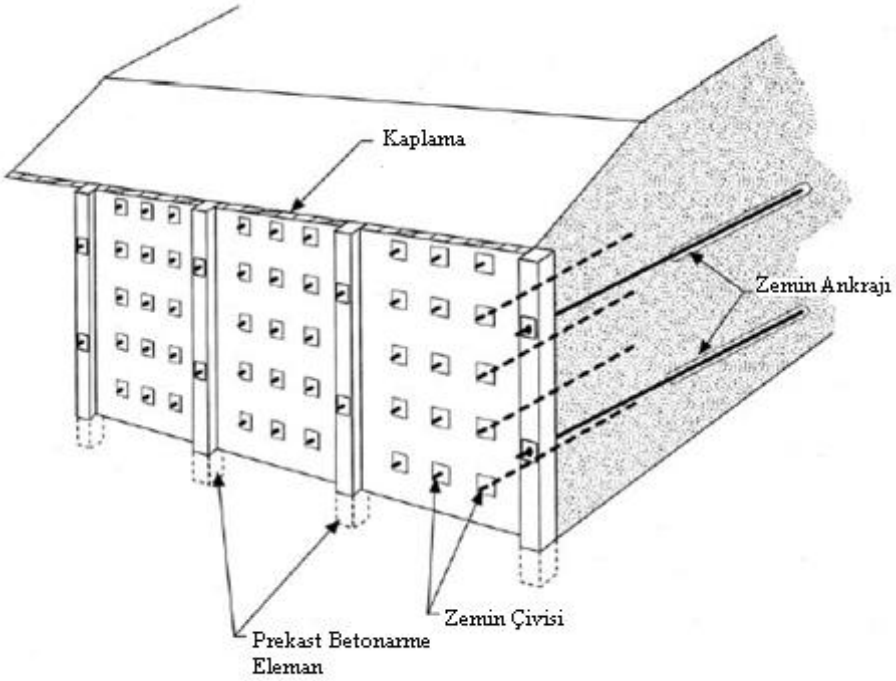
Zemin ankrajları ankrajları destekleyecek betonarme elemanların teşkil edilmesi ile düşeyde duvar boyunca da uygulanabilir. Düşeyde çok sıra ankrajla desteklenmiş bir sistem örneği Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Bu şekilde imal edilen kompozit sistemlerle 25 m yüksekliğindeki duvarlar desteklenebilir.




**Şekil 2.27 :** Kompozit duvar kesiti (Byrne ve diğ., 1998)

Tasarım yöntemi destek sisteminin yapısına, çivi ve ankrajların dağılımı, boyu ve fonksiyonuna bağlı olarak değişir. Örnek olarak Şekil 2.27 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 alınabilir. Bu durumda tasarımın zemin çivili duvar tasarımı şeklinde ilerlemesi toptan göçme analizinde

sistemin zemin çivileri ve ankrajlar için ayrı ayrı değerlendirilmesi önerilir. Zemin çivili bölgenin blok olarak hareket edeceği kabulu ile zemin ankrajlarının boyu zemin çivili bloğun stabilitesini etkileyen ve daha derin bölgelerden geçen kayma kamalarına göre belirlenecektir.




**Şekil 2.28 :** Çok sıra ankrajlı kompozit duvar kesiti (Byrne ve diğ., 1998)

# 3. ZEMİN ÇİVİLİ ESNEK İSTİNAT DUVARLARINA AİT İKİ VAKA ANALİZİNİN İNCELENMESİ

## 3.1 Giriş

İstanbul içinde 1970'li yıllardan itibaren görülen plansız büyümenin bir sonucu olarak bugün şehir merkezi olan bölgelerde dahi hafriyat atıklarından oluşmuş kontrolsüz dolgu birimlerle karşılaşılmaktadır. Bu bölümde şehir merkezinde bulunan iki komşu parselde hafriyat atığı grovak birimin kontrolsuz depolanması ile oluşmuş dolgu birim içinde inşa edilmiş zemin çivili istinat duvarlarına ait vaka analizlerine yer verilecektir. İki parsel arasındaki mesafe Parsel 1'in batısında ve Parsel 2'nin doğusundan geçen 30 m genişliğindeki karayoludur.

Parsel 1 için 6 bloklu konut sitesi inşaatı projesi hazırlanmıştır. Projenin yapılması planlanan arsanın sadece batı cephesinde yol kotları ile temel alt kotları arasında en fazla 16 m olmak üzere değişen yükseklik farkları bulunmaktadır.

Yaklaşık 250 m boyundaki batı cephesinde 4300 m²'lik alan için zemin çivili iksa duvarı projelendirilmiş ve uygulanmıştır.

Parsel 2 için 7 bodrum katlı alışveriş merkezi ve konut projesi hazırlanmıştır. Projenin yapılması planlanan arsanın kuzeyi ve doğusunda yaklaşık olarak aynı kotta yollar bulunmakta, güneyinde saha kotundan yaklaşık olarak 2 m aşağıda yeşil alan ve batısında yine aynı kotlarda bulunan yeşil alan yer almaktadır. Sahada gözlenen en yüksek arazi kotu +124 m, kazı kotu +92 m'dir. 32 m'ye varan kazı derinliğini desteklemek amacı ile kompozit istinat duvarı sistemi projelendirilmiştir.

Kompozit sistemin üst kademesinde yaklaşık 590 m boyundaki cephede 7700 $m^2$'lik alanda zemin çivili iksa duvarı projelendirilmiş ve uygulanmıştır.

Her iki sahada deplasman ölçümleri inklinometre ile takip edilmiştir. İnklinometreler duvarların yaklaşık 1 m ardına yerleştirilmiş ve dik doğrultuda deformasyonlar kaydedilmiştir.

## 3.2 Zemin Özellikleri

Parsel 1'de yapılan sondajlarda kalınlığı 30 m'ye varan SPT N = 7 – R olan ve Parsel 2'de yapılan sondajlarda kalınlığı 20 m'ye varan SPT N = 4 – R olan kontrolsüz depolanmış grovak kökenli çakıl dolgu tabakası gözlenmiştir. Ayrıca inşaat atığı kiremit, tuğla ve beton parçalarına da düzensiz bir şekilde rastlanılmıştır. Bu kontrolsuz yığın muhtemelen başka inşaatların temel kazılarında hafredilen grovak birimlerden ve diğer atıklardan kuruludur. Kontrolsüz dolgu tabakasının altında kırıklı çatlaklı, RQD = 0 – 0,25 olan tamamen ayrışmış diyabaz ve silttaşı birimler gözlenmiştir. En altta ise kırıklı, çatlaklı çok zayıf – zayıf dayanımlı silttaşı ve diyabaz birimler gözlenmiştir.

**Çizelge 3.1 :** Birimlere ait geoteknik parametreler

| | Birim Hacim Ağırlık ($\gamma$, kN/m³) | İçsel Sürtünme Açısı ($\phi'$,°) | Kohezyon ( c, kN/m² ) |
|---|---|---|---|
| Dolgu | 18 | 30 | 0 |
| Ayrışmış Diyabaz - Ayrışmış Silttaşı | 20 | 30 | 0 |
| Diyabaz - Silttaşı | 22 | 38 | 0 |

Sahada gözlemlenen birimler için seçilen geoteknik parametreler Çizelge 3.1'de verilmiştir. Saha ve sondaj kotları değerlendirildiğinde zemin çivili duvarların dolgu birim içinde imal edileceği görülmektedir.

## 3.3 Uygulanan Tasarım

Parsel 1'de yaklaşık 250 m boyunca devam eden doğu cephesinde kazı üst kotları ve uygulama alanı genişliği farklılık göstermektedir. Sahada zemin çivili duvarların düşey ile yaptığı açının ve duvar yüksekliklerinin farklılık gösterdiği 13 kesitte çözüm uygulanmıştır. Bu tez kapsamında zemin çivili duvar kesitleri arasında düşey ile oluşturulan eğim, yükseklik ve ölçülen deplasmanların en kritik görüldüğü iki kesit incelenmiştir.

Parsel 2'de 590 m boyunca devam eden cephede zemin üst seviyesi farklılık göstermemektedir ayrıca çalışma alanı kısıtlı olduğu için duvarların düşey ile yaptığı

açı sabit tutulmuş ve sahada tek kesit uygulanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında farklı deformasyon okumalarının alındığı üç kesit incelenmiştir.

### 3.3.1 Parsel 1 – kesit 1

Zemin çivili duvarın imal edileceği zemin profili Bölüm 3.2'de tanımlanan kontrolsüz dolgudur.

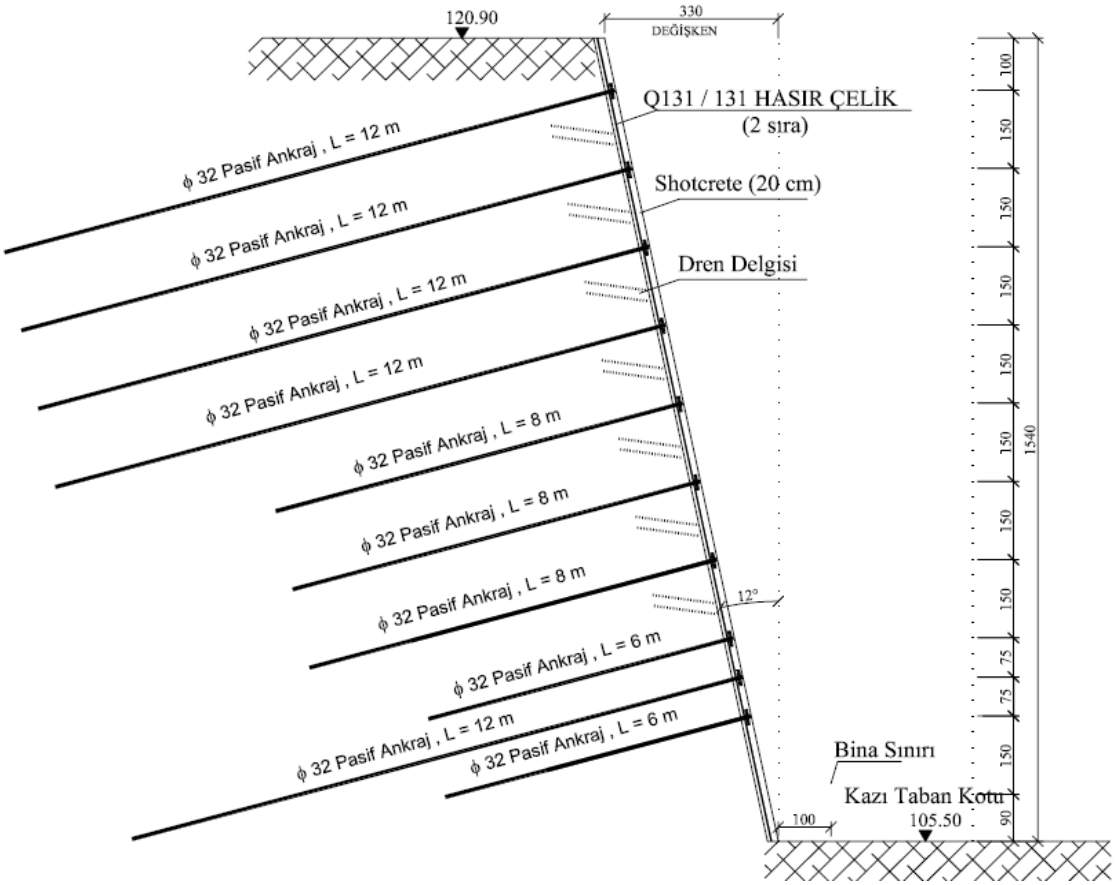
Kazı derinliğinin 15,4 m, duvarın düşeyle yaptığı açı 6°'dir.

Zemin çivisinin yatayla yaptığı açı i = 15°, delgi çapı $D_{DH}$ = 110 mm, çivi $\phi$ 32 donatı olarak seçilmiştir. Zemin çivisi yatay aralığı $S_h$ = 1,5 m, düşey aralığı $S_v$ = 1,5 m, çivi boyları 12 m – 6 m arasında değişmektedir.

Yüzey kaplaması 20 cm kalınlığında 2 sıra hasır çelikle imal edilmiştir, çivi başlığı olarak 200 x 200 x 15 mm St 52 plaka kullanılmıştır.

Drenaj sistemi, uzunluğu $l_d$ = 3 m, yatay aralığı $S_{hd}$ = 6 m, düşey aralığı ilk 3 m hariç $S_{vd}$ = 1,5 m, yatayla $i_d$ = 10° açı yapacak şekilde yerleştirilmiş drenlerden oluşmaktadır.

1 kesitine ait detaylı çizimler Şekil 3.1'de, saha uygulamasına ait bir fotoğraf Şekil 3.2'de sunulmuştur.




**Şekil 3.1 :** Parsel 1 – Kesit 1



**Şekil 3.2 :** Parsel 1 – 1 Kesiti uygulaması

### 3.3.2 Parsel 1 – kesit 2

Zemin çivili duvarın imal edileceği zemin profili bölüm 3.2'de tanımlanan kontrolsüz dolgudur.

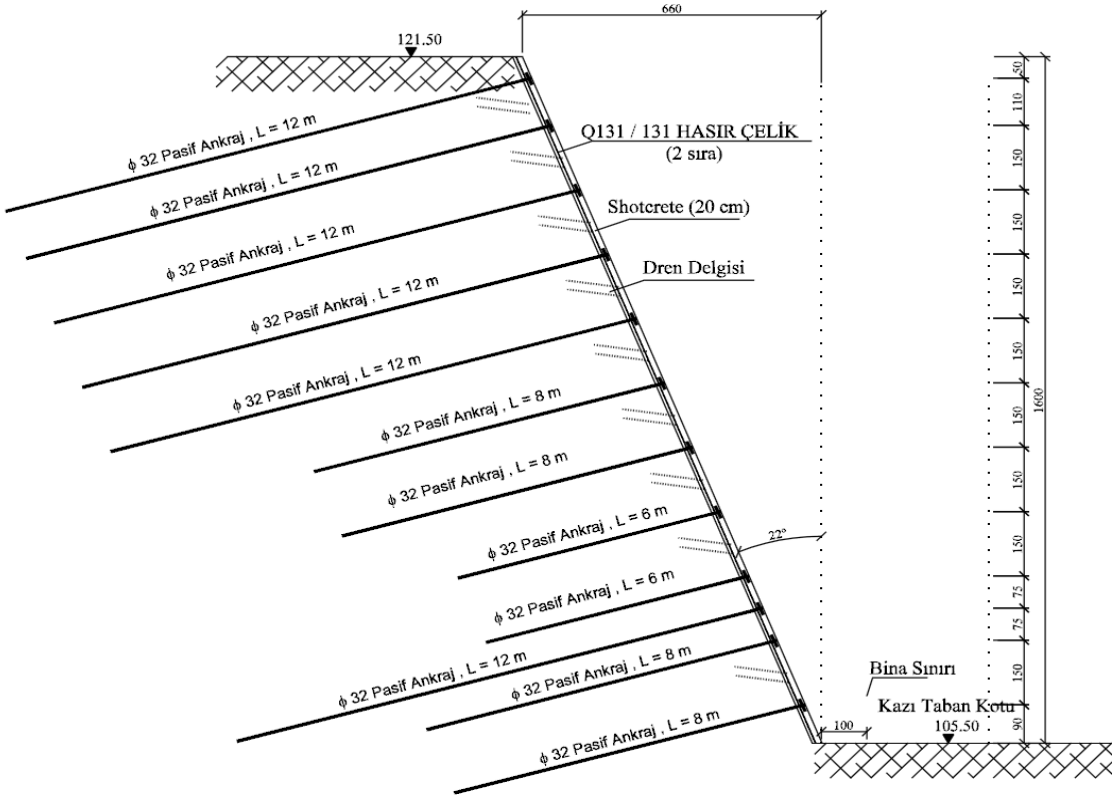
Kazı derinliğinin 16 m, parsel ve yapı sınırı arasındaki mesafe uygun şekilde kullanılarak duvarın düşeyle yaptığı açı 22° kullanılmıştır. Zemin çivili duvarlarda eğimin artması hafriyat ve geri dolgu maliyetlerini arttıran bir tercih olsa da zemin hakkındaki yetersiz bilgi sebebiyle güvenli tarafta kalmaya çalışan bir tasarım seçilmiştir.

Zemin çivisinin yatayla yaptığı açı i = 15°, delgi çapı $D_{DH}$ = 110 mm, çivi $\phi$ 32 donatı olarak seçilmiştir. Zemin çivisi yatay aralığı $S_h$ = 1,5 m, düşey aralığı $S_v$ = 1,5 m, çivi boyları 12 m – 6 m arasında değişmektedir.

Yüzey kaplaması 20 cm kalınlığında 2 sıra hasır çelikle imal edilmiştir, çivi başlığı olarak 200 x 200 x 15 mm St 52 plaka kullanılmıştır.

Drenaj sistemi, uzunluğu $l_d$ = 3 m, yatay aralığı $S_{hd}$ = 6 m, düşey aralığı ilk 3 m hariç $S_{vd}$ = 1,5 m, yatayla $i_d$ = 10° açı yapacak şekilde yerleştirilmiş drenlerden oluşmaktadır.

2 kesitine ait detaylı çizimler Şekil 3.3'de, saha uygulamasına ait bir fotoğraf Şekil 3.4'de sunulmuştur.




**Şekil 3.3 :** Parsel 1 – Kesit 2




**Şekil 3.4 :** Parsel 1 – 2 kesitinin uygulaması

### 3.3.3 Parsel 2 – kesit 3

Kesit 3'te toplam kazı derinliği 31,9 m'dir. Zemin profili Çizelge 3.1'de tanımlanmıştır. Sistem ekonomi ve emniyet koşulları değerlendirilerek palyeli olarak çözülmüştür. Palyenin üst kısmında 13,9 m yüksekliğinde zemin çivili istinat duvarı teşkil edilmiş, palyenin alt kısmı 18 m boyunca mini kazık ve 9 sıra öngermeli ankrajlı sistem ile desteklenmiştir.

Bina yaklaşım sınırı, arsa sınırı, kazı ve geri dolgu maliyetleri, uygulama için gerekli çalışma payı değerlendirilerek palye genişliği 3 m seçilmiştir. Bu seçim sonucunda tasarım aşamasında palyenin üst kısmında yer alan zemin çivili duvar palyenin alt kısmında kalan mini kazıklı öngermeli ankrajlı sisteme sürşarj yükü olarak etkitilmiştir.

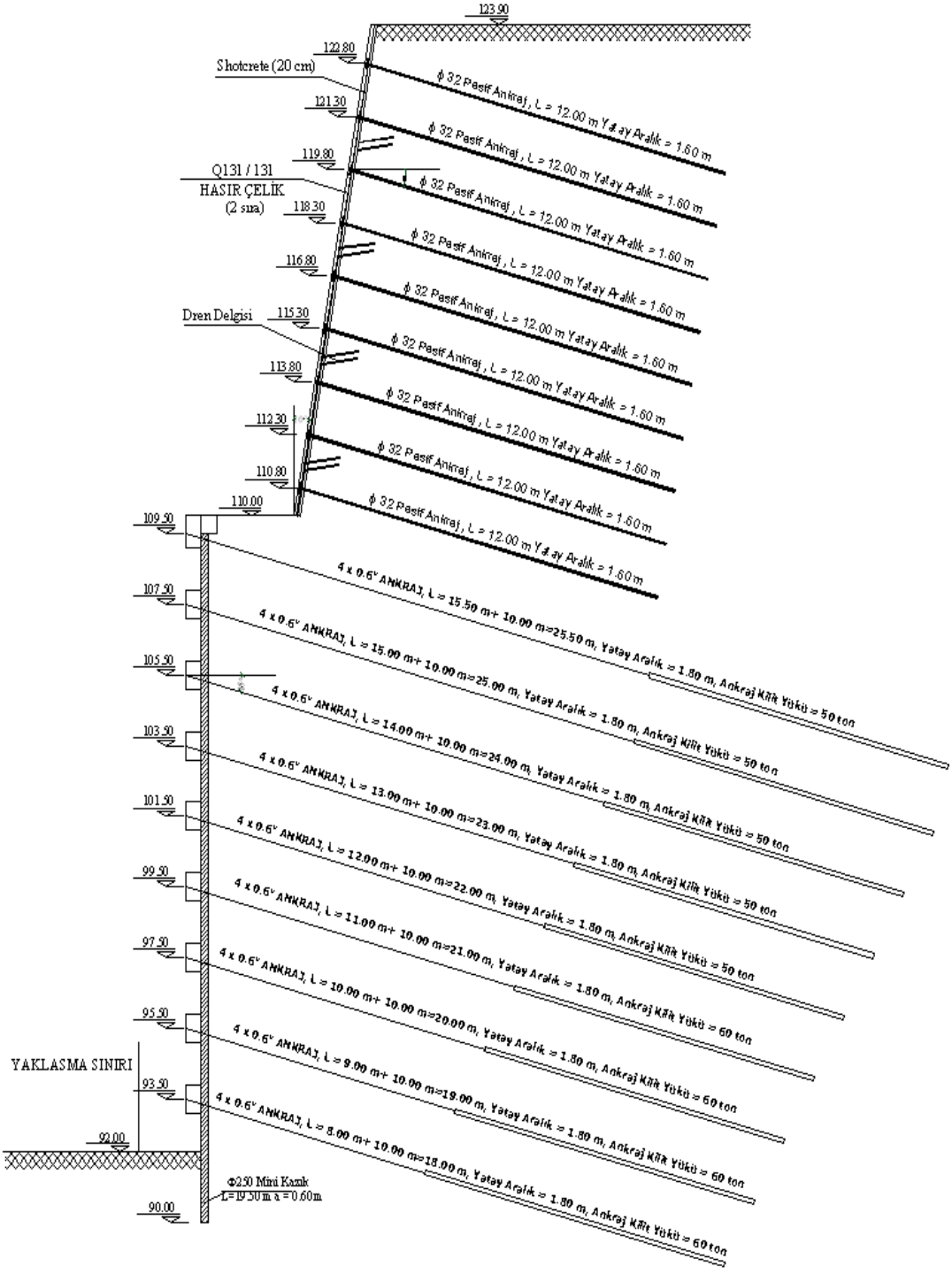
Zemin çivili duvar yüksekliği 13,9 m, duvarın düşeyle yaptığı açı 10°'dir.

Zemin çivisinin yatayla yaptığı açı i = 15°, delgi çapı $D_{DH}$ = 110 mm, çivi $\phi$ 32 donatı olarak seçilmiştir. Zemin çivisi yatay aralığı $S_h$ = 1,5 m, düşey aralığı $S_v$ = 1,5 m, çivi boyları 12 m seçilmiştir.

Yüzey kaplaması 20 cm kalınlığında 2 sıra hasır çelikle imal edilmiştir, çivi başlığı olarak 250 x 250 x 15 mm St 52 plaka kullanılmıştır.

Drenaj sistemi, uzunluğu $l_d$ = 3 m, yatay aralığı $S_{hd}$ = 3 m, düşey aralığı ilk 3 m hariç $S_{vd}$ = 1,5 m, yatayla $i_d$ = 15° açı yapacak şekilde yerleştirilmiş drenlerden oluşmaktadır.

3 kesitine ait detaylı çizimler Şekil 3.5'de saha uygulmasına ait bir fotoğraf Şekil 3.6'da sunulmuştur.




**Şekil 3.5 :** Parsel 2 – Kesit 3



**Şekil 3.6 :** Parsel 2 – 3 kesitinin uygulaması

### 3.3.4 Parsel 2 – kesit 4

Kesit 4'te toplam kazı derinliği 31 m'dir. Zemin profili Çizelge 3.1'de tanımlanmıştır. Sistem ekonomi ve emniyet koşulları değerlendirilerek palyeli olarak çözülmüştür. Palyenin üst kısmında 13 m yüksekliğinde zemin çivili istinat duvarı teşkil edilmiş, palyenin alt kısmı 18 m boyunca mini kazık ve 9 sıra öngermeli ankrajlı sistem ile desteklenmiştir.

Bina yaklaşım sınırı, arsa sınırı, kazı ve geri dolgu maliyetleri, uygulama için gerekli çalışma payı değerlendirilerek palye genişliği 3 m seçilmiştir. Bu seçim sonucunda tasarım aşamasında palyenin üst kısmında yer alan zemin çivili duvar palyenin alt

kısmında kalan mini kazıklı öngermeli ankrajlı sisteme sürşarj yükü olarak etkitilmiştir.

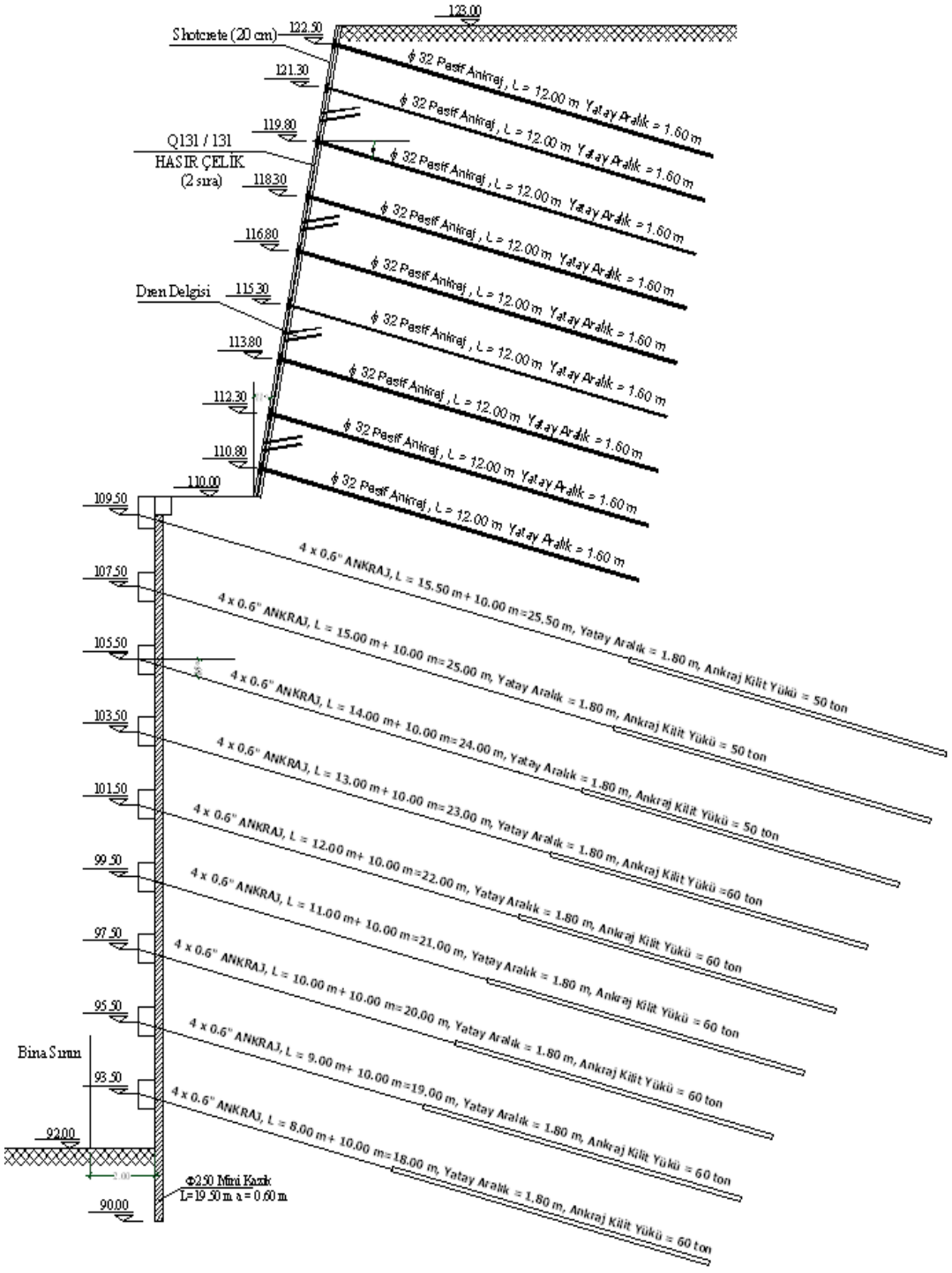
Zemin çivili duvar yüksekliği 13 m, duvarın düşeyle yaptığı açı 11°'dir.

Zemin çivisinin yatayla yaptığı açı i = 15°, delgi çapı $D_{DH}$ = 110 mm, çivi $\phi$ 32 donatı olarak seçilmiştir. Zemin çivisi yatay aralığı $S_h$ = 1,5 m, düşey aralığı $S_v$ = 1,5 m, çivi boyları 12 m seçilmiştir.

Yüzey kaplaması 20 cm kalınlığında 2 sıra hasır çelikle imal edilmiştir, çivi başlığı olarak 250 x 250 x 15 mm St 52 plaka kullanılmıştır.

Drenaj sistemi, uzunluğu $l_d$ = 3 m, yatay aralığı $S_{hd}$ = 3 m, düşey aralığı ilk 3 m hariç $S_{vd}$ = 1.5 m, yatayla $i_d$ = 15° açı yapacak şekilde yerleştirilmiş drenlerden oluşmaktadır.

4 kesitine ait detaylı çizimler Şekil 3.7'de saha uygulmasına ait bir fotoğraf Şekil 3.8'de sunulmuştur.




**Şekil 3.7 :** Parsel 2 – Kesit 4



**Şekil 3.8 :** Parsel 2 – 4 kesitinin uygulaması

### 3.3.5 Parsel 2 – kesit 5

Kesit 5'te toplam kazı derinliği 30,1 m'dir. Zemin profili Çizelge 3.1'de tanımlanmıştır. Sistem ekonomi ve emniyet koşulları değerlendirilerek palyeli olarak çözülmüştür. Palyenin üst kısmında 12,1 m yüksekliğinde zemin çivili istinat duvarı teşkil edilmiş, palyenin alt kısmı 18 m boyunca mini kazık ve 9 sıra öngermeli ankrajlı sistem ile desteklenmiştir.

Bina yaklaşım sınırı, arsa sınırı, kazı ve geri dolgu maliyetleri, uygulama için gerekli çalışma payı değerlendirilerek palye genişliği 3 m seçilmiştir. Bu seçim sonucunda tasarım aşamasında palyenin üst kısmında yer alan zemin çivili duvar palyenin alt kısmında kalan mini kazıklı öngermeli ankrajlı sisteme sürşarj yükü olarak etkitilmiştir.

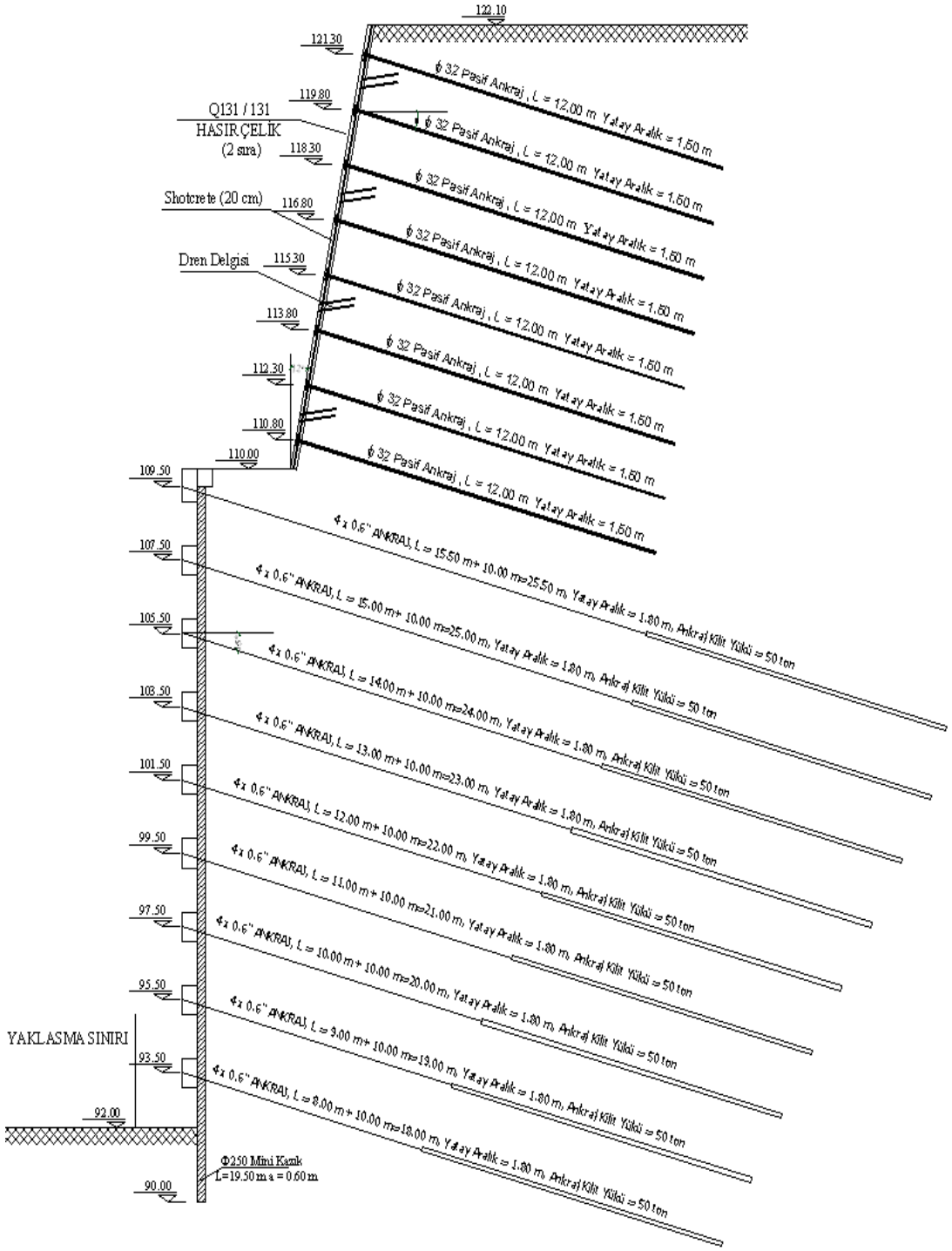
Zemin çivili duvar yüksekliği 12,1 m, duvarın düşeyle yaptığı açı 12°'dir.

Zemin çivisinin yatayla yaptığı açı i = 15°, delgi çapı $D_{DH}$ = 110 mm, çivi $\phi$ 32 donatı olarak seçilmiştir. Zemin çivisi yatay aralığı $S_h$ = 1,5 m, düşey aralığı $S_v$ = 1,5 m, çivi boyları 12 m seçilmiştir.

Yüzey kaplaması 20 cm kalınlığında 2 sıra hasır çelikle imal edilmiştir, çivi başlığı olarak 250 x 250 x 15 mm St 52 plaka kullanılmıştır.

Drenaj sistemi, uzunluğu $l_d$ = 3 m, yatay aralığı $S_{hd}$ = 3 m, düşey aralığı ilk 3 m hariç $S_{vd}$ = 1,5 m, yatayla $i_d$ = 15° açı yapacak şekilde yerleştirilmiş drenlerden oluşmaktadır.

5 kesitine ait detaylı çizimler Şekil 3.9'da saha uygulmasına ait bir fotoğraf Şekil 3.10'da sunulmuştur.




**Şekil 3.9 :** Parsel 2 – Kesit 5



**Şekil 3.10 :** Parsel 2 – 5 kesitinin uygulaması

### 3.4 Zemin Çivili Duvarların Deformasyon Tahimini

Çivi boyu – duvar yüksekliği (L/H) oranı 0,7 ve 1,0 arasında, sürşarj yükünün olmadığı, toplam güvenlik katsayısı 1,50 alınarak yapılan tasarımların duvar üst kotunda oluşması beklenen maksimum deformasyon değerinin hesaplanması için formül (3.1) verilmiştir (FHWA, 2003).

$$\delta_h = \left(\frac{\delta_h}{H}\right)_i xH \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada;

$(\delta_h/H)_i$: zemin koşullarına bağlı olarak Çizelge 3.2'de verilen katsayı

H: duvar yüksekliği

Deformasyon etki alanının yatay büyüklüğü ($D_{DEF}$) ise formül (3.2) ile bulunabilir.

$$\frac{D_{DEF}}{H} = C(1 - \tan\alpha) \qquad \textbf{(3.2)}$$

Burada;

$\alpha$: duvar yüzünün düşeyle yaptığı açı

C: zemin koşullarına bağlı olarak Çizelge 3.2'de verilen katsayı

**Çizelge 3.2 :** Zemin şartlarına bağlı $(\delta_h/H)_i$ ve C değerleri (FHWA, 2003)

| | Ayrışmış Kaya ve Sıkı Zeminler | Kumlu Zeminler | İnce Daneli Zeminler |
|---|---|---|---|
| $(\delta_h/H)_h$ ve $(\delta_h/H)_v$ | 1/1000 | 1/500 | 1/333 |
| C | 1,25 | 0,8 | 0,7 |

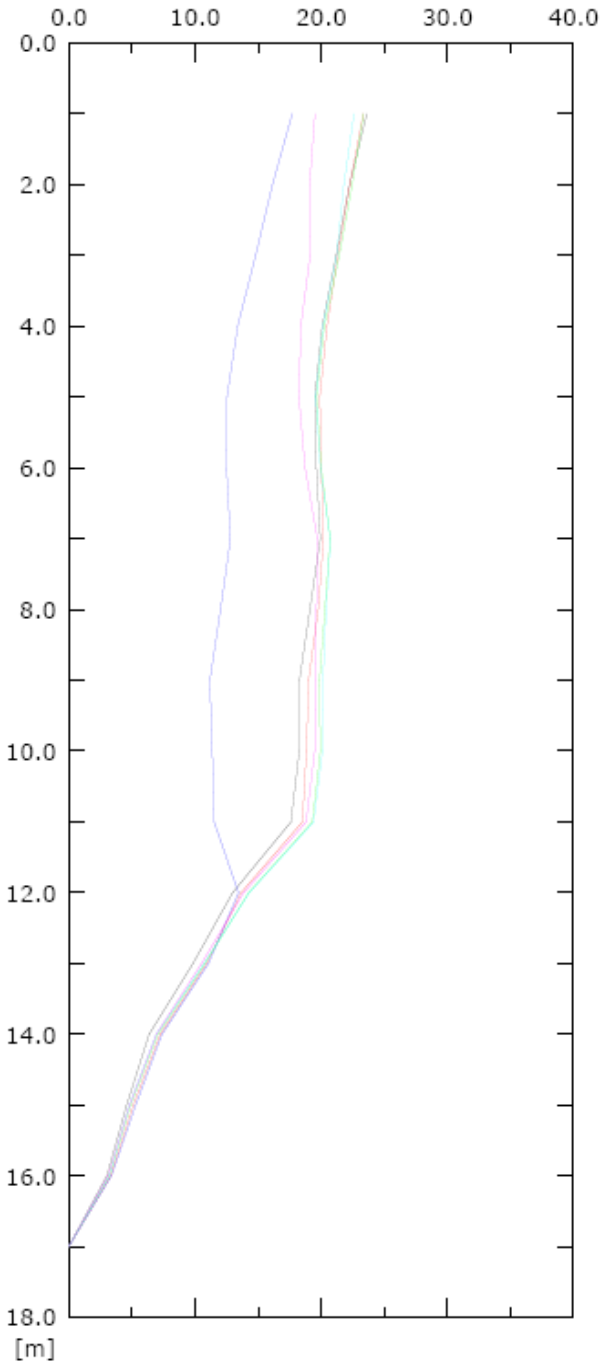
### 3.5 Sahada Oluşan Deformasyonların Gözlenmesi

Sahada kazı süresince oluşacak yatay deplasmanları ölçmek amacı ile kazı öncesinde belirlenen noktalara inklinometreler yerleştirilmiştir. İnklinometreler kazı taban kotundan 3,5 m daha derine inecek şekilde açılan sondaj delgisinin içine oluklu özel boruların yerleştirilmesiyle tesis edilir. Temel kazısına paralel olarak haftalık yatay deplasman ölçümleri yapılır. Aşırı hareket görüldüğünde okuma sıklığı arttırılır. Kazı süresinde ankraj imalatları ya da başka bir dış etken sebebi ile inklonometrenin zarar görmesi ve kullanılamaz duruma gelmesi durumunda ilgili bölgenin yatay deformasyon takibi amacı ile yeni bir inklonometre tesis edilir.

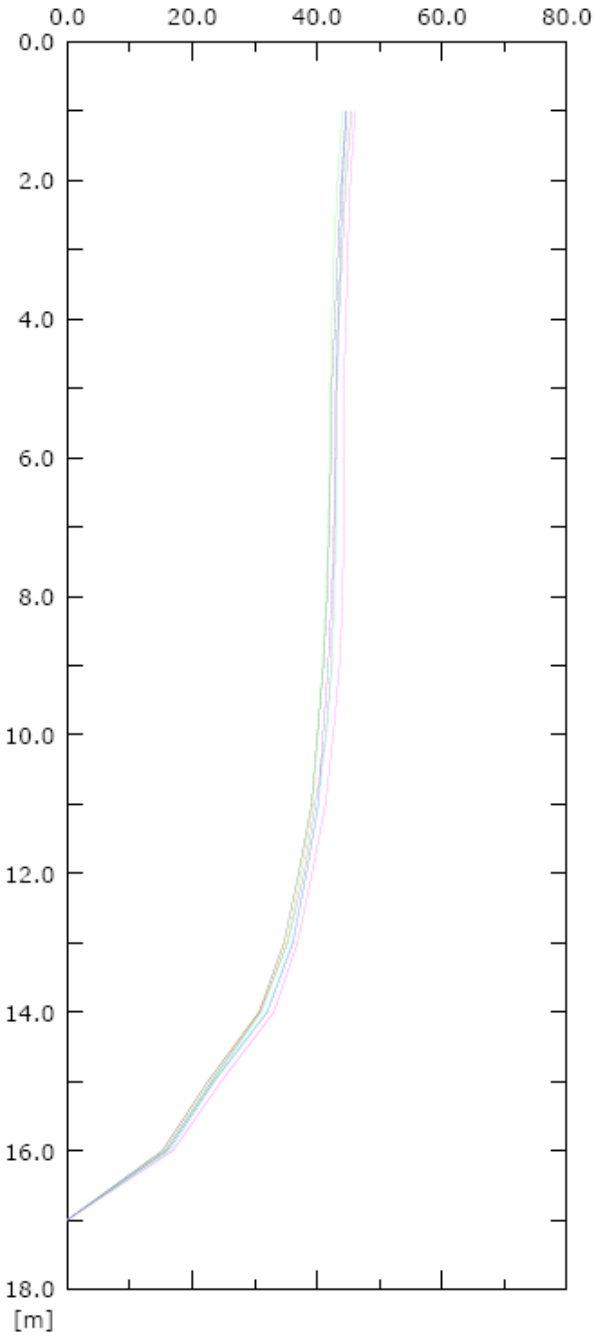
Farklı ekipmanların kullanıldığı durumlarda farklı grafikler elde edilmesi mümkündür. Fakat temel olarak tüm grafiklerde düşey eksen derinliği (m), yatay eksen deplasmanı (mm) göstermektedir. Düşey eksenin sağında kalan pozitif

değerler kazı içine doğru, solunda kalan negatif değerler kazı dışına doğru oluştuğu gözlenen hareketleri idafe etmektedir.

Parsel 1'de 250 m boyundaki cephe boyunca 8 adet inklonometre teşkil edilmiştir. Parsel 1'de incelenen Kesit 1 ve Kesit 2'nin bulunduğu bölgelere denk gelen 7 ve 9 numaralı inklonometre okumaları Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de verilmiştir. Düşey eksen derinliği (m), yatay eksen deplasmanı (mm) göstermektedir.



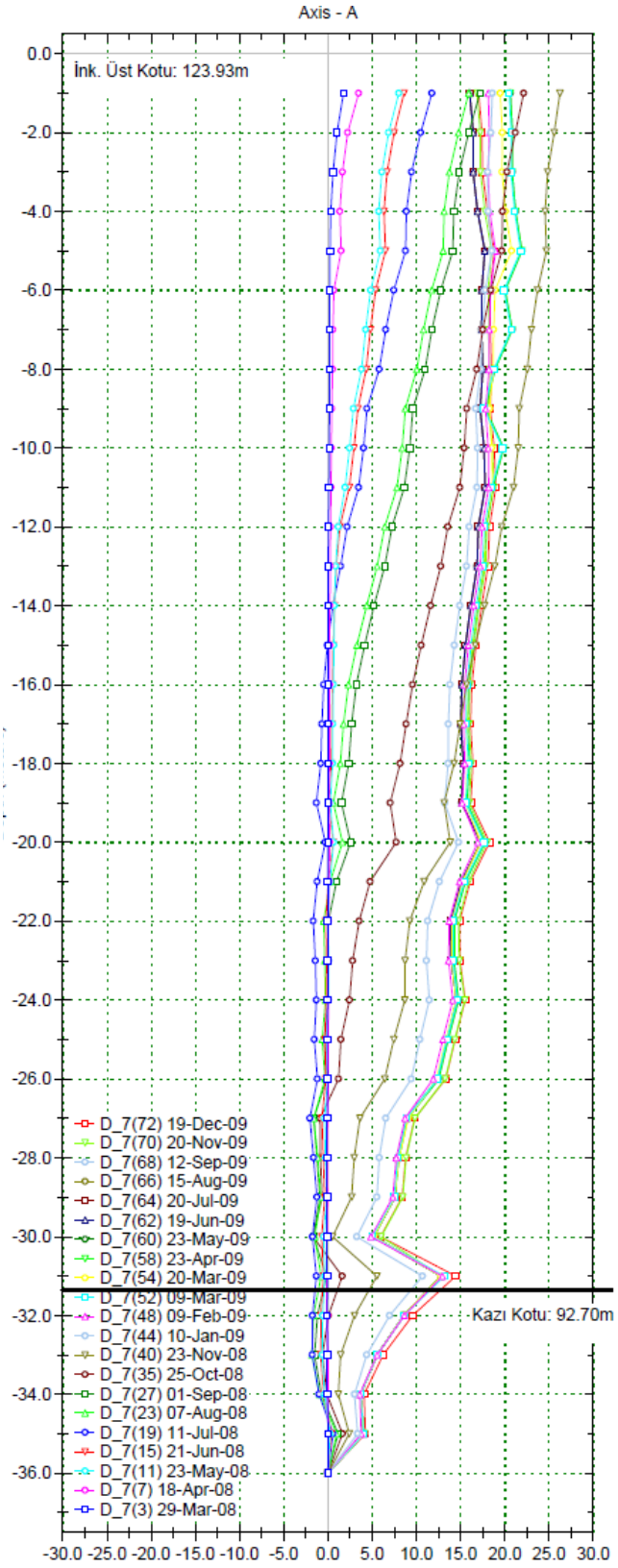

**Şekil 3.11 :** 1 Kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları



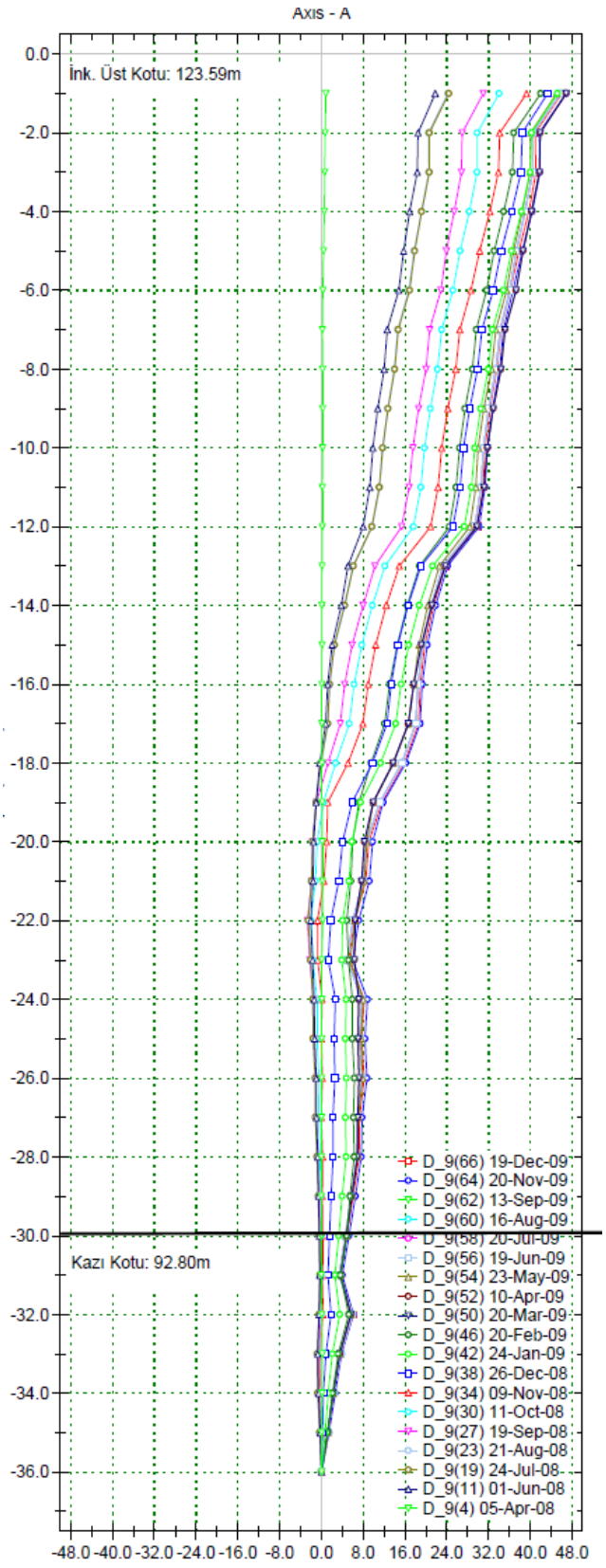

**Şekil 3.12 :** 2 kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları

Parsel 2'de 590 m boyundaki cephe boyunca 13 adet inklonometre teşkil edilmiştir. Parsel 2'de incelenen Kesit 3'ün bulunduğu bölgede yer alan 7 numaralı inklonometrenin 29 Mart 2008 ile 19 Kasım 2009 tarihleri arasındaki deplasman ölçümleri Şekil 3.13'de, Parsel 2 – Kesit 4'ün bulunduğu bölgede yer alan 9 numaralı inklonometrenin 05 Nisan 2008 ile 19 Kasım 2009 tarihleri arasindaki deplasman ölçümleri Şekil 3.14'de ve Parsel 2 – Kesit 5'in bulunduğu bölgede yer alan 10 numaralı inklonometrenin 12 Nisan 2008 ile 19 Kasım 2009 tarihleri arasındaki

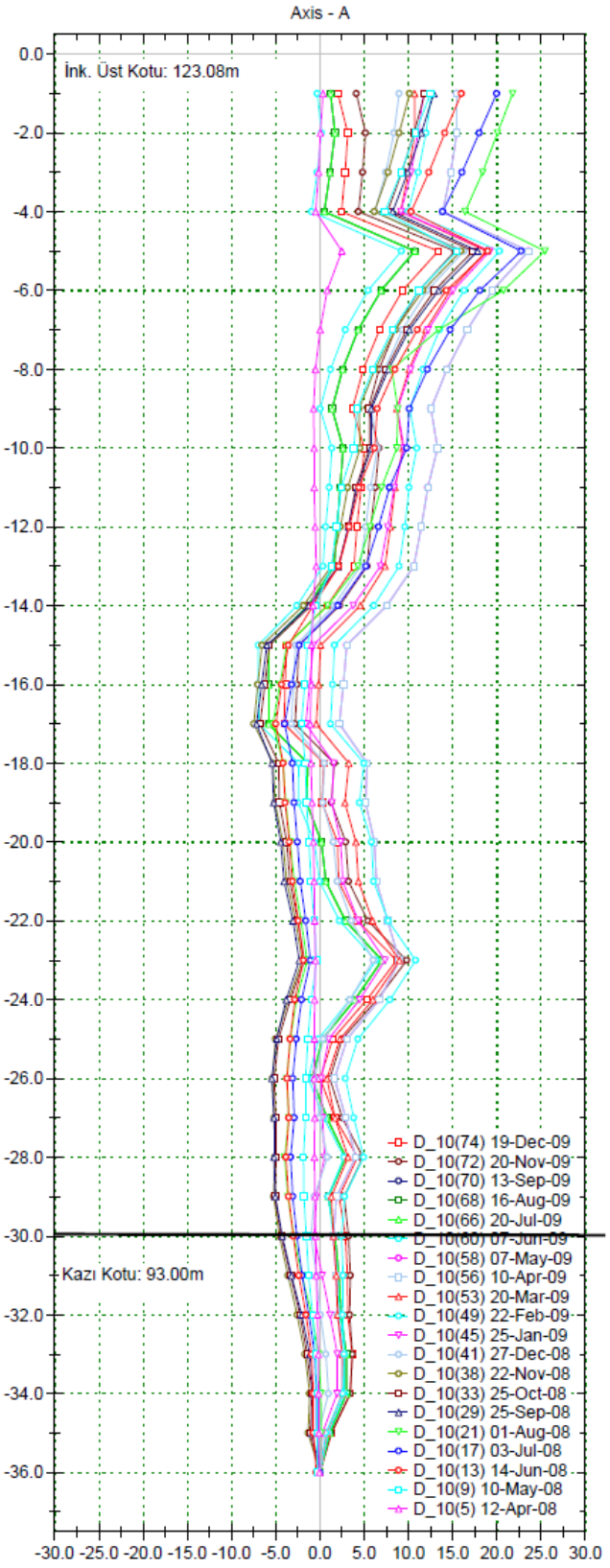
deplasman ölçümleri Şekil 3.15'te verilmiştir. Düşey eksen derinliği (m), yatay eksen deplasmanı (mm) göstermektedir.




**Şekil 3.13 :** 3 kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları




**Şekil 3.14 :** 4 kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları




**Şekil 3.15 :** 5 kesitine ait inklinometre deformasyon okumaları

Çizelge 3.3'de kazı yükseklikleri ve sahada belirlenen deformasyon değerleri verilmiştir. Parsel 2'de deformasyon değerleri palye kotu +110 m'nin üzerinde imal edilen zemin çivili duvarlar ve kazının tamamlandığı durum için ayrı ayrı verilmiştir.

H: kazı derinliği, m

$\delta_h$: yatay deformasyon, mm

$P_r$: $\delta_h$/H, performans oranı

**Çizelge 3.3 :** Kazı yükseklikleri ve sahada belirlenen deformasyon değerleri

| Parsel No | Kesit No | H (m) | $\delta_h$ (mm) | $P_r$ ($10^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 15,4 | 24 | 1,6 |
| | 2 | 16,0 | 42 | 2,6 |
| 2 | 3 | 13,9 | 12 | 0,9 |
| | | 31,9 | 26 | 0,8 |
| | 4 | 13,0 | 24 | 1,8 |
| | | 31,0 | 46 | 1,5 |
| | 5 | 12,1 | 22 | 1,8 |
| | | 30,1 | 25 | 0,8 |

### 3.6 Performans Değerlendirmesi

2 parselde incelenen 5 zemin çivili duvar kesiti için temel tasarım parametreleri ve performans parameterleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Tasarım parametreleri;

H: kazı derinliği. m

$S_h$: yatay çivi aralığı

$S_v$: düşey çivi aralığı

S: $S_h$ x $S_v$. birim çivi alanı. $m^2$

L: ortalama çivi boyu. m

$\eta$: L/S. çivi yoğunluğu. birim alandaki ortalama çivi boyu. $m/m^2$

$L_r$: L/H. boy oranı

$B_r$: DxL/S. bağ oranı

$S_r$: $D^2$/S. dayanım oranı

Performans parametreleri;

$\delta_h$: yatay deformasyon. mm

$P_r$: $\delta_h$/H. performans oranı

**Çizelge 3.4 :** Zemin çivili duvarların tasarım ve performans değerlendirmesi

| Parsel No | Kesit No | H (m) | S (m²) | L (m) | $\delta_h$ (mm) | $\eta$ (m/m²) | $L_r$ | $B_r$ | $S_r$ ($10^{-3}$) | $P_r$ ($10^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 15,4 | 2,25 | 9,6 | 24 | 4,3 | 0,6 | 0,5 | 5,4 | 1,6 |
| | 2 | 16,0 | 2,25 | 9,6 | 42 | 4,5 | 0,6 | 0,5 | 5,4 | 2,6 |
| 2 | 3 | 13,9 | 2,25 | 12,0 | 12 | 5,2 | 0,8 | 0,6 | 5,4 | 0,9 |
| | 4 | 13,0 | 2,25 | 12,0 | 24 | 5,2 | 0,9 | 0,6 | 5,4 | 1,8 |
| | 5 | 12,1 | 2,25 | 12,0 | 22 | 5,2 | 1,0 | 0,6 | 5,4 | 1,8 |

Yatay ve düşey aralıkları 1,5 m olan çivilerin birim alanı 2,25 $m^2$'dir.

Parsel 1'de imal edilen duvar yükseklikleri 15,4 m ve 16,0 m, kullanılan ortalama çivi boyu 9,6 m'dir. Parsel 2'de imal edilen zemin çivili duvar yükseklikleri 13,9 m ve 12,1 m arasındadır fakat toplam kazı derinliği yaklaşık 32 m olduğu için zemin çivisi boylarında optimizasyon yapılmamış tek çivi boyu 12,0 m olarak kullanılmıştır.

Sözkonusu inşaat sahaları için hazırlanan zemin raporlarında diğer kazı sahalarından hafredilmiş grovak kökenli çalık bloklarından oluşmuş kontrolsüz dolgu olarak tanımlanan zemin benzer çivi tasarım geometrisine sahip olsa da deformasyon davranışı farklılık göstermektedir. 13 m ile 16 m arasında değişen kazı yüksekliklerinde 12 mm ile 42 mm arasında değişen deformasyon ölçümü gözlenmiştir.

Performans oranının % 0,09 ile % 0,26 arasında değiştiği görülmektedir.

Sahada ölçülen yatay deplasman değerlerinin kazı yüksekliğine oranı değerlendirildiğinde kabuledilebilir sınırlar içerisinde kalındığı görülmektedir.

### 3.7 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Deformasyon Analizi

Limit denge analizine dayalı tasarım yöntemleri sistem deformasyonlarının tahmini hakkında eksiklikler içermektedir. Ayrıca zemin ve zemin çivisi arasında mobilize olacak direnç kuvveti için gerekli deformasyon miktarı da belirlenememektedir (FHWA, 2003). Bu durumda detaylı sonuç alabilmek için sayısal modelleme yöntemlerinden sonlu elemanlar programları kullanılması uygun olmaktadır.

Bu tez kapsamında Parsel 1 ve Parsel 2'de yeralan 1, 2, 3, 4 ve 5 kesitleri sonlu elemanlar programı Plaxis ile analiz edilmiştir. Sahada ölçülen yatay deformasyonları elde etmek amacı ile şev geometrisi, malzeme modelleri, kazı ve imalat aşamaları saha koşullarını en iyi yansıtacak şekilde tanımlanmaya çalışılmıştır.

Ölçülen yatay deformasyon, şev geometrisi, malzeme özellikleri, kazı ve imalat aşamalarını gerçeğe en yakın şekilde modellemek amacı ile sonlu analiz programı PLAXIS kullanılmıştır. Düzlem gerilme koşulları altında 15 düğüm noktalı sonlu eleman ağı modele esas seçilmiştir. Model sınır koşulları olarak standart durum seçilmiş bu şekilde modelin yanlarda x yönünde hareket etmesine izin verilmezken düşeyde hareketi gözlenmiş, alt sınırda ise hiçbir yönde harekete izin verilmemiştir. Başlangıç durum için gerilme dağılımı yerçekimi yüklemesi ile dengelenmiştir. Zemin modeli olarak "hardening soil model" seçilmiştir. Zemin özellikleri EK-1'de detaylı olarak verilmiştir.

Zemin çivileri sadece tek yönlü çekme kuvveti taşıyabilen geotekstil elemanlar olarak modellenmiştir. Zemin çivilerine ait uzama rijitliği, EA, formül (3.3) ile hesaplanmıştır.

$$(EA)_{çivi} = E_{çelik} x A_{çelik} + E_{enj} x A_{enj} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Burada;

$E_{çelik}$: Çeliğin elastisite modülü

$A_{çelik}$: Donatı kesit alanı

$E_{enj}$: Enjeksiyon elastisite modülü

$A_{enj}$: Enjeksiyon kesit alanı

Delgi çapı D = 100mm, çivi donatısı ϕ 32 olması durumunda bu değer formül (3.4) ile hesaplanmıştır.

$$(EA)_{çivi} = 200\frac{\pi}{4}32^2 + 20\frac{\pi}{4}\left(10^2 - 32^2\right) = 330000\,kN \qquad \textbf{(3.4)}$$

1,50m aralıklarla yerleştirilen zemin çivileri için hesapta kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

**Çizelge 3.5 :** Zemin çivisi malzeme parametreleri

| No. | Tanım | EA [kN/m] |
|---|---|---|
| 1 | Zemin çivisi | 200000,00 |

Püskürtme beton yüzey kaplaması kalınlığı d = 0,20m olan elastik plak eleman olarak modellenmiştir. Eğilme rijitliği, EI, ve normal rijitliği, EA, formül (3.5) ve (3.6) ile hesaplanmıştır.

$$(EA)_{kaplama} = E_{pb}xA_{pb} \qquad \textbf{(3.5)}$$

$$(EI)_{kaplama} = E_{pb}xI_{pb} \qquad \textbf{(3.6)}$$

Burada;

$E_{pb}$: Püskürtme beton elastisite modülü

$A_{pb}$: Püskürtme beton elastisite modülü

$I_{pb}$: Püskürtme beton atalet momenti

Bu denklemler kullanılarak (3.7) ve (3.8)'de püskürtme beton elemanın eğilme rijitliği ve normal rijitliği hesaplanmıştır. Bu hesaplarda kaplama içerisine yerleştirilmiş hasır çelik donatının etkisi gözönüne alınmamıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

$$(EA)_{kaplama} = 30x10^6\,x0{,}20x1{,}0 = 6x10^6\,kN/m \qquad \textbf{(3.7)}$$

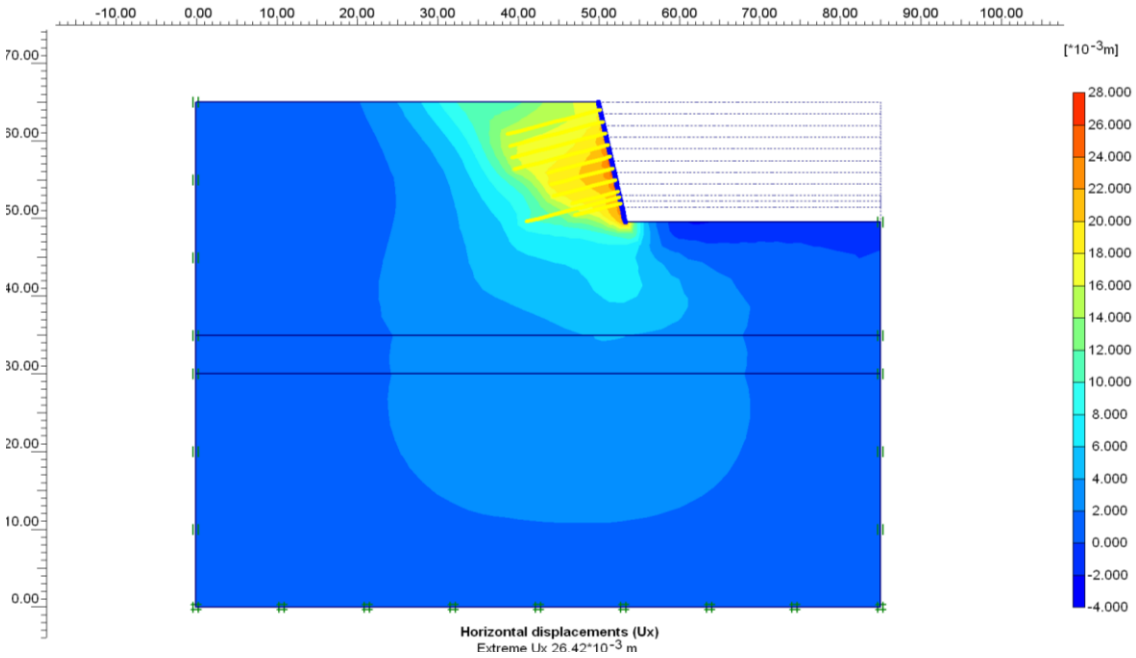
$$(EI)_{kaplama} = 30x10^6\,x\frac{0{,}20^3\,x1{,}0}{12} = 20000\,kN/m^2 \qquad \textbf{(3.8)}$$

**Çizelge 3.6 :** Zemin çivisi malzeme parametresi

| No. | Tanım | EA [kN/m] | EI [kNm²/m] | ω [kN/m/m] | ν [-] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Kaplama | 6E6 | 20000,00 | 1,40 | 0,20 |

### 3.7.1 Parsel 1 – 1 kesiti analiz sonuçları

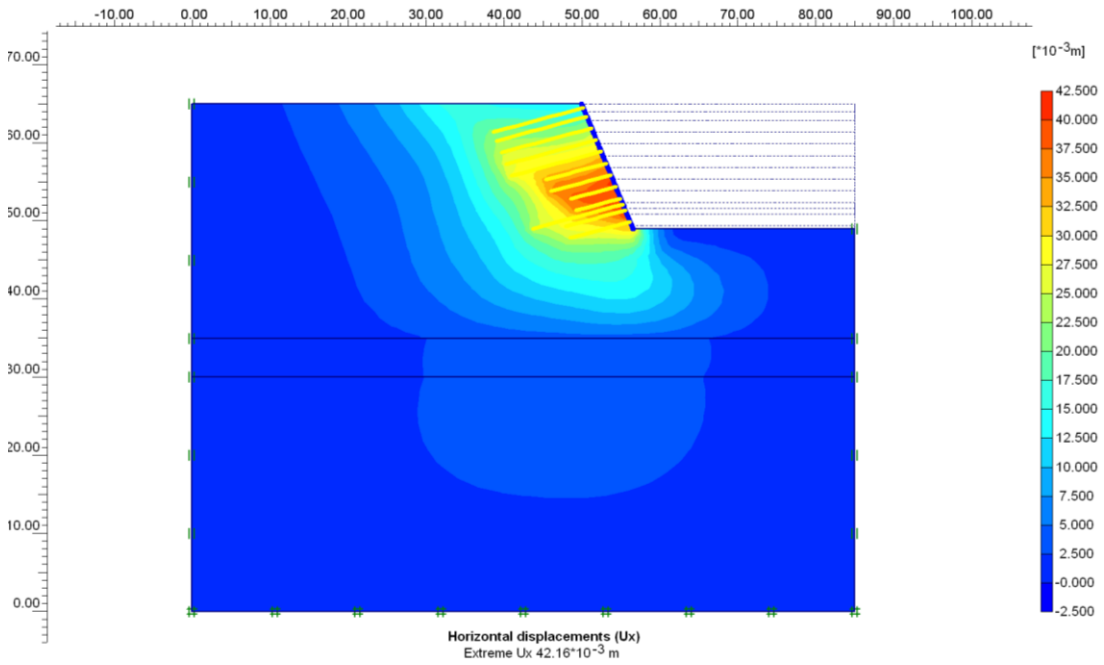
Kesit özellikleri 3.3.1'de verilen 1 kesitinin sonlu elemanlar analiz programı Plaxis ile analizi sonucunda elde edilen deformasyon grafiği Şekil 3.16'da verilmiştir. Sahada ölçülen deformasyon 24 mm'dir. Sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda elastisite modülü 27500 kPa için hesaplanan deformasyon değeri 26 mm bulunmuştur.




**Şekil 3.16 :** 1 kesiti deformasyon grafiği

### 3.7.2 Parsel 1 – 2 kesiti analiz sonuçları

Kesit özellikleri 3.3.2'de verilen 2 kesitinin sonlu elemanlar analiz programı Plaxis ile analizi sonucunda elde edilen deformasyon grafiği Şekil 3.17'de verilmiştir. Sahada ölçülen deformasyon 42 mm'dir. Sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda elastisite modülü 12500 kPa için hesaplanan deformasyon değeri 42 mm bulunmuştur.

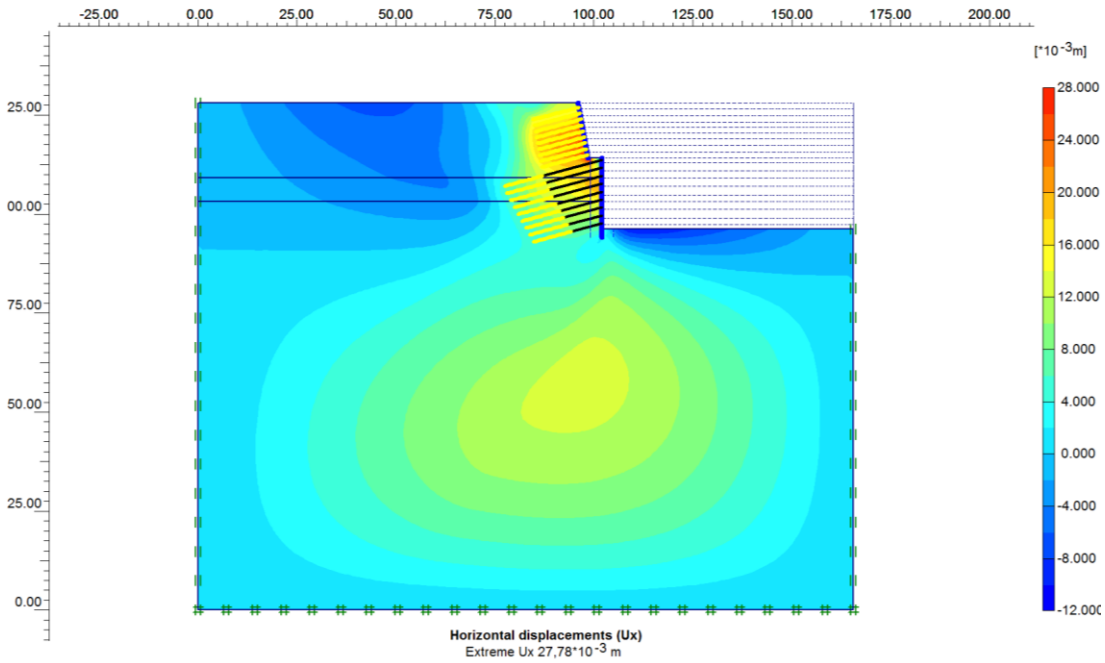



**Şekil 3.17 :** 2 kesiti deformasyon grafiği

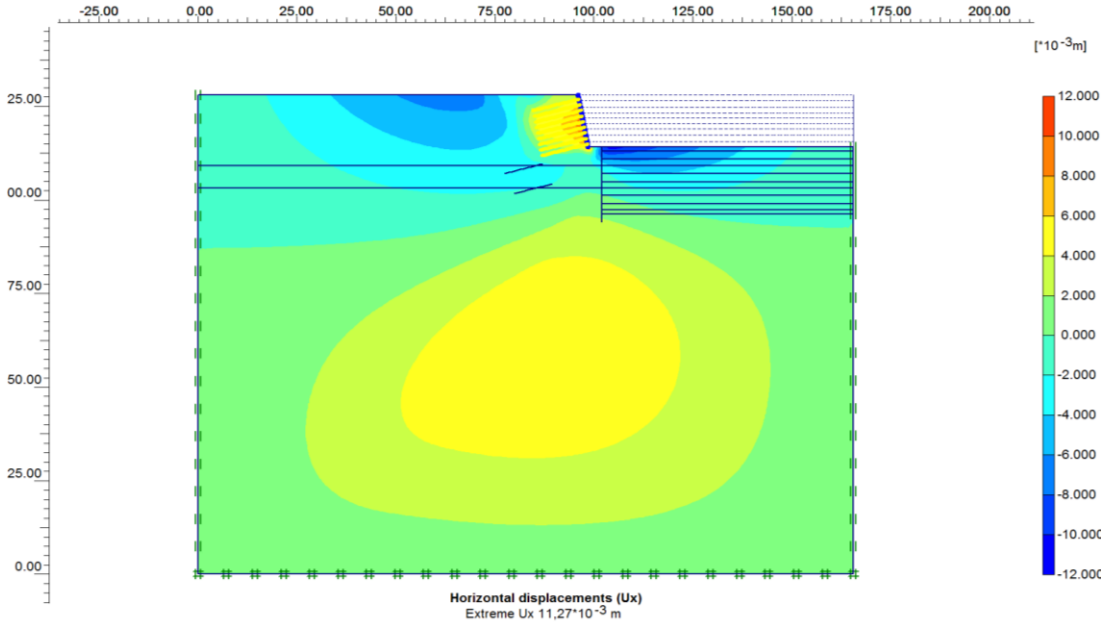
### 3.7.3 Parsel 2 – 3 kesiti analiz sonuçları

Kesit özellikleri 3.3.3'de verilen 3 kesitinin sonlu elemanlar analiz programı Plaxis ile analizi sonucunda toplam kazı derinliği 31,9 m için elde edilen deformasyon grafiği Şekil 3.18'de verilmiştir. Yatay deplasmanların en büyük değerine zemin çivili duvar ardında ulaşıldığı görülmektedir. Toplam kazı yüksekliği için sahada ölçülen deformasyon 26 mm'dir. Sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda elastisite modülü 30000 kPa için hesaplanan deformasyon değeri 28 mm bulunmuştur.

Şekil 3.19'da palye kotunun üzerinde imal edilen 13,9 m yüksekliğindeki zemin çivili duvarın yatay deformasyon grafiği sunulmuştur. Bu durum için farklı çözüm yapılmamış, deformasyon grafiği aynı sonlu elemanlar programı çözümünün ilgili imalat kademesi modellinin sonuçlarından alınmıştır. Zemin çivili duvar için sahada ölçülen deformasyon 12 mm'dir. Sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda elastisite modülü 30000 kPa için hesaplanan deformasyon değeri 21 mm bulunmuştur.




**Şekil 3.18 :** 3 kesiti 31,9 m kazı derinliği için deformasyon grafiği



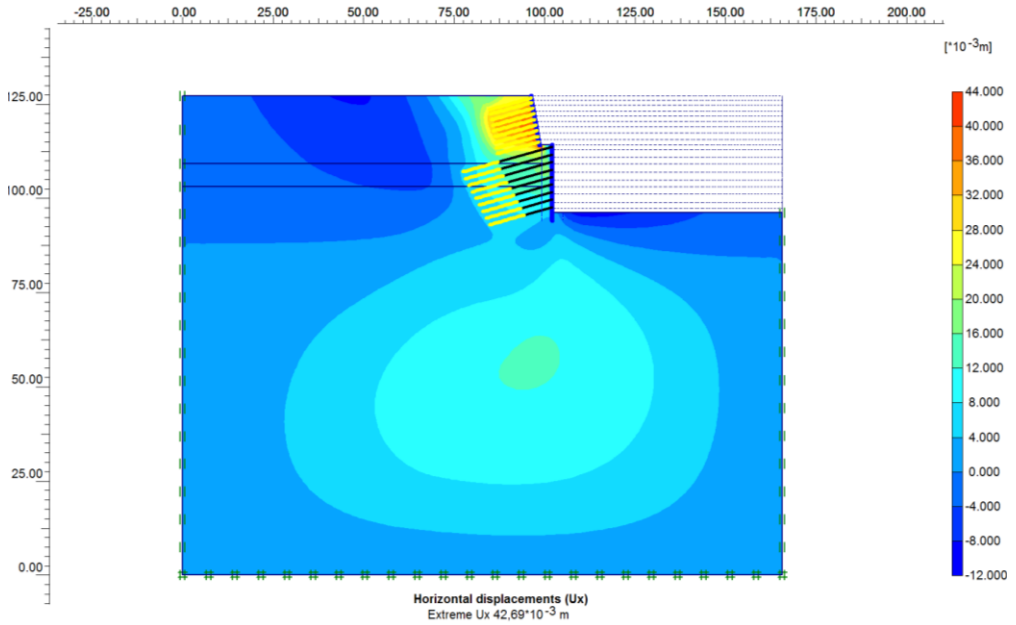

**Şekil 3.19 :** 3 kesiti 13,9 m kazı derinliği zemin çivili duvar için deformasyon grafiği

### 3.7.4 Parsel 2 – 4 kesiti analiz sonuçları

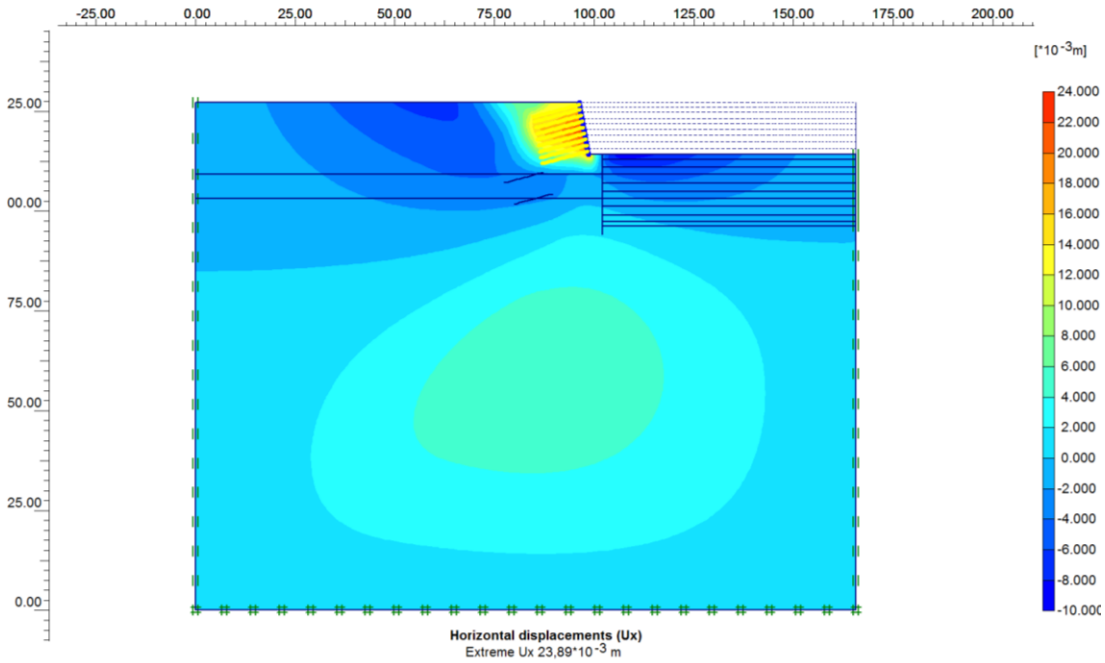
Kesit özellikleri 3.3.4'te verilen 4 kesitinin sonlu elemanlar analiz programı Plaxis ile analizi sonucunda toplam kazı derinliği 31,0 m için elde edilen deformasyon grafiği Şekil 3.20'de verilmiştir. Yatay deplasmanların en büyük değerine zemin çivili duvar ardında ulaşıldığı görülmektedir. Toplam kazı yüksekliği için sahada

ölçülen deformasyon 46 mm'dir. Sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda elastisite modülü 10000 kPa için hesaplanan deformasyon değeri 43 mm bulunmuştur.

Şekil 3.21'de palye kotunun üzerinde imal edilen 13,0 m yüksekliğindeki zemin çivili duvarın yatay deformasyon grafiği sunulmuştur. Bu durum için farklı çözüm yapılmamış, deformasyon grafiği aynı sonlu elemanlar programı çözümünün ilgili imalat kademesi modellinin sonuçlarından alınmıştır. Zemin çivili duvar için sahada ölçülen deformasyon 24 mm'dir. Sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda elastisite modülü 10000 kPa için hesaplanan deformasyon değeri 24 mm bulunmuştur.




**Şekil 3.20 :** 4 kesiti 31,0 m kazı derinliği için deformasyon grafiği

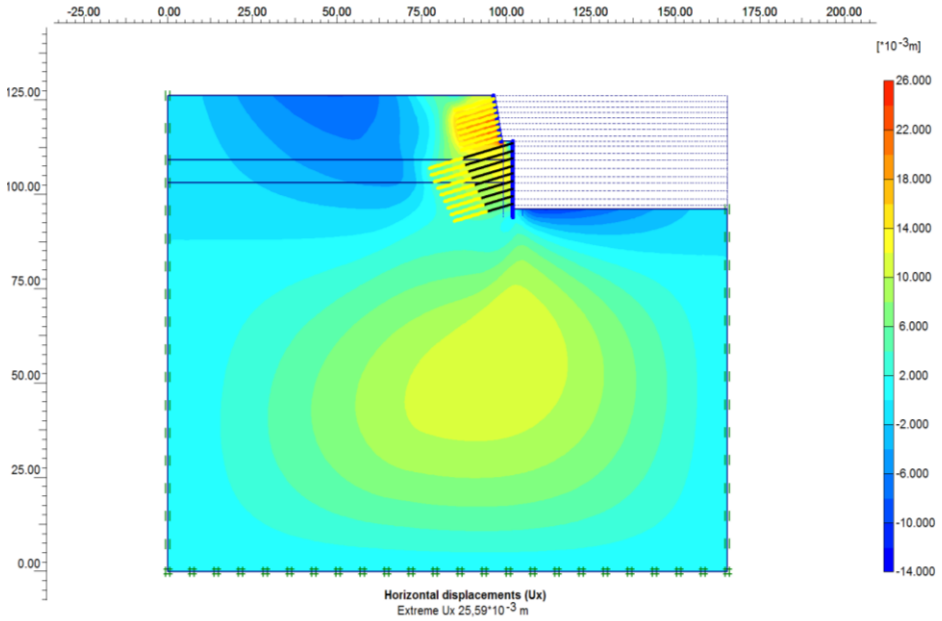



**Şekil 3.21 :** 4 kesiti 13,0 m kazı derinliği zemin çivili duvar için deformasyon grafiği

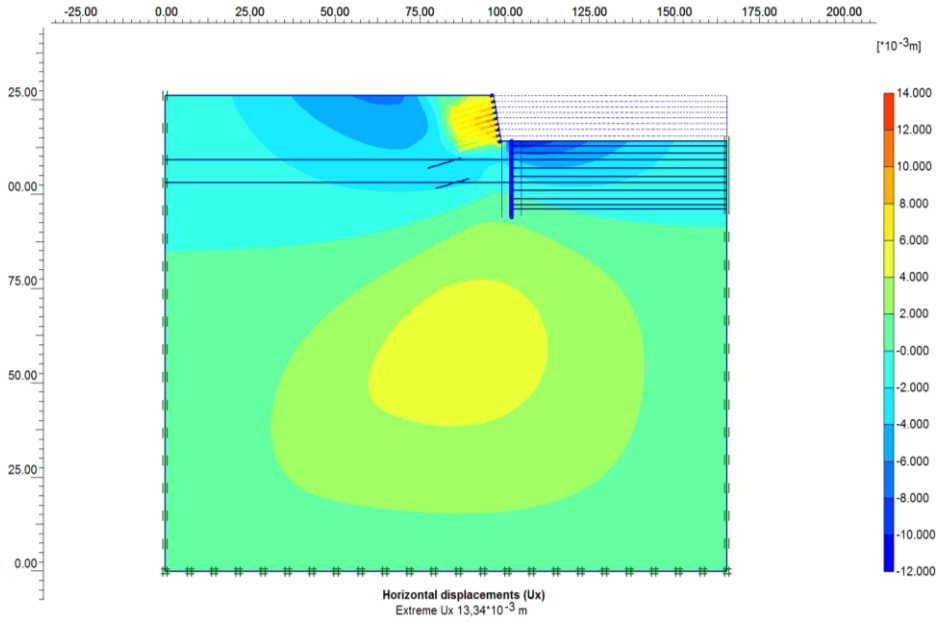
### 3.7.5 Parsel 2 – 5 kesiti analiz sonuçları

Kesit özellikleri 3.3.5'te verilen 5 kesitinin sonlu elemanlar analiz programı Plaxis ile analizi sonucunda toplam kazı derinliği 30,1 m için elde edilen deformasyon grafiği Şekil 3.22'de verilmiştir. Yatay deplasmanların en büyük değerine zemin çivili duvar ardında ulaşıldığı görülmektedir. Toplam kazı yüksekliği için sahada ölçülen deformasyon 25 mm'dir. Sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda elastisite modülü 13000 kPa için hesaplanan deformasyon değeri 25 mm bulunmuştur.

Şekil 3.23'de palye kotunun üzerinde imal edilen 12,1 m yüksekliğindeki zemin çivili duvarın yatay deformasyon grafiği sunulmuştur. Bu durum için farklı çözüm yapılmamış, deformasyon grafiği aynı sonlu elemanlar programı çözümünün ilgili imalat kademesi modellinin sonuçlarından alınmıştır. Zemin çivili duvar için sahada ölçülen deformasyon 22 mm'dir. Sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda elastisite modülü 13000 kPa için hesaplanan deformasyon değeri 13 mm bulunmuştur.




**Şekil 3.22 :** 5 kesiti 30,1 m kazı derinliği için deformasyon grafiği




**Şekil 3.23 :** 5 kesiti 12,1 m kazı derinliği zemin çivili duvar için deformasyon grafiği

### 3.8 Analiz Sonuçları

İksa projesi hesapları limit denge analizlerini temel alan Servis Yük Tasarım (SLD) yöntemi ile projelendirilmiştir. Tasarıma esas alınan zemin mukavemet parametreleri ve sahada ölçülen deplasman değerleri kullanılarak zeminin deformasyon parametreleri geri analiz ile elde edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen zemine ait elastisite modülü değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

H: kazı derinliği, m

$\delta_h$: sahada ölçülen yatay deformasyon, mm

$\delta_h'$: hesaplanan yatay deformasyon, mm

E: zemin elastisite modülü, kPa

**Çizelge 3.7 :** Analiz sonuçları

| Parsel No | Kesit No | H (m) | $\delta_h$ (mm) | E (kPa) | $\delta_h'$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 15,4 | 24 | 27500 | 26 |
| | 2 | 16,0 | 42 | 12500 | 42 |
| 2 | 3 | 13,9 | 12 | 30000 | 11 |
| | | 31,9 | 26 | | 28 |
| | 4 | 13,0 | 24 | 10000 | 24 |
| | | 31,0 | 46 | | 43 |
| | 5 | 12,1 | 22 | 13000 | 13 |
| | | 30,1 | 25 | | 25 |

Yükseklikleri 12,1 m ile 16,0 m arasında değişen zemin çivili duvarların yatay deformasyonları 12 mm ile 42 mm arasında değişmektedir. +92,0 kotunda ulaşıldığında, zemin çivili duvarların altında 18,0 m derinliğindeki kazı tamamlanmış olmaktadır. Son kazı kotunda yapılan ölçümlerde meydana gelen yatay deformasyon artışının 3 mm ile 22 mm arasında değiştiği görülmektedir.

Yapılan analizlerde zemine ait elastisite modülü değerlerinin 10000 kPa ile 30000 kPa arasında değiştiği görülmektedir.

# 4. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında derin kazı destek sistemlerinden biri olan zemin çivili esnek istinat duvarları hakkında bilgi verilmiştir. Yöntemin diğer sistemlere göre ekonomik oluşu, imalat süresinin kısalığı ve özellikle şehir içi imalatlarda küçük ekipmanla çalışma olanağı vermesi gibi avatajlarına değinilmiştir. Yeni yarma ve dolgu şevlerinin imalatları yanı sıra mevcut şevlerin onarımlarında kullanılabilmerinden bahsedilmiştir.

Daha sonra zemin çivili duvarların gelişimi, zemin çivili duvarları oluşturan elemanlar, inşaat adımları, zemin çivili duvarların davranışları ve tasarım hesapları anlatılmıştır.

Ayrıca anlatılan hesap yöntemlerin kullanılarak projelendirilmiş saha uygulamalarının tasarım ve performans değerlendirmeleri detaylı olarak incelenmiştir. İnceleme sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

İstanbul şehrinin kontrolsüz büyümesi sırasında temel kazısı hafriyat atıklarının kontrolsüz ve denetimsiz şekilde depolandığı sahalar oluşmuş, zamanla bu sahaların şehir merkezinde kalması sebebiyle inşaat alanı olarak kullanılması söz konusu olmuştur. Bu sebeple kalınlığı 30 m'ye varan kontrolsüz dolgu birimde iksa sistemlerinin uygulanması gerektedir.

Bu tez çalışmasında şehir merkezinde bulunan iki komşu parselde kontrolsüz dolgu birim içinde inşa edilmiş zemin çivili istinat duvarlarına ait vaka analizleri incelenmiştir. İki parsel arasındaki mesafe Parsel 1'in batısında ve Parsel 2'nin doğusundan geçen 30 m genişliğindeki karayoludur.

İnşaat alanında yapılan sondajlarda kalınlığı 30m'ye varan SPT N = 7 – R olan kontrolsüz depolanmış grovak kökenli çakıl dolgu tabakası gözlenmiştir. Bu kontrolsüz yığın muhtemelen diğer inşaat temel kazılarında hafredilen grovak kökenli atık malzemeden kuruludur.

Parsel 1 ve Parsel 2'de yer alan 5 kesitinin hesapları Servis Yük Tasarım (SLD) yöntemi ile projelendirilmiştir. Proje tasarım ve performans parametreleri değerlendirmesi yapılmış, sonuçlar Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Tasarım parametreleri;

H: kazı derinliği, m

S: $S_h$ x $S_v$, birim çivi alanı, $m^2$

L: ortalama çivi boyu, m

$\eta$: L/S, çivi yoğunluğu. birim alandaki ortalama çivi boyu, $m/m^2$

Performans parametreleri;

$\delta_h$: yatay deformasyon, mm

$P_r$: $\delta_h$/H, performans oranı

**Çizelge 4.1 :** Zemin çivili duvarların tasarım ve performans değerlendirmesi

| Parsel No | Kesit No | H (m) | S ($m^2$) | L (m) | $\delta_h$ (mm) | $\eta$ ($m/m^2$) | $P_r$ ($10^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 15,4 | 2,25 | 9,6 | 24 | 4,3 | 1,6 |
| | 2 | 16,0 | 2,25 | 9,6 | 42 | 4,5 | 2,6 |
| 2 | 3 | 13,9 | 2,25 | 12,0 | 12 | 5,2 | 0,9 |
| | 4 | 13,0 | 2,25 | 12,0 | 24 | 5,2 | 1,8 |
| | 5 | 12,1 | 2,25 | 12 | 22 | 5,2 | 1,8 |

Parsel 1'de temel inşaatı için gerekli kazı yüksekliği zemin çivili duvar ile desteklenmiştir. Kesit 1 ve Kesit 2'de toplam iksa yüksekliği zemin çivili duvar yüksekliğine eşit olduğu için zemin çivili duvar yarı yüksekliğinden itibaren aşağıda kalan zemin çivilerinin boyları kısaltılmış, bu şekilde ortalama çivi uzunluğu ve çivi yoğunluğu optimize edilmiştir.

Parsel 2'de ise toplam kazı yükseklikleri 31,9 m, 31,0 ve 30,1 m'dir. İksa projesinde palyeli sistem tercih edilmiş, 13,9 m, 13,0 m ve 12,1 m yüksekliğinde zemin çivili duvar ve 18,0 m yüksekliğindeki mini kazık ve öngermeli ankrajlardan oluşan iki farklı kazı destek sisteminin birlikte çalıştırılması ile çözülmüştür. Toplam kazı derinliğinin fazla olması nedeni ile zemin çivisi boyları kısaltılmadan uygulanmıştır.

Performans değerlendirilmesinde ortalama çivi uzunluğu ve çivi yoğunluğunun Kesit 3, Kesit 4 ve Kesit 5'te fazla çıkmasının sebebi bu şekilde açıklanabilir.

Limit denge analizine dayalı tasarım yöntemleri sistem deformasyonlarının tahmini hakkında eksiklikler içermektedir. Bu sebeple analizlerde sayısal modelleme yöntemlerinden sonlu elemanlar programı Plaxis kullanılmıştır.

Tasarıma esas alınan zemin mukavemet parametreleri ve sahada ölçülen deplasman değerleri kullanılarak zeminin deformasyon parametreleri geri analiz ile elde edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen zemine ait elastisite modülü değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Sahada ölçülen yatay deformasyonları elde etmek amacı ile şev geometrisi, malzeme modelleri, kazı ve imalat aşamaları saha koşullarını en iyi yansıtacak şekilde tanımlanmaya çalışılmıştır.

**Çizelge 4.2 :** Analiz sonuçları

| Parsel No | Kesit No | H (m) | $\delta_h$ (mm) | E (kPa) | $\delta_h'$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 15,4 | 24 | 27500 | 26 |
| | 2 | 16,0 | 42 | 12500 | 42 |
| 2 | 3 | 13,9 | 12 | 30000 | 11 |
| | | 31,9 | 26 | | 28 |
| | 4 | 13,0 | 24 | 10000 | 24 |
| | | 31,0 | 46 | | 43 |
| | 5 | 12,1 | 22 | 13000 | 13 |
| | | 30,1 | 25 | | 25 |

Yapılan geri analiz sonucunda Bölüm 3.2'de tanımlanan zemine ait elastisite modülü değerlerinin 10000 kPa ile 30000 kPa değerleri arasında değiştiği belirlenmiştir.

Sahada ölçülen ve sonlu elemanlar programı ile hesaplanan yatay deplasman değerlerinin kazı yüksekliğine oranı ile hesaplanan kazı performans değerleri Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

H: kazı derinliği, m

$\delta_h$: sahada ölçülen yatay deformasyon, mm

$P_r$: $\delta_h/H$, sahada ölçülen deformasyon – performans oranı

$\delta_h'$: hesaplanan yatay deformasyon, mm

$P_r'$: $\delta_h/H$, hesaplanan yatay deformasyon – performans oranı

**Çizelge 4.3 :** Sahada ölçülen ve hesaplanan yatay deformasyon – performans değerlendirmesi

| Parsel No | Kesit No | H (m) | $\delta_h$ (mm) | $P_r$ ($10^{-3}$) | $\delta_h'$ (mm) | $P_r'$ ($10^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 15,4 | 24 | 1,6 | 26 | 1,7 |
| | 2 | 16,0 | 42 | 2,6 | 42 | 2,6 |
| 2 | 3 | 13,9 | 12 | 0,9 | 11 | 0,8 |
| | | 31,9 | 26 | 0,8 | 28 | 0,9 |
| | 4 | 13,0 | 24 | 1,8 | 24 | 1,8 |
| | | 31,0 | 46 | 1,5 | 43 | 1,4 |
| | 5 | 12,1 | 22 | 1,8 | 13 | 1,0 |
| | | 30,1 | 25 | 0,8 | 25 | 0,8 |

Elde edilen değerlerin kabuledilebilir sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir.

## KAYNAKLAR


**Barley, A.D., Davies, M.C.R. ve A.M. Jones,** 1997. Review of current field testing methods for soil nailing, *Proceedings of the Third International Conference on Ground Improvement Geosystems*, London, United Kingdom, June 5-9.

**Bonazzi, D. ve G. Colombet,** 1984. Reajustement et entretien des ouvrages de talus, *Proc Colloque Renforcement En Place Des Sols Et Des Roches*, Paris, France, November 12-16.

**Bruce, D.A. ve R.A. Jewell,** 1987. Soil Nailing: Application and Practice - Part 2, *Ground Engineering*, **20**, January, pp. 21-23.

**Bruce, D.A. ve R.A. Jewell,** 1986. Soil Nailing: Application and Practice - Part 1, *Ground Engineering*, **19**, December, pp. 10-15.

**Charles, J,A, ve K.S. Watts,** 2001. *Building on fill geotechnical aspects*, Building Research Establishment, Garston, United Kingdom.

**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, September 4-7.

**Hong – Kong Institution of Engineers,** 2003. *Soil nails in loose fill slopes, a preliminary study*, HKIE Geotechnical Division, Hong – Kong.

**Jewell, R.A. ve M.J. Pedley,** 1992. Analysis for soil reinforcement with bending stiffness, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering* **118**, No. 10, pp. 1505-1528.

**Pedley, M.J., Jewell, R.A. ve G.W.E. Milligan,** 1990. A large scale experimental study of soil – reinforcement interaction, *Ground Engineering*, **30**, July/August, pp. 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, October 5-7.

**Phear, A., Dew, C., Ozsoy, B., Wharmby, N.J., Judge, K. ve A.D. Barley,** 2005. *Soil Nailing - Best Practice Guidance*, CIRIA, London, United Kingdom.

**Porterfield, J.A., D.M., Cotton, ve R.J. Byrne,** 1994. *Soil nailing Field Inspectors Manual*, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.

**Rabejac, S. ve P. Toudic,** 1974. Construction of a retaining wall between Versailles – Chantiers, *Revue Generale des Chemins de Fer,* **93,** April, pp. 232-237.

**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, May 27-30.

**Skempton, A.W.,** 1996. Embankments and cuttings on the early railways, *Construction History*, **11**, October, pp 33-39.

**EKLER**

**EK A.1:** Zemin Mukavemet Parametreleri

**Çizelge A.1 :** Zemin parametreleri

| *Hardening Soil* | | 1<br>DOLGU | 2<br>SERT KİL | 3<br>GROVAK |
|---|---|---|---|---|
| Type | | Drained | Drained | Drained |
| $\gamma_{unsat}$ | [kN/m³] | 18,00 | 19,00 | 22,00 |
| $\gamma_{sat}$ | [kN/m³] | 18,00 | 19,00 | 22,00 |
| $k_x$ | [m/day] | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| $k_y$ | [m/day] | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| $e_{init}$ | [-] | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| $e_{min}$ | [-] | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $e_{max}$ | [-] | 999,00 | 999,00 | 999,00 |
| $c_k$ | [-] | 1E15 | 1E15 | 1E15 |
| $E_{50}^{ref}$ | [kN/m²] | 27500,00 | 50000,00 | 80000,00 |
| $E_{oed}^{ref}$ | [kN/m²] | 27500,00 | 50000,00 | 80000,00 |
| power (m) | [-] | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| $c_{ref}$ | [kN/m²] | 10,00 | 1,00 | 10,00 |
| $\varphi$ | [°] | 30,00 | 33,00 | 38,00 |
| $\psi$ | [°] | 0,00 | 3,00 | 0,00 |
| $E_{ur}^{ref}$ | [kN/m²] | 82500,00 | 150000,00 | 240000,00 |
| $\nu_{ur}^{(nu)}$ | [-] | 0,200 | 0,200 | 0,200 |
| $p^{ref}$ | [kN/m²] | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| $c_{increment}$ | [kN/m²] | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $y_{ref}$ | [m] | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $R_f$ | [-] | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| $T_{strength}$ | [kN/m²] | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $R_{inter}$ | [-] | 0,80 | 0,80 | 1,00 |
| $\delta_{inter}$ | [m] | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

VESİKALIK FOTO

**ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Armağan Simge CESUR

**Doğum Yeri ve Tarihi:** İstanbul, 01.01.1983

**Adres:**

**Lisans Üniversite:** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

**Yayın Listesi:**