Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ALÜVYON BİRİMLERDE BARET KAZIK ÜZERİNDE ENSTRÜMANTE EDİLMİŞ ÇİFT YÖNLÜ STATİK YÜKLEME TESTİ (K-CELL)

Eşref DİNÇ[1], Ahmet DİNÇ [2], Şenol ADATEPE[3], Alp GÖKALP[4]

ÖZET

Çift yönlü statik yükleme deneyi (K-Cell), özellikle çok yüksek test yüklerinin söz konusu olduğu ve konvansiyonel üstten yüklemeli (top-load) kazık yükleme deneylerinin uygulanmasının pratik veya teknik olarak zorlaştığı durumlarda, kazıkların eksenel taşıma kapasitesi ve yük aktarım davranışının değerlendirilmesinde güvenilir bir yöntem olarak yaygın şekilde kabul edilmektedir. Gömülü hidrolik krikolar aracılığıyla yükün kazık içerisinde uygulanması sayesinde yöntem, şaft sürtünmesi ve uç direncinin birbirinden bağımsız olarak mobilize edilmesine olanak sağlamakta ve uygun enstrümantasyon ile birlikte kullanıldığında kazık davranışına ilişkin ayrıntılı veriler sunmaktadır. Bu vaka çalışması, derin alüvyon birimlerin bulunduğu ve yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu bir proje sahasında inşa edilmiş bir baret kazık üzerinde gerçekleştirilen enstrümante edilmiş çift yönlü statik yükleme deneyinin sonuçlarını ele almaktadır. Deney, boyutları 0.8 m × 2.8 m olan ve 47.0 m uzunluğundaki bir baret kazık üzerinde, ASTM D8169/D8169M-18 Procedure A (hızlı yükleme prosedürü) esaslarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test kazığında yerleştirilen 36 adet gerinim ölçer ve 16 adet deplasman sensörü sayesinde mobilize edilen şaft direnci, uç direnci ve eşdeğer üstten yüklemeli (top-down) yük–oturma ilişkisi gibi kritik parametreler belirlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler, analitik yaklaşımlar ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak bu yöntemlerin performansı ve uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Çift yönlü statik yükleme (K-Cell), Enstrümantasyon, Baret kazık, Kazık kapasitesi, Şaft sürtünmesi*

ABSTRACT

The bi-directional static load test (K-Cell) is widely recognized as a reliable method for evaluating the axial load capacity and load-transfer behaviour of piles, particularly in cases where very high-test loads are required and conventional top-load pile load tests become impractical or technically difficult to perform. By applying the load within the pile through embedded hydraulic jacks, the method allows shaft friction and toe resistance to be mobilized independently and, when used together with appropriate instrumentation, provides detailed insight into pile behaviour. This case study presents the results of an instrumented bi-directional static load test performed on a barrette pile constructed at a project site characterized by deep alluvial deposits and a groundwater level located close to the ground surface. The test was conducted on a barrette pile with dimensions of 0.8 m × 2.8 m and a length of 47.0 m, in accordance with ASTM D8169/D8169M-18 Procedure A (Quick Test Procedure). A total of 36 strain gauges and 16 displacement sensors installed in the test pile enabled the determination of key parameters, including mobilized shaft resistance, toe resistance, and the equivalent top-down load–settlement response. The experimental results were compared with predictions obtained from analytical approaches and finite element analyses in order to evaluate the performance and applicability of these methods.
Keywords: *Bi-directional static load (K-Cell), Instrumentation, Barrette pile, Pile capacity, Shaft resistance*

[1] İnş.Yük. Müh, KASKTAŞ, esref.dinc@kasktas.com.tr (Sorumlu yazar)
[2] İnş.Yük. Müh, KASKTAŞ, ahmet.dinc@kasktas.com.tr
[3] İnş.Yük. Müh, KASKTAŞ, senol.adatepe@kasktas.com.tr
[4] İnş.Yük. Müh, KASKTAŞ, alp.gokalp@kasktas.com.tr

1. GİRİŞ

Derin temellerin tasarımındaki belirsizliklerin azaltılması ve optimize edilmiş çözümlerin üretilmesi, modern geoteknik mühendisliğinde performansa dayalı tasarım yaklaşımının benimsenmesiyle ivme kazanmıştır (Gökalp vd., 2024). Özellikle değişken arayüzey davranışları gösteren alüvyon zeminlerde, kazık-zemin etkileşiminin yerinde incelenmesi amacıyla yapılan enstrümante saha testleri, tasarım kabullerinin doğrulanmasında en gerçekçi referans verilerini sunar (Gökalp vd., 2024). Yüksek yük kapasitelerine ulaşılması gereken projelerde, geleneksel üstten yükleme deneyleri lojistik zorluklar, yüksek kurulum maliyetleri ve operasyonel riskler nedeniyle sınırlandırılmaktadır. Bu kısıtlamaları aşmak için yaygınlaşan çift yönlü statik yükleme testleri, kazık içine yerleştirilen hidrolik hücreler yardımıyla şaft sürtünmesi ile uç direncini birbirine reaksiyon olarak kullanır. Bu yöntem, derin temel elemanlarının gerçek yük-oturma davranışını belirlemede en verimli saha metotlarından biri haline gelmiştir. Ayrıca, kazık boyunca yerleştirilen gerinim ölçerler sayesinde, yükün derinlikle değişimi ve tabakalar arasındaki yük transfer mekanizması hassasiyetle izlenebilmektedir. Bu çalışma, İzmir'in Konak ilçesinde yer alan bir proje kapsamında inşa edilen, 800 × 2800 mm boyutlarında ve 47.05 m derinliğindeki bir baret kazığın davranışını ele almaktadır. Tasarım kabullerinin doğruluğunu test etmek amacıyla, söz konusu baret kazıkta çift yönlü statik yükleme testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen saha verileri ve enstrümantasyon sonuçları, kazığın yük taşıma kapasitesi ile derinliğe bağlı yük transfer mekanizmasını ortaya koymakta ve benzer zemin koşullarındaki gelecek tasarımlar için pratik veriler sunmaktadır.

2. SAHA VE ZEMİN KARAKTERİZASYONU

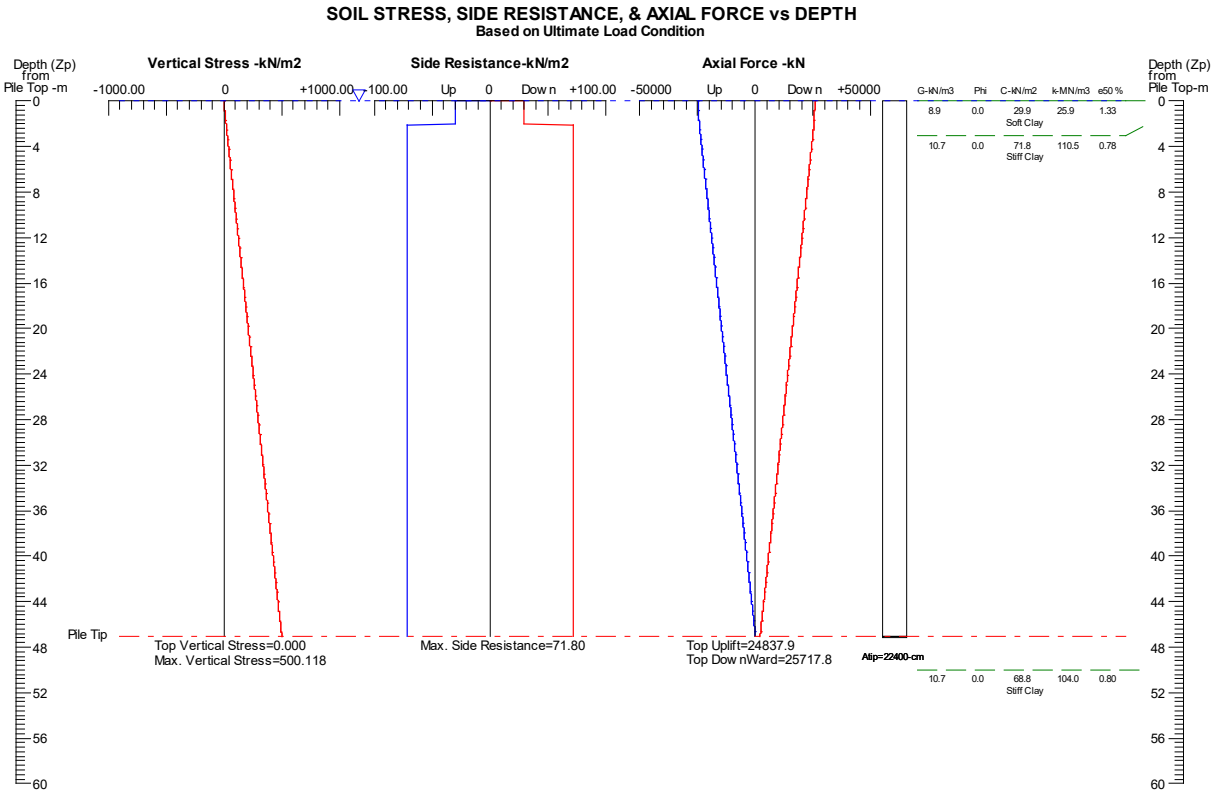
Projesi sahasında dolgu altında yüksek plastik killi tabakalar (CIH, CIV) ve alüvyon kum-silt birimleri (siSa/siGr) saptanmıştır. Yer altısu seviyesi yüzeye oldukça yakın olup (-1.30 m), zemin kıvamı orta-katı olarak belirlenmiştir. Saha ve laboratuvar çalışmaları neticesinde; zemin profilinin genel olarak yüksek/orta plastisiteli kil (CIH, CIM, CIV), killi/milli kum (ciSa/siSa) ve mil/milli çakıl (SiL/siGr) ardışıklığından oluştuğu tespit edilmiştir. Laboratuvar analizlerinde, söz konusu tabakaların likit limit (LL) değerlerinin %40 ile %75 aralığında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Genel kıvamı orta katı olarak değerlendirilen bu formasyona ait zemin profili ve mühendislik parametreleri Tablo 1'te özetlenmiştir. İzmir proje sahasında yeraltı su seviyesi 1.30 m derinlikte gözlenmiş olup, zemin kıvamı orta-katı olarak sınıflanmıştır.

Tablo 1. Geoteknik tasarım parametreleri

Jeolojik Birim	Derinlik (m)	Drenajsız Kayma Mukavemeti (cu, kPa)	Elastisite Modülü / Sekant Modülü (E=E50, MPa)
Dolgu	0.00 - 2.00	30	15.0
Alüvyon	2.00 -	72	35.0

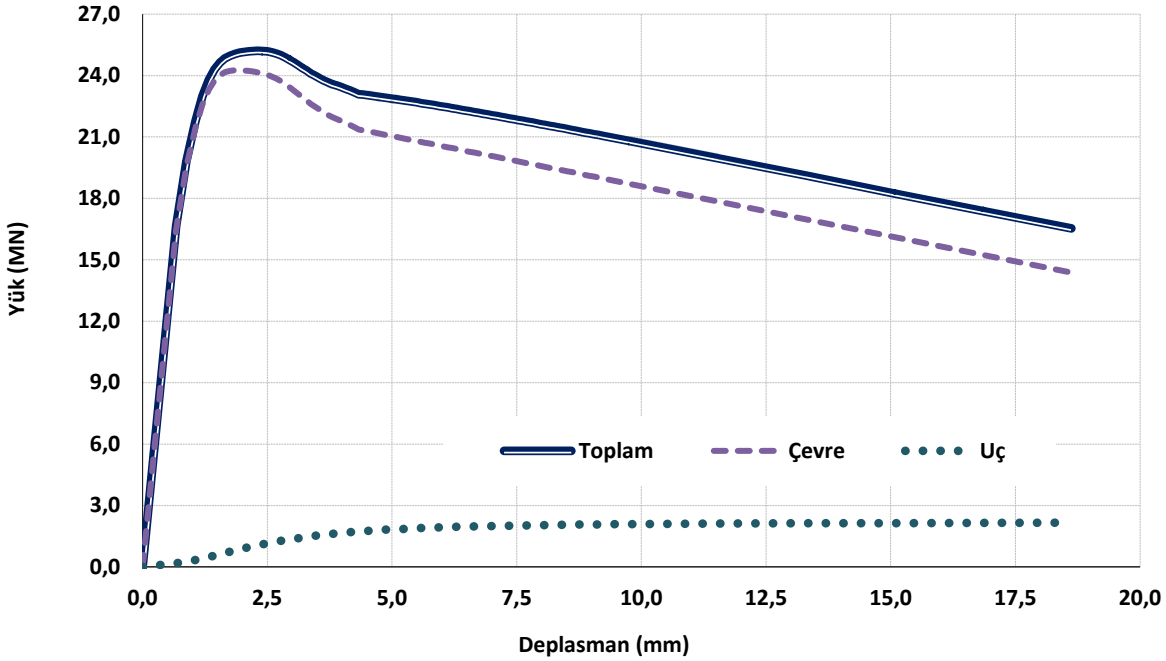
3. BARET KAZIK TASARIMI

Baret kazık tasarımında Allpile yazılımı ve Reese ve O'Neal (1988) tarafından geliştirilen hesap metodolojisi kullanılmıştır. Şekil 1'de, baret kazığa ait idealize edilmiş zemin profili ile birlikte derinliğe bağlı olarak değişim gösteren düşey gerilme, şaft direnci ve eksenel yük grafikler sunulmaktadır.



Şekil 1: Baret Kazık için düşey gerilme, çevre direnci, eksenel yük ve idealize zemin profilinin derinlik ile değişimi

Şekil 2, Reese ve O'Neal (1988) yöntemi doğrultusunda hesaplanan yük ve buna bağlı deplasman değişimlerini göstermektedir.



Şekil 2: Baret kazık için hesaplanan yük-deplasman grafikleri (Reese Metodu)

4. TEST METODOLOJİSİ VE ENSTRÜMANTASYON PLANI

İzmir'de gerçekleştirilen çalışmada, 0.80 × 2.80 m kesitinde ve 47.05 m uzunluğundaki baret kazık üzerinde çift yönlü statik yükleme testi (K-Cell) uygulanmıştır. Çift yönlü statik yükleme düzeneğinde, iki adet hidrolik krikodan oluşan ve her iki yönde 40 MN yük kapasitesi sunan K-Cell yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi taban kotu -36.05 m olarak ayarlanarak kazık üst ve alt parçalara ayrılmıştır.

Gerinim Ölçerler: Kazık gövdesi boyunca 9 farklı seviyede, her seviyede 4 adet olmak üzere toplam 36 adet titreşen telli gerinim ölçer yerleştirilmiştir.

Kriko ve Deplasman İzleme: K-Cell kriko açılmalarını ölçmek için 4 adet 500 mm kapasiteli analog deplasman sensörü; kazık gövde içi yer değiştirmeleri için 10 adet 500 mm kapasiteli analog deplasman sensörü ve kazık kafa hareketleri için 4 adet 200 mm kapasiteli analog deplasman sensörü monte edilmiştir.

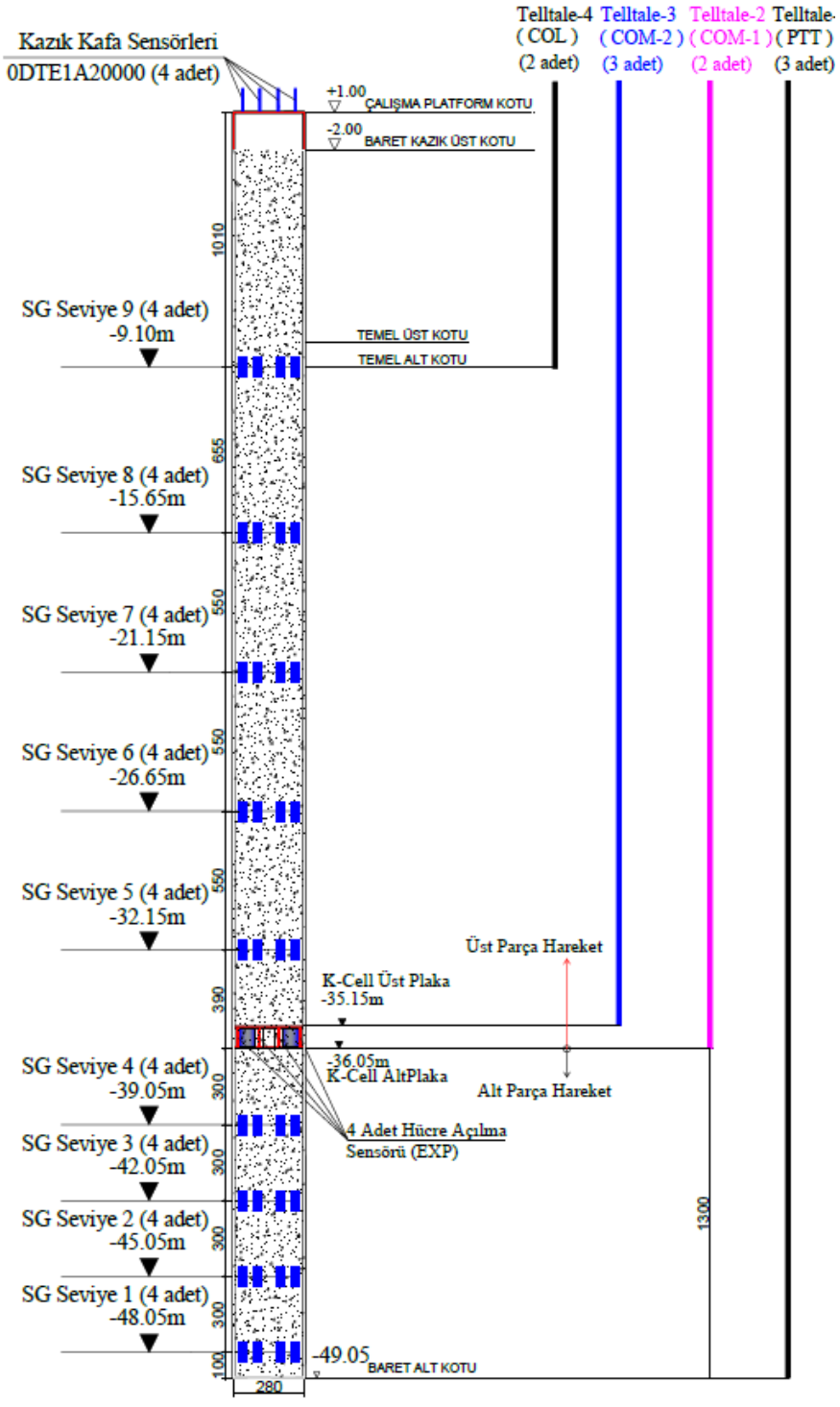
Referans Sistemi: Kazık başı hareketleri, kazık merkezinden çapın en az 3 katı uzaklığa yerleştirilen FBS beton blok mesnetli, 12 m uzunluğundaki çelik referans kirişi üzerinden izlenmiştir. Referans kirişinin kararlılığı Total Station ile sürekli denetlenmiştir

Veri Toplama: Tüm sensörler otomatik veri toplama ünitesine bağlanarak veriler 60 saniyelik aralıklarla, 0.01 mm hassasiyetle çevrim içi bulut platformuna aktarılmıştır. Şekil 3'de K-CELL yük hücresine ait montaj görseli verilmiştir.



Şekil 3: Yük hücresi (K-Cell) montajı

Şekil 4'de; baret kazık boyunca gerinim ölçer (strain gage) ve telltale (uzama ölçer çubuk) sensörlerinin yerleşimi, hücre açılması sensörlerinin konumu ve yükleme hücresinin detayları gösterilmektedir.

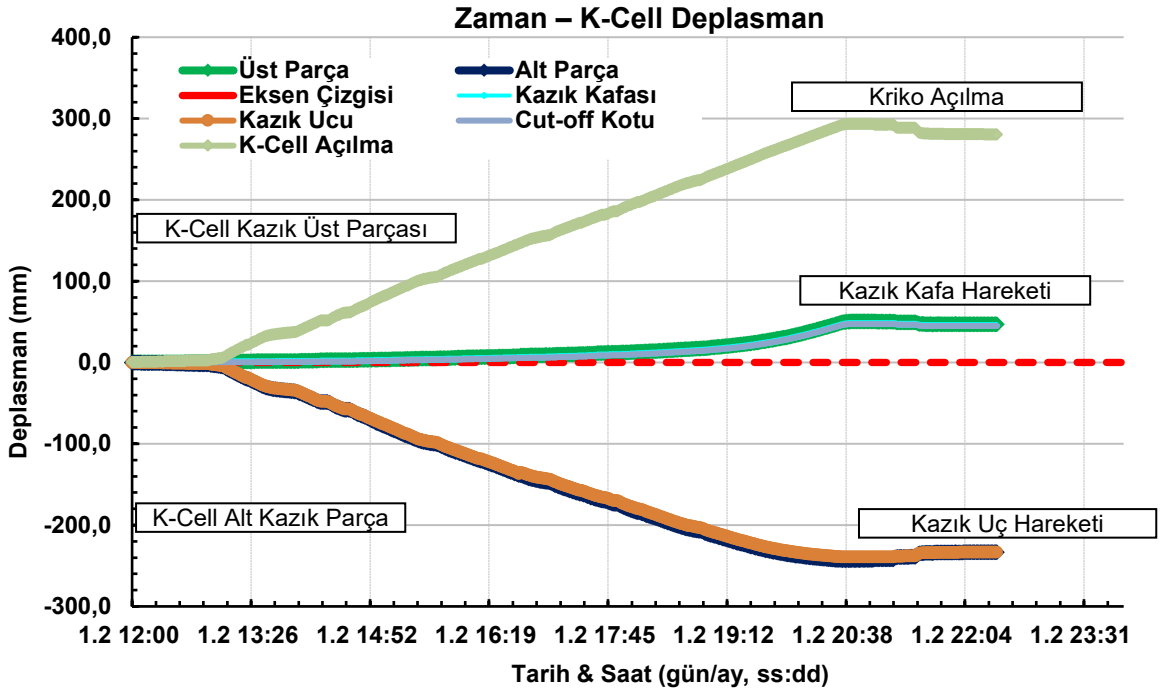


Şekil 4: Enstrümantasyon Baret Boyunca Yerleşim Planı

5. ÇİFT YÖNLÜ YÜKLEME TESTİ (K-CELL)

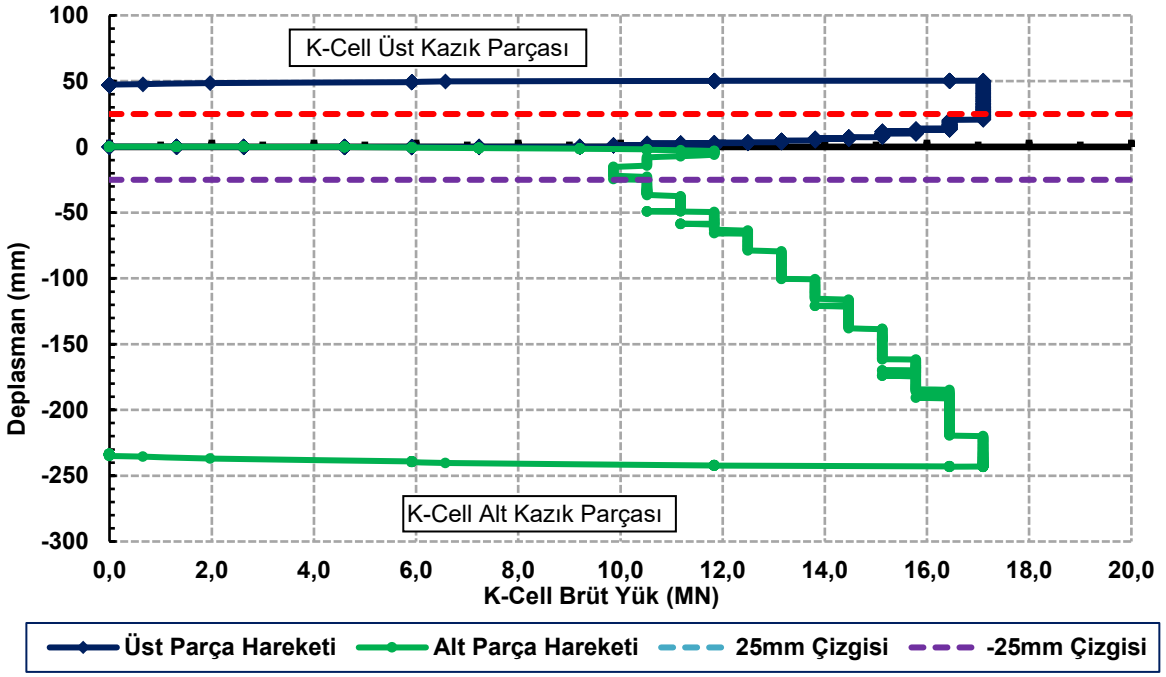
5.1 Yük - Deplasman Davranışının Belirlenmesi

Proje sahasında yapılan çift yönlü yükleme testinde hücre açılışı, kafa hareketi ve COM-1, COM-2, COL ve PTT seviyelerine ait deplasman grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Yük hücresi test boyunca maksimum yükte, maksimum 293.40 mm açılarak test tamamlandı.



Şekil 5: Deplasman – zaman eğrileri

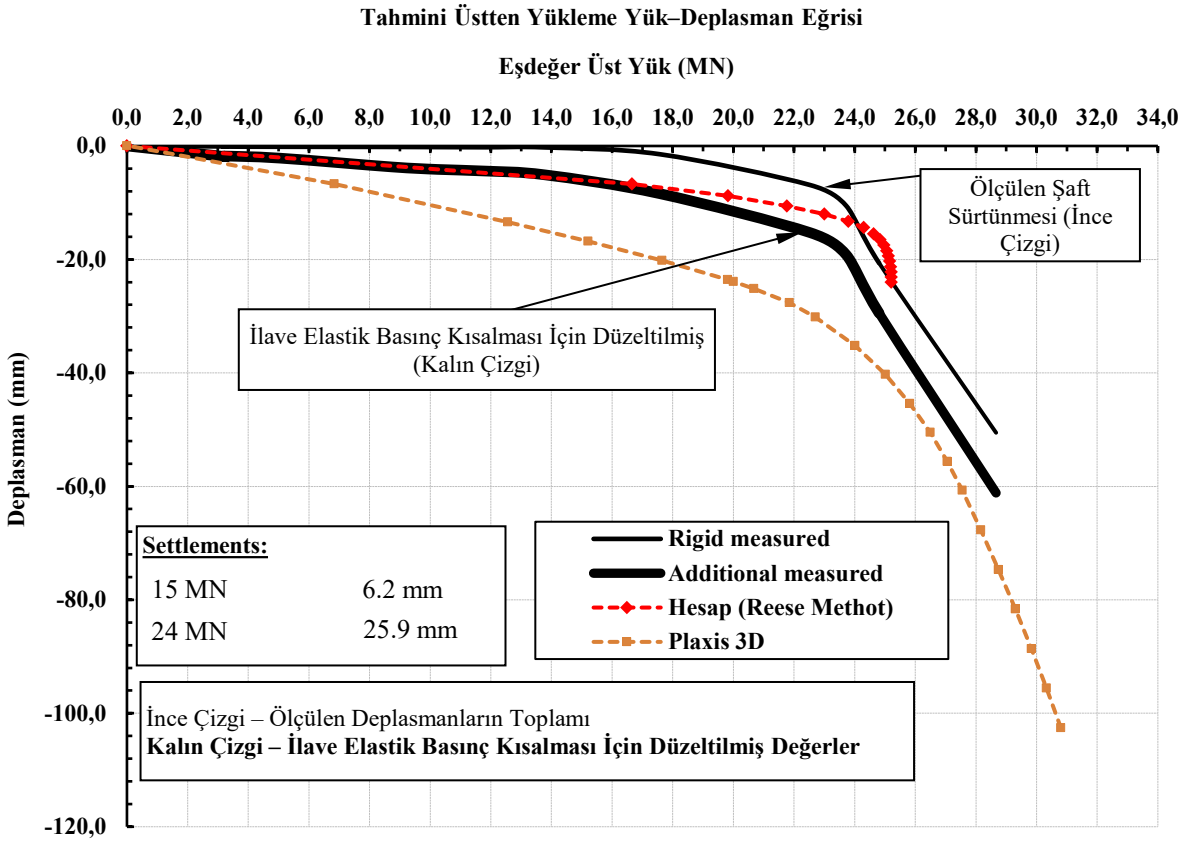
Yükleme testine ait yük-deplasman grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Yük – Deplasman Grafiği

Çift yönlü statik yükleme testi (BDSLT), kazık gövdesi içerisine belirli bir derinlikte yerleştirilen hidrolik yük hücresi (K-Cell) aracılığıyla kazığı üst ve alt bölümlere ayırarak yükün iki yönde uygulanmasını sağlayan bir deney yöntemidir. Bu yerleşim düzeninde üst

bölümün şaft direnci ile alt bölümün şaft ve uç direnci birlikte mobilize olduğundan, şaft sürtünmesi ve uç direnci doğrudan ve birbirinden tamamen bağımsız olarak belirlenemez; bu bileşenlerin ayrıştırılması yük aktarım analizi ve enstrümantasyon verileri ile gerçekleştirilir. Ancak bu yöntemin mühendislik pratiğinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için, deneyden elde edilen yukarı (şaft) ve aşağı (şaft+uç) yönlü yük-deplasman verilerinin, geleneksel bir üstten yükleme testi davranışını temsil eden eğriye dönüştürülmesi gerekmektedir (Massad, 2015). Vaka analizine konu test kazığına ait üstten yükleme eğrisi Şekil 7'de verilmiştir.

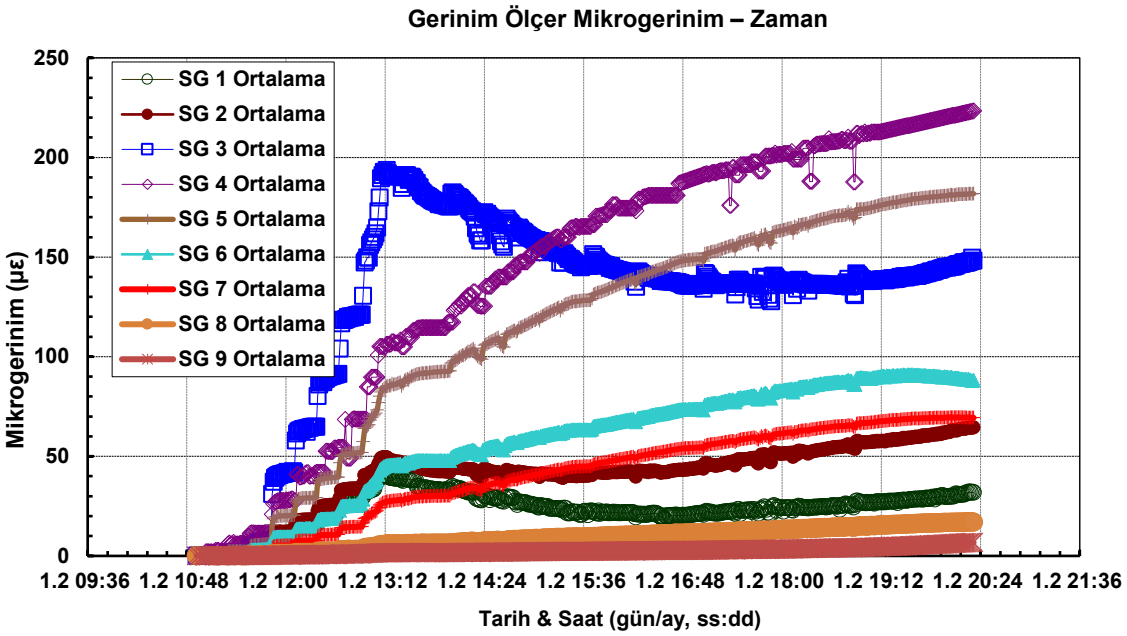


Şekil 7: Eşdeğer üstten yükleme eğrisi

Süperpozisyon prensibi, eşdeğer eğrinin türetilmesindeki ana teorik çerçeveyi oluşturur. Bu ilke gereğince, kazık ucu kapasitesi aşağı yönlü oturmalardan, şaft direnci ise yukarı yönlü yer değiştirmelerden sentezlenerek bir araya getirilir. Öte yandan gerek yük transfer mekanizmalarının gerekse zemin gerilme alanlarının iki metotta farklı nitelikte olması, çift yönlü yükleme testinde elde edilen hareketlerin geleneksel üstten yükleme deneyiyle doğrudan özdeşleştirilemeyeceğini göstermektedir (Fellenius et al., 1999; Massad, 2015).

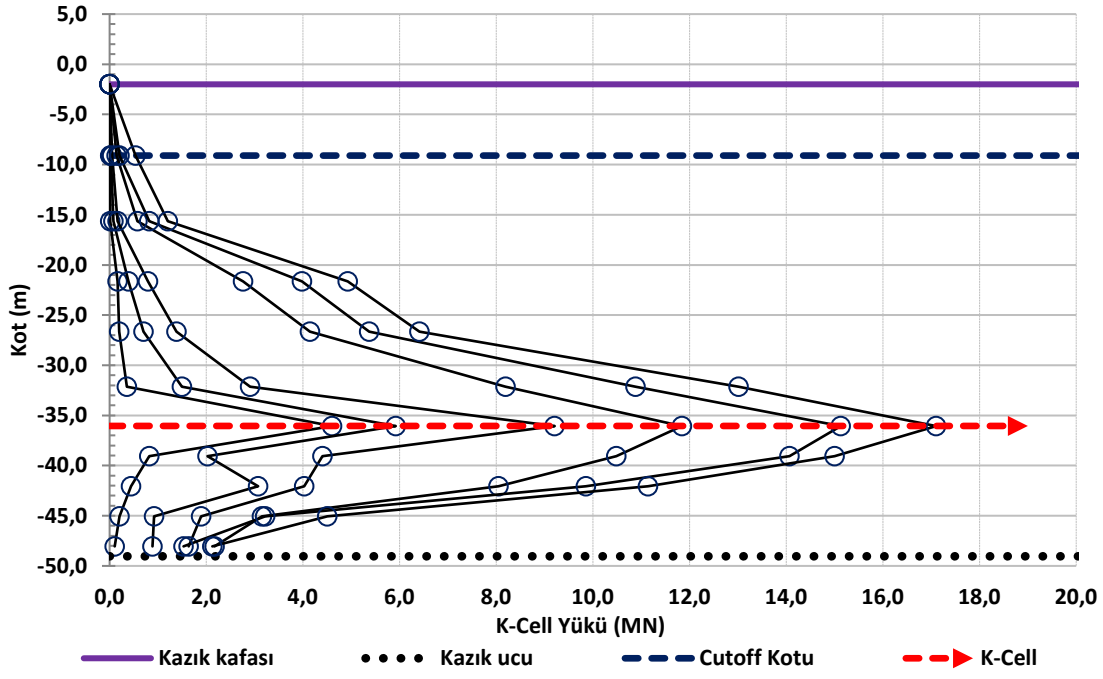
5.2 Mobilize Şaft Direncinin Belirlenmesi

Kazık yükleme testlerinde yükün derinlikle nasıl sönümlendiğini ve hangi zemin katmanında ne kadar direnç mobilize olduğunu anlamak için kazık gövdesi boyunca stratejik noktalara yerleştirilen gerinim ölçerler kritik önem taşır. Test kazığı özelinde, 9 farklı seviyede simetrik olarak konumlandırılan 36 adet titreşen telli gerinim ölçer, beton içindeki mikro gerinim ($\mu\epsilon$) değişimlerini yükleme süresince gerçek zamanlı olarak kaydetmiştir. Şekil 8'de gerinim öçler zaman grafiği verilmiştir.



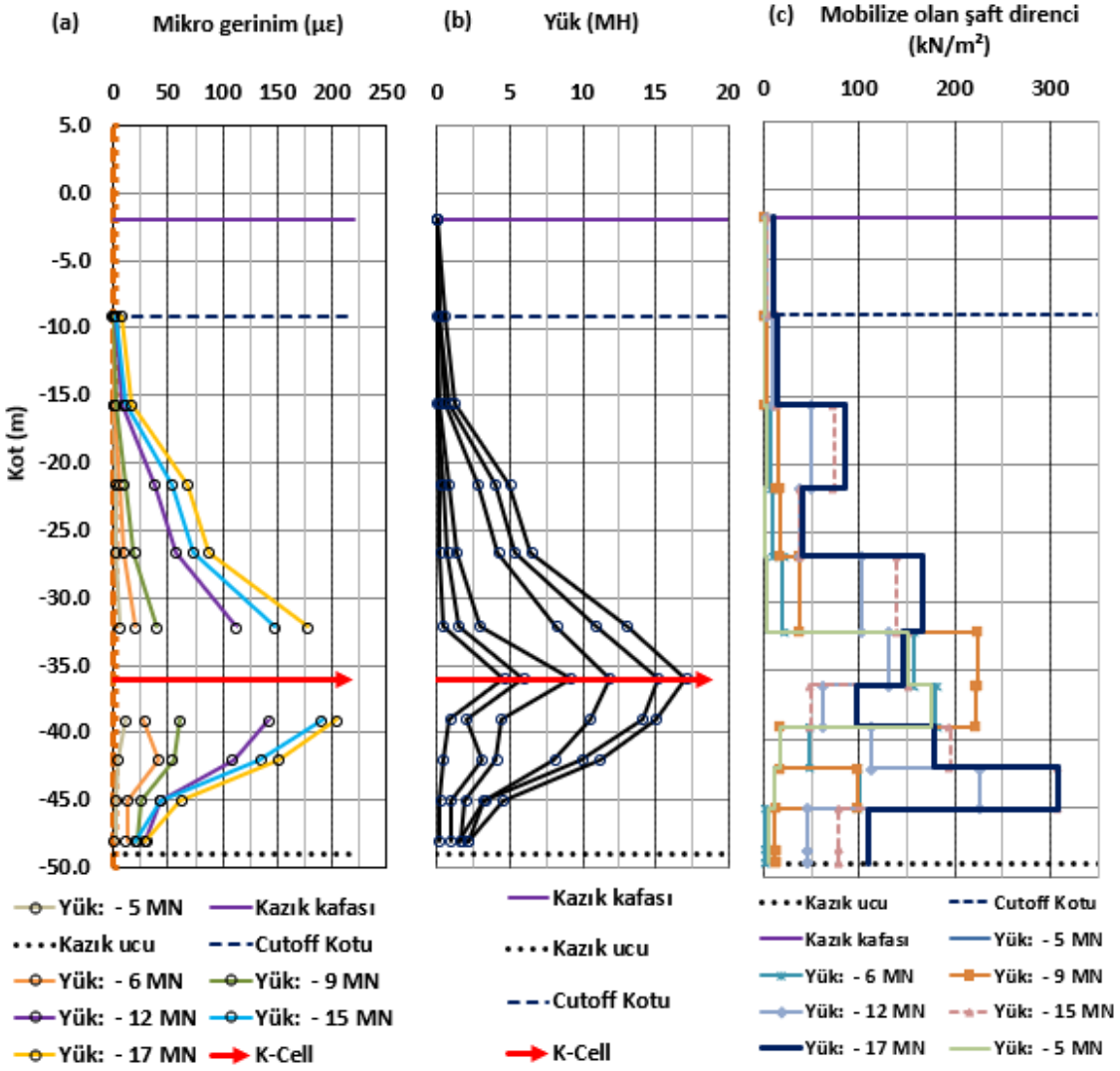
Şekil 8: Gerinim Ölçer (Mikrogerinim – Zaman)

Analizin ilk adımı, ölçülen mikro gerinim değerlerinin kazık kesitindeki eksenel kuvvete (F) dönüştürülmesidir. Bu işlemde temel prensip Hooke Yasası'dır ($F=E\cdot A\cdot\varepsilon$). Ancak, kazığın beton ve donatıdan oluşan kompozit yapısı nedeniyle "eşdeğer kesit rijitliği" ($\Delta F/\Delta\epsilon$) titizlikle hesaplanmalıdır. Proje kapsamında, beton küp numunelerinin basınç dayanımı sonuçları kullanılarak özgün rijitlik değeri (74.50 MN) belirlenmiştir. Deney sırasındaki yük hücresi ve gerinim ölçer verilerine göre yükün derinlikle değişimi (Şekil 9).



Şekil 9: Kazık kesitine aktarılan yükün derinliğe bağlı değişimi

Deney programı kapsamında gerçekleştirilen ölçümler neticesinde; gerinim ölçerlerden elde edilen mikro gerinim değerleri, kazık boyunca yük dağılımı ve mobilize olan şaft (çevre) direncinin derinlikle değişimi sırasıyla Şekil 10'da b ve c'de grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 10: Mikro gerinim, yük ve mobilize olan çevre direncinin derinliğe bağlı değişimi

Kazık gövdesindeki iki komşu gerinim ölçer seviyesi arasındaki yük farkı, o aralıktaki zemin tarafından karşılanan toplam şaft direncini verir. Bu fark, ilgili bölümün çevre alanına bölünerek ortalama birim şaft direnci (q_s) hesaplanır. Test kazığı test sonuçları incelendiğinde, yükün büyük bir kısmının K-Cell ünitesinin yerleştirildiği -36.05 m kotu çevresinde mobilize olduğu görülmektedir. Şekil 10'da "Mobilize Olan Şaft Direnci" grafiği, derinlikle birlikte çevre sürtünmesinin değişimini açıkça ortaya koymakta; alüvyon birimlerin farklı alt seviyelerinde şaft direncinin karakteristik bir artış sergilediği gözlenmektedir. Bu veriler, tasarım aşamasında öngörülen zemin parametrelerinin doğruluğunu tescil ederken, kazığın uç direnci ile çevre sürtünmesi arasındaki yük paylaşım mekanizmasını deneysel olarak doğrulamıştır.

6. SONUÇLAR

Bu vaka çalışması kapsamında, İzmir'in Konak ilçesindeki derin alüvyon birimlerde (yüksek/orta plastisiteli kil ve killi/milli kum-çakıl ardışıklığı) inşa edilen 0.80 m × 2.80 m kesitinde ve 47.05 m uzunluğundaki enstrümante baret kazık üzerinde gerçekleştirilen çift yönlü statik yükleme testi (K-Cell) gerçekleştirilmiştir ve aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

1. **Yük Taşıma Davranışı ve Deplasmanlar:** Deney boyunca -36.05 m kotuna yerleştirilen K-Cell hidrolik yük hücresi maksimum yükte, maksimum 293.40 mm açılarak test test sonlandırılmıştır. Hücrenin üstünde ve altında kalan kazık bölümlerinin yukarı ve aşağı yönlü hareketleri eş zamanlı olarak izlenmiş, kazık alt parçasında maksimum-26.64 mm deplasman kaydedilirken üst parçada 21.17 mm yukarı yönlü hareket gözlenmiştir.
2. **Eşdeğer Üstten Yükleme Davranışı:** BDSLT verilerinden süperpozisyon prensibi kullanılarak türetilen ve ilave elastik basınç kısalması için düzeltilen "Eşdeğer Üstten Yükleme Eğrisi" (Top-Down Response), yapının servis ve limit yükler altındaki oturma performansını başarıyla ortaya koymuştur. Hesaplanan eşdeğer eğriye göre kazık kafasında 15 MN yük altında 5.5 mm; tasarım limit sınırını temsil eden 24 MN yük altında ise 25.0 mm oturma meydana geldiği saptanmıştır. Bu durum, baret kazığın proje tasarım yüklerini güvenli tarafta kalarak karşılayabildiğini göstermektedir.
3. **Mobilize Şaft Sürtünmesi ve Yük Aktarımı:** 9 farklı seviyede konumlandırılan 36 adet titreşen telli gerinim ölçerden alınan mikro gerinim ($\mu\epsilon$) verileri, yükün derinlikle sönümlenme karakteristiğini ve tabakasal yük transfer mekanizmasını net bir şekilde doğrulamıştır. Yükün büyük bölümü K-Cell ünitesinin yerleştirildiği -36.05 m kotu çevresindeki derin alüvyon tabakalarda mobilize olduğu görülmüştür. Derinliğe bağlı olarak çevre sürtünmesinde (q_s) belirgin bir artış trendi gözlenmiş, alt alüvyon tabakalarda mobilize olan birim şaft direncinin 300 kN/m² sınırını aşan pik değerlere ulaştığı deneysel olarak desteklemiştir.
4. **Tasarım ve Analitik Metotların Validasyonu:** Sahadan elde edilen deneysel birim şaft direnci ve uç direnci verileri, Reese ve O'Neal (1988) metodolojisini temel alan Allpile önemli bir doğrulama veri seti sağlamıştır. Test sonuçları, alüvyon zeminlerde baret kazıkların şaft sürtünmesinin konvansiyonel tasarım öngörülerine kıyasla daha yüksek performans sergileyebileceğini ve bu tür derin temel projelerinde K-Cell enstrümantasyonunun optimizasyon süreçlerine doğrudan veri sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

BS EN ISO 22477-1 :2018: Geotechnical investigation and testing. Testing of geotechnical structures. Testing of columns: static compression load testing

Brown, D. A., Turner, J. P., Castelli, R. J., & Americas, P. B. (2010). Drilled shafts: Construction procedures and LRFD design methods (No. FHWA-NHI-10-016). United States. Federal Highway Administration.

Gökalp, A., Adatepe, Ş., & Dinç, A. (2024, October 17–18). *A case study: Evaluation of instrumented bored pile loading test (PLT) in silty sand soils* . 19th National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey.

Fellenius, B. H., Altaee, A., Kulesza, R., & Hayes, J. (1999). O-cell testing and FE analysis of 28-m-deep barrette in Manila, Philippines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *125*(7), 566-575.

Massad, F. (2015). On the interpretation of the bidirectional static load test. *Soils and Rocks*, *38*(3), 249-262.

Reese, L.C. & O'Neill, M.W., Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods, U.S. Department of Transportation, FHWA, Office of Implementation, McLean, VA, 1988.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
TOP	Top of pile displacement / Kazık üst deplasmanı
EXP	K-Cell Expansion / K-Cell Hücresi Açılması
PTT	Pile tip displacement / Kazık uç deplasmanı
COM-1	K-Cell alt plaka hareketi
COM-2	K-Cell üst plaka hareketi
COL	Cut-off level displacement / Cut-off deplasmanı