



DERİN ZEMİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİNDE NİHAİ TAŞIMA GÜCÜNÜN BELİRLENMESİ

Mukaddes Tuğçe DİKMEN*, Sıddıka Nilay KESKİN

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Derin Zemin Karıştırma Yöntemi,
Statik Eksenel Yükleme Deneyi,
Sonlu Elemanlar Yöntemi,
Nihai Taşıma Kapasitesi.

Öz

Bu çalışmada, Amasya İli, Merkez İlçesi'nde inşaatı yapılan konut türü yapı için temel zemini ıslahında uygulanan derin zemin karıştırma yönteminin incelemesi gerçekleştirilmiştir. Derin zemin karıştırma yöntemi, mevcut problemlili zeminlere çeşitli mekanik şaftlar vasıtasıyla katkı maddelerinin (bağlayıcı) enjekte edilerek karıştırılması esasına dayanır. Yöntem, kohezyonsuz zeminlerde genel olarak taşıma kapasitesi artırmak, oturmaları ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak amaçlarıyla uygulanabilir. Bu çalışma kapsamında; taşıma gücü ve sıvılaşma problemi beklenen temel zemini için 80 cm çapında ve 15,00 metre boyunda derin zemin karıştırma kolonları tasarlanmıştır. Sahada yapılan statik eksenel yükleme deneyinden elde edilen sonuçlara göre literatürde yaygın olarak kullanılan Brinch Hansen %80, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz ve Hirany Kulhawy yöntemleri ile derin karıştırma kolonu için nihai taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Ayrıca tekil derin karıştırma kolonu Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımıyla modellenerek taşıma kapasitesi tahmini yapılmıştır. Sonuç olarak; teorik olarak hesaplanan taşıma kapasitesi değerine en yakın sonucu Mazurkieicz yöntemi vermiştir. Brinch Hansen %80 yönteminde ise düşük taşıma kapasitesi elde edilmiştir.

DETERMINATION OF ULTIMATE BEARING CAPACITY IN DEEP SOIL MIXING METHOD

Keywords

Deep Soil Mixing Method,
Static Axial Loading Test,
Finite Element Method,
Ultimate Bearing Capacity.

Abstract

In this study, an analysis of deep soil mixing method, which is applied in the improvement of the foundation soil of a residential type building in the central district of Amasya province, was carried out. The deep soil mixing method is based on the mixing of additives (binder) by injecting into existing problematic soils by means of various mechanical shafts. It is generally applied in cohesionless soils to increase bearing capacity, to reduce settlement and liquefaction potential. In this study, deep soil mixing columns with 80 cm diameter and 15.00 meters length were designed for the foundation soil, in which bearing capacity and liquefaction problems were expected. The ultimate bearing capacity for the deep mixing column was determined according to the results obtained from the static axial loading test conducted in the field, by using some widely used methods in literature, whose names are the Brinch Hansen 80%, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz and Hirany Kulhawy. In addition, the carrying capacity of a single deep mixing column was estimated with the help of Plaxis 3D Foundation finite element software modelling. As a result, Mazurkieicz method gave the closest result to the theoretically calculated bearing capacity value. On the other hand, in Brinch-Hansen 80% method, the obtained bearing capacity was low.

Alıntı / Cite

Dikmen, M.T., Keskin, S.N., (2023). Derin Zemin Karıştırma Yönteminde Nihai Taşıma Gücünün Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(1), 184-197.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. T. Dikmen, 0000-0001-5269-4719
S. N. Keskin, 0000-0002-0367-943X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	03.06.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	23.08.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	02.10.2022
Yayın Tarihi / Published Date	27.03.2023

* İlgili yazar / Corresponding author: mtugceaydogmus@gmail.com, +90535-871-4527

DETERMINATION OF ULTIMATE BEARING CAPACITY IN DEEP SOIL MIXING METHOD

Mukaddes Tuğçe DİKMEN*, Sıddıka Nilay KESKİN

Department of Civil Engineering, Isparta Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey

Highlights

- Application of deep soil mixing method in stabilization of foundation soil.
- Interpretation of results from static axial loading test.
- Modelling of single deep soil mixing column by finite element software.
- Estimating the bearing capacity of single deep soil mixing column.

Graphical Abstract

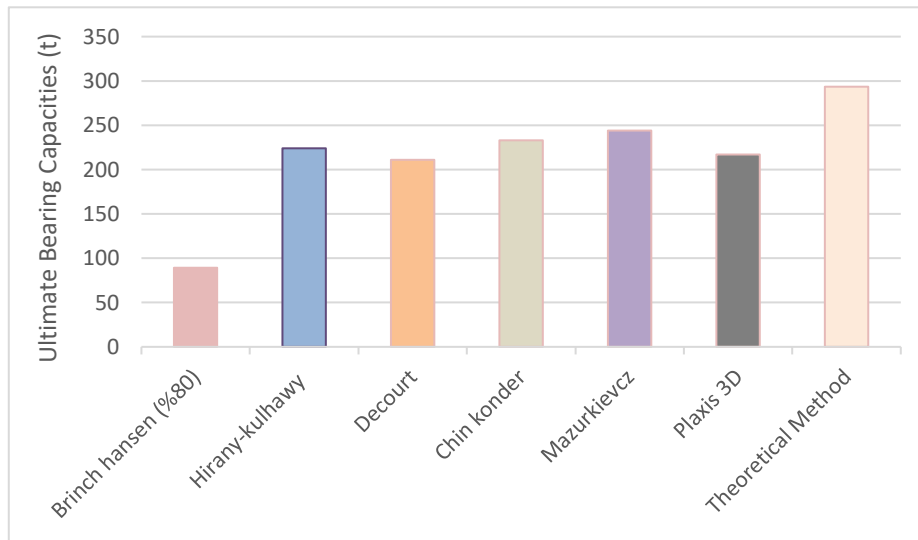


Figure. Comparison of ultimate bearing capacities

Purpose and Scope

The aim of the study is to improve the subsoil, where bearing capacity and liquefaction problems are expected, by the deep soil mixing method. In addition, the ultimate bearing capacity of the deep soil mixing columns created by this application is determined using different methods.

Design/methodology/approach

A static axial loading test was performed on the deep soil mixing column used in the study area. By the results of the static axial loading test, the ultimate bearing capacity of the deep mixing column was determined using the methods of Brinch Hansen 80%, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz, and Hirany Kulhawy, which are widely used in the literature. At the same time, the single deep mixing column was modeled using Plaxis 3D Foundation finite element software to estimate bearing capacity.

Findings

As a result of the static axial loading test performed on a single deep soil mixing column, the ultimate bearing capacity values of the Mazurkieicz, Decourt, Chin-Konder, and Hirany-Kulhawy methods are obtained in the range of 210-244 tons and provided consistent results. The PLAXIS 3D Foundation finite element program is determined as 217 tons in the point loading simulation of the singular deep mixing column.

Originality

In this study, the deep soil mixing method was applied to improve the foundation soil where bearing capacity and liquefaction problems are expected. Moreover, the results of theoretical calculation, finite element program Plaxis 3D Foundation, and static axial loading tests were compared in determining the ultimate bearing capacity of each deep soil mixing column.

* İlgili yazar / Corresponding author: mtugceaydogmus@gmail.com, +90535-871-4527

1. Giriş (Introduction)

Yapı ihtiyacı, nüfus artışıyla doğru orantılı olarak her geçen gün talepler doğrultusunda artmaktadır. Elverişli zeminlerin yetersizliği beraberinde zemin mekaniği ve temel mühendisliği açısından problemlerle zeminlerde yapılaşmayı zorunlu hale getirmektedir. Problemlerle zeminlerin en yaygını, genellikle nehir ağzları yakınında, körfezlerin çevresi boyunca ve bataklıkların altında bulunan yumuşak, suya doygun killer ve siltlerdir. Bu tür zeminler yüksek deformasyon ve düşük dayanım göstermektedirler. Gevşek suya doygun kumlar ise sismik koşullar altında sıvılaşma potansiyeline sahiptirler. Tekrarlı yüklemeler, bu tür zeminlerde boşluk suyu basıncının artmasına sebep olarak efektif gerilme ve kayma dayanımı kaybına yol açmaktadırlar (Coduto, 2001).

Elverişsiz zeminlerde taşıma gücü yetersizliği, izin verilebilir toplam ve farklı oturumların aşılması, sıvılaşma, dolgu ve yarmalara ait stabilite sorunları, kazı sonrası meydana gelmesi muhtemel kabarmalar vb. olumsuzluklardan dolayı zemin ıslahı gereksinimi ortaya çıkmaktadır (Özaydın, 2012). Zemin ıslahı; zemin özelliklerinin hedeflenen tasarıma yönelik olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılarak iyileştirilmesidir. Teknolojik gelişmeler zemin ıslah yöntemlerinde büyük kolaylık ve önemli yenilikleri beraberinde getirmiştir. Günümüzde birçok ıslah yöntemi, uygun tasarımlar sonucu kolay ve pratik çözümler ortaya koymaktadır. Sahaya uygun zemin iyileştirme yöntemi seçiminde pekçok alternatif bulunmaktadır. Uygun ıslah yöntemi seçimi için zeminin türü, saha koşulları, civar yapılara ve çevreye etkileri, hedeflenen iyileştirmenin türü, ekonomi, malzeme, ekipman ve iş gücü temini gibi birçok parametre dikkate alınmaktadır.

Günümüzde çevre koşullarını ve güvenliğini iyileştirmek için derin zemin karıştırma yöntemi verimli bir şekilde uygulanmaktadır. Yöntem, mevcut problemlerle zeminlere çeşitli mekanik şartlar vasıtasıyla katkı maddelerinin (bağlayıcı) enjekte edilerek karıştırılması esasına dayanır. Karıştırma ekipmanı; birçok farklı şekil ve konfigürasyonda kesme ve karıştırma şaftlarına sahip tek veya çok şaftlı aletlerden oluşmaktadır. Karıştırma işlemi sonucunda; doğal zemine kıyasla mühendislik özellikleri iyileştirilmiş zemin kütleleri meydana gelmektedir. Elde edilen stabilize zemin malzemesi genellikle mevcut zemine göre daha yüksek dayanım, daha düşük geçirgenlik ve sıkışabilirliğe sahiptir. Üst yapının türü, boyutu ve önemi, iyileştirmenin amaç ve işlevi, yapım (inşaa) maliyetleri ve saha koşulları dikkate alınarak grup kolonları tipi, duvar tipi, ızgara (grid) tipi ve blok tipi uygulama modelleri seçilebilmektedir (Kitazume ve Terashi, 2012).

Yöntem bağlayıcının zemine enjekte türüne göre ıslak ve kuru derin zemin karıştırma yöntemi olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Çalışma kapsamında temel zemini ıslahında uygulanan ıslak derin zemin karıştırma yöntemi, genel olarak izole elemanlar, sürekli duvar ya da bloklar oluşturmak için birincil olarak çimento bazlı bağlayıcı (şerbet) kullanan tek veya çok şaftlı (burgu) bir yöntemdir. Yöntemin temel amacı homojen olarak işlenmiş zemin kütleleri oluşturmaktır. Bu nedenle; uygun su/çimento ve enjeksiyon oranının belirlenerek, iyileştirme alanı boyunca bağlayıcı ve zeminin koordinasyonlu bir şekilde karıştırılması gerekir (Bruce, 2000).

Mevcut yöntemlerin geliştirilmesi ve malzemelerdeki yenilikler (örneğin uçucu kül, alçıtaşı veya cüruf kullanımı gibi) devam etmektedir. Enjekte edilen bağlayıcılar, kullanılan yöntem, yerel mevcudiyete, işlenecek zemine, istenen ve amaçlanan sonuca göre uyarlanır. Genel olarak harç bileşenleri arasında çimento, su, bentonit, kil, alçıtaşı, uçucu kül ve çeşitli katkı maddeleri bulunur. Su/çimento oranı tipik olarak 1 ila 2 arasında değişmekle beraber su ve akışkanlarla yapılan ön delme faaliyetlerine ve zeminin geçirgenliğine bağlı olarak değişmektedir (Bruce, 2000).

Derin zemin karıştırma yöntemi genel olarak kohezyonlu ve organik zeminlerde yapılan uygulamalarda; taşıma kapasitesini artırmak, oturumları azaltmak, pasif toprak basıncını artırmak, aktif toprak basıncını azaltmak ve kazık/duvarların yatay dayanımlarını artırmak vb. amaçlarla uygulanmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerdeki uygulama amaçları ise taşıma kapasitesi artırmak, oturumları ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak şeklindedir (Coastal Development Institute of Technology, 2002).

Derin karıştırma yönteminin sıvılaşma kontrolüne yönelik uygulama alanı sıvılaşmanın önlenmesi, sıvılaşabilir zeminin güçlendirilmesi ve boşluk suyu basıncının azaltılmasını içerir. Derin zemin karıştırma yöntemi ile ön iyileştirme uygulamasında ise zeminlerin mukavemetinin artırılıp, sıkışabilirliğinin azaltılmasıyla yüzey ve yeraltı inşaatı sırasında yer hareketlerinin kontrolü ve zemin stabilitesi sağlanmış olur (Bruce, 2000).

Son yıllarda yapılan derin karıştırma yöntemine ait literatür incelendiğinde; Bahmanpour ve diğ. (2019) derin karıştırma kollarının sıvılaşma üzerindeki etkisini belirlemek için sarsma tablası modeli deney düzeneği kurarak; sarsma sıklığı, derin karıştırma kolon boyu, çapı, aralığı ve sınır koşulları gibi değişen parametrelerin boşluk suyu basıncı ve deformasyon üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada derin karıştırma kolonuna ait eğilme rijitliğinin kolonun performansına büyük etki sağladığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca derin karıştırma kolonlarının kayma dalgası hızı, boşluk suyu basıncı oluşum hızı ve deformasyonları azalttığı belirlenmiştir.

Erbeyoğlu (2019) derin karıştırma kolonları ile kolonları çevreleyen zeminin taşıma gücüne etkilerini üç adet tam ölçekli statik basınç yükleme deneyi ile incelediği tez çalışmasında; tasarımlarda taşıma gücünün zemin ve derin karıştırma kolonu alanları oranında dağıtılmasının daha gerçekçi ve ekonomik çözümler ortaya koyduğu sonucuna varmıştır. Aydın (2019) yapmış olduğu tez çalışmasında ise; derin karıştırma kolonları ile ıslah edilen bir vaka analizini inceleyerek; iyileştirme öncesi ve sonrasına ait analitik ve sonlu elemanlar ile hesaplanan oturma değerlerinin kıyaslamasını gerçekleştirmiş ve tutarlı sonuçlar elde etmiştir.

Kaptan ve diğ. (2021) derin karıştırma kolonları ile ıslah edilen zeminlerin gerilme-deformasyon davranışlarının öneminin belirlenmesi amacıyla 12 adet çalışmadan toplam 1090 veri kullanmışlardır. Oluşturulan bu veri tabanı ile tasarımlarda serbest basınç dayanımına göre uygun elastisite modül değerinin seçilmesine imkan sağlanmıştır. Ayrıca zemin türü, katkı maddesi, modülün arazi veya laboratuvar numunesinden elde edilmiş olması, E veya E₅₀ kullanımına gibi parametrelere göre serbest basınç mukavemeti-elastisite modülü ilişkileri belirlenmiştir.

Bu çalışma, "Özel Amasya Ataşehir Hastanesi ve Ataşehir Life Konutları Projelendirme İşi" kapsamında imalatı yapılacak olan konut türü yapı için temel zemini ıslahında uygulanmış olan derin zemin karıştırma yöntemi uygulamasını içermektedir. İnceleme alanı için gerçekleştirilen geoteknik değerlendirmeler neticesinde; mevcut zeminde taşıma gücü ve sıvılaşma problemi beklenmektedir. Sahaya uygun zemin iyileştirme yöntemi seçimi için zeminin türü, saha koşulları, civar yapılara ve çevreye etkileri, hedeflenen iyileştirmenin türü, ekonomi, malzeme, ekipman ve iş gücü temini gibi birçok parametre dikkate alınmaktadır. Bu parametreler dikkate alındığında; ekonomi, zemin türüne uygunluğu, uygulama esnasında iyileştirme kalitesinin doğrulanabilmesi gibi nedenlerle inceleme alanı için derin zemin karıştırma kolonları ile ıslah yapılması uygun görülmüştür. Bu kapsamda temel zeminde uygulanan derin zemin karıştırma kolonlarının yükleme altındaki performansları incelenmiştir. Sahada gerçekleştirilen statik eksenel yükleme deney veri sonuçları ile literatürde yaygın olarak kullanılan Brinch Hansen %80, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz ve Hirany Kulhawy yöntemleri kullanılarak derin karıştırma kolonlarının taşıma kapasiteleri (nihai taşıma güçleri) hesaplanmıştır. Ayrıca tekil derin zemin karıştırma kolonu Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımıyla modellenerek nihai taşıma gücü belirlenmiştir. Teorik olarak hesaplanan taşıma gücü değeri; Brinch Hansen %80, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz ve Hirany Kulhawy yöntemleri ile elde edilen taşıma kapasiteleri ve Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımından elde edilen sonuç ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Geoteknik Değerlendirme (Geotechnical Evaluation)

İnceleme konusu olan konut yapısı yaklaşık 768 m² taban alanına sahip olup, 2 Bodrum+Zemin+11 Normal kattan oluşmaktadır. Temel boyutları yaklaşık olarak 16,65 metre x 46,10 metredir. Bina taşıyıcı sistemi betonarme olarak belirlenmiştir. Radye temel tabii zemin kotundan itibaren yaklaşık -6,90 m kotunda inşa edilecektir. Üst yapıdan aktarılacak maksimum taban gerilmesinin 19,00 t/m² olacağı statik proje müellifi tarafından iletilmiştir (Sağlam, 2017).

İnceleme alanındaki zemin birimlerinin yanal ve düşey yönlerdeki değişimlerini belirlemek amacıyla 6 farklı noktada 5 adet 15,00 m ve 1 adet 20,00 metre derinlikli olmak üzere toplam 95,00 m derinlikte sondaj kuyusu açılmıştır. Yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre yer altı suyu seviyeleri 4,50-5,00 metre olarak belirlenmiştir. Zemin etüt raporunda yapılan değerlendirmeler sonucunda yüzeyden yaklaşık olarak 0,20 metre tabaka kalınlığında bitkisel toprak, altındaki 0,20-9,50/10,00 metre tabaka aralığında yer yer silt-kum ara bantlı kahverengi renkli kil tabakası, devamında ise az çakıllı siltli kum tabakası birimler tespit edilmiştir. Temel derinliği dikkate alındığında, yapının yer yer silt-kum ara bantlı kahverengi renkli kil birimlere oturacağı görülmektedir. Bununla birlikte; sondaj kuyularından farklı derinliklerde alınan 12 adet SPT ve 2 adet UD örnekleri üzerinde laboratuvar deneyleri (3 eksenli basınç deneyi, elek analizi, Atterberg limit deneyi vb) yapılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Laboratuvar Deney Sonuçları (Laboratory Test Results)

Sondaj no	Numune no	Derinlik (m)	Su muhtevası. wn (%)	γ_n (t/m ³)	Atterberg limitleri			Elek analizi		Sınıflama	Üç eksenli basınç deneyi	
					LL	PL	PI	+No.4 Kalan (%)	-No.200 Geçen (%)		C (kg/cm ²)	ϕ (°)
SK-1	UD	4,50-5,00	24,20	1,95	44,80	22,70	22,10	0,00	79,20	CL	0,46	5
SK-2	UD	3,00-3,50	26,40	1,93	42,50	23,80	18,70	0,00	82,60	CL	0,45	6
SK-6	SPT	1,50-1,95	26,30	1,88	35,60	20,10	15,50	0,00	73,20	CL	-	-
SK-6	SPT	3,00-3,45	22,40	1,91	39,00	21,50	17,50	0,00	76,10	CL	-	-
SK-6	SPT	4,50-4,95	24,20	1,94	40,20	20,60	19,60	0,00	80,60	CL	-	-
SK-6	SPT	6,00-6,45	23,70	1,87	39,00	20,90	18,10	0,00	75,40	CL	-	-
SK-6	SPT	7,50-7,95	25,60	1,88	40,30	21,60	18,70	0,00	78,50	CL	-	-
SK-6	SPT	9,00-9,45	24,00	1,92	42,50	22,70	19,80	0,00	81,20	CL	-	-
SK-6	SPT	10,50-10,95	25,30	1,94	41,40	20,40	21,30	0,00	82,50	CL	-	-
SK-6	SPT	12,00-12,45	27,50	1,71	NP	NP	NP	0,00	37,80	SM	-	-
SK-6	SPT	13,50-13,95	25,60	1,85	40,50	22,10	18,40	3,80	58,70	CL	-	-
SK-6	SPT	15,00-15,45	19,30	1,76	NP	NP	NP	55,10	23,70	GC	-	-
SK-6	SPT	16,50-16,95	6,30	1,74	NP	NP	NP	59,70	6,10	GP	-	-
SK-6	SPT	18,00-18,45	20,80	1,72	NP	NP	NP	25,80	41,70	SC	-	-

İnceleme alanında açılan sondaj kuyularında, zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenebilmesi ve parametrelerinin saptanabilmesi amacıyla; 1,5 m aralıklarla standart penetrasyon testi (SPT) yapılmıştır. Zemin etüt raporunda verilmiş olan zemin profiline uygun olarak ortalama SPT-N değerleri üzerinde uygulanan düzeltme faktörleri sonucunda elde edilen ortalama $N_{1,60}$ değerleri Tablo 2’de verilmektedir. Tablo 2’deki N_{60} ise derinlik düzeltilmesi uygulanmamış düzeltilmiş SPT değeridir. Buradaki zemin sınıflandırmasında CL yer yer silt-kum ara bantlı kahverengi renkli kil tabakasını; SM ise az çakıllı siltli kum tabakasını temsil etmektedir.

Tablo 2. Analize Esas Ortalama Sondaj Değerlendirme Tablosu (Average Drilling Evaluation Table Based On Analysis)

Derinlik (m)	Zemin türü	N	C_E	C_B	C_S	C_R	σ'_{vo} (kPa)	N_{60}	C_N	$N_{1,60}$
1,50	CL	7	0,75	1,00	1,00	0,75	28,50	4	-	4
3,00		8	0,75	1,00	1,00	0,75	57,00	4	-	4
Y.A.S.S. 4,50 m										
4,50	CL	10	0,75	1,00	1,00	0,85	85,50	6	-	6
6,00		12	0,75	1,00	1,00	0,95	100,50	9	-	9
7,50		14	0,75	1,00	1,00	0,95	115,50	10	-	10
9,00		16	0,75	1,00	1,00	0,95	130,50	11	-	11
10,50		20	0,75	1,00	1,00	1,00	145,50	15	-	15
12,00	SM	24	0,75	1,00	1,00	1,00	158,70	18	0,78	14
13,50		28	0,75	1,00	1,00	1,00	173,70	21	0,74	15
15,00		32	0,75	1,00	1,00	1,00	188,70	24	0,71	17
16,50		35	0,75	1,00	1,00	1,00	203,70	26	0,69	18
18,00		35	0,75	1,00	1,00	1,00	218,70	26	0,66	17
19,50		36	0,75	1,00	1,00	1,00	233,70	27	0,64	17

Yapılan geoteknik değerlendirmeler neticesinde zeminin emniyetli taşıma gücü Spt-N deney sonuçları kullanılarak Meyerhof (1956) yöntemine göre 11,00 t/m² olarak hesaplanmış olup; bu değer statik müellifi tarafından çözüm sonucunda elde edilen maksimum gerilme değeri olan 19,00 t/m²’den düşük olmasından dolayı temelin oturacağı zeminde taşıma gücü problemi beklenmektedir. Ayrıca inceleme alanına ait 7,20 moment büyüklüğündeki deprem için sıvılaşma değerlendirmesi 10,00-20,00 metre derinliği arasında mevcut olan az çakıllı siltli kum birimler için gerçekleştirilmiş olup; 10,00-18,00 metre aralığındaki az çakıllı siltli kum birimlerde sıvılaşma potansiyeli olduğu belirlenmiştir.

2.2. Derin Zemin Karıştırma Yöntemi ile Zemin İslahı (Soil Improvement with Deep Soil Mixing Method)

Muhtemel taşıma gücü ve sıvılaşma problemleri beklenen yapı temellerin oturacağı zeminde "derin zemin karıştırma metodu" ile zemin ıslahı yapılmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda, temeller altında 80 cm çapında 15,00 metre uzunluğunda derin karıştırma kolonları tasarlanmıştır. Uygulanması planlanan derin karıştırma kolonları için yapılan hesaplarda, iyileştirme kotu altındaki zemin tabakaları için Tablo 3'de verilen zemin parametreleri kullanılmıştır. Ayrıca, zemin etüt raporunda belirtildiği üzere yer altı suyu seviyesinin yüzeyden 4,50 metre aşağıda olduğu, yapılan hesaplarda göz önüne alınmıştır.

Tablo 3. Hesaba Esas İdealize Zemin Modeli Ve Parametreleri (Idealized Soil Model And Parameters Based On The Calculation)

No.	Açıklama	Tabaka Kotları (m)	Tabaka Kalınlığı (m)	B. Hacim Ağırlığı γ (kN/m ³)	Drenajsız Kohezyon c_u (kPa)	İçsel Sür. Açısı ϕ' (°)
1	Kil	6,90-10,00	3,10	18,00	80	-
2	Kum (çevre)	10,00-18,00	8,00	18,50	-	32
3	Kum (uç)	18,00-21,90	3,90	18,50	-	33

Derin karıştırma kolonlarının taşıyabileceği nihai taşıma kapasitesi uç direnci ve çevre sürtünmesi bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır. İnceleme alanı için uygulanan derin zemin karıştırma kolonuna ait teorik taşıma kapasitesi hesabı aşağıda verilmiştir.

Derin karıştırma kolonlarına ait sürtünme direnci temasta olduğu zemin tabakalarındaki sürtünme dirençlerinin toplanması sonucu elde edilmektedir.

$$Q_{\zeta} = \sum p * \Delta l_i * f_i \quad (1)$$

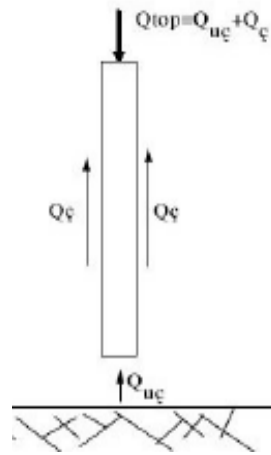
Burada;

Q_{ζ} : Derin karıştırma kolonu çevre taşıma kapasitesini,

Δl_i : Derin karıştırma kolonunun değişik zemin tabakaları içindeki uzunluğunu,

f_i : Derin karıştırma kolonunun her bir zemin tabakası içindeki birim çevre sürtünmesini,

p : Derin karıştırma kolon enkesidinin çevre uzunluğunu temsil etmektedir.



Şekil 1. Statik Kazık Formülleri İle Kazık Taşıma Kapasitesi Hesaplanması (Birand, 2007) (Calculation Of Pile Bearing Capacity With Static Pile Formulas)

Kohezyonsuz ($c=0$) zeminlerde derin karıştırma kolonu uç taşıma kapasitesi ise Eşitlik (2) ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_{u\zeta} = A_p * \sigma_v * (N_q - 1) \quad (2)$$

Burada;

$Q_{u\zeta}$: Derin karıştırma kolonu uç taşıma kapasitesini,

σ_v : Efektif düşey gerilmeyi,

A_p : Derin karıştırma kolonu kesit alanını,

N_q : Zeminin içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayısını temsil etmektedir.

Hesaplamalar sonucunda;

$$Q_c = 172,50 \text{ ton}$$

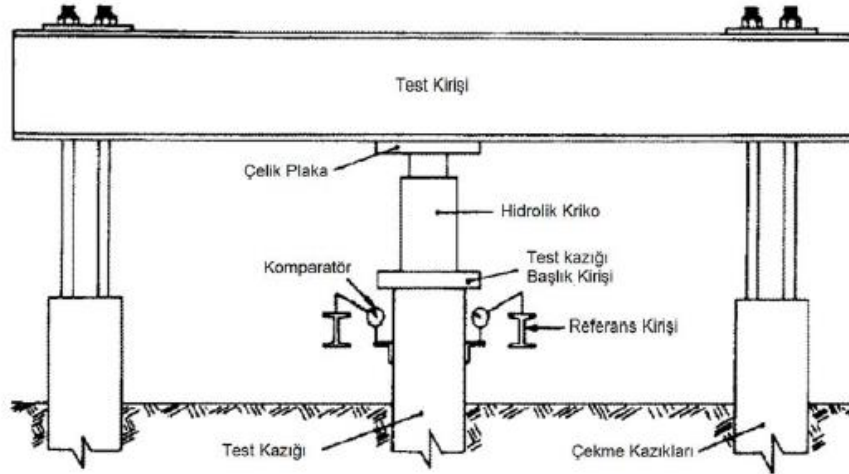
$$Q_{uç} = 121,00 \text{ ton}$$

$$Q_{top} = Q_{uç} + Q_c = 172,50 + 121,00 \approx 293,50 \text{ ton olarak bulunmuştur.}$$

GK=3,00 olarak alındığında emniyetli kolon taşıma kapasitesi; $Q_{top(emn)} = Q_{uç(emn)} + Q_{c(emn)} \approx 97,00 \text{ ton}$ elde edilmiştir.

2.3. Statik Eksenel Yükleme Deneyi (Static Axial Loading Test)

“Özel Amasya Ataşehir Hastanesi ve Ataşehir Life Konutları Projelendirme İşi” kapsamında inceleme alanı için belirlenen bir adet derin zemin karıştırma kolonu üzerinde kademeli yavaş statik eksenel basınç yükleme deneyi yapılmıştır. Zemin koşulları ve sistemin taşınma bedeli dikkate alındığında proje kapsamında çekme kolonlu sistem uygulanmıştır. Yükleme testinde; 1 adet test kolonu ve 2 adet çekme kolonu mevcuttur. Test yapılacak kolon etrafında inşa edilen kolonlar, çelik kirişler vasıtasıyla çekme elemanı vazifesi görmektedir (Şekil 2) (Can ve Acar, 2016).



Şekil 2. Çekme Kolonlu Yükleme Testi Örneği (Can Ve Acar, 2016) (Example Of Tensile Column Loading Test)

Statik eksenel basınç yükleme deneyinde 300 ton kapasiteli bir adet hidrolik krikodan faydalanılmıştır. Deney sırasında, yüklemeye dolaylı olarak derin karıştırma kolonlarında oluşan hareketler, kolon başlığına bağlanmış ve test kolonundan bağımsız referans kirişlere oturtulan, 100 mm kapasiteli ve 0,01 mm hassasiyette iki adet komparatör vasıtasıyla ölçülmüştür. Komparatörlerin uçlarının temas yüzeylerin temiz ve pürüzsüz olması sağlanmıştır. İnceleme alanına ait deney düzeneği Şekil 3’de gösterilmiştir (Can ve Acar, 2016).



Şekil 3. İnceleme Alanına Ait Yükleme Deney Düzeneği (Can ve Acar, 2016) (Loading Test Setup Belonging To The Study Area)

Statik eksenel basınç yükleme deneylerinin uygulanması sırasında 97 ton proje yükü dikkate alınmıştır. Deney yapılan derin karıştırma kolonu öncelikle 97,00 ton değerine kadar yüklenmiş ve boşaltılmış, daha sonra ise proje yükünün 1,5 katına denk gelen 145,50 ton değerine kadar yüklenmiş ve tekrar boşaltılmıştır.

2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)

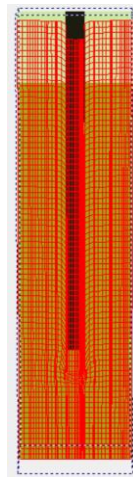
Sonlu eleman yöntemi; mühendislik ve matematiksel modellerde sıklıkla kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. Geoteknik mühendisliğinde sonlu eleman yöntemi ile geometrik olarak son derece karmaşık modeller tasarlanabilmektedir. Analizlerde zemin kesiti, zemin özellikleri ve zeminin yapısal modeli, sonlu eleman modelinin boyutları, elemanların şekil ve boyutları, temel-zemin ara yüzey elemanlarının kullanılması, yüklemenin doğrusal olup olmaması sonuçların gerçeğe yakınlığını doğrudan etkilemektedir. Analizlerin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi; seçilen zemin modelinin ve bu modellerde kullanılan zemin parametrelerinin gerçeğe uygun olmasına bağlıdır (Plaxis, 2019).

Bu çalışma kapsamında kullanılan Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı, geoteknik mühendisliği projelerinde yer değiştirme ve taşıma gücü analizleri için özel olarak geliştirilmiştir. İnceleme alanı için tasarlanan 80 cm çapında ve 15,00 m uzunluğundaki tekil derin zemin karıştırma kolonu; 6,00 metre*6,00 metre*20,00 metre boyutlarındaki zemin içerisine Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımında modellenerek göçme yükü tayini için genel bir yaklaşım hedeflenmiştir. Modellenen tekil derin zemin karıştırma sistemi için Mohr-Coulomb zemin modeli seçilerek, kolon orta noktası üzerine 250 tonluk noktasal yük tanımlanmıştır. Derin zemin karıştırma kolonu, Plaxis-3D sonlu elemanlar programında lineer elastik malzeme modeli seçimiyle rijit bir zemin gibi tanımlanmıştır. Modellenen derin zemin karıştırma kolonu ve zeminlere ait parametre seçimi için inceleme alanında yapılan saha ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Zamana bağlı olarak boşluk suyu basıncının sönmüneceğinden dolayı analizlerde drenajlı zemin parametrelerin seçimi uygun görülmüştür. Buna göre malzeme modelleri ve değişken parametreler Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Plaxis-3D Foundation Programında Kullanılmış Zemin Modelleri Ve Parametreler (Soil Models And Parameters Used In Plaxis-3D Foundation Program)

Zemin Parametreleri	Kil	Kum	Derin Karıştırma Kolonu
Zemin modelleri	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Lineer elastik
Malzeme tipi	Drenajlı	Drenajlı	Non-porous
Kuru birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	17,50	18,00	24,00
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m ³)	18,00	18,50	-
E_{ref} (kN/m ²)	11475	45000	11586000
Poisson oranı, ν_{ur}	0,35	0,30	0,30
Kohezyon, c (kPa)	10	2	
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	30	33	
Dilatasyon açısı, Ψ (psi)	0	3	
Zemin modelleri	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Lineer elastik

Şekil 4'de gösterilen analize esas yapısal eleman için orta sıklıkta ağ (medium mesh) seçilmiş olup kolon kenar bölgelerinde sıklaştırma yapılmıştır.



Şekil 4. Yapısal Elemana Ait Geometri Ve Ağ Modeli (Geometry And Mesh Model Of Structural Element)

2.5. Statik Eksenel Yükleme Deneylelerinden Elde Edilen Veriler ile Derin Karıştırma Kolonu Nihai Taşıma Kapasitenin Belirlenmesi (Determination of Deep Mixing Column Ultimate Bearing Capacity with Data Obtained from Static Axial Loading Tests)

Statik eksenel basınç yükleme deney sonuçları kullanılarak literatürde bulunan yöntemlerle derin karıştırma kolonu göçme yükü tahmini yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında literatürde sıklıkla kullanılan bazı yöntemlere ait incelemeler verilmektedir.

Brinch - Hansen %80 (1963) Yöntemi

Brinch-Hansen %80 (1963) yöntemine göre, uygulanan yükün %80'ine denk gelen oturmanın 4 katı oturmaya sebep olan yük göçme yükü olarak kabul edilir. Bu yöntem için öncelikle $\Delta^{0.5}/Q$ ile Δ arasında bir grafik oluşturulur. Bu grafikten elde edilen doğrunun denklemi Eşitlik (3) 'te ifade edilmektedir.

$$\Delta^{0.5}/Q = C_1 \times \Delta + C_2 \quad (3)$$

Burada;

Q : Yükleme deneyi sırasında uygulanan yük,

Δ : Yükleme deneyi sırasında okunan oturma değerini,

C₁: Doğrunun eğimini

C₂: Doğrunun $\Delta^{0.5}/Q$ eksenini kestiği noktayı ifade etmektedir.

Brinch - Hansen %80 yönteminde kolonun taşıma kapasitesi ise Eşitlik (4) yoluyla hesaplanır.

$$Q_{ult} = 1 / (2 \times \sqrt{C_1 \times C_2}) \quad (4)$$

Chin Kondner (1970) Yöntemi

Chin Kondner (1970) yöntemine göre, her yük değerine karşılık gelen oturma, yük değerine bölünerek oturma/yük –oturma grafiği oluşturulur. Grafikten elde edilen doğrunun denklemi Eşitlik (5) 'de verilmiştir.

$$\Delta/Q = C_1 \times \Delta + C_2 \quad (5)$$

Burada;

Q : Statik eksenel basınç yükleme deneyi sırasında uygulanan yükü,

Δ : Statik eksenel basınç yükleme deneyi sırasında okunan oturma değerini,

C₁: Chin Kondner grafiğindeki doğrunun eğimi

C₂: Chin Kondner grafiğindeki Doğrunun oturma/yük eksenini kestiği noktayı ifade etmektedir.

Bu grafikte çizilen doğrunun eğiminin tersi ($1/C_1$) ile kolonun taşıma kapasitesini (Q_{ult}) elde edilir.

$$Q_{ult} = 1/C_1 \quad (6)$$

Mazurkiewicz (1972) yöntemi

Mazurkiewicz (1972) yöntemine göre; yük-oturma eğrisi parabolik kabul edilerek, yük-oturma grafiğindeki oturma eksenini eşit aralıklara bölünür. Oturma eksenini eşit aralıklara bölen doğruların yük – oturma eğrisini kestiği noktalardan oturma eksenine paralel doğrular çizilir. Bu doğruların yük eksenini kestiği noktalardan yük eksenine 45°'lik eğimli doğrular çizilerek oturma eksenine paralel doğrular ile kesiştirilir. 45°'lik eğim yapan doğruların oluşturduğu üçgenlerin tepe noktalarını birleştiren bir doğru çizilir ve bu doğrunun yük eksenini kestiği noktadan kolonun taşıma kapasitesi elde edilir.

Decourt (1999) Yöntemi

Decourt (1999) yöntemine göre; her yük, kendi yük değerine karşılık gelen oturma değerine bölünerek yük – oturma/yük grafiği oluşturulur.

Elde edilen grafikteki eğri x eksenine yaklaştıkça doğrusal hale gelir. Doğrunun x eksenini kestiği nokta kolonun taşıma kapasitesini (Q_{ult}) verir.

$$Q_{ult} = C_2/C_1 \quad (7)$$

Burada;

C₁: Decourt (1999) grafiğindeki doğrunun eğimi

C₂: Decourt (1999) grafiğindeki Doğrunun düşey eksenini kestiği nokta

Q_{ult} : Göçme yükü

Hirany-Kulhaway (2002) Yöntemi

Hirany-Kulhaway (2002) yöntemine göre; yük – oturma eğrisinin, kolon çapının %4'ü kadar oturma değerini kestiği nokta, o kolonun taşıma kapasitesini vermektedir.

3. Bulgular (Results)

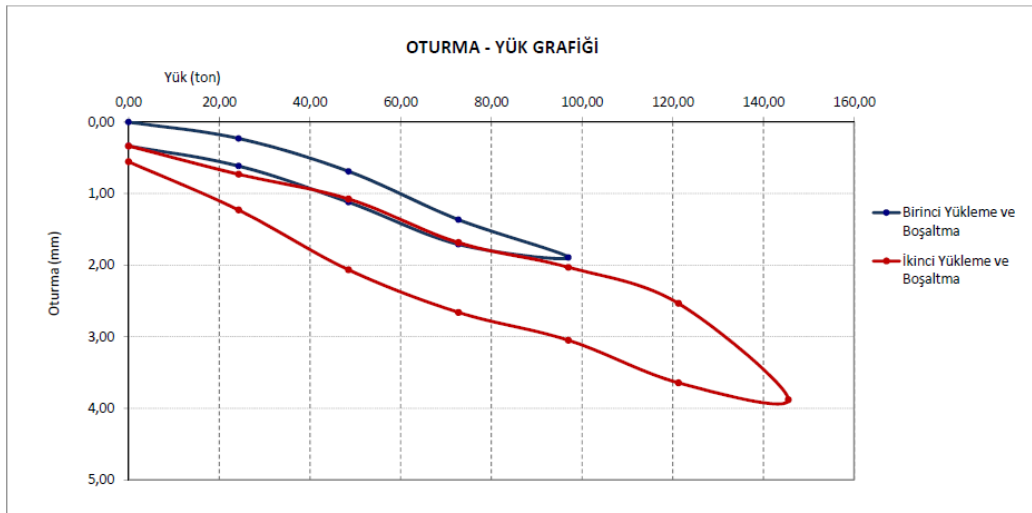
3.1. Statik Eksenel Yükleme Deneyi Sonuçları (Static Axial Loading Test Results)

Proje kapsamında, arazide Ø80 çapında ve 15 metre boyunda bir adet derin zemin karıştırma kolonu üzerinde yapılmış kademeli eksenel statik yükleme deneyine ait zaman yük oturma değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Kolon yükleme testi sonuçlarına göre, 97 ton (tasarım yükü) yükleme sonucunda toplam oturma 1,90 mm olup, kalıcı oturma 0,34 mm olarak belirlenmiştir. Bu durumda oluşan elastik oturma 1,56 mm olarak ölçülmüştür. İkinci yükleme durumunda, proje tasarım yükünün 1,5 katı olan 145,50 ton yük için, toplam oturma 3,88 mm olup, kalıcı oturma 0,59 mm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde elastik deplasman ise 3,29 mm olarak ölçülmüştür.

Tablo 5. Yükleme Deneyi Oturma Değerleri (Can Ve Acar, 2016) (Load Test Settlement Values)

Proje yükü (%100)	Uygulanan Yük (ton)	Okuma Süresi (dk)	Oturma (mm)
0	0	0	0,00
25	24,25	30	0,23
50	48,50	30	0,69
75	72,75	30	1,37
100	97,00	120	1,90
75	72,75	10	1,71
50	48,50	10	1,12
25	24,25	10	0,62
0	0	30	0,34
25	24,25	30	0,73
50	48,50	30	1,08
75	72,75	30	1,69
100	97,00	30	2,03
125	121,25	180	2,54
150	145,50	10	3,88
125	121,25	10	3,65
100	97,00	10	3,05
75	72,75	10	2,66
50	48,50	10	2,07
25	24,25	10	1,23
0	0	30	0,59

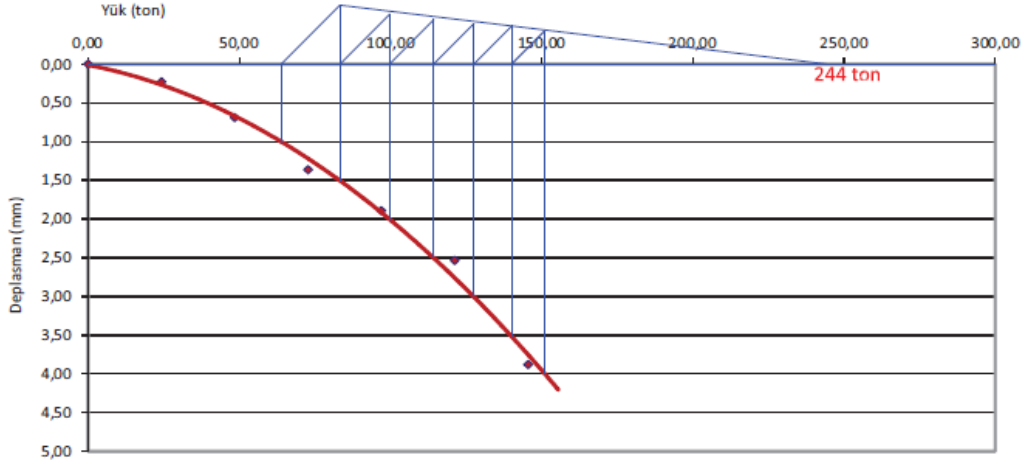
Tablo 5'deki yük ve oturma değerlerine göre elde edilen oturma-yük grafiği ise Şekil 5'deki gibidir.



Şekil 5. Statik Eksenel Yükleme Deneyi Sonucuna Göre Oturma - Yük Grafiği (Can Ve Acar, 2016) (Settlement - Load Graph According To The Static Axial Load Test Result)

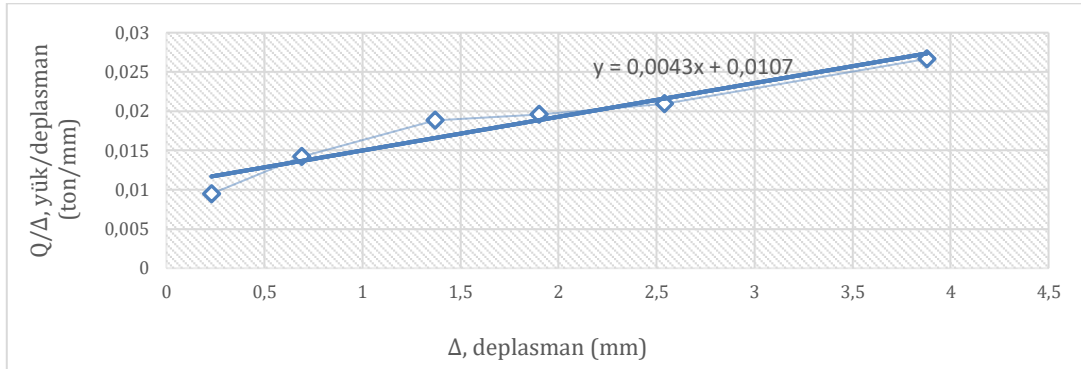
3.2. Yükleme Deney Sonuçlarına Göre Nihai Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi (Determination of Ultimate Bearing Capacity According to Loading Test Results)

Statik eksenel basınç yükleme deneyi sonucu okunan oturma değerleri dikkate alınarak oluşturulan yük-oturma grafiğinden Mazurkiewicz yöntemi ile elde edilen göçme yükü için çizilen grafik Şekil 6'dadır. Şekilde görüldüğü üzere Mazurkiewicz yöntemine göre tekil derin karıştırma kolonu taşıma kapasitesi 244 ton olarak elde edilmiştir.



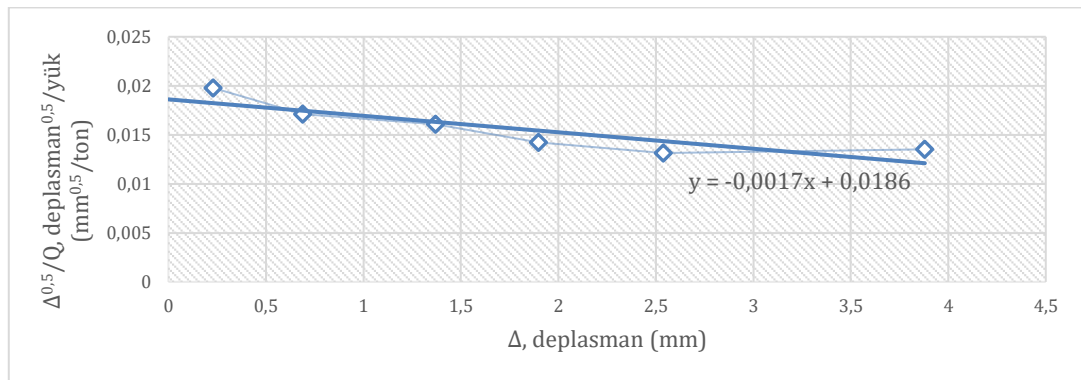
Şekil 6. Mazurkiewicz Yöntemi İle Nihai Taşıma Kapasitesinin Elde Edilmesi (Can Ve Acar, 2016) (Obtaining The Ultimate Bearing Capacity By Mazurkiewicz Method)

Bu çalışma kapsamında; Tablo 5'de verilen yük-deformasyon verileri kullanılarak Chin Kondner, Brinch Hansen %80, Decourt ve Hirany Kulhawy yöntemleri için elde edilen grafikler sırasıyla Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmektedir. Buna göre;



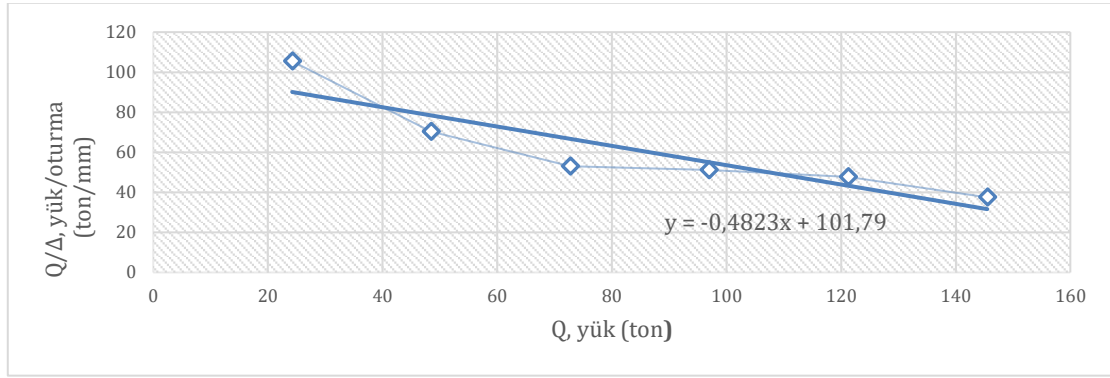
Şekil 7. Chin Kondner Yöntemi İle Nihai Taşıma Kapasitesinin Elde Edilmesi (Obtaining The Ultimate Bearing Capacity By Chin Kondner Method)

Chin Kondner yöntemi için $C_1 = 0,0043$ ve $Q_{ult} = 1/C_1 = 1/0,0043 = 233$ ton olarak elde edilmiştir.



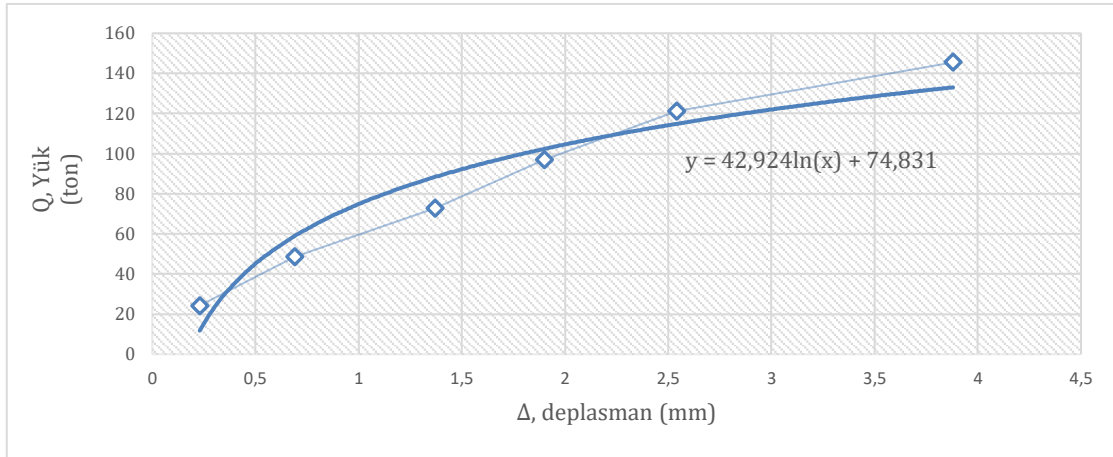
Şekil 8. Brinch - Hansen %80 Yöntemi İle Nihai Taşıma Kapasitesinin Elde Edilmesi (Obtaining The Ultimate Bearing Capacity By Brinch - Hansen %80 Method)

Brinch-Hansen %80 (1963) yöntemi için $C_1= 0,0017$, $C_2= 0,0186$ ve $Q_{ult}=1/(2x\sqrt{0,0017 x 0,0186})= 89$ ton olarak elde edilmiştir.



Şekil 9. Decourt Yöntemi ile Nihai Taşıma Kapasitesinin Elde Edilmesi (Obtaining The Ultimate Bearing Capacity By Decourt Method)

Decourt yöntemi için $C_1= 0,4823$, $C_2= 101,79$ ve $Q_{ult} = C_2/C_1=101,79/0,4823 = 211$ ton olarak elde edilmiştir.

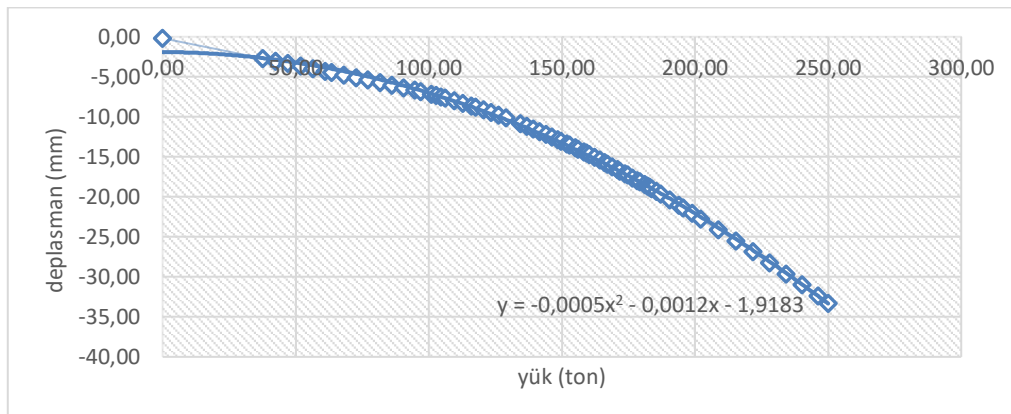


Şekil 10. Hirany Kulhawy Yöntemi ile Nihai Taşıma Kapasitesinin Elde Edilmesi (Obtaining The Ultimate Bearing Capacity By Hirany Kulhawy Method)

Hirany Kulhawy yöntemine göre; kolon çapının %4'ü 32 mm'e tekabül etmektedir. Eğri denkleminde 32 mm'lik deplasman değeri ile 224 ton taşıma kapasitesi elde edilmiştir.

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Sonuçları (Finite Element Method Analysis Results)

Modellemede yükleme aşamasının tamamlanması sonrasında yük- deplasman grafiği oluşturulmuştur. Derin karıştırma kolonu 250 ton tekil yük altında yenilmeye uğramamış ve Şekil 11'de görüldüğü üzere 33,31 mm deplasman yapmıştır.

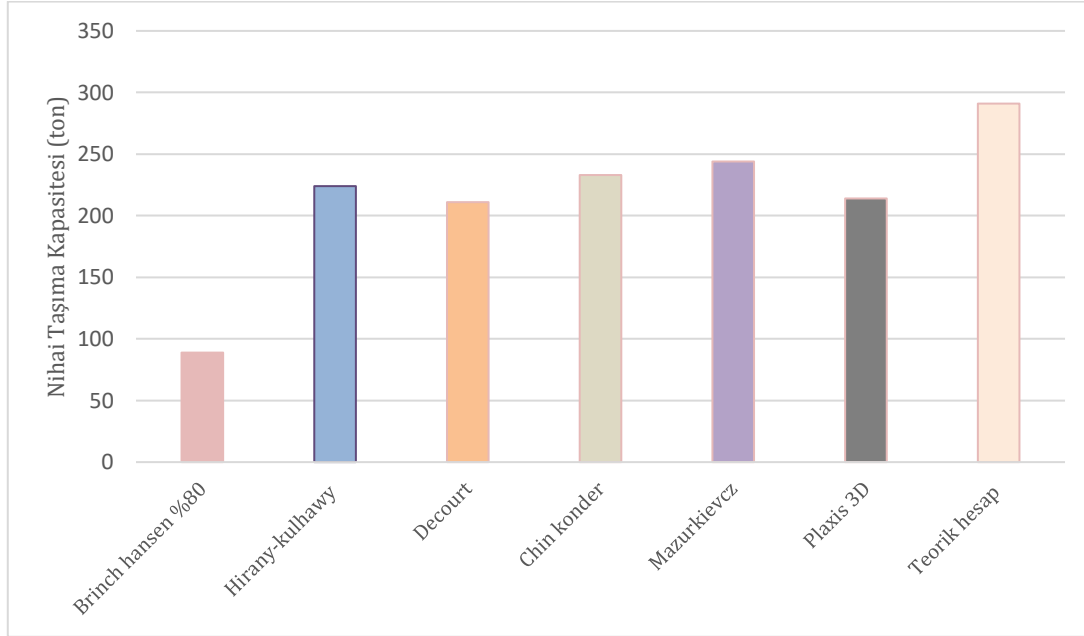


Şekil 11. Derin Zemin Karıştırma Kolonu İçin Yük-Oturma İlişkisi (Load-Settlement Relation For Deep Soil Mixing Column)

Toplam oturma sınırının en fazla 25 mm (Hollanda) olacağı kabul edilerek; 25 mm oturma olduğu andaki yük değeri olan 217 ton göçme yükü olarak bulunmuştur.

3.4. Tekil Derin Zemin Karıştırma Kolonu Ait Nihai Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması (Comparison of Ultimate Bearing Capacities of Single Deep Soil Mixing Column)

Mevcut proje kapsamında teorik olarak hesaplanan taşıma gücü değerinin Brinch Hansen %80, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz ve Hirany Kulhawy yöntemleri ile elde edilen taşıma kapasiteleri ve Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımından elde edilen taşıma kapasitesi ile karşılaştırılması Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Nihai Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması (Comparison Of Ultimate Bearing Capacities)

4. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Result)

Bu çalışma “Özel Amasya Ataşehir Hastanesi ve Ataşehir Life Konutları Projelendirme İşi” kapsamında imalatı yapılacak olan konut türü yapı için taban zemini ıslahında uygulanmış olan derin zemin karıştırma yöntemi uygulamasını incelenmiştir. Temel zemininde uygulanan derin zemin karıştırma kolonlarının yükleme altındaki performanslarını incelenmesi için sahada gerçekleştirilen statik eksenel yükleme deney veri sonuçları ile literatürde yaygın olarak kullanılan Brinch Hansen, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz ve Hirany Kulhawy yöntemleri kullanılarak derin karıştırma kolonlarının göçme yükleri (nihai taşıma kapasiteleri) hesaplanmıştır. Ayrıca tekil derin zemin karıştırma kolonu Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımıyla modellenerek göçme yükü tayini yapılmıştır. Teorik yöntem ile hesaplanan taşıma kapasitesi; yükleme deneyinden elde edilen sonuçlar ve Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- $\varnothing=80$ cm çapında ve $L=15$ metre uzunluğunda derin karıştırma kolonuna ait eksenel statik yükleme deneyi sonuçlarına 97 ton (tasarım yükü) yükleme sonucunda toplam oturma 1,90 mm olup, kalıcı oturma 0,34 mm olarak belirlenmiştir. Bu durumda oluşan elastik oturma 1,56 mm olarak ölçülmüştür. Proje tasarım yükünün 1,5 katı olan 145,50 ton yük için ise, toplam oturma 3,88 mm olup, kalıcı oturma 0,59 mm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde elastik deplasman ise 3,29 mm olarak ölçülmüştür.
- Derin karıştırma kolonuna ait eksenel statik yükleme deneyi sonucunda elde edilen veriler ile Brinch Hansen, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz ve Hirany Kulhawy yöntemleri kullanılarak göçme yükleri (nihai taşıma kapasiteleri) hesaplanmıştır. Nihai taşıma kapasitesi kıyaslaması Şekil 12’de verilmiştir.
- Mazurkiwicz, Decourt, Chin-Konder ve Hirany-Kulhawy yöntemlerine ait sonuçların 210-244 ton aralığında olduğu ve birbirleriyle tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle Mazurkieicz yönteminin, teorik yöntemle hesaplanan nihai taşıma kapasitesine çok yakın olmasından dolayı başarılı bir tahmin ortaya çıktığı anlaşılmıştır.

- Brinch -Hansen %80 yöntemi ile elde edilen taşıma kapasitesi ise diğer yöntemlere göre daha düşüktür. Değerlendirme yapılırken Brinch-Hansen %80 yönteminin daha çok çakma kazıklar için geliştirildiği dikkate alınmalıdır.
- Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı ile tekil derin karıştırma kolonuna ait noktasal yükleme sonucunda taşıma kapasitesi ise 217 ton olarak belirlenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Çalışmamda bahsi geçen projeye ait yükleme test deney raporu, geoteknik değerlendirme raporu ve ihtiyacım olan teknik bilgilere ulaşmamda bana yardımcı olan İnş. Yük. Müh. İlkay TONYALI, ve İksa-Mühendislik Genel Koordinatörü İnşaat Mühendisi Serkan NEMLİ'ye teşekkürlerimi iletirim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aydın, M., 2019. Derin Karıştırma Yöntemi ile Zemin İyileştirilmesi Üzerine Bir Vaka Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Bahmanpour, A., Towhata, I., Sakr, M., Mahmoud, M., Yamamoto, Y. ve Yamada, S., 2019. The Effect of Underground Columns on The Mitigation of Liquefaction in Shaking Table Model Experiments, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 15-30.
- Birand A., 2007. Kazıklı Temeller, Teknik Yayınevi, 47-157
- Bruce, D., A., 2000. An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 99,138, 6, Georgetown.
- Can, A., Acar, K., 2016. Amasya Ataşehir Hastanesi ve Doktorlar Sitesi İnşaatı ϕ 80 cm WSM (Derin Karıştırma Kolonu) 1 No'lu Yükleme Testi Raporu; İksa Mühendislik, Ankara.
- Coastal Development Institute of Technology, 2002. The Deep Mixing Method – Principle, Design and Construction. A.A.Balkema Publishers.
- Coduto, D. P., 2001. Foundation Design: Principles and Practise, Prentice-Hall Inc.
- Erbeyoğlu, E., 2019. Derin Zemin Karıştırma Yöntemi ile İyileştirme Yapılan Zeminlerde Taşıma Gücü Dağılımının Belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
- Kaptan, E. C., Çınar, F. T., Bozbey, İ., 2021. Derin Karıştırma Yöntemi (dsm) ile İyileştirilen Zeminlerde Elastisite Modülü ve Serbest Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi* 29: 286-296.
- Kitazume, M., Terashi, M., 2013. The Deep Mixing Method. Netherlands: CRC Press.
- Özaydın, K., 2012. Zeminlerin İyileştirilmesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi, 4-5 Ekim 2012, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Plaxis 3D Foundation (2019). Reference Manual, 1-2.
- Sağlam. A., 2017. Amasya Merkez Ataşehir Hastanesi ve Doktorlar Sitesi Zemin ve Temel Mühendisliği Değerlendirme Raporu; Denge Mühendislik, Amasya.