

İSTANBUL AYRIŞMIŞ GROVAKLARINDAKİ ZEMİN/KAYA ANKRAJLARININ NİHAİ YÜK KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

DETERMINING THE ULTIMATE LOAD CAPACITY OF GROUND ANCHORS IN ISTANBUL WEATHERED GREYWACKES

Faruk SEFİ¹, Emine Gamze ABANOZOĞLU², Müge BALKAYA³, Musaffa Ayşen LAV⁴

ÖZET

Zemin/kaya ankrajlarının nihai yük kapasitesi (T_{ult}), ankrajın kökü ile çevresindeki zemin/kaya arasında oluşan ortalama sürtünme gerilmesine (p_b), ankraj kök çapına (D) ve ankraj kök boyuna (L_b) bağlıdır. İstanbul ayrıışmış grovak (kumtaşı) ortamında bulunan zemin ankrajları için, literatürde geniş bir aralıkta yer alan p_b gerilme değerleri sunulmuştur. p_b gerilme değeri seçimindeki bu belirsizliklerden dolayı, ankraj tasarımı yapan mühendisler genellikle önerilen düşük değerleri kullanmaktadır. Bu çalışmada, İstanbul ayrıışmış grovaklarındaki zemin ankrajları için literatürde sunulmuş p_b gerilme değerleri ve ankraj T_{ult} yük değerleri listelendi. Ayrıca, bu değerlerin sınanması için İstanbul ayrıışmış grovak ortamında bulunan bir şantiyede, iki adet 2.0 metre ankraj L_b uzunluğuna sahip araştırma ankraji imal edildi. Bu ankrajlara, yüksek yük seviyesine kadar ilerleyen ankraj performans deneyleri uygulandı. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar çeşitli kriterlere göre değerlendirildi ve ankrajların T_{ult} yük kapasiteleri belirlendi. Bu şekilde, İstanbul ayrıışmış grovaklarındaki ankrajların T_{ult} yük kapasitelerinin belirlenmesinde, literatürde sunulan değerler, ampirik bağıntılar ve ankraj performans deneyi sonuçları kullanıldı. Buna göre; bu ortamda bulunan ankrajlar için p_b gerilme değeri minimum 0.50-0.88 MPa aralığında, 1.0 metrelik ankraj kök uzunluğunun ürettiği ankraj T_{ult} yükü minimum 200.0-350.0 kN/m aralığında sunuldu. Ayrıca, performans deneyinden elde edilen çevrimsel yük-deplasman eğrisinin boşaltma hatlarının eğimindeki (k_{uni}) değişim, üç evreli bir eğri olarak sunuldu. Bu eğrinin ilk evresinde, ankraj sisteminin k_{uni} rijitliği sert bir düşüş sergiledi. İkinci evrede, ankraj sisteminin k_{uni} rijitliği sabite yakın hafif bir düşüş ile ilerledi. Üçüncü evre, ankraj sisteminin göçmeye ulaştığı evredir ve bu evrenin ilk noktasına ulaştıran ankraj öngerme yükü (T_w), ankrajın T_{ult} yükü olarak sunuldu. *Anahtar Kelimeler: Zemin/kaya ankraji, İstanbul, ayrıışmış grovak, performans deneyi*

¹ Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, sefi@itu.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Doktora öğrencisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, egabanozoglu@itu.edu.tr

³ Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, balkayamu@itu.edu.tr

⁴ Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, lavay@itu.edu.tr

ABSTRACT

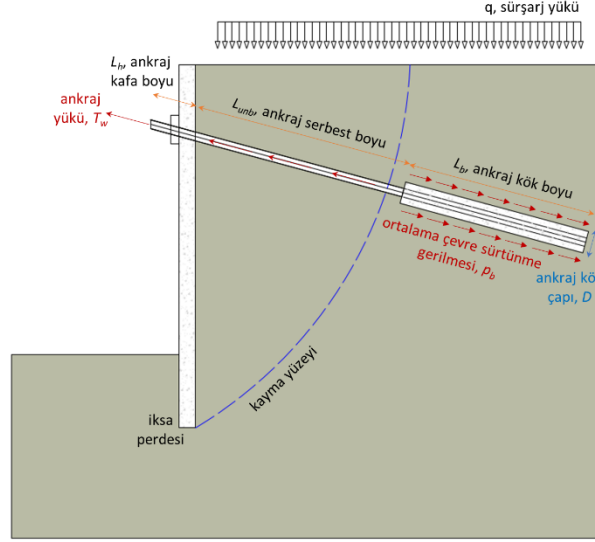
The ultimate load capacity (T_{ult}) of ground anchors depends on the average frictional stress (p_b) between the anchor bond and the surrounding soil/rock, the anchor bond diameter (D), and the anchor bond length (L_b). For ground anchors in Istanbul weathered greywacke (sandstone) environments, a wide range of p_b stress values has been reported in the literature. Due to uncertainties in selecting the p_b value, engineers typically use the lower recommended values in design. This study lists the p_b stress values and T_{ult} load values for ground anchors in Istanbul weathered greywackes as reported in the literature. Additionally, two research anchors with an L_b length of 2.0 meters were manufactured at a construction site in a weathered greywacke environment to test these values. These anchors underwent performance testing up to high load levels. The results from these tests were evaluated based on various criteria, and the T_{ult} load capacities of the anchors were determined. Thus, the values from the literature, empirical relationships, and performance test results were used to determine the T_{ult} load of anchors in Istanbul weathered greywackes. The p_b stress values for these anchors were found to range from a minimum of 0.50 to 0.88 MPa, and the T_{ult} load for a 1.0-meter anchor bond length ranged from a minimum of 200.0 to 350.0 kN/m. Additionally, the cyclic load-displacement curve from the performance test showed a three-phase behavior in the unloading path's slope (k_{unl}) changes. In the first phase, the k_{unl} stiffness of the anchor system exhibited a sharp decrease. In the second phase, the k_{unl} stiffness showed a slight decrease, remaining nearly constant. The third phase represented the failure stage of the anchor system, and the prestressing load (T_w) that brings the system to the first point of this phase is presented as the T_{ult} load of the anchor.

Keywords: Ground anchor, Istanbul, weathered greywacke, performance test

1. GİRİŞ

Eğimli zemin ankrajı, temel çukuru kazılarında yaygın kullanılan yatay destek elemanlarından biridir. Bu destek elemanının imalatı, iksa perdesinin dış yüzünden başlayan eğimli bir delgi içerisinde oluşturulur. Sarmal çelik halatlardan oluşan ankraj halat demeti, delgi içerisine yerleştirilir. Bu işlem sonunda, ankraj halatlarının bir kısmı iksa perdesinin dışına doğru taşmalıdır. Dışa taşan ankraj halat kısmı, ankraja öngerme yükünün (T_w) uygulandığı kısmı oluşturur. Delgi içerisindeki ankraj halatlarının son kısmına, çimento şerbeti enjekte edilir ve bu kısım zemin ile temas eden kompozit ankraj bölgesini oluşturur (Sefi, 2014). Bu tip zemin ankrajları, üç kısımdan oluşur: ankraj kafa boyu/bölgesi (L_h), ankraj serbest boyu/bölgesi (L_{unb}) ve ankraj kök boyu/bölgesi (L_b). Ankraja T_w yükünün uygulandığı kısım, ankraj kafa bölgesidir. Bu bölgede, delgiden taşan ankraj halatları ve iksa perdesine dayanan taşıma plağı bulunur. Ankraj kafa bölgesinde uygulanan T_w yükü, ankrajın ileri bölgelerine ankraj serbest bölgesi üzerinden aktarılır. Serbest bölgede, sadece yalın ankraj halatları yer almaktadır. Ankraj serbest bölgesinden aktarılan T_w yükü, ankraj kök bölgesine ulaşır. Ankraj kök bölgesinde, aktarılan T_w yüküne karşı direnimsizlik, kök bölgesi dış yüzü ile çevresindeki zemin arasında oluşan ortalama sürtünme gerilmesi (p_b) ile karşılanır (Şekil 1).





Şekil 1. Zemin ankrajı bileşenleri ve yük aktarım mekanizması

Zemin ankrajı tasarımı için yaygın olarak kullanılan standart FHWA-IF-99-015 (1999)'dir. Bu standarda göre; ankraj L_h boyu, öngermenin uygulanabileceği uzunlukta seçilmelidir. Ankraj L_{unb} boyu belirlenirken temel kriter, iksa sistemine ait toptan göçme kayma yüzeyinin belirlenmesidir. L_{unb} boyu, kaya ve zemin ortamları için en az 4.5 metre olmalıdır ve kayma yüzeyinden minimum 1.5 metre ya da iksa perdesi boyunun (h) 5'te 1'ine denk gelen mesafe kadar ötelenmelidir. Ankraj L_b boyu için sınır uzunluk aralığı, zemin ortamı için 4.5-12.0 metre, kaya ortamı için 3.0-10.0 metredir. L_b boyu, ankraj tasarım yükünü (T_{des}) güvenlik sayısı (zemin için $FS = 2.0$, kaya için $FS = 3.0$) ile karşılayacak ankraj nihai yükü (T_{ult}) kontrolünde belirlenir (FHWA-IF-99-015, 1999). Ankraj T_{ult} yükünün belirlenmesinde ise, p_b sürtünme gerilmesi değerinin belirlenmesi kritik önem taşır. Genel olarak p_b sürtünme gerilmesinin, kohezyonlu zeminler için 0.03-0.38 MPa aralığında, kohezyonsuz zeminler için 0.07-1.38 MPa aralığında, kaya ortamı için 0.15-3.10 aralığında olduğu öngörülmektedir (PTI, 1996).

İstanbul grovaklarında imal edilmiş zemin ankrajları için araştırmacılar tarafından sunulan p_b gerilme değerleri, lokasyona ve kaya ayrışma derecesine göre değişiklikler göstermektedir. Çınar (2010), Maslak bölgesinde bulunan çok ayrışmış grovak ($RQD = \% 5-10$) için 0.50 MPa'lık p_b değerini, Şişli bölgesinde bulunan ayrışmış grovak ($RQD = \% 25$) için 0.75 MPa'lık p_b değerini önerdi. Dayıoğlu (2010), Şişli/Harbiye bölgesinde bulunan çok ayrışmış grovak ($RQD = \% 0-10$) için 0.80 MPa'lık p_b değerini kullandı. Köse (2011), Beyoğlu/Sütlüce bölgesinde bulunan çok ayrışmış grovak için 0.80 MPa'lık p_b değerini kullandı. Sefi (2014), Beyoğlu/Taksim bölgesinde bulunan grovak için 0.95 MPa'lık p_b değerini sundu. Sefi ve diğ. (2024), çok ayrışmış grovaktaki zemin ankrajı analizlerinde 0.70 MPa'lık p_b değerini kullandı.

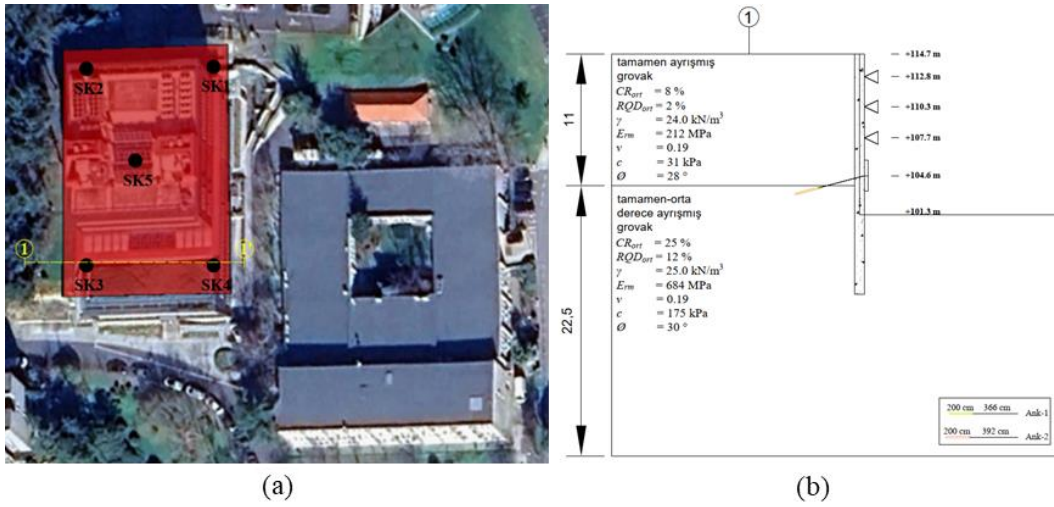
Bu çalışmada, İstanbul'daki ayrışmış grovak ortamında imal edilecek zemin ankrajları için p_b gerilme değeri ve bu ankrajların sağlayacağı ankraj T_{ult} yükü irdelenmektedir. Çalışma kapsamında, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Maslak kampüsü içinde bulunan bir şantiyede araştırma ankrajları imal edildi ve bu ankrajlara uygulanan performans deneyi sonuçları incelendi. Ankrajların T_{ult} yükü, ankraj performans deneyi sonuçlarından belirlenmeye çalışıldı.



2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Araştırma Sahasının Geoteknik Özellikleri

Çalışmadaki inceleme sahası, İTÜ Maslak kampüsünde bulunan Bilgi-İşlem binası şantiyesi idi. Sahanın geoteknik özellikleri, derinliği 25.0-30.0 metre olan beş adet araştırma çukurundan temin edilen veriler ve yerinde alınan dört adet kaya karot numunesi eşliğinde belirlendi (Şekil 2a). Genel olarak, saha iki tabaka ile temsil edildi. İlk tabaka, yaklaşık 11.0 metre kalınlığında, düşük karot yüzdesi ($CR = \% 8$) ve düşük kaya kalite göstergesi ($RQD = \% 2$) değerlerine sahip, tamamen ayırışmış grovaktan oluşmakta idi. Bu tabakanın altında, nispeten daha yüksek CR ($CR = \% 25$) ve RQD ($RQD = \% 12$) değerlerine sahip tamamen-orta derecede ayırışmış grovak bulunmakta idi (Şekil 2b). Temel çukuru kazısı nihai kazı kotuna erişildiğinde, kazı tabanına dik doğrultuda dört adet kaya karot numunesi alındı. Bu numunelerin serbest basınç dayanımı (σ_{ci}) belirlendi. Buna göre, numunelerin σ_{ci} değeri 1.60-5.74 MPa aralığında elde edildi. Bu değerler, zayıf kaya sınıfına işaret etmektedir. Tabakaların temsili σ_{ci} değeri, bozulmamış kaya parametresi (m_i), jeolojik dayanım indeksi (GSI), bozulma faktörü (d) değerleri ile tabakanın temsili Hoek-Brown dayanım parametreleri (m_b , s ve a) ve bu değerlere eşdeğerdeki Mohr-Coulomb dayanım parametreleri (c ve \emptyset) RocData yazılımı ile belirlendi. Tabakalara ait geoteknik özellikler Tablo 1'de özet halinde sunuldu.



Şekil 2. inceleme sahası: a) plan; b) düşey kesit

Tablo 1. Zemin tabakalarının geoteknik özellikleri

Tabaka adı	Tabaka-1	Tabaka-2
Karot yüzdesi, CR	(%) 8	25
Kaya kalitesi, RQD	(%) 2	12
Doğal birim hacim ağırlığı, γ_n	kN/m^3 24,0	25,0
Serbest basınç dayanımı, σ_{ci}	(MPa) 0,80	3,89
Poisson oranı, ν	0,19	0,19
Jeolojik dayanım indeksi, GSI	25	32
Deformasyon modülü, E_{rm}	MPa 212,1	684,2
Kohezyon, c	(kPa) 31	175
içsel sürtünme açısı, \emptyset	($^\circ$) 28	30



2.2. Araştırma Ankrajlarının Özellikleri

İnceleme sahasında imal edilen araştırma ankrajları, Ankraj-1 ve Ankraj-2 olarak adlandırıldı. Bu ankrajlar, kazı çukurunda dördüncü, yani son kademe ankrajları seviyesinde idi. Bu ankrajlar, araştırma ankrajları olduğu için deneyler esnasında göçmeye uğramalarına izin verildi. Ankrajlar, serbest (L_{unb}) ve kök (L_b) boyları kısa olacak şekilde imal edildi. Ankrajların L_{unb} boyu 3.7-3.9 metre, L_b boyu 2.0 metre, kök çapı (D) 127 mm uzunluğunda idi. Ankrajlar, eğim açısı (i) 15 olan delgi içerisinde imal edildi. Ankraj imalatında beş adet 0.6" çaplı çelik sarmal ankraj halatı kullanıldı. Ankraj halatının kesit alanı (A) 138.8 mm², elastisite modülü (E) 200.0 GPa ve lineer-elastik yük taşıma kapasitesi 222.2 kN idi. Ankrajların kök kısmı, temsili saha kesidini oluşturan ikinci tabakada yer almakta idi. Bu tabaka, tamamen-orta derecede ayrışmış grovak birimdir. Ankrajların kök bölgesinin orta kısmı üzerine etki eden düşey efektif gerilme (σ_v) 282.4-284.0 kPa seviyelerinde idi (Şekil 2b ve Tablo 2).

Tablo 2. Araştırma ankrajlarının geometrik, malzeme ve yük özellikleri

Ad	Kot	Kademe	Halat sayısı	Eğim	Kök çapı	Serbest boyu	Kök boyu	Efektif gerilme (kök ortası)	Uygulanan max yük
	(m)		(0.6")	(i) (°)	(D) (mm)	(L_{unb}) (m)	(L_b) (m)	(σ_v) (kPa)	($T_{w,max}$) (kN)
Ankraj-1	104,6	4	5	15	127	3,7	2,0	282,4	770
Ankraj-2	104,6	4	5	15	127	3,9	2,0	284,0	770

2.3. Ankraj Performans Deneyi

İnceleme sahasında araştırma ankrajlarına performans deneyi uygulandı. Bu deney için FHWA-IF-99-015 (1999)'da belirtilen adımlar takip edildi. Performans deneyi, ankraja kademeli olarak yük verilerek ve yük boşaltılarak uygulanan bir deneydir. Deney esnasında, yükleme ve boşaltma işlemi ankraj kafasına yerleştirilen basınç hücresi ile yapılır. Bu deneyin temel amacı; ankrajın yük kapasitesinin belirlenmesi, ankraj yük-deplasman davranışının belirlenmesi, ankraj tasarım yükünün (T_{des}) ve ankraj kök boyunun (L_b) yeterliliğinin kanıtlanmasıdır. Deney, ankraja bir başlangıç yükünün ($T_{w,0}$) uygulanması ile başlar. Bu yük, T_{des} yükünün % 5'inden fazla olmamalıdır. $T_{w,0}$ yüküne karşılık gelen deplasman miktarı, sıfır okumasıdır. Bundan sonra, T_{des} yükünün % 25'ine denk gelen yüke kadar yükleme yapılır ve oluşan deplasman kaydedilir. Sonrasında, $T_{w,0}$ yüküne kadar boşaltım yapılır ve oluşan deplasman miktarı kaydedilir. Bu döngüsel işlem, farklı yük kademelerini de kapsayacak şekilde, maksimum test yüküne ($T_{w,max}$) kadar sürdürülür. $T_{w,max}$ yükü, kalıcı ankrajlar için T_{des} yükünün % 133'üne denk gelen yük iken, geçici ankrajlar için T_{des} yükünün % 120'sine denk gelen yüküdür. Performans deneyinde, çevrimsel yük kademelerinde elde edilen toplam deplasman miktarı (δ_t), ankrajın o yük kademesindeki rezidüel (δ_r) ve elastik (δ_e) deplasmanlarının toplamıdır. Deney boyunca, her yük kademesine ait elastik ve kalıcı deplasman miktarları belirlenir (FHWA-IF-99-015, 1999; Sefi, 2014). Ankraj-1 ve Ankraj-2 ankrajlarına uygulanan performans deneyinde, 18 çevrimsel yükleme sonunda 770.0 kN'luk $T_{w,max}$ yüküne ulaşıldı. Deneylerde kullanılan $T_{w,0}$ yükü ve çevrimsel yüklemedeki yük artımı 40.0 kN idi.



2.4. Ankraj Nihai Yükünün Belirlenmesi

Istanbul ayrışmış grovaklarında bulunan ankrajların nihai yükünün (T_{ult}) belirlenmesinde; literatür verileri, ampirik formüller ve bu çalışmada incelenen araştırma ankrajlarına ait performans deneyinden elde edilen yük-deplasman ($T_w - \delta_t$) eğrileri değerlendirildi.

Değerlendirilen ilk kritere (K-1) göre; İstanbul ayrışmış grovakları için literatürde sunulmuş p_b sürtünme gerilmesi değerleri ile ankraj T_{ult} yükü belirlendi;

$$T_{ult} = (\pi D L_b) \times (p_b) \quad (1)$$

Burada: ankraj T_{ult} yükü, bütün ankraj kök boyu (L_b) tarafından üretilen değerdir (kN).

Değerlendirilen ikinci kritere (K-2) göre; performans deneyinde elde edilen yük-rezidüel deplasman ($T_w - \delta_r$) eğrisindeki δ_r değerinin, ankraj kök çapının (D) 1/10'una denk gelen deplasman değerine eriştiği andaki yük değeri, ankraj T_{ult} yükünü vermektedir (Briaud ve diğ., 1998);

$$\delta_r = \frac{D}{10} \text{ (mm) iken } T_w = T_{ult} \quad (2)$$

Burada: araştırma ankrajlarının kök çapı (D) 127 mm olduğu için, 12.7 mm'lik δ_r deplasman değeri, T_{ult} yükünü belirlemede referans olmaktadır.

Değerlendirilen üçüncü kritere (K-3) göre; performans deneyinde elde edilen yük-toplam deplasman ($T_w - \delta_t$) eğrisindeki δ_t değerinin, $D/10$ deplasman değeri ve ilgili yük kademesinde ankraj serbest boyunda (L_{unb}) oluşan elastik deplasman değerinin toplamına denk gelen deplasman değerine eriştiği andaki yük değeri, ankraj T_{ult} yükünü vermektedir (Briaud ve diğ., 1998);

$$\delta_t = \frac{D}{10} + \frac{T_w \times L_{unb}}{A \times E} \text{ (mm) iken } T_w = T_{ult} \quad (3)$$

Burada: A ankrajda bulunan bütün halatların kesit alanı, E ise ankraj halatlarının elastisite modülüdür.

Değerlendirilen dördüncü kritere (K-4) göre; kaya ortamını temsil eden numune için elde edilmiş serbest basınç dayanımı (σ_{ci}) değerinin % 10'u, p_b sürtünme gerilmesini vermektedir. Düşük içsel sürtünme açısına (\emptyset) sahip ayrışmış kayalar için bu yüzdesel değerin % 20-35 olduğu belirtilmiştir (Littlejohn, 1980). Buna göre, bu kriter kullanılarak ankraj T_{ult} yükü şu şekilde elde edilmektedir;

$$T_{ult} = (\pi D L_b) \times (\% 20 - 35 \sigma_{ci}) \quad (4)$$

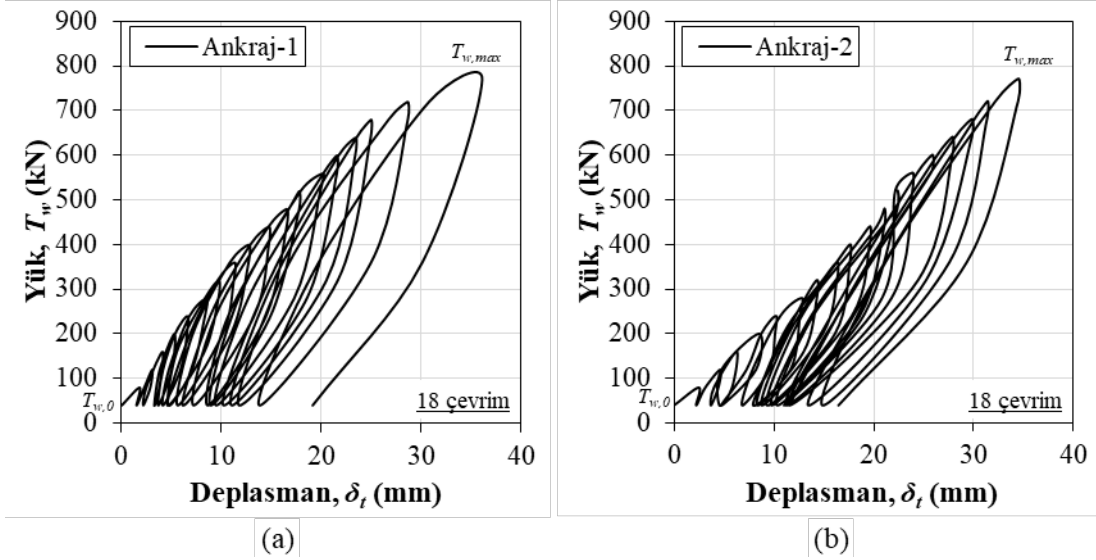
Bu çalışma kapsamında tanıtılacak olan beşinci kriter (K-5); performans deneyi sırasında araştırma ankrajına ait çevrimsel yük-deplasman ($T_w - \delta_t$) eğrisinin boşaltma hatlarının eğimindeki değişimi dikkate almaktadır. 3 lineer eğim ile idealleştirilen bu eğrinin son evresine geçişi sağlayan yük, ankraj T_{ult} yükünü vermektedir. Bölüm 3.2'de bu kritere ait çözümler sunuldu.



3. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

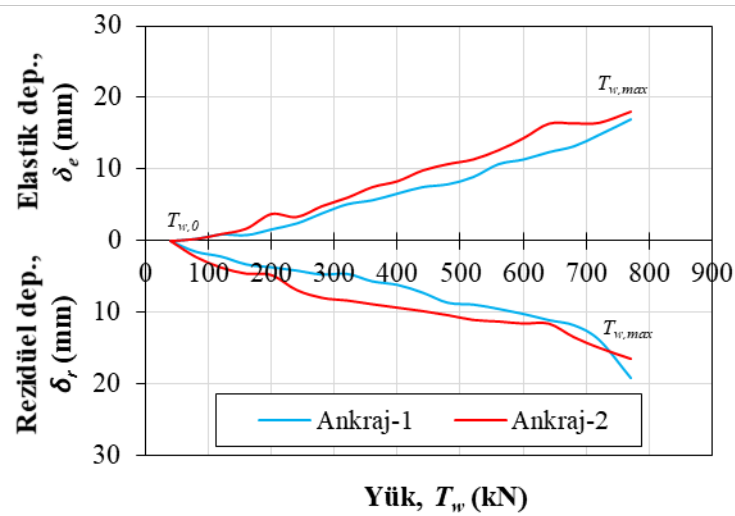
3.1. Performans Deneyi Sonuçları

Performans deneyinde 18 çevrimsel yükleme sonucunda, Ankraj-1 ve Ankraj-2 için oluşan yük-deplasman ($T_w - \delta_t$) eğrileri Şekil 3'de sunuldu. 770.0 kN'luk maksimum test yükünde ($T_{w,max}$), Ankraj-1 ve Ankraj-2'de oluşan δ_t deplasman değerleri sırası ile 36.10 mm ve 34.47 mm idi.



Şekil 3. Araştırma ankrajlarına ait performans deneyinde elde edilmiş $T_w - \delta_t$ eğrileri

Her çevrimsel yüklemeyi takip eden boşaltma sonucunda araştırma ankrajlarında oluşan elastik (δ_e) ve rezidüel (δ_r) deplasman değerleri, ilgili çevrime ait maksimum yüke (T_w) karşılık elde edildi. $T_{w,max}$ yükünde, Ankraj-1 ve Ankraj-2'de oluşan δ_e deplasman değerleri sırası ile 16.98 mm ve 18.02 mm iken, δ_r deplasman değerleri sırası ile 19.12 mm ve 16.45 mm idi (Şekil 4).



Şekil 4. Araştırma ankrajlarına ait performans deneyinde elde edilmiş $T_w - \delta_e$ ve $T_w - \delta_r$ eğrileri

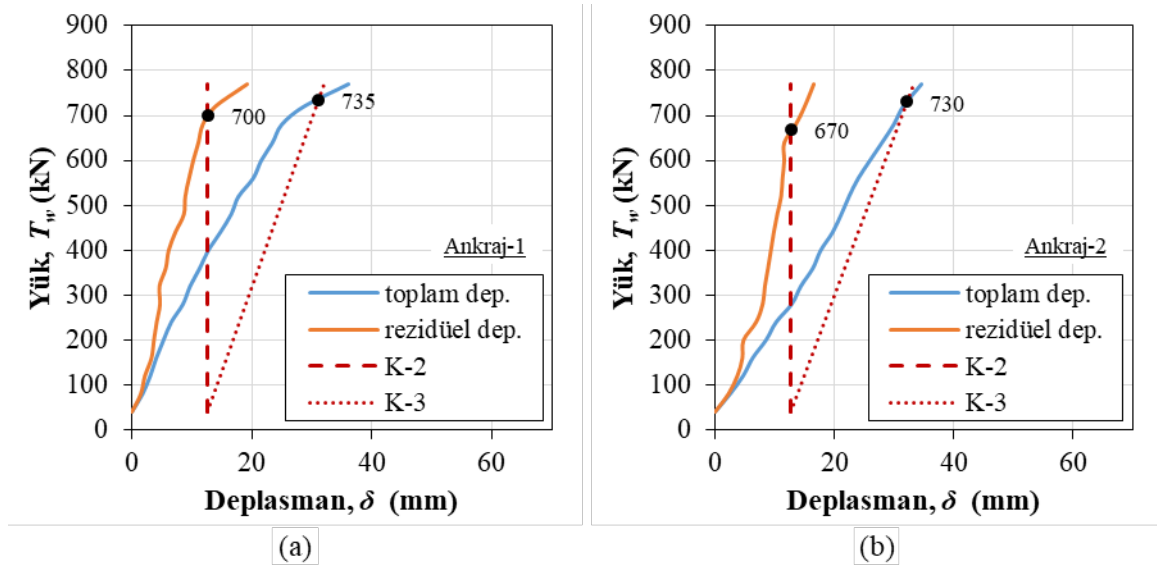


3.2. Ankrarların Nihai Yükünün Kriterler ile Belirlenmesi

Kriter-1 (K-1) kapsamında, İstanbul ayrışmış grovaktarı için literatürde sunulmuş p_b sürtünme gerilmesi değerleri 0.50-0.95 MPa aralığında listelendi (ınar, 2010; Dayioğlu, 2010; Köse, 2011; Sefi, 2014; Sefi ve diğ., 2024). Bu değerlere sahip zeminde üretilecek, 127 mm çaplı (D) ankrar kök bölgesine sahip ankrarın 1.0 metresinin sağlayacağı ankrar T_{ult} yükü, 200.0-380.0 kN/m aralığında belirlendi.

Kriter-2 (K-2) kapsamında, performans deneyi sırasında araştırma ankrarlarında 12.7 mm'lik δ_r deplasmanı oluşturan yk (T_w), ankrar T_{ult} yükü olarak belirlendi. Buna göre, Ankrar-1 ve Ankrar-2'nin T_{ult} yükü sırası ile 700.0 ve 670.0 kN idi. Bu ankrarlar 2.0 metre ankrar L_b boyuna sahip olduğundan, 1.0 metrelik kök kısmının sağlayacağı ankrar T_{ult} yükü, 335.0-350.0 kN/m aralığında belirlendi (şekil 5).

Kriter-3 (K-3) kapsamında, performans deneyi sırasında araştırma ankrarlarında oluşan δ_t deplasman değerinin, $D/10$ deplasman değeri ve ilgili yük kademesinde ankrar L_{unb} boyunda oluşan elastik deplasman değerinin toplamına eriştiği andaki yük değeri, ankrar T_{ult} yükü olarak belirlendi. Buna göre, Ankrar-1 ve Ankrar-2'nin T_{ult} yükü sırası ile 735.0 ve 730.0 kN olarak belirlendi. Bu ankrarların 1.0 metrelik kök kısmının sağlayacağı ankrar T_{ult} yükü, 365.0-367.5 kN/m aralığında belirlendi (şekil 5).



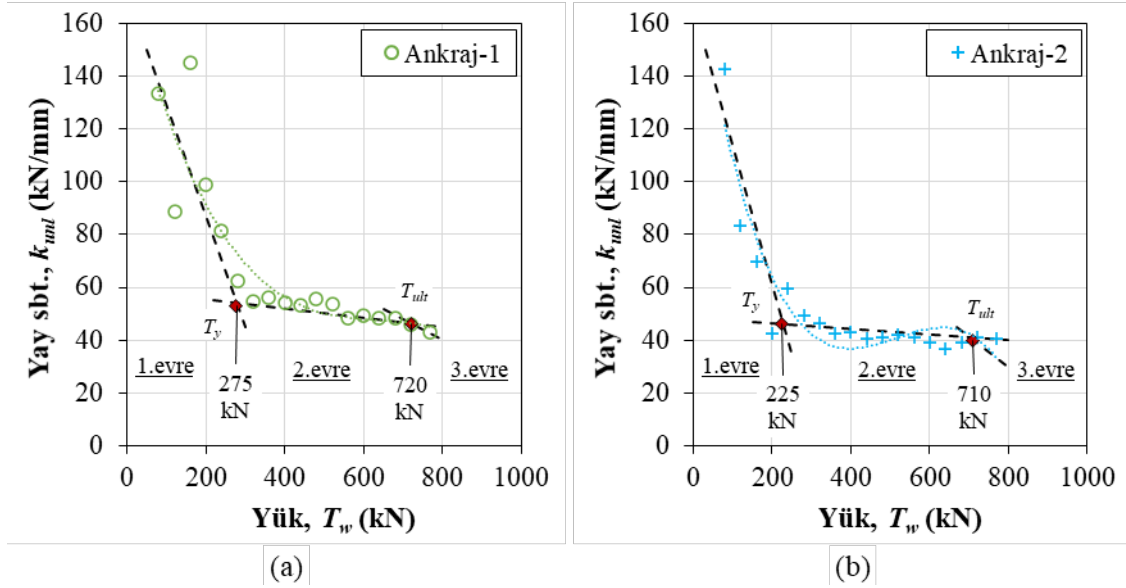
şekil 5. Ankrarda oluşan toplam ve rezidüel deplasman değerleri ile ankrar T_{ult} yükü belirleme

Kriter-4 (K-4) kapsamında, ankrar kök bölgesinin bulunduğu tabakayı temsil eden serbest basınc dayanım (σ_{ci}) değerinin % 20-35'i, p_b sürtünme gerilmesi olarak belirlendi. Buna göre, tabakayı temsil eden σ_{ci} değeri olan 3.89 MPa değeri için p_b sürtünme gerilmesi 0.78-1.36 MPa aralığında belirlendi. Bu değerlere sahip zeminde üretilecek, 127 mm çaplı (D) ankrar kök bölgesine sahip ankrarın 1.0 metresinin sağlayacağı ankrar T_{ult} yükü, 310.4-543.2 kN/m aralığında belirlendi.

Kriter-5 (K-5), bu çalışma kapsamında üretilmiştir. Bu kriter, performans deneyi esnasında elde edilen $T_w - \delta_t$ eğrisinin boşaltma hatlarının eğimindeki değişimin çevrimsel yükleme boyunca izlenmesine dayanmaktadır. Her bir boşaltma hattı lineer bir doğru olarak ele



alındı ve bu eğim boşaltma rijitliği (k_{ult}) olarak kaydedildi. Her çevrimsel yüklemdeki maksimum yüke karşılık gelen k_{ult} değerleri elde edildi. Elde edilen bu noktalara, üçüncü dereceden bir polinom uyduruldu. Bu eğri ise, üç lineer doğru ile üç evre olarak idealleştirildi. İlk evrede lineer doğru yüksek bir eğimle düşüş gösterirken, ikinci evrede sabite yakın düşük eğimli bir düşüş sergiledi. Üçüncü evredeki hareket net değildi, fakat ikinci evrenin sonunun tanımlanmasında kullanıldı. İlk evreden ikinci evreye geçiş noktasının, ankraj sisteminin akma yükünü (T_y) verdiği düşünülmektedir. İkinci evreden üçüncü evreye geçiş noktası ise ankraj T_{ult} yükü olarak tanımlandı. Buna göre, Ankraj-1 ve Ankraj-2'nin T_y yükü sırası ile 275.0 ve 225.0 kN olarak, T_{ult} yükü ise sırası ile 720.0 ve 710.0 kN olarak belirlendi. Bu ankrajların, 1.0 metrelik kök kısmının sağlayacağı ankraj T_{ult} yükü, 355.0-360.0 kN/m aralığında belirlendi (Şekil 6) (Tablo 3).



Şekil 6. Bu çalışmada sunulan kriter (K-5) ile ankraj T_{ult} yükü belirleme

Tablo 3. Değerlendirilen kriterlere göre İstanbul ayrılmış grovalarında p_b ve T_{ult} değerleri

Kriter	Kaynaklar	Nihai ankraj yükü ($D=127$ mm için),		Ort. sürtünme gerilmesi (zemin-kök arasında),	
		T_{ult}		p_b	
		min	max	min	max
K-1	Çınar, 2010; Dayıoğlu, 2010; Köse, 2011; Sefi, 2014; Sefi ve diğ., 2024	200,0	380,0	0,50	0,95
K-2	Briaud ve diğ., 1998	335,0	350,0	0,84	0,88
K-3	Briaud ve diğ., 1998	365,0	367,5	0,91	0,92
K-4	Littlejohn, 1980	310,4	543,2	0,78	1,36
K-5	Bu çalışma	355,0	360,0	0,89	0,90
Güvenli aralık, (min değerler) =		200,0	350,0	0,50	0,88



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, İstanbul ayırışmış grovaklarında üretilecek zemin/kaya ankrajlarının nihai ankraj yükü (T_{ult}) ve tasarımda kullanılacak zemin ile ankraj kök arasında oluşan ortalama sürtünme gerilmesi (p_b) değerleri irdelendi. Literatürde sunulan değerlere ve ampirik bağıntılara ek olarak, iki araştırma ankraji üzerinde uygulanan performans deneyi sonuçları bu bağlamda değerlendirildi. Ankraj performans deneyinde elde edilen çevrimsel yük-deplasman eğrisinin boşaltma hatlarının lineer eğiminin yükleme boyunca değişimi, üç evrede tanımlandı. İlk evrenin sonu ankraj sisteminin akma yükü (T_y) olarak, ikinci evrenin sonu ise ankraj T_{ult} yükü olarak tanımlandı. Çeşitli kriterler değerlendirildiğinde, İstanbul ayırışmış grovaklarında üretilecek zemin ankrajlarının T_{ult} yükünün, minimum 200.0-350.0 kN/m aralığında, p_b sürtünme gerilmesinin ise minimum 0.50-0.88 MPa aralığında olduğu belirlendi. Bu çalışmanın yazarları, çalışmayı daha fazla araştırma ankraji ile genişletmeyi planlamaktadır. Nümerik analizler ile ankraj ortamının modellenmesi ve çeşitli yük kademelerinde ankraj bileşenlerindeki değişimin incelenmesi, bu çalışmanın sınanmasına veya desteklenmesine katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: MGA-2024-45704.

Bu çalışmada bahsi geçen deneyler merhum Doç. Dr. Mustafa Tuğrul ÖZKAN danışmanlığında yürütülmüş ve halen devam etmekte olan doktora tezi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Bu deneylerin gerçekleştirilmesine destek veren Cihangir Grup'a; Proje Müdürü İnş. Müh. Hakan AYAN, İnş. Müh. Gülden SÖZER ve çalışma arkadaşlarına, ayrıca, İrem İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti'ne; İnş. Müh. Murat ÇAKAN ve ekibine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Briaud, J.L., Powers III, W.F. & Weatherby, D.E. (1998), "Should grouted anchors have short tendon bond length? ", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(2):110-119.
- Çınar, A. (2010), "Trakya formasyonunda yapılan öngermeli ankrajlı derin kazıların sonlu elemanlar ile modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dayıoğlu, M. (2010), "Derin kazıların incelenmesi ve derin kazı uygulaması üzerine bir örnek: Harbiye kongre merkezi derin temel kazısı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- FHWA-IF-99-015 (1999), "Geotechnical engineering circular no.4: ground anchors and anchored systems", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Washington DC.
- Köse, H.K. (2011), "Derin kazılar ve derin kazı uygulamasına bir örnek: Hilton Garden Inn Söğütözü derin temel kazısı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Littlejohn, G.S. (1980), "Design estimation of the ultimate load-holding capacity of ground anchors", Ground Engineering, 13(8):25-39.



- PTI (1996), "Recommendations for prestressed rock and soil anchors", Post-Tensioning Institute, Phoenix, 70 p.
- Sefi, F. (2014), "Yarı-top-down inşaat yönteminin çok sıra ankrajlı iksa üzerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Sefi, F., Abanozoğlu, E.G., Balkaya, M. ve Lav, M.A. (2024), "Investigation of the contribution of first row rock anchors to the retaining system by variation of anchor bond length", European Journal of Engineering and Applied Sciences, 7(1):35-43.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
A	ankraj halatı kesit alanı	m_i	bozulmamış kaya para.
a	Hoek-Brown dayanım para.	\emptyset	içsel sürtünme açısı
c	kohezyon	ρ_b	zemin-kök arası ort. sürt. gerilmesi
CR	karot yüzdesi	RQD	kaya kalite göstergesi
D	ankraj kök çapı	s	Hoek-Brown dayanım para.
d	bozulma faktörü	T_{des}	ankraj tasarım yükü
E	ankraj halatı elast. mod.	T_{ult}	nihai ankraj yükü
E_{rm}	deformasyon modülü	T_w	ankraj öngerme yükü
FS	güvenlik sayısı	$T_{w,0}$	uygu. baş. ankraj öngerme yükü
GSI	jeolojik dayanım indeksi	$T_{w,max}$	uygu. max ankraj öngerme yükü
h	iksas perdesi boyu	γ_n	birim hacim ağırlığı
i	ankraj eğim açısı	δ_e	elastik deplasman miktarı
k_{unl}	ankraj sistemi boşaltma rijitliği	δ_r	rezidüel deplasman miktarı
L_b	ankraj kök boyu	δ_t	toplam deplasman miktarı
L_h	ankraj kafa boyu	ν	poisson oranı
L_{unb}	ankraj serbest boyu	σ_{ci}	kaya serbest basınç dayanımı
m_b	Hoek-Brown dayanım para.	σ_v'	düşey efektif gerilme

