

2123

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YATAY YÜK ETKİSİNDEKİ MODEL KAZIKLARIN DAVRANIŞI

(DOKTORA TEZİ)

Yük. Müh. Erkan DİNÇER

Tezin Fen Bilimleri Ens. Verildiği Tarih : 7 Kasım 1985

Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Nisan 1986

Doktorayı Yöneten Öğretim Üyesi
Diğer Jüri Üyeleri

: Doç.Dr.Ahmet SAĞLAMER
: Prof.Dr. Yalçın AKÖZ
Doç.Dr. Atilla ANSAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
SUMMARY	iv
SEMBOLLER	ix
1. GİRİŞ	1
2. PROBLEMİN TANITILMASI	4
3. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	13
3.1. GELENEKSEL STATİK YAKLAŞIM -----	13
3.2. BROMS TEORİSİ -----	15
3.2.1. Kohezyonlu Zeminlerdeki Kazıklar -----	16
3.2.2. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıklar -----	19
3.3. YATAK KATSAYISI ANALİZİ -----	24
3.3.1. Teori -----	24
3.3.2. Lineer Çözümler -----	25
3.3.2.1. k_h Derinlikle Sabit -----	25
3.3.2.2. k_h 'ın Derinlikle Lineer Değişmesi Halinde Çözümler -----	26
3.3.3. Yatak Katsayısının Belirlenmesi -----	27
3.4. ELASTİK TEORİ -----	28
3.5. ZEMİN REAKSİYONU - KAZIK YERDEĞİŞTİRMESİ YÖNTEMİ (p-y eğrileri) -----	30
3.6. H.MATLOCK ve L.C.REESE'in YANAL YÜKLÜ KAZIKLAR İÇİN ÇÖZÜMLERİ -----	33
3.7. DİĞER ARAŞTIRICILARIN ÇALIŞMALARI -----	37
3.8. EĞİLME MOMENTLERİNİN VEYA YERDEĞİŞTİRMELERİN DENEYSEL BELİRLENMESİNDE ORTAYA ÇIKAN SORUNLAR -	40
4. METOD	42
4.1. PROBLEMİN GALERKİN YÖNTEMİYLE ÇÖZÜMÜ -----	42
4.2. FOTOELASTİK DENEYLER -----	49
4.3. MODEL KAZIĞIN STATİK VE TEKRARLI YATAY YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI -----	51
4.3.1. Model Kazığının Özellikleri -----	51
4.3.2. Deney Düzeni -----	54
4.3.3. Deneylerin Yapılışı -----	59

	<u>Sayfa</u>
5. DENEYSEL SONUÇLAR	62
5.1. KAZIK YERDEĞİŞTİRMELERİ -----	62
5.2. KAZIK DAVRANIŞININ ANALİZİ -----	68
5.2.1. Fotoelastik Deneylere Ait Sonuçlar -----	68
5.2.2. Model Kazık Deneylerine Ait Sonuçlar -----	75
5.3. YÜK ARTIMININ VE TEKRARLI YÜKLEMENİN EĞİLME MOMENTLERİNE ETKİSİ -----	84
6. GENEL SONUÇLAR	87
KAYNAKLAR	89
EK	93
TEŞEKKÜR	101
ÖZGEÇMİŞ	102

Ö Z E T

Dünya'da pek çok ülkenin en önemli sorunlarından birisi enerji açığıdır. Enerji sorununu halletmek üzere bazı ülkeler petrol arama çalışmalarını denizlerde yapmak gereğini duymuştur. Bu çalışmaların sonucunda Dünya petrol ihtiyacının önemli bir kısmının denizlerden karşılanabileceği anlaşılmıştır. Bu amaçla, petrol üretimi için inşa edilen yapılar çoğunlukla kazıklı platform tipinde olmuştur. Ayrıca, deniz içerisinde teşkil edilen deniz fenerleri, askeri ve sivil havacılık radarları, derin su rıhtımları, nükleer enerji santralleri gibi yapılar genellikle kazıklı temel üzerine oturmaktadır. Deniz yapılarının geoteknik tasarımı en önemli husus rüzgâr ve dalganın oluşturduğu tekrarlı yanal kuvvetlerdir. Ayrıca tankerlerin platforma yanaşmasından ötürü kısa süreli statik yüklemeler de söz konusudur.

Bu tezde, problemin tanımı yapıldıktan sonra yatay kuvvet etkisindeki kazıkların davranışını açıklayan mevcut yöntemlere yer verilmiştir. Daha sonra yanal yüklü kazıkların eğilme momentleri veya yerdeğiştirmelerinin deneysel belirlenmesinde ortaya çıkan sorunlardan bahsedilmiştir. Tezin dördüncü bölümünde yatay yüklü kazık probleminin çözümü için (2), (3) no'lu referanslarda verilen yöntemden bahsedilmiştir. Ayrıca, bu bölümde çeşitli model kazıklar üzerinde yapılan deneylerde kullanılan deney düzenine yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise kazık davranışının analizi, tekrarlı yatay kuvvet etkisiyle yatay kazık yerdeğiştirmesinde meydana gelen artışlar, yük artımının ve tekrarlı yüklemenin eğilme momentine etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Altıncı bölümde ise genel sonuçlardan bahsedilmiştir.

THE BEHAVIOUR OF Laterally LOADED MODEL PILES

SUMMARY

Energy gap is a very serious problem concerning many countries of the World today. There have been many operations including exploring, drilling and production in the seas by some countries. As a result of these operations, it is clearly seen that an important and wide portion of the World's petroleum need could be supplied by the offshore operations today. The petroleum platforms erected for drilling and production purpose are generally constructed in the form structures on piles. Many other structures such as military and civil aviation radars, nuclear power plants are generally based on pile foundations. In the geotechnical designs of the offshore structures must be taken into account the cyclic lateral forces exerted by winds and waves. Also there are other short-term horizontal loadings such as berthing loads and accidental impacts caused by the ships.

The behaviour of a pile under cyclic-lateral loading has been studied by many investigators and the results of these studies have been reported in the literature. Such techniques include linear subgrade reaction analysis, non-linear subgrade reaction analysis or p-y analysis, elastic analysis and finite element analysis. For the analysis of pile behaviour under cyclic loading, p-y method has certain advantages.

The design of offshore structures should take into account the three types of lateral loadings that are given below:

- o Short-term static loading,
- o Cyclic loading,
- o Cyclic loading followed by static or cyclic loading.

Laterally loaded piles are generally classified as below considering the pile head condition:

- o Free-head piles,
- o Fixed-head piles.

They may also be classified according to the pile penetration:

- o Rigid or short piles,
- o Flexible or long piles,
- o Semi-rigid or intermediate piles.

It may be said that long piles are usually preferred in practice. For this reason, in this thesis, the behaviour of long piles under cyclic and static lateral loading have been studied.

The problem of laterally loaded piles is closely related to the familiar problem of a beam on an elastic foundation; however, in one respect, it represents a more specialized case. All external forces and moments applied to the pile-soil system are introduced through boundary conditions existing at one point, the top of the pile, while loading may be applied at many points along a beam. On the other hand, rational solutions of pile-soil interaction problems require generalization of the beam-on-elastic-foundation theory to account for the non-linear characteristics of real soils. By writing the differential equation of a pile affected by lateral forces, the classical beam on an elastic foundation theory can be adopted(21). In this case it can be assumed that.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = p$$

where;

- y: Pile deflection
- x: The depth below soil surface
- EI: Flexural rigidity of the pile
- p: Soil reaction

The solution of this equation depends upon the development of a mathematically convenient function for the soil reaction p. The soil reaction may be a function of the pile properties, the stress-strain relationships of the soil, the effective unit weight of the soil, the depth of the overburden at the point considered, the deflection of the pile, the rate of loading, the number of cycles of loading, and perhaps other parameters.

A comprehensive solution to the problem of the laterally loaded pile has two major parts:

- 1- It is necessary to obtain complete information describing the behavior of the surrounding soil,
- 2- It is necessary to solve the differential equation.

If the soil resistance-pile deflection relationship is not linear then in the solution the elasto-plastic behaviour of the soil must be considered. In this case, either the iterative applications of one of the elastic methods, or the behavior of the laterally loaded pile is examined by considering the physical model of the pile-soil system.

In this thesis, after summarizing the methods explaining the behaviour of piles affected by the horizontal forces, the problems observed in the experimental determination of the moments or deflection has been explained. Later, the writer of this thesis has studied the behaviour of the model piles

made of two different materials affected by static and cyclic horizontal forces. The laboratory experiments have been carried out in two groups. In the first group of experiments, araldite sheets were used as a model pile and the behaviour of a pile inside the soil was studied by photo-elastic method. In the second group of experiments, a model pile was formed by duraluminium. The deformation of pile under horizontal forces in the soil was detected by strain gages. In the following parts and paragraphs of the thesis, the data from the model experiments, the analysis of data, and the evaluation of data are presented.

The general conclusions reached by this work are listed below:

1- The Pile deflection bending moment, shear force and soil reaction curves obtained from the experiments are in harmony. The harmonization of these curves that were determined by the analysis of Galerkin method of pile behaviour shows the validity of the method used.

2- The cyclic nature of a horizontal force has made important increases in the pile deflections that are measured on the soil surface. In a pile group, it is known that if the approximate horizontal force acting on each pile is considered to act on a single pile, the horizontal deflection of the single pile will be less than the horizontal deflection of the pile group. For this reason, the deflections of the pile groups of offshore structures under the cyclic horizontal forces must be carefully investigated.

3- The points that the bending moment is maximum, change from $3b$ to $5b$ from the soil surface where (b) shows the pile width (diameter). This value is in agreement with the values given by the literature. The cyclic loading of the pile doesn't change practically the place where bending moment passes through the maximum.

4- Cyclic loading increases the maximum bending moment which affects the pile about 1% to 5%. This increase of the maximum bending point can be neglected. Cyclic loading has made an important increase at the bending moments at points of the pile's bottom middle. This increase is almost 30% of the bending moment observed under static loading at the mentioned cross-sections. With all these, because the pile design is made according to the maximum bending moment, the increase of bending moment which is at the bottom middle of the pile, has not been important for projection of the constant cross-sectioned piles but important for the variable cross-sectioned piles.

5- The applied load level of the horizontal force or the increase of cycle number in the cyclic loading experiments has caused the soil displacements around the pile to extend to a larger and a deeper region. During the cyclic loading cavities may form around a pile because of the rolling of sand grains at sections near the surface. Because of this reason, due to the cavity and separation and the decrease of soil reactions, the pile deflections have been increased. At the design of offshore constructions, this point must be taken into account.

SEMBOLLER

A	: Katsayı
B	: Katsayı
b	: Kazık genişliği veya çapı (cm)
C	: Katsayı
C ₁	: Katsayı
C ₂	: Katsayı
c _u	: Drenajsız kohezyon (kg/cm ²)
D	: Katsayı
d	: Kazık genişliği (cm)
D _r	: Relatif sıkılık
E	: Kazığın elastisite modülü (kg/cm ²)
e	: Yatay kuvvetin dış merkezliği (cm)
E _s	: Zeminin elastisite modülü (kg/cm ²)
E _{so}	: Zemin yüzeyindeki elastisite modülü (kg/cm ²)
e _{max.}	: Maksimum boşluk oranı
e _{min.}	: Minimum boşluk oranı
G	: Kayma modülü (kg/cm ²)
H	: Yatay kuvvet (kg)
H _u	: Nihai yanıl yük (kg)
I	: Kazık atalet momenti (cm ⁴)
K _a	: Rankine aktif toprak basıncı katsayısı
K _p	: Rankine pasif toprak basıncı katsayısı
K _R	: Kazık fleksibilite faktörü
k _h	: Yatay yatak katsayısı (kg/cm ³)
L	: Kazık boyu (cm)

M	: Eğilme momenti (kg.cm)
M _t	: Eğilme momenti (kg.cm)
M _y	: Akma momenti (kg.cm)
$\bar{M}$	: Boyutsuz eğilme momenti
N	: Yatay kuvvetin tekrar sayısı
n	: Girişim çizgileri sayısı
n _h	: Yatay yatak katsayısı sabiti (kg/cm ³)
P _h , P _t	: Yatay kuvvet (kg)
P _u	: Nihai yanal kazık direnci (kg)
P _v	: Düşey kuvvet (kg)
p	: Zemin reaksiyonu (kg/cm)
p _o	: Zemin yüzeyindeki zemin reaksiyonu (kg/cm)
$\bar{p}$	: Boyutsuz zemin reaksiyonu
T	: Göreceli rijitlik faktörü
$\bar{T}$	: Boyutsuz kesme kuvveti
W	: Mukavemet momenti (cm ³)
W _o	: Kazığın zemin yüzeyindeki ötelenme miktarı (cm)
W _o '	: Kazığın zemin yüzeyindeki eğimi
$\bar{Y}$	: Boyutsuz yatay kazık yerdeğiştirmesi
y	: Yatay kazık yerdeğiştirmesi (cm)
Z	: Derinlik faktörü
z _r	: Dönme derinliği (cm)
z	: Zemin yüzünden derinlik (cm)
β	: Katsayı
θ	: Kazığın zemin yüzündeki dönmesi (derece)
v	: Poisson oranı
ρ	: Kazığın zemin yüzündeki yatay yerdeğiştirmesi (cm)
δ	: Kazık yerdeğiştirmesi (cm)
δ _L	: Kazık eleman boyu (cm)
γ	: Zeminin birim hacim ağırlılığı (gr/cm ³)
φ	: Zeminin kayma mukavemeti açısı (Derece)
φ'	: Efektif gerilmeler cinsinden kayma mukavemeti açısı (Derece)
σ' _v	: Efektif düşey gerilme (kg/cm ²)

BÖLÜM 1

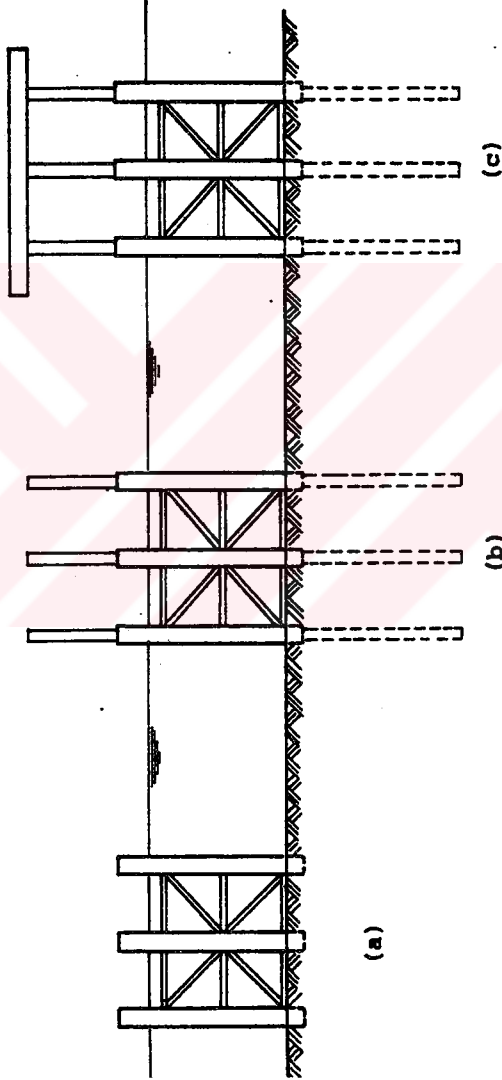
G İ R İ Ş

Günümüzde pek çok ülkenin belli başlı sorunlarından birisi sürekli artan enerji ihtiyacıdır. Bu nedenle, son yıllarda deniz dibi petrol yatakları da araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda Dünya petrol ihtiyacının önemli bir bölümünün denizlerde karşılanabileceği anlaşılmıştır.

Açık deniz hidrokarbon yataklarından petrol üretimi delgi ve üretim platformlarıyla yapılmaktadır. Bu platformlar kılıflı kazık tipinde veya ağırlık yapısı tipinde inşa edilmektedir. Açık denizdeki inşaatların şekilleri üst yapıya etkiyecek yüklere ve temel şartlarına göre uyarlanmıştır. Açık deniz yapılarının temel elemanları üzerindeki yükler, inşaatın ağırlığından kaynaklanan düşey yükler, teçhizat ya da taşıyıcı elemanlarla birlikte rüzgâr ve dalgadan kaynaklanan yatay yükleri kapsar. Yatay yükler devirici momentle, temel düzeyinde kesme meydana getirir. Su derinliğinin fazla olması halinde devirici moment çok büyük olabilir ve temel elemanlar üzerindeki yüklerde büyük değişiklikler meydana getirebilir. Dalgalardan dolayı oluşan yükler değişik büyüklüklerine rağmen tekrarlamalı ve terse dönmeli yani değişimlidir. Açık deniz yapıları temellerinin üzerindeki yanal yüklerin tekrarlı karakteri, temellerin tasarlanması yönünden büyük önem arz etmektedir.

Şekil 1.1'de bir kılıflı açık deniz yapısının inşa sırası gösterilmiştir. Burada, daha önce boru kazıklardan bir kılıf yapılmakta, bu kılıf yüzdürülerek yapının teşkil edileceği yere taşınmakta ve deniz ta-

banına batırılmaktadır. Daha sonra taşıyıcı kazıklar mevcut kılıf içinden zemine çekilmektedir. Son olarak üst platform taşıyıcı kazıklar üzerine oturtulmaktadır. Rijitlik ve yük aktarma kabiliyetinin sağlanması bakı-



Şekil 1.1. Kılıflı bir açık deniz yapısının kademeli inşası;

a) kılıf yerleştirilmiş, b) taşıyıcı kazıklar zemine sürülmüş, c) üst döşeme kazıklar üzerine yerleştirilmiş durumda(23)

mindan taşıyıcı kazıkların kılıfa kaynaklanması ve taşıyıcı kazıklarla kılıf arasındaki boşluğun enjeksiyonla doldurulması gerekir.

Aşındırma özelliği yüksek olan suların çelik kazıklara etkisi ve prefabrik ön elemanların yapılacak yapılar için elverişli olmadığı durumlarda öngerilmeli beton kazıklar kullanılır. Fakat bu tür yapılar için su derinliği kılıflı kazıklara göre daha sınırlıdır ve 90 cm çapında 30 m derinliğe kadar olan inşaatları kapsar.

Denizlerde sayıları gittikçe artan yapılar genellikle kazıklı temellere oturmaktadır. Söz konusu yapılar yanaşan gemilerin yapıya bindirmesi sonucu kısa süreli statik yüklemeye maruzdur. Bir kısım kazıklı deniz yapılarının dalga tesiriyle yıkılması pek çok araştırmacıyı "tekrarlı kuvvet etkisindeki kazıklı temellerin davranışı" problemini incelemeye yönlendirmiştir. Bu nedenle tezde, yatay yük etkisindeki kazıkların davranışı model deneyleriyle incelenmiştir. Yatay yük etkisindeki kazıkların analizinde, kazık boyunca gerilme-şekil değiştirme bağıntısı için bir kabul yapılmaktadır. Bu amaçla zemin modülünün derinlikle lineer arttığı veya belirli bir fonksiyona bağlı olarak değiştiği kabul edilir. Bu tezde zemin modülünün derinlikle değişimi hakkında bir kabul yapmadan (2) ve (3) no'lu referanslarda verilen yöntem kullanılarak kazık davranışı analiz edilmiştir. Bu amaçla yapılan model deneyleri iki grupta toplanmıştır. Birinci gruptaki deneylerde Araldit levha model kazık olarak kullanılmış ve kazığın zemin içindeki davranışı Fotoelastik yöntemle incelenmiştir. İkinci gruptaki deneylerde ise Duraliminyum model kazık kullanılmıştır. Kazığın zemin içindeki davranışı, kazık boyunca muhtelif yerlere yerleştirilmiş Strain-gage (şekil değiştirme ölçer) lerle tesbit edilen yerdeğiştirme sonuçlarının değerlendirilmesiyle analiz edilmiştir.

Bu tezde problemin tanımı yapıldıktan sonra yatay kuvvet etkisindeki kazıkların davranışını açıklayan mevcut yöntemlere yer verilecektir. Daha sonra sırasıyla kazık davranışının analizi için kullanılmış olan metoda, yapılan deneylere ve sonuçlarına yer verilecektir.

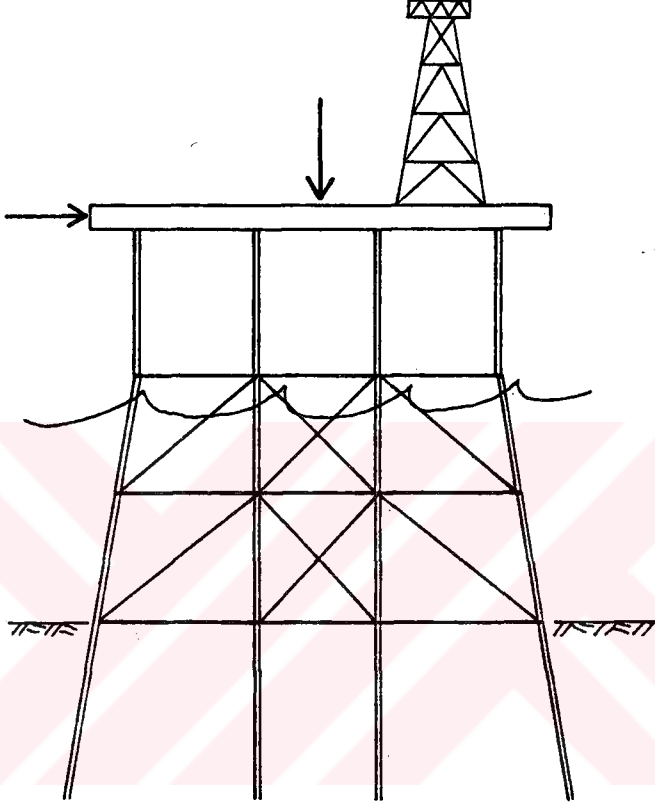
BÖLÜM 2

PROBLEMİN TANITILMASI

Kazıklı temeller üst yapıya etkileyen rüzgâr, deprem, dalga kuvvetleri veya yanal toprak basınçları nedeniyle yatay kuvvetlere maruzdur. Bu kuvvetlerden rüzgâr, deprem ve dalgalar tekrarlı olarak etkirler ve temellerin tasarımında en kritik etkileri meydana getirirler. Yanal olarak yüklenmiş kazık problemi, delgi platformları ve diğer açık deniz yapıları nedeniyle önem kazanmıştır. Şekil 2.1'de açık bir deniz yapısına etkileyen kuvvetler gösterilmiştir. Belli olan düşey ve yatay yüklerin kombinasyonu ile birlikte kazıklara etkileyen kesme kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin belirlenmesi gerekir. Kazığın düşey kuvvete göre tasarımı bilinen statik ve dinamik kazık formülleriyle yapılmaktadır(4,6,9,16,28,30,31,33). Kazığın yanal yükler etkisindeki davranışı ise; lineer yatak katsayısı analizi, lineer olmayan yatak katsayısı analizi veya p-y analizi, elastik analiz ve sonlu elemanlar analizini kapsayan bir çok yaklaşım kullanılarak geliştirilmiş yöntemlerle incelenmiştir(20). Yukarıdaki yaklaşımlardan sadece p-y analizi tekrarlı yük hali için uygulanabilir.

Deniz yapılarının yanal yüklere göre hesabında üç yükleme şekli önemlidir:

- 1- Kısa süreli statik yükleme,
- 2- Tekrarlı yükleme,
- 3- Tekrarlı yüklemekten sonra statik veya tekrarlı yükleme.

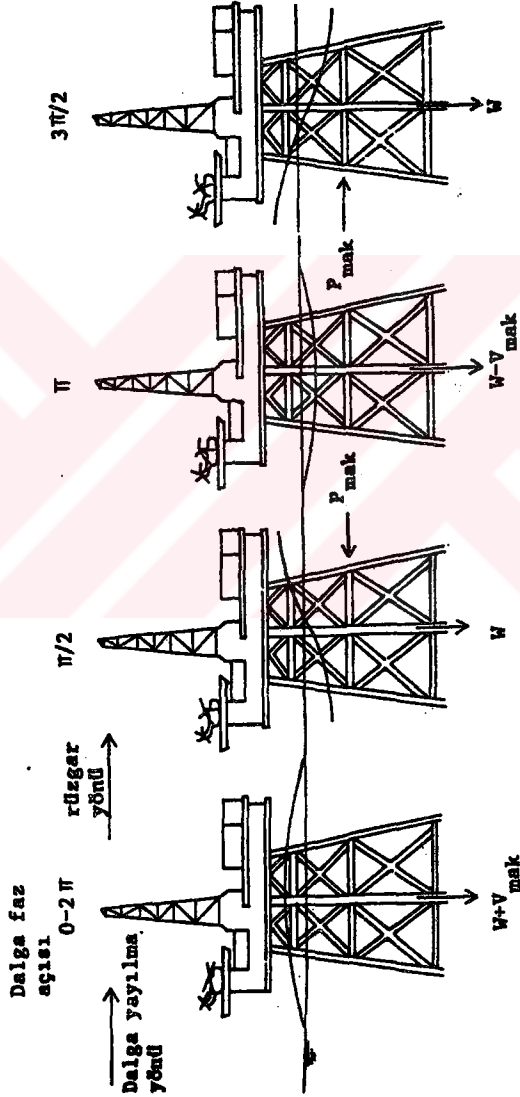


Şekil 2.1. Bir açık deniz delgi platformu(23)

Kısa süreli statik yükleme açık deniz yapılarına yanan gemilerin yapıya bindirmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda yapı ile gemi arasında bir miktar karşılıklı dinamik etki söz konusu ise de, temas süresinin yeteri kadar uzun olduğu kabul edilerek zeminde meydana gelmesi muhtemel visko-elastik tesirler ihmal edilmektedir(23).

Açık deniz yapılarının geoteknik tasarımında en önemli husus fırtına sırasında maksimum değere ulaşan tekrarlı dalga kuvvetleridir. Dalga kuvvetlerinin dalga faz açısına bağlı olarak yönleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Faz açısının $3\pi/2$ değeri için yatay dalga kuvvetiyle,

rüzgâr kuvveti aynı yönde etkimektedir. Örneğin, Kuzey Denizi'ndeki yapıların tasarlanmasında 150 m.lik su derinliği için maksimum dalga yüksekliği olarak 30 m, dalga/peryodu 15-17 sn, dalga boyu 350-430 m alınmaktadır(23).



Şekil 2.2. Dalga kuvvetlerinin dalga faz açısına bağlı olarak yönleri(23)

Yanal yüklü kazıklar aşağıdaki şekillerde sınıflandırılmaktadır(23), (Şekil 2.3):

- 1- Rijit veya kısa kazıklar,
- 2- Bükülebilir veya uzun kazıklar,
- 3- Yarı rijit veya orta boylu kazıklar.

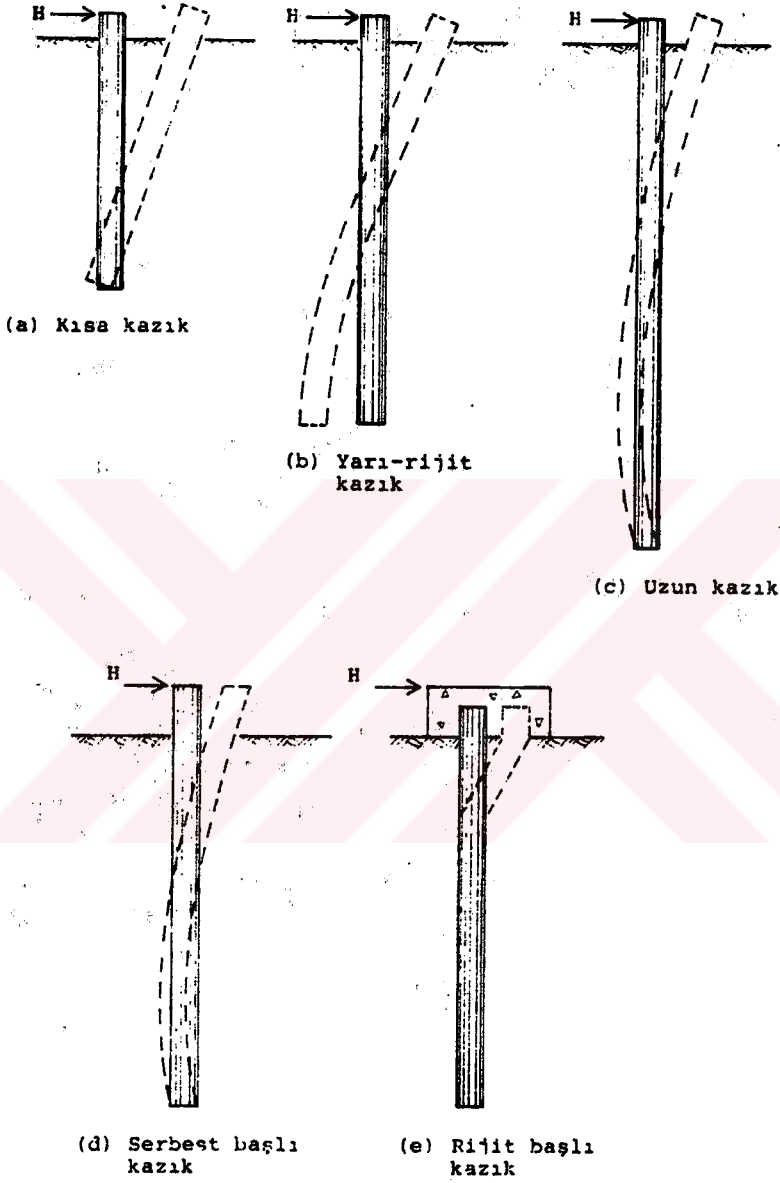
Kazık başının serbest ve ankastre olmasına göre:

- 1- Serbest başlı kazıklar,
- 2- Rijit başlı kazıklar.

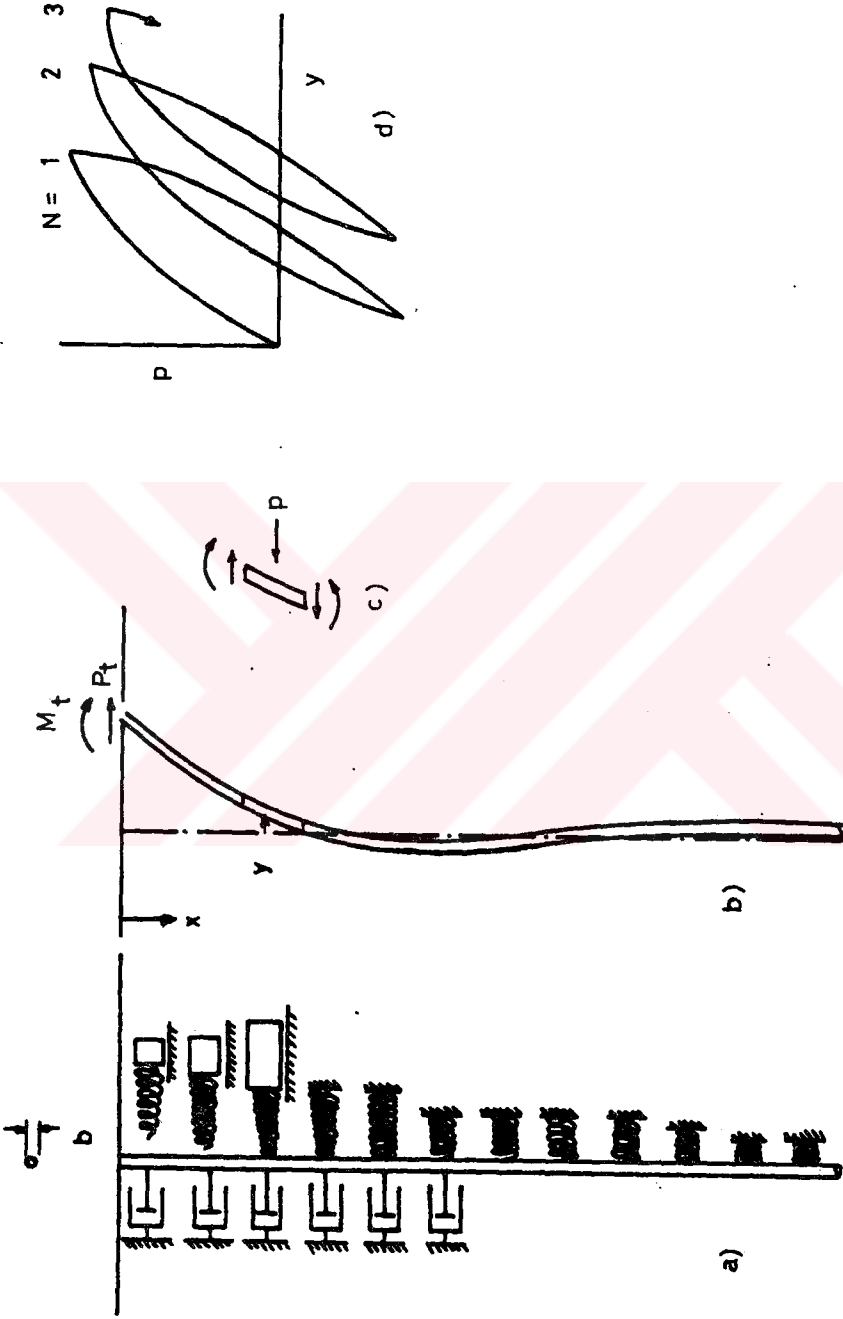
Uygulamada genellikle uzun kazıklar kullanıldığından, bu tezde yanal yük etkisindeki uzun kazıkların davranışı incelenecektir.

Yatay yüklenmiş kazık problemi, elastik zemine oturan kiriş problemi ile yakından ilgilidir. Bununla beraber, bir bakıma, daha özel bir durumu temsil etmektedir. Kazık-zemin sisteminde dış kuvvetler ve momentler kazık başında tatbik edilmesine karşın, elastik zemine oturan kirişte yükleme kiriş boyunca bir çok noktada tatbik olunabilir. Diğer taraftan, zemin kazık ilişkisi ile ilgili problemlerin çözümleri, zeminin lineer olmayan özelliklerini hesaba almak üzere elastik temel üzerindeki kiriş teorisinin genelleştirilmesini gerektirmektedir. Şekil 2.4'de yanal yüklü uzun kazık probleminde zemin davranışından beklenen karmaşıklıklar gösterilmiştir. Şekil 2.4a'da gösterilen yayların şekilleri, zemin reaksiyonlarının derinliğe ve kazığın yer değiştirmesine bağlı olarak değişeceğini gösterir. Sürtünme blokları, mobilize olabilecek zemin reaksiyonlarının bir limit değeri olabileceğini göstermektedir. Yüze yakın bölgede yay ve zemin arasındaki boşluklar kazığın zeminden direnç görmeden bir miktar eğilebileceğini ifade etmektedir.

Yağ kutuları ise zemin reaksiyonlarının yükleme hızına ve yüklemekten sonra geçen zamana göre değişeceğini gösterir. Şekil 2.4d'de problemin diğer bir karmaşık yönü belirtilmektedir. Tekrarlı yükleme ile zemin reaksiyonu-kazık yer değiştirmesi bağıntısı, zeminin yumuşaması veya yuğrulması sonucu değişmektedir.



Şekil 2.3. Yanal yük etkisinde bulunan kazıkların sınıflandırılması(23)



Şekil 2.4. Yanal yüklü kazık davranışında mümkün karışıklıklar(21)

Şekil 2.4'deki gibi yatay kuvvet etkisindeki kazık probleminin differansiyel denkleminin yazılmasında klasik elastik zemine oturan kiriş teorisi kullanılabilir(21).

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = p \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte:

- y: kazığın yatay yerdeğiştirmesi,
- x: kazık boyunca ölçülen derinlik,
- EI: kazığın eğilme rijitliği,
- p: zemin reaksiyonudur.

Yukarıdaki eşitliğin çözümü p zemin reaksiyonu için seçilen fonksiyona bağlıdır. Zemin reaksiyonu ise kazık özelliklerinin, zeminin gerilme-deformasyon bağıntısının, ele alınan noktadaki düşey efektif gerilmenin, zeminin birim hacim ağırlığının, kazığın yerdeğiştirmesinin, yükleme hızının, yükün tekrar sayısının v.b. parametrelerin fonksiyonu olabilir.

Yanal yüklü kazık probleminin çözümünde iki önemli husus vardır:

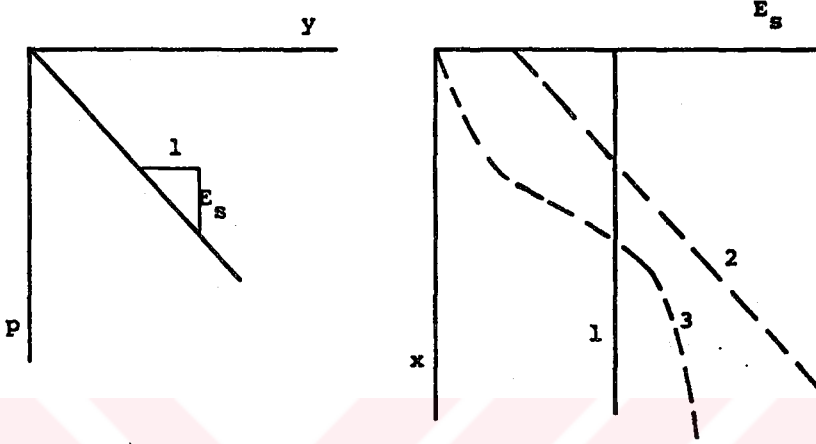
- 1- Zemin davranışını açıklayan bilgilerin elde edilmesi,
- 2- Differansiyel denklemin çözülmesi.

Zemin reaksiyonu p ve kazık yerdeğiştirmesi y arasında Şekil 2.5'deki doğrusal bağıntısının varlığı kabul edilirse kazığın birim uzunluğuna etkiyen zemin reaksiyonu,

$$p = -E_s y \quad (2.2)$$

eşitliğinden hesaplanır(21).

Burada E_s zemin modülü olarak tanımlanmakla birlikte fiziksel bir zemin karakteristiği değildir.



YÖNTEM	ZEMİN MODÜLÜ	ZEMİN REAKSİYONU	ÇÖZÜMÜN FORMU
1	Derinlikle sabit	$p = -E_s y$	$y = e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x)$
2	Derinlikle lineer ar- tıyor	$p = -(E_{s0} + kx)y$	$y = C_1 y_1 + C_2 y_2 + C_3 y_3 + C_4 y_4$ Bu eşitlikte örneğin: $y_3 = \frac{z^2}{2!} - \frac{3\alpha}{7!} z^7 + \frac{3.8 \cdot \alpha^2}{12!} z^{12} - \frac{3.8.13\alpha^3}{17!} z^{17} +$
3	Derinlikle gelişigüzel değişiyor.	$p = -\phi(x)y$	$y_m = \frac{EI}{E_{sm}} \left(\frac{t}{L}\right)^4 (y_{m+2} - 4y_{m+2} - 4y_{m+1} + 6y_m - 4y_{m-1} + y_{m-2})$

Şekil 2.5. Zemin reaksiyonuyla kazık yerdeğiştirmesi arasında doğrusal bir bağıntı olması halinde çözüm yöntemleri(23)

Şekil 2.5'de gösterildiği gibi E_s derinlikle sabitse ve kazık sonsuz uzunlukta kabul edilirse (2.1) diferansiyel denklemi kapalı formda çözülebilir. Çözüm formu Şekil 2.5'de verilmiştir. A, B, C, D katsayıları kazık başındaki sınır şartlarından belirlenir(23). E_s zemin modülünün (2) doğrusuyla gösterildiği gibi derinlikle lineer arttığı kabul edilirse zemin reaksiyonu p,

$$p = -(E_{so} + k_h x)y \quad (2.3)$$

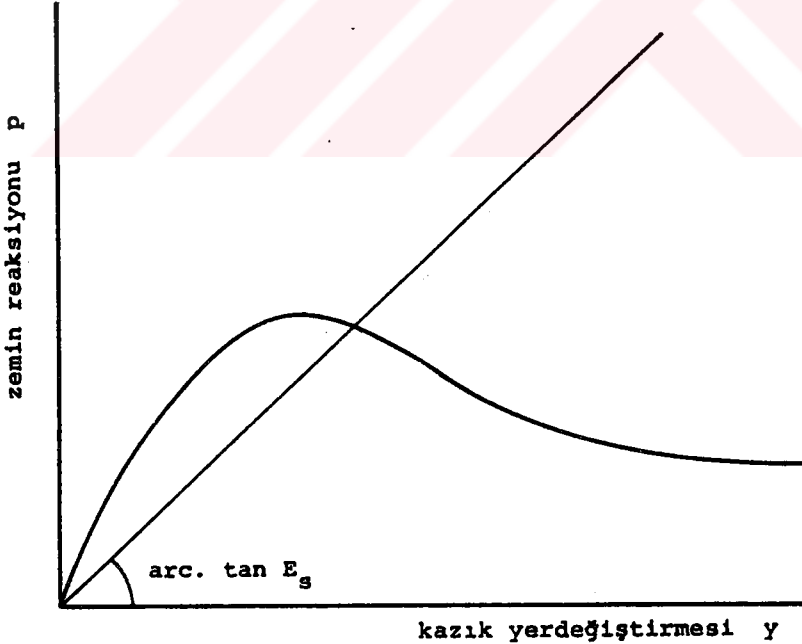
eşitliğinden hesaplanır(21).

Eğer E_s zemin modülünün derinlikle değişiminin (3) eğrisiyle gösterildiği farzedilirse, birim kazık boyuna etkiyen zemin reaksiyonu,

$$p = -\phi(x)y \quad (2.4)$$

eşitliğinden hesaplanır(21).

Eğer zemin reaksiyonu-kazık yerdeğiştirmesi bağıntısı Şekil 2.6' da gösterildiği gibi lineer değilse problemin çözümünde zeminin elasto-plastik davranışının gözönünde bulundurulması gerekmektedir. Bu durumda ya bir elastik yöntemin ardışık uygulanmasıyla zeminin elastik olmayan davranışının simulasyonu yapılmakta(15), veya kazık-zemin sisteminin fiziksel modeli hazırlanarak yatay yüklenmiş kazığın davranışı bu modelle incelenmektedir.



Şekil 2.6. Zemin reaksiyonuyla kazık yerdeğiştirmesi arasında doğrusal bir bağıntı olmaması durumu(23)

BÖLÜM 3

KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

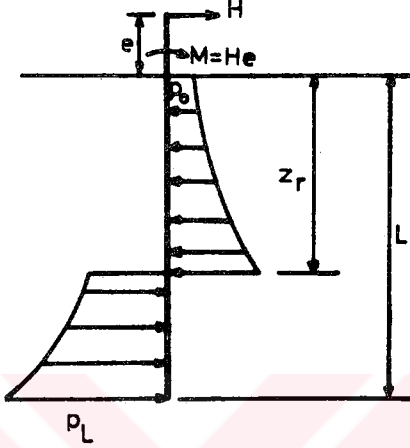
3.1. GELENEKSEL STATİK YAKLAŞIM

Bir kazığa etkiyen nihai yanal zemin reaksiyonunun tahmin edilmesinde en basit metod, kazığın statik modelini gözönüne almaktır. Şekil 3.1'de H yanal yükü ve M momentine maruz serbest başlı bir kazık gösterilmiştir. Burada, z derinliğindeki nihai yanal zemin reaksiyonu p_u dur. Göçmeye sebep olacak H_u ve M_u , yatay denge ve moment denge denklemleri gözönüne alınarak, z_r dönme derinliği için, sonuç denklemleri çözülerek bulunur. d kazık genişliği olmak üzere bu denklemlerin genel formu aşağıda verilmiştir.

$$H_u = \int_0^{z_r} p_u dz - \int_{z_r}^L p_u dz \quad (3.1)$$

$$M_u = H_u e = - \int_0^{z_r} p_u dz dz + \int_{z_r}^L p_u dz dz \quad (3.2)$$

Kazık boyunca zemin reaksiyonu yayılışının üniform olması halinde, yani $p_o = p_L = p_u$ ise yukarıdaki denklemler z_r dönme derinliği için aşağıdaki sonuçları verir:



Şekil 3.1. Serbest başlı yanal yüklü kazık(19)

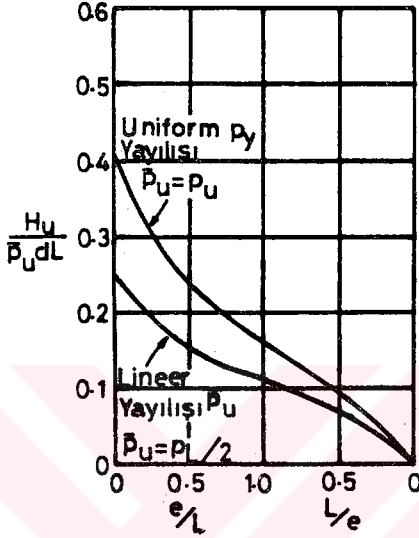
$$z_r = \frac{1}{2} \left(\frac{H_u}{p_u d} + L \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{M_u}{p_u d L^2} = \frac{H_u e}{p_u d L^2} = \frac{1}{4} \left| 1 - \left(\frac{2H_u}{p_u d L} \right) - \left(\frac{H_u}{p_u d L} \right)^2 \right| \quad (3.4)$$

$$\frac{H_u}{p_u d L} = \sqrt{\left(1 + \frac{2e}{L} \right)^2 + 1} - \left(1 + \frac{2e}{L} \right) \quad (3.5)$$

Şekil 3.2'de $\frac{e}{L}$ ye karşılık $\frac{H_u}{p_u d L}$ değerleri gösterilmiştir.

Zemin direncinin yayılışı zemin yüzeyinde p_0 , kazık ucunda p_L şeklinde lineer değişiklik gösterirse aşağıdaki denklemler elde edilir:



Şekil 3.2. Serbest başlı kazıklar için nihai yanal zemin reaksiyonu(19)

$$4\left(\frac{z_r}{L}\right)^3 + \left| 6\left(\frac{z_r}{L}\right)^2 \right| \left| \frac{e}{L} + \frac{p_o}{p_L - p_o} \right| + \left(\frac{12p_o}{p_L - p_o} \right) \left(\frac{e}{L} \right) \left(\frac{z_r}{L} \right)$$

$$-(3 \frac{e}{L}) \left(\frac{p_o + p_L}{p_L - p_o} \right) - \left(\frac{2p_L + p_o}{p_L - p_o} \right) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{H_u}{p_L d_L} = \left(1 - \frac{p_o}{p_L} \right) \left(\frac{z_r}{L} \right)^2 + \left(2 \frac{p_o}{p_L} \right) \left(\frac{z_r}{L} \right) - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{p_o}{p_L} \right) \quad (3.7)$$

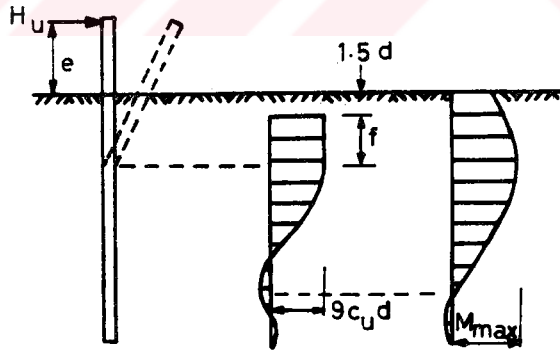
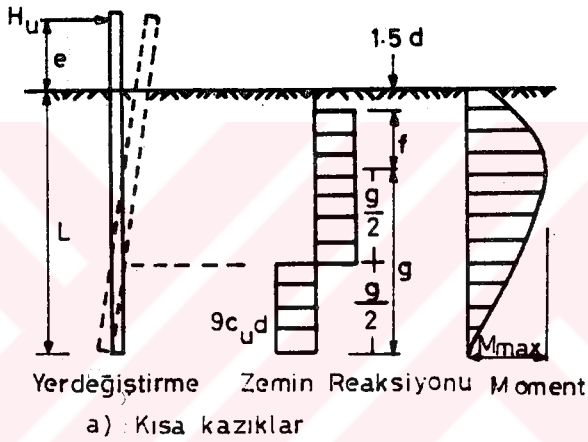
3.2. BROMS TEORİSİ

Bu kısımda Broms teorisi kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde olmak üzere serbest başlı ve sabit başlı kazıklar için incelenecektir.

3.2.1. Kohezyonlu Zeminlerdeki Kazıklar

Broms, kohezyonlu zeminlerde zemin reaksiyonunun yüzeyden $1.5 d$ derinliğe kadar sıfır, bu derinlikten sonra ise $9 c_u$ değerine eşit olduğu kabulünü yapmıştır (Şekil 3.3).

Şekil 3.3'de serbest başlı kısa ve uzun kazıklar için kırılma mekanizması, zemin reaksiyonu dağılışı ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kohezyonlu zeminlerdeki kazıklar için kırılma mekanizmaları(19)

Broms'a göre kısa kazıklarda yanal taşıma kapasitesi tamamen zemin reaksiyonuna bağlı iken uzun kazıklarda öncelikle kazığın akma momentine bağlıdır. Kısa kazıklarda, kesme kuvvetinin sıfır, eğilme momentinin maksimum olduğu derinlik:

$$f = \frac{H_u}{9C_u d} \quad (3.8)$$

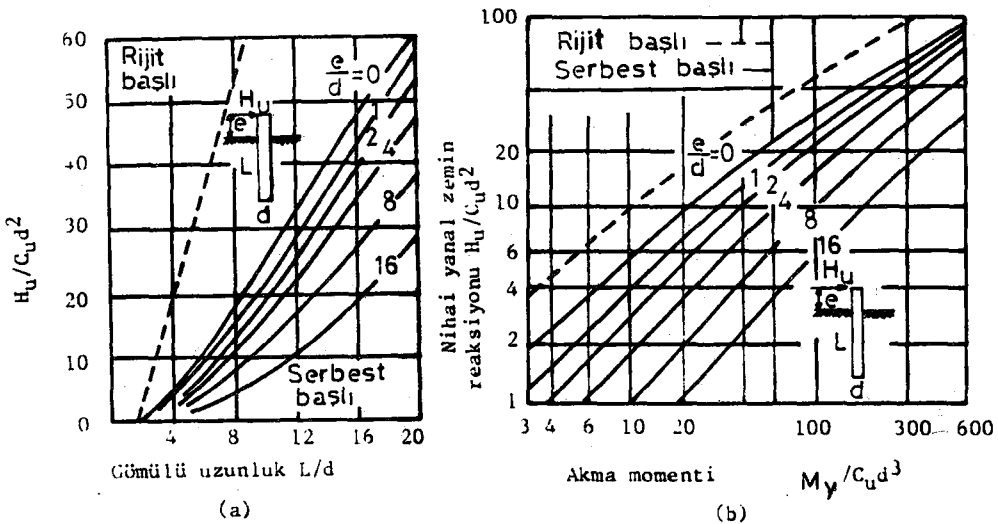
formülünden hesaplanır. Maksimum moment:

$$M_{\max} = H_u (e + 1.5 d + 0.5 f) \quad (3.9a)$$

keza;

$$M_{\max} = 2.25 d g^2 C_u \quad (3.9b)$$

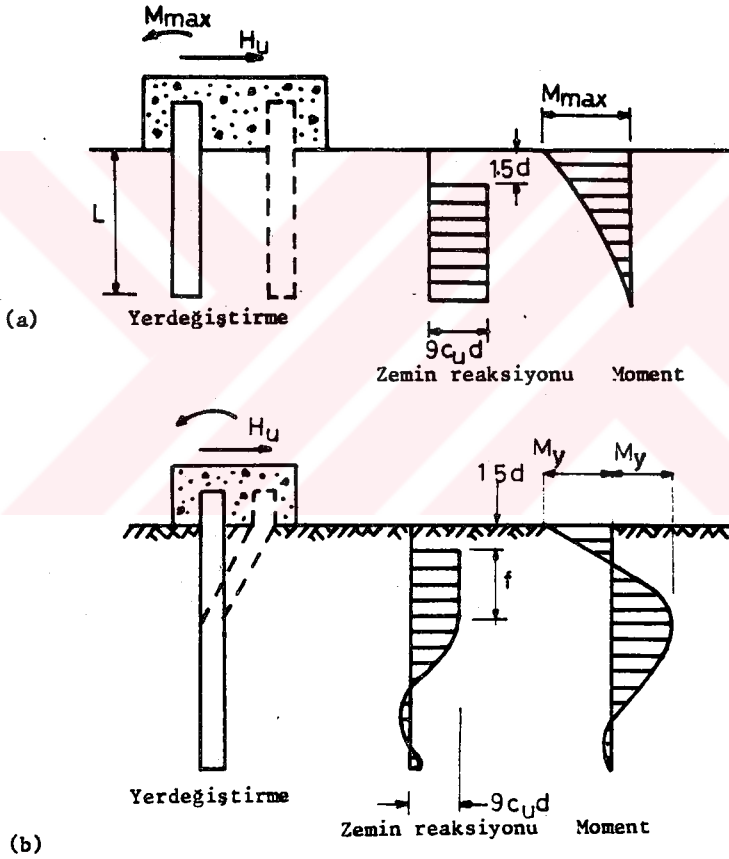
$L = 1.5d + f + g$ olduğuna göre H_u için (3.8) ve (3.9) denklemleri çözülebilir. Çözümler boyutsuz parametrelerde Şekil 3.4a'da gösterilmiştir. Uzun kazıklar için 3.9a denkleminde $M_{\max}$ yerine akma moment değeri konulmak suretiyle çözümler boyutsuz parametrelerle Şekil 3.4b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kohezyonlu zeminlerde nihai yanal zemin reaksiyonu:
a) Kısa kazıklar, b) Uzun kazıklar(19)

Şekil 3.5'de rijit başlıklı kazıklar için zemin reaksiyonları, eğilme momenti, kırılma mekanizması gösterilmiştir.

Şekil 3.5a'da gösterilen kısa kazıklar için bağıntılar aşağıda ifade edilmiştir.



Şekil 3.5. Kohezyonlu zeminlerde rijit başlı kazıklar:
a) Kısa; b) Uzun(19)

$$H_u = 9C_u d (L-1.5d) \quad (3.10)$$

$$M_{\max} = H_u (0.5 L + 0.75d) \quad (3.11)$$

Çözümler boyutsuz eksenlerde Şekil 3.4.a'da gösterilmiştir.

3.2.2. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıklar

Broms tarafından verilen analizde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- 1- Kazık arkasına etkiyen aktif toprak basıncı ihmal edilir.
- 2- Kazık önündeki pasif basınç Rankine pasif basıncının üç katına eşittir.
- 3- Kazık kesiti şeklinin nihai yanal basıncın yayılışına veya nihai yanal zemin reaksiyonuna etkisi yoktur.
- 4- Yanal hareket halinde tüm yanal direnç mobilize olur.

p_u , zemin reaksiyonu olup

$$p_u = 3\sigma_v' K_p \text{ ifadesinden hesaplanabilir.} \quad (3.12)$$

Burada;

σ_v' = efektif düşey gerilme

$$K_p = (1 + \sin \phi') / (1 - \sin \phi')$$

ϕ' = efektif gerilmeler cinsinden içsel sürtünme açısıdır.

Şekil 3.6'da uzun ve kısa kazıklar için kırılma modelleri, zemin reaksiyonu yayılışları ve eğilme momenti yayılışı gösterilmiştir. Maksimum moment, akma momentinden küçükse kazık kısa kazık davranışı gösterir. Şekil 3.6'da kazık ucuna göre moment alınırsa;

$$H_u = \frac{0.5 \gamma d L^3 K_p}{e + L} \quad (3.13)$$

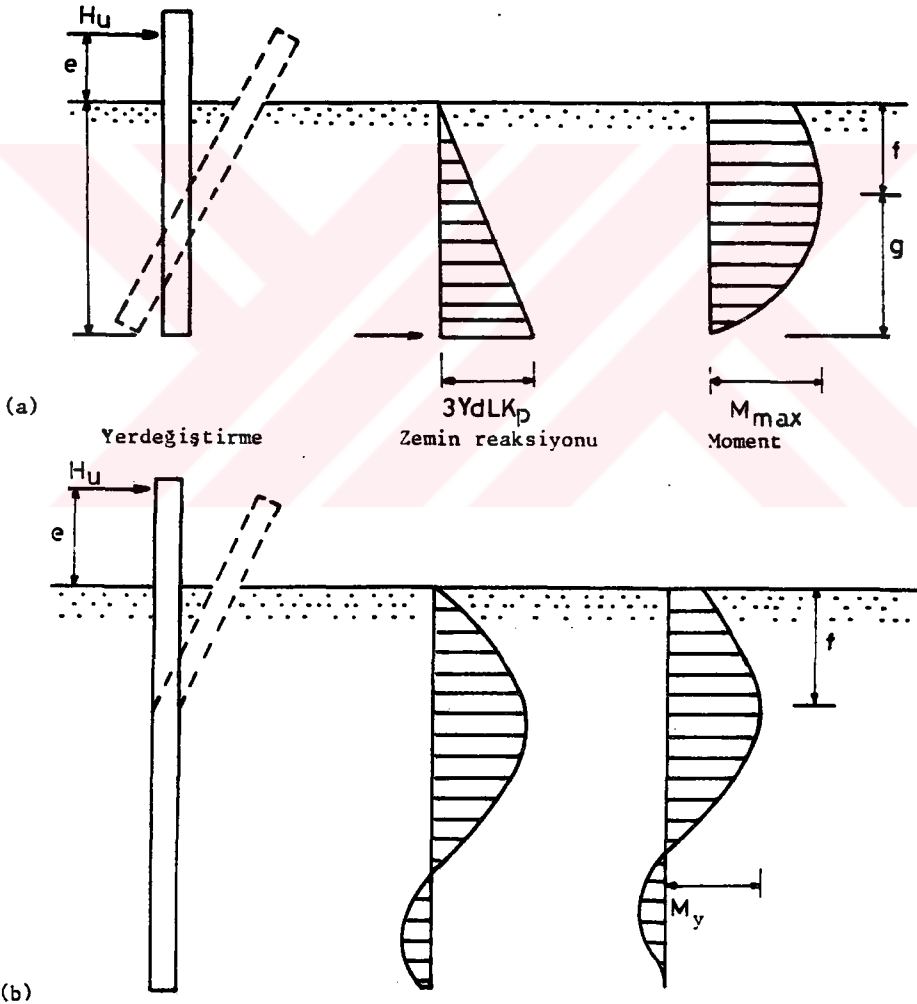
eşitliği elde edilir.

Bu eşitlik Şekil 3.7a'da boyutsuz parametrelerle gösterilmiştir. Maksimum moment yüzeyden f derinliğinde oluşur. Burada:

$$H_u = \frac{3}{2} \gamma d K_p f^2 \quad (3.14)$$

yani;

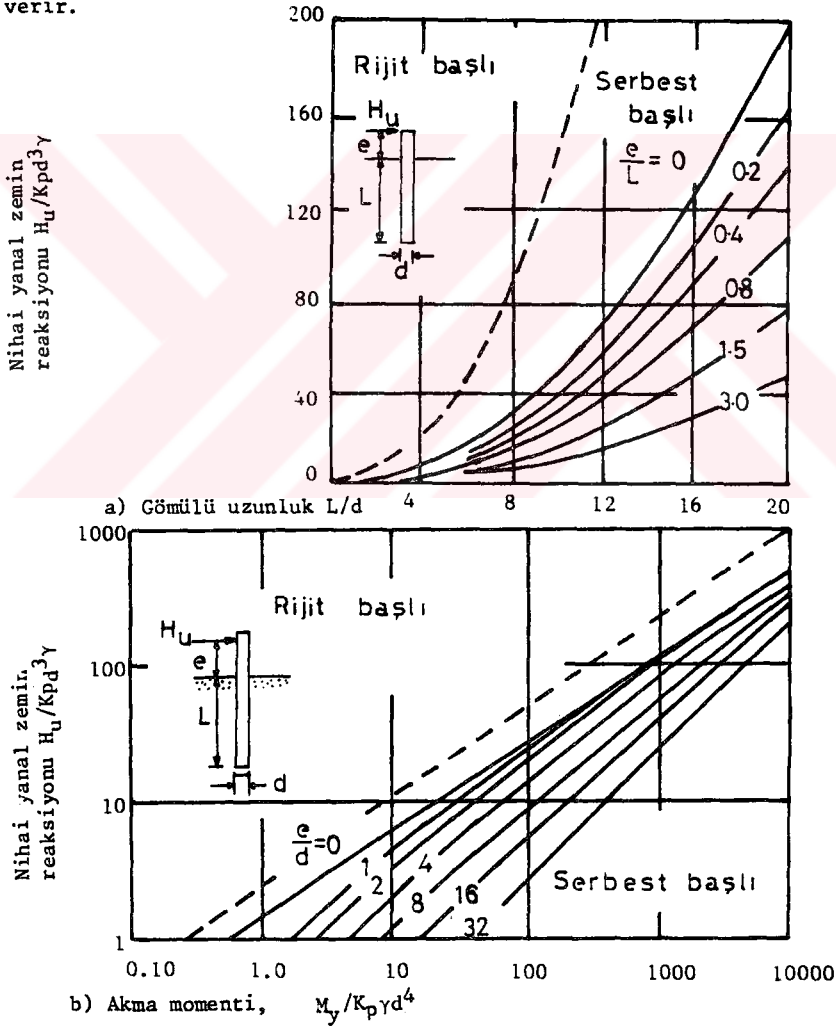
$$f = 0.82 \sqrt{\left(\frac{H_u}{d K_p \gamma} \right)} \quad (3.15)$$



Şekil 3.6. Kohezyonsuz zeminlerde serbest başlı kazıklar: a) Kısa, b) Uzun(19)

$$\text{Maksimum moment, } M_{\max} = H_u \left(e + \frac{2}{3} f \right) \text{ dir.} \quad (3.16)$$

(3.13) denkleminin kullanılmasından sonra $M_{\max} > M_y$ olduğu ortaya çıkarsa kazık uzun kazık davranışı gösterecektir. (3.14) ve (3.16) denklemlerinin çözümünde $M_{\max} = M_y$ alınarak H_u bulunabilir. Uzun kazıklar için çözüm Şekil 3.7b'de gösterilmiştir. Kısa kazıklar için Broms'un kabul-leri daha önce belirtilmiş olan analize göre daha büyük nihai taşıma yükü verir.



Şekil 3.7. Kohezyonsuz zeminlerdeki kazıkların nihai yanal zemin reaksiyonu:
a) Kısa kazıklar, b) Uzun kazıklar(19)

Şekil 3.8'de kısa, orta ve uzun rijit başlıklı kazıklar için kırılma modelleri gösterilmiştir. Şekil 3.8a'da gösterilen kısa kazık için yatay denge denkleminde, H_u göçme yükü bulunur.

$$H_u = 1.5\gamma L^2 dK_p \quad (3.17)$$

Bu çözüm boyutsuz şekilde, Şekil 3.7a'da gösterilmiştir. Maksimum moment:

$$M_{\max} = \frac{2}{3} H_u L \text{ dir.} \quad (3.18)$$

Eğer $M_{\max}$, M_y yi geçerse kırılma modu Şekil 3.8b'deki gibi olur. Şekil 3.8b'den yatay denge denkleminde göre,

$$F = \left(\frac{3}{2} \gamma d L^2 K_p\right) - H_u \text{ bulunur.} \quad (3.19)$$

Kazığın uç noktasına göre moment alınır ve (3.19) denklemindeki F yerine konulursa;

$$M_y = (0.5 \gamma d L^3 K_p) - H_u L \quad (3.20)$$

ve buradan H_u elde edilebilir. Bu denklem yalnız f derinliğindeki moment M_y den küçükse geçerlidir. f mesafesi (3.15) denkleminde hesaplanır.

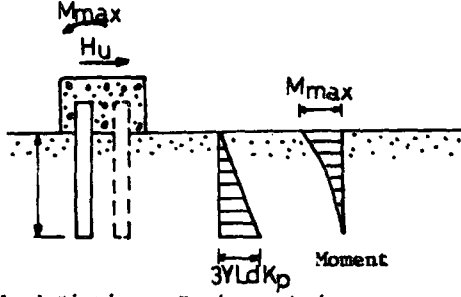
Şekil 3.8c'de gösterilen durum için maksimum moment iki bölgede M_y değerine erişir.

$$H_u \left(e + \frac{2}{3} f\right) = 2 M_y \quad (3.21)$$

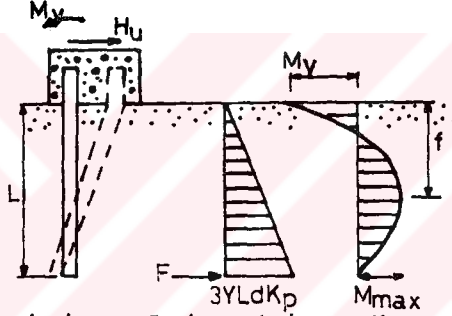
eşitliğinden kolayca M_y bulunur. Boyutsuz çözümler Şekil 3.7b'de gösterilmiştir.

Broms tarafından, verilen yaklaşımlardan hesaplanan eğilme momentleri ile literatürde verilen deneysel sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Kohezyonlu zeminler için hesaplanan değerin gözlenene oranının 0.88 ilâ 1.19 arasında, kohezyonsuz zeminler için 0.54 ilâ 1.61 arasın-

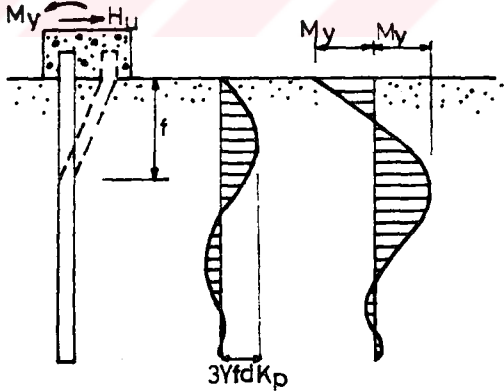
da değiştiği belirlenmiştir. Broms, farzedilen zemin reaksiyonu yayılışındaki k değişiklikler için, hesaplanan maksimum momentin etkilemediğine işaret etmiştir.



a) Yerdeğiştirme Zemin reaksiyonu



b) Yerdeğiştirme Zemin reaksiyonu Moment



c) Yerdeğiştirme Zemin reaksiyonu Moment

şekil 3.8. Kohezyonsuz zeminlerde rijit başlı kazıklar:
a) Kısa; b) Orta; c) Uzun(19)

3.3. YATAK KATSAYISI ANALİZİ

3.3.1. Teori

Winkler zemin modelinde, herhangi bir noktada, k_h ile gösterilen yatay yatak katsayısı ile ilgili olarak p basınç ve y yer değiştirmeleri arasında aşağıda gösterilmiş olan bağıntı ifade edilir.

$$p = k_h y \quad (3.22)$$

Bu bağıntı sık sık yeniden düzenlenmiştir (Reese ve Mattock(21); Davisson ve Gill(7) gibi).

Yatak katsayısı yaklaşımını kullanarak kazık davranışını analiz etmek için, kazık boyunca k_h değişiminin bilinmesi gerekir. k_h için muhtelif dağılış şekilleri kullanılmıştır. En çok kullanılanı, Palmer ve Thompson(17) tarafından geliştirilmiş olanıdır. Buna göre

$$k_h = k_L \left(\frac{z}{L}\right)^n \quad (3.23)$$

alınmakta ve burada;

k_L : Kazık ucundaki k_h değerini

n: Sıfır veya daha büyük bir sayıyı göstermektedir.

Killi zeminlerde çoğunlukla $n=0$ kabul edilir. Yani yatay yatak katsayısı derinlikle sabittir. Granüler zeminler için $n=1$ alınır. Yani yatay yatak katsayısının derinlikle lineer arttığı kabul edilir.

Davisson ve Prakash(8) $n=0.15$ değerini killi zeminler için tavsiye ederler (muhtemelen drenajsız şartlar altında).

$n=1$ için (3.23) eşitliği

$$k_h = n_h \left(\frac{z}{d}\right) \quad (3.24)$$

formunda yazılır.

Burada;

n_h : F/L^3 boyutlu katsayı,

z : derinlik

d : çap ve genişliktir.

Kazık, genellikle ince bir şeritmiş gibi farzedilerek, kiriş denkleminin

$$E I \frac{d^4 y}{dz^4} = -pd \quad (3.25)$$

yazılır.

Basit kiriş eğilme teorisinde olduğu gibi eksenel yükün etkisi gözönüne alınmaz. Eksenel yük burkulma ile alakalıdır. (3.22) ve (3.25) denklemlerinden aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$E I \frac{d^4 y}{dz^4} + k_h y d = 0 \quad (3.26)$$

Bu denklem, k_h 'in derinlikle sabit olması hali için, analitik olarak çözülebilir. k_h 'in diğer yayılımları için denklem sonlu elemanlar yöntemiyle çözülebilir (Palmer ve Thompson(17); Gleser(11)).

3.3.2. Lineer Çözümler

3.3.2.1. k_h Derinlikle Sabit

(3.26) denkleminin çözümü kapalı formda Hetenyi tarafından verilmiştir(19). Serbest başlı kazıkta, zemin yüzeyindene kadar mesafede H yatay yükü uygulandığı zaman, L kazık boyunu, ρ yerdeğiştirmeyi, θ eğimi gösteriyorsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

Burada β katsayısı,

$$\beta = (k_h d / 4EI)^{1/4} \text{ olup} \quad (3.27)$$

1. $\beta L < 1.5$ ise rijit kazık

$$\rho = \frac{4H(1+1.5e/L)}{k_h d L} \quad (3.28)$$

$$\theta = \frac{6H(1+2e/L)}{k_h d L^2} \quad (3.29)$$

2. $\beta L > 2.5$ ise uzun kazık

$$\rho = \frac{2H\beta(e\beta+1)}{k_h d} \quad (3.30)$$

$$\theta = \frac{2H\beta^2(1+2e\beta)}{k_h d} \quad (3.31)$$

Rijit başlı kazıkda aşağıdaki eşitlikler geçerlidir.

1. $\beta L < 1.5$ ise rijit kazık

$$\rho = \frac{H}{k_h d L} \quad (3.32)$$

3.3.2.2. k_h 'ın Derinlikle Lineer Değişmesi Halinde Çözümler

Aşağıda Barber tarafından, serbest başlı kazıklar için verilen limit çözümler ifade edilmiştir(19).

1. $Z_{\max} = \frac{L}{T} < 2$ ise rijit kazık:

$$\rho = \frac{18H(1+1.33e/L)}{L^2 n_h} \quad (3.34)$$

$$\theta = \frac{24H(1+1.5e/L)}{L^3 n_h} \quad (3.35)$$

2. $Z_{\max} > 4$ ise uzun kazık:

$$\rho = \frac{2.40H}{(n_h)^{3/5}(EI)^{2/5}} + \frac{1.60 He}{(n_h)^{2/5}(EI)^{3/5}} \quad (3.36)$$

$$\theta = \frac{1.60H}{(n_h)^{2/5}(EI)^{3/5}} - \frac{1.74He}{(n_h)^{1/5}(EI)^{4/5}} \quad (3.37)$$

Rijit başlı kazıklar için:

1. Rijit kazık

$$\rho = \frac{2H}{L^2 n_h} \quad (3.38)$$

2. Uzun kazık

$$\rho = \frac{0.93H}{(n_h)^{3/5}(EI)^{2/5}} \quad (3.39)$$

$$T = \left(\frac{EI}{n_h}\right)^{1/5}$$

eşitliğiyle belirlenir. Yerdeğiştirme, dönme, moment, kesme ve zemin reaksiyonları için çözümler Reese ve Matlock tarafından verilmiştir(19).

Derinlikle k_h 'ın genel yayılış durumuyla ilgili olarak, $k_h = n_h z^n/d$ veya $k_{hd} = k_0 + k_1 z + k_2 z^2$ şekli Matlock ve Reese tarafından gözönüne alınmıştır.

3.3.3. Yatak Katsayısının Belirlenmesi

Yatak katsayısı genellikle aşağıdaki metotlardan biri ile belirlenir:

- 1- Yanal kazık yükleme deneyi,
- 2- Plaka yükleme deneyi,
- 3- Zemin özellikleri ile amprik korelasyonlar.

Yanal kazık yükleme deneyi pahalı, zaman alıcı ve dikkat ister(19). Plaka yükleme deneyinde ana problem plaka sonuçlarının kazığa uydurulmasıdır. Terzaghi killeri için, yatak katsayısının derinlikten bağımsız olduğunu belirtmiş ve aşağıdaki bağıntıyı vermiştir(19).

$$k_h = \left(\frac{1}{1.5d}\right) k_{sl}^- \quad (3.40)$$

Burada;

k_{sl}^- = 30 cm genişliğinde yatay kare plaka için katsayı (aşırı konsolide killeri için, Terzaghi tipik k_{sl}^- değerleri için tablo vermiştir(19).

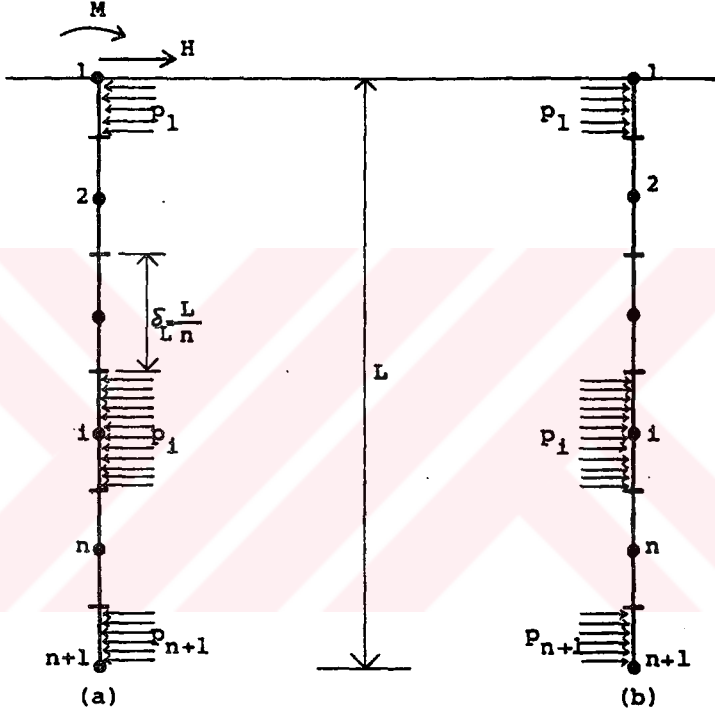
d = Çap veya en

Vesic, Broms, Skempton, Davisson yatak katsayısı için bağıntılar vermişlerdir(19). Ayrıca yatak katsayısının tekrarlı yüklemeye azaldığı Alizadeh ve Davisson'un deney sonuçları ile Awad ve Petrasovits'in model deney sonuçlarında gösterilmiştir(19).

3.4. ELASTİK TEORİ

3.4.1. Teori

Aşağıda zeminin elastik olduğunu gözönüne alan Poulos'un analizi açıklanmıştır. Şekil 3.9'da d genişliğinde (eğer kazık dairesel ise d çap olarak alınır), L uzunluğunda ve EI eğilme rijitliği sabit düşey kazık gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Poulos yönteminde: (a) kazığa, (b) zemine etkiyen gerilmeler(19)

Analizi basitleştirmek için kazık yanları ile zemin arasındaki kayma gerilmeleri gözönüne alınmaz. Kazık $n+1$ elemana bölünür. Üstte ve altta $\delta_L/2$ olmak üzere, diğer elemanların uzunlukları δ_L dır. Her elemana kazık genişliğince değeri sabit olan p basıncının etkiği varsayılır. Ayrıca zemin ideal, homojen, izotrop, yarı sonsuz, elastik malzeme olarak varsayılır. E_s elastisite modülü ve ν Poisson oranı ortamın sabitleridir.

Kazık boyunca kazık ve zemin yerdeğiştirmelerinin eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu analizde, elemanların merkezindeki yerdeğiştirmeler, kazık ucunda ve altındaki iki eleman hariç olmak üzere hesaplanmakta ve birbirine eşit yazılmaktadır. İlk ve son elemanda ise kazık başındaki ve ucundaki yerdeğiştirmeler hesaplanmaktadır.

Mindlin, yarı-sonsuz, elastik, izotrop bir ortam içinde yüzeyden c derinlikte bulunan p yatay kuvvetinin, aynı düşey çizgi üzerinde ve yüzeyden z derinlikte bulunan bir noktada hasıl ettiği u yatay yerdeğiştirmesini (3.41) eşitliğiyle vermiştir(23).

$$u = \frac{p}{16\pi G(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{|z-c|} + \frac{1+2(1-\nu)(1-2\nu)}{z+c} + \frac{2cz}{(z+c)^3} \right] \quad (3.41)$$

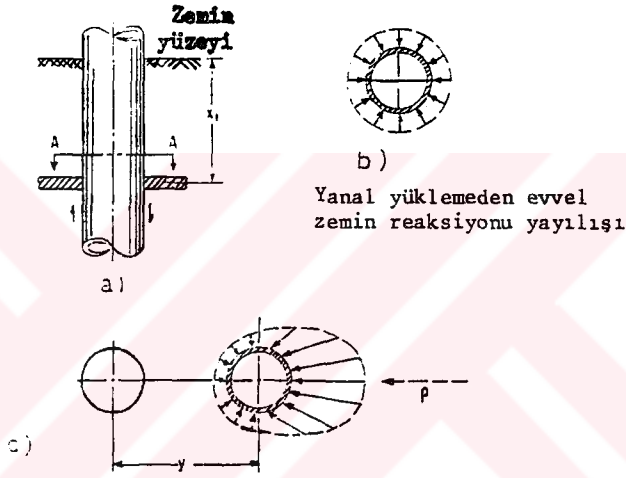
Bu eşitlikte ν ve G sırasıyla Poisson oranı ve kayma modülüdür. Poulos yönteminde kazık üzerinde ayrılmış elemanter parçaların merkezlerine P_i kuvvetlerinin etkiği düşünülerek bu noktalardaki zemin yerdeğiştirmeleri (3.41) eşitliğiyle hesaplanır. Kazık üzerindeki noktaların yerdeğiştirmeleri ise sonlu farklar yöntemiyle elastik kiriş teorisinden hesaplanır ve zemin yerdeğiştirmelerine eşit yazılır. Bu şekilde elde edilen denklemlere kazığın dış kuvvetler altında dengede bulunduğunu ifade eden 3 adet denge denkleminin ilavesiyle elde edilen denklem takımı çözümlerek P_i nokta kuvvetleri veya p_i gerilmeleri hesaplanır. Hesaplanan P_i kuvvetlerine bağlı olarak yerdeğiştirmeler, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri bulunur(23). Ayrıca Poulos, zemin modülünün derinlikle lineer değişmesi halindeki çözümleri de vermiştir(21). Bu durumda maksimum momentler, 0.1 L ilâ 0.45 L arasındaki derinliklerde oluşmaktadır.

3.5. ZEMİN REAKSİYONU-KAZIK YERDEĞİşTİRMESİ YÖNTEMİ (p-y eğrileri)

şekil 3.10'da p-y eğrileri tanımlanmaktadır. şekil 3.10a'da zemin içerisindeki bir kazık kesiti gösterilmiştir. şekil 3.10b'de yüklemeden evvel kazık etrafındaki zemin reaksiyonu dağılışı görülmektedir. şekil 3.10c'de gösterildiği gibi kazık y değiştirmesi yaparsa, zemin reaksiyonu dağılışı şekilde gösterildiği gibi olacaktır. Bu durumda kazığın birim

uzunluğu için p kuvveti oluşur. Bu şartlar altında kazıkda içten bir kesme ve eğilme momenti oluşacaktır.

Kazığın uzunluk eksenine paralel olan sürtünme kuvvetleri, kazık kesme kuvvetlerine göre küçük değerdendir. Dolayısıyla bunlar analizde kullanılmamaktadır.



Şekil 3.10. p ve y'nin grafik tanımı(22)

Şekil 3.10'da gösterildiği gibi "p" ve "y"nin anlamında dikkatle durulmalıdır. "y" yerdeğiştirmesi, kazığın, yanal yükleykenmesiyle yana olan yerdeğiştirme uzunluğudur. Zemin reaksiyonu "p", kazığın yerdeğiştirmesi sonucu kazığa karşı zeminde ortaya çıkan ve kazığın birim uzunluğuna etkiyen reaksiyon kuvvetidir.

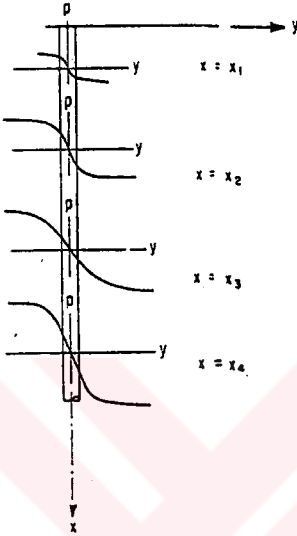
Eğer Şekil 3.11'de gösterildiği gibi p-y eğrilerini tahmin etmek mümkün olursa, yanal yüklemeye altındaki kazık davranışı diferansiyel denklemin çözümü ile saptanabilir. Şekil 3.11'deki eğriler zamandan bağımsız tahmin edilir.

Çözülecek diferansiyel denklem

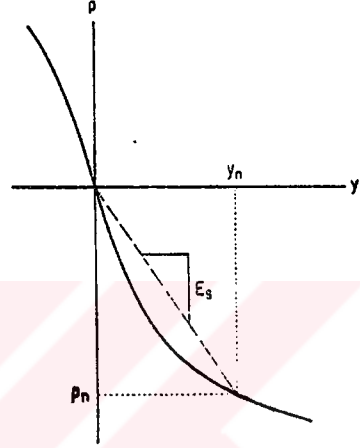
$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = p \quad \text{dir.} \quad (3.42)$$

Şekil 3.12'ye göre p aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$p = -E_s y \quad (3.43)$$



Şekil 3.11. p-y eğrilerinin derinlik değişimi(22)



Şekil 3.12. Zemin modülü tanımı(22)

(3.42) ve (3.43) eşitlikleri sonlu farklar cinsinden aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{EI}{h^4} \left| y_{n-2} - 4y_{n-1} + 6y_n - 4y_{n+1} + y_{n+2} \right| + E_{s_n} y_n = 0 \quad (3.44)$$

Kazık, h uzunluğunda sonlu sayıda parçaya bölünür ve 3.44 denklemi her düğüm noktasında yazılır. Sonlu farklar denklemi kazığın üst ve altında sınır şartları için yazılır. Bu tarzda elde edilen denklemler dijital hesaplayıcı yardımıyla çözülür.

p-y eğrileri normal olarak lineer olmadıklarından, iteratif çözüm yapılmalıdır. Genel işlem aşağıdaki gibidir:

1- Toplam kazık uzunluğu üzerinden bir takım E_s değerleri tahmin edilir.

2- Kazığın yerdeğiştirilmiş şekli için fark denklemi çözülür. Böylece kazık yerdeğiştirmeleri bulunur.

3- p-y eğrileri takımından bilgiler kullanılarak her düğüm noktası için p değerleri hesaplanır.

4- 3.43 denklemi kullanılarak E_s yeniden hesaplanır.

5- Hesaplamalar zemin modülünde yaklaşma sağlanana kadar tekrarlanır.

6- Nihai E_s değerlerinden yararlanılarak, eğim, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu değerleri hesaplanır(22).

Yukarıdaki açıklamalardan görüldüğü üzere, p-y eğrilerinin nasıl tahmin edileceği hakkında bilgi, yanal yüklü kazık probleminin çözümünü sağlamada anahtar teşkil eder. p-y eğrileri zemin özelliklerini, kazık boyutlarını ve yükleme doğasını yansıtmalıdır. Yükleme statik, tekrarlı veya dinamik olabilir. p-y eğrilerini geliştirme metodları, yanal yüklü kazık çevresinde zeminin davranışı üzerinde bilgi uygun olduğunda geliştirilebilir. Reese ve Cox, kazıkların arazi deneylerinden yararlanarak davranışını saptama metodunu vermişlerdir(22). Bu amaçla, sadece zemin üst yüzeyi hariç deneylerde kazık için teçhizat kullanmamışlardır. Serbest başlı kazıkta üst taraftaki eğim, yerdeğiştirme, yük uygulama yeri ve büyüklüğü, kazık özellikleri bilindiğinde diferansiyel denklemin nümerik çözümünden geliştirilmiş boyutsuz eğriler sunmuşlardır. Reese ve Cox'un çalışmalarındaki bağıntılar genelde Matlock ve Reese'in çözümlerine dayanmakta olduğundan aşağıda Matlock ve Reese tarafından yanal yüklü kazıklar için verilen çözümlerinden bahsedilmiştir(14).

3.6. HUDSON MATLOCK VE LYMON C.REESE'İN YANAL YÜKLÜ KAZIKLAR İÇİN ÇÖZÜMLERİ

Matlock ve Reese yanal yüklenmiş kazıklar ile ilgili problemlerde rasyonel çözümlere ulaşmak ve zeminin lineer olmayan gerilme-deformasyon özelliklerini dikkate almak için elastik teorisinin tekrar tatbiki ile yapılabileceğini belirtmişlerdir. Elastik kazık teorisi ve rijit kazık teorisi için hesaplamalar ile ilgili esas işlemleri ve metodları vermişlerdir(14). Hesaplamalarda boyutsuz çözümlerle kolaylık sağlanmıştır. Derinliğe bağlı olarak zemin modülü değişiminin bir çok formlarını gözönüne almışlardır. Aşağıda Matlock ve Reese'in çözümlerinden kısaca bahsedilmiş-

tir. Şekil 3.13a'da L uzunluğunda EI eğilme rijitliğine sahip olan bir kazık gösterilmiştir. Burada tepede tesir eden M_t momenti ve p_t kuvvetidir. Eğer kazık yerdeğiştirmeleri kazık boyutlarına göre küçük kalırsa süperpozisyon prensibi tatbik edilebilir. Böylelikle yüzeyden itibaren x derinliğindeki Y kazık yerdeğiştirmesinin, p_t yatay kuvvetinin sebep olduğu Y_A yerdeğiştirmesi ile M_t momentinin sebep olduğu Y_B yerdeğiştirmesinin toplamına eşit olacağı söylenebilir (Şekil 3.13). Matlock ve Reese tarafından aşağıdaki eşitlikler verilmiştir:

$$\text{Derinlik katsayısı} \quad Z = \frac{x}{T} \quad (3.45)$$

$$\text{Maksimum derinlik katsayısı} \quad Z_{\max} = \frac{L}{T} \quad (3.46)$$

$$\text{Zemin modülü fonksiyonu} \quad \phi(Z) = \frac{E_s T^4}{EI} \quad (3.47)$$

$$\text{A durumu için yerdeğiştirme katsayısı} \quad A_y = \frac{Y_A EI}{p_t T^3} \quad (3.48)$$

$$\text{B durumu için yerdeğiştirme katsayısı} \quad B_y = \frac{y_B EI}{M_t T^2} \quad (3.49)$$

Yukarıdaki T relatif rijitlik faktörü aşağıdaki eşitlikten belirlenir.

$$T^{n+4} = \frac{EI}{k} \quad (3.50)$$

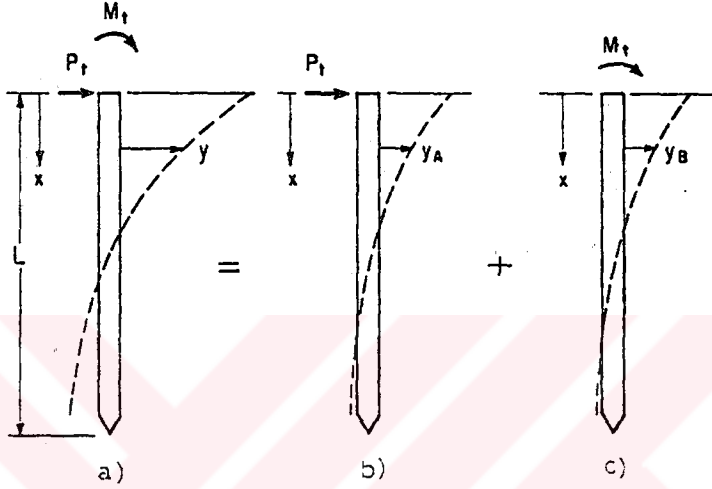
(3.50) eşitliğindeki k, zemin modülü sabitidir. Burada zemin modülü E_s aşağıdaki eşitlikle tariflenmiştir.

$$E_s = kx^n \quad (3.51)$$

(3.50) denkleminde k'nın değeri (3.51) denkleminde yerine konulursa;

$$E_s = \frac{EI}{T^{n+4}} x^n \quad (3.52)$$

elde edilir.



Şekil 3.13. Yanal yüklü kazık için süperpozisyon prensibinin uygulanışı(14)

E_s 'in bu değeri (3.47) eşitliğinde yerine konulursa zemin modülü fonksiyonu aşağıdaki şeklini alır.

$$\phi(Z) = \frac{x^n T^4}{T^{n+4}} = (Z)^n \quad (3.53)$$

(3.48) ve (3.49) eşitliklerinden Y_A ve Y_B çekilerek yerdeğiştirme için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$y = \left[\frac{P_t T^3}{EI} \right] A_y + \left[\frac{M_t T^2}{EI} \right] B_y \quad (3.54)$$

Aynı şekilde eğim, moment, kesme kuvveti, zemin reaksiyonu için aşağıdaki eşitlikler yazılır.

$$= \left[\frac{P_t T^2}{EI} \right] A_s + \left[\frac{M_t T}{EI} \right] B_s \quad (3.55)$$

$$M = |p_t T| A_m + \left| \frac{M_t}{T} \right| B_m \quad (3.56)$$

$$V = |p_T| A_v + \left| \frac{M_t}{T} \right| B_v \quad (3.57)$$

$$p = \left| \frac{p_t}{T} \right| A_p + \left| \frac{M_t}{T^2} \right| B_p \quad (3.58)$$

Kiriş teorisinden hareketle yanal yüklü kazık için yazılan eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{E_s}{EI} y = 0 \quad (3.59)$$

Tatbik edilen p_t yanal yük ve M_t momenti için süperpozisyon prensibine göre (3.59) eşitliği A durumu için;

$$\frac{d^4 y_A}{dx^4} + \frac{E_s}{EI} y_A = 0 \quad (3.60)$$

B durumu için;

$$\frac{d^4 y_B}{dx^4} + \frac{E_s}{EI} y_B = 0 \quad (3.61)$$

olur.

(3.45) eşitliğinden (3.49) eşitliğine kadar olan formüller ile (3.53), (3.60) ve (3.61) eşitliklerinin kullanılmasıyla aşağıdaki boyutsuz eşitlikler yazılabilir.

A durumu için;

$$\frac{d^4 A_y}{dz^4} + Z^n A_y = 0 \quad (3.62)$$

B durumu için;

$$\frac{d^4 B_y}{dz^4} + Z^n B_y = 0 \quad (3.63)$$

Burada; A_y ve B_y katsayılarının belirlenmesi gerekir. Bunun için:

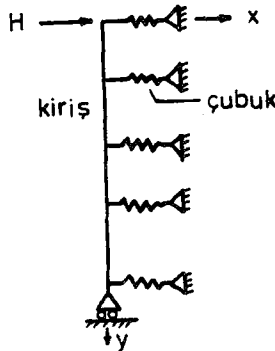
1- Relatif rijitlik faktörünün uygun bir formülünün dahil edilerek $\phi(Z)$, zemin modülü fonksiyonunun belirlenmesi,

2- (3.62) ve (3.63) diferansiyel eşitliklerinin çözülmesi gereklidir.

A_y ve B_y katsayılarının elde edilmesinden sonra, boyutsuz çözümlerin elde edildiği duruma benzer herhangi kazık problemi için yerdeğiştirmeler, eğimler, momentler, kesme kuvvetleri ve zemin reaksiyonlarını hesaplamak için (3.54) eşitliğinden (3.58) eşitliğine kadar olan formüller ile birlikte kullanılabilir. Genelleştirilmiş çözümler için Fark-Eşitlik metodu en pratik yaklaşımı sağlamaktadır.

3.7. DİĞER ARAŞTIRICILARIN ÇALIŞMALARI

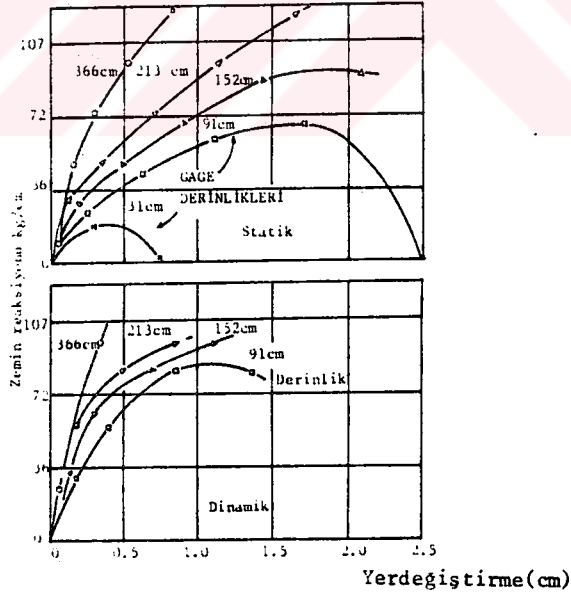
Robert L.Sogge zemin ve yapının karşılıklı tesirlerini içeren sonlu elemanlar modeli ve çözümü ile yanal yüklü kazıklara bir çözüm geliştirmiştir(27). Model Şekil 3.14'de verilmiştir. Bu model için esas denklem kiriş eleman rijiditeleri ve çabuk eleman rijiditelerinin eklenmesi ile oluşan katsayıları kapsar. Model kazık-zemin ara yüzeyinde bulunan düşey kayma gerilmelerini gözönüne almadığı gibi, kazıkların yanlarında yatay yönde olanları da gözönüne almaz. Kazık boyunca E ve I sabittir.



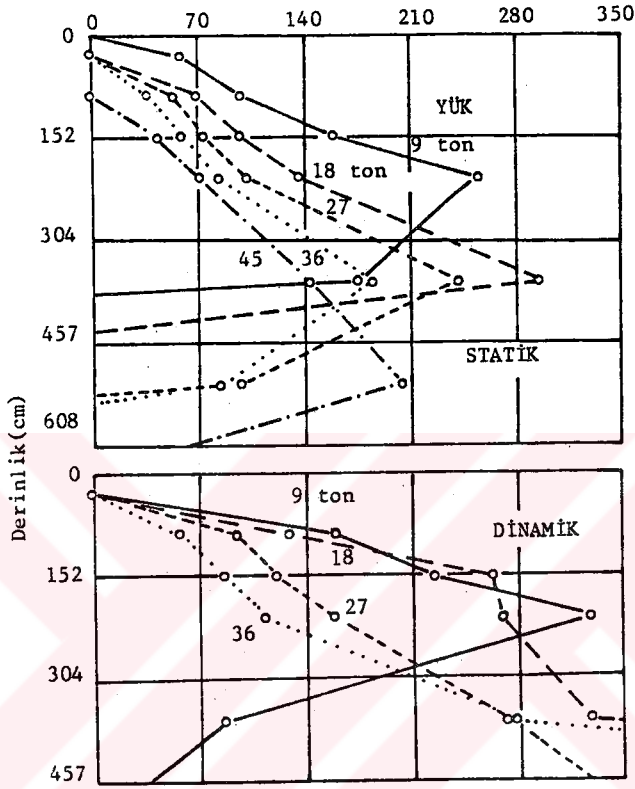
Şekil 3.14. Kiriş-çabuk sonlu elemanlar modeli(27)

Mc Clelland ve Focht zemin için üç eksenli deneylerden elde edilmiş gerilme-deformasyon sonuçları ile yerdeğiştirme-reaksiyon eğrilerini bağdaştırmaya teşebbüs etmişlerdir(15). Muhtelif noktalarına Strain-gage'ler yerleştirilmiş kazık, değişik derinliklerdeki zemin reaksiyonu yerdeğiştirme eğrilerinden sonuç çıkarmak için kullanılmıştır. Eğilme momentleri ölçülen birim deformasyonların bir sabitle çarpılması sonucu belirlenmiştir. Eğilme momentinden de diferansiyel ve integrasyon işlemleri ile zemin reaksiyonları, kesme, yerdeğiştirme değerleri belirlenmiştir. Deneyler içerisinde zemin modülündeki değişimleri açıklamak için, her yük ve deformasyon ölçüm noktası için E_s değerleri Şekil 3.15'deki bilgiler üzerinden hesaplanıp sonuçlar Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Bu eğriler, kazık deneyine uygulanan durumlar için E_s 'in derinlik ile lineer artış gösterdiğini belirtir. Diğer önemli noktada E_s 'in yük arttığı oranda azalış göstermesidir.

Eğriler, yerdeğiştirmelerin sifıra yaklaştığı derinlik altında, düzensizleşir. Yazarlar tarafından sıfır yerdeğiştirmenin ilk noktası altındaki E_s değerlerindeki hataların eğilme momenti ve zemin yüzeyine yakın oluşan yerdeğiştirmenin hesaplanmış değerlerini etkilemediği belirtilmiştir(14).



Şekil 3.15. Yerdeğiştirme-reaksiyon eğrileri(14)



Şekil 3.16. Derinlikle zemin modülü değişimi(14)

Mc Clelland ve Focht'un çalışmaları üzerine Hudson Matlock ve Ralp B.Peck görüşlerini belirtmişlerdir(13). Ralp B.Peck'e göre yerdeğiştirme eğrisi, ölçülmüş birim deformasyonlar üzerinden kesin olarak saptanabilir. Çünkü, çift katlı integrasyon işlemi büyük hataları içermez. Öte yandan hesaplanan moment eğrisi, eğriler arasında zıtlıklar olup olmadığını ve bu zıtlıkların deneysel hata sınırları içerisinde olup olmadığını saptamak için ölçülen birim deformasyondan türetilen eğri ile karşılaştırılmalıdır.

Matlock ise kazığın birim uzunluğu için zemin direncinin basınç hücreleri ile ölçümünün başarısızlığını aşağıda belirtmiştir.

1- Basınç hücrelerinin duyarlı alanları sınırlıdır,

2- Her ölçme istasyonunda kazığın toplam çevresi, basınç hücreleri ile uyuşturulmalıdır ve bundan sonra bile, kazığın hareketinin ters yönünde hareket eden toptan kuvvet bileşkesinin saptanması karmaşık olur.

Ayrıca Matlock, Strain-gage'ler (şekil değiştirme ölçer) ile yerdeğiştirmenin belirlenmesinin zor olmadığını bildirmiştir. İstenilen tek şeyin, integrasyon ile kullanılabilecek kazık boyunca bir yerde iyi kurulu bir referans teğetinin olmasıdır. Deneyden önce, kazık ve şekil değiştirme ölçerlerin bilinen moment değerlerine göre ayarlanması gerekliliğini de belirtmiştir.

3.8. EĞİLME MOMENTLERİNİN VEYA YERDEĞİŞTİRMELERİN DENEYSEL BELİRLENMESİNDE ORTAYA ÇIKAN SORUNLAR

Daha önce açıklanan metodlardan, yatak katsayısı modeli zemini birbirinden bağımsız bir dizi lineer elastik yay olarak karakterize etmektedir. Böylece deformasyon yalnızca yükün mevcut olduğu yerde meydana gelmektedir. Bu zemin modelinin aşırı dezavantajı süreklilikten yoksun olmasıdır. Zira, gerçek zemin en azından bir dereceye kadar süreklidir ve bir noktadaki yerdeğiştirmeler zemin içindeki diğer noktalarındaki kuvvet ve gerilmelerden etkilenmektedir. Buna ilave olarak gerçek zeminin yatak katsayısı kohezyonlu zeminlerde sabit, kohezyonsuz zeminlerde ise lineer arttığı kabul edilmiştir. Yapılan bu kabuller zeminin elasto-plastik davranışını gözönüne almamaktadır. Ayrıca, Poulos, yatak katsayısı metodunun momentleri, yerdeğiştirmeleri daha büyük değerlerde ortaya çıkardığını belirtmiştir(19).

Elastik metotta da zemin elastik, yarı-sonsuz ortam olarak kabul edilmektedir ve zemin modülünün uygun değerinin saptanmasında güçlükler söz konusudur.

Kazık davranışının analizi için en uygun metod p-y yöntemidir. Deneysel p-y eğrilerini saptamanın bir metodu zemin reaksiyonunu ve yerdeğiştirmeyi doğrudan ölçen cihazlar kullanılmaktadır. Matlock, basınç hücrelerinin duyarlı alanlarının sınırlılığından bahsetmiştir. Ayrıca basınç

hücreleri ile kazığın toplam çevresinin uyuşturulması ve kazık hareketinin ters yönünde hareket eden toplam kuvvet bileşkesinin saptanmasındaki kargaşalıktan bahsetmiştir. Şekil değiştirme ölçerlerle yerdeğiştirmele- rin ve momentlerin belirlenmesinin kesin olacağını da belirtmiştir(13). Ralph B. Peck'de aynı fikirde olduğunu belirtmiştir(13). Yalnız burada kazığın çeşitli noktalarına yerleştirilecek şekil değiştirme ölçerlerinin, kazık deneye tabi tutulmadan önce, bilinen moment değerlerine göre kalibre edilmesi gerekliliği söz konusudur. Ayrıca, kazık başındaki yerdeğiştirme değerleri de ölçülerek, statik ve tekrarlı yükleme altında, bilinen sınır şartlarında her yükleme kademesi için eğilme momenti değerleri elde edilir. Seçilen derinliklerdeki p-y eğrileri ise eğilme momenti değerlerinden aşağıdaki eşitliklerin nümerik çözümüyle hesaplanır.

$$y = \iint \frac{M(x)}{EI} \quad (3.64)$$

$$p = \frac{d^2}{dx^2} M(x) \quad (3.65)$$

Nümerik veya grafik integrasyon ile yeterli hassaslıkta y değerleri elde edilmektedir. Zemin reaksiyonu yukarıdaki eşitliğin sonlu farklar formunda yazılmasıyla elde edilir. Fakat eğilme momenti ölçümündeki ufak hatalar, zemin reaksiyonunun sonlu farklar ile belirlenmesinde büyük hatalara sebebiyet vermektedir(13).

BÖLÜM 4

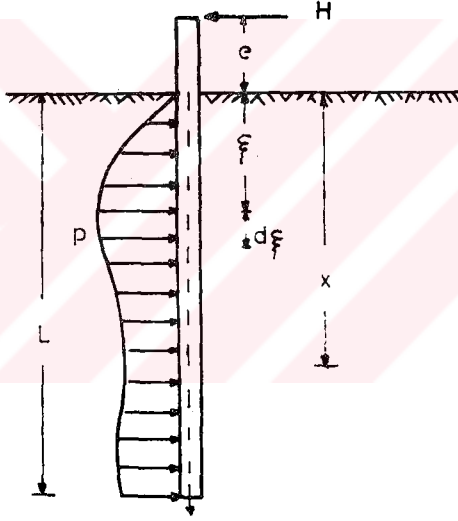
M E T O D

Bu çalışmada, kazıkların statik ve tekrarlı yatay kuvvetler etkisindeki davranışı model deneyleri ile incelenmiştir. Laboratuvarda model kazıklar üzerinde yapılan yükleme deneyleri iki grupta toplanmıştır. Birinci gruptaki deneylerde model kazık olarak araldit levhalar kullanılmış ve kazığın zemin içindeki davranışı Fotoelastik yöntemle incelenmiştir. İkinci gruptaki deneylerde ise model kazık Duraliminyum'dan teşkil edilmiştir. Kazığın yatay yükler altında, zemin içindeki deformasyonları Strain-gage (şekil değiştirme ölçer)lerle tesbit edilmiştir. Tezin takip eden bölüm ve paragraflarında, model deneylerinde elde edilen verilere ve bu verilerin analizine ve değerlendirilmesine yer verilecektir.

4.1. PROBLEMİN GALERKİN YÖNTEMİYLE ÇÖZÜMÜ

Yanal yük etkisindeki kazıkların analizinde en yaygın olarak kullanılan yaklaşım p-y yöntemidir. Bu yöntemde kazık boyunca gerilme-şekil değiştirme bağıntısı için bir kabul yapılmaktadır. Bu amaçla, zemin modülünün derinlik ile lineer arttığı veya belirli bir fonksiyona bağlı olarak değiştiği kabul edilir. Ayrıca, eğilme momenti ölçümündeki ufak hataların, zemin reaksiyonunun sonlu farklar yöntemi ile belirlenmesinde büyük hatalara sebebiyet verdiğinden bahsedilmiştir. Zemin modülünün derinlikle değişimi için bir kabul yapılmasını ve zemin reaksiyonunun sonlu farklar eşitlikleriyle belirlenmesini gerektirmeyen ve (2), (3) no'lu referanslarda verilen yöntem kazık davranışının analizinde kullanılmıştır. Kazık boyunca ölçülen deneysel eğilme momenti değerlerinin söz konusu yöntemle analizi ve değerlendirmesi yapılmış ve bu yöntemin tekrarlı yatay yükler etkisindeki kazıkların davranışlarının analizinde kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Bu amaçla, deneysel olarak belirlenen moment diyagramından nümerik türev almak yerine, zemin reaksiyonları ile eğilme momenti arasındaki denge düşünülerek Volterra integral denklemi yazılmıştır(12). İntegral denklemi, Galerkin yöntemiyle çözülerek elastik eğri, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu gibi aranan tesirler bulunmuştur. Elde edilen sonuçların doğruluk derecesine, başlangıçta deneysel olarak bulunan moment diyagramı ile teorik çözümle bulunan moment diyagramı karşılaştırılarak karar verilmiştir. Aşağıdaki satırlarda analiz yöntemi açıklanmıştır:



Şekil 4.1. Yatay yüklü kazıkda zemin reaksiyonu dağılışı

Zemin yüzeyinden itibaren x derinliğinde, kazık kesitindeki eğilme momenti:

$$M(x) = H(e+x) - \int_0^x p(\xi) (x-\xi) d\xi \quad (4.1)$$

denklemleri bulunabilir.

Bu denklemdeki integral ifade $F(x)$ olarak tanımlansın.

$$F(x) = \int_0^x p(\xi)(x-\xi)d\xi \quad (4.2)$$

$F(x) = M(x) - H(e+x)$ olarak deneyden bilinmektedir. (4.2) denklemi birinci tipte Volterra integral denklemi olup integral içindeki $p(\xi)$ aranan zemin reaksiyonları dağılımıdır(1,2).

Kazığa, zeminin uyguladığı p zemin reaksiyonu dağılımını bir polinomla ifade edip, bu polinomun kazık boyunca integrasyonu alınırsa elde edilen kuvvet, yatay denge şartından uygulanan H yatay kuvvetine eşit olmalıdır.

$$p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad (4.3)$$

$$H = \int_0^L p(x)dx = a_0L + a_1 \frac{L^2}{2} + \dots + a_n \frac{L^{n+1}}{n+1} \quad (4.4)$$

Şekil 4.1'de kazık için moment dengesinden hareketle aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$H(e+x) = \int_0^x p(\xi)(x-\xi)d\xi \quad (4.5)$$

$$H(e+x) = \int_0^x \sum a_n \xi^n (x-\xi)d\xi \quad (4.6)$$

$$H(e+x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+2} \left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} \right)$$

Bu denklem $X=L$ için düzenlenip her iki tarafı HL 'ye bölünerek boyutsuzlaştırılır.

$$(\bar{a} + 1) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\bar{a}_n}{(n+1)(n+2)} \quad (4.7)$$

Burada,

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{a} = \frac{e}{L}, \quad \bar{a}_n = \frac{a_n L^{n+1}}{H} \quad \text{dir.}$$

(4.4) denklemi H/L 'e bölünerek boyutsuzlaştırılıp düzenlenirse $\bar{a}_0$ bulunur.

$$\bar{a}_0 = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{a}_n}{n+1} \quad (4.8)$$

$\bar{a}_0$ sabiti (4.7) nolu denklemde ilk sabit terim yerine konup, düzenlenirse:

$$\bar{a} = - \sum_{n=1}^{\infty} \bar{a}_n \frac{1}{n+2} \quad (4.9)$$

elde edilir. Bu ifadeden $\bar{a}_1$ terimi çekilirse,

$$\bar{a}_1 = -3\bar{a} - \sum_{n=2}^{\infty} \bar{a}_n \frac{3}{n+2} \quad (4.10)$$

elde edilir. (4.10) eşitliğindeki $\bar{a}_1$ terimi (4.8) nolu denklemde yerine konulup, düzenlenirse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\bar{a}_0 = 1 + \frac{3}{2} \bar{a} + \sum_{n=2}^{\infty} \bar{a}_n \frac{n-1}{2(n+1)(n+2)} \quad (4.11)$$

(4.10) ve (4.11) eşitlikleri, (4.3) denkleminin boyutsuz şekle çevrilmiş ifadesinde yerine konulup, düzenlenirse,

$$\bar{p}(x) = \psi_0(\bar{x}) + A_1 \psi_1(\bar{x}) + \dots + A_n \psi_n(\bar{x}) \quad (4.12)$$

bulunur. Burada $\psi_0 = 1 + \frac{3}{2} \bar{a} - 3\bar{a}x$ dir.

(4.2) nolu denklem boyutsuz olarak, aşağıda gösterilmiştir.

$$F(\bar{x}) = \int_0^{\bar{x}} p(\bar{\xi}) (\bar{x} - \bar{\xi}) d\bar{\xi} \quad (4.13)$$

Burada $\bar{F}(\bar{x})$:

$$\bar{F}(\bar{x}) = \frac{F(\bar{x})}{HL} = (\bar{a} + \bar{x}) - \bar{M}(\bar{x}) \quad (4.14)$$

şeklinde boyutsuz hale getirilmiş büyüklüktür. (4.13) denklemini Galerkin yöntemiyle yaklaşık olarak çözmek için (4.12) denklemi (4.13) denkleminde yerine konulup düzenlenirse,

$$G(\bar{x}) = \int_0^{\bar{x}} \sum_{i=1}^n A_i \psi_i(\bar{x}) (\bar{x} - \bar{\xi}) d\bar{\xi} \quad (4.15)$$

bulunur. Burada

$$G(\bar{x}) = (\bar{a} + \bar{x}) - \bar{M}(\bar{x}) - (1 + \frac{3}{2} \bar{a}) \frac{\bar{x}^2}{2} + \bar{a} \frac{\bar{x}^3}{2} \quad (4.16)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Yazılışlarda kolaylık sağlamak üzere

$$\phi_i(\bar{x}) = \int_0^{\bar{x}} \psi_i(\bar{\xi}) (\bar{x} - \bar{\xi}) d\bar{\xi} \text{ şeklinde bir } \phi_i(\bar{x}) \text{ fonksiyonu tanımla-}$$

nırsa

$$G(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n A_i \phi_i(\bar{x}) \quad (4.17)$$

haline dönüştür.

Böylece deneyden elde edilen değerlere göre bilinen $G(\bar{x})$ fonksiyonu, A_i bilinmeyen sabitleri ve $\phi_i(\bar{x})$ bilinen fonksiyonlarına bağlı olarak seri şeklinde ifade edilmiş olur. (4.17) eşitliğiyle verilen ifade yaklaşık bir ifade olduğundan gerçek dağılımla arasında bir hata olacaktır.

tır. Bu hata $H_A(\bar{x})$ ile gösterilirse:

$$H_A(\bar{x}) = G(\bar{x}) - \sum_{i=1}^n A_i \phi_i(\bar{x}) \quad (4.18)$$

eşitliği elde edilir. n tane A_i bilinmeyen katsayıyı çözmek üzere $H_A(\bar{x})$ hata fonksiyonunun n tane koordinat fonksiyonuna ortogonalliği yazılırsa:

$$\int_0^1 H_A(\bar{x}) \psi_j(\bar{x}) d\bar{x} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.19)$$

yazılırsa, n tane

$$C_{ij} A_i = b_j \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.20)$$

şeklinde lineer denklem bulunur.

$$b_j = \int_0^1 G(\bar{x}) \psi_j(\bar{x}) d\bar{x} \quad (4.21)$$

$$c_{ij} = \int_0^1 \phi_i(\bar{x}) \psi_j(\bar{x}) d\bar{x}$$

şeklinde tanımlanmışlardır(1,2).

(4.20) no.lu denklemden bulunan A_i katsayıları, (4.21) nolu denklemden yerine konursa zemin reaksiyonları boyutsuz olarak bulunabilir. Denge denklemleri kuşlanılarak $\bar{T}(\bar{x})$ kesme kuvveti ve $\bar{M}(\bar{x})$ eğilme momentleri

$$\bar{T}(\bar{x}) = 1 - \int_0^{\bar{x}} p(\bar{\xi}) d\bar{\xi} \quad (4.22)$$

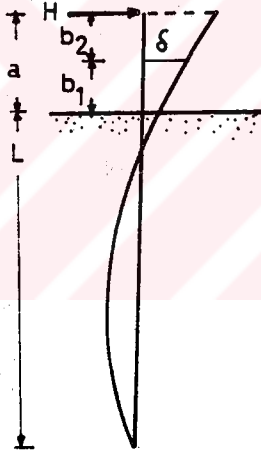
$$\bar{M}(\bar{x}) = (\bar{a} + \bar{x}) - \int_0^{\bar{x}} \bar{p}(\bar{\xi}) (\bar{x} - \bar{\xi}) d\bar{\xi}$$

olarak ifade edilir.

(4.22) no.lu denkleme göre hesaplanan moment dağılımı ile hesapların başında veri olarak kullanılan deneysel moment dağılımı karşılaştırılarak çözümde yeter yaklaşım elde edilene kadar (4.20) no.lu denklemde n sayısı arttırılır. Eğilme momenti istenen hassaslıkta elde edildikten sonra kazık yerdeğiştirmeleri ardışık iki integralle hesaplanır.

$$\bar{y}(\bar{x}) = \int d\bar{x} \int \bar{M}(\bar{x}) d\bar{x} + C_1 \bar{x} + C_2 \quad (4.23)$$

Burada, C_1 ve C_2 integral sabitleridir. Zemin yüzeyi üstünde farklı iki noktada kazık yerdeğiştirmeleri ölçülerek bu integral sabitleri Şekil 4.2'de gösterildiği gibi bulunur.



Şekil 4.2. Yanal yüklü kazıkta elastik eğri

Kazık yüklendiğinde Şekil 4.2'de gösterildiği gibi bir elastik eğri oluşacağını varsayarsak, bu elastik eğrinin zemin dışında ölçülecek herhangi bir noktasındaki yerdeğiştirmesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$-\delta = -\frac{Hb_1^3}{3EI} - \frac{Hb_2b_1^2}{2EI} + w_0 - b_1w'_0 \quad (4.24)$$

W_0 : kazığın zemin yüzeyindeki ötelenme miktarı

$C_1 = W'_0$: kazığın zemin yüzeyindeki eğimi

Bu ifadede W_0 ve W'_0 bilinmeyenleri vardır. Bu iki bilinmeyeni çözebilmek için kazığın zemin üstünde kalan kısmında, iki noktada yerdeğiştirmeler ölçülür. $C_2 = W_0/L$ eşitliğinden de C_2 integral sabiti tesbit edilir.

Yatay yükler etkisindeki kazık davranışının Galerkin yöntemi ile analizine ilişkin algoritma programlanmış ve bu çalışmaya ait deneyler bilgisayarla değerlendirilmiştir. Bilgisayar programı teze Ek olarak verilmiştir.

4.2. FOTOELASTİK DENEYLER

Bu çalışmada, çift kırılma özelliğine sahip dikdörtgen kesitli 400 x 23 x 20 mm boyutlarında bir araldit levha kazık olarak kullanılmıştır. Araldit çubuk, 24 mm genişliğinde, 700 mm uzunluğunda ve 550 mm yüksekliğinde, yüzleri cam olan bir deney kutusu içine yerleştirilmiştir. Deney kutusu yağmurlama tekniğiyle istenilen sıklıkta doldurulmuştur. Kullanılan kum dane birim hacim ağırlığı 2.64 gr/cm³, üniformluk oranı 2.70, maksimum boşluk oranı 0.96, minimum boşluk oranı 0.45 olan Silivri Kumudur. Kum serme işleminden sonra deney kutusu polariskoba yerleştirilmiştir. Daha sonra kutu kenarlarına konan makaralar yardımıyla kazık modeline dış yük uygulanmıştır. Kazığın zemin yüzeyi üstünde kalan iki noktasında yerdeğiştirme değerleri deformasyon saatleri ile ölçülmüştür. Yüklün uygulanmasından sonra kazık boyunca oluşan girişim çizgileri bir santimetre aralıklarla okunmuştur. Girişim çizgileri sayısı n bilinirse, σ_1 ve σ_2 asal gerilmeleri, aşağıda eşitlik ile belirlenebilir(1).

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n \cdot f}{b} \quad (4.25)$$

Burada;

f : malzemenin optik sabiti (11.7)

b : kazık genişliği

Çubuk teorisinde, eksene dik olan σ_2 gerilmeleri ihmal edilmektedir. Böylece çubuğun bir kesitinin dış noktalarında σ_1 bilinirse, o kesitteki M momenti aşağıdaki eşitlikten hesaplanır(5).

$$M = \sigma_1 \cdot W \quad (4.26)$$

Burada, $W = bd^2/6$ olarak tanımlanan çubuk mukavemet momentidir. (4.25) no.lu denklemdeki σ_1 değeri, (4.26) no.lu denklemde yerine konulursa,

$$M = \frac{fd^2}{6} n \quad (4.27)$$

çubuk kesitindeki moment değeri elde edilir.

Bu şekilde, kazık boyunca M eğilme momenti değerleri belirlenmiştir. Bu işlemi takiben moment eğrisi ile en uygun olan fonksiyon eğrisi, en küçük kareler yöntemiyle geçirilmiştir. Daha sonra, Ek'de verilen bilgisayar programıyla deneysel moment diyagramıyla uyuşan teorik moment diyagramı ve zemin reaksiyonu, kesme kuvveti, elastik eğri diyagramları bulunmuştur. Fotoelastik çalışma ile model kazığın statik yüklenmesine ait beş ayrı deney yapılmış ve sonuçlar, deneysel sonuçlar bölümünde gösterilmiştir. Fotoelastik deneylerle ilgili özellikler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.



Şekil 4.3. Deney kutusu ve Polariskob

TABLO 4.1
Fotoelastik Deneyler

Deney No	Dr, Sıkılık	Gömlü Uzunluk (cm)	Yanal Kuvvet (kg)	Yanal Kuvvetin Tatbik Noktasının Zemin Yüzüne Uzaklığı (cm)
1	0.86	29	2.0	10.00
2	0.84	29	2.0	10.00
3	0.88	31	1.5	8.90
4	0.75	31	1.5	7.56
5	0.87	31	1.5	8.80

4.3. MODEL KAZIĞIN STATİK VE TEKRARLI YATAY YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

4.3.1. Model Kazığın Özellikleri

Bu çalışmada duraliminyumdan yapılmış model kazıklar kullanılmıştır. Model kazıkların yapıldığı duraliminyum üzerinde yapılan çekme deneylerinde elastisite modülünün 690.000 kg/cm^2 olduğu belirlenmiştir. Kazık kesidine ait mukavemet momenti 0.1626 cm^3 olarak hesaplanmıştır.

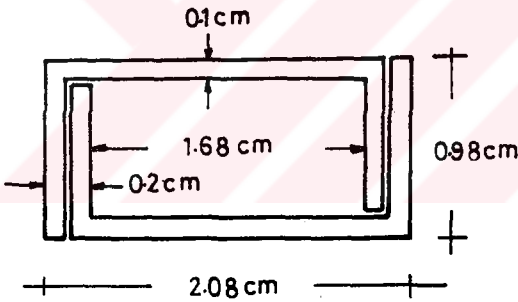
Deneysel moment eğrilerinin belirlenebilmesi için, kazık boyunca çeşitli kesitlere şekil değiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Kullanılan şekil değiştirme ölçerlerin hassasiyetle ölçebileceği moment değeri ayrıca hesaplanmıştır. Bu deneyde hassasiyetle belirlenebilecek moment için minimum değer aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmiştir.

$$\frac{M}{WE} = \epsilon \quad (4.28)$$

Burada, kullanılan şekil değiştirme ölçerler için ϵ değeri 50×10^{-6} mertebesinde dir. Buna göre:

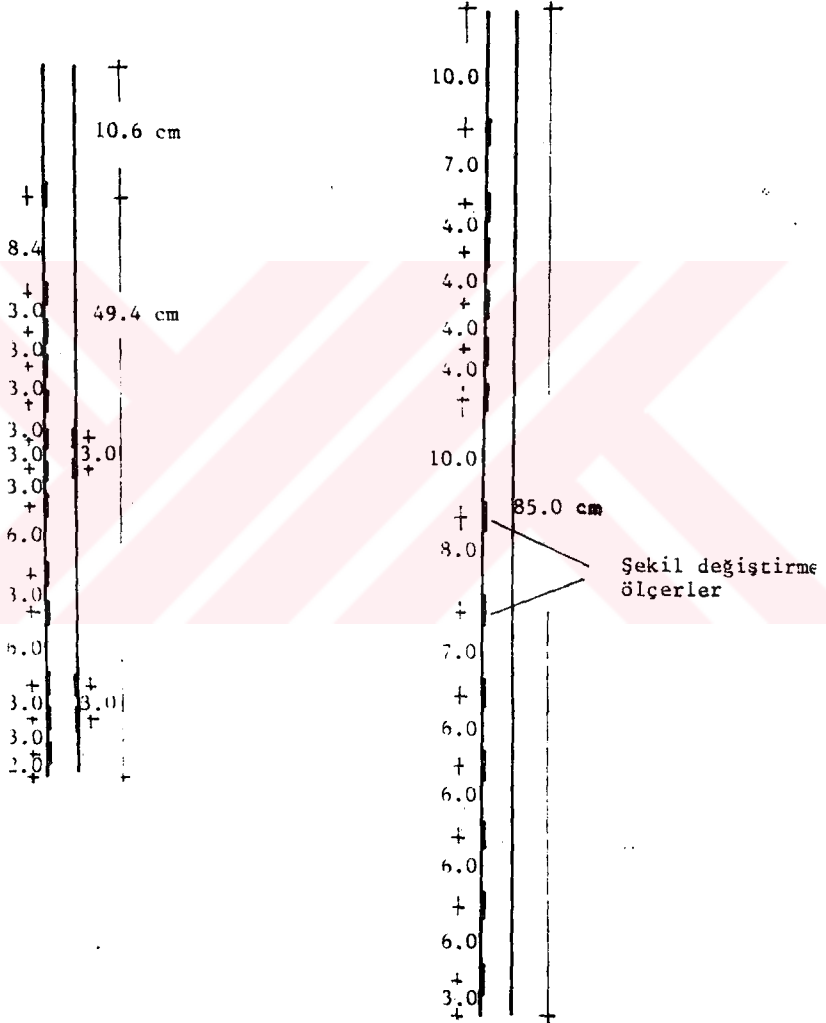
$$M_{\min} = 50 \times 10^{-6} \times 0.1626 \times 6.9 \times 10^5 = 5.6 \text{ kg cm'dir.}$$

Kullanılan model kazığın kesiti Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Model kazığın kesiti

Kullanılan şekil değiştirme ölçerlerin kazığa yerleştirilmesinden sonra, model kazık bilinen moment değerlerine göre kalibre edilmiştir (Şekil 4.6). Kalibrasyon sonuçlarından görüldüğü gibi, kazık ucunda (4.28) eşitliğiyle belirlenen M değerleri, $M_{\min}$ altında kaldığından doğruluktan uzaklaşma vardır. Kullanılan model kazıklar Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Şekil değiştirme ölçerlerin deneylerde kullanılan model kazıklara yerleştirilme şekilleri

4.3.2. Deney Düzeni

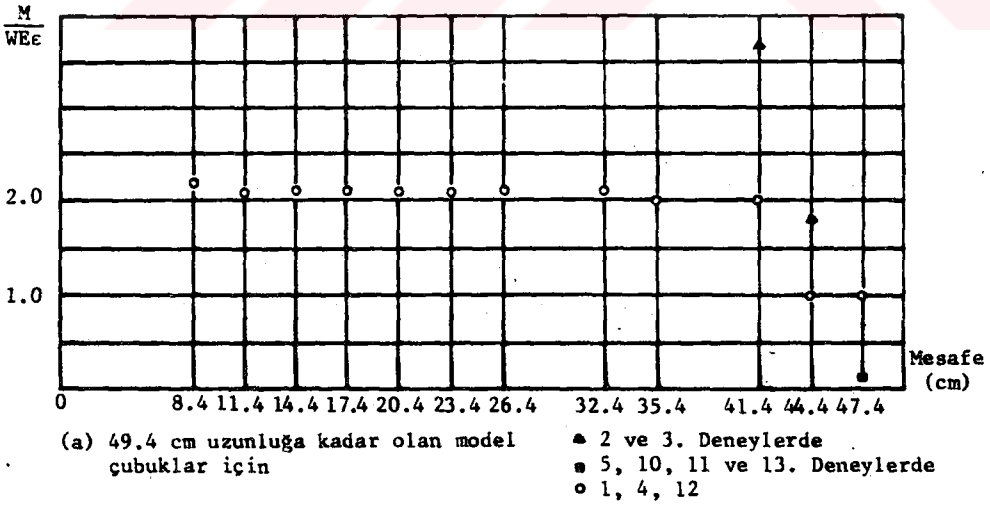
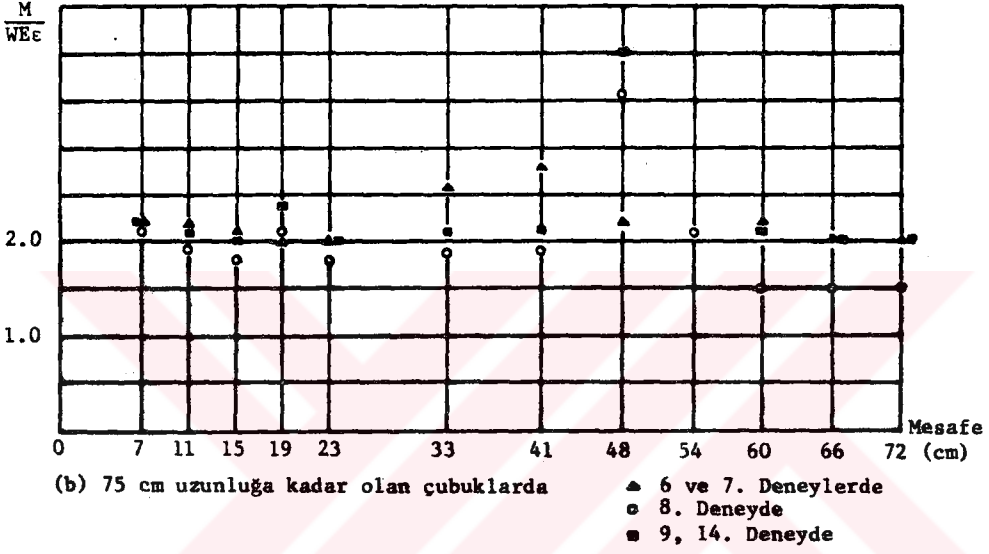
Deney düzeni şu bölümlerden ibarettir:

- 1- Deney sandığı
- 2- Üniform kum serici
 - a) Kum dökücü hazne
 - b) Çerçeve
- 3- Redüktör
- 4- Şekil değiştirme ölçer indikatörü

1- Deney Sandığı: Deney sandığı 40 x 70 x 93 cm boyutlarında içi boş bir sandıktır. Sandık 2 mm kalınlığında sacdan yapılmıştır. Alt tarafında deneyin bitmesinden sonra kumun boşaltılmasını sağlayan 30 cm yüksekliğinde bir kapağı vardır. Ayrıca üstünde, üniform kum sericinin ileri geri hareketi için 40 cm uzunluğunda, iki yanda olmak üzere köşebentler vardır. Deney sandığı içine, deneyde kullanılacak model kazık yerleştirilmekte ve üniform kum serici ile yağmurlama tekniğiyle kum doldurulmaktadır.

2- Üniform Kum Serici: Aşağıda belirtildiği gibi iki kısımdan meydana gelmiştir. Üniform kum serici, tez sahibi tarafından geliştirilmiştir.

a) Kum Dökücü Hazne: 30 x 69.6 x 30 cm boyutlarında içine kum konulan kısımdır. Bu hazne üç tarafından, haznenin çerçeve içinde yukarı aşağı doğru hareketini kolaylaştıran 4 cm çapında 6 adet tekerlek ile donatılmıştır. Diğer yüzüne ise haznenin yukarı hareketini sağlayan kramayer dişli konulmuştur. Haznenin alt tarafında ise orta kısımda 3 cm boşluk bulunan vanalı kum dökücü kısmı vardır. Vana ayarıyla çeşitli sıklıklarda kum dökülebilmektedir.



Şekil 4.6. Kalibrasyon sonuçları

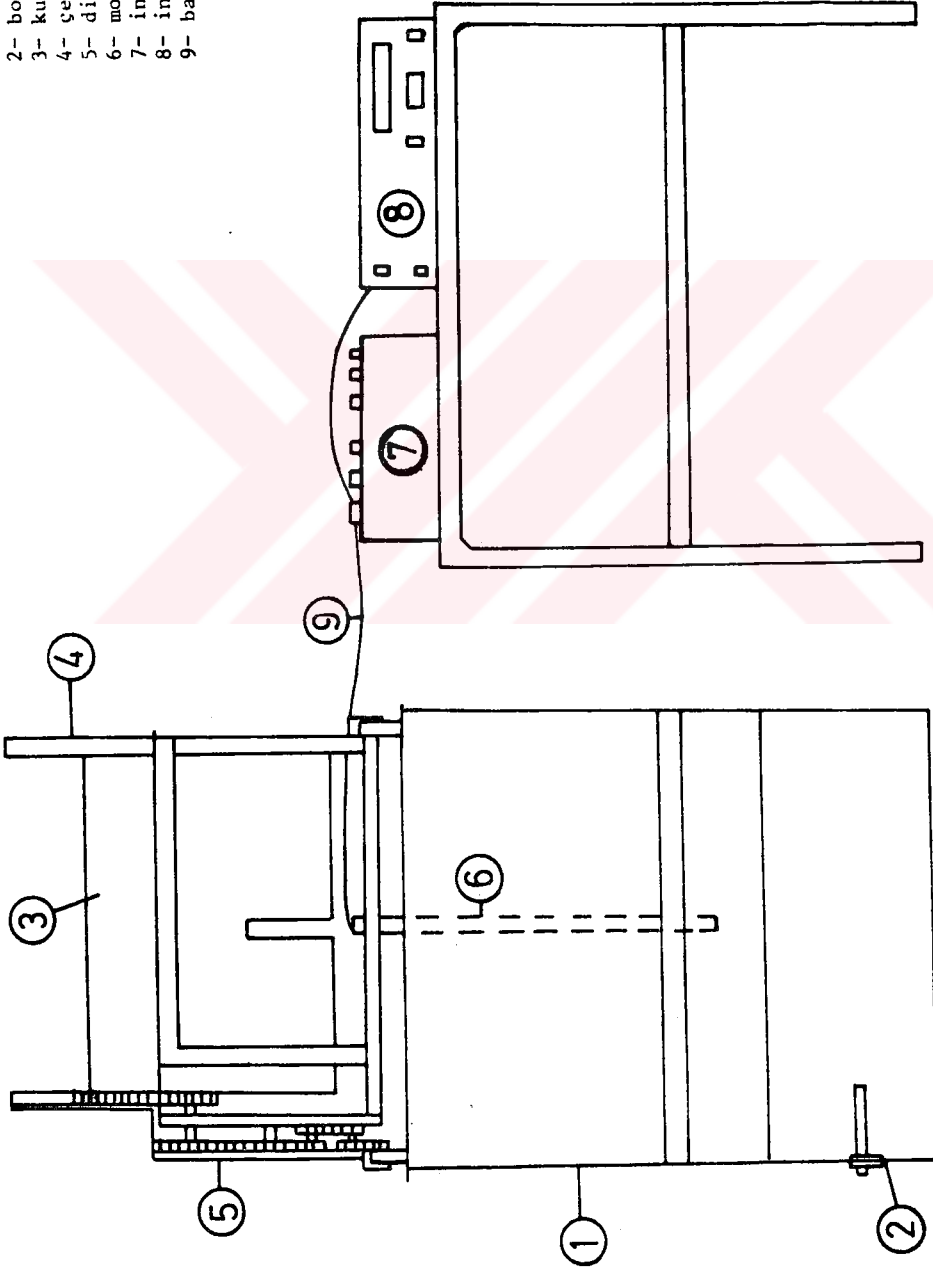
b) Çerçeve: Çerçeve, 65.6 x 53 x 38 cm boyutlarında 4x4 cm'lik köşebentlerden teşkil edilmiştir. Çerçevenin altında kum dökücünün, deney sandığı üzerinde ileri geri hareketi için 4 adet 10 cm çapında lastik tekerlek konulmuştur. Tekerleklerden birinin mili, redüktörden gelen krank kolunun tesbit edilebileceği şekilde değiştirilmiştir. Bu tekerleğin yanındaki tekerleğin mili ise çerçeve üzerindeki dişli grubuyla bağlantı kurulabilmesi için bir dişli ile donatılmıştır. Dişli grubu ile tekerlek üzerindeki dişli bir zincirle birbirlerine tesbit edilmiştir.

3- Redüktör: Redüktör, deney sandığının arka kısmına tesbit edilmiştir. Yarım beygir gücünde elektrik motoruna sahiptir. Redüktörün dakikadaki devir hızı 1.55'dir. Redüktör krank kolu ile çerçevenin ileri geri hareketini sağlamaktadır. Çerçevenin dört defa ileri geri hareketi ile kum dökücü hazne dişli grubu tarafından 1 cm yukarı kaldırılmaktadır. Böylece, kumun düşme yüksekliği daima 30 cm yükseklik üzerinde tutulabilmektedir.

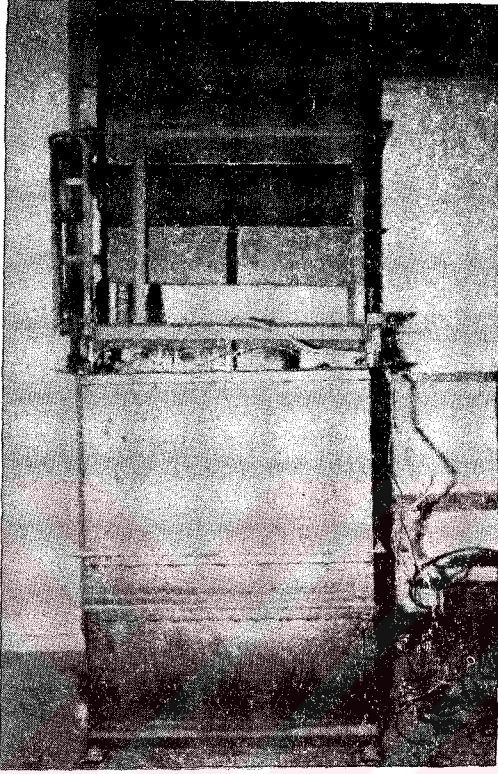
4- Şekil Değiştirme Ölçer İndikatörü: Kum sandığının doldurulmasından sonra, şekil değiştirme ölçer kabloları indikatör köprüsüne bağlanmaktadır. Daha sonra kazığa yanal yükün uygulanması halinde, deformasyon değerleri indikatörün göstergesinden okunmaktadır.

Deney düzeni Şekil 4.7-4.10'da gösterilmiştir.

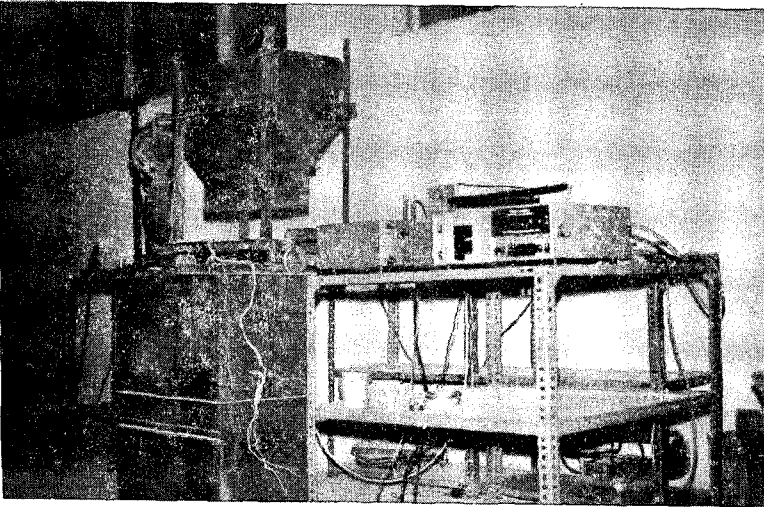
- 1- deney sandığı
- 2- boşaltma kapağı
- 3- kum dökücü hazne
- 4- çerçeve
- 5- dişli grubu
- 6- model kazık
- 7- indikatör köprüsü
- 8- indikatör
- 9- bağlantı kabloları



Şekil 4.7. Deney düzeninin şematik görünüşü



Şekil 4.8. Kum sandığı ve kum serici

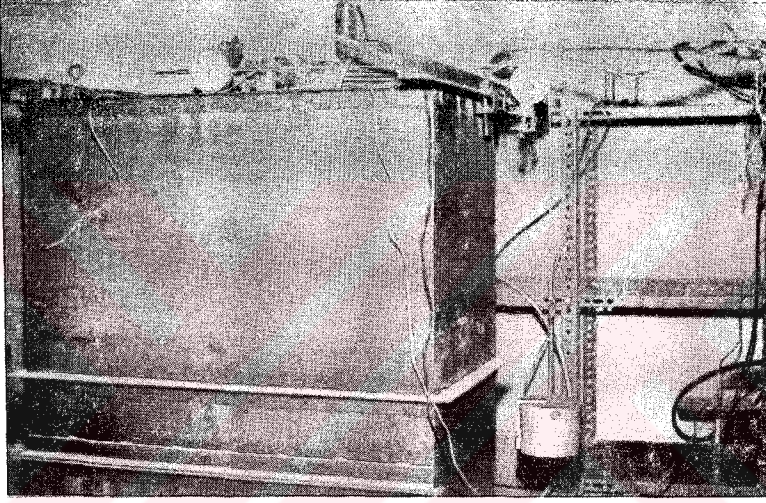


Şekil 4.9. Deney düzeninin genel görünüşü

4.3.3. Deneylerin Yapılışı

Deney sandığı, üniform kum serici ile belli bir derinliğe kadar doldurulduktan sonra model kazık, karşılıklı olarak iki kıskaçla düşey yönde tutturulmuştur. Bundan sonra üniform kum serici ile sandık kumla doldurulmuştur. Doldurma işlemi sırasında, kum dökücüyü konan kumun ağırlığı daima tesbit edilmiştir. Kum dökme işleminden sonra, kum serici sandık üzerinden alınıp, yere konulmuştur. Dökülen kumun özellikleri, ağırlığı ve sandık içine dökülen kum hacmi belli olduğundan, kumun sıkılığı hesapla bulunur. Model kazıkdaki şek.değ.ölç.lere ait kablolar indikatör köprüsüne sırasıyla bağlanır. Ayrıca, yardımcı şek.değ.ölç.de indikatör köprüsüne bağlanır. Kazığın zemin yüzeyi dışında kalan kısmında, yükün uygulanacağı nokta ile herhangi bir başka noktaya yerdeğiştirme ölçmeleri için deformasyon saatleri yerleştirilir. Daha sonra yanal yük 1 kg dan başlamak üzere birer kilogram arttırmak suretiyle uygulanır. İstenilen yük seviyelerinde kazıkdaki birim deformasyonlar sırasıyla indikatör göstergesinden okunur. Okunan değerler ilgili şek.değ.ölç.e ait sabitle çarpılmak suretiyle kazık boyunca sırasıyla moment değerleri belirlenmiş olur. Tekrarlı yüklemelerde uygulanan son yüke ait okumadan sonra, sırasıyla birer kilogram aralıklarla yük boşaltması yapılır. Bu şekilde deneye devam edilerek okumalar tesbit edilmiştir. Deneysel olarak belirlenen moment diyagramından en küçük kareler yöntemiyle en uygun polinom eğri saptanmış ve Ekde verilen bilgisayar programıyla kazık boyunca diğer kesit tesirleri belirlenerek printerden liste çıkışı alınmıştır. Bir başka programla sonuçlara ait diyagramlar printer yardımıyla çizdirilmiştir.

Deneylerde beş ayrı uzunluktaki kazıkla değişik sıkılıkdaki kum zeminde, çeşitli yük kademelerinde ondört adet statik yükleme, altı adet tekrarlı yükleme yapılmıştır (Tablo 4.2). Deneylere ait karakteristik bilgisayar çıktıları Tezin Ekinde gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Model kazığa yanal yük uygulanması

TABLO 2
Model Kazık Deneylerinin Karakteristikleri

Deney No	Relatif Sıkılık D_r	Gömülü Uzunluk, L (cm)	Uygulanan Yanal Yükler, H (kg)	Yanal Yükün Tatbik Noktasının Zemin Yüzüne Uzaklığı, e (cm)	Tekrar Sayısı, N
1	0.84	41.0	2; 5	17.5	10
2	0.83	41.0	3.5	17.5	-
3	0.87	41.0	2.0	17.5	-
4	0.78	49.4	2.0	9.2	-
5	0.85	49.4	2; 8	9.7	20
6	0.78	75.0	2; 5; 7	9.7	-
7	0.96	75.0	5; 8	10.2	20
8	0.88	75.0	5; 8	10.2	-
9	0.78	65.0	2; 5; 7	16.8	-
10	0.85	41.0	5.0	13.5	-
11	0.91	41.0	9.0	7.5	15
12	0.88	35.0	8.0	7.7	15
13	0.85	41.0	9.0	7.3	-
14	0.88	75.0	4.0	10.2	30

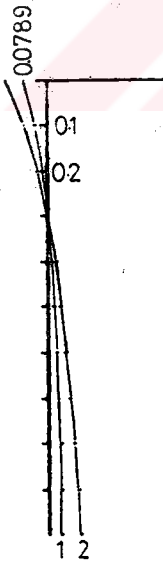
BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. KAZIK YERDEĞİŞTİRMELERİ

Kazık yerdeğıştirmeleri, yanal yük artımının kazık yerdeğıştirmelerine etkisi ve tekrarlı yüklemenin kazık yerdeğıştirmelerine etkisi olmak üzere incelenecektir.

Şekil 5.1 ve 5.2'de 8 ve 9 no.lu deneylere ait kazık yerdeğıştirme eğrileri gösterilmiştir.



- 1- 5 kg statik yükleme sonucu
- 2- 8 kg statik yükleme sonucu

Şekil 5.1. 8 no.lu deneye ait boyutsuz yerdeğıştirme eğrileri



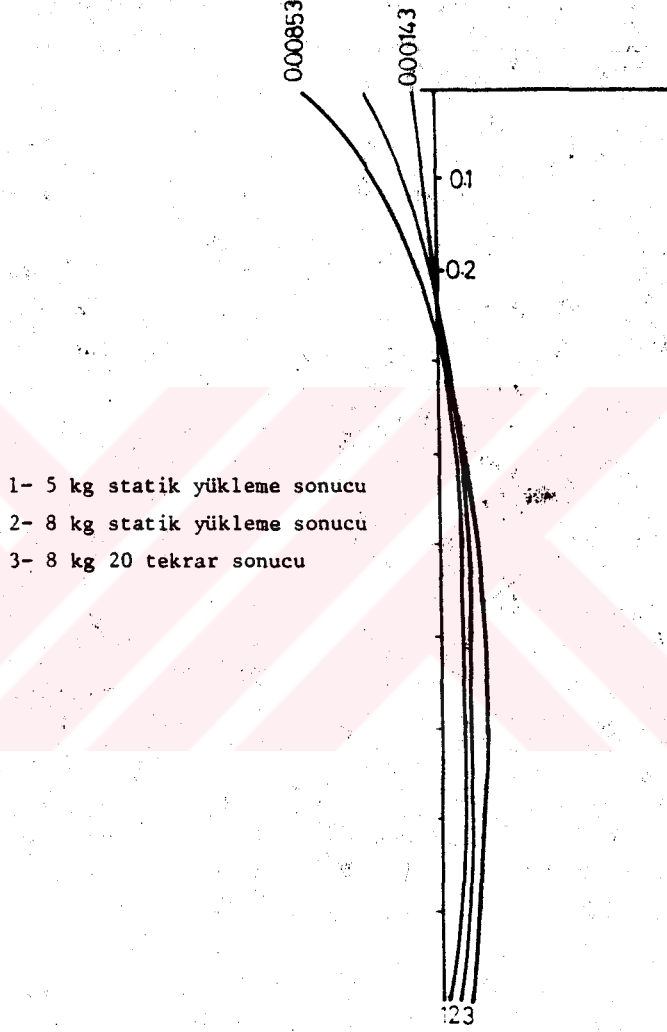
- 1- 5 kg statik yük uygulanması sonucu
- 2- 7 kg statik yük uygulanması sonucu

Şekil 5.2. 9 no.lu deneye ait boyutsuz yerdeğıştirme eğrileri

8 no.lu deneyde yanal yükün 5 kg.dan 8 kg.a çıkarılması halinde zemin yüzeyinde yerdeğiştirmedeki değişme 5.92 mm.den 10.72 mm.ye olmuştur. Yerdeğiştirme eğrisinin sıfır olduğu noktanın zemin yüzeyinden olan derinliği 22 cm olup kazık genişliğinin 10.6 katına eşittir. 9 no.lu deneyde ise yanal yükün 5 kg.dan 7 kg çıkarılması halinde kazık yerdeğiştirmesi zemin yüzeyinde 6.21 mm.den 9.78 mm.ye çıkmıştır. Yerdeğiştirme eğrisinin sıfır olduğu noktanın zemin yüzeyine olan uzaklığı ise 19.2 cm (kazık genişliğinin 9.2 katı) olarak belirlenmiştir.

Yanal yükleme ile birlikte tekrarlı yüklemenin kazık yerdeğiştirmelerine etkisi şekil 5.3 ilâ şekil 5.5'de gösterilmiştir. şekil 5.3'de, 5 kg.lık yanal yükün 8 kg çıkarılması halinde zemin yüzeyindeki kazık yerdeğiştirmesi 3.10 mm.den 5.54 mm.ye çıkmıştır. 8 kg.lık yanal yükün 20 tekrarı sonucunda zemin yüzeyindeki kazık yerdeğiştirmesi 6.40 mm olmuştur. Tekrarlı yükleme sonucunda zemin yüzündeki kazık yerdeğiştirmesindeki artış % 16'dır. Yanal yükün 5 kg.dan 8 kg.a çıkarılması halindeki artış ise % 79 olarak belirlenmiştir. şekil 5.4'de ise 12 no.lu deney sonucunda belirlenen kazık yerdeğiştirmeleri gösterilmiştir. Burada 8 kg yanal yük uygulaması sonucu zemin yüzeyindeki kazık yerdeğiştirmesi 4.63 mm iken yükün 15 tekrarı sonucu belirlenen yerdeğiştirme 6.02 mm olmuştur. Artış yüzdesi % 30 olarak belirlenmiştir.

şekil 5.5'de 11 no.lu deney sonucunda belirlenen yerdeğiştirme eğrileri gösterilmiştir. Burada 9 kg.lık yanal yükün 15 tekrar sonucunda zemin yüzeyindeki kazık yerdeğiştirmesi 6.81 mm.den 7.46 mm.ye çıkmıştır. Bu artış % 10'dur. Kazık yerdeğiştirme eğrilerinin sıfır olduğu noktaların zemin yüzeyinden uzaldıkları 7 no.lu deneyde 5 kg yanal yük uygulanması sonucunda 15.75 cm (7.5 b), 8 kg yanal yük uygulanması sonucunda 21.75 cm (10.5 b) ve 12 no.lu deneyde 8 kg yanal yük uygulaması sonucu 21.7 cm (10 b), yükün 15 tekrarı sonucu 22.05 cm (10.6 b) olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.3. 7 no.lu deneye ait boyutsuz yerdeğiştirme eğrileri



1- 8 kg statik yük uygulama sonucu
2- 8 kg 15 tekrar sonucu

Şekil 5.4. 12 no.lu deneye ait boyutsuz yerdeğiştirme eğrileri

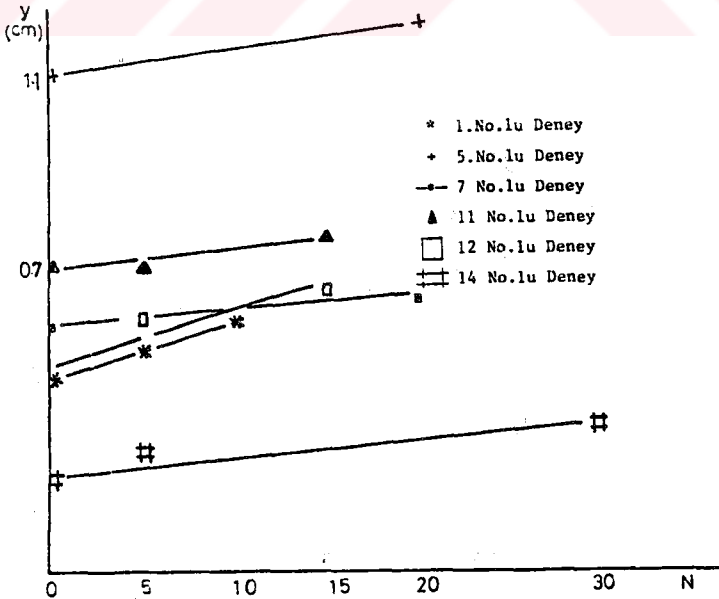


1- 9 kg statik yükleme sonucu
2- 9 kg, 15 tekrar sonucu

Şekil 5.5. 11 no.lu deney sonucunda belirlenen boyutsuz yerdeğiştirme eğrileri

Ayrıca, 1 no.lu deneyde 5 kg.lık yanal yükün 10 tekrarı sonucu zemin yüzeyinde, kazık yerdeğiştirmesindeki artış yüzdesi % 29, 5 no.lu deneyde yanal yük uygulamasının 2 kg.dan 8 kg.a çıkarılması halindeki artış 7 kat, yükün 20 tekrarı sonucu belirlenen artış yüzdesi ise % 11 olmuştur. Tek yönlü yüklemenin yapıldığı 14 no.lu deneyde ise 4 kg.lık yanal yükün 30 tekrarı sonucu zemin yüzeyinde kazık yerdeğiştirmesindeki artış yüzdesi % 70 olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.6'da zemin yüzeyindeki yatay kazık yerdeğiştirmesinin yatay kuvvetin tekrar sayısı ile artışı 1,5,7,11,12 ve 14 no.lu deneyler için çizilmiştir. Bu deneyler için izafi sıkılıklar sırasıyla 0.84, 0.85, 0.96, 0.91, 0.88 ve 0.88 olarak belirlenmiştir. Tekrar sayılarına bağılı olarak zemin yüzeyindeki kazık yerdeğiştirmesinin düzenli arttığı görülmektedir. 1 ve 12 no.lu deneylerde görüldüğü gibi zemin yüzeyindeki yerdeğiştirme tekrar sayısına bağılı olarak hızla artmaktadır. Bu ise kazığın, uzun kazık gibi davranmadığını ve yerdeğiştirmelerin eğilme ve kazığın rijit dönmesinden oluştuğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 5.6. Kazığın zemin yüzeyindeki yatay yerdeğiştirmesinin yatay kuvvetin tekrar sayısı ile değişimi

5.2. KAZIK DAVRANIŞININ ANALİZİ

Kazık davranışının analiz edilebilmesi için kesit tesirlerinin bilinmesi gereklidir. Bu amaçla, 1. grup Fotoelastik deneylerde kazık boyunca birer santimetre aralıklarla okunan girişim çizgilerine göre (4.27) eşitliğiyle belirlenen Moment değerleri; 2. grup deneylerde ise kazık boyunca muhtelif yerlerdeki şekil değiştirme ölçerlerle tesbit edilmiş ϵ değerlerine göre (4.28) eşitliğiyle belirlenen moment değerleri, derinlik değerleriyle birlikte en küçük kareler metoduna ilişkin bilgisayar programına girdi olarak verilmiştir. En küçük kareler metoduyla da deneyde belirlenen moment değerlerine en uygun polinom eğrisi araştırılmıştır. Polinom eğrisinin genel ifadesi

$$M = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n \text{ olduğuna göre}$$

deneysel moment değerlerine en uygun polinomun araştırılmasında, önce $n=1$ için elde edilen ifadenin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu şekilde belirlenen moment ifadesinin deney sonuçlarına uygun olmadığı görülmüş ve n değerleri arttırılarak araştırılmağa devam edilmiştir. Neticede $n=4$ değeri için belirlenen polinom eğrisinin en uygun olduğu görülmüştür. Yapılan bütün deneylerde en uygun polinom eğrisinin dördüncü dereceden olduğu belirlenmiştir. Deneylere ait tipik boyutsuz polinom katsayıları Ek'de verilmiştir. Bundan sonra en küçük kareler metoduyla belirlenen polinom eğrisinin katsayıları, kazığa uygulanan yatay yük, kazık boyu, kazığın elastisite modülü, atalet momenti, kazığın e/L oranı ve kazığın yerdeğiştirmesiyle ilgili C_1, C_2 integral sabitleri kazık davranışının analizi için Ek'de verilen bilgisayar programına girdi olarak verilmiştir.

Program sırasıyla aşağıdaki işlemleri yapmaktadır:

- 1- C_{ij} ($i=1...n, j=1...n$) katsayılarını hesaplar,
- 2- b_j ($j=1...n$) katsayılarını hesaplar,
- 3- $C_{ij}, A_i=b_j$ ($i,j=1,2...n$) şeklindeki lineer denklem takımından A_i katsayılarını hesaplar
- 4- Zemin reaksiyonu, eğilme momenti, kesme kuvveti, elastik eğri değerlerini hesaplar,

5- Çıktı olarak kazık boyunca onda bir aralıklarla kesit tesirlerini printerde basar.

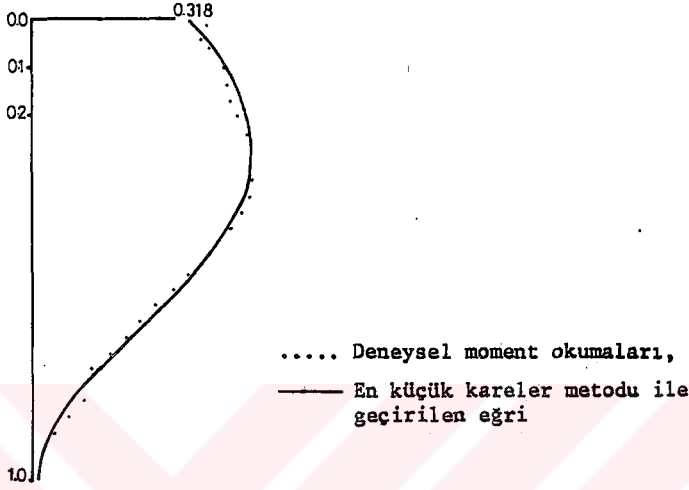
Bilgisayar programıyla n sayısı birden başlamak suretiyle arttırılarak deneysel moment eğrisiyle en iyi yaklaşımı sağlayacak teorik moment eğrisi araştırılmıştır. Deneylerde $n=5$ için bulunan teorik moment eğrisinin deneysel moment eğrisiyle en uygun yaklaşımı sağlamasından sonra diğer kesit tesirleri olan zemin reaksiyonu, kesme kuvveti ve elastik eğri değerleri belirlenmiştir. Bundan sonra kesit tesirlerinin birbirleriyle karşılaştırılmaları yapılmıştır. Daha sonra da kazık tasarımında maksimum eğilme momenti söz konusu olduğundan eğilme momentlerinin maksimum değerlerinin zemin yüzeyinden itibaren kazık genişliğine bağlı olarak ne kadar derinlikte olduğu ve tekrarlı yüklemenin maksimum eğilme momentinin olduğu derinliğe etkisinin olup olmadığı da bu kısımda araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar her iki grup deney için sırasıyla aşağıda verilmiştir.

5.2.1. Fotoelastik Deneylere Ait Sonuçlar

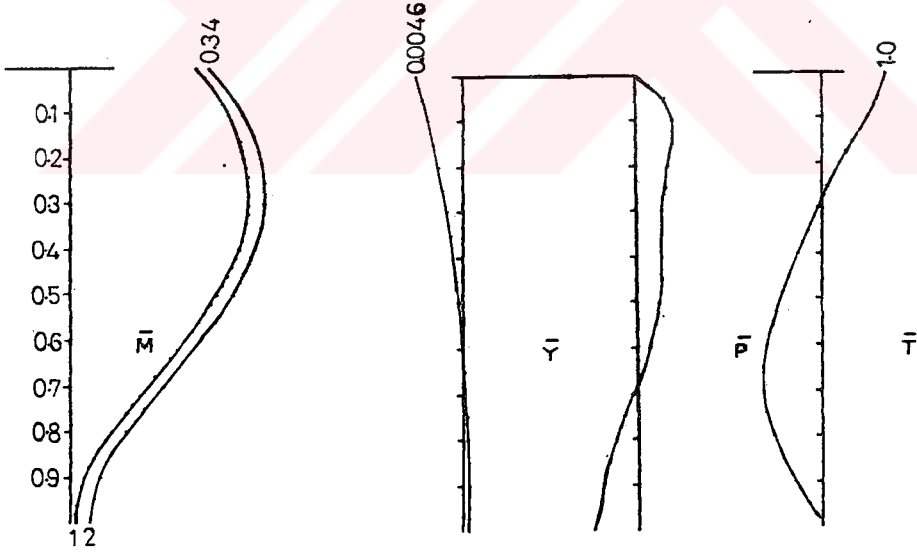
Deneysel olarak kazık boyunca moment değerlerinin ölçülmesinden sonra, bu noktalara en uygun olan eğrinin en küçük kareler metodu ile saptandığı daha önce belirtilmişti. Bundan sonra kazık davranışının analizi için, deneysel moment eğrisi ile en iyi uyum içersinde olan teorik moment eğrilerinin araştırılması yapılmıştır. Uyuşumun sağlanmasından sonra kesme kuvveti, zemin reaksiyonu, elastik eğri saptanmıştır. 1 no.lu deneyde ölçülen eğilme momenti değerleriyle, en küçük kareler metodu ile geçirilen dördüncü dereceden polinoma ait moment eğrisi Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Bu seriden yapılan deneylerde de dördüncü dereceden moment eğrileri en uygun yaklaşımı göstermiştir.

Şekil 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 ve 5.12 de 1,2,3,4,5 no.lu deneyler için en küçük kareler metoduna göre belirlenen deneysel moment eğrileri ile Ek'de verilen bilgisayar programıyla Galerkin yöntemiyle belirlenen teorik moment değerlerinin karşılaştırılması ve zemin reaksiyonu, elastik eğri gibi tesirler gösterilmiştir. Şekillerde görüleceği gibi deneysel moment eğrileri ile teorik moment eğrileri büyük bir uyum içindedir. Diğer taraftan her yükleme deneyine ait yerdeğiştirme, moment, kesme kuvve-

ti ve zemin reaksiyonu eğrilerinin uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Tipik bir bilgisayar çıkışı 1 no.lu deney için Ek Tablo 1'de verilmiştir.

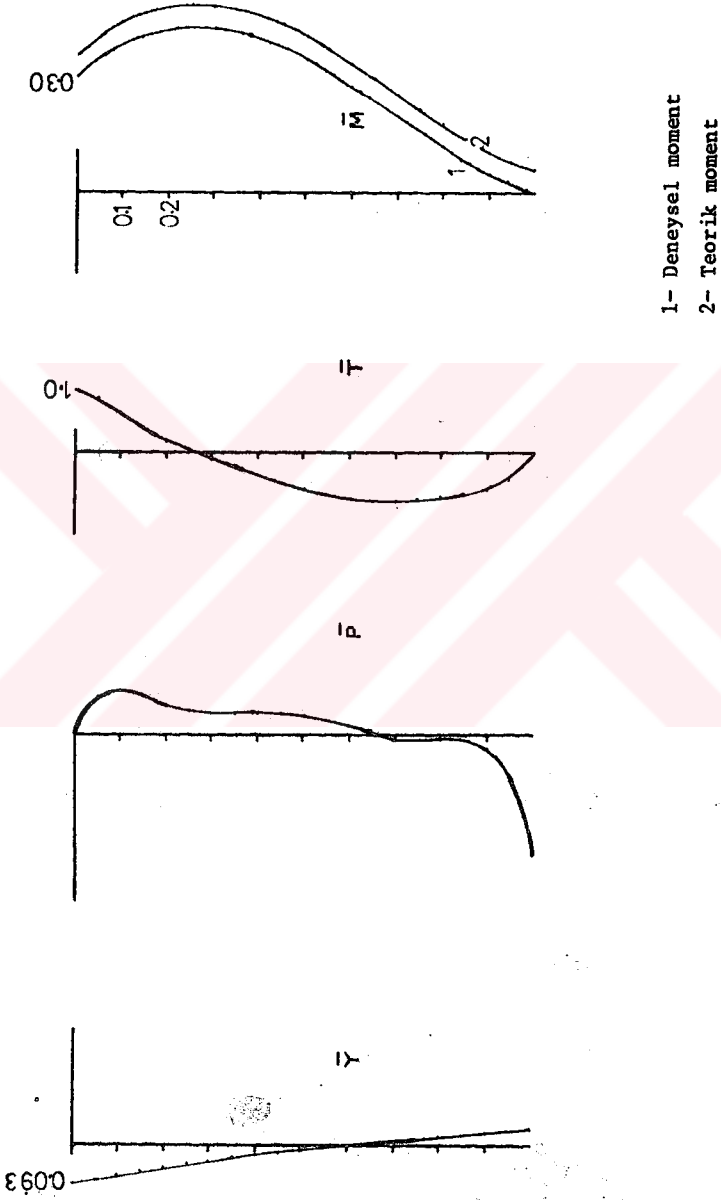


Şekil 5.7. 1 no.lu fotoelastik deneye ait ölçülen moment değerleri ve en küçük kareler metodu ile geçirilen eğri

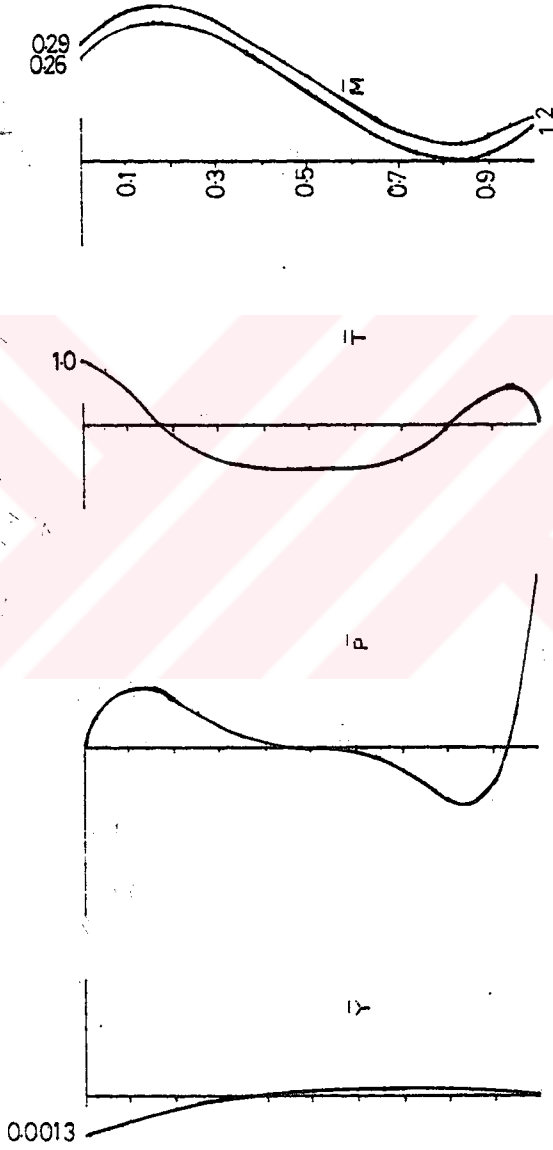


- 1- Deneysel moment
- 2- Teorik moment

Şekil 5.8. 1 no.lu deneye ait boyutsuz moment, elastik eğri, zemin reaksiyonu, kesme kuvveti eğrileri

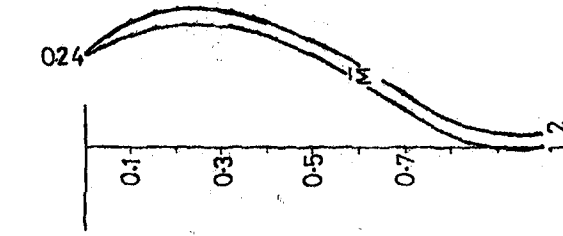


Şekil 5.9. 2 no.lu deneye ait boyutsuz elastik eğri, zemin reaksiyonu, kesme kuvveti, moment eğrileri

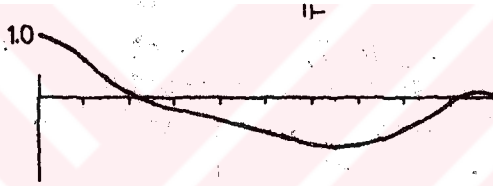


1- Deneysel moment
2- Teorik moment

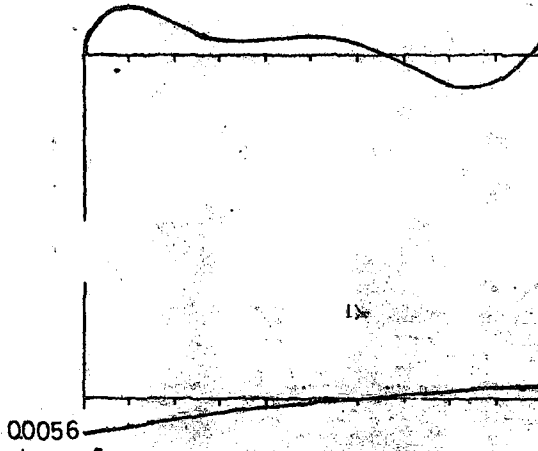
Şekil 5.10. 3 no.lu deneye ait boyutsuz elastik eğri, zemin reaksiyonu, kesme kuvveti, deneyel moment ve teorik moment eğrileri



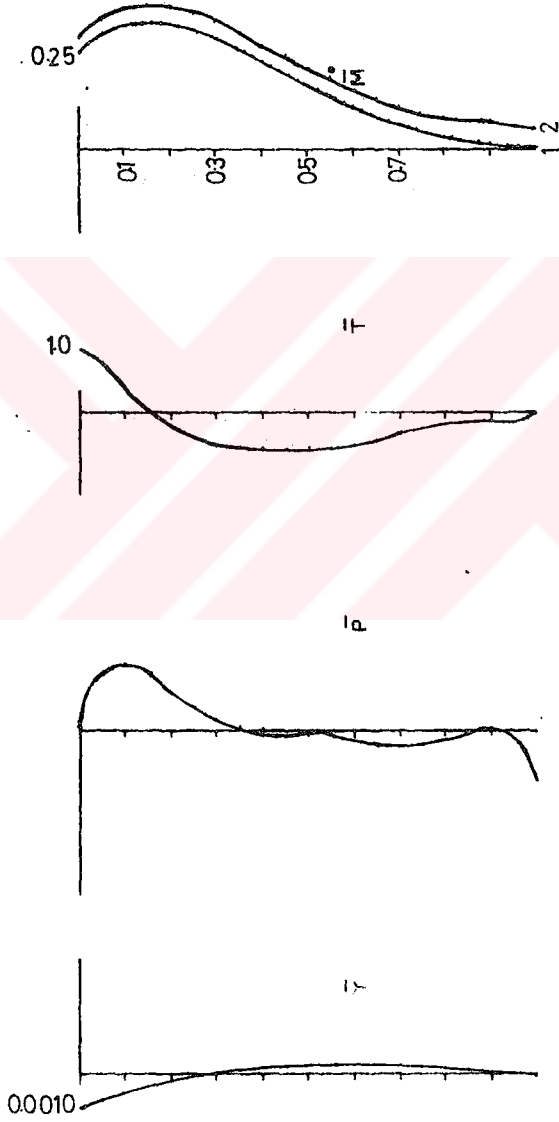
1- Deneysel moment
2- Teorik moment



1a



Sekil 5.11. 4 no.lu deneye ait boyutsuz elastik, zemin reaksiyonu, kesme kuvveti, moment egrileri



1- Deneysel moment
2- Teorik moment

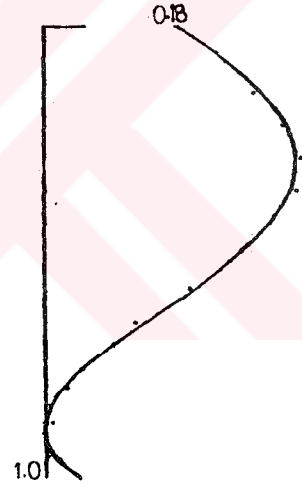
Şekil 5.12. 5 no.lu deneye ait boyutsuz yerdeğiştirme, zemin reaksiyonu, kesme kuvveti, moment eğrileri

5.2.2. Model Kazık Deneylerine Ait Sonuçlar

Strain-gage'lerle donatılmış model kazıklar üzerinde yapılan yatay yükleme deneylerinde elde edilen tipik eğilme momenti eğrilerinden iki adeti Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Aynı şekilde en küçük kareler yöntemi ile geçirilen polinom eğrilerde verilmiştir. Boyutsuz ölçekte verilen deneysel ve polinom eğrilerin büyük bir uyum içerisinde bulunduğu görülmektedir.



Şekil 5.13. 10 no.lu deneye ait ölçülen moment değerleri ve en küçük kareler metodu ile geçirilen eğri



Şekil 5.14. 13 no.lu deneye ait ölçülen moment değerleri ve en küçük kareler metodu ile geçirilen eğri

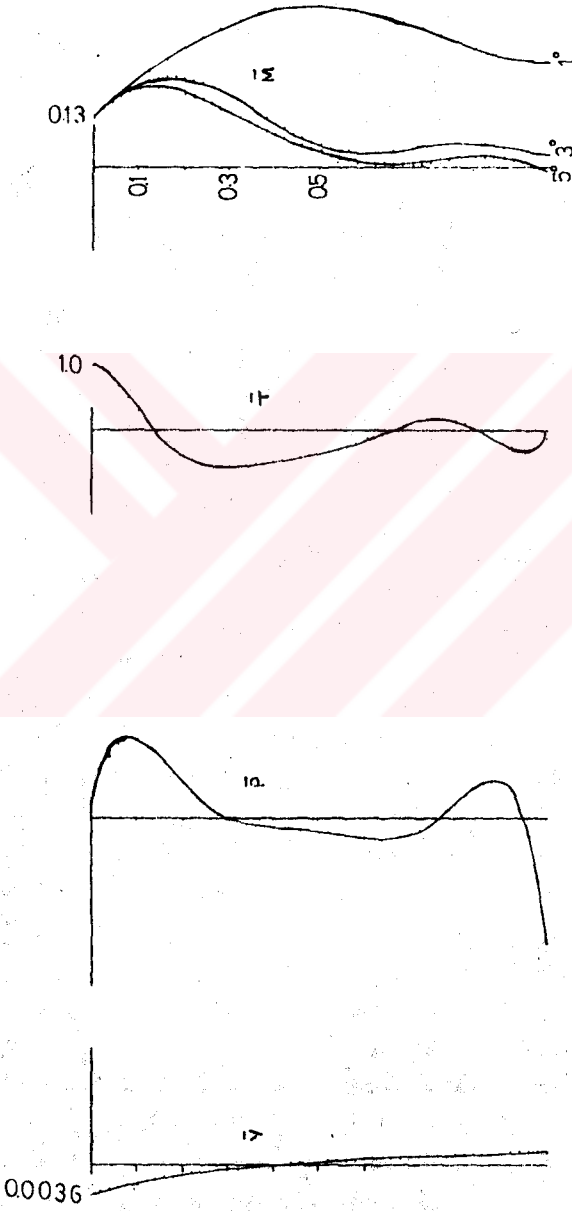
Deneyler sonucunda en küçük kareler metodu ile belirlenmiş deneysel moment eğrileri ve Galerkin yöntemiyle belirlenen değişik derecelerdeki teorik moment eğrileri karşılaştırılmıştır. Deneysel moment eğrileri ile en uygun yaklaşımı 5. dereceden belirlenen teorik moment eğrile-

ri sağlamıştır. Kesme kuvveti, zemin reaksiyonu, elastik eğri 5. dereceden teorik moment eğrisine karşılık belirlenmişlerdir. Örnek olarak Şekil 5.15 verilmiştir.

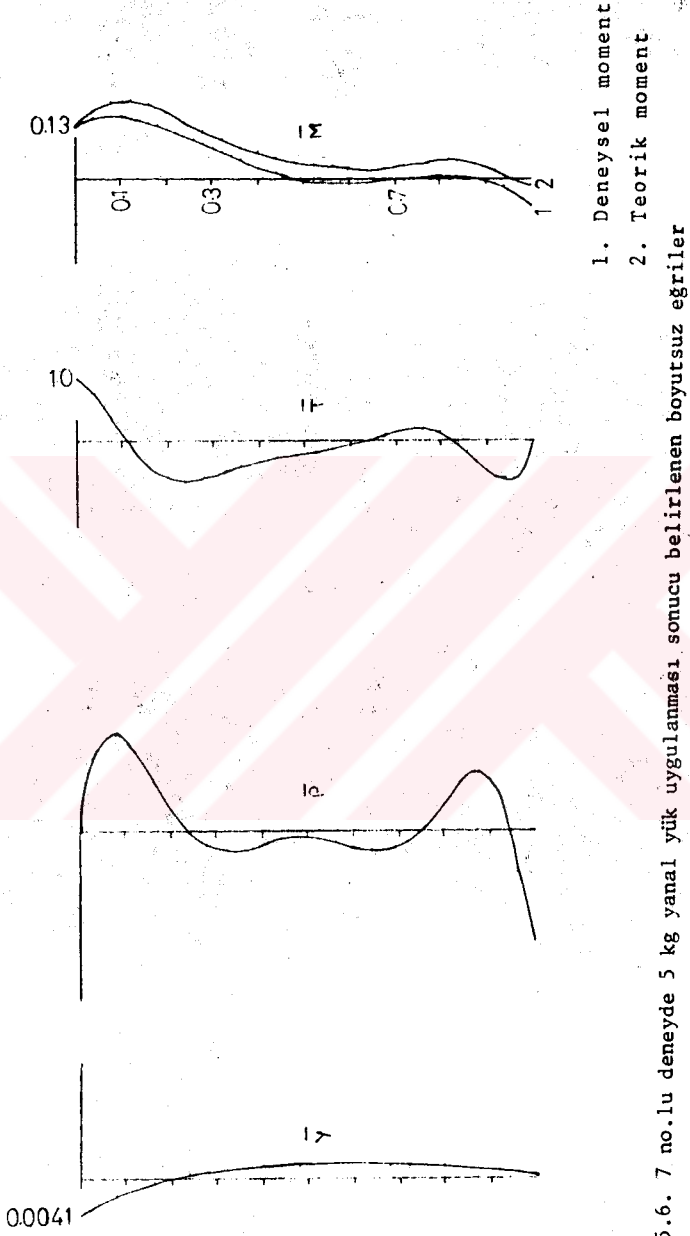
1 no.lu deneyde 2 kg statik yük uygulaması sonucu belirlenen teorik moment ve zemin reaksiyonu eğrilerinin maksimum olduğu noktalar, zemin yüzeyinden 6.10 cm derinlikten geçmektedir. Bu kazık genişliğinin 2,9 katına eşittir. 5 kg yük uygulanması sonucu belirlenen eğrilerden teorik moment ve zemin reaksiyonu eğrilerinin maksimum olduğu noktalar ise zemin yüzeyinden itibaren 6.1 cm'den geçmektedir. 5 kg yanıl yükün 5 defa tekrarı sonucunda bu nokta 6.2 cm'ye inmiştir. 5 kg yanıl yükün 10 defa tekrarı sonucunda ise belirlenen bu derinlik 6.4 cm olmuştur.

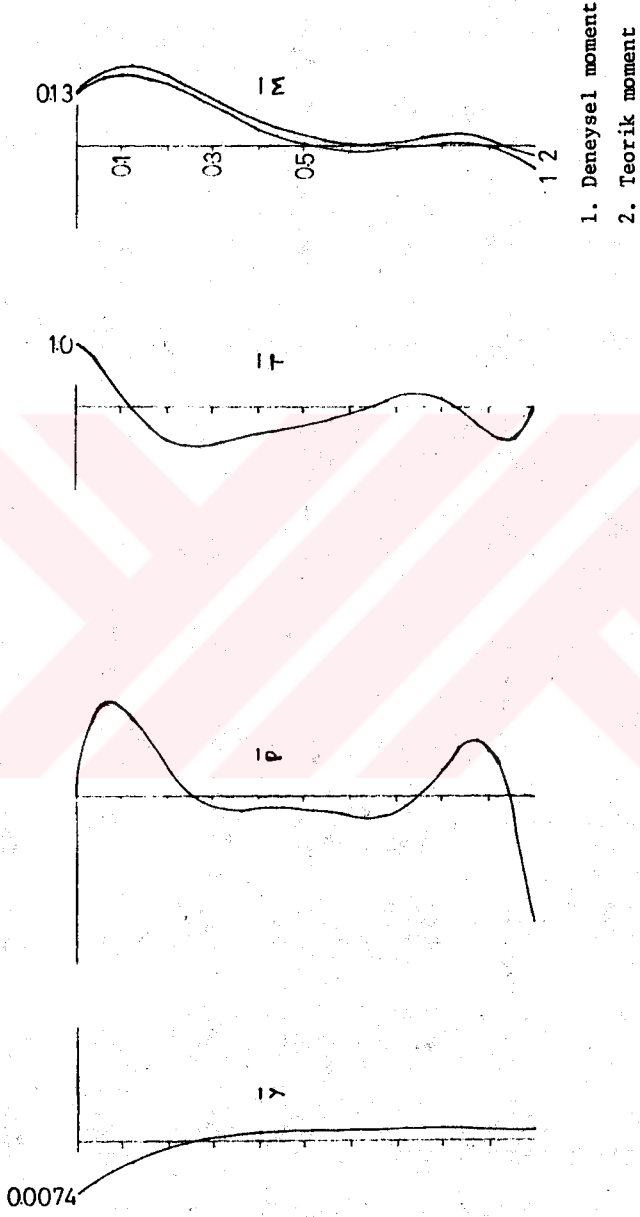
2 no.lu deneyde 3.5 kg.lık yanıl yük uygulanması sonucunda eğilme momenti ve zemin reaksiyonlarının maksimum olduğu noktalar zemin yüzeyinden 5.7 cm (2.7 b) derinlikte olup 2 kg.lık yanıl yükün uygulandığı 3 no.lu deneyde bu noktalar zemin yüzeyinden itibaren 6.1 cm (2.9 b) derinliktedir. 4 no.lu deneyde bu noktalar 8.28 cm (4 b) olarak tesbit edilmiştir. 5 no.lu deneyde ise 8 kg.lık yük uygulaması için bu noktalar 10.4 cm (5 b) olarak belirlenmiştir. Yukarıda bahsedilen deneylerde eğilme momentleri, kesme kuvvetleri, zemin reaksiyonları ve elastik eğrilerin birbiriyle karşılıklı uyum içinde olduğu görülmüştür.

7 no.lu deneye ait sonuçlar Şekil 5.16-5.18 de gösterilmiştir. Burada, 8 kg.lık yük için maksimum moment zemin yüzünden itibaren 8.75 cm (4.2 b) derinlikte oluşurken, aynı yükün 20 tekrarı sonucu maksimum moment 8.91 cm (4.3 b) derinlikte oluşmuştur.

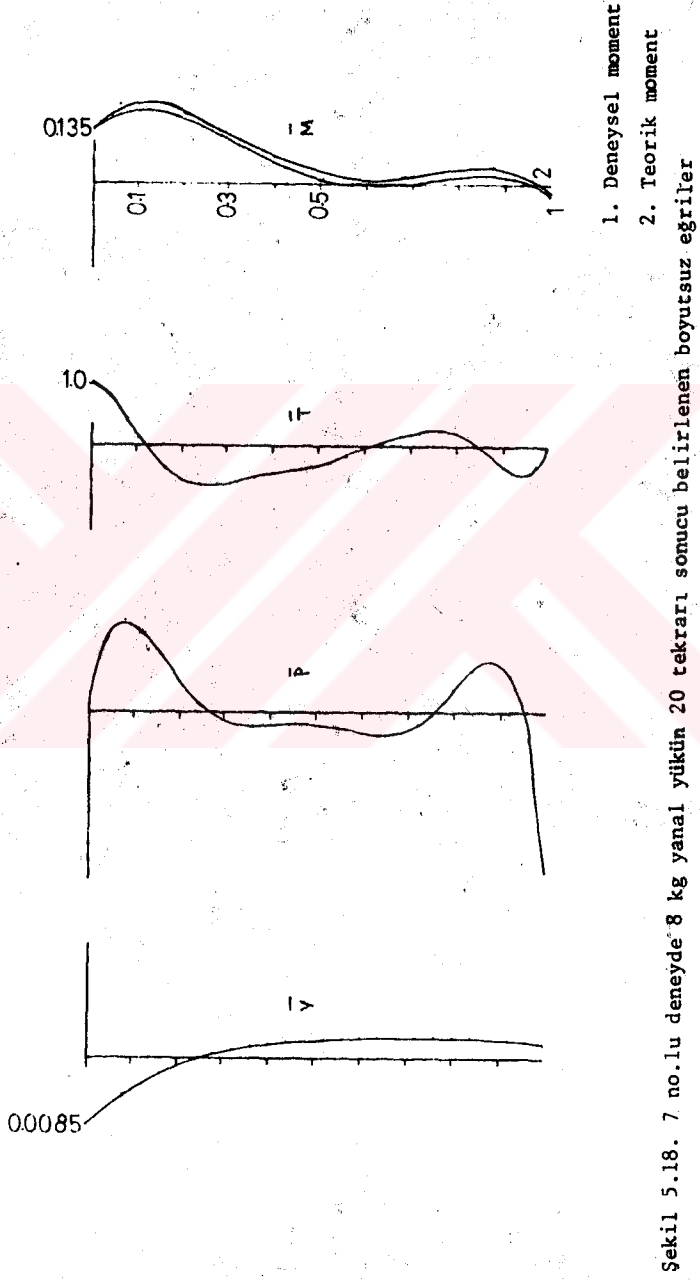


Şekil 5.15. 6 no.lu deneyde 2 kg yanal yük uygulanması sonucu belirlenen boyutsuz eğriler





Şekil 5.17. 7 no.lu deneyde 8 kg yanal yük uygulanması sonucunda belirlenen boyutsuz eğriler



8 no.lu deneyde 5 kg yanal yük uygulanması sonucu maksimum moment 9.3 cm (4.5 b) derinlikte tesbit edilmişken yükün 8 kg çıkarılması sonucu maksimum moment 9.9 cm (4.8 b) derinlikte meydana gelmiştir.

9 no.lu deneyde ise 5 kg yanal yük uygulanması sonucu maksimum moment 7 cm (3.4 b) derinlikte belirlenmiş olup 7 kg yanal yük uygulanması sonucunda bu derinlik 7.12 cm. ye çıkmıştır.

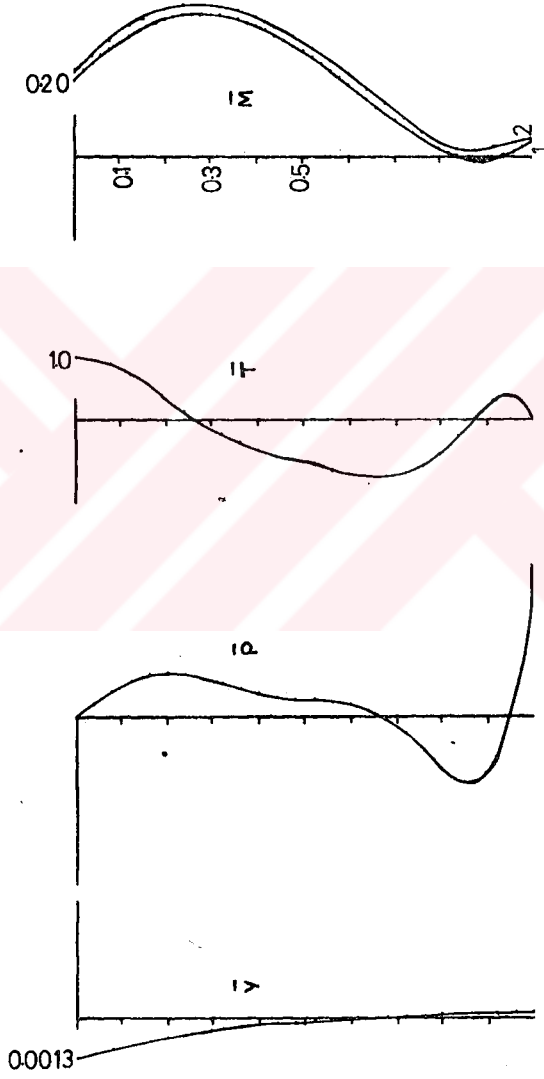
10 no.lu deneyde maksimum moment 5 kg yanal yük için 8.1 cm (3.9 b) derinlikte belirlenmiş iken 11 no.lu deneyde 5 kg yanal yük uygulaması sonucu maksimum moment 9.08 cm (4.4 b) derinlikte ve aynı yükün 15 tekrarı sonucu 9.31 cm (4.5 b) olarak belirlenmiştir.

12 no.lu deney sonucunda belirlenen eğriler Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 de gösterilmiştir. Burada 8 kg yanal yük uygulanması sonucu maksimum moment 9.38 cm (4.5 b) derinlikte oluşmuş iken aynı yükün 15 tekrarı sonucu bu derinlik 9.78 cm (4.7 b)'ye inmiştir.

13 no.lu deneyde ise 9 kg.lık yanal yük uygulanması sonucu maksimum momentin 11.7 cm (5.7 b) derinlikte meydana geldiği belirlenmiştir.

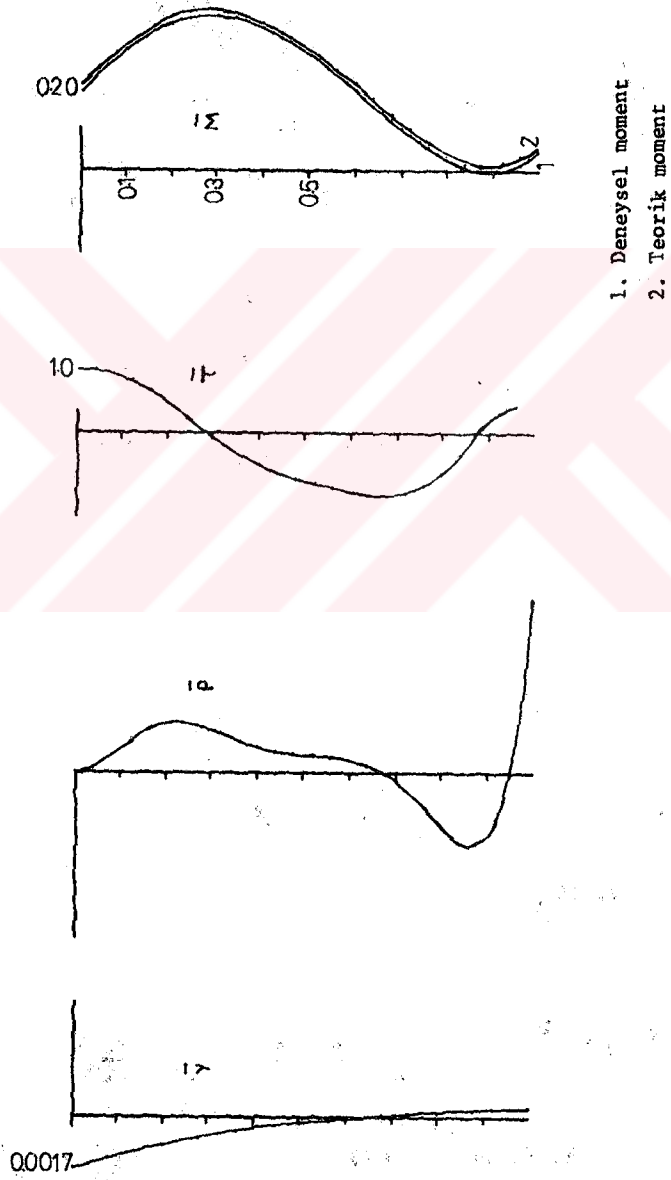
Deneyler sonucunda en küçük kareler metoduna göre belirlenen deneysel moment eğrileri ile Ek'de verilen bilgisayar programıyla belirlenen teorik moment eğrileri büyük bir uyum içindedir. Diğer taraftan her yükleme deneyine ait yerdeğiştirme, moment, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu eğrilerinin de kesit tesirlerinin önemli olduğu bölgede uyum içinde olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, eğilme momentinin maksimum olduğu noktalar zemin yüzeyinden itibaren 3b ilâ 5b derinlikte oluşmaktadır. Yatay kuvvetin kazığa tekrarlı etkisi eğilme momentinin maksimumdan geçtiği kesidi pratik olarak değiştirmemektedir.



1. Deneysel moment
2. Teorik moment

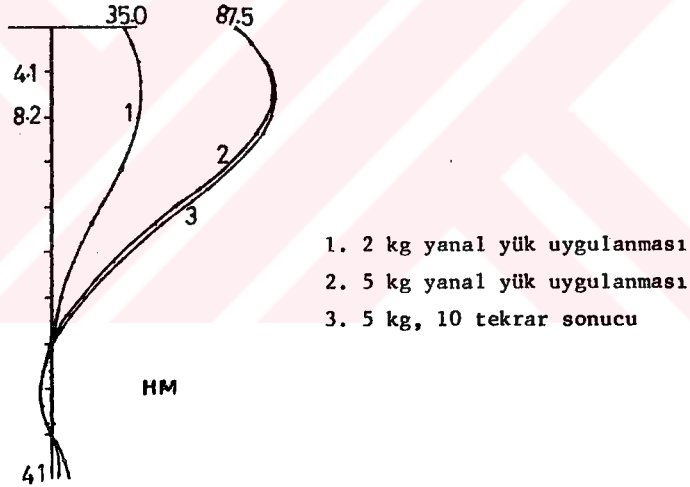
Sekil 5.19. 12 no.lu deneyde 8 kg yanal yük uygulanması sonucu belirlenen boyutsuz eğriler



Şekil 5.20. 12 no.lu deneyde 8 kg yanal yükün 15 tekrarı sonucu belirlenen boyutsuz eğriler

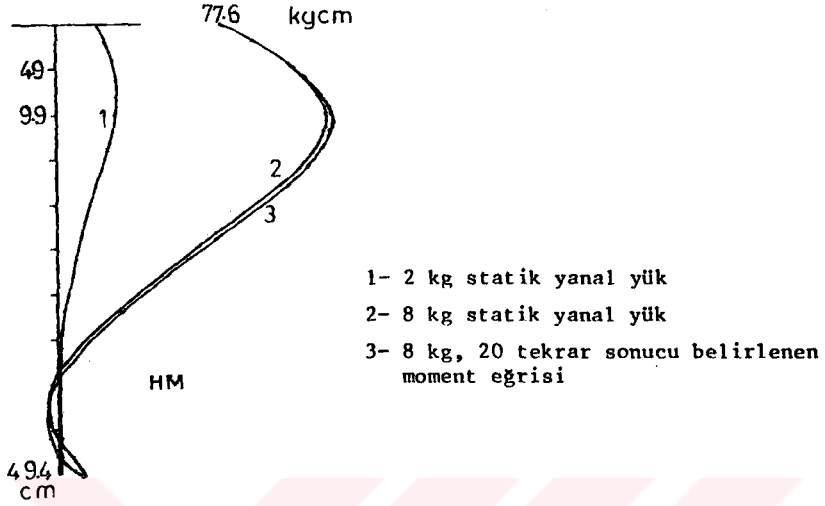
5.3. YÜK ARTIMININ VE TEKRARLI YÜKLEMENİN EĞİLME MOMENTLERİNE ETKİSİ

Kazık tasarımı maksimum eğilme momentine göre yapıldığından bu kısımda tekrarlı yüklemenin maksimum eğilme momentine etkisi incelenmiştir. Deniz yapılarında kullanılan uzun boru kazıklarda genellikle et kalınlığı derinlikle azalmaktadır. Bundan dolayı tekrarlı yükleme sonucunda eğilme momentinde derinlikle olan değişimde bu kısımda incelenmiştir. Deney sonuçları aşağıda verilmiştir. 1 no.lu deneyde elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 5.21'de gösterilmiştir. 5 kg yanal yükün 10 tekrarı sonucunda 8.2 cm (3.9 b) derinlikte eğilme momentindeki artış yüzdesi % 4 iken 12.3 cm (5.9 b) derinlikte artış yüzdesi % 6 olmuştur. 24.6 cm (11.8 b) derinlikte artış yüzdesi % 29 olmuştur.



Şekil 5.21. 1 no.lu deneyde yük artımı ve tekrarlı yükleme sonucu kazık boyunca eğilme momentindeki değişiklikler

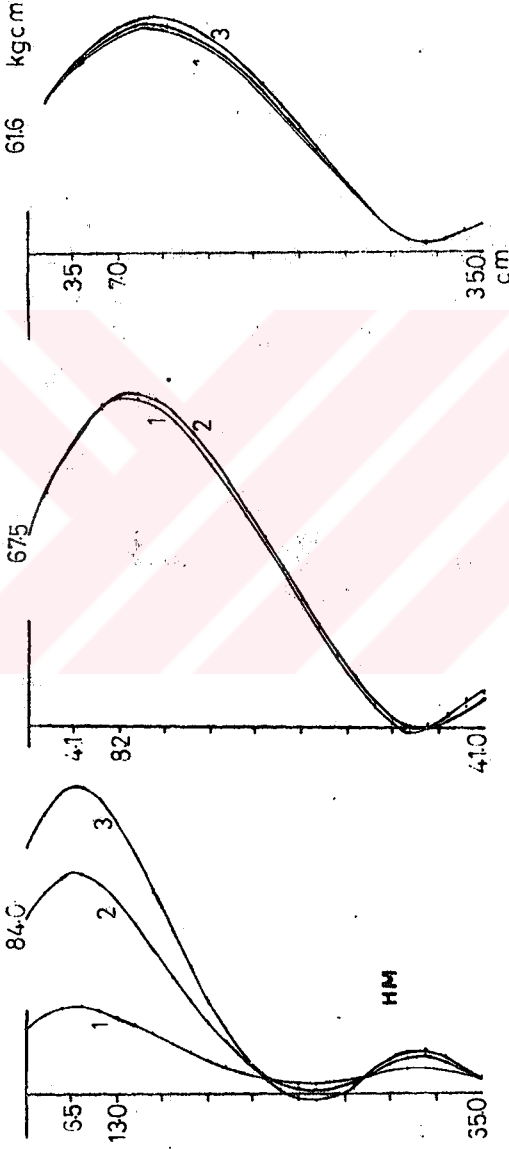
Şekil 5.22'de 5 no.lu deneye ait 2 kg, 8 kg ve 8 kg yanal yükün 20 tekrarı sonucu belirlenen moment eğrileri bir arada gösterilmiştir. Burada 8 kg yanal yükün statik uygulanması sonucu 9.9 cm (4.8 b) derinlikteki moment değeri, yükün 20 tekrarı sonucunda % 2 artarken, 14.8 cm (7.1 b) derinlikte bu artış yüzdesi % 3 olmuştur. 29.6 cm (14.3 b) derinlikte artış yüzdesi ise % 7 olmuştur.



Şekil 5.22. 5 no.lu deneye ait yük artımı ve tekrarlı yükleme sonucu belirlenen eğilme momentleri

9 no.lu deneyde 2 kg, 5 kg ve 7 kg yanal yük uygulanmaları sonucu belirlenen moment eğrileri bir arada Şekil 5.23'de gösterilmiştir. Şekil 5.24'de ise 11 no.lu deney için 9 kg yanal yük ve bu yükün 15 tekrarı sonucu belirlenen moment eğrileri gösterilmiştir. 9 kg yanal yük için moment değerindeki artış 15 tekrar sonucu 8.2 cm (3.9 b) derinlikte % 5 iken, 12.3 cm (5.9 b) derinliğinde % 9, 24.6 cm (11.8 b) derinlikte ise % 33 olmuştur. 12 no.lu deney için 8 kg yanal yük ve bu yükün 5 ve 15 tekrarları sonucu belirlenen moment eğrileri bir arada Şekil 5.25 de gösterilmiştir. Burada 8 kg.lık yükün 5 tekrarı sonucu 7 cm (3.4 b) derinlikle momentteki artış yüzdesi % 1 iken, 15 tekrar sonucu artış yüzdesi % 4 olmuştur. 10.5 cm (5.1 b) derinlikte artış yüzdeleri 5 tekrar sonucu % 2, 15 tekrar sonucu ise % 6 olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak yatay kuvvetin tekrarlı etkimesinin maksimum eğilme momentinde büyük değişiklikler meydana getirmediği, buna karşılık kazığın alt yarısındaki eğilme momenti değerlerinde önemli artışlar meydana getirdiği belirlenmiştir. O halde deniz yapılarında kullanılan uzun boru kazıkların tekrarlı kuvvete göre tasarlanmasında kazığın alt yarısı için eğilme momenti değerlerindeki artışların gözden uzak tutulmaması gerekir.



1. 2 kg yanal yüke ait
2. 5 kg yanal yüke ait
3. 7 kg yanal yüke ait

Şekil 5.23. 9 no.lu deneyde yük artırılmaları sonucu belirlenen moment eğrileri

1. 9 kg yanal yüke ait
2. 9 kg, 15 tekrar sonucu

Şekil 5.24. 11 no.lu deneyde 9 kg yanal yük ve 15 tekrar sonucu belirlenen moment eğrileri

1. 8 kg yanal yüke ait
2. 8 kg, 5 tekrar sonucu
3. 8 kg, 15 tekrar sonucu

Şekil 5.25. 12 no.lu deneyde 8 kg yük ve yükün 5, 15 tekrarı sonucu belirlenen moment eğrileri

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, kohezyonsuz zeminlerde yanal yük etkisindeki kazıkların davranışını analiz etmek için zemin modülünün derinlikle değişimi hakkında önceden bir kabul yapmayan bir yöntem kullanılmıştır. Bu amaçla, farklı iki malzemeden yapılmış model kazıklar üzerinde muhtelif deneyler yapılmıştır. Deneylerde yük artımının ve yükün tekrarının kazık yerdeğiştirmelerine, eğilme momentlerine ve zemin reaksiyonlarına olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ulaşılan genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1- Deneylerde elde edilen kazık yerdeğiştirmesi, eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu eğrileri statik yönden uyum içerisindedir. Kazık davranışının Galerkin yöntemi ile analizi sonucu elde edilen bu eğrilerin uyum içerisinde olması kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermektedir.

2- Yatay kuvvetin tekrarlı etkimesi zemin yüzeyinde ölçülen kazık yerdeğiştirmelerinde önemli artışlar meydana getirmiştir. Bir kazık grubunda, her kazığa etkiyen ortalama yatay kuvvetin tek kazığa etkimesi halinde tek kazığın yatay yerdeğiştirmesinin, kazık grubunun yatay yerdeğiştirmesinden daha az olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, deniz yapılarındaki kazık gruplarının tekrarlı yatay kuvvet altındaki yerdeğiştirmeleri dikkatle incelenmelidir.

3- Eğilme momentinin maksimum olduğu noktalar, (b) kazık genişliğini (çapını) göstermek üzere zemin yüzeyinden 3b ilâ 5b arasında de-

gismektedir. Bu değer, literatürde verilen değerlerle uyum içindedir. Kazığın tekrarlı yüklenmesi eğilme momentinin maksimumdan geçtiği kesidi pratik olarak değiştirmemektedir.

4- Tekrarlı yükleme kazığa etkiyen maksimum eğilme momentinde % 1 ilâ % 5 dolayında artış meydana getirmektedir. Maksimum eğilme momentindeki söz konusu artış ihmal edilebilir mertebededir. Tekrarlı yükleme kazığın alt yarısındaki eğilme momentlerinde önemli ölçüde artış meydana getirmiştir. Bu artış söz konusu kesitlerde statik yükleme altındaki eğilme momentinin ortalama % 30'u dolayındadır. Bununla beraber, kazık tasarımı maksimum eğilme momentine göre yapıldığından kazığın alt yarısında ortaya çıkan eğilme momenti artışı projelendirme yönünden sabit kesitli kazıklarda önemli olmamakta buna karşılık değişken kesitli kazıklarda önem arz etmektedir.

5- Yatay kuvvetin şiddetinin arttırılması veya tekrarlı yükleme deneylerinde, tekrar sayısının arttırılması kazık çevresindeki zemin yerdeğiştirmelerinin daha geniş ve derin bir bölgeye yayılmasına sebep olmaktadır. Tekrarlı yükleme sırasında yüzeye yakın bölgeden yuvarlanan daneler nedeniyle kazık çevresinde oyulma olmaktadır. Bu nedenle, oyulma ve örselenme bölgesinde zemin reaksiyonlarının azalması sonucu, kazık yerdeğiştirmeleri artmaktadır. Deniz yapılarının tasarımı bu husus dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- 1- Aköz,Y., (1974), "Fotoelastisite", Türkiye İnşaat Müh. 6. Teknik Kongresi, İstanbul.
- 2- Aköz,Y., Sağlamer,A., Öntuna,K.A., (1981), "Yatay Yüklü Kazıkların İncelenmesinde Yeni Bir Yöntem", Zemin Mekaniği ve Temel Müh. Birinci Ulusal Kongresi, Sf.103-113.
- 3- Aköz,Y., Öntuna,K.A., Sağlamer,A., (1981), "A New Approach to the Analysis of Laterally Loaded Piles", 10th International Conf. on SMFE, Stockholm, Vol.1, Sf.587-592.
- 4- American Petroleum Institute, (1975), "Recommend Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", API RP2A.
- 5- İnan,M., (1969), "Düzlemde Elastisite Teorisi", Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 336 sf.
- 6- Burland,J.B., (1973), "Shaft Friction of Piles in Clay A Simple Fundamental Approach", Building Research Establishment Publication, CB 3373.
- 7- Davisson,M.T., Gill,H.L., (1963), "Laterally Loaded Piles in a Layered Soil System", J.S.M.F.D., ASCE, Vol.89, SM3:63-94.
- 8- Davisson,M.T., Prakash,S., "A Review of Soil-Pile Behavior", High Res. Rec., No:39, sf.25-48.

- 9- Det Norske Veritas, (1974), "Rules for the Design, Construction and Inspection of Fixed Offshore Structures", 79 sf.
- 10- Georgiadis, M., Butterfield, R., (1982), "Laterally Loaded Pile Behavior", Proc. of the ASCE, Journal of the Geotechnical Eng. Div., Vol. 108, GTI, January, sf.155-165.
- 11- Gleser, S.M., (1953), "Lateral Load Tests on Vertical Fixed-Head and Free-Head Piles", ASTM, STP 154, sf.75-93.
- 12- Hildebrand, F.B., (1965), "Methods of Applied Mathematics", Prentice Hall Inc.
- 13- Matlock, H., (1956), "Discussion on Paper by B. Mc Clelland, J.A. Focht", Transactions of ASCE, Vol. 121, sf.1064-1086.
- 14- Matlock, H., Reese, L.C., (1960), "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", Proc. of ASCE, Journal of Soil Mech. and Found. Eng. Div., Vol. 86, SMS, October, sf.63-91.
- 15- Mc Clelland, B., Focht, J.A., (1956), "Soil Modulus for Laterally Loaded Piles", Proc. of ASCE Journal of the Soil Mech. and Found. Eng. Div., Vol. 82, No. SM4, sf.1081-1-1081-22.
- 16- Mc Clelland, B., (1974), "Design of Deep Penetration Piles for Ocean Structures", Proc. of ASCE, Journal of the Geotechnical Eng. Div., Vol. 100, No. GT7, July, sf.709-747.
- 17- Palmer, L.A., Thompson, J.B., (1948), "The Earth Pressure and Deflection Along the Embedded Lengths of Piles Subjected to Lateral Thrust". Proc. 2nd Int. Conf. S.M. and F.E., Rotterdam, Vol. 5:156-161.
- 18- Parry, R.H.G., Sağlam, A., (1976), "Single Pile Loading Tests with Radiographic Observations", Cambridge University Interim Report, File No B 1295.

- 19- Poulos,H.G., Davis,E.H., (1980), "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley and Sons, Inc., 397 sf.
- 20- Poulos,H.G., (1982), "Single Pile Response to Cyclic Lateral Load", Proc. of ASCE, Journal of the Geotechnical Eng. Div., Vol.108, GT3, March, sf.355-375.
- 21- Reese,L.C., Matlock,H., (1956), "Non-dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth", Proc. of the Eight Texas Conf. on JMFE, 41 sf.
- 22- Reese,L.C., Cox,W.R., (1968), "Soil Behaviour from Analysis of Tests of Uninstrumented Piles under Lateral Loading", Performance of Deep Foundations; ASTM STP 444, sf.160-175.
- 23- Sağlamer,A., (1977), "Açık Deniz Yapılarındaki Kazıkların Davranışı", Doçentlik Tezi, 210 sf.
- 24- Sağlamer,A., (1978), "Yatay Yüklü Kazıkların Nümerik Analizi", İnşaat Mühendisliği 7. Teknik Kongresi, Ankara, sf.215-228.
- 25- Sağlamer,A., Parry,R.H.G., (1979), "Model Study of Laterally Loaded Piles", 7th European Conf. on SMFE, Vol.2, sf.115-120.
- 26- Sağlamer,A., (1980), "Açık Deniz Kazıklarının Tasarımı", Zemin, Cilt 2, Sayı 2, sf.69-84.
- 27- Sogge,R.L., (1981), "Laterally Loaded Pile Design", Proct. of ASCE, Journal of the Geotechnical Eng. Div., Vol. 107, GT9, September, sf.1179-1199.
- 28- Smith,E.A.L., (1962). "Pile Driving Analysis by the Wave Equation", Trans. of ASCE, Vol.127, Part I, 1145-1193.

- 29- Toğrol,E., (1970), "Kazıklı Temeller", Temel Araştırma Yayınları, No.1, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 154 sf.
- 30- Tomlinson,M.J., (1957), "The Adhesion of Piles Driven in Clay Soils", Proc. 4th. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol.2, sf.61-71.
- 31- Tomlinson,M.J., (1971). "Some Effects of Pile Driving on Skin Friction", Behaviour of Piles, Institute of Civil Engineers, sf.107.
- 32- Ünsaç,O., (1963), "Mukavemet", Kutulmuş Basımevi, Cilt 1, 461 sf.
- 33- Vijayvergia,V.N., Focht,J.A., (1972), "A New Way to Predict the Capacity of Piles in Clay", 4th Offshore Technology Conference, Houston OTC 1718, Vol.2, sf.865-874.

EK

TABLO 1

1. Deneye ait boyutsuz deneysel moment, zemin reaksiyonu, teorik moment, kesme kuvveti ve yerdeğiştirme sonuçları

1. DENEY 2kg statik			
x=0	dm=0.010000014		
x=0.1	dm=0.000000013		
x=0.2	dm=0.400000170		
x=0.3	dm=0.440000000		
x=0.4	dm=0.424000000		
x=0.5	dm=0.300000100		
x=0.6	dm=0.200000740		
x=0.7	dm=0.100000140		
x=0.8	dm=0.101000043		
x=0.9	dm=0.033000044		
x=1	dm=0.013940932		
P			
x=0	0.000000014	0.044000	
x=0.1	4.000000007	0.430000000	
x=0.2	3.000000000	0.470000000	
x=0.3	3.000000000	0.450000000	
x=0.4	2.000000000	0.460000000	
x=0.5	2.777777777	0.400000000	
x=0.6	1.666666666	0.300000000	
x=0.7	0.477777777	0.200000000	
x=0.8	-0.100000000	0.100000000	
x=0.9	-4.100000000	0.000000000	
x=1	-0.410000000	0.000000000	
T			
x=0	1	-0.004500000	
x=0.1	0.000000000	-0.000000000	
x=0.2	0.000000000	-0.000000000	
x=0.3	0.000000000	-0.000000000	
x=0.4	0.000000000	-0.000000000	
x=0.5	0.000000000	-0.000000000	
x=0.6	0.000000000	-0.000000000	
x=0.7	0.000000000	-0.000000000	
x=0.8	0.000000000	-0.000000000	
x=0.9	0.000000000	-0.000000000	
x=1	0.000000000	-0.000000000	

TABLO 2
Model Kazık Deneylerinde Tipik Deneysel Ölçüm Sonuçları

6.DENEY		7.DENEY		8.DENEY	13.DENEY	
DERİNLİK cm	H=2 kg Moment	H=5 kg Moment	H=8 kg Moment	H=5 kg Moment	Derinlik cm	H=9 kg Moment
0	19.76	45.91	75.28	47.83	0	63.19
7	26.62	64.42	107.37	62.43	6	98.95
11	29.21	60.72	115.02	61.82	9	113.32
15	28.05	46.65	82.53	60.58	12	121.10
19	26.36	17.28	55.42	52.54	15	118.74
23	20.64	3.81	4.49	38.37	18	107.20
33	6.96	3.21	2.92	6.39	24	68.32
41	1.62	1.88	2.20	2.13	27	43.31
48	2.47	2.47	3.70	2.42	33	9.65
60	2.59	2.96	3.95	2.69	36	3.03
66	1.80	1.57	2.24	2.19	39	0.76
72	0.90	0.00	0.00	0.67		
Alt Def. saatinin ze. yüzüne uzaklığı (cm)	4.4	4.9	4.9	5.0		1.9
Üst Def. saatinin ze. yüzüne uzaklığı (cm)	9.7	10.2	10.2	10.2		7.3
Ara Mesafe(cm)	5.3	5.3	5.3	5.2		5.4
Alt Okuma(0.01mm)	144.8	184	338.5	314.0		433.0
Üst Okuma(0.01mm)	299.4	245.0	439.0	395.7		563.0

TABLO 5

II. Grup Deneylere Ait Boyutsuz Polinom Katsayıları.

DENEY NO	YÜK (kg)	a_0 10^{-3}	a_1 10^{-3}	a_2 10^{-6}	a_3 10^{-6}	a_4 10^{-9}
1	2 5 10 Tek	358.1 388.8 388.4	59.53 52.17 51.74	-6774 -5639 -5718	202,3 152.8 158.5	-1884 -1248 -1335
2	3.5	360.3	59.51	-7048	219.8	-2143
3	2	393.1	39.92	-4261	103.2	-6590
4	2	173.0	29.42	-2459	57.06	-418.8
5	2 8	177.5 176.8	27.63 35.59	-2529 -2343	63.25 42.88	-503.1 -229.9
6	2 7	124.4 120.0	16.80 16.35	-1154 -950.1	22.07 15.64	-133.5 - 81.95
7	5 8	133 130	8.495 13.56	-841.7 -1097	18.43 22.63	-122.7 -145.0
8	5 8	125.7 120.2	12.44 15.92	-963.4 -1108	19.17 21.11	-118.5 -126.6
9	2 5 7	204.1 240.5 241	20.45 20.73 23.42	-1967 -2027 -2210	46.36 47.26 51.16	-334.3 -336.6 -363.3
10	5	316.4	20.82	-1169	11.82	-590.5
11	9 15 Tek	168.1 169.3	33.31 34.21	-2228 -2320	31.08 37.15	-38.15 -3.204
12	8	196.6 197.5	32.10 36.36	-1316 -1401	40.90 48.08	-1394 -1573
13	9	168.1	21.72	-356.7	42.86	-898.6

```

10 REM ERKAN
20 DIM a(8,8)
30 DIM o(8)
40 DIM b(8)
41 LET k1=0
42 INPUT "tv=0,pr=1: ";tvi
43 INPUT "kacinci deney: ";ks;
" Yuk ";yk;" tekrar=? ";b$
50 READ p,l,ac,c1,c2,at,em,ao
60 FOR n=1 TO 4
70 READ o(n)
80 NEXT n
81 READ k
90 FOR m=1 TO k
100 LET h=m/(4*(m+2)*(m+3))
110 FOR n=1 TO k
120 LET g=n/(2*(n+2)*(n+3))
130 LET d1=((h*g)/6)*((5*n+14)/(
(n+4))-((h*g)/2)*((m+6)/(m+4))+((
4*h)/(m*(m+n+5))))
140 LET a(m,n)=d1-((12*h)/(m*((
n+3)*(m+5))))-(n/(5*((m+3)*((n+3
)*(n+5)))))
160 NEXT n
170 NEXT m
180 LET c=1-o(1)/p
190 LET db=0.5+0.75*ac+(o(2)/p)
#l
200 LET e=.5*ac-(o(3)/p)*l+2
210 LET fb=(o(4)/p)*l+3
220 FOR n=1 TO k
230 LET g=n/(2*(n+2)*(n+3))
231 LET b(n)=g*c/2-(g*db/6)*((5*
n+14)/(n+4)+(g*e/20)*(21*n+57)/(
n+5)-(g*fb*0.4)*(3*n+8)/(n+5))
233 NEXT n
234 LET r=k
235 DIM x(r+1)
240 DIM p(r+1,r+1)
250 DIM w(r,r)
260 FOR i=1 TO r
270 FOR s=1 TO r
280 LET w(i,s)=a(i,s)
290 NEXT s
300 NEXT i
310 FOR s=1 TO r
320 FOR i=1 TO r
330 FOR j=1 TO r
340 LET a(i,j)=-a(i,j): NEXT j
350 NEXT i
360 IF i=s OR j=s THEN GO TO 38
370 LET a(i,j)=a(i,j)-a(i,s)*a(
s,j)/a(s,s)
380 NEXT j: NEXT i
390 FOR i=1 TO r
400 IF i=s THEN GO TO 430
410 LET a(i,s)=-a(i,s)/a(s,s)
420 LET a(s,i)=-a(s,i)/a(s,s)
430 NEXT i
440 LET a(s,s)=-1/a(s,s)
450 NEXT s
460 FOR i=1 TO r: FOR j=1 TO r
470 LET a(i,j)=-a(i,j): NEXT j
NEXT i
480 FOR i=1 TO r
490 FOR j=1 TO r
500 LET x(i)=x(i)+a(i,j)*b(j)
510 NEXT j
520 NEXT i
530 NEXT i
540 FOR i=1 TO r: LET x(i)=0: F
OR j=1 TO r
550 LET x(i)=x(i)+a(i,j)*b(j)
560 NEXT j
570 NEXT i
571 LPRINT " "
572 IF tvi=1 THEN LPRINT k;" . A
DIM"
573 IF tvi=0 THEN PRINT k;" . AD
IM"
574 LPRINT " "

```

```

576 FOR i=1 TO r STEP r
576 FOR j=1 TO r
577 IF tvi=0 THEN PRINT "z(";j);
")=";x(j)
578 IF tvi=1 THEN LPRINT "z(";j);
")=";x(j)
579 NEXT j
580 NEXT i
580 LPRINT " "
581 LPRINT " "
582 LPRINT ks;"", DENE: "yK;"
kg
583 DIM z(8)
584 FOR n=1 TO k
585 LET z(n)=x(n)
586 NEXT n
587 IF k1>0 THEN GO TO 676
588 LET xc=-.1
589 LET a01=a0*(1/(p*(1)))
590 FOR c=1 TO 11
591 LET xc=xc+.1
592 LET cm=0
593 LET cm2=(xc/p)*o(1)
594 FOR n=1 TO 4
595 IF n=1 THEN GO TO 671
596 LET cm1=(o(n)*(1(n-1))/p)*
(xc+n)
597 LET cm=cm+cm1
598 LET xcm=a01+cm2+cm
599 NEXT n
600 IF tvi=0 THEN PRINT "x=";xc
;TAB 6;"dm=";xcm
601 IF tvi=1 THEN LPRINT "x=";x
c;TAB 6;"dm=";xcm
602 NEXT c
603 LET k1=1
604 LPRINT " "
605 IF tvi=0 THEN PRINT TAB 8;"
0";TAB 18;" M
606 IF tvi=1 THEN LPRINT TAB 8;"
0";TAB 18;" M
607 LET xc=-.1
608 FOR c=1 TO 11
609 LET xc=xc+.1
610 LET yu=0
611 LET x4=xc
612 LET kj=0
613 LET s3=ac+x4
614 LET s1=0
615 LET s2=0
616 LET s7=0
617 LET ax=1+1.5*ac-3*ac*xc
618 FOR n=1 TO k
619 LET b1=n/(2*((n+2)*(n+3)))-
(3/(n+3))*xc+xc*(n+1)
620 LET b2=b1*z(n)
621 LET yu=yu+b2
622 LET q=yu+ax
623 LET s4=z(n)*n/(2*(n+2)*(n+3)
)
624 LET s5=(3/(n+3))*z(n)
625 LET s6=(z(n)*xc*(n+3))/(n+
2)*(n+3)
626 LET s1=s1+s4
627 LET s2=s2+s5
628 LET s7=s7+s6
629 LET s8=.5*(1+1.5*ac+s1)*xc+
2
940 LET s9=(1/6)*(3*ac+s2)*xc+3
950 LET m=s3-s8+s9-s7
1100 NEXT n
1101 IF tvi=0 THEN PRINT "x=";xc
;TAB 6;q;TAB 18;;m
1102 IF tvi=1 THEN LPRINT "x=";x
c;TAB 6;q;TAB 18;;m
1103 NEXT c
1104 LPRINT " "

```

```

1137 IF tvi=1 THEN LPRINT TAB 8;
1138 T TAB 18; Y
1139 IF tvi=0 THEN PRINT TAB 8; "
1140 T TAB 18; Y
1141 LET xc=-.1
1142 FOR c=1 TO 11
1143 LET xc=xc+.1
1144 LET us=0
1145 LET s1=0
1146 LET s2=0
1147 LET ta=0
1148 FOR n=1 TO k
1149 LET s4=z(n)*n/(2*(n+2)*(n+3))
1150 LET s5=(3/(n+3))*z(n)
1151 LET s1=s1+s4
1152 LET s2=s2+s5
1153 LET tr=(1/(n+2))*(z(n)*xc+(n+2))
1154 LET ta=ta+tr
1155 LET ty=(1+1.5*ac+s1)*xc
1156 LET tz=.5*(3*ac+s2)*xc+2
1157 LET th=1-ty+(z-ta)
1158 LET yr=(z(n)*xc+(n+5))/(n+2)*((n+3)*((n+4)*(n+5)))
1159 LET ya=ya+yr
1160 LET yz=(1/24)*(1+1.5*ac+s1)*xc+4
1161 LET yl=.5*(ac*xc+2)+(1/6)*xc+3
1162 LET ym=yl-yy+yz-ya
1163 LET yn=-(p*(l+2)*ym)/(em*at)+c1*xc+c2
1164 NEXT n
1165 IF tvi=0 THEN PRINT "x=";xc
1166 TAB 6;tn;TAB 19;yn
1167 IF tvi=1 THEN LPRINT "x=";xc
1168 TAB 6;tn;TAB 19;yn
1169 NEXT c
1170 GO TO 81
1171 STOP
1172 DATA 2,29,.34483,.01257,-.0
1173 1.5333,32000,17.215522
1174 DATA 1.8798754,-.13271937,.
1175 00037467293,.000043461568
1176 DATA 5
1177 INPUT "alt=";alt;"e=";di;"a
1178 ra=";ar;"alt saat=";qs;"ust saat
1179 ="qu;"p=";p;"l=";le
1180 LET jj=-qu+((p*di+3)/147201)
1181 LET c1=1/(alt-di)
1182 LET c1=c1*(qs+jj-((p*alt+2)*(2*alt+3*ar))/294402))
1183 LET c12=jj+c1*di
1184 LET c2=c12/le
1185 PRINT "c1=";c1,"c2=";c2

```

T E Ş E K K Ü R

Doktorayı yöneten, çalışma boyunca değerli fikirlerinden yararlandığım Doç.Dr.Ahmet SAĞLAMER'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında sağladığı olanaklardan ve gösterdikleri ilgiden dolayı Prof.Dr.Yalçın AKÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Gösterdikleri ilgiden dolayı Doç.Tuncer KODAMANOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Ö Z G E Ç M İ S

1953 yılında Bolu'nun Seben ilçesinde doğdu. İlk öğrenimini Bolu'nun Düzce ilçesi Atatürk İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimini Uşak Lisesi'nde tamamladı. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi'nden 1975 yılında mezun oldu. 1976-1977 yılları arasında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Geoteknik dalında MMLS öğrenimi yaptı. Askerlik görevini 1978-1980 yıllarında Karadeniz Bölge Komutanlığında yaptı. 1981 yılında Geoteknik Anabilim Dalı'na Doktora adayı olarak kabul edildi. Halen Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak görevini sürdürmektedir.

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi