4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GGM4

DENİZ DİBİ SIĞ TEMELLER VE TASARIM ESASLARI

SUBSEA SHALLOW FOUNDATIONS AND DESIGN ASPECTS

Ali ÇOBAN[1], Zeynep Huri ÖZKUL BİRGÖREN[2]

ÖZET

Türk enerji sektörü, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerinde yeni proje önerileriyle birlikte çeşitlenmektedir. Enerji bağımsızlığı ve dirençli açık deniz altyapı geliştirilmesine yönelik ihtiyaç artmaktadır. Bununla birlikte, sığ deniz dibi temelleri önemli birleşik yüklere ve zorlu zemin koşullarına maruz kalmaktadır. Bu çalışma, sektörde yaygın olarak kullanılan açık deniz sığ temellerinin türlerine ve bunların kurulumu, işletimi ve sökülmesiyle ilgili bazı temel tasarım kriterlerine odaklanmaktadır. Sığ ve derin denizde tipik olarak kullanılan temel tipleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Farklı hibrit sığ temel türlerinin ortaya çıkışı, kapasite hesaplamasında yenilme yüzeyi yaklaşımının kullanımındaki son gelişmelerle birlikte ele alınmıştır. Kavramlar, yönetmelik uygulamaları ve literatürde sunulan vaka çalışmaları ışığında sunulmuştur. Bu çalışma, geoteknik mühendislerinin açık deniz ortamının zorlu koşullarını anlamaları için entegre bir mühendislik çerçevesi ortaya koymaktadır. Endüstri standartlarını (örneğin API) ve daha gelişmiş (ve daha uygun maliyetli) çözümleri kullanarak temel kapasitesini değerlendirmek için teknik bilgiler sağlamaktadır.
Anahtar Kelimeler: *Deniz dibi sığ temel, açık deniz enerji, tasarım esasları, hibrit temeller*

ABSTRACT

The Turkish energy sector is diversifying with proposed new assets in the Black Sea and Mediterranean regions. There is a growing need to develop energy independence and robust subsea infrastructure. However, subsea shallow foundations are subjected to significant combined loads and challenging subsurface conditions. This study focuses on the types of offshore shallow foundations commonly used in the industry and some fundamental design criteria related to their installation, operation and decommissioning. Foundation types typically used in shallow water and in deep water are discussed separately. The emergence of different types of hybrid shallow foundations is discussed along with recent advances in using the yield surface approach for calculating capacity. The concepts are presented in the light of recommended practices and case studies presented in the literature. This overview paper sets out an integrated engineering framework for geotechnical engineers to understand the harsh conditions of the offshore environment. It provides technical insights for assessing foundation capacity using industry standards (i.e. API) as well as more advanced (and more cost-effective) solutions.
Keywords: *Subsea shallow foundations, offshore energy, design aspects, hybrid foundations*

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, al.coban@yahoo.com (Sorumlu Yazar)
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, zhozkul.birgoren@aybu.edu.tr

1. GİRİŞ

Açık deniz yapılarını destekleyen çeşitli tipte su altı temelleri mevcuttur. Su altı sığ temeller ve hibrit tasarımlar sığ veya derin deniz sahalarındaki boru hattı ekipmanlarını desteklemek için kullanılabilirler. Bu temeller, ayrıca, sığ sulardaki rüzgâr türbinlerini ya da (yeni bir yaklaşım olan) su altı veri merkezlerini taşıyabilirler (Randolph ve Gourvenec, 2011; Wang vd., 2024; Simon, 2018; Çoban ve Özkul Birgören, 2026).

Açık denizlerdeki çevresel yükler, yapılara düşey (V), yatay (H) ve moment (M) şeklinde birleşik olarak (metin içinde VHM kısaltması ile ifade edilecektir.) etkimektedir. Su altı temeller, düşey yüklere ek olarak yüksek yatay ve dönme yüklerine maruz kalırlar (Randolph ve Gourvenec, 2011). Bu yapılar için, düşey taşıma gücünden ziyade, kayma ve devrilme stabilitesinin tahkiki daha kritik olabilir. Yüksek yatay yüklere ve momentlere karşı koymak için, temeller etekli olarak tasarlanabilir ya da özel hibrit tasarımlar (örneğin, etekli ve köşe kazıklı mat temel) kullanılabilir.

Temellerin imalat ve deniz tabanına yerleşim işlemlerinin olası yüksek maliyetleri ve bu işlemlerde kullanılacak vinçlerin sınırlı yük kaldırma kapasiteleri düşünüldüğünde, temel boyutunun optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Tipik derin deniz saha koşulları olan heterojen dayanıma sahip yumuşak killerde gerçek kapasitenin tahmini, dolayısıyla boyut optimizasyonu, oldukça güçleşebilir. Temel tasarımı için pratikte takip edilen geleneksel yaklaşımların yanı sıra, nispeten daha gerçekçi tahminlerde bulunan ileri seviye analizler kullanılabilir (Gourvenec, 2023). Bu çalışma kapsamında, klasik metot ve ileri seviye yaklaşım kullanılarak bir dizi temel boyutlandırma analizi yapılmış ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

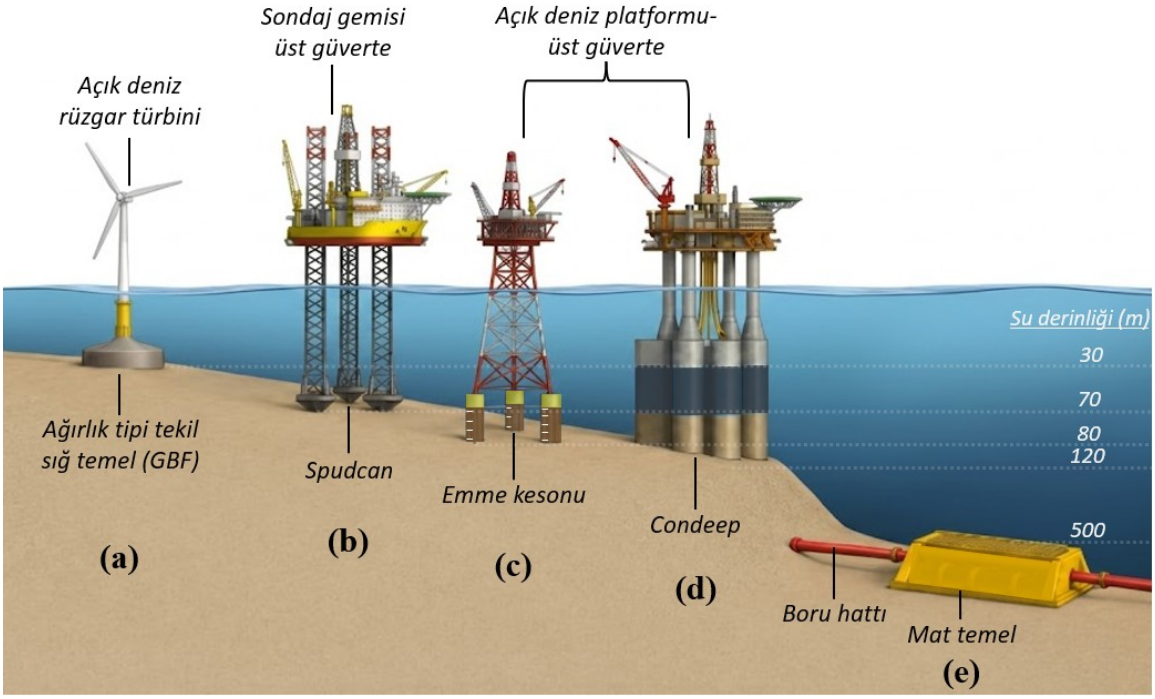
2. AÇIK DENİZ YAPILARINI DESTEKLEYEN SIĞ TEMELLER

Su altı sığ temeller, tasarım yüklerini doğrudan deniz tabanı yüzeyi ya da (derin kazık sistemlerine kıyasla) daha sığ bir derinlikteki zemin tabakasına dağıtan geniş bir temel taban alanına sahiptirler. Genellikle, genişlikleri kadar deniz tabanına gömülmeleri ile derin temel yapılarından ayırt edilirler. Taşınacak yapı türü ve su derinliğine bağlı olarak Şekil 1'de görüldüğü gibi farklı sığ temel çözümleri bulunmaktadır.

2.1. Ağırlık Tipi Sığ Temeller (GBF: Gravity Base Foundations)

Ağırlık tipi sığ temeller masif yapılardır. Çevresel yüklerin kayma ve dönme etkilerine karşı kendi ağırlıklarıyla direnç gösterirler. İçi boş çelik siloların ağır balast malzeme ile doldurulması ya da betonarme şeklinde üretilebilirler. Oldukça ağır olabilen bu temeller, genellikle taşıma gücü göçmesine neden olabilen düşey tasarım yüklerini karşılayabilecek dayanıma sahip zeminlerde (örneğin, kum) tercih edilirler (Randolph ve Gourvenec, 2011).

Karadaki ve açık denizdeki rüzgâr türbinlerini desteklemek için, 15-20 m çapındaki ağırlık tipi tekil sığ temeller kullanılabilir. Ancak açık deniz uygulamalarında, bu temeller genellikle su derinliği 50 m'ye kadar olan sığ deniz sahalarında tercih edilirler. Şekil 1a'da, bir ağırlık tipi tekil sığ temel temsili olarak gösterilmiştir (Lombardi, 2010).



Şekil 1. Su altı sığ temel tipleri ve tipik operasyonel su derinlikleri

"Condeep" isimli yapılar, açık deniz petrol ya da gaz platformlarını destekleyen özel ağırlık tipi yapılardır. Bu betonarme yapılarda, tabanda hidrokarbon depolama siloları bulunmakta ve bu silolardan bazıları yukarıya doğru uzanarak üst yapı platformunu taşıyan bacakları oluşturur. Temsili bir görüntü Şekil 1d'de sunulmuştur. "Condeep" yapıları, genellikle su derinliği 200 m'ye kadar olan sığ deniz sahalarında tercih edilir (Randolph vd., 2005).

"Condeep" yapısı imalatı için standart bir inşa süreci takip edilebilir. Depolama silolarının betondan imal edilmesinde genellikle kayar kalıp yöntemi kullanılır. Platform, imalatı tamamlandıktan sonra kontrollü su alma/boşaltma ve balastlama uygulamaları ile yüzdürülerek nihai konumuna römorkörler kullanılarak çekilir. Nihai konumunda, gerçekleştirilen son su alımı ve balastlama uygulamasıyla kontrollü bir şekilde batırılarak deniz tabanına yerleştirilir (Eide ve Andersen, 1984; Randolph ve Gourvenec, 2011).

Ağırlık tipi sığ temellere de, zemin koşullarına bağlı olarak, etekler eklenebilir. Karar verilen etek boyu, sert kil ve sıkı kumlarda 0,5 m'den başlarken; yumuşak killerde 30 m'nin üzerine çıkabilmektedir (Randolph ve Gourvenec, 2011).

2.2. "Spudcan" Temeller

Spudcan temeller, açık deniz petrol veya doğalgaz sektöründe genellikle sondaj gemisi olarak kullanılan mobil jack-up platformlarını desteklemek için kullanılırlar. Açık deniz rüzgâr enerjisi sektöründe ise, türbinlerin montaj işlemlerini yürüten gemileri desteklemek için kullanılabilirler. Modern jack-up gemileri yüzebilir bir gövde, gövdeyi taşıyan genellikle üç ayaktan oluşan çelik kafes yapı ve ayakların tabanında bulunan "spudcan" temellerden oluşur. Üç ayaklı bir jack-up gemisi ve destek yapılarına ait temsili gösterime Şekil 1b'de yer verilmiştir (Randolph ve Gourvenec, 2011; Emren, 2015).

"Spudcan" temeller, taban kısmında yatay ile 15º - 30º açı yapan ters çevrilmiş sığ koni şeklindeki yapılardır. Deniz tabanı zeminine aşırı gömülmeyi önlemek amacıyla,

tabanlarında hafif sivri bir uç bulunur. Büyük platformları destekleyen "spudcan" temellerin çapı 20 m'yi aşabilmektedir (Randolph ve Gourvenec, 2011).

"Spudcan" temeller "MODU" denilen mobil sondaj ünitelerini deniz tabanına sabitlemek için kullanılır. "Spudcan"ler MODU'ların çelik konstrüksiyon bacaklarının ucuna yerleştirilir. İş bitiminde bacaklar yukarı çekilerek MODU başka bir araştırma bölgesine gidebilir. Spudcan temeller deniz tabanı zemin koşullarına dair belirsizliklerin olduğu ve geoteknik karakterizasyonun detaylı araştırılmadığı durumlarda kullanılabilmektedir. Fakat, özellikle güçlü zemin katmanlarının altında zayıf zeminin bulunması gibi durumlar MODU'ların (özellikle yerleşim aşamasında) karşılaşılabileceği en önemli stabilize risklerinden birini oluşturmaktadır. Jack-up platform ayaklarından birinin fazla oturması veya göçmesi, çelik ayakların burkulmasına ve işletmenin geçici olarak durması hatta tüm platformun alabora olması gibi durumlara yol açabilir (Randolph ve Gourvenec, 2011). Benzer sonuçlar doğurabileceğinden, ayakların tabanındaki her bir spudcan sığ temelinin yerleştirileceği noktada kayma dayanımı verileri ayrı ayrı değerlendirilmeli; tüm sahayı temsil eden kayma dayanımı değerleri analizlerde kullanılmamalıdır.

2.3. Emme Kesonları (Suction Caisson)

Emme kesonları, üstü ağır bir kapakla kapatılmış, tabanı açık, ters çevrilmiş çelik silindirik borulardır. Etek kısımları deniz tabanına belirli bir oranda gömülür. Gömülme oranları (D_{etek}/B) genellikle 1'den küçüktür. Bu özellikleri ile emme kazıklarından (suction pile) ayrılırlar.

Emme kesonları, 5 - 60 m su derinliğindeki yüzer rüzgar türbinleri tabanında; derin deniz sahalarındaki ise "Tension Leg Platform" isimli yapıların tabanında çok noktalı bağlanma sistemleri olarak kullanılabilirler. Ayrıca, açık deniz platformlarda çelik kiriş kafes yapıların taban ayakları olarak da kullanılabilirler. Açık deniz sabit çelik kafes yapısını destekleyen emme kesonları, temsili bir görsel olarak Şekil 1c'de sunulmuştur. Emme kesonları, deniz tabanına yerleşim için genellikle zemin hazırlığı gerektirmezler ve yerleşim sırasında minimum çevresel etkileri (örneğin, gürültü kirliliği) bulunur (Wang vd., 2018).

Emme kesonları özel bir yöntem ile deniz tabanına yerleştirilip hedef derinliğine kadar zeminin içinde gömülür. Bu gömülme metodu iki aşamadan oluşur: i) kendi ağırlığıyla sınırlı ilk penetrasyon ve ii) silindirik keson içine hapsolan suyun kapaktaki vanadan pompa ile dışarı çekilmesi sonucu oluşan basınç farkı ve bu farkın keson kapağı üzerinde yarattığı aşağı yönlü net kuvvet sayesindeki ikincil penetrasyon (Randolph ve Gourvenec, 2011).

2.4. Çelik Matlar (Mudmats)

Mat temeller, üzerinde delikler bulunan, çoğu durumda dikdörtgen geometriye sahip, çelik plakalardır. Çelik matlar, sığ sularda ya da tasarım yüklerinin aşırı yüksek olmadığı derin deniz sahalarında kullanılabilirler. Derin deniz petrol ve gaz sahalarında genellikle boru hattı bağlantı ekipmanlarını taşırlar. Bu ekipmanlar arasında "jumper" ve "Tee" adı verilen bağlantı yapı ve ekipmanları, boru hattı sonlandırma PLET (Pipeline End Termination) ve FTA (Flowline Termination Assembly) modülleri yer almaktadır (Audibert ve Won, 2018; Zhou vd., 2015). Ayrıca, sığ deniz sahalarındaki çelik kafes yapılarının tabanında, kazık yerleşimi öncesi geçici temel yapıları olarak da kullanılabilirler (Randolph ve Gourvenec, 2011).

Mat üzerindeki delikler, kurulum sırasında sıkışan hava ve suyun tahliye edilmesini sağlar. Böylece, paraşüt etkisi azaltılarak temellerin deniz dibine indirilmesi işlemi kolaylaşır. Ayrıca, bu boşluklar, temelin deniz tabanına ilk teması anındaki olası zemin erozyonu ve yerel zemin örselenmelerini minimum seviyeye indirmeye katkıda bulunur.

Kapasiteyi artırmak adına, mat temeller genellikle etekli olarak tasarlanır. Ultra derin deniz sahalarında, çelik matlara, katlanabilir kenar kanatları ve mat tabanı boyunca iç kısım-etekler eklenebilir (Audibert ve Won, 2018). Ayrıca, kısmen mobil (kayar) matlar ile tasarım yüklerinin sığ ve derin temel bileşenlerince paylaşıldığı hibrit mat sistemlerinin de pratikte kullanımı mevcuttur. Hibrit mat temeller, bir çelik mat ve mat köşelerine yakın noktalardan pim bağlantılarıyla tutturulmuş kısa kazıklardan oluşmaktadır (Zhou vd., 2015; Dimmock vd., 2013).

3. SU ALTI SIĞ TEMELLERİN KAPASİTE HESAPLARI

Açık deniz ortamının zorlu çevre koşulları ve açık deniz projelerinin devlete ait yapı yönetmeliklerinin yetki alanı dışında kalması nedeniyle, su altı sığ temellerin tasarımında, genellikle özel standartlar (API RP 2GEO, DNV-RP-C212 ve NAVFAC SP-2209-OCN gibi) kullanılmaktadır (API, 2011; DNV, 2011; Thompson ve Beasley, 2012).

3.1. Klasik Hesap Yöntemleri

Su altı temellerin düşey stabilitesi limit-denge metodu kullanılarak değerlendirilir. Taşıma gücü problemine karşı hesaba katılan güvenlik katsayısı değeri genellikle 2.0'dir (API, 2011; API, 2014). Su altı sığ temellerin nihai taşıma gücü hesabında, genellikle klasik taşıma gücü teorisi (Terzaghi, 1948; Hansen, 1970; Vesic, 1975) esas alınır (API, 2011; ISO, 2016). Bu yöntem, homojen bir zemin üzerindeki sonsuz şerit şeklindeki bir yüzeysel temelin düşey taşıma kapasitesine ilişkin kesin çözümü dönüştürmek amacıyla, birden fazla modifikasyon faktörünün üst üste uygulanmasını içerir. Söz konusu dönüşüm; düşey olmayan yükleme, üç boyutlu temel şekli, temel gömülme derinliği ve zemin mukavemetindeki heterojenlik gibi daha gerçekçi saha koşullarını hesaba katmayı amaçlar.

Su altı sığ temellerin projelendirilmesinde açık deniz ortamı koşulları hüküm süreceğinden, karadaki temellerin kapasite analizinde kullanılan klasik metot eşitliklerinin formu ilgili tasarım parametrelerinin (örneğin, deniz tabanı zemininin kayma dayanımının heterojenliği ve VHM yük durumu) etkilerini kısmen hesaba katacak şekilde düzenlenmiştir.

Su altı sığ temellerine etkiyen moment yükleri, temeli devrilmeye zorlar. Klasik tasarım yöntemleri, temel ve zemin arasındaki sürtünmenin sadece sıkışma kuvvetleri altında geçerli olduğu kabulüne dayanır. Fakat, yüksek momentler altında su altı sığ temelleri taban alanına belli bir oranda çekme kuvvetleri etki eder. Moment yükleri klasik metotlar ile ele alındığında, temel taban alanının bir kısmının devre dışı kalacağı varsayımı yapılır. Bu varsayıma dayanan, efektif alan metodu ile moment yüklerinin kapasiteye etkileri belirlenir (API, 2011; Gourvenec, 2023).

Efektif alan metodunda, temele etkiyen moment yükleri, M_x ve M_y, eksantrikliğe sahip düşey eşdeğer yük, Q, olarak ifade edilir. Sırasıyla x ve y eksenlerindeki eksantriklik değerleri temel taban alanının daraltılmasında kullanılır. Eşitlik (1) ve (2), sırasıyla x ve y eksenindeki eksantriklik değerlerini, e_x ve e_y, hesaplamak için kullanılır (API, 2011).

$$e_x = M_y/Q \tag{1}$$

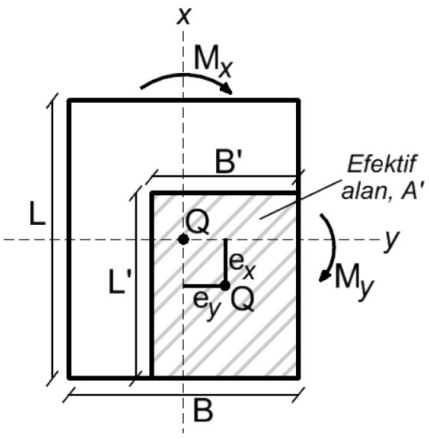
$$e_y = M_x/Q \quad (2)$$

Hesaplanan eksantriklik değerleri temel boyutlarından, B ve L, çıkarılarak yeni etkin temel taban boyutları, B've L'

$$B' = B - 2e_y \quad (3)$$

$$L' = L - 2e_x \quad (4)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Azaltılmış temel boyutları kullanılarak efektif temel taban alanı, A', hesaplanır. Ve bu düzeltilmiş alan düşey taşıma gücü hesaplamasında kullanılır. Neticede, moment yükleri nihai düşey taşıma kapasitesini düşürmektedir. Efektif alan metodu Şekil 2'de görselleştirilmiştir (API, 2011).



Şekil 2. Efektif alan metodu

VHM yük durumunda, temeller, deniz tabanı zemininde karmaşık bir gerilme durumu oluşturur. Örneğin, özellikle etekli bir temele etkiyen yatay ve moment yüklerinin zeminde oluşturduğu gerilme hatları birbiri ile etkileşim halindendir. Klasik hesap yöntemi, kapasitenin hesaplanmasında, yüklerin birbiri ile olan etkileşimini incelemeye olanak tanımaz. Bunun yerine, nihai taşıma gücü gibi tek bir serbestlik derecesinde stabilite kontrolü yapmak için uygundur. Ayrıca klasik yöntem hesaplamaları, kohezyonlu deniz tabanı zeminlerinin heterojen kayma dayanımı profilini hesaba katmak için yetersiz kalabilmektedir. Ek olarak, klasik hesaplamalar temel tabanı zemininin çekme kuvveti taşıyamayacağı kabulüne dayanmaktadır. Fakat, su altı sığ temellere etek eklenmesi gibi durumlarda, negatif aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşumuyla, nispeten düşük de olsa, çekme direnci kapasiteye katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, klasik yaklaşım nihai kapasiteyi gerçek değerinden daha düşük tahmin edebilmektedir (Gourvenec vd., 2017; Randolph ve Gourvenec, 2011).

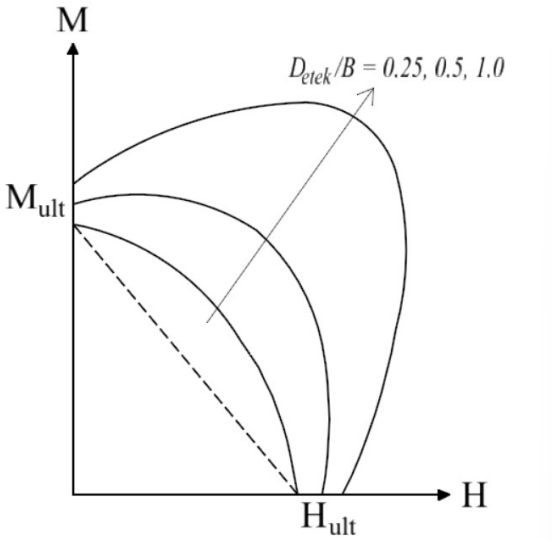
3.2. İleri Seviye Yaklaşımlar

Gerçek sınır durumlarını daha iyi yansıtan kapasitenin hesaplanabilmesi için, klasik hesap yöntemi yerine, ileri seviye yaklaşımlar kullanılabilir. Yük etkileşim diyagramlarının kullanılması, ileri seviye yaklaşımlardan biridir. Yük etkileşim diyagramları, iki boyutlu göçme zarfı veya üç boyutlu VHM yük uzayında tanımlanmış sınır akma yüzeyini içermektedir. Göçme zarfları, VHM yük bileşenlerinden birinin sabit kabul edilmesi ile elde edilen düzlem kesit eğrisidir. Bir göçme zarfının spesifik şekli drenaj koşulları, zemin kayma

dayanımının heterojenlik derecesi, çekme direnci gibi ara yüzey özellikleri, temel geometrisi ve gömülme derinliğine bağlı olarak değişir (Randolph ve Gourvenec, 2011).

Göçme zarflarının elde edilmesinde analitik, deneysel veya nümerik yaklaşımlar takip edilebilir. Analitik yaklaşımlar, plastisite teorisi ve limit analiz prensiplerine dayanır ve tasarımcının rutin hesaplarda doğrudan kullanabileceği matematiksel kapalı form denklemler ortaya koymayı hedefler. Deneysel yaklaşımlar ise, zemin davranışının karmaşıklığı nedeni ile genellikle drenajlı yükleme durumu için geliştirilen akma yüzeylerinin oluşturulması amacıyla takip edilebilir. Genellikle en yüksek hassasiyete sahip sonuçları sunan nümerik yaklaşımlar ise, genellikle sonlu elemanlar analizi kullanılarak karmaşık zemin-yapı etkileşimlerinin irdelenmesi sürecini içerir (API, 2011; Gourvenec ve Barnett, 2011).

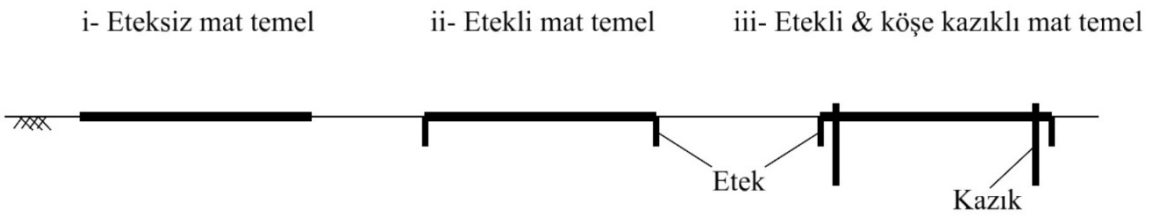
Klasik yöntem ve göçme zarfları yaklaşımından elde edilebilecek kapasite değerleri Şekil 3'teki temsili yük etkileşim diyagramında kıyaslanmaktadır. Klasik yaklaşım doğrusal ve dar bir nihai kapasite sınırı çizerken, göçme zarfı yaklaşımında tahmin edilen kapasite sınırları daha geniştir. Ek olarak, klasik yöntemin nihai kapasitenin tahminindeki olası yetersizliği, gömülme oranı (D_{etek}/B) arttıkça belirginleşmektedir (Gourvenec, 2023; Gourvenec ve Barnett, 2011).



Şekil 3. Klasik metot (kesikli çizgi) ve göçme zarfı (düz çizgiler) yaklaşımının kıyası (Gourvenec ve Barnett'e (2011) ait çalışmadan uyarlanmıştır.)

4. KLASİK & İLERİ SEVİYE YAKLAŞIMLARIN KIYASLANMASI

Tasarımda takip edilecek yöntem, karar verilen temelin tipi ve artan VHM yük durumunun temel boyutlandırmasına etkisini irdelemek adına, parametrik bir çalışma, bildiri kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, derin denizlerde tercih edilebilecek, üç farklı konfigürasyondaki su altı çelik mat temel için (düşey yönde) güvenlik katsayısı 2 alınarak drenajsız kapasite analizleri gerçekleştirilmiş ve gerekli minimum temel genişlik (B_{min}) değerleri hesaplanmıştır. Analizlerde kullanılan mat temellere ait temsili görsellere Şekil 4'te yer verilmiştir.



Şekil 4. Analizde kullanılan mat biçimleri (www.webappsforengineers.com 'dan uyarlanmıştır.)

4.1. Yöntem & Tasarım Parametreleri

Parametrik çalışmada, klasik taşıma gücü hesabı ve yük etkileşim diyagramları yaklaşımı kullanılarak mat temellerin kapasite analizleri yapılmıştır. Klasik taşıma gücü analizlerinde, API (2011) tasarım standardında tanımlanan bağıntı ve metodolojiler kullanılmıştır. Klasik yaklaşım analizleri için (MS Excel kullanılarak) hesap araçları geliştirilmiş ve iterasyon yapılarak kritik $\boldsymbol{B_{min}}$ değerleri elde edilmiştir.

Nispeten yeni bir seçenek olan etekli ve köşe kazıklı mat temeller için yaygın kullanılan standart bir tasarım metodolojisi henüz bulunmamaktadır (Audibert ve Won, 2018). Bu sebeple, parametrik çalışmaya konu olan hibrit temel sistemindeki kazıkların, klasik yöntem-taşıma gücüne katkısı, API (2011) tasarım standardında kazık temeller için önerilen tasarım metodolojisi referans alınarak hesaplanmıştır.

Sınır durumdaki $\boldsymbol{B_{min}}$ değerlerinin yük etkileşim diyagramları kullanılarak belirlenmesinde Web Apps for Engineers (WA4E) hesap araçları, www.webappsforengineers.com, kullanılmıştır. Kullanılan hesap araçları, kapasite hesaplamalarında Feng vd. (2014) tarafından sunulan mat temel tasarım esasları ve çalışmada yer alan kapalı formdaki bağıntıları temel almaktadır. İleri seviye yaklaşım analizlerinde, zemin-temel arasındaki çekme direncinin kapasiteye katkısı hesaba katılmıştır. Ayrıca, sınır durum koşulunu kapalı formdaki bağıntılara yansıtabilmek için düşey yük çarpanı, $\boldsymbol{\lambda_V = 2}$ olarak belirlenmiştir.

Mat temellere ait tasarım parametreleri, pratikteki yaygın mühendislik uygulamaları gözetilerek belirlenmiştir. Zemin profili, derinlikle dayanımı artan yumuşak kil olarak ele alınmıştır. Analizlerde kullanılan örnek tasarım parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Örnek Tasarım Parametreleri

Tasarım	Parametre	Değer	Birim
Mat	Boyut oranı (B/L)	0.5	-
	Gömülme oranı (D_{etek}/B)	0.1	-
Kazık	Dış çap (OD)	0.3	m
	Etek-uç seviyesi altındaki kazık boyu (H_{pile})	4	m
	Çelik boru kazık-çeper et kalınlığı (t)	0.01	m
	Mat köşelerinden kazık merkezine mesafe (d_{off})	0.25	m
	Tek bir kazığın ağırlığı (W_{pile})	5	kN
Zemin	Ortalama batık birim hacim ağırlık (γ'_{ave})	5	kN/m^3
	Deniz tabanı yüzeyindeki drenajsız kayma dayanımı (s_{um})	7	kPa
	Kayma dayanımı gradyanı (k)	2	kPa/m

Açık deniz ortamlarında artan çevresel yüklerin temel geometrisine etkisini incelemek adında a) referans, b) artan moment ve c) artan yatay yük olmak üzere üç ayrı VHM yük durumu tanımlanmıştır. (Şekil 4'te görselleştirilen) üç ayrı mat temel, parametrik çalışma

kapsamında, tüm yük durumları için analiz edilmiştir. Tanımlanan yük durumlarına ait detaylar, Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Tasarım yük durumları

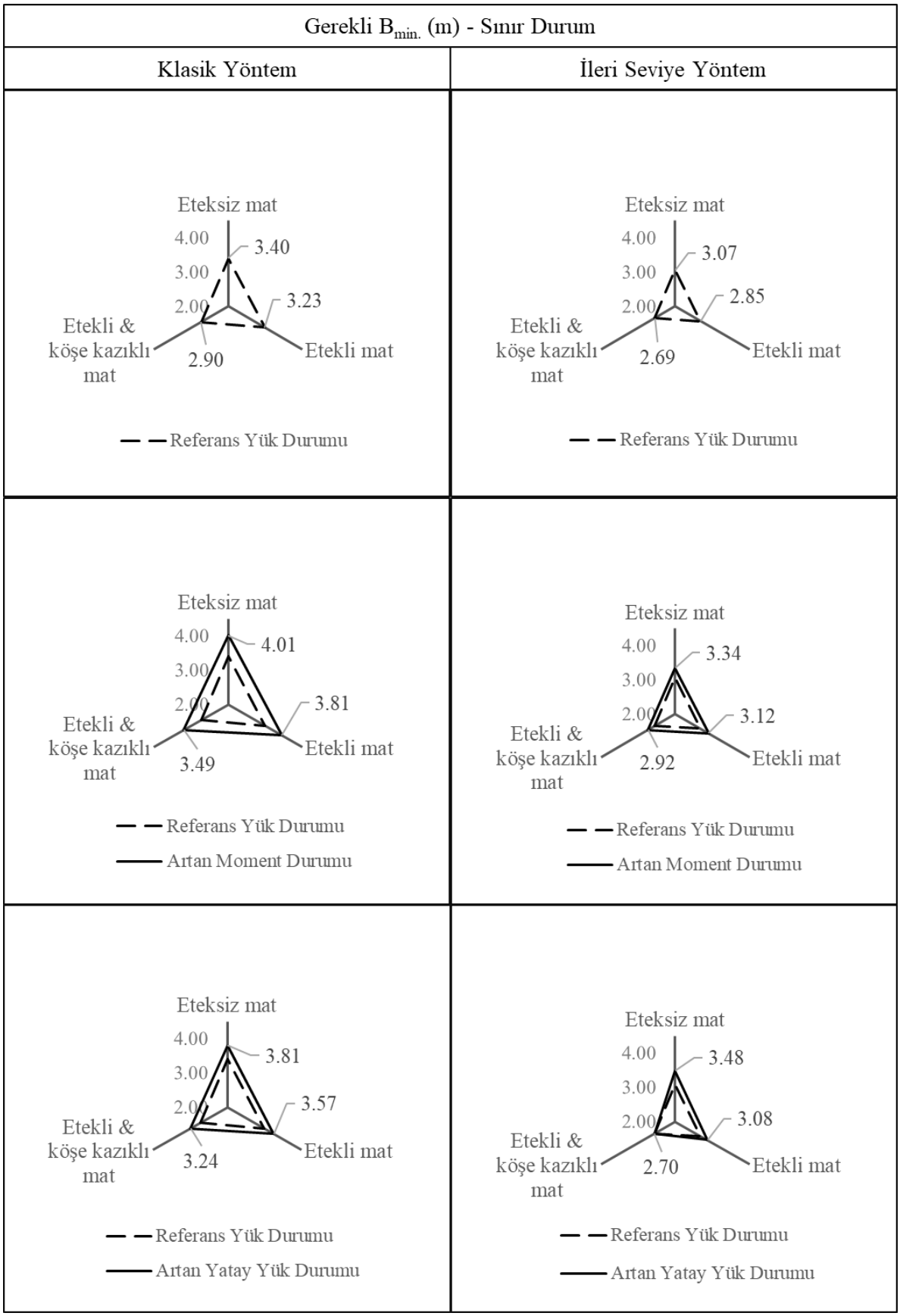
Yük durumu	Yük	Değer	Birim
Referans	Düşey yük (V)	400	kN
	Yatay yük (H)	50	kN
	Moment (M)	100	kNm
Artan moment	Düşey yük (V)	400	kN
	Yatay yük (H)	50	kN
	Moment (M)	300	kNm
Artan yatay yük	Düşey yük (V)	400	kN
	Yatay yük (H)	150	kN
	Moment (M)	100	kNm

Düşük moment-yatay yük oranları ($\boldsymbol{M/HD_{eqv}}$) olası bir göçmenin, kayma göçmesi şeklinde gerçekleşmeye yatkın olduğunu gösterir. Benzer şekilde, nispeten büyük oranlar (1.0'e yakın ya da daha büyük) ise devrilme göçmesi riskine işaret eder (Randolph ve Gourvenec, 2011). Burada, artan moment yük durumunda, ($\boldsymbol{M/HD_{eqv}}$) oranı 1.0 civarında seyrederken, diğer yük durumları için bu oran 0.5'ten küçüktür. Bu doğrultuda, tanımlanan yük durumları, söz konusu göçme mekanizmaları ve literatürdeki benzer vaka analizleri referans alınarak belirlenmiştir.

5. BULGULAR & DEĞERLENDİRME

Parametrik çalışma neticesinde elde edilen sınır durum B_{min} değerleri, Şekil 5'teki radar grafikleriyle sunulmuştur. Klasik yaklaşım analizlerine ait sonuçlar sol sütundaki radar grafiklerinde sunulurken, sağ sütundaki radar grafikleri yük etkileşim diyagramı yaklaşımının kullanıldığı ileri seviye analiz sonuçlarını içermektedir. Üst satırdaki sonuçlar referans VHM yük durumu, orta satırdakiler artan moment yük durumu ve alt satırdakiler ise artan yatay yük durumu altındaki sınır durum için gerekli B_{min} değerlerini göstermektedir. Analizlerde ileri seviye yaklaşımın kullanımı, klasik yönteme kıyasla gerekli temel genişliklerini ortalama %13 civarında azaltmaktadır (Kıyaslanabilir örnek değerler: 3.57 m >> 3.08 m; Şekil 5). Çalışma kapsamındaki en yüksek verimlilik, klasik metot ile boyutlandırılan eteksiz mat ve ileri seviye yaklaşım ile tasarlanan hibrit temel sisteminin tüm yük durumları için kıyaslanmasıdır. Bu kıyasta, sınır durum için B_{min} değerlerinin ortalama %26 civarında azalmış olduğu gözlenmektedir (4.01 m >> 2.92 m; Şekil 5).

Eteksiz mat temele eklenecek, etek ve köşe kazıklarının, kapasiteyi artırarak, temel boyutunu azaltma yönündeki etkileri, her bir grafikte görülmektedir. Aynı temel biçimi ve tasarım yönteminin kullanıldığı, ancak (HM) tasarım yüklerinin arttığı senaryolarda gerekli B_{min} değerleri, beklendiği üzere, artmaktadır. Fakat, etekli ve köşe kazıklı matın ileri seviye yöntem ile analizinde, referans yük ve artan yatay yük durumları için tahmin edilen gerekli B_{min} değerleri oldukça yakındır (2.69 m >> 2.70 m; Şekil 5). Benzer hibrit sistemlerin ileri seviye yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilen analizlerinde, genellikle, düşey tasarım yüklerinin çelik mat tarafından karşılandığı, köşe kazıklarının yatay tasarım yüklerini taşıdığı ve moment yüklerinin ise mat ile kazıklar arasında paylaşıldığı kabulü ile ele alınırlar (Dimmock vd., 2013). Dolayısıyla, artan yatay yük durumunun ileri seviye yaklaşımı ile analizinde, artan yatay yükü köşe kazıkları karşıladığından, gerekli B_{min} değerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir.



Şekil 5. Artan çevresel yük, temel biçimi ve tasarım yönteminin sınır durum temel genişliğine, B_{min}, etkisini gösterir radar grafikleri

6. SONUÇLAR

Bu çalışma, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerinde çeşitlenen Türkiye'nin açık deniz enerji yatırımları için kritik öneme sahip sığ temellerin tasarım esaslarına ve boyutlarının optimizasyonuna yönelik genel bir bakış sunmaktadır. Su altı sığ temel kapasitesinin belirlenmesinde geleneksel yaklaşımlar, açık denizlerdeki zorlu çevresel tasarım koşullarını ve yük etkileşimlerini uygun şekilde hesaba katamamakta ve dolayısıyla muhafazakâr sonuçlar sunmaktadırlar.

Buna karşın, göçme zarfı yaklaşımlarının kullanılması gerçeğe daha yakın kapasitenin tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca yüksek yanal yük ve dönme yükü durumlarında temellere eklenebilecek etek yapıları ya da köşe kazıkları, çevresel yüklere karşı direnci artırmakta ve daha küçük temel taban alanı kullanımına olanak tanımaktadır.

Nitekim gerçekleştirilen parametrik çalışma ile temel geometrisinin optimize edilmesinde kullanılabilecek bazı yöntem ve stratejiler değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları göçme zarfı yaklaşımının, temel boyutunu, geleneksel yönteme kıyasla ortalama yaklaşık %13 oranında optimize edebildiğini göstermektedir. Ayrıca, geleneksel metotla boyutlandırılan eteksiz standart bir mat temelden, göçme zarfı yaklaşımıyla tasarlanan etekli ve köşe kazıklı hibrit sistemlere geçildiğinde ise temel boyutunda ortalama yaklaşık %26 civarında kayda değer bir azalma sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Neticede, ileri seviye yaklaşımların kullanımı ve etek ya da köşe kazıklarının temel sistemlerine eklenmesi ile görece daha küçük boyuttaki ve dolayısıyla daha ekonomik temeller tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

API (2014), "API RP 2A-WSD: American Petroleum Institute, Recommended Practice, Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Steel Platforms - Working Stress Design, Washington, DC, ABD.

API (2011), "API RP 2GEO: Geotechnical and Foundation Design Considerations", Recommended Practice, American Petroleum Institute, Washington, DC, ABD.

Audibert, J.M. ve Won, J.Y. (2018), "Hybrid Subsea Foundation for Deepwater Developments", ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 519-524.

Çoban, A. ve Özkul Birgören, Z.H. (2026), "Design Considerations and Geotechnical Challenges for Subsea Shallow Foundations", International Innovation Sience and Technology Conference, 88-94.

Dimmock, P., Clukey, E., Randolph, M.F., Murff, D. ve Gaudin, C. (2013), "Hybrid Subsea Foundations for Subsea Equipment", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 139, No 12, 2182-2192.

DNV (2011), DNV-RP-C212: Det Norske Veritas, Recommended Practice, Offshore Soil Mechanics and Geotechnical Design, Norveç.

Eide, O. ve Andersen, K.H. (1984), "Guest Lecture - Foundation Engineering for Gravity Structures in the Northern North Sea", International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri University of Science and Technology, 1627-1678.

Emren, V. (2015), "Three Dimensional Finite Element Modeling for the Spudcan Penetration into Clayey Seabed", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Feng, X., Randolph, M.F., Gourvenec, S. ve Wallerand, R. (2014), "Design Approach for Rectangular Mudmats Under Fully Three-Dimensional Loading", Géotechnique, Vol 64, No 1, 51-63.

Gourvenec, S. ve Barnett, S. (2011), "Undrained Failure Envelope for Skirted Foundations Under General Loading", Géotechnique, Vol 61, No 3, 263-270.

Gourvenec, S. (2023), "Numerical Modelling in Geotechnical Design of Offshore Infrastructure-Evolution and Revolution", Proceedings of 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Londra, İngiltere, 26-28.

Gourvenec, S.M., Feng, X., Randolph, M.F. ve White, D.J. (2017), "A Toolbox for Optimizing Geotechnical Design of Subsea Foundations", Offshore Technology Conference, Houston, Texas, ABD, OTC-27763-MS.

Hansen, J.B. (1970), "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", Danish Geotechnical Institute Bulletin, 5-11.

ISO (2016), "ISO 19901-4: Petroleum and Natural Gas Industries Including Lower Carbon Energy - Specific Requirements for Offshore Structures - Part 4: Geotechnical Design Considerations", International Organization for Standardization, Cenevre, İsviçre.

Lombardi, D. (2010), "Dynamics of Offshore Wind Turbines", Yüksek Lisans Tezi, University of Bristol, Department of Civil Engineering, Bristol, UK.

Randolph, M. ve Gourvenec, S. (2011), "Offshore Geotechnical Engineering", Spoon Press.

Randolph, M., Cassidy, M., Gourvenec, S. ve Erbrich, C. (2005), "Challenges of offshore geotechnical engineering", Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, IOS Press, 123-176.

Simon, K. (2018), "Project Natick-Microsoft's Self-Sufficient Underwater Datacenters", IndraStra Global, Vol 4, No 6, Art. 4.

Terzaghi, K. (1948), "Theoretical Soil Mechanics", Chapman & Hall, Londra.

Thompson, D. ve Beasley, D.J. (2012), NAVFAC SP-2209-OCN: Naval Facilities Engineering Command, Handbook for Marine Geotechnical Engineering, Washington, DC, ABD.

Vesic, A.S. (1975), "Bearing Capacity of Shallow Foundations", Foundation Engineering Handbook, Ed.: Winterkorn, H.F. ve Fang, H.Y., Van Nostrand Reinhold, New York, 121-147.

Wang, X., Zeng, X., Li, J., Yang, X. ve Wang, H. (2018), "A Review on Recent Advancements of Substructures for Offshore Wind Turbines", Energy Conversion and Management, Vol 158, 103-119.

Wang, Z., Zheng, D., Guo, X., Gu, Z., Shen, Y. ve Nian, T. (2024), "Investigation of Offshore Landslides Impact on Bucket Foundations Using a Coupled SPH-FEM Method", Geoenvironmental Disasters, Vol 11, No 1, Art. 2.

WebAppsForEngineers (t.y.), Erişim Tarihi: 16.07.2026, www.webappsforengineers.com

Zhou, H., Krisdani, H., Maujean, R. ve Deeks, A.D. (2015), "System Integration of Direct On-Seabed Sliding Foundations", Frontiers in Offshore Geotechnics III: Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015), Vol 1, Taylor & Francis Books Ltd., 825-830.