

# ÇEVİRMELİ ANKRAJLARIN FİZİKSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

## PHYSICAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FLIP ANCHORS

Yıllar Meral KAYALI YK<sup>1</sup>, Nurhan ECEMİŞ<sup>2</sup>

### ÖZET

Çevirme tipi ankrajların çekme kapasitesinin anlaşılması, Şev stabilitesinin korunması açısından oldukça önemlidir. Bu alışma, üç farklı zemin tabakasına sürülen iki farklı tasarıma sahip çevirmeli zemin ankrajının sahada yapılan çekme testlerinden ve sonlu elemanlar kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen bulguları sunmayı amaçlamaktadır. Büyük evirmeli zemin ankrajı (TA-I) ağırlığı 10 kg, küçük çevirmeli zemin ankrajı (TA-II) ağırlığı ise yaklaşık 5 kg'dır. Her iki ankrajın yapımında galvanizli elik döküm malzeme kullanılmıştır. Sahada, TA-I ankrajı dikey olarak 3 farklı, TA-II ankrajı ise 2 farklı derinliğe kadar sürülmüş ve daha sonra yeterli zemin basıncının üzerlerine etki etmesine izin verecek kadar döndürülmüştür. Çekme testleri ile farklı derinliklerde iki farklı çevirmeli zemin ankrajının maksimum çekme direnci belirlenmiştir. Son olarak ankrajlar saha testlerinden elde edilen verilere dayalı olarak sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak modellenmiştir. Sayısal analizler ile çevirmeli zemin ankrajlarını çevreleyen zeminin üst ve alt kısımlarındaki yer değiştirmeler ve toplam gerilmeler elde edilmiştir. Saha deneylerinden ve sayısal analiz sonuçlarından elde edilen ana bulgular, çevirmeli zemin ankrajlarının çekme davranışının her zemin profilinde farklı davranış sergilediği ve yzeeye yakın zemin profilindeki gerilme ve yer değiştirmeden etkilendiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** *evirmeli ankraj, ekme testi, Yer değiştirme, Toplam gerilmeler, Sonlu elemanlar analizi*

### ABSTRACT

Understanding the pull-out capacity of flip anchors is crucial for maintaining slope stability. This study aims to present the findings from field pull-out tests and finite element analyses conducted on two different types of flip anchors driven into three different soil layers. Both anchors are made from galvanized steel cast material. The large impact flip anchor (TA-I) weighs 10 kg, while the small impact flip anchor (TA-II) weighs approximately 5 kg. The TA-I anchor was driven vertically to three different depths, whereas the TA-II anchor was driven to two different depths. The flip anchors were rotated to allow adequate soil pressure to act upon them. Pull-out tests were conducted to determine the maximum tensile resistance of the two different flip anchor designs at various depths. The flip anchors

<sup>1</sup> Yüksek Lisans ğrencisi, İzmİr Yüksek Teknoloji Enstits, e-posta(yillarkayali@iyte.edu.tr)

<sup>2</sup> Profesr, İzmİr Yüksek Teknoloji Enstits, nurhanecemis@iyte.edu.tr

were then modeled using a finite element program based on data obtained from the field tests. As a result of numerical analysis, displacements and total stresses at the upper and lower parts of the soil surrounding the flip anchors were obtained. The main findings from the field experiments and numerical analysis indicate that the tensile behavior of flip anchors varies with each soil profile and is influenced by stress and displacement in the near-surface soil profile.

**Keywords:** *Flip anchor, Tensile test, Displacement, Principal stresses, Finite element method analysis*

## 1. GİRİŞ

Çevirmeli ankrajlar, şev stabilizasyonu için yapılan uygulamalarda şevlerin ve dolguların güçlendirilmesi için çok yönlü ve verimli çözümler sunmaktadır (Aswaf vd., 2023). Bu ankrajlarda, çekme yüklerine yeterince dayanmak için zeminin doğal mukavemetine bağlı bir devrilme plakası mekanizması kullanılmaktadır. Çevirmeli ankrajları yapımında çoğunlukla galvanizli çelik döküm veya alüminyum alaşımları gibi birinci sınıf malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek mukavemet-ağırlık oranlarına ve korozyon direncine sahiptirler. Diğer harçlı ankraj sistemleriyle karşılaştırıldıklarında nispeten düşük bir taşıma kapasitesine sahiptirler (Moghadam vd., 2021). Ancak fazla gömme derinliği ihtiyacını ortadan kaldırarak mevcut eğimlerin iyileştirilmesi ve ortaya çıkan stabilite sorunlarının giderilmesi için özellikle uygun bir uygulama yöntemidir. Kurulum sırasında zemin örselenmesi çok azdır. Bununla birlikte, çevirme tipi ankrajlar genellikle 10 ila 50 mm arasında değişen çeşitli çaplardaki çelik çubuklar veya tel halatlarla uyumludur. Bu da tasarım ve kurulumda esneklik sağlamaktadır. Çevirmeli ankrajlar hafif tasarımları sayesinde taşınabilir ekipmanlar kullanılarak kazıya gerek kalmadan zemine doğrudan sürülebilirler. Çevirmeli ankrajlar önceden belirlenen derinliğe sürüldükten sonra yük taşıma konumuna geçmesi için zemin içinde 90° dönmesi için çekilerek sabitlenir. Ankrajın hemen önünde zemin bozunma bölgesi oluşur. Bu, zemin yer değiştirmesinin ve mobilizasyonunun başladığını gösterir ve ankrajın zemin ile etkileşimini yansıtmaktadır. Dolayısıyla, çevirmeli ankrajların yerleştirilmesinden sonra çekme testleri yapılır. Ankrajın kurulumu, nihai yük kapasitesine ulaştığında tamamlanmaktadır.

Çevirmeli ankrajların farklı zemin tiplerinde ve çevre koşullarında performansının karşılaştırılması, çevirmeli ankrajların uzun vadeli çekme performansını, dayanıklılığını ve özellikle döngüsel yükleme altında zamanla potansiyel bozulmasını anlaşılması ile ilgili literatürde eksiklikler vardır (Moghadam vd., 2021). Literatürde çevirmeli ankrajlar üzerine yapılan çalışmalar sayısal analizleri içermektedir (Yoshida ve Xiong, 2023; Azizian vd., 2024), Azizian vd. (2024), kötü derecelendirilmiş kumda, çekme yükleri altında çevirmeli ankrajın davranışını simüle etmek için sonlu elemanlar analizleri yapmıştır. Sayısal analiz sonuçlarında, gömülme derinliğinde %13'lük bir artış (0.75 m'den 0.85 m'ye) ile nihai çekme direncinde ( $P_{ult}$ ) %78 artış sağlamış ve  $P_{ult}$  1.8 kN'dan 3.9 kN'a yükselmiştir. Çekme dayanımındaki bu önemli artış, ankrajın daha derin gömülmede daha büyük hacimli zeminden direnç alması olduğunu gözlemlenmiştir. Yoshida ve Xiong (2023) ise şev stabilizasyonunda çevirmeli ankrajların davranışını analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmışlardır. Bu çalışmada, değişen yük koşulları altında zeminin direncini

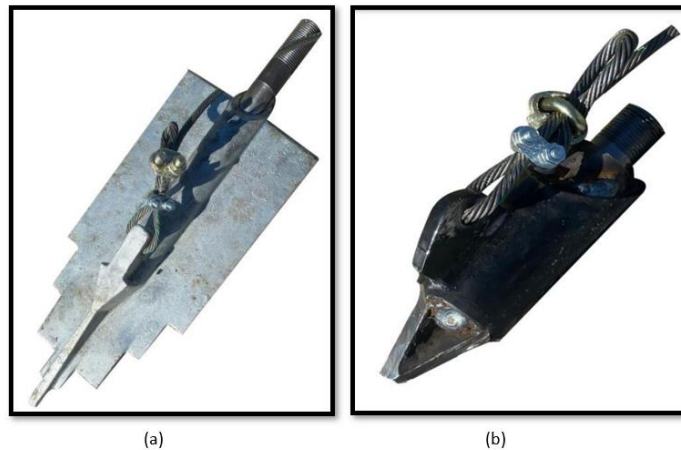
doğru bir Şekilde karakterize etmek için alt yükleme tij modeli uygulamıŐlardır. Bu model ile ankrajların takviye etkilerinin değerlendirilmesinde kritik faktörler olan artan plastisite ve zemin örselenmesi araştırılmıştır. Sayısal analiz ıktıları, çevirmeli ankrajların, takviyesiz veya geleneksel plaka ankrajlı senaryolara kıyasla Şev stabilitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Çevirmeli ankrajlar çeşitli zemin koşullarında ankrajlama için yenilikçi çözümler sunsa da geoteknik uygulamalarda çevirme tipi ankrajların performansını ve güvenilirliğini artırmak için kapsamlı testler ve araştırmalar yapılmalıdır. Dolayısıyla evirmeli ankrajların tasarlanan yükleri yeterince destekleyebilmeleri için zemin koŐullarının ve yk gereksinimlerinin titiz bir Şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu alıŐma kapsamında ilk olarak iki farklı geometride tasarlanan çevirmeli ankrajlar üç farklı zemin profiline sürülmüş ve sahada çekme deney testi yapılarak nihai çekme dirençleri belirlenmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar analizleri ile saha testlerinden elde edilen TA-I ve TA-II ankrajlarının nihai çekme dirençleri, Plaxis 2D programına yk fazı giriş değerleri(ekme kuvvetleri) olarak sahadaki çekme testinden elde edilen  $P_{ult}$  değerleri kullanılmıştır.

## 2. ÇEVİRMELİ ANKRAJLARIN SAHA TESTİ

### 2.1. Tasarlanan evirmeli Ankrajlar

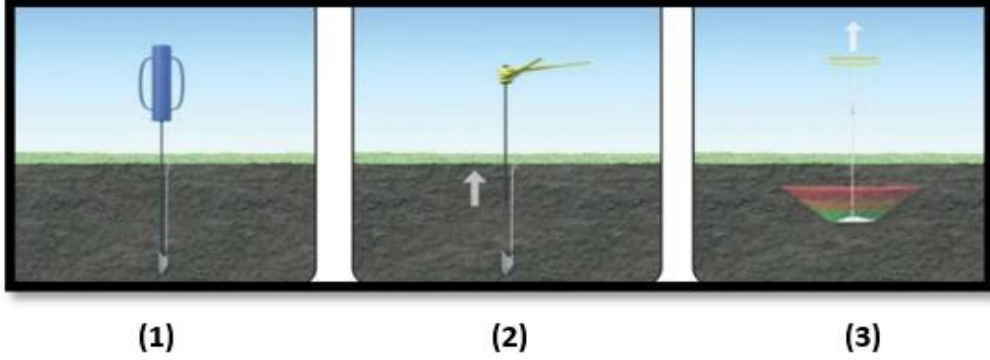
Bu alıŐma kapsamında farklı geometrilere sahip iki farklı çevirmeli ankraj tasarlanmış ve sahada test edilmiştir. Şekil 1.(a) ve (b)'de büyük çevirmeli ankrajı (TA-I) ve küçük çevirmeli ankraj (TA-II)'nin fotoğrafları verilmektedir. TA-I ankrajının geniŐliđi 17 cm ve uzunluğu 47.5 cm'dir. Bu ankraj numunesinin kütlesi yaklaşık 10 kg olarak ölçülmüŐtür. TA-II ankrajı 4 cm geniŐliđinde ve yaklaşık 16.28 cm uzunluğundadır. Bu ankraj da yaklaşık 5 kg olarak ölçülmüŐtür. Zemini yukarı veya yana doğru çekerken kavrayan ve tutan TA-I ve TA-II ankrajlarının geometrisi ankrajın uygunluğunu ve performansını değerlendirmek açısından önemlidir.



Şekil 1. (a) TA-I ve (b) TA-II ankrajı

Bu tip ankrajların kurulum süreci Şekil 2.'de gösterildiği gibi üç aŐamadan oluŐmaktadır: (1) ankraj plakasına bir tahrik elik çubuğun ve halatın bağlanması ve daha önceden belirlenen derinliğe sürülmesi, (2) tahrik elik çubuğun ankraj ile bağlantısının kesilmesi ve zeminden

çıkartılması, (3) istenen çekme kapasitesini elde etmek için halatın çekilmesi ve plakanın 90° döndürülmesi ile yük kilitlemeyi amaçlayan sistematik bir işlem dizisini içermektedir.



Şekil 2. Çevirme tipi ankrajların kurulum prosedürü (Platipus Civil Engineering & Construction Brochure, 2022)

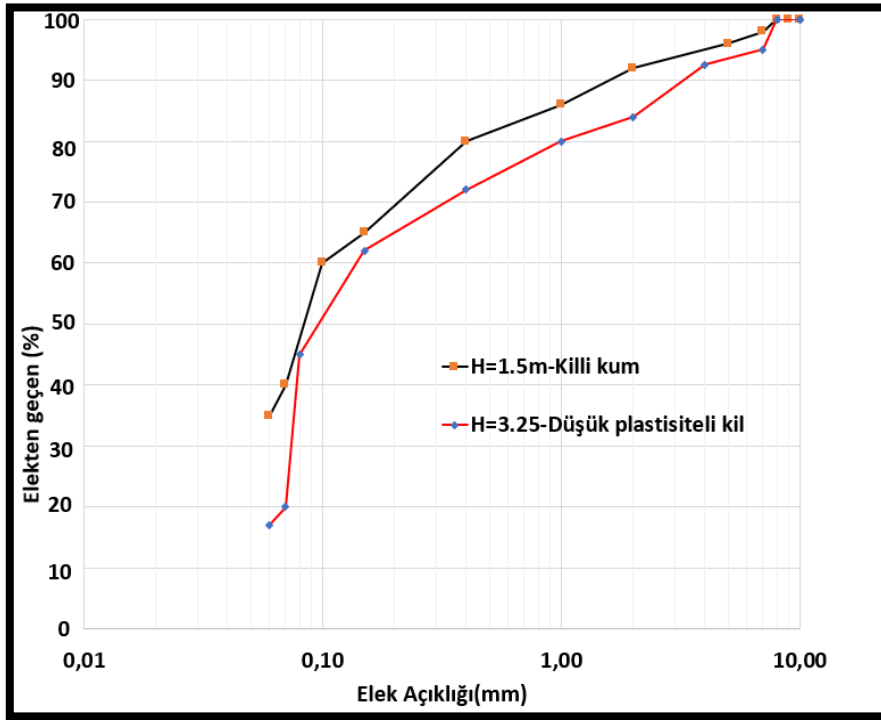
Başlangıçta, ankraj kafası, önceden belirlenmiş derinliğe nüfuz eden bir ekskavatör kullanılarak zemine sürülür. Kurulumun bu ilk aşaması, sonraki yük taşıma kapasitesi ve stabilite için önemli bir faktördür. Daha önceden belirlenmiş derinliğe sürüldüğünde, kurulum süreci, bağlı bir tahrik çelik çubuğunun kullanıldığı ikinci aşamaya geçilmektedir. Bu tahrik çelik çubuğu, yük kilitleme mekanizmasında pivot görevi görerek ankrajın istenen derinlikte sabitlenmesini kolaylaştırır. Tahrik çelik çubuğu, ankraj başlığı tertibatına titizlikle yerleştirilerek uygulanan yüklere ve çevresel gerilimlere dayanabilen bir bağlantı görevi görmektedir. Kurulumun son aşamasında, halat ile yük kilitleme işlemi yapılır. Bu, bir çekme kuvveti uygulandığında ankraj kafasının döndüğü ve açıldığı kritik bir prosedürdür. Çevirmeli ankraja çekme yükü uygulanması, ankraj başlığında dönmeye neden olur ve böylece yük kilitli mekanizması işlemi gerçekleşir böylelikle, çevirmeli ankraji zemine sabitlenir ve böylece sabit bir tutuş sağlanır.

## 2.1. Çekme Testleri

Çevirme tipi ankrajların çekme testleri, Şekil 3.'de gösterildiği gibi İzmir İli, Seferihisar İlçesinde gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinden önce Standard Penetrasyon testleri (SPT) yapılmış ve  $(N_{60})_1$  değerleri elde edilmiştir. Çekme testlerinin yapıldığı lokasyon ile SPT testlerinin yapıldığı lokasyon arası yaklaşık 2 m'dir. Farklı derinliklerden örselenmiş zemin numuneleri alınmış ve laboratuvarında elek analizleri (TS-EN ISO 17892-4) ve Atterberg limit deneyleri (TS EN ISO 17892-1) yapılmıştır. Şekil 4.'de dane boyut eğilimi gösterilmektedir.



Şekil 3. Proje sahasında sondaj ve çekme testlerinin yapıldığı konum

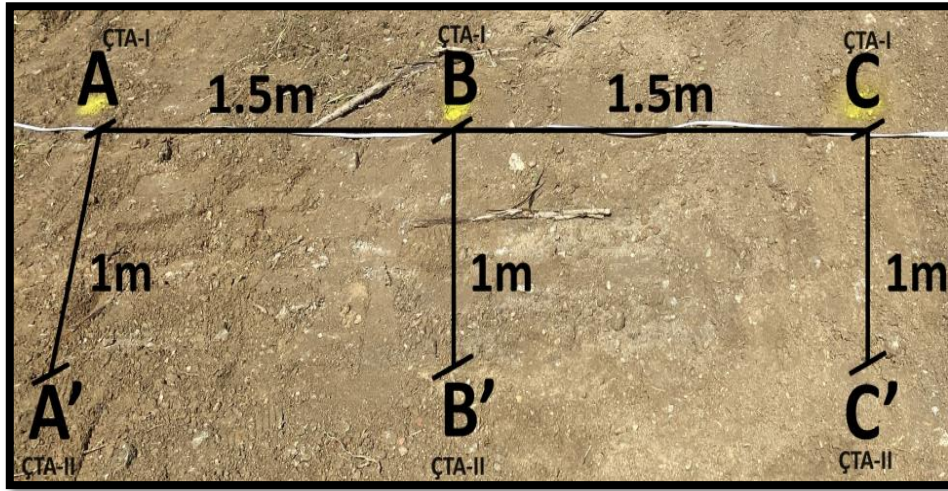


Şekil 4. Dane boyut dağılım eğrisi

Saha incelemesi tamamlandıktan sonra, TA-I üç ve TA-II iki farklı zemin katmanına dikey olarak sürülmüş ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Deney için üç farklı derinlik seçilmesinin nedeni, iki farklı çevirmeli ankrajın çeşitli zemin profillerindeki nihai gerilme direncini ( $P_{ult}$ ) araŐtırmaktır (Kayalı Yük, 2024).

Şekil 5.'de gösterilen A, B ve C noktaları TA-I için çekme testlerinin yapılacağı lokasyonları göstermektedir. A noktasında 1.5 m derinlikte, B noktasında 2.5 m derinlikte ve C noktasında 3.25 m derinliğe kadar TA-I ankrajı dikey olarak sürülmüş ve çekme testleri

yapılmıştır. Şekilde verilen A', B' ve C' noktaları ise ÇTA-II için çekme testlerinin yapılacağı lokasyonları göstermektedir. A' noktasında 1.5 m derinlikte, B' noktasında 2.5 m derinlikte ve C' noktasında 3.25 m derinliğe kadar ÇTA-II ankrajı dikey olarak sürülmüş ve çekme testleri yapılmıştır. ÇTA-II ankrajının zemine 3.25 m sürülmesi sırasında tahrik çelik çubuğu burkulmuş ve 3.25 m'de çekme testi yapılamamıştır. Diğer tüm çekme testlerinde, tahrik çelik çubuğu kademeli ve kontrollü bir şekilde zemine sürülmüştür. Ankrajların zemine sürülürken ve çekme testleri yapılırken birbirlerinden etkilenmemesi için yatay olarak 1.5 m ve dikey olarak 1 m açıklık olacak şekilde konumlandırılmıştır. Çevirmeli ankrajların  $P_{ult}$  değeri her bir çekme testi için hidrolik kriko kullanılarak manuel olarak basınç göstergesinden kaydedilmiştir. Sahada ölçülen  $P_{ult}$  değerleri uygulamada mevcut olan benzer boyutlardaki çevirmeli ankrajların çekme direnci ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5. ÇTA-I ve ÇTA-II ankrajlarının zemine dikey olarak sürülmesi ve çekme testi yapılacak noktaların konumu

#### Çevirmeli Ankrajların Çekme Testi Uygulaması

Test koşullarında tutarlılığı sağlamak ve aynı test koşulları altında sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için kontrollü bir deney düzeneği oluşturulmuştur. İlk olarak, çevirmeli ankrajları Şekil 5.'de belirtilen noktalara Şekil 6.(a)'da gösterildiği gibi tahrik çelik çubuğu kullanılarak bir ekskavatör yardımıyla zemine dikey olarak sürülmüştür. Ankrajının zemine sürülmesinden önce yüksek karbonlu çelik malzemeden yapılmış ankraj halatı plakaya bağlanmıştır. Kullanılan halatın gerilme kapasitesi 300 kPa'dır. Ankraj istenilen derinliğe sürüldükten sonra çelik çubuk çıkartılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 6(a) CTA-I ankrajının zemine dikey olarak sürülme işlemi ve (b) hidrolik pompa, krika ve yatak plakası

Ankraj halatının bulunduğu yere bir yatak plakası yerleŐtirilmiŐtir. Şekil 6.(b)'de 700 bar kapasiteli hidrolik pompa, krika ve yatak plakası gösterilmiştir. Hidrolik krikoda, uygulanan kuvvetin manuel olarak gözlemlenmesi için bir basınç göstergesi kullanılmıştır. Yatak plakası uygulanan yükü eŐit Şekilde daĐıtmıŐ ve hidrolik krikonun sonraki uygulaması için sabit bir tepki noktası sağlamıştır. Çekme testini kolaylaştırmak için, özellikle konik çeneler olmak üzere mekanik konektörler, ankraj halatının etrafına yerleŐtirilmiŐtir. Bu konektörler, halat üzerinde sıkı bir tutuş sağlayarak test sırasında kuvvetin doğru bir Şekilde aktarılmasını sağlamıştır. Daha sonra, hidrolik krika ankraj halatıyla hizalanmıŐ ve uygulanan kuvvetin yönünün doğrudan ankraj halatının ekseni boyunca olması saĐlanmıŐtır. Bu testlerin sonuçları, özellikle heterojen zemin tabakalarına sahip ortamlarda geoteknik mühendislik uygulamaları için çevirmeli ankraj tasarımı kurulum teknikleri hakkında gözleme yapma olanağı sağlamış ve aynı zamanda çeşitli zemin tiplerinde çevirmeli ankrajların tepkisinin araştırılması için basit bir temel sağlamıştır.

#### Çevirmeli Ankrajların ekme Testi Sonuç ve Benzer evirmeli Ankrajların Nihai ekme Direnleriyle Karşılaştırılması

TA-I ve TA-II ankrajları için aynı test aparatının kullanılması, deneysel modeli doğrulamak ve sahada toplanan verilerin kontrollü koŐullar altında elde edilen  $P_{ult}$  değerlerinin karşılaştırılabilir olmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Tablo 1'de, farklı derinliklerde TA-I ve TA-II ankrajlarının çekme testi sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 1. ÇTA-I ve ÇTA-II ankrajları için test yapılan derinliklerdeki nihai gerilme direnci ( $P_{ult}$ )

Ankraj tipi	Derinlik (m)	$P_{ult}$ (kN)
ÇTA-I	1.5	61.6
	2.5	86.2
	3.25	154.0
ÇTA-II	1.5	37.0
	2.5	52.5

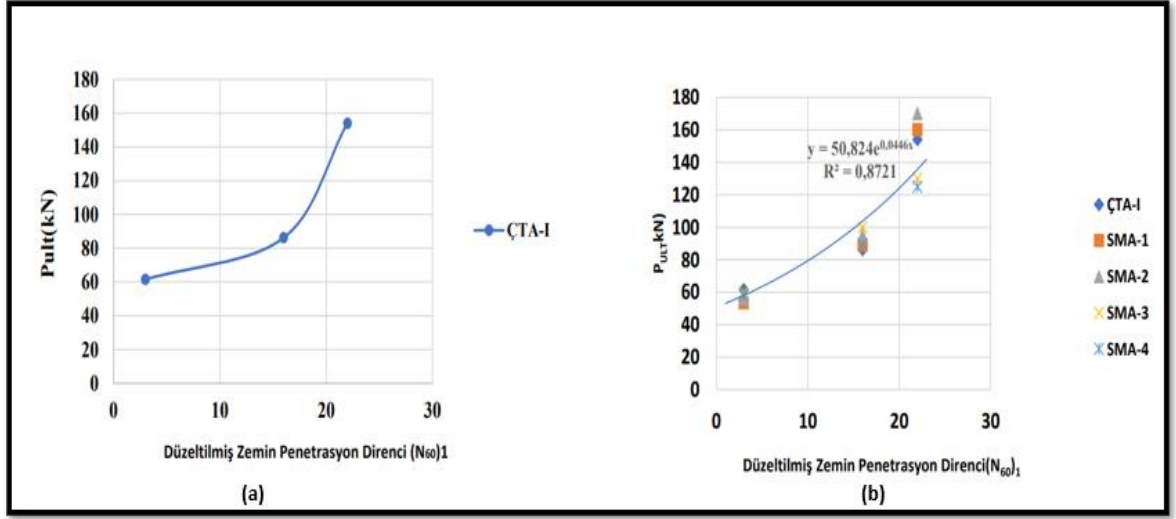
ÇTA-I ankrajı için zemin ( $N_{60}$ )<sub>1</sub> değerleri göz önünde bulundurularak  $P_{ult}$  ile ( $N_{60}$ )<sub>1</sub> arasında bir ilişki belirlenmiş ve Şekil 7.(a)'da verilmiştir.  $P_{ult}$  değerindeki farklılıkların, aşırı yük basıncı nedeniyle derinlikle artan gerilme ve yoğunluktaki farklılıklardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. ÇTA-I ankrajında,  $P_{ult}$  ile ( $N_{60}$ )<sub>1</sub> arasındaki ilişki çekme direncinin zemin koşullarına göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Ek olarak, piyasada mevcut benzer çevirmeli ankrajların (SMA-1, SMA-2, SMA-3 ve SMA-4) test verileri karşılaştırılmış ve karşılaştırılabilir zemin profillerindeki  $P_{ult}$  değerleri incelenmiştir. Tablo 2'de, SMA-1, SMA-2, SMA-3, SMA-4 ve ÇTA-I çevirmeli ankrajların geometrik özellikleri gösterilmektedir. Şekil 7.(b)'de SMA-1, SMA-2, SMA-3 ve SMA-4 ve ÇTA-I ankrajlarının  $P_{ult}$  değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 7.(b)'ye bakıldığında gösterilen grafik, benzer çevirmeli ankrajlar ve ÇTA-I ankrajları arasında ( $N_{60}$ )<sub>1</sub> -  $P_{ult}$  verilerinin birbirine yakın olduğunu, dolayısıyla saha testlerinden elde edilen sonuçların tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Şekildeki eğri kullanılarak ( $N_{60}$ )<sub>1</sub> ile  $P_{ult}$  arasında bir fonksiyon elde edilmiştir:

$$P_{ult} = 50.824e^{0.0446(N_{60})_1} \quad (1)$$

Tablo 2. ÇTA-I ankrajı ve benzer çevirmeli ankrajların fiziksel özellikleri (L=uzunluk, W=genişlik, H=yükseklik)

Çevirme tipi ankraj	LxWxH (cm)
SMA-1	40x20x11
SMA-2	34x18x10
SMA-3	34x21x9
SMA-4	37x18x19
ÇTA-I	47.5x17x5





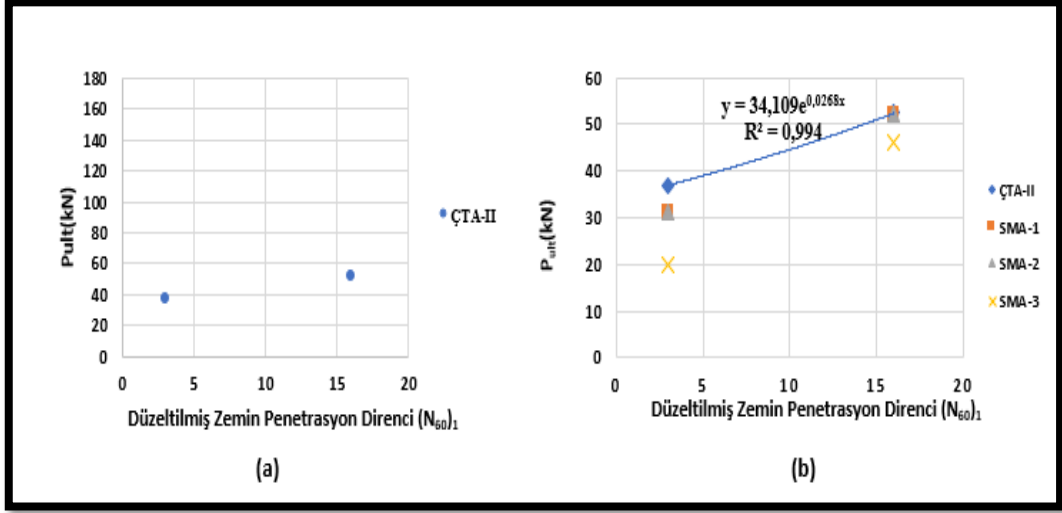
Şekil 7. (a) ÇTA-I ankraji için  $(N_{60})_1$  -  $P_{ult}$  ilişkisi ve (b) diğer benzer çevirmeli ankrajlarla karşılaştırılması

Yukarda verilen aynı yöntem kullanarak ÇTA-II ankraji ve literatürde mevcut benzer boyutlardaki çevirmeli ankrajlar karşılaştırılmıştır. Tablo 3’de diğer benzer çevirme tipi ankrajlar (SMA-1, SMA-2 ve SMA-3) ve ÇTA-II ankrajlarının geometrik özellikleri gösterilmektedir. Şekil 8.(a)’da ÇTA-II ankrajının  $P_{ult}$  değerleri ile  $(N_{60})_1$  değerleri arasındaki ilişki ve Şekil 8.(b)’de diğer benzer çevirme tipi ankrajlar (SMA-1, SMA-2 ve SMA-3) ve ÇTA-II ankrajlarının  $P_{ult}$  değerleri karşılaştırılmıştır. ÇTA-II ankraji için  $(N_{60})_1$  ile  $P_{ult}$  arasında bir fonksiyon geliştirilmiştir:

$$P_{ult} = 34.109e^{0.0268(N_{60})_1} \quad (2)$$

Tablo 3. ÇTA-II ankraji ve benzer çevirmeli ankrajların fiziksel özellikleri (L=uzunluk, W=genişlik, H=yükseklik)

Çevirme tipi ankraj	LXWXH(cm)
SMA-1	16x4.5x6
SMA-2	16.3x4.8x6
SMA-3	15x4x5
ÇTA-II	16.3x4x4

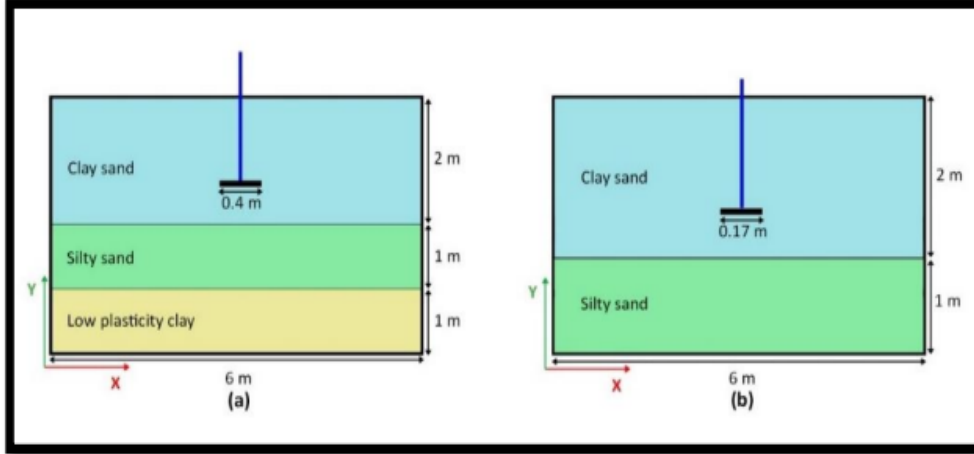


Şekil 8. (a) ÇTA-II ankraji için  $(N_{60})_1 - P_{ult}$  ilişkisi ve (b) diğer benzer çevirmeli ankrajlarla karşılaştırılması

Şekil 7. ve Şekil 8.'e bakıldığında, ÇTA-I ankrajının ÇTA-II ankrajından daha yüksek nihai çekme direncine sahip olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni ÇTA-I ankrajının ÇTA-II ankrajına kıyasla daha büyük bir yüzey alanına sahip olmasıdır. Ayrıca, ÇTA-I ankraji geometrisine bakıldığında daha girintili ve çıkıntılı bir şekle sahipken, ÇTA-II ankrajının geometrisi ÇTA-I ankrajından daha düz bir geometriye sahiptir. ÇTA-I ankrajının geometrisi, girinti ve kenarların açısını ayarlayarak zemindeki yük kitleme mekanizmasını optimize ederek daha yüksek bir çekme direnci gözlemlenmiştir (Kayalı Yük, 2024). Nihai çekme direncine ilişkin veriler yaklaşık olarak mevcut kaynak bilgilerinden elde edilmiştir. Bu yaklaşım, bu çevirmeli ankrajların çekme direnci performansına ilişkin ön ve bilgilendirici bir analiz sağlayarak bu çalışma alanındaki nümerik araştırmalar için temel oluşturmaktadır.

## 2.2. Sayısal Analizler

Bu çalışma kapsamında, Plaxis 2D sonlu elemanlar (FEM) programı kullanılarak, ÇTA-I ve ÇTA-II ankrajları sayısal model içinde sahada uygulanan aynı derinliklere yerleştirilmiş ve uygulanan çekme kuvveti ile zeminin yer değiştirmesi ve toplam gerilme dağılımı etkili bir şekilde araştırılmıştır. Modelde, çekme uygulanan yük altında çevirmeli ankrajının performansı için kritik öneme sahip olan düşey gerilme ve yer değiştirme tepkilerinin dikey yönelimine odaklanılmıştır. Sayısal analizlerde, yük fazı giriş değerleri için sahadaki çekme testinden elde edilen  $P_{ult}$  değerleri kullanılmıştır. Şekil 9.'da Plaxis 2D programı kullanılarak oluşturulan, ÇTA-I ve ÇTA-II ankrajlarının 2D sonlu eleman modelleri gösterilmektedir. Modelin yan ve alt sınır koşulları kısıtlanmıştır. Bunun sebebi, serbest üst sınır, yüzeyin uygulanan çekme yüklerine doğal olarak tepki vermesini sağlayarak yüzeydeki yer değiştirmelerinin gerçekçi bir şekilde temsil edilmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 9. 2D sayısal model geometrisi (a) ÇTA-I ve (b) ÇTA-II ankraji

Saha deneyleri sırasında belirlenen farklı zemin profilleri modelde şekilde verildiği gibi temsil edilmiştir. Zemin Mohr-Coulomb ile modellenmiş ve kullanılan zemin parametreleri Tablo 4’de verilmiştir. Bu sayede , değişen yük koşulları altında zeminin kayma mukavemeti ve deformasyon özelliklerinin analitik olarak incelenmesi ve modellenmesi daha kolay hale getirilmiştir.

Tablo 4. Sayısal modelde kullanılan zemin parametreleri

Zemin Parametreleri	Killi kum	Siltli Kum	Düşük Plastisiteli Kil
Birim hacim ağırlığı, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17	18	17
S-dalga hızı, $V_s$ (m/sn)	200	264	343
Kayma Modülü, $G$ (kPa)	72408	120281	203806
Elastisite Modülü, $E$ (kPa)	188260	300702	529540
İçsel sürtünme açısı, $f$ (°)	33	38	41
Kohezyon, $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	32	75	76

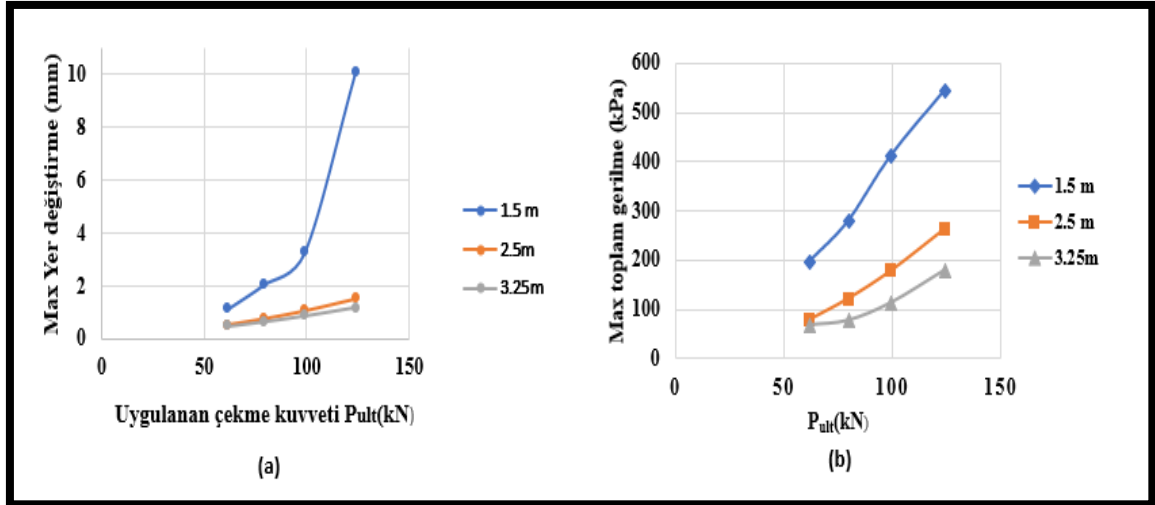
Sahada kullanılan ankraj halatı Plaxis 2D programının set tipindeki plaka olarak tanımlanmıştır. Çevirmeli ankrajlar ise, programa ankraj olarak tanımlanmıştır. Çevirmeli ankraj ve ankraj halatları kullanılan malzeme cinsine göre uygun olan elastise modül değerleri baz alınmıştır. Tablo 5’de sayısal modelde çevirmeli ankraj ve ankraj halatı için programa girilen parametrelerin değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5. FEM modelinde kullanılan ankraj halatı ve çevirmeli ankrajının özellikleri

Malzeme	Ankraj Halatı	Çevirmeli Ankraj
Elastisite Modül (kPa)	$1.98 \times 10^8$	$9.8 \times 10^5$
Atalet Momenti (I)	0.052	0.002
EI	$1.041 \times 10^7$	N/A
EA	$2.52 \times 10^5$	$6.7 \times 10^4$

ÇTA-I ankrajının davranışını değerlendirmek için 3 farklı derinlikte (1.5 m, 2.5 m ve 3.25 m) sahada bulunan  $P_{ult}$  değerleri (Tablo 1) çekme kuvveti girdi değeri olarak kullanılmış ve farklı derinliklerde analizler gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde, ÇTA-II ankraji için de 1.5 m ve 2.5 m derinliklerde sayısal analizler yapılmıştır. Analizlerde çevirmeli ankrajların toplam gerilmelerini ve yer değiştirmelerini değerlendirilmiştir.

İlk olarak ÇTA-I ankraji için, 1.5, 2.5 m ve 3.25 metre derinliklerinde Denklem 1 kullanılarak  $(N_{60})_1$  değerlerine karşılık gelen çekme kuvvetleri bulunmuş ve bulunan bu değerler sırasıyla programa çekme kuvvetleri olarak girilerek analizler yapılmıştır. Sonuç olarak Şekil 10.(a)'da her bir derinliğe karşılık gelen  $P_{ult}$  değerleri dolayısıyla farklı  $(N_{60})_1$  zemin değerleri için ankraji etrafındaki zemindeki maximum yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Şekil 10.(b)'de ise her bir derinliğe karşılık gelen  $P_{ult}$  değerleri dolayısıyla farklı  $(N_{60})_1$  zemin değerleri ve ankraji etrafındaki zemindeki maximum toplam gerilmeler verilmiştir.

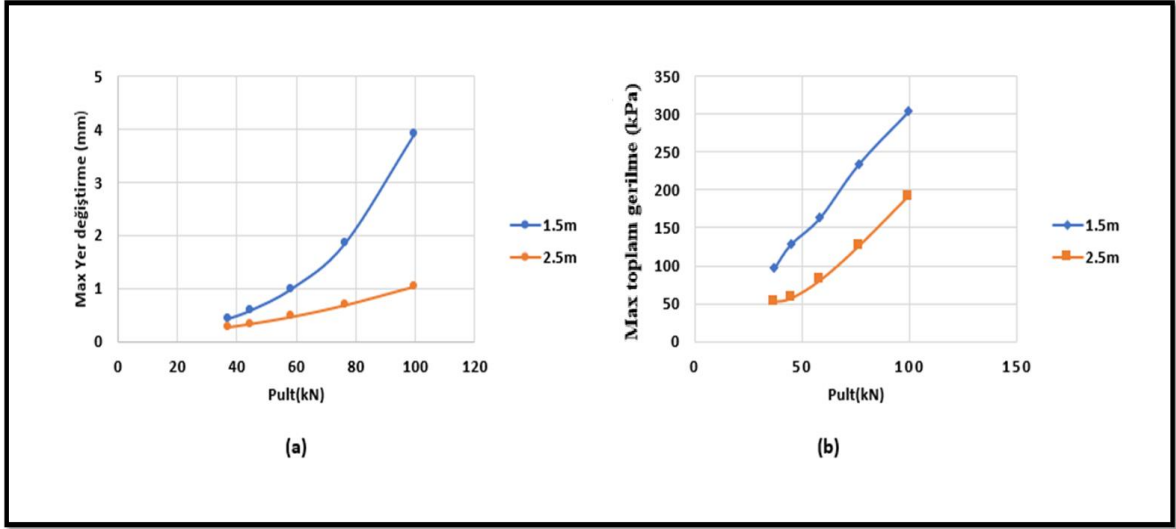


Şekil 10. ÇTA-I ankraj için farklı derinliklerde ve zeminlerde (a) maksimum yer değiştirme-  $P_{ult}$  ilişkisi ve (b) maksimum toplam gerilme-  $P_{ult}$  arasındaki ilişki

Şekil 10.(a)'da görüldüğü üzere derinlik arttıkça maksimum yer değiştirme 1.5 m ile 2.5 m arasında yaklaşık %65 ve 2.5 m ile 3.25 m arasında %20 azalmıştır. 2.5 m ve 3.25 m derinlik arasında  $(N_{60})_1$  zemin değerlerinin birbirine yakın olmasından dolayı diğer zemin katmanlarına kıyasla daha az yer değiştirme gözlemlenmiştir (Kayalı Yük, 2024). Ayrıca, 1.5 m derinlikteki killi kumlu zemin profili, düşük plastisiteli kil zeminine göre genellikle azaltılmış bir kesme dayanımı sergilemektedir. Çevirmeli ankraja çekme kuvveti uygulandığında, killi kumlu zemin tabakası, zemindeki kesme dayanımı mukavemeti azalması sonucu ve sürtünme direncinin azalması nedeniyle daha büyük yer değiştirmeler gözlemlenmiştir. Şekil 10.(b)'de görüldüğü gibi de maximum toplam gerilme değişimlerine

bakıldığında aynı derinlikte uygulanan  $P_{ult}$  değerine orantılı olarak maximum toplam gerilme artmıştır. Çekme kuvvetinin uygulama noktasına en yakın zemin katmanı (1.5 m) olan killi kum katmanında maksimum toplam gerilmenin önemli ölçüde yükseldiğini göstermektedir. Buna karşılık, 2.5 m siltli kum zemin katmanında ve düşük plastik kil zemin profilinde 3.25 m'de zemin katmanının maksimum toplam gerilim artışı nispeten azalmıştır. Aynı  $P_{ult}$  değeri altında derinlik arttıkça maksimum toplam gerilimin 1.5 m ile 2.5 m arasında yaklaşık %55, 2.5 m ile 3.25 m arasında ise %30 azaldığını göstermektedir (Kayalı Yük,2024).

ÇTA-II ankrajı için iki farklı derinlikte (1.5 m ve 2.5m) sahada bulunan  $P_{ult}$  değerleri (Tablo 2) çekme kuvveti girdi değeri şeklinde kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 11.(a)'da her bir derinliğe karşılık gelen  $P_{ult}$  değerleri dolayısıyla farklı  $(N_{60})_1$  zemin değerleri için ankrajı etrafındaki zemindeki maximum yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Şekil 11.(b)'de her bir derinliğe karşılık gelen  $P_{ult}$  değerleri dolayısıyla farklı  $(N_{60})_1$  zemin değerleri ve ankrajı etrafındaki zemindeki maximum toplam gerilmeler verilmiştir.



Şekil 11. ÇTA-II ankraj için farklı derinliklerde ve zeminlerde (a) maksimum yer değiştirme-  $P_{ult}$  ilişkisi ve (b) maksimum toplam gerilme-  $P_{ult}$  arasındaki ilişki

Şekil 11.(a) ve (b)'ye bakıldığında ÇTA-II ankrajının ÇTA-I ile benzer sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Killi kumlu zemin profilinde ÇTA-I ve ÇTA-II ankrajı karşılaştırıldığında daha büyük bir yüzey alanına ve açılı bir tasarıma sahip olan ÇTA-I ankrajı, ÇTA-II ankrajına kıyasla daha fazla zemin yer değiştirmesi ve daha yüksek toplam gerilme sayısal çıktı analizlerinde gözlemlenmiştir. ÇTA-I ankrajının daha geniş yüzey alanı, çekme direncini artırır ancak aynı zamanda kurulum sırasında daha fazla zemin örselenmesine neden olmuştur. Sayısal analizler sonucunda aynı derinlikte ve benzer çekme yüklerinde, ÇTA-I ankrajı etrafındaki zemin yer değiştirmesi ÇTA-II ankrajından yaklaşık olarak %35 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, her iki tip çevirmeli ankraj için de zemindeki toplam gerilme değişimi derinlik arttıkça yaklaşık %45 oranında azalmıştır (Kayalı Yük, 2024).

### 3.SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında ilk olarak iki farklı geometride tasarlanan çevirmeli ankrajlar (ÇTA-I ve ÇTA-II) üç farklı zemin tabakasına sürülmüş ve sahada çekme deney testi yapılarak nihai çekme dirençleri belirlenmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar analizleri ile saha testlerinden elde edilen ÇTA-I ve ÇTA-II ankrajlarının  $P_{ult}$  değerleri kullanılmış ve ankrajlar etrafında zemindeki toplam gerilme değişimleri ve yer değiştirmeler bulunmuştur.Saha ve sayısal analiz sonuçlarına göre:

- ÇTA-I ankrajının nihai çekme direnci benzer çevirmeli ankrajların yakın nihai çekme direnci sonuçları gözlemlenmiş fakat ÇTA-II ankraji ve diğer benzer çevirmeli tipteki ankrajlardan daha düz yüzeye sahip olmasından dolayı nihai çekme dirençleri farklılık göstermiştir.
- Derinlik arttıkça, ÇTA-I ankraji etrafındaki zemindeki maksimum yer değiştirmeler azalmıştır.1.5 m ile 2.5 m arasında yaklaşık %65, 2.5 m ile 3.25 m arasında %20 azalma gözlemlenmiştir. Aynı  $P_{ult}$  değeri altında, derinlik arttıkça maksimum toplam gerilmenin 1.5 m ile 2.5 m arasında yaklaşık %55, 2.5 m ile 3.25 m arasında ise %30 azaldığı tespit edilmiştir.
- Saha ve sayısal analizler sonucunda yer değiştirmeler yüzeye yakın kısımlarda daha fazla gözlemlenmiş ve derinlik arttıkça zemindeki yer değiştirmenin azaldığı gözlemlenmiştir. Toplam gerilme ise de derinlik arttıkça doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir.
- Daha büyük bir yüzey alanına sahip olan ÇTA-I, aynı zemin profillerinde ÇTA-II'ye kıyasla daha yüksek gerilmeler ve yer değiştirmeler gözlemlenmiştir. Aynı derinlik ve benzer çekme kuvvetlerinde, ÇTA-I ankraji etrafındaki zemin yer değiştirmesi, ÇTA-II ankrajından %35 daha fazla bulunmuştur.
- ÇTA-I ve ÇTA-II ankraji için genel olarak zemindeki toplam gerilme değişimi derinlik arttıkça yaklaşık %45 oranında azalmıştır.
- Sayısal analizin saha verileriyle bütünleştirilmesi, çevirmeli ankraj performansına ilişkin temel bilgiler sağlayarak geoteknik uygulamalar için tasarım ve kurulum teknikleri daha iyi anlaşılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Asfaw, N. T., G. Lei, M. Azizian, A. Poudel, L. Hoyos, and X. Yu. 2023. "Field Pullout Tests of Percussion-Driven Earth Anchors." *Applied Sciences* 13, no. 4: 2132. <https://doi.org/10.3390/app13042132>
- Jalali Moghadam, M., N. Dastaran, and A. Zad. 2021. "Introducing Expandable Mechanical Plate Anchors for Onshore and Offshore Anchoring." *Marine Georesources & Geotechnology* 40 (3): 329–48. <https://doi.org/10.1080/1064119x.2021.1894274>
- Kayalıyk, Yıllar M. "Physical and Numerical Investigation of Flip Anchors." Msc. Thesis, İzmir Institute of Technology, 2024.
- Platipus Civil Engineering & Construction Brochure." Quicksupplyco.com. Accessed June 1, 2024. <https://www.quicksupplyco.com/userdocs/products/platipus-civilengineering-construction-brochure-qsc.pdf>.
- Yoshida, S., and X. Xiong. 2023. "A Limit Equilibrium Method for Estimating Pull-out Resistance of Flip-type Ground Anchors in Sand Grounds." In *Smart Geotechnics for Smart Societies*, 1076–1080. <https://doi.org/10.1201/9781003299127-150>

## SEMBOL LİSTESİ

$P_{ult}$	Nihai çekme direnci
$(N_{60})_1$	Dzeltilmiş zemin penetrasyon direnci
ÇTA-I	Birinci numune çevirmeli ankraj
ÇTA-II	İkinci numune çevirmeli ankraj