

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Yüksek lisans derslerim ve tez çalışmam süresince yol gösterici olan, olumlu tavrıyla beni cesaretlendiren, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak yol gösterip farkındalık kazandıran çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU'na teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olduklarını hissettiren, aldığım kararları her zaman destekleyen eşim İrem SÜLÜN KUL'a, annem Nurcan KUL'a, babam Mehmet Salih KUL'a ve kardeşim Ömer KUL'a sonsuz şükranlarımı, sevgilerimi ve saygılarımı sunarım.

Özellikle tez çalışma dönemimde ihtiyacım olan süreklilik ve kararlılık duygularımı pekiştiren, mensubu olmaktan da gurur duyduğum, Türk Polis Teşkilatı'na minnet duyduğumu belirtmek isterim.

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Palyeli Toprakarme Duvarın Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Parametrik Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06.03.2023

Furkan KUL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	iii
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SEMBOLLER DİZİNİ	xiv
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2 Toprakarme.....	2
1.2.1. Henri Vidal’e Göre Toprakarme.....	2
1.2.1.1. Donatı ve Toprak Arasındaki Sürtünme	3
1.2.1.2. Zemindeki Gerilmelerin Hesaplanması ve Donatı	7
1.2.1.3. Toprakarme Kuramı	16
1.2.1.4. Toprakarmenin Özellikleri ve Mühendislik Problemleri.....	23
1.2.2. Karayolları Teknik Şartnamesi’ nde Toprakarme	25
1.2.3. Toprakarme Yapı Kullanım Alanları ve Uygulamaları	26
1.2.5. Toprakarme Yapıların Deprem Davranışı	27
1.2.6. Toprakarme Sistemin Avantaj ve Dezavantajları	29
1.4. Toprakarme Dayanma Yapılarının Tasarım Ölçütleri.....	30
1.4.1. Giriş	30
1.4.2. Donatı	30
1.4.3. Donatı Gerilmeleri.....	31
1.4.4. Göçme Modları.....	33
1.4.4.1. İç Stabilite.....	33
1.4.4.2. Dış Stabilite	34
1.4.5. Yükleme Koşulları.....	36
1.4.6. Su Etkisi.....	36
1.4.7. Tasarım Aşamaları.....	37
1.4.7.1. Gömme Derinliği.....	38

1.4.7.2. Düşey Donatı Aralıkları.....	39
1.4.7.3. Donatı Uzunluğu	40
1.4.7.4. Yatay Toprak İtkisi ve Düşey Gerilme.....	40
1.4.7.5. Dış Stabilite	42
1.4.7.5.1 Taban Kayma Tahkiki	42
1.4.7.5.2. Devrilme Tahkiki.....	44
1.4.7.5.3. Taşıma Gücü Tahkiki	46
1.4.7.5.4. Genel Stabilite	47
1.4.7.5.5. Sismik Kontrol.....	47
1.4.7.6. İç Stabilite.....	49
1.4.7.6.1. Donatılarda Çekme Kuvvetleri ve Şerit Kırılma Tahkiki.....	49
1.4.7.6.2. Kopma Tahkiki	52
1.4.7.6.3. Sismik Kuvvetler Etkisinde İç Stabilite Kontrolü	54
1.4.8. Oturma	56
1.4.9. Zemin İyileştirmesi.....	57
1.5. Palyeli (Çok Katlı) Toprakarme Dayanma Yapılarının Tasarımı	58
1.5.1. Giriş	58
1.5.2. Palyeli Toprakarme Yapılar.....	59
1.5.2.1. Palyeli Toprakarme Yapıların Tasarımı	60
1.5.2.1.1. Ön Tasarım	60
1.5.2.1.2. Saha Araştırmaları	61
1.5.2.1.3. Taşıma Gücü Kontrolü	63
1.5.2.4. Yatay Deformasyonlar.....	63
1.5.2.5. Düşey Deformasyonlar	63
1.5.2.2. Palyeli Toprakarme Yapıların İmalatı	64
1.5.2.2.1. Dolgu	64
1.5.2.2.2. Palye Genişliği (Set-back).....	65
1.5.2.2.3. Drenaj	66
1.5.2.3. Tarihsel Gelişim	67
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	69
2.1. Palyeli Toprakarme Nümerik Modelinin Oluşturulması	69
2.2. Duvar Yüksekliğinin Etkisini İncelemek İçin Yapılan Analizler.....	71
2.3. Zemin Deformasyon Modülünün Etkisini İncelemek İçin Yapılan Analizler	71
2.4. Palye Genişliğinin Etkisini İncelemek İçin Yapılan Analizler.....	72

3. BULGULAR	73
3.1. Duvar Yüksekliğinin Duvarın Davranışına Etkisi.....	73
3.2. Temel Zemini Elastisite Modülünün Duvarın Davranışına Etkisi	74
3.3. Palye Genişliğinin Duvarın Davranışına Etkisi.....	76
4.SONUÇLAR.....	79
5. KAYNAKLAR.....	81



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

PALYELİ TOPRAKARME SİSTEMİN DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

Furkan KUL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU
2023, 80 Sayfa

Bu çalışmada, toprakarme sistem ile palyeli toprakarme duvarların genel özellikleri detaylı bir şekilde anlatılmış, avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir.

Ayrıca, tezin ana konusu olan palyeli toprakarme duvarların tasarımında yapı yüksekliğinin, elastisite modülünün ve palye genişliğinin etkisinin değerlendirilmesi amacıyla farklı yükseklik ve deformasyon modülü ve palye genişlikleri seçilerek Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda tasarlanan toprakarme duvardaki maksimum deplasman mesafesi ve şeritlere etkileyen eksenel kuvvetlerin değişimi gözlenmiştir.

Sonuç olarak; yapının yüksekliğinin artmasının sistemdeki deplasmanların ve şeritlere etkileyen eksenel kuvvetlerin artmasına sebebiyet verdiği, temel zemininin elastisite modülündeki değişimin sistemdeki maksimum deplasmanda ve şeritlere etkileyen eksenel kuvvetlerde büyük değişiklikler ortaya çıkarmadığı, palye mesafesindeki artışın ise sistemdeki deplasmanların ve şeritlere etkileyen eksenel kuvvetlerin azalmasına sebebiyet verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Palyeli toprakarme duvar, Duvar yüksekliği, Elastisite modülü, Palye genişliği, Donatı eksenel kuvvetleri

Master Thesis

SUMMARY

PARAMETRIC INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF THE MULTI-TIERED
REINFORCED SOIL RETAINING WALL WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

Furkan KUL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Erol ŞADOĞLU
2023, 80 Pages

In this study, the general features of the reinforced soil retaining walls and the multi-tiered reinforced soil retaining walls are discussed in detail, advantages and disadvantages are examined.

In addition, in order to evaluate the effect of wall height, elasticity modulus and offset distance on the design of multi-tiered reinforced soil, which is the main subject of the thesis, different height and elasticity modulus and offset distance were selected and analyzes were made with the Plaxis 2D finite element program. As a result of the analysis, the maximum displacements in the walls and the variation of the axial forces acting on the reinforcements were determined.

As a result; It has been determined that the increase in the height of the structure causes the displacements of the walls and the axial forces acting on the reinforcements to increase, the change of the elasticity modulus in the bedrock does not cause significant changes in the maximum displacement in the system and the axial forces acting on the strips, and the increase in the offset distance causes the displacements in the system and the axial forces acting on the reinforcements to decrease.

Kew Words: Multi-tiered reinforced earth wall, Height of wall, Modulus of elasticity, Offset distance, Axial forces of reinforcements

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Donatı elemanlarıyla temas halindeki taneciklerin gösterimi	4
Şekil 2. Taneciklerin sahip olduğu F_2 ve F_1 gerilmelerinin gösterilmesi	4
Şekil 3. F_2 ve F_1 gerilmesine sahip iki nokta arasının dl olarak isimlendirilmesi	5
Şekil 4. Zemindeki gerilmenin donatı düzlemine dik hali.....	5
Şekil 5. Toprakarme sistemde donatılar	5
Şekil 6. Donatı tabakaları	6
Şekil 7. Zemin küreleri	7
Şekil 8. Gerilmeye maruz kalan zemin parçacığı	8
Şekil 9. N_1 ve N_2 basınç kuvvetleri altındaki zemin küpü ve Mohr dairesi	8
Şekil 10. N_1 ve N_2 basınç kuvvetleri altındaki zemin küpü	9
Şekil 11. N_1 ve N_2 basınç kuvvetleri altındaki zemin küpü	9
Şekil 12. N_1 hareket ettiğinde Mohr dairesi oluşumu.....	10
Şekil 13. Temel küpün genişleme eğilimi	10
Şekil 14. Basınç kuvvetlerinin $i \cdot N_1$ 'e eşit olması durumunda Mohr dairesi	10
Şekil 15. Toprakarmeyi A ve B olarak bölen S yüzeyi	12
Şekil 16. S yüzeyinin toprakarme sistemini bölmesi sonucu oluşan dS	12
Şekil 17. dS üzerindeki R_1 kuvveti ve ϕ açısı.....	13
Şekil 18. R_1 ve F sonucu ortaya çıkan R_2	13
Şekil 19. Gerilmelerin elastiklik teorisi ile hesaplanması	13
Şekil 20. Herhangi bir M noktasındaki hayali gerilmelere karşılık gelen Mohr çemberi ...	14
Şekil 21. Elastik deformasyon sırasındaki taneciklerin kayması	15
Şekil 22. Ek basınç kuvveti dahilindeki Mohr çemberi.....	15
Şekil 23. Kavisli şekle sahip paneller.....	17
Şekil 24. Yüzeyde temel dikdörtgenler modeli	18
Şekil 25. Ölçekli model	18
Şekil 26. i değerindeki düzeltme	19
Şekil 27. Eksenlerin şekil değiştirmesi.....	19
Şekil 28. Şeritlerin yerleşimi	20
Şekil 29. Toprak istinat duvarı	21
Şekil 30. Eğimli arazide toprakarme duvarın şematik gösterimi	21

Şekil 31. Platform-Destekleyici Duvar.....	22
Şekil 32. Prefabrike teknikler ile inşa edilen toprakarme duvar.....	23
Şekil 33. Toprakarme duvarda takviye şeritler.....	23
Şekil 34. Büyük bir güvenlik faktörü ile inşa edilmiş çok yüksek bir duvar	24
Şekil 35. İç stabilite: İçsel dinamik kuvvetlerin dağıtılması	28
Şekil 36. Uzayamayan donatıya sahip sistemlerde gerilme çizgisi	31
Şekil 37. Uzayabilen donatıya sahip sistemlerde gerilme çizgisi.....	32
Şekil 38. Farklı metotlarda maksimum gerilme hattı	33
Şekil 39. Dış stabilite için göçme modları.....	35
Şekil 40. Toprakarme sistemde su basıncı	37
Şekil 41. Toprakarme sistem geometrisi ve yükleme koşulları.....	38
Şekil 42. Şevli toprak ve düz topuk için gömme derinlikleri	39
Şekil 43. Dolgu arkasındaki düşey gerilme parametreleri.....	41
Şekil 44. Dış stabilitede Meyerhof formülü	43
Şekil 45. Toprakarme sisteminde devrilme tahkiki	45
Şekil 46. Şerit tiplerine göre yatay gerilme oranı-yükseklik ilişkisi	49
Şekil 47. Şevli duvarlarda donatı gerilmeleri	51
Şekil 48. Sürşarj tipine göre düşey gerilme artışı.....	51
Şekil 49. Yatay yükler altında gerilme artış parametreleri.....	52
Şekil 50. Bağlantı noktalarında şerit kopma tahkiki.....	53
Şekil 51. Uzayamayan donatılı sistemlerde sismik iç stabilite.....	56
Şekil 52. Ön yükleme ve düşey dilatasyon.....	58
Şekil 53. Kompleks geometrili toprakarme sistemler	59
Şekil 54. Palyeli duvarlarda maksimum gerilme çizgisi	60
Şekil 55. Üst duvar etkisinde alt duvarda düşey gerilmeler).....	62
Şekil 56. Cürufu toprakarme dolgusundan kaynaklı deformasyon	65
Şekil 57. Palyeli duvarlarda terasman dolgusu.....	66
Şekil 58. Palye mesafesine göre topuk dolgusu	67
Şekil 59. Palyeli duvar uygulaması	67
Şekil 60. H yüksekliği ve D palye genişliğine sahip toprakarme yapı.....	71
Şekil 61. 14 m yüksekliğinde 2m palye genişliğine sahip toprakarme duvar	72
Şekil 62. 14 m yüksekliğinde 3 m palye genişliğine sahip toprakarme duvar	72

Şekil 63. Farklı yapı yüksekliklerinde yapıdaki tüm şeritlere etkiyen maksimum eksenel kuvvetler	74
Şekil 64. Temel zemini elastisite modülüne bağlı olarak duvar maksimum deplasmanlarının değişimi	75
Şekil 65. Farklı deformasyon modülü altında yapıdaki tüm şeritlere etkiyen maksimum eksenel kuvvetler	76
Şekil 66. Palye genişliğine bağlı olarak duvar maksimum deplasmanlarını değişimi	77
Şekil 67. Farklı palye genişliklerindeki duvarlarda tüm şeritlere etkiyen maksimum eksenel kuvvetler	78



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Duvar altı zemine ait Mohr-Coulomb modeli parametreleri.....	69
Tablo 2. Dolguya ait HSSMALL modeli parametreleri	70
Tablo 3. Nümerik modeldeki donatı ve yüzey kaplama elemanlarına ait parametreler	70
Tablo 4. Farklı yapı yüksekliklerinde ortaya çıkan maksimum deplasman	73



SEMBOLLER DİZİNİ

- a_m : Sisteme etki eden maksimum yatay ivme
- dl : Donatının uzunluğu
- E : Donatıların elastisite modülü
- e : eksantirisite
- F^* : Kopma dayanımı katsayısını
- G_s : Güvenlik şartı
- H' : yapının mekanik yüksekliği
- i : Aktif yanal toprak basıncı katsayısı
- K : Toprak basıncı katsayısı
- K_a : Aktif toprak basıncı katsayısı
- K_{ab} : Coulomb yatay toprak basıncı katsayısı
- L_b : Sürşarj yükünün etkili genişliği
- L_e : Maksimum gerilme çizgisine göre pasif bölgede bulunan şerit mesafesi
- M_d : Devirici moment
- M_{WR} : Tutucu moment
- N : Çubuk etrafındaki ortalama basınç
- P_{AE} : Sismik itki
- P_q : Sürşarj yükleri
- P_b : Aktif kayma kuvveti
- P_r : tutucu kayma kuvveti
- P_{IR} : Sismik kuvvetlerin oluşturduğu atalet kuvveti
- q_{ult} : Zeminin taşıma gücü
- R_c : Kapsama oranı
- S : Zeminde birim alan başına düşen donatıların kesit alanı
- V_q : Tabandaki düşey yöndeki gerilme
- W : toplam düşey gerilme
- ϕ : Çubuk çapı
- λ : Toprak itkisinin düzleme yaptığı açı

ϕ_b : Geri dolgunun efektif içsel sürtünme açısı

σ_v : Yapı tabanındaki uniform düşey gerilme

μ : Toprakarme kitlesi ile taban zemini arasındaki sürtünme katsayısı

$\Delta\sigma_v$: Düşey yüklerin sistemde oluşturduğu düşey gerilme artışıdır



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Toprakarme sisteminin temel çalışma prensibi duvar blokunu meydana getiren seçilmiş dolgu ile donatı amacıyla kullanılan şeritlerin kompozit bir biçimde çalışmasıdır. Zemin ve geogrid, geotekstil, geonet gibi geosentetik malzemelerin birlikte kullanılması sonucunda ortaya çıkarılan toprakarme sistemler; depreme karşı dayanıklı oluşu, kısa sürede inşa edilebilmesi, ekonomik fizibilite, dikkate değer yükseklikte çekme mukavemetine sahip oluşu ve estetik görünümleri sayesinde tercih edilmektedir (Evirgen, Tuncan, Tuncan; 2017).

Rijit dayanma yapılarıyla kıyaslandığında esnek olduğundan farklı oturma davranışı beklenen zeminlerde ön plana çıkar. Bahsedilen bu özelliklere ek olarak yüksek miktarda hacimde dolgu ihtiyacı olan karayolu projeleri ve bu projelerde bulunan menfez, alt geçit, üst geçit gibi sanat yapıları ile yaklaşım yollarındaki mekanik stabilizasyon evreleri toprakarme açısından son derece uygun alanlardır. Tabakalar halindeki dolgunun serme-sıkıştırma işlemi sırasında donatı yerleştirilmesi ve yerleştirilen bu donatıların şevdeki kaplama elemanlarına sabitlenmesi şeklinde inşa edilen toprakarme sistem, son senelerde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından da sıklıkla uygulanmaktadır.

İlk toprakarme dayanma yapısı uygulaması 1972 yılında Amerika Birleşik Devletleri, Güney Kaliforniya'da yapılmıştır (Thomson, Brooks, Cole; 2007). Toprakarme dayanma yapılarının sistematik çözümleme ve tasarım kavramını dünyaya tanıtan ise Henri Vidal isimli Fransız bir mühendistir (Vidal, 1966). Vidal'in çalışmalarını takip eden bu süreçte Fransa'da birkaç toprakarme dayanma yapısı inşa edilmiştir. Ardından Schlosser ve Long, ölçekli modelleme tesislerinin sonuçlarından yola çıkarak radye temeller altındaki toprakarme sistemlerdeki gerilmelerin dağıtılması adına deneysel yöntemlerle elde edilen bir denklem önermiştir (Schlosser, Long; 1974). Akinmusuru ve Akinbolande ise toprakarme ile desteklenen kare biçimindeki temellerin taşıma kapasitesini muhteva eden test sonuçlarını yayınlamıştır (Akinmusuru, Akinbolande; 1981).

Bahsi geçen çalışmalardan da görüleceği üzere toprakarme sadece şev stabilitesini sağlamak amacıyla değil aynı zamanda temel altı aplikasyonlarda da ön plana çıkmaktadır. Bunlara ek olarak betonarme prensibinde olduğu üzere zemine eklenen donatılardan edinilen

Fayda donatının çekme mukavemetine ve zemin ile donatı arasındaki sürtünmenin kesmeye karşı dayanımına bağlıdır (Lee, 1973).

Toprakarme sistem son 35 yılda dünya çapında 60'tan fazla ülkede 7.700.000 m²'nin üzerinde yüzey alanına sahip 23.500' den fazla yapı olarak inşa edilmiştir. Türkiye' de ise son yıllarda otoyollarda kullanılmaya başlanmıştır (Alkaya, Yeşil; 2012).

Toprakarme dayanma yapıları son 20 yılda Türkiye' de 400.000 m²'nin üzerinde inşa edilmiştir. Karayollarında projelerinde özellikle dolgudaki istinat (dayanma) duvarları ile köprü yaklaşım rampaları aplikasyonlarında yaygın olarak yer bulmaktadır. Bunun aksine toprakarme kenar ayak yapıları diğer tipteki uygulamaların toplamına kıyasla çok daha az inşa edilmiştir. Bunun sebebi olarak kenar ayak toprakarme yapıların giriş yüklerini taşıma gerekliliği nedeniyle mühendislerin bu durumu kuşku ile algılaması gösterilebilir. Oysaki, günümüzde inşa edilmiş binin üzerinde toprakarme kenar ayak yapısı bulunmaktadır (Anderson, 2004).

Mevcut tezin içinde genel olarak toprakarme dayanma yapısı olarak ifade edilen sistem, yer yer donatılı zemin duvar, toprakarme istinat duvarı olarak da ifade edilmiştir. Tezin ana konusu palyeli toprakarme dayanma yapısı olsa da klasik toprakarme dayanma yapıları da detaylıca incelenmiştir.

1.2 Toprakarme

1.2.1. Henri Vidal'e Göre Toprakarme

Toprakarme toprak ve donatının birleşiminden oluşur. Toprak terimi taneli toprak ve hafif kohezyon gösteren toprak dahil doğada bulunan tüm zemin biçimlerini, fiziksel veya kimyasal olarak üretilmiş, kapsar.

Toprakarme tüm parçacık boyutlarını içerebilir (alüvyon, kum, taş ve her boyuttaki kaya); prefabrik elemanlardan oluşabilir (örneğin Beton). Donatı kelimesi esas çekme gerilimine dayanan tüm doğrusal bileşenleri tanımlar. Bu bağlamda, toprak, küreye veya küpe benzeyen kompakt şekillere sahip bileşenler kütesidir; sonuç olarak, onları taneler(grains) ve parçacıklar(particles) olarak adlandıracağız. Donatı elemanları ise bir boyutu diğerinden açıkça daha büyük olan uzatılmış elemanlardır.

Zemin mekaniğinde kullanılan açıklamaya göre, tek başına toprak, en azından parçacıklı toprak, kohezif olmayan parçacıklardan oluşur ancak esnek, doğrusal donatının

yatay tabakaları eklendiğinde tüm kütle bir miktar kohezyon sergiler. Bu toprakarme sistemin bütününde geçerlidir.

Toprakarmedeki bu kohezyon, toprak parçacıklarının donatı elemanlarına karşı sürtünmesinden meydana gelir. Taneler ve donatı arasında tüm kütleye kohezyon sağlayan sürtünme yoluyla kuvvet aktarımı vardır.

Buradan kaymadan donatı-tanecik sürtünmesi meydana geldiği çıkarılır, bu yüzden donatı elemanları her zaman bu koşulu karşılayacak şekilde düzenlenmelidir. Donatı üç eksenin de doğrultusu boyunca yerleştirilebildiğinden, toprakarmenin gövdesinin tüm yönlerde kohezyon gösterebildiği kolayca anlaşılabilir. Bu nedenle istenilen şekilde toprakarme yapı inşa etmek mümkündür.

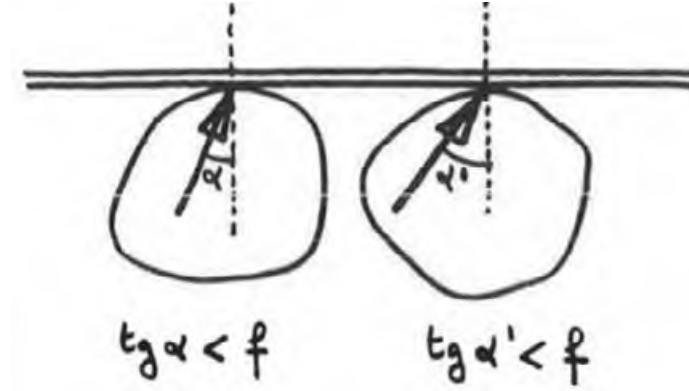
Bu tür yapılarda, donatıda oluşan gerilmeler, toprak parçacıkları arasındaki temas hareketlerinin toplamına bağlıdır. Bunu sonucunda eğer donatı uygun biçimde tasarlanır ve yerleştirilirse, her türlü kesme ve kaymayı önlemek mümkündür. Böylece tüm kütle hem iç hem de dış kuvvetlere dayanabilen kohezif bir katı gibi davranır.

Kısaca, toprakarme teorisinin temeli sürtünmedir. Toprak ve donatı arasındaki uygun bağlantı kurulduktan sonra problem donatı ve topraktaki gerilimin hesaplanması problemi olarak ele alınır.

1.2.1.1. Donatı ve Toprak Arasındaki Sürtünme

Daha etkili olması için donatı elemanları zemine bağlanmalıdır. Donatılama eylemi sadece sürtünmeden kaynaklandığından, bu sürtünmenin, kayma gerçekleşmeden var olup olmadığı belirlenmelidir.

Donatı elemanı ile temas halinde olan 2 toprak tanesi düşünelim. (Şekil 1). Eğer temas kuvveti donatıya dik düzlemle α açısını oluşturuyorsa (f tanecik ve donatı arasındaki kat sayısıdır), $\tan \alpha < f$ ilişkisi vardır. Ancak, donatı elemanındaki basınç sabit kalırsa, gerilimi toprağa aktarmaz ve α açısı ya da ikinci tanecik üzerinde bir etkisi olmaz. Bağlantı çubuklarında olduğu gibi iki komşu tanecik arasında bağlantı oluşmaz.



Şekil 1. Donatı elemanlarıyla temas halindeki taneciklerin gösterimi

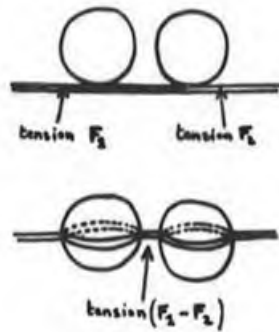
Öte yandan, bir donatı elemanındaki gerilme bir taneciğin hemen önünde F_1 değerine sahipse (Şekil 2) ve F_2 komşu tanecikten hemen sonra geliyorsa, hepsi donatı F_1 - F_2 gerilimleriyle birlikte iki tanecik arasında bağlantı oluşturmuyormuş gibi davranır. Bu bağlantının gerçekten oluşması için bu gerilim donatı ve toprak arasındaki kaymadan, sürtünmeyle oluşmalıdır. Gerilimin F_2 ve F_1 değerine sahip olduğu iki nokta arası dl olsun (Şekil 3).

Donatının uzunluğu dl boyunca, gerilim şuna göre değişir:

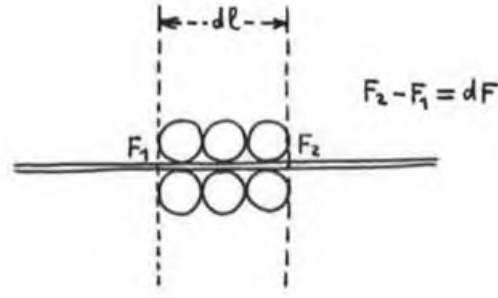
$$dF = F_2 - F_1 \text{ (Denklem 1)}$$

Şekil 4'te görüldüğü gibi topraktaki gerilme donatı düzlemine dik bir N değerine sahiptir ve iki yüzdeki $2 N dl$ değeri; daha sonra sürtünmenin kaymadan gerçekleştiğinden emin olmak gerekir, ya da

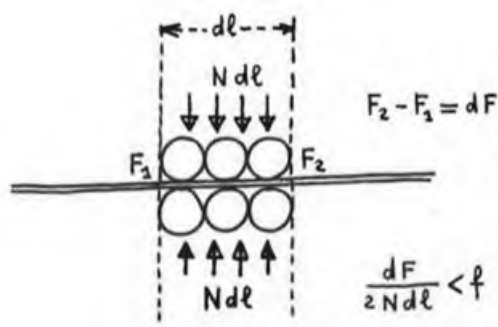
$$\frac{dF}{N dl} < f \text{ (Denklem 2)}$$



Şekil 2. Taneciklerin sahip olduğu F_2 ve F_1 gerilmelerinin gösterilmesi



Şekil 3. F_2 ve F_1 gerilmesine sahip iki nokta arasının dl olarak isimlendirilmesi

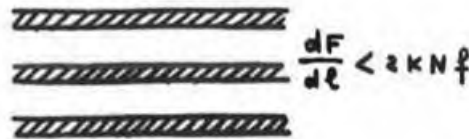


Şekil 4. Zemindeki gerilmenin donatı düzlemine dik hali

F , zemin ve donatılar arasındaki sürtünme katsayısı olduğundan, katsayı 2, düz donatının her iki yüzündeki sürtünmeden kaynaklanır. Sonuç olarak,

$$\frac{dF}{2Nd\ell} = \frac{f}{s} \text{ (Denklem 3)}$$

ilişkisi doğrulanırsa, donatının her iki tarafındaki granüler sürtünmenin kaymadan ve bir güvenlik faktörü ile gerçekleştiği varsayılabilir. Bu ilişki, bir betonarme kirişte donatının bağlanması ile biraz benzerdir. Sadece bağ gerilimi, sürtünme katsayısının iki katı ile çarpılan bir basınçla değiştirilir. Bu formül, donatı elemanlarının düz olduğunu ve bir donatı katmanının tam bir düzlem oluşturduğunu varsayar. Gerçekte, donatılar aralarında sonlu mesafe olan sınırlı genişlikteki düz şeritlerdir (Şekil 5).



Şekil 5. Toprakarme sistemde donatılar

K, birim uzunluk başına donatı oranı ise, formül şöyledir:

$$\frac{dF}{dl} < 2KN_f \text{ (Denklem 4)}$$

Donatı elemanlarındaki gerilimi uzunluklarının bir fonksiyonu olarak veren eğrinin eğimi, belirli bir değeri geçmemelidir. T kesme kuvvetine sahip toprakarme kiriş durumunda $dF/dl = T$ ve $T < 2KN_f$ denklemleri ortaya çıkar.

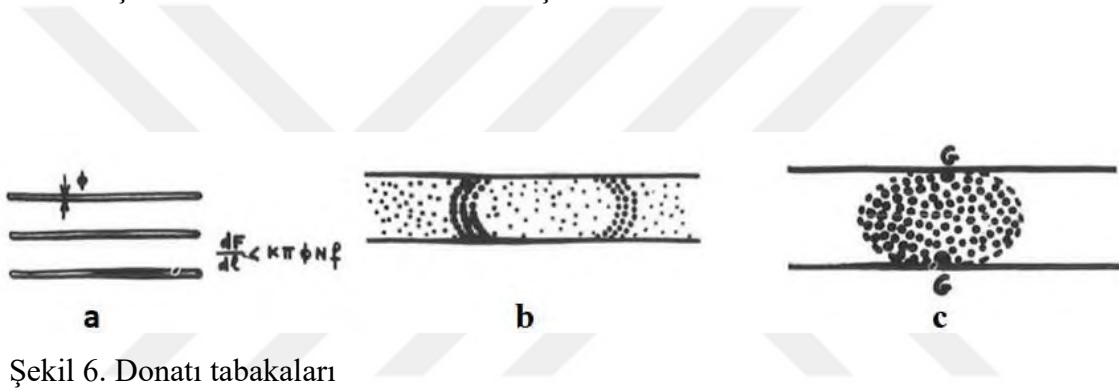
Yuvarlak donatı durumunda (Şekil 6a), benzer bir formül uygulanır;

$$\frac{dF}{dl} < K\pi\phi N_f \text{ (Denklem 5)}$$

ϕ : Çubuk çapı

K: Birim başına çubuk sayısı

N: Çubuk etrafındaki ortalama basınç



Şekil 6. Donatı tabakaları

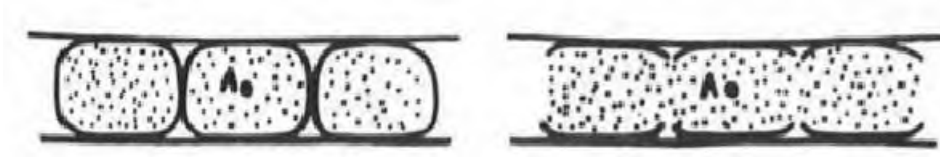
Vidal' in çalışmalarından önceki argümanlarda yalnızca bir donatı elemanı ile doğrudan temas ettiği toprak taneleri arasındaki bağlantı dikkate alınmıştır, ancak donatı tabakaları genellikle birbirinden bir miktar uzaktadır. Bu nedenle, donatıdaki gerilmelerin, doğrudan temas halindeki tanelerden temasta olmayanlara nasıl iletilildiğini incelemeliyiz.

Aktarım şekli kesin olarak bilinmemekle birlikte, bu bağlantının bir destek veya kemer şeklinde olması gerektiği varsayılmaktadır (Şekil 6b). Ancak betonarme konusundaki bu tür bir bilgi eksikliği, son 50 yıldaki gelişimini engellemiştir.

Toprakarmede, donatı ile doğrudan temas halinde olan bir G tanesinin, donatı elemanlarının aralığı ile ilişkili belirli bir yarıçap boyunca yalnızca iki donatı tabakası arasındaki tanecikler üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğu varsayılır (Şekil 6c). Bu nedenle, hesaplamalar yapılırken, toprak parçacıkları, iki donatı tabakası arasındaki mesafeye eşit kalınlıkta zemin küreleri olarak kabul edilebilir.

Kürelerin içinde tam olarak ne olduğunu bilmememizin önemi yoktur. Bir yapı gerçekten zemin kürelerinden oluşsaydı, tüm hesaplamalar yine de tamamen doğru çıkardı;

keselerin donatıya dik kenarları (Şekil 7) yırtarak açılması, yırtılmanın yakın çevresi dışında gerilmelerin dağılımını değiştirmeye gerek yoktur. Bu, kürenin ortasında bulunan A tanesinin üzerindeki gerilmelerde hiçbir fark yaratmamalıdır (Şekil 7).



Şekil 7. Zemin küreleri

Böylece, zemin ile donatı arasında toprakarme sürtünmesinin varlığı için ilk koşulun karşılanabileceği ve nispeten basit bir formülün doğrulanarak kontrol edilebileceği görülebilir. Hesaplama, zemin ile donatı arasındaki sürtünme katsayısına, yeryüzündeki gerilmelere, donatının geometrik özelliklerine ve her donatı boyunca gerilimin değişim hızına bağlıdır.

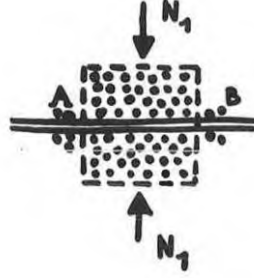
Tasarlanan sayısız çalışmanın tamamında, sanıldığı gibi aksine, zemin ile donatı arasındaki bu sürtünme durumu sağlanmıştır.

1.2.1.2. Zemindeki Gerilmelerin Hesaplanması ve Donatı

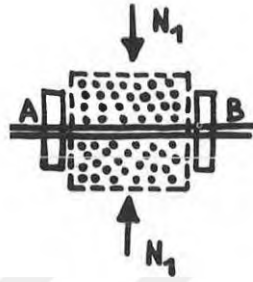
Kütlenin daima dengede kaldığını doğrulamak için, her bir donatının her noktasındaki gerilmeyi hesaplamak gerekir.

Toprakarmenin hesaplanmasındaki zorluk, genellikle izotropik olmayan ve büyük plastik bölgeler içeren heterojen bir malzemeyle uğraşmaktan kaynaklanır. Bu karakteristik özellikler, yeryüzündeki gerilmeleri bir nokta etrafında açılmayı mümkün kılan Mohr çemberinin geçerliliğini engellemese de ilk bakışta gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri elastisite teorisi veya malzemelerin mukavemeti gibi basit bir şekilde birleştirmek zor görünür. Yine de toprakarme hesaplanabilir ve belirli bir esnekliğe sahip bir malzeme olarak düşünülebilir.

İlk adım olarak, basınç ve çekmeye göre temel durumlar incelenecektir. Daha sonra, en genel durumda gerilmeleri hesaplamak için iki yöntemle birlikte, toprakarmenin elastiklik özellikleri tartışılacaktır.



Şekil 10. N_1 ve N_2 basınç kuvvetleri altındaki zemin küpü



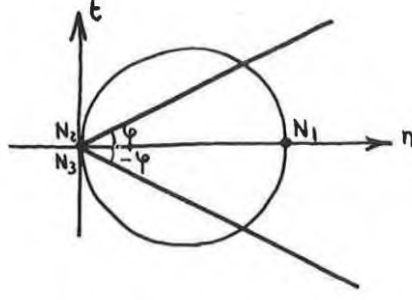
Şekil 11. N_1 ve N_2 basınç kuvvetleri altındaki zemin küpü

Temel bir toprakarme küpü düşünüldüğünde (Şekil 10), donatının iki yönde dik açılarla N_1 basınç kuvvetinin yönüne dik olarak şekillendiği varsayılır. Bu donatının görevini yerine getirebilmesi için, donatı ile parçacıklar arasında kayma olmadığı varsayılır. Böylece, komşu parçacıklar A ve B, donatı ile sert bir şekilde bağlanır.

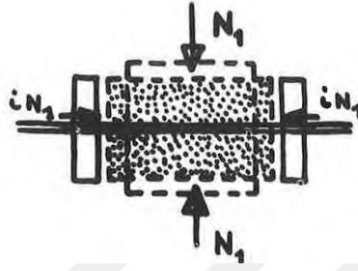
Eğer A ve B, küpün iki yüzüne en yakın iki yerde yer alıyorsa (Şekil 11) ama küpün dışındaysa, sistem, bu iki küp yüzünde gerilim oluşturabilen dış parçacıklardan oluşan iki plaka donatı ile birbirine bağlanmış gibi davranır.

Basit sıkıştırma gerilimi N_1 hareket ettiğinde ve A-B yönünde parçacıklar üzerinde herhangi bir sıkıştırma gerilimi olmadığında, Mohr dairesi içsel eğrinin dışından geçtiği için parçacıkların birbirine göre kayması kendiliğinden oluşur (Şekil 12). Küp içindeki parçacıklar plastik haldedir.

Ancak temel küp, basınç yönünde sıkıştırma eğilimindedir ve parçacık kütlesi kabaca sabit olan bir hacmi kapladığından, takviye edici elemanlar yönünde genişleme eğilimindedir (Şekil 13). Donatı yönünde yeryüzünün bu genişlemelerine donatı uzantıları eşlik eder. Sonuç olarak, her iki taraftaki parçacık plakalarının birbirine bağlanmasının neden olduğu sıkıştırma kuvvetleri, küpün yüzleri üzerinde etki eder.

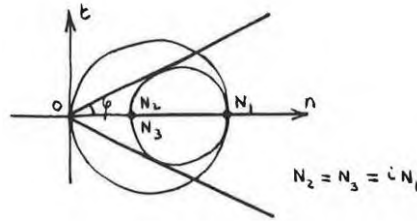


Şekil 12. N_1 hareket ettiğinde Mohr dairesi oluşumu



Şekil 13. Temel küpün genişleme eğilimi

Küp içindeki parçacıkların kayması, basınç kuvvetleri $i \cdot N_1$ 'e eşit olduğunda, Mohr dairesi içsel eğriye teğet olacak şekilde kesintiye uğrar (Şekil 14).



Şekil 14. Basınç kuvvetlerinin $i \cdot N_1$ 'e eşit olması durumunda Mohr dairesi

$$E_t = \frac{ES}{2i} \text{ (Denklem 7)}$$

Tam reaksiyon, elastikiyet modülü olan, sıkıştırılmış elastik bir cismin reaksiyonudur.

E = Donatıların elastisite modülü

S = Zeminde birim alan başına düşen donatıların kesit alanı

i = Aktif yanal toprak basıncı katsayısı

Saf Gerilim: Saf gerilme durumunda, gerilmeye karşı direnç sadece donatılar tarafından sağlanır. Parçacıkların donatılara göre kayması olmadığı varsayıldığında, toprakarme, sanki donatı tek başına oradaymış gibi, basit gerilmede elastiktir, elastiklik modülü ES'dir (E = donatının elastisite modülü; S = birim alan başına gerilimde takviye kesit alanı).

Toprakarmenin Esnekliği: Parçacıklar ve donatı arasında kayma olmadığı sürece, toprakarme, basınçta olduğu kadar çekmede de etkili olan elastik bir davranışa sahiptir, ancak iki durumda da elastikliği aynı değildir. Donatının yoğunluğu tüm noktalarda tekdüze ve her yönde aynı olsa bile, çekmedeki elastisite modülü genel olarak basınçtaki elastisite modülünden farklı olacaktır, ancak büyük ölçüde değil. Pratik uygulamalarda, bu esneklik modülü genellikle küçüktür. Bu nedenle, paradoksal görünse de toprak genellikle ahşap veya betonarme kadar elastik olacaktır.

Fakat eğer toprak elastik özellikler gösteriyorsa, (çok yaklaşık bir şekilde) matematiksel elastikiyet teorisini takip eder, çünkü gerilmeler ve şekil değiştirmeler arasındaki sabit oran, gerilimin yönüne ve dikkate alınan noktaya göre değişebilir. Gerilim boyuna donatı alanına göre; sıkıştırma, enine donatı bölümüne göre değişir. İzotropik olmayan bir malzeme durumunda tam matematiksel esneklik teorisi, karmaşık hesaplamalar olmadan pratik kullanımı için çok fazla parametre içerir.

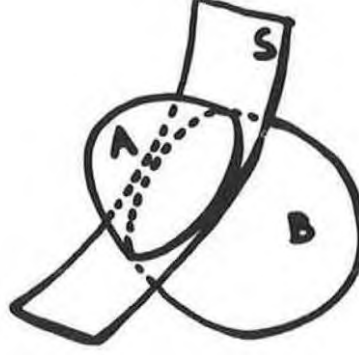
Aslında, betonarme aynı zamanda basınçta olduğu gibi çekmede de aynı esnekliğe sahip değildir; dahası, çekmede betonun esnekliği, gerilmenin değerine göre değişir. Dolayısıyla, belirli bir yön için herhangi bir noktada kuvvetler ve deformasyon arasında hiçbir orantılılık yoktur, ancak bu orantılılık toprakarme için mevcuttur.

Toprakarmenin basınç ve çekmedeki esnekliğini gösterirken, deformasyon sırasında bir birim küpün hacminin az çok sabit kalması için parçacıkların boşlukları ortadan kaldırmaya yetecek kadar sıkıştırıldığı varsayılmalıdır. Saha uygulamalarında, bu her zaman böyle olmayabilir ve toprakarmenin görünen esneklik döneminden önce, boşlukların çökmesi ve tanelerin sıkıştırılmasının ilk, elastik olmayan, kalıcı bir deformasyon ürettiği bir dönem olabilir örneğin bir kiriş durumunda kalıcı bir sapma olarak görünebilir.

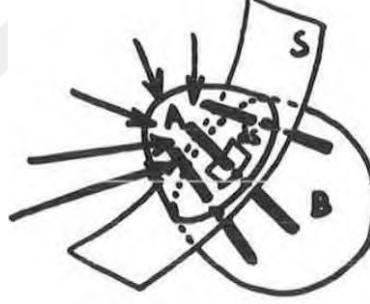
Yapıların Tasarımı: Herhangi bir şekildeki toprakarme yapı tasarlanırken iki tasarım yöntemi uygulanır.

İlk yöntem: Daha pratik olan ilk yöntemde, toprakarmenin hacmi, onu A ve B olmak üzere ikiye bölen bir yüzey S (Şekil 15) tarafından kesilir. A hacminin, S yüzeyi boyunca B hacmine göre kaymasını önlemek için, A ve B'ye etki eden kuvvetlerin etkisi altında,

genellikle A ve B'yi birbirine bağlayan bir donatı sağlamak gerekir. Bu donatı, S alanının herhangi bir yerinde dS yüzeyinin herhangi bir elemanında kayma olmayacak şekilde düzenlenmelidir (Şekil-16).

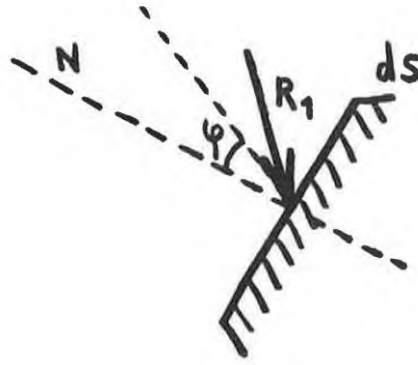


Şekil 15. Toprakarmeyi A ve B olarak bölen S yüzeyi

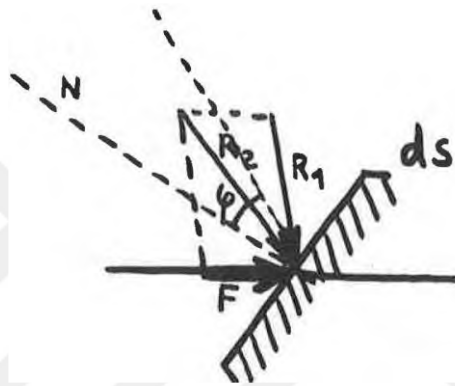


Şekil 16. S yüzeyinin toprakarme sistemini bölmesi sonucu oluşan dS

Bu nedenle, dS yüzeyinin bir elemanı üzerinde, A'nın B üzerindeki kuvvetlerinin sonucunun R_1 olduğu ve dS'ye normal olan ϕ 'den (Şekil-17) daha büyük bir açı yaptığı varsayılır. A hacmini B hacmine bir gerilme kuvveti F ile birleştiren donatı bağlamak mümkündür, öyle ki R_1 ve F'nin ortaya çıkan R_2 'si, normalden dS'ye olan ϕ 'den (Şekil-18) daha küçük bir açı yapar.

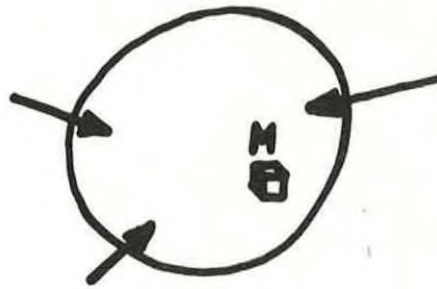


Şekil 17. ds üzerindeki R_1 kuvveti ve ϕ açısı



Şekil 18. R_1 ve F sonucu ortaya çıkan R_2

İkinci yöntem: İkinci yöntem, gerilmeleri elastiklik teorisi ile hesaplar (Şekil-21). Hooke yasasına göre toprakarme yapının gövdesi elastiktir, yani M noktasında deformasyonlar gerilmelerin doğrusal fonksiyonlarıdır. Herhangi bir şekle sahip bir cisim için, sanki gövde bu esneklik yasasını izliyormuş gibi, herhangi bir noktadaki gerilmeleri dış kuvvetlerin işlevleri olarak belirlemek teorik olarak mümkün olacaktır. Ayrıca bu yasa, incelenen hacim içindeki donatı düzenlemesini ve boyutunu da dikkate alır. Sahada uygulamada, hesaplama genellikle neredeyse çözülmez olacaktır.



Şekil 19. Gerilmelerin elastiklik teorisi ile hesaplanması

Öte yandan, malzemelerin izotropik ve homojen olduğu varsayılan elastik hesaplamalar, belirli sayıda basit durumda geleneksel hesaplamalardır. Karmaşık hacim durumları için, gerilmeler ve gerilmeler fotoelastisite ile değerlendirilebilir.

Son olarak, bir kiriş ile karşılaştırılabilen uzun bir gövde durumunda, gerilmeler, malzemelerin mukavemet teorisi ile daha da kolay bir şekilde hesaplanabilir.

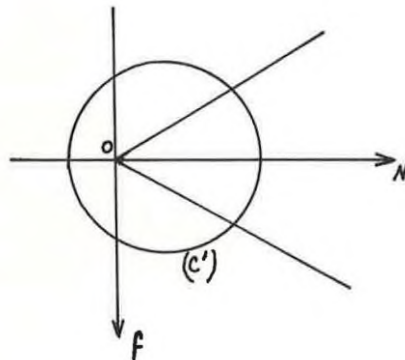
Bu nedenle, bu karşılaştırmanın büyük hatalara yol açmadığından emin olunabilirse, geleneksel elastisite teorisini toprakarme gövdesine uygulamaya çalışmak caziptir.

Ancak, halihazırda betona uygulanan bu elastiklik teorisini gördüğünüzde, deformasyonları gerilmelere göre doğrusal olarak değişmediği için elastik değildir; bazen betonarme, izotropik olmayan diğer birçok malzemeye de uygulanır.

Elastik bir cisimdeki herhangi bir noktadaki gerilmeler, gövdeye etki eden kuvvetlere göre biliniyorsa, bu hayali gerilmelerin yeryüzündeki ve donatıdaki gerilmelerin nasıl belirlendiğini görme sorunu haline gelir. Herhangi bir M noktasındaki bu hayali gerilmeler, karşılık gelen Mohr çemberi C ile temsil edilebilir (Şekil 20). Genellikle bu dairenin F için içsel eğri içinde yer alması için bir neden olmadığından, denge genellikle taneli zeminle oluşmayacaktır.

Donatının dahil edilmesi, yeryüzündeki gerilmeleri, bu noktada, yalnızca zemine karşılık gelen yeni Mohr çemberi, içsel eğrinin içinde yer alacak şekilde değiştirir.

Uygulamada, genellikle elastik deformasyon sırasında, tanecikler takviye olmadan dengede kalamazlar ve takviye gerilime girecek şekilde kayma gerçekleştirirler (Şekil 21).



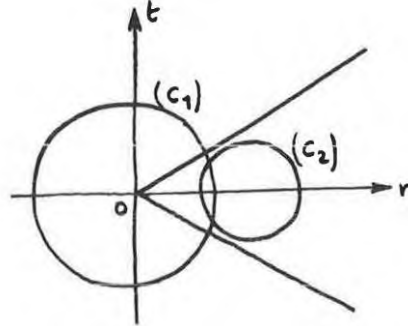
Şekil 20. Herhangi bir M noktasındaki hayali gerilmelere karşılık gelen Mohr çemberi



Şekil 21. Elastik deformasyon sırasındaki taneciklerin kayması

Parçalar ile donatı arasındaki A ve B bağlantısının kaymadan yapıldığı varsayılırsa her şeyin, toprak küpünün iki yüzü A ve B sanki donatıya sağlam bir şekilde bağlı iki levha oluşturmuş gibi davrandığı sonucuna varılmıştır.

Donatı, levhaların tanecikler üzerinde uyguladığı sıkıştırma kuvvetine eşit bir çekme kuvveti F ile A ve B arasında gerilir. Bu nedenle, donatının varlığının etkisi, takviyeye paralel ve sonuncudaki çekme kuvvetine eşit olarak tanelerde ek bir sıkıştırma kuvveti uygulamaktır; karşılık gelen sıkıştırma gerilimi, F 'nin S n_a 'ya eşit olduğu bir n_a değerine sahiptir, burada S , donatı yönüne dik olan parçacıklar üzerindeki takviyenin etki alanıdır.



Şekil 22. Ek basınç kuvveti dahilindeki Mohr çemberi

Zemindeki bu ek basıncı hesaba katarak, dikkate alınan nokta etrafında tek başına zemindeki gerilmeleri temsil eden yeni bir Mohr çemberi çizilebilir (C_2) (Şekil 22). Zeminin dengede olması için, bu yeni Mohr çemberi dünyanın içsel eğrisinin içinde yer almalıdır.

Donatıdaki gerilimin F değerinin bulunmasını sağlayan yapısal grafik basittir ve bu yöntem, toprakarme gövdesindeki tüm gerilmeleri hesaplamak için kullanılabilir.

1.2.1.3. Toprakarme Kuramı

Toprakarme kohezyonunun temeli olan toprak ve donatı arasındaki sürtünmenin temel hesabı son derece basittir. Yeryüzündeki gerilmeler ve donatı bilindiğinde, hesaplama için sadece basit bir formüle ihtiyaç vardır.

Toprak ve donatı hesaplamaları kadar, geleneksel yapılar ve malzemeler için yapılan hesaplamalara oldukça yakın oldukları söylenebilir.

Saf sıkıştırma ve saf gerilimin temel durumları, geleneksel yapılarla aynı doğruluk derecesiyle hesaplanır. Öte yandan, belirli bir şekle sahip olmayan işler için, diğer malzemelerde olduğu gibi, hesaplamalar oldukça zordur.

Toprakarmede bu nitelikteki yapılara oldukça sık rastlanabileceğinden dolayı tasarımları için çok farklı iki yöntem hazırlanmıştır. Ve bu iki yöntem aynı çalışmanın tasarımına uygulandığında, sonuçlar birbirine çok yakındır.

Ancak toprakarmenin tüm geleneksel malzemeleri geride bıraktığı bir nokta vardır. Bu, en zor hesaplamaları ölçekli modellerle kontrol etme imkanıdır. Bu ölçekli modellerin oluşturulması çok basittir ve teorik hesaplamaları kontrol etmek için her zaman çok etkili bir yöntem sunarlar. Bu nedenle, bu teorinin doğruluğunu geliştirmeleri gerekir.

Toprakarme yapıların inşaatı: Gerçek inşaatı, toprakarme yapılar, yatay tabakalar halinde yerleştirilmiş şeritler şeklinde toprak ve donatı elemanlarından oluşur. Bu katmanlarda şeritler belirli aralıklarla ayarlanır. Yapının cephesinde, donatı şeritleri ile temas halinde olmayan toprak parçacıklarını tutmak için belirli bir tür sınır veya yüzey gereklidir.

Panel: Panellerin belirli niteliklere sahip olması gerekir. İlk olarak, panele yakın iki bitişik donatı elemanı arasında bulunan toprak parçacıklarını tutmak için yeterli yerel dirence sahip olmalıdır. Ancak, aynı zamanda kütlenin ayrılmaz bir parçasını oluşturarak kütlenin tüm deformasyonlarını takip etmek için yeterli esnekliğe sahip olmalıdır. Panel sert olsaydı, kendisini toprakarme kütlesinin dışındaki elemanlarla temas halinde bulurdu; örneğin, destekleyici zemin. Aynı zamanda (hakkında çok az şey bilinen ve sertliğini daha da arttırmayı gerekli kılan) büyük ek dış kuvvetleri de iletecektir. Bu, toprakarmeyi homojenlikten tamamen mahrum bırakır.

Bu nedenle, bağlantı çubukları ve ankraj blokları ile levha kazıkla yapılan duvarlar toprakarme yapılar değildir, çünkü bunların bağlantı çubukları (burada gerilim sabittir),

gerilimin değiştiği ve toprak kütlesindeki parçacıkları birbirine bağlayan donatı ile hiçbir benzerliği yoktur.

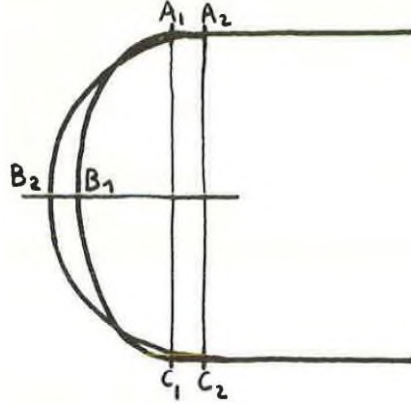
Sınır yüzeyi, genel esneklikle birlikte yeterli yerel direnç özelliğine sahip olmalıdır. çok ve aşınmaya karşı direnç sunarak koruma görevi görmelidir; kabul edilebilir bir malzeme veya renkte olmalıdır. Yeterli derecede sızdırmazlığa sahip olmalı veya drenaj sağlamalıdır. Toprak ve donatı ile birlikte yerleştirilmesi çok basit olacak şekilde tasarlanmalıdır. Son olarak, korozyona karşı yüksek bir dirence sahip olmalıdır.

Panel düz olabilir ve tıpkı kauçuk tabakalar gibi malzemenin basit elastikliğinden sapabilir. Aynı zamanda, çok sayıda böcek veya kabukluların kabuklarında olduğu gibi, birbiriyle üst üste binen sert elemanlardan da oluşturulabilir (ve bu fıkirden türetilen birkaç yüzey türü vardır). Ancak geniş kavisli paneller nedeniyle genel esnekliğe sahip kavisli alanlardan (şekil 23) yararlanılarak da esnek olabilir.

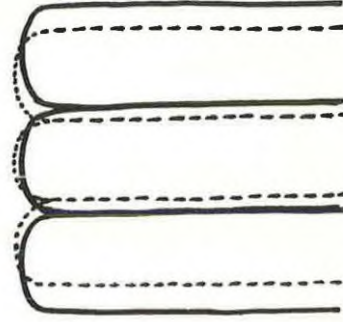


şekil 23. Kavisli şekle sahip paneller

Yarı eliptik silindirik elemanlar veya dış yüzeyler bu prensipten doğar. Bu temel unsurdan başlayarak, toprakarmede gerekli büyüklükte bir gövde oluşturmak her zaman mümkündür, çünkü gövdenin yüzeyi her zaman temel dikdörtgenler modeline bölünebilir (şekil 24). Oldukça farklı boyutlara sahip olabilen bu temel eleman, en zorlu koşullarda gerilimde çalıştığı için ekonomiktir. Kararlıdır ve yeryüzündeki kuvvetler, özellikleri veya yerleşimi ne olursa olsun kararlılığı garanti edilir.



Şekil 26. i değerindeki düzeltme



Şekil 27. Eksenlerin şekil değiştirmesi

Bu özel formla, bu deformasyonun gerçekleşmesi ve yine de her zaman 2'den büyük bir güvenlik faktörünün ortaya çıkmasının mümkün olduğu doğrulanmıştır. Bu, malzeme türü fark etmeksizin ve yüzey geriliminin yüksek değerleri için geçerlidir. Tamamen mekanik bir bakış açısından bakıldığında, yüzeyin, üzerine etki eden kuvvetlere direnmek için yalnızca çok küçük bir kalınlığa ihtiyaç duyduğu sonucuna varılmıştır. Korozyon gibi diğer faktörler, yüzey kalınlığının artmasına neden olur.

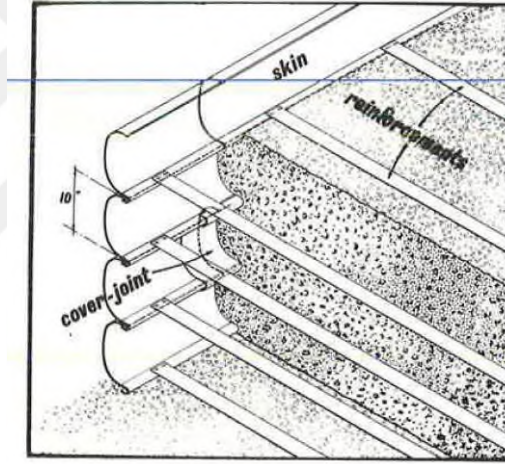
Korozyon, dikkate alınması gereken bir faktördür. Yapılarda galvanizli çelik veya alüminyum-magnezyum alaşımı kullanılır. Plastik alaşımlar ise test edilmektedir. Gelecekte, hava şartlarına dayanıklı çelikler gibi yeni metal türleri kesinlikle kullanılacaktır. Galvanizleme veya çeşitli kimyasal kaplamalar gibi bir kaplamayla sağlanan ilk korumanın dışında, korozyonla mücadelenin bir yolu da yüzeye gerekli ekstra kalınlıklarda metal uygulamak ve takviye etmektir.

Daha önce gösterildiği gibi, tamamen mekanik bir bakış açısından yalnızca küçük metal kalınlıklar gereklidir. Genel olarak, toprakarme yapılardaki metal düşük gerilme

altındadır, oysa levha veya t p kazık yüksek gerilme altındadır ve korozyon hızla tehlikeli hale gelebilir.

Böylelikle toprakarmenin metalik elemanlarının yapının tasarım ömrüne dayanacağı hesaplanabilir.

Donatı Elemanları: Takviye elemanları, gerekli gerilme mukavemetine sahip herhangi bir malzemeden ve gerekli yönde gerekli sürtünme yüzeyini veren herhangi bir şekilde yapılabilir. Bu nedenle, şeritler, tel örgü,  elik kablolar, alüminyum alaşımı veya plastik kumaş kullanılmış olabilir ve kullanılabilir. Genellikle duvarların inşasında galvanizli  elik veya alüminyum-magnezyum alaşımından yapılmış uzun takviye şeritleri kullanılır. şeritler yatay katmanlar halinde yerleştirilir ve yüzey elemanlarına bağlanır (şekil 28). Yapıya etki eden kuvvetlere bağlı olarak hesaplanan mesafelerde ayarlanır.



şekil 28. şeritlerin yerleşimi

Toprak: İki yatay donatı şeridi tabakası arasında toprak boşaltılır ve yapının amacına bağlı olarak sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz.

Bu yazıda kullanıldığı şekliyle "toprak", belli bir limiti aşmayan kil miktarıyla çoğu taneli malzemeden oluşan çok sayıda doğal toprağı kapsar. Bu sınır, kullanılan donatı türüne göre değişir; genel durum, donatıda gerekli çekme gerilmelerini oluşturmak için toprak ve donatı arasında yeterli sürtünmenin mevcut olmasıdır. Genelde kullanılan geleneksel tip donatı ile bu durum, 25 derece civarında sürtünme açısına sahip olan toprakla karşılanmaktadır.

Toprakarme yapıları inşa ederken, dolgu malzemeleri için geleneksel test yöntemleri kullanılır.

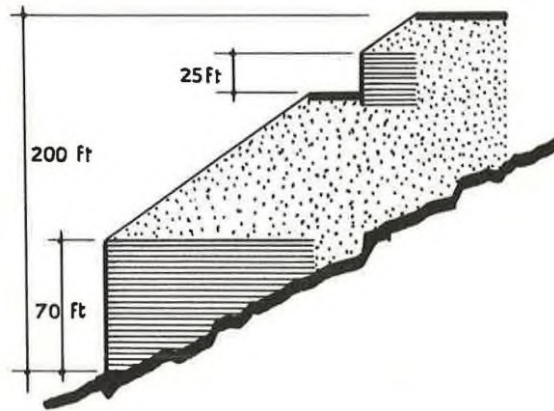
Toprakarme Yapı Çeşitleri: Çoğu ağır temel işi türü toprakarme ile olduğu kadar betonla da yapılabilir, bu iki malzemenin ilgili ağırlıkları oldukça yakındır. Bu nedenle, bir toprakarme yapının hacmi, benzer bir beton yapının hacmine benzer olabilir.

Toprak İstinat Duvar: Fransız İtalyan veya Normandiya otoyollarında bulunanlar gibi, bitişik araziye korumak için bir dolgu olarak inşa edilen tipik bir duvarı göstermektedir böylece gerekli geçiş hakkı azaltılır (Şekil 29).



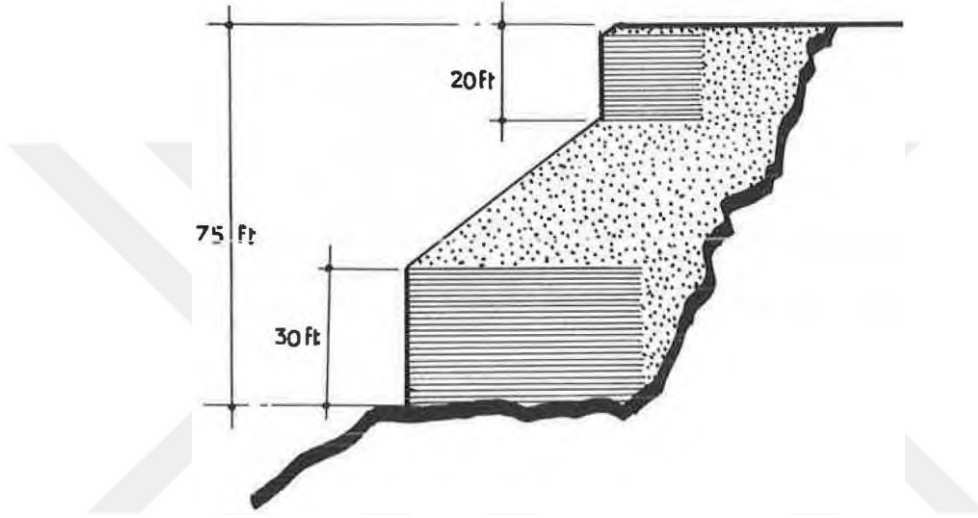
Şekil 29. Toprak istinat duvarı

Eğimli İstinat Duvarı: Toprakarme yapılar düz bir zemine veya eğimli arazilere inşa edilebilir (Şekil 30). Fransız-İtalyan karayolu üzerindeki Peyronnet yapısı, 200 ft yüksekliğindeki büyük bir eğimi korumak için inşa edilmiş; şevin üst kısmına servis yolu sağlamak için ara toprakarme duvar yapılmıştır.



Şekil 30. Eğimli arazide toprakarme duvarın şematik gösterimi

Platform-Destekleyici Yapılar: Şekil 31, tipik bir örneği göstermektedir. Fransız-İtalyan Karayolu üzerindeki Vigna çalışmaları, iki toprakarme duvardan oluşur, üst duvar otoyol platformunu doğrudan destekler. Yapı içerisindeki donatıların dağılımı ve boyutlarının hesaplanmasında karayolunun neden olduğu sürüşarj dikkate alınır. Üzerine uygulanan her türlü dış kuvveti desteklemek için toprakarme yapı tasarlamak her zaman mümkündür.



Şekil 31. Platform-Destekleyici Duvar

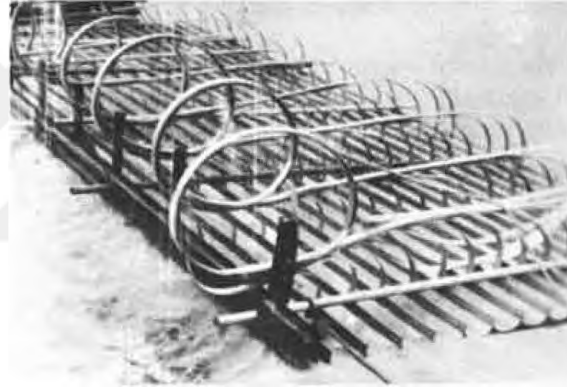
Kirişler ve Temel Hasırları: Toprakarme ilkeleri bu tür iki yapı elemanında kullanılmıştır. Bunlardan biri, akış nedeniyle boşlukların oluşmasının beklenebileceği alçı yatakları içeren bir zemin bölümünün üzerinden geçmek zorunda olan bir kanalı desteklemek için bir temel hasırıdır. Diğeri ise Gabon'daki bir uranyum madeninin üzerindeki çatıdır. Her iki yapı da bir tanecikli toprak kütleleri içinde donatı olarak tel örgü ile yapılmıştır.

Su Altı Yapıları: Deniz suyunda çalışırken korozyonu önlemek için bir alüminyum-magnezyum alaşımı kullanılarak su altı yapılar aynı elemanlarla inşa edilebilir. İş hızlandırmak için prefabrikasyon teknikleri kullanılmış ve yüzey elemanları ve donatı şeritleri de dahil olmak üzere tüm duvar panelleri karada monte edilmiş ve bir birim olarak su altında yerine yerleştirilmiştir.

Daha sonra kum dökülür ve takviye şeritler katman katman serbest bırakılır (Şekil 32 ve 33). Fransa'da limanlar için iskeleler prefabrike teknikleri kullanılarak inşa edilmiştir.



Şekil 32. Prefabrike teknikler ile inşa edilen toprakarme duvar



Şekil 33. Toprakarme duvarda takviye şeritler

Farklı şekil ve boyutlara sahip birçok başka yapı inşa edilebilir. Kentsel alanlarda otoyolları veya demiryollarını destekleyen duvarlar, barajlar, batardolar ve setlerdeki tüneller projelendirilmiş veya test edilmiş ve hesaplamalar geliştirilmiştir.

1.2.1.4. Toprakarmenin Özellikleri ve Mühendislik Problemleri

İnşaat mühendisliğinde toprakarmenin gelişimi çok uzak değildir; ilk yapılar 1964 yılında inşa edilmiştir. İnşaat prensibi olarak kullanımı çeşitli özelliklerden kaynaklanır ve gelecekte uygulanmaya uygun olduğunu gösterir.

Yüksek Ağırlık: Toprakarme, beton gibi ağır bir malzemedir. Yüksek gerilimlere veya çarpma yüklerine dayanabilen ağır, sağlam yapılar genellikle gereklidir ve bazen tamamen mimari nedenlerle istenir. Toprağın kendisi setlerde, barajlarda, otoyol desteklerinde vb. kullanılmaktadır, ancak büyük hacimlerin taşınmasını gerektirir ve nüfuslu alanlarda maliyetli hale gelen önemli yüzey arazilerini işgal eden yapılarla sonuçlanır.

Takviyeli toprak temelde aynı niteliklere sahiptir, ancak dikey yüzleri ile bu tür yapılar, yer hareketi miktarını ve gerekli olan geçiş hakkını azaltır.



Şekil 34. Büyük bir güvenlik faktörü ile inşa edilmiş çok yüksek bir duvar

Dayanıklılık: Tek başına topraktan farklı olarak, toprakarme hemen hemen her basınca dayanacak şekilde hesaplanabilir, çünkü kütleliyi oluşturan parçacıklar genellikle yüksek bir ezilme direncine sahiptir ve donatı şeritleri, dış koşullara dayanacak şekilde kütleliğin içine yerleştirilebilir. Şekil 34, büyük bir güvenlik faktörü ile inşa edilmiş çok yüksek bir duvarı göstermektedir.

Esneklik: Toprakarmeyi oluşturan kütle, doğası gereği esasen taneciklidir, destek temelindeki deformasyonlar, betonda olduğu gibi çatlak veya kırılma oluşturmaz. Aslında kütlede sonsuz sayıda çatlak veya çatlak vardır ve yerin hareketleri bu çatlakların hareket etmesine neden olur. Böyle bir durumda, parçacıklar başka bir denge durumuna ulaşmak için donatı elemanları boyunca kayarak bu elemanlarda başka bir gerilim dağılımına yol açar.

Donatı elemanları bu yeni yüklere dayanacak şekilde hesaplandığı sürece, tüm yapı sabit kalır. Kırılmadan önce büyük deformasyona sahip bu plastiklik olgusu, her yapı

malzemesinin vazgeçilmez bir kalitesidir. Düzgün tasarlanmış bir toprakarme bu kaliteye o kadar yüksek derecede sahip olabilir ki, depreme karşı dayanıklılık önemli olmalıdır. Doğal olarak, depremlerin neden olduğu dış kuvvetlere karşı denge dikkate alınmalıdır, ancak toprakarme, geniş bir yatay taban ve iç boyutlandırma gerekliliği nedeniyle geleneksel malzemelere göre ekonomik olarak daha uygun olmalıdır.

Basitlik: Toprakarme yapıları inşa etmek basit ve hızlıdır. Yerleşim için zaman faktörü yoktur ve sadece dikey oturmanın sınırlandırılması istendiğinde sıkıştırma gereklidir. Dış yüzey elemanları standart uzunluktadır, kullanımı kolaydır ve ağır ekipman gerekmez. Özel bir beceri de gerekmez.

Ekonomi: Nispeten basitliği nedeniyle, betonla karşılaştırıldığında ortaya çıkan ekonomi harikadır. Bir yapının kütesinin içindeki kuvvetlere, hesaplamalara göre yerleştirilen takviye elemanları ile ve sadece dış kuvvetlerin etkisinin gerektirdiği yönde direnilir. Beton yapı her yönde çimento gerektirir, bu da kohezif kuvvetlerin pahalı ve savurgan bir şekilde kullanılmasını sağlar

Fransız otoyol deneyimine göre, toprakarme yapılar, beton yapıların karşılaştırılabilir kullanımlar için sahip olacağının yaklaşık yarısı kadardır. Ayrıca, kullanılabilecek diğer tüm istinat duvarı türlerinden (kaset veya bin walls) daha az maliyetliydi.

Toprakarme prensibiyle yapılan yapılarda yükseklik sınırı yoktur ve aslında ekonomik avantajı yükseklik ile artar.

Bu ilginç özelliklerle, toprakarme prensibinin dünyanın her yerinde inşaatta yaygın olarak kullanılması, büyük, ağır toprak veya beton yerçekimi işleri ile ultra ayrıntılı betonarme veya ön gerilmeli beton yapılar arasındaki bir yeri doldurması beklenebilir.

Son olarak, toprakarme prensibinin ve uygulamalarının Amerika Birleşik Devletleri'nde ve diğer birçok ülkede patentli olduğu belirtilmelidir.

1.2.2. Karayolları Teknik Şartnamesi' nde Toprakarme

Toprakarme terimi ile de anılan donatılı zeminler bakımından önemli olan tasarım ölçütleri; donatının mekanik ve geometrik özellikleri, dolgu olarak kullanılacak malzemenin tane boyutu dağılımı ile donatıların sabitleneceği cephe panellerinin (kaplama elemanlarının) niteliği ve doğal zemin parametrelerini olarak yer alır.

Karayolları Genel müdürlüğü Teknik Şartnamesi' ne göre 0,075 mm boyutundan küçük tane içeriği %15' ten az olan iyi derecelenmiş biçimdeki dolgu malzemesinin

düzgünlük katsayısı 5,00' ten büyük, aynı zamanda plastisite indeksi de %6' dan küçük olmalıdır (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013). TS EN 7994' e göre ise tanecikli dolgunun barındırdığı ince malzeme oranı en fazla %10 olabilir. Dolgu malzemesinde kil oranı %10' u geçmeyen kohezyonlu zemin bulunması durumunda likit limit %45' ten az ve plastisite indeksi de %20' den az olmalıdır. Her iki dolgu tipi (seçilmiş ve taşıyıcı dolgu) için en yüksek tane çapı 125,00 mm ve kayma direnci açısı 30° olarak hesaplarda kullanılmalıdır. Ancak sistemde yüksek dayanımlı donatı kullanılması durumunda en yüksek tane çapı 250,00 mm' ye kadar yükseltilebilir (TS7994, 1990).

Sistemde çekme kuvvetini karşılaması için tasarlanan donatı elemanı olarak sıcak daldırma galvaniz kaplı çelik, paslanmaz çelik, alüminyum, düz yüzeyli alüminyum alaşımları veya yüzeyindeki enine çukurluklarla sürtünmesi artırılmış şeritler kullanılır. Bu donatı elemanlarında tipik olarak genişlik 50,00 mm – 100,00 mm arasında, et kalınlığı ise 4,00 mm – 10,00 mm olabilir. Metal, yani paslanabilir, bir eleman kullanıldığı takdirde 1,00 mm – 1,50 mm pas payı bırakılmalıdır (TS7994, 1990).

Donatı elemanı olarak sistemde yer alan çelik şeritler en az 530,00 g/m² sıcak daldırma galvanizle kaplı olması gerekir ve minimum 510,00 MPa çekme mukavemetine sahip orta veya yüksek karbon çeliğinden imal edilmelidir (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

Donatıların sabitleneceği cephe panellerinin işlevleri duvar arkasındaki zemini tutmak, yapıda oluşacak deformasyonları karşılamak, donatı elemanlarına bağlantı noktaları sağlamak, yapıya estetik görünüme sahip bir ön yüzey sağlamak olarak sıralanabilir.

Bahsedilen tüm bu detaylara ilave olarak Sun ve Graves; toprakarme duvarların yapısal anlamda uzun dönem stabilite hallerinin mukavemet limiti, servis limiti ve LFRD (yük ve dayanım katsayılarıyla tasarım) metoduna göre genel kararlılık kontrollerinin yapılması gerekliliğini vurgulamıştır (Sun, Graves; 2013).

1.2.3. Toprakarme Yapı Kullanım Alanları ve Uygulamaları

Geleneksel dayanma yapılarına göre daha ekonomik olması ve yapımının kısa sürede tamamlanmasının yanı sıra şehir içi geçişlerde estetik bir görüntü oluşturması ve taşıma kapasitesinin zayıf zeminler için uygun oluşu toprakarme sistemin son yıllarda sıkça kullanılmasına neden olmuştur.

Toprakarme sistemler yaygın olarak karayollarındaki dolgu ve yarmalardaki dayanma duvarları, su yapıları, demiryolları ve köprü kenar ayakları ve yaklaşım duvarları inşalarında kullanılmaktadır.

Toprakarme, Türkiye’ de ilk olarak 1988’ de STFA/IMPREGILO ortaklığınca Adapazarı Arifiye’ de bulunan 69 no’ lu otoyol üst geçidinin çok zayıf zeminler üzerine oturan yaklaşım dolgusunun iki tarafındaki 12 m yükseklikteki duvarlar için inşa edilmiştir.

İkinci toprakarme uygulaması ise yine STFA/IMPREGILO ortak girişimince FSM (ikinci boğaz köprüsü) köprüsünün yaklaşım duvarları ile Çamlıca alt geçidini duvarlarında kullanılmıştır. Daha sonra İzmir – Urla – Çeşme Otoyolu İzmir – Urla kesimi arasında yapılmış bazı dayanma duvarları da mevcuttur.

Sivas – Yıldızeli – Hanlı devlet yolundaki üst geçitlerde yine toprakarme sistemin örneklerine rastlanmaktadır. Son zamanlarda yapılan otoyollar ve birçok karayolunda toprakarme tercih edilen bir imalat olmuştur.

Dünyadaki ilk örnekler ise 1967’ den itibaren ABD, Fransa, Japonya ve İngiltere’ de inşa edilen dayanma duvarlarıdır. Bunları deniz ve nehir duvarları, köprü kenar ayakları, dolgu payandaları, kömür deposu istinat duvarları ve zeminlerdeki donatılı imalatlar takip etmiştir.

Başlıca toprakarme imalatları olarak; Fransa’da Nice Menton karayolunda inşa edilmiş olan 23 metre yüksekliğe sahip Peyronner duvarı, yine Fransa’da bulunan Dunkirk limanındaki cevher ve kömür yükleme tesisi, ABD’ de Kaliforniya’ daki 39 no’ lu karayolu ve Kolorado kayalık dağlarındaki Vail geçidini aşan 70 no’ lu devletlerarası karayolunda inşa edilmiş dayanma duvarları ve İspanya, Bilbao Behobia otoyolundaki dayanma duvarları ile Hint körfezindeki Reunion Adası’ nda yer alan Saint Denis sahil yolunda inşa edilmiş 11 m uzunluğundaki duvar gösterilebilir (Alkaya, Çobanoğlu; 2007).

1.2.5. Toprakarme Yapıların Deprem Davranışı

Toprakarme dayanma yapıları sismik koşullara göre tasarlanırken genellikle quasi statik (yarı statik) tasarım yükleri kullanılmaktadır. Bu tasarım prensipleri sistemin boyutlandırılmasının, yer aldığı sismik bölgedeki yatay yöndeki deprem ivmesinin hem iç hem dış stabilize gerekliliklerine uygun güvenlik faktörleri ile artışı sağlanarak etki edilmesi mantığına dayanmaktadır.

nde merkez üsse yakın mesafede imal edilmiş olan toprakarme yapılar ayakta kalabilme başarısını sergilemişlerdir.

1.2.6. Toprakarme Sistemin Avantaj ve Dezavantajları

İnşaat mühendisliğine kullanılan diğer malzemelere nazaran toprakarme sistemin birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar şöyle sıralanabilir:

- Esnek olma (fleksibilite, esneklik), toprakarmenin direkt olarak sıkıştırılması mümkün temel zeminlerinin üzerine inşa edilebilmesine olanak sağlar.
- Statik ve aynı zamanda dinamik yüklere karşı da yüksek mukavemet gösterir.
- Prekast, aynı zamanda prefabrik, yüzey ve donatı elmanı olarak kullanılan şeritlerin kullanılması montaj kolaylığı sağlar.
- Prekast cephe panelleri sayesinde çeşitli mimari çözümlere uygunluk gösterir.
- İnşaat malzemesinden ve inşa süresinde tasarruf sağlar. Özellikle yüksek imalatlarda geleneksel sistemlere göre düşük maliyeti ile ön plandadır.
- Nitelikli işçi ihtiyacı yoktur.
- Depreme karşı davranışta klasik siteme göre daha fazla dayanım gösterir.
- Zemin sistemi ile geleneksel sistemde yapımı uygun görülmeyen oldukça yüksek (40 metreye kadar) duvarların inşası mümkündür.

Toprakarme sistemlerin dezavantajları da mevcuttur. Ancak avantajlara oranla kıyaslanamayacak kadar azdır. Toprakarme sistemin dezavantajları şu şekildedir:

- Cephe panellerinin arkasında yerleştirilecek şeritler için mesafeye ihtiyaç vardır.
- Cephe panellerinin arkasına dolgu malzemesi ihtiyacı vardır.
- Donatıların korozyona uğrama riski vardır ve bunun için özel tasarım kriterleri gerektirir.
- Tasarım kriterleri ve şartnameler günümüzde hala gelişmekte ve değişmektedir.

1.4. Toprakarme Dayanma Yapılarının Tasarım Ölçütleri

1.4.1. Giriş

Toprakarme sistemler donatı ve sıkılaştırılmış dolgu ile meydana gelen kompozit imalatlardır. Bu sistemlerin mukavemet prensibi donatı ile sıkılaştırılmış dolgu arasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti ile çözümlenir. Sistemlerde yapılan teorik çalışmalar ve saha çalışmaları neticesinde kompleks çekme dayanımının yüksek olması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple sistemde kullanılan yapı elemanlarının karakteristik özellikleri önemli bir faktör olarak ele alınmalıdır.

Toprakarme sistemler tasarlanırken her bir tasarım için farklı hesap kabulleri yapılmaktadır. Bu farklı hesap kabulleriyle yapılan çözümlerin ortak ölçütleri ise şöyledir:

- Toprakarme dayanma yapılarının ön yüzeyi genellikle 70° ile 90° arasında değişir.
- Kesit yüksekliklerine uygun donatı tipleri kullanılır. Kesit yüksekliği 15 metreden yüksek olduğunda uzamayan çelik donatılar, 15 metreden düşük olduğunda ise uzayabilen polimer donatılar kullanılır.
- Donatılar, düşeyde 0,15 m ile 0,90 m kademelendirilerek imal edilir.
- Toprakarme sistemlerde dolgu malzemesinin tanecikli yapıda olması gerekir.
- Yüzey kaplama sistemi yapılırken kullanım amacına uygunluğu esas alınır.

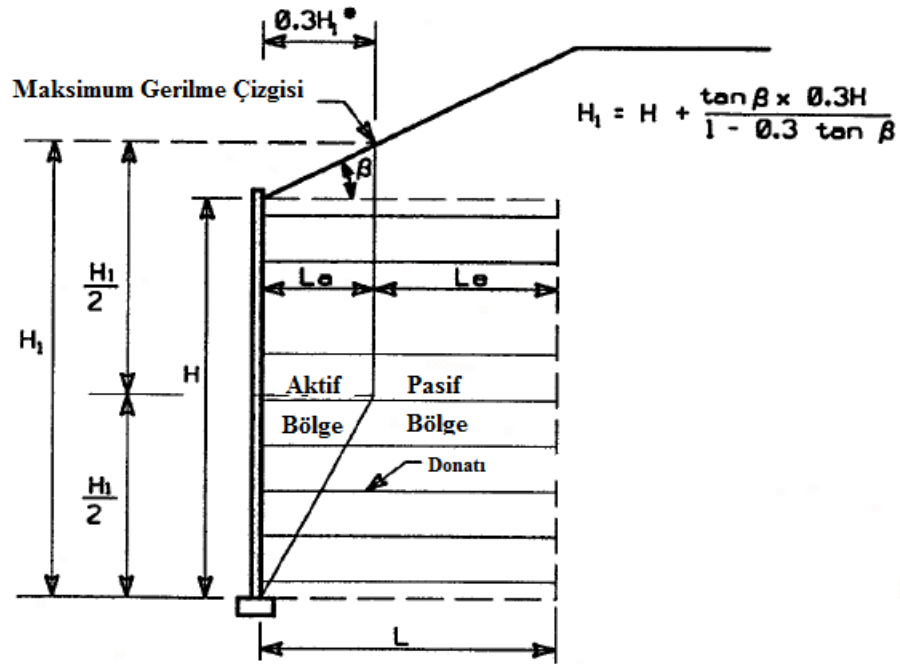
1.4.2. Donatı

Toprakarme sistemin tasarım ve davranışının belirlenmesindeki temel nokta donatı tipi seçimidir. Bu tür istemlerde donatıların görevi yatay doğrultudaki deformasyonların sınırlandırılmasıdır. Ayrıca sistemin davranışını etkileyen bir diğer nokta ise zeminin muhteva ettiği deplasmanlara karşı donatıların uzayabilirliğidir. Tasarımda tercih edilen donatının uzayabilen donatı olması durumunda hesaplar aktif duruma göre, tasarımda uzayamayan donatı söz konusu ise hesaplar pasif duruma göre yapılır. Uzayamayan donatılar için çelik şerit donatılar, uzayabilen donatılar için geogrid ve geotekstil niteliğindeki donatılar örnek verilebilir. Uzayamayan donatılarda kopma, zemin göçme durumuna erişmeden gerçekleşirken uzayabilen donatılar zemin göçme durumuna ulaşmadan deformasyona uğrayabilse de göçme gerçekleşirken donatı kopmamış olabilir (Mitchell, 1987).

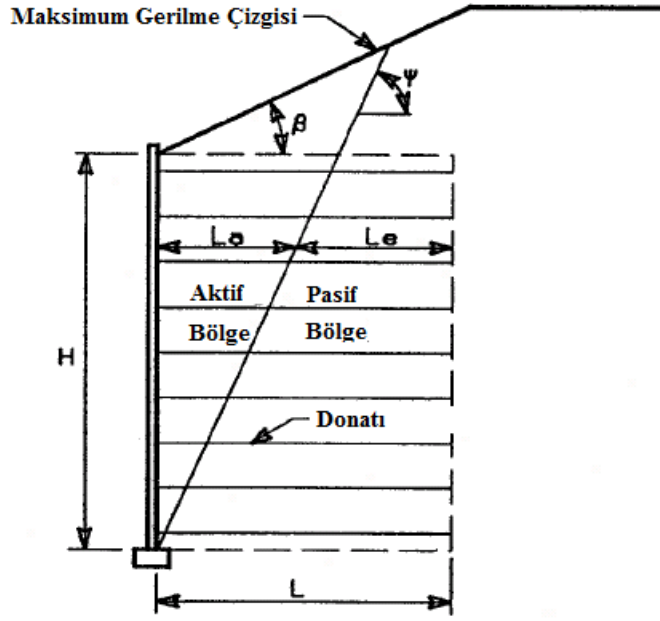
1.4.3. Donatı Gerilmeleri

Toprakarme sistemin donatı geometrisi, donatı boyları ve iç stabilitesinin belirlenmesinde birçok sayısal modelin çözümlenmesi söz konusudur. Ayrıca bu çalışmalar toprakarme sistemdeki donatıların yerlerinin ve büyüklüklerinin tespitine de olanak tanır (RECO, 2006).

Bir toprakarme modelinde gerilme hattı oluşturulurken her donatıya deplasman ölçerler bağlanır ve maksimum değerlerin şerit üzerindeki yeri tespit edilir. Bu oluşturulan gerilme hattı toprakarme dayanma yapılarının iç stabilize analizlerinin çözüm kaynağıdır. Uzayamayan ve uzayabilen donatılı sistemler için ideal hale getirilmiş maksimum gerilme hattı Şekil 36 ve Şekil 37’ de gösterilmiştir.



Şekil 36. Uzayamayan donatıya sahip sistemlerde gerilme çizgisi

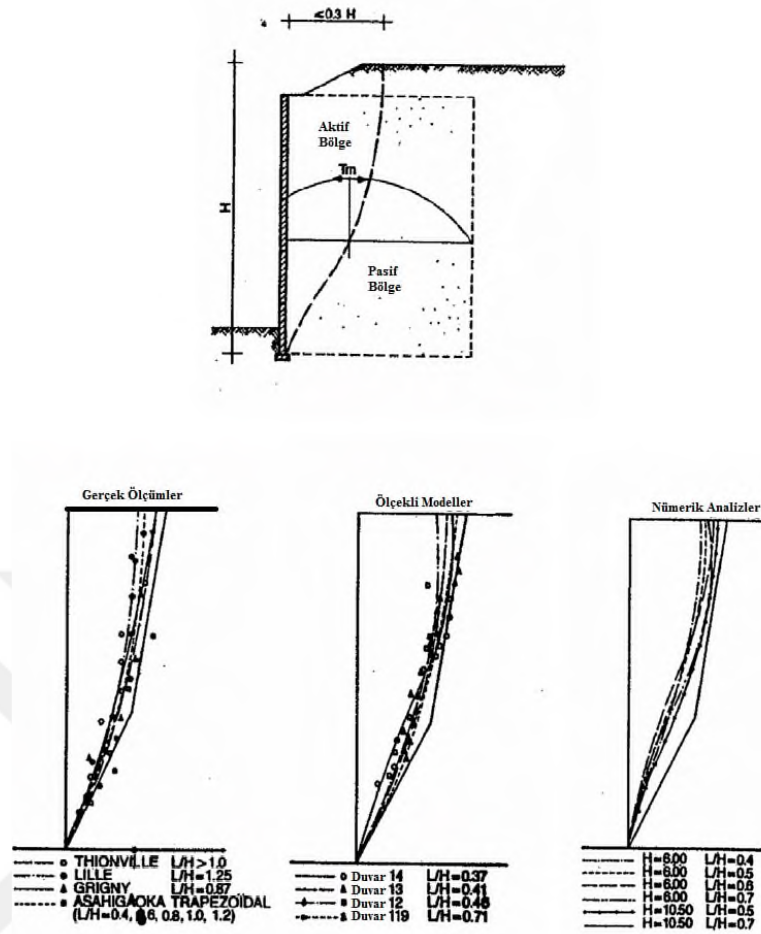


Şekil 37. Uzayabilen donatıya sahip sistemlerde gerilme çizgisi

Maksimum gerilme çizgisinin çizilmesi sistemimizi aktif ve pasif olmak üzere iki bölgeye ayırır. Panel tarafında kalan bölge olarak söyleyebileceğimiz aktif bölgede dolgu toprakarme şeritler tarafından tutulurken pasif bölgede ise dolgu, toprakarme şeritleri sürtünme kuvvetinin de etkisiyle tutan kısım olarak karşımıza çıkar. Şerit yüzeyinde oluşan kayma kuvvetinin yönü aktif bölgede panel yüzeyinden geriye doğru, pasif bölgede ise duvar cephesine doğrudur.

Maksimum gerilme çizgisinin belirlenmesi için birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ile çelik şeritlerin kullanılması halinde maksimum gerilme çizgisinin, başlangıç noktası duvar topuğu olan ve doğrusal bir yol izleyerek tepe noktasına ulaşan çizgi olduğu anlaşılmıştır. Bu çizgi dayanma yapısının orta noktasında duvar ön yüzüne paraleldir. Dayanma yapısının üst kısmındaki maksimum gerilme çizgisinin duvar düşeyine olan uzaklığı, yüksekliğin %30' u kadardır.

Bir toprakarme sistemde tercih edilen donatı tipi uzayabilen donatı ise maksimum gerilme çizgisi Coulomb – Rankine kayma düzlemini kesecektir. Bu yüzden dolguda ortaya çıkan gerilmeler aktif duruma örnek teşkil eder. Toprakarme kesitinin geometrisi ve sürşarj yükü maksimum gerilme hattını değiştirebilir (Juran, Schlosser; 1978).



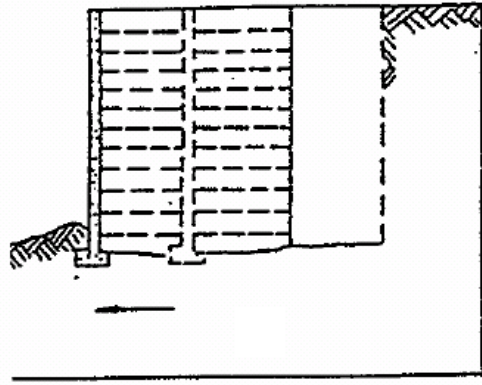
- Şeridin koparak deformasyona uğraması nedeniyle ortaya çıkan göçme durumudur. Tasarımda esas donatı boyu ve yüzey alanıdır. Meydana gelen bu deformasyon, kesitin herhangi bir kısmında ya da şerit bağlantı noktasında kopma olarak görülebilir. Çözümleme iki bölgede de aynı şekilde yapılır.

Maksimum gerilme çizgisinde yararlanılarak iç stabilite nedeniyle ortaya çıkan göçme modlarının çözümlenmesi yapılabilir. Maksimum gerilme çizgisinin oluşturduğu hat, potansiyel kayma dairesi olarak kabul edilirse tasarlanan şeritlerin uzunluklarının gerilme çizgisinin oluşturduğu hattı aşacak şekilde hesaplanması gerekir (Juran, 1983).

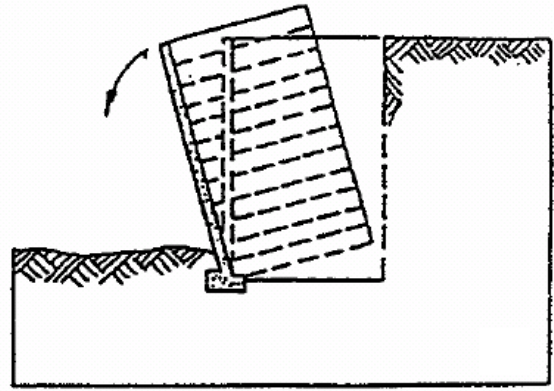
1.4.4.2. Dış Stabilite

Toprakarme dayanma yapılarının dış stabilite tahkiklerinde sistemin ağırlık duvarı gibi davranacağı kabul edilir. Analizler bu kabul esas alınarak aşağıda belirtilen kontrollere karşı yürütülür.

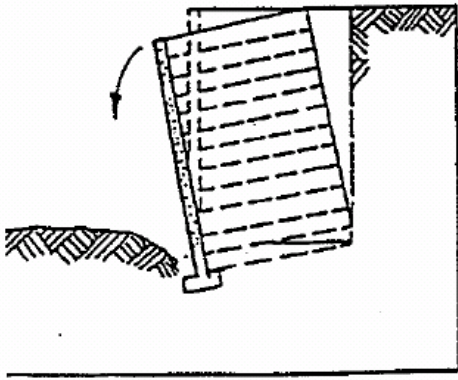
- Taban kayması kontrolü
- Zeminin taşıma gücü kontrolü
- Devrilme kontrolü
- Dairesel göçme kontrolü



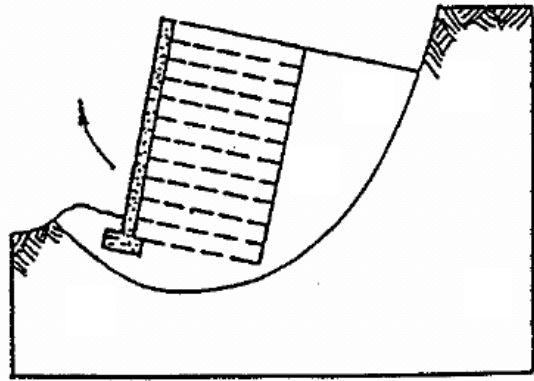
(a) Kayma Durumu



(b) Devrilme Durumu



(c) Taşıma Gücü Durumu



(d) Dairesel Göçme Durumu

Şekil 39. Dış stabilite için göçme modları

Toprakarme sistem, diğer dayanma yapılarına göre daha deformasyonları karşılayabilen ve esnek bir yapıdır. Bu sebeple tahkiklerde esas alınan güvenlik sayıları daha küçüktür. Esnek olan dayanma yapılarının taşıma gücü kontrolünde kıyas yapılan güvenlik sayısı 2'dir. (Schlosser, 1978).

1.4.5. Yükleme Koşulları

Toprakarme dayanma yapılarının tasarımında farklı hallerdeki yükleme koşulları esas alınır. Bu yüklemeleri statik ve dinamik olarak ikiye ayırabiliriz. Tasarım aşamasında kullanılan statik yükleme durumları ise şöyledir:

- Toprak itkisi
- Köprü kenar ayaklarında düşey ve noktasal yükler
- Trafik yükleri
- Dolgu arkası şev yükleri
- Üst yapı dolgu yükleri
- Baraj ve su kanallarında su yükleri

1.4.6. Su Etkisi

Toprakarme dayanma yapılarının tasarımında su etkilerinin dikkate alınması hesap yöntemlerinin değişmesine yol açabilir. Sahada yapılan araştırmalar ve projenin niteliği su etkilerinin analizinde yardımcı kaynaklardandır. Su kaynaklı etkilerin araştırılmasında aşağıdaki maddeler dikkate alınır:

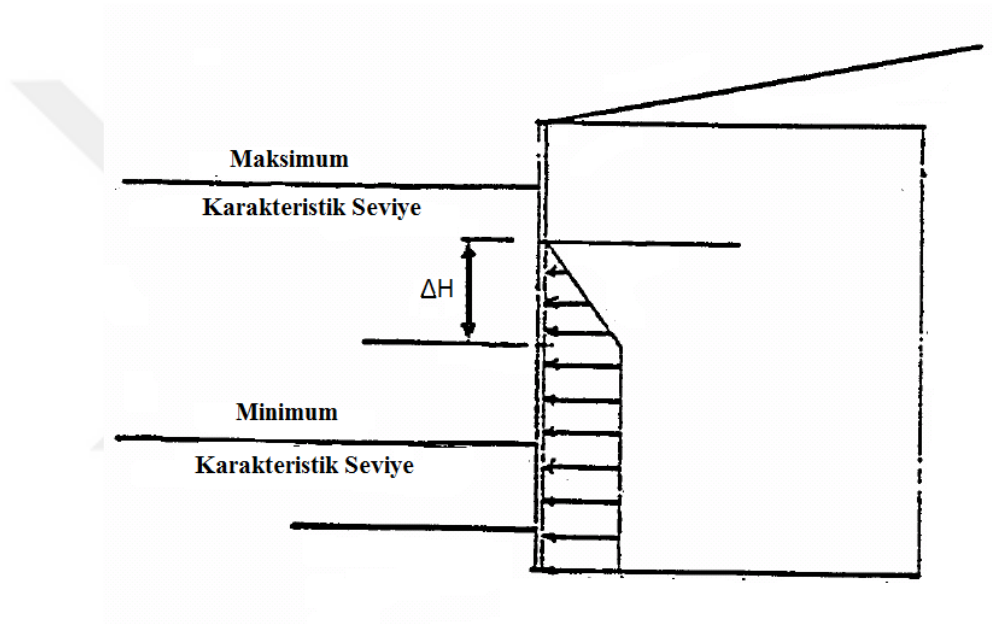
- Hidrostatik basınç kuvvetleri
- Akım ağırları
- Efektif zemin parametreleri
- Su etkisinde zemin ile donatı arasındaki sürtünme davranışı

Suya maruz kalan toprakarme dayanma yapılarının tasarımı su kanalları ve baraj yapılarında kullanılacak olan toprakarme sistemler için önemlidir. Bu yapılarda toprakarme duvar blokunun ön cephesindeki su seviyesi değişiklik gösterebileceğinden ötürü göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle tasarım için oluşturmamız gereken iki farklı parametre grubu vardır. İlk grup karakteristik parametreler olarak isimlendirilir. Karakteristik parametrelerde minimum ile maksimum su seviyeleri dikkate alınır. İkinci grup parametreleri ise akış rejiminin minimum on yıllık zaman aralığındaki çözümlenmesi sonucu elde edilir. Özellikle kanal tasarımında bu grup parametrelerinin belirlenmesi İnşaat Mühendisliğinin de temeli olan ekonomik ve güvenli bir yapı sistemi oluşumuna olanak sağlar

Karakteristik tasarım durumunda, en yüksek ve en düşük su seviyesinin arasındaki fark tespit edilir. Böylece suya maruz kalacak duvar seviyeleri belirlenmiş olur. Güvenli

bölgede kalmak adına tasarımda her zaman en olumsuz duruma bakılarak projelendirme işlemi yapılır. Suya maruz bir yapının karşılaşılabileceği en olumsuz durum Şekil 40' ta gösterilmiştir.

Bir başka önemli husus ise toprakarme toprak kısmının su etkisine karşı muhafaza edilmesidir. Suyun etkisiyle tabanda oyulmalar meydana gelebilir ve bunun önlenmesi için yapılan uygulamalara gabion uygulaması ve kaya dolgu teşkili, nitelikli dolgu seçimi, özel yüzey kaplama elemanları, düşey ve yatay dilatasyon uygulamaları örnek olarak gösterilebilir (TAI, 2000).

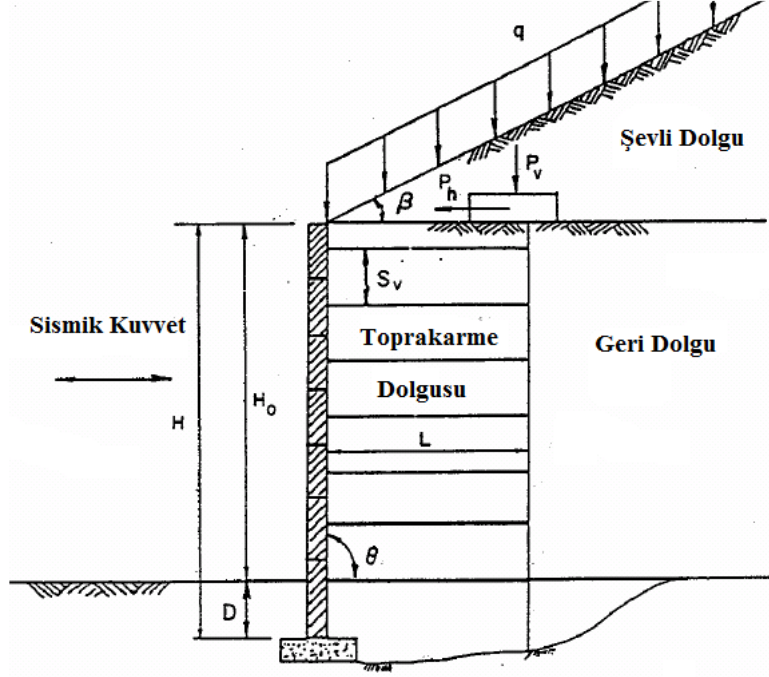


Şekil 40. Toprakarme sistemde su basıncı (NCHRP, 1984)

1.4.7. Tasarım Aşamaları

Bir toprakarme dayanma yapısının tasarımında bazı kabuller vardır. Bu kabuller aşağıdaki gibidir:

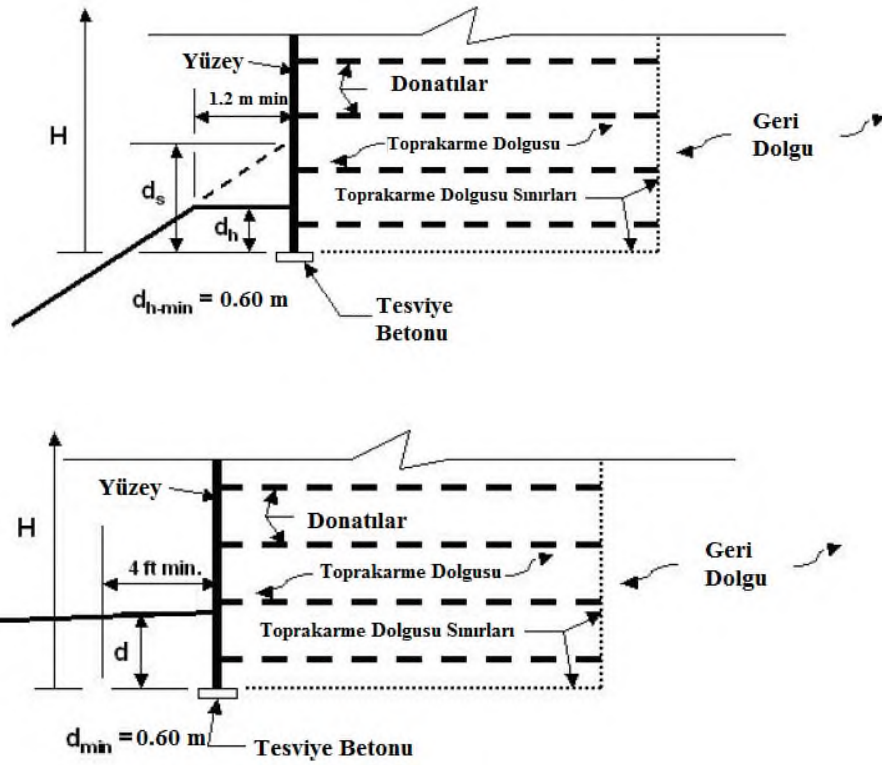
- Yapı, dikdörtgen kesite sahip bir blok olarak düşünülür.
- Şerit boylarının birbirine eşit olduğu varsayılır.
- Duvarın ön yüzü ve yatay düzlem 90° lik açı yapar.



Şekil 41. Toprakarme sistem geometrisi ve yükleme koşulları (Berg, 2009)

1.4.7.1. Gömme Derinliği

Gömme derinliği (D), toprakarme sistemde topuğun çeşitli etmenlere karşı korunması amacıyla yapılır. Bu etmenler yüzeysel kayma riski, donma etkileri, toprakta oluşacak oyulmalar olarak sıralanabilir. Ayrıca tabanda oluşabilecek taşıma gücü kaynaklı problemlere karşı da bir önlem niteliği taşıyan bir parametre olarak karşımıza çıkar. Gömme derinliğinin bağlı olduğu yapı yüksekliği, depremsellik, zemin ve topografik etmenler vb. gibi koşullar bulunmaktadır. Teorik olarak gömme derinliği yapı yüksekliğinin %10' u kadar alınarak hesaplarda kullanılır. En düşük gömme derinliği ise 0,60 m olarak önerilmektedir. Kaya zemine oturan sistemlerde bu değer küçültülebilir. Eğer sistem şeve oturuyorsa gömme derinliği 1,20 metreye kadar çıkartılabilir (Berg, 2009).



Şekil 42. Şevli toprak ve düz topuk için gömme derinlikleri (Elias, 2001)

1.4.7.2. Düşey Donatı Aralıkları

Toprakarme dayanma yapılarında yer alacak düşey donatı aralıkları aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Sıkıştırma tabaka kalınlığı
- Dolgu niteliği
- Cephe paneli geometrisi
- Şerit yoğunluğu

Donatılar arasındaki düşey mesafeler ilk olarak 0,30 – 0,60 metre olarak seçilir. Yapılan iç stabilite analizleri yapının tabanından yukarıya doğru tabaka mesafelerinin değişiklik gösterebildiğini ortaya koymuştur. Mesafelerdeki bu değişimin bağlı olduğu parametreler ise şeritlerin mukavemeti ve şeritler arasındaki zemin blokunun karakteristik dayanımı olarak belirtilebilir.

1.4.7.3. Donatı Uzunluğu

Toprakarme dayanma yapılarında birçok etmen donatı uzunluğunun seçilmesinde etkilidir. Sistemde kullanılacak donatı boyu belirlenmeden önce fiktif bir donatı boyu seçilir ve bu fiktif donatı boy üzerinden yapılacak stabilite analizleri sonucunda kesin donatı boyu belirlenir. Ancak fiktif donatı boyu da seçilmeden önce göz önünde bulundurulması gereken etmenler vardır. Bu etmenler; duvar üstü geometrisi, yükleme durumu ve taban zeminin yüksekliği olarak sıralanabilir. Duvar en alt kotu olan tesviye betonunun hizasından dayanma yapısının en üst kotuna kadar olan mesafeye “duvar yüksekliği (H)” diyebiliriz. Bu takdirde fiktif şerit boyunu (L) duvar yüksekliğinin %70’ i (0,70 H) olarak seçmemiz uygun olur. Ancak bu şerit boyları farklı sistemlerde azaltılabilir veya arttırılabilir. Örneğin; yüksek sürşarj etkisinde olan, şevli dolgu ve kenar ayak yüklerini taşıyacak olan sistemlerde şerit boyu 0,8H ile 1,10H seviyesine kadar arttırılabilir. Eğer sistemimizde depremsellik de söz konusu ise şerit boyunu arttırmamız gerekir. Diğer taraftan sistemimiz rijit bir temel zemine oturuyorsa şerit boyumuzun 0,50 H seviyesine düşürülmesinde bir sakınca yoktur (AICE, 1994).

1.4.7.4. Yatay Toprak İtkisi ve Düşey Gerilme

Toprak itkisinin uzayabilen donatılı ve uzayamayan donatılı sistemler için ayrı incelenmesi gerekir. Sistemimizdeki donatının uzayamayan olduğunu varsayarsak, toprakarme dolgusunun arka tarafındaki bölgede dolgunun sebep olduğu toprak itkisi doğrusal bir artışla duvar üstünden tabana doğru uzanır. Bu gerilmenin sebep olduğu itkinin düzlemle yaptığı açığı “ λ ” ile isimlendirmektediriz. Bu λ açısının formülü ise şöyledir:

$$\lambda = (1,2 - \frac{L}{H})\phi_b \quad (\text{Denklem 1})$$

Uzayamayan donatılı sistemlerde bu açı $c=0$ olarak alınır.

Uzayabilen donatıya sahip sistemlerde toprakarme dolgusuna etki eden toprak itkisi aşağıdaki formülasyon ile elde edilir.

$$P_a = K_{ab(\lambda, \beta)} \gamma H^2 \quad (\text{Denklem 2})$$

Eğer sürşarj yüklerinin etkisi ihmal edilirse Coulomb yatay toprak basıncı katsayısı şöyle hesaplanır:

$$K_{ab} = \tan^2(45 - \frac{\phi_b}{2}) \quad (\text{Denklem 3})$$

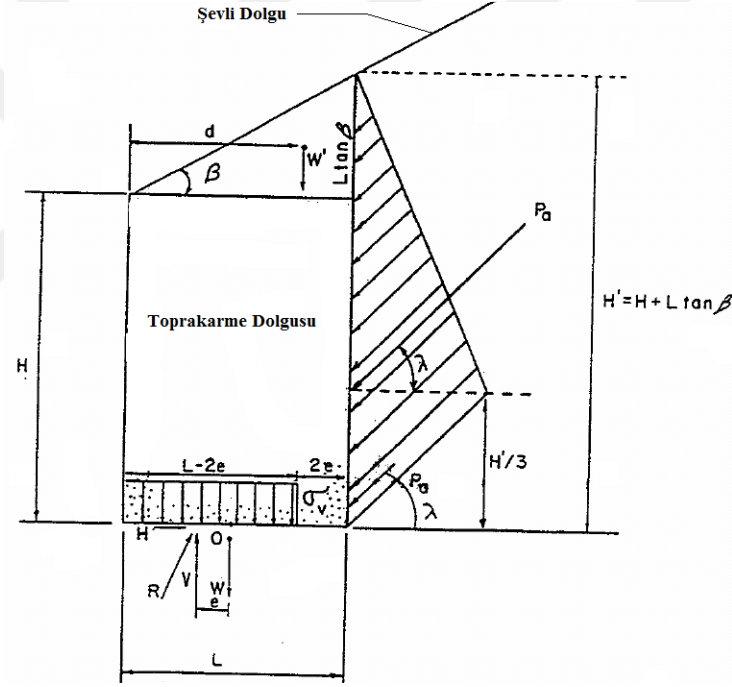
Formülasyonda belirtilen ϕ_b , geri dolgunun efektif içsel sürtünme açısı olarak tanımlanır. Eğer λ ve β açıları sıfıra eşit değilse aktif toprak basıncının bağlı olduğu değerler ϕ_b ve λ açıları olur.

Sistemin arka bölgesinde sonsuz uzunlukta olan ve yatay düzlemle bir β açısı yapan şevli bir dolgu bulunuyorsa eğim açısı uzayamayan donatılar için aşağıdaki hale dönüşür.

$$\lambda_b = \phi_b \left[1 - \left(1 - \frac{\beta}{\phi_b} \right) \left(\frac{L}{H} - 0,2 \right) \right] \text{ (Denklem 4)}$$

Uzayabilen donatılarda ise bu eğim açısı $\lambda_b = \beta$ şeklindedir. Aktif toprak basıncı katsayısı aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır.

$$K_a = \left[\frac{\frac{\sin(\theta - \theta_b)}{\sin \theta}}{(\sqrt{\sin(\theta + \lambda)} \sqrt{\sin(\phi_b + \lambda) \sin(\phi_b - \beta) / \sin(\theta - \beta)})} \right] \text{ (Denklem 5)}$$



Şekil 43. Dolgu arkasındaki düşey gerilme parametreleri (Elias, 2001)

H' yapının mekanik yüksekliği olmak üzere bu toprakarme dayanma yapısının kesitinde oluşacak düşey gerilmeler Şekil 43'te gösterilmiştir. Yapılacak hesaplamalarda cephe panellerinin düşey yöndeki ağırlığı ihmal edilmelidir. Bu kabulleri yaptıktan sonra ön hesaplamalar için aşağıdaki sıralama esas alınır.

- Toprak itkisinin yatay düzlemle yaptığı λ eğim açısı belirlenir.
- Duvar arka bölgesindeki yatay itki Denklem 6'daki formülasyon ile hesaplanır.

- Eksantrisite hesaplanır. Duvar tabanındaki toplam moment değerinin sıfır olduğu yer eksantrisite noktası olarak isimlendirilir. Aşağıdaki formülasyon, W toplam düşey gerilme değeri olmak üzere, eksantrisite hesap edilir.

$$e = \frac{[P_a \cos \lambda \frac{H'}{3} - P_a \sin \lambda \frac{L}{2} - W'(d - \frac{L}{2})]}{(\gamma_r HL + W' + P_a \sin \lambda)} \quad (\text{Denklem 6})$$

- σ_v olarak ifade edilen yapının tabanındaki uniform düşey gerilme aşağıda ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$\sigma_v = \frac{(\gamma_r HLW' + P_a \sin \lambda)}{(L - 2e)} \quad (\text{Denklem 7})$$

Bu yaklaşım Meyerhof formülüne de uyum göstermektedir. Eksantrik yükleme sonucunda yapının tabanında oluşan uniform gerilmenin, yapının taban genişliğinin eksantrisite mesafesinin yarısı bir mesafede oluştuğu kabul edilir.

- Son olarak düşey yöndeki gerilmelere sürşarj yükü değeri eklenir ve çözümleme tamamlanır.

1.4.7.5. Dış Stabilité

1.4.7.5.1 Taban Kayma Tahkiki

Toprakarme yapı sisteminde tabandaki kaymaya karşı güvenlik şartı aşağıdaki eşitsizlikte verilmiştir.

$$G_{Skayma} = \frac{\Sigma \text{Yatay tutucu kuvvetler}}{\Sigma \text{Yatay devirici kuvvetler}} \geq 1,5 \quad (\text{Denklem 8})$$

Eğer toprakarme sistemimiz uzayabilen donatılı ($\lambda=0$), yatayda dolguyu tutan ve uniform olan sürşarj yükü etkisindeyse kayma için güvenlik faktörünün aşağıdaki gibi hesaplanması gerekir.

$$G_{Skayma} = \frac{(V_q + W)\mu}{(P_b + P_q)} \quad (\text{Denklem 9})$$

Bu denklemde μ değeri toprakarme kitlesi ile taban zemini arasındaki sürtünme katsayısı olarak ifade edilir.

Yapı ağırlığı;

$$W = \gamma_r HL \quad (\text{Denklem 10})$$

Tabandaki düşey yöndeki gerilme değeri;

$$V_q = \gamma_s h_s L \quad (\text{Denklem 11})$$

Sürşarj yüklerinin etkisinin hesabı;

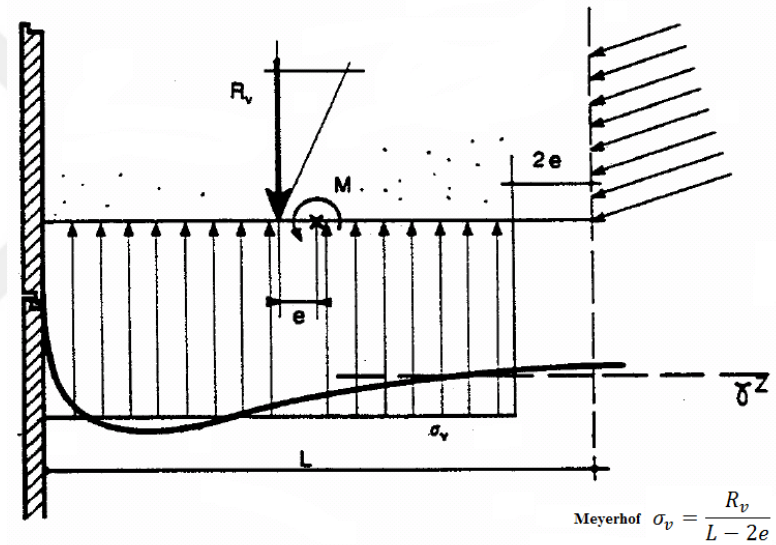
$$P_q = K_{(a,b)} \gamma_s h_s H \text{ (Denklem 12)}$$

Geri dolgudaki yatay itkinin hesabı;

$$P_a = 0,5 K_{(a,b)} \gamma_b H^2 \text{ (Denklem 13)}$$

formülasyonlarıyla elde edilir.

Genel stabilite hesaplarında göçme derinliği kaynaklı oluşacak pasif toprak itkisi ihmal edilir. Çünkü topraktaki gömmenin ilerleyen zamanlarda kaldırılma ihtimali düşünülmelidir. Bunun sebebi olarak güvenli bölgede kalmak söylenebilir. Buna ek olarak cephe panellerinin kayma direnci de hesaplamalara dahil edilmez. Taban zemininde oluşan kayma direnci ise geri dolgunun sebep olduğu itkinin yatay yöndeki bileşeni ile benzerlik gösterir.



Şekil 44. Dış stabilitede Meyerhof formülü (Elias, 2001)

Uzayamayan donatıya sahip bir toprakarme dayanma yapısının taban kayması tahkiki hesaplanırken aşağıdaki aşamalar dikkate alınır.

- Duvar arka bölgesindeki itki hesabı;

$$P_a = K_{(\phi, \lambda, \beta)} (0,5 \gamma_b H'^2 + q H') \text{ (Denklem 14)}$$

- Mekanik yükseklik;

$$H' = H + L \tan \beta \text{ (Denklem 15)}$$

- Aktif kayma kuvvetinin hesabı;

$$P_b = P_a \cos \lambda_b \text{ (Denklem 16)}$$

şeklinde yapılır.

Bu hesaplamaların ardından kayma modları da dikkate alınarak minimum içsel sürtünme açısı (ϕ) belirlenir. İncelenmesi gereken ilk durum yapının taban zemininde oluşan kaymadır. Yapının oturduğu temel zeminine ilişkin mukavemet değişkenleri (c , ϕ_f) geri dolgunun değişkenlerinden sayıca küçük ise bahsedilen ilk durum dikkate alınır. Kullanılan donatı tipi tabaka tipi ise geri dolgunun yüzeyinde oluşan kayma durumu esas alınır (ϕ_r). Toprakarme dolgusunda dolgu-donatı yüzeyinde oluşan kayma durumu “ ρ ” simgesiyle belirtilen son kayma modu ile ilişkilendirilir. Bahsedilen dolgu-donatı arasındaki sürtünme kuvveti açısını belirlemek için deneysel yöntemlere ihtiyaç duyulur (Yıldız, 2014).

- Birim uzunluk boyunca tutucu kayma kuvvetinin hesabı aşağıdaki gibidir:

$$P_r = (W + V_q + P_a \sin \lambda_b) \mu \text{ (Denklem 17)}$$

$$\mu = \min (\tan \phi_f, \tan \phi_r, \tan \rho) \text{ (Denklem 18)}$$

Eğer sürüş yükleri kalıcı ise bu durumda kaymaya karşı güvenliğe pozitif etkisi hesaba katılır. Geçici yükler ihmal edilir.

- Son aşama olarak güvenlik sayısının belirlenmesi gerekir. Güvenlik sayısının hesaplanabilmesi için tüm verilerin eksiksiz hesaplanabilmesi gerekmektedir. Belirlenen güvenlik sayısı istediğimiz değerden daha küçük ise şev açısının düşürülmesi, donatı uzunluğunun arttırılması gibi koşullar uygulanır ve analizler tekrarlanır.

1.4.7.5.2. Devrilme Tahkiki

Toprakarme dayanma yapıları, çalışma prensibi itibarıyla klasik dayanma yapılarından daha esnek bir yapıya sahiptir. Burum da devrilmenin diğer konvansiyonel yapılardan daha farklı oluşacağı anlamına gelir. Devrilme tahkiki hesabına başlanırken yapılması gereken ilk iş, yapının topuğundaki tutucu momentlerin devirici momentlere oranının aşağıda belirtilen eşitsizliğe uygun elde edilmesidir.

$$G_{s_{devrilme}} = \frac{\Sigma \text{tutucu momentler}}{\Sigma \text{devirici momentler}} \geq 2,0 \text{ (Denklem 19)}$$

Uzayabilen donatıya sahip ve uniform yüklü bir toprakarme sistemde devrilme tahkikinde kullanılacak güvenlik sayısı formülü aşağıda verilmiştir.

$$G_{s_{devrilme}} = \frac{(V_q + W) \left(\frac{L}{2} \right)}{(P_b \left(\frac{H}{3} \right) + P_q \left(\frac{H}{2} \right))} \text{ (Denklem 20)}$$

$\lambda \neq 0$, $\beta \neq 0$ olmak üzere bir toprakarme sistem için devrilme tahkiki hesabında izlenmesi gereken sıra aşağıdaki gibidir:

- Toprak itkisinin yatay yöndeki bileşeni (P_a) yüksekliği H' olan bir yapıda devirici momentin hesabı (devirici kuvvet olarak):

$$M_d = P_a \cos \lambda_\beta \left(\frac{H}{3} \right) \text{ (Denklem 21)}$$

- Yapı ağırlığı kaynaklı oluşan tutucu momentin hesabı:

$$M_{WR} = V_q d + \frac{WL}{2} \text{ (Denklem 22)}$$

- Toprak itkisinin yatay yöndeki bileşeninin hesabı (tutucu kuvvet olarak):

$$M_{TR} = P_a \sin \lambda_\beta L \text{ (Denklem 23)}$$

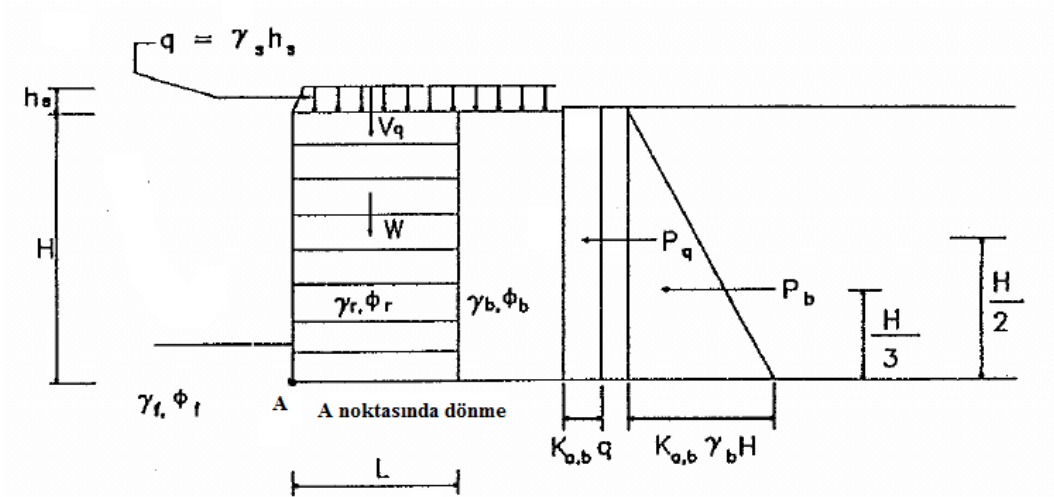
- Bu kabullerin ardından devrilmeye karşı güvenlik katsayısının hesabı aşağıdaki gibidir:

$$G_{S_{devrilme}} = \left(\frac{V_q d + \frac{WL}{2} + P_a \sin \lambda_\beta L}{P_a \cos \lambda_\beta \frac{H'}{3}} \right) \text{ (Denklem 24)}$$

Güvenlik katsayısı istenen değeri sağlamıyorsa yapılması gereken şerit boyunu arttırmak ve eksantrisiteyi tekrar hesaplamaktır. Eksantrisite değeri için dikkat edilmesi gereken şart aşağıdaki gibidir:

$$e \leq \frac{L}{6} \text{ (Denklem 25)}$$

Bu şart sağlanmıyorsa şerit boyu artırılabilir (Elias, 2001)



Şekil 45. Toprakarme sisteminde devrilme tahkiki (Elias, 2001)

1.4.7.5.3. Taşıma Gücü Tahkiki

Toprakarme dayanma yapısı sistemi tasarlanırken taşıma gücü sorunu yaşamamak için zemindeki emniyetli taşıma gücünün, Meyerhof yöntemiyle hesaplanmış olan taban basıncından daha büyük olması gerekir. Güvenlik katsayısı ise 2 olarak alınır ve hesaplarda kullanılır.

$$\sigma_v \leq q_{all} = \frac{q_{ult}}{F_s} = \frac{q_{ult}}{2} \text{ (Denklem 26)}$$

Toprakarme sistem uzayabilen donatılı tasarlanmış ve yatay yöndeki bir geri dolguyu tutuyorsa taşıma gücü tahkikinden önce eksantrisite değerinin aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanması gerekir.

$$e = \frac{(P_b \frac{H}{3} + P_q \frac{H}{2})}{(V_q + W)} \text{ (Denklem 27)}$$

Bu formülden hareketle tabanda oluşacak toplam gerilme;

$$\sigma_{v_{maks}} = \frac{(V_q + W)}{(L - 2e)} \text{ (Denklem 28)}$$

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{2} \geq \frac{\sigma_{v_{maks}}}{G_s} \text{ (Denklem 29)}$$

şeklinde hesaplanır.

Bir toprakarme yapısının ($\lambda \neq 0$, $\beta \neq 0$) taşıma gücü tahkiki için hesaplamalarda izlenmesi gereken sıra aşağıdaki gibidir:

- Denklem 27’de verilen formülasyona göre eksantrisite hesaplanır.
- Düşey gerilme Meyerhof formülü ile hesaplanır.

$$\sigma_v = \frac{(V_q + W + P_a \sin \lambda)}{(L - 2e)} \text{ (Denklem 30)}$$

- Zemin mekaniği prensipleri esas alınarak taban zeminindeki taşıma gücü hesaplanır.

$$q_{ult} = c_f N_c + 0,5(L - 2e)\gamma_f N_f \text{ (Denklem 31)}$$

Bu formülde N_c ve N_f değerleri birimsiz büyüklüklerdir ve istendiği takdirde zemin mekaniği kaynaklarından bakılabilir.

Beklenen stabilite değerleri, emniyetli taşıma gücü tahkikinin ardından elde edilemiyorsa şerit boyları uzatılarak çözümleme tekrarlanır. Eğer şerit boylarının uzatılması hala istenilen stabilite değerlerine ulaştırmıyorsa başvurulacak yöntem zemin iyileştirme yöntemleridir. Temel zeminin mukavemet değişkenleri yeniden hesaplanarak çözümleme yapılır (Schlosser, 1983).

Seçilecek iyileştirme yöntemi projenin niteliği göz önünde bulundurularak karar verilir. Zemin iyileştirme yöntemlerinden en yaygın kullanılanlar ise zemin yerdeğiştirmesi, taş kolon ve jet grout olarak sıralanabilir. Zemin iyileştirme yöntemlerine karar verirken göz önünde bulundurulması gereken diğer parametreler yapının yüksek yükleme altında olması ve zeminin zayıf olmasıdır. Zemin iyileştirme alanı belirlenirken şerit boyları da göz ardı edilmemelidir.

Toprakarme dayanma yapılarının tasarım ölçütlerinden biri olan “Zemin İyileştirme” 1.4.9. Başlığı altında detaylı olarak incelenecektir.

1.4.7.5.4. Genel Stabilite

Bir toprakarme dayanma yapısında genel stabilite kontrolü yapılmadan önce sistemdeki donatı aralıkları, donatı boyları seçimi ve dış stabilite tahkikleri tamamlanmış olmalıdır. Sisteme etki eden bu i parametrelerin yanında dış parametrelerin de önemi büyüktür. Analiz sonucuna direkt etki eden bu parametreler şöyle sıralanabilir:

Yapının yer alması planlanan bölgenin;

- Topografik zellikleri
- Jeolojik yapısı
- Taban yapısı
- Tabakalanması
- Altta bulunan tabakaların geoteknik parametreleri

Genel stabilite analizleri yapmak için şev stabilitesi analizi yapan sayısal çözümleme programları ile yapılabilir. Bu programlar ile toprakarme dayanma yapısının sınırlarına karar verilir. Programda şeritlerin boyları ve yerleşimleri sisteme girilip değişkenler tanımlanır. Analizlerin sonucunda emniyet katsayısı en düşük olan kayma dairesi bulunur. Elde edilen güvenlik katsayısı olması gereken değerden düşük ise yapılması gereken taban zemininde iyileştirme yapmak veya şeritleri uzatarak analizleri tekrarlamaktır (Elias, 2001).

1.4.7.5.5. Sismik Kontrol

Sismik yükler toprakarme dayanma yapısında statik yüklere ek olarak bir dinamik itki oluşmasına sebep olur. Bu itki sistemde bir atalet kuvveti oluşturur ve formülü aşağıdaki gibidir:

$$P_{IR} = Ma_m \text{ (Denklem 32)}$$

Bu formülde M ile ifade edilen değer toprakarme dayanma yapısının toplam ağırlığını ifade eder a_m değeri ise sisteme etki eden maksimum yatay ivmeyi temsil etmektedir.

Sismik yüklerin sebebiyet verdiği dinamik yatay itki kuvveti psödo statik özelliktedir ve Mononobe-Okabe yaklaşımında gösterildiği gibi oluşur. Dış stabilite analizleri yapılmadan önce bahsi geçen dinamik etki ve statik halde sistemde yer alan kuvvetler de hesaba katılmalıdır. Sismik çözümlemelerde dikkate alınan güvenlik faktörleri, statik çözümlemelerde kullanılan güvenlik faktörlerinin %75' i kadardır.

Sismik hesaplamalar aşağıda belirtilen adım sırasına göre yapılır:

- Bir pik yatay yer ivmesi (a_g) belirlenir ve maksimum yer ivmesi katsayısıyla çarpılır. Maksimum yer ivmesi yapının bölgesine göre belirlenir ve a ile ifade edilir.

$$a_m = (1,45 - a)a \text{ (Denklem 33)}$$

Denklem 32 ve Denklem 33'te belirtilen a_m değeri merkezde meydana gelen ve duvara etki eden maksimum deprem ivmesini ifade eder. Bu değere tasarım deprem ivmesi de denebilir. Bu ivmeye bağlı olarak sismik itki (P_{AE}) ve yatay atalet kuvveti (P_{IR}) aşağıda gösterildiği gibi hesap edilir.

$$P_{IR} = 0,5a_m\gamma_r H^2 \text{ (Denklem 34)}$$

$$P_{AE} = 0,375a_m\gamma_b H^2 \text{ (Denklem 35)}$$

Bütün bu kuvvetler hesaplandıktan sonra sisteme etki eden statik kuvvetlere ilave edilir. Bu kısımda yapılması gereken bir diğer kabul de yatay yöndeki atalet kuvveti değerinin, sismik kuvvetlerin oluşturduğu itkinin %60' ı kadar olduğudur. İki değer en yüksek değere çıktığı ana kadar indirgenen yatay yöndeki atalet kuvveti sisteme etki eder.

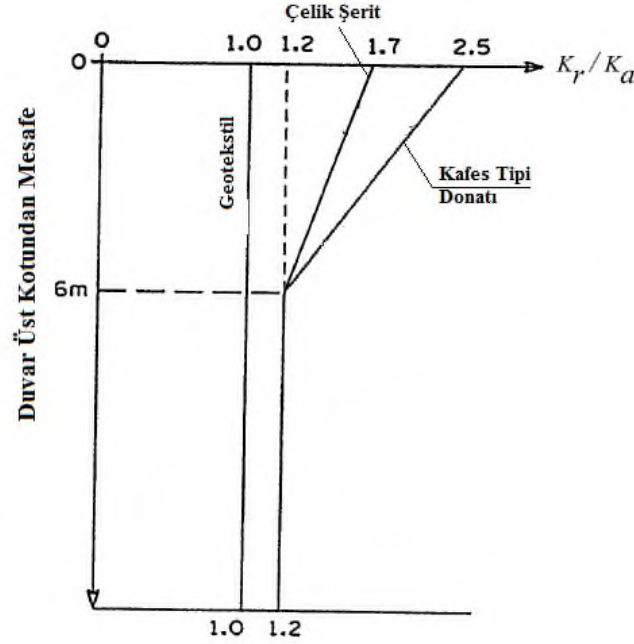
- Devrilme tahkiki ve kayma tahkiki bu durum için tekrar edilir. Sismik çözümlemelerde istenilen güvenliğin sağlandığı durum, toprakarme sistemin statik haldeyken sağlaması gereken güvenlik katsayılarının %75'i oranınca güvenli olarak bulunduğu durumdur.

Eğer yapının bulunduğu bölgede deprem ivmeleri, 0,4g değerinden daha büyükse sistemde kalıcı olacak şekilde yatay ve düşey yönde deformasyonlar yapabilir. Bu sebeple sismik etkinliği yüksek olan bölgelerde tasarım aşamasında güvenlik sayılarının daha büyük seçilmesi gerekir (Binquet, 1978).

1.4.7.6. İç Stabilité

1.4.7.6.1. Donatılarda Çekme Kuvvetleri ve Şerit Kırılma Tahkiki

İç stabilite kontrolüne başlarken uygulanması gereken ilk adım şeritlerde oluşacağı ön görülen maksimum çekme kuvvetinin tayin edilmesidir. Bu aşamada, Başlık 1.4.3.' te bahsedilen maksimum gerilme çizgisinden faydalanılır. Maksimum gerilme çizgisi hattının yeri dolgunun ve donatının sıklığına bağlı olarak değişebiliyor olsa da genel hali aynıdır. Bu ölçütler dikkate alınarak şerit tipine göre Şekil 46'da görülen yatay gerilme oranı-derinlik grafiği elde edilmiştir.



Şekil 46. Şerit tiplerine göre yatay gerilme oranı-yükseklik ilişkisi (Elias, 2001)

Maksimum gerilmenin hesaplanabilmesi için aşağıdaki aşamalar dikkate alınır.

- Her bir şerit düzeyindeki yatay ve düşey yöndeki gerilmeler hesap edilir. Sistemdeki sürşarj yüklerinin oluşturacağı ek gerilmeler de aynı şekilde yatay ve düşey yöndeki bileşenleri ile eklenir. Böylece her bir şerit düzeyindeki toplam yatay ve düşey yöndeki gerilmeler aşağıda formülize edilmiştir.

$$\sigma_H = K_r \sigma_v + \Delta \sigma_h \text{ (Denklem 36)}$$

Düşey yöndeki gerilme hesabı yapılırken donatı seviyesi (z) ve dayanma yapısına etkiyen sürşarj yükü (q) değeri de hesaba katılır. Düşey gerilme değerinin hesabı aşağıdaki formül ile yapılır.

$$\sigma_v = \gamma_r z + \sigma_2 + q + \Delta\sigma_h \text{ (Denklem 37)}$$

Denklem 36'da belirtilen K_r değeri, dayanma yapısının üst seviyesi ile alt seviyesi arasındaki uzaklığın (z) bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkar. Bu uzaklık belirlenirken panel altındaki tesviye betonu ve duvar üstü elemanlar ihmal edilir.

Denklem 37'deki σ_2 değerinin Şekil 48' te gösterildiği üzere hesabı yapılır.

$\Delta\sigma_v$ değişkeni ise düşey yüklerin sistemde oluşturduğu düşey gerilme artışıdır. Bu artış Şekil 47'de gösterildiği üzere 2/1 eğimle sisteme etki eder.

Bir diğer değişken olan $\Delta\sigma_h$, sisteme etki eden düşey yöndeki yüklerin oluşturduğu yatay gerilme artışını ifade eder.

Sistemde sürşarj yükü çeşidine göre hesap yöntemleri ve gerilme artışı değişir.

- Her bir donatı seviyesi için birim genişlikte maksimum gerilmeler hesap edilir.

$$T_{maks} = \sigma_h S_v \text{ (Denklem 38)}$$

Bu formülde S_v , düşey kademeler olarak ifade edilir.

Maksimum gerilme değerinin bir diğer hesap yöntemi ise bağımsız tipte donatılarda karar verilmiş bir duvar genişliği boyunca hesaplamaktır.

$$T_{maks} = \frac{\sigma_h S_v}{R_c} \text{ (Denklem 39)}$$

Bu denklemdeki R_c değeri kapsama oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$R_c = \frac{b}{S_h} \text{ (Denklem 40)}$$

Kapsama oranı, bir donatıya ait birim genişliğin (b), donatıların merkezleri arasındaki yatay yöndeki uzaklığa (S_h) oranıdır. Dış stabilite ve iç stabilitenin ilişkisinin anlaşılması gerekliliği kapsama oranını önemli kılar. Şekil 47 ve Şekil 48'e bakıldığında sürşarj yükünün oluşturduğu düşey yöndeki gerilme artışının ve şevli dayanma yapılarındaki donatı gerilmelerinin hesabı görülebilir.

- Mevcut olması durumunda yatay yöndeki sürşarj kuvvetlerinin oluşturduğu yatay gerilme artışı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$\Delta\sigma_h = 2F_h\left(\frac{z}{l_1}\right) \text{ (Denklem 41)}$$

l_1 değerinin hesabı şöyledir:

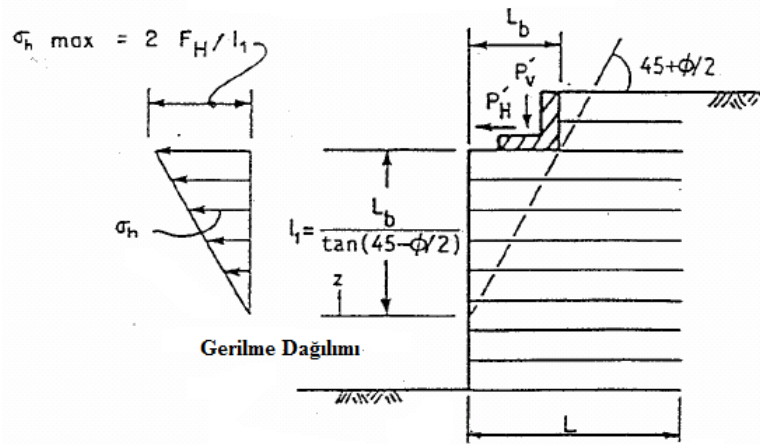
$$l_1 = \frac{L_b}{\tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})} \text{ (Denklem 42)}$$

Burada L_b , sürşarj yükünün etkili genişliğini temsil eder. F_h ise yatay yönde etki eden kuvveti ifade eder.

- Her kademe için ayrı ayrı izin verilen maksimum çekme kuvveti (T_a) hesaplanır.

$$T_a \geq \frac{T_{maks}}{R_c} \text{ (Denklem 43)}$$

Donatılarda çekme ve şerit kırılma tahkiki yapılırken şeritlerin cephe paneline bağlantı noktalarında oluşacak kuvvetlerin, şerit kapasitesini aşmaması dikkat edilmesi gereken bir husustur. Eğer bu kapasite aşılsa uygulanabilecek önlemler şerit tipini değiştirmek, hesap yüksekliğindeki bağlantı sayısını arttırmak şeklinde olabilir. Çekme tahkiki iç stabilitede aderans tahkiki ile birlikte iki temel ölçütten biri olarak karşımıza çıkar (Mitchell, 1987).



Şekil 49. Yatay yükler altında gerilme artış parametreleri (Elias, 2001)

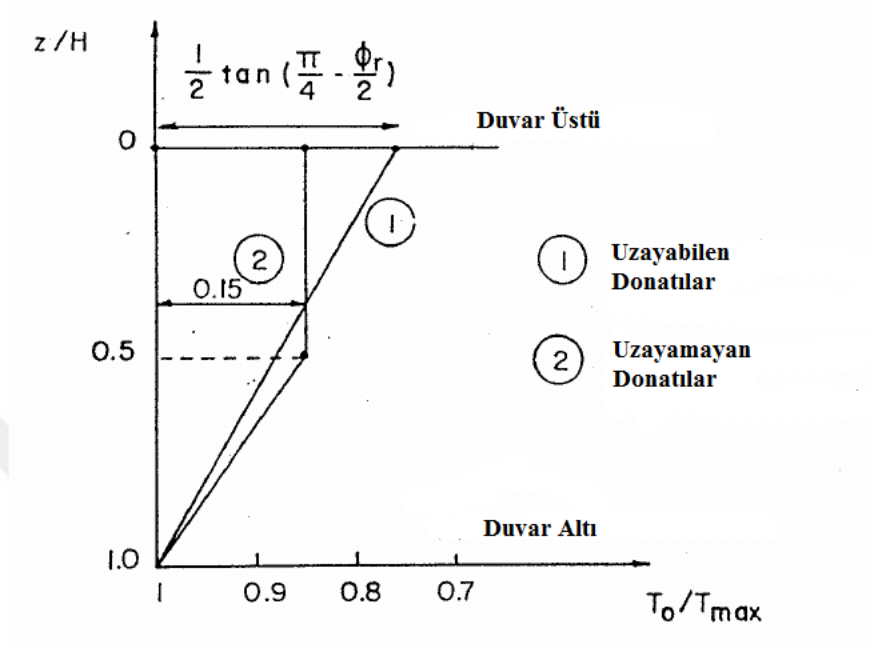
1.4.7.6.2. Kopma Tahkiki

Şeritlerde kopma dayanımının kontrolünde aşağıdaki eşitsizliklerden faydalanılır.

$$T_{maks} \leq \left(\frac{1}{G_{sp}}\right) P_r R_c \text{ (Denklem 44)}$$

$$T_{maks} \leq \left(\frac{1}{G_{sp}}\right) F^* \alpha \gamma_r z' L_e C R_c \text{ (Denklem 45)}$$

Burada G_{sp} , kopma tahkikindeki güvenlik sayısını, F^* kopma dayanımı katsayısını, α da ölçek düzeltme faktörünü temsil eder.



Şekil 50. Bağlantı noktalarında şerit kopma tahkiki (Elias, 2001)

Yukarıdaki formüllerde geçen C ifadesi çelik donatılarda 2 alınır. $\gamma_r z'$ değeri ise hesap derinliğinde düşey yöndeki jeolojik yüke tekabül eder. Burada dikkat edilmesi gereken L_e değeridir. L_e değeri, maksimum gerilme çizgisine göre pasif bölgede bulunan şerit mesafesidir. Ayrıca bu değer kopmaya göre iç stabilite analizlerinde şerit boyunun da boyunu etkiler. Denklemde pasif bölgedeki şerit boyu yalnız bırakılırsa aşağıdaki eşitsizlik elde edilir.

$$L_e \geq \left(\frac{1.5T_{maks}}{CF^* \alpha \gamma_r z' R_c}\right) \text{ (Denklem 46)}$$

Bu formülde hareketli yükler ihmal edilmiştir. Eğer bu eşitsizlik sağlanmıyorsa donatı boyunda arttırma yapılabilir, donatılar arasındaki düşey uzaklık arttırılarak maksimum kopma dayanımı (T_{maks}) azaltılabilir veya daha yüksek kopma dayanımına sahip şeritler tercih edilebilir.

Şekil 49 ve Şekil 50'de gösterildiği üzere pasif bölge ve aktif bölgedeki şerit boyu ise dayanma yapısının yüksekliği boyunca değişkenlik gösterir. İki farklı durum ele alınabilir:

- Duvar üstü ile H/2 seviyesi arasında;

$$L_a = 0,3H \text{ (Denklem 47)}$$

- H/2 seviyesi ile duvar tabanı arasında;

$$L_a = 0,6(H - z) \text{ (Denklem 48)}$$

olarak elde edilir.

Çoğunlukla şerit boyu kesit uzunluğunca aynı uzunlukta seçilir. Güvenli bölgede kalmak adına şerit boyu en elverişsiz şerit seviyesinde de güvenliği sağlayacak uzunlukta olmalıdır.

Yükleme durumları ile geometrik değişiklikler sonucu seviyeler arasındaki şerit boyları değiştirilebilir. Ancak ne olursa olsun şerit boylarının hem iç hem dış stabilite bakımından güvenlik koşullarını sağlaması gerekir (Bowles, 1988)

1.4.7.6.3. Sismik Kuvvetler Etkisinde İç Stabilite Kontrolü

Sismik kuvvetlerin etkisinde bir toprakarme dayanma yapısının iç stabilite tasarımı yapılırken yatay yönde bir deprem kuvvetinin (P_1) aktif bölgeye etki etmesi sağlanır. Bu etkitilen kuvvet sistemde yatay doğrultuda bulunan donatılarda bir gerilme kuvveti meydana getirir. Toprakarme sistemimizden beklentimiz her şerit kademesinde bu gerilmeyi güvenli bir şekilde karşılamasıdır. Sismik yükleme süresince sistemde maksimum gerilme çizgisinin yerinin değişmediği kabul edilir. Yapılan bu kabul, şerit kopması ve kırılması hallerine göre daha konservatiftir.

Sistemde sismik kuvvetler etkisinde iç stabilite analizi yapılırken aşağıdaki sıralama izlenmelidir.

- Bir z düzeyinde toprakarme sisteme etki eden maksimum deprem ivmesi ($a_m g$) ve atalet kuvveti ($P_1(z)$) hesap edilir.

$$a_m = (1,45 - \alpha)\alpha \text{ (Denklem 49)}$$

$$P_1(z) = M(z)a_m g \text{ (Denklem 50)}$$

Sismik kuvvetlerin etkisinde oluşan maksimum gerilme kuvvetinin ilk bileşeni T_{m1} olarak simgelenir. Bu bileşen derinliğe bağlı K katsayısına ve bu derinlikteki düşey gerilmeye bağlı olarak hesabı yapılır.

$$\sigma_h = K\sigma_v + \Delta\sigma_h = K(\gamma_r H + q + \Delta\sigma_v) + \Delta\sigma_h \text{ (Denklem 51)}$$

$$T_{m1} = S_v \sigma_h \text{ (Denklem 52)}$$

- Sismik kuvvetlerin tetiklediği şeritler üzerindeki dinamik artış miktarı hesaplanır. Bu artış miktarı kuvvetin, şeritlerin taşıyıcı olarak çalışan kısımlarına orantılı bir şekilde dağıtılmasıyla hesap edilir.

$$T_{m_2} = \frac{P_I(R_c L_e)i}{(\Sigma(R_c L_e)i)} \text{ (Denklem 53)}$$

Bu formüllerden hareketle iki bileşenin toplamı gerilme kuvvetini verir.

$$T_{maks} = T_{m_1} + T_{m_2} \text{ (Denklem 54)}$$

Şerit kırılması veya kopması gibi istenmeyen durumlarda sismik iç stabilite analizi yapılırken, statik haldeki güvenlik sayısı 0,75 ile çarpılarak hesaplara dahil edilir. Sismik kırılma tahkikinde aşağıdaki eşitsizlikten yararlanılır.

$$T_{maks} \leq \frac{1}{0,75} T_a R_c \text{ (Denklem 55)}$$

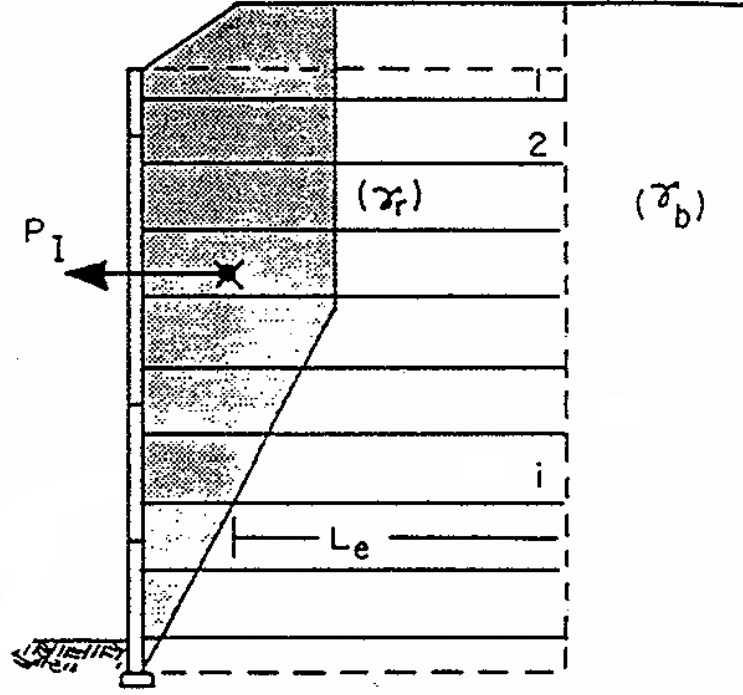
Bir diğer durum olan kopma tahkiki ise şu şekildedir:

$$T_{maks} \leq \frac{P_r R_c}{0,75 G_{sp0}} \text{ (Denklem 56)}$$

$$T_{maks} \leq \frac{2F_d^* \alpha}{1,125} \gamma z' L_e R_c \text{ (Denklem 57)}$$

$$F_d^*(dinamik) = 0,8 F^* \text{ (Denklem 58)}$$

Bu hesap yöntemi uzayamayan donatılara sahip toprakarme dayanma yapıları için geliştirilmiştir. Donatıların uzayabilirliği toprakarme kitlesinin sıklığını etkileyen bir özellik olarak karşımıza çıkar. Eğer sıklık azalırsa sismik kuvvetlerin sistemi devirme eğilimi artacaktır (Mitchell, 1987).



Şekil 51. Uzayamayan donatılı sistemlerde sismik iç stabilite (Elias, 2001)

1.4.8. Oturma

Toprakarme sistemdeki sürşarj yükleri ve kendi ağırlığının etkisinde yapının tabanında oluşma ihtimali olan oturmalarının tespiti de dış stabilite analizine dahildir. Önceki başlıklarda da bahsedildiği üzere toprakarme sistemler konvansiyonel sistemlere göre daha esnek bir yapıya sahiptir. Bu yüzden oturma sınırları yapının dahil olduğu sınıfa göre farklılık gösterir. Kenar ayak sistemleri, yol yaklaşımları ve yapı dolgusuna göre farklı oturma ölçütleri belirlenir. Tüm bunlar dikkate alındığında oturma analizlerinde iki farklı durum bulunur.

Yapının inşası sırasında zayıf tabakalara oturan kısımlar farklı oturma oluşturabilirler. Bu durumla karşılaşıldığında zayıf tabakaya oturan kısımlar dilatasyonla ayrılarak ayrı sistemlermiş gibi çalışması sağlanmalıdır.

Yapının planlanan kullanım ömrü boyunca oluşacak toplam oturmalarla karşı uzun dönem zemin değişkenlerinden yararlanılarak toplam oturma miktarı tespit edilmelidir. Bu miktarın istenen seviyenin üstüne çıkması cephe panellerinde deformasyona neden olacaktır.

İzin verilen en yüksek oturma değeri yapının yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak yer alır. Cephe panellerinin betondan imal edildiği sistemlerde izin verilebilir oturma değeri panel yüksekliğinin %1' i kadardır.

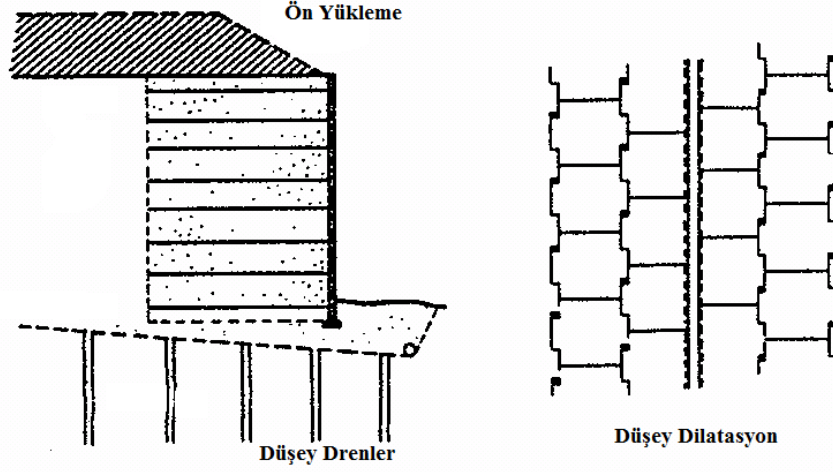
Toprakarme sistemlerin bir diğer önemli avantajı, imalatın dolgu ser-sıkıştır ile yapılmasından dolayı temel sisteminin devamlı bir yükleme etkisinde bulunmasıdır. Bu sebepten ötürü oluşabilecek ani oturmalar ise imalat esnasında düzeltilebilir. Uzun dönemde oluşabilecek oturmalar karşı alınabilecek önlemler; imalat esnasında ön yükleme yapılması, düşey drenler yardımıyla oturma yapıda kullanım ömrünü azaltmadan tolere edilebilir seviyelere düşürülmesi olarak ifade edilebilir.

Duvar hattı boyunca zemindeki zayıf tabakalar kaynaklı yerel oturmalar göze çarpıyorsa, farklı oturmalar karşı önlem almak adına oturan bölümler düşey derz koyularak ayrılır. Sistemde oluşturulan bu yerel bölgelerin farklı deformasyon yapabilme riski vardır ancak yapının bütünü adına bir tehdit meydana getirmeyecek seviyededir. Sıkışabilen yapıdaki zemin tabakalarına rastlayan bu kısım dilatasyonlar ile ayrılarak sistemin bütününde oturma açısından risk oluşturmayacak duruma gelir (Schlosser, 1974).

1.4.9. Zemin İyileştirmesi

Toprakarme dayanma yapısının temel zemininin iyileştirilmesi ihtiyacı sistemin kendi temel sistemiyle etkileyen yükleri taşıyamaması sonucunda oluşur. Temel iyileştirme yöntemlerinden toprakarme sistemlere uygun olanlar şu şekildedir:

- Zemin değıştirmesi: Zayıf zeminin kaldırılıp yerine istenilen kalınlıkta nitelikli malzeme ile serme-sıkıştırma işlemi yapılması
- Düşey drenler yardımıyla oturma hızlandırılması
- Dinamik konsolidasyon
- Ön yükleme
- Jet grout uygulaması
- Taş kolon uygulaması



Şekil 52. Ön yükleme ve düşey dilatasyon (Elias, 2001)

1.5. Palyeli (Çok Katlı) Toprakarme Dayanma Yapılarının Tasarımı

1.5.1. Giriş

Toprakarme dayanma yapılarının kullanımının artması çeşitli topografik ve arazi şartlarında kullanım maksatlarına göre sistemin yeni uygulama alanlarında imal edilmeye başlandığı görülmüştür. Bu gelişmeler neticesinde toprakarme sistemlerin kompleks yapılarda da yer bulmaya başlamasının bu kompleks yapılara özel hesap yönteminin geliştirilmesi gerekmiştir.

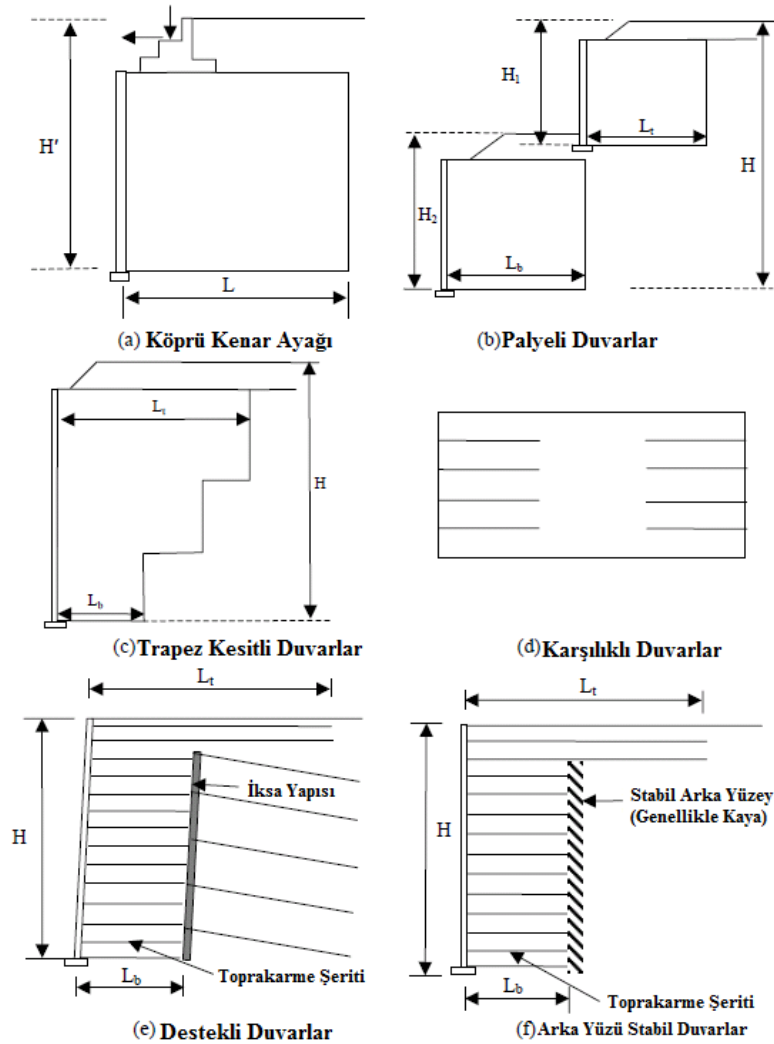
Sismik aktivitesi yüksek bölgelerde, apik arazilerde, üst yapı yüklerinin yüksek olduğu yerlerde toprakarme dayanma yapılarını kullanmak zorunluluk olarak ortaya çıkmıştır. Özel olarak tasarlanması gereken başlıca toprakarme sistemler aşağıda sıralanmıştır.

- Toprakarme kenar ayaklar
- Palyeli (Çok katlı) toprakarme duvar
- Trapez kesitli toprakarme duvarlar
- Karşılıklı toprakarme duvarlar
- Destekli toprakarme duvarlar

Bu sistemlerle, dikdörtgen kesitli toprakarme duvar tasarımında kullanılan prensiplerle birlikte özel tasarım ve yapım koşulları belirtilmiştir.

1.5.2. Palyeli Toprakarme Yapılar

Toprakarme sistemlerin kompleks hale getirilmesiyle palyeli dayanma yapılarının tasarımı önem kazanmıştır. Apik arazi koşullarına göre hazırlanan mimari tasarımlar sebebiyle meydana gelen yüksek kesitlerde tek palyeli sistemlerin kullanılması toprakarme sisteminin şerit boyunun artırılmasına neden olmuştur. Bununla birlikte yüksek dolgu yüklerinin meydana getirdiği oturma riski toprakarme sistemi üzerinde negatif etki yapacaktır. Yüksek dolgu yüklerinin meydana getireceği oturmalar beton panel yüzeyinde dolgu içinde ya da temel seviyesinde hasara neden olacaktır. Bu sebeple toprakarme sistemleri kademeler halinde inşa etmek zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. Palyeli sistemler, düşeyde oluşabilecek deformasyonları önleyerek ön yüzeyin eğimliymiş gibi hareket etmesini sağlar. Bu sayede yatay gerilmeler azalmış olur (Berg, 2009).



Şekil 53. Kompleks geometrili toprakarme sistemler (Berg, 2009)

1.5.2.1. Palyeli Toprakarme Yapıların Tasarımı

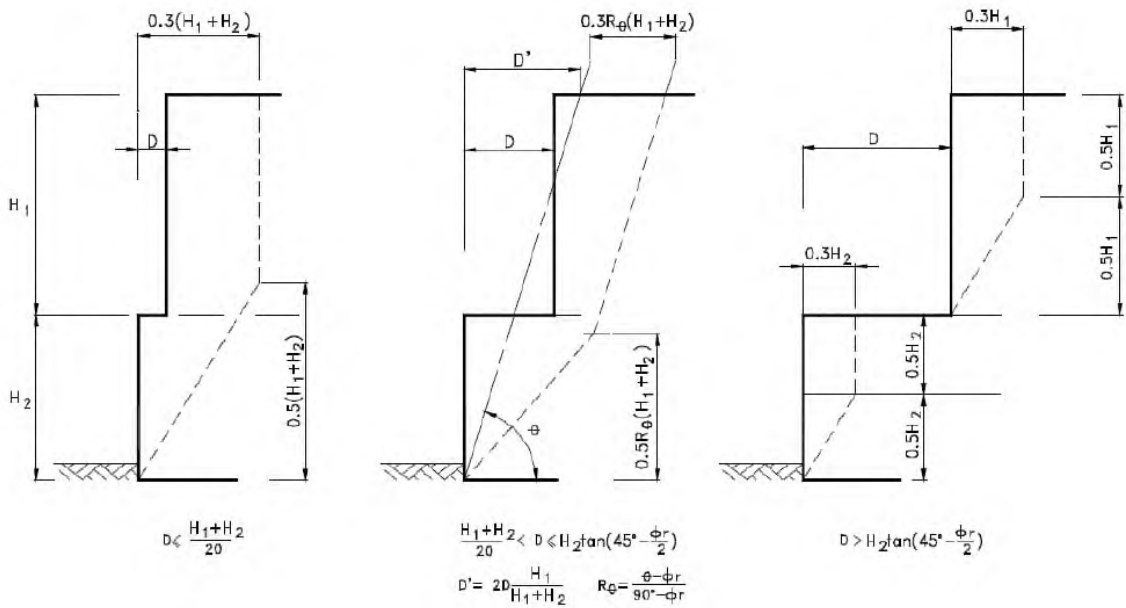
1.5.2.1.1. Ön Tasarım

Toprakarme sistemlerde palyesiz dikdörtgen kesite sahip dayanma yapıları için yeni çözümler geliştirilebilirken, palyeli sistemlerin çözümlenmesi aşamasında bilinenler sınırlı seviyededir. Sistemin çözümlenebilmesi için maksimum kayma dairelerinden ve genel stabilite analizlerinden faydalanılarak iç ve dış stabilitelerin doğru hesaplanması şarttır. Ön tasarım yapılırken dikkat edilmesi gereken noktalar bu bölümde açıklanacaktır.

Palyeli dayanma yapıları tasarlanırken iki ana durum için çözümler yapılır:

- Dış stabilite hesaplanırken basitleştirilmiş geleneksel toprakarme tasarım yaklaşımlarından faydalanılır. Maksimum gerilme hattının tespiti yapılır.
- Zemin şartları ve geometrik koşullar ise şev stabilitesi analiz programları yardımıyla hesaplanır. Genel stabilite değerleri kontrol edilir.

Duvar yükseklikleri alt ve üst palyelerde uygun olarak belirlenir. Ardından duvarların birbiriyle olan etkileşimi hesaplanarak yatay mesafe, set-back, tespit edilir. Böylece alt ve üst palye yüksekliklerinin sonucu olarak duvarlar arası yatay mesafe koyulması gerektiği ortaya çıkar. Duvarlar arası koyulması gereken yatay mesafenin sınır şartları esas alınarak maksimum gerilme hattı belirlenir.



Şekil 54. Palyeli duvarlarda maksimum gerilme çizgisi (Elias, 2001)

Ön tasarım esnasında alt ve üst duvarların şerit boyları tespit edilirken dikkat edilmesi gereken sınır şartları aşağıdaki gibidir:

Üst duvarda;

$$L'_1 \geq 0,7H_1 \text{ (Denklem 59)}$$

Alt duvarda;

$$L'_2 \geq 0,6H_2 \text{ (Denklem 60)}$$

Bu formüllerde H_1 üst duvarın yüksekliğini; L_1 , üst duvardaki şerit boyunu; H_2 , alt duvarın yüksekliğini; L_2 , alt duvardaki şerit boyunu ifade eder. Sistemin toplam yüksekliği H ile ifade edilmek üzere, bu değer;

$$H=H_1+H_2 \text{ (Denklem 61)}$$

olarak hesaplanır.

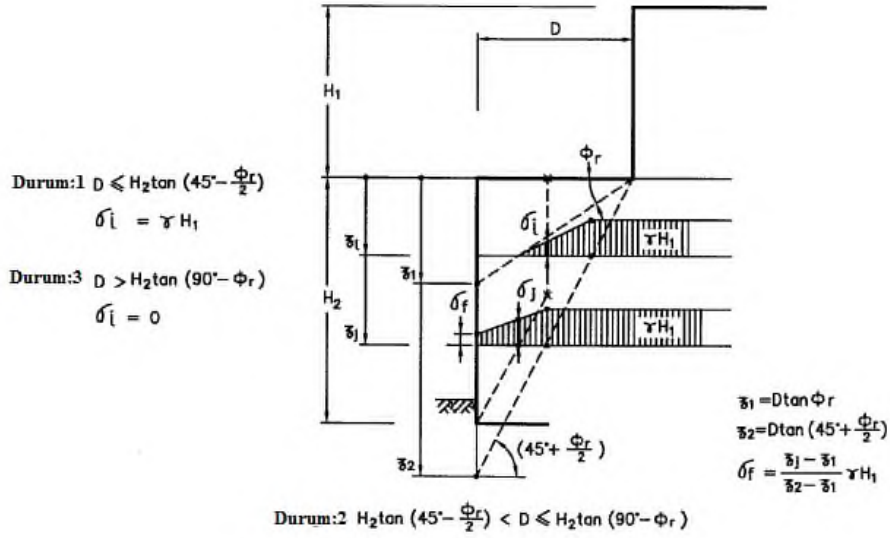
Tasarım yapılırken uygulanması gereken aşamalar aşağıdaki gibidir.

- Alt duvar hesaplamalarında, üst duvardan aktarılan yükler duvar üzerine sürşarj yükü olarak ilave edilir. Bu şartlarda alt duvar hesaplaması yapılırken genel stabilite analizleri yardımıyla çözümlenir. Kayma dairelerinin sınır değerlere yakın olanları belirlenir. Hedeflenen güvenlik katsayılarına ulaşılamazsa şerit boyları arttırılabilir. Bu aşamalar sonrasında istenilen kriterlere ulaşılmıyorsa zemin iyileştirme çalışmaları yapılır.
- Palye genişliği sınır şartları belirlenirken Şekil 56'da verilen durumlardan uygun olanı seçilerek iç stabilite çözümlmeleri yapılır. Geometrik koşullar ve ampirik bağlantılar kullanılarak maksimum gerilme hattı belirlenir.
- Palye mesafesi ortalama değerlerde olan sistemler çözümlenirken düşey gerilme diyagramları kullanılır.
- Büyük palye genişliklerinde D uzunluğu için seçilen sınır şartlarının aşılması durumunda duvarlar birbirinden bağımsız olarak tasarlanır ve üst duvar ile alt duvarın birbirine etkisi olmadığı kabul edilir.

1.5.2.1.2. Saha Araştırmaları

Klasik toprakarme duvarlar dizayn edilirken yapının imal edileceği zeminin teknik özelliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Geleneksel yaklaşımlardan faydalanılarak

çözömlenebilen kesitlerde, duvar hattında yapılacak sondaj çalışmalarıyla yeterli veri elde edilmektedir. Palyeli duvarlarda yapı yüksekliği nedeniyle zeminin teknik özelliklerinin daha kapsamlı olarak araştırılması gerekir. Ortaya çıkan yüksek dolgu yükleriyle birlikte, yapının taşınması gereken yüksek, ölü ve hareketli sürşarjlar, sondaj çalışmalarının daha kapsamlı yapılmasını ve incelenmesini gerektirmektedir. Bu bölgenin kapsadığı alan duvar yüksekliğinin %70' i olarak alınır. Dayanma yapısının temel imalatının yapılacağı bölgede sondaj çalışmaları yapılmalıdır. Zemin tabakalarının zayıf olduğu bölgelerde sondaj çalışmaları arttırılarak zeminin teknik özellikleri hakkında daha çok bilgi edinilmelidir (Sankey, 2004).



Şekil 55. Üst duvar etkisinde alt duvarda düşey gerilmeler (Elias, 2001)

Toprakarme yapılarda yüksekliğin artmasıyla birlikte temel zemininde oluşan gerilmeler de artmaktadır. Yüksek gerilmelere maruz kalan temel zemininde taşıma gücü ve oturma davranışlarının incelenmesi için standart penetrasyon ya da konik penetrasyon deneyleri, üç eksenli basın., direk kesme ve konsolidasyon testleri yapılarak yüksek yükler altında sistemin güvenilirliği hakkında fikir edinilir. Bu nedenle yüksek toprakarme yapıların tasarımı yapılırken geoteknik çalışmalar yüksek önem arz etmektedir.

1.5.2.1.3. Taşıma Gücü Kontrolü

Duvar yüksekliğinin arttırılmasıyla temel zemininde oluşan yüksek gerilmelerin altında zeminin davranışlarının incelenmesi tasarımın ekonomik olabilmesi için önemlidir. Geleneksel toprakarme çözümlerinin yetersiz kaldığı kompleks yapılarda ekonomi oldukça önem taşır. Yapılan yanlış yaklaşımlar neticesinde ekonomiklikten uzaklaşarak konzervatif tasarımlar ortaya çıkabilmektedir. Temel zemininin taşıma gücü doğru tespit edilerek zemin davranışının yorumlanmasıyla daha ekonomik tasarımlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle detaylı saha çalışmaları yapılması gerekir. Yeterli araştırmalar yapılarak daha düşük güvenlik katsayıları kullanılarak tasarım yapılabilir. Böylece daha kısa çelik şeritler kullanılarak daha ekonomik imalatlar yapılmasına imkân tanınmış olur.

1.5.2.4. Yatay Deformasyonlar

Palyeli yüksek duvarlar tasarlanırken oturma analizleri ekonomik açıdan dikkat edilmesi gereken hesaplardan biri olarak ortaya çıkar. Potansiyel kayma daireleri, maksimum gerilmeler ve duvardaki deformasyonlar sismik ve statik şartlarda tespit edilirken sonlu elemanlar sayısal çözümleme programlarından yararlanılır. Bu sayede sanal olarak hazırlanana sistem tasarımının gerçekliği artar.

Sankey (2004) yaptığı çalışmayla ortaya koyduğu yaklaşımla palyeli ve uzamayan donatılı toprakarme dayanma yapılarında izin verilen yatay deformasyon maksimum 12 mm olarak belirlenmiştir. 12 mm üzerindeki yatay deformasyonların yapısal hasar yaratacağı kabul edilir. Sismik etkiler deformasyonların artmasına neden olacaktır.

Toprakarme sistemler esnek yapısı sayesinde meydana gelebilecek küçük deformasyonları yapısal hasar görmeden karşılayabilmektedir. Buna karşı yatay deformasyonların belli sınırlara tabi olması gerekmektedir. Duvar kesitinde meydana gelen yatay deformasyonların olduğu bölgelerde özel önlemler alınarak sistem deformasyonları arttırılabilir.

1.5.2.5. Düşey Deformasyonlar

Palyeli yapılarda oluşan düşey deformasyonlar dolgu yüksekliği ve yüzey elemanların niteliğine bağlıdır. Dolgu yüklerinin yüksek olduğu sistemlerin gerilmenin fazla

olduğu alt kesimde düşey deformasyon riski sebebiyle kullanılacak cephe paneli seçiminde standart 14 cm kalınlığında paneller yerine daha kalın olan 18 cm' lik paneller tercih edilerek önlem alınır. Yüzey panelleri üzerinde artan gerilmeler panellerin birbirine kuvvet uygulayarak deformasyona uğramasına neden olabilir. Bu nedenle paneller arasına çeşitli kalınlıklarda polimer takozlar duvar kesiti boyunca koyulur. Kesit yüksekliğinin artırılmasıyla birlikte kullanılan takozlar kalınlaştırılır.

Yüksek toprakarme yapılarda bir metreye varan düşey deformasyonlar olduğu gözlemlenmiştir. Toprakarme sistemler esnek yapıları nedeniyle düşey deformasyonlara karşı avantaj sağlamaktadır. Polimer takoz ve dilatasyon uygulamaları da düşey deformasyonların kısıtlanması açısından önemlidir. Alınan önlemler sayesinde toprakarme yapıları, çarpılma sayısı 1cm/metre seviyesine kadar meydana gelen farklı oturmalara dayanabilmektedir (Sankey, 2004).

1.5.2.2. Palyeli Toprakarme Yapıların İmalatı

1.5.2.2.1. Dolgu

Dolgu malzemesinin seçimi, palyeli toprakarme yapılarda dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir. Klasik toprakarme sistemlerde olduğu gibi palyeli toprakarme sistemlerde de iyi sıkışabilen ve granüler yapıya sahip geri dolgu malzemesi tercih edilmesi gerekmektedir. Palyeli sistemlerde kullanılan toprakarme dolguların AASHTO' da belirtilen standartlara göre 200 no' lu elekten geçen malzemelerin %15' ten küçük olması ve içsel sürtünme açısının en az 34° olması gerekmektedir. Alçak kesitlerde bu şartlar esnetilebilirken, dolgu yüksekliğinin artmasıyla birlikte kriterlerin sağlanması yapı performansı konusunda önem arz etmektedir.

Toprakarme dolgunun sıkışabilirliği arttıkça şerit dolgu etkileşiminde aderans da artmaktadır. Dolgudaki ince malzeme azaltılarak organik aktiviteler engellenir. Bu sayede donatının yüzeyinde oluşabilecek korozyon sınırlandırılmış olur.

Dolguda ince malzeme yüksek oranda kullanılırsa toprakarme sistemde oturmalar ve üst yapıda bozulmalara neden olabilir. Toprakarme yapının dolgusunda endüstriyel atık, uçucu kül veya cüruf kullanılması ise önerilmemektedir. Drenaj özelliklerinden dolayı bu tür malzemeler sistemde hidrostatiklik oluşturabilmektedir. Bu sebeple toprakarme yapıların dolgusunda kullanılması sorun oluşturabilmektedir (Smith, 2003).

1.5.2.2.2. Palye Genişliği (Set-back)

Toprakarme sistemlerde yüksekliğin artmasıyla birlikte palye imalatı, sistemde ortaya çıkabilecek deformasyonların tamiri açısından çok önemlidir. Bu sebepten ötürü palye dizayn edilirken bazı kriterlerin değerlendirilmesi gerekir. Palye tasarımımda dikkat edilmesi gereken hususlar şöyledir:

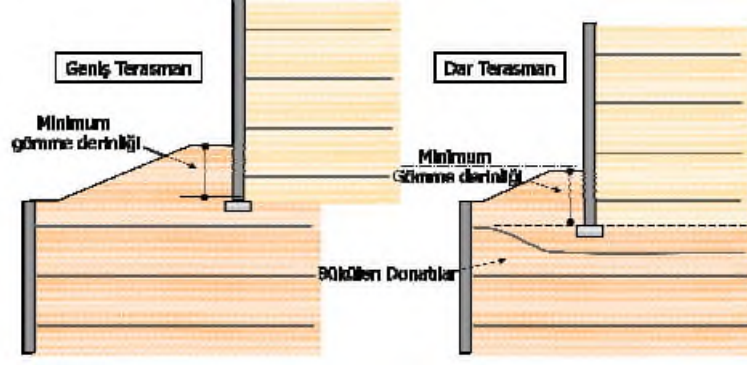
- Üst duvar gömme geometrisi
- Terasman genişliği
- şeritlerin yerleşimi

Palyeler hattında imalatın kolay yapılabilmesi ve dolgunun iyi sıkıştırılabilmesi için palye genişliği en az 1 metre olmalıdır. İmal edilen palyeler sayesinde numune şeritlerin ve dilatasyonların kontrolü, drenaj kanallarının temizliği yapılabilmekte ve üst duvar topuğunun korunması açısından da palyeler önem taşımaktadır. Palye st dolgusu şekillendirilerek ihtiyaç duyulan gömme derinlikleri oluşturulur.

Üst duvarların sistemin tabanına iletilen gerilmeler nedeniyle gömme derinliği kriterleri bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Palye şevlerinin yanlış açıyla yapılması sonucunda bölgesel stabilite sorunları görülebilmektedir. Tasarım aşamasında, topuğun korunması amacıyla palye genişliği önemli bir kriter olarak değerlendirilir. Üst bölümde bulunan palyelerdeki duvarın topuk koruma dolgusu sisteme pasif direnç kazandırır. Böylece sistem devrilme hususunda daha dayanıklı halde gelir.



şekil 56. Cüruflu toprakarme dolgusundan kaynaklı deformasyon (Smith, 2003)



Şekil 58. Palye mesafesine göre topuk dolgusu (TAI, 2000)

1.5.2.3. Tarihsel Gelişim

Toprakarme dayanma yapıları son 30 yıl içinde ciddi miktarda uygulama alanı bulmaya başlamıştır ve bununla birlikte sismik açıdan aktif bölgelerde çeşitli projelerin dahilinde kendine yer bulmuştur. Palyeli toprakarme sistemin uygulama alanının genişlemesiyle klasik yaklaşımlar ile tasarımı yapılan küçük kesitlerin yerini, yüksek sürşarj yükleri etkisindeki kesit uygulamaları almıştır. Tasarım yöntemleri temel olarak aynı olmakla birlikte, dolgu, cephe panelleri ve donatılara ilişkin ölçütlerin yeniden değerlendirilmesi gerekir.



Şekil 59. Palyeli duvar uygulaması (Seattle Airport, RECO, 2003)

ABD’ de 1980’ li yılların başına kadar inşa edilen toprakarme dayanma yapılarının yüksekliği 12 metrenin üzerine çıkmamaktaydı. Ancak 1990’ lı yıllara gelince 20 metreyi gören toprakarme yapılar göze çarpmaya başlamıştır. Şehir merkezlerindeki inşaatlarda çalışma alanının kısıtlı oluşu, kamulaştırma problemleri yüksek kesitlerin daha ekonomik bir dizayn ile çözülmesi ihtiyacı meydana gelmiştir. Buna ek olarak uzayamayan donatıların mevcut olduğu sistemlerde uzayabilen donatılı sistemlere göre daha küçük deformasyonlar tespit edilmiştir (Sankey, 2004).



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Palyeli Toprakarme Nümerik Modelinin Oluşturulması

Bu çalışmada, palyeli toprakarme duvarın yüksekliğinin, palye genişliğinin ve duvar altı zeminin deformasyon modülünün, bu tür duvarların davranışına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, Plaxis 2D programı kullanılarak çeşitli toprakarme duvar modelleri oluşturulmuş ve tasarım parametrelerinin duvar deformasyonlarına ve donatı kuvvetlerine olan etkisi incelenmiştir.

Analizlerde, toprakarme duvar iki kademeli olarak tasarlanmış ve duvarların yükseklikleri artırılarak ortaya çıkan donatı(şerit) kuvvetleri gözlenmiştir. Bununla birlikte, duvarın yüksekliği sabit tutularak duvar altı zemine ait deformasyon modülü değiştirilmiş ve ortaya çıkan değerler not edilmiştir. Söz konusu analizlerde, duvar altı zeminin Mohr-Coulomb malzeme modeli parametreleri Tablo 1’de verilmektedir.

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk, ρ_{doy} ($D_r=0.80$)	Mg/m ³	2.5
Kohezyon, c	kPa	20
İçsel sürtünme açısı, ϕ	Derece	35
Deformasyon modülü, E	MPa	20000
Poisson oranı, ν	-	0.20
Arayüz faktörü, R_{inter}	-	1.0

Tablo 1. Duvar altı zemine ait Mohr-Coulomb modeli parametreleri

Toprakarme duvarın imalatında kullanılan dolgu zemin HSSMALL malzeme modeli ile modellenmiş olup, bu malzeme modelini, tanımlayan parametrelerin değerleri Tablo 2’de görülmektedir. HSSMALL malzeme modeli, dolgu deformasyonlarını daha gerçekçi elde etmek için tercih edilmektedir.

Özellik	Birim	Değer
Tane özgül yoğunluğu, G_s	-	2.65
Kuru yoğunluk, $\rho_k (D_r=0.80)$	Mg/m ³	1.80
Doygun yoğunluk, $\rho_{doy} (D_r=0.80)$	Mg/m ³	2.12
Rölatif kompaksiyon	%	95
Kohezyon, c	kPa	0.1
İçsel sürtünme açısı, ϕ	Derece	38
Başlangıç boşluk oranı, e_{init}	-	0.47
Referans sekant modülü, E_{50}^{ref}	kPa	48000
Referans ödometre deformasyon modülü, E_{oed}^{ref}	kPa	48000
Referans yeniden yükleme modülü, E_{ur}^{ref}	kPa	144000
Küçük deformasyon kayma modülü, G_o^{ref}	kPa	114400
Kayma şekil değiştirme sınırı, $\gamma_{0.7}$	-	1.2×10^{-4}
Poisson oranı, ν	-	0.20
Gerilme bağılılık oranı, m		0.45
Genleşme açısı, ψ	Derece	9
Göçme oranı, R_f	-	0.90
Arayüz faktörü, R_{inter}	-	1.0

Tablo 2. Dolguya ait HSSMALL modeli parametreleri

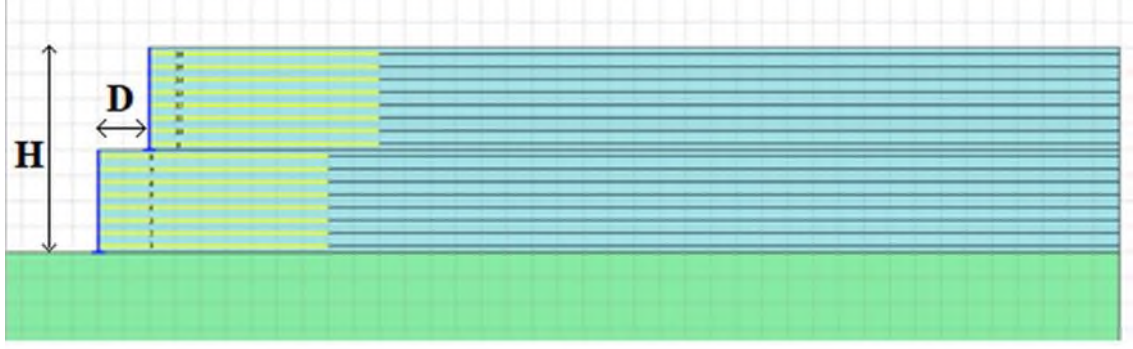
Toprakarme duvarların en önemli bileşenlerinden olan donatı ve yüzey paneline ait model parametreleri Tablo 3'te toplu olarak verilmiştir. Her iki toprakarme duvar elemanının da lineer elastik davrandığı kabul edilmiştir.

Eleman Adı	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	w (kN/m/m)	Poisson Oranı (ν)
Panel	4500000	8437.5	3.75	0.2
Donatı	85300	-	-	-

Tablo 3. Nümerik modeldeki donatı ve yüzey kaplama elemanlarına ait parametreler

2.2. Duvar Yüksekliğinin Etkisini İncelemek İçin Yapılan Analizler

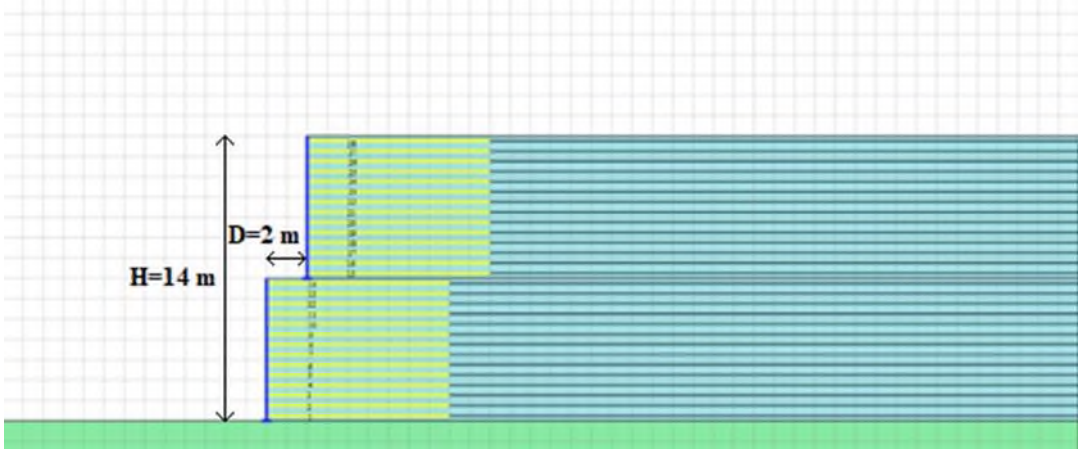
Bu parametrik çalışmada, duvar yüksekliği sırasıyla 8, 11, 14, 17, 20 metre seçilmiş ve duvar, tüm yüksekliğinin yarısında bir palye olacak şekilde tasarlanmıştır. H yüksekliğine ve D palye genişliğine sahip duvara ait nümerik model Şekil 60’da görülmektedir. Nümerik modelde sınır etkisi oluşmaması için model boyutları, duvar yüksekliğinin en az dört katı büyük seçilmiştir. Palye genişliğinin 2 metre olarak sabit seçildiği grup nümerik simülasyonlarda duvar yükseklikleri; 8, 11, 14, 17 ve 20 m seçilerek duvar yüksekliğinin toprakarme duvar davranışı üzerindeki etkisi irdelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 60. H yüksekliği ve D palye genişliğine sahip toprakarme yapı

2.3. Zemin Deformasyon Modülünün Etkisini İncelemek İçin Yapılan Analizler

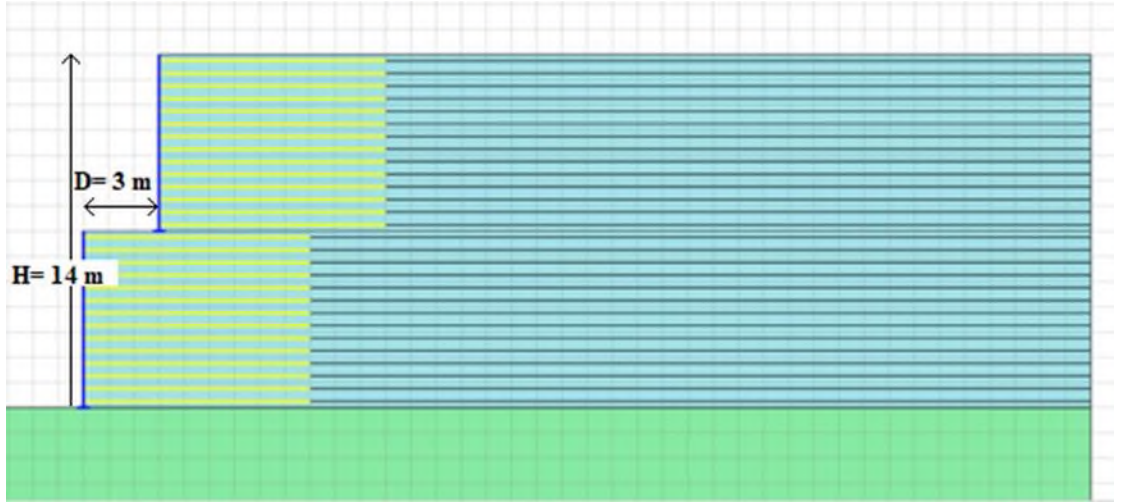
Bir grup nümerik modelde, yapının toplam yüksekliği 14 metre olarak seçilmiş ve toprakarme duvar altındaki zeminin deformasyon modülü sırasıyla 15.000, 30.000, 45.000, 60.000, 75.000, 90.000 ve 105.000 MPa olarak değiştirilmiştir. Toprakarme duvara ait tüm diğer özellikler Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3’teki değerler olarak alınmış ve palye genişliği sabit 2 metre olarak tasarlanmıştır (Şekil 61). Böylece, duvar altındaki zeminin rijitliğinin toprakarme duvarın davranışına olan etkisi irdelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 61. 14 m yüksekliğinde 2 m palye genişliğine sahip toprakarme duvar

2.4. Palye Genişliğinin Etkisini İncelemek İçin Yapılan Analizler

Bu analizlerde, palye genişliğinin toprakarme duvarın davranışına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu sebeple, yüksekliği 14 m olan toprakarme duvarda 1, 2, 3 ve 4 metre genişliklerinde palyeler oluşturularak duvarın davranışı incelenmiştir. Nümerik modellere ait diğer tüm özellikler Tablo 1, 2 ve 3'te belirtildiği gibi seçilmiştir. Toplam yüksekliği 14 metre ve palye genişliği 3 metre olan nümerik model, Şekil 62'de görülmektedir.



Şekil 62. 14 m yüksekliğinde 3 m palye genişliğine sahip toprakarme duvar

3. BULGULAR

Yüksek toprakarme duvar kesitlerinin olduğu apik arazi koşullarında, donatı boylarının aşırı uzun olması ve yüksek dolguların oluşturduğu oturma riski gibi sebeplerle palyeli toprakarme duvar inşaatı son yıllarda yaygınlaşmaktadır. Ayrıca, büyük yüksekliklere sahip toprakarme duvarların beton/betonarme panellerinde hasarlar oluşmaktadır. Bu gibi sorunlar, palyeli toprakarme duvar inşaatının tercih edilmesine yol açmıştır. Palyeli sistemler, ön yüzey eğimliymiş gibi davranarak düşeyde oluşabilecek hasarları oluşmasını engeller. Bu sebeplerle yaygınlaşan palyeli toprakarme duvarlar, bu çalışma kapsamında nümerik simülasyonlarla incelenmiş ve tasarım parametrelerinin duvarın performansına etkisi değerlendirilmeye çalışılmıştır.

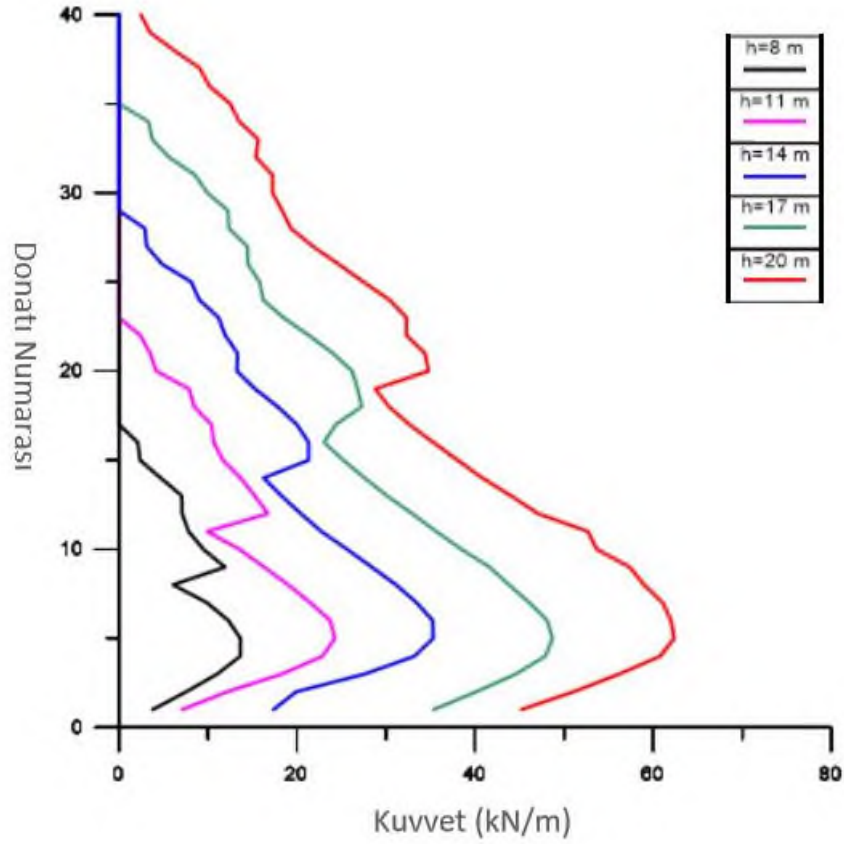
3.1. Duvar Yüksekliğinin Duvarın Davranışına Etkisi

Palye genişliği 2 metre olan duvarda, duvar yüksekliğine bağlı olarak duvarda oluşan deplasmanlar Şekil 63'te görülmektedir. Duvar yüksekliğinin artışıyla birlikte, deplasmanlar artmış olup, 20 metre yüksekliğinde deplasman değeri yaklaşık 0,11 metre değerine ulaşmıştır. Ayrıca, duvar yüksekliği ile deplasmanlar arasındaki ilişki doğrusal değildir.

Yükseklik ve deformasyon parametreleri ile yapılan analiz sonucu ortaya çıkan sistemdeki maksimum deplasman mesafesi yukarıdaki şekillerde gösterilmiştir. Daha önce paylaşılan maksimum deplasman mesafesine ek olarak sistemde ilk duvardaki en alt ve en üst şeritlere (donatılara) etkiyen maksimum ve minimum eksenel kuvvetler de bu kısımda incelenecektir.

Yapı Yüksekliği (metre)	Maksimum Deplasman (metre)
8	0,02231
11	0,03866
14	0,05889
17	0,08327
20	0,1117

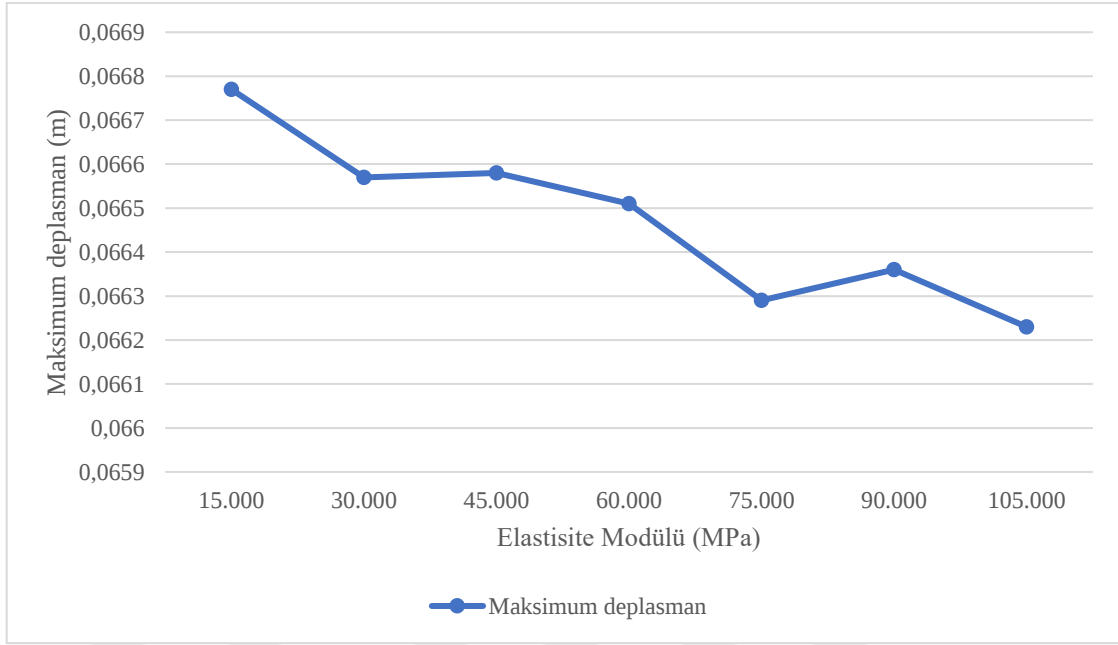
Tablo 4. Farklı yapı yüksekliklerinde ortaya çıkan maksimum deplasman



Şekil 63. Farklı yapı yüksekliklerinde yapıdaki tüm şeritlere etkiyen maksimum eksenel kuvvetler

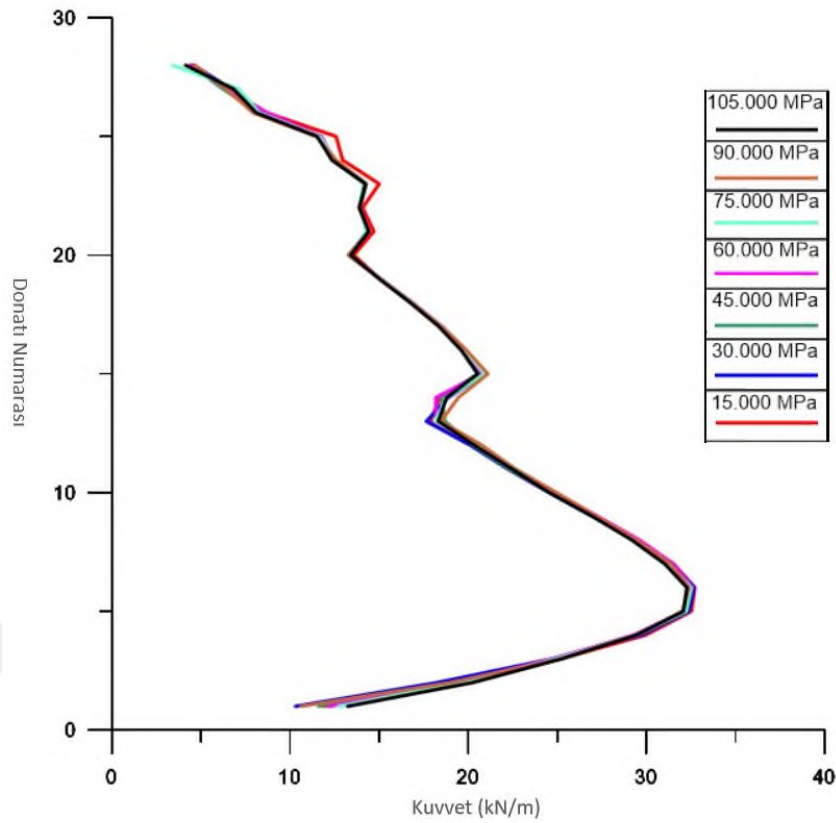
3.2. Temel Zemini Elastisite Modülünün Duvarın Davranışına Etkisi

Yüksekliği 14 metre ve palye genişliği 2 metre olan duvarda, duvar deplasmanlarının elastisite modülüne bağlı olarak değişimi Şekil 64'te görülmektedir. Temel zemini elastisite modülündeki artış ile duvar deformasyonları azalmıştır. Fakat bu azalma ihmal edilecek düzeydedir. Temel zemininin elastisite modülünün 15.000 MPa'dan, 105.000 MPa'ya yükselmesi, %0,8'lik azalmaya sebep olmuştur. Genel olarak, temel zemini elastisite modülünün duvar deplasmanları üzerindeki etkisi önemsiz düzeydedir.



Şekil 64. Temel zemini elastisite modülüne bağlı olarak duvar maksimum deplasmanlarının değişimi

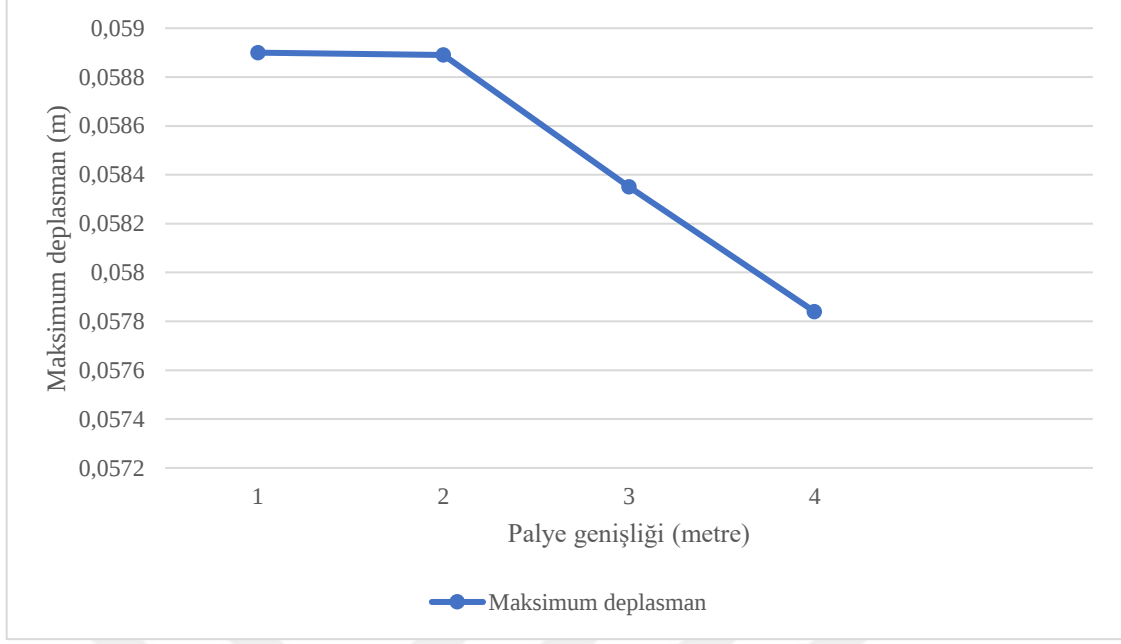
Duvar yüksekliği 14 metre ve palye genişliği 2 m olan duvar için, temel zemini elastisite modülüne bağlı olarak donatı çekme kuvvetlerinin değişimi Şekil 65'te görülmektedir. Elastisite modülüne bağlı olarak donatı çekme kuvvetlerinde bir miktar değişiklik olmakla birlikte, bu değişim ihmal edilecek düzeydedir. Genel olarak düşük elastisite modülü sahip temel zemini durumunda, yüksek donatı çekme kuvvetleri oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 65. Farklı deformasyon modülü altında yapıdaki tüm şeritlere etkileyen maksimum eksenel kuvvetler

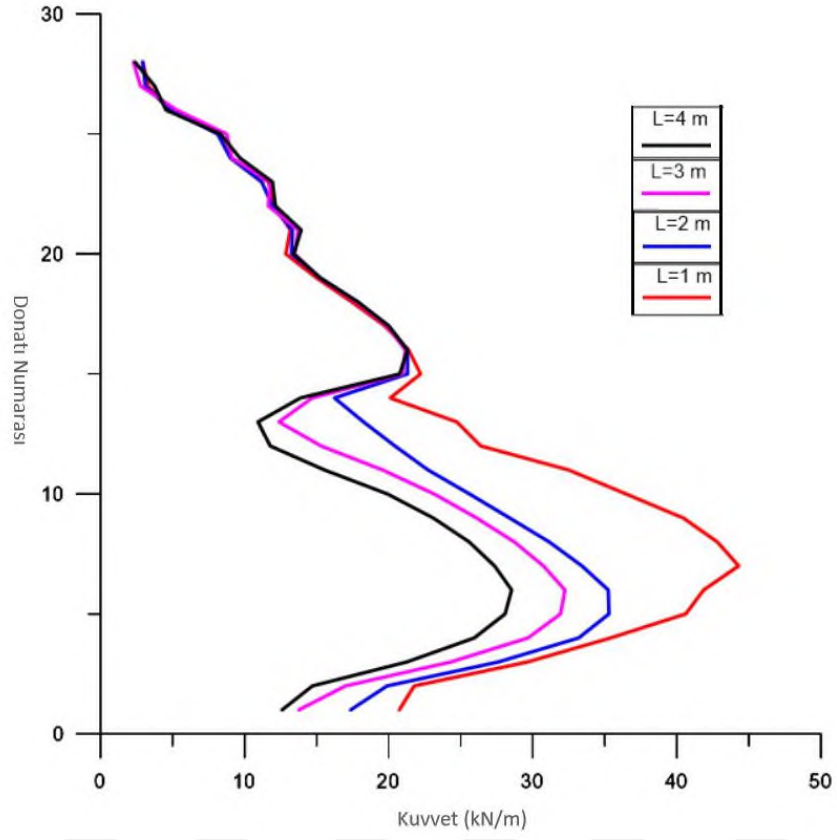
3.3. Palye Genişliğinin Duvarın Davranışına Etkisi

Yüksekliği 14 m olan duvar için palye genişliğine bağlı olarak, toprakarme duvarda oluşan maksimum deplasmanlar Şekil 66'da görülmektedir. Palye genişliği 2 metre olana kadar, palye genişliğinin duvarda oluşan maksimum deplasmanlar üzerinde etkisi çok az olmuştur. Palye genişliği 2 metreden daha büyük değerlere ulaştıkça duvar deplasmanlarındaki azalmalar daha fark edilir olmuştur. Genel olarak, palye genişliği arttıkça duvar deplasmanlarının azaldığı görülmüştür. İncelenen 14 metre yüksekliğindeki duvar için palye yüksekliğinin 1 metreden 4 metreye yükselmesi ile deplasmanda %1.8'lik azalma olmuştur.



Şekil 66. Palye genişliğine bağlı olarak duvar maksimum deplasmanlarını değişimi

Duvar yüksekliği 14 metre olan duvar için palye genişliğine (1-4 m) bağlı olarak donatı maksimum çekme kuvveti değerlerinin değişimi Şekil 67’de görülmektedir. Palye genişliği 1 metre olduğunda, en yüksek donatı maksimum çekme kuvvetleri tespit edilmiştir. Palye genişliği arttıkça, palyenin bulunduğu seviyenin hemen altındaki donatılarda maksimum çekme kuvveti ani bir düşüş yapmıştır. Bu seviyeden itibaren aşağı doğru indikçe donatı çekme kuvvetlerinde artış oluşmuştur. Genel olarak palye genişliğinin donatı maksimum çekme kuvvetlerini azaltmada çok etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 67. Farklı palye genişliklerindeki duvarlarda tüm şeritlere etkiyen maksimum aksenal kuvvetler

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada, palyeli bir toprakarme duvarın davranışında, yükseklik, palye genişliği ve temel zeminin elastisite modülünün etkisinin değerlendirilmesi amacıyla çeşitli yükseklik, palye genişliği ve elastisite modülü değerleri için Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile analizler yapılmıştır. Analizler öncelikle elastisite modülü 20.000 MPa olan bir zemin üzerinde duvar yükseklikleri 8, 11, 14, 17 ve 20 metre olacak şekilde toprakarme duvarlar tasarlanmıştır. Bahse konu toprakarme duvarlar, yükseklikleri birbirine eşit, palye ile ayrılmış iki duvar şeklinde tasarlanmıştır. İkinci grup analizde ise, toprakarme duvar yükseklikleri 14 metre seçilmiş, zemin elastisite modülü 15.000-105.000 MPa arasında değiştirilerek analizler yapılmıştır. Üçüncü grup analizde ise elastisite modülü 20.000 MPa olan bir zeminin üzerine inşa edilen 14 metre yüksekliğindeki toprakarme sistemin, yüksekliğinin tam ortasındaki palyenin genişliği 1, 2, 3 ve 4 metre olarak değiştirilerek analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda palyeli toprakarme duvarların maksimum deplasman ve donatı(şerit) kuvvetleriyle ilgili aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Çeşitli yüksekliklere sahip palyeli toprakarme duvarların analizlerinden, duvar yüksekliği arttıkça maksimum deplasman miktarının arttığı görülmüştür. Duvar yüksekliği ile maksimum deplasmanlar arasındaki ilişki doğrusal olmayıp, yükseklikle birlikte gittikçe artan deplasmanlar oluşmuştur. Genel olarak duvar yüksekliği arttıkça, palyeli toprakarme duvarların maksimum deplasmanları artmaktadır.
- Yükseklik parametresi altında yapılan bir diğer analizde sistemde bulunan tüm şeritlere etkileyen eksenel kuvvetler incelendiğinde yapı yüksekliği arttıkça şeritlerde meydana gelen maksimum eksenel kuvvetlerin arttığı görülmüştür. Ayrıca, yapı yüksekliğinin artırılması halinde ise en alt şeritte meydana gelen maksimum eksenel kuvvetler yine doğrusal olmayıp yükseklikle birlikte gittikçe artan kuvvetler olduğu anlaşılmıştır. Diğer yandan, yüksekliğin artması, ilk duvardaki en üst şeritte meydana gelen maksimum kuvvetlerin artmasına da sebebiyet vermiştir. Yapılan analizlerde yüksekliğin değişmesi şerit numaralandırmasını da değiştirdiğinden kıyaslama ilk duvardaki en alt ve en üst şerit üzerinden yapılmıştır.
- 15.000-105.000 MPa arasında değiştirilen zeminin elastisite modülünün sisteme etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan analizler sonucu sistemde meydana gelen maksimum deplasman mesafesi değerleri incelendiğinde zeminin elastisite

modülünün artmasının sistemde ortaya çıkan maksimum deplasman miktarını azalttığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, ortaya çıkan deplasman değerleri arasında büyük bir farklılık olmadığı anlaşılmıştır.

- Zeminin elastisite modülü parametresinde yapılan bir diğer analizde yapıdaki şeritlere etkiyen eksenel kuvvetler incelendiğinde, elastisite modülündeki değişimin şeritlerde minimum eksenel kuvvetleri ciddi sayılacak bir oranda değiştirmedeği, maksimum eksenel kuvvetteki değişikliğin 75.000 MPa'lık değerden sonra yaşandığı tespit edilmiştir. Diğer yandan, zeminin elastisite modülünün artırılması halinde ilk duvarın en üst şeridinde oluşan minimum eksenel kuvvetin “0” olarak kaldığı, maksimum eksenel kuvvet de ise ciddi bir değişim yaşanmadığı tespit edilmiştir.
- Çeşitli palye genişliğine sahip toprakarme duvarların analizlerinde, sistemde meydana gelen maksimum deplasman mesafesi değerleri incelendiğinde palye genişliği arttıkça ile maksimum deplasman mesafesinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Palye genişliği parametresi altında yapılan bir diğer analizde sistemde bulunan tüm şeritlere etkiyen eksenel kuvvetler incelendiğinde palye genişliğinin artmasının şeritlerde meydana gelen maksimum ve minimum eksenel kuvvetlerin azalmasına sebep olduğu anlaşılmıştır. Ancak palye genişliği arttıkça ikinci duvarın (üst tarafta bulunan duvar) üst kısmında bulunan şeritlerde meydana gelen eksenel kuvvetin artış hızının ciddi oranda düştüğü fark edilmiştir.
- Bir diğer dikkat çeken sonuç da sistemde maksimum eksenel kuvvetin ortaya çıktığı şeritlerdir. Yükseklik parametresi altında analiz yapılırken 8, 11 ve 14 metre olarak seçilen yüksekliklerde maksimum eksenel kuvvetin 5 numaralı şeritte (ki bu şerit ilk duvarın orta kısmındaki şeritlerden biridir) ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Ancak yüksekliği arttırmaya devam ettiğimizde (17 ve 20 metre olarak seçildiğinde) ise ortaya çıkan sonuç maksimum eksenel kuvvetin ilk duvardaki ilk şeritte (1 numaralı şerit) ortaya çıktığıdır. Yükseklik parametresinde görülen bu değişiklik deformasyon modülü parametresinde hiç ortaya çıkmamış (maksimum eksenel kuvvet tüm seçimlerde 6 numaralı şeritte ortaya çıkmıştır), palye genişliği parametresinde ise dikkat çekici seviyede (maksimum eksenel kuvvetler 7,6 ve 5 numaralı şeritlerde, ki bu şeritler ilk duvarın ortasında bulunan şeritlere tekabül etmektedir, ortaya çıkmıştır) bir değişiklik olmamıştır.

5. KAYNAKLAR

- Alkaya, D. ve Yeşil B., 2012. Metal Şerit ve Geosentetik Donatı Kullanılarak Oluşturulan Donatılı Zemin (Toprakarme) Yapıların Spreadsheet Kullanarak Analizi, Akademik Bilişim, Uşak Üniversitesi.
- Ateş, B., Şadoğlu, E. ve Kalyoncu, O., 2022. Palyeli Toprakarme Duvarlarda Palye Genişliğinin Duvarın Davranışına Etkisinin Numerik Analizi, Dokuzuncu Ulusal Geosentetikler Konferansı, Haziran, İstanbul.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E. ve Engin, H. K., 2010. Validation Of Empirical Formulas to Derive Model Parameters For Sands, 7th NUMGE Conference, Norveç.
- Varma, B. A., Sekhar G. C. ve Avinash P. S., 2010. Analysis and Design of Mechanically Stabilized Reinforced Earth Wall.
- U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009. Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes.
- U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2001. Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.
- Yıldız, E., 2014. Aşırı Yüklemler Altında Toprakarme İstinat Yapılarının Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vidal H., 1966. La terre armée, Annales de L'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics; 223: 888-938.
- Evirgen, B., Kelek, İ., Acarca, Ş. ve Tuncan, A., 2019. Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 211-221.
- Schlosser F. ve Long N., 1974. Recent results in French research on reinforced earth, Journal of the Construction Division; 100: 113-237.
- Evirgen B, Tuncan M, Tuncan A. Modelling study on the geotextile, geogrid and steel strip reinforced slopes, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture 2017; 32, 4, 227-240.
- TS7994. 1990. Zemin Dayanma Yapıları; Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Das B.M., 2007. Principles of Foundation Engineering, 6th ed. USA: Thomson/Brooks/Cole.
- Akinmusuru J.O. ve Akinbolande, J.A., 1981. Stability of loaded footings on reinforced soil, Journal of the Geotechnical Engineering Division; 107: 819-827.
- Karayolları Teknik Şartnamesi. 2013. Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üst Yapı ve Çeşitli İşler, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Sun C. ve Graves C., 2013 Mechanically stabilized earth (MSE) walls design guidance, University of Kentucky Transportation Center.
- Lee K.L., Adams B.D. ve Vaneron J.J., 1973. ASCE, Reinforced earth retaining walls, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, SM10, October.
- Bowles,E.J., 1988. Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Elias,V. Christopher,B.R. ve Berg, R.R., 2001. "FHWA-NHI-00-043: Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines" Woodbury, USA.
- Durgunoğlu H. T., Kaya T. ve Özbatır M., 2007." Donatılı Zemin Duvar Yapılarının Depremde Davranışı" TMMOB Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 1. Özel Konulu Sempozyum, İstanbul.
- Berg, R.R., Christopher, B.R. ve Samtani, N.C., 2009. "FHWA-NHI-10-024: Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes-Volume:I" Technical Manual , Woodbury USA.
- Juran, I., 1983. "State of the Art Report “Reinforced Soil Systems – Application in Retaining Structures,” 7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Haifa.
- Juran I. ve Schlosser, F., 1978. “Theoretical Analysis of Failure in Reinforced Earth Structures” Proceedings of a Symposium Sponsored by the Committee on Placement and Improvement of Soils of the Geotechnical Engineering Division of the ASCE, Pittsburg, Pennsylvania,pp 528-556, April.

- Sankey, J. ve Soliman, A., 2004. "Tall Wall Mechanically Stabilized Earth Applications" Geo-Trans 2004: Geotechnical Engineering for Transportation Projects Los Angeles-California, USA.
- Vidal H., 1969. "The principle of reinforced earth" Transportation Research Board Business Office, no. 282, pp. 1-16.
- Uzuner, B., A., Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, VII. Baskı, Derya Kitabevi, Trabzon, 2007.
- Alkaya D. ve Çobanoğlu, İ., 2007. "Toprakarme (donatılı zemin) yapılar" Denizli İMO Bülten - İnceleme Araştırma, sayı. 54, Denizli.
- Mitchell, J.K. ve Villet, W.C.B., 1987. "Reinforcements of Earth Slopes and Embankments" National Cooperative Highway Research Program Report, California, USA, June.
- Segrestin P. ve Freitag, N., 2000. "Reinforced Earth Walls Along the Spillways" TAI Document.
- Elias,V., Christopher,B.R. ve Berg, R.R., 2001. FHWA-NHI-00-043: Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines" Woodbury, USA.
- Anderson, P.L., Gladstone, R.A. ve Sankey, J.E., 2012. "State of the Practice of MSE Wall Design for Highway Structures" Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress: Geotechnical Special Publication No.226.
- Smith, A.C. ve Dison, L., 2000. "Backfill Materials for Mechanically Stabilized Earth (MSE): African Experience" Reinforced Earth South Africa Company Technical Papers.
- Koca, E., 2020. Moloz Taş Duvarların Güvenliğinin Arttırılmasına Yönelik Yapılan Taş – Kum Dolgu uygulamalarının Drenaja Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- URL-1, www.geotechinsaat.com 14 Nisan 2021.
- URL-2, www.stech.com.tr 17 Mayıs 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Furkan KUL, Yomra Merkez İlköğretim Okulu'nda ilk öğrenimini tamamladıktan sonra ortaöğretime geçiş sınavı sonunda Kanuni Anadolu Lisesi'ne yerleşmiştir. 2007 yılında başladığı lise eğitimi ise 2011 yılında sona ermiş olup, yine aynı yıl üniversitelere giriş sınavı ile KTÜ Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazanmıştır. Lisans eğitimini 2018 yılında tamamlayarak 2020 yılına kadar çeşitli özel şirketler bünyesinde konut ve tünel projelerinde saha mühendisi olarak çalışmıştır. 2018 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalında Tezli Yüksek Lisans öğrenimine başlamıştır. Ayrıca, 2020 yılında başladığı Polis Akademisi/Güvenlik Bilimleri Enstitüsü/Güvenlik Yönetimi Tezsiz Yüksek Lisans programını başarıyla tamamlayarak Komiser Yardımcısı unvanıyla 2021 yılı Nisan ayında Emniyet Genel Müdürlüğü, İnterpol-Europol Daire Başkanlığı'nda çalışmaya başlamıştır ve halen bu görevini sürdürmektedir.