Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
17. Ulusal Konferansı

26-28 Eylül 2018
İstanbul Üniversitesi, İstanbul

EUROCODE – 7'YE GÖRE DAYANMA YAPILARININ GEOTEKNİK TASARIMI

GEOTECHNICAL DESING OF RETAINING STRUCTURES ACCORDING TO EUROCODE - 7

S.Miraç KARADEMİR[1], Özgür KURUOĞLU[2]

ÖZET

Bu çalışmada, Fas'ın Casablanca şehrindeki bir altgeçit projesi kapsamında, diyafram duvar teknolojisi kullanılarak imalatı öngörülen altgeçit yapısına ait konsol duvarların Eurocode – 7 ve Fransa Ulusal Eklentisi doğrultusunda gerçekleştirilen geoteknik hesaplamalar ile hesap detaylarına yer verilmiştir. Altgeçit yapısı, yapının konsol diyafram duvarlar ve kapalı kutu kesit ile teşkil edileceği iki ana kısımdan oluşmaktadır. Proje bölgesinde, ihale sürecinde yapılmış olan saha araştırmalarına ek olarak, uygulama aşamasından önce ilave araştırma çalışmaları yapılmış olup, öncelikli olarak bu saha çalışmalarına ait veriler kullanılarak zemin ve kaya birimlere ait geo-mekanik parametreler belirlenmiştir. Geoteknik tasarım kapsamında, konsol diyafram duvar ile teşkil edilecek kesim için yatay yükler altında soket boyunun yeterliliği Eurocode – 7 ve Fransa Ulusal Eklentisi kuralları gereğince kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar yazılımları ile hesaplanan değerler ile kıyaslanmıştır.
Anahtar kelimeler: Eurocode – 7, diyafram duvar, altgeçit, soket boyu

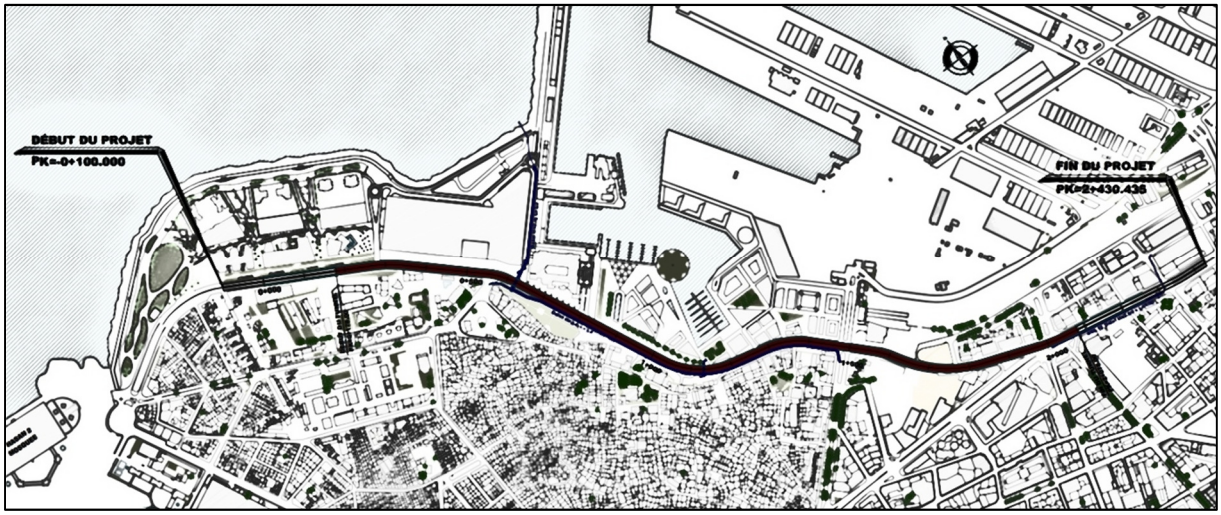
ABSTRACT

In this study, the geotehnical calculation details are presented for an underpass project which is located in Casablanca, Morocco. The underpass will be constructed by diaphragm walls. The design is carried out according to Eurocode-7 and French National Annexes. The underpass structure consists of two main parts as cantiliver diaphragm walls in the entry-exit and closed box section in the middle. Site investigations were carried out both during the bidding phase and before the construction phase. Geo-mechanical parameters were determined according to site investigation results. In the scope of geotechnical desing, the adequacy of the socket length of diaphragm walls which are subjected to lateral loads is controlled for cantilever diaphragm walls. All calculations were carried out according to Eurocode-7 and French National Annexes. Results are compared with finite element analysis results.
Keywords: Eurocode - 7, diaphragm wall, underpass, socket length

[1] İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje A.Ş., mkarademir@yukselproje.com.tr (Sorumlu yazar)
[2] Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje A.Ş., ozgurk@yukselproje.com.tr

1. GİRİŞ

Fas'ın batısında bulunan ve Atlas Okyanusu'nun kıyısında yer alan Casablanca şehri önemli bir liman kenti olma özelliğini taşımakla birlikte, Fas'ın en büyük şehridir. Yaklaşık nüfusu 3.4 milyon olan şehrin, önemli ulaşım akslarında nüfusa bağlı olarak trafik problemleri yaşanmaktadır. Söz konusu trafik problemlerini çözmeye yönelik olarak, şehrin limanına paralel olarak uzanan bulvarın yaklaşık olarak 2.0 km uzunluğundaki kesimi yapılacak olan altgeçit vasıtasıyla yer altına alınması planlanmıştır. Proje alanını gösteren plan Şekil 1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Altgeçit projesi plan görünümü (Ölçeksiz)

Altgeçit yapısı geleneksel bir altgeçit yapısı olarak giriş ve çıkış rampa kesimleri konsol duvarlar ile; orta kesimi ise kapalı kesit ile teşkil edilecektir. Çevresel şartlar ve şartname gereklilikleri göz önünde bulundurularak, yapının diyafram duvarlar ile ve kapalı kutu kesit olarak imal edilecek orta kesiminin yukarıdan aşağıya (top-down) inşaat metodu ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Proje bölgesinde, yapım öncesi ihale sürecinde ve yapım sırasında uygulama projesi aşamasında olmak üzere iki set halinde zemin araştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tasarımda Eurocode ve Fransız Ulusal Eklentileri ile Fransız Özel Tasarım Şartnameleri kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, konsol duvar olarak teşkil edilecek çıkış kesiminden konsol yüksekliğinin en fazla olduğu kritik kesit üzerinden Eurocode 7'ye göre tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken hususlar açıklanacaktır.

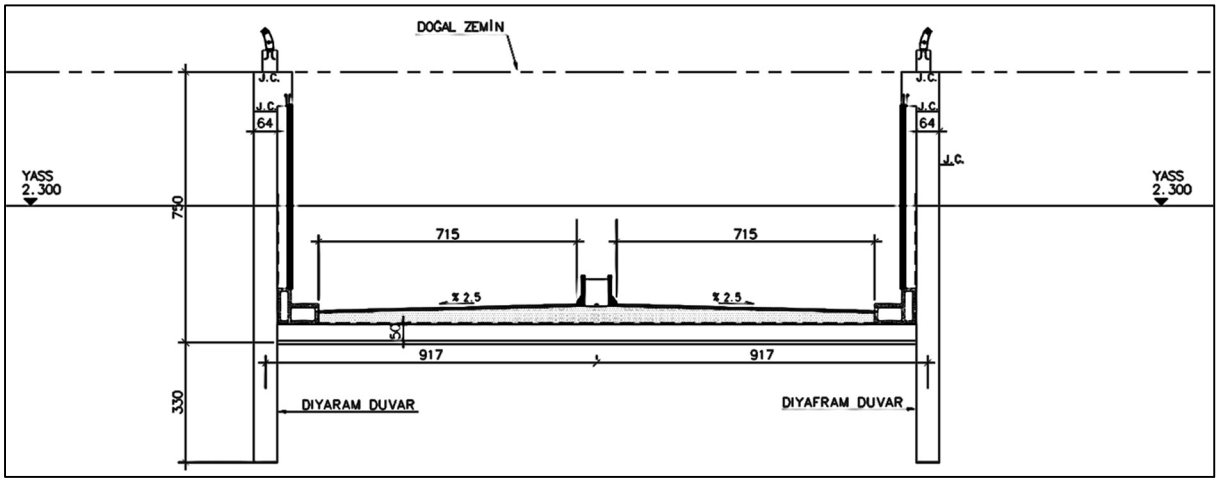
2. ZEMİN PROFİLİ VE KRİTİK KESİT

Proje bölgesinde gerçekleştirilen araştırma çalışmaları sonucunda, idealize zemin profili yüzeyde gözlemlenen değişken kalınlıktaki yapay dolgu (Ra) ve onun altında sırasıyla kum-çakıl (SSt-w6) ve onun altında yer alan üst seviyeleri ayrışmış (Sc-w5), alt seviyeleri sağlam olan Şist (Sc) birimlerinden oluşmaktadır. Belirlenen kritik kesit için idealize zemin profilini ve parametrelerini gösteren tablo, aşağıda sunulmaktadır.

Tablo 1. İdealize zemin profili ve parametreler

Birim Adı	Tabaka Kalınlığı (m)	Zemin Parametreleri		
		γ (kN/m^3)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Yapay Dolgu (Ra)	1.50	19	0	30
Kum-Çakıl(Sst-W6)	3.60	20	0	38
Ayrış.Şist (Sc-w5)	-	24	41	39

Konsol diyaframı duvarın en fazla yüksekliğe sahip olduğu kritik kesite ait bilgiler Şekil 2.'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Konsol diyaframı duvar – Kritik Kesit (Ölçeksiz)

3. TASARIM AŞAMALARI

Tasarım çalışmaları kapsamında, konsol diyaframı duvar ile teşkil edilecek kesim için yatay yükler altında soket boyunun yeterliliği Eurocode – 7 ve Fransa Ulusal Eklentisi kuralları gereğince kontrol edilmiştir.

3.1. Soket Boyu Kontrolü – Limit Denge Yöntemi

Konsol duvarların soket boyunun yeterliliğinin limit denge yöntemine göre kontrolü, "NF P 94-282 - Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement – Écrans" şartnamesi Bölüm 9.3'e göre gerçekleştirilmiştir. Esas olarak, limit denge metodu ve zemin-yapı etkileşim metodu adı altında iki farklı yöntem önerilmiş olup, konsol duvarlar için daha çok tercih edilen limit denge metodunda izlenen prosedür aşağıda özetlenmektedir:

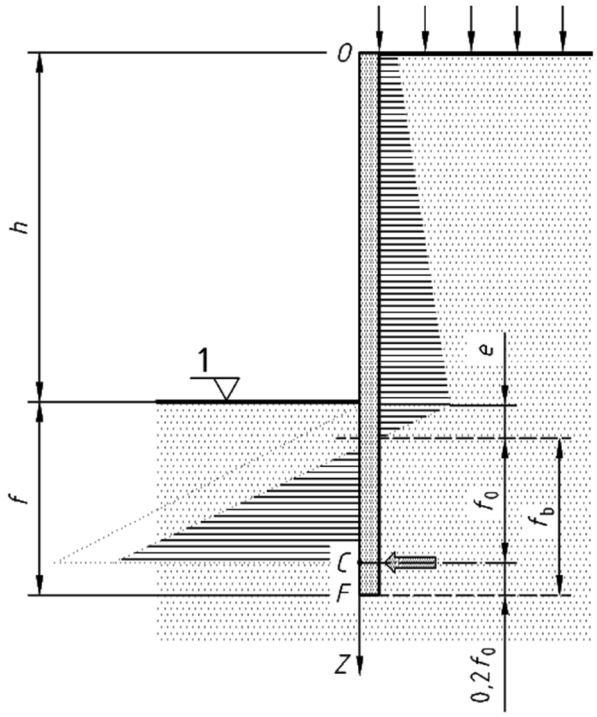
Soket boyunun yeterli kabul edilebilmesi için aşağıdaki eşitsizlik sağlanmalıdır:

$$f_b \geq 1.2\ f_0 \qquad (1)$$

Burada,

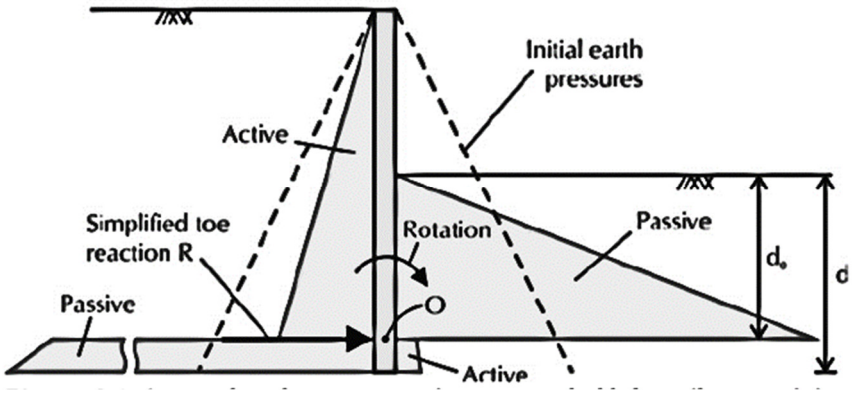
f_b, dayanma yapısı üzerindeki net yatay gerilmenin sıfır olduğu noktanın altında kalan soket boyu

f_0, dayanma yapısının uç noktasına göre alınan momentlerin eşit olması için gereken minimum soket boyudur. Notasyonları gösteren çizim Şekil 3.'te sunulmaktadır.



Şekil 3. Limit denge yöntemine göre soket boyu kontrolü – Notasyonlar

Şartnamede limit denge yöntemi olarak tariflenen yöntem, esasında literatürdeki konsol gömülü duvarların stabilitesinin kontrolü için kullanılan sabit zemin (fixed earth) koşulunu temsil etmektedir. Bu yöntem, gömülü duvar sisteminin "O" noktası etrafında rotasyonuna izin verilirken kuvvet ve moment dengesinin sağlanması varsayımına dayanmaktadır (Bkz. Şekil 4.).



Şekil 4. Sabit zemin (Fixed earth) koşulu hesap varsayımları

Yukarıdaki eşitsizliğe ek olarak, ilgili şartname, özellikle zemin dayanımının derinliğe bağlı olarak azaldığı durumlarda, momentin sıfır olduğu noktanın (Şekil 3.'teki C ve Şekil 4.'teki O noktaları) altında kalan sokette oluşacak ters yöndeki pasif kuvvet bileşkesinin, yatay dengeyi sağlayacak olan kuvvetten büyük olduğunun teyit edilmesini önermektedir. Bu sebeple aşağıdaki eşitsizlik kontrol edilmelidir:

$$C_{t;d} \leq C_{m;d} \quad (2)$$

Burada,

$C_{t;d}$, Yatay kuvvet dengesi için gerekli olan ters pasif direnç kuvveti tasarım değeri

$C_{m;d}$, C noktasının altında mobilize olabilecek ters pasif direnç kuvveti tasarım değeridir.

Yukarıda belirtilen hesaplamalar gerçekleştirilirken, aktif basınç yük olarak değerlendirilmekte ve 1.35 yük faktörü ile artırılırken, pasif basınç ise direnç olarak kabul edilmekte ve 1.40 azaltma faktörü ile azaltılmaktadır. Geçici kazı aşamalarında azaltma faktörü 1.10 ile sınırlandırılabilmektedir.

3.2. Soket Boyu Kontrolü – Zemin/Yapı Etkileşim Modeli

Zemin/yapı etkileşim yöntemine göre kontrol, "NF P 94-282 - Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement – Écrans" şartnamesi Bölüm 9.2'ye göre gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, radyenin imalatı sonrasındaki kalıcı durumun kontrolü için kullanılmaktadır.

Bu yöntemde aşağıdaki eşitsizlik sağlanmalıdır:

$$B_{t;d} \leq B_{m;d} \quad (3)$$

Burada,

$B_{t;d}$, Yatay denge için mobilize olmuş pasif direnç tasarım kuvveti

$B_{m;d}$, Mobilize olabilecek pasif direnç tasarım kuvvetidir.

Mobilize olabilecek pasif direnç tasarım kuvveti ($B_{m;d}$) hesaplanırken, karakteristik tasarım kuvvetine ($B_{m;k}$) kalıcı durum için 1.40, geçici durum için 1.10 azaltma faktörü uygulanacaktır. Yatay dengeyi sağlayan mobilize olmuş pasif direnç tasarım kuvveti ($B_{t;d}$) hesaplanırken ise, karakteristik tasarım kuvvetine ($B_{t;k}$) 1.35 yük faktörü uygulanarak artırılacaktır. Bu durumda sistemin toplam güvenliği kalıcı durum için 1.89; geçici durum için ise 1.485 olarak değerlendirilebilir. $B_{t;d}$ değeri, el hesabı ile hesaplanabileceği gibi, yazılımlar (limit denge ya da sonlu elemanlar yazılımları) yardımı ile de servis durumu koşulları altında hesaplanabilmektedir.

3.3. Yanal Zemin Basınçlarının Hesaplanmasına İlişkin Detaylar

Konsol dayanma yapıları için, soket yeterliliğinin kontrolü amacıyla gerçekleştirilecek olan analizlerde, her iki yöntem (limit denge ve zemin/yapı etkileşim yöntemleri) için de yanal zemin basınçlarının hesaplanması gerekmektedir. Düşey bir duvar üzerinde, zeminin birim hacim ağırlığı (γ), yüzeydeki düzgün yayılı yük (q), içsel sürtünme açısı (ϕ') ve efektif kohezyon (c') parametrelerine bağlı olarak oluşan yanal zemin basıncına ait limit değerler, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_a(z) = K_a[\int \gamma dz + q - u] + u - cK_{ac} \quad (4)$$

$$K_{ac} = 2\sqrt{K_a(1 + a/c)} \quad (5)$$

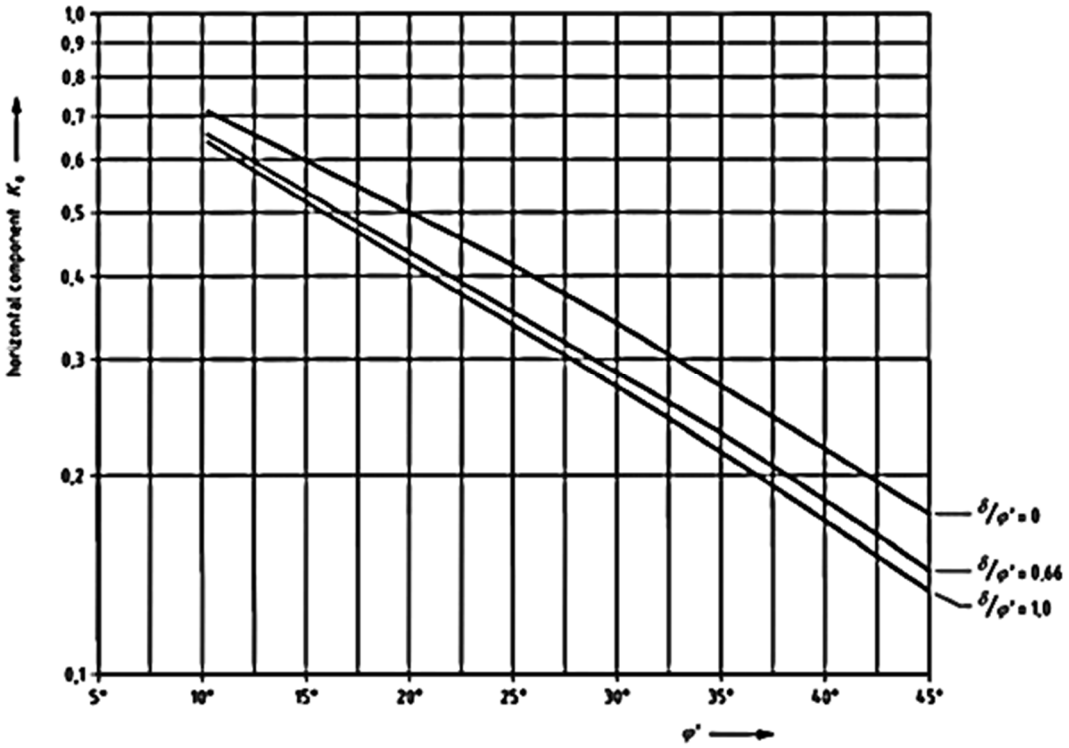
$$\sigma_p(z) = K_p[\int \gamma dz + q - u] + u + cK_{pc} \tag{6}$$

$$K_{pc} = 2\sqrt{K_p(1 + a/c)} \tag{7}$$

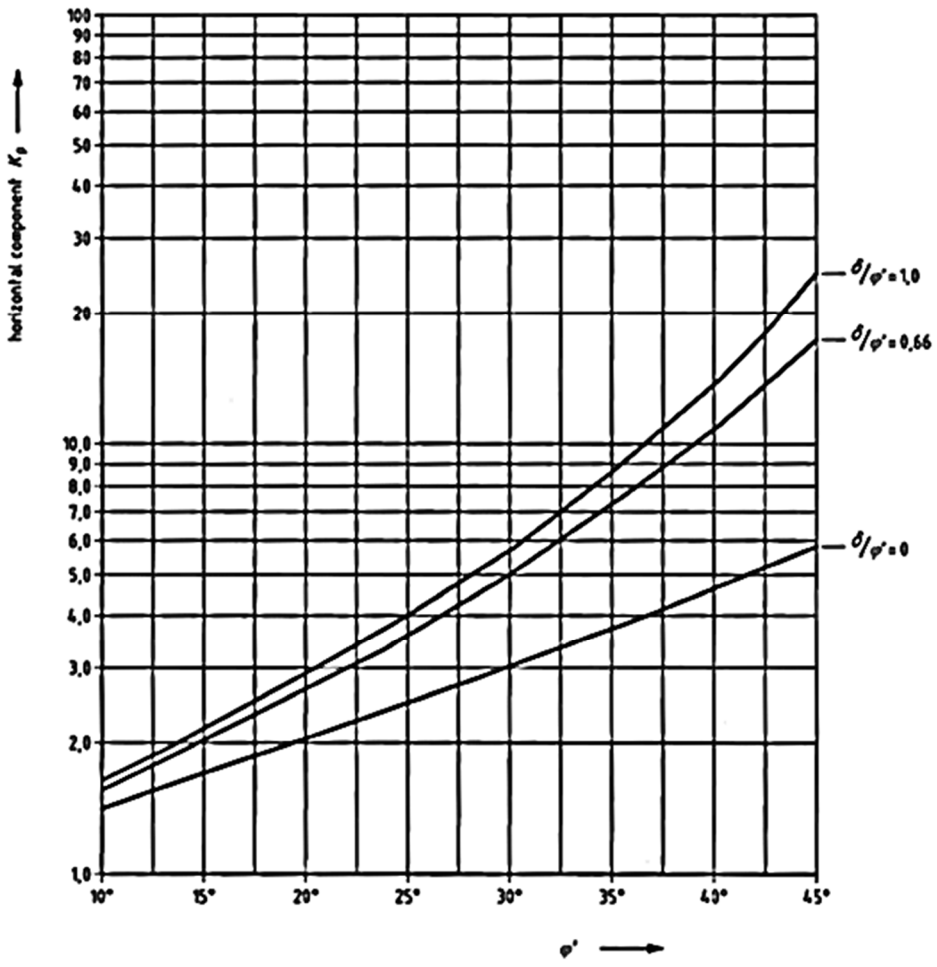
Burada, a zemin ve duvar arasındaki adhezyon, c kohezyon, K_a aktif yanal basınç katsayısı, K_p pasif yanal basınç katsayısı, q sürşarj yükü, z derinlik ve u boşluk suyu basıncıdır.

Aktif ve pasif yanal basınç katsayılarının hesaplanmasına ilişkin detaylı analitik prosedür, Eurocode – 7 Ek C.2'de sunulmakta olup, bu değerlerin grafiksel yöntemlerle elde edilmesi amacıyla da Ek C.1'de farklı içsel sürtünme açısı (ϕ'), dayanma yapısı gerisindeki zeminin yatay ile yaptığı açı (β) ve duvar ile zemin arasındaki sürtünme açısı (δ) değerleri için hazırlanmış grafikler bulunmaktadır. Dayanma yapısının gerisinde zeminin yatay olduğu durum için hazırlanmış olan grafikler, aktif ve pasif basınç katsayısı değerleri için Şekil 5. ve Şekil 6.'da sırasıyla sunulmaktadır. Grafiklerden görüleceği üzere, aynı içsel sürtünme açısı (ϕ') değeri için, pasif basınç katsayısının (K_p) zemin ile duvar arasındaki sürtünme açısı olan, δ, değerine bağlı olarak önemli mertebelerde farklılık göstermektedir. Bu durum, tasarım açısından, δ değerinin seçimini önemli bir husus haline getirmektedir. Tasarım duvar sürtünme açısı değerinin (δ_d) belirlenmesine ilişkin Eurocode – 7'de aşağıdaki eşitlik önerilmektedir:

$$\delta_d = k\ \phi_{cv;d} \tag{8}$$



Şekil 5. Farklı içsel ve duvar sürtünme açısı değerleri için aktif basınç katsayısı



Şekil 6. Farklı içsel ve duvar sürtünme açısı değerleri için pasif basınç katsayısı

Burada, k dayanma yapısının türüne göre katsayı, $\phi_{cv;d}$ ise kritik durum sürtünme açısı değeridir. Eurocode – 7 k değerinin prekast betonarme elemanlar veya çelik palplanş ile teşkil edilen dayanma yapıları için 2/3 değerini aşmamasını önerirken, yerinde dökme betonarme dayanma yapıları için k değerinin 1.0 olarak alınabileceğini önermektedir.

4. STABİLİTE ANALİZLERİ

Analizler kapsamında, bir önceki bölümde detayları açıklanan stabilite hesapları ve tahkikler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 2'de verilen zemin parametreleri ile gerçekleştirilen geçici ve kalıcı durum analiz sonuçları aşağıda özetlenmektedir.

4.1. Soket Boyu Kontrol Hesapları – Limit Denge Modeli

Geçici durum konsol diyaframı duvara ait soket boyu hesapları limit denge yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Hesaplar el hesabı ile gerçekleştirilebileceği gibi, proje kapsamında sunum dilinin Fransızca olması sebebiyle, Fransızca ara yüze sahip ve Eurocode-7 ile tasarım yapmaya izin veren bir yazılım olan K-Rea yazılımı kullanılmıştır. Programda oluşturulan modelde, veri olarak zemin parametreleri, su seviyesi, kazı aşamaları ve duvarın özellikleri ile duvar uzunluğu bilgileri girilebilmektedir. Nihai Limit Durum (Ultimate Limit State - ULS) koşulları altında gerçekleştirilen hesaplarda kazı aşamaları geçici ve kalıcı olarak ayrılabilmektedir. Geçici

durum için farklı duvar/zemin sürtünme açısı oranına göre gerçekleştirilen analiz sonuçları aşağıdaki tabloda sunulmaktadır:

Tablo 2. Konsol duvar soket yeterliliği hesap sonuçları (Geçici Durum)

Duvar/Zemin sürtünme açısı (δ/ϕ)	Tüm birimler için 1.00	Zemin birimler için 0.67 Kaya birimler için 0.33
Kazı derinliği (m)	7.50	7.50
İnşaat aşaması tipi	Geçici	Geçici
Net gerilmenin sıfır olduğu nokta ile momentlerin uç noktada eşitlendiği yer arasındaki mesafe (f_0 – metre)	1.87	2.71
Soket boyu (f_b – metre)	2.30	3.30
f_b / f_0	1.228 > 1.200	1.219 > 1.200
Yatay kuvvet dengesi için gereken ters pasif kuvvet, $C_{t,d}$	746.15	635.51
Mobilize olmuş ters pasif kuvvet, $C_{m,d}$	940.92	786.63
Mobilizasyon faktörü	0.788	0.801

4.1. Soket Boyu Kontrol Hesapları – Zemin/Yapı Etkileşim Modeli

Zemin/Yapı etkileşim modeli analizleri kapsamında, K-Rea yazılımı ile kalıcı durum modellemesi ve buna ek olarak Plaxis sonlu elemanlar yazılımı ile hem geçici hem de kalıcı durum modellemesi yapılmıştır.

Kalıcı durum için bir önceki bölümde belirtilen duvar/zemin sürtünme açısı oranlarına göre analizler K-Rea yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Tablo 3.'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Konsol duvar soket yeterliliği hesap sonuçları (Kalıcı Durum)

Duvar/Zemin Sürtünme Açısı (δ/ϕ)	Tüm birimler için 1.00	Zemin birimler için 0.67 Kaya birimler için 0.33
Kazı Derinliği (m)	7.50	7.50
İnşaat Aşaması Tipi	Kalıcı	Kalıcı
Soket boyu (m)	2.30	3.30
Yatay kuvvet dengesi için mobilize olmuş pasif direnç kuvveti, $B_{t,d}$	728.72	720.57
Mobilize olabilecek pasif direnç kuvveti, $B_{m,d}$	1095.12	1048.39
Mobilizasyon faktörü	0.665	0.687

Plaxis sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde, farklı soket boyu değerleri için geçici ve kalıcı durumdaki soket önünde mobilize olmuş pasif direnç kuvveti değeri elde edilmekte olup, bu değerin pasif direnç kapasitesi ile kıyaslaması yapılmıştır. Analizlerde 2.50 m, 3.00 m ve K-Rea analizi ile yeterliliği teyit edilen 3.30 m soket boyu olmak üzere toplamda 3 farklı soket boyu kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına ait özet tablolar, geçici ve kalıcı durum için sırasıyla aşağıda sunulmaktadır.

Tablo 4. Zemin/Yapı etkileşim modeli (Plaxis) analiz sonuçları (Geçici durum)

Soket boyu (m.)	Yatay kuvvet dengesi için mobilize olmuş pasif direnç kuvveti, $B_{t,d}$ (kN/m)	Mobilize olabilecek pasif direnç kuvveti, $B_{m,d}$ (kN/m)	Mobilizasyon faktörü
2.50	560.4	922.3	0.608
3.00	537.2	1173.2	0.458
3.30	553.8	1334.3	0.415

Tablo 5. Zemin/Yapı etkileşim modeli (Plaxis) analiz sonuçları (Kalıcı durum)

Soket boyu (m.)	Yatay kuvvet dengesi için mobilize olmuş pasif direnç kuvveti, $B_{t,d}$ (kN/m)	Mobilize olabilecek pasif direnç kuvveti, $B_{m,d}$ (kN/m)	Mobilizasyon faktörü
2.50	558.1	724.7	0.770
3.00	531.5	921.8	0.577
3.30	549.1	1048.4	0.523

4.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi

Hesap sonuçlarına ait özet tablolardan, limit denge analizlerinde daha düşük yük faktörleri ile çalışılıyor olmasına rağmen, geçici durumun tasarımı kontrol ettiği anlaşılmaktadır.

Buna ek olarak, soket bölgesindeki birimin sahip olduğu yüksek içsel sürtünme açısı değeri göz önünde bulundurularak, δ/ϕ değerinin Eurocode – 7'de önerildiği gibi 1.0 alınması durumunda soket boyu yaklaşık olarak %30 daha az hesaplanabilmektedir. Ancak, proje bölgesindeki yerel pratikler de göz önünde bulundurularak, proje kapsamında bu katsayının zemin birimler için 0.67, kaya birimler için 0.33 olarak alınması uygun görülmüştür.

Zemin/yapı etkileşim modeli ile gerçekleştirilen analizlerde ise limit denge analizlerine kıyasla daha düşük soket boyu değerlerinin yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu bildiri kapsamında, Fas'ın Casablanca şehrindeki bir altgeçit projesinde, diyafram duvar teknolojisi kullanılarak imalatı öngörülen altgeçit yapısına ait konsol duvarların Eurocode – 7 ve Fransa Ulusal Eklentisi doğrultusunda gerçekleştirilen geoteknik hesaplamaları ile hesap detayları sunulmuştur. Proje bölgesinde, ihale sürecinde ve uygulama aşamasından önce gerçekleştirilen saha çalışmalarına ait veriler kullanılarak zemin ve kaya birimlere ait geo-mekanik parametreler belirlenmiştir. Geoteknik tasarım kapsamında, konsol diyafram duvar ile teşkil edilecek kesim için yatay yükler altında soket boyunun yeterliliği Eurocode – 7 ve Fransa Ulusal Eklentisi kuralları gereğince kontrol edilmiştir. Gerçekleştirilen analiz ve hesaplamalar sonucunda konsol analiz kesiti için 3.30 metre uzunluğundaki soket boyu yeterli bulunmuştur. Soket boyunun belirlenmesi aşamasında, geçici durum tasarımı kontrol ederken, tasarımda önemli bir parametre olduğundan δ/ϕ oranının seçilmesine dikkat edilmelidir. Limit denge yöntemine göre gerçekleştirilen hesapların, zemin/yapı modeline göre gerçekleştirilen hesaplara kıyasla daha güvenli tarafta kaldığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

Bond A., Harris A., (2008), "Decoding Eurocode 7", Taylor & Francis Group, London – New York

NF EN 1997 -1 (2006), "Eurocode 7 Calcul géotechnique - Partie 1: Règles générales"

NF-P-94-262 (2012), "Justification Des Ouvrages Géotechniques Normes D'application Nationale de l'Eurocode 7 Fondations Profondes"

NF P 94-282 (2009), "Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement – Écrans"