Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

EMME ANKRAJLARININ TASARIM OPTİMİZASYONU ÜZERİNE NÜMERİK BİR ÇALIŞMA

A NUMERICAL STUDY ON THE DESIGN OPTIMIZATION FOR SUCTION ANCHORS

Fırat Kağan SARGIN[1], Havvanur KILIÇ[2]

ÖZET

Emme ankrajları, özellikle derin deniz ortamlarında inşa edilen yüzer platformların deniz tabanına demirlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan temel sistemleridir. Bu sistemler, narinlikleri ve yükleme koşulları açısından, yüzeysel ve derin temellerden ayrışmakta ve kendilerine özgü optimizasyon kriterleri barındırmaktadır. Bu kapsamda, mukavemet profili derinlikle artış gösteren normal konsolide kil bir deniz tabanı sedimanında kurulu olduğu düşünülen bir emme ankrajının drenajsız davranışının incelenmesi amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar (3B SE) yöntemi kullanılarak bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Yükün optimum mapa konumunda uygulanması durumunda elde edilen kapasite zarfları, literatürde yer alan kapasite zarfı etkileşim denklemleriyle uyum içindedir. Ancak mapanın optimum konumundan uzaklaşması durumunda bu uyumda belirgin farklılıklar meydana gelmektedir. Optimum mapa konumu, yükleme açısına bağlı olarak, ankraj gömülü derinliğinin yaklaşık dörtte üçü mertebelerindedir. Mapanın optimum konumundan uzaklaşması ciddi oranda kapasite kayıplarıyla sonuçlanmaktadır. Bu bulgular, yük bağlama noktası ve yükleme açısı parametrelerinin ankraj davranışını önemli ölçüde etkilediğini ve tasarım optimizasyonunun kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Emme ankrajları, kapasite zarfı, optimum mapa derinliği, optimum yükleme açısı, sonlu elemanlar yöntemi*

ABSTRACT

Suction anchors are widely used foundation systems for mooring floating platforms to the seabed, particularly in deep-water environments. These systems differ from shallow and deep foundations due to their slenderness and specific loading conditions, introducing unique optimization criteria. In this context, a series of parametric studies was performed using the three-dimensional finite element (3D FE) method to investigate the undrained behavior of a suction anchor installed in a normally consolidated clay seabed sediment with a strength profile increasing with depth. The capacity envelopes obtained when the load is applied at the optimum pad-eye location align well with the interaction equations in the literature. However, significant deviations emerge as the pad-eye location away from its optimum position. Depending on the loading angle, the optimum pad-eye location is approximately three-quarters of the anchor embedment depth. Furthermore, any deviation from this optimum position results in significant capacity losses. These findings demonstrate that the load attachment point and loading angle parameters heavily influence anchor behavior, highlighting the critical importance of design optimization.

Keywords: *Suction anchors, capacity envelope, optimum pad-eye location, optimum loading angle, finite element method*

[1] İnşaat Müh., Yıldız Teknik Üniversitesi, kagan.sargin@std.yildiz.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, kilic@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Açık deniz geoteknik mühendisliğinin teorik temelleri karasal geoteknik uygulamalarından doğmuş olsa da zorlu hidrodinamik çalışma ortamı, baskın çevresel yük rejimleri, yüksek boşluk suyu basıncı altındaki deniz tabanı sedimanlarının kompleks bünye davranışı, deniz üstü/deniz altı inşaat ve kurulum metodolojilerinin özgünlüğü ile kullanılan temel sistemlerinin geometrik ölçekleri nedeniyle karasal uygulamalardan ayrışmaktadır. Tüm bu farklılıklar, sektörün kendine özgü tasarım kriterleri geliştirmesini zorunlu kılmış ve açık deniz geoteknik mühendisliğinin ayrı bir uzmanlık alanı haline gelmesiyle sonuçlanmıştır.

Açık deniz endüstrisi, 1947 yılında Louisiana kıyısında, sadece 6 metre su yüksekliğinde kurulan ilk deniz üstü platformdan, günümüzde 2000 metreyi aşan su yüksekliklerinde yapı inşasını mümkün kılmak üzere büyük bir gelişim göstermiştir. Artan deniz derinliklerindeki inşaat ihtiyacı, deniz üstü yapıların daha esnek veya yüzer formda tasarlanmasıyla sonuçlanmış ve açık deniz temel sistemlerinin evrimini zorunlu kılmıştır (Randolph ve Gourvenec, 2017).

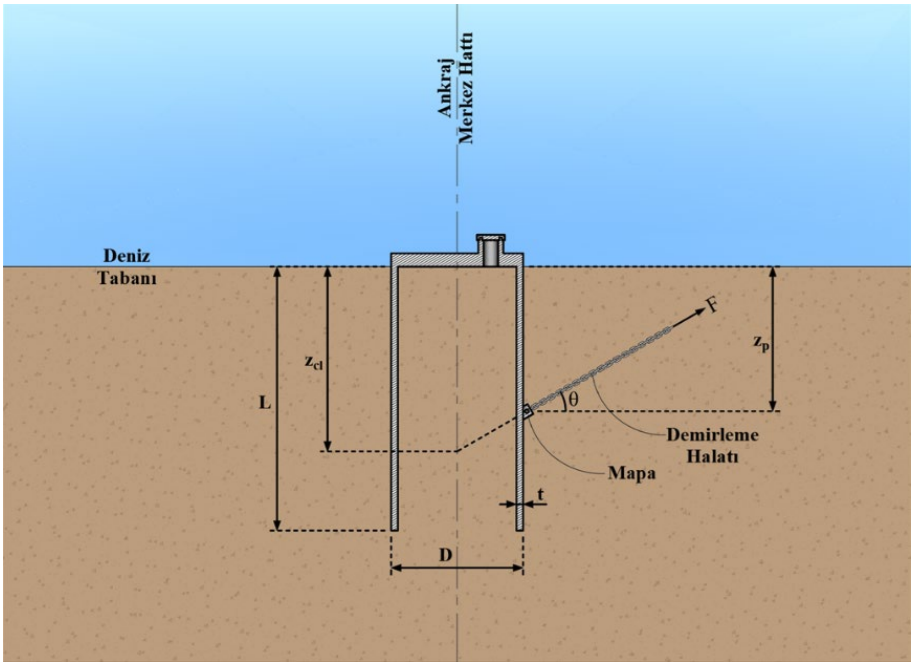
Açık deniz temel sistemleri, üstyapı yüklerini deniz tabanına rijit şekilde aktaran sabit temel sistemleri ve bir demirleme mekanizmasına ihtiyaç duyan yüzer temel sistemleri olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Güncel teknolojik sınırlar doğrultusunda, sığ ve orta derinlikteki deniz ortamlarında ($\leq$60 m) sabit temel sistemlerinin kullanımı, maliyet optimizasyonu açısından efektif bir çözüm sunmaktadır. Buna karşın, operasyon sahasındaki su yüksekliğinin 60 metrelik kritik eşiği aşması durumunda sabit temel sistemleri imalat ve montaj maliyetleri açısından ekonomik bir çözüm olmaktan çıkmakta ve yüzer temel sistemlerinin kullanımı zorunlu hale gelmektedir (Bhattacharya, 2019). Bu tür sahalarda inşa edilmesi planlanan yüzer platformlar için, ters basınç prensibiyle zemine penetrasyonu sağlanan emme ankrajları, efektif bir temel sistemi olarak sıklıkla kullanılmaktadır.

Ters basınç prensibiyle kurulumu gerçekleştirilen emme ankrajları, inşaat ve montaj yönteminden kaynaklanan geometrik sınırlara tabidir. Genellikle $1.0 \leq L/d \leq 6$ narinlik değer aralığında kullanımı mümkün olan emme ankrajları, bu özellikleri ve zeminle etkileşimleri bakımından yüzeysel ve derin temel sistemlerine göre belirgin davranış farklılıkları göstermektedir (Houlsby ve Byrne, 2005). Açık deniz endüstrisi için önemli bir alternatif olan bu yapılar, yanal yükleme altında esnek kazık elemanlarının aksine rijit gövde davranışı sergilemeleri ve göçme mekanizmalarında hem sığ hem de derin temel direncinin bir kombinasyonunu barındırmaları nedeniyle ara temeller olarak değerlendirilmektedir (Kay vd., 2021).

Emme ankrajlarına ait şematik gösterim Şekil 1'de sunulmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere yüzer platformdan kaynaklı yükler, ankraja bir bağlantı elemanı aracılığıyla mapa konumunda aktarılır. Burada; mapanın deniz tabanına göre ankraj üzerindeki konumu z_p, ankrajın merkez hattındaki konumu ise z_{cl} parametresi ile ifade edilmektedir.

Bir ara temel olarak emme ankrajları, yanal yükleme altında sergiledikleri rijit gövde davranışı sebebiyle gömülü derinlikleri boyunca sabit bir rotasyon hareketi sergilemekte, bunun bir sonucu olarak da düşey (V), yatay (H) ve moment (M) kapasite bileşenleri arasında güçlü bir etkileşim barındırmaktadırlar. Bu güçlü etkileşim sebebiyle, bir kapasite bileşenindeki artış diğer bileşenlerin azalması ile sonuçlanır. Bu karmaşık etkileşimin ankraj kapasitesi üzerindeki etkilerini bütüncül bir şekilde tanımlamak amacıyla kullanılan VHM

kapasite zarfları, ankraj kapasitesini VHM uzayında genellikle ters çanak benzeri bir geometriyle temsil etmektedir.



Şekil 1. Emme ankrajı şematik gösterimi

Emme ankrajları için kapasite zarflarının kullanımını gerektiren yatay ve düşey kapasite bileşenleri arasındaki etkileşim, tasarımda tercih edilen demirleme sistemine göre değişiklik gösteren yükleme açısı (θ) ile doğrudan ilişkilidir. Uygulamada emme ankrajları ile birlikte kullanılan demirleme sistemleri; katener, gergin/yarı gergin hat ve gergi ayaklı sistemlerdir. Yüzer platform ile ankraj arasında gergin olmayan bağlantı elemanlarının kullanıldığı katener sistemlerde bağlantı elemanı mapadan önce deniz tabanına temas etmektedir. Dolayısıyla bu tür bir demirlemenin kullanıldığı ankrajlarda yükleme açısı sıfıra yaklaşmakta ve ankraj yalnızca yatay yüklemeye maruz kalmaktadır. Su yüksekliği arttıkça, bağlantı elemanının uzunluğu ve dolayısıyla kütlesi artmakta, bu durum üstyapı tasarımında sınırlayıcı bir etkiye sebep olmaktadır. Bu sınırlayıcı etkinin aşılması amacıyla, nispeten hafif bağlantı elemanları olan sentetik halatların kullanıldığı gergin hatlı sistemler geliştirilmiştir. Gergin hatlı sistemlerde yükün uygulanma şekli nedeniyle ankraj, eğik yüklemeye maruz kalmakta ve mapada, birim uzunluk başına düşük bağlantı elemanı kütlesinin bir sonucu olarak genellikle *45*°'lik bir yükleme açısı oluşmaktadır. Yarı gergin hatlı bağlantılar için yükleme açısı daha geniş bir aralıkta dağılsa da kritik tasarım koşulları altında benzer maksimum açılarla sınırlı kalmaktadır. Yüzer platform ile ankraj arasında gergin düşey çelik halatların kullanıldığı sistemler ise gergi ayaklı sistemler olarak adlandırılmaktadır. Gergi ayaklı sistemlerde ankraj, yalnızca düşey çekme yüklemesi altındadır (Ma vd., 2019).

Emme ankrajı tasarımında üstyapı yüklerinin temele aktarıldığı konum olan ve mapa terimiyle ifade edilen yük bağlantı noktasının seçimi kritik bir öneme sahiptir. Emme ankrajı konsepti için bir tasarım kriteri olan mapa konumu, ankraj davranışını ve ankraja ait kapasite zarfını doğrudan etkilemektedir. Tasarımda mapa konumunun optimum bir noktaya yerleştirilmesi yoluyla kapasite üzerindeki net moment etkisinin minimize edilmesi ve ankrajın rotasyon davranışı göstermeden tamamen yatayda ötelenmesi, bu sayede zemin reaksiyonlarının azami şekilde mobilize edilmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda kullanılan

iki boyutlu VH kapasite zarfları, üç boyutlu VHM uzayındaki kapasite zarfının mapa düzlemi üzerindeki izdüşümünü ifade etmektedir. Özellikle emme ankrajları için optimum mapa konumunun belirlenmesi yoluyla kapasite zarfı üzerindeki moment etkisinin kontrol altına alındığı bu yaklaşım, uluslararası standartlar ve modern açık deniz mühendisliği literatüründe ankraj tasarımı için kabul görmüş bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (DNV, 2017).

Günümüzde emme ankrajı uygulamalarında kabul gören ve uluslararası tasarım standartlarında yer alan VHM etkileşim zarflarının modern anlamdaki temelleri ilk olarak Murff (1994) tarafından ortaya atılmıştır. Bu temel yaklaşım Bransby ve Randolph (1998) tarafından derinlikle artan zemin mukavemet profilleri için modifiye edilmiştir. Bu literatür birikiminin somut bir çıktısı olan ve günümüzdeki tasarım esaslarının temelini oluşturan VHM etkileşim denklemi aşağıda sunulmaktadır.

$$\left(\frac{V}{V_{maks}}\right)^2 - 1 + \left[\left(\frac{H}{H_{maks}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{maks}}\right)^2\right]^{0.5} = 0 \quad (1)$$

Burada; V, H ve M sırasıyla ilgili yükleme açısı ve mapa konumu için düşey, yatay ve moment kapasite bileşenlerini; V_{maks}, H_{maks} ve M_{maks} ise yükleme koşullarından bağımsız olarak ankrajın taşıyabileceği maksimum düşey, yatay ve moment kapasite bileşenlerini ifade etmektedir. Ayrıca; V/V_{maks} normalize düşey kapasite, H/H_{maks} normalize yatay kapasite ve M/M_{maks} normalize moment kapasitesi terimleriyle ifade edilmektedir.

Bransby ve Randolph (1998), tamamen yatay ötelenme (M=0) durumu için yürüttüğü çalışmalarda; normalize yatay kapasiteye ait üstel katsayının 5 olarak alınması durumunda, kapasite zarflarının 2B SE analizlerinden elde edilen akma yüzeyleri ile daha yüksek bir uyum içinde olduğunu bildirmektedir. Bu bilgiler ışığında genel etkileşim denklemi aşağıdaki formda yeniden düzenlenebilir.

$$\left(\frac{V}{V_{maks}}\right)^2 + \left(\frac{H}{H_{maks}}\right)^5 = 1 \quad (2)$$

Senders ve Kay (2002) genel etkileşim denkleminin kübik formda basitleştirilebileceğini, dolayısıyla normalize düşey ve yatay kapasite değerlerine ait üstel ifadelerin a=b=3 olarak kullanılabileceğini ifade etmektedir.

Supachawarote (2004), farklı zemin mukavemet profilleri ve gömülme oranlarına (L/d) sahip ankrajlar için gerçekleştirdiği 3B SE analizlerinden elde ettiği bulgular neticesinde, genel etkileşim denkleminin ankraj geometrisinden etkilendiğini ve aşağıdaki formda revize edilebileceğini belirtmektedir.

$$\left(\frac{V}{V_{maks}}\right)^a + \left(\frac{H}{H_{maks}}\right)^b = 1 \quad (3)$$

Burada; a ve b üstel katsayıları, ankraj gömülme oranına bağlı katsayılar olmakla birlikte aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilmektedir.

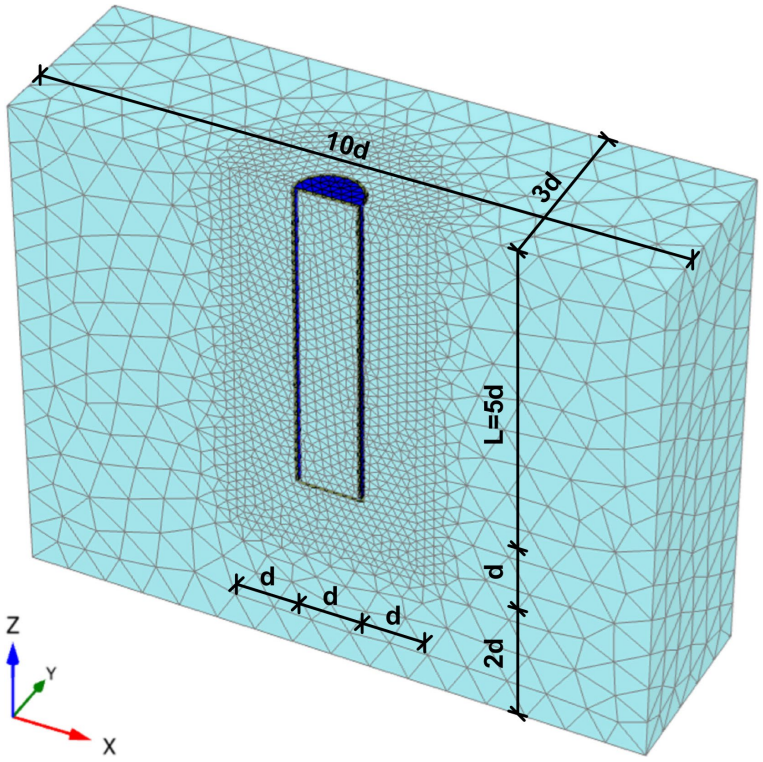
$$a = 0.5 + L/d \quad (4)$$
$$b = 4.5 - L/3d \quad (5)$$

Bu çalışma kapsamında, derinlikle artan zemin mukavemet profilinde yer alan bir emme ankrajının farklı mapa konumu ve yükleme açıları altındaki kapasite zarfları 3B SE analizleri

ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçların yukarıda açıklanan etkileşim denklemleriyle uyumluluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca bileşke kapasite değeri referans alınarak mapa konumu (z_{cl}) ve yükleme açısı (θ) değişkenlerinin ankraj davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında emme ankrajlarının karmaşık yükleme koşulları altındaki davranışını incelemek amacıyla, 3B SE analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelleme süreçlerinde, geoteknik uygulamalarında güvenilirliği ile öne çıkan Plaxis 3D yazılımından yararlanılmıştır. Ankraj-zemin etkileşiminin yüksek doğrulukla simüle edilebilmesi amacıyla, karmaşık geometrik sınır koşullarında yüksek yakınsama performansı gösteren 10 düğümlü dört-üçgen-yüzlü (tetrahedral) elemanlar tercih edilmiştir. Çalışmanın hesaplama maliyetini düşürmek ve analiz sürelerini minimize etmek amacıyla, geometri ve yükleme simetrisi dikkate alınarak yarım geometri modellemesi yapılmış ve simetri düzlemi üzerinde gerekli sınır koşulları tanımlanmıştır. Bu kapsamda sonlu eleman ağının çözüm hassasiyeti üzerindeki etkileri göz önünde bulundurularak ankraj duvarı çevresindeki ani gerilme gradyanlarının ve yüksek deformasyon alanlarının efektif bir şekilde modellenebilmesi amacıyla kesonun geometrik sınırlarından dışarıya doğru ve ankraj dış çapına eşit bir mesafede (5.0 m) lokal ağ sıklaştırması uygulanmıştır. İlgili ankraj geometrisi ve çevre zemini için sonlu eleman ağı ile model boyutları Şekil 2 kapsamında sunulmaktadır.



Şekil 2. İlgili ankraj geometrisi için mesh görünümü ve model boyutları

Emme ankrajlarının kapasite tahmini özelinde deplasman kontrollü analiz yöntemi, yükleme koşullarının ön tanımlı yüzey deplasmanları kullanılarak modellenmesi prensibine dayanmaktadır. Bu sayede bütün ankraj uzunluğu boyunca sabit bir deplasman davranışı elde edilmekte ve ankrajın tamamen yatay ötelenme davranışı göstermesi sağlanmaktadır. Bu durum sitemde moment oluşumunun engellenmesini ve ilgili yükleme koşulları altında düşey ve yatay kapasite bileşenlerine ait maksimum değerlerin elde edilmesini mümkün

kılmaktadır. Emme ankrajlarının teorik arka planı düşünüldüğünde, deplasman kontrollü analiz yöntemi geçerli bir yaklaşım olmakla birlikte, yüklemenin sahada uygulanış biçiminin doğrudan modellenmesi konusunda yetersiz kalmaktadır. Yüklemenin bir yüzey boyunca uygulanan ön tanımlı deplasmanlar ile simüle edildiği deplasman kontrollü analizlerde bir yükleme noktasından söz edilemez. Dolayısıyla deplasman kontrollü analizlerin kullanılması durumunda mapa konumunun ankraj davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca bu analizlerde eğik yükleme, kullanılan ön tanımlı deplasmanın yatay ve düşey bileşeni arasındaki oran (u_x/u_y) ile modellendiğinden, yükleme açısı bir girdi parametresi değil bir analiz sonucudur.

Yük kontrollü analiz yöntemi ise yükleme koşullarının ankraj duvarı üzerindeki belirli bir noktaya uygulanan noktasal yüklerin kullanımı prensibine dayanmaktadır. Bu durum, yük kontrollü analiz yönteminin kullanılması yoluyla sahadaki gerçek yükleme koşullarının simüle edilebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca yükleme, bileşke zincir yükünün yatay ve düşey bileşenleri yardımıyla modellendiğinden yükleme açısı doğrudan bir girdi parametresi olarak kullanılabilmektedir. Bu avantajlarının yanında yük kontrollü analiz yönteminin kullanılması durumunda optimum mapa konumunun mutlak değerinin belirlenmesi büyük uğraş ve zaman gerektirmektedir. 3B SE analiz yönteminin sınırlayıcı bir etkisi olarak karşılaşılan bu durum, yük kontrollü analizler için sistemde bir miktar moment oluşumuyla kendini gösterse de normalize kapasite değerleri üzerinde majör sapmaların meydana gelmesi beklenmemektedir.

Bu çalışma kapsamında her iki yöntemin avantajlarından faydalanmak ve göçme mekanizmaları ile yükleme koşullarını kapsamlı bir biçimde simüle etmek amacıyla deplasman kontrollü ve yük kontrollü analiz yöntemleri birlikte kullanılmış, analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırmasına yer verilmiştir. Bu doğrultuda, ilgili yükleme senaryoları altında literatürde kabul görmüş yaklaşımlarla uyumlu olarak, keson kapağının merkezinde tanımlanan bir referans noktasında, ankraj çapının %20'si (0.2d) kadar toplam deplasman değerine karşılık gelen yük miktarı, ilgili yükleme koşulu altındaki kapasite değeri olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1. Normal konsolide kil zemin ve arayüz elemanına ait malzeme parametreleri

Açıklama	Malzeme Modeli	γ (kN/m^3)	$s_{u,ref}$ (kN/m^2)	$s_{u,inc}$ (kN/m^2/m)	E_{ref} (kN/m^2)	E_{inc} (kN/m^2/m)	υ_u (-)	r_{int} (-)	OCR (-)
NC Kil	MC	16	0	1.25	50	625	0.495	1.0	1.0
Arayüz elemanı	MC	16	0	1.25	50	625	0.495	0.65	1.0

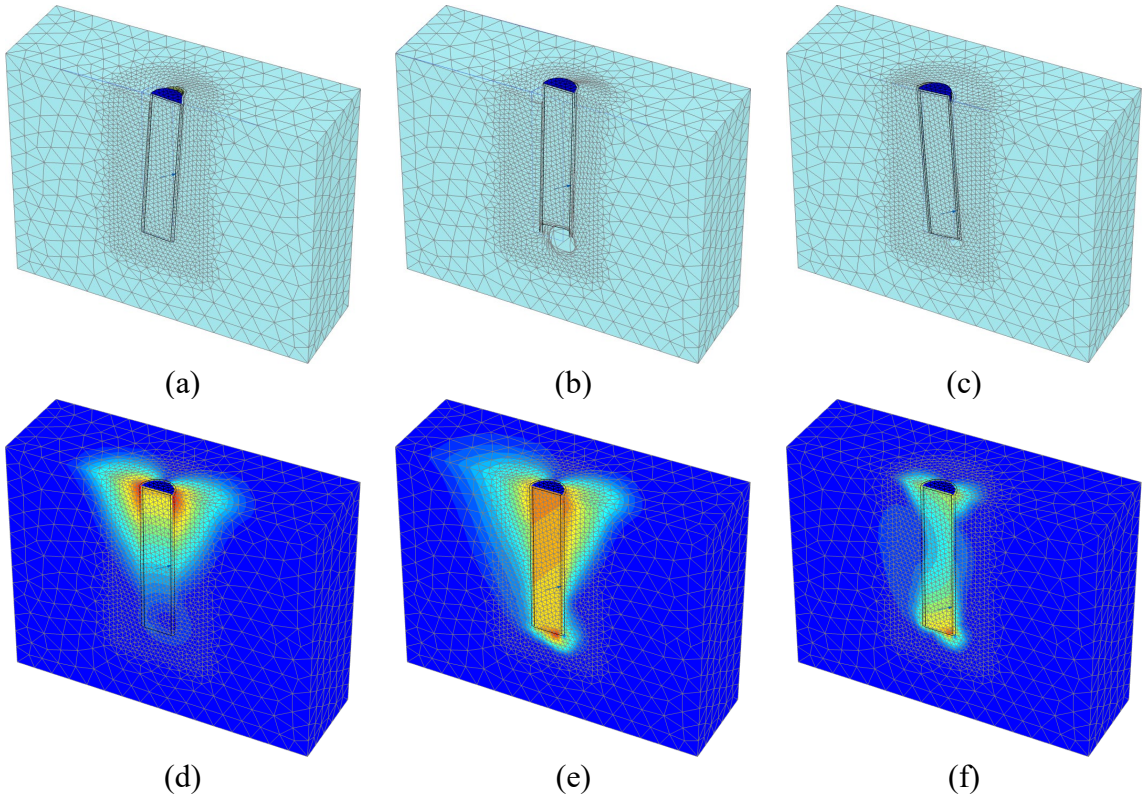
Tablo 2. Emme ankrajına ait geometrik özellikler ve malzeme parametreleri

Açıklama	Malzeme Türü	L (m)	d (m)	t (m)	γ' (kN/m^3)	E (kN/m^2)	υ (-)
Emme ankrajı	Plate	25.0	5.0	0.05	68.5	20E+09	0.27

Emme ankrajlarının yatay, düşey ve eğik yükleme ile drenajsız (toplam gerilme) koşulları altındaki davranışını incelemek amacıyla s_u=1.25z mukavemet profiline sahip normal konsolide (NC) kil bir zeminde kurulu, gömülü derinliği L=25.0 m ve çapı d=5.0 m olan bir emme ankrajı kullanılmıştır. NC kil zemin davranışını simüle etmek amacıyla, çalışmanın odak noktası olan kapasite tahmini için yeterli bir bünye modeli olan Tresca göçme kriteri tercih edilmiştir (Plaxis, 2024). Zeminin gerilme – deformasyon davranışını temsil etmek amacıyla drenajsız durumdaki elastisite modülü (E_u) ile drenajsız kayma dayanımı (s_u) arasında, normal konsolide ve yüksek plastik kil zeminler için NAVFAC (1982) tarafından önerilen E_u/s_u=500 oranı kullanılmıştır. Ankraj malzemesi plaka elemanlar kullanılarak

modellenmiş ve ankraj – zemin arayüzünde α=0.65 değerinde bir adezyon faktörü kullanılarak dayanım azaltması yapılmıştır. Zemin ve arayüz elemanına ait malzeme parametreleri Tablo 1, ankraj malzemesine ait parametreler ise Tablo 2 kapsamında sunulmaktadır.

Bu çalışmaya konu olan parametre seti, yükleme koşullarında meydana gelen değişimlerin ankraj davranışı ve kapasite zarfı üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Sabit ankraj geometrisi ve zemin profili kullanılarak parametrik çalışmaya ait değişkenler mapa konumu ve yükleme açısı ile sınırlı tutulmuştur. Bu kapsamda, z_{cl}=0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80 ve 0.85L olmak üzere 7 farklı mapa konumu ile θ=0, 10, 20, 30, 45, 60 ve 90° olmak üzere 7 farklı yükleme açısı için toplam 49 farklı yükleme durumu incelenmiştir.



Şekil 3. Farklı mapa konumları için emme ankrajı deformasyon mekanizmaları ve artımlı deplasman konturları, (a) z_{cl}=0.55L için deforme sonlu eleman ağı, (b) z_{cl}=0.70L için deforme sonlu eleman ağı, (c) z_{cl}=0.85L için deforme sonlu eleman ağı, (d) z_{cl}=0.55L için artımlı deplasman konturu, (e) z_{cl}=0.70L için artımlı deplasman konturu, (f) z_{cl}=0.85L için artımlı deplasman konturu.

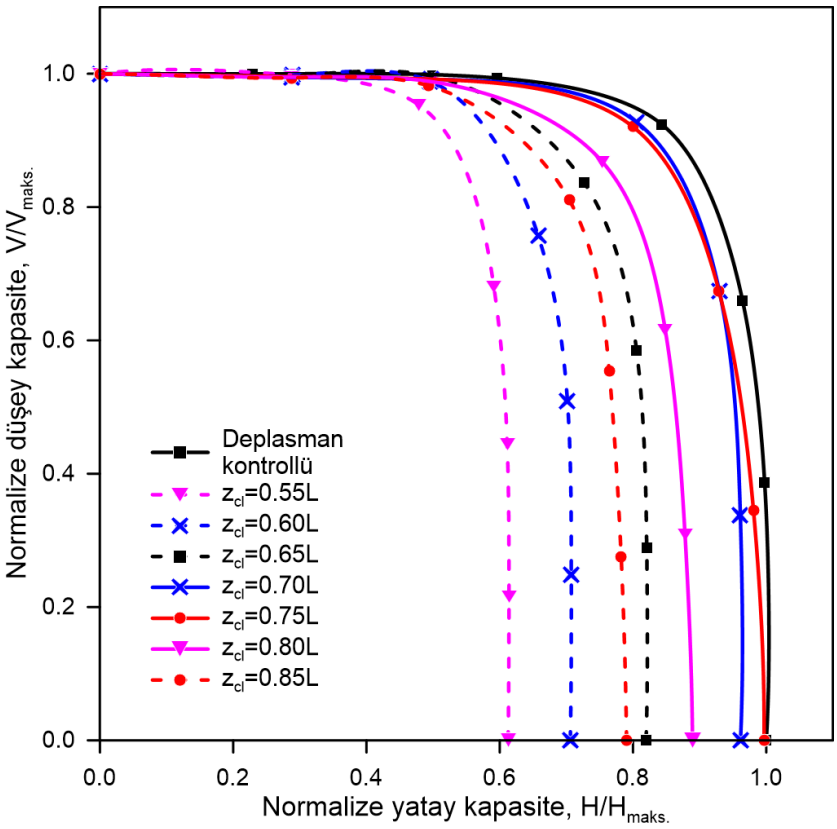
3. ANALİZ ÇIKTILARI

Bir emme ankrajının maksimum kapasite değerine ulaşabilmesi için herhangi bir dönme hareketine maruz kalmaksızın tamamen yatay ötelenme davranışı göstermesi gerektiği bilinmektedir. Bu kapsamda θ=30° yükleme açısı için farklı mapa konumlarına ait analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, θ=30° yükleme açısı altında maksimum kapasite değerinin z_{cl}=0.70L mapa konumu için elde edildiğini göstermektedir. z_{cl}=0.55, 0.70 ve 0.85L değerleri için ankrajın deformasyon mekanizmasını ve artımlı deplasman konturlarını gösteren analiz çıktıları Şekil 3 kapsamında sunulmaktadır.

Ankraja ait deformasyon mekanizmaları incelendiğinde (Şekil 3), mapa konumunun emme ankrajı davranışı üzerinde baskın bir role sahip olduğu görülmektedir. Optimum değerin

üzerinde yer alan mapa konumu için (Şekil 3(a)), ankraj saat yönünde belirgin bir rotasyon hareketi sergilerken; optimum değerin altındaki mapa konumu (Şekil 3(c)) durumunda saat yönünün tersine bir rotasyon hareketi tetiklenmiştir. Buna karşın, optimum mapa konumunda (Şekil 3(b)), uygulanan yükün keson merkezindeki izdüşümü sistemin dönme merkezine oldukça yakın olduğundan, ankraj neredeyse tamamen saf ötelenme davranışı sergilemektedir.

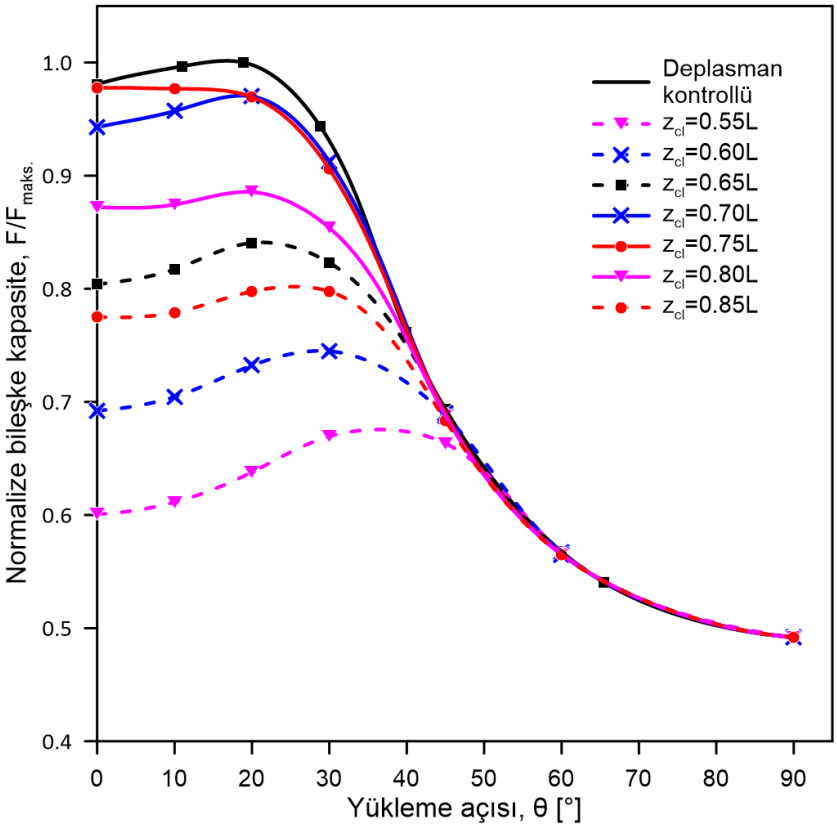
Bu kinematik farklılıklar, zeminde mobilize olan göçme mekanizmalarını doğrudan şekillendirmektedir. Şekil 3(d)'de görüldüğü üzere, yüksek mapa konumunda plastik deformasyonlar zemin yüzeyine yakın bir kama ile sınırlı kalmış ve derinlerdeki zemin direnci mobilize olmamıştır. Alçak mapa konumunda ise (Şekil 3(f)) zemin reaksiyonları ankraj tabanında kümelenmiştir. En efektif zemin-ankraj etkileşimi, artımlı deplasman konturlarının ankraj gövdesi boyunca ve ankraj içinde yer alan zeminde homojen bir şekilde yayıldığı z_{cl}=0.70L mapa konumunda elde edilmiştir (Şekil 3(e)). Bu durum, tüm ankraj uzunluğu boyunca zemin kayma direncinin maksimum düzeyde mobilize edildiğini ve yükleme açısının θ=30° olduğu eğik yükleme durumunda optimum mapa konumunun $z_{cl,opt}$=0.70L derinliğinde yer aldığını metodolojik olarak doğrulamaktadır.



Şekil 4. Değişken mapa konumları için normalize VH kapasite zarfları

Emme ankrajlarının drenajsız davranışının araştırılması amacıyla gerçekleştirilen nümerik analizlerden elde edilen bulgular yatay kapasite bileşeninin mapa konumundan büyük oranda etkilendiğini ve optimum mapa konumundan uzaklaştıkça kapasite zarflarının yatay eksende daralma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu çalışmaya konu olan ankraj geometrisi ve zemin profili için optimum mapa konumu, yükleme açısına bağlı olarak z_{cl}=0.70L ve z_{cl}=0.75L için elde edilmiştir. Bu kapsamda 20°'den küçük yükleme açıları için z_{cl}=0.75L mapa konumunda, 20°'den büyük yükleme açıları için ise z_{cl}=0.70L mapa konumunda kapasite zarfları genişleme eğilimindedir. Elde edilen kapasite zarfları

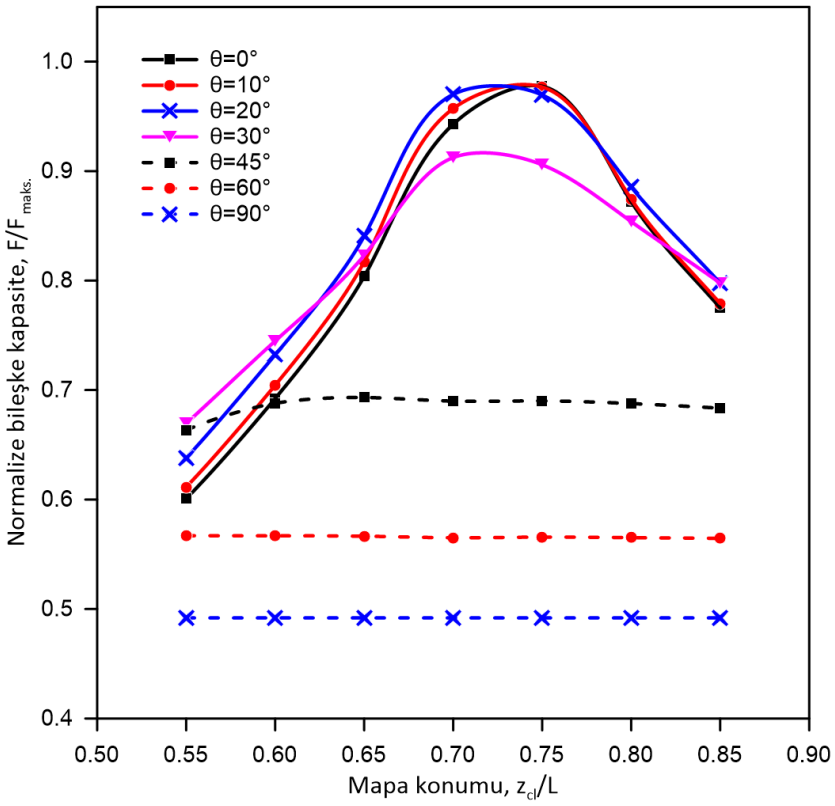
incelendiğinde en dar kapasite zarfı z_{cl}=0.55L noktasındaki mapa konumu için elde edilmiş olup bileşke kapasite değerlerinde optimum mapa konumu ile kıyaslandığında %40 mertebelerine varan kapasite kayıplarının yaşandığı görülmektedir. Simüle edilen her bir yükleme koşulu altında, farklı mapa konumları için elde edilen VH kapasite zarfları normalize edilerek Şekil 4 kapsamında sunulmuştur.



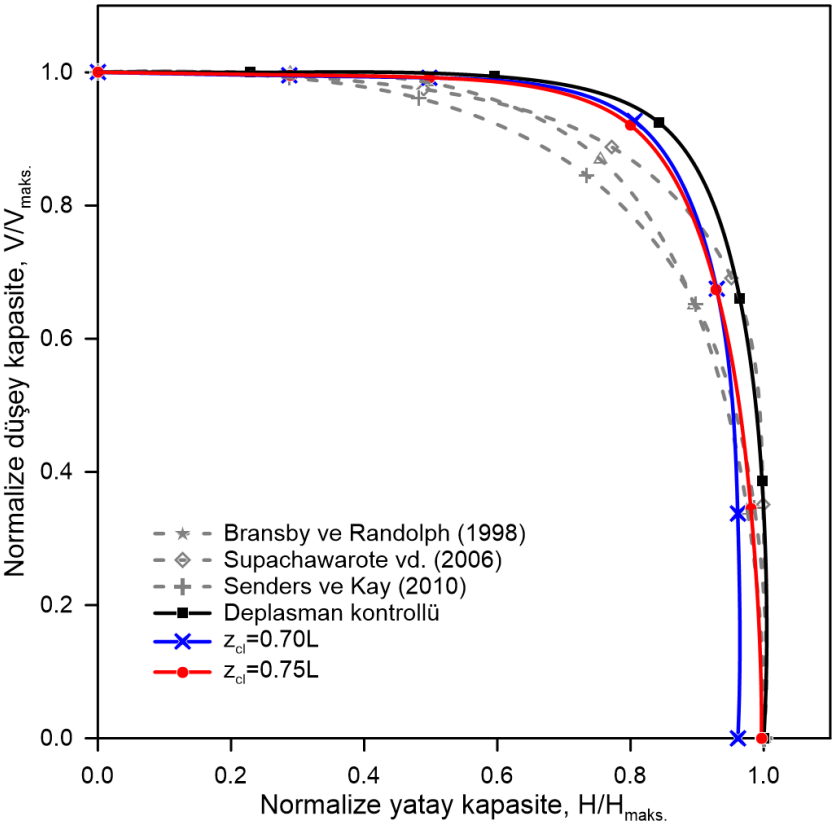
Şekil 5. Normalize bileşke kapasite değerlerinin yükleme açısına göre değişimi

Deplasman kontrollü analizlerle uyumlu olarak, z_{cl}=0.70 ve 0.75L mapa konumları için maksimum bileşke kapasite değerleri yükleme açısının 20°'den düşük olduğu durumlar için elde edilmiştir. Mapa konumunun optimumdan uzaklaşması durumunda, ilgili yükleme açısı için maksimum bileşke kapasite ile sonuçlanan yükleme açısı artış eğilimindedir. Bu bulgunun en bariz örneği mapa konumunun z_{cl}=0.55L olduğu yükleme koşulu için görülmektedir. Söz konusu yükleme durumu altında maksimum bileşke kapasite değeri θ=45° yükleme açısına yakınsamaktadır. Analiz sonuçlarından elde edilen normalize bileşke kapasitenin yükleme açısı ile ilişkisi Şekil 5, mapa konumu ile ilişkisi ise Şekil 6 kapsamında sunulmaktadır.

Sonlu eleman analizlerinden elde edilen kapasite zarflarının literatürde yer alan kapasite zarfı etkileşim denklemleriyle karşılaştırması Şekil 7 kapsamında sunulmaktadır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sonlu eleman analiz sonuçları ile en yüksek uyum Supachawarote (2006) etkileşim denklemi ile elde edilmiştir. Bransby ve Randolph (1998) ile Senders ve Kay (2002) denklemleri nispeten dar kapasite zarfları ile sonuçlanmakta ve tutucu bir yaklaşım sergilemektedir. Bununla birlikte, sonlu eleman analizleri ile elde edilen kapasite zarflarının literatürde yer alan kapasite zarfı etkileşim denklemleri ile genel olarak uyum içinde olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Normalize bileşke kapasite değerlerinin mapa konumuna göre değişimi



Şekil 7. Sonlu eleman analizleri ile elde edilen normalize kapasite zarflarının literatür de yer alan kapasite zarfı etkileşim denklemleriyle karşılaştırılması.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, derinlikle mukavemeti artan normal konsolide kil bir deniz tabanı sedimanında kurulu emme ankrajlarının drenajsız davranışı, farklı mapa konumları ve yükleme açıları altında üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Emme ankrajlarının tasarım optimizasyonunda mapa konumu ve yükleme açısı, kritik parametreler olarak öne çıkmaktadır. Mapanın optimum konumundan uzaklaşması, ankrajın taşıma kapasitesinde büyük kayıplar yaşanması ile sonuçlanmaktadır. Bu durum, açık deniz yapılarının güvenliği ve maliyet optimizasyonu açısından doğru mapa yerleşiminin hayati bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. İncelenen ankraj geometrisi ve zemin profili için optimum mapa konumu ise yükleme açısına bağlı olarak değişmektedir.

Ankrajın zemin içindeki kinematik hareketi doğrudan mapa konumu tarafından kontrol edilmektedir. Optimum noktanın üzerinde kalan mapa konumlarında saat yönünde, altındaki konumlarda ise saat yönünün tersine belirgin rotasyon hareketleri tetiklenmektedir. Optimum mapa derinliğinde ise sistemin moment etkisi minimize edilmekte, ankraj neredeyse tamamen yatay ötelenme davranışı sergilemekte ve zemin kayma direnci tüm gövde boyunca maksimum düzeyde homojen olarak mobilize edilmektedir.

Elde edilen tüm bu bulgular, emme ankrajları için tasarım optimizasyonunun kritik öneme sahip olduğunu ve sistemin kapasite zarfını doğrudan etkilediğini açıkça göstermektedir. Ankraj geometrisinin ve çevresel yük rejimlerinin optimizasyonu, derin deniz yapılarının hem operasyonel güvenliği hem de maliyet verimliliği açısından belirleyici bir rol oynamaktadır.

KAYNAKLAR

Bentley Systems (2024), "PLAXIS 3D 2024.2: Material Models Manual", Bentley Systems Incorporated, Exton, PA, USA.

Bhattacharya, S. (2019), "Design of Foundations for Offshore Wind Turbines", John Wiley & Sons.

Bransby, M.F. & Randolph, M.F. (1998), "Combined loading of skirted foundations", Géotechnique, 48(5), 637–655.

DNV (2017), "Geotechnical design and installation of suction anchors in clay", Report, DNV-RP-E303.

Houlsby, G.T. & Byrne, B.W. (2005), "Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Vol 158, Issue 2, 75–82.

Kay, S., Gourvenec, S., Palix, E. & Alderlieste, E. (2021), "Intermediate Offshore Foundations", CRC Press, Taylor & Francis, USA.

Ma, K.T., Luo, Y., Kwan, T. & Wu, Y. (2019), " Mooring system engineering for offshore structures", Elsevier.

Murff, J. D. (1994), "Limit analysis of multi-footing foundation systems", Proceedings of the 8th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, 223–244.

Randolph, M. & Gourvenec, S. (2017), "Offshore Geotechnical Engineering", CRC Press.

Senders, M. & Kay, S. (2002). "Geotechnical Suction Pile Anchor Design in Deep Water Soft Clays", Conference Deepwater Risers, Moorings and Anchorings, London, UK.

Supachawarote, C., Randolph, M. & Gourvenec, S. (2004), "Inclined Pull-out Capacity of Suction Caissons", Proceedings of The 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, 500–506.

United States Naval Facilities Engineering Command (1982), "Soil Mechanics, Design Manual 7.1", Department of the Navy, Alexandria, USA.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
a	Etkileşim denklemi düşey kapasite üstel katsayısı	$s_{u,inc}$	Drenajsız kayma mukavemeti için derinlikle artış oranı
b	Etkileşim denklemi yatay kapasite üstel katsayısı	$s_{u,ref}$	Zeminin deniz tabanındaki drenajsız kayma mukavemeti
d	Emme ankrajı dış çapı	t	Emme ankrajı et kalınlığı
E	Zemin elastisite (Young) modülü	V	İlgili yükleme koşulu altında düşey kapasite
E_{inc}	Zemin elastisite modülünün derinlikle artış oranı	V_{maks}	Yükleme koşulundan bağımsız maksimum düşey kapasite
E_{ref}	Zeminin deniz tabanındaki elastisite modülü	z	Deniz tabanından itibaren derinlik
E_u	Zemin drenajsız deformasyon modülü	z_{cl}	Mapa konumunun ankraj merkez hattındaki izdüşümü
F	İlgili yükleme koşulu altında bileşke kapasite	$z_{cl,opt}$	Optimum mapa konumunun ankraj merkez hattındaki izdüşümü
F_{maks}	Yükleme koşulundan bağımsız maksimum bileşke kapasite	z_p	Mapa konumu
H	İlgili yükleme altında yatay kapasite	α	Kazık-zemin adezyon faktörü
H_{maks}	Yükleme koşulundan bağımsız maksimum yatay kapasite	γ	Zeminin doğal birim hacim ağırlığı
L	Emme ankrajı uzunluğu	γ'	Emme ankrajı batık birim hacim ağırlığı
M	İlgili yükleme koşulu altında moment kapasitesi	θ	Mapa konumundaki yükleme açısı
M_{maks}	Yükleme koşulundan bağımsız maksimum moment kapasitesi	υ	Zemin Poisson oranı
r_{int}	Kazık-zemin arayüz faktörü	υ_u	Zemin drenajsız Poisson oranı
s_u	Zemin drenajsız kayma mukavemeti		