

YATAY YÜKLÜ KAZIK ANALİZ YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

H. Fatih Kulaç
İnşaat Yüksek Mühendisi, ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.
Prof. Dr. H. Turan Durgunoğlu
Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ABSTRACT

Laterally loaded pile analysis should be carried out considering the interaction between soil and structure. For this purpose, the western methods of analysis implemented for the last 40 years and the last USSR specification on pile foundations are comparatively evaluated. At least one illustrative example is solved out for each method of analysis presented herein. The comparisons are basically relied upon the numerical values obtained from the illustrative examples. At the end of each comparison, the design variation between implementation of these methods of analysis is briefly evaluated.

ÖZET

Yatay yüklü kazık analizi zemin ve yapı elemanları arasındaki etkileşim dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla, son 40 yıl içerisinde uygulanan Batı metodları ve son SSCB şartnamesince öngörülen hesap yöntemi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu karşılaştırmalı çalışma içerisinde incelenen hesap yöntemleri ile en az bir adet temsili örnek problem çözülmüştür. Karşılaştırmalar genelde, örnek problemlerden elde edilen sayısal değerlere dayandırılmıştır. Karşılaştırmaların sonunda projelendirmenin bu çalışma içerisinde sunulan yöntemlerin herhangi biri seçilerek yapılması halinde ne miktarda proje farklılıklarının ortaya çıkabileceği incelenmiştir.

1. GİRİŞ

Kazıklı temeller; viyadük, köprü, liman, baca, kule ve benzeri bir çok inşaat mühendisliği uygulamasında yatay yüklere maruz kalmaktadır. Kazıklı temellerin yatay yükler altında projelendirilmesinde kazık-zemin etkileşimi dikkate alınmalıdır. Kazık boyunca çeşitli derinliklerde, eğilme momenti, kesme kuvveti, zemin gerilmeleri ve deplasmanlar belirlenerek şartnamelerce öngörülen yöntemler ile kazıklı temel projeleri gerçekleştirilir.

Bu amaçla, bu çalışma kapsamında Batı'da uygulanan ve elastik esaslara dayanan iki(2)

ayrı yöntem ve Sovyet Sosyalist Cumhuriyetleri Birliği'nde (SSCB) uygulanan kazıklı temeller şartnamesince öngörülen yöntem karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca, değişik Batı yöntemlerinin ve SSCB yönteminin yatay yüklü kazık arkasındaki zeminin taşıma kapasitesi hakkındaki kabul ve hesap yöntemleri de ele alınmıştır. Her yöntem ile en az bir tipik problem çözülerek değerlendirmeler genelde bunlar sonucunda elde edilen sayısal değerlere dayandırılmıştır.

2. BATI YÖNTEMLERİ

Bu maksatla, elastik esaslara dayanan ve kazık-zemin etkileşimini sonlu farklar ve sonlu elemanlar nümerik yöntemleri ile simule eden iki ayrı metod sunulmuştur.

2.1. Sonlu Farklar Yöntemi

Sonlu farklar yöntemi için geçerli diferansiyel denklem ve bu denklemin bu çalışmada uygulanan sonlu farklar nümerik yöntemi açılımı (Desai & Christian (1977)) aşağıda verilmiştir.

Diferansiyel Denklem

Yatay yüklü kazık problemlerinde aşağıda sunulan diferansiyel denklem literatürde bir çok araştırmacı tarafından uygulanmıştır. (Reese(1960), Bowles(1968))

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} + E_y y = 0 \quad (1)$$

bu denklemde,

E,I : kazık kesitinin elastisite modülü ve atalet momenti

y : yatay deplasman

x : kazık üst ucundan mesafe

Px : düşey yük

Es : yatay zemin modülü (yay katsayısı)

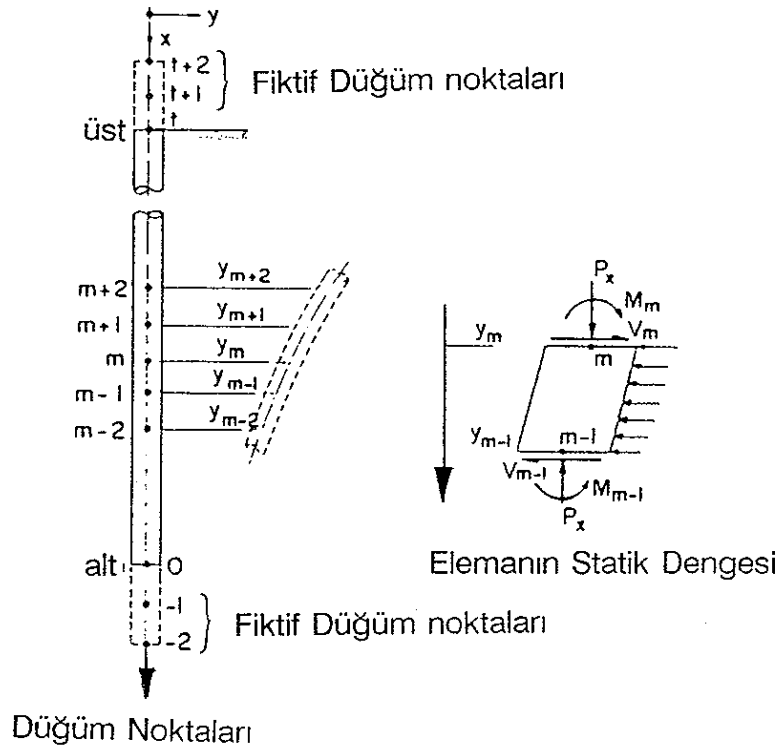
olarak verilmektedir.

Sonlu Farklar Açılımı

Şekil 1'de sunulan "m" düğüm noktası için (1) no'lu denklemin sonlu farklar açılımı (central-implicit) aşağıda verilen hesap yöntemi ile elde edilmiştir.

$$\left[\frac{d^2}{dx^2} \left(R \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \right] - \left(\frac{d^2 M}{dx^2} \right)_m = \frac{(dM/dx)_{m-1/2} - (dM/dx)_{m+1/2}}{h} \quad (2)$$

bu bağıntı bir elemanın statik dengesinden elde edilmiş olup M : kesit momenti, h : düğüm noktaları arası mesafe(eleman boyu) ve R = EI olarak verilmektedir. dM/dx ve d²y/dx² in sonlu farklar açılımının (2) no'lu bağıntıda yerlerine konulması sonucunda aşağıdaki bağıntı elde edilir.



Sekil 1 - Sonlu Farklar Modellemesi

$$\left(\frac{d^2M}{dx^2}\right)_m \approx \frac{1}{h^4} [R_{m-1}y_{m-2} + (-2R_{m-1} - 2R_m)y_{m-1} + (R_{m-1} + 4R_m + R_{m+1})y_m + (-2R_m - 2R_{m+1})y_{m+1} + R_{m+1}y_{m+2}] \quad (3)$$

Benzer şekilde,

$$P_x \frac{d^2y}{dx^2} \approx \frac{P_x(y_{m-1} - 2y_m + y_{m+1})}{h^2} \quad (4)$$

bağıntısı elde edilir ve (3) ve (4) no'lu bağıntıların (2) no'lu bağıntıda yerlerine konması sonucunda (1) no'lu diferansiyel denklemin genel sonlu farklar açılımı elde edilir.

$$\begin{aligned} & R_{m-1}y_{m-2} + (-2R_{m-1} - 2R_m + P_x h^2)y_{m-1} \\ & + (R_{m-1} + 4R_m + R_{m+1} - 2P_x h^2 + E_s h^4)y_m \\ & + (-2R_m - 2R_{m+1} + P_x h^2)y_{m+1} \\ & + R_{m+1}y_{m+2} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

(5) no'lu genel bağıntı Şekil 1'de gösterilen 0,1,2, ... ,t düğüm noktaları için yazılarak deplasman, y'e bağımlı t+1 adet denklem elde edilir. Ancak bu denklemlerin çözülebilmesi için kazık alt ve üst uçlarındaki geometrik ve yükleme şartları da hesaplara dahil edilmelidir. Bu konuda detaya girilmeksizin sınır şartları da dikkate alınarak problemin çözümü için gereken t+5 adet denklem takımı bir matris şeklinde (6) no'lu denklemde sunulmuştur. Sonuçta elde edilen ve (6) no'lu matris bağıntısında sunulan denklem takımı GAUSS yöntemi ile çözülerek 0 ila t düğüm noktalarında (Şekil 1) yatay deplasmanlar eklenmiştir. Projelendirilmede gereken diğer parametreler (M_m : moment, V_m : kesme kuvveti ve σ_m : zemin gerilmesi) ise "m" düğüm noktası için aşağıda verilen sonlu farklar açılımları ile elde edilmiştir.

$$M_m \approx \frac{R_m(y_{m-1} - 2y_m + y_{m+1})}{h^2} \quad (7)$$

$$V_m \approx \frac{1}{2} \left\{ \frac{R}{h^3}y_{m-2} + \left(\frac{2R}{h^3} + \frac{P_x}{h} \right)y_{m-1} + \left(\frac{2R}{h^3} - \frac{P_x}{h} \right)y_{m+1} - \frac{R}{h^3}y_{m+2} \right\} \quad (8)$$

$$\sigma_m = y_m E_s / D \quad (9)$$

Sonuçların Sunulması

Geliştirilen kompüter programı (LLPILE) aracılığı ile projelendirmede kullanılacak parametrelerin kazık boyunca değişimi kullanıcının isteğine bağlı olarak tablo ve grafikler halinde elde edilebilmektedir. Problemin geometrisi, kazık başlığına uygulanan üst yapı yükleri vs'de çizim halinde sunulmaktadır.

Örnek Problem

L = 20.0 m boyunda, D = 1.0 m çapında yerinde dökme betonarme ($E_c = 2.028 \times 10^8$ kPa) kazığa H = 200 kN yatay yük ve M = 100 kNm moment etkimektedir. Kazık başlığı serbest olup zeminin yatay elastisite modülü $E_s = 5000 z$ (z : derinlik, m ; E_s : kPa) olarak alınmıştır. Yukarıda tarifli örnek problem LLPILE ile çözülerek kompüter çıktıları Tablo 1 ve Şekil 2'de sunulmuştur. Elde edilen önemli projelendirme parametreleri aynı problemin diğer yöntemler ile de çözülmesinden sonra topluca özet bir tabloda sunulacaktır.

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu amaçla, sonlu elemanlar nümerik yöntemini kullanan ve P. Fritz(6) tarafından gerçekleştirilen bir hazır program kullanılmıştır. Bu program ile oldukça karmaşık zemin modellemeleri (elasto-plastik, plastik, tiksotropik) gerçekleştirilebildiği halde bu çalışmanın sınırları dahilinde sadece elastik modelleme yapılmıştır.

Eleman Çeşitleri

Zeminin temsil edilmesinde üçgen elemanlar, kazığın temsil edilmesinde ise çubuk elemanlardan oluşan iki boyutlu kafesler kullanılmıştır.

Örnek Problem

Daha önce tariflenen örnek problem bir kez de sonlu elemanlar metodu ile çözülmüştür. Bu amaçla, 1317 düğüm-noktası, 2480 üçgen eleman ve 101 çubuk eleman kullanılarak, 31.0 m boyunda ve 40.0 m derinliğinde bir zemin kesiti ve kazık simule edilmiştir. Hesaplarda kullanılan sonlu elemanlar modellemesi Şekil 3'de sunulmuştur. Bu model içinde kazığın çubuk elemanlar ile temsil edilme şekli ise Şekil 4'de sunulmuştur. Sonuç olarak elde edilen kesit tesirleri-derinlik bağıntısı Şekil 5, deplasman konturları Şekil 6 ve maksimum kayma gerilmesi konturları ise Şekil 7'de sunulmuştur. Önemli projelendirme parametreleri aynı problemin SSCB yöntemi ile de çözülmesinden sonra topluca bir özet tabloda verilmiştir.

TABLO 1 : Sonlu Farklar Metodu ile Örnek Problem Çözümü

SONLU ELEMANLAR METODU İLE YATAY YÜKLÜ KAZIK ANALİZİ

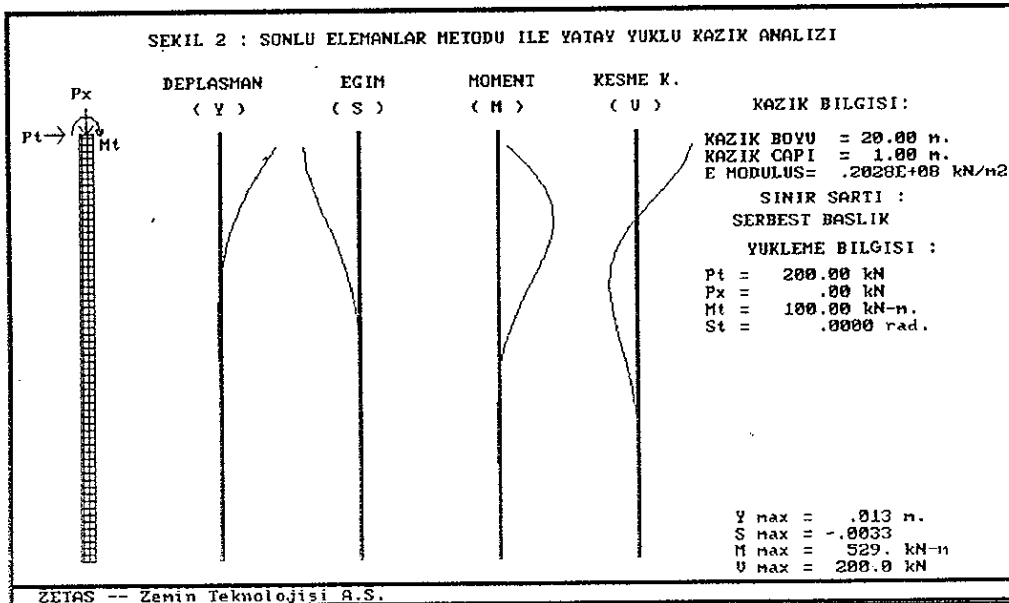
KAZIK ÇAPRI = 1.00 m
 KAZIK BOYU = 20.00 m
 KAZIK BAŞLIĞI SARTI (1) - SERBEST(2) --> SEÇİLEN 2 ŞİŞİDE
 ELASTİSİTE MODULU= 2020000. kN/m²
 YATAY YÜK = 200.0 kN
 BAŞLIKTAKI MOMENT= 100.0000 RAD/KNm
 DÜŞÜY YÜK = .0 kN

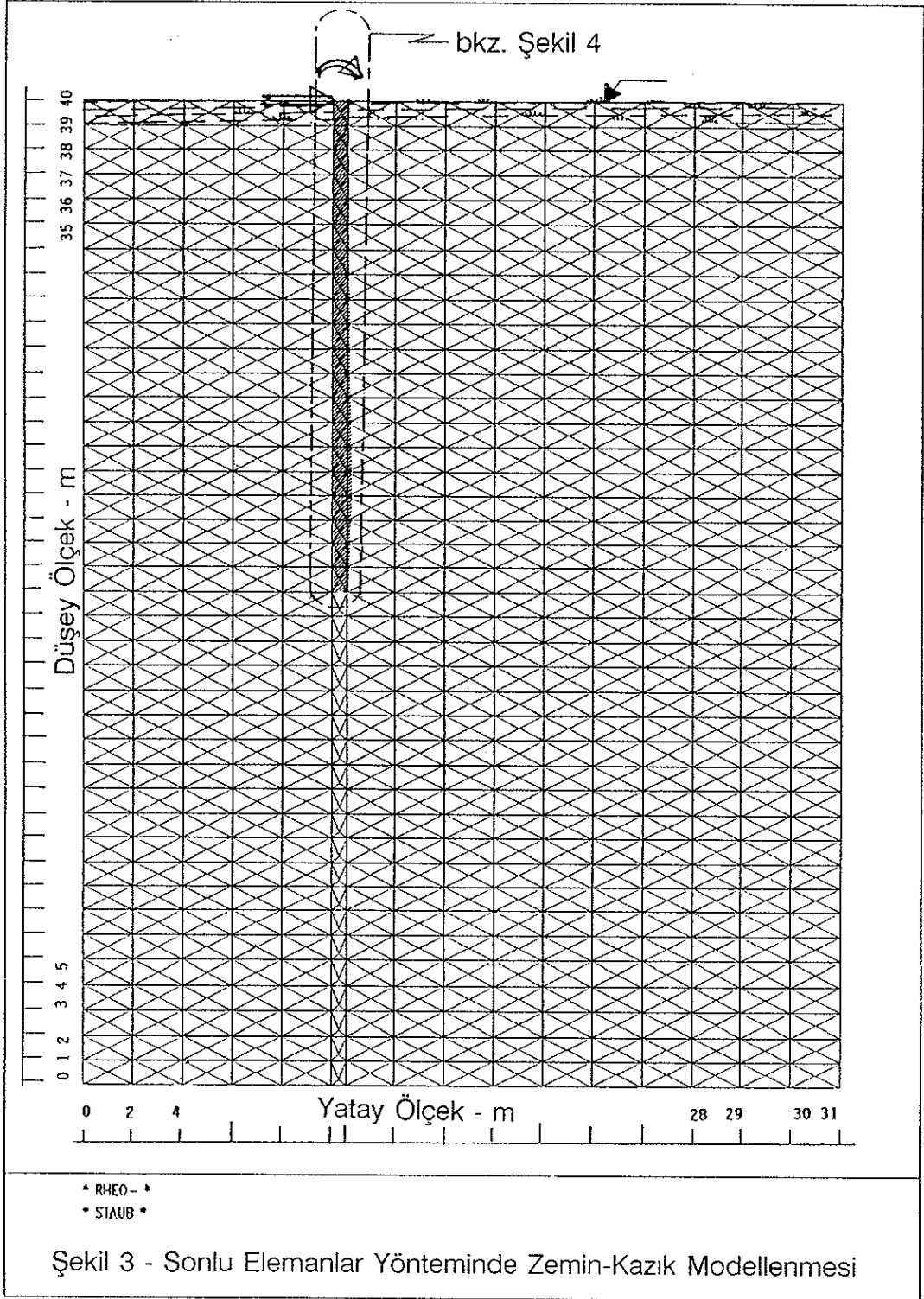
KESİM SAYISI = 20

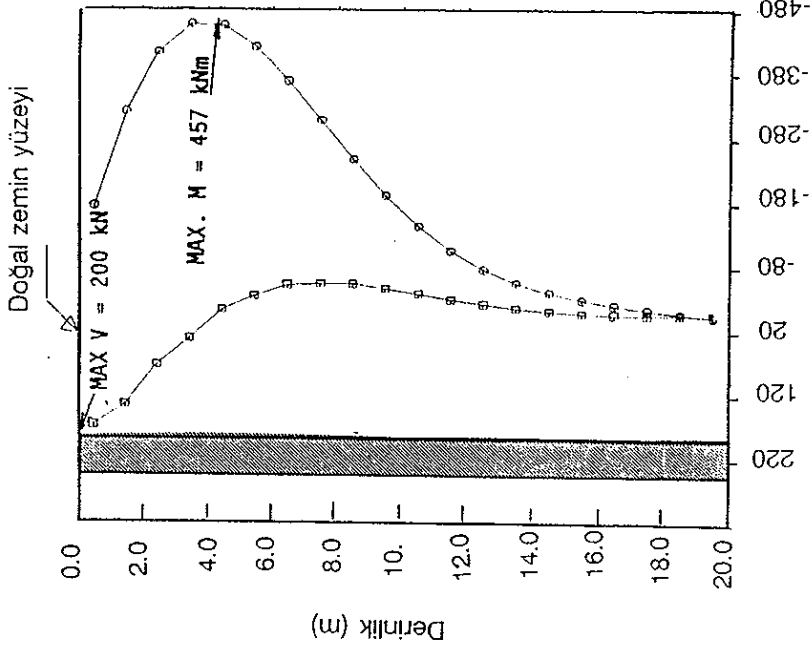
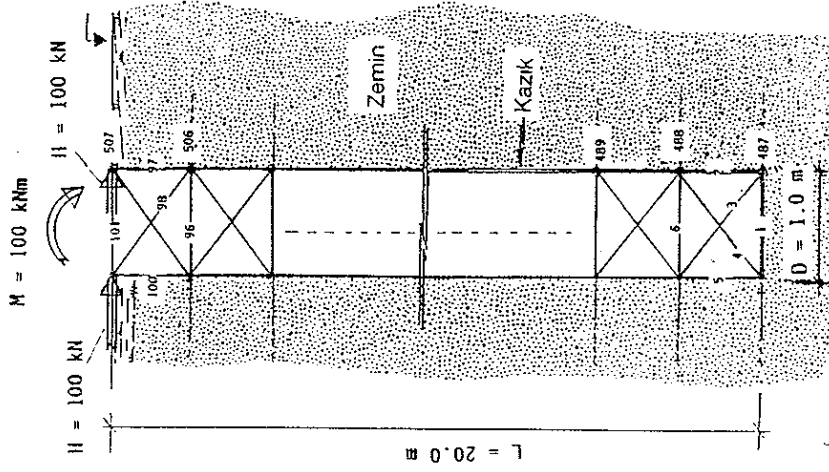
HER DÜĞÜM NOKTASINDAKİ ZEMİN RİJİLİĞİ

NOKTA > 1 ES = 100000. kN/m²
 NOKTA > 2 ES = 95000. kN/m²
 NOKTA > 3 ES = 90000. kN/m²
 NOKTA > 4 ES = 85000. kN/m²
 NOKTA > 5 ES = 80000. kN/m²
 NOKTA > 6 ES = 75000. kN/m²
 NOKTA > 7 ES = 70000. kN/m²
 NOKTA > 8 ES = 65000. kN/m²
 NOKTA > 9 ES = 60000. kN/m²
 NOKTA > 10 ES = 55000. kN/m²
 NOKTA > 11 ES = 50000. kN/m²
 NOKTA > 12 ES = 45000. kN/m²
 NOKTA > 13 ES = 40000. kN/m²
 NOKTA > 14 ES = 35000. kN/m²
 NOKTA > 15 ES = 30000. kN/m²
 NOKTA > 16 ES = 25000. kN/m²
 NOKTA > 17 ES = 20000. kN/m²
 NOKTA > 18 ES = 15000. kN/m²
 NOKTA > 19 ES = 10000. kN/m²
 NOKTA > 20 ES = 5000. kN/m²
 NOKTA > 21 ES = 0. kN/m²

NOKTA	DEFORM - m	EGİM - RAD	MOMENT - kNm	KESİM K - kN	ZEMİN REAK. - kPa
21	.013457	-.003291	100.	200.	0.
20	.010216	-.003090	300.	174.	51.
19	.007276	-.002714	449.	113.	73.
18	.004787	-.002225	525.	40.	72.
17	.002826	-.001695	529.	-24.	57.
16	.001396	-.001190	477.	-70.	35.
15	.000446	-.000754	390.	-94.	13.
14	-.000112	-.000413	290.	-98.	-4.
13	-.000379	-.000170	193.	-89.	-15.
12	-.000452	-.000017	112.	-71.	-20.
11	-.000412	.000065	51.	-51.	-21.
10	-.000322	.000096	10.	-32.	-18.
9	-.000221	.000095	-12.	-16.	-13.
8	-.000133	.000077	-22.	-5.	-9.
7	-.000067	.000055	-23.	2.	5.
6	-.000023	.000034	-19.	5.	2.
5	.000002	.000018	-13.	5.	0.
4	.000014	.000008	-8.	5.	1.
3	.000018	.000002	-4.	3.	2.
2	.000018	.000000	-1.	2.	2.
1	.000018	.000000	0.	0.	2.



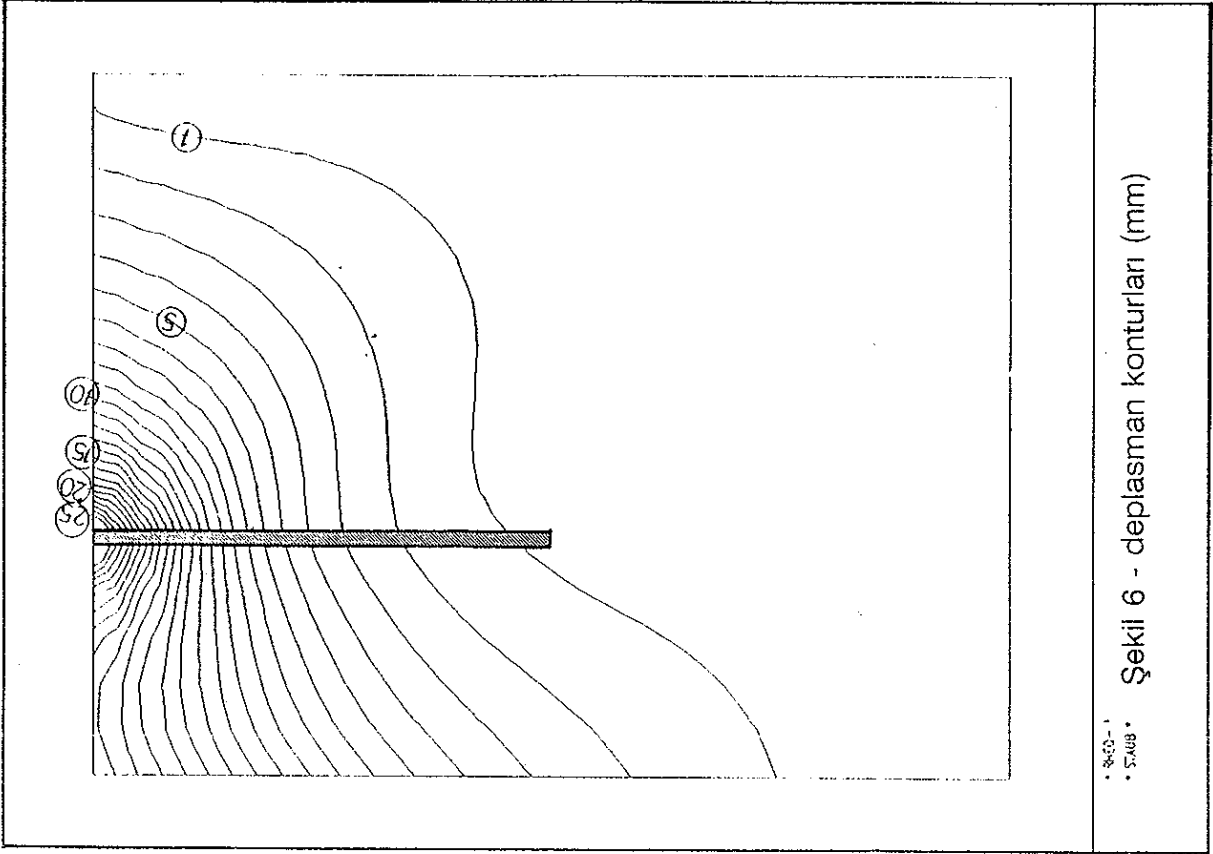




Moment(kNm) ve Kesme Kuvveti(kN)

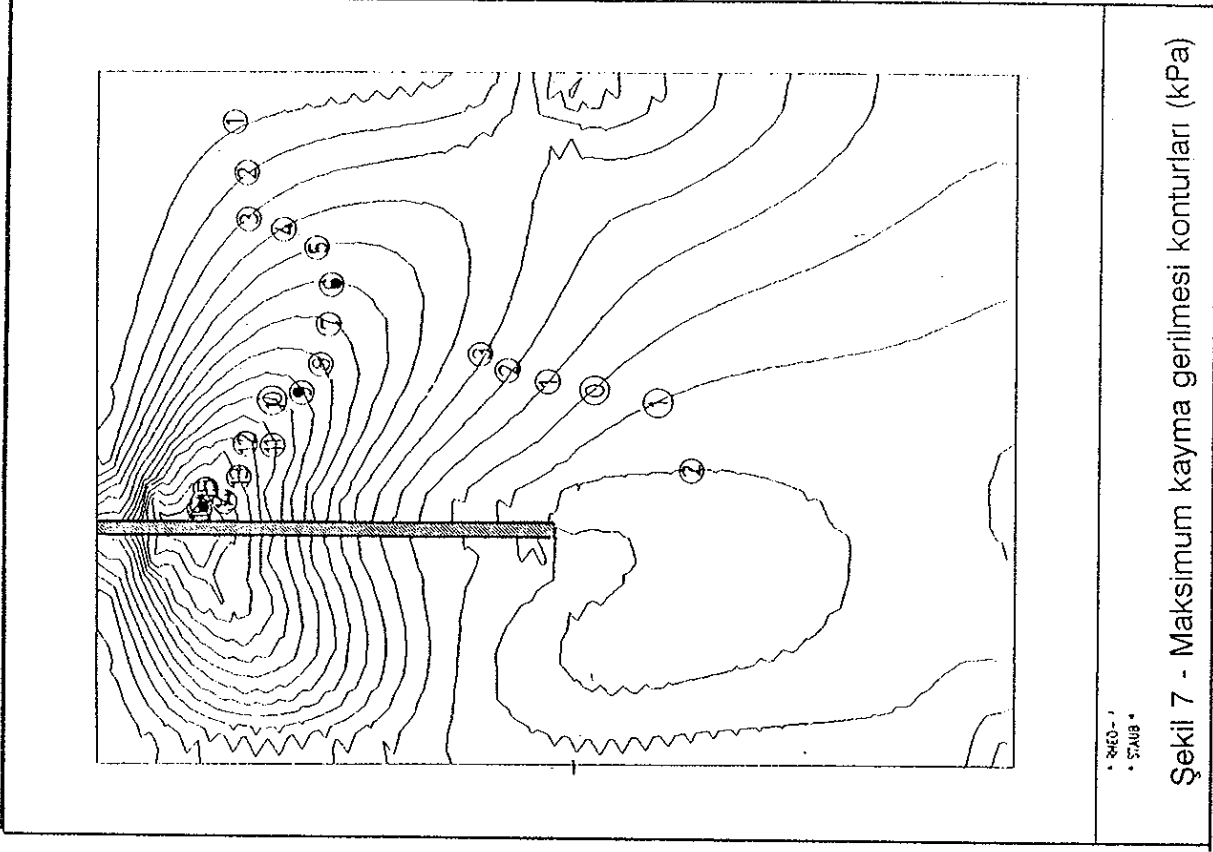
Şekil 5 - Kesit Tesirleri

Şekil 4 - Zemin içerisinde kazık davranışının çubuk elemanlar ile simüle edilmesi



• 460-1
• STAUB •

Şekil 6 - deplasman konturları (mm)



• 460-1
• STAUB •

Şekil 7 - Maksimum kayma gerilmesi konturları (kPa)

3. SSCB YÖNTEMİ

Çalışmanın bu bölümünde kazıklarla ilgili SSCB şartnamesinde (CNIP 2.02.03-85) önerilen yatay yüklü kazık hesap yöntemi sunulmaktadır. SSCB şartnamesinde ancak çok özel durumlarda zeminin plastik deformasyonlarına izin verilmekte ve genelde uygulamalar için zeminin elastik sınırlar içinde kaldığı kabul edilmektedir. Bu nedenle, daha önce sunulan iki Batı yöntemi ile uyum içinde olacak şekilde sadece elastik formülasyonlar dikkate alınmıştır. Bu amaçla şartnamede verilen tüm formülasyonlar bir hesap akış diyagramı haline getirilerek Şekil 8'de sunulmuştur. Referans olarak verilen tablolar ise ilgili şartnamede verilmektedir. Hesap yöntemi, ilgili şartnamede detaylı olarak açıklanmadığı halde daha çok elastik yöntemlere dayandığı ancak model testler ile de korele edildiği tahmin edilmektedir.

3.1. Örnek Problem

Daha önce tariflenen örnek problem bir kez de SSCB yöntemi ile çözülmüştür. Sonuçta Şekil 8'de sunulan hesap akış diyagramı izlenerek gerçekleştirilen hesaplar aşağıda sunulmuş ve özet değerler 10.0 m'lik kazık boyu için aşağıda verilmiştir.

4. İNCELEN YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

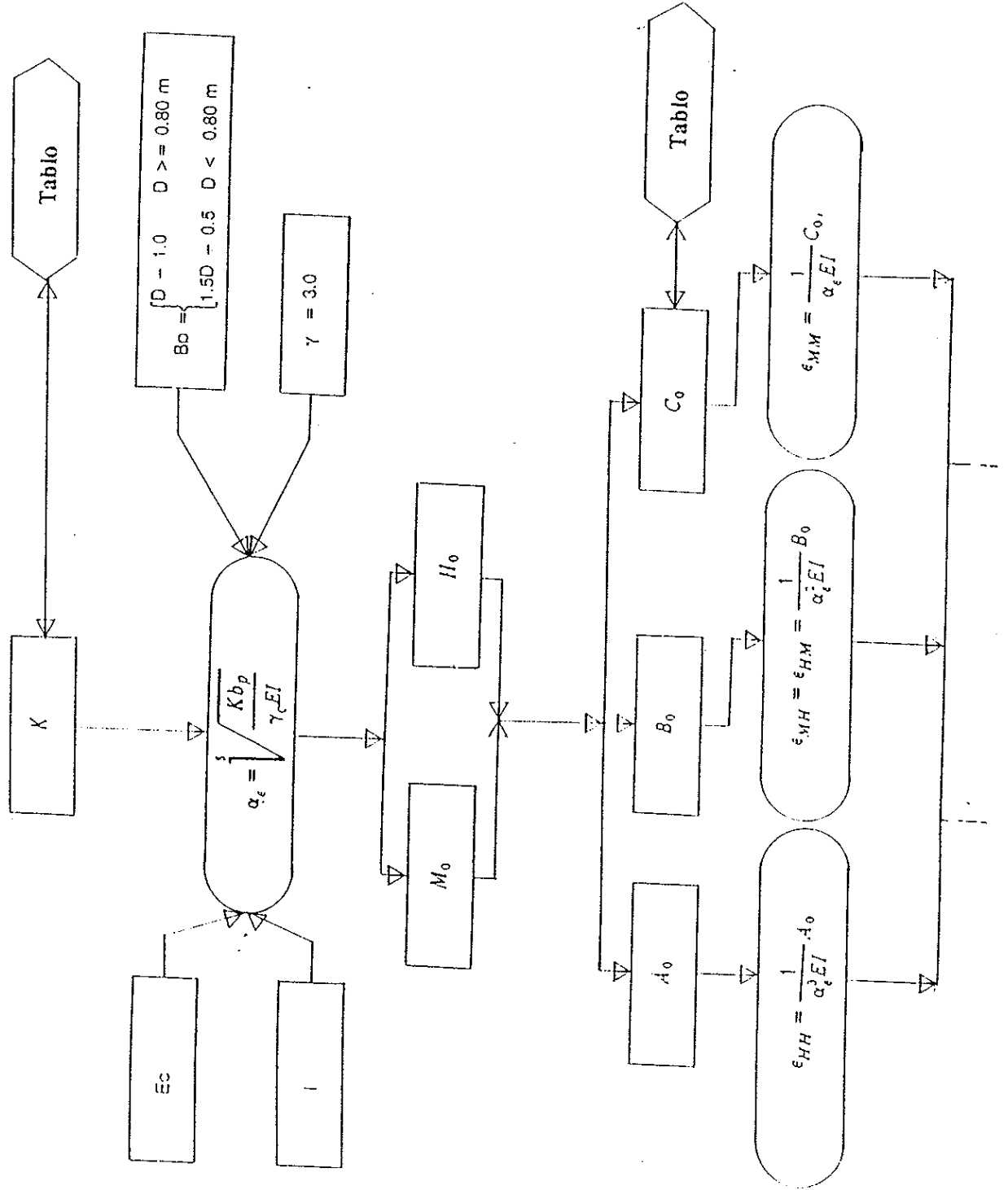
İncelenen üç(3) ayrı yöntem ile çözülen örnek problem için elde edilen ve projelendirmede doğrudan kullanılan parametreler Tablo 3'de topluca sunulmuştur bu tablodan aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür.

Tablo 3 - Proje Kriterlerinin Karşılaştırılması

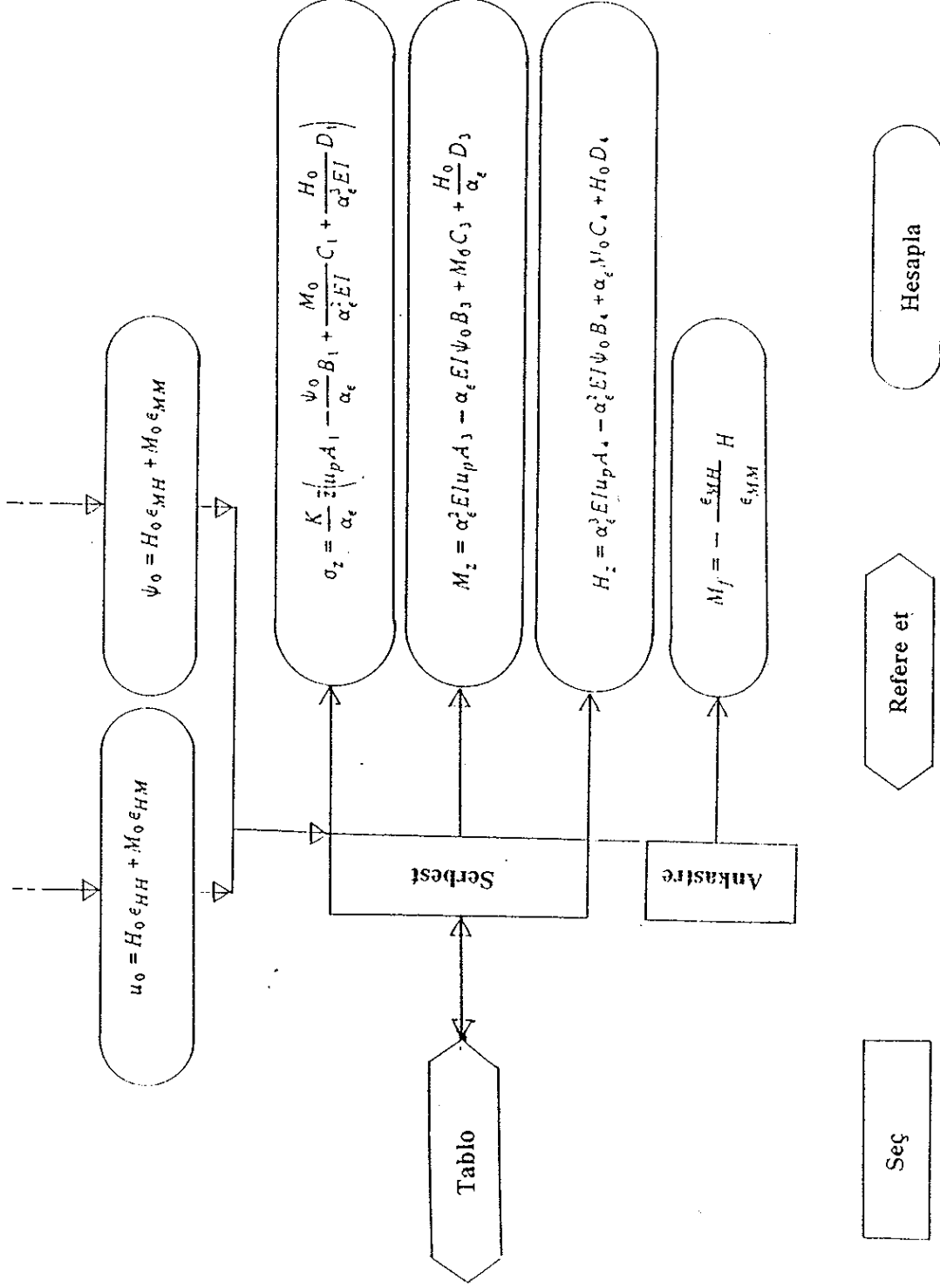
Proje Kriteri	Sonlu Farklar	Sonlu Elemanlar	SSCB Yöntemi
Deplasman,cm	1.35	2.68	0.87
Moment,kNm	529	457	459
Zemin gerilmesi,kN/m ²	73	-	125

* Hesaplanan deplasmanlar arasında oldukça önemli farklar vardır. Ancak, bu durum hesap yöntemleri ve kabullerinin çok değişik olması nedeniyle olağandır. Geniş bir zemin kesitini modelleyen sonlu elemanlar yöntemi ile 2.68 cm maksimum deplasman hesaplanırken SSCB yöntemi ile bu değer 0.87 cm olarak hesaplanmıştır. SSCB yöntemi ile hesaplanan düşük deplasmanın bir nedeni de daha sonra detaylı olarak değinileceği şekilde SSCB şartnamesinde Batı yöntemlerine nispeten oldukça düşük zemin gerilmelere izin verilmesidir.

ŞEKİL 8 - SSCB YÖNTEMİ HESAP AKIŞ DİYAGRAMI



ŞEKİL 8 - SSCB YÖNTEMİ HESAP AKIŞ DİYAGRAMI (Devamı)



Not : Tablo ve Değişkenler CNIP 2.02.03-85 SSCB Şartnamesinde Verilmektedir

* Değişik yöntemler ile hesaplanan moment değerleri oldukça büyük yaklaşım içindedir. Özellikle sonlu elemanlar ve SSCB yöntemleriyle hesaplanan maksimum kesit moment değerleri arasındaki yaklaşım dikkate değerdir. Kazık kesitinin donatı hesabında en önemli girdi olan maksimum kesit momentinin Batı ve SSCB yöntemleri ile bu kadar yakın olarak hesaplanması bu açıdan projelendirmede büyük farklılıklar olmayacağını bir göstergesidir.

* Değişik yöntemler ile hesaplanan kazık arkasında oluşan maksimum zemin gerilmeleri arasında da farklılıklar vardır. Batı yöntemi ile 73 kPa maksimum zemin gerilmesi hesaplanırken bu değer SSCB yöntemi ile 125 kPa olarak hesaplanmaktadır. Emniyetli zemin gerilmesinde ise daha sonra açıklanacağı üzere SSCB yöntemi düşük değerler verirken Batı yöntemleri nispeten yüksek değerler vermektedir.

5. ZEMİN TAŞIMA KAPASİTESİ

Bu bölümde iki ayrı Batı yöntemi (Konvansiyonel sınır-durum hesap ve Plastik hesap) ve SSCB şartnamesince öngörülen yöntem ile zemin taşıma kapasitesi hesapları yapılmıştır. Hesaplar ($\phi_u = 0$ ve $c_u = 150$ kPa) ve ($\phi = 40$ ve $c_u = 0$) kayma mukavemeti parametreleri kullanılarak sırasıyla ince taneli ve granüler zemin koşulları için gerçekleştirilmiştir. Hesap yöntemlerinin detayı verilmemiş ancak sonuç değerler sunulmuştur. Ancak plastik hesap yöntemi, Davis(1961) için bir azami taşıma kapasitesi yerine verilen kazık geometrisi ve üst yapı yükleri için göçme durumu tahkik edildiğinden daha önce sunulan örnek problem için her yöntem ile elde edilen sonuçlar değerlendirilerek Tablo 4'de özellenmiştir. Bu değerler Tablo 3'de sunulan Batı ve SSCB yöntemleri ile elde edilen maksimum zemin gerilmeleri ile mukayese edilerek çözülen örnek problem için zeminin kritik olup olmadığı değerlendirilmiştir.

Tablo 4 - Değişik Yöntemler ile Zemin Kapasitesinin Tahkiki

Zemin Koşulu	Batı Yöntemleri				SSCB Yöntemi	
	Sınır-durum(*)		Plastisite(**)		σ_e -kPa	Göçme
	σ_e -kPa	Göçme	σ_e -kPa	Göçme		
İnce taneli $c_u = 150$ kPa	150(0)- 675(3)	Yok	-	Yok	180	Yok
Granüler $\phi = 40$	150(1)- 320(2)	Yok	-	-	87(1)- 175(2)	Var

(*)Broms (1964) ve Brinch Hansen (1961) (**)Davis (1961) σ_e :emniyetli gerilme

Notlar : 1)Batı yöntemlerinde $G = 2.0$ güvenlik faktörü uygulanmıştır.

2)Parantez içinde verilen değerler m cinsinden derinliktir.

Tablo 4'den aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür.

* İnce taneli zemin koşullarında incelenen üç yöntem de göçme olmadığı sonucunu getirmektedir. Ancak, SSCB yönteminin bir miktar daha düşük emniyetli zemin gerilmelerine izin verdiği belirlenmiştir.

* Granüler zemin koşullarında ise Batı yöntemleri göçme olmayacağı sonucunu vermekte SSCB yöntemi ise göçme olabileceği sonucunu vermektedir. Bu durumda granüler zemin koşullarında SSCB yönteminin Batı yöntemlerine göre zemin kapasitesini ele alışındaki konservatif yaklaşım belirginleşmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

İncelenen değişik hesap yöntemlerinin Batı - Doğu çerçevesinde karşılaştırılması neticesinde zeminin kritik olmadığı durumlarda her iki yaklaşımın projelendirme açısından yakın sonuçlar verdiği (moment değerleri) ancak zayıf zemin koşullarında ve özellikle gevşek granüler zeminlerde SSCB yönteminin zemin kapasitesi hesabı bakımından oldukça konservatif olduğu belirlenmiştir. Bu durumda zeminin kritik olmaması halinde Batı ve SSCB yöntemleri ile yapılan kazıklı temel projeleri yaklaşım içinde olacak ancak aksi taktirde SSCB yöntemi oldukça fazla kazık ve dolayısıyla ek maliyet gerektiren çözümlere yol açacaktır.

Bu konuya özellikle son yıllarda SSCB ile Türkiye arasında imzalanan doğal gaz anlaşması ile SSCB'de ve özellikle zor zemin koşullarında anahtar teslimi müteahhlik hizmetleri sunmakta olan Türk Müteahhit Firmalarının dikkati çekilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaların yapılmasındaki destek ve işbirliğinden dolayı Tekser İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş. şirketine teşekkürü bir borç biliriz.

REFERANSLAR

1. Bowles, J.E.,(1988),"Foundation Analysis and Design",Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company
2. Broms,B.B., (1964a). "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils." J.S.M.F.D., ASCE, vol.90,SM2:27-63.
3. "Construction Standarts and Rules CNIP 2.02.03-85, Pile Foundations", USSR State Committee for Building, Moscow, 1986
4. Davis,E.H., (1961) "The Application of the Theory of Plasticity to Foundation Problems-Limit Analysis." Post-Grad. Course on Fndn. Eng., Univ of Sydney.
5. Desai, C.S. and Christian, J.T., (1977),"Numerical Methods in Geotechnical Engineering", McGraw-Hill Book Company
6. Fritz, P., "Rheo-Staub User's Manual", Department of Rock Engineering Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland
7. Hansen, B.J., (1961), "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces". Geoteknisk Institut. Bull., No.12, Copenhagen