4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

AÇIK DENİZ ANKRAJLARINDA ZEMİN VE YÜKLEME AÇISININ KAPASİTE–KÜTLE VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ

EFFECT OF SOIL CONDITIONS AND LOADING ANGLE ON THE CAPACITY-TO-MASS EFFICIENCY OF OFFSHORE ANCHORS

Barbaros KİRİŞ[1], Hasan Emre DEMİRCİ[2]

ÖZET

Bu çalışma, yüzer açık deniz rüzgâr türbinleri için kritik öneme sahip ankraj sistemlerinin farklı yükleme açıları (0°-90°) ve zemin koşulları altındaki performansını sayısal olarak incelemektedir. Kumlu ve killi zemin parametrelerinin ankraj kapasitesine etkisi, doğrulanmış sonlu elemanlar modelleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, malzeme verimliliğini değerlendirmek amacıyla "kapasite-kütle oranı" (CM) parametresi tanımlanmıştır. Elde edilen bulgular; yükleme yönünün dikeyden yataya dönmesiyle CM değerinin 2 ila 3 kat arttığını ve zemin mukavemetinin sistem performansını doğrudan belirlediğini kanıtlamaktadır. Özellikle orta ve yüksek yükleme açılarında (60°-90°) plaka ankrajlar, verimlilik açısından en üstün performansı sergilemiştir. Sunulan metodoloji, yüzer açık deniz yapıları için rasyonel ve ekonomik bir ankraj seçim çerçevesi teşkil etmektedir.
Anahtar Kelimeler: *Ankraj sistemleri, zemin-yapı etkileşimi, performans/maliyet oranı, nümerik modelleme, açık deniz geotekniği*

ABSTRACT

This study numerically investigates the performance of anchor systems, which are of critical importance for floating offshore wind turbines, under various loading angles (0°–90°) and soil conditions. The effects of sandy and clayey soil parameters on anchor capacity were analyzed using validated finite element models. Within the scope of the study, a 'capacity-to-mass ratio' (CM) parameter was defined to evaluate material efficiency. The findings demonstrate that the CM value increases by 2 to 3 times as the loading direction shifts from vertical to horizontal, and that soil strength directly dictates system performance. Plate anchors exhibited superior performance in terms of efficiency, particularly at moderate-to- high loading angles (60°-90°). The presented methodology constitutes a rational and economic anchor selection framework for floating offshore structures.
Keywords: *Anchor systems, soil-structure interaction, performance-cost ratio, numerical modelling, offshore geotechnics*

1. GİRİŞ

Yüzer açık deniz rüzgâr türbinleri, 60 m'den daha derin sularda yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlayan en önemli açık deniz enerji teknolojilerinden biridir. Su derinliğinin artmasıyla birlikte sabit temelli sistemlerin boyutları, yapım maliyetleri ve montaj zorlukları önemli ölçüde artmaktadır. Buna karşılık yüzer platformlar, yüzdürme sistemi ile bağlama sistemlerinin birlikte çalışması sayesinde rüzgâr, dalga, akıntı ve sismik etkiler altında platformun konumunu ve stabilitesini koruyabilmektedir.

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, barbaroskiris@gmail.com,
[2] Doktor Öğr. Üyesi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, hasanemre.demirci@ikcu.edu.tr, (Sorumlu yazar)

Bu nedenle bağlama sistemlerinin tasarımı ve performansı, platform stabilitesi, dinamik davranış ve enerji üretim verimliliği açısından kritik öneme sahiptir (Katsouris ve Marina, 2016; Henderson ve Witcher, 2010). Platformların güvenliğinin sağlanmasında ankrajlar ve bağlama hatları temel sistem bileşenlerini oluşturmaktadır. Farklı zemin ve çevresel koşullara uyum sağlayabilmek amacıyla ağırlık, kazık, emme kesonu, helisel, plaka ve sürükleme ankrajları gibi farklı ankraj sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler; yük aktarım mekanizması, montaj yöntemi, uygulama alanı ve taşıma kapasitesi bakımından birbirinden farklı özellikler göstermekte olup, uygun ankraj sisteminin seçimi zemin özellikleri, yükleme koşulları ve platform gereksinimlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.
Yüzer açık deniz rüzgâr türbinlerinin daha derin sularda yaygınlaşması ve türbin kapasitelerinin son yıllarda önemli ölçüde artması, ankraj sistemleri üzerinde oluşan yatay, düşey ve eğik bağlama yüklerini artırmış; buna bağlı olarak ankraj davranışına yönelik araştırmalar hız kazanmıştır. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar, ankraj performansının yalnızca ankraj tipine değil; yükleme açısı, ankraj geometrisi, bağlama noktası, zemin dayanımı ve ankraj–zemin etkileşimine de bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle helisel, emme kesonu, plaka ve kazık ankrajları üzerine yapılan deneysel ve nümerik araştırmalar, bu parametrelerin taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir (Cerfontaine vd., 2020, 2023; Alnmr ve Mayassah, 2024; Chen vd., 2023; Xie vd., 2025; Huang vd., 2026).

Bununla birlikte mevcut çalışmaların büyük bölümü belirli ankraj tipleri veya sınırlı zemin koşulları üzerine odaklanmış olup, farklı ankraj sistemlerinin ortak modelleme yaklaşımı altında karşılaştırıldığı araştırmalar sınırlıdır. Ayrıca ankraj performansı çoğunlukla nihai taşıma kapasitesi esas alınarak değerlendirilmiş, malzeme kullanım verimliliğini esas alan karşılaştırmalı performans ölçütlerine daha az yer verilmiştir. Bu çalışmada ise ağırlık, kazık, emme kesonu, helisel ve plaka ankrajlarının kum ve kil zeminlerde farklı yükleme açıları altındaki davranışları ortak bir üç boyutlu sonlu eleman modelleme yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Sayısal modeller literatürde yer alan çalışmalarla doğrulanmış; yükleme açısı ve zemin dayanımının ankraj performansına etkisi Kapasite–Kütle Oranı kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, farklı ankraj sistemlerinin malzeme verimliliğini karşılaştırarak açık deniz ankraj tasarımına katkı sağlamaktır.

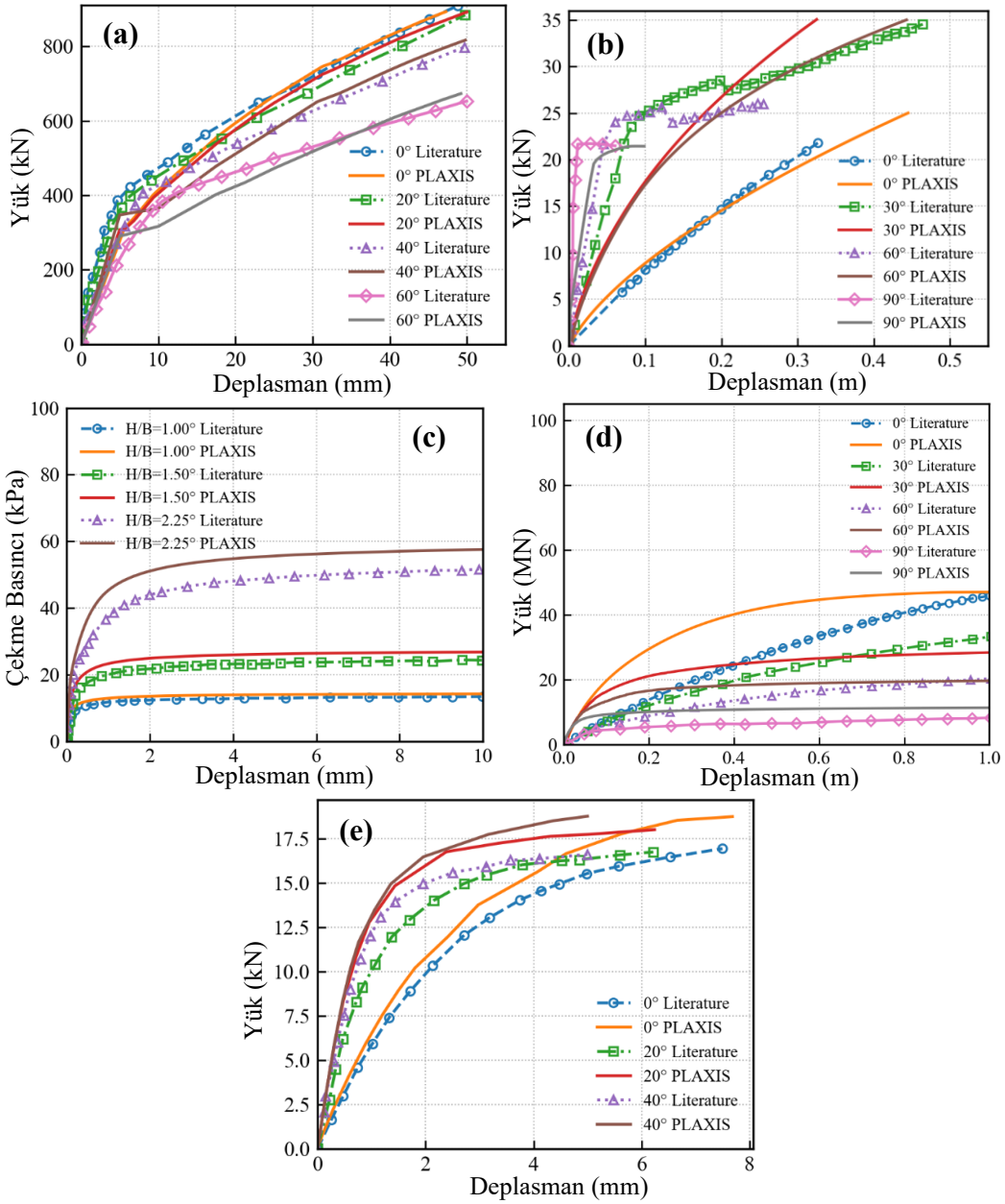
2. YÖNTEM

Bu çalışmada, farklı açık deniz ankraj sistemlerinin değişen yükleme açıları ve zemin dayanım parametreleri altındaki davranışları üç boyutlu sonlu eleman yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde ağırlık, kazık, emme keson, helisel ve plaka ankrajları dikkate alınmış olup tüm modeller PLAXIS 3D yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sayısal analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada geliştirilen modeller literatürde yer alan deneysel ve sayısal çalışmalar kullanılarak doğrulanmış (Ramadan vd., 2009; Alnmr ve Mayassah, 2024; Lu vd., 2024; Xie vd., 2025; Yünkül vd., 2025), ikinci aşamada ise doğrulanan modeller üzerinden parametrik analizler yürütülmüştür. Bu yaklaşım sayesinde farklı ankraj sistemlerinin aynı modelleme kabulleri altında karşılaştırılması mümkün olmuştur. Model doğrulama sürecinde kullanılan deneysel ve sayısal çalışmaların ayrıntılı

açıklamaları Kiriş (2026)'da sunulmuştur.

2.1. Sayısal Modellerin Doğrulanması

Geliştirilen sayısal modellerin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla her ankraj tipi için literatürde yer alan doğrulanmış deneysel veya nümerik çalışmalar referans alınmıştır. Doğrulama kapsamında helisel ankraj için Alnmr ve Mayassah (2024), kazık ankrajı için Ramadan vd. (2009), plaka ankrajı için Yünkül vd. (2025), emme kesonu için Xie vd. (2025) ve ağırlık ankrajı için Lu vd. (2024) tarafından sunulan sonuçlar kullanılmıştır. Şekil 1'de sayısal ve referans modellere ait yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması verilmekte olup, geliştirilen modellerin tüm ankraj tipleri için yük-yer değiştirme davranışı ve nihai taşıma kapasitesini literatürle uyumlu şekilde temsil ettiği görülmektedir. Gözlenen sınırlı farklılıkların modelleme kabulleri ve zemin parametrelerindeki farklılıklardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



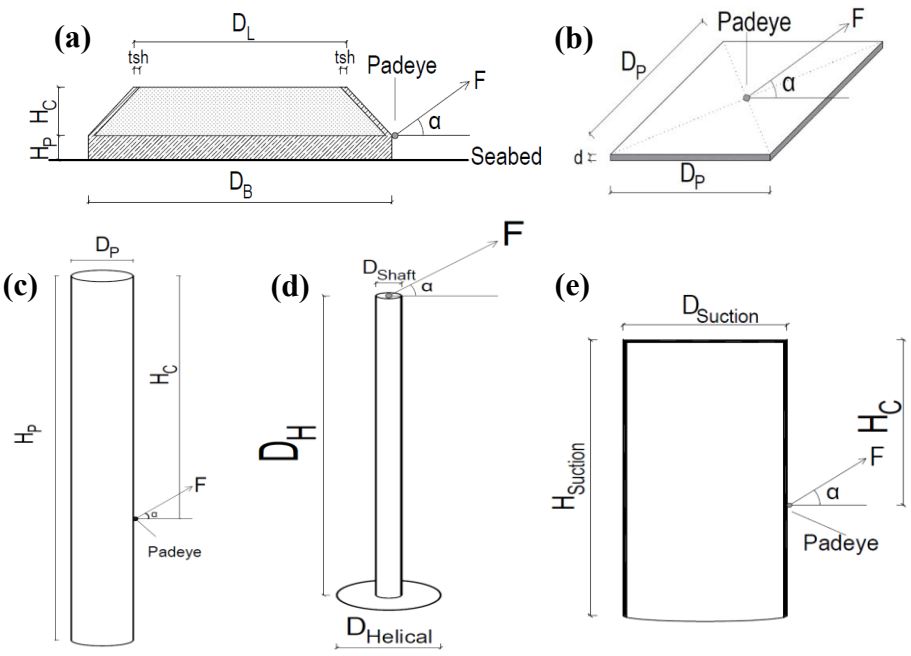
Şekil 1. Bu çalışmada geliştirilen sayısal modellerin literatürdeki referans çalışmalar ile doğrulanması: (a)

helisel ankraj (Alnmr ve Mayassah, 2024), (b) kazık ankrajı (Ramadan vd., 2009), (c) plaka ankrajı (Yünkül vd., 2025), (d) emme kesonu ankrajı (Xie vd., 2025) ve (e) ağırlık ankrajı (Lu vd., 2024).

Sayısal modellerin güvenilirliğini nicel olarak değerlendirmek amacıyla, her ankraj tipi için literatürde rapor edilen nihai taşıma kapasiteleri ile bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yüzde farklar hesaplanmıştır. Şekil 4'te görüldüğü üzere, geliştirilen modeller tüm ankraj tipleri için literatürle genel olarak uyumlu sonuçlar vermektedir. Hesaplanan yüzde farklar helisel ankrajlarda %1-11, kazık ankrajlarında %2-15, plaka ankrajlarında %8-14, emme kazıklarında %10-30 ve ağırlık ankrajlarında %10-15 arasında değişmektedir. Emme kazıklarında gözlenen nispeten yüksek farkların modelleme kabulleri, zemin davranış modeli, sınır koşulları ve ara yüz parametrelerindeki farklılıklardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Genel olarak sonuçlar, geliştirilen sayısal modellerin ankraj davranışını ve nihai taşıma kapasitesini güvenilir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

2.2 Parametrik Çalışma

Bu çalışmada, farklı açık deniz ankraj sistemlerinin değişen yükleme açıları ve zemin koşulları altındaki davranışlarını incelemek amacıyla PLAXIS 3D kullanılarak üç boyutlu sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Ağırlık, kazık, emme kesonu, helisel ve plaka ankrajları modellenmiş; tüm modellerde ankraj-zemin etkileşiminin gerçekçi şekilde temsil edilebilmesi için uygun zemin davranış modelleri, ara yüz elemanları ve sınır koşulları tanımlanmıştır. Model boyutları sınır etkilerini en aza indirecek şekilde belirlenmiş, yükler ankraj başlığına farklı yükleme açıları altında uygulanmıştır. Şekil 2'de parametrik analizlerde kullanılan ankraj geometrileri gösterilmekte olup, tüm ankraj tiplerinde yalnızca ankraj geometrisi ve parametrik değişkenler değiştirilerek farklı sistemlerin aynı analiz koşulları altında karşılaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 2. Parametrik analizlerde kullanılan üç boyutlu sonlu eleman modeli ve genel modelleme yaklaşımı.

Analizlerde kullanılan ankraj geometrileri, literatürde bulunan referans çalışmalar esas alınarak belirlenmiş ve tüm parametrik analizlerde sabit tutulmuştur. Böylece ankraj performansındaki değişimlerin yalnızca yükleme açısı ve zemin dayanımındaki farklılıklardan kaynaklanması sağlanmıştır. Her ankraj tipine ait temel geometrik özellikler ve model boyutları Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Bu çalışmada incelenen ankraj sistemlerinin geometrik özellikleri ve temel boyutları.

Ankraj Tipi	**Parametreler & Boyutlar (m)**
Ağırlık Tipi	H_C: 1.60, H_P: 0.80, D_L: 7.00, D_B: 10.00, t_{sh}: 0.20
Plaka	D_P: 5.00, d: 0.20
Kazık	D_P: 4.00, H_P: 30.00, H_C: 20.00, t: 0.10
Helisel	D_H: 15.00, $D_{Helical}$: 1.76, D_{Shaft}: 0.88
Emme Kesonu	$D_{Suction}$: 5.00, $H_{Suction}$: 10.00, H_C: 6.00, t: 0.10

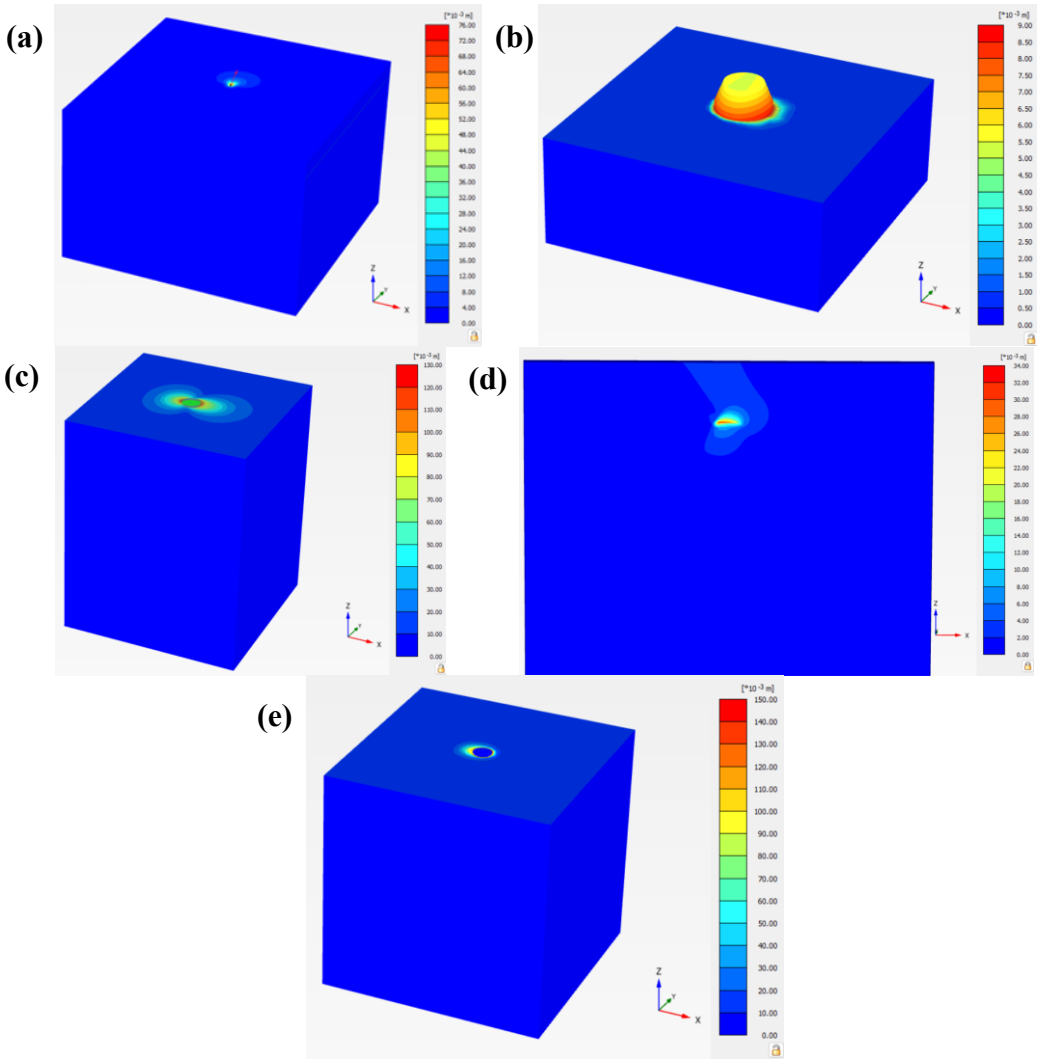
Farklı ankraj sistemlerinin değişen yükleme yönü ve zemin koşulları altındaki davranışlarını değerlendirmek amacıyla parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Tüm analizlerde ankraj geometrisi, model boyutları, sınır koşulları ve analiz prosedürü sabit tutulmuş; yalnızca yükleme açısı ile zemin dayanım parametreleri değiştirilmiştir. Yükleme yönünün etkisini incelemek amacıyla 0°, 30°, 60° ve 90° olmak üzere dört farklı yükleme açısı kullanılmıştır. Kum zeminlerde Hardening Soil (HS) modeli ile içsel sürtünme açısı (φ = 30°, 32°, 34°, 36° ve 38°), kil zeminlerde ise drenajsız kayma dayanımı (c_u = 25, 50, 75, 100 ve 125 kPa) parametrik değişken olarak ele alınmıştır. Analizlerde kullanılan zeminin geoteknik özellikleri ve diğer ilgili parametreler Kiriş (2026)'da ayrıntılı olarak sunulmuştur. Her ankraj tipi için elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri, nihai taşıma kapasiteleri ve performans göstergeleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3. ANKRAJ SİSTEMLERİNİN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

3.1 Farklı Ankraj Tiplerinde Yer Değiştirme Davranışı

Parametrik analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme konturları, farklı ankraj sistemlerinin uygulanan yükleme açıları altında geliştirdiği deformasyon mekanizmalarının değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Yer değiştirme dağılımları, ankraj çevresinde oluşan deformasyon bölgelerini ve yük aktarım mekanizmalarını ortaya koyarak farklı ankraj tiplerinin davranışlarının karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda her ankraj tipi için karakteristik yükleme açıları seçilmiş ve elde edilen yer değiştirme konturları Şekil 3'te sunulmuştur.

Şekil 3'te, farklı ankraj tiplerinin yükleme açısına bağlı olarak belirgin şekilde farklı deformasyon mekanizmaları geliştirdiği görülmektedir. Yer değiştirme konturları, yük aktarım mekanizmasının ankraj geometrisi ve yükleme yönünden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Ağırlık ankrajında deformasyon ankraj tabanı çevresinde yoğunlaşırken, helisel ve kazık ankrajlarında yük şaft boyunca daha derin zemin tabakalarına aktarılmaktadır. Plaka ankrajında geniş bir pasif zemin bloğu harekete geçerken, emme kesonunda özellikle düşeye yakın yükleme durumlarında keson-zemin arayüzeyinde ve keson ucunda deformasyon bölgesi oluşmaktadır. Bu bulgular, ankraj performansının yalnızca nihai taşıma kapasitesiyle değil, deformasyon davranışı ve yük aktarım mekanizması birlikte değerlendirilerek incelenmesi gerektiğini göstermektedir.



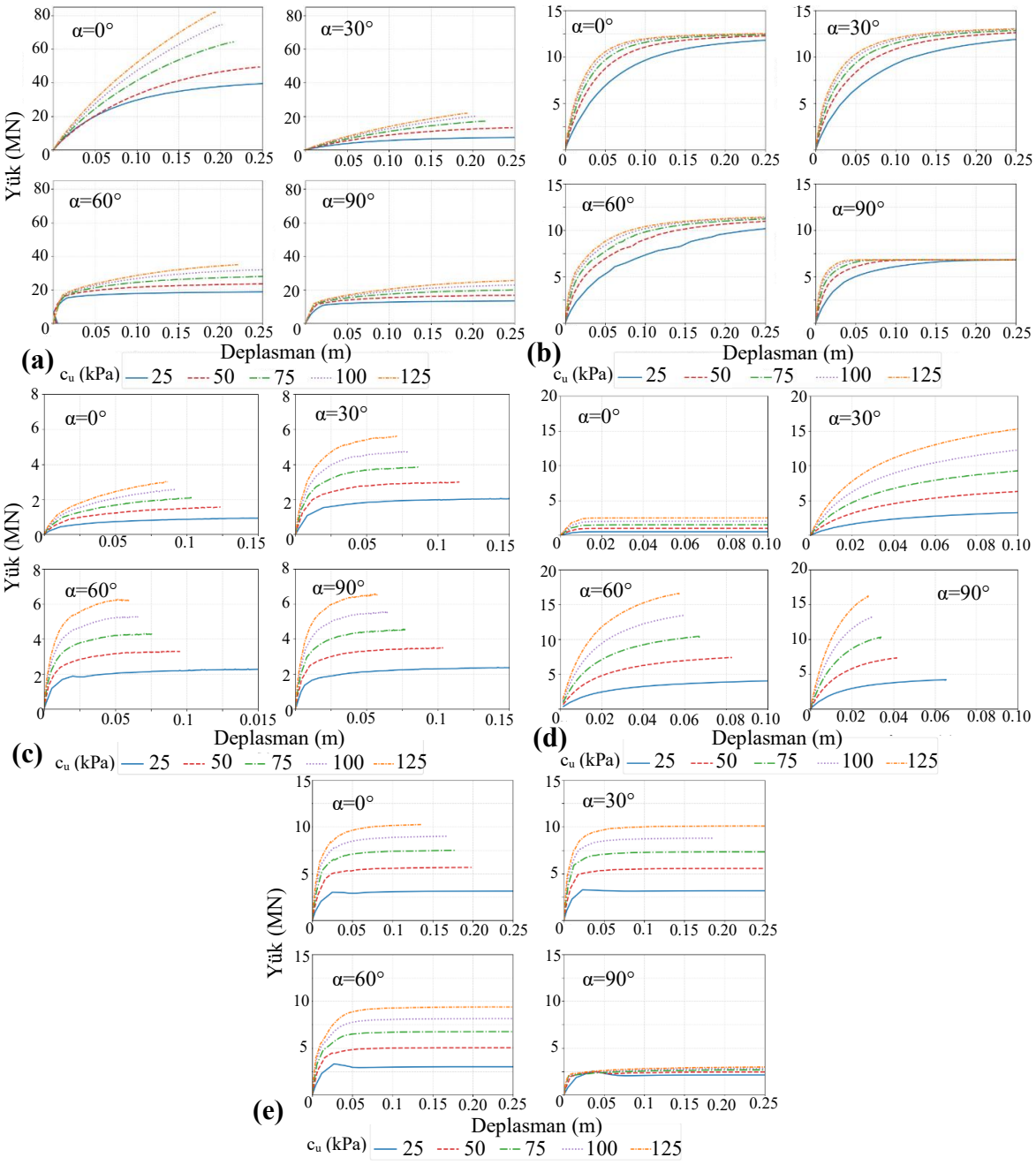
Şekil 3. PLAXIS 3D modellerinden elde edilen farklı ankraj tipleri ve yükleme açıları için yer değiştirme konturları: (a) 30° yükleme açısı altında ağırlık ankrajının izometrik görünümü, (b) 60° yükleme açısı altında helisel ankrajın izometrik görünümü, (c) 30° yükleme açısı altında kazık ankrajının izometrik görünümü, (d) 30° yükleme açısı altında plaka ankrajının kesit görünümü ve (e) 90° yükleme açısı altında emme kesonu ankrajının izometrik görünümü.

3.2 Farklı Yükleme Açılarının Ankraj Davranışına Etkisi

Farklı ankraj sistemlerinin yük–yer değiştirme davranışları, yükleme açısı ile zemin dayanımının ankraj performansı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla kil ve kum zeminler için ayrı ayrı incelenmiştir. Parametrik analizlerde bağlama açısı ($\alpha = 0°, 30°, 60°$ ve $90°$) değiştirilmiş; kil zeminlerde drenajsız kayma dayanımı (c_u = 25–125 kPa), kum zeminlerde ise içsel sürtünme açısı ($\varphi = 30°–38°$) parametreleri dikkate alınmıştır. Elde edilen yük–yer değiştirme eğrileri; ankrajların başlangıç rijitliğini, nihai taşıma kapasitesini ve yük aktarım mekanizmalarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye imkân sağlamaktadır. Kil zemine ait sonuçlar Şekil 4'te, kum zemine ait sonuçlar ise Şekil 5'te sunulmaktadır. Bu analizler, yükleme açısı, zemin dayanımı ve ankraj geometrisinin birlikte ankraj performansını nasıl şekillendirdiğini ortaya koymaktadır.

Kil Zeminde Ankraj Sistemlerinin Yük–Yer Değiştirme Davranışı

Kil zeminde farklı ankraj sistemlerine ait yük–yer değiştirme eğrileri Şekil 4'te sunulmaktadır. Analizlerde kazık, emme kesonu, helisel, plaka ve ağırlık ankrajları α = 0°, 30°, 60° ve 90° bağlama açıları altında değerlendirilmiş; drenajsız kayma dayanımı (c_u= 25–125 kPa) parametrik olarak değiştirilmiştir. Böylece yükleme yönü ile zemin dayanımının farklı ankraj sistemlerinin yük–yer değiştirme davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



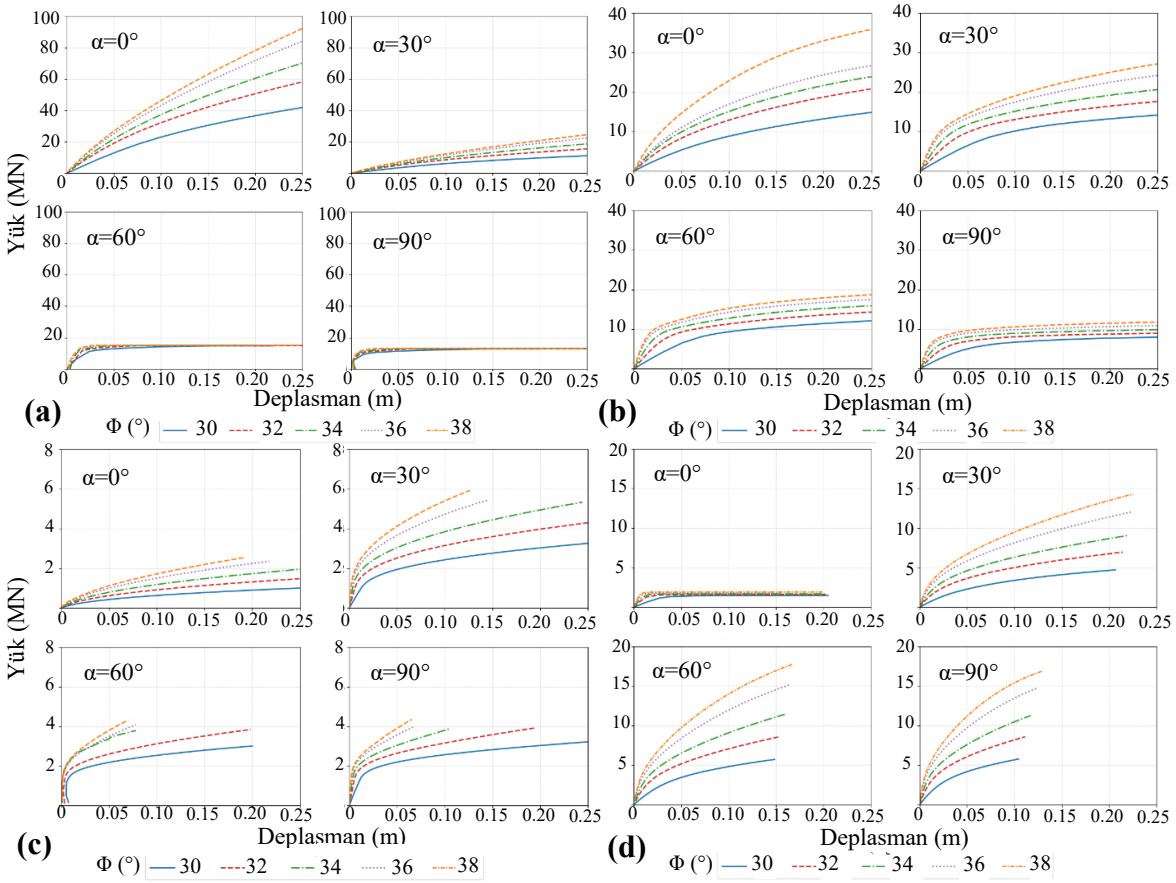
Şekil 4. Farklı drenajsız kayma dayanımı (c_u) seviyeleri ve bağlama açıları (α = 0°, 30°, 60° ve 90°) altında kil zemindeki ankraj sistemlerinin yük-yer değiştirme davranışı: (a) kazık, (b) emme kesonu, (c) helisel, (d) plaka ve (e) ağırlık ankrajı.

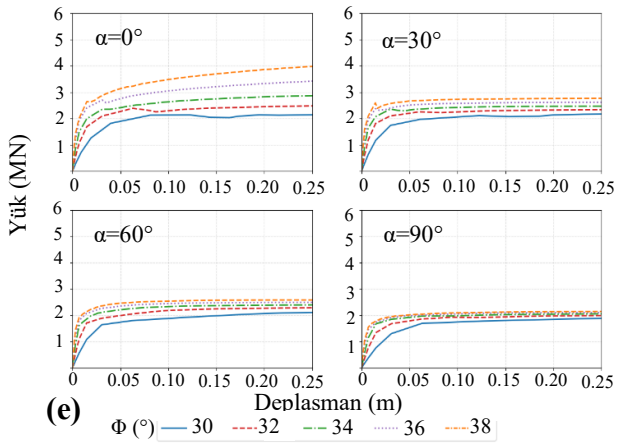
Kil zeminde farklı ankraj sistemlerine ait yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4'te sunulmaktadır. Analizlerde kazık, emme kesonu, helisel, plaka ve ağırlık ankrajları için

bağlama açısı (α = 0°, 30°, 60° ve 90°) ile drenajsız kayma dayanımı (c_u = 25-125 kPa) parametrik olarak değiştirilmiştir. Sonuçlar, tüm ankraj tiplerinde drenajsız kayma dayanımının artmasıyla başlangıç rijitliği ve nihai taşıma kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, yükleme açısının etkisi ankraj tipine bağlı olarak değişmekte; kazık ve helisel ankrajlarda yük şaft boyunca çevre zemine aktarılırken, plaka ve emme kesonu ankrajlarında daha geniş pasif zemin bölgeleri mobilize olmaktadır. Ağırlık ankrajında ise taşıma kapasitesi büyük ölçüde ankraj ağırlığı ve taban altında gelişen pasif direnç tarafından kontrol edilmektedir. Elde edilen eğilimler literatürde rapor edilen deneysel ve sayısal çalışmalarla uyumlu olup, geliştirilen sayısal modellerin farklı ankraj sistemlerinin davranışını güvenilir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Kum Zeminde Ankraj Sistemlerinin Yük–Yer Değiştirme Davranışı

Şekil 5'te kum zeminde farklı ankraj sistemlerine ait yük-yer değiştirme eğrileri sunulmaktadır. Analizlerde içsel sürtünme açısı (φ = 30°, 32°, 34°, 36° ve 38°) ile bağlama açısı (α = 0°, 30°, 60° ve 90°) parametrik olarak değiştirilmiş; bu parametrelerin ankrajların başlangıç rijitliği, yük aktarım mekanizması ve nihai taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



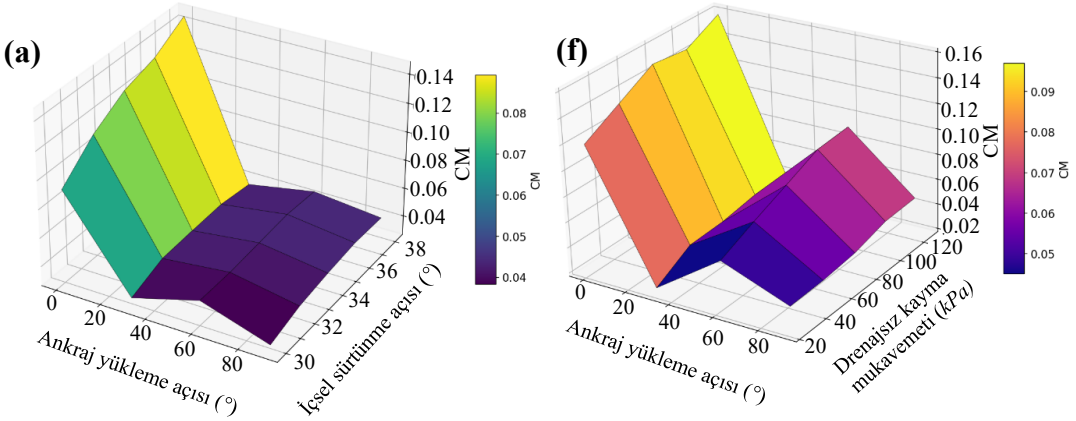


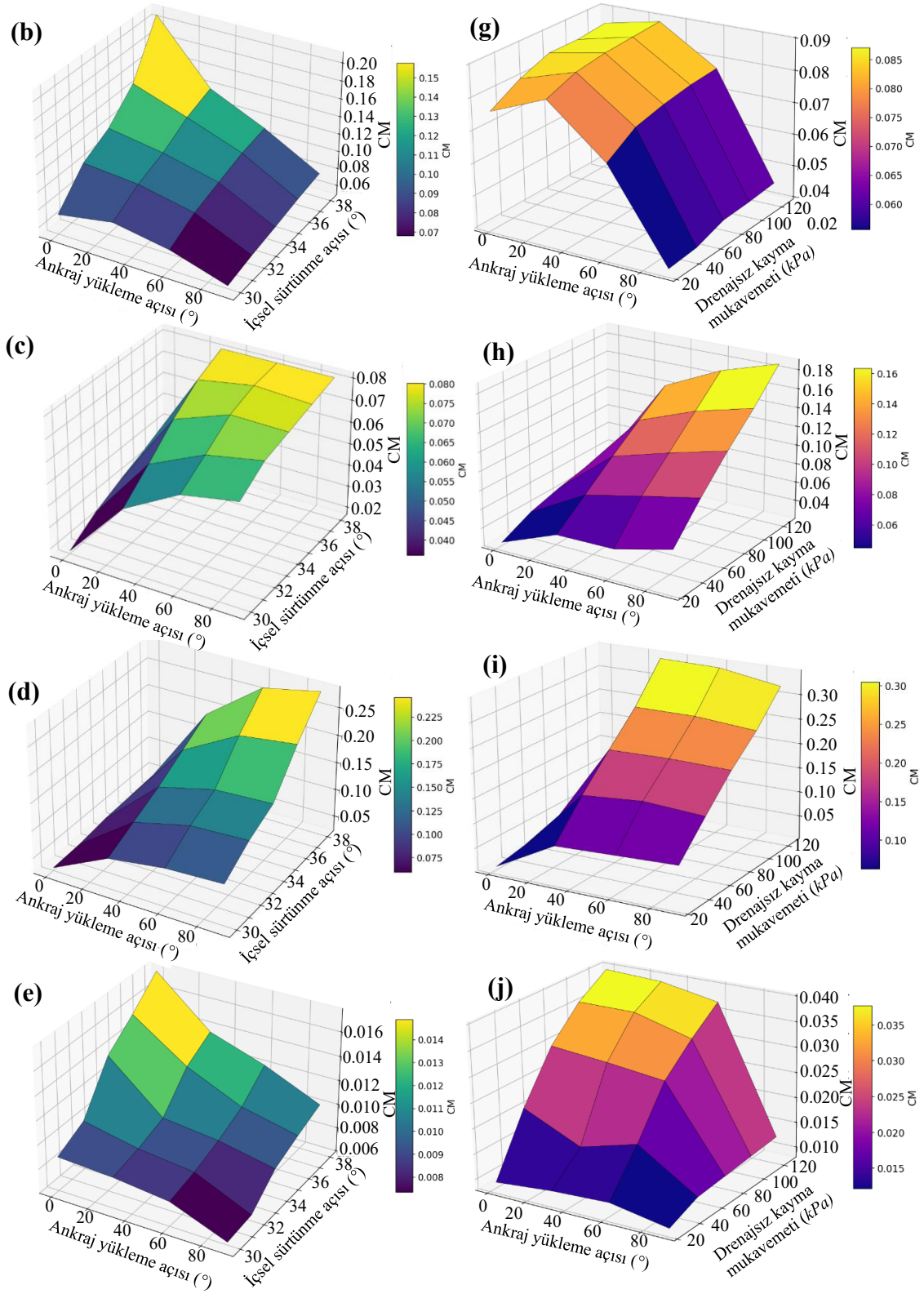
Şekil 5.Farklı içsel sürtünme açısı (φ) seviyeleri ve bağlama açıları (α = 0°, 30°, 60° ve 90°) altında kum zemindeki ankraj sistemlerinin yük-yer değiştirme davranışı: (a) kazık, (b) emme kesonu, (c) helisel, (d) plaka ve (e) ağırlık ankrajı.

Kum zeminlerde içsel sürtünme açısının artması tüm ankraj tiplerinde başlangıç rijitliğini ve nihai taşıma kapasitesini artırmış, yük-yer değiştirme eğrileri daha dik bir karakter kazanarak taşıma kapasitesi daha küçük yer değiştirmelerde mobilize edilmiştir. Bununla birlikte, yükleme açısının etkisi ankraj tipine bağlı olarak değişmektedir. Kazık, emme kesonu ve ağırlık ankrajlarında düşük bağlama açıları daha yüksek taşıma kapasiteleri sağlarken, helisel ve plaka ankrajlarında en yüksek kapasitelere düşeye yakın yükleme koşullarında ulaşılmıştır. Bu farklılık, ankraj geometrisine bağlı olarak gelişen yük aktarım mekanizmaları ve mobilize edilen zemin hacmindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Elde edilen eğilimler literatürde rapor edilen deneysel ve sayısal çalışmalarla uyumlu olup, geliştirilen sayısal modellerin farklı ankraj sistemlerinin davranışını güvenilir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

3.3 Kapasite–Kütle Oranı (CM) ile Malzeme Verimliliğinin Değerlendirilmesi

Farklı ankraj sistemlerinin malzeme kullanım verimliliğini karşılaştırmak amacıyla Kapasite-Kütle Oranı (Capacity-to-Mass Ratio, CM) kullanılmıştır. CM, ankrajın nihai taşıma kapasitesinin (T_{ult}) yapısal kütlesine oranı olarak tanımlanmakta ve birim kütle başına mobilize edilen taşıma kapasitesini ifade etmektedir. Tüm ankraj tipleri için CM değerleri aynı geometri ve modelleme kabulleri altında, kuru ankraj kütlesi esas alınarak hesaplanmış; böylece farklı sistemlerin göreli malzeme kullanım verimliliği ortak bir değerlendirme çerçevesinde karşılaştırılmıştır.





Şekil 6. Farklı ankraj–zemin sistemleri için bağlama açısı (α) ve zemin dayanım parametrelerine (φ, c_u) bağlı olarak Kapasite–Kütle Oranı (CM) değerlerinin değişimi: (a) kazık–kum, (b) emme kesonu–kum, (c) helisel–kum, (d) plaka–kum, (e) ağırlık–kum, (f) kazık–kil, (g) emme kesonu–kil, (h) helisel–kil, (i) plaka–kil ve (j) ağırlık–kil.

Şekil 6'da farklı ankraj sistemlerine ait Kapasite-Kütle Oranı (CM) değerlerinin yükleme açısı (α) ile zemin dayanım parametrelerine (φ ve c_u) bağlı değişimi sunulmaktadır. Sonuçlar, CM değerlerinin ankraj tipi, yükleme açısı ve zemin dayanımından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Kum ve kil zeminlerde kazık, emme kesonu ve ağırlık ankrajlarında yükleme açısının artmasıyla CM genel olarak azalırken, helisel ve özellikle plaka ankrajlarında artış eğilimi gözlenmiştir. Ayrıca zemin dayanımındaki artış tüm ankraj tiplerinde CM değerlerini yükseltmiş, en yüksek malzeme verimliliği yüksek dayanımlı zeminlerde plaka ankrajlarında elde edilmiştir. Buna karşılık ağırlık ankrajları, taşıma kapasitesinin büyük ölçüde kendi kütlesine bağlı olması nedeniyle en düşük CM değerlerini göstermiştir. Bu sonuçlar, ankraj seçiminde yalnızca nihai taşıma kapasitesinin değil, malzeme kullanım verimliliğinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüzer açık deniz rüzgâr türbinlerinde kullanılan ağırlık, kazık, emme kesonu, helisel ve plaka ankrajlarının farklı yükleme açıları altında kum ve kil zeminlerdeki davranışları üç boyutlu sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Geliştirilen sayısal modeller literatürde yer alan deneysel ve sayısal çalışmalarla doğrulanmış, ardından yükleme açısı ve zemin dayanımının ankraj performansı üzerindeki etkileri parametrik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Geliştirilen sayısal modeller, yük-yer değiştirme davranışı ve nihai taşıma kapasitesi bakımından literatürle uyumlu sonuçlar vermiş ve doğrulama analizlerinde kabul edilebilir doğruluk sağlamıştır.

2. Hem kum hem de kil zeminlerde zemin dayanımındaki artış tüm ankraj tiplerinde başlangıç rijitliğini ve nihai taşıma kapasitesini artırmıştır. Bununla birlikte, yükleme açısının etkisi ankraj tipine bağlı olarak değişmiş; kazık, emme kesonu ve ağırlık ankrajları düşük yükleme açılarında, helisel ve plaka ankrajları ise düşeye yakın yüklemelerde daha yüksek performans göstermiştir.

3. Kapasite-Kütle Oranı (CM) sonuçları, plaka ankrajlarının özellikle yüksek dayanımlı zeminlerde en yüksek malzeme kullanım verimliliğine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

4. CM oranının değerlendirilmesi, ankraj seçiminin zemin özellikleri ve yükleme yönüne bağlı olduğunu göstermiş; yüksek dayanımlı zeminlerde plaka ankrajları, düşük dayanımlı zemin ve yataya yakın yükleme koşullarında ise kazık ve emme kesonu ankrajları daha uygun performans sergilemiştir.

Bununla birlikte, sonuçlar temsili ve optimize edilmemiş ankraj geometrileri ile homojen zemin kabulleri çerçevesinde değerlendirilmelidir. Anizotropi, kurulum etkileri ve CM oranına dahil edilmeyen kurulum ve operasyonel koşullar dikkate alınmamıştır. Bu nedenle bulgular kesin bir performans sıralaması olarak değil, genel davranış eğilimleri olarak değerlendirilmelidir. Gelecek çalışmalarda farklı zemin profilleri, optimize edilmiş geometriler ve kurulum koşullarının dikkate alınması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Alnmr, A.; Mayassah, M. (2024). Innovations in Offshore Wind: Reviewing Current Status and Future Prospects with a Parametric Analysis of Helical Pile Performance for Anchoring Mooring Lines. J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12, 1040. https://doi.org/10.3390/jmse12071040.

Cerfontaine, B., Knappett, J., Brown, M. J., Davidson, C., & Sharif, Y. (2020). Optimised design of screw anchors in tension in sand for renewable energy applications. Ocean Engineering, 217, 108010. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108010.

Cerfontaine, B., White, D., Kwa, K., Gourvenec, S., Knappett, J., & Brown, M. (2023). Anchor geotechnics for floating offshore wind: Current technologies and future innovations. Ocean Engineering, 279, 114327. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114327.

Chen, H. Z., Wang, L., Tian, Y. H., Zhang, C. H., Shen, Z. C., & Liu, M. M. (2023). Failure envelopes of single plate helical anchors for floating offshore wind turbine. China Ocean Engineering, 37(6), 1000–1010. https://doi.org/10.1007/s13344-023-0083-6.

Henderson, A. R., & Witcher, D. (2010). Floating offshore wind energy: A review of the current status and an assessment of the prospects. Wind Engineering, 34(1), 1–16.

Huang, Y., Lai, Y., Wang, P., Qi, H., & Zong, Z. (2026). Inclined loading performance and failure envelope modelling of single-helix anchors in clay with depth-varying strength. Ocean Engineering, 343(Part 2), 123368. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123368.

Katsouris, G., & Marina, A. J. (2016). Cost modelling of floating wind farms. ECN Petten.

Kiriş (2026). Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri İçin Ankraj Sistemlerinin Kum ve Kil Zeminlerde Çekme Yükleri Altında Analitik, Sayısal ve Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi.

Lu, Y., Chen, H., Tomac, I., & McCartney, J. S. (2024). Analytical and numerical investigation of gravity anchors for floating photovoltaic systems. Ocean Engineering, 313(Part 3), 119591. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119591.

Ramadan, M. I., Butt, S. D., & Popescu, R. (2009). Finite element modelling of offshore anchor piles under mooring forces. In Proceedings of GeoHalifax2009 (September 20–23, 2009, Canada).

Xie, S., Sun, C., Liu, B., Huang, L., Deng, H., Zhu, M., Li, X., & Dai, G. (2025). Numerical simulation on anchored load-bearing characteristics of suction caisson for floating offshore wind power. Journal of Marine Science and Engineering, 13(9), 1653. https://doi.org/10.3390/jmse13091653.

Yünkül, K., Gürbüz, A., & Demirdöğen, S. (2025). The effect of geometry on the uplift performance of horizontal plate anchors in sandy soil. Sādhanā, 50, 131. https://doi.org/10.1007/s12046-025-02817-8.