



Killi Zeminler için Ankrajlı Duvar Analizlerinde Parametrik Bir Çalışma

A Parametric Study on Anchored Wall Analysis for Soils with Clay

Alperen Cevahir¹ , Banu Yağcı^{2*} 

¹Maksoy İnşaat Taah. San. Tic. Ltd. Şti., 34515, İstanbul, Türkiye

²Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

Öz

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, killi zeminler söz konusu olduğunda farklı nedenlerle öngörülemeyen belirsizliklerle karşılaşılabilir. Bu açıdan, killi zeminlerin doğru parametrelerle temsil edilebilmesi ve davranışı için uygun malzeme modellerinin belirlenmesi, kritik önem taşıyan bir konudur. Bu çalışmada, iri ve ince dane oranlarının birbirine yakın olduğu ve bu sebeple CL, ML, SC, SM sınıflarında dağılımın gözlemlendiği bir bölgeyi temsilen killi zeminler için çok sıra ankrajlı bir destek sistemi analiz edilmiştir. Sistemin deformasyonları farklı analiz yöntemlerini kullanan yazılımlar ile hesaplanmış ve bu deformasyonların hangi koşullarda karşılaştırılabilir olacağını açıklamaya yönelik parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Sistemin boyutlandırması Geo5 programı ile yapılmış ve zemin sınıfındaki farklılıkların etkisi karşılaştırılmıştır. Plaxis programı ile gerçekleştirilen deformasyon analizlerinde, zemin malzeme modelinin ve grafik model sınırlarının etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, kullanılan zemin malzeme modelinin sistemin gerçekçi davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Diğer yandan grafik model sınırlarının, zemin malzeme modeline göre farklı etki yaratabildiği ve analizlerimizde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon analizi, derin kazı destek sistemi, zemin malzeme modeli.

Abstract

In geotechnical engineering applications, unpredictable uncertainties may be encountered for clayey soils for different reasons. In this respect, representing clayey soils with correct parameters and determining appropriate material models for their behaviour is a critical issue. In this study, a multi-row anchored support system was analysed for clayey soils, representing a region where coarse and fine grain ratios are close to each other and therefore distribution in CL, ML, SC, SM classes is observed. The deformations of the system were calculated with software using different analysis methods and parametric analyses were performed to explain under what conditions these deformations would be comparable. Dimensioning of the system was done with the Geo5 program and the effects of differences in soil class were compared. In the deformation analyses performed using the Plaxis program, the effects of the soil material model and graphic model boundaries were investigated. Results showed that the soil material model used had a very significant effect on the realistic behaviour of the system. On the other hand, it was determined that the graphic model boundaries could create different effects compared to the soil material model and that this was an important issue to be considered in the analyses.

Keywords: Deformation analysis, deep excavation support system, soil material model

1. Giriş

Bu çalışmanın içeriği, çok sıra ankrajlı bir destek sistemi için killi zeminlere sahip bir bölgeyi temsilen gerçekleştirilen parametrik analizlerdir. Derin kazı problemlerinde, yetersiz

veri ile modelleme yapma zorunluluğunun bir sonucu olarak zemin parametrelerinin doğru bir şekilde temsil edilemesi sebebiyle parametrik çalışmalar yapılmaktadır (Vural ve Işık 2019, Şahin ve Tonaroğlu 2016, Kökten vd. 2018). Diğer yandan sayısal analizler için, zemin-yapı etkileşimini göz önüne alan farklı analiz yöntemlerinin ve yazılımların mevcut olması da parametrik çalışmaların bir diğer nedeni olarak düşünülebilir (Engin 2012). Bir başka gerekçe de farklı geoteknik uygulamalarda farklı parametrelerin önem kazanmasının beklenmesidir (Kökten vd. 2018, Aslan ve Yağcı 2018a, Aslan ve Yağcı 2018b).

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: byagci@balikesir.edu.tr

Alperen Cevahir  orcid.org/0000-0003-1423-4214

Banu Yağcı  orcid.org/0000-0002-3261-2680



Derin kazı tasarımlarında, emniyet ve ekonominin optimum seviyede kullanılması; uygun sistem seçimi ile seçilen sistemin ve özellikle zemin koşullarının gerçeğe yakın şekilde modellenmesi sonucu mümkün olmaktadır (Alam et al. 2020). Bu durumda derin kazı analizlerinde zemin parametrelerinin ve malzeme modellerinin seçimi kritik önem taşımaktadır (Kökten vd. 2018, Aslan ve Yağcı 2018a, Aktaş vd. 2018). Projelendirmede göz önüne alınan parametrelerin sınırlı sayıda zemin araştırmalarına dayandırılması sonucu öngörülme belirsizlikler ile karşılaşılabilir. Özellikle killi zeminlerin yol açtığı sorunlara geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıkça rastlanmaktadır (Mollamahmutoğlu vd. 2021). Diğer yandan zemin araştırmalarının yeterli olduğu durumlarda dahi, killi zeminlerin sınıflandırılması aşamasında, kıvam limitleri için örnek hazırlama yöntemi ile likit limit deney yönteminden kaynaklanan farkların USCS'e göre belirlenen zemin sınıflarının değişmesine yol açabileceği saptanmıştır (Özer 2008, Orhan vd. 2006).

Derin kazılarda ankraj kullanımının özellikle 5 m derinlikten sonra önem kazandığı bilinmektedir ve çoğunluğu killi, siltli zeminlerin (CL-ML-SM-CH) oluşturduğu kesitler üzerinde gerçekleştirilen parametrik bir çalışma ile de ortaya konmuştur (Fenerci 2010). Aynı zamanda kil zeminlerde derin kazılarla ilgili çok sayıda vaka analizi datasına dayalı ampirik bir çalışmanın (Moormann 2004) sonuçları, çok sıra ankrajlı ve içten destekli duvarlar arasında duvar yanıl deplasmanı açısından çok fark olmadığını göstermektedir. Bu doğrultuda zemin malzeme modeli için literatür taramasında, çok sıra ankrajlı sistemler ve içten destekli sistemler birlikte göz önüne alınabilir.

Kil zeminin etkin gerilme-deformasyon davranışını simüle etmek için çok sayıda zemin modeli geliştirilmiştir. Bu modeller, klasik ancak basit olması nedeniyle geoteknik mühendisliği uygulamalarında halen yaygın olarak kullanılan Mohr-Coulomb (MC) modeli ile başlamış ve rijitlik anizotropisini dikkate alan, ileri düzeydeki laboratuvar testlerinden türetilen çok sayıda girdi zemin parametresine sahip sofistike zemin modellerine kadar devam etmiştir (Lim and Ou 2017). Ankrajlı sistemlerde kil zeminlerin MC malzeme modeli ile temsil edildiği bazı vaka analizlerinde, duvar hareketlerinde ölçülen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu ve MC zemin modeli kullanımının tatmin edici olabileceği belirtilmiştir (Muntohar and Liao 2013, Bai et al. 2019). Benzer koşullarda MC zemin modeli varsayımıyla çözülen bir proje de ise aletsel gözlem ile elde edilen deplasman değerlerinin analiz sonuçlarından daha az mertebelerde gerçekleştiği gözlenmiştir (Nalçakan vd 2016). Diğer

yandan bir başka ankrajlı derin kazı çalışmasının sonuçları, MC modelin mevcut sahadaki zemin davranışını simüle etmekte yetersiz kalabileceği şeklinde yorumlanmıştır (Hayta 2005). MC modelden farklı olarak gerilme bağımlı rijitlik modelinin hesaplandığı ve boşaltma rijitliğinin göz önüne alındığı Pekleşen Zemin (Hardening Soil-HS) modeli kullanılan vakalarda, killi zeminler için ankrajlı destek sistemi analiz sonuçları ölçülen sonuçlarla karşılaştırılmış ve yanıl yer değiştirme eğrilerinin hem eğilim hem de değer olarak büyük ölçüde aynı olduğu gözlemlenmiştir (Li et al. 2022, Nossan et al. 2009, Tan et al. 2001). Bununla birlikte HS modeli kullanan bir başka vakada, ölçülen yer değiştirmelerin tasarımıdaki tahminlerin 2 katı kadar olduğu ve literatürdeki üst limitlere yaklaştığı belirtilmiştir (Ünver and Ünver 2022).

Killi zeminler için her iki modelin de (MC ve HS) kullanıldığı ve karşılaştırıldığı çok sıra ankrajlı derin kazı çalışmalarının bir kısmında, deformasyon analizleri, yatay yöndeki maksimum deplasmanların ve derinlik boyunca deplasman davranışlarının yakın olduğunu ve inklinometrik deplasman değerleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir (Kökten vd. 2018, Şen 2021). Diğer bir çalışmada ise, HS zemin modelinde kazı alanına doğru gelişen yatay deplasmanların, MC modeline nazaran daha iyi sonuçlar verdiği yani inklinometrik grafik ile farkların daha az olduğu ve MC modelin aksine inklinometre okumalarına kıyasla daha güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir (Bahadır ve Onur 2017). MC model ile yapılan analizlerin, gerçek deplasman eğrilerinden oldukça farklı sonuçlar verdiği, diğer ileri modeller ile kıyaslamaların yapıldığı bir başka çalışmada da görülmüştür (Aktaş vd. 2018). Diğer yandan belirli koşullar altında MC modelin HS model kadar mantıklı sonuçlar verebileceği yorumunu sunan bir çalışma da mevcuttur (Lim and Ou 2017). Bu çalışmanın sonuçları elastisite modülünün önemine yoğunlaşmaktadır. Benzer şekilde sert killer için HS model kullanılmasını öneren Aktaş vd. 2018 çalışması, deplasmanların gerçeğe yakın olarak tahmininin ancak analizlerde gerçekçi deformasyon modülü değerlerinin kullanılması ile mümkün olduğunu belirtmektedir. Bu konuda bir diğer örnek laboratuvar deneyi sonuçlarından yararlanılarak elde edilen parametrelerle modellenen zemin kesitinde, her iki malzeme modeli (HS ve MC) için de deplasman değerlerinin oldukça yüksek olduğudur (Kökten vd. 2018). Bu açıdan bakıldığında parametre seçimi, arazi ve laboratuvar test sonuçları kullanılarak doğru tahmin edilememiş olabilir. Benzer şekilde aşırı yatay deplasman yapmış ankrajlı bir iksa sistemi vakasında, inklinometre ölçümleri ile HS zemin modeli kabulü

ile gerçekleştirilmiş analiz sonuçları karşılaştırılmış ve laboratuvar deneylerinde belirlenmemiş olan aşırı konsolidasyon oranının deplasmanları büyük ölçüde etkilediği tespit edilmiştir (Vural ve Işık 2019). Bu gibi aşırı deformasyon vakalarında, gözlenen yatay duvar deformasyonuna dayalı olarak geri analizler ile kil zemin parametrelerinin optimize edildiği çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Ünver and Ünver 2022, Levasseur et al. 2010, Ma'ruf and Darianto 2017, Kim and Finno 2020). Bir başka yaklaşım HS model için kil zemin parametrelerinin kalibrasyonunda tam ölçekli deneylerin kullanımı olarak da gözlenmektedir (Voottipruex et al. 2019).

Kil zeminlerin deformasyon davranışının doğru olarak tahmin edilmesinde, zemin parametrelerinin tahmini ve zemin davranış modellerinin seçimi kadar önemli olabilecek bir diğer kriter de grafik model sınırları olabilir. Yanal destekli derin kazılarda killi zeminlerin MC dışındaki ileri zemin modelleri ile temsil edilmiş olduğu parametrik bir çalışmada, zemin modellerinin deformasyonlar üzerindeki etkisinin sınır koşulları ile de ilgili olduğu belirlenmiştir (Harahap and Ou 2020). Bir başka çalışmada, zemin deformasyonu açısından öngörülenler ile gerçekte gerçekleşenler arasındaki farklar istatistiksel olarak derlenmiş ve 15 adet derin kazı inşaatına ait toplam 152 adet kesit, literatür çalışmalarıyla birlikte incelemiştir (Yıldız ve Berilgen 2017). Çalışma kapsamında sayısal analizlerden elde edilen yer değiştirmeler sahada ölçülenler ile kıyaslanmış ve buna göre jeolojik ortamın zemin olması durumunda, projelerin yaklaşık olarak %28 inde ölçülen ve analiz edilen yatay yer değiştirme değerlerinin birbirine çok yakın ya da eşit değerler aldığı, %60'ında ölçülen yanal yer değiştirme değerlerinin tasarımında tahmin edilenden daha küçük olduğu, geriye kalan yaklaşık %12'sinde ise ölçülen yatay yer değiştirme değerlerinin analizden elde edilenlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler, zemin sınıflarının CL/SC ve ML/SM sınırlarında olduğu, diğer bir ifade ile iri ve ince dane oranlarının yaklaşık olarak %50 civarında birbirine yakın olduğu bir zemin profilini göz önüne almaktadır. Çalışmanın ilk aşamasını Geo5 programı ile analizler oluşturmaktadır. En olumsuz koşulu temsilen CL sınıfı zemin için boyutlandırma yapılmış ve devamında zemin sınıfındaki olası değişimin etkisi gözlenmiştir. Killi zeminlerin, sınıflandırılması ve dolayısıyla zemin parametrelerinin seçimi açısından oldukça hassas oluşu göz önüne alındığında, çalışılan bölge için bu gözlem önemli olmaktadır. Çalışmanın ikinci aşamasında Plaxis programı ile deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada farklı analiz yöntemlerine sahip iki ayrı yazılım ile elde edilen deformas-

yonların hangi koşullarda karşılaştırılabilir olabileceğini anlamaya yönelik parametrik bir çalışma oluşturulmuştur. Bu amaçla MC ve HS zemin davranış modelleri kullanılmış ve bu modeller ile farklı grafik model sınırlarında sistemin analizi gerçekleştirilmiştir. Plaxis analizlerinde kullanılan zemin davranış modelinin sistemin davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiş olmakla birlikte grafik model sınırlarının, zemin malzeme modeline göre farklı etki yaratabildiği ve analizlerimizde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu belirlenmiştir.

2. Geo5 Programı ile Analizler

Geo5 programı çalışma prensibi limit denge analizlerine dayanmakta olup, yüzeysel temeller, derin temeller, zemin çivili şevler, MSE duvarlar, zemin ankrajlı perde duvarlar gibi birçok geoteknik problemin çözümünde kullanılan bir yazılımdır. Geo5 analizlerinin ilk aşamasında, "perde tasarımı" ve "perde kontrolü" bileşenleri kullanılarak, kazı derinliği 9 metre olan çok sıra ankrajlı diyafram duvar boyutlandırılmıştır. "Perde tasarımı" bileşeni ile limit denge analizlerine dayalı ankraj kuvvetleri ve duvar gömülme derinliği hesaplanarak şev stabilite analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde güvenlik katsayısı tahkik yöntemi kullanılmıştır. Ankrajlı diyafram duvar, orta katı kıvamındaki düşük plastisiteli kil (CL) tanımlı zemin için uygulanmıştır. Çalışma için seçilen zemin sınıfında, çok sayıda arazi ve laboratuvar deneylerine dayalı olarak modellenmiş zemin profilinden esinlenilmiştir. Söz konusu profilde zemin, CL, ML, SM, SC sınıflarında bir dağılım göstermektedir. Bu dağılımda en olumsuz koşulu temsilen analizler için CL sınıfı zemin seçilmiş ve malzeme parametreleri Geo5 veri tabanından efektif parametreler olarak belirlenmiştir (Çizelge 1). Analizlerde drenajlı koşullarda efektif parametrelerin tercih edilmesinin temel nedeni, duvarın gömülme derinliğinin belirlenmesinde güvenli tarafta kalmak açısından daha kritik bir rol oynamasıdır.

Yeraltı su seviyesi yüzeyden 2.5 metre derinliğindedir. Yüzeyde trafik yükü olarak, 20 kN/m^2 büyüklüğünde ve 9 m uzunluğunda sürşarj yükü varsayılmıştır. $H=9 \text{ m}$ kazı derinliği için 50 cm kalınlığında duvar ve 3 adet ankraj belirlenmiştir. Ankrajlar için seçilen uygulama derinlikleri, açıları, kök boyları ve yatay aralıkları ile hesaplanan ankraj serbest boyları Çizelge 2' de gösterilmiştir (Cevahir 2022).

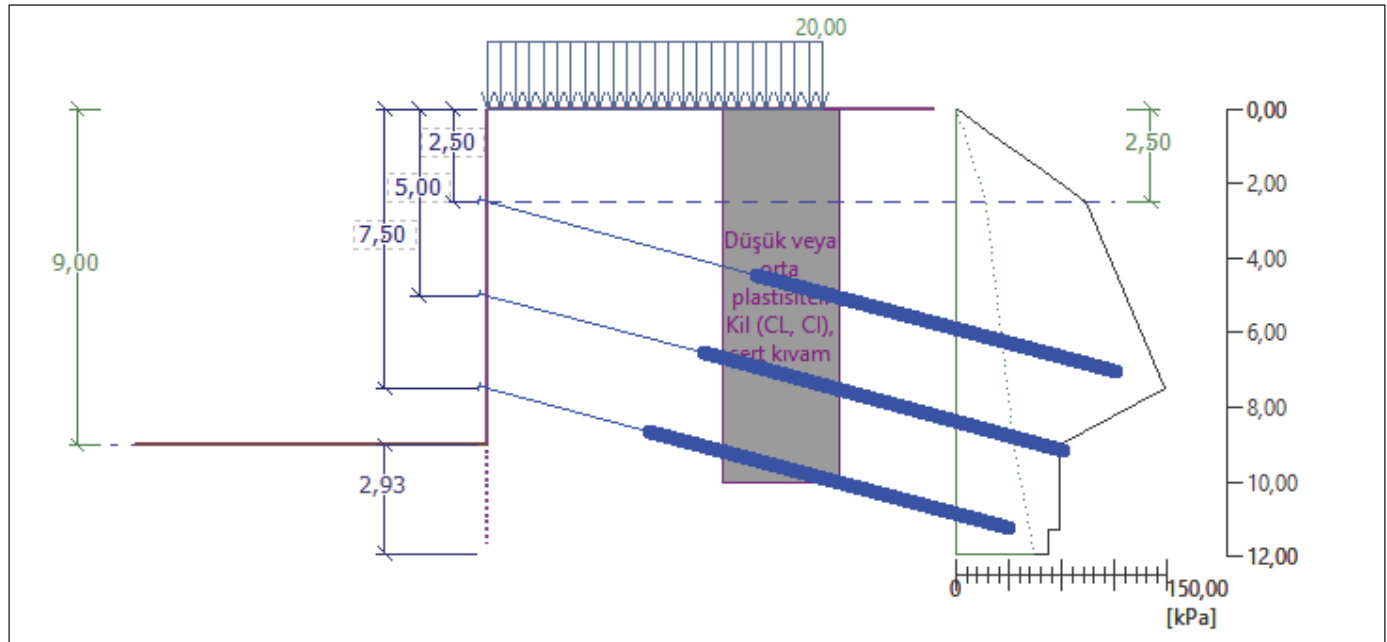
Duvarın geometrisi ve seçilen kriterler doğrultusunda hesaplanan yanal basınç dağılımı Şekil 1'de görüldüğü gibidir. Ön boyutlar ile gerçekleştirilen analiz sonucunda, gömülme derinliği $D=9.46 \text{ m}$ hesaplanmış ve ankraj kuvvetleri Şekil 2'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Bu geometride şev sta-

Çizelge 1. Geo5 “perde tasarımı” programında zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değerler	Birim
Zemin sınıfı	CL	-	-
Kohezyon	c'	12	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	°
Zemin-duvar sürtünme açısı	δ	12	°
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_{\text{sat}}$	21	kN/m ³
Poisson oranı	ν'	0.4	-

Çizelge 2. Geo5 “perde tasarımı” programında ankraj parametreleri.

Parametreler	1.Ankraj	2.Ankraj	3.Ankraj
Uygulama Derinliği (m)	2.5	5	7.5
Açı °	15	15	15
Serbest boy (m)	7.5	6	4.5
Kök boyu (m)	10	10	10
Yatay aralık (m)	1.3	1.3	1.3

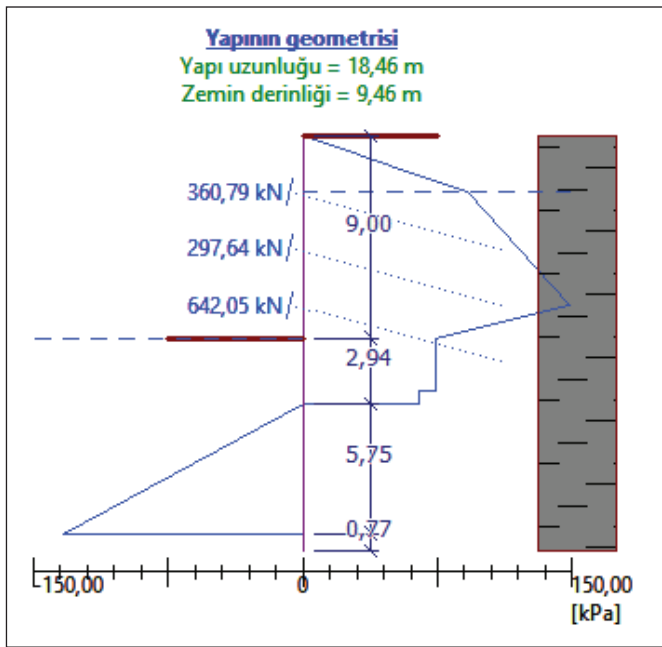
**Şekil 1.** Geo5 “perde tasarımı” programında geometri ve yanal zemin basınç dağılımı.

bilitesi, Bishop yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve güvenlik sayısı $FS=1.38 < 1.50$ değeri ile stabilitenin yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda 9.46 m olarak hesaplanmış olan gömülme derinliği 11 metre varsayılarak şev stabilitesi tekrarlanmış ve güvenlik sayısında $FS=1.51 > 1.50$ değeri ile yeterlilik sağlandığından toplam yapı uzunluğu $H=20$ m olarak belirlenmiştir.

Boyutlandırılan destek sistemi “perde kontrolü” bileşeninde aşamalı inşaat yaklaşımı ile tahkikler doğrultusunda düzenlenmiştir. Bu aşamada zemin parametrelerine ek olarak “elastisite modülü” ve “yapısal dayanım katsayısı” eklenmiştir (Çizelge 3). Yatak katsayısı için “otomatik iterasyon” kabulü yapılmıştır. Bu kabul, seçilen zemin yatak katsayısı yönteminin duvarın maksimum yatay deplasmanını önemli oranda

Çizelge 3. Geo5 “perde kontrolü” programında zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değerler	Birim
Zemin sınıfı	CL	-	-
Kohezyon	c'	12	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	°
Zemin-duvar sürtünme açısı	δ	12	°
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_{\text{sat}}$	21	kN/m ³
Poisson oranı	ν'	0.4	-
Elastisite Modülü	E	4.5	MPa
Yapısal Dayanım Katsayısı	-	0.1	-

**Şekil 2.** Geo5 “perde tasarımı” programında duvar gömülme derinliği ve ankraj kuvvetleri.

değiştirebildiğini göstermiş olan parametrik bir çalışmanın sonuçlarına dayanmaktadır (Aslan ve Yağcı 2018b). Geo5 veri tabanından seçilmiş olan önerilmiş donatı tipindeki 26.5 mm çaplı “DYWIDAG S950/1050 D26.5” model ankrajın çekme dayanımı 578 kN dur. Zemin türüne ve enjeksiyonun uygulanma şekline göre ankraj kök bölgesinin nihai aderans gerilme değerleri değişkenlik göstermektedir. Kök bölgesinin çapı 150 mm seçilmiş ve ankraj kökü boyunca zemin ile harç ara yüzeyindeki ortalama nihai aderans gerilme değeri 130 kPa tanımlanmıştır (Sabatini et al. 1999).

“Perde kontrolü” programında analizler sırayla şu inşaat aşamalarını kapsar şekilde gerçekleştirilmiştir; 3 m derinliğinde kazı, 2.5 m seviyesinde 1. ankrajın uygulanması, kazı derin-

liğinin 6 m ye indirilmesi, 5 m seviyesinde 2. ankrajın uygulanması, 9 m’lik kazı derinliğine inilmesi ve 7.5 m seviyesinde 3. ankrajın uygulanması. Yüzeyden 2.5 m derinliğinde olan yeraltı su seviyesi, her bir kazı aşamasında kazı derinliği kadar indirilmiştir. Tüm inşaat aşamaları için duvar deplasmanları hesaplanmış ve güvenlik katsayısı yaklaşımı ile içsel stabilite, şev stabilitesi ve ankraj doğrulama tahkikleri yürütülmüştür. Ankrajlı diyafram duvar uygulaması sahada da aşamalı olarak inşa edildiğinden her bir aşama kendi içerisinde tüm tahkikleri sağlamalıdır. Analizlerin ikinci inşaat aşamasında, ankraj köklerinin zeminden sıyrılma direnci yetersiz kalmış ve bu doğrultuda kök boyu 12 m ye çıkarılarak stabilite sağlanmıştır. Diğer yandan üçüncü inşaat aşamasından itibaren “perde tasarımı” programında belirlenmiş olan donatı serbest boyları için içsel stabilite sağlanamadığından kademeli olarak serbest boylar arttırılmıştır. Son inşaat aşamasında ise ankraj doğrulama tahkikleri yetersiz kalmıştır. Bu sebeple donatı çapı 36 mm olarak seçilerek çekme dayanımını 1057 kN olacak şekilde arttırılmış ve zeminden sıyrılma direncinin karşılanması amacıyla da kök bölgesinin çapı 200 mm olarak belirlenmiştir (Çizelge 4). “Perde kontrolü” programında duvarın maksimum yatay deformasyonu $u_{x-\text{maks.}} = 33$ mm elde edilmiştir (Şekil 3). Tüm tahkiklerin yeterli olduğunu gösteren sonuçlar, Çizelge 5 ve Çizelge 6’ da içsel stabilite ve taşıma kapasitesi doğrulamaları cinsinden gösterilmiştir. Şev stabilitesi için güvenlik katsayısı $FS=1.66$ elde edilmiştir.

Geo5 analizlerinin ikinci aşamasında, ankrajların sayısı, uygulama derinlikleri, açıları ve yatay aralıkları sabit tutulmuş ve zemin sınıfı değiştirilerek, orta katı-ML sınıfı, orta sıkı-SC sınıfı ve orta sıkı-SM sınıfı zeminler (Çizelge 7) için destek sisteminin boyutları stabilite tahkikleri ile düzenlenmiştir. Zemin sınıfı değişimine karşılık “perde tasarımı” programında, duvar gömülme derinliklerinde toplamda 3 m’lik bir fark olduğu ve ankraj kuvvetlerinin beklenildiği

Çizelge 4. Geo5 “perde kontrolü” programında ankraj parametreleri.

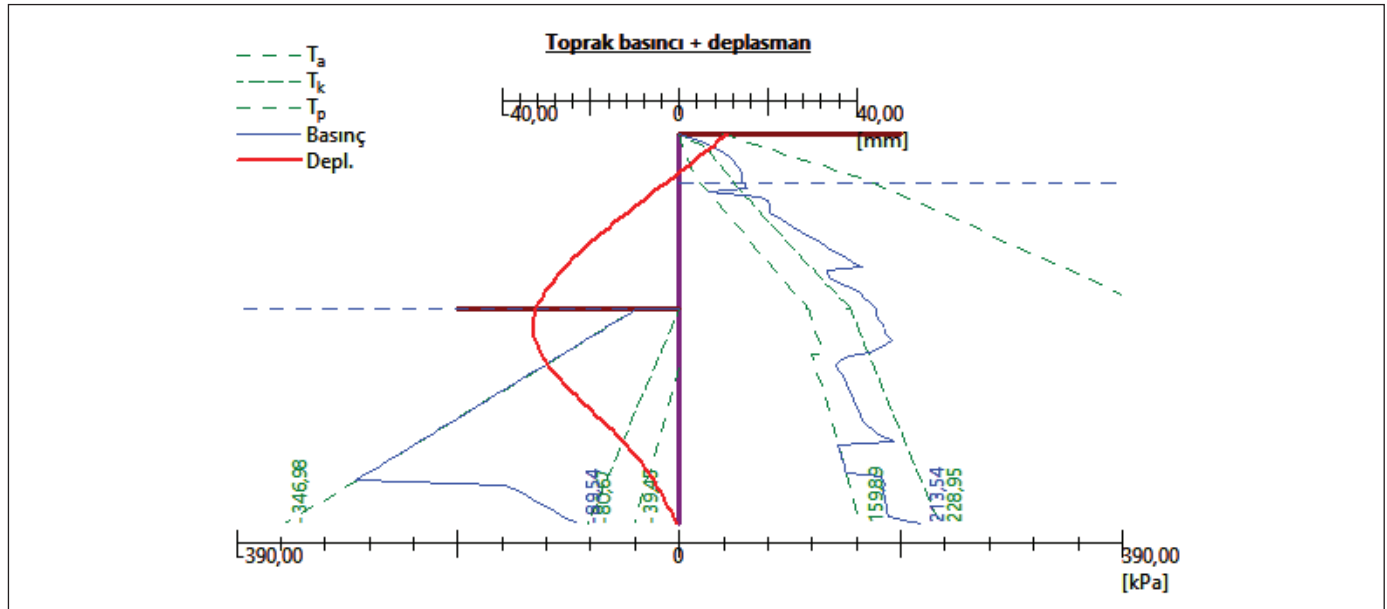
Parametreler	1. Ankraj	2. Ankraj	3. Ankraj
Uygulama Derinliği (m)	2.5	5	7.5
Açı °	15	15	15
Serbest boy (m)	16	15	14
Kök boyu (m)	12	12	12
Yatay aralık (m)	1.3	1.3	1.3
Donatı çapı (mm)	36	36	36
Kök bölgesinin çapı (mm)	200	200	200

Çizelge 5. Geo5 “perde kontrolü” programında ankrajların içsel stabilitesi.

No	Ankraj kuvveti (kN)	Maksimum izin verilen ankraj kuvveti (kN)	Güvenlik katsayısı
1	361.00	734.67	2.04
2	298.00	888.93	2.98
3	643.00	1062.89	1.65

Çizelge 6. Geo5 “perde kontrolü” programında ankraj taşıma kapasiteleri.

No	Maksimum kuvvet (kN)	Ankraj dayanımı (kN)	Sıyırılma direnci (zemin) (kN)	Sıyırılma direnci (enjeksiyon) (kN)	Kullanım (%)
1	361.00	704.67	653.45	1027.30	55.25
2	298.00	704.67	653.45	1027.30	45.60
3	643.00	704.67	653.45	1027.30	98.40

**Şekil 3.** Geo5 “perde kontrolü” programında yanal basınçlar ve duvarın deformasyonu.

Çizelge 7. Geo5 programında farklı sınıfların zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	CL	ML	SC	SM	Birim
Kohezyon	c'	12	12	8	5	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	21	27	29	°
Zemin-duvar sürtünme açısı	δ	12	14	18	20	°
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	20	18.5	18	kN/m ³
Poisson oranı	ν'	0.4	0.4	0.35	0.3	-
Elastisite Modülü	E	4.5	4	8	10	MPa
Yapısal Dayanım Katsayısı	-	0.1	0.2	0.3	0.3	-

Çizelge 8. Geo5 “perde tasarımı” programında farklı zemin sınıflarının analiz sonuçları.

	CL	ML	SC	SM
Duvar Gömülme derinliği (m)	11	10	8	8
1. ankraj kuvveti (kN)	360	295	213	207
2. ankraj kuvveti (kN)	297	259	222	214
3. ankraj kuvveti (kN)	642	565	436	433

Çizelge 9. Geo5 “perde kontrolü” programında farklı zemin sınıflarının analiz sonuçları.

		CL	ML	SC	SM
Boyutlar	Ankraj kök boyu (m)	12	12	10	10
	1. ankraj serbest boyu (m)	16	14	11	11
	2. ankraj serbest boyu (m)	15	13	10	10
	3. ankraj serbest boyu (m)	14	12	9	9
	Ankraj kök bölgesi çapı (mm)	200	200	150	150
	Ankraj donatısı çapı (mm)	36	36	32	32
Tahkikler	Duvarın maksimum yatay deplasmanı (mm)	33	22	12	13
	3. ankraj-içsel stabilite doğrulaması-GS	1.65	1.72	1.70	1.76
	3. ankraj-taşıma kapasitesi kullanım yüzdesi	0.98	0.87	0.82	0.81
	Şev Stabilitesi-GS	1.66	1.66	1.63	1.62

gibi zemin rijitliklerinin artışı doğrultusunda azaldığı gözlenmiştir (Çizelge 8).

“Perde kontrolü” programında farklı zemin sınıfları için değişen rijitlikler ile ankraj kök boylarında toplamda 2 m ve ankraj serbest boylarında ise toplamda 5 m fark olduğu söylenebilir (Çizelge 9). Benzer şekilde ankraj kök bölgesi çapı ve ankraj donatı çapında da stabilitelerin sağlanması için gerekli boyutlarda değişim gözlenmektedir. Her bir zemin sınıfı için belirlenen boyutlarda, duvar deplasmanları beklenildiği gibi artan zemin rijitlikleri ile azalmıştır. Ankrajların içsel stabilite doğrulamaları ve ankraj taşıma kapasitesi kullanım yüzdeleri için kritik olan 3 numaralı ankraj dikkate

alınmıştır. Artan zemin rijitliği ile azalan boyutlar için, içsel stabilite güvenlik sayılarında artış ve ankraj taşıma kapasitesi kullanım yüzdelерinde ve duvarın maksimum yanal deplasmanında düşüş belirlenmiştir. Ancak şev stabilitesi güvenlik sayılarında zemin rijitliği ile ters orantılı bir düşüş gözlenmektedir. Bu durum kohezyonu yüksek olan zemin sınıflarında şev stabilitesinin daha yüksek olduğu şeklinde gözlenmiştir.

CL ve SC sınıfı zeminler kendi arasında karşılaştırıldığında; gömülme derinliklerinde 3 m ve ankrajlara gelen kuvvetlerde %25-%40 arasında değişen oranlarda fark görülebilir. Ayrıca stabilitelerin sağlanmasında, ankraj serbest boyların-

da 5 m, kök boyunda 2 m, kök bölgesi çapında 50 mm ve ankraj donatı çapında 4 mm'lik farklar mevcuttur. ML ve SM zemin sınıfları için; gömülme derinliklerinde 2 m ve ankrajlara gelen kuvvetlerde %18-%30 oranlarında farktan söz edilebilir. Ankraj serbest boylarında 3 m, kök boyunda 2 m, kök bölgesi çapında 50 mm ve ankraj donatı çapında 4 mm'lik fark stabilitenin sağlanması için gerekli olmuştur.

3. Plaxis Programı ile Analizler

Plaxis 2D, geoteknik mühendisliği problemlerinin sayısal analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Program geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında ihtiyaç duyulan şekil değiştirme ve stabilize analizlerini gerçekleştirebilecek şekilde geliştirilmiştir. Plaxis analizlerinin ilk aşamasında, Geo5 programı ile CL sınıfı zemin profili için boyutlandırılmış olan sistemin deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Orta plastisiteli CL sınıfı, homojen tek bir zemin tabakasının, MC malzeme modeli ile temsil edildiği bu analiz A-1MC olarak tanımlanmıştır. Plaxis ile analiz edilmek istenilen bir problemin ilk olarak sayısal modelini oluşturmak gerekmektedir. Sayısal model, genellikle yarı sonsuz olan çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmış durumunu ifade etmektedir. Sayısal modeli elde etmek için noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan bir grafik model oluşturulmaktadır. Sayısal model, farklı zemin tabakalarını, yapısal elemanları, inşa aşamalarını ve ortamdaki tüm yükleri ve sınır koşullarını kapsamaktadır. Yarı sonsuz problemlerde modelin sınırları sonuçları etkilemeyecek boyutlarda seçilmelidir. A-1MC analizi için grafik modelin sınırları, B=80 m kazı genişliği varsayımı ile hesaplanmıştır. Yatay uzaklık, duvar arkasında kazı genişliğinin minimum 2-3 katı kadar bir mesafe olması gerektiği kabulü ile $x_{max}=320$ m, düşey derinlik kazı tabanından itibaren kazı ge-

nişliğinin minimum 2-3 katı kadar bir mesafe olması gerektiği kabulü ile $y_{min}=-260$ m belirlenmiştir (Berilgen 2011). Plaxis analizi için gerekli olan zemin parametreleri Çizelge 10 ile sunulmuştur.

Plaxis programında, diyafram duvar malzeme özellikleri Çizelge 11'de, ankraj serbest boyu ve kök bölgesi için tanımlanan malzeme özellikleri ise Çizelge 12 ve Çizelge 13'te gösterilmiştir. Ankraj kökünde kullanılacak harcın elastisite modülü $E=10000$ MPa varsayılmıştır. Ankraj kök çevresi direnci, 0.13 MPa seçilmiş (Sabatini et al. 1999) ve bu değer kök çevresi ile çarpılarak, birim uzunluğa gelen kuvvet cinsinden 80 kN/m olarak hesaplanmıştır. Ankrajlı duvar sisteminin grafik modeli Şekil 4'te gösterilmiştir. Modelde sonlu elemanlar ağı, orta büyüklükte üçgen elemanlar seçilerek oluşturulmuştur. Her bir inşaat aşamasındaki kazı ve ankraj uygulama derinlikleri Geo5 programında uygulanan değerlerdir. Her kazı aşamasında, yeraltı su seviyesi kazı derinliği kadar düşürülmüştür.

A-1MC için plaxis analizinin sonucu duvardaki yatay deplasmanın maksimum değeri $u_{x-maxs}=424$ mm elde edilmiştir. Bu değer, Geo5 programında hesaplanan maksimum yatay deplasman değeri olan $u_{x-maxs}=33$ mm ile karşılaştırıldığında hem sayısal olarak hem de maksimum deplasmanın yeri açısından büyük farklar olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Geo5 programında belirlenen maksimum yatay deplasman değeri izin verilebilir bir aralıkta kalırken, Plaxis programında belirlenen değer, izin verilebilir sınırlarda değildir. Ankrajlı duvarlar için maksimum yanal duvar hareketlerinin, kazı derinliğine (H) kıyasla yaklaşık %0.2 H ile %0.5 H arasında kabul edilebilir seviyelerde olduğu düşünüldüğünde (Sabatini et al. 1999), H=9 m kazı derinliği için izin verilen maksimum yanal hareket miktarı $0.05H=45$ mm

Çizelge 10. Plaxis A-1MC analizi için zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değerler	Birim
Zemin sınıfı	CL	-	-
Malzeme modeli	Mohr-Coulomb	-	-
Drenaj tipi	Drenajlı		
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat}=\gamma_{sat}$	21	kN/m ³
Elastisite modülü	E'	4500	kN/m ²
Poisson oranı	ν'	0.4	-
Kohezyon	c'	12	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	°
Dilatasyon açısı	ψ	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R_{inter}	0.65	-

Çizelge 11. Plaxis analizde diyafram duvar malzeme özellikleri.

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Zımbalamanın önlenmesi	-	Evet	-
Normal rijitlik	EA	15×10^6	kN/m
Eğilme rijitliği	EI	312×10^3	kNm ² /m
Ağırlık	w	2	kN/m ³
Poisson oranı	ν'	0.15	-

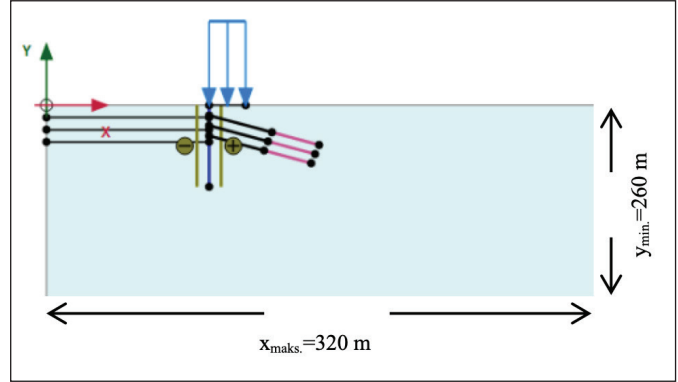
Çizelge 12. Plaxis analizde ankraj serbest boyunun malzeme özellikleri.

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Normal rijitlik	EA	203.5×10^5	kN
Ankrajlar arası yatay mesafe	L_s	1.3	m

Çizelge 13. Plaxis analizde ankraj kökünün malzeme özellikleri.

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Elastisite modülü	E	10.10^6	kN/m ²
Birim ağırlık	γ	0	kN/m ³
Kiriş tipi	-	Ön tanımlı	-
Ön tanımlı kiriş tipi	-	Masif dairesel kiriş	-
Çap	D	0.2	m
Yatay mesafe	L_s	1.3	m
Eksenel çevre direnci	T_s	80	kN/m
	T_e	80	kN/m
Yanal çevre direnci	-	Sınırsız	-
Uç direnci	F_{max}	0	kN
Ara yüzey rijitlik faktörü	-	Varsayılan değer	-

olmaktadır. Plaxis analizinde, seçilen grafik model sınırları için homojen tek tabakalı zemin varsayımı sonucu derinlik artışı ile rijitlik artışı göz önüne alınamamış ve MC malzeme modeli yetersiz kalmıştır. Bu açıdan analiz sonuçlarının gerçekçilikten uzaklaştığı söylenebilir.

**Şekil 4.** Plaxis analizde ankrajlı duvarın grafik modeli.

Çalışmanın ikinci aşamasında Plaxis analizlerinin daha gerçekçi olabilmesi ve Geo5 sonuçları ile karşılaştırılabilir olması amacıyla tabakalı zemin kabulü yapılmış ve bu analiz A-3MC olarak adlandırılmıştır. Geo5 programında, geometrinin duvar yüksekliği olan 20 m ile sınırlı oluşu göz önüne alınarak, A-3MC analizinde “orta katı” kıvamındaki CL sınıfı zeminin 20 m kalınlıkta olduğu kabul edilmiştir. Bu derinlikten sonra kıvamın “çok katı” olduğu ve 120 m derinlikte “anakaya” olduğu varsayımı yapılmıştır (Çizelge 14). Bu varsayım, çalışmamızda göz önüne alınan inceleme alanına ait modellenmiş olan zemin profili ile uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir (Cevahir 2022). A-3MC analizinin sonucu, duvardaki maksimum yatay deplasman, $u_{x-maks,=}$ 227 mm elde edilmiştir. A-1MC analizi ile kıyaslandığında, maksimum yatay deplasmanda %47 oranında azalma görülmüştür. Fakat yine de duvar deplasmanı izin verilebilir sınırlar içinde değildir.

Üçüncü aşamada, orta plastisiteli CL sınıfı homojen tek zemin tabakasının, HS malzeme modeli ile temsil edildiği A-1HS analizi gerçekleştirilmiştir. HS model, drenajlı üç eksenli basınç deneyinde gözlenen eksenel deformasyon-deviatorik gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklinde olması esasına dayanır. Modelde kullanılan ek temel parametreler, üç eksenli sekant rijitlik modülü, ödometre tanjant rijitlik modülü, boşaltma/yüklemeye rijitlik modülü ve gerilme bağımlı rijitlik üssel değeridir (Çizelge 15). Çeşitli zemin türleri için varsayılan ortalama değerler =3 ve = olarak önerilmektedir (Brinkgereve et al. 2020). A-1HS analizinin sonucu, maksimum duvar yatay deplasmanı $u_{x-maks,=}$ 97 mm elde edilmiştir. Duvar maksimum yatay deplasmanında, A-1MC analiz sonuçlarına kıyasla %77 oranında azalma görülmüştür. Fakat yine de duvar deplasmanı izin verilebilir sınırlar içinde kalmamaktadır.

Çizelge 14. Plaxis A-3MC analizi için zemin parametreleri.

Özellikler	Sembol	CL	CL	Ana kaya	Birim
Malzeme modeli	MC	√	√	√	-
Drenaj tipi	Drenajlı	√	√	√	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	21	21	kN/m ³
Elastisite modülü	E'	4500	12500	100000	kN/m ²
Poisson oranı	ν'	0.4	0.4	0.4	-
Kohezyon	c'	12	24	24	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	19	19	°
Dilatasyon açısı	Ψ	0	0	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R _{inter}	0.65	0.65	0.65	-

Çizelge 15. Plaxis A-1HS analizi için zemin parametreleri.

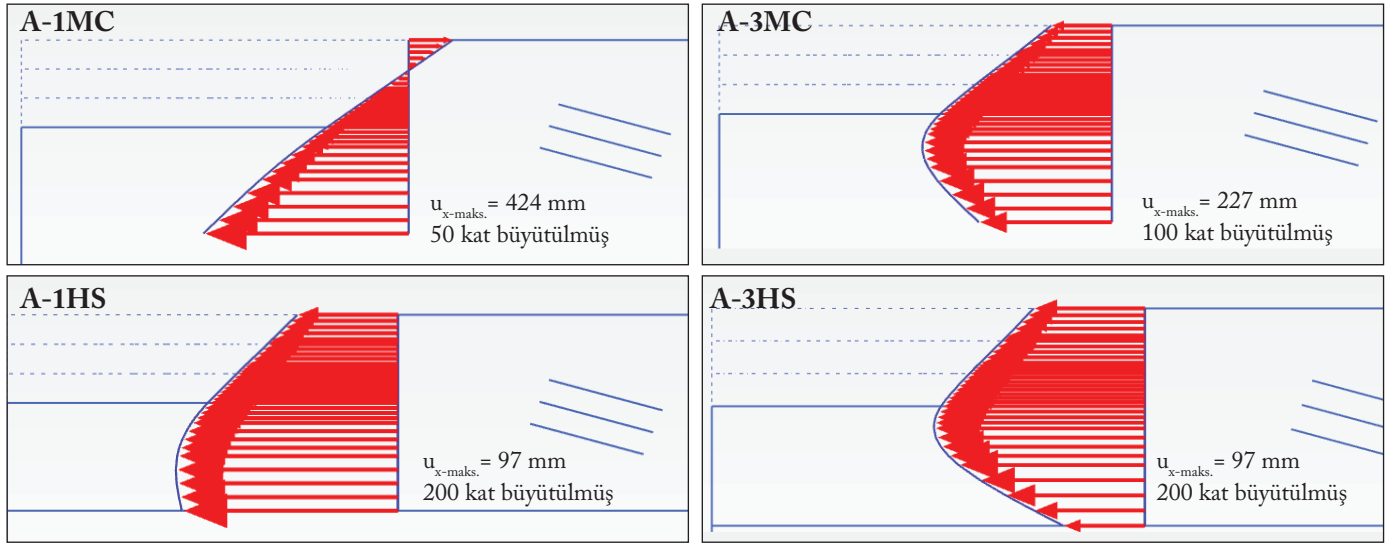
Parametreler	Sembol	CL	Birim
Malzeme modeli	HS	√	-
Drenaj tipi	Drenajlı	√	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	kN/m ³
Üç eksenli sekant rijitliği		4500	kN/m ²
Ödometre tanjant rijitliği		4500	kN/m ²
Boşaltma/yükleme rijitliği		13500	kN/m ²
Gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri	m	0.9	-
Poisson oranı	ν_{ur}'	0.2	-
Kohezyon	c'	12	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ	19	°
Dilatasyon açısı	Ψ	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R _{inter}	0.65	-

Son aşamada A-3HS ile gösterilen analizler, tabakalı zemin profili için HS model kabulü ile yapılmıştır (Çizelge 16). Bu yaklaşım ile maksimum duvar yatay deplasmanı $u_{x-maks} = 97$ mm elde edilmiştir. Bu deplasman değerinin, homojen tek zemin profili için HS modelin kullanıldığı A-1HS analizinin sonucu ile tamamen aynı olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda malzeme modelinin HS olarak seçilmesi durumunda, zemin profilinin homojen veya tabakalı olmasının fark yaratmadığı ifade edilebilir. Plaxis analizlerinde duvardaki maksimum yatay deplasmanın yeri ve deplasmanların duvar boyunca değişimi açısından da farklılıklar gözlenmektedir (Şekil 5). A-1MC ve A-3MC analizlerinde, maksimum deplasmanlar duvarın alt ucunda ve yakınında iken A-1HS ve A-3HS için maksimum deplasmanlar kazı tabanı civarında gözlenmektedir, bu açıdan farklılığın zemin malzeme modeline bağlı olduğu söylenebilir.

Plaxis ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının, duvarın maksimum yanal deplasmanı cinsinden Geo5 analiz sonuçlarına kıyasla daha yüksek oluşu, plaxis deki grafik model sınırlarının da kontrolünü gerektirebilir. Geo5 çözümlerinde, kazı genişliği ve duvar alt seviyesinin altındaki zemin, hesaplarda göz önüne alınmamaktadır. Plaxis çözümlerinde ise grafik model sınırları, B=80 m kazı genişliği göz önüne alınarak hesaplanan değerlerdir ($x_{max} = 320$ m, $y_{min} = -260$ m) (Şekil 4) (Berilgen 2011). Diğer yandan literatür araştırmalarında ve örnek saha çalışmalarında, grafik model sınırlarının bizim çalışmamızdaki sınırlara oranla daha küçük olduğu gözlenebilir. Bu doğrultuda çalışmadaki model sınırları değiştirilmiştir. Kazı genişliği B=30 m varsayılmış ve sınırlar kazı genişliği yerine H=9 m olan kazı derinliği göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Yatay uzaklık, duvar arkasında kazı derinliğinin minimum 2-3 katı kadar bir mesafe olması ge-

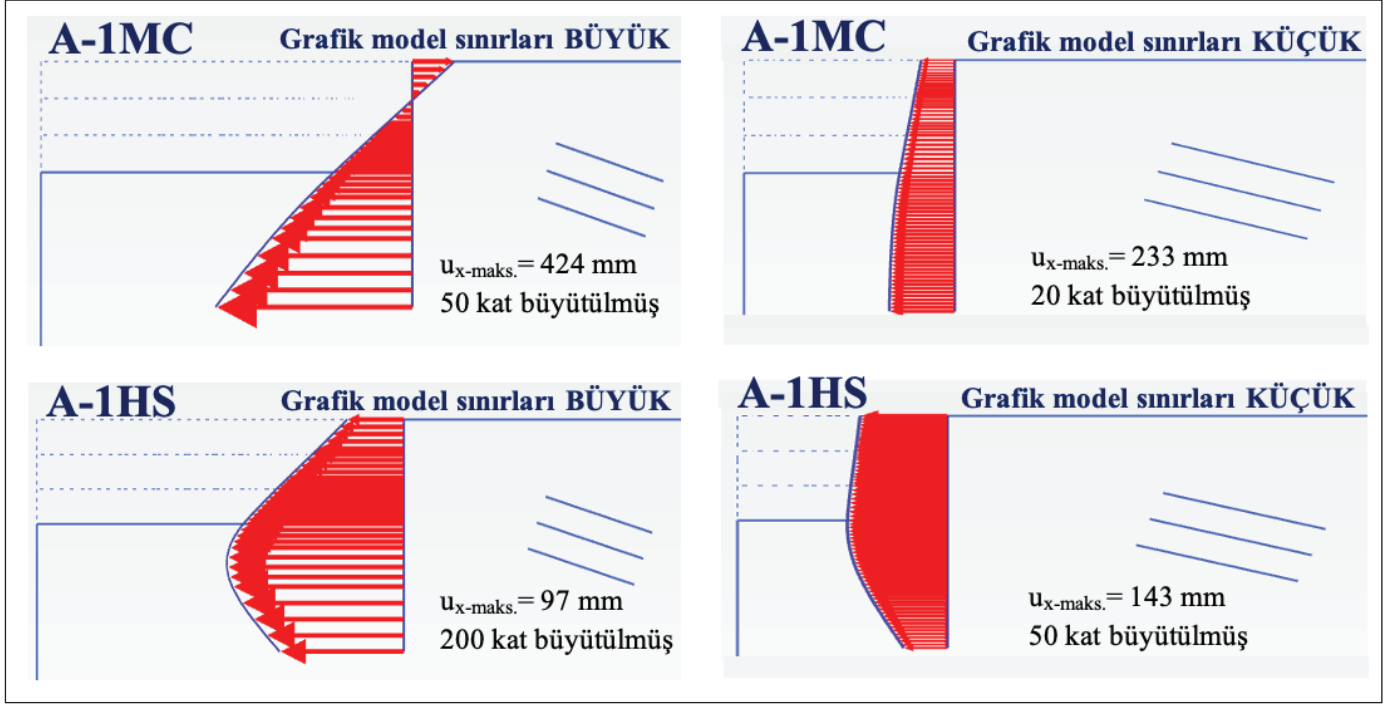
Çizelge 16. Plaxis A-3HS analizi için zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	CL	CL	Ana kaya	Birim
Malzeme modeli	HS	√	√	√	-
Drenaj tipi	Drenajlı	√	√	√	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	21	21	kN/m ³
Üç eksenli sekant rijitliği		4500	12500	100000	kN/m ²
Ödometre tanjant rijitliği		4500	12500	100000	kN/m ²
Boşaltma/yükleme rijitliği		13500	37500	300000	kN/m ²
Gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri	m	0.9	0.9	0.9	-
Poisson oranı	ν'	0.2	0.2	0.2	-
Kohezyon	c'	12	24	24	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	19	19	°
Dilatasyon açısı	Ψ	0	0	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R_{inter}	0.65	0.65	0.65	-

**Şekil 5.** Plaxis analizlerinde duvarın yatay deplasmanları.

rektiği kabulü ile $x_{max}=70$ m, düşey derinlik kazı tabanından itibaren kazı derinliğinin minimum 2-3 katı kadar bir mesafe olması gerektiği kabulü ile $y_{min}=-40$ m belirlenmiştir (Berilgen 2011). Homojen tek tabakalı zemin profili ve MC malzeme modelinin kullanıldığı A-1MC çözümünde, grafik model sınırlarının küçüldüğü koşullar için analiz tekrarlanmış ve duvardaki maksimum yatay deplasman, $u_{x-maks.}=233$ mm elde edilmiştir. Bu sonuçlar, grafik model sınırlarının daha büyük olduğu analiz sonucu ile kıyaslandığında duvarın maksimum yatay deplasmanında %45 oranında azalma gözlenmiştir. Benzer şekilde homojen tek tabakalı zemin profili için HS malzeme modelinin kullanıldığı A-1HS analizi, grafik model sınırlarının azaldığı koşullarda tekrar

gerçekleştirilmiş ve duvardaki maksimum yatay deplasman, $u_{x-maks.}=143$ mm elde edilmiştir. Bu değer daha büyük model sınırlarına sahip analiz sonucu ile kıyaslandığında, duvarın maksimum yatay deplasmanında %47 oranında artış gözlenmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen analiz sonuçları, grafik model sınır şartlarındaki değişimin zemin malzeme modeline göre farklı etki yarattığını göstermektedir (Şekil 6). Grafik model sınırlardaki küçülme, MC malzeme modelinin kullanıldığı analizde duvarın maksimum yatay deplasmanında azalmaya sebep olur iken, HS malzeme modelinin kullanıldığı analizde duvarın maksimum yatay deplasmanında artış gözlenmiştir.



Şekil 6. Farklı grafik model sınırları için plaxis analizlerinde duvar yatay deplasmanları.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, bir inceleme alanındaki yerel zemin profilini temsilen killi zeminlerde, çok sıra ankrajlı bir destek sistemi için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Zemindeki iri ve ince danelerin yaklaşık olarak %50 oranlarında birbirine çok yakın olduğu ve zeminlerin CL, ML, SM, SC sınıflarında bir dağılım gösterdiği bölgede, en olumsuz koşulu temsilen orta katı kıvamdaki CL sınıfı zemin için kazı derinliği 9 metre olan bir sistem analiz edilmiştir. Boyutlandırmalar, limit denge analizlerine dayalı Geo5 programı ile oluşturulmuştur. Geo5 programında stabilite tahkikleri aşamalı inşaat yaklaşımı ile yapılabilmekte ve yatak katsayısı yaklaşımı ile sistemin deformasyonu belirlenebilmektedir. Geo5 analizleri ile sistemdeki maksimum yatay deformasyonlar, literatürde belirtilen izin verilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Zemin sınıfındaki dağılımın etkisi için, ankrajların sayısı, uygulama derinlikleri, açıları ve yatay aralıkları sabit tutularak, ML, SC ve SM sınıfı zeminler için analizler tekrarlanmıştır. Artan zemin rijitliği ile beklenildiği üzere azalan boyutlara karşılık, duvarın yanal deplasmanında düşüş ve stabilite güvenlik sayılarında genel olarak artış belirlenmiştir. Sonuçlar, arazi ve laboratuvar çalışmalarına dayalı olarak zemin sınıfının belirlenmesi aşamasındaki hatalar ve/veya veri yetersizliği sebebiyle ortaya çıkabilecek olası zemin sınıfı farklılıklarının, destek sisteminin boyutları ve stabilitesi üzerindeki etkisini göstermektedir.

Geo5 programı ile boyutlandırılan sistem, sonlu elemanlar yazılımı Plaxis ile modellenmiş ve deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada farklı analiz yöntemlerine sahip iki ayrı yazılım ile elde edilen deformasyonların hangi koşullarda karşılaştırılabilir olabileceğine yönelik olarak parametrik çalışma yapılmıştır. Bu doğrultuda farklı zemin davranış modelleri kullanılmış ve farklı grafik model sınırları uygulanmıştır. Sonlu eleman yazılımlarında grafik model sınırlarının sonuçları etkilemeyecek boyutlarda seçilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda literatürde önerilen sınırlar, kazı genişliği veya kazı derinliğini göz önüne almaktadır. Çalışmada varsayılan kazı genişliği göz önüne alınarak hesaplanan grafik model sınırlarında, orta plastisiteli CL sınıfı zemin tabakası Geo5 analizlerinde olduğu gibi homojen tek bir tabaka olarak modellenmiş ve Mohr-Coulomb malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Analiz sonucu duvardaki maksimum yatay deplasmanın, Geo5 programı ile hesaplanan değer ve literatürde izin verilen sınır değerlerin çok üstünde oluşu plaxis uygulamasındaki modellemenin birçok açıdan gerçekçilikten uzaklaştığını göstermektedir. Destek sisteminin geometrisi ile sınırlı zemin koşullarını göz önüne alan Geo5 analizlerinden farklı olarak, daha geniş sınırlara sahip grafik modelin oluşturulduğu plaxis analizinde, homojen tek tabakalı zemin varsayımı sonucu, derinlik artışı ile rijitlik artışı göz önüne alınamamış ve bu açıdan Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanılması da yetersiz kalmıştır. Gerçeğe

daha yakın bir modelleme için çalışmada göz önüne alınan zemin profili ile uyumlu olacak şekilde destek sisteminin alt ucundan başlayarak artan rijitlikte zemin tabakalanması ve anakaya varsayımı yapılmıştır. Bu varsayım ile duvardaki maksimum yatay deplasman %47 oranında azalmış olsa da Geo5 analiz sonuçlarının ve izin verilebilir sınır değerlerin halen oldukça üstünde kalmıştır.

Plaxis analizlerinde, davranışın Pekleşen Zemin modeli ile temsil edildiği durumda, zemin profilinin homojen tek tabaka olması ile derinlikle artan rijitlikte tabakalı oluşunun, duvardaki maksimum yatay deplasman değeri açısından fark yaratmadığı görülmüştür. Deplasmanlar, tek tabakalı ve Mohr-Coulomb davranış modeline sahip çözüme nazaran %77 oranında azalmış, Geo5 analiz sonuçları ile karşılaştırılabilir daha makul bir seviyeye gelmiş ancak yine de izin verilebilir sınırları aşmıştır. Bu durum analiz edilen sistem için Pekleşen Zemin modelinin, davranışın temsil edilmesinde daha uygun olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Plaxis analizlerinde kullanılan zemin davranış modelinin sistemin davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiş ve bu etkinin aynı zamanda farklı grafik model sınırlarındaki sonuçları incelenmiştir. Bu amaçla varsayılan kazı genişliği küçültülmüş, sınırlar kazı derinliği kriterine göre belirlenmiş ve yeni grafik model sınırları ilkine oranla daha küçük elde edilmiştir. Grafik model sınırlardaki küçülme, Mohr-Coulomb malzeme modelinin kullanıldığı analizde, duvarın maksimum yatay deplasmanında azalmaya sebep olur iken, Pekleşen Zemin malzeme modelinin kullanıldığı analizde duvarın maksimum yatay deplasmanında artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar ile Plaxis analizlerinde grafik model sınırlarının, zemin malzeme modeline göre farklı etki yaratabildiği ve analizlerimizde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu belirlenmiştir. Literatürde zemin malzeme modellerini kıyaslayan vaka analizlerine ait parametrik çalışmalar göstermiştir ki; belirli koşullar altında her zemin modeli gerçeğe yakın, mantıklı sonuçlar verebilir. Çünkü sonuçlar üzerinde başka parametrelerin de etkisi olduğu ve bu parametrelerin hangi doğrulukta belirlenip kullanıldığı önemli olmaktadır. Kullanılan diğer parametreler dışında, belirli ve uygun koşulların oluşturulmasında grafik model sınırlarının da önemli olduğu bu çalışma ile gösterilmiştir. Bu çalışmanın devamında grafik model sınırları için daha kapsamlı örnekler üzerinde çalışılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir.

Yazar katkısı: Alperen Cevahir: Yüksek lisans tezi kapsamında çalışmanın analizlerini yapmıştır, Banu Yağcı: Çalışmaya danışmanlık yapmış ve makaleyi yazmıştır.

Etik kurul onayı: Etik kurul izni gerektirmeyen bir çalışma olup, herhangi bir kurumdan etik kurul izni alınmamıştır.

5. Kaynaklar

- Aktaş, T., Çalışan, O., Çokça, E. 2018.** Ankara Kilinde 18.5 m Derinliğindeki Bir Kazının Geri Analizi: Örnek Olay İncelemesi. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Kongresi, Türkiye.
- Alam, M., Chaallal, O., Galy, B. 2020.** Protection Practices for Trench and Excavation in Quebec Sensitive Clay Soils: Review of Codes, Guidelines, and Research Needs. Safety Science, 131:104918. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104918>.
- Aslan, V., Yağcı, B. 2018a.** Derin Kazı Destek Sistemlerinin Analizinde Geoteknik Modelleme Farklılıkları. BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(1): 514-526. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.418714>
- Aslan, V., Yağcı, B. 2018b.** Konsol Diyafram Duvarların Yatay Deplasmanı için Parametrik Bir Çalışma. AKÜ FEMÜBİD, 18:015601, 616-628. <https://doi.org/10.5578/fmbd.66938>
- Bahadır, AA., Onur, Mİ. 2017.** Derin Kazı Destek Sistemi Tasarımında Zemin Modeli Seçimi: Bir Vaka Analizi. 7. Geoteknik Sempozyumu, s. 583, Türkiye.
- Bai, X., Chen, X., Zhang, M. 2019.** Pile-Steel Support-Anchor System for Foundation in Rock-Soil Layer. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 55 (6): 425-432. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09559-w>
- Berilgen, MM. 2011.** Model sınırları. Plaxis ile Hesaplamalı Geoteknik Kursu, GEOgrup A.Ş., Kültür Üniversitesi, İstanbul.
- Cevahir, A. 2022.** Ankrajlı Diyafram Duvarların Nümerik Analiz Yöntemleri ile Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71 s.
- Engin, V. 2012.** Comparison of Factor of Safety Obtained from Limit Equilibrium Methods with Strength Reduction Factors in Finite Element Modeling. Master's Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 141 s.
- Fenerci, E. 2010.** Palplanş Perdeli Derin Kazı Destek Sistemlerinde Zemin Kesiti ve Tasarım Yönteminin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 120 s.
- GEO5 2022.** Geotechnical Software, Fine company, Czech Republic.
- Harahap, SE., Ou, C. 2020.** Finite element analysis of time-dependent behavior in deep excavations. Computers and Geotechnics 119: 103300. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103300>
- Hayta, Ö. 2005.** Finite Element Analysis of Tieback Wall Using Plaxis: A Case Study. Master's Thesis, Graduate Program in Civil Engineering Boğaziçi University, 123 s.

- Kim, S., Finno, R.J. 2020.** Inverse analysis of Hypoplastic Clay model for computing deformation caused by excavations. *Computers and Geotechnics*, 122: 103499. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103499>
- Kökten, Ö., Özgörgün, P., Ghalandari, MT. 2018.** Çok Sıra Ankrajlarla Destekli Derin Kazıların Deplasmana Dayalı Tasarımı. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, Türkiye.*
- Levasseur, S., Malecot, Y., Boulon, M., Flavigny, E. 2010.** Statistical inverse analysis based on genetic algorithms and principal component analysis: Applications to excavation problems and pressuremeter tests. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34: 471-491. <https://doi.org/10.1002/nag.813>.
- Li, G., Li, Q., Wang, J., Dong, J., Sun, Q. 2022.** The Deformation Characteristics of a 40-m-Deep Excavation Supported by a Suspended Diaphragm Wall in Rock and Soil Composite Ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26 (3): 1040-1050. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1810-2>.
- Lim, A., Ou, C. 2017.** Stress Paths in Deep Excavations Under Undrained Conditions and Its Influence on Deformation Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63: 118-132. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.013>.
- Ma'ruf, MF., Darjanto, H. 2017.** Back Calculation of Excessive Deformation on Deep Excavation, *Procedia Engineering*, 171: 502-510. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.362>.
- Mollamahmutoglu, M., Avcı, E., Devenci, E., Gökçe, A. 2021.** Çok İnce Taneli Yüksek Fırın Cürufu Çimento ile Stabilize Edilmiş Düşük Plastisiteli Killi Zeminin Mühendislik Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36 (2): 985-996. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.642402>
- Moormann, C. 2004.** Analysis of Wall and Ground Movements Due to Deep Excavations in Soft Soil Based on a New Worldwide Database. *Soils and Foundations*, 44 (1): 87-98. <https://doi.org/10.3208/sandf.44.87>
- Muntohar, AS., Liao, H. 2013.** Finite Element Analysis of the Movement of the Tie-Back Wall in Alluvial-Silty Soils. *Procedia Engineering*, 54: 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.017>
- Nalçakan, MS., Binzet, S., Cabarkapa, Z. 2016.** Derin Bir Kazının Gözlem ve Davranışı. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Konferansı*, s. 667, Türkiye.
- Nossan, AS., Sokolic, I., Plepelic, G. 2009.** Design of Anchored Retaining Structures by Numerical Modelling. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, s. 1381, Egypt.
- Orhan, M., Özer, M., Işık, NS. 2006.** Doğal Zeminlerin Likit Limitinin Belirlenmesinde Casagrande ve Koni Batma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (4): 711-720. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6670/88862>
- Özer, M. 2008.** Örnek Hazırlama Yönteminin Likit Limit ve Plastik Limit Değerlerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (3): 689-698. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6677/88531>
- Plaxis 2D 2018.** Geotechnical Software, Bentley Systems, USA.
- Sabatini, PJ., Pass, DG., Bachus, RC. 1999.** Ground Anchors and Anchored Systems. FHWA-IF-99-015, Office of Bridge Technology Washington D.C.
- Şahin, M., Tonaroğlu, M. 2016.** Derin Kazılarda Oluşan Yanal Deformasyonların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tahmin Edilenler ile Karşılaştırılması. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, s. 455, Türkiye.
- Şen, B. 2021.** Bir Ankrajlı İksa Sistemi Geoteknik Tasarımında Malzeme Modeli Etkisinin İncelenmesi ve Aletsel Ölçüm Sonuçları ile Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 197 s. Sayfa sayısı eklenmelidir
- Tan, YC., Liew, SS., Gue, SS., Taha, MR. 2001.** A Numerical Analysis of Anchored Diaphragm Walls for a Deep Basement in Kuala Lumpur, Malaysia. *Proc. 14th Southeast Asian Geotechnical Conf.*, s. 453, Hong Kong.
- Ünver, M., Ünver, İS. 2022.** Monitoring of a Deep Excavation Supported by Anchored Retaining Walls. *Indian Geotech J.*, 52 (1): 227-236. <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00544-5>
- Vural, U., Işık, NS. 2019.** Ankrajlı İksalarda Analiz Sonuçlarının Saha Deneyleri ile Karşılaştırılması. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1): 74-83. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bufbd/issue/46478/558451>
- Voottipruex, P., Jamsawang, P., Sukontasukkul, P., Jongpradist, P., Horpibulsuk, S., Chindaprasirt, P. 2019.** Performances of SDCM and DCM walls under deep excavation in soft clay: Field tests and 3D simulations. *Soils and Foundations*, 59: 1728-1739. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.012>.
- Yıldız, Ö., Berilgen, MM. 2017.** Destekli Derin Kazıların İnşaa ve Tasarım Performansı. *7. Geoteknik Sempozyumu, Türkiye.*