

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAYILI TEMEL BOYUTLANDIRMADA YATAK KATSAYISI KAVRAMININ
UYGULANABİLİRLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim BOZKURT

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Geoteknik

Tez Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ersin AREL

HAZİRAN 2017

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAYILI TEMEL BOYUTLANDIRMADA YATAK KATSAYISI KAVRAMININ
UYGULANABİLİRLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim BOZKURT

1109071001

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 24.05.2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.06.2017

Tez Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ersin AREL

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Akın ÖNALP

Prof. Dr. Suat AKBULUT

HAZİRAN 2017

ÖNSÖZ

Hocalarım Prof. Dr. Akın Önalp ve Yrd. Doç. Dr Ersin Arel'e yüksek lisans programı boyunca bana verdikleri emek için çok teşekkür ederim. Kendileri eğitim dahil herşeyin ticari düşünüldüğü günümüz dünya koşullarında, mesleklerine olan saygılarıyla bana ilham kaynağı olmuşlardır.

Bu tez süresince yardımını esirgemiyen Prof. Dr. Kutlu Darılmaz'a, inşaat mühendisi Ahmet Can Mert ve ayrıca aileme de çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
2. ELASTİSİTE	2
2.1. Zemin Mekaniğinde Elastisite	3
3. YAYILI TEMEL	3
3.1. Yayılı Temel Uygulama Koşulları	4
3.2. Yatak Katsayısı ile Yayılı Temel Boyutlandırma	6
4. WINKLER MODELİ	7
5. İKİ PARAMETRELİ ZEMİN MODELLERİ	12
5.1. Filonenko-Borodich Temeli	12
5.2. Hetenyi Temeli	13
5.3. Pasternak Temeli	14
5.4. Vlasov Temeli	14
6. DEĞİŞKEN YATAK KATSAYISI YAKLAŞIMLARI	15
6.1. Bağlantılı Yöntem	16
6.2. Yarı Bağlantılı Yöntem	17
6.3. Eşdeğer Winkler Yöntemi	18
7. YATAK KATSAYISININ ELDE EDİLMESİ	19
7.1. Plaka Taşıma Deneyi	21
8. PLAK - ZEMİN PROBLEMLERİNİN SONLU ELEMANLARLA MODELLENMESİ.....	28
8.1. Winkler Zemin Modelinin Tanımlanması	30
8.2. İki Parametrelili Vlasov Zemin Modelinin Tanımlanması	31
8.2.1 Tekil ve Düzgün Yayılı Yük Etkisinde Vlasov Yöntemi ile İki Parametrelili Zemine Oturan Plak Analizi	39
8.3. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlarla Modelleme	42
9. SAYISAL ÖRNEKLER	43
9.1. İki Tabakalı Zeminde Düzgün Yayılı Yük Etkisinde Yayılı Temel Analizi	44
9.2. Homojen Zeminde Düzgün Yayılı Yük Etkisinde Yayılı Temel Analizi	50
9.3. Elastisite Modülü Farklı Zeminlerde Düzgün Yayılı Yük Etkisinde Analiz	54
10. SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKÇA	58

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Yatak Katsayısı Değerleri.....	20
Tablo 2. Zemin Parametreleri	25
Tablo 3. Sonuçlar.....	27
Tablo 4. Zemin ve Plak Özellikleri.....	40
Tablo 5. Düzgün Yayılı Yük Durumunda Zemin Parametreleri ve Temel Merkezindeki Oturma.....	41
Tablo 6. Tekil Yük Durumunda Zemin Parametreleri ve Temel Merkezindeki Oturma	41
Tablo 7. Vlasov Zemin ve Plak Parametreleri	44
Tablo 8. “Mohr Coulomb” Zemin Modeli için Parametreler.....	46
Tablo 9. 14x14 Yayılı Temelin Düzgün Yayılı Yük Etkisinde İki Tabakalı Zemindeki Analiz Sonuçları	46
Tablo 10. Vlasov Zemin ve Plak Parametreleri	50
Tablo 11. Tek Tabakalı Zeminde “Mohr-Coulomb” Parametreleri	51
Tablo 12. Tek Tabakalı Zemin için Analiz Sonuçları.....	51
Tablo 13. Elastisite Modülü Farklı Zeminler için Analiz Sonuçları	55



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Metal tel üzerinde çekme deneyi (a) deney düzeneği (b) Yük çekme ilişkisi (c) Çap ve boydaki değişim.....	2
Şekil 2. Yayılı Temellerin Tipleri	5
Şekil 3. Düz Plaklı Yayılı Temel	5
Şekil 4. Kolon Altları Kalınlaştırılmış Yayılı Temel	6
Şekil 5. Düz Kirişli Yayılı Temel	6
Şekil 6. Winkler Zemin-Temel Etkileşim Modeli.....	7
Şekil 7. Yayılı Temelin Oturması	9
Şekil 8. Winkler Zemin Modeli (a) düzgün yayılı olmayan yük durumunda zeminin yerdeğiştirilmesi, (b) tekil yük durumundaki yerdeğiştirme, (c) rijit tabaka aracılığıyla aktarılan yük altındaki yerdeğiştirme, (d) düzgün yayılı yük altındaki yerdeğiştirme	11
Şekil 9. Filonenko-Borodich Zemin Modeli	13
Şekil 10. Pasternak Zemin Modeli.....	14
Şekil 11. Vlasov Zemin Modeli	15
Şekil 12. Yatak Katsayılarının Değişimi.....	16
Şekil 13. Bağlantılı Yaylar Yaklaşımı	17
Şekil 14. Yarı Bağlantılı Yay Yönteminde k_s Oranlarının Seçimi.....	17
Şekil 15. Çeyrek Yayılı Temelde Farklı H/r Oranları için K_{nw} 'yi tanımlayan Kontürler.....	18
Şekil 16. Plaka Taşıma Deneyi	21
Şekil 17. Plaka Taşıma Deneyi ile Taşıma Gücü ve Yatak Katsayısının Tayini	22
Şekil 18. Tabakalı Zeminde Plaka Taşıma Deneyi	23
Şekil 19. Sonlu Eleman Analiz Modeli.....	24
Şekil 20. Analiz ve Terzaghi Denklem Sonuçlarının Karşılaştırılması	25
Şekil 21. Y.A.S.S Durumuna göre Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	26
Şekil 22. Analiz Sonuçları	26
Şekil 23. Sonlu Eleman Tipleri.....	29
Şekil 24. Plak Sonlu Eleman Modeli	30
Şekil 25. Yatak Katsayısının Atanması.....	31
Şekil 26. Elastisite Modülü Sabit Zeminler	32
Şekil 27. Elastisite Modülü Doğrusal Artan Zeminler.....	32
Şekil 28. Elastisite Modülü Kuadratik Artan Zeminler	33
Şekil 29. C ve C_T 'nin hesabı için Ardışık Yaklaşım.....	34
Şekil 30. İki Parametrelili Zemin Üzerine Oturan Plak Modeli.....	35
Şekil 31. Dört Serbestlik Dereceli Sonlu Eleman	36
Şekil 32. Ortotrop Malzeme Tanımlanması.....	36
Şekil 33. Layered Shell Özelliklerinin Tanımlanması	37
Şekil 34. Weld Constraint Tanımlanması	37
Şekil 35. Ardışık Hesaplama Yapan Programın Arayüzü.....	38
Şekil 36. Ardışık Hesapların Akış diyagramı	39
Şekil 37. Analizde Kullanılan Zemin-Plak Sistemi ve Yükleme	40
Şekil 38. Zemin Deformasyon Durumu.....	42
Şekil 39. Üç Boyutlu Solid Elemanlarla Sonlu Eleman Modeli	43
Şekil 40. 14x14m Yayılı Temel	44
Şekil 41. İki Tabakalı Zemin Profili	45
Şekil 42. Elastisite Modülünün Değişimi	45
Şekil 43. Zemin Deformasyon Durumu.....	47
Şekil 44. Farklı Yükleme Durumları için Oturma Eğrileri	48
Şekil 45. Artan Yükleme Durumları için Yük-Oturma Grafiği	49

Şekil 46. Farklı Yükleme Durumlar için Oturma Eğrileri	52
Şekil 47. Artan Yükleme Durumları için Yük-Oturma Grafiği	53
Şekil 48. 100 kPa Yük Etkisinde Elastisite Modülü-Oturma Grafiği	55



SEMBOL LİSTESİ

A	: Kesit alanı
P	: Yük
l	: Boy
σ_a	: Eksenel gerilme
ϵ_a	: Eksenel deformasyon
σ_1	: Asal gerilme
ϵ_1	: 1 eksenindeki asal deformasyon
ϵ_2	: 2 eksenindeki asal deformasyon
ν	: Poisson oranı
ϵ_r	: Radyal deformasyon
σ_{max}	: Maksimum normal gerilme
σ_{em}	: Temel güvenli gerilmesi
k_s	: Düşey yatak katsayısı
q	: Taban basıncı
δ	: Yay sıkışması, değişim
$p(x, y)$: x,y noktasındaki taban basıncı
w	: Düşey deplasman
$q(x, y)$: x,y noktasına etkiyen yayılı yük
k_{iz}	: i düğüm noktasındaki elastik yay katsayısı
A_i	: İlgili düğüm noktasının etki alanı
T	: Membran kuvveti
∇^2	: Laplace operatörü
D	: Plagın eğilme rijitliği
E_p	: Plak elastisite modülü
H	: Plak kalınlığı
ν_p	: Plak malzemesinin Poisson oranı
G_p	: Zemin modülü
$u(x, z)$: x-z düzlemindeki yatay yer değiştirme
$w(x, z)$: x-z düzlemindeki düşey yer değiştirme
$\theta(z)$: Yaklaşım fonksiyonu
$2t$: Kayma parametresi
$[d]$: Deplasman vektörü
d_i	: i nolu düğüm noktasının düşey yer değiştirmesi
$[C]$: Yatak katsayısına bağlı zemin yataklanma matrisi
$[C_T]$: Kayma parametresine bağlı zemin kayma matrisi
C	: İki parametrelili zeminde yatak katsayısı
$2C_T$: İki parametrelili zeminde kayma parametresi
γ	: Zemin yüzey parametresi
E_s	: Zemin elastisite modülü
ν_s	: Zemin Poisson oranı
H_s	: Sıkışabilir Zemin Yüksekliği

Enstitü	: Fen Bilimleri
Ana Bilim Dalı	: İnşaat Mühendisliği
Program	: Geoteknik
Tez Danışmanı	: Yrd. Doç. Dr. Ersin AREL
Tez Türü	: Yüksek Lisans – Haziran 2017

ÖZET

YAYILI TEMEL BOYUTLANDIRMADA YATAK KATSAYISI KAVRAMININ UYGULANABİLİRLİĞİ

İbrahim BOZKURT

Bu çalışmada; yatak katsayısına dayalı yöntemlerle yapılan yayılı temel boyutlandırmada, geoteknik açıdan temel tasarımı için yeterlilik araştırılmıştır. Çalışma on bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yatak katsayısı ile boyutlandırma yapmanın getireceği hatalar belirtilerek araştırmanın amaç ve kapsamı sunulmuştur. İkinci bölümde, elastisite ile ilgili genel bilgiler verilip bunların zemin mekaniğinde hangi şartlarda kullanıldığı anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, yayılı temel ve uygulama koşulları açıklanarak yatak katsayısı ile boyutlandırma gösterilmiştir. Dördüncü bölümde, Winkler hipotezine dayalı yatak katsayısı kavramı açıklanarak genel denklemleri sunulmuş ve yöntemin sonlu eleman yazılımlarına nasıl dahil edildiği belirtilmiştir. Zemini birbirinden bağımsız elastik yaylar olarak modelleyen Winkler hipotezinde sürekliliğin sağlanamaması nedeniyle farklı araştırmacılar tarafından iki parametrelili zemin modelleri geliştirilmiş ve süreklilik için elastik yayları birbirine bağlayan kayma elamanları hesaba katılmıştır. Beşinci bölümde, iki parametrelili zemin modelleri ile genel denklemleri verilmiştir. İki parametrelili zemin modellerinin sayısal çözümlerde getirdiği yüksek işlem yükü farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş değişken yatak katsayısı yaklaşımları ile azaltılmaya çalışılmıştır. Altıncı bölümde, yatak katsayısının temel alanı içinde değiştirilerek uygulanması ele alınmıştır. Yedinci bölümde yatak katsayısının deneysel ve teorik olarak nasıl elde edileceği gösterilip, temel boyutlarının yatak katsayısı üzerine etkileri açıklanmıştır. Sekizinci bölümde, plak zemin problemleri için Winkler ve iki parametrelili zemin problemlerinin SAP2000 programında nasıl modelleneceği gösterilmiştir. İki parametrelili

zemin modeli için Vlasov yöntemi irdelenmiş ve zemin parametrelerini veren denklemler sunulmuştur. İki parametrelili zemin özelliklerinde; yüzey parametresi γ , yatak katsayısı C ve kayma parametresi C_T 'nin ardışık yöntemle hesaplanabilmesi amacıyla SAP2000 programının "OAPI :*Object Application Programming Interface*" özelliği kullanılarak program dışarıdan yönetilmiştir. İlgili API fonksiyonları yazılarak, "Visual Basic.NET" programlama diliyle SAP2000 ile etkileşimli çalışan bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılımda oluşturulan döngü ile zemin parametreleri SAP2000'nin ilgili yerlerine gönderilerek ardışık yaklaşımla analiz sonlandırılmaktadır. Bu Bölüm'de Winkler ve Vlasov yöntemlerinin yanı sıra plak zemin problemlerinin üç boyutlu *solid* elemanlarla modellenmesi gösterilmiştir. Solid elemanlarla modelleme için Plaxis3D yazılımı kullanılmıştır. Dokuzuncu bölümde, iki tabakalı ve homojen bir zemin üzerine oturtulmuş yayılı temelin analizleri; Winkler, iki parametrelili zemin, solid elemanlarla doğrusal elastik zemin ve solid elemanlarla elasto plastik "Mohr-Coulomb" malzeme davranışı SAP2000 ve Plaxis3D yazılımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları tablolar ve eğrilerle irdelenerek değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılmış olan analizler grafiklerle karşılaştırılıp, başta Winkler olmak üzere yatak katsayısına dayalı yöntemlerin yayılı temel boyutlandırırken ne denli uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Onuncu bölümde, çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara ve değerlendirmelere yer verilerek ilerki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

University	: Istanbul Kültür University
Institute	: Institute of Sciences
Department	: Civil Engineering
Programme	: Geotechnical Engineering
Supervisor	: Assist. Prof. Dr. Ersin AREL
Degree Awarded and Date	: MA – June 2017

ABSTRACT

THE APPLICABILITY OF THE CONCEPT OF THE COEFFICIENT OF SUBGRADE MODULUS IN THE DESIGN OF RAFTS

İbrahim BOZKURT

This study is concerned with the dimensioning of rafts based on methods using the coefficient of subgrade modulus. It comprises ten chapters. The errors involved in using this hypothesis are described in the First Chapter and the purpose and aim of the study is presented. Second Chapter presents fundamentals of the theory of elasticity as applied in soil mechanics. In the Third Chapter a detailed description of rafts and mats is presented along with the essentials of dimensioning, by the use of the coefficient of subgrade modulus. An account of Winkler's hypothesis of subgrade modulus and the general equations involved is given in Chapter Four and the approach to its analysis by the finite element method is described. The "slip elements" have been developed by different investigators to connect the individual springs proposed by using two parameter soil model which compensates for the discontinuity created by Winkler's individual elastic springs. Chapter Five presents the two-parameter soil models and the related equations. The excessive computation load brought by the two-element soil model has been compensated by employing the "variable modulus" concept proposed by different researchers. Chapter Six thus handles the issue of varying the k_s value within the foundation area. The methods of determining the k_s value by theoretical and experimental approaches is described in Chapter Seven, as well as the influence of footing size on k_s . Chapter Eight illustrates the application of the Winkler and the two parameter soil models to the plate-soil models in the software SAP200. The Vlasov method using the two parameter model has been

dissected to arrive at equations providing soil parameters for the purpose. The option “OAPI: Object Application Programming Interface” of SAP2000 has been employed for iterative computation of surface parameter γ , reaction modulus C , and the shear parameter C_T , externally. The related API functions have been developed to write a computer program using “Visual Basic.NET” language that works interactively with SAP2000. The loop formed by this program is used to send the soil parameters to appropriate locations in SAP2000 to complete the analysis iteratively. Modelling by three dimensional solid elements has been demonstrated in this chapter as well as the Winkler and Vlasov methods. The software Plaxis3D has been employed for modelling by solid elements. Chapter Nine contains analyses of a raft placed on a two-layered soil by Winkler, two parameter soil, linear elastic soil with solid elements and elasto-plastic Mohr-Coulomb soil using the software SAP2000 and Plaxis3D. The results have been used to arrive at a judgement whether methods based on the theory of modulus of subgrade reaction are realistically applicable. Chapter Ten summarises the findings of this study and offers recommendations for future work.

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Binalarda yüzeysel temellerin kullanımı önceliklidir. Yüzeysel temelerde temel tipinin belirlenmesi ve boyutlandırılmasında yapı yükleri, zemin özellikleri, olası oturmalar ve temel taşıma gücü göz önüne alınarak karar verilir. Türkiye’de yapılan genel uygulamada ise yüzeysel temeller hazırlanan zemin etüdlerindeki iki parametre; temel güvenli taşıma gücü (σ_{em}) ve düşey yatak katsayısı (k_s) ile boyutlandırılır. Winkler yay yöntemine dayalı modellerle temel boyunca sabit düşey yatak katsayısı kullanılarak taban basınçları ve temeldeki düşey yer değiştirmeler hesaplanır. Boyutlandırma sonucunda temel taşıma gücünün aşılmaması amacıyla taban basınçlarının temel güvenli gerilmesinden küçük olması gerekmekte, yatak katsayısı kavramıyla yapı ve temelin elastik zemin üzerine oturduğu varsayılarak taban basınçlarının yanı sıra temeldeki iç kuvvetler de hesaplanarak betonarme temel donatılandırılır. Elde edilen sonuçların, gerilme-deformasyon ilişkisi, yükleme hızı, drenaj koşulları, gerilme tarihçesi gibi birçok parametreye bağlı lineer ve elastik malzeme olmayan zemin için ne kadar doğru olacağı tartışmalıdır. Zeminde, deformasyonların artmasıyla elastik davranıştan dolayısıyla yatak katsayılı çözümde gerçek davranıştan uzaklaşılır. Zeminin elastik yaylarla temsil edildiği çözümlerde tamamen uniform yüklenmiş simetrik bir plak temel esneklik katsayıları aynı olan elastik yayların eşit kısılması sonucunu getireceğinden plağın eğilmemesi ve moment almaması gibi yanıltıcı bir sonuç getirmektedir. Oysa, homojen ortamlarda bile temel kase veya kapak biçimi aldığından bu görüşün geçerliliği bulunmamaktadır. Tabakalı zemine uygulanamayan yay sistemi, düşey yönde yüklenen zeminin yatay yönde ötelenme yapmasını göz önüne almaz. Ayrıca, hesaplanan yay kısılmaları konsolidasyon oturmalarını da içermemektedir.

Bu araştırmada, yatak katsayısı kavramının, yayılı temel boyutlandırılmasında ne denli uygulanabilir olduğu araştırılarak bu yöntemle yayılı temelerde hesaplanan oturmaların, doğrusal olmayan davranışı esas alan yöntemlerle arasındaki farklar irdelenmektedir. Bu amaçla; aynı sayısal problemlerin, yatak katsayısına dayalı Winkler ve geliştirilmiş Vlasov yöntemiyle ve zemin ortamının sadece sürekli sonlu elemanlarla modellendiği doğrusal elastik ve doğrusal olmayan malzeme davranışını içeren analizleri yapılmıştır. Winkler ve Vlasov yöntemleri ile yapılan analizlerde SAP2000, yatak katsayısına dayalı olmayan modeller için de Plaxis3D yazılımları kullanılmıştır.

2. ELASTİSİTE

Malzemelerin elastik özelliklerini belirlemek için Şekil 1’de tele bağlanmış yüklere karşı teldeki uzamanın ölçüldüğü deney gösterilmektedir. Birçok malzeme için uygulanan yük P ile uzama arasında lineer bir ilişki vardır ve yük kaldırılınca uzama geri döner ve telde kalıcı bir deformasyon oluşmaz (Wood, 1990).

Hooke yasası (1675) ideal elastik malzemeler için geliştirilmiş ilk bağıntıdır. Elastik bir cisim gerilme aldığı anda elastisite modülüne bağlı olarak orantılılık limitine değin doğrusal geri dönüşlü, ani birim uzama veya kısalmaya gösterir.

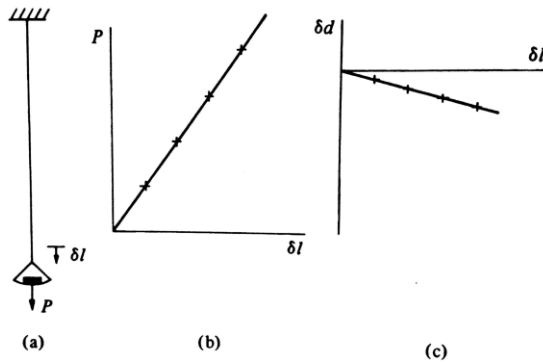
Yük ve uzama arasındaki lineer ilişkinin eğimi tel malzemesinin tek eksenli rijitliğini gösterir ve elastisite modülü;

$$E = \frac{P/A}{\delta l/l} = \frac{\delta \sigma_a}{\delta \epsilon_a} = \frac{\delta \sigma_1}{\delta \epsilon_1} \quad (1)$$

olarak yazılır.

Deney süresince çaptaki değişim δ ölçülerek izlenirse Şekil 1’deki telin boyunun uzadığı çapının ise küçüldüğü görülür. Radyal deformasyonun boyuna deformasyona oranı ile Poisson oranı ν elde edilir.

$$\nu = \frac{-\delta d/d}{\delta l/l} = \frac{\delta \epsilon_r}{\delta \epsilon_a} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2)$$



Şekil 1. Metal tel üzerinde çekme deneyi (a) deney düzeneği (b) Yük çekme ilişkisi (c) Çap ve boydaki değişim

2.1. Zemin Mekanikinde Elastisite

Zeminin uygulanan yüklere karşı gösterdiği davranış elastik kabul edilebilirse, elastisite teorisi herhangi bir geoteknik problemde deformasyonların analizi için uygun bir yöntem olacaktır. Temel oturmaları, kazık deformasyonları çoğu kez elastisite teorisinden elde edilen çizelgelerle tahmin edilir. Yapılan arazi araştırmaları, laboratuvar deneyleri, arazideki presiyometre veya plaka taşıma deneyleri deformasyon analizlerindeki zemin modüllerini belirlemek için yapılan çalışmalardır. Analizler, deformasyon modüllerinin doğru belirlenmesine ve zeminin elastik sınırlar altında yüklenmesine bağlı olarak iyi sonuçlar verecektir (Wood, 1990).

İzotrop ve elastik zemin davranışı, arazi ve laboratuvar deneyleriyle belirlenebilen iki elastik sabitle tanımlanmaktadır. İzotrop ve elastik davranış varsayımı, zeminlerin birçoğu için gerçek davranışı yansıtmamaktadır. Zemin davranışını tanımlamak için, doğrusal ve elastik olmayan davranışı içeren modeller gerekmektedir. Kısıtlı gerilme durumlarının oluşturulabildiği zemin deneylerinden tahmin edilen bu gibi zemin modelleri, analizi yapılmak istenen geoteknik yapının etkideği zemin kitlesindeki karmaşık gerilme ve deformasyon durumlarına uygulanmaktadır. Zemin davranışının doğru tahmin edilebilmesi, yapılan deneylerle mekanik özelliklerin tahmin edilmesine bağlıdır.

3. YAYILI TEMEL

Yayılı temel, ya da Türk mühendislik topluluğunda Fransızca adıyla anıldığı gibi *radyejeneral* veya *mat, raft*; bir tür birleşik yüzeysel temel tipi olup üzerinde veya içinde oturduğu zeminle bir betonarme plak gibi etkileşir.

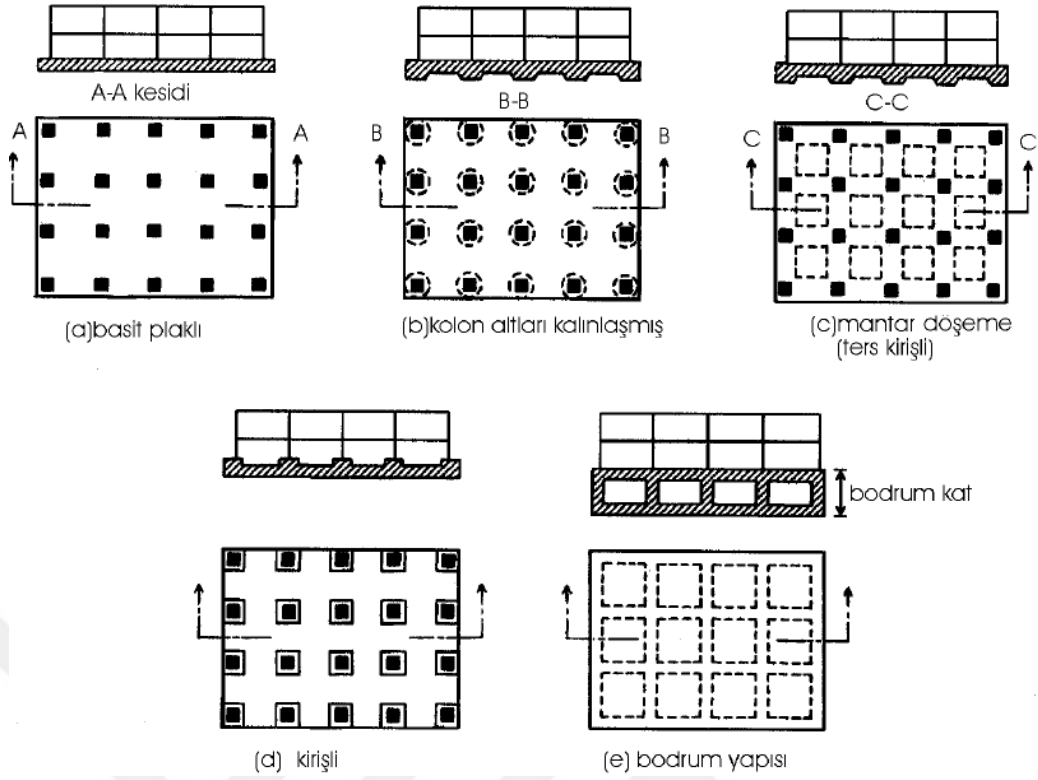
Yayılı temel günümüzde kütle betonunun ucuz ve kolayca sağlanabilmesi, ayrık temellere oranla aşırı artan donatı miktarlarındaki maliyet farklarının çok olmaması, su yalıtımını kolayca sağlaması ve görünümünün kullanıcıya güven vermesi nedeniyle özellikle deprem bölgelerinde en çok kullanılan temel tipi olma özelliğini kazanmış görünmektedir. Bir temelin yayılı olarak tanımlanabilmesi için aynı ekseninde üçten fazla kolon yükü taşıması ve bu eksenlerin iki veya fazla olması gerekir (Önalp & Sert, 2010).

3.1. Yayılı Temel Uygulama Koşulları

Yayıllı temelin çift yönde çalışan bir betonarme plak olması, yük aldığıında zeminle yakından etkileştiğinden gerekli donatı miktarı eşdeğer tekil temellere oranla oldukça yüksektir. Bu nedenle yayılı temel kullanımını geleneksel olarak bazı koşullara bağlanmıştır:

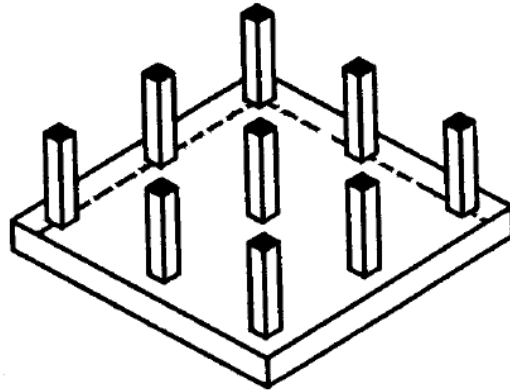
- Zemin özelliklerinin bina yüklerini tekil veya birleşik/sürekli temellerle taşıyamayacak kadar kötü olması,
- Yapı yükünün yüksekliği nedeniyle ayırık temel boyutlarının bir diğeri ile kesişecek denli aşırı büyümesi,
- Alandaki zeminin değışken özelliklerine bağılı olarak binanın ayırık temel yükleri altında farklı oturma gösterme olasılığı,
- Bina yüklerinin değışken ve belirsiz olması,
- Y.A.S.S'nden kaynaklanan kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğü,
- Su yalıtım gereksinimleri

olarak özetlenebilir. Genel kural olarak, bir binada yayılı temelin kullanılabilmesi için hesaplanmış ayırık temeller toplam alanının, bina oturma alanının en az yarısından fazla olması gerekir. Bazı durumlarda gerekli temel alanı bina oturma alanını aşabilir. Bu özel durumda kazıklara oturtulmuş yayılı temel çözümleri gerekli olmaktadır. Yayılı temellerde Türkiye'de anıldığı terimle "çıkma" veya "ampatman" kullanımını belirli limitler (~0.50 m) dışında uygun değildir. Binadan gelen yüklerin tekil ve ayırık temellerle zemine aktarılması yerine tüm yapı altına tek temel yerleştirilmesi yapı-zemin etkileşimini tümüyle değıştirir. Bu yeni seçimle temel altında taban basınçları düşer, yüzdürme (telafi) etkisi sağlanır, rijitliği ve üst yapıya etkisi zeminde olası boşluklarda köprüleme görevi yapar, izin verilen toplam oturmalar tekil temeğe göre daha yüksektir, ancak plak farklı oturmalara daha duyarlı hale gelir. Şekil 2'de farklı yayılı temel tipleri görülmektedir. En basit tür olan kirişsiz tipte yükler hafifse düz plak, yükler ağırsa kolon altları kalınlaştırılmış temeller kullanılır (Önalp & Sert, 2010).



Şekil 2. Yayılı Temellerin Tipleri

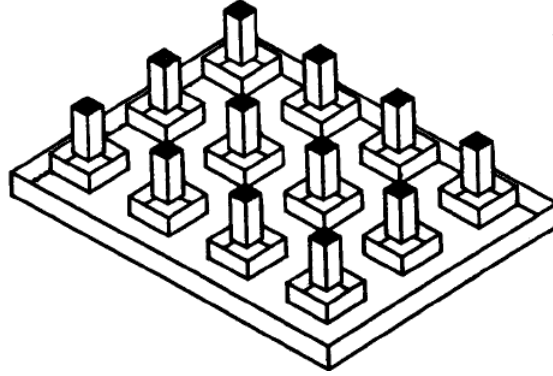
Düz plaklı yayılı temel yapım kolaylığı ve bodrumda tam düz bir alan sağlaması nedeniyle tercih edilir. Şekil 3’de örneği görünen düz plaklı temelde özellikle donatılar en kolay biçimde yerleştirilir. Diğer tiplerden daha kalın çıkmasına karşın sonuçta en ekonomik tip olarak belirmektedir.



Şekil 3. Düz Plaklı Yayılı Temel

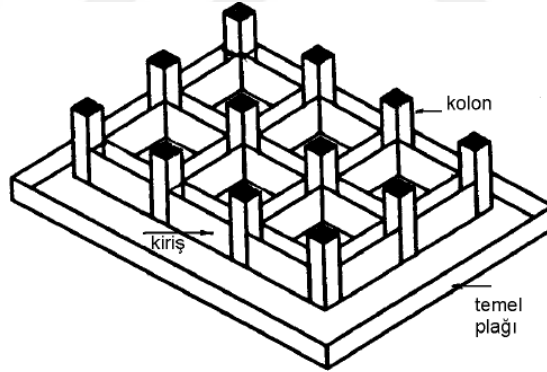
Kolon yüklerinin aşırı artması temelde yüksek kesme kuvvetleri oluşturur. Bu etki düz plaklarda zımbalamayı önlemek için kalınlıkların kabul edilemez düzeye çıkması sonucuna yönelttiğinden sadece kolon altlarına gelen bölgeleri kalınlaştırma yolu

seçilebilir (Şekil 4). Bu seçimle demir ve betonda ekonomi sağlanırsa da kazı-dolgu, kalıp ve tesviye işleri ek maliyet getirmektedir.



Şekil 4. Kolon Altları Kalınlaştırılmış Yayılı Temel

Daha ekonomik çözüm düz ve ters kirisli (omurgalı) plaklarla sağlanabilir. Plak kalınlığı kolonlar arasına sistematik olarak yerleştirilmiş kirişlerin sağladığı rijitlik nedeniyle büyük ölçüde azalır. Şekil 5’de kirişlerin üstte olduğu tip görülmektedir (Önalp & Sert, 2010).



Şekil 5. Düz Kirişli Yayılı Temel

3.2. Yatak Katsayısı ile Yayılı Temel Boyutlandırma

Genel olarak yatak katsayısı kullanılarak yapılan boyutlandırma temel altındaki en büyük taban basıncının “temel güvenli taşıma gücü” ile karşılaştırılmasıyla yapılır. Türkiye’de yaygın olarak kullanılmakta ve Türk Deprem Yönetmeliğinde değinilen bu yöntem uygulanmaktadır. Önceden belirlenen k_s değerine göre yapılan Winkler çözümüyle, temel plağındaki taban basınçları hesaplanır. Elde edilen en büyük taban basıncı; $\sigma_{\max} \leq \sigma_{em}$ ile temel güvenli gerilmesi ile karşılaştırılır. Taban basınçları temel

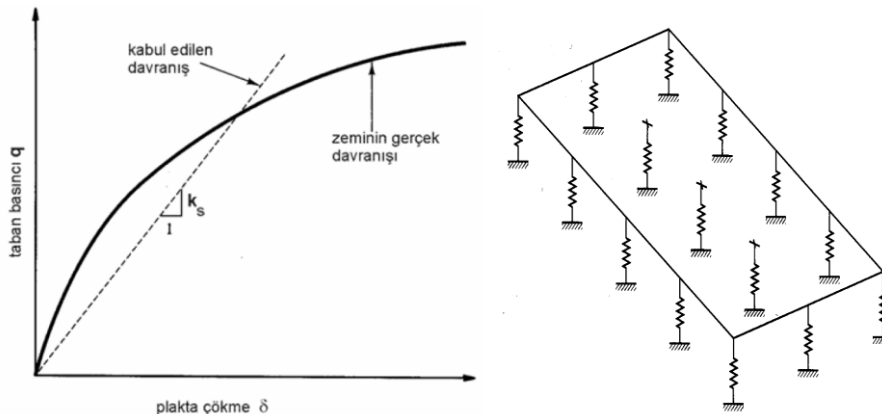
güvenli gerilmesinden büyükse, $\sigma_{\max} \leq \sigma_{em}$ koşulu sağlanana kadar temel boyutları değiştirilir ve çözüm yinelenir. Türk Deprem Yönetmeliğinde, deprem ve düşey yüklerin ortak etkisi altında da aynı boyutlandırma yöntemi istenmektedir. Deprem yükleri de hesaplara katıldığında; $\sigma_{\max} \leq 1.5 \times \sigma_{em}$ temel güvenli gerilmesinin %50 arttırılmasına izin verilir. Temel güvenli gerilmesi D gurubu ve Z4 sınıfı zeminlerde arttırılamaz. TS500 ve deprem yönetmeliğindeki yüklem kombinasyonları altında çözülen temeldeki, iç kuvvetler hesaplanır, betonarme temel donatılmalıdır.

Deprem yönetmeliğindeki uygulama, yayılı temellerin taşıma gücüne göre boyutlandırılmasıdır. Oysa, bu temel tipinde oturma problemi daha önemlidir. Winkler yöntemi ile ancak ortam homojen ise elastik oturmalar hesaplanabilir. Bu durumda konsolidasyonun etkin olduğu killi zeminlerde ve tabakalı ortamlarda oturma hesaplanması mümkün olmaz.

4. WINKLER MODELİ

Temel altında zemin ortamının tek boyutta sıkışabilen elastik yaylarla temsil edilmesi XIX. Yüzyıldan kalma bir hipoteze dayalı olup taban basıncı ile yay sıkışması arasında yatak katsayısı olarak tariflenen değişmez bir bağıntı olduğu kabul edilmiştir. Yatak katsayısı, zeminin gerçek gerilme-birim boy değiştirme özelliklerini bir anlamda gözardı etmekte ve Şekil 6'da görüldüğü gibi temelin birbirinden bağımsız bir seri yay üzerinde, doğrusal σ - ε özelliği gösterdiğini kabul etmektedir;

$$k_s = \frac{q}{\delta} \quad (3)$$



Şekil 6. Winkler Zemin-Temel Etkileşim Modeli

(a) Kabul edilen σ - δ doğrusu (b) Yaylı Yatak

Yatak katsayısı zemin gerilmesi ve temel oturması arasındaki ilişkiyi gösteren zeminlerin elastik özelliklerinden birisidir. Sürekli, yayılı ve değişik tipteki kazıklı temeller için kullanılır. Şekil 6'da temsil edildiği gibi elastik yaylar üzerine plak modellenebilir. Kazıklar çevre sürtünmesi ve uç direncini temsil eden düşey ve yatay elastik yaylarla zemine bağlanır.

Uygulamada kolaylığı nedeniyle günümüzde dahi sık uygulama bulan yatak katsayısı kavramı şu hataları içermektedir; (Önalp & Sert, 2010)

- *Temel altında işlev yaptığı düşünülen yayların bağımsız olması, boyu kısalan bir yayın diğerini etkilememesi sonucunu getirdiğinden, plakta momentlerin oluşmayacağı gibi yanıltıcı bir sonuç doğuracaktır. Oysa, temel kase biçimi aldığından bu görüşün geçerliliği bulunmamaktadır.
- *Yay katsayıları temelin boyutlarına bağlı olduğundan plaka taşıma deneyinden gerçek temel boyutlarına dönüşümde önemli hatalar doğabilmektedir.
- * Tabakalı zeminde uygulanamamaktadır
- * Düşey yönde yüklenen zemin yanal ötelenme yapar. Bu özellik yay sisteminde gözönüne alınamamaktadır.
- * Yer altı su seviyesi modele katılamamaktadır.

Winkler temeli en basit ve sık kullanılan modeldir. Günümüzdeki sonlu eleman programlarının çoğu Winkler modeline dayalı olarak geliştirilmiştir. Diyagonal bir matris içinde tanımlanan yay sabitleri sonlu eleman programında kolayca kullanılabilir. Sürekli elastik ortam üzerine oturan elastik temelin en basit temsili; elastik plağın, yakın aralıklı, sadece düşey reaksiyon üreten ve birbirinden bağımsız doğrusal elastik yaylar üzerine oturduğunun kabul edilmesidir. Elastik yayın oluşturduğu reaksiyon yayın kısalmasıyla orantılıdır. Böylece, temel alanı içerisindeki basınç ile düşey yerdeğiştirme arasındaki ilişki;

$$p(x, y) = k_s w(x, y) \quad (4)$$

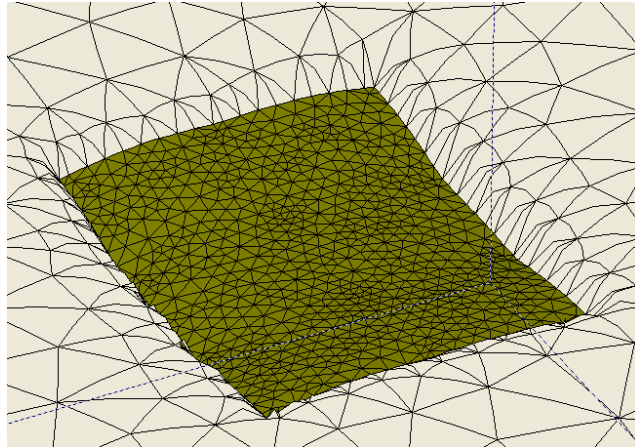
ile ifade edilir. Bu denklemde p uygulanan düşey gerilme, k_s yatak katsayısı w ise düşey yerdeğiştirme'dir. Denklem (4) temas alanı içindeki bir noktadaki düşey kuvvetin sadece aynı noktadaki düşey yer değiştirmeye bağlı olduğunu göstermektedir. Bir noktaya etkileyen yay kuvvetleri ve yer değiştirmeler arasında rijitlik matrisi kullanımı ile ilişki kurulur. Elastik yayın rijitlik matrisi o yaya ait katsayıları içerir. Bir noktadaki yer değiştirmenin diğer noktaldakilerden bağımsız olması nedeniyle Winkler modelindeki yay katsayısı matrisleri diyagonaldır. Yay atanmış noktanın serbestlik dereceleri arasında bağımlılık

olmadığı için diyagonal değerler haricindekiler sıfırdır. Diyagonal değerler noktanın yerdeğiştirmeleriyle yay kuvvetleri arasında ilişki kurmaktadır. Temele etkiyen yükler altında sadece ani (drenajsız) deformasyon hesaplanabilir. Bu nedenle konsolidasyon oturmaları belirlenemez.

Winkler temeli üzerine oturan izotrop plağın eğilmesini yöneten, yatak katsayısına bağlı denklem,

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + k_s w = q(x, y) \quad (5)$$

olarak yazılır. Denklemdeki D plağın eğilme rijitliği, w dūřey deplasman, q ise (x,y) noktasına etkiyen yayılı yükür. Yatak katsayısı k_s değeri de plağın geometrisine bağlıdır. Winkler modeline göre, düzgün yayılı yüklenen plağın dūřey yerdeğiştirmeleri sabittir. Bu nedenle temel plağı eğilmemekte ve moment almamaktadır. Bu durum plağın oturma şekliini gerčekçi olarak yansıtamamaktadır. Gerček zemin davranışında ise temel kase veya kubbe biçiminde bükülür. Yayılı temelin merkezindeki oturma, kenarlarından daha büyük olmaktadır. Bunun nedeni zemindeki kitle gerilmelerinin temelin merkezi altında daha büyük olmasındandır. Böylece temel ortasında oturmalar artmakta kenarlarda azalmaktadır (Coduto, 2001). şekil 7'de yayılı temelin oturması gösterilmektedir.



şekil 7. Yayılı Temelin Oturması

Sonlu elemanlar yöntemi esaslı SAP2000/SAFE ve benzeri yapısal analiz yazılımlarında; zemin, temel plağını oluşturan sonlu eleman ağında düğüm noktaları altına yerleştirilmiş doğrusal elastik yaylar ile temsil edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen sistemlerde altı serbestlik dereceli bir düğüm noktasında kullanılacak elastik yaylar, ötelenme ve dönmeleri yay katsayılarına bağlı olarak kısıtlıyabilir. Bu yaylar

düğüm noktalarını elastik olarak zemine bağlar. Serbestlik derecelerini sınırlandıran yaylar, yapı rijitliğine katılmazlar.

Yay katsayıları global veya lokal koordinat sistemlerinde serbestlik dereceleriyle eşleştirilerek belirlenebilir. Düğüm noktalarına etkiyen yay reaksiyon kuvvetleri, ilgili noktadaki yay katsayılarından oluşan 6x6 simetrik matris ile yer değiştirmelerle ilişkilendirilir. Bu kuvvetler yerdeğiştirmelere karşılık gelmektedir. Denklem (6)'da bir düğüm noktasındaki elastik yayın katsayı matrisi ile yerdeğiştirmelerin bağımlılığı gösterilmektedir. Elastik yay sadece düşey yönde kısıllacağı için diyagonal değerler içinde de k_z katsayısı sıfırdan farklıdır. Eşitlik(8)'de bir Winkler yayına ait katsayı matrisi görülmektedir : (*Manual: (Computers and Structures, 2013)*)

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_x k_y & k_x k_z & k_x k_{\theta_x} & k_x k_{\theta_y} & k_x k_{\theta_z} \\ & k_y & k_y k_z & k_y k_{\theta_x} & k_y k_{\theta_y} & k_y k_{\theta_z} \\ & & k_z & k_z k_{\theta_x} & k_z k_{\theta_y} & k_z k_{\theta_z} \\ & & & k_{\theta_x} & k_{\theta_x} k_{\theta_y} & k_{\theta_x} k_{\theta_z} \\ s & y & m & & k_{\theta_y} & k_{\theta_y} k_{\theta_z} \\ & & & & & k_{\theta_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \\ R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

Düşey yöndeki yay katsayısı;

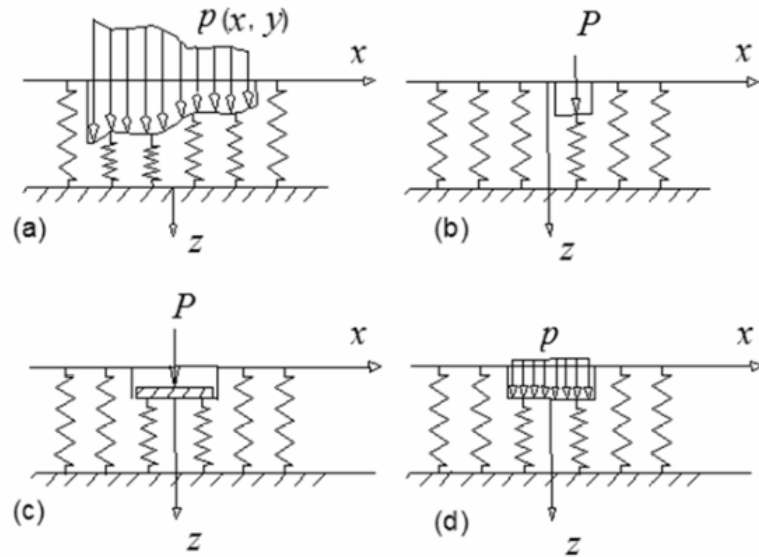
$$k_z = k_s A_i \quad (7)$$

ile hesaplanır. Plak içindeki bir düğüm noktasındaki elastik yay katsayısı k_z yatak katsayısı k_s (kN/m^3) ile düğüm noktasının etki alanı A_i (m^2) ile çarpımına eşittir. Birimi (F/L, kN/m) olan k_z , ilgili düğüm noktasındaki elastik yayın birim kısalması için gereken kuvvet anlamına gelmektedir. (8)'de $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ yay kuvvetleri ve momentleridir. $U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z$ değerleri yerdeğiştirme bileşenleri olan ötelenme ve dönmelerdir. k_i ve k_{θ} sayıları elastik yayın katsayılarıdır. Winkler yönteminde noktada sadece düşey hareketi kısıtlayan bir yay olduğu için eşitlik (8);

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & k_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ s & y & m & & 0 & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \\ R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

biçimini alır. Noktadaki yerdeğiştirmeleri birbirine bağlanmayan yaylar için, altı adet diyogonal değerin belirlenmesi ve diğerlerinin sıfır olması gerekir. Her nokta için tanımlanan katsayı matrisinin determinantı sıfır veya pozitif olmalıdır. Bu durum sağlanmadığında sistem stabil olmaz.

Winkler hipotezine göre zemine etkileyen yükler yalnız etkidiği noktada okme meydana getirirler. Dolayısıyla, her bir yay komşu yayların yükleme durumundan etkilenmez. Bu durum, zemin tamamen süreksiz bir ortam olduğunda dikkate alındığını gösterir. Oysa elastik tabakanın yüzeyinde herhangi bir noktada oluşan yer değiştirme sadece o noktaya etki eden kuvvetten değil, diğer noktalardaki kuvvetlerden de etkilenir. Bu model her ne kadar tekil yük durumunda kabul edilebilir sonuçlar verse de düzgün yaylıl yük durumunda gerçekçi olmayan sonuçlar vermektedir (Hamarat, 2012). Bütün bu olumsuzluklarına karşın sadeliği ve kullanım kolaylığından dolayı günümüzde en çok kullanılan zemin modelidir. şekil 8’de Winkler zemin modeline göre çeşitli yklemeleer için yer değiştirmeler gösterilmiştir.



şekil 8. Winkler Zemin Modeli (a) düzgün yaylıl olmayan yük durumunda zeminin yerdeğiştirmesi, (b) tekil yük durumundaki yerdeğiştirme, (c) rijit tabaka aracılığıyla aktarılan yük altındaki yerdeğiştirme, (d) düzgün yaylıl yük altındaki yerdeğiştirme

5. İKİ PARAMETRELİ ZEMİN MODELLERİ

Zeminlerdeki gerilme-deformasyon davranışının, elastik ve doğrusal olmaması, yükleme koşulları, gerilme tarihçesi ve konsolidasyon gibi özelliklerden etkilenmesi nedeniyle, zeminde oluşan deformasyonların elastik analizlerle belirlenmesi sonuçların hassasiyeti açısından doğru bir yaklaşım değildir. Bu durumda problemin çözümü zeminle olan temas alanı içinde temelin tepkisini belirleyen doğruluk derecesi makul, daha basit bir matematiksel ifadeye dönüşür. Çoğu araştırmacı temelin fiziksel davranışını doğru gösteren uygun modeller oluşturmak için çalışmışlardır. Bu modellerden biri zemin ortamını birbirine sonsuz yakın doğrusal elastik yaylarla temsil eden Winkler modelidir. Zeminin doğrusal veya doğrusal olmayan malzeme davranışına dayalı üç boyutlu sonlu elemanlarla modellenbildiği yöntemler de bulunmaktadır. Winkler ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri haricinde temel-zemin modelleri hakkında ortaya çıkmış birçok çalışma vardır. Bunlar Pasternak, Hetenyi, Filonko-Borodich ve Vlasov tarafından yapılmış çalışmalardır (Hamarat, 2012). Bu modellerde amaç; Winkler modelinde olmayan, yayların birbiriyle etkileşerek ortamda sürekliliğin sağlanmasıdır.

5.1. Filonenko-Borodich Temeli

Filonenko-Borodich Modeli'nde (Filonenko-Borodich, 1940) ortamın sürekliliği, yüzeydeki ince elastik zar tabakası ile sağlanmıştır. Sisteme bir yük etkimesi durumunda yüzeyde gerilmeler meydana gelmekte ve yaylar birbirinden etkilenmektedir. Bu membran-yay sisteminde zeminin tepki fonksiyonu,

$$p(x, y) = kw(x, y) - T\nabla^2 w(x, y) \quad (9)$$

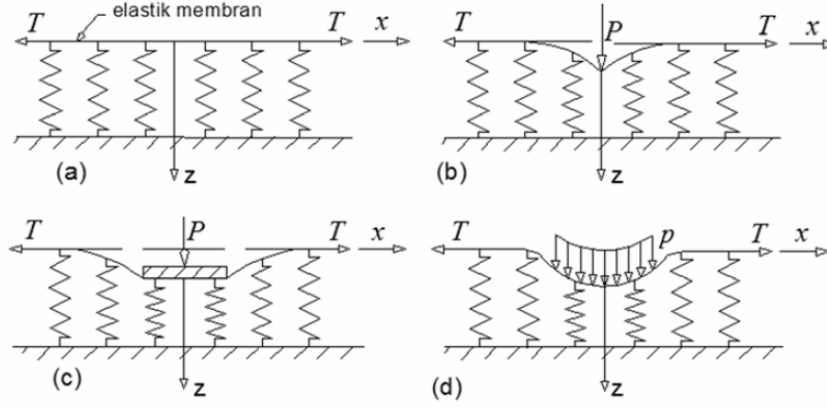
ifadesiyle verilmektedir. Burada, T membran kuvvetini ∇^2 Laplace operatörünü göstermektedir. Laplace operatörü ise;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (10)$$

şeklinde bir boyutlu problemler için (9) ifadesi;

$$p(x, y) = kw(x) - \frac{Td^2w(x, y)}{dx^2} \quad (11)$$

olarak yazılır. Şekil 9’da Filonenko-Borodich modeline göre çeşitli yükleme durumları için yerdeğiştirmeler gösterilmiştir (Hamarat, 2012).



Şekil 9. Filonenko-Borodich Zemin Modeli (Hamarat, 2012)

(a) yüksüz durum (b) tekil yük altında zeminin yerdeğiştirmesi (c) rijit tabaka ile aktarılan yük altındaki yerdeğiştirme (d) yayılı yük altında yerdeğiştirme

5.2. Hetenyi Temeli

Hetenyi Modeli’nde üç boyutlu problemler için elastik plak, iki boyutlu problemlerde ise kiriş ilave ederek zemin ortamının sürekliliği sağlanmıştır (Hetenyi, 1946). Bu modele göre zeminin tepki fonksiyonu,

$$p(x,y) = kw(x,y) - D\nabla^2 w(x,y) \quad (12)$$

denklemleri ile verilmektedir. Burada;

$$D = \left(\frac{E_p H^3}{12(1-\nu_p^2)} \right) \quad (13)$$

olup plağın eğilme rijitliğini göstermektedir. H plak kalınlığı, E_p plağın elastisite modülü, ν_p ise Poisson oranıdır. İki boyutlu sistemlerde (12) ifadesi,

$$p(x,y) = kw(x) - D \frac{d^4 w(x,y)}{dx^4} \quad (14)$$

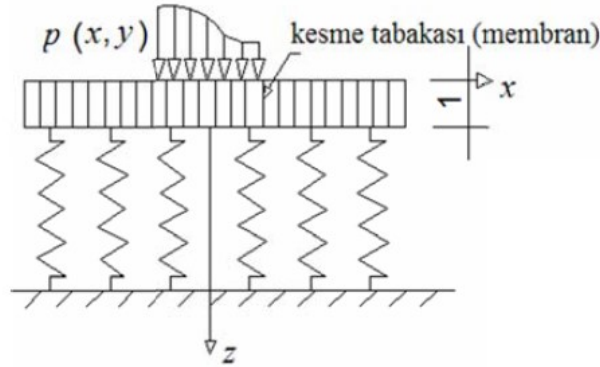
şeklini alır.

5.3. Pasternak Temeli

Pasternak Modeli'nde, Winkler yayları üzerine sıkışmayan bir kesme tabakası tanımlanarak zemin ortamının sürekliliği sağlanmıştır (Pasternak, 1954). Bu kesme tabakası sadece düşey yönde yerdeğiştirme yapabilen elemanlardan oluşmaktadır (Şekil 10). Kayma tabakasının x-y düzleminde izotrop olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla zemin kayma modülleri arasında $G_x=G_y=G_p$ ilişkisi olduğu ifade edilebilir. G_p zemin kayma modülü olmak üzere Pasternak Modeli için zemin fonksiyonu,

$$p(x,y) = kw(x,y) - G_p \nabla^2 w(x,y) \quad (15)$$

olarak yazılır.



Şekil 10. Pasternak Zemin Modeli

Pasternak ve Filonenko-Borodich modelleri karşılaştırıldığında aradaki tek farkın $T-G_p$ parametrelerinden kaynaklandığı görülmektedir. Bu nedenle bu iki model birbirine çok yakın yerdeğiştirme değerleri vermektedir (Hamarat, 2012).

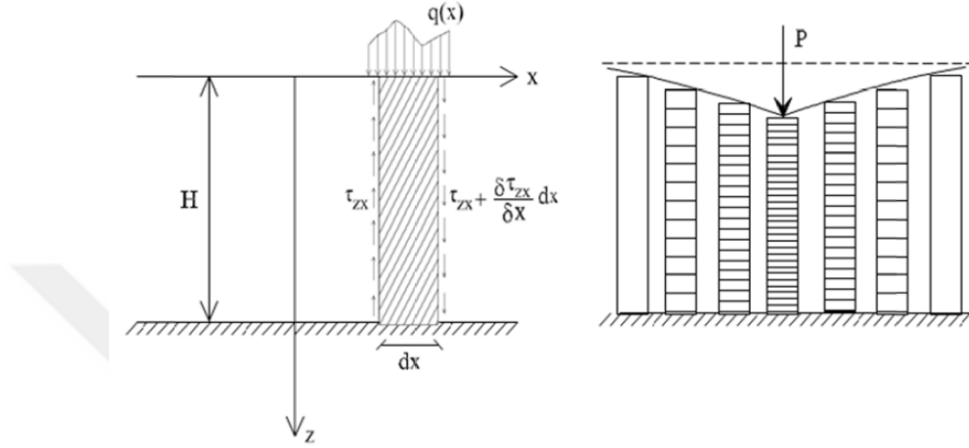
5.4. Vlasov Temeli

Vlasov ve Leont'ev (1966), zemin tabakasını Winkler yayları ile tanımlamak yerine x-z düzleminde zemin kolonları olarak tanımlamışlardır (Şekil 11). Bu zemin kolonu içinde yer değiştirmeler; $u(x,z)$ x-z düzlemindeki yatay deplasmanı, $w(x,y)$ aynı

düzlemde düşey deplasmanı ve $\theta(z)$ fonksiyonu $w(x)$ yerdeğıştirmelerinin derinlik boyunca değişimini veren yaklaşım fonksiyonu olmak üzere;

$$u(x, z) = 0, \quad w(x, z) = w(x)\theta(z) \quad (16)$$

ifadesi ile tanımlanmıştır.



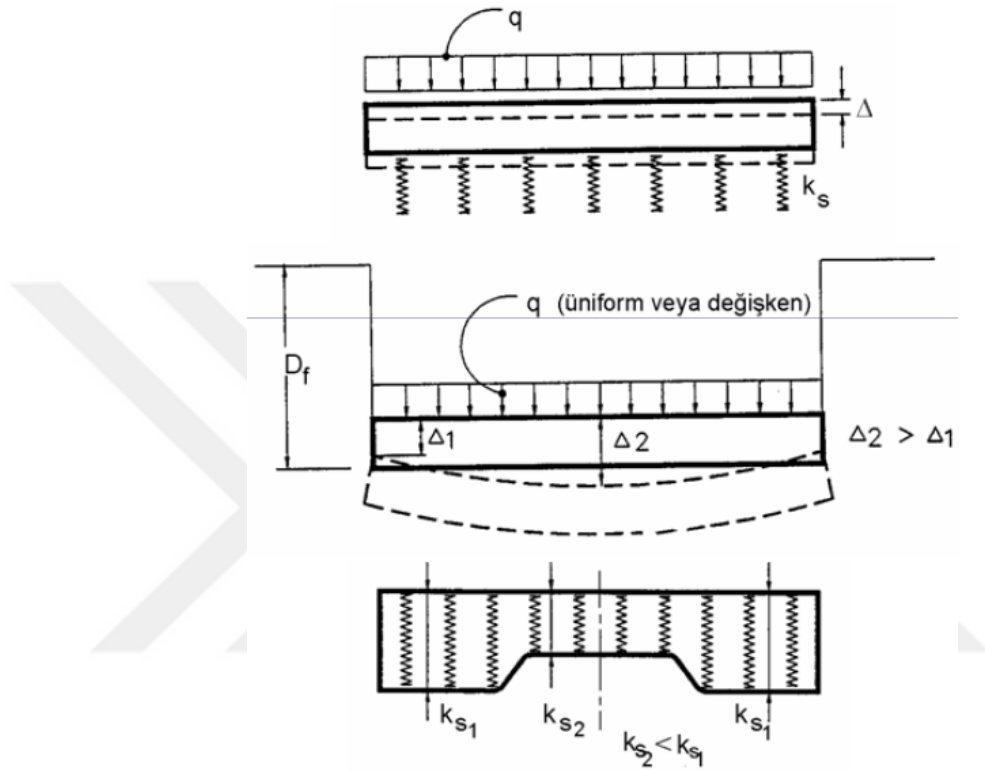
Şekil 11. Vlasov Zemin Modeli

Vlasov modeli üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar zemindeki düşey deformasyon değişimini gösteren ve γ olarak tanımladıkları başka bir parametreyi öne sürmüşlerdir. γ parametresinin belirlenmesiyle yatak katsayısı k_s , ve kayma parametresi $2t$ değerlerinin deney yapma zorunluluğu olmaksızın hesaplanmasının mümkün olduğunu göstermekle birlikte γ parametresinin hesabı ile ilgili herhangi tanım yapmamışlardır. Vallabhan ve Das, yayılı yükü yüklenmiş elastik zemine oturan kirişler için zeminin yerdeğiştirme fonksiyonunu temsil eden γ parametresinin, hesaplanması için bir yöntem sunmuşlardır (Vallabhan & Das, 1988). Elastik zemini birbiriyle bağlantılı olan k , $2t$ ve γ parametreleri ile tanımladıkları için kendi modellerini “değiştirilmiş Vlasov modeli” veya “üç parametrelili zemin modeli” olarak adlandırmışlardır.

6. DEğİŞKEN YATAK KATSAYISI YAKLAŞIMLARI

Elastik kabul edilen zemine oturan yapıların analizinde, yapı modeli ile zemin bağlantısını kurmak için yaygın olarak Winkler yöntemi kullanılmaktadır. Tek parametrelili yatak katsayısı yaklaşımına bir iyileştirme olan iki parametrelili temel-zemin etkileşimi modellerinde, zemindeki sürekliliği sağlamak için Winkler modeline yaylar

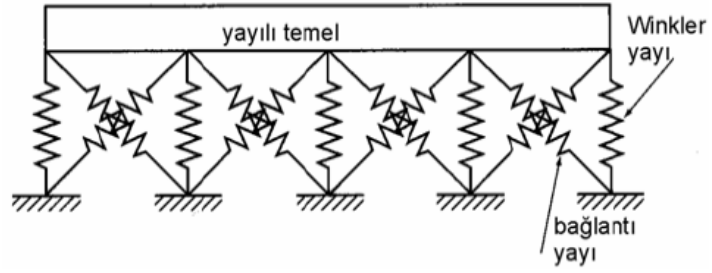
arasında bağlantı sağlayan bir membran eleman eklenmiştir (Vallabhan & Daloğlu, 1999). Ancak, Winkler kabullerine kısmen iyileştirme getiren iki parametrelili zemin modelleri, işlem yükü nedeniyle mühendislik uygulamalarında kolaylıkla kullanılamamaktadır. Zemindeki sürekliliğin sağlanabilmesi için düşey yatak katsayısının temel alanı içerisinde değişken kullanılması gerektiği düşünülmüştür.



Şekil 12. Yatak Katsayılarının Değişimi

6.1. Bağlantılı Yöntem

Uniform yayılı rijit temelde tek k_s değeri kabulü sonuçta gerçekte bağdaşmayan tek çökme değeri (Δ) vermektedir. Oysa temel, yükleme sonrası çanak biçimine dönüşmektedir (Δ_1, Δ_2). Şekil 12a'da elastik yaylar üzerindeki yayılı temel, Şekil 12b'deki gibi kase biçiminde oturmaktadır. Bu durumda k_s değerlerinin Şekil 12c'de gösterildiği gibi değişken olması gerekecektir (Önalp & Sert, 2010).



Şekil 13. Bağlantılı Yaylar Yaklaşımı

Bu değişkenliğin gereğince sağlanabilmesi için Şekil 13’de gösterildiği gibi yayların birbirine bağlı olduğu varsayımı yapılmalıdır (*coupled method*).

6.2. Yarı Bağlantılı Yöntem

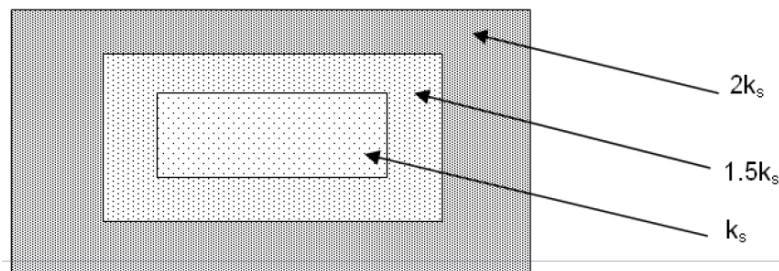
Bağlantılı yaklaşıma benzeyen ancak daha basit yarı bağlantılı yöntemde (*pseudo coupled*) temelin kenarındaki yayların iç taraftakilerden daha rijit olduğu varsayılmakta, böylece yükleme sonucu çanak biçimi sağlanmaktadır. Yarı bağlantılı yöntemle çözümde izlenecek yol:

- Yaylı temel iki veya daha fazla iç içe bölgeye ayrılır.
- Her bölgeye bir k_s değeri atanır. Ancak bu atamada dıştan içe azalan değerler seçildiği gibi en içteki k_s değerinin en dıştakinin yarısı kadar olmasına dikkat edilir (Şekil 14).
- Bu değerleri kullanarak kesme kuvveti, moment ve çökme diyagramları çizilir.

Yarı bağlantılı yöntemde deneysel veya teorik olarak hesaplanan k_s değeri uygun bir yaklaşımla iç içe oluşturulan kenar ve orta bölgelere,

$$A_1.k_1 + A_2.k_2 + A_3.k_3 = (A_1 + A_2 + A_3).k_s \quad (17)$$

ifadesi yardımıyla da dağıtılabilir.

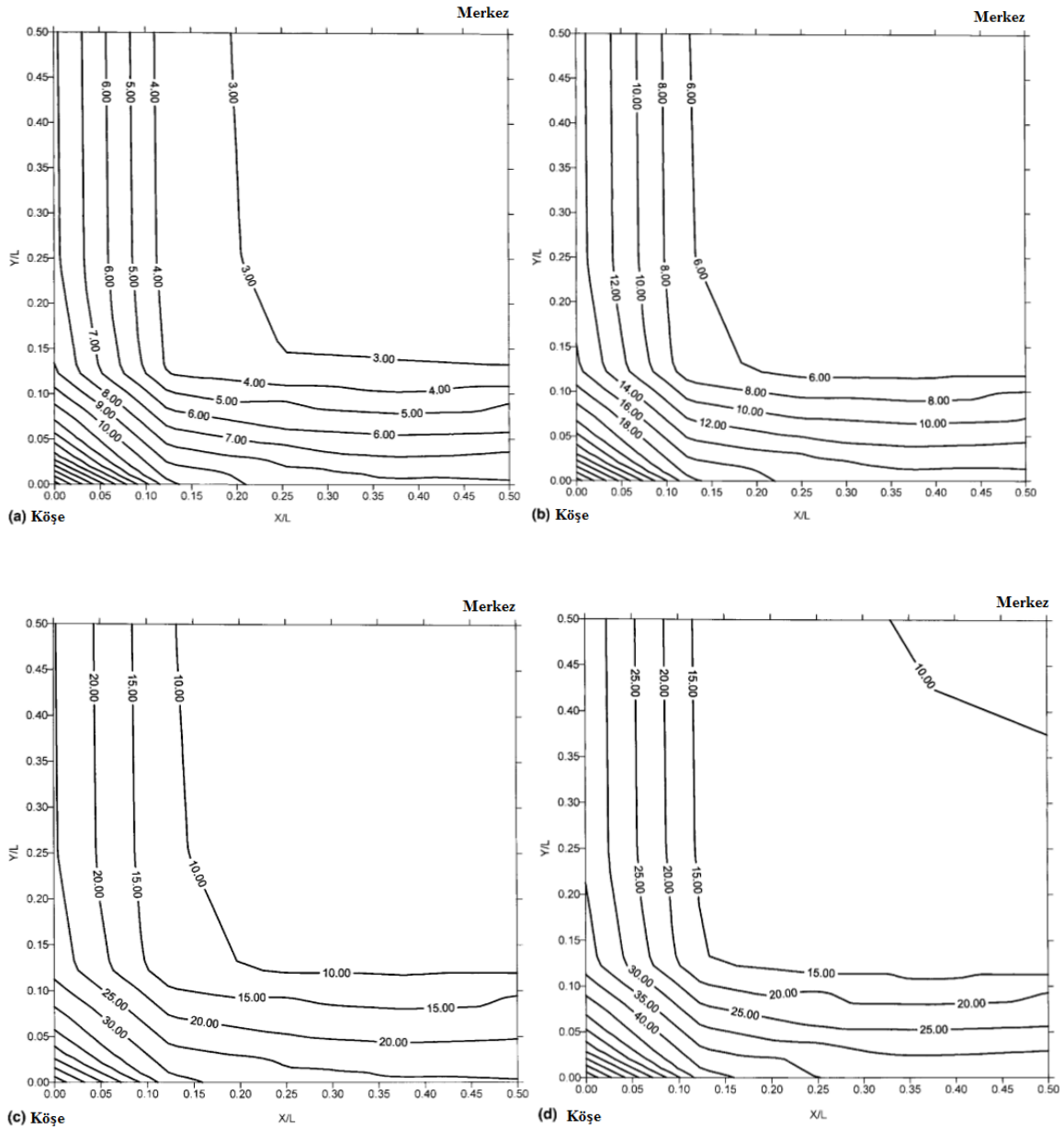


Şekil 14. Yarı Bağlantılı Yay Yönteminde k_s Oranlarının Seçimi

Yarı bağlantılı yay sistemi kullanımı ile yapılan çözümlerden elde edilen maksimum moment değerlerinin Winkler yayları ile yapılan çözümlerden %25 kadar fazla olması, tek k_s değeri ile hesap yapmanın sürdürülmemesi gerektiğini gösteren önemli bir kanıttır (Önalp & Sert, 2010).

6.3. Eşdeğer Winkler Yöntemi

Değişken yatak katsayısı yaklaşımlarından birisi de iki parametrelili Vlasov zemin modeline yakın sonuçlar veren Eşdeğer Winkler yöntemidir (Daloğlu & Vallabhan, 2000). Winkler yönteminde kullanılmak üzere Vlasov çözümüne eşdeğer yatak katsayısı veren ilişkiler kurulmuş ve boyutsuz yatak katsayısı K_{nw} grafikleri önerilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Çeyrek Yayılı Temelde Farklı H/r Oranları için K_{nw} 'yi Tanımlayan Kontürler

(a) $H/r=4$ (b) $H/r=6$ (c) $H/r=9$ (d) $H/r=11$

Plağın karakteristik uzunluğu r ,

$$r = \sqrt[4]{\frac{DH}{E_s}} \quad (18)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde zemin tabaka kalınlığı (H , toplamda en fazla etkili zemin derinliği kadar, diğer bir deyişle düşey gerilme artışının, efektif gerilmenin %20'sine denk geldiği derinlik kadar alınır), beton elastisite modülü (E_p), beton poisson oranı (ν_p), zemin elastisite modülü (E_s) ve plak kalınlığı (h) kullanılmaktadır. Eşdeğer Winkler yatak katsayısı (k); temel üzerinde belirlenen her $x'=x/L$, $y'=y/B$ (L ve B sırasıyla temel planının uzun ve kısa boyutları) boyutsuz koordinatına sahip nokta için grafiklerden elde edilen K_{nw} değeri kullanılarak,

$$k = \frac{K_{nw}D}{r^4} \quad (19)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Böylece yatak katsayısı hesabında temel ve zemin rijitlikleri ile zemin tabaka kalınlığı da dikkate alınmış olmaktadır. Temel için oluşturulan sonlu elemanlar modelinde düğüm noktalarına denklem (19) ile elde edilen eşdeğer Winkler yatak katsayıları atanır ve temel plağı analizi tamamlanır. Bu aşamada, temel plağına yalnızca zemin kat kolon yükleri uygulanabildiği gibi, üst yapı-temel sistemi birlikte modellenerek üst yapı rijitliğini de dikkate alan daha gerçekçi bir zemin-yapı etkileşimi sistemi oluşturulabilmektedir.

7. YATAK KATSAYISININ ELDE EDİLMESİ

Yatak katsayısını, zeminin diğer elastik özelliklerinden ayıran önemli farklardan birisi, zemin sıkışabilirliği yanında, temelin boyutları ve malzemesine de bağlı olmasıdır. Bu anlamda, sadece zemine ait bir elastik parametre olarak görülmeyebilir. Temel gömme derinliği, farklı oturmalar ve konsolidasyon süreci de yatak katsayısını etkilemektedir. Kullanılan birim (kN/m^3) zeminlerin fiziksel özelliklerinden biri olan birim hacim ağırlık ile aynı olmasına karşı anlamı farklıdır. Yatak katsayısı; temel altındaki birim zemin kitlesi alanına birim düşey yerdeğiştirme yaptırmak için gerekli kuvvet anlamındadır.

$$k_s = \frac{q(\text{taban basıncı})}{\delta(\text{sıkışma})} \rightarrow \frac{\text{kPa}}{\text{m}} \rightarrow \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (20)$$

Tablo 1 'de' farklı araştırmalardan alınmış yatak katsayısı değerleri görülmektedir.

Tablo 1. Yatak Katsayısı Değerleri

DAS

	İRİ DANELİ ZEMİN			AŞIRI KONSOLİDE KİL		
	BAğIL BİRİM HACIMAğIRLIK			KIVAM		
	GEVŞEK	ORTA	SIKI	KATI	SERT	ÇOK SERT
Kuru/nemli kum	8000-25000	25000-125000	125000-375000			
				12000-25000	25000-50000	>50000
Batık kum	10000-15000	35000-40000	130000-150000			

TERZAGHI

TERZAGHI	İRİ DANELİ ZEMİN			AŞIRI KONSOLİDE KİL		
	BAğIL BİRİM HACIM AğIRLIK			KIVAM		
	GEVŞEK	ORTA	SIKI	KATI	SERT	ÇOK SERT
Kuru/nemli kum	12800	41600	160000			
				24000	48000	96000
Batık kum	8000	19600	96000			

BOWLES

KUMLAR					KİLLER		
GEVŞEK	ORTA SIKI	SIKI	KİLLİ	SİLTİLİ	$q_u < 200$	$200 < q_u < 800$	$q_u > 800$
4800-16000	9600-80000	64000-128000	32000-80000	24000-48000	12000-24000	24000-48000	>48000

USA İSTİHKAM (TM5-809-12)

Su İeriği →	1-4	5-8	9-12	13-16	17-20	21-24	25-28	>28
OH-CH-MH	-	47500	40700	33950	27100	20350	13600	6800
OL-CL-ML	-	54300	47500	40730	33950	27150	20350	13600
SM-SC	81500	67900	61000	54300	40700			
SW-SP	81500+	81500	67900	61100				
GM-GC	81500+	81500+	81500	67900				
GW-GP	81500+	81500+						

Yatak katsayısı için teorik çözüm yapıldığında zeminin ve temelin elastik katsayıları yanında temelin boyut ve özelliklerinin,

$$k_s = \frac{0.65}{B} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_b I_b}} \frac{E_s}{1 - \nu^2} \quad (21)$$

ifadesinde yansıdığı görülmektedir. Burada B temel genişliği, E_s zeminin elastisite modülü, E_b temelin (beton) elastisite modülü, ν zeminin Poisson oranı, I_b ise temel alanının ikinci momentini göstermektedir. Herhangi bir sayının onikinci karekökü 0.65 ile çarpıldığında sonuç 1'e yakın olacağı için, yukarıdaki denklem yaklaşık olarak;

$$k_s = \frac{E_s}{B(1 - \nu^2)} \quad (22)$$

biçimine dönüşür (Bowles, 1996).

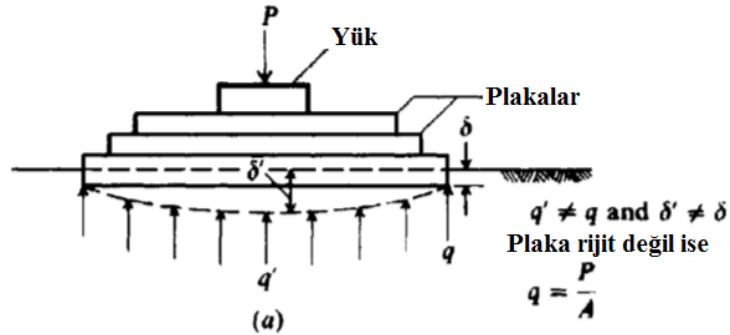
Kumlarda güvenilir bir deney olan standart penetrasyon okumaları (SPTN) ile;

$$k_{0.3}(\text{MN} / \text{m}^3) = 18N^* \quad (23)$$

$k_{0.3}$ 305 mm çaplı plaka taşıma deneyine karşılık gelen yatak katsayısını göstermektedir. Burada, N^* düzeltilmiş SPTN değerini göstermektedir.

7.1. Plaka Taşıma Deneyi

Plaka taşıma deneyi zeminin rijit bir plaka ile yüklenerek plaka çapının iki katı bir derinlik için son taşıma gücü, deformasyon modülü ve yatak katsayısının hesaplanmasını sağlayacak verileri elde etmede kullanılır (TS 5744, 2013). Deneyde kalınlığı 25 mm den az olmayan 300, 600 ve 762 mm çaplarında plakalar kullanılır. Eklenecek yeni plakalarla deney plakasının rijitliği artırılabilir (Şekil 16).



Şekil 16. Plaka Taşıma Deneyi

Yükleme, önceden kararlaştırılan bir basınç kademesi; bir oturma değeri veya plakanın son taşıma gücüne erişilene kadar sürdürülür. Her yük artışı 1 kgf/cm² (10 kPa) veya son taşıma gücünün onda birinden fazla olmamalıdır. Basınç (P/A) – çökme eğrisi Şekil 17’deki gibi çizilir. Eğriden belirlenecek tanjant veya sekant modülleriyle yatak katsayısı belirlenir. Bu amaçla önce σ - δ eğrisinin elastik kabul edilen doğruya yakın en yakın bölümünde veya $\Delta\delta=0.0254$ m noktasındaki gerilme-yerdeğiştirme ile aşağıdaki formül kullanılır ve yatak katsayısı hesaplanır.

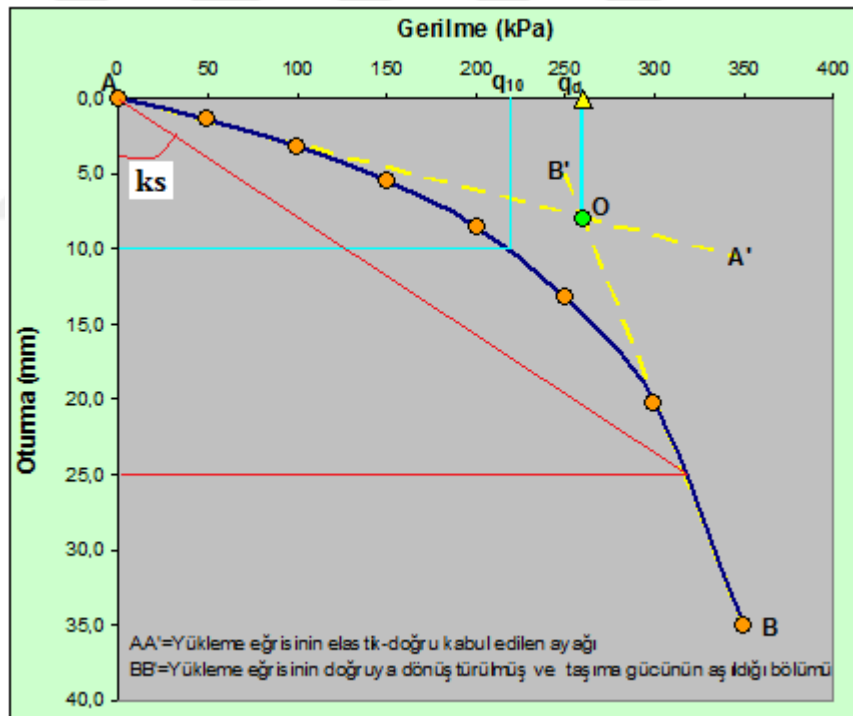
$$k_s = \frac{q}{\delta} \quad (24)$$

Burada;

k_s : Düşey yatak katsayısı (kN/m³)

δ : elastik bölgedeki herhangi bir nokta için ortalama plaka oturması(m) veya $\Delta\delta=0.0254$ m

q : δ 'ye karşılık olan gerilme (kN/m²)



Şekil 17. Plaka Taşıma Deneyi ile Taşıma Gücü ve Yatak Katsayısının Tayini

Basınç-çökme eğrisinin doğruya (elastik) yakın tarafında herhangi iki gerilme değeri q_{01} ve q_{02} seçilir ve bunların karşılığı çökmeler δ_1 ve δ_2 eğrilerden okunur. Buradan zeminin seçilen aralıkta deformasyon modülü aşağıdaki formülle hesaplanır. (TS 5744, 2013)

$$E_s = 0.75D \frac{\Delta q}{\Delta \delta} \quad (25)$$

Burada;

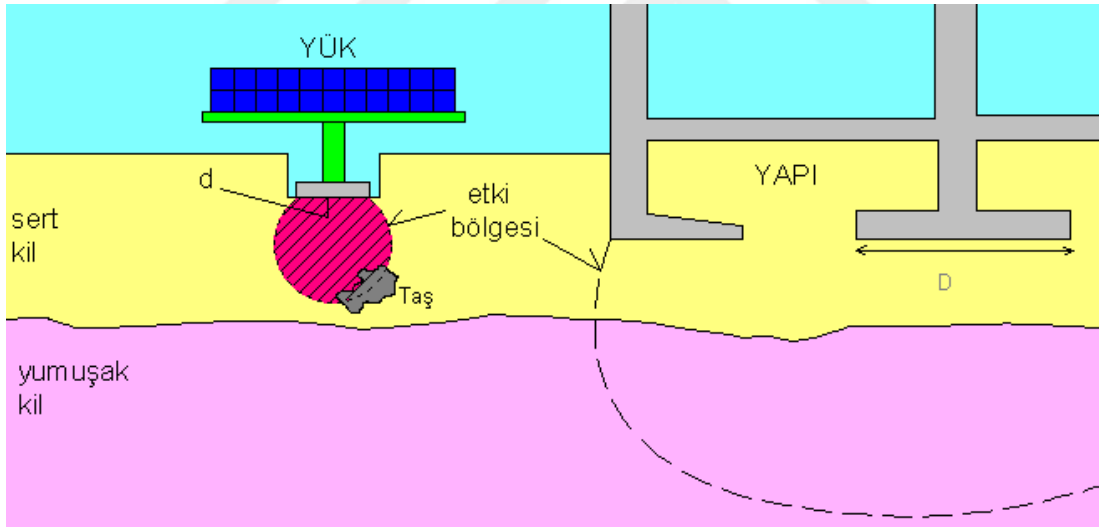
E_s : Deformasyon Modülü (kN/m^2)

D: Plaka çapı (m)

$\Delta q = q_{01} - q_{02}$ (kN/m^2)

$\Delta \delta = \delta_1 - \delta_2$ (m)

Deneyin en zayıf yanı ise plaka çapının gerçek temele oranla küçük olması nedeniyle etkilediği derinliğin kısıtlı olmasıdır. Böylece, örneğin üstte sert altta çok yumuşak bir zemin profili varsa kısıtlı boyuttaki plakanın basınç soğanları yumuşak tabakaya kadar uzanamayacağından taşıma gücü gerçek değerinden çok yüksek ölçülecek, ve tehlikeli bir durum ortaya çıkacaktır. Tersisi durum, yani sığ yumuşak bir tabaka altında katı zemin, ortamı olduğundan daha kötü göstereceğinden aynı ölçüde sakıncalı olacaktır (Şekil 18).



Şekil 18. Tabakalı Zeminde Plaka Taşıma Deneyi

Plaka taşıma deneyi ile yapılan ölçümlerde hesaplanan yatak katsayısı k_s değerinin, plaka çapının temel boyutuna göre küçük olması nedeniyle düzeltilmesi gerekir. D çapındaki bir plakaya uygulanacak yük ile kitle gerilmelerinin belireceği bölge yaklaşık 5D ile sınırlıdır. Gerçekte ise daha büyük boyutlu olan temel çok daha derin ortamlarda kitle gerilmeleri oluşturacaktır. Bu durumu gidermek için Terzaghi, temel derinliğinde

uygulanan 305mm çaplı plaka taşıma deneyinde ölçülen ($k_{0.3}$) yatak katsayısı değerinin temel boyutuna uygulanmak üzere kumlarda;

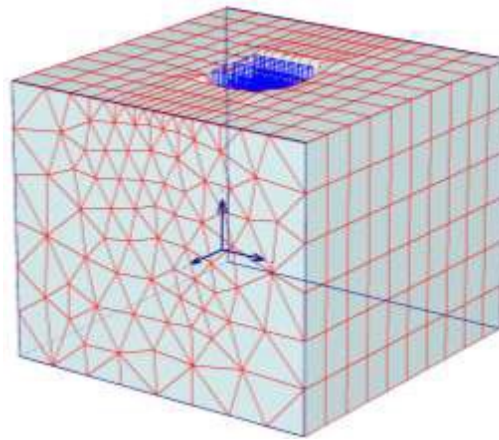
$$k_s = k_{0.3} \left(\frac{B + 0.3}{2B} \right)^2 \quad (26)$$

killerde ise;

$$k_s = k_{0.3} \left(\frac{0.3}{B} \right) \quad (27)$$

ifadelerinden hesaplanabileceğini öne sürülmüştür. Bir diğer deyişle k_s kumlarda beklendiği gibi temel boyutundan doğrusal olmayan biçimde etkilenmekte olup, killerde ise doğrusallık göstermektedir. Genelde temel için yatak katsayısı belirlenirken yukarıdaki Terzaghi denklemleri kullanılır. Oysa eldeki bilgiler k_s 'nin sadece temelin genişliği değil, biçimi, gömme derinliği, yüklemeye sonra geçen süre, zeminin özelliği, yer altı su seviyesi ve de en önemlisi incelenen noktanın temelin altındaki konumuna bağlı olarak değiştiğini göstermektedir (Önalp & Sert, 2010).

Temel altındaki gerilme alan zemin kalınlığının plaka taşıma deneyine göre büyük olması, yani farklı rijitlik ve kayma direncine sahip tabakalara kitle gerilmeleri aktarılamamasına neden olmaktadır. (26) ve (27) denklemleri bu sorunu düzeltmek için kullanılmaktadır. Terzaghi denklemlerini sayısal çözümlerle karşılaştırmak için sonlu eleman yazılımının kullanılması önerilmiştir (Şekil 19). Analizde kumlu zemin katmanları 15 düğüm noktalı üçgen geometrili sonlu elemanlarla modellenmiştir (Marto, et al., 2012).



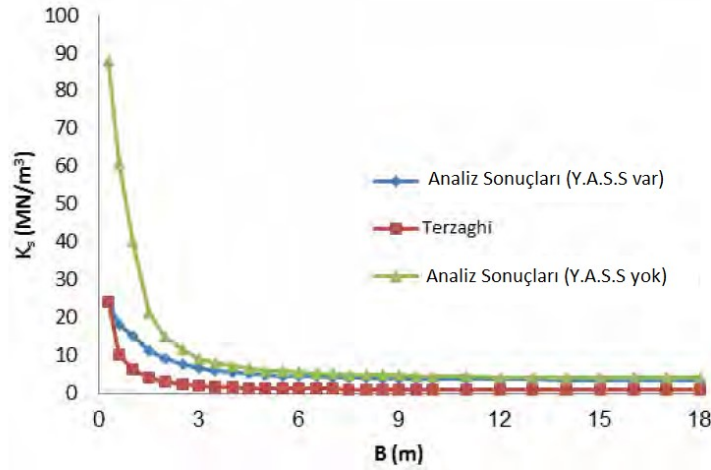
Şekil 19. Sonlu Eleman Analiz Modeli

Zeminin mekanik davranışı için Tablo 2’de parametreleri verilen “Mohr-Coulomb” modeli kullanılmıştır.

Tablo 2. Zemin Parametreleri (MARTO, et al., 2012)

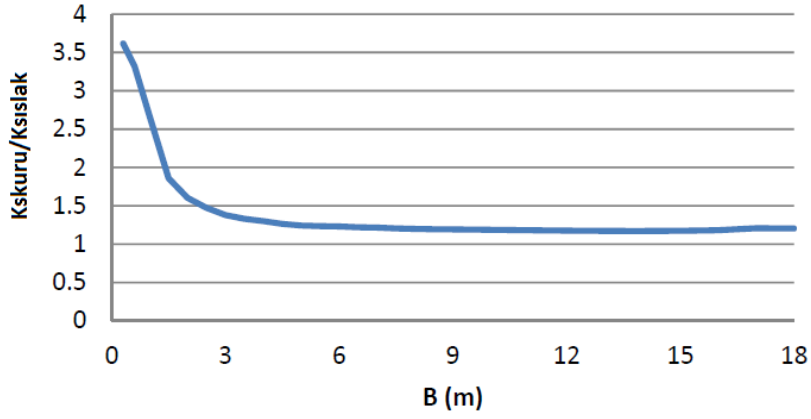
Tabaka	c (kPa)	ϕ (°)	v	E (MPa)	ρ (kN/m ³)	ρ_{doygun} (kN/m ³)	K_0	H (m)
1	1	47.5	0.3	32060	18.2	18.9	2.16	2.44
2	1	42	0.3	14880	17.3	18.1	0.63	1.5
3	1	42.8	0.3	23080	15.7	17.3	0.66	3.05
4	1	38	0.3	7820	15.7	17.3	1.04	0.9

Dört zemin katmanının özellikleri CPT deneyi ile bulunmuştur. 60 adet düşey plaka taşıma deneyi Plaxis programında modellenip bunların analizi yapılmıştır. 0.3m çapındaki plakanın analiz sonuçlarından bulunan k_s değerleri Terzaghi denklemi ile diğer boyuttaki plakalar için düzeltilerek hesaplanmıştır. Analizler yeraltı su seviyesi olan ve olmayan modeller ile yapılmıştır. Analizlerde aynı taban basıncını kullanmak için bütün plakalara aynı yayılı yük ($q=220$ kPa) etkilmiştir ve sonuçlar Şekil 20’de gösterilmiştir. Analiz sonuçlarında Terzaghi denklemindeki gibi plaka boyutları büyüdükçe k_s değerleri azalmıştır.



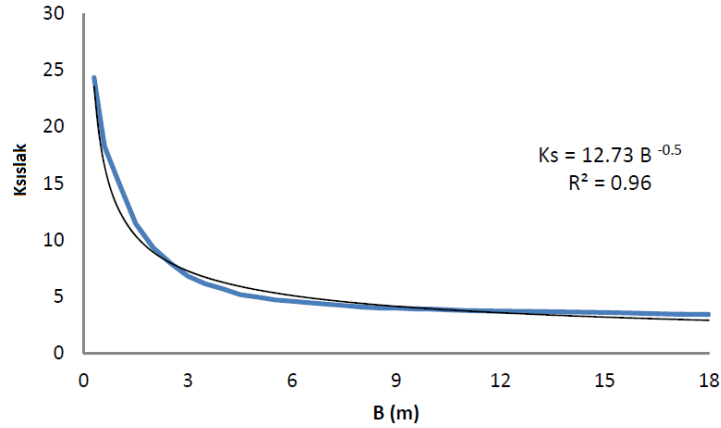
Şekil 20. Analiz ve Terzaghi Denklem Sonuçlarının Karşılaştırılması (Marto, et al., 2012)

YASS’nin dikkate alındığı analizlerde, plaka boyutu arttıkça kuru durumdaki k_s ’nin ıslak durumdakine oranının sabitleştiği de Şekil 21’de görülmektedir.

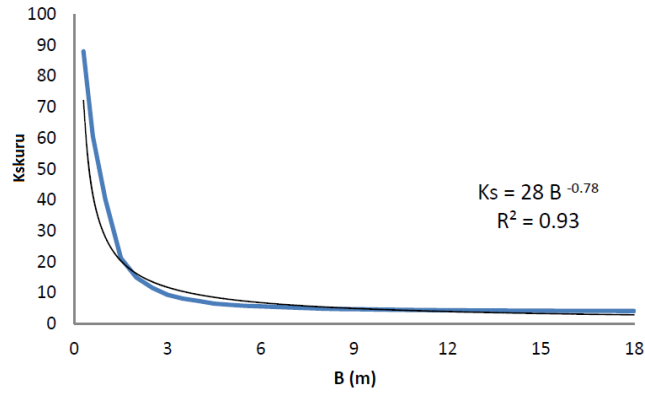


Şekil 21. Y.A.S.S Durumuna göre Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması (Marto, et al., 2012)

Sonuçların belirtildiği Şekil 22'deki k_s -B grafiklerlerinde, eğri uydurma yöntemi ile denklemler belirlenmiştir. Belirlenen denklemlerle istenilen temel boyutu girilerek yatak katsayıları hesaplanabilir.



(a) YASS var



(b) YASS yok

Şekil 22. Analiz Sonuçları (Marto, et al., 2012)

Kumlu zemin ortamındaki plaka taşıma deneyleri için sonlu eleman analiz sonuçları Tablo 3’de Plaka genişliği ve k_s arasındaki korelasyon YASS’li ve kuru duruma göre belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda Terzaghi denklemi, YASS durumu ve zemindeki tabakalanmayı göz önüne almamıştır.

Tablo 3. Sonuçlar (MARTO, et al., 2012)

B (m)	P (kN/m ²)	Oturma (m) Kuru	Oturma (m) Islak	k_{s_kuru} (MN/m ³)	k_{s_islak} (MN/m ³)	k_s Terzaghi Y.A.S.S. lı durum
0.3	220	0.0025	0.00904	88.00	24.34	24.34
0.6	220	0.00363	0.01252	60.61	18.27	10.28
1	220	0.00545	0.01453	40.37	15.14	6.40
1.5	220	0.01035	0.01924	21.26	11.43	4.12
2	220	0.01472	0.02361	14.95	9.32	3.08
2.5	220	0.0188	0.02769	11.70	7.95	2.49
3	220	0.02348	0.03237	9.37	6.80	2.06
3.5	220	0.027	0.0359	8.15	6.13	1.81
4	220	0.02974	0.03867	7.40	5.69	1.64
4.5	220	0.03365	0.0425	6.54	5.18	1.47
5	220	0.03577	0.04441	6.15	4.95	1.39
5.5	220	0.03786	0.04674	5.81	4.71	1.31
6	220	0.03904	0.04798	5.64	4.59	1.26
6.5	220	0.04054	0.04942	5.43	4.45	1.22
7	220	0.04187	0.05089	5.25	4.32	1.18
7.5	220	0.04333	0.0522	5.08	4.21	1.14
8	220	0.04521	0.0541	4.87	4.07	1.09
8.5	220	0.04623	0.05513	4.76	3.99	1.07
9	220	0.04645	0.05532	4.74	3.98	1.06
9.5	220	0.04732	0.05617	4.65	3.92	1.04
10	220	0.04765	0.05655	4.62	3.89	1.03
11	220	0.04976	0.05861	4.42	3.75	0.99
12	220	0.05046	0.05936	4.36	3.71	0.97
13	220	0.051	0.05981	4.31	3.68	0.96
14	220	0.05169	0.06058	4.26	3.63	0.95
15	220	0.05255	0.06143	4.19	3.58	0.93
16	220	0.05285	0.06243	4.16	3.52	0.91
17	220	0.053	0.06389	4.15	3.44	0.89
18	220	0.0534	0.06429	4.12	3.42	0.88

Yapılan benzer bir çalışmada (Moayed & Janbaz, 2008) boyut etkisi yine sonlu eleman analizi ile incelenmiş ve Terzaghi’nin killi zeminler için önerdiği denklemin yatak katsayısını belirlemedeki geçerliliği araştırılmıştır. Bu çalışmada diğerinden farklı olarak analizi yapılan zemin ortamındaki 0.3, 0.45 m çaplı plaka deneyleri de analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. 45 adet oturma analizi yapılmıştır. Terzaghi denklemi ve analiz sonuçları karşılaştırılmış, denklemden hesaplanan k_s değerlerinin sonlu eleman analiz sonuçlarından daha düşük olduğu görülmüştür.

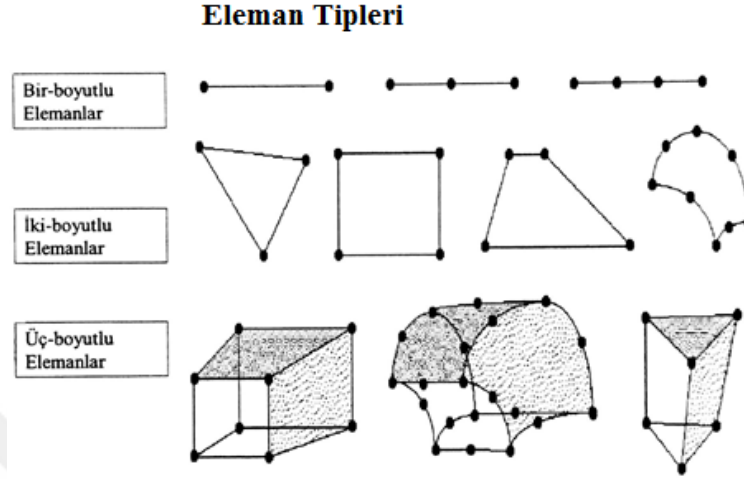
Gösterilen çalışmalardaki gibi plaka taşıma deneyi sonlu eleman programları yardımıyla hesaplanabilir. 0.3m çaplı plaka taşıma deneyinin sayısal analizi bu amaç için kullanılan yazılımlarla modellenip yapılabilir. Boyut etkisinin daha iyi yansıtılabilmesi amacıyla farklı temel boyutları için plaka modellenip analiz sonuçlarıyla k_s değerini veren denklem, temel boyutuna göre belirlenerek, ilgili temel zemini için üstyapı mühendislerine verilebilir. Böylece temeli boyutlandırarak mühendis denkleme, yapacağı temelin boyutlarını girerek k_s değerine ulaşır. Yapılan sayısal analizlerde, plaka genişliği arttığı için temas alanı içerisinde düşey çökmeler arasındaki fark artacaktır. Çökmelerin ortalaması veya bunların en büyük değerinin alınması k_s değerini önemli oranda değiştirebilir. Bu durumda, analizlerde plakanın rijitliği betonarme temele yakın veya daha yüksek seçilmelidir. Sayısal analizle elde edilebilecek avantajlar, gerilmelerin sıkışabilir zemin kalınlığına ulaştırılabilmesi, tabakalanma ve YASS etkilerinin dikkate alınabilmesidir. Bu analiz yöntemlerinden elde edilen k_s değerinin Terzaghi'ye göre bulunandan daha yüksek olması, bu denklemleri güvenli tarafta bırakmaktadır.

8. PLAK - ZEMİN PROBLEMLERİNİN SONLU ELEMANLARLA MODELLENMESİ

Sonlu elemanlar yöntemi diferansiyel denklemlerle ifade edilen mühendislik problemlerinin analizi için geliştirilen sayısal bir çözüm yöntemidir. Sürekli bir ortam sonlu elemanlara bölünerek denklemler bir eleman için yazılır ve entegre edilerek sistem denklemleri elde edilir. Sonuç olarak sürekli bir ortam için göz önüne alınan diferansiyel denklem doğrusal bir denklem takımına indirgenir. Geliştirilen sonlu eleman formülasyonu bir çok probleme uygulanabilir. Karmaşık geometri, yükleme, sınır koşulları ve malzeme durumu dikkate alınabilir. Seçilen birincil bilinmeyenler (yer değiştirme, akım potansiyeli vb.) ve bunlara bağlı ikincil bilinmeyenler (gerilme, deformasyon, akım miktarı, hız, vb) birlikte elde edilir. Yaklaşık bir yöntemdir ve analitik çözüme çok yakın sonuçlar verir. Probleme uygun eleman tipi seçilir. Belirlenen birincil bilinmeyenlere göre bir, iki veya üç boyutlu elemanlar kullanılır (Şekil 23).

Eğri yüzeyler için eğrisel elemanlar tanımlanır. Gerekli serbestlik dereceleri belirlenir. Eleman düğüm noktaları, eleman bölgesinde bilinmeyen büyüklüğün dağılım şeklini tanımlamak üzere matematiksel bir fonksiyon yazmak için stratejik noktalar sağlar.

Büyükliğin eleman içindeki dağılımını tanımlamak üzere polinomlar ve seriler bu amaçla kullanılabilir. Çözüm yalnız düğüm noktaları için gerçekleştirilir.



Şekil 23. Sonlu Eleman Tipleri

Bu çalışmada yapılan sonlu eleman analizlerinde iki parametrelili zemin modeli için Vlasov yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerde zemin ortamının davranışı, sıkışabilirliği yatak katsayısı ile belirlenen elastik yaylarla temsil edilmektedir. Elastik yayların (*spring*) üzerine oturan plak için iki boyutlu sonlu elemanlar (*shell*) kullanılmıştır. İki parametrelili zeminde elastik yaylar, sürekliliğin sağlanması için kayma elemanlarıyla birleştirilmelidir. Bu amaçla (*layered Shell*) özellikli elemanlar kullanılmıştır.

Yatak katsayısı kullanan Winkler ve iki parametrelili zemin modelleri için iki boyutlu sonlu elemanlar yeterlidir. Analizde kullanılacak yatak katsayısı deneysel veya teorik olarak elde edilebilir. Teorik hesaplarda zemin elastisite modülü E_s ve Poisson oranı ν_s 'ye ihtiyaç vardır.

İki parametrelili zemin modellerinde, yayları birbirine bağlayan kayma elemanları kullanıldığı için zeminde süreklilik sağlanır. Zeminin deformasyonu yine yayların kayma elemanlarıyla birbirinden etkilenerek sıkışmasıyla belirlenir. Geliştirilmiş Vlasov modelinde zemin, birbirleri arasında kesme gerilmeleri oluşan düşey kolonlar olarak düşünülmektedir. Zemin deformasyonu sıkışabilir kalınlık boyunca bir yaklaşım fonksiyonu ile ifade edilir. Homojen, elastisite modülünün doğrusal veya karesel arttığı zeminlere uygulanabilir. İki parametrelili zemin modelleri de Winkler gibi zeminin doğrusal olmayan davranışını dikkate almamaktadır. Yükleme koşulları ve efektif gerilme analizi yapılamadığı için YASS'nin etkisi hesaplanamaz.

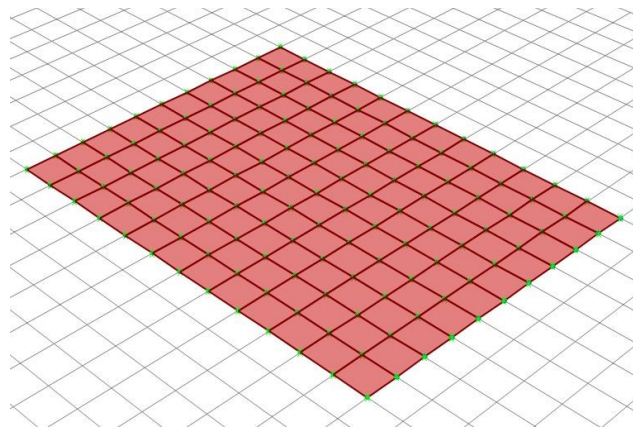
Plak ve zemin ortamı iki boyuta indirgenerek; düşeyde iki boyutlu sonlu elemanların kullanılması ile problem düzlem-deformasyon analizleri ile, malzeme davranışı için doğrusal ve doğrusal olmayan zeminler tanımlanarak efektif ve toplam gerilme analizleri ile yapılabilir.

Günümüzde kullanılan geoteknik hesaplama için geliştirilmiş sonlu eleman analiz yazılımlarında en önemli belirleyici faktör analizde hangi zemin modeli ve parametrelerin kullanılması gerektiğidir. Analizin gerçeği yansıtabilmesi için zemin incelemelerinin yeterli sayı ve derinlikte yapılması gerekmektedir. Bu yazılımlar farklı tabaka kalınlıklarında, yer altı suyu koşullarında ve farklı zemin problemlerini üç boyutlu modellemeye yarar.

8.1. Winkler Zemin Modelinin Tanımlanması

Winkler zemin modeli için bu araştırmada SAP2000 sonlu eleman yazılımından yararlanılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman (*shell*) ve elastik yaylarla modellenen plak-zemin probleminde yazılıma yay katsayılarının hesaplanabilmesi için düşey yatak katsayısı k_s değeri girilmektedir. Herbir sonlu elemana farklı yatak katsayısı değeri tanımlanabildiği için değişken yatak katsayısı analizleri yapılabilir. Eşdeğer Winkler ve yarı bağlantılı yöntem kullanılabilir.

Analizi yapılacak plak, Şekil 24'deki gibi programdaki alan (*Area*) elemanlarıyla modellenir.



Şekil 24. Plak Sonlu Eleman Modeli

Malzeme ve kesit tanımlandıktan sonra ilgili sonlu elemanlara “*Assign*” komutu ile atanır. Elemanların düğüm noktalarına yatak katsayısına bağlı yay katsayılarını vermek için Şekil

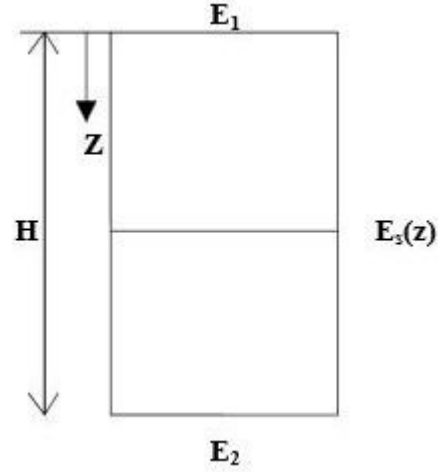
25’de görüldüğü gibi “Area Springs” kullanılır. Böylece program düğüm noktalarının etkili alanlarını girilen değerle çarparak yay katsayılarını bulup her noktaya bir yay eleman eklemektedir.

Şekil 25. Yatak Katsayısının Atanması

8.2. İki Parametrelili Vlasov Zemin Modelinin Tanımlanması

Vlasov zemin modelinde elastik zemini tanımlayan zemin yatak katsayısı C , zemin kayma parametresi $2Ct$ ve yüzey parametresi γ 'nın hesaplanması gerekmektedir. Bu büyüklükler,

$$\gamma^2 = \frac{H^2(1-2\nu_s)}{2(1-\nu_s)} \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(\frac{\partial w(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy}{\iint w^2 dx dy} \quad (28)$$



Şekil 26. Elastisite Modülü Sabit Zeminler

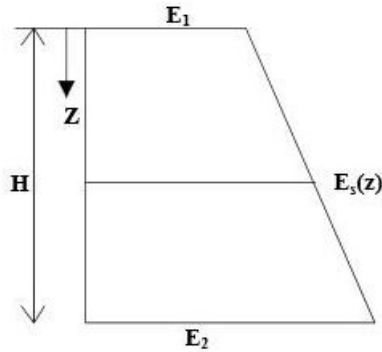
Elastisite modülü sabit zeminlerde,

$$C = \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \frac{\gamma}{H_s} \frac{(Sh2\gamma + 2\gamma)}{4Sh^2\gamma} \quad (29)$$

$$2C_T = G_s \frac{H_s}{\gamma} \frac{(Sh2\gamma - 2\gamma)}{4Sh^2\gamma} \quad (30)$$

Elastisite modülü derinlikle doğrusal artan zeminlerde,

$$E_s(z) = E_1 + (E_2 - E_1) \frac{z}{H_s} \quad (31)$$



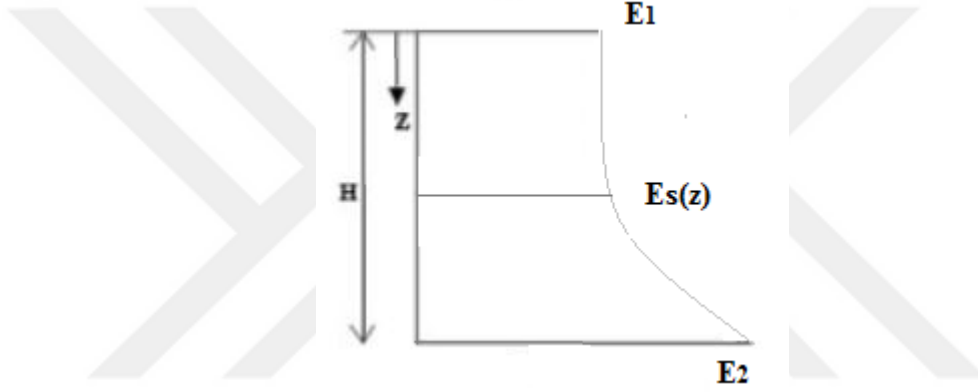
Şekil 27. Elastisite Modülü Doğrusal Artan Zeminler

$$C = \frac{(1 - \nu_s)}{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)} \frac{2E_1\gamma \text{Sh}2\gamma + 2\gamma^2(E_1 + E_2) - (E_2 - E_1)[1 - \cosh 2\gamma]}{8H_s \text{Sh}^2\gamma} \quad (32)$$

$$2C_T = \frac{1}{(1 + \nu_s)} \frac{H_s}{\gamma^2} \frac{2E_1\gamma \text{Sh}2\gamma - 2\gamma^2(E_1 + E_2) - (E_2 - E_1)[1 - \cosh 2\gamma]}{16\text{Sh}^2\gamma} \quad (33)$$

Elastisite modülü kuadratik artan zeminlerde,

$$E_s(z) = E_1 + (E_2 + E_1) \frac{z^2}{H^2} \quad (34)$$

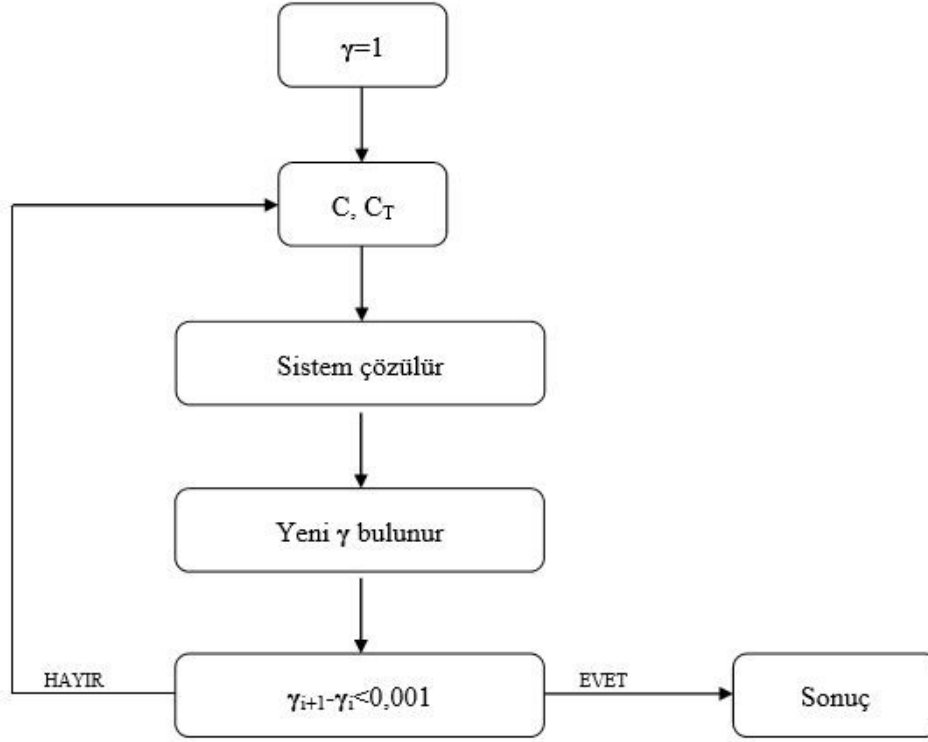


Şekil 28. Elastisite Modülü Kuadratik Artan Zeminler

$$C = \frac{(1 - \nu_s)}{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)} \frac{3[E_2 + E_1(2\gamma^2 - 1)]\text{Sh}2\gamma + 2\gamma[E_2(2\gamma^2 - 3) + E_1(3 + 4\gamma^2)]}{24H_s \text{Sh}^2\gamma} \quad (35)$$

$$2C_T = \frac{H_s}{(1 + \nu_s)} \frac{3[E_2 + E_1(2\gamma^2 - 1)]\text{Sh}2\gamma - [E_2(2\gamma^2 + 3) + E_1(4\gamma^2 - 3)]2\gamma}{48\gamma^3 \text{Sh}^2\gamma} \quad (36)$$

biçimindedir. γ katsayısı bu değerlerin yanında temel boyutları, temel rijitliği, yükleme şekline bağlı olarak temel altındaki ve çevresindeki zemin bölgesinde $w(x,y)$ düşey yer değiştirme yüzeyinin belirlenip, eşitlik (28)'de ki pay ve paydadaki integrellerin alınmasıyla hesaplanabilir. Böylece çözüme bir ardışık yaklaşımla ulaşılabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 29. C ve C_T'nin hesabı için Ardışık Yaklaşım

γ 'nın ilk değeri uygun seçilmese bile itarasyonun yakınsama hızının yüksek olduğu yapılan analizlerde anlaşılmıştır. Zeminin hesaplanmış bir şekildeğiştirme yüzeyine karşı gelen yeni γ katsayısı bulunabilir. Pay ve paydaya giren integrallerin zemin bölgesinin idealizasyonunda ortaya çıkan sonlu elemanların her birinde ayrı ayrı bulunup tüm sistem için integral değerlerine bütün elemanlardan gelen katkıların toplanmasıyla geçilebilir. Bir zemini temsil eden bir sonlu eleman için ilgili integraller sözkonusu sonlu eleman için C ve [C_T] matrisleri hesaplanarak,

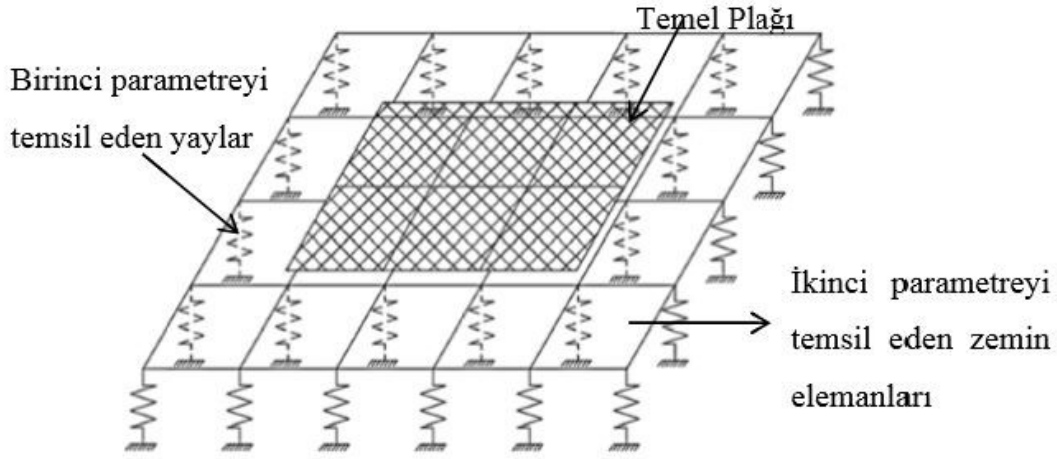
$$\iint w^2 dA = \frac{1}{C} [d]^T [C] [d] \quad (37)$$

$$\iint \left\{ \left(\frac{\partial w^2}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial w^2}{\partial y} \right) \right\} dA = \frac{1}{2C_T} [d]^T [C_T] [d] \quad (38)$$

denklemleriyle bulunabilir. Tüm zemin ortamı için bütün sonlu elemanlardan gelen katkılar toplanarak,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w^2 dx dy = \sum_{\text{Zemin Alanı}} \frac{1}{C} [d]^T [C] [d] \quad (39)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(\frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy = \sum_{\text{Zemin Alanı}} \frac{1}{2C_T} [d]^T [C_T] [d] \quad (40)$$

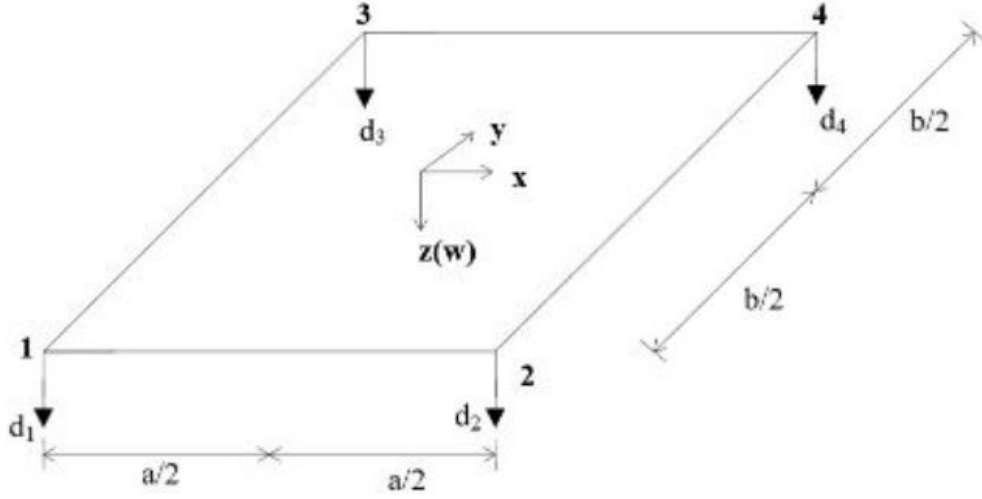


Şekil 30. İki Parametrelili Zemin Üzerine Oturan Plak Modeli

hesaplanır. SAP2000' de tanımlanan iki parametrelili zemin üzerine oturan plak modeli Şekil 30'da görülmektedir. Bu denklemlerde, $[C]$ zemin yatak katsayısına bağıli yataklanma matrisi, $[C_T]$ zemin kayma parametresine bağıli zemin kayma matrisidir. Dört serbestlik dereceli dikdörtgen sonlu elemanda C_T matrisi,

$$[C_T] = \frac{2C_T}{3} \begin{pmatrix} \alpha + \beta & \frac{\alpha}{2} - \beta & \frac{\beta}{2} - \alpha & -\frac{(\alpha + \beta)}{2} \\ \frac{\alpha}{2} - \beta & \alpha + \beta & -\frac{(\alpha + \beta)}{2} & \frac{\beta}{2} - \alpha \\ \frac{\beta}{2} - \alpha & -\frac{(\alpha + \beta)}{2} & \alpha + \beta & \frac{\alpha}{2} - \beta \\ -\frac{(\alpha + \beta)}{2} & \frac{\beta}{2} - \alpha & \frac{\alpha}{2} - \beta & \alpha + \beta \end{pmatrix} \quad (41)$$

ile gösterilmektedir. Bu eşitlikte, sonlu elemanın boyutları a ve b olmak üzere $\alpha=a/b$ ve $\beta=b/a$ 'dır.

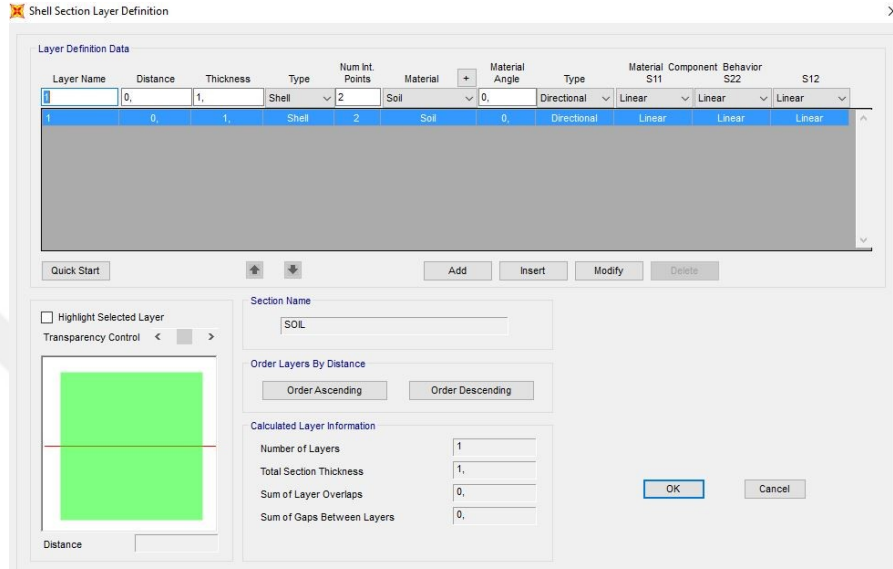


Şekil 31. Dört Serbestlik Dereceli Sonlu Eleman

Zeminin birinci parametresi olan yatak katsayısı SAP2000'deki "Area Springs" özelliği ile tanımlanır ve Winkler modelindeki gibi zemin sonlu elemanlarına atanır.

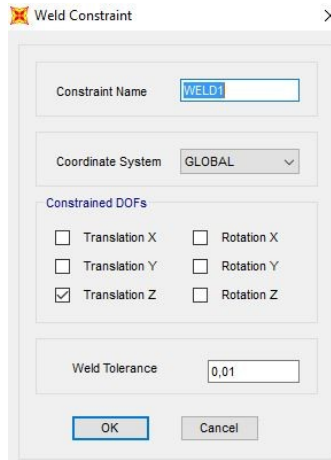
Şekil 32. Ortotrop Malzeme Tanımlanması

Yazılıma ikinci parametreyi tanımlamak için Şekil 32’de gösterildiği gibi ortotrop malzeme özelliği olan *layered/nonlinear* kabuk (*shell*) elemanlar kullanılır. Kayma modülünün tanımlandığı yerlere zemin kayma parametresi $2C_T$ değeri 1.2 ile çarpılarak girilir. Buradaki 1.2 sayısı, zemin elemanının, programın eleman kütüphanesindeki kalın plak elemandan benzeştirilerek üretilmesinden gelmektedir. Şekil 33’de ise zemin eleman için tanımlanan *layered shell*’in kesiti belirlenmektedir (Hamarat, 2012).



Şekil 33. *Layered Shell* Özelliklerinin Tanımlanması

Modelde zemin sonlu elemanlarıyla plak elemanları arasında 5 mm mesafe bırakılır. Plak altına denk gelen zemin eleman düğüm noktaları ile plak noktalarının eşit düşey yerdeğiştirme yapması için programda kaynaklı kısıtlama “*Weld Constraint*” tanımlanır ve bu noktalara atanır (Şekil 34).



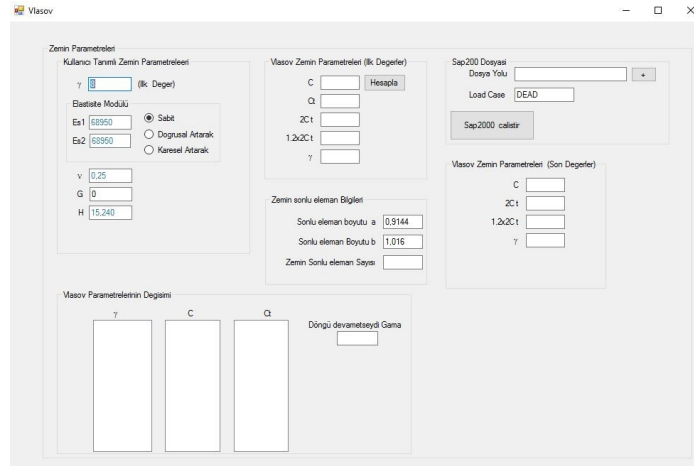
Şekil 34. *Weld Constraint* Tanımlanması

Ardışık yöntemin uygulanabilmesi için, SAP2000 programına C ve $2C_T$ parametrelerinin gönderilip, analiz sonucu zemin sonlu elemanlara ait düşey yerdeğiştirmelerin alınarak (39),(40) denklemleriyle γ parametresinin bulunup, buna bağlı olarak hesaplanan C ve $2C_T$ değerlerinin yeniden hesaplanıp programa gönderilerek, bir iterasyon yapılması gerekmektedir. Eşitlik (39)' deki ifade yerine,

$$\iint w^2 dx dy \approx \sum_{\text{Zemin Alanı}} d_i^2 \frac{A}{4} \quad (42)$$

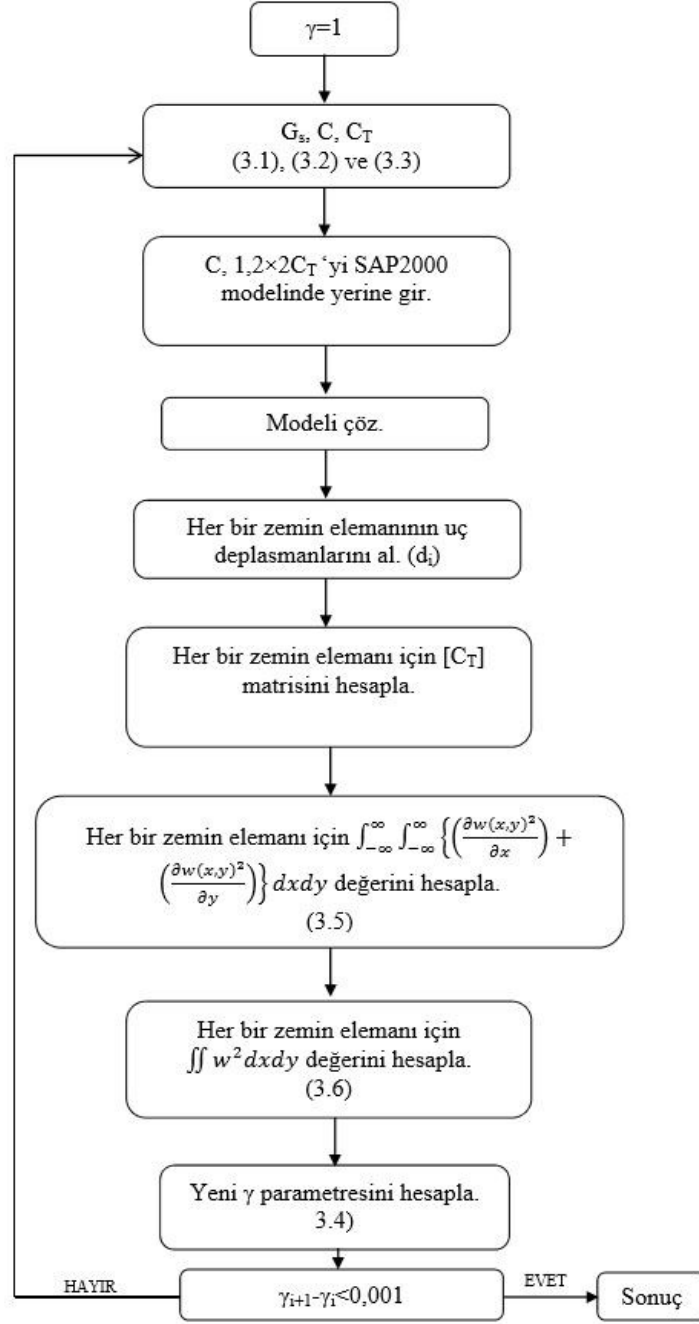
kullanılabilir. Burada A, sonlu elemanın alanıdır.

SAP2000 programı "OAPI (Object Application Programming Interface) özelliği ile ilgili fonksiyonlar yazılarak, kullanıcılara programı dışarıdan yönetme imkanı vermektedir. Bu araştırmada, C ve $2C_T$ zemin parametrelerini programa gönderip sonuçların alınıp, ardışık hesapların yapılabilmesi için "Visual Basic.NET" programlama diliyle bir yazılım geliştirilmiştir. Şekil 35'de arayüzü görülen yazılım, zemin parametreleri E_s , v_s , sıkışabilen zemin kalınlığı H_s gibi değerleri kullanıcıdan almakta, daha sonra γ , C ve $2C_T$ 'yi hesapladıktan sonra C ve $2C_T$ değerlerini, SAP2000 yazılımını çalıştırarak ilgili yerlere girmektedir.



Şekil 35. Ardışık Hesaplama Yapan Programın Arayüzü

SAP2000 analizi tamamlandıktan sonra sonlu elemanların düşey yerdeğiştirmelerini okumakta ve ilgili hesapları yaptıktan sonra yine zemin parametrelerini SAP2000'e göndererek iterasyona devam etmektedir. SAP2000 ile etkileşimli çalışan yazılımın akış şeması Şekil 36'da görülmektedir.



Şekil 36. Ardışık Hesapların Akış diyagramı (Hamarat, 2012)

8.2.1 Tekil ve Düzgün Yayılı Yük Etkisinde Vlasov Yöntemi ile İki Parametrelili Zemine Oturan Plak Analizi

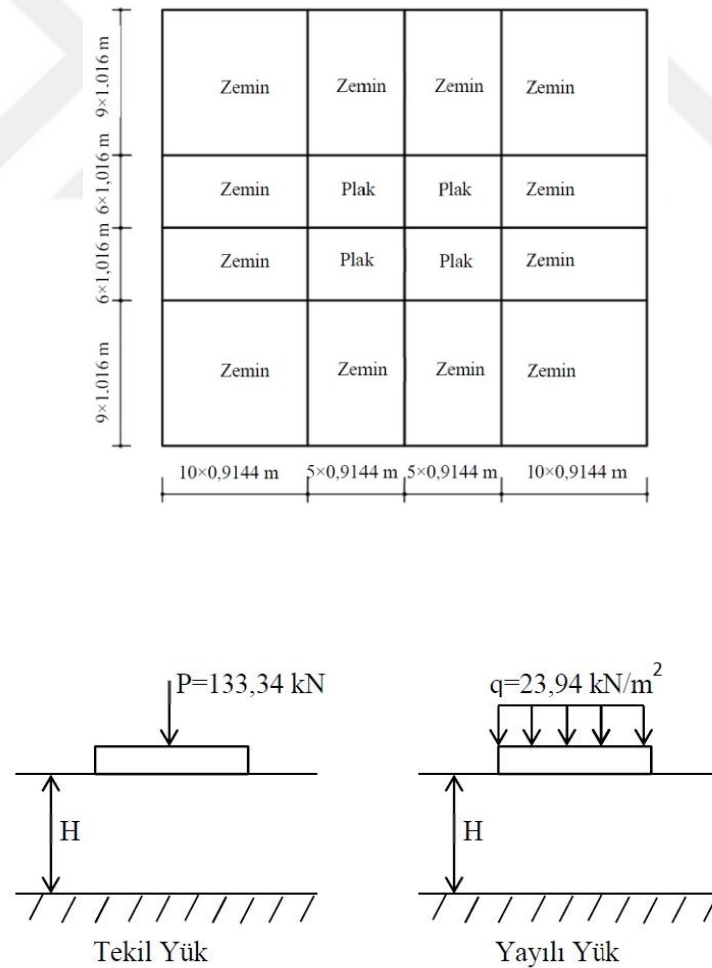
Daha önce (Vallabhan, Straughan, & Das, 1991), (Saygun & Çelik, 2003), (Darılmaz, 2009) tarafından iki parametrelili zemine oturan dairesel temel çizgisel ve düzgün yayılı yük altında çözülmüştür. Bu örnekte de (Darılmaz, 2009) tarafından elde edilen zemin parametreleri aynen kullanılarak γ , C , $2C_T$ parametreleri ve yerdeğişimler

karşılaştırılmış ve geliştirilen yazılım ile SAP2000’de iki parametrelili zeminin modellenenabilirliği doğrulanmaya çalışılmıştır.

Tablo 4. Zemin ve Plak Özellikleri

Plak Elastisite Modülü E_p (kN/m ²)	20685000
Plak Poisson Oranı ν_p	0,2
Plak kalınlığı h_p (m)	0,152
Zemin Elastisite Modülü E_s (kN/m ²)	68950
Zemin Poisson Oranı ν_s	0,25

Tablo 4’de plak ve zemin özellikleri verilen ve farklı sıkışabilir zemin kalınlıkları için analizi yapılan modelin geometrisi ve sonlu eleman ağı Şekil 37’de verilmektedir. Sonlu eleman boyutları $a=0,9144\text{m}$, $b=1.016\text{m}$ seçilmiştir. Boyutları $9,144\text{ m} \times 12,192\text{ m}$ olan plak ağırlık merkezinden $133,34\text{ kN}$ tekil ve $23,94\text{ kN/m}^2$ yayılı yüklerle yüklenmiştir.



Şekil 37. Analizde Kullanılan Zemin-Plak Sistemi ve Yükleme

Yapılan analiz sonuçlarında zemin parametrelerinin ve temelin merkezindeki düşey yerdeğiştirmenin önceki çalışmalarla birbirine çok yakın olduğu Tablo 5 ve Tablo 6’da gösterilmektedir. Böylece “Visual Basic.Net” diliyle yazılan ardışık yaklaşım yapan program doğrulanmış olmaktadır.

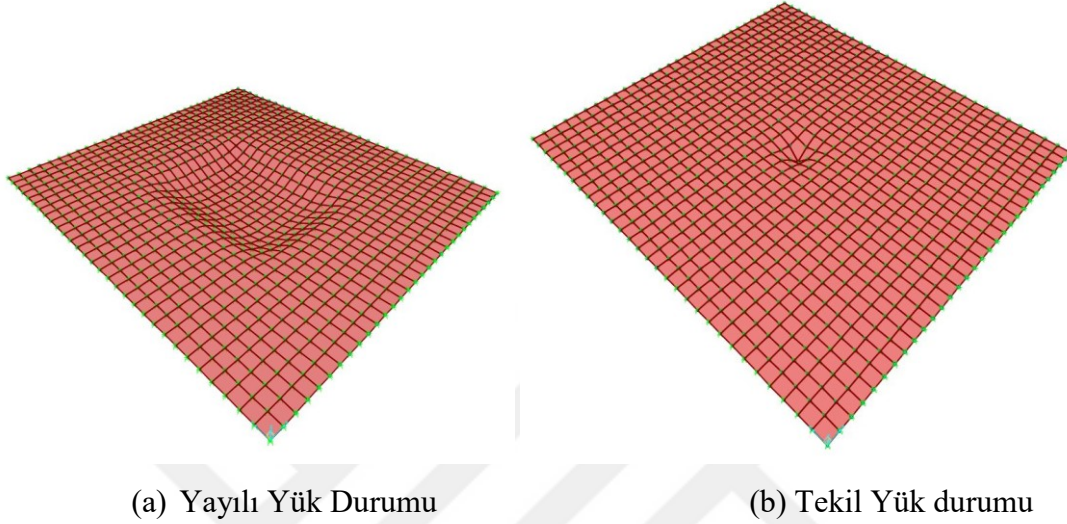
Tablo 5. Düzgün Yayılı Yük Durumunda Zemin Parametreleri ve Temel Merkezindeki Oturma

H(m)		3,048	6,096	9,144	15,24
γ	Çelik, Saygun	0,5766	0,9194	1,2064	1,6193
	Vallabhan	0,5724	0,9297	1,2644	1,9419
	Daloğlu	0,575	0,901	1,164	1,585
	Darılmaz	0,574	0,9113	1,2382	1,6923
	Bu Araştırma	0,572	0,933	1,243	1,7233
C_z (kN/m ³)	Çelik, Saygun	27192	13757	9377	5954
	Vallabhan	27206	13757	9430	6366
	Daloğlu	27208	13744	9339	5928
	Darılmaz	27207	13751	9409	6045
	Bu Araştırma	27207	13768	9414	6082
C_T (kN/m)	Çelik, Saygun	13413	25205	35293	52332
	Vallabhan	13452	25141	34753	47366
	Daloğlu	13241	25307	35681	51374
	Darılmaz	13423	25249	34999	51187
	Bu Araştırma	13426	25133	34955	50704
Δ (cm)	Çelik, Saygun	0,0853	0,1526	0,1893	0,2212
	Vallabhan	0,0872	0,1524	0,189	0,207
	Daloğlu	0,0876	0,1541	0,1917	0,2247
	Darılmaz	0,0865	0,1522	0,1883	0,2176
	Bu Araştırma	0,0872	0,1526	0,1894	0,22095

Tablo 6. Tekil Yük Durumunda Zemin Parametreleri ve Temel Merkezindeki Oturma

H(m)		3,048	6,096	9,144	15,24
γ	Çelik, Saygun	1,9478	3,5249	5,2434	8,7369
	Vallabhan	1,9018	3,4737	5,1669	8,6079
	Darılmaz	1,9217	3,5039	5,1973	8,6627
	Bu Araştırma	1,8445	3,3934	4,9869	8,198
C_z (kN/m ³)	Çelik, Saygun	31898	24256	23737	23710
	Vallabhan	31610	23918	23376	23350
	Darılmaz	31709	24124	23531	23516
	Bu Araştırma	31176	23434	22586	22253
C_T (kN/m)	Çelik Saygun	9456	11798	12017	12030
	Vallabhan	9565	11959	12193	12205
	Darılmaz	9534	11865	12124	12130
	Bu Araştırma	9767	12224	12632	12818
Δ (cm)	Çelik, Saygun	0,0818	0,0845	0,0846	0,0846
	Vallabhan	0,048	0,0975	0,0975	0,0975
	Darılmaz	0,0866	0,0907	0,0909	0,0909
	Bu Araştırma	0,0883	0,0919	0,0922	0,0922

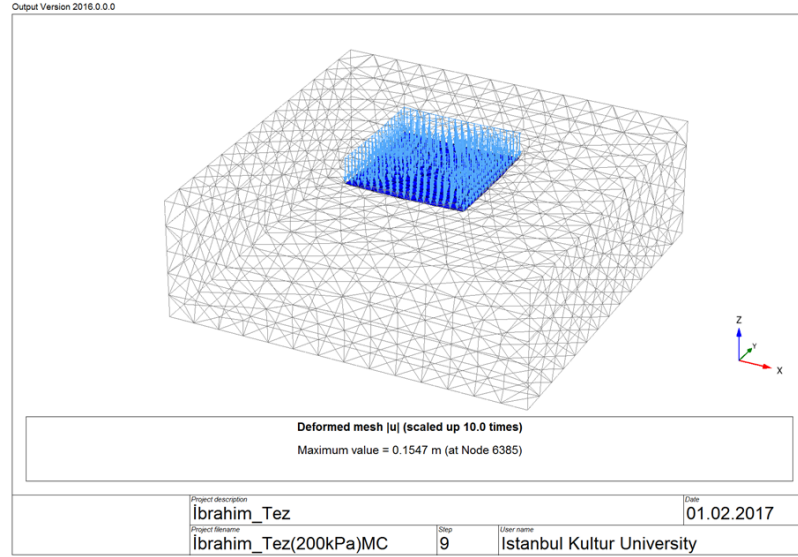
Şekil 38’de zeminin deformasyon durumu gösterilmiştir. Düzgün yayılı yük altında, Winkler yönteminde elde edilemeyen kase biçimindeki zemin deformasyon durumu Vlasov modeliyle gerçekleşmiştir. Tekil yük içinde aynı durum geçerlidir. Tekil yükün etkideği düğüm noktasının yanındaki diğer sonlu elemanlar da şekil değiştirmektedir.



Şekil 38. Zemin Deformasyon Durumu

8.3. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlarla Modelleme

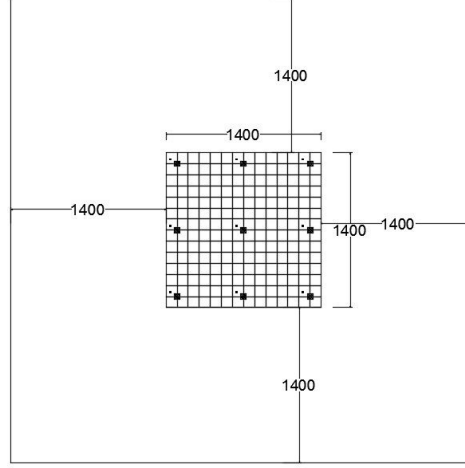
Boyu enine göre daha büyük olan plak tipindeki yayılı temel, dayanma duvarı, kat döşemesi, bina perdeleri gibi yapısal elemanlar için iki boyutlu sonlu elemanlar (*shell*) uygundur. Zeminde ise modellenen ortam *solid* elemanlarla daha iyi temsil edilmektedir. SAP2000 pogramının sonlu eleman kütüphanesinde solid elemanlar mevcut olmasına karşın, elasto plastik “Mohr-Coulomb” zemin davranış modelinin tanımlanabilmesi, toplam-efektif gerilme ayırımı yapılabilmesi ve YASS’ın girilebilmesi için üç boyutlu sonlu eleman modelleri için bu çalışmada Plaxis3D yazılımı kullanılmıştır. Programda doğrusal elastik, elasto plastik malzeme modellerinin yanı sıra pekleşen zemin (*Hardening Soil*) ve yumuşak zemin (*Soft Soil*) gibi ileri zemin davranış modelleri de bulunmaktadır. Şekil 39’da Plaxis3D’de tanımlanmış sonlu eleman modeli görülmektedir.



Şekil 39. Üç Boyutlu Solid Elemanlarla Sonlu Eleman Modeli

9. SAYISAL ÖRNEKLER

Winkler ve Vlasov yöntemlerinin süreklilik ve malzeme davranışı açısından değerlendirilmesi, solid sonlu elemanlar yazılımı Plaxis3D ile yapılmıştır. Yatak katsayısı kavramına dayalı Winkler ve iki parametrelili zemin modeli olan Vlasov yöntemlerinin ortamdaki sürekliliğin sağlanabilmesi ve doğrusal olmayan zemin davranışı açısından değerlendirilmesi amacıyla Şekil 40'daki 14x14m yayılı temel seçilerek çözümler Winkler, Vlasov, Elastik3D ve Mohr-Coulomb olarak sınıflandırılmıştır. Burada, Winkler ve Vlasov SAP2000, Elastik 3D ve Mohr-Coulomb çözümleri Plaxis3D yazılımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Solid elemanların kullanıldığı analizler, doğrusal elastik ve elasto plastik "Mohr-Coulomb" zemin davranışları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte aynı problem SAP2000 yazılımıyla Winkler ve iki parametrelili Vlasov zemin modelleri ile de iki parametrelili model için zemin parametrelerini belirlemek amacıyla bu çalışma kapsamında geliştirilen ardışık hesap yapan "Vlasov" isimli yazılım kullanılarak çözülmüştür. Analiz sonuçlarının gerçek zemin davranışına ne kadar yaklaşabildiği irdelenmiştir.



Şekil 40. 14x14m Yayılı Temel

9.1. İki Tabakalı Zeminde Düzgün Yayılı Yük Etkisinde Yayılı Temel Analizi

Düzgün yayılı yük altında Winkler ve Vlasov yöntemleriyle SAP2000’de modellenen 14x14m boyutlarındaki yayılı temel iki tabakalı zemin üzerine oturmaktadır. İki parametrelili zemin özellikleri ardışık hesap için geliştirilmiş yazılım ile elde edilerek çözülmüştür. Daha sonra, mevcut yayılı temelin Plaxis3D yazılımı ile, üç boyutlu solid sonlu elamanlarla yine iki tabakalı aynı zemin özellikleriyle doğrusal elastik ve “Mohr Coulmb” zemin davranışlarıyla analizleri yapılmıştır.

Tablo 7. Vlasov Zemin ve Plak Parametreleri

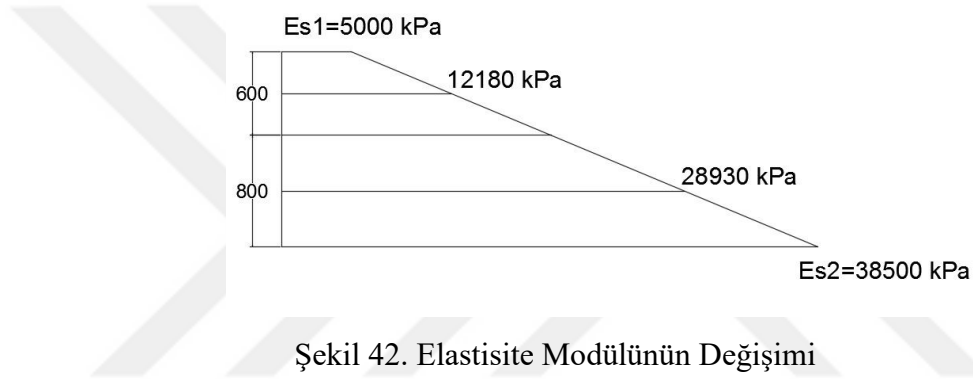
Plak Elastisite Modülü E_p (kN/m ²)	31000000
Plak Poisson Oranı ν_p	0,2
Plak kalınlığı h_p (m)	0,4
Kil Tabakası Zemin Elastisite Modülü E_s (kN/m ²)	5000
Kum Tabakası Zemin Elastisite Modülü E_s (kN/m ²)	38500
Zemin Poisson Oranı ν_s	0,2
Sıkışabilir Zemin Yüksekliği H_s (m)	14

Vlasov modeli için zemin ve plak parametreleri Tablo 7’de verilmiştir. Temel altındaki zemin profili 6 m kil, altında 8 m kum tabakası şeklindedir (Şekil 41).

Kil	600 cm
Kum	800 cm

Şekil 41. İki Tabakalı Zemin Profili

Zemin elastisite modülünün derinlikle değişimi Şekil 42’de görülmektedir. Yapılan hesaplarda elastisite modülünün doğrusal artış gösterdiği durum için Vlasov zemin parametreleri hesaplanırken (32) ve (33) nolu denklemler kullanılmıştır.



Şekil 42. Elastisite Modülünün Değişimi

Winkler modeli için düşey yatak katsayısı teorik olarak hesaplanmış, k_s için bölüm 7’deki denklem (21) kullanılmıştır.

$$I_b = \frac{1 \cdot 0,40^3}{12} = 0,005333 \rightarrow k_s = \frac{0,65}{1} \sqrt[12]{\frac{21750 \times 1^4}{31000000 \times 0,005333}} \times \frac{21750}{1 - 0,20^2} = 12436 \text{ kN/m}^3$$

Denklemdaki E_s için ortalama değer olan 21750 kPa alınmıştır. Bunun sonucunda Winkler analizleri için gerekli $k_s = 12436 \text{ kN/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Plaxis3D yazılımı için kullanılan zemin parametreleri Tablo 8’de verilmektedir.

Tablo 8. "Mohr Coulomb" Zemin Modeli için Parametreler

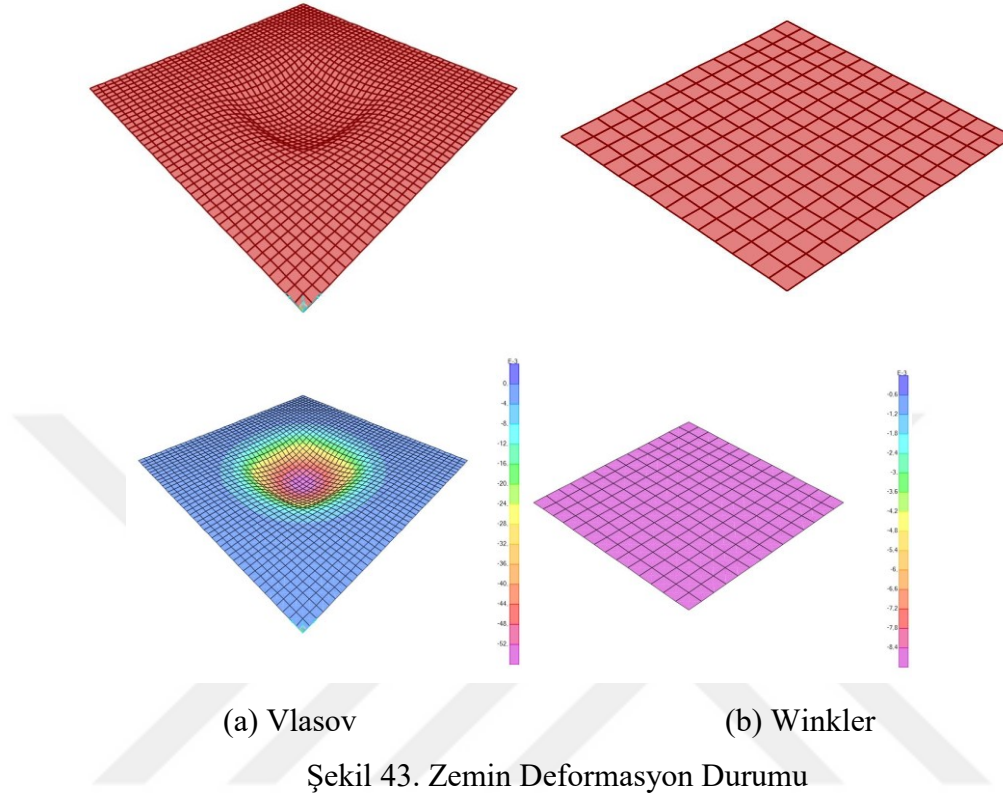
Parametre	Sembol	Kum	Kil	Birim
Plak Elastisite Modülü	Model	MohrCoulomb	MohrCoulomb	-
Davranış Tipi	Tip	Drenajlı	Drenajlı	-
Kuru Birim Hacim Ağırlık	ρ_{dry}	17	18	kN/m ³
Doğal Birim Hacim Ağırlık	ρ_{wet}	20	19	kN/m ³
Permeabilite x-yönü	k_x	0,5	0,1	metre/gün
Permeabilite y-yönü	k_y	0,5	0,1	metre/gün
Young Modülü	E_{50}	28930	12180	kN/m ²
Poisson oranı	ν	0,2	0,2	-
Efektif Kohezyon	c'	1	8	kN/m ²
Efektif Kayma Direnci Açısı	ϕ'	34	20	Derece
Kabarma Açısı	ψ	4	0	Derece
Ara Yüzey Katsayısı	R_{inter}	0,7	0,65	-
Yatay Toprak Basıncı Kats.	K_o	0,44	0,658	-

Tablo 9' da farklı analiz yöntemleri için temel geometrik merkezinde hesaplanan en yüksek oturma değerleri görülmektedir. Winkler modeliyle hesaplanan temel oturması 20 kPa yüklemde 0,24 cm, Vlasov'da 1,49 cm, Elastik3D ve Mohr-Coulomb modellerinde 1,60 cm'dir. Yayılı yük 200 kPa'a yükseldiğinde oturma Winkler'de 1,65 cm iken, Vlasov analizinde 10,41 cm, Elastik3D analizinde 11,33 cm ve Mohr-Coulomb'da 15,47 cm' dir.

Tablo 9. 14x14 Yayılı Temelin Düzgün Yayılı Yük Etkisinde İki Tabakalı Zemindeki Analiz Sonuçları

Yayılı Yük (kPa)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
γ	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
C_z (kN/m ³)	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418
C_T (kN/m)	9158	9159	9159	9159	9159	9159	9159	9159	9159	9159
k_s (kN/m ³)	12436	12436	12436	12436	12436	12436	12436	12436	12436	12436
$\Delta_{Winkler}$ (cm)	-0,24	-0,39	-0,55	-0,71	-0,86	-1,02	-1,18	-1,33	-1,49	-1,65
Δ_{Vlasov} (cm)	-1,49	-2,48	-3,47	-4,46	-5,45	-6,45	-7,44	-8,43	-9,42	-10,41
$\Delta_{3DElastik}$ (cm)	-1,60	-2,68	-3,76	-4,85	-5,93	-7,01	-8,09	-9,17	10,25	-11,33
$\Delta_{3DMohr Coulomb}$ (cm)	-1,60	-2,69	-3,86	-5,20	-6,69	-8,30	10,00	11,77	13,59	-15,47
Artış 3DElastik-Vlasov (%)	7,63	8,20	8,45	8,59	8,68	8,74	8,78	8,81	8,84	8,86
Artış 3DMohr-Coulomb-Vlasov (%)	7,72	8,67	11,33	16,65	22,65	28,79	34,51	39,64	44,31	48,59

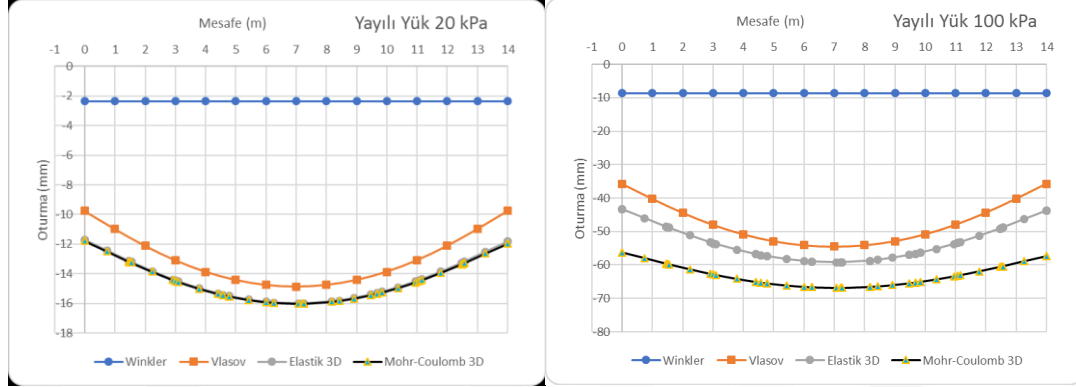
Yüklemeler artmasına rağmen Winkler modelinde, oturmalarındaki artış beklenen yükselişi göstermemiştir. Şekil 43’de ise Vlasov ve Winkler için deformasyon durumu gösterilmiştir. Vlasov modelinde, Winklere göre daha gerçekçi bir zemin deformasyonu görülmektedir.



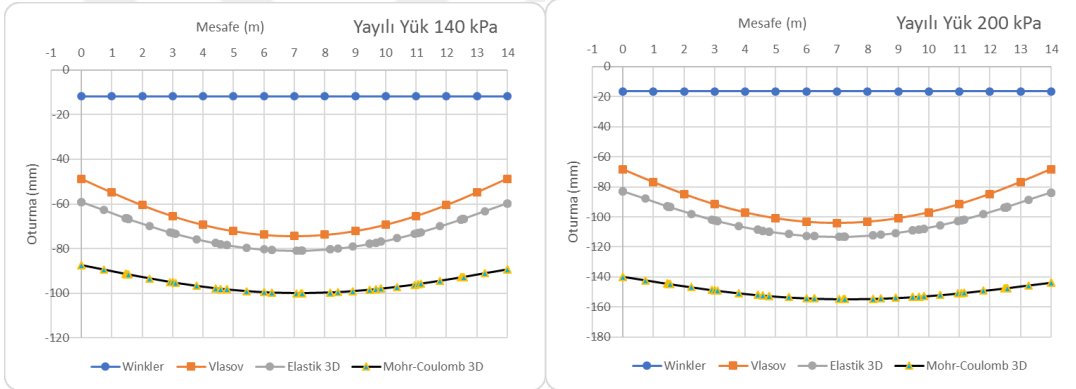
Temel plağının orta ekseninde farklı yükleme durumları için çökme profilleri (oturma çanağı) Şekil 44’de verilmiştir. Kile oturan yayılı temel için toplam oturma limiti 10 cm’dir (Önalp & Sert, 2010). Bu nedenle Winkler analizinde hesaplanan oturmalar ile diğer yöntemler arasındaki oturma farkları, incelenen 14x14m yayılı temel için 140 kPa yükleme seviyesinden sonra temel tasarımını etkilemektedir. 140 kPa yüklemeye Winkler’de oturma 1,18 cm ve izin verilebilir limitin altında iken Mohr-Coulomb analizinde 10 cm olmakta ve oturma limiti aşılmaktadır. Tüm yükleme seviyelerindeki Winkler oturma eğrileri yatay çıkmıştır. Böylece Winkler yönteminden gelen sonuçlar, zeminin gerçek davranışını yansıtmamıştır.

Eğrilerde Vlasov modeli ve Elastik3D model birbirine yakın durumdadır. Bunun nedeni, iki analiz için de malzeme davranışının elastik kabul edilmesidir. 20 kPa yüklemeye oturmalar arasındaki fark %7,63 iken, yüklemeler arttıkça aradaki fark artmaktadır. 200 kPa yüklemeye %8,86 olmaktadır. Oturma değerleri ise en büyük yüklemeye Vlasov’da

10,41 cm iken, Elastik3D analizinde 11,33 cm'dir. Bu durumda hesaplanan oturmaların bu problem için Vlasov ve Elastik3D analizlerinde aynı tasarım sonucunu elde ettiği söylenebilir. Her iki yöntemde de oturma eğrisi birbirine benzer çıkmış ve temel beklendiği gibi kase şeklinde deforme olmuştur.



(a). 20 kPa için Oturmalar (b). 100 kPa'da Oturmalar

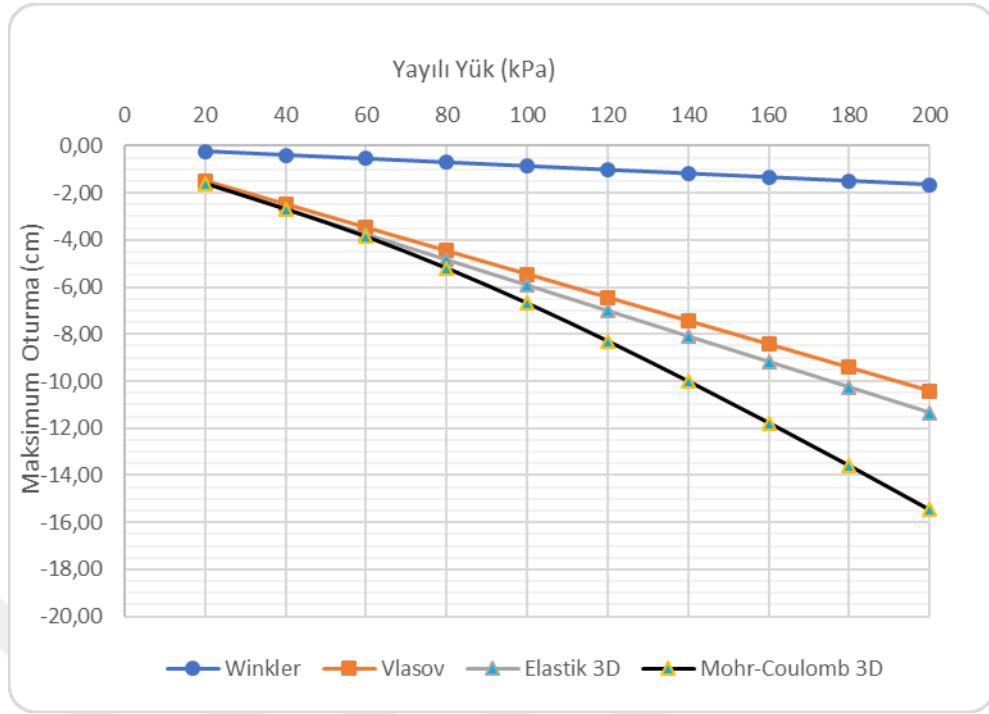


(c). 140 kPa'da Oturmalar

(d). 200 kPa'da Oturmalar

Şekil 44. Farklı Yükleme Durumları için Oturma Eğrileri

Yükleme arttıkça Mohr-Coulomb çözümündeki oturmaların Vlasov ve Elastik3D analizinden ayrıldığı görülmektedir. 20, 40 ve 60 kPa yüklemelerinde birbirine çok yakın olan oturma değerleri, 60 kPa dan sonra farklılaşmaktadır. Örneğin, 60 kPa için Vlasov, Elastik3D ve "Mohr-Coulomb" modellerde 3,47 cm , 3,76 cm ve 3,86 cm elde edilmiştir. 60 kPa yükleme seviyesi için üç analiz yönteminde de benzer tasarım sonuçları elde edilmektedir. Diğer bir ifadeyle incelenen yayılı temel üzerine 4 katlı bir bina yapılırsa yatak katsayısına dayalı Vlasov, Elastik3D ve "Mohr Coulomb" yöntemleri arasında aynı tasarım sonuçları elde edilecektir. Temel merkezindeki en yüksek oturmaların, yükleme durumlarına göre değişimi Şekil 45'de ki eğrilerde gösterilmektedir. Elastik3D, Vlasov yük-oturma eğrileri ve zeminin gerçek davranışını daha iyi yansıttığı düşünülen "Mohr-Coulomb" yük-oturma eğrisinin Winkler'e göre birbirlerine daha yakın olduğu görülmektedir. Yükleme arttıkça eğriler arasındaki fark büyümektedir.



Şekil 45. Artan Yükleme Durumları için Yük-Oturma Grafiği

Beklendiği gibi doğrusal elastik davranışa dayalı Winkler, Vlasov ve Elastik3D analizlerinde yük-oturma eğrileri doğrusal olmaktadır. Winkler modeli, oturmaya dayalı temel tasarımı yapılamayacak kadar düşük değerler vermektedir. Elasto-plastik davranış gösteren Mohr-Coulomb modeli, 60 kPa mertebesinde sonra diğer yöntemlerden ayrılmaktadır. Bu yükleme seviyesinden sonra zeminde plastik deformasyonlar başlamakta ve doğrusal olmayan davranışa geçilmektedir. Plastikleşmeyi başlatan yükleme seviyesini belirleyen, Mohr-Coulomb zeminindeki c' ve ϕ' kayma direnci parametreleridir. Zeminin kayma direnci arttıkça plastikleşmeyi başlatan yüklemelerde daha yüksek olacaktır. Analizi yapılan temelde, Vlasov yöntemi ve Mohr Coulomb sonuçları, yüklemeler arttıkça birbirinden uzaklaşmaktadır. Belirli bir yükleme seviyesine kadar elastik yöntemlerle, bu temel için tasarım yapılabileceği ve Vlasov analizinin kullanılabilmesi söylenebilir. Bununla birlikte rijitliği ve kayma direnci düşük zeminlerde, yükleme seviyeleri arttığında Vlasov modelinde oturmaların düşük elde edileceği ve tasarımın güçleşeceği belirlenmiştir.

İki tabakalı zeminde yapılan analizlerde Winkler analizindeki oturmalar Vlasov yöntemine göre düşük çıkmıştır. Bunun nedeni Vlasov modelindeki sürekliliği sağlayan kayma elemanlarıdır. Yükleme seviyesi arttıkça Winkler ile elde edilen oturmalar

yanıltıcı olmakta, oturma limitlerinin üzerinde kalan yayılı temel güvenli kabul edilebilmektedir. Bu nedenle Winkler yöntemi ile oturmalara dayalı temel tasarımı yapılması güvenilir olmamaktadır. Buradan, oturmaların farklı olması nedeniyle hesaplanan taban basınçlarının da çok farklı olacağı bilinmektedir. Taşıma gücüne dayalı yayılı temel tasarımı da önerilmemektedir. Vlasov modelinde elde edilen sonuçlarda ise kullanılan kayma elemanları sayesinde sürekliliğin sağlandığı, gerçekçi bir temel deformasyon durumu elde edilmiştir. Şekil 45’de görüldüğü gibi Vlasov modelindeki yük-oturma eğrisi Elastik 3D eğrisine çok yakındır. Oturma değerlerinin bu kadar yakın olması iki parametrelili Vlasov yönteminde zeminde sürekliliğin sağlandığını göstermektedir. Yük-oturma grafiğinde Mohr-Coulomb eğrisinin 60 kPa mertebesinde sonra Vlasov ve Elastik3D eğrilerinden ayrıldığı, oturmaların farklılaştığı görülmektedir. Bunun nedeni 60 kPa’dan fazla yapılan yüklemelerde zeminin plastikleşmeye başlaması, diğer bir deyişle doğrusal elastik olmayan zemin davranışına geçmesidir. Vlasov analiz sonuçlarının Mohr-Coulomb’dan farkı 60 kPa yüklemeye %7,72 iken, bu seviyeden sonra yükselişe geçmekte 200 kPa seviyesinde %48,59 mertebesine çıkmaktadır. Yüklemeler arttıkça her ne kadar zeminde süreklilik sağlansa da elastik olmayan zemin davranışı nedeniyle Vlasov veya Elastik3D analizleriyle oturmalara göre tasarım yapılamayacağı kanısına varılmaktadır.

9.2. Homojen Zeminde Düzgün Yayılı Yük Etkisinde Yayılı Temel Analizi

İki parametrelili Vlasov zemin modelinin elastisite modülü ve kayma direnci düşük zeminlerde vereceği sonuçları değerlendirmek amacıyla incelenen yayılı temel 14m kalınlığındaki elastisite modülü 12180 kPa olan kil tabakası üzerine oturtulmuştur. Tablo 10’da Vlasov yönteminde kullanılacak parametreler verilmektedir. Elastite modülünün derinlikle değişmediği kabul edilmiş ve iki parametrelili zemin için yatak katsayısı ve kayma parametresi (29) ve (30) nolu denklemlerle hesaplanmıştır.

Tablo 10. Vlasov Zemin ve Plak Parametreleri

Plak Elastisite Modülü E_p (kN/m ²)	31000000
Plak Poisson Oranı ν_p	0,2
Plak kalınlığı h_p (m)	0,4
Kil Tabakası Zemin Elastisite Modülü E_s (kN/m ²)	12180
Zemin Poisson Oranı ν_s	0,2
Sıkışabilir Zemin Yüksekliği H_s	14

Winkler analizi için $k_s=6636 \text{ kN/m}^3$ denklem (21) ile teorik olarak hesaplanmıştır.

$$I_b = \frac{1 \cdot 0,40^3}{12} = 0,005333 \rightarrow k_s = \frac{0,65}{1} \sqrt[12]{\frac{12180 \times 1^4}{31000000 \times 0,005333}} \times \frac{12180}{1-0,25^2} = 6636 \text{ kN/m}^3$$

“Mohr-Coulomb” modeli için parametreler Tablo 11’de görülmektedir. Analizlerde bütün zemin modelleri için aynı elastisite modülü kullanılmıştır.

Tablo 11. Tek Tabakalı Zeminde “Mohr-Coulomb” Parametreleri

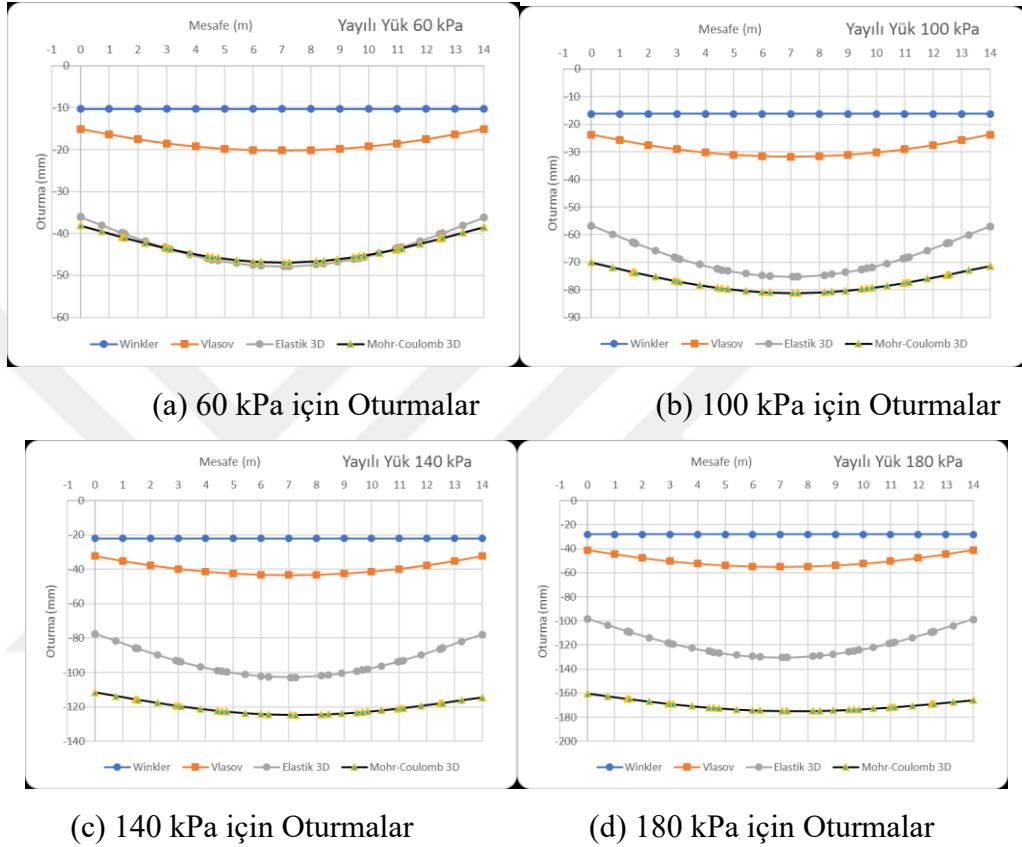
Parametre	Sembol	Kil	Birim
Plak Elastisite Modülü	Model	Mohr-Coulomb	-
Davranış Tipi	Tip	Drenajlı	-
Kuru Birim Hacim Ağırlık	γ_{dry}	18	kN/m^3
Doğal Birim Hacim Ağırlık	γ_{wet}	19	kN/m^3
Permeabilite x-yön	k_x	0,1	metre/gün
Permeabilite y-yön	k_y	0,1	metre/gün
Young Modülü	E_{50ref}	12180	kN/m^2
Poisson oranı	ν	0,20	-
Efektif Kohezyon	c'	8	kN/m^2
Efektif Kayma Direnci Açısı	ϕ'	20	Derece
Kabarma Açısı	ψ	0	Derece
Ara Yüzey Katsayısı	R_{inter}	0,65	-
Yatay Toprak Basıncı k_{ATS}	K_o	0,658	-

Tablo 12’ de yapılan analizler sonucunda farklı analiz yöntemleri için temel geometrik merkezinde hesaplanan en yüksek oturma değerleri görülmektedir. Winkler modeliyle temel oturması 60 kPa yüklemde 1,03 cm, Vlasov’da ise 2,02 cm’dir. Yayılı yük 180 kPa olduğunda en yüksek oturma Winkler’de 2,80 cm iken, Vlasov analizinde 10,41 cm’dir. Yüklemeler artmasına rağmen Winkler modelindeki oturmalarda artış azdır.

Tablo 12. Tek Tabakalı Zemin için Analiz Sonuçları

Yayılı Yük (kPa)	60	100	140	180
γ	0,69	0,69	0,69	0,69
C_z (kN/m^3)	971	971	971	971
C_T (kN/m)	60568	60568	60568	60568
k_s (kN/m^3)	6636	6636	6636	6636
$\Delta_{Winkler}$ (cm)	-1,03	-1,62	-2,21	-2,80
Δ_{Vlasov} (cm)	-2,02	-3,18	-4,34	-5,49
$\Delta_{3DElastik}$	-4,78	-7,53	-10,28	-13,03
$\Delta_{3DMohr Coulomb}$ (cm)	-4,70	-8,12	-12,48	-17,49
Artış 3DElastik-Vlasov (%)	136,42	136,92	137,14	137,28
Artış 3DMohr-Coulomb-Vlasov (%)	132,21	155,38	187,82	218,57

Temel plağının orta ekseninde farklı yükleme durumları için oturma eğrileri Şekil 46’da verilmiştir. Winkler analizinde hesaplanan oturmalar ile diğer yöntemler arasında bütün yükleme adımlarında fark büyük çıkmaktadır. Bu eğrilerden Winkler yöntemindeki sonuçların, zeminin gerçek davranışına yaklaşmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 46. Farklı Yükleme Durumları için Oturma Eğrileri

Vlasov ve Elastik3D modellerindeki oturmalar arasındaki fark, iki tabakalı ve daha yüksek rijitlikteki zemin durumuna göre daha fazla olmaktadır. Her iki analizde de zemin davranışı doğrusal elastik alınmış olmasına karşın oturmalar arasındaki fark daha yüksek çıkmıştır. 60 kPa yüklemede oturmalar arasındaki fark %136 iken, 180 kPa yüklemede %137 olmaktadır. Bütün yükleme adımlarında fark büyüktür. Zemin rijitliği azaldığında iki yöntem arasındaki farkın bu denli yükselmesi Vlasov modelinin rijitliği ve kayma direnci düşük zeminlerde gerçek zemin davranışından uzaklaştığını göstermektedir. Oturma değerleri ise en büyük yüklemede Vlasov’da 5,49 cm iken, Elastik3D analizinde 13,03 cm’dir. Her iki yöntemde de oturma eğrileri benzer çıkmış ve temel beklendiği gibi kase şeklinde deforme olmuştur. Bununla birlikte oturmalar arasındaki farkın yüksek olması, Vlasov analizi ile verilen yayılı temel için oturmalara dayalı tasarım

yapılamayacağını göstermektedir. Elastik3D analiz sonuçları ise tasarım yeterliliği için daha gerçekçi model olan Mohr-Coulomb analizi ile karşılaştırılmaktadır.

Yüklemeye arttıkça Mohr-Coulomb çözümündeki oturmaların Elastik3D analizinden ayrıldığı görülmektedir. 60 kPa yüklemesinde birbirine çok yakın olan oturma değerleri, 60 kPa dan sonra farklılaşmaktadır. Örneğin 60 kPa için Vlasov, Elastik3D ve “Mohr-Coulomb” modellerde 2,02 cm , 4,78 cm ve 4,70 cm elde edilmiştir. 60 kPa yüklemeye seviyesi için Elastik3D ve “Mohr-Coulomb” modellerinde aynı tasarım sonuçları elde edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, incelenen yayılı temel üzerine 4 katlı bir bina yapıldığında Elastik3D ve “Mohr-Coulomb” analizleri arasında aynı tasarım sonuçları elde edilecektir.

Temel merkezindeki oturmaların, yüklemeye durumlarına göre değişimi Şekil 47’de ki eğrilerde gösterilmektedir. Beklendiği gibi Winkler, Vlasov ve Elastik3D eğrisi doğrusaldır. “Mohr-Coulomb” zemin modelinin elastik yöntemlere göre zemin davranışını daha gerçekçi yansıttığını kabul edersek, Winkler yöntemi oturmalara dayalı temel tasarımı yapılamayacak kadar düşük oturma değerleri vermektedir ve temelin deformasyonu gerçekçi değildir. Vlasov modelinde oturmalar Winklere göre daha yüksek olsa da solid elemanlarla yapılan modellerin altında kalmaktadır. Elasto- plastik davranış gösteren Mohr-Coulomb modeli, 60 kPa mertebesinde sonra doğrusal elastik malzeme davranışından ayrılmaktadır. Bu yüklemeye seviyesinden sonra zeminde plastik deformasyonlar başlamakta ve doğrusal olmayan davranışa geçilmektedir. Plastikleşmeyi başlatan, yüklemeye seviyesini belirleyen Mohr-Coulomb modeldeki c' ve ϕ' parametreleridir.



Şekil 47. Artan Yüklemeye Durumları için Yük-Oturma Grafiği

Zeminin kayma direnci arttıkça plastikleşmeyi başlatan yükleme daha yüksek olacaktır. Analizi yapılan temelde, Elastik3D ve Mohr Coulomb eğrileri yüklemeler arttıkça birbirinden uzaklaşmaktadır. Belirli bir yükleme seviyesine kadar Elastik3D analiziyle bu temel için tasarım yapılabileceği sonucuna varılmaktadır. Bununla birlikte rijitliği ve kayma direnci düşük zeminlerde, Elastik3D analizi Mohr-Coulomb'dan daha düşük yükleme seviyelerinde ayrılmaya başlayacaktır. Vlasov yöntemiyle elde edilen oturmaların, elastisite modülü ve kayma direnci düşük zeminlerde Mohr-Coulomb, Elastik3D analizine göre görece daha düşük olduğu, böylece bu tür zeminlerde iki parametrelili zemin modelleriyle oturmalarla yönelik yayılı temel boyutlandırılmayacağı sonucuna varılmıştır.

Tek tabakalı zeminde yapılan analizlerde, elastisite modülü 12180 kPa olan bir zemin seçilmiştir. Vlasov analizindeki yük-oturma eğrisinin Elastik3D eğrisinden farklı olduğu ve oturmalar arasındaki farkın rijitliği yüksek zemindeki analize göre daha büyük olduğu görülmüştür (Şekil 47). Zeminde elastisite modülü düşüktüğü iki parametrelili Vlasov yönteminde, zeminde hesaplanan deformasyonun Elastik3D ve Mohr-Coulomb analizlerine göre düşük kaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle elastisite modülü düşük zeminlerde Vlasov yöntemi ile yüklemeler düşük olsa bile tasarım yapılabilmesi güçleşmiştir. Mohr-Coulomb eğrisi doğrusal elastik olmayan zemin davranışı nedeniyle 60-80 kPa yükleme seviyesinden sonra Elastik3D eğrisinden ayrılmakta ve oturmalar arasındaki fark açılmaktadır. Elastik3D analizi ile oturmalarla göre tasarımın, düşük yükleme seviyelerinde yapılabileceği anlaşılmaktadır.

9.3. Elastisite Modülü Farklı Zeminlerde Düzgün Yayılı Yük Etkisinde Analiz

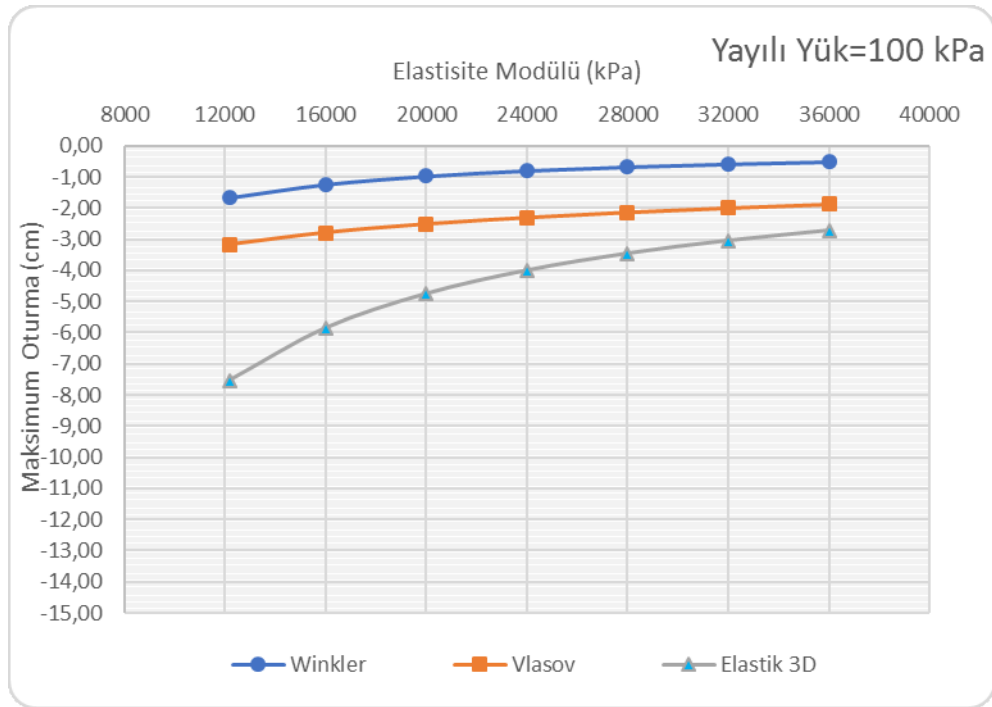
Zemin elastisite modülü azaltıldığında Vlasov analiz sonuçları Elastik3D ve Mohr-Coulomb analiz sonuçlarından ayrılmaktadır. Bu nedenle incelenen yayılı temelin zemin elastisite modülü 12180-36000 kPa aralığında değiştirilerek 14 m kil tabakaları için analizleri yapılmıştır.

Tablo 13'de elastisite modülü farklı zeminler için yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Winkler sonuçlarıyla Elastik3D oturmaları arasında fark %354-%429 aralığında çok yüksektir.

Tablo 13. Elastisite Modülü Farklı Zeminler için Analiz Sonuçları

Yayılı Yük	100 kPa						
	12180	16000	20000	24000	28000	32000	36000
Elastisite Modülü (kPa)	12180	16000	20000	24000	28000	32000	36000
γ	0,69	0,81	0,91	1,00	1,06	1,12	1,16
C_z (kN/m ³)	971	1281	1608	1940	2274	2610	2948
C_T (kN/m)	60568	59203	57980	56837	55985	55265	54645
k_s (kN/m ³)	6636	8917	11356	13836	16351	18895	21467
$\Delta_{Winkler}$ (cm)	-1,66	-1,23	-0,97	-0,80	-0,67	-0,58	-0,51
Δ_{Vlasov} (cm)	-3,18	-2,79	-2,51	-2,31	-2,14	-2,00	-1,88
$\Delta_{3DElastik}$	-7,53	-5,85	-4,74	-3,99	-3,45	-3,04	-2,71
Fark 3DElastik-Vlasov (%)	136,87	109,46	88,74	73,15	61,24	51,79	44,11
Fark 3DElastik-Winkler (%)	354,28	374,00	389,84	402,44	412,84	421,60	429,20

Vlasov ve Elastik3D oturmaları arasındaki fark ise %136-%44 aralığındadır. Elastisite modülü yükseldikçe fark azalmaktadır. Elastisite modülü 12180 kPa iken Vlasov oturması 3,18 cm Elastik3D oturması 7,53 cmdir. Elastisite modülü 36000 kPa'a yükseldiğinde Vlasov analizi 1,88 cm Elastik3D 2,71 cm oturma değeri vermektedir. Şekil 48'de 100 kPa etkileyen yayılı temelin farklı zemin elastisite modülüyle yapılan analiz sonuçları elastisite modülü-oturma sonuçları olarak verilmektedir.



Şekil 48. 100 kPa Yük Etkisinde Elastisite Modülü-Oturma Grafiği

Çizilen eğirilerde Winkler sonuçlarının Elastik3D oturmalarından farklı olduğu anlaşılmaktadır. Vlasov eğrisinde ise elastisite modülü arttıkça Elastik3D eğrisine yaklaşmakta ve oturmalar arasındaki fark azalmaktadır.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Winkler, iki parametrelili zemin veya sürekli elastik zemin kabullerinin yapıldığı karmaşık geometri ve yükleme koşullarının uygulandığı plak-zemin problemlerinde diferansiyel denklemlerin kapalı çözümü zor olmakta bazen de çözüm gerçekleşmemektedir. Günümüzde bu tür problemlerin çözümünde genellikle sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Winkler yönteminin sonlu elemanlar uygulamasında plak (*shell*) elemanlarla, zemin elastik yay mesnetlerle tanımlanmaktadır. İki parametrelili Vlasov zemin modelinde plak (*shell*) elemanlarla, zemin elastik yay mesnetler ve bu yayları birbirine bağlayan kayma elemanları (*layered shell*) ile modellenmektedir. Sürekli zemin modellerinde ortam üç boyutlu solid elemanlarla temsil edilmektedir. Bu çalışmada 14x14m yayılı temel analizleri Winkler, Vlasov ve sürekli zemin yöntemleriyle SAP2000 ve Plaxis3D sonlu eleman programları kullanılarak yapılmıştır.
- Zeminler ancak küçük gerilme artışlarında elastik davrandıkları için elastik yöntemlerle yapılan analizlerde yükleme değerleri yükseldikçe hesaplanan zemin gerilmeleri ve deformasyonlar zeminin gerçek davranışından uzaklaşmaktadır. Uygulanan yüklemelerle, zemin elastik sınırlar içerisinde kaldığı sürece yayılı temel elastik yöntemlerle boyutlandırılabilir. Yayılı temele etkiyen yükler zemini elastik ötesi davranışa geçiriyorsa Mohr-Coulomb, Pekleşen zemin (*Hardening Soil*) gibi zemin modelleri kullanılmalıdır. Winkler, Vlasov veya malzeme davranışının elastik kabul edildiği solid elemanlı modeller ancak elastik sınırlar içerisinde kullanılmalıdır.
- Winkler yöntemiyle yapılan plak-zemin problemlerinin sonlu eleman çözümlerinde birbirinden bağımsız elastik yaylar ile süreklilik sağlanamamakta, yayılı temelde gerçekçi deformasyon durumu elde edilememektedir. Düzgün yayılı yük etkisinde çözülen yayılı temelde bütün noktalarda düşey yerdeğiştirme aynı hesaplanmış ve kase şeklinde deforme olması gereken temelde farklı oturma oluşmamıştır. Bununla birlikte yayılı temel, oturma limitlerine göre boyutlandırıldığında Winkler yöntemiyle hesaplanan oturmalar elastik ve

doğrusal olmayan zemin modellerine göre daha küçük değerler elde edilerek hesaplanmakta ve yanıltıcı olmaktadır.

- Vlasov modelinde zemin parametrelerinin elde edilebilmesi için çözüme ardışık bir yaklaşımla ulaşılabileceği saptanmıştır. Sürekliliğin sağlanması amacıyla geliştirilmiş iki parametrelili zemin modeli Vlasov ile yapılan analizlerde gerçekçi deformasyon durumu elde edilmiş ve temel kase şeklinde deforme olmuştur. Ancak oturmalar elastisite modülü yüksek zeminlerde, zeminin solid sonlu elemanlarla modellendiği zemin davranışının elastik kabul edildiği çözümlere yaklaşmaktadır. Elastisite modülü düşük zeminlerde hesaplanan oturmalar gerçeğinden daha küçük hesaplanarak yanıltıcı olmaktadır.
- Elastik yöntemler içerisinde yatak katsayısı kullanıldığında Winkler yerine iki parametrelili Vlasov modeli tercih edilmelidir. Vlasov modeli elastisite modülü yüksek zeminlerde gerçekçi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle yatak katsayısı kullanan modeller rijitliği ve kayma direnci düşük olan normal yüklenmiş killer ve gevşek kumlarda kullanılmamalıdır.
- Sonraki çalışmalarda yatak katsayısının kullanıldığı Winkler ve iki parametrelili Vlasov modelleri ile yayılı temellerin analizleri tekil kolon yükleri etkisinde veya üst yapı-temel etkileşimli yapılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Atkinson, J. H. (1993). *The Mechanics of Soils and Foundations*. London, England: McGraw-Hill Book Company Europe.
- Bakioğlu, M. (2001). *Cisimlerin Mukavemeti* (1. b.). İstanbul: Beta Basım A.Ş.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (4. ed.). New York, USA: McGraw-Hill Companies.
- Budhu, M. (2008). *Foundations and Earth Retaining Structures* (3. ed.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Bulut, R. (2001). Finite Element Method Analysis of Slabs on Elastic Half Space Expansive Soil Foundations. *In Partial Fulfillment of the Requirements For The Degree of Doctor of Philosophy*. Texas, USA: Texas A&M University.
- Coduto, P. D. (2001). *Foundation Design Principles and Practices* (2. ed.). London, England: Copyright Licensing Agency Ltd.
- Computers and Structures. (2013). CSI Analysis Reference Manual. *Computers and Structures Inc*.
- Daloğlu, A. T., & Vallabhan, C. G. (2000). Values of k for slab on Winkler foundation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, p. 126(5).
- Darılmaz, K. (2009). an assumed-stress hybrid element for modelling of plates with shear deformations on elastic foundation. *Structural Engineering and Mechanics*(33), pp. 573-58.
- Das, M. B. (2006). *Principles of Geotechnical Engineering* (5. ed.). Toronto, Canada: Thomson Canada Limited.
- Filenenko-Borodich, M. M. (1940). *Some approximate theories of the elastic foundation*. Russian: Uchenyie Zapiski Moscovskogo Gosudarstvennogo Universiteta *Mechanika*.
- Hamarat, M. (2012). İki Parametrelili Zemin Üzerine Oturan Yapı Sistemlerinin Dinamik Analizi. *Yüksek Lisans Tezi (İstanbul Teknik Üniversitesi)*.
- Hetenyi, M. (1946). *Beams on elastic foundation*. Michigan: The University of Michigan Press.
- Hetenyi, M. (1950). *A general solution for the bending on an elastic of arbitrary continuity*. *Journal of Applied Physics*.
- Marto, A., Latifi, N., Janbaz, M., Kholghifard, M., Khari, M., Alimuhammed, P., & Banadaki, D. A. (2012). Foundation Size Effect on Modules of Subgrade Reaction on sandy Soils. *EJGE*(17), pp. 2523-2530.

- Moayed, Z. R., & Janbaz, M. (2008). Foundation size Effect on Modules of Subgrade Reaction in Clayey Soils. *EJGE*(13), pp. 2-8.
- Önalp, A., & Arel, E. (2013). *Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği* (4. b.). İstanbul: Birsen Yayınevi Ltd. Şti.
- Önalp, A., & Sert, S. (2010). *Geoteknik Bilgisi III Bina Temelleri* (2. b.). İstanbul: Birsen Yayınevi Ltd. Şti.
- Pasternak, P. L. (1954). *On e new method of analaysis of an elastic foundation by means of two foundation constants*. Moscow, Russi: Gosudarstuennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu i Arkhitekture Moscow.
- Saygun, A., & Çelik, M. (2003). Analaysis of circular plates on two parameter elastic foundation. *Struct. Eng. Mech.*(15(2)), pp. 249-267.
- TS 5744. (2013). Plaka Yükleme Deneyi ile Zemin Taşıma Gücünün Yerinde Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*.
- Vallabhan, C. G., & Daloğlu, A. T. (1999). Consistent FEM-Vlasov model for plates on layered soil. *Journal of Structural Engineering ASCE*(125(1)), pp. 108-113.
- Vallabhan, C. G., & Das, Y. C. (1988). Parametric study of beams on elastic foundations. *Journal of Engineering Mechanics*(114), pp. 2072-2082.
- Vallabhan, C. G., Straughan, W. T., & Das, Y. C. (1991). Refined model for analysis of plates on elastic foundations. *Journal of Structural Engineering ASCEE*(125(1)), pp. 108-113.
- Verruijt, A. (2006). *Soil Mechanics*. Delft University of Technology.
- Vlasov, V. Z., & Lepnt'ev, U. N. (1966). *Beams plates and shells on elastic foundations Isreal Programme for Scientific Translations*. Tel Aviv.
- Wood, D. M. (1990). *Soil Behaivour and Critical State Soil Mechanics*. New York, USA: Cambridge University Press.