



**TOPRAK ŞEVLERİN STABİLİTE ANALİZİNE YÖNELİK GRAFİK
ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ**

Fatma Begüm KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2019

Fatma Begüm KAYA tarafından hazırlanan “TOPRAK ŞEVLERİN STABİLİTE ANALİZİNE YÖNELİK GRAFİK ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Onur PEKCAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 06 /08/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatma Begüm KAYA

06/08/2019

TOPRAK ŞEVLERİN STABİLİTE ANALİZİNE YÖNELİK GRAFİK ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatma Begüm KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2019

ÖZET

Toprak şevlerin stabilite problemleri geoteknik alanının konularından biridir. Şev stabilite analizlerinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri limit denge yöntemidir. Bu yöntem ile belirli bir geometrideki şev yüzeyinin stabiliteyi sağlayan güvenlik sayısı en kritik kayma düzlemi için, kuvvet ve moment dengesi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Homojen zemin içerisindeki şevlerin stabilite analizlerinde iterasyon ve karmaşık analitik çözümlere ihtiyaç duyulmadan hızlı bir şekilde sonuca ulaşmak için stabilite grafik çözümleri kullanılmaktadır. Stabilite grafik çözümlerinin bir diğer avantajı ise farklı şev eğimlerinin denenmesiyle istenilen güvenlik sayılarını sağlayan şev eğiminin tespit edilmesi yerine, istenilen güvenlik sayısını sağlayan şev eğimlerine kolayca ulaşılmasının sağlanmasıdır. Daha önce oluşturulmuş olan stabilite grafiklerinin dilimler arası yanal kuvvetleri ihmal ederek veya çeşitli varsayımlar yaparak hesaplayan limit denge yöntemleri ile oluşturulması, özellikle şev eğiminin dikleştiği problemlerde sonuçların hatalı elde edilmesine neden olabilmektedir. Morgenstern ve Price yöntemi ile dilimler arası kuvvetler şev eğimiyle orantılı olarak değişken olacak şekilde hesaplanmakta ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, en yaygın ve gelişmiş limit denge yöntemlerinden biri olan Morgenstern ve Price (1965) yöntemi kullanılarak, MATLAB Programı ile statik ve deprem durumlarındaki zemin dayanım parametreleri, su etkisi, şev üzerindeki sürşarj etkisi hesaba katılarak, çok sayıda verinin elde edilmiştir. Bu konu üzerine yapılmış çalışmalar referans alınarak stabilite grafiklerinin güncel yöntemlere göre, hazırlanmış MATLAB kodu yardımı ile hazırlanmasını ve mevcut çalışmalar ile sonuçların karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Mevcut çalışmalara ek olarak sürşarj yükü, boşluk suyu basıncı, pseudo-statik deprem etkileri aynı anda hesaba katılabilmektedir. Ön tasarım aşamalarında, ön projelerde, zemin etüt raporlarında bu stabilite grafikleri ile şev stabilitesi güvenlik sayıları ve şev eğimlerinin belirlenebilecek ve hazırlanacak bir projenin ön tasarım sürecinde yol gösterici olacaktır.

Bilim Kodu : 91105
Anahtar Kelimeler : Şev Stabilitesi Analizi, Stabilite Grafikleri, Limit Denge Yöntemi, Morgenstern ve Price Yöntemi, MATLAB Programı
Sayfa Adedi : 129
Danışman : Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

A REVIEW OF CHART SOLUTIONS FOR STABILITY ANALYSIS OF EARTH SLOPES

(M. Sc. Thesis)

Fatma Begüm KAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2019

ABSTRACT

Stability of earth slopes is an issue in geotechnical field. The most common analysis method about stability of earth slope is limit equilibrium method. Safety factor of slope for the most critical slip surface is calculated with this method as force and moment equilibrium are satisfied. Chart solutions are used due to elimination of iteration and complex analytical calculation for analysis of earth slope in homogeneous soil profile. The other advantage of chart solution is to reach the slope ratio which supply the needed factor of safety easily instead slope ratio is obtained with trying the different slope ratio for providing the needed factor of safety. Previous researches give unreasonable results especially for sharper slope because the limit equilibrium methods used for previous researches ignore interslice forces or make some assumption. Interslice forces are considered as the forces change with slope in Morgenstern ve Price Method, proportionally, so more reasonable results obtain from the analysis. In the scope of this research, Morgenstern ve Price Method which is most common and developed method is performed by MATLAB Software, many datas for static and seismic condition considered as shear strength parameters, pore water pressure and surcharge effects are obtained from this script. Stability chart solutions are prepared considering the previous research as using the obtained data. Also, this study is included the comparison between this research and previous ones. In addition to available study, surcharge loads, pore water pressure of soil, pseudo-static earthquake effects are evaluated at the same time. Factor of safety of slope stability and slope ratio can be obtained with the help of the chart solutions for preliminary design, soil investigation report or preliminary project.

Science Code : 91105

Key Words : Slope Stability Analysis, Chart Solution, Limit Equilibrium Method, Morgenstern ve Price Method, MATLAB Script

Page Number : 129

Supervisor : Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi kapsamında, çalışmalarım boyunca benden desteğini ve tecrübelerini esirgemeyen, bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Yüksel YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte beni destekleyen Dr. Zeynep ÇEKİNMEZ BAYRAM ve AR-GE çalışmaları kapsamında tezimi destekleyen, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım. Her konuda yanımda olan ve beni destekleyen meslektaşım Can Metin SÖNMEZ'e teşekkürlerimi sunarım. Sevgi ve fedakarlıklarıyla maddi ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili annem Gülten KAYA, kardeşlerim Murat Berk KAYA ve Müge KAYA ÖZGAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1. Limit Denge Yöntemi.....	6
2.1.1. Morgenstern ve Price yöntemi (1965).....	10
2.2. Şev Stabilitesi Analizleri için Grafik Çözümler.....	17
3. METODOLOJİ.....	29
3.1. MATLAB Yazılımının Hazırlanması.....	29
3.1.1. Kritik kayma dairesinin tespiti.....	32
3.1.2. M ve P limit denge yönteminin programlanması.....	36
3.2. Stabilitate Grafiklerinin Oluşturulması.....	38
4. ANALİZ ÇÖZÜMLERİ.....	45
4.1. Drenajlı Durum Stabilitate Grafik Çözümleri.....	45
4.2. Stabilitate Grafiklerinin Karşılaştırılması.....	57
4.3. Örnek Çözümler.....	62
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR.....	77

	Sayfa
EKLER.....	79
EK-1. Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri.....	80
EK-2. Drenajlı durum sürşarj etkisinin dikkate alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri.....	90
EK-3. Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	129

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Farklı limit denge yöntemlerindeki denge kabulleri.....	6
Çizelge 3.1. Analiz edilen değişken değerler.....	39
Çizelge 3.2. Değişkenlere göre yapılan analiz sayıları.....	40
Çizelge 3.3. Daha önceki araştırmalarda oluşturulmuş grafiklerin stabilite bilgileri...	43
Çizelge 4.1. Farklı yöntemlere göre elde edilen güvenlik sayılarının karşılaştırılması.	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yöntemlere göre dilimler arası kuvvet yönleri.....	9
Şekil 2.2. Dilimler arası kuvvetlerin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.3. X yönündeki değişime göre dilimler arası kuvvet fonksiyonu varyasyonları.....	11
Şekil 2.4. Dilimler arası kuvvet yönünün şev eğimi ile değişimi.....	12
Şekil 2.5. (a) Tipik şev ve kayma kesit görünüşü (b) Tipik bir dilime ait kuvvetler.....	13
Şekil 2.6. Farklı μ ve ν değerleri için dilimler arası kuvvet fonksiyonu ($f(x)$).....	15
Şekil 2.7. M ve P yöntemi yazılım algoritmasına ait basamaklar.....	16
Şekil 2.8. (a) n_d oranı (b) Taylor'ın Stabilite Grafiği.....	18
Şekil 2.9. Janbu stabilite grafiği (1968) (a) $\Phi=0$ (b) $\Phi>0$	20
Şekil 2.10. A ve B parametrelerinin grafikleri.....	21
Şekil 2.11. (a) Log-spiral kayma mekanizması (b) Stabilite grafikleri.....	22
Şekil 2.12. Drenajsız durum için stabilite grafiği.....	23
Şekil 2.13. Drenajlı durum için stabilite grafiği.....	24
Şekil 2.14. Lineer olmayan zemin yenilme zarfı parametreleri.....	25
Şekil 2.15. Güvenlik sayısı ve stabilite parametresi (λ) arasındaki bağıntı.....	25
Şekil 2.16. Kayma düzlem mekanizmaları.....	26
Şekil 2.17. Kayma düzlem mekanizmaları.....	27
Şekil 2.18. $\beta=15^\circ$ için stabilite grafiği.....	27
Şekil 3.1. Güvenlik sayısının tespitine ait akış şeması.....	31
Şekil 3.2. Aynı yarıçap değerinde kayma dairesinin aranması.....	32
Şekil 3.3. Şev düzlemi kesit görünüşü.....	33
Şekil 3.4. Kesişim noktasına göre, oluşabilecek kayma dairesi alternatifleri.....	34
Şekil 3.5. Geçersiz kayma dairesi.....	35
Şekil 3.6. Kayma dairelerinin tespitinde kullanılan akış şeması.....	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.7. Bir dilimin ve dilime ait su seviyesinin yüksekliği.....	37
Şekil 3.8. Kombinasyonlarda kullanılan değişkenlerin şematik görünümü.....	39
Şekil 3.9. Farklı kayma dairesi mekanizmaları.....	41
Şekil 3.10. Kayma dairesi mekanizması algoritması.....	42
Şekil 4.1. $q=0$ (q : sürşarj) durumu veya $q>0$ için $FS_{Q=0}$ tespitinde kullanılan örnek stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli.....	46
Şekil 4.2. Örnek sürşarj etkisi grafikleri (a) $q/(\gamma H)$ 'nin güvenlik sayısına etkisi (b) $\tan\Phi'/c$ 'nin güvenlik sayısına etkisi.....	48
Şekil 4.3. A1 Parametresinin belirlenmesi için stabilite grafik çözümleri (a) $K_c=0$ (b) $K_c=0,05$ (c) $K_c=0,1$ (d) $K_c=0,2$ (e) $K_c=0,3$	50
Şekil 4.4. A2 Parametresinin belirlenmesi için stabilite grafik çözümleri (a) $R_u=0$ (b) $R_u=0,25$ (c) $R_u=0,5$	53
Şekil 4.5. $q=0$ durumu için kırılma noktası.....	55
Şekil 4.6. Kayma dairesi mekanizmalarının dağılım grafiği.....	56
Şekil 4.7. Michalowski (2002) ile karşılaştırma.....	58
Şekil 4.8. Steward ve Diğerleri (2011) ile karşılaştırma.....	59
Şekil 4.9. Farklı yöntemlere göre hata payları.....	61
Şekil 4.10. Örnek-1 MATLAB limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı.....	62
Şekil 4.11. Örnek-1 Slide 2D limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı.....	63
Şekil 4.12. Örnek-1 Kayma dairesi mekanizmasının tespiti.....	64
Şekil 4.13. Örnek-2 MATLAB limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı (a) $q=0$ (b) $q=50$ kPa.....	65
Şekil 4.14. Örnek-2 Slide 2D limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı.....	67
Şekil 4.15. Örnek -2 Kayma dairesi mekanizmasının tespiti.....	68
Şekil 4.16. Örnek-3 MATLAB limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı (a) $q=0$ (b) $q=150$ kPa.....	69
Şekil 4.17. Örnek-3 Slide 2D limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı.....	71
Şekil 4.18. Örnek-3 Kayma dairesi mekanizmasının tespiti.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Φ'	İçsel sürtünme açısı (°)
c'	Efektif kohezyon değeri, kPa
FS	Güvenlik sayısı, birimsiz
N	Kesme yüzeyindeki normal kuvvet, kN
Z	Bileşke dilimler arası kuvvet, kN
n	Bilinmeyen sayısı, birimsiz
λ	Ölçek faktörü, birimsiz
$f(x)$	Dilimler arası kuvvet fonksiyonu, birimsiz
E	Dilimler arası yatay kuvvet, kN
X	Dilimler arası düşey kuvvet, kN
Q_i	Bir dilime etkiyen sürşarj yükü, kN
ω_i	Sürşarj yükü ile dilimin normali arasındaki açı, (°)
b_i	Bir dilimin genişliği, m
h_i	Bir dilimin yüksekliği, m
E_i	Bir dilime etkiyen dilimler arası yatay kuvvet, kN
W_i	Bir dilim ağırlığı, kN
Kc	Yatay pseudo- statik deprem ivmesi katsayısı, birimsiz
z_i	Dilimler arası yatay kuvvet yüksekliği, m
α_i	Dilim tabanı açısı, (°)
N_i	Dilim tabanı normal kuvveti, kN
U_i	Dilim tabanı su basıncı yükü, kN
u_i	Dilimler arası su basıncı, kPa
S_k	Dilim tabanı kesme kuvveti, kN
Φ'_i	Dilime ait içsel sürtünme açısı, (°)
c_i'	Dilime ait efektif kohezyon değeri, kPa
Ri	Tutucu kesme kuvvetlerinin toplamı, kN
T_i	Stabiliteyi bozan kuvvetlerin toplamı, kN

Simgeler**Açıklamalar**

ε_1	İterasyondaki güvenlik sayıları arasındaki fark, birimsiz
ε_2	İterasyondaki λ arasındaki fark, birimsiz
q	Yayılı sürşarj yükü, kPa
N_s	Stabilite sayısı, birimsiz
γ	Birim hacim ağırlık, kN/m ³
H	Şev yüksekliği, m
c_u	Drenajsız kayma dayanımı, kPa
n_d	Sağlam tabaka derinliğinin kazı derinliğine oranı, birimsiz
N_0	Stabilite sayısı, birimsiz
μ_q	Sürşarj azaltma faktörü, birimsiz
μ_w	Boşluk suyu azaltma faktörü, birimsiz
μ_t	Tansiyon çatlağı azaltma faktörü, birimsiz
N_{cf}	Drenajlı durumdaki stabilite sayısı, birimsiz
$R_u (r_u)$	Boşluk suyu basıncı oranı, birimsiz
β	Şev açısı, (°)
GridX₁	Dairenin merkezinin alanının sol X eksen değeri, m
GridY₁	Dairenin merkezinin alanının alt Y eksen değeri, m
GridX₂	Dairenin merkezinin alanının sağ X eksen değeri, m
GridY₂	Dairenin merkezinin alanının üst Y eksen değeri, m
YüzeyX₁	Şevin topuk kısmı X eksen değeri, m
YüzeyY₁	Şevin topuk kısmı Y eksen değeri, m
YüzeyX₂	Şevin taç kısmı X eksen değeri, m
YüzeyY₂	Şevin taç kısmı Y eksen değeri, m
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
m	metre
Y:D	Şev oranı (Yatay / Düşey)

Simgeler**Açıklamalar**

A_1	Sürşarj parametresi-1, birimsiz
A_2	Sürşarj parametresi-2, birimsiz
FS_{ref}	Referans güvenlik sayısı, birimsiz
FS_{ek}	Ek güvenlik sayısı, birimsiz
FS_0	Sürşarj etkisinin olmadığı güvenlik sayısı, birimsiz

Kısaltmalar**Açıklamalar**

MveP	Morgenstern ve Price Yöntemi
-------------	------------------------------

1. GİRİŞ

Şev stabilitesi değerlendirilmesi inşaat mühendisliğinin önemli konularından biridir. Bir zemin kütlelerinin belirli bir yüzey boyunca kaymaya karşı emniyeti, stabilite olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle belirli bir yüzeydeki kayma gerilmeleri o yüzeyde mevcut kayma mukavemetini aştığı anda kayma hareketi gerçekleşir.

Şevlere etki eden yüklerin ve zeminlerin kayma dayanımlarının zamana bağlı olarak değişimi şevlerin stabilitesinin değişmesine neden olur. Şevlerin bu gibi farklı koşullara maruz kalması stabilite analizlerine ihtiyaç duyulmasını beraberinde getirir. Stabilite analizlerinin yapılmasındaki amaç doğal şevlerin kayma mekanizmalarının incelenmesi, karayolu, demiryolu, tünel portalleri, kanal yapıları gibi çeşitli mühendislik yapılarındaki yarma ve dolgu şevlerinin kayma veya göçme olmadan stabil bir şekilde kalmasını sağlayan şev eğimlerinin belirlenebilmesi ve stabilitesi bozulmuş şevlerin hasarının giderilmesidir.

Şevlerin stabilite problemlerinin irdelenebilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Şev stabilitesi analizlerinin irdelenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Limit Denge Analizi Yöntemidir. Bu yöntem kullanılarak, en kritik kayma düzlemine sahip yay içindeki kütle dilimlere ayrılarak farklı kabullere esasına dayalı moment ve kuvvetler dengesinin sağlanmasıyla kayma düzlemine ait minimum güvenlik sayısı değerleri hesaplanır.

Şev stabilitesi analizlerinde kullanılan limit denge yöntemlerinin iterasyona ve karmaşık analitik çözümlere ihtiyaç duymasının getirdiği sonuç olarak çeşitli yazılım programları kullanılmadan stabilite analizlerinin yazılması uzun vakitler almaktadır.

İlk olarak Taylor (1937) tarafından geliştirilen stabilite grafik çözümleri ile homojen zeminleri için zemin kayma dayanım parametreleri, birim hacim ağırlık, şev yüksekliği ve eğimi değişkenlerine bağlı olan şev stabilitesi grafikleri oluşturulmuştur. Daha sonra günümüze kadar farklı araştırmacılar tarafından grafikler farklı değişken etkileri ile geliştirilerek irdelenmiştir ve detaylandırılmıştır. Micholawski (2002) limit denge analizin kinematik yaklaşımları ile homojen zeminler için su basıncı etkisinin, deprem etkisinin dikkate alınması suretiyle şev stabilitesi grafiklerini oluşturmuştur. Sonrasında Eid (2013) tarafından Spencer Yöntemi kullanılarak homojen, lineer olmayan zemin modelleri için su

basıncı etkisi, deprem etkisi de dikkate alınarak çok sayıda grafik geliştirilmiştir. Buna benzer birçok çalışma yapılarak homojen zemine sahip şev stabilitesi problemleri için şev eğimlerinin veya şev stabilitesinin güvenlik sayısının hesaplanması sağlanmıştır.

Bu tez çalışmanın amacı dilimler arası kuvvetleri en gerçekçi şekilde hesaba katan Limit Denge Yöntemleri'nden biri olan Morgenstern ve Price (1965) dilim yöntemi kullanılarak homojen zemin koşulları için MATLAB Yazılım Programı ile statik ve deprem durumlarındaki zemin dayanım parametreleri, su etkisi, şev üzerindeki sürşarj etkisi hesaba katılarak birçok verinin elde edilmesi, bu veriler ile stabilite grafik çözümlerin farklı durumlar için oluşturulması ve irdelenmesini kapsamaktadır. Ayrıca tez çalışmasının bir diğer amacı daha önce yapılmış olan çalışmalar ile sonuçların karşılaştırılmasıdır.

Daha önce oluşturulmuş olan stabilite grafiklerinin dilimler arası yanal yükleri ihmal ederek veya çeşitli kabuller yaparak hesaplayan dilim yöntemleri ile oluşturulması özellikle şev eğiminin dikleştiği problemlerde sonuçların hatalı elde edilmesine neden olabilmektedir. Morgenstern ve Price (1965) tarafından geliştirilen dilim yöntemi ile bu problem ortadan kaldırılmaktadır. Bu grafikler ile şev modeline ait stabilite güvenlik sayıları özellikle homojen zeminlerde hızlı ve iterasyona ihtiyaç duymadan elde edilebilmektedir. Ayrıca bu grafiklerden tasarım alternatifleri hızlı bir şekilde hesaplanabilmekte ve karşılaştırılabilmektedir. Ön tasarım aşamalarında, ön projelerde, zemin etüt raporlarında bu stabilite grafikleri ile şev stabilitesi güvenlik sayıları ve şev eğimleri belirlenebilecek veya hazırlanacak bir projenin ön tasarım sürecinde tasarıma yön vermek için kullanılabilecektir.

Mevcut paket yazılımlar yerine MATLAB Programı kullanılarak çok sayıda analiz otomatik olarak yürütülmüş ve kısa sürede çok sayıda veri elde edilebilmiştir. Hazırlanmış olan MATLAB kodu sayesinde daha çok değişken etkisi gözlemlenebilmiştir. Ayrıca sadece şev modeline ait güvenlik sayıları tespit edilmemiş, aynı zamanda kayma dairesinin lokasyonuna ve derinliğine göre tipi tespit edilebilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında izlenen aşamalar aşağıda sıralanmıştır.

- Stabilité grafiklerinin oluşturulabilmesi için ilk olarak MATLAB koduna yol gösterici olabilmesi için algoritmalar geliştirilmiş ve literatürdeki algoritmalar kullanılmıştır.
- MATLAB kodu aracılığı ile Limit Denge Analiz Yöntemlerinden biri olan Morgenstern ve Price (1965) Yöntemiyle şev stabilitesi analizinin yapılabildiği kodun oluşturulması hedeflenmiştir.
- Oluşturulan MATLAB kodu sayesinde çok sayıda analiz otomatik olarak yapabilmektedir. Statik ve deprem durumlarındaki zemin dayanım parametreleri, boşluk suyu basıncı etkisi, şev üzerindeki sürşarj etkisi hesaba katılarak birçok değişken için güvenlik sayıları ve kayma dairesi tipleri elde edilmiştir.
- Belirtilen değişken etkilerine göre elde edilen çok sayıda veri kullanılarak stabilité grafik çözümleri oluşturulmuştur.
- Bu grafik çözümlerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalara ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölüm kapsamında şev stabilite analizi için literatürde kullanılan limit denge yönteminin teori ve uygulama temelleri açıklanmıştır. Ayrıca limit denge yöntemi kullanılarak daha önce yapılmış olan bazı yüksek lisans tezleri özetlenmiştir.

Çetin (2010) tarafından hazırlanan yüksek lisans tezi kapsamında farklı limit denge analiz yöntemleri için MATLAB programıyla bir bilgisayar programı geliştirilmiş ve dilim yöntemi, Bishop ve Janbu yöntemleri karşılaştırılmıştır. Drenajsız/drenajlı, statik/deprem durumu su etkisi de incelenerek irdelenmiştir. Ayrıca zemin dayanım parametrelerinin değişimiyle kayma dairesi mekanizması da incelenmiştir.

Azizi (2018) tarafından hazırlanan yüksek lisans tezi kapsamında şev kayma yüzeyinin ve güvenlik sayılarının belirlenmesi için çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bunun için yapılan analizlerde Morgenstern ve Price yöntemi kullanılmıştır.

Yalçın (2018) tarafından hazırlanan yüksek lisans tezi kapsamında kayma düzlemi tespiti, şev stabilitesi analizlerinin verimliliği üzerine geliştirilmiş olan integral tabanlı limit denge yöntemi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Tekin (2011) tarafından hazırlanan yüksek lisans tezi kapsamında sonlu elemanlar yöntemi ile dayanım azaltma yöntemi ve limit denge yöntemi karşılaştırılmıştır. Şev stabilite analizlerinde kazıklı ve kazıksız sistemler 2 çözüm yöntemi ile irdelenmiştir. Kazıklı sistemlerin şev güvenliğine etkisi incelenmiştir.

Ayrıntılı literatür incelemeleri sonucunda bu tez çalışması kapsamında dilimler arası kuvvetleri en gerçekçi şekilde hesaba katan limit denge yöntemlerinden biri olan Morgenstern ve Price (1965) dilim yöntemi kullanılarak homojen zemin koşulları için MATLAB Yazılım Programı ile statik ve pseudo-statik deprem durumlarındaki zemin dayanım parametreleri, boşluk suyu basıncı etkisi, şev üzerindeki sürşarj etkileri incelenmiştir. İterasyona, karmaşık nümerik hesaplamalara veya bilgisayar programlarına ihtiyaç duymadan şev stabilitesi analizlerinin yapılabilmesi için şev stabilitesi grafik çözümleri oluşturulmuştur.

Ayrıca daha önce yapılmış olan çalışmalar ile bu grafiklerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve değerlendirilmiştir.

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan limit denge yöntemi Bölüm 2.1’de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Stabilitate grafikleri üzerine daha önce yapılmış olan çalışmalar Bölüm 2.2’de açıklanmıştır.

2.1. Limit Denge Yöntemi

Şev stabilite analizlerinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri limit denge yöntemidir. Limit denge yöntemlerinde kayma dairesi üzerindeki zemin kütlesi düşey dilimlere bölünerek her bir dilimdeki kuvvetler hesaplanır. Bu yöntem ile şev stabilitesini sağlayan güvenlik sayıları farklı kabullere göre moment, kuvvet veya hem moment hem kuvvet dengesinin sağlanmasıyla elde edilir. Limit denge yöntemleri ile farklı kayma mekanizmaları için (dairese, dairese olmayan, log-sipral) güvenlik sayıları hesaplanabilmektedir. Dilimler arası kuvvetler, denge kabulleri limit denge yöntemleri arasında değişiklik göstermektedir. Denklem sayısı ve bilinmeyen sayısı arasındaki dengenin elde edilmesi ve problemin statik olarak belirlenebilmesi için varsayımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı yöntemlere ait farklı varsayımlar Çizelge 2.1’de özetlenmiştir (Duncan, Wright, Brandon, 2014: 106, 108). Tüm yöntemlerde denge denklemi sayısı, bilinmeyen sayısına eşit olup, tüm yöntemlerde denge koşulları sağlanmıştır.

Çizelge 2.1. Farklı limit denge yöntemlerindeki denge kabulleri (Duncan ve diğerleri, 2014)

Prosedür	Varsayımlar	Sağlanan Denge denklemleri		Çözülecek bilinmeyenler	
Sonsuz Şev	Kayma düzlemi yüzeye paralel olarak sonsuza doğru ilerler.	1	Σ Şev yüzeyine dik kuvvetler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		1	Σ Şev yüzeyine paralel kuvvetler	1	Kesme yüzeyindeki normal kuvvet
		2	Toplam Denklem (Moment dengesi dolaylı olarak sağlanır.)	2	Toplam bilinmeyen
Logaritmik Spiral	Kayma yüzeyi logaritmik spiraldir.	1	Σ Spiralın ortasına göre momentler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		1	Toplam Denklem (Kuvvet dengesi dolaylı olarak sağlanır.)	1	Toplam bilinmeyen
İsveç Dairesi ($\Phi'=0$)	Kayma düzlemi dairese, içsel sürtünme açısı (Φ') 0'dır.	1	Σ Dairenin ortasına göre momentler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		1	Toplam Denklem (Kuvvet dengesi dolaylı olarak sağlanır.)	1	Toplam Bilinmeyen

Çizelge 2.2. Farklı limit denge yöntemlerindeki denge kabulleri
(Duncan ve diğerleri, 2014)

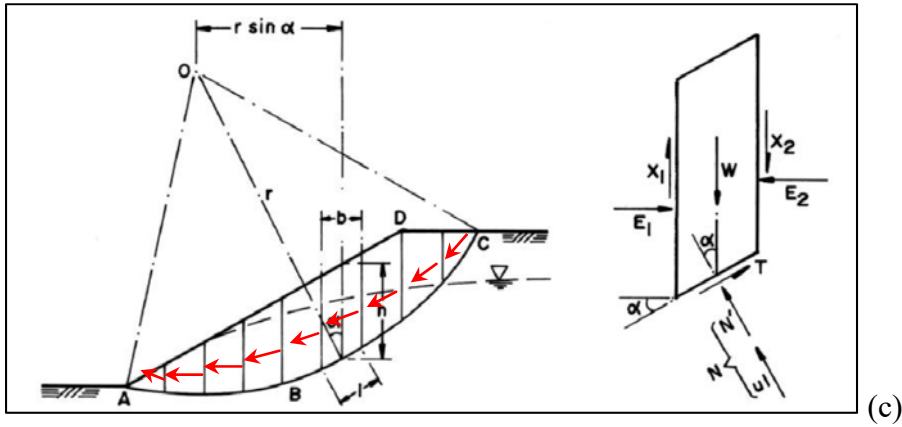
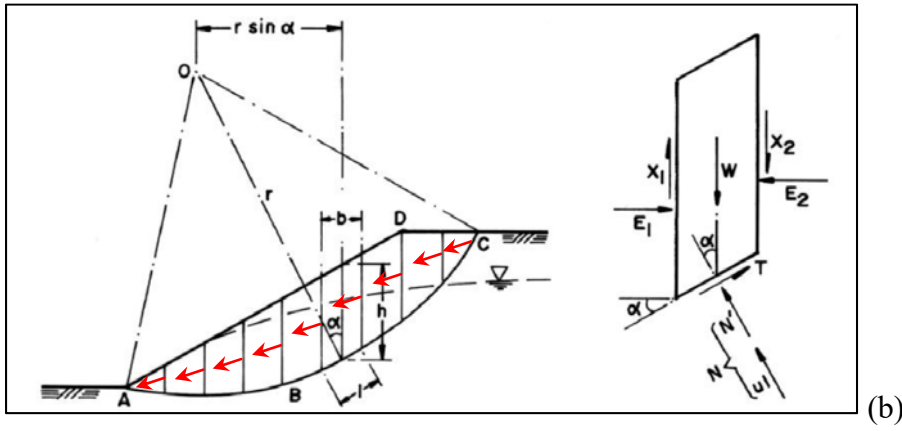
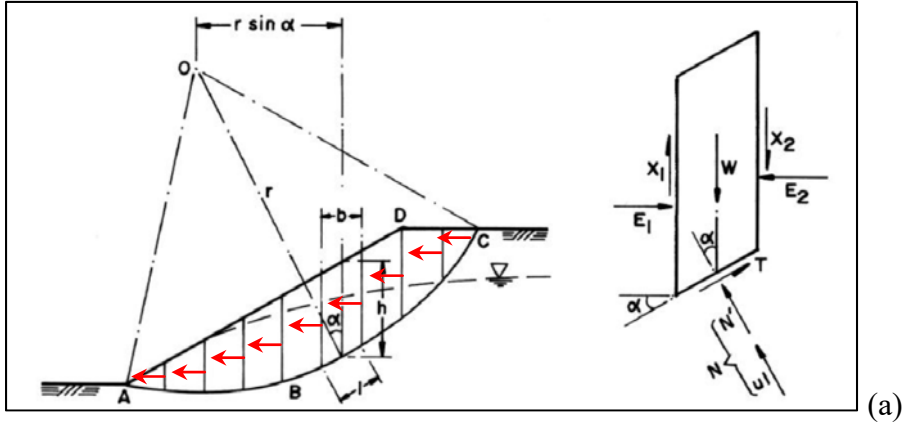
Prosedür	Varsayımlar	Sağlanan Denge denklemleri		Çözülecek bilinmeyenler	
Ordinary Dilim Yöntemi (Fellenius Yöntemi veya İsveç Dilim Yöntemi olarak da bilinir.)	Kayma düzlemi daireseldir. Dilimler arası kuvvetler ihmal edilir.	1	Σ Dairenin ortasına göre momentler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		1	Toplam Denklem (Kuvvet dengesi dolaylı olarak sağlanır.)	1	Toplam bilinmeyen
Basitleştirilmiş Bishop	Kayma düzlemi daireseldir. Dilimler arası kuvvetler yatay alınır. (dilimler arasında kesme kuvveti yok.)	1	Σ Dairenin ortasına göre momentler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		n	Σ Düşey yöndeki kuvvetler	n	Dilim tabanındaki normal kuvvet (N)
		n+1	Toplam Denklem	n+1	Toplam bilinmeyen
Kuvvetler dengesi (Lowe ve Karafiath, Basitleştirilmiş Janbu, Corps of Engineer modifiye İsveç Yöntemi, Janbu'nun GPS Prosedürü)	Dilimler arası kuvvetlerin eğim açısı olduğu varsayılmıştır. Varsayımlar prosedüre göre değişiklik gösterir.	n	Σ Yatay yöndeki kuvvetler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		n	Σ Düşey yöndeki kuvvetler	n	Dilim tabanındaki normal kuvvet (N)
		2n	Toplam Denklem	n-1	Bileşke dilimler arası kuvvetler (Z)
				2n	Toplam bilinmeyen
Spencer	Dilimler arası kuvvetler paralel. (tümü aynı eğim açısına sahip). Dilim tabanındaki normal kuvvetin (N) konumu genelde tabanın ortasında olarak varsayılır.	n	Σ Herhangi bir noktaya göre momentler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		n	Σ Yatay yöndeki kuvvetler	1	Dilimler arası kuvvetlerin eğim açısı (θ)
		n	Σ Düşey yöndeki kuvvetler	n	Dilim tabanındaki normal kuvvet (N)
		3n	Toplam Denklem	n-1	Bileşke dilimler arası kuvvetler (Z)
				n-1	Yan kuvvetlerin konumu
Morgenstern ve Price	Dilimler arası kesme kuvvetleri ile dilimler arası normal kuvvetler arasında $X = \lambda f(x)E$ bağlantısı vardır. Dilim tabanındaki normal kuvvetin (N) konumu genelde tabanın ortasında olarak varsayılır.	n	Σ Herhangi bir noktaya göre momentler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		n	Σ Yatay yöndeki kuvvetler	1	Dilimler arası kuvvetlerin açı ölçek faktörü (λ)
		n	Σ Düşey yöndeki kuvvetler	n	Dilim tabanındaki normal kuvvet (N)
		3n	Toplam Denklem	n-1	Dilimler arası yatay kuvvet (E)
				n-1	Yan kuvvetlerin konumu
Chen ve Morgenstern	Dilimler arası kesme kuvvetleri ile dilimler arası normal kuvvetler arasında $X = [\lambda f(x) + f_0(x)]E$ bağlantısı vardır. Dilim tabanındaki normal kuvvetin (N) konumu genelde tabanın ortasında olarak varsayılır.	n	Σ Herhangi bir noktaya göre momentler	1	Güvenlik sayısı (FS)
		n	Σ Yatay yöndeki kuvvetler	1	Dilimler arası kuvvetlerin açı ölçek faktörü (λ)
		n	Σ Düşey yöndeki kuvvetler	n	Dilim tabanındaki normal kuvvet (N)
		3n	Toplam Denklem	n-1	Dilimler arası yatay kuvvet (E)
				n-1	Yan kuvvetlerin konumu
Sarma	Dilimler arası kesme kuvveti mevcut dilimler arası kesme kuvvetine (S_v) $X = \lambda f(x)S_v$ ile bağlantılıdır. Dilimler arası kayma dayanımı kayma dayanımı parametrelerine, boşluk suyu basıncına ve dilimler arası kuvvetlerin yatay bileşenine bağlıdır. Dilim tabanındaki normal kuvvetin (N) konumu genelde tabanın ortasında olarak varsayılır.	n	Σ Herhangi bir noktaya göre momentler	1	Sismik sabit (k) (yada deneme yanılma kullanıldıysa güvenlik sayısı (GS))
		n	Σ Yatay yöndeki kuvvetler	1	Dilimler arası kuvvetlerin açı ölçek faktörü (λ)
		n	Σ Düşey yöndeki kuvvetler	n	Dilim tabanındaki normal kuvvet (N)
		3n	Toplam Denklem	n-1	Dilimler arası yatay kuvvet (E)
				n-1	Yan kuvvetlerin konumu
				3n	Toplam bilinmeyen

Sonsuz şev analizleri homojen granüler zemine sahip şevlerde kayma yüzeyi sığ bir derinlikte ve yüzeye paralel ilerlediği kabulü yapılır. Bu koşulları sağlayan modellerde doğru sonuçlar verirken uygulama alanları kısıtlıdır.

Logaritmik spiral yöntemi homojen zeminlerde kullanılır. Genellikle şev stabilitesi grafiklerinde kullanılan yöntem olarak veya desteklenmiş şevler için bazı yazılım programlarında kullanılan kayma dairesi mekanizması tipidir.

İsveç Dairesel Yöntemi ve Ordinary Dilim Yöntemlerinde dilimler arası kuvvetler ihmal edilerek sadece moment dengesi sağlanır. Ayrıca İsveç Dairesel Yöntemi sadece drenajsız durumdaki kohezyonlu zeminler için kullanılabilmektedir. Kuvvetler dengesi yöntemlerinde (Lowe ve Karafiath, Basitleştirilmiş Janbu, Corps of Engineer'in modifiye edilmiş İsveç Yöntemi, Janbu'nun GPS Prosedürü) tüm şev geometrilerinde ve zemin profillerinde kullanılabilmektedir. Kuvvetler dengesi sağlanır, fakar moment dengesi sağlanmaz. Tüm denge eşitliklerini sağlayan yöntemlere göre daha uzak doğru sonuçlara ulaşılır. Bishop Yönteminde (Şekil 2.1.a) düşey yöndeki kuvvetler dengesi sağlanırken, kuvvetler dengesi yöntemi, Spencer (Şekil 2.1.b), Morgenstern ve Price (Şekil 2.1.c), Chen ve Morgenstern ve Sarma yöntemlerinde yatay ve düşey kuvvetler dengesi sağlanmaktadır. Yatay kuvvetlerde dahil olmak üzere tüm kuvvetlerin hesaba katılması sonuçları oldukça etkilemektedir (Duncan ve diğerleri, 2014:108) .

Spencer, Morgenstern ve Price, Chen ve Morgenstern ve Sarma Yöntemleri tüm denge koşullarını sağlamaktadır. Tüm denge koşullarının sağlandığı en basit yöntem Spencer Yöntemi'dir. Dilimler arası bileşke kuvvetlerin yönü tüm dilimlerde aynı kabul edilmiştir. Morgenstern ve Price ve Chen ve Morgenstern Yöntemlerinde dilimler arası bileşke kuvvet yönü her dilimde ölçek faktörü (λ) ve dilimler arası kuvvet fonksiyonu ($f(x)$) değişkenlerine göre değişmektedir. Chen ve Morgenstern Yönteminde bu değişkenlere ek olarak ikinci dilimler arası kuvvet fonksiyonu hesaba katılır. Fakat Morgenstern ve Price ve Chen ve Morgenstern yönteminden elde edilen sonuçlar arasındaki fark ihmal edilebilir seviyede küçüktür (Duncan ve diğerleri, 2014:108).



Şekil 2.1. Yöntemlere göre dilimler arası kuvvet yönleri

Sarma yöntemi diğer tüm yöntemlerden farklı bir yaklaşımla sismik sabit (k) değeri bilinmeyen olarak kabul edilip, güvenlik sayısı bir değer olarak (genellikle başlangıç için 1) varsayılmaktadır. Bu yöntem sismik durum stabilitesinin saptanması için geliştirilmiştir. Ayrıca dilimler arası kuvvetlerinin elde edilmesi varsayımlardan dolayı diğer yöntemlere göre daha zordur.

Tüm yöntemler değerlendirildiğinde tüm kuvvet ve moment dengesi eşitliklerini sağlayan, dilimler arası tüm kuvvetleri hesaba katan hem dairesel hem dairesel olmayan kayma düzlemleri için kullanılabilen Morgenstern ve Price Yöntemi (1965) şev modeline ait güvenlik sayılarının tespitinde en etkili yöntemlerden biridir. Ayrıca dilimler arası bileşke kuvvetlerin eğimleri her dilimde farklı kabul edilmesi bu yöntemi özellikle kayma düzlemi yönünün aniden değiştiği, güçlendirme veya sürşarj yüklerinin kayma düzlemine etkidiği problemlerde önemli kılmaktadır.

2.1.1. Morgenstern ve Price Yöntemi (1965)

Morgenstern ve Price (1965) tarafından geliştirilmiş olan limit denge yöntemi tüm denge denklemlerini sağlayan (yatay ve düşey kuvvetler, moment) dilimler arası kuvvetleri lineer olmayan bir fonksiyon ile tanımlayan yöntemdir. Bu sayede dilimler arası kuvvetler ve yönleri her dilimde değişmektedir. Bu yöntemde, dilimler arası kesme kuvveti ve normal kuvvet arasında λ ve $f(x)$ olarak isimlendirilen sırasıyla ölçek faktörü ve dilimler arası kuvvet fonksiyonu bağıntısı olup, (Eş 2.1.), Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.

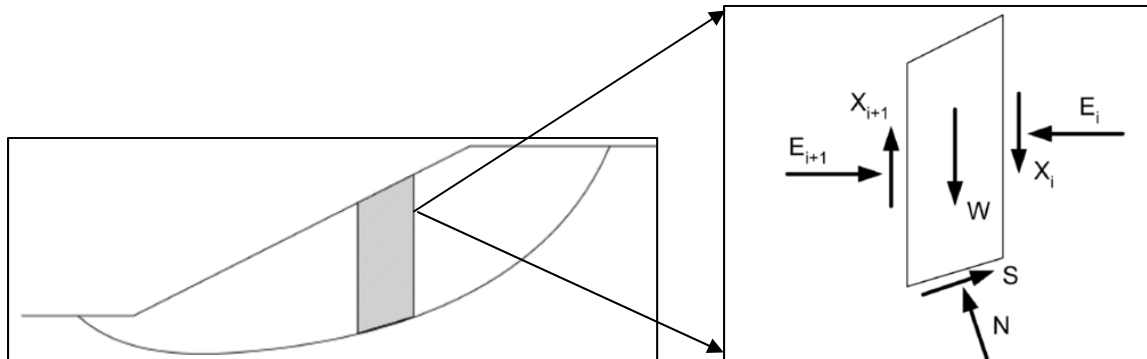
$$X = \lambda f(x)E \quad (2.1)$$

λ : ölçek faktörü

$f(x)$: dilimler arası kuvvet fonksiyonu

E : dilimler arası yatay kuvvet, kN

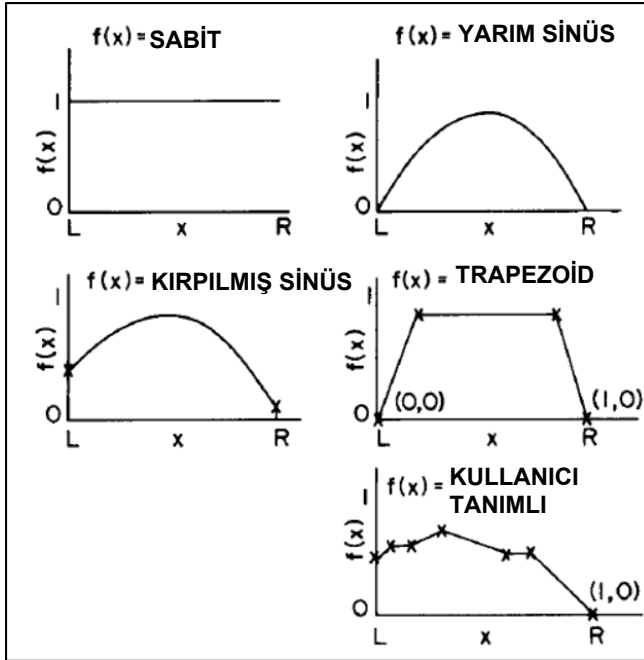
X : dilimler arası düşey kuvvet, kN



Şekil 2.2. Dilimler arası kuvvetlerin şematik gösterimi (EM 1110-2-1902, 2013)

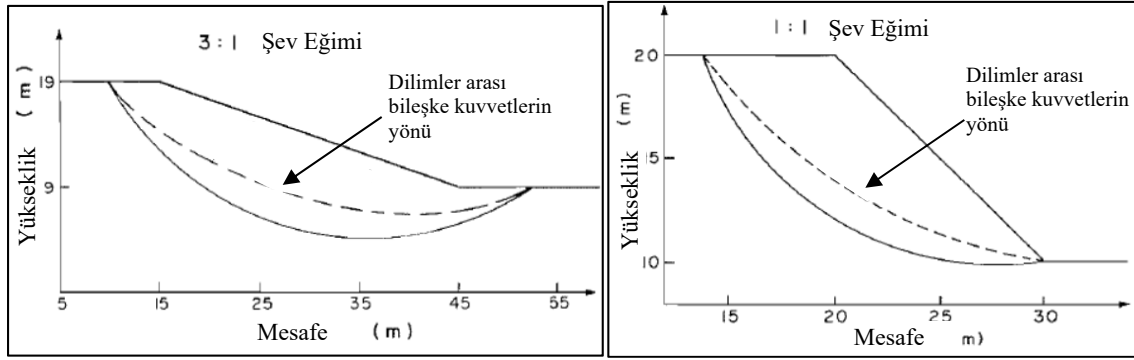
Lineer olmayan $f(x)$ fonksiyonu

Morgenstern ve Price ilk olarak $f(x)$ fonksiyonunu lineer olarak kabul etmiş olup, fonksiyonun lineer olması halinde sonuçları neredeyse Spencer yöntemi ile aynı olmaktadır. Morgenstern ve Price Yöntemini diğerlerinden ayıran en önemli fark dilimler arası kuvvetler için yapılan varsayımlarda esneklik sağlamasıdır (Duncan ve diğerleri, 2014: 103-104). Diğer bir deyişle dilimler arası kuvvetleri Şekil 2.3’de verildiği gibi sabit, yarım sinüs, kırılmış sinüs, trapezoid, kullanıcı tanımlı gibi farklı şekillerde zemin parametreleri, zemin modeli, şev eğimi gibi değişkenlere bağlı olarak seçilebilecektir.



Şekil 2.3. X yönündeki değişime göre dilimler arası kuvvet fonksiyonu varyasyonları (Fredlund, 1977)

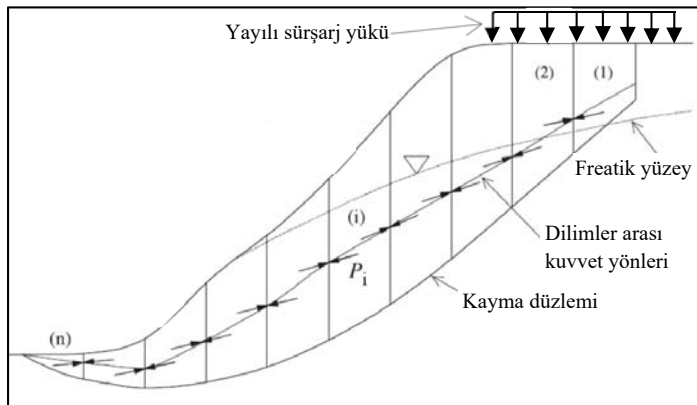
Fan, Fredlund ve Wilson (1986) tarafından “Limit Denge Yöntemi ile Şev Stabilite Analizi için Dilimler arası Kuvvet Fonksiyonu” isimli makalede dilimler arası kuvvet yönlerinin şev eğimi ile değişimi örnek olarak 3Y:1D ile 1Y:1D eğim oranları için Şekil 2.4’te gösterilmiştir. İlgili kaynakta dilimler arası bileşke kuvvetlerin yönü şev eğiminin azalması ile daha yatay olmakta, artması ile dikleşmekte olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle dilimler arası kuvvetleri değişken alan Morgenstern ve Price gibi yöntemlerde dilimler arası kuvvet yönlerini her dilim için sabit alan yöntemlerden daha gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir.



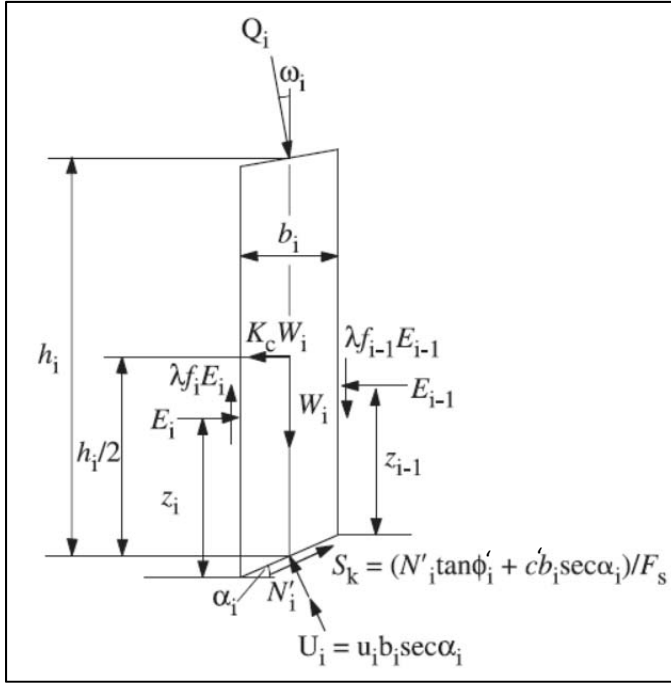
Şekil 2.4. Dilimler arası kuvvet yönünün şev eğimi ile değişimi (Fan ve diğerleri, 1986)

M ve P Yöntemi algoritması

Şev stabilitesini sağlayan güvenlik sayısının tespiti için geliştirilmiş iterasyona dayalı ve karmaşık numerik hesaplamalara dayalı olan Morgenstern ve Price Yöntemi için oluşturulmuş olan yazılım programları kapalı kutu programlar olup, yazılım içeriği, varsayım kabulleri çoğu programda ayrıntılı olarak verilmemiştir. Zhu, Lee, Qian ve Chen (2005) tarafından bu yöntemin karmaşık çözümlmelerini anlaşılır hale getirilebilmesi için eşitlikler tekrar düzenlenerek bir algoritma şekline getirilmiştir. Algoritmada hesaba katılan kuvvet ve yükler Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.5. (a) Tipik şev ve kayma kesit görünüşü (b) Tipik bir dilime ait kuvvetler (Zhu ve diğerleri, 2005)

A_lgoritmada kullanılan bir dilime ait kuvvet dengesini sağlayan eşitlikler aşağıda verilmiştir. Her bir dilim için aynı işlem yapılacak olup, temsili olarak i ile adlandırılmıştır. Φ_i ve Ψ_i değerleri moment ve kuvvet eşitliklerinin sadeleştirilmesi ile elde edilen eşitliklerdir. Herhangi bir kuvveti temsil etmemekte olup, işlem sadeliği için oluşturulmuş geçici olarak kullanılan değişkenlerdir. E_0 ve E_n ilk ve son dilime ait dilimler arası yatay kuvvetler olup, 0 olarak kabul edilmiştir.

$$N'_i = (W_i + \lambda f_{i-1} E_{i-1} - \lambda f_i E_i + Q_i \cos \omega_i) \cos \alpha_i + (-K_c W_i + E_i - E_{i-1} + Q_i \sin \omega_i) \sin \alpha_i - U_i \quad (2.2)$$

$$S_k = (N'_i \tan \Phi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i) / F_s \quad (2.3)$$

$$R_i = [W_i \cos \alpha_i - K_c W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos(\omega_i - \alpha_i) - U_i] \tan \Phi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i \quad (2.4)$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i + K_c W_i \cos \alpha_i - Q_i \sin(\omega_i - \alpha_i) \quad (2.5)$$

$$E_i \Phi_i = \Psi_{i-1} E_{i-1} \Phi_{i-1} + F S T_i - R_i \quad (2.6)$$

$$\Phi_i = (\sin\alpha_i - \lambda f_i \cos\alpha_i) \tan\Phi'_i + (\cos\alpha_i + \lambda f_i \sin\alpha_i) FS \quad (2.7)$$

$$\Phi_{i-1} = (\sin\alpha_{i-1} - \lambda f_{i-1} \cos\alpha_{i-1}) \tan\Phi'_{i-1} + (\cos\alpha_{i-1} + \lambda f_{i-1} \sin\alpha_{i-1}) FS \quad (2.8)$$

$$\Psi_{i-1} = [(\sin\alpha_i - \lambda f_{i-1} \cos\alpha_i) \tan\Phi'_i + (\cos\alpha_i + \lambda f_{i-1} \sin\alpha_i) FS] / \Phi_{i-1} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;

Q_i : Bir dilime etkiyen sürşarj yükü, kN

ω_i : Bir dilime etkiyen sürşarj yükünün dilimin normaliyile yaptığı açısı, (°)

b_i : Bir dilimin genişliği, m

h_i : Bir dilimin yüksekliği, m

E_i : Bir dilime etkiyen dilimler arası yatay kuvvet, kN

W_i : bir dilim ağırlığı, kN

Kc : yatay deprem ivmesi katsayısı

z_i : dilimler arası yatay kuvvet yüksekliği, m

α_i : dilim tabanı açısı, (°)

N'_i : dilim tabanı normal kuvveti, kN

U_i : dilim tabanı su basıncı yükü, kN

u_i : dilimler arası su basıncı, kPa

S_k : dilim tabanı kesme kuvveti, kN

Φ'_i : dilime ait içsel sürtünme açısı, (°)

c_i' : dilime ait kohezyon dayanımı, kPa

FS : güvenlik sayısı değeri

Her dilimden elde edilen değerler kullanılarak FS Eş 2.10 ile hesaplanmıştır.

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j) + T_n} \quad (2.10)$$

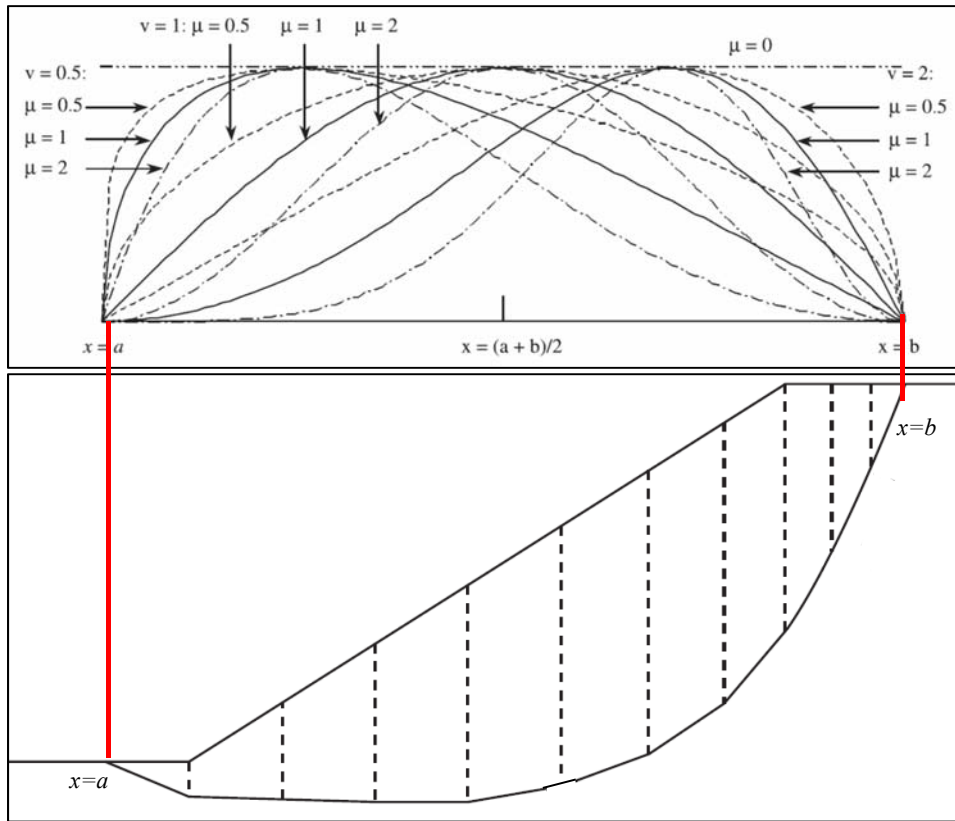
Her bir dilimin moment dengesi tüm kuvvetler düşünülerek dilim tabanının orta noktasına göre oluşturulmuştur. Moment dengesi eşitlikleri sonucunda elde edilen eşitlik Eş .2.11’de verilmiştir.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n [b_i(E_i + E_{i-1}) \tan \alpha_i + K_c W_i h_i + 2Q_i \sin \omega_i h_i]}{\sum_{i=1}^n [b_i(f_i E_i + f_{i-1} E_{i-1})]} \quad (2.11)$$

Dilimler arası kuvvet fonksiyon yaklaşımlarından yarım sinüs fonksiyonu . Zhu, Lee, Qian ve Chen (2005) çalışmalarında yarım sinüs fonksiyonunu kullanmış olup, mevcut yazılım programlarında da tanımlı olarak yarım sinüs fonksiyonu kullanılmaktadır. Yarım sinüs fonksiyonu Eş. 2.12’de verilmiştir.

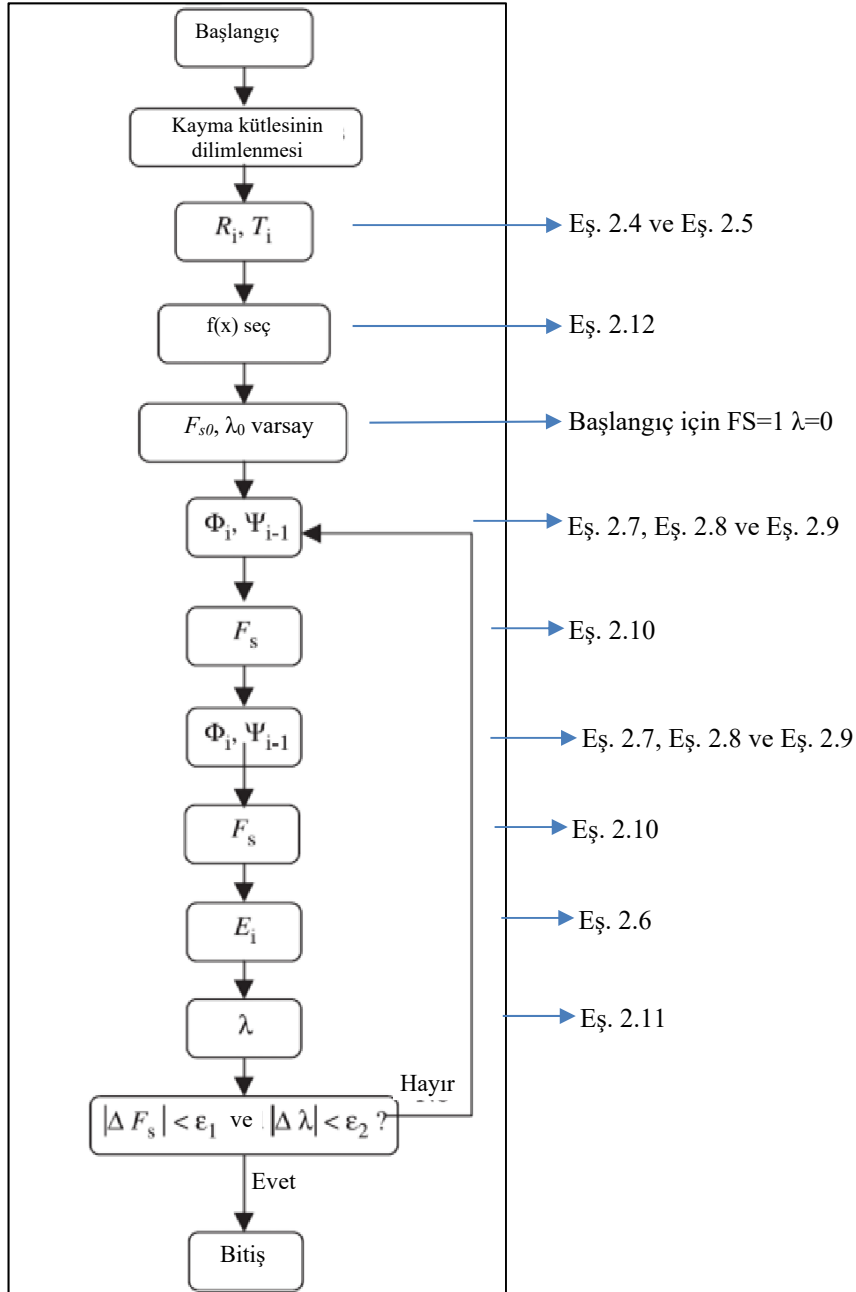
$$f(x) = \sin^\mu \left[\pi \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^v \right] \quad (2.12)$$

a ve b değerleri kayma düzleminin yatay eksenindeki ilk ve son noktalarını temsil etmektedir. μ ve v değerlerinin değişiminin yarım sinüs fonksiyonuna etkisi Şekil 2.6 ‘te verilmiştir.



Şekil 2.6. Farklı μ ve v değerleri için dilimler arası kuvvet fonksiyonu ($f(x)$) (Zhu ve diğerleri, 2005)

İterasyon sonucu sistemi sağlayan güvenlik sayısına ulaşmak için Şekil 2.7’da gösterilmiş olan yazılım algoritmasına ait basamaklar takip edilmektedir. İterasyon, hesaplanan FS değerleri ve λ değeri sırasıyla arasındaki fark olan ε_1 değeri 0,0001, ε_2 değeri 0,0001 değerine kadar küçüldüğünde iterasyon tamalanır.



Şekil 2.7. M ve P yöntemi yazılım algoritmasına ait basamaklar (Zhu ve diğerleri, 2005)

2.2. Şev Stabilitesi Analizleri için Grafik Çözümler

Stabilite grafik çözümler ile şev modeline ait stabilite güvenlik sayıları özellikle homojen zeminlerde hızlı ve iterasyona ihtiyaç duymadan elde edilebilmektedir. Bu konu üzerine farklı araştırmacılar tarafından farklı değişkenlere göre oluşturulan stabilite grafik çözümleri kronolojik sıraya göre özetlenmiştir.

Taylor stabilite grafiği (1937)

İlk olarak Taylor tarafından geliştirilmiş olan grafiklerden güvenlik sayısı stabilite numarası olarak adlandırılan Eş. 2.13 ile bulunmaktadır. Bu grafik sayesinde şevin stabiliteye karşı güvenlik sayısı kayma düzlemi tipine ve sağlam kayaya olan mesafe / kazı derinliği (n_d) oranına göre belirlenebilmektedir (Şekil 2.8).

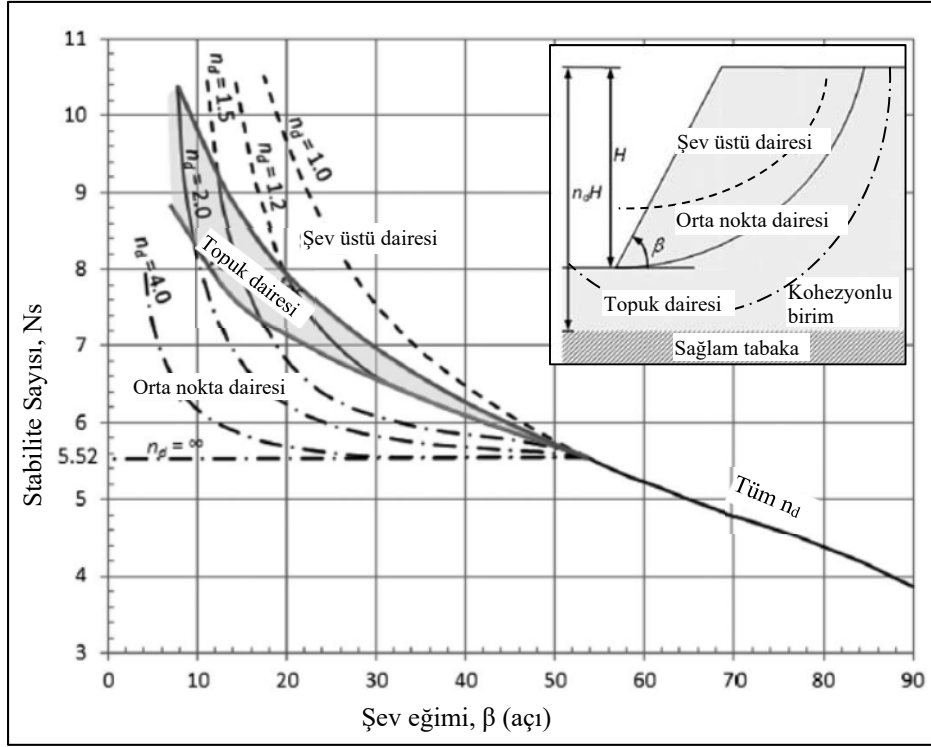
$$N_s = \frac{\gamma HFS}{c_u} \quad (2.13)$$

γ : birim hacim ağırlık, kN/m³

H : şev yüksekliği, m

N_s : stabilite sayısı

c_u : drenajsız kayma dayanımı, kPa



Şekil 2.8. (a) n_d oranı (b) Taylor'ın Stabilite Grafiği (Taylor, 1937)

Taylor tarafından oluşturulan grafikler kohezyonsuz zeminler ve sert ve füsürlü killer için kullanılamamaktadır. Ayrıca yeraltı suyu etkisi, çekme çatlağı gibi etkiler hesaba katılamamaktadır.

Janbu stabilite grafiği (1968)

Janbu tarafından stabilite grafikleri geliştirilmiş, su etkisi, sürşarj ve çekme çatlağının stabiliteye etkisi hesaba katılmıştır (EM 1110-2-1902, 2003:E3-E16). Ayrıca $\Phi=0$ koşulu için şev eğimi ve şev yüksekliğine bağlı, $\Phi>0$ koşulu için bir de $\lambda_{c\Phi}$ değişkenine bağlı olarak kayma dairesinin merkezinin lokasyonun belirlenebilmesi için grafikler oluşturmuştur (Şekil 2.9). Stabilite sayıları $\Phi=0$ koşulu için Eş. 2.14 ve Eş. 2.15'teki eşitlikler ile, $\Phi>0$ koşulu için Eş. 2.15, Eş. 2.16, Eş. 2.17 ve Eş. 2.18'deki eşitlikleri ile elde edilmektedir.

$$FS = \frac{N_0 c}{P_d} \quad (2.14)$$

$$P_d = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_q \mu_w \mu_t} \quad (2.15)$$

$$FS = \frac{N_{cf}c}{P_d} \quad (2.16)$$

$$\lambda_{c\Phi} = \frac{P_e \tan \Phi}{c} \quad (2.17)$$

$$P_e = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H'_w}{\mu_q \mu_w} \quad (2.18)$$

Burada;

FS : güvenlik sayısı

N_0 : $\Phi=0$ için stabilite sayısı

P_d : $\Phi=0$ değişken faktörü

μ_q : sürşarj düzeltme faktörü

μ_w : boşluk suyu basıncı düzeltme faktörü

μ_t : çekme çatlağı düzeltme faktörü

H_w : topuk noktasından yeraltı su seviyesine kadar olan yükseklik

q : sürşarj yükü

H : şev yüksekliği

N_{cf} : $\Phi>0$ için stabilite sayısı

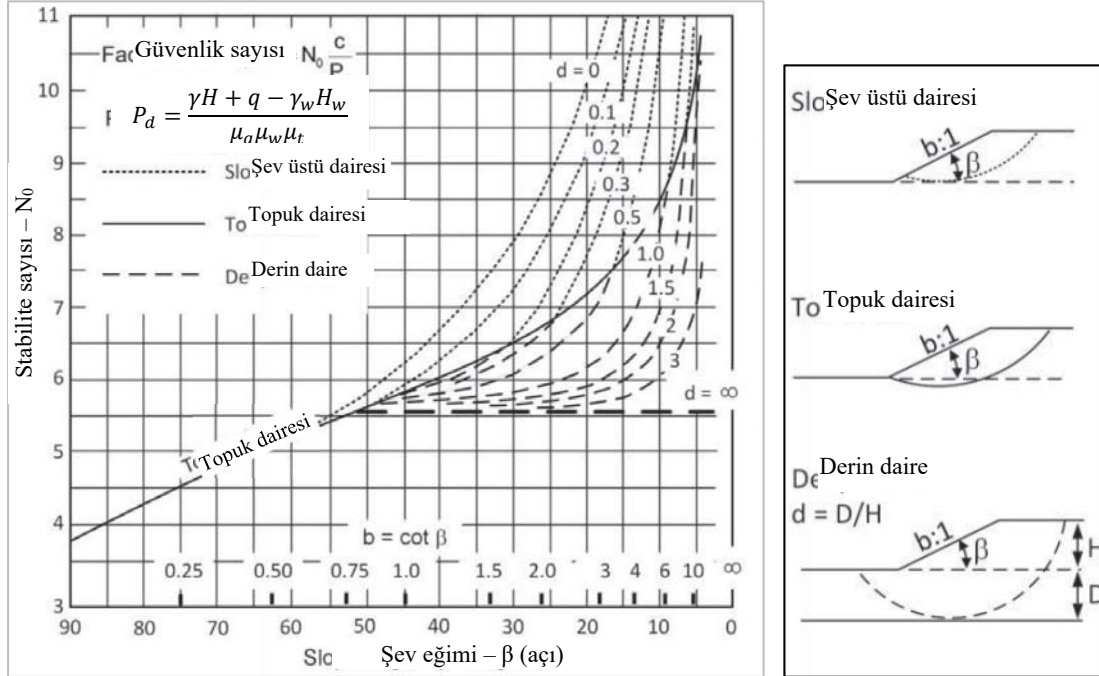
P_e : $\Phi>0$ değişken faktörü

$\lambda_{c\Phi}$: birimsiz parametre

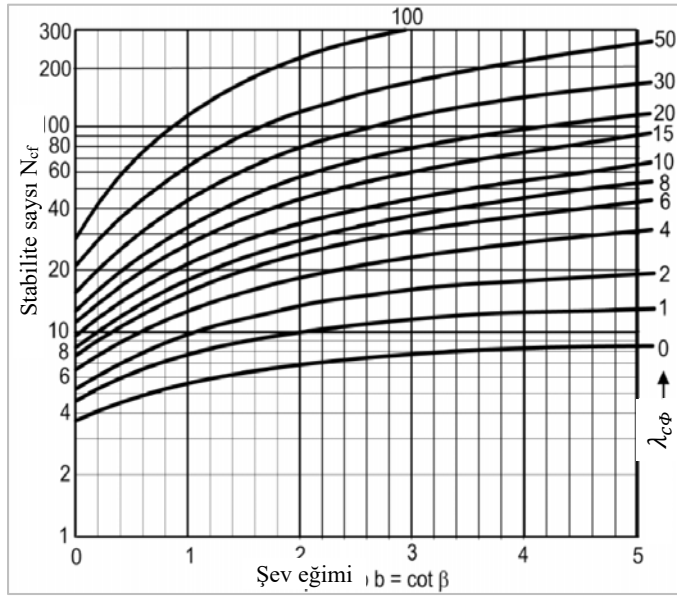
$\Phi=0$ koşulu için şev eğimine bağlı olarak kayma dairesinin merkezinin lokasyonun belirlenebilmesi için grafikler oluşturulmuştur (EK-1 – Şekil 1.1, Şekil 1.2).

$\Phi=0$ ve $\Phi>0$ koşullarında sürşarj faktörü (μ_q) için ayrı grafikler oluşturulmuş olup, grafik x ekseninde $q/\gamma H$, y ekseninde μ_q olacak şekilde şev eğimlerine göre ayrı eğriler çizilerek oluşturulmuştur (EK-1 – Şekil 1.3). Şevin memba ve mansab taraflarındaki su yüksekliklerinin birbirine oranına (H'_w/H_w) karşı yeraltı suyu etkisi faktörü μ_w değeri ile oluşturulmuş grafiklerden yararlanılarak suyun şev stabilitesine etkisi hesaplanabilmektedir (EK-1 - Şekil 1.4). Çekme çatlağı derinliğinin şev yüksekliğine oranına (H_t/H) karşı Çekme çatlağı faktörü (μ_t) ile grafikler şev eğimlerine göre ayrı eğriler çizilerek oluşturulmuştur (EK-1 - Şekil 1.5).

Ayrıca μ_q , μ_w ve μ_t değerleri, kayma dairesinin çıkış noktasına göre (şev topuğundan, şev eğimi yüzeyinden veya derinden) ayrı grafiklerde gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.9. Janbu stabilite grafiği (1968) (a) $\Phi=0$ (b) $\Phi>0$

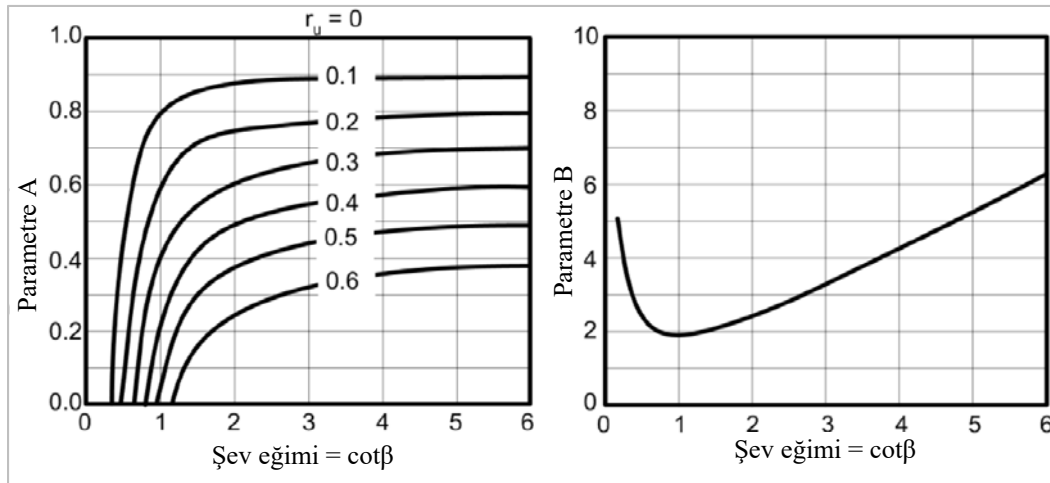
Bishop ve Morgenstern stabilite grafikleri

Bishop ve Morgenstern (Hunter ve Schuster, 1971:77-89) stabilite grafiklerine su etkisini boşluk suyu basıncı oranı (r_u) hesaba katarak oluşturmuştur. Güvenlik sayısı, m ve n olarak adlandırılan ve grafikten elde edilen değerler olmak üzere $m-n.r_u$ eşitliğinden elde edilmektedir (EK-1 – Şekil 1.6.)

Duncan, Buchianani ve DeWet (1987)

Sığ derinlikli, sonsuz kayma düzlemleri ve kohezyonsuz zemin koşulları için Duncan tarafından diğer grafiklerden biraz daha farklı bir şekilde stabilite grafikleri elde etmiştir. Güvenlik sayısını Eş. 2.19 ile elde edilmekte olup, iki ayrı grafikten elde edilen A ve B parametrelerinin hesaba katılması ile güvenlik sayısına ulaşılmaktadır. Ayrıca su etkisi boşluk suyu basıncı (r_u) olarak hesaba katılmıştır (Duncan ve diğerleri, 1987).

$$FS = A \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + B \frac{c'}{\gamma H} \quad (2.19)$$



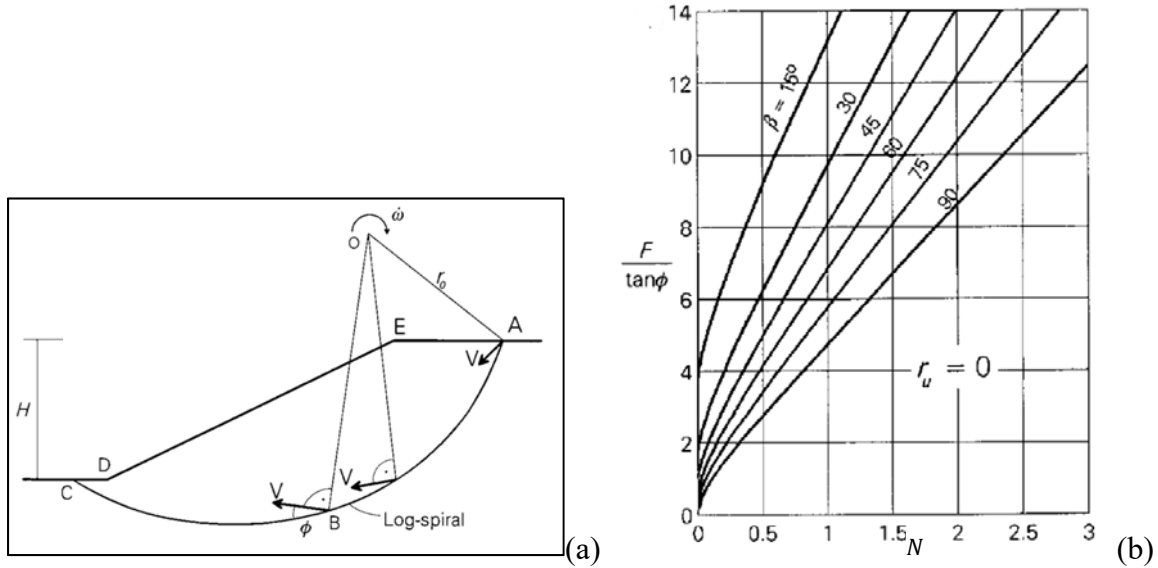
Şekil 2.10. A ve B parametrelerinin grafikleri (Duncan, Buchianani ve DeWet, 1987)

Michalowski (2002)

Limit analizin enerji korunumuna dayalı kinematik yaklaşımı ile log-spiral kayma düzlemi için stabilite grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 2.11). Stabilite sayısı Eş. 2.20’de gösterilmiştir.

$$N = \frac{c}{\gamma H \tan \Phi} \quad (2.20)$$

Michalowski yaptığı çalışmada şev eğiminin dikleştiği ve yüksek Φ açısına sahip zeminlerde kayma dairesi genelde şev topuğundan çıktığını, şev eğiminin azaldığı ve düşük Φ açısına sahip zeminlerde kayma düzlemi topuğun altından derinleşerek çıktığını tespit etmiştir. Farklı r_u ve deprem değerleri için farklı grafikler hazırlanmış olup, bu grafikler EK-1 – Şekil 1.7, 1.8 ve 1.9’da sunulmuştur.

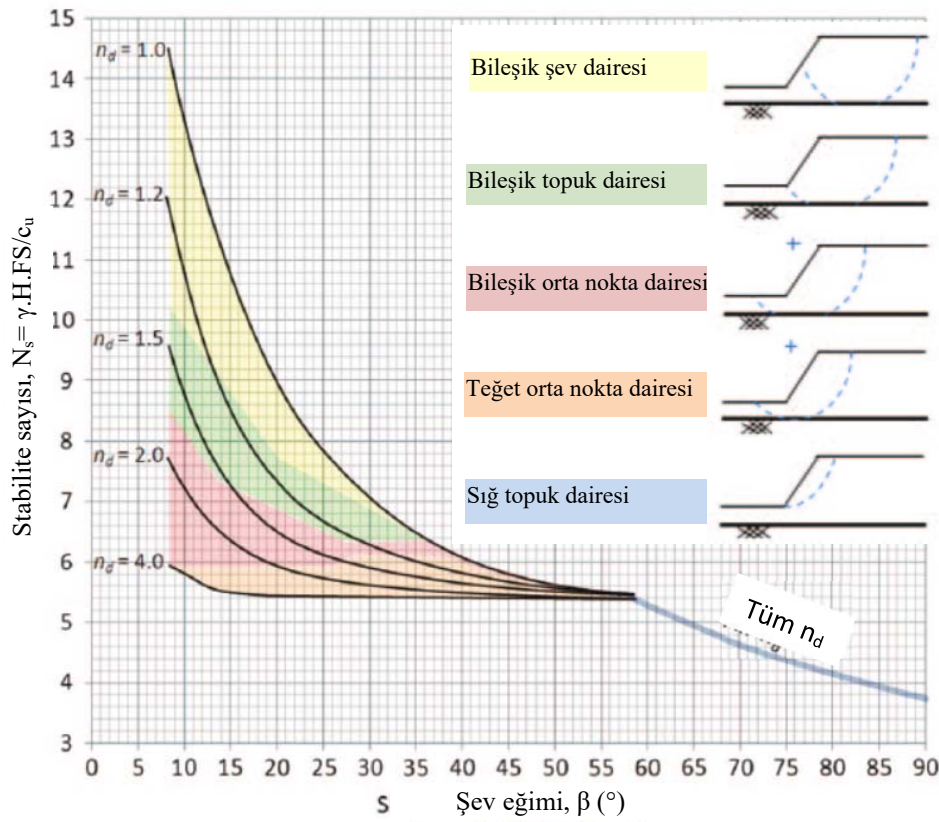


Şekil 2.11. (a) Log-spiral kayma mekanizması (b) Stabilite grafikleri (Michalowski, 2002)

Michalowski tarafından yapılan çalışmalar drenajlı parametrelere göre yapılmış olup, drenajsız durumda diğer bir deyişle Φ açısının 0° ’a eşit olduğu durumda, stabilite sayısının tanımsız olması nedeniyle kullanılmamaktadır.

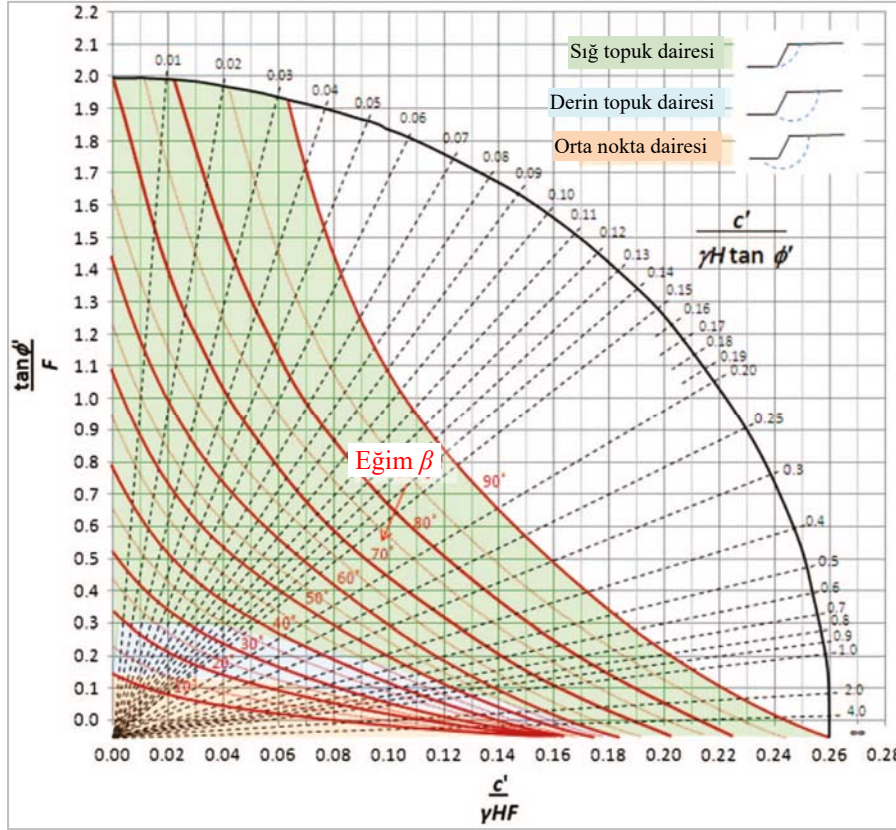
Steward ve Diğerleri (2011)

Taylor tarafından oluşturulmuş olan grafikler Morgenstern ve Price Limit Denge yöntemine göre geliştirilerek yeniden oluşturulmuştur. Drenajsız durum için Taylor 3 farklı kayma düzlemi tipi belirlemişken Steward ve diğerleri (2011) 5 farklı kayma düzlemi tipi belirlemiştir. Grafik aynı eksen eşitlikleri için oluşturulmuş olup, drenajsız durum stabilite grafiği Şekil 2.12’de verilmiştir. Bileşik kayma düzlemleri iki farklı ark ile gösterilmiş olup, grafik detaylandırılmıştır.



Şekil 2.12. Drenajsız durum için stabilite grafiği (Steward ve diğerleri, 2011)

Ayrıca drenajlı durum için de stabilite grafiklerini kayma düzlemi tipine göre oluşturmuştur (Şekil 2.13). Kayma düzlemi tipi genelde sığ topuk dairesi yenilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Sığ şev yüksekliğine ve düşük zemin parametrelerine sahip zeminlerde kayma dairesi derin topuk veya derin orta nokta yenilmeleri şeklinde gerçekleşmektedir. Su etkisi, deprem etkisi bu çalışma kapsamında incelenmemiştir.



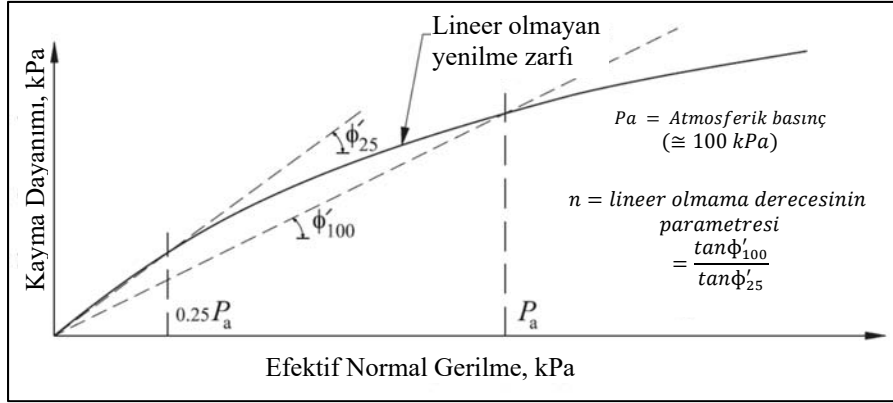
Şekil 2.13. Drenajlı durum için stabilite grafiği (Steward ve diğerleri, 2011)

Eid (2013)

Eid lineer olmayan yenilme zarfına sahip zeminler için Spencer (1967) Limit Denge yöntemine göre grafikler geliştirmiştir. Lineer olmayan yenilme zarfına sahip zemin modellerinden Mohr-Coulumb yenilme zarfına göre daha konservatif sonuçlar elde edilmektedir. Oluşturulmuş grafiklerde lineer olmayan yenilme zarfını temsilen stabilite parametresi, λ , olarak isimlendirdiği Eş. 2.21'de sunulmuştur.

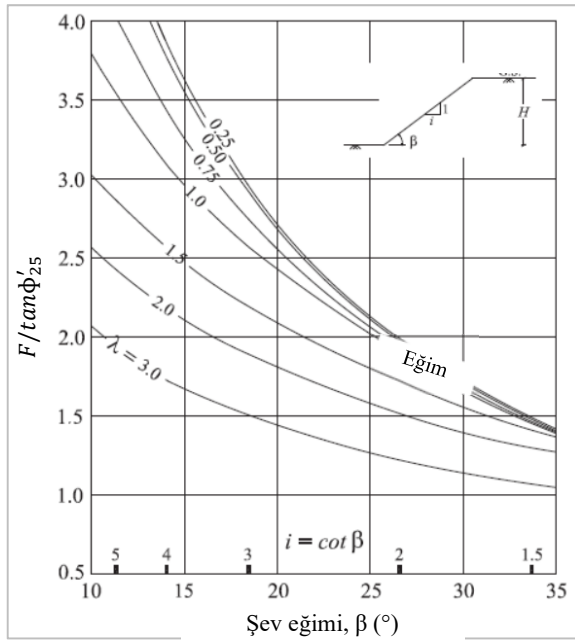
$$\lambda = \frac{1-n}{n} \left(\frac{\gamma H}{P_a} \right) \quad (2.21)$$

Lineer olmayan zeminin yenilme zarfı modelinde referans iki değer alınmıştır. Biri 100 kPa standart atmosferik basınç olup, diğeri 25 kPa olarak alınmıştır. Bu değer ne Φ açısı belirlenemeyecek kadar küçük, ne de ölçüm hassasiyetini azaltıp diğeri referans değere yaklaşacak kadar küçük bir değer olmalıdır. Bahsedilen lineer olmayan yenilme zarfı Şekil 2.14 'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Lineer olmayan zemin yenilme zarfı parametreleri (Eid, 2013)

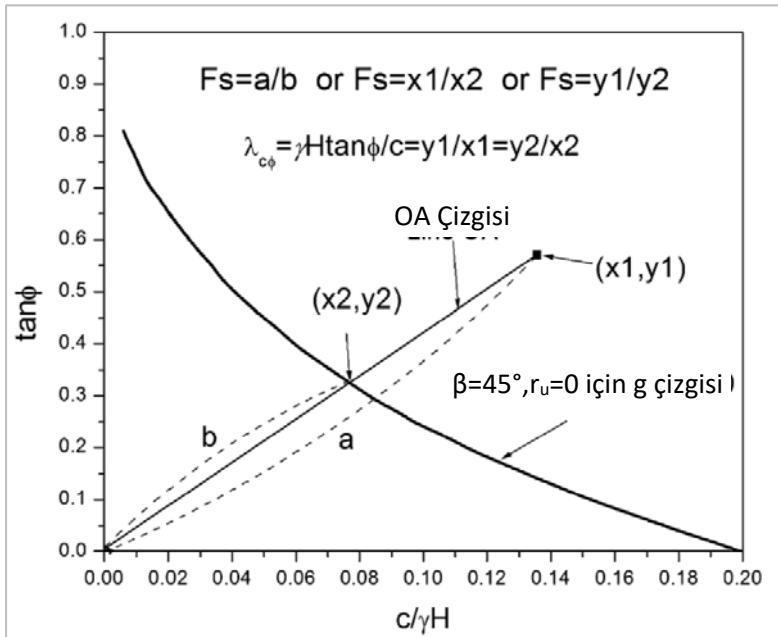
Stabilite parametresi (λ) değerine bağlı olarak stabiliteye karşı güvenlik sayıları Şekil 2.15'teki grafiğe göre belirlenebilmektedir. Ayrıntılı grafikler EK-1 – Şekil 1.10, 1.11, 1.12'de sunulmuştur. Bunun dışında farklı sismik yatay ivme katsayıları, statik durumda farklı boşluk suyu basıncı oranı (r_u) ve yer altı su seviyesi (H_u) için ayrı ayrı grafikler oluşturulmuştur. Grafiklerde sadece içsel sürtünme açısı (Φ') değeri hesaba katılmış olup, kohezyon değerleri hesaba katılmamıştır. Ayrıca su etkisinin hesaba katıldığı sismik koşullar için grafikler elde edilmemiştir. Bunlara ilave olarak deney verisinin olmadığı durumlarda lineer olmayan yenilme zarfının analiz edilmesi oldukça güçtür.



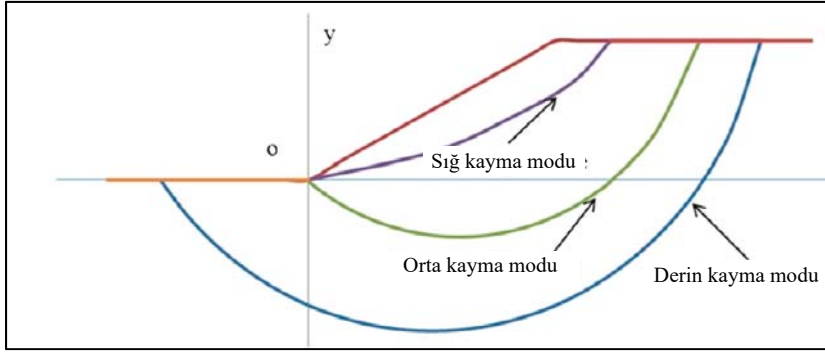
Şekil 2.15. Güvenlik sayısı ve stabilite parametresi (λ) arasındaki bağıntı (Eid, 2013)

Sun ve Zhao (2013)

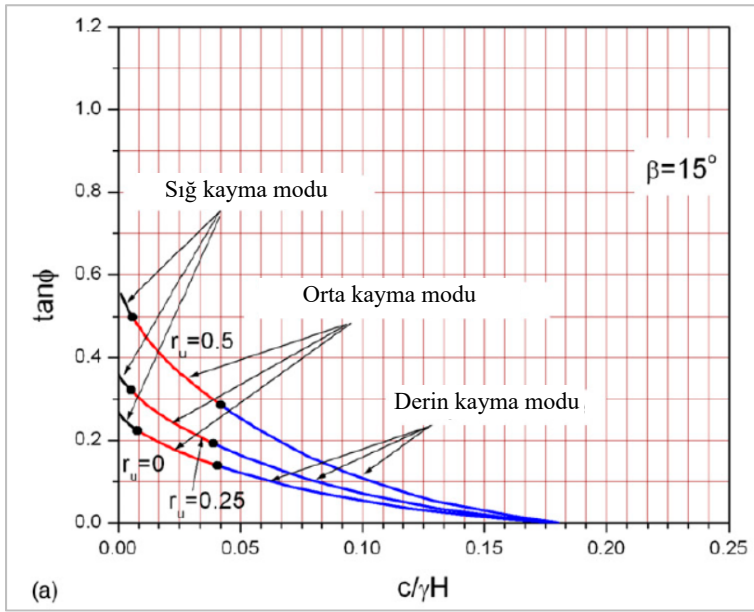
Limit denge durumundaki güvenlik sayısının 1 olduğu durumda sistemin stabilite analizinin tespiti için oluşturulan stabilite grafikleri Morgenstern ve Price Limit Denge Yöntemi ile oluşturulmuştur. İlk olarak $c/\gamma H$ ile $\tan\Phi$ arasındaki bağıntı güvenlik sayısı 1'i sağlayan limit denge durumu için g çizgisi belirlenmiştir (Şekil 2.16). Bu g çizgisinin yukarısında sistem stabil aşağısında sistem stabil değil olarak tanımlanmıştır. Taylor çalışmalarına benzer şekilde kayma düzlem tipini 3 farklı tip olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.17). Sun ve Zhao su etkisini boşluk suyu basıncı oranı (r_u) olarak hesaba katmış ve farklı r_u değerleri için ayrı eğrilerde, farklı şev eğimi açılarını farklı grafiklerde göstermiştir. Grafikleri drenajlı / drenajsız parametreye göre ayırmamışlardır. Farklı r_u değerleri için güvenlik sayısı 1'i sağlayan çizgiler belirli bir şev açısı için Şekil 2.18' de verilmiştir. Bu çalışma ile $c/\gamma H$ ile $\tan\Phi$ etkileri ayrı eksenlerde gösterilerek ayrılmıştır. Modele ait olan x ve y eksen değeri g çizgisi olarak belirtilen çizgiye oranı ile güvenlik sayısı elde edilmektedir. Grafikler ayrıntılı olarak EK-1 – Şekil 1.13 ve 1.14'te sunulmuştur.



Şekil 2.16. Kayma düzlem mekanizmaları (Sun ve Zhao, 2013)



Şekil 2.17. Kayma düzlem mekanizmaları (Sun ve Zhao, 2013)



Şekil 2.18. $\beta=15^\circ$ için stabilite grafiği (Sun ve Zhao, 2013)

Araştırmacılar tarafından statik durumda sürşarj etkisi, boşluk suyu basıncı etkisi, çekme çatlağı etkisi, lineer olmayan kayma zarfına sahip zemin modeli gibi etkiler araştırılmış olup, bu doğrultuda stabilite sayıları belirlenmiş ve stabilite grafikleri oluşturulmuştur. Özetle farklı araştırmacılar tarafından elde edilen stabilite grafik çözümleri sayesinde homojen zeminler için iterasyona ve karmaşık nümerik analizlere ihtiyaç duymadan belirli zemin koşulu ve geometrideki şev düzlemleri için stabilite güvenlik sayıları elde edilebilmektedir. Farklı araştırmacılar stabilite grafiklerini farklı açılardan değerlendirmiş ve farklı değişkenlere bağlı olan stabilite grafiklerini oluşturmuşlardır. Genel olarak drenajlı ve drenajsız kayma dayanımına sahip zeminlerin kayma tiplerinin farklı olması grafiklerinin de ayrı ayrı oluşturulması durumunu beraberinde getirmektedir.

3. METODOLOJİ

Bu tez çalışması kapsamında, toprak şevlerin stabilite grafik çözümleri dilimler arası kuvvetleri hesaba katan, Limit Denge yöntemlerinden biri olan Morgenstern ve Price (1965) dilim yöntemi kullanılarak, MATLAB Yazılım Programı ile homojen zemin koşullarında statik ve psedo-statik deprem durumları için oluşturulmuştur. Zemin dayanım parametreleri, şev geometrisi, su etkisi, şev üzerindeki sürşarj etkisi değişken kabul edilerek çok sayıda analiz yürütülmüştür. Analizlerden elde edilen verilere dayandırılarak, stabilite grafik çözümleri oluşturulmuştur.

Stabilite grafiklerinin bir projenin ön proje aşamasında, güvenlik sayılarının tespiti ile kabul edilebilir güvenlik sayısını sağlayan şev eğiminin tespitinde hızlı ve kolay sonuç sağlamaktadır (Hunter ve Schuster, 1971). Ayrıca bahsedilen bu grafikler detaylı analizler için yol gösterisi olup, tasarıma yön vermektedir.

İlk olarak, stabilite grafiklerinin oluşturulabilmesi için gerekli olan veriler, MATLAB Yazılımı ile oluşturulan program kullanılarak elde edilmiştir. Bölüm 3.1’de program kabulleri, kayma dairesinin belirlenmesi için kullanılan algoritma ve yöntemler açıklanmıştır.

Daha sonra elde edilen veriler kullanılarak, çok sayıda deneme sonunda güvenlik sayılarının en doğru şekilde tespiti için grafikler farklı koşullar için elde edilmiştir. Grafiklerde boşluk suyu basıncı etkisi, sürşarj etkisi, deprem etkisi ve bunların birbiriyle olan ilişkileri Bölüm 3.2’de sunulmuştur.

3.1. MATLAB Yazılımının Hazırlanması

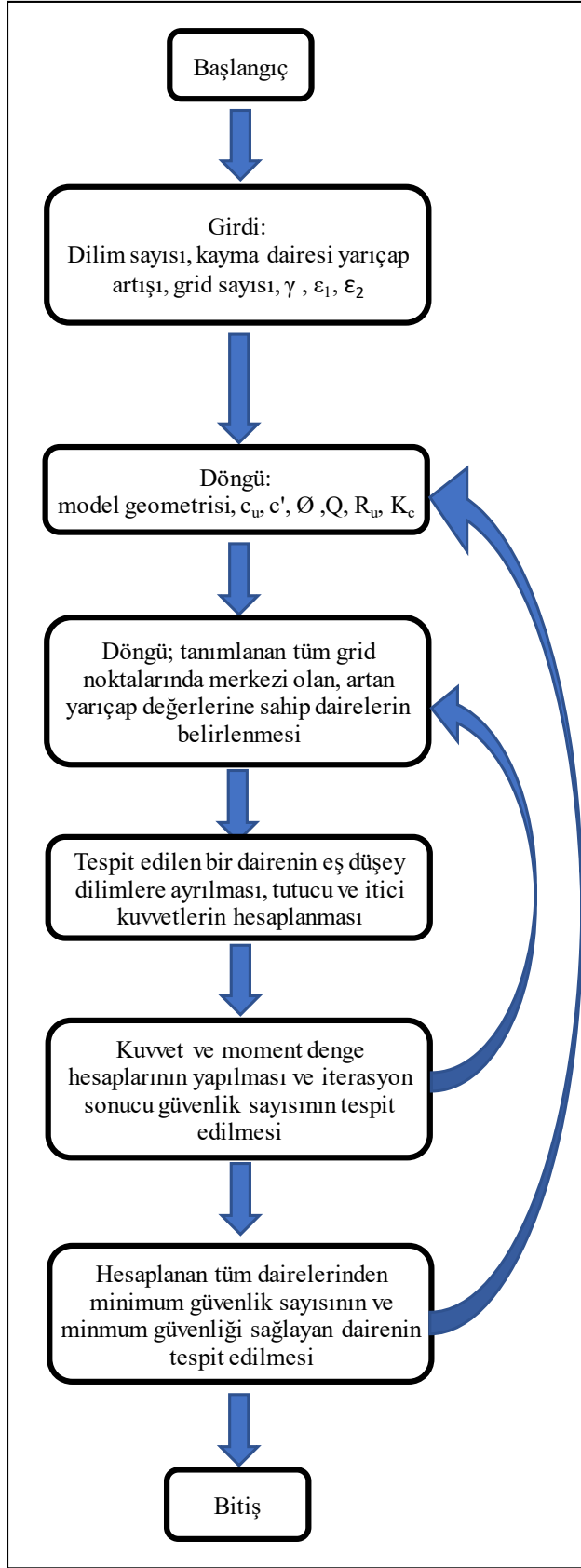
Hazırlanmış olan MATLAB Yazılımı sayesinde birçok değişken etkisi analiz edilebilmiştir. Ayrıca sadece şev modeline ait güvenlik sayıları tespit edilmemiş, buna ilave olarak kayma dairesinin lokasyonu ve mekanizmaları da tespit edilebilmiştir. Programlama kabul ve yöntemleri için çoğunlukla Rocscience Slide Programı referans alınmış olup, takip eden bölümlerde detaylandırılmıştır.

Güvenlik sayısının tespitine dair akış şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Programda akış ilk olarak girdi değerleri kullanılarak grid arama yöntemi ile tüm kayma dairelerinin lokasyon ve çap tespitiyle başlar. Ardından tespit edilen daire x ekseninde eşit dilimlere ayrılır. MveP Yöntemi ile her bir dilimdeki kuvvetler ve momentler hesaplanarak iterasyon döngüleri sonunda bir daireye ait güvenlik sayısı tespit edilir. Daha sonra döngü en başa döner ve tüm daireler için güvenlik sayıları tespit edilir. Son olarak hesaplanan tüm güvenlik sayılarından minimum olan değer, şev modelinin güvenlik sayısı olarak belirlenmiş olup, minimum güvenlik sayısını sağlayan kayma düzlemi de en kritik kayma düzlemi olarak belirlenir.

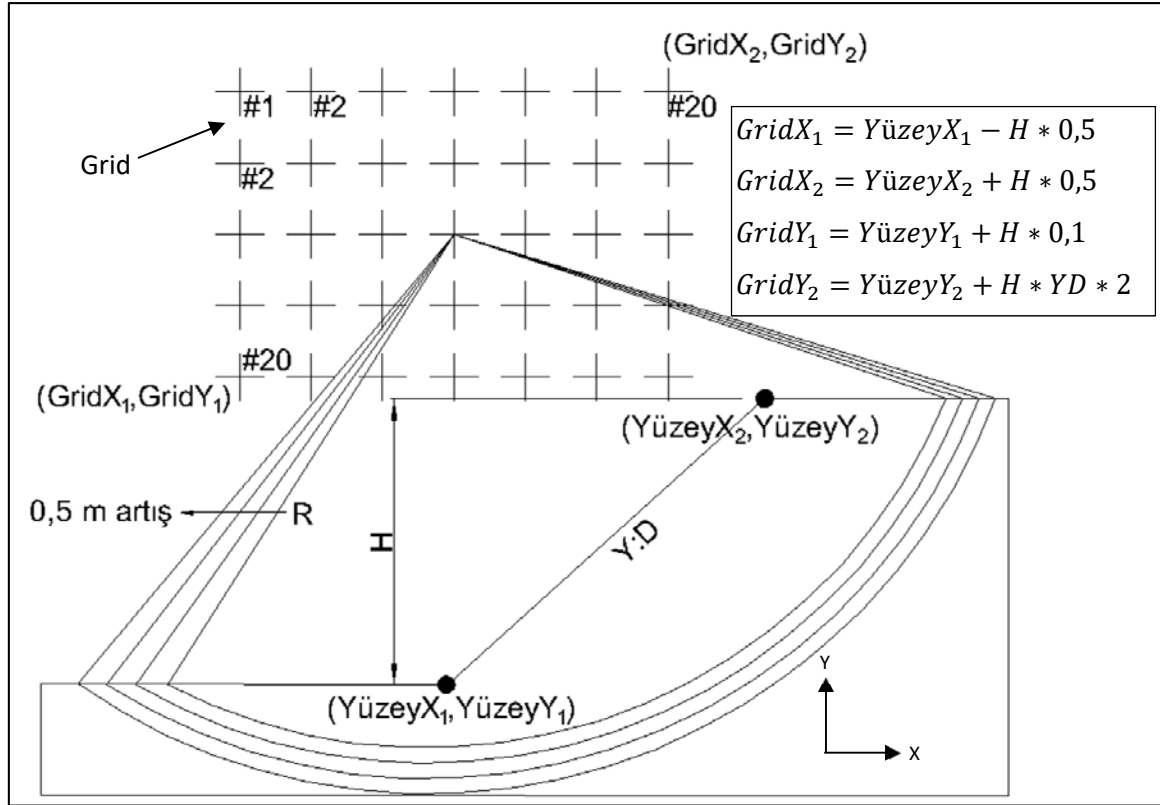
Şekil 3.1’deki akış şemasında;

ε_1 : iterasyondaki güvenlik sayıları arasındaki fark

ε_2 : iterasyondaki λ arasındaki fark

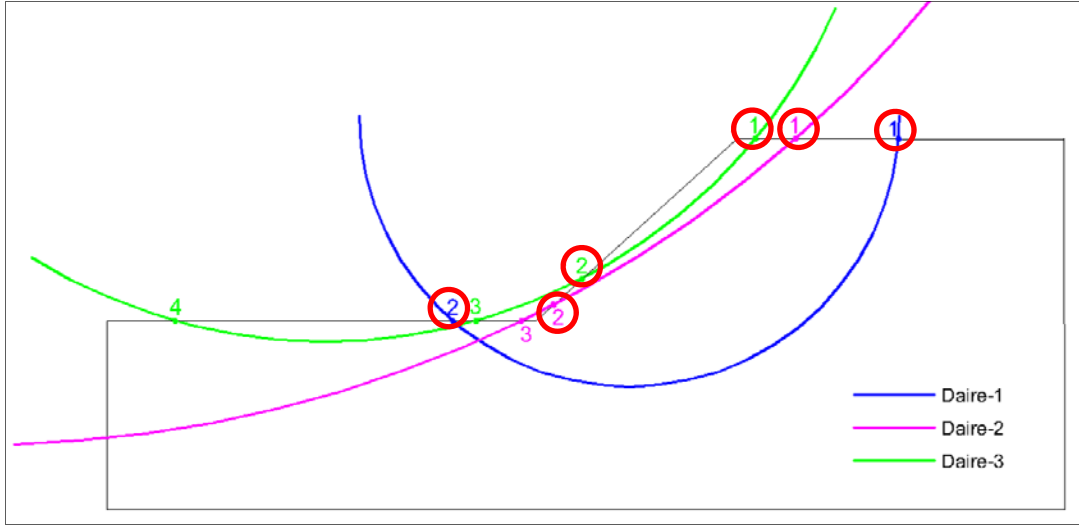


Şekil 3.1. Güvenlik sayısının tespitine ait akış şeması



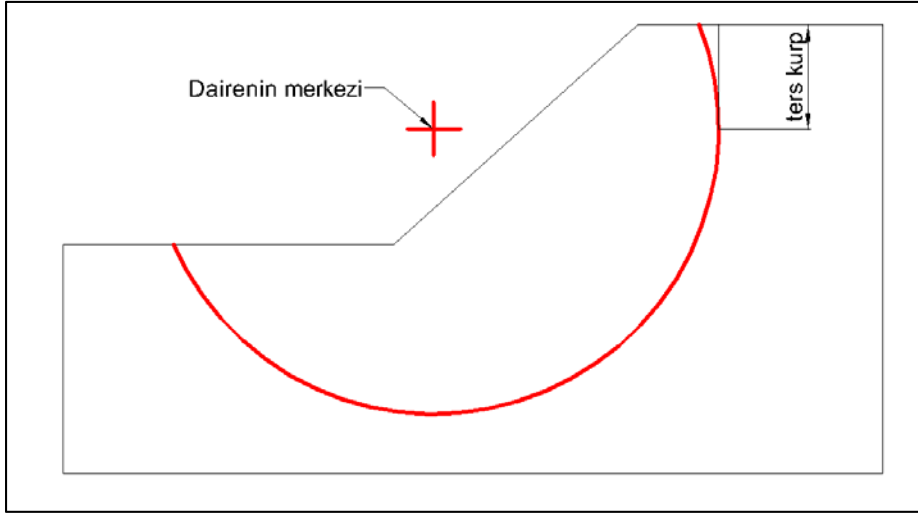
Şekil 3.3. Şev düzlemi kesit görünüşü

Programlama aşamasında geçerli sayılabilecek ve güvenlik sayısı hesaplamalarında kullanılabilecek daireler için çözüm süresini ve güvenlik sayısı hesaplanacak daire sayısını azaltmak için çeşitli kısıtlamalar oluşturulmuştur. Şekil 3.4'te gösterildiği üzere potansiyel bir kayma dairesi zemin yüzeyini 2, 3 veya 4 noktadan kesebilir. Üç daire tipinde de 1. ve 2. noktalar kayma dairesi ile yüzeyin kesişim noktası olarak kabul edilmiştir.



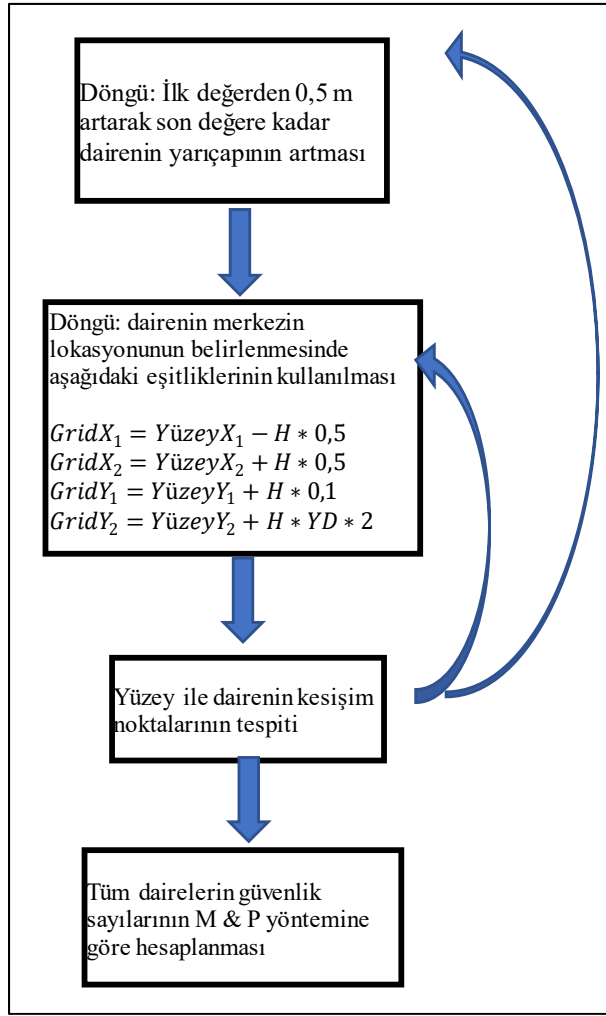
Şekil 3.4. Kesişim noktasına göre, oluşabilecek kayma dairesi alternatifleri

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi kayma dairesinin merkezinin şevin üst kotunun altında olduğu durumda çekme çatlağı oluşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, çekme çatlağı ihmal edildiği için bu ters kurp daireleri grid alanının GridY₁ noktasının sınırlandırılmasında belirleyici olmuştur. Ters kurp dairelerinin geçerli daire olarak alınmaması için, GridY₁ değerinin YüzeyY₂ değerinin hemen yukarısında olması sağlanmıştır. Drenajlı durum için Rocscience Slide programından yapılan çok sayıda analiz sonucunda grid alanı için (GridX₁, GridY₁, GridX₂ ve GridY₂ noktaları) Şekil 3.3'te verilen eşitlikler belirlenmiştir. Grid alanı her iki yönde şevin X eksenı boyunca, şev yüksekliğinin (H) yarısı kadar genişletilmiştir. Grid alanı Y ekseninde ise şevin üst noktasından şev genişliğinin iki katı kadar genişletilerek oluşturulmuştur. Rocscience Slide Programı ile yapılan analizler sonucunda kayma dairesinin lokasyonunun, R_u ve K_c değerlerinin değişiminden az oranda etkilendiği, zemin parametrelerinin ve şev eğiminin değişiminin belirleyici olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.5. Geçersiz kayma dairesi

Dairelerin yarıçapları şev yüzeyinden başlayarak 0,5 m artış ile modelin bittiği noktaya kadar devam etmektedir. Daire merkezinin değişimi için Şekil 3.3'te gösterilen daire merkezi alanı iki yönde de 20'ye bölünmektedir. Tüm kayma dairelerin tespiti için Şekil 3.6'da verilen akış şeması aşamaları takip edilmektedir.



Şekil 3.6. Kayma dairelerinin tespitinde kullanılan akış şeması

3.1.2. M ve P limit denge yönteminin programlanması

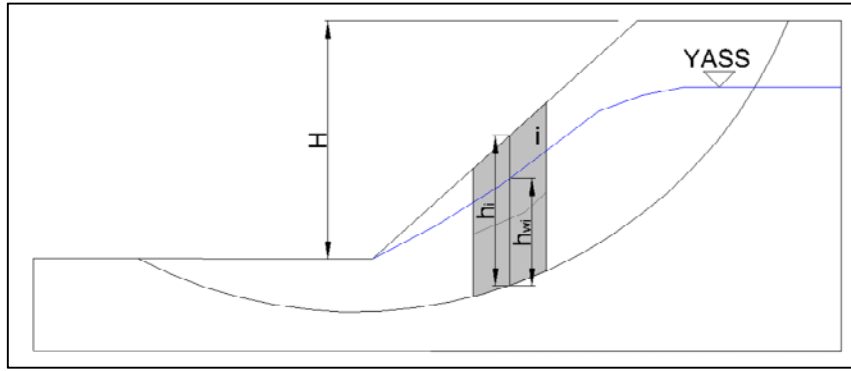
M ve P limit denge yöntemi (1965) hem kuvvet hem moment dengesi koşullarını sağlayan, dilimler arası kuvvetleri düşey ve yatayda hesaba katıp, modele göre yapılabilecek farklı kabullere esneklik sağlayabilen, diğer bir deyişle dilimler arası yatay ve düşey kuvvetler arasındaki bağlantının probleme uygun kabuller ile kurulmasına izin veren bir yöntemdir. Bu avantajlar nedeniyle bu çalışmada M ve P limit denge yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem Zhu ve diğerleri (2005) tarafından tekrar düzenlenmiş ve yazılım altlığı oluşturulması için algoritması oluşturulmuştur. Bölüm 2.1.1’de ayrıntılı olarak verilen bu yöntem ile programın kuvvet ve moment dengesi bölümü yazılmıştır. MATLAB Programında kabul edilen varsayımlar aşağıda detaylandırılmıştır.

Deprem etkisi

Deprem etkisi pseudo – statik olarak hesaba katılmış olup, deprem ivmesi katsayısının yarıya bölünmesi ile yatay deprem ivmesi değeri elde edilmektedir. Düşey deprem ivmesi etkisi ihmal edilmiştir. Sürşarj yükü şev eğimi üzerinde yayılı yük etkidiği kabul edilmiştir.

Boşluk suyu basıncı etkisi

Su etkisi boşluk suyu basıncı olarak hesaba katılmıştır. R_u eşitliği dilim yüksekliğinin h olduğu yer için Eş. 3.1 kullanılarak hesaba katılmış olup, bir dilime ait şematik kesit görünüşü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Bir dilimin ve dilime ait su seviyesinin yüksekliği

$$R_u = \frac{u}{\gamma h} = \frac{\gamma_w h_{wi}}{\gamma_i h_i} \quad (3.1)$$

R_u : boşluk suyu basıncı oranı

$f(x)$ fonksiyonu

M ve P limit denge yönteminde kullanılan $f(x)$ fonksiyonu dilimler arası kuvvetlerin değişimini daha hassas bir şekilde ifade eden yarım sinüs fonksiyonu ile tanımlanmış olup, Şekil 2.6’da verilen fonksiyonda orta değerler seçilerek, $\mu = 1$ ve $\nu = 1$ olarak alınmıştır.

İterasyon sayısı ve tolerans değerleri

İterasyon sırasında hesaplanan son iki FS değerleri ve λ değeri sırasıyla arasındaki fark olan ε_1 değeri 0,0001, ε_2 değeri 0,0001 tolerans değerine kadar küçüldüğünde iterasyon tamalanır. Maksimum iterasyon sayısı 50 olarak belirlenmiş olup, genelde iterasyon 10'dan daha az basamakta tamamlanmaktadır (Zhu ve diğerleri, 2005). İterasyon maksimum sayıya ulaştığında dahi FS ve λ değerleri tolerans değerini sağlamıyorsa bu dairenin güvenlik sayısının sonuca yakınsamadığı çıkarımı yapılmakta olup, bu değerler elimine edilmektedir.

Kullanılan dilim sayısı

Tüm analizlerde kayma dairesi ve şev yüzeyi arasındaki zemin 20 eşit düşey birimlere bölünmüştür.

Geçersiz güvenlik sayıları

- Eğer güvenlik sayısı 0.1'den daha küçük hesaplanıyorsa bu değer de Rocscience Slide yazılımında olduğu gibi geçersiz sayılmaktadır.
- Zhu ve diğerleri (2005) güvenlik sayısının iterasyonun başında aşağıdaki eşitliği sağlaması gerektiğini belirtmiştir.

$$FS > \frac{\sin\alpha_i - \lambda f_i \cos\alpha_i}{\cos\alpha_i + \lambda \sin\alpha_i} \tan\phi' \quad (3.2)$$

Yukarıda belirtilen varsayım ve kabullere dayalı olarak, döngüdeki ilk zemin parametresi ve şev geometrisindeki modele ait tüm geçerli kayma daireleri için elde edilen minimum güvenlik sayısı ve bu değeri sağlayan en kritik kayma dairesi belirlenir. Aynı işlem diğer tüm zemin parametreleri ve şev geometrisi değerleri için yapılır.

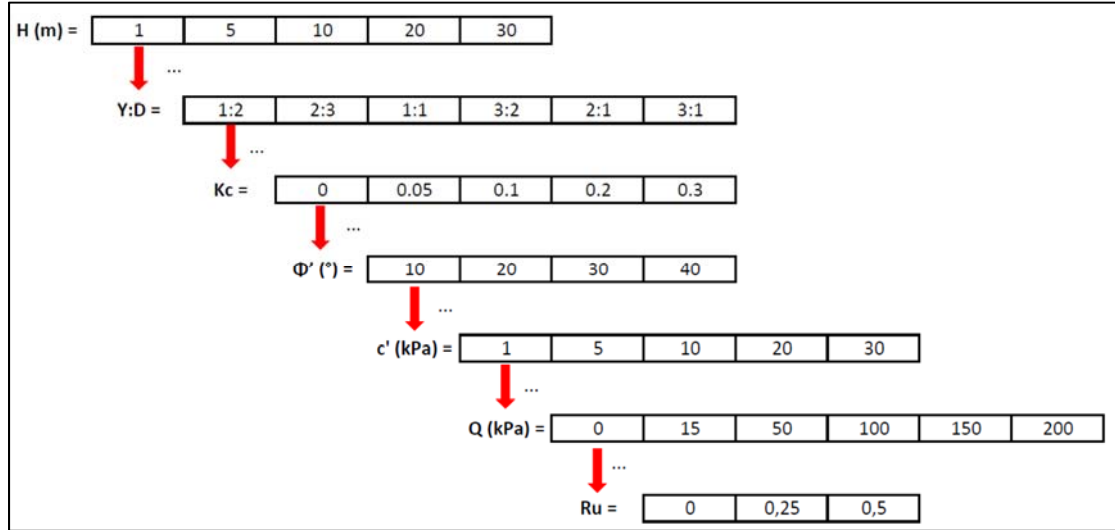
3.2. Stabilité Grafiklerinin Oluşturulması

MveP limit denge yöntemi kullanılarak MATLAB ile oluşturulan program sayesinde farklı durumları temsil eden çok sayıda veri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, stabilité grafikleri sürşarj, boşluk suyu basıncı, deprem etkileri düşünülerek oluşturulmuştur. Farklı

araştırmacılar tarafından yürütülen bazı çalışmalar Bölüm 2.2’de özetlenmiş olup, bu çalışmalarda çok azında MveP Yöntemi (Morgenstern ve Price, 1965) kullanılmıştır. Daha önce yapılmış olan çalışmalarda deprem sırasındaki sürşarj, boşluk suyu basıncı gibi etkiler bir arada incelenmemiştir. Bu çalışma kapsamında hem statik hem deprem durumundaki sürşarj ve boşluk suyu basıncı etkileri düşünülerek stabilite grafikleri oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında değişken olarak alınan değerler Çizelge 3.1’de ve Şekil 3.8’de özetlenmiştir. Birim hacim ağırlık 20 kN/m^3 olarak alınmıştır. Yapılan tüm analizler ve elde edilen veri sayıları Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Analiz edilen değişken değerler

H (m)	Y:D	K _c	Φ' (°)	c' (kPa)	Q (kPa)	R _u
1	1:2	0	10	1	0	0
5	2:3	0.05	20	5	15	0,25
10	1:1	0.1	30	10	50	0,5
20	3:2	0.2	40	20	100	
30	2:1	0.3		30	150	
	3:1				200	



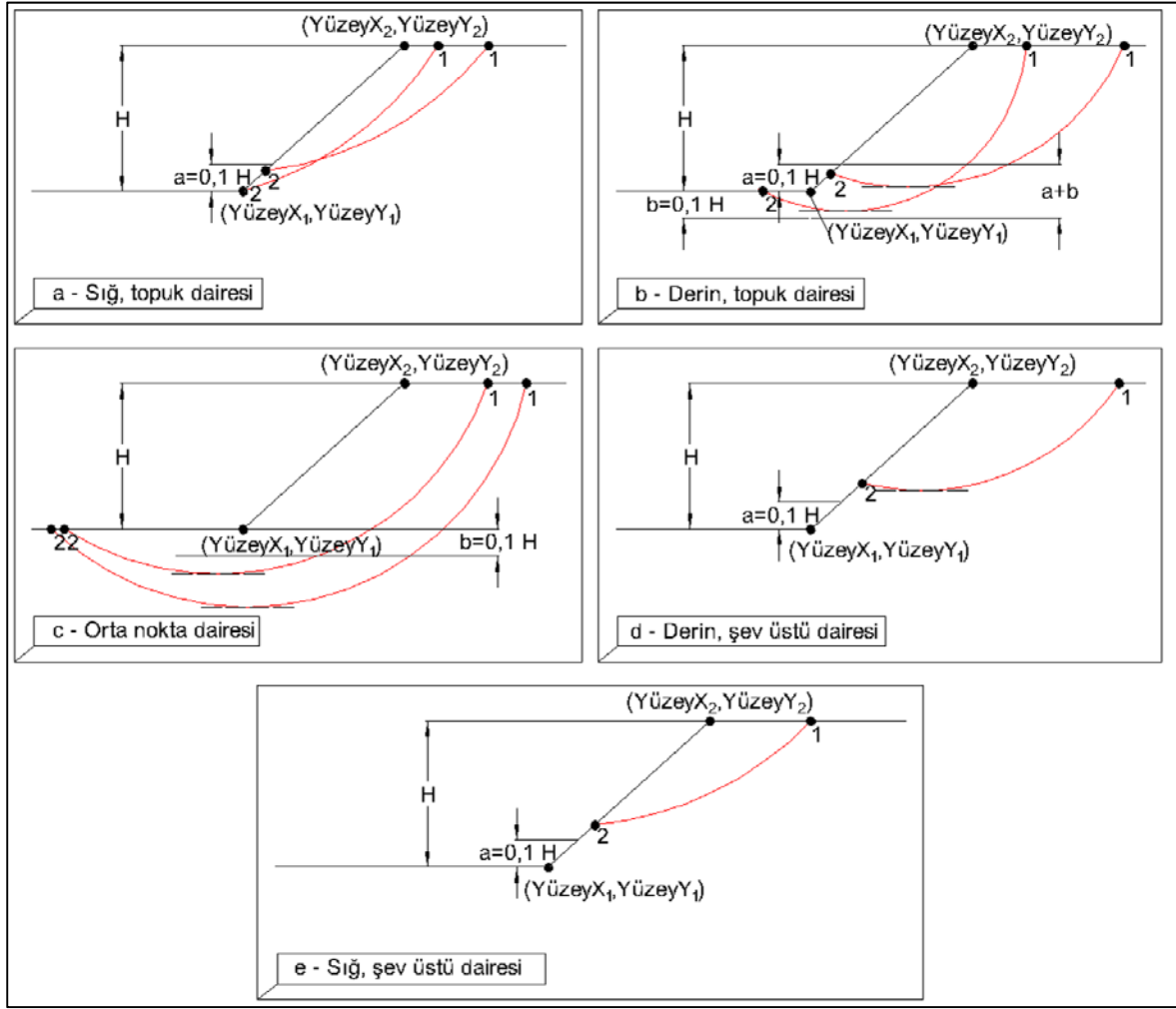
Şekil 3.8. Kombinasyonlarda kullanılan değişkenlerin şematik görünümü

Çizelge 3.2. Değişkenlere göre yapılan analiz sayıları

Statik/Deprem	Sürşarj	R_u	Analiz Sayısı
Statik	-	-	800
Statik	Var	-	7 500
Statik	-	Var	9 000
Statik	Var	Var	9 000
Deprem	-	-	4 000
Deprem	Var	-	7 500
Deprem	-	Var	9 000
Deprem	Var	Var	9 000
Toplam			55 800

Kayma düzlemi mekanizması

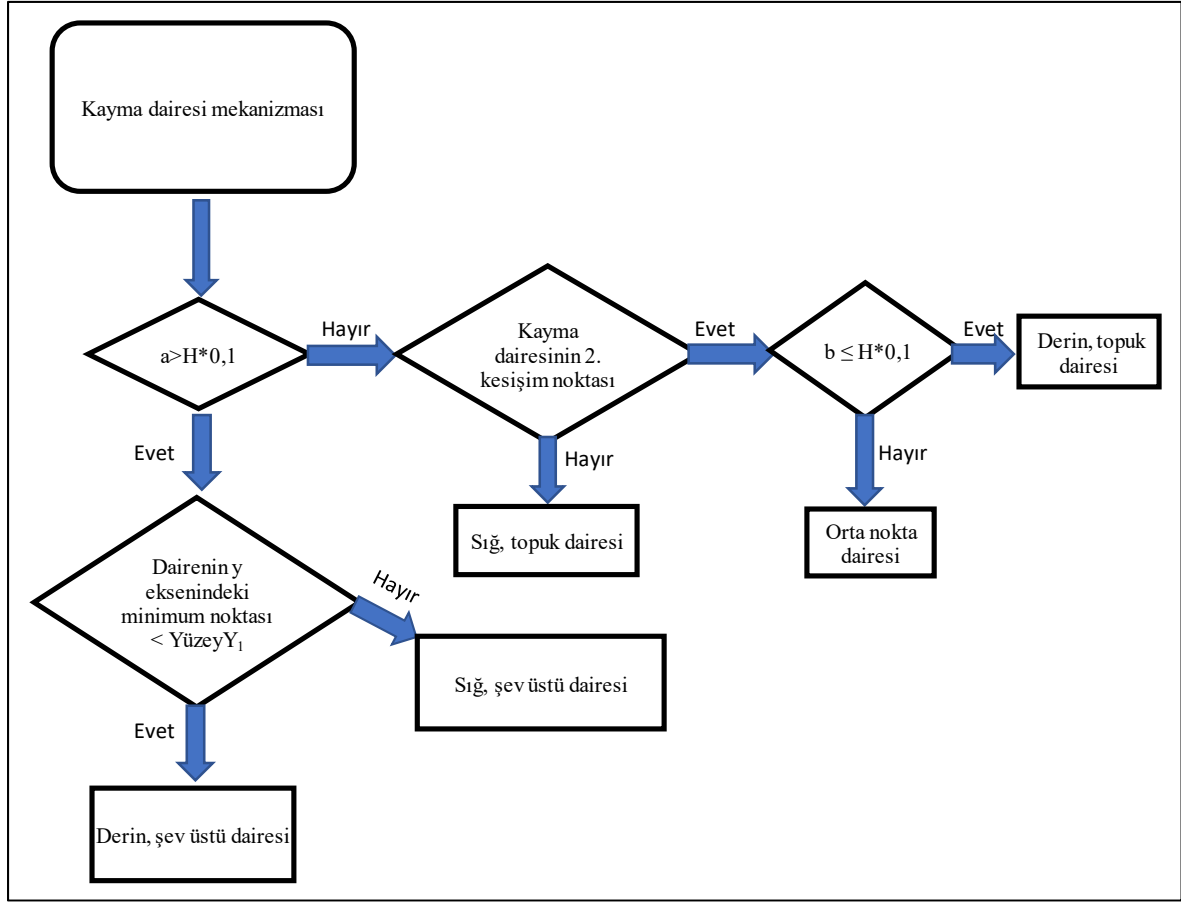
Şev geometrisi, zemin kayma dayanım parametreleri, deprem, boşluk suyu, sürşarj etkileri şevlerdeki kritik kayma dairesi mekanizmalarını etkilemektedir. yaptığı çalışmada 5 farklı kayma dairesi mekanizması tanımlamıştır. Bu tez çalışması kapsamında Steward ve Diğerleri (2011) tarafından tanımlanan kayma dairesi mekanizmaları göz önünde bulundurularak, 5 farklı kayma mekanizması tanımlanmıştır (Şekil 3.9). Kayma mekanizmalarının tespitinde kullanılan kriterler aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.9. Farklı kayma dairesi mekanizmaları

Kayma dairesinin belirlenmesinde Şekil 3.9'da gösterilen a ve b değerleri $0,1 \times H$ olarak ifade edilmiştir. Bu değerın sınır olarak belirlenmesinin sebebi topuk ve yakın çevresinden çıkan kayma dairesi ile şev üstünden çıkan kayma dairesinin ayrımının yapılabilmesidir.

Kayma dairesi mekanizmasının MATLAB programında yazılımının oluşturulabilmesi için oluşturulmuş olan akış şeması Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Kayma dairesi mekanizması algoritması

Elde edilen tüm veriler Microsoft Excel Programına taşınmış, düzenlenerek en uygun grafik modeli elde edilmeye çalışılmıştır. Daha önceki araştırmacıların çalışmalarındaki grafiklerin eksen bilgileri Çizelge 3.3'te özetlenmiştir. Sürşarj yükünün hesaba katılmadığı durum grafikleri için Micholawski (2002) çalışmasında kullanmış olduğu X ve Y değerleri aynı şekilde alınmıştır. Bu çalışmadaki grafiklerin eğri çizgileri β açısı ile oluşturulmuş iken, kullanıcıya kolaylık sağlanması adına bu tez çalışması kapsamında şev oranlarına (Y:D) göre oluşturulmuştur. Sürşarj yükünün hesaba katılabilmesi için Janbu (1968) ve Duncan ve diğerlerinin (1987) çalışmalarından yararlanılmıştır. Janbu (1968) drenajlı koşullar için sürşarj, boşluk suyu basıncı ve çekme çatlağı etkilerini düzeltme faktörleri ile hesaba katmış olup, bu faktörler ayrı grafikler ile belirlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında da sürşarj yükü etkisi ayrı grafikler ile irdelenmiş olup, x eksen değeri $q/\gamma H$ olarak kullanılmıştır. Duncan ve diğerlerinin (1987) yapmış olduğu çalışmada A ve B olarak isimlendirilen parametreler ile sırasıyla $\tan\phi'/\tan\beta$ ve $c'/\gamma H$ oranları faktörleştirilmiştir. Duncan ve diğerlerinin (1987) yapmış olduğu çalışmadaki değerler ile grafikler oluşturulduğunda grafik noktaları için belirli bir düzen elde edilememiştir. Farklı grafik değerleri için A_1 ve A_2 olarak

isimlendirilen ikincil ve üçüncül grafikler denenmiş olup, sırasıyla zemin dayanım parametreleri ($\tan\phi'/c'$) ve sürşarj yükünün zemin yüküne oranı ($q/\gamma H$) etkilerinin toplamı ile farklı şev eğimi çizgileri için belirli bir düzen yakalanabilmiştir. Bu değerler ile oluşturulan üç ayrı grafik modeli ile şev modelinin güvenlik sayılarının elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu eksen değerlerine göre oluşturulmuş grafikler Bölüm 4'te verilmiş olup, ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 3.3. Daha önceki araştırmalarda oluşturulmuş grafiklerin stabilite bilgileri

Stabilite Grafikleri	Zemin Parametresi	x eksen	y eksen	Eğri çizgileri
Taylor (1937)	Drenajız/kohezyonlu	β	$N_s = \frac{\gamma HFS}{c_u}$	n_d
Janbu (1968)	Drenajız/kohezyonlu	β	$FS = \frac{N_0 c' (\mu_q \mu_w \mu_t)}{\gamma H + q - \gamma_w H_w}$	d
Janbu (1968)	Drenajlı	$\cot \beta$	$FS = \frac{N_0 c' (\mu_q \mu_w \mu_t)}{\gamma H + q - \gamma_w H_w}$	$\lambda_{c\phi}$
Duncan, Buchianani ve DeWet (1987)	Drenajlı/kohezyonsuz (sadece sonsuz şevler için)	$\cot \beta$	Parametre A	r_u
		$\cot \beta$	Parametre B	-
Michalowski (2002)	Drenajlı	$\frac{c}{\gamma H \tan \phi'}$	$\frac{FS}{\tan \phi'}$	β
Steward ve Diğerleri (2011)	Drenajız /kohezyonlu	β	$N_s = \frac{\gamma HFS}{c_u}$	n_d
	Drenajlı	$\frac{c'}{\gamma HFS}$	$\frac{\tan \phi'}{FS}$	$\beta, \frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}$
Eid (2013)	Drenajlı	β	$\frac{FS}{(\tan \phi'_{25})}$	$\lambda = \frac{1-n}{n} \left(\frac{\gamma H}{P_a} \right)$
Sun ve Zhao (2013)	Drenajlı	$\frac{c'}{\gamma H}$	$\tan \phi'$	r_u, β (GS=1 için)
Kaya ve Yılmaz (2019)	Drenajlı (Sürşarj yok)	$\frac{c}{\gamma H \tan \phi'}$	$\frac{FS}{\tan \phi'}$	Y:D
	Drenajlı (+Sürşarj)	$\frac{q}{\gamma H}$	A_1	Y:D
		+		
		$\frac{\tan \phi'}{c}$	A_2	Y:D

4. ANALİZ ÇÖZÜMLERİ

Bu bölümde çalışma kapsamında oluşturulan grafik çözümleri açıklanmış, daha önce yapılan çalışmalardaki grafik çözümleri ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Drenajlı Durum Stabilité Grafik Çözümleri

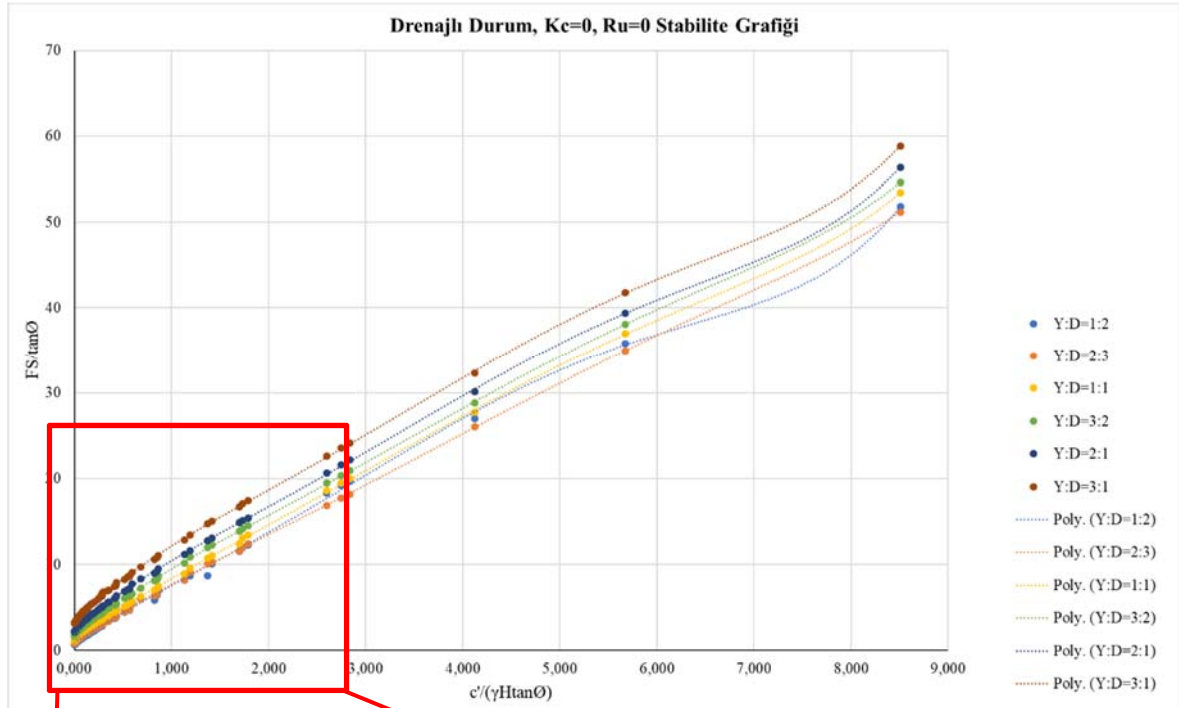
Drenajlı durum statik ve deprem durumu analizleri $R_u=0; 0,25; 0,5$ durumları için ayrı ayrı yapılmıştır. Çizelge 3.3'te verilen daha önceki çalışmalara ait grafik bilgilerinden yararlanılarak, en uygun grafik modeli oluşturulmuş aşağıda açıklanmıştır. Bu çalışmalarda boşluk suyu basıncı (R_u), deprem katsayısı (K_c), şev açısı (β) gibi değişken sayılarının artması nedeniyle ayrı grafikler ile irdelenmiştir.

Bu çalışmada da boşluk suyu basıncı (R_u), deprem katsayısı (K_c) değerleri ayrı grafiklerde gösterilmiş olup, şev eğimleri aynı grafik üzerinde farklı çizgiler ile gösterilmiştir. Bu grafiklerde x ve y eksenini için belirlenen eşitlikler aşağıda verilmiştir.

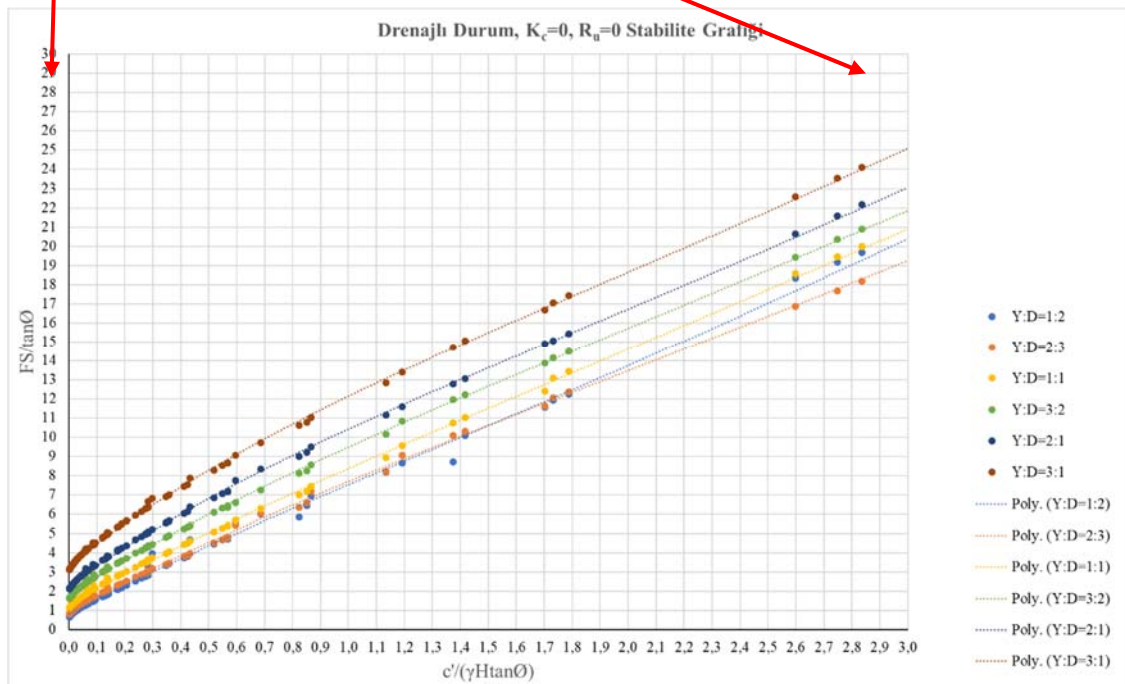
$$\text{X eksenini: } \textit{Stabilite sayısı}, N_s = \frac{c}{\gamma H \tan \phi'} \quad (4.1)$$

$$\text{Y eksenini: } \frac{FS}{\tan \phi'} \quad (4.2)$$

Stabilite grafikleri ile modelin güvenlik sayısının tespiti için ilk olarak Şekil 4.1'de örnek olarak verilen sürşarj etkisinin hesaba katılmadığı ($Q=0$) grafikten güvenlik sayısına ulaşılır. Sürşarj etkisi yok ise buradan elde edilen güvenlik sayısı (FS) modelin güvenlik sayısını olur. Sürşarj etkisi var ise bu grafikten elde edilen güvenlik sayısı $FS_{Q=0}$ olarak isimlendirilir. Bu sayı ($FS_{Q=0}$) ilerleyen kısımda anlatılan A_1 ve A_2 parametrelerinin elde edilmesinde kullanılır. Bu parametrelerin belirtilen eşitliklerinden modelin güvenlik sayısına ulaşılır. Sürşarj etkisinin olmadığı durumu temsilen farklı R_u ve farklı K_c değerleri için oluşturulmuş olan grafikler Ek-2'de sunulmuştur.



(a)

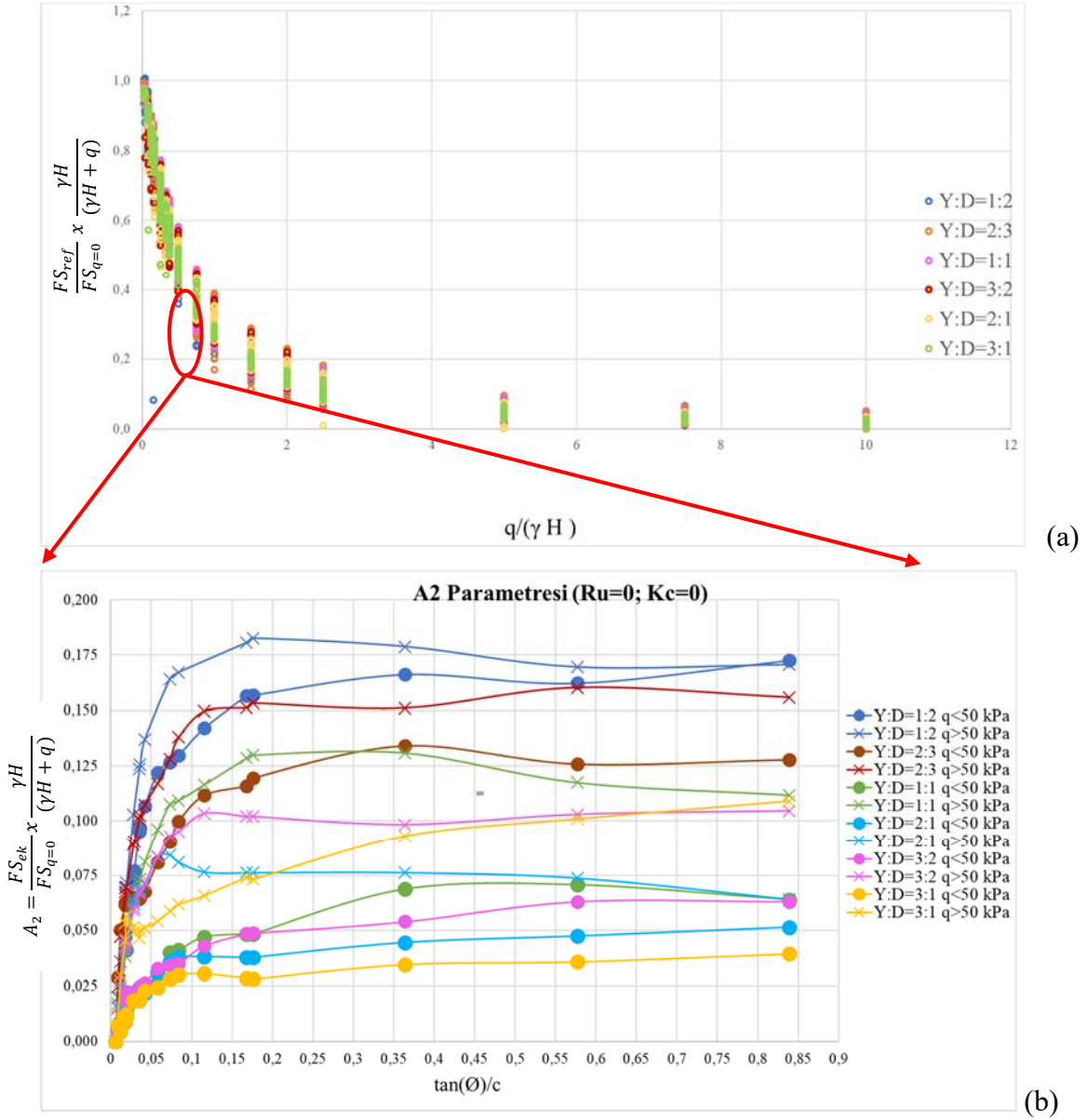


(b)

Şekil 4.1. $q=0$ (q : sürşarj) durumu veya $q>0$ için $FS_{Q=0}$ tespitinde kullanılan örnek stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

Sürşarj Etkisi

Sürşarj etkisi Janbu (1968) tarafından stabilite grafiklerinde irdelenmiştir. Bu grafikler Ek-1 Şekil 1.3'te verilmiş olup, ikinci bir grafik ile sürşarj faktörü bulunmakta ve bu faktör stabilite sayısına bölünmektedir. Benzer şekilde x eksenindeki $q/(\gamma H)$ eşitliği bu çalışma kapsamında x eksenine konulduğunda, aynı $q/(\gamma H)$ değerinde birçok karşılık değer bulunmaktadır (Şekil 4.2-a). Bunun nedeninin sürşarj etkisinin zemin parametrelerinin değerlerine göre de değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.2-b). Şekil 4.2-a'da kırmızı ile belirtilmiş aynı $q/(\gamma H)$ değerlerinin $\tan\Phi/c$ ile değişimi incelendiğinde Şekil 4.2-b'deki gibi bir grafik elde edilmektedir. Şekil 4.2-b'den görüldüğü üzere sürşarj etkisi zemin parametrelerinin değişimiyle polinomik olarak artış göstermektedir. Diğer bir deyişle sürşarj değişimi hem doğrudan olarak güvenlik sayısını değiştirmekte hem de zemin parametrelerine göre etki oranı değişmektedir.



Şekil 4.2. Örnek sürşarj etkisi grafikleri (a) $q/(\gamma H)$ 'nin güvenlik sayısına etkisi (b) $\tan\phi'/c$ 'nin güvenlik sayısına etkisi

Bu çalışma kapsamında ilk olarak sürşarjın olmadığı güvenlik sayılarının ($FS_{q=0}$) sürşarj etkisinin olduğu güvenlik sayısına (FS_{ref}) oranının kayma düzlemine etkiyen yük oranıyla çarpılmasıyla Eş. 4.3 ile elde edilmiştir. Bu oran (A_1) Şekil 4.2-a'da verilen grafikteki her bir $q/(\gamma H)$ değerinin y eksenindeki minimum karşılığı, referans değer olarak alınmıştır (FS_{ref}). Şekil 4.2-b'deki $\tan\phi'/c$ eşitliğinin güvenlik sayısına etkisi ayrıca incelenmiş olup, bu ek güvenlik sayısı FS_{ek} olarak tanımlanmış ve FS_{ref} değerine eklenmiştir (Eş. 4.4 ve Eş. 4.5). Duncan ve diğerleri (1987) sürşarj etkisini katmamasına rağmen benzer bir çalışma ile A ve B olarak tanımladığı sırasıyla zemin parametresi ve dilime gelen yük etkisine bağlı parametrelerin toplanmasıyla güvenlik sayısına ulaşmaktadır. Bu çalışma kapsamında buna

ek olarak sürşarj etkileri, boşluk suyu basıncı ve deprem etkileri aynı zamanda incelenebilmiştir.

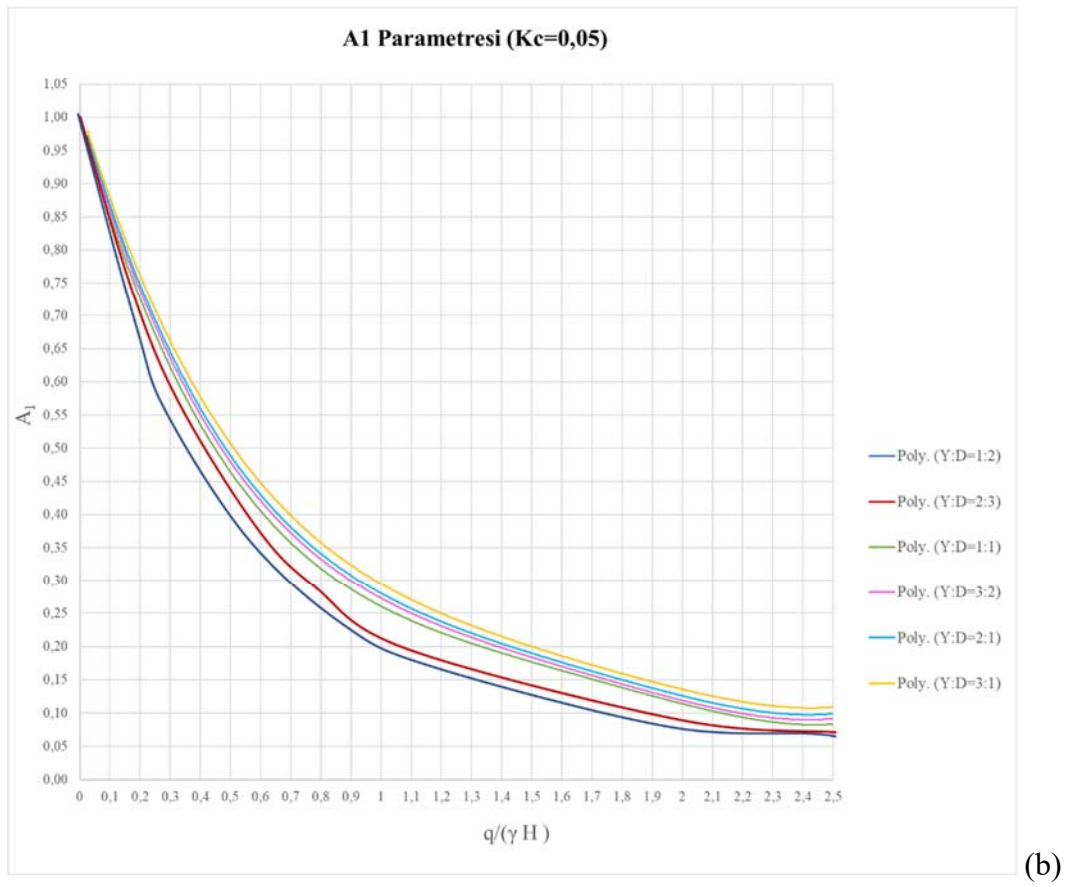
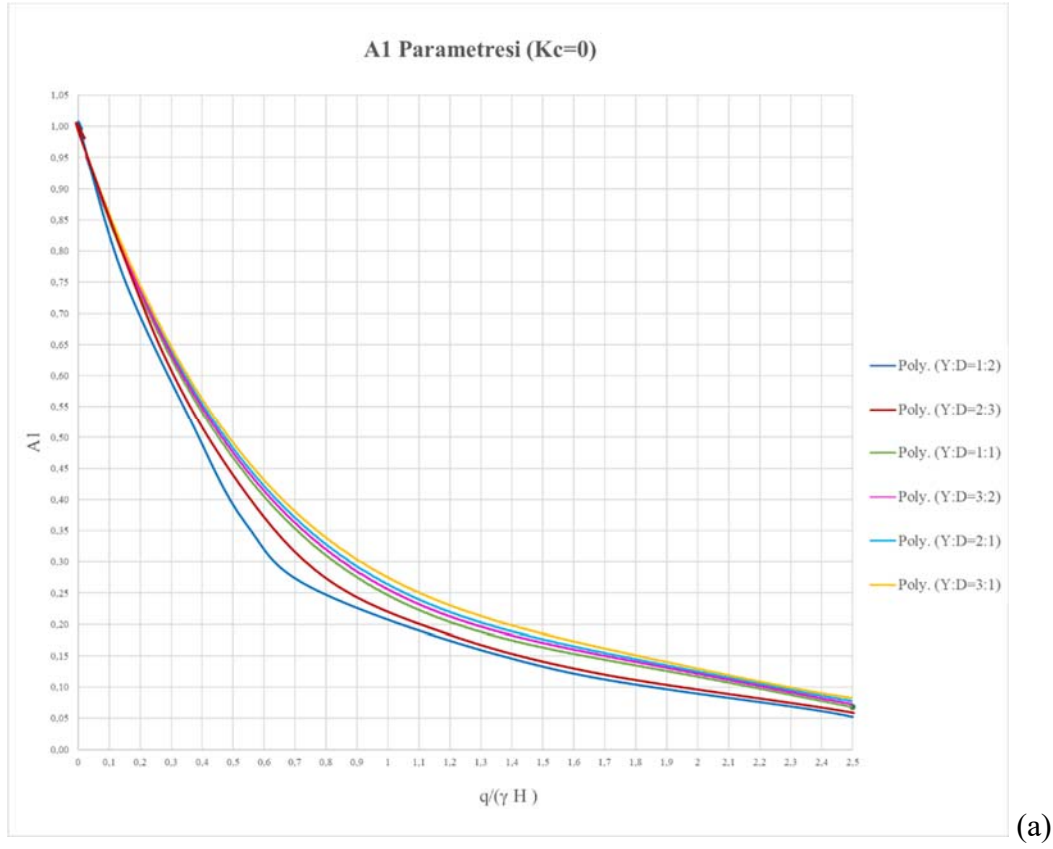
Ayrıca sürşarj etkisi yaklaşık 50 kPa değerine kadar benzer şekilde eğilim gösterirken, 50 kPa sonrasında farklı eğilim göstermiştir. Bu nedenle A_2 'nin elde edildiği grafiklerde bu değerin yukarısında ve aşağısı için 2 farklı eğri tanımlanmıştır (Şekil 4.2-b).

$$A_1 = \frac{FS_{ref}}{FS_{q=0}} \times \frac{\gamma H}{(\gamma H + q)} \quad (4.3)$$

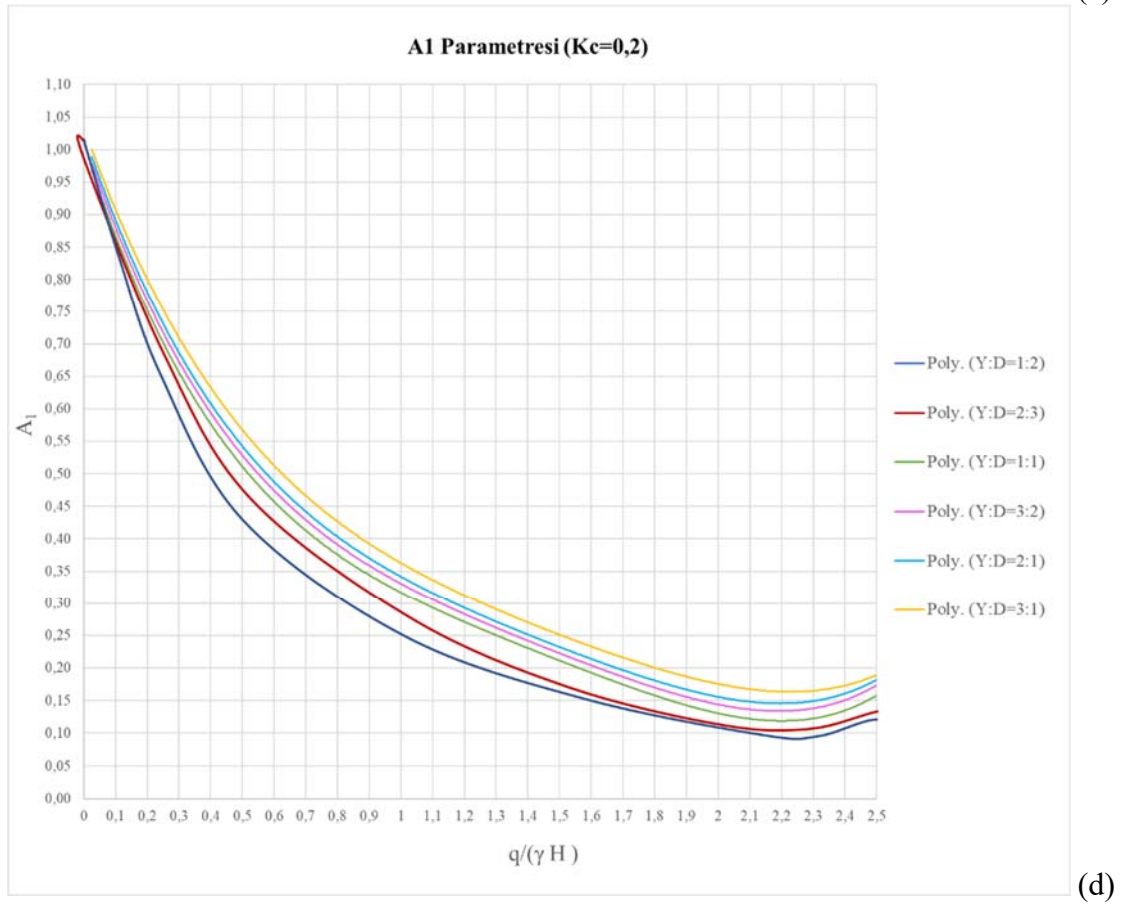
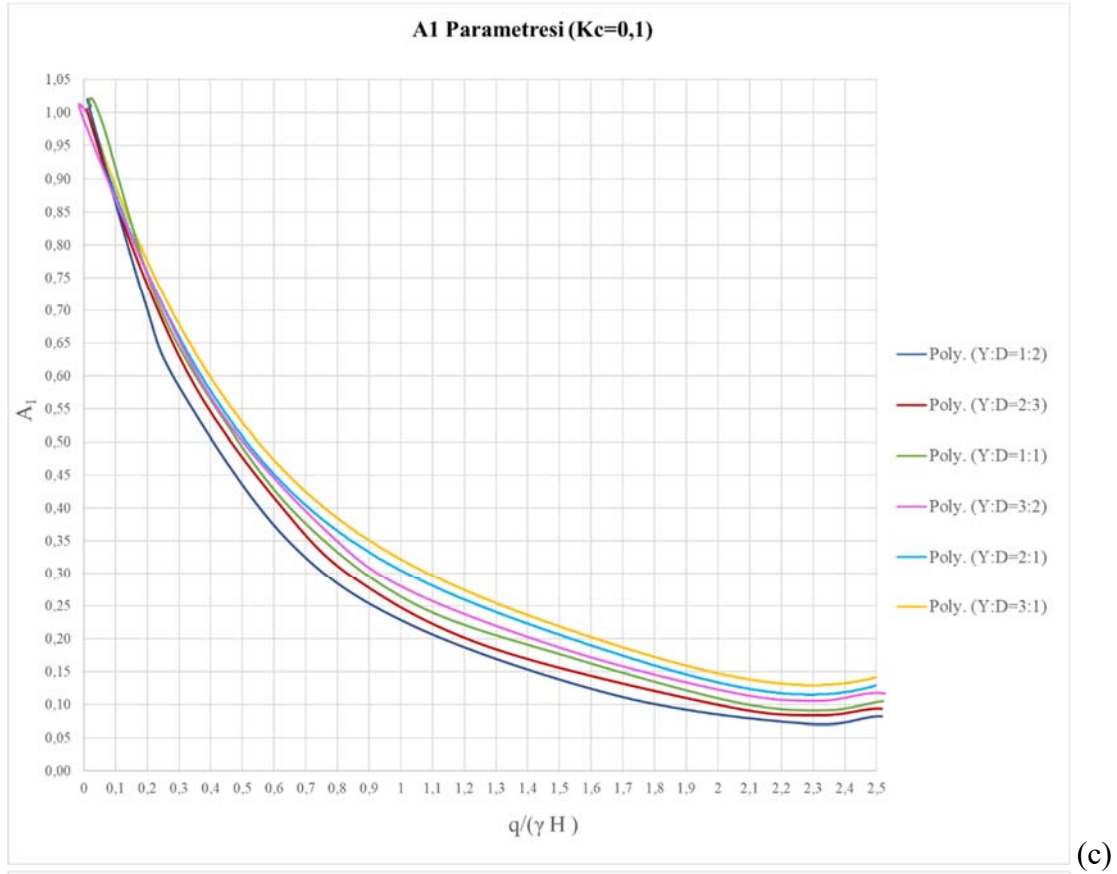
$$A_2 = \frac{FS_{ek}}{FS_{q=0}} \times \frac{\gamma H}{(\gamma H + q)} \quad (4.4)$$

$$\frac{FS}{FS_{q=0}} \times \frac{\gamma H}{(\gamma H + q)} = A_1 + A_2 \quad (4.5)$$

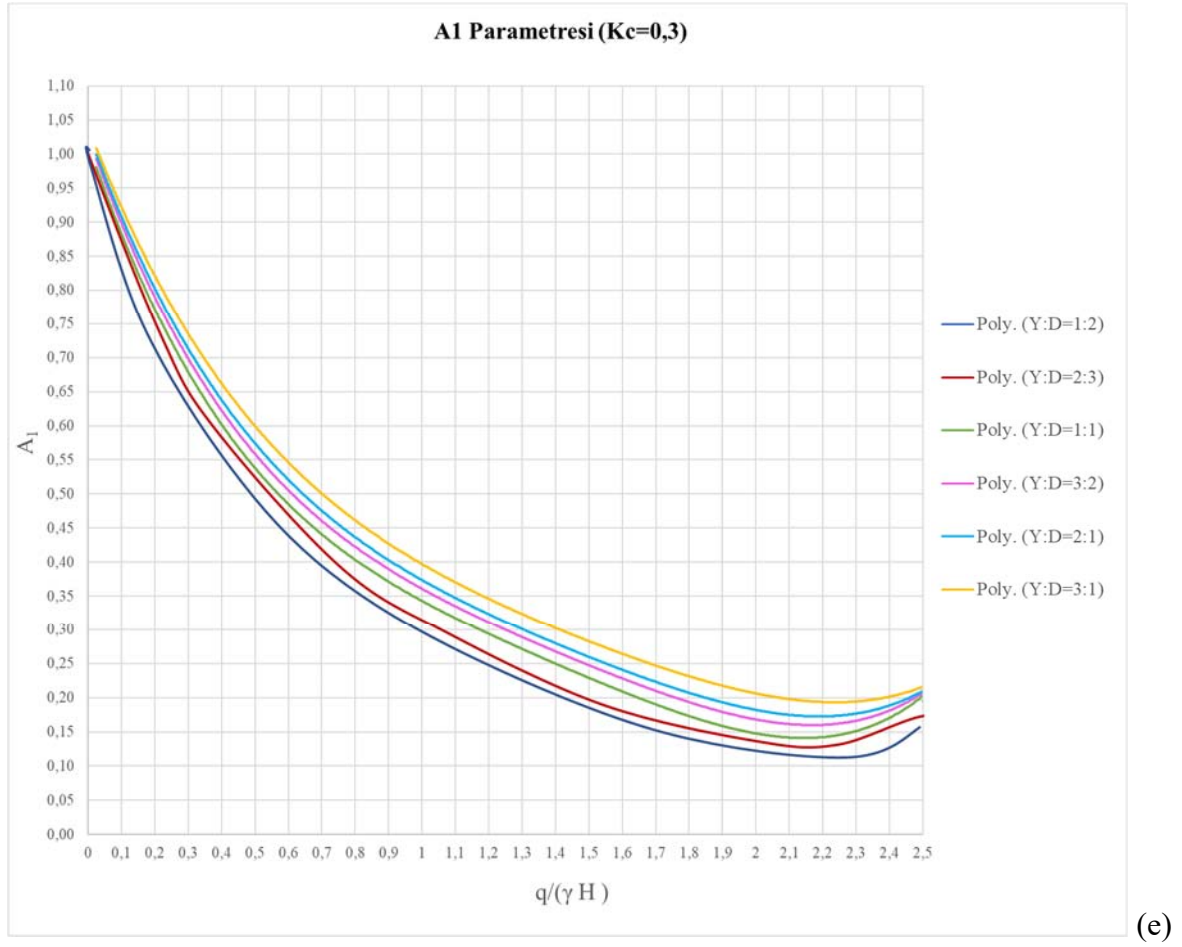
Farklı deprem katsayısı (K_c) ve boşluk suyu basıncı katsayısı (R_u) değerleri için A_1 ve A_2 grafikleri detaylı olarak Ek-3'te sunulmuştur. Bu grafiklerde A_1 grafiğindeki şev oranlarına göre oluşan çizgiler deprem ivmesinin artmasıyla çizgi eğiminin değiştiği gözlemlenmiştir. A_1 parametresinin belirlenmesi için hazırlanan grafikler farklı yatay deprem katsayısı (K_c) değerlerine göre Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. A1 Parametresinin belirlenmesi için stabilite grafik çözümleri (a) $K_c=0$ (b) $K_c=0,05$ (c) $K_c=0,1$ (d) $K_c=0,2$ (e) $K_c=0,3$

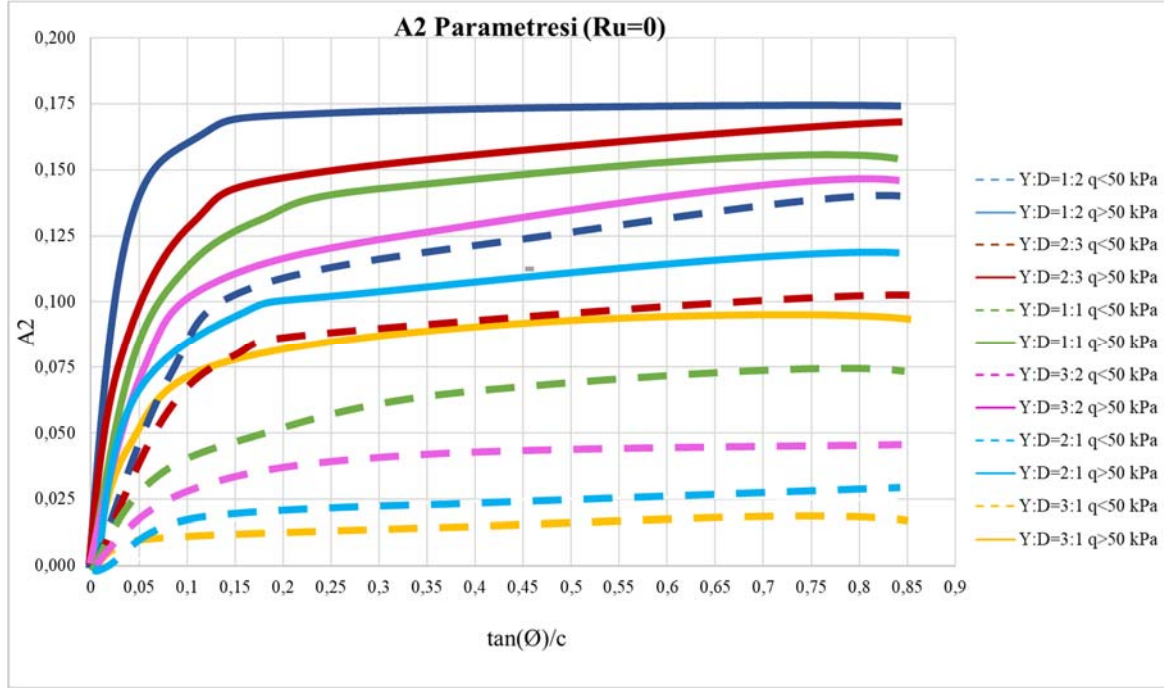


Şekil 4.3. (devam) A1 Parametresinin belirlenmesi için stabilite grafik çözümleri (a) $K_c=0$ (b) $K_c=0,05$ (c) $K_c=0,1$ (d) $K_c=0,2$ (e) $K_c=0,3$

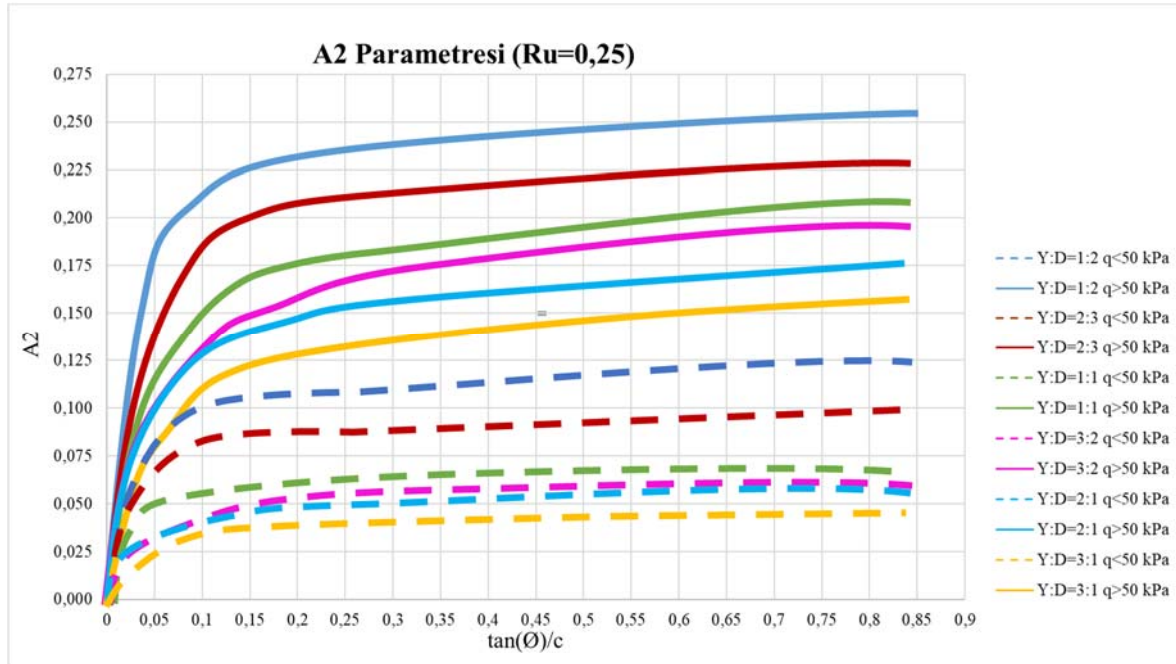


Şekil 4.3. (devam) A1 Parametresinin belirlenmesi için stabilite grafik çözümleri (a) $K_c=0$ (b) $K_c=0,05$ (c) $K_c=0,1$ (d) $K_c=0,2$ (e) $K_c=0,3$

A_2 parametresinin deprem katsayısından çok fazla etkilenmediği, fakat R_u değerinin değişiminden etkilendiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te verilen A_2 parametre grafiklerinde farklı R_u değerlerindeki maksimum A_2 değerleri incelendiğinde bu değerlerin R_u değerinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Bu nedenle farklı R_u değerleri için A_2 parametresi grafikleri düzenlenerek oluşturulmuş olup, Şekil 4.4'te verilmiştir. A_2 parametreleri grafiklerinin oluşturulmasında kullanılan ham grafikler EK-3'te detaylı olarak sunulmuştur.

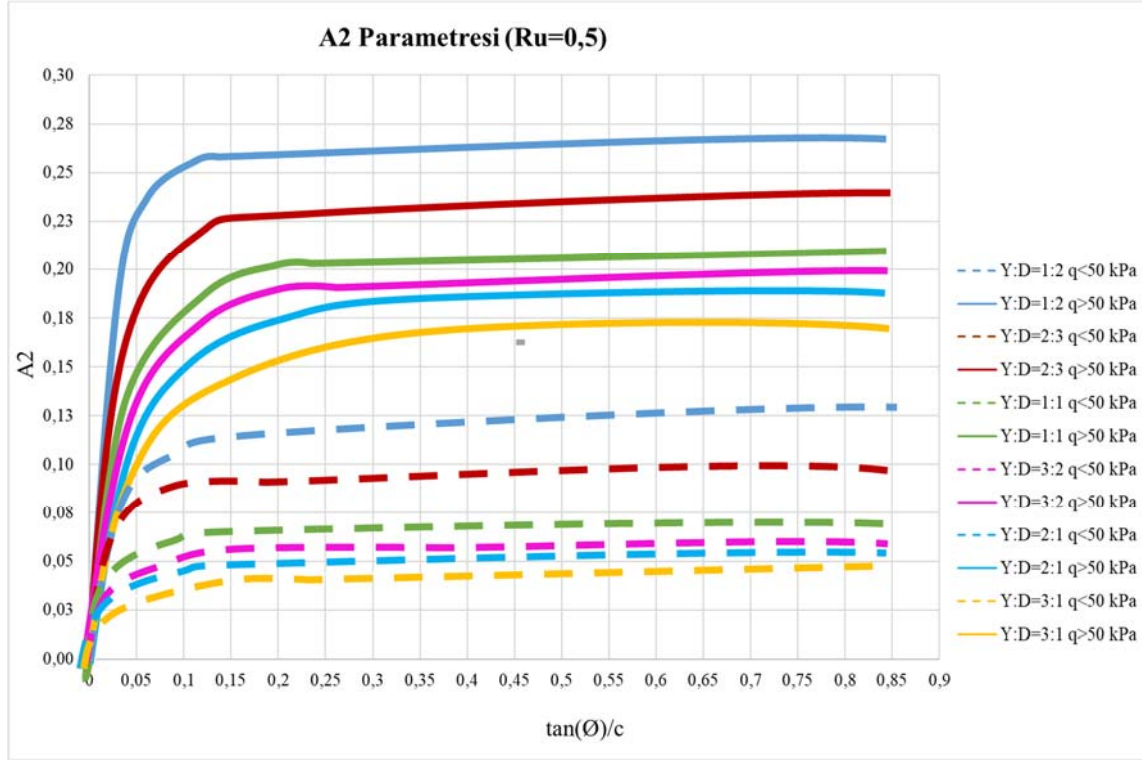


(a)



(b)

Şekil 4.4. A_2 Parametresinin belirlenmesi için stabilite grafik çözümleri (a) $R_u=0$ (b) $R_u=0,25$ (c) $R_u=0,5$



(c)

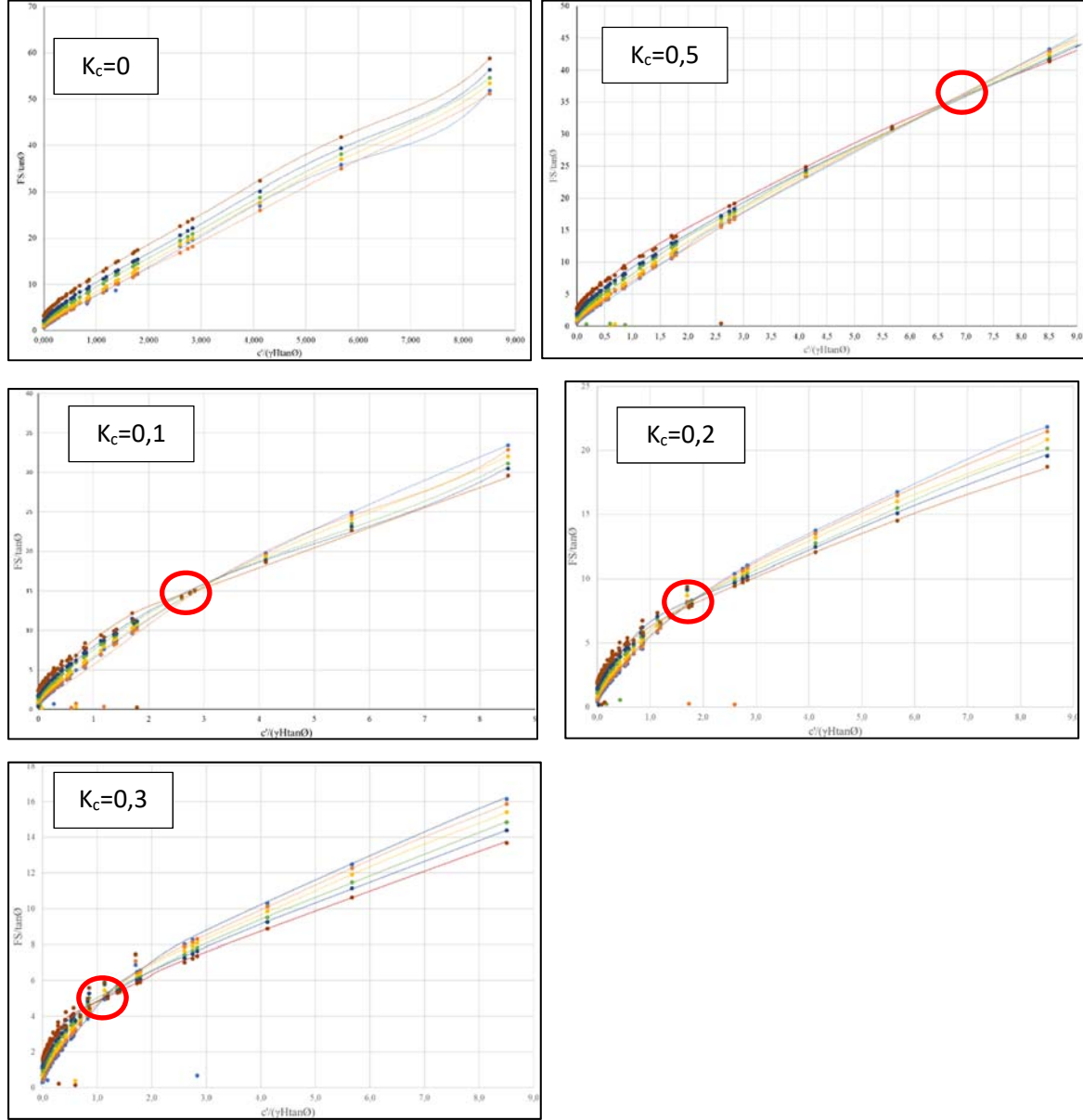
Şekil 4.4. (devam) A2 Parametresinin belirlenmesi için stabilite grafik çözümleri (a) $R_u=0$ (b) $R_u=0,25$ (c) $R_u=0,5$

Özetle, bu tez çalışması kapsamında oluşturulan, Ek-2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 'te verilen stabilite grafiklerinden güvenlik sayısının tespiti için aşağıdaki gibi bir yol izlenmelidir.

1. Model bilgileri kullanılarak Eş. 4.1. ve Eş. 4.2. ile X ve Y eksenı değerleri belirlenir.
2. Ek-2'de verilen grafiklerden R_u ve K_c değerlerine göre güvenlik sayısı (FS) tespit edilir. Eğer sürşarj yoksa bu değer modelin stabiliteye karşı güvenlik sayısıdır.
3. Eğer sürşarj var ise bir üst maddeden elde edilen güvenlik sayısı FS_0 olarak isimlendirilir. Sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilen grafiklerden R_u ve K_c değerlerine göre A_1 ve A_2 parametreleri belirlenir.
4. Eş. 4.5. kullanılarak modelin güvenlik sayısı elde edilir.

Sürşarj etkisinin olmadığı durumda statik ve deprem etkisi stabilite grafikleri ile irdelenmiş olup, eğrilerin deprem etkisi arttıkça sola kayan bir kırılma noktası oluşturduğu, bu değerden önce eğriler polinomik bir yol izlerken bu değerden sonra lineer artış gösterdiği saptanmıştır (Şekil 4.5). Lineer artışın olduğu kesim parametreleri incelendiğinde özellikle şev

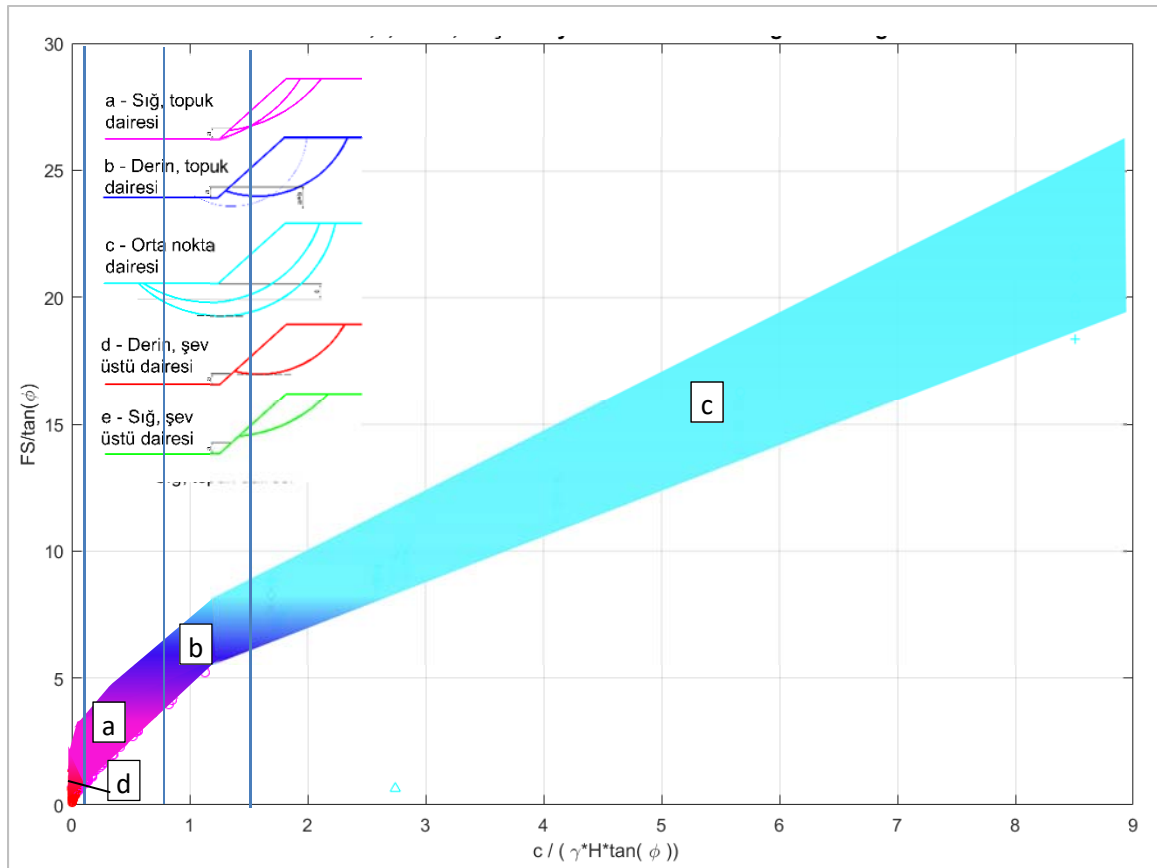
yüksekliğinin düşük olduğu (yaklaşık 10 m ‘den daha düşük) durumda gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. $q=0$ durumu için kırılma noktası

Farklı K_c ve R_u durumları için oluşturulan kayma dairesi mekanizması dağılım grafikleri ayrı ayrı Ek-2’de verilmiştir. Bunun için 5 farklı kayma dairesi mekanizma tipi belirlenmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere N_s sayısının Şekil 4.6’te verilen tanımlamalardan 0 – 0,2 aralığında olduğu durumda daireler ‘derin, şev üstü dairesi’ şeklinde oluşurken, 0,2 – 0,8 arasında ‘sığ, topuk dairesi’, 0,8 – 1,5 arasında olduğu durumda ‘derin, topuk dairesi’ şeklinde oluştuğu ve 1,5’ten büyük değerlere sahip olduğu durumda ‘orta

nokta dairesi' şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. 'Sığ şev üstü dairesi' çok az lokasyonda gözlenmiş olup, genelde şev eğiminin çok yüksek olduğu ve c' değerinin küçüldüğü modellerde gözlenmiştir. Ek-2'de verilmiş olan bu grafikler incelendiğinde kayma daire mekanizmasının $c/(\gamma H \tan \phi')$ eşitliği ile değiştiği gözlemlenmiş ve Şekil 4.6 verilen dağılım grafik elde edilmiştir. Elde edilen grafik incelendiğinde özellikle X eksenindeki değerin 1,5'tan büyük olduğu yerlerde şev yüksekliklerinin az olduğu problemlerde gözlenmiş olup, düşük şev yüksekliğine sahip şevlerde daireler daha derinden kayma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Grafik Y eksen değeriinden etkilenmediği gözlemlenmiş olup, eksen değeri verilmemiştir, belirleyici olan X eksen değeri olmuştur. Ayrıca Ek-2'de farklı deprem yatay ivme katsayıları ve farklı boşluk suyu basıncı değeri için kayma mekanizma grafikleri verilmiş olup, bu grafikler incelendiğinde, güvenlik sayısı mertebesi deprem yatay ivme katsayısının artmasıyla beklendiği şekilde azalırken, kayma mekanizmaları deprem yatay ivme katsayısının veya boşluk suyu basıncının değişiminden etkilenmediği gözlenmiştir.



Şekil 4.6. Kayma dairesi mekanizmalarının dağılım grafiği

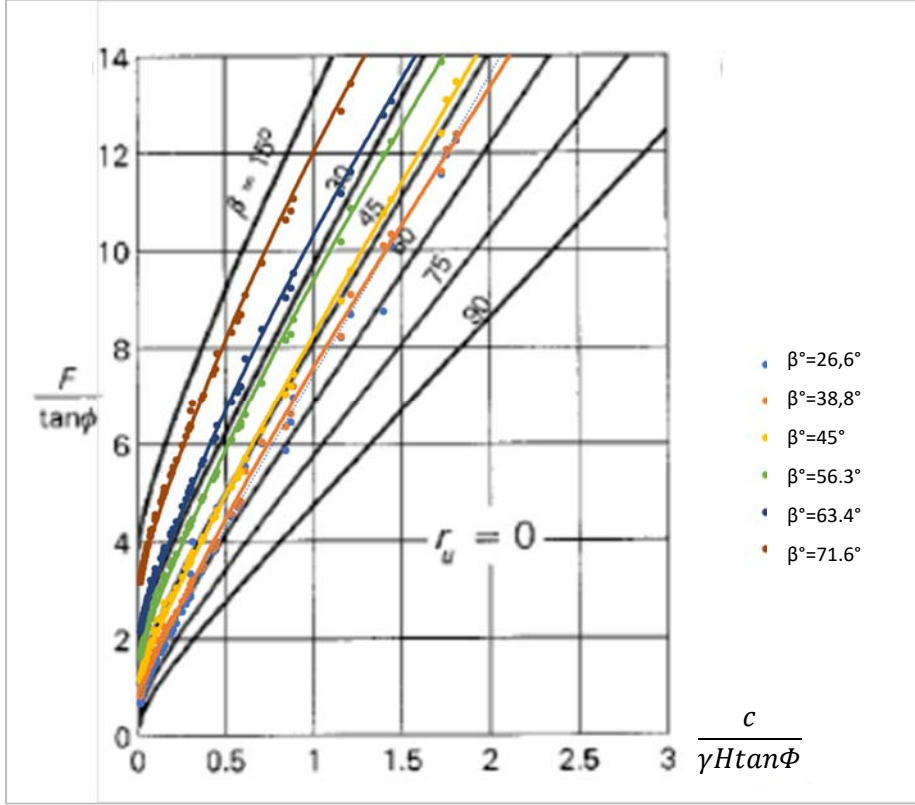
4.2. Stabillite Grafiklerinin Karşılaştırılması

Bölüm 2.2’de farklı araştırmacılar tarafından oluşturulan stabilite grafikleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Mevcut stabilite grafikleri ile bu çalışma kapsamında hazırlanan stabilite grafikleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen aynı değişken değerler için drenajlı durum grafiklerinden Janbu (1968), Michalowski (2002), Steward ve diğerleri (2011), Sun ve Zhao (2013) tarafından oluşturulmuş grafikler karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışma kapsamında hazırlanan grafiklerden elde edilen sonuçlar, MATLAB ve Slide 2D programları aracılığıyla M ve P limit denge yönteminden elde edilen sonuçlar ile da karşılaştırılmış ve elde edilen değerler değerlendirilmiştir. Tüm modellerde 10 m şev yüksekliği, 20 kN/m³ birim hacim ağırlık değeri alınmıştır.

Janbu (1968) stabilite grafiklerinde sürşarj, su düzeltme faktörlerinin kullanılabilmesi için kayma dairesinin mekanizmasının bilinmesi bu grafiklerin kullanımını zorlaştırmaktadır. Çünkü kayma dairesi mekanizması şev staiblitesi analizleri sonucunda tespit edilir. Stabilite probleminin varlığı gözlemlenmiş ise bu grafikler kullanılabilir, fakat diğer türlü kayma dairesinin mekanizmasının tahmini olarak alınması gerekmektedir. Çizelge 4.1’de verilen karşılaştırmada daireler topuk dairesi şeklinde kabul edilmiştir. Varsayımların artması analizlerin doğru sonuçtan uzaklaşmasına neden olmaktadır. Nitekim Şekil 4.9’de görüldüğü üzere Janbu ‘nun staiblite grafiklerinden elde edilen sonuçlardaki hata payı oldukça fazladır.

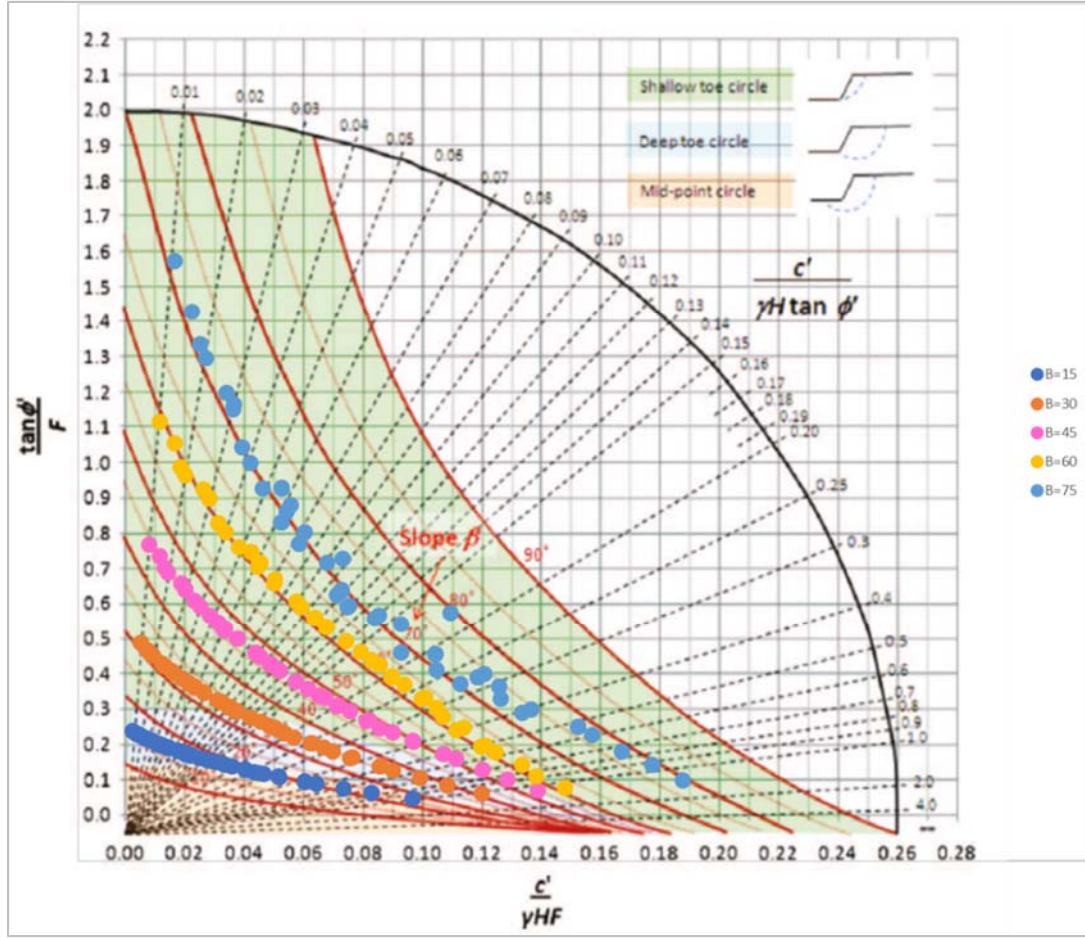
Michalowski (2002) grafikleri bu tez çalışması ile benzer şekilde oluşturulmuş olup, eksen değerleri aynıdır. Şekil 4.7’de Michalowski grafiği ile bu çalışma kapsamında elde edilen değerler karşılaştırılmış olup, sonuçlar tutarlıdır. Homojen zemin koşullarında dairesel (bu çalışmada kullanılan) veya log-spiral (Michalowski’nin çalışmasında kullanılan) analiz sonuçları birbirine oldukça yakındır. Michalowski grafiklerdeki eğrileri β açısı ile oluşturmuş iken bu çalışmada şev oranına göre oluşturulmuş olup, bu yönüyle bu çalışmadan farklıdır. Bu çalışmada grafik çizgilerinin şev oranına göre oluşturulmasının sebebi tasarım uygulamalarında genelde aç yerine şev oranının kullanılması bu grafiklerinin kullanımında kullanıcıya kolaylık sağlamasıdır. Michalowski tarafından elde edilen sonuçlar limit dengeden elde edilen sonuçlar ile tutarlıdır, ancak sürşarj etkisi bu grafiklerde incelenmemiştir. Ayrıca deprem, yer altı suyu etkileri aynı anda gözlemlenememektedir. Bunlara ek olarak Michalowski (2002), grafikleri benzer şekilde oluşturduğu halde x

eksenini $(c/\gamma H \tan \phi)$ 3 rakamı ile sınırlamıştır. Dolayısıyla EK-2'deki grafiklerde gözlenen kırılma noktasının ardındaki lineer kısmı gözlemleyememiştir.



Şekil 4.7. Michalowski (2002) ile karşılaştırma

Steward ve Diğerleri (2011) tarafından oluşturulan grafiklerde eksenini iki tarafında da güvenlik sayısı bulunmaktadır. Şekil 4.8'de gösterildiği üzere grafik üzerinde renkli noktalar ile gösterilen değerler tez çalışmasından elde edilen değerler olup, grafik değerleri ile uyusmaktadır. Steward ve diğerlerinin (2011) de MveP Yöntemini kullanmış olması nedeniyle neredeyse aynı sonuçlar beklenmiştir. Çalışmada kullanılan MATLAB kodunun tutarlılığı test edilmiştir. Steward ve diğerlerine (2011) ait grafiklerde bir model için iki farklı güvenlik sayısı elde edilmektedir. Bu da şev stabilitesi analizini zorlaştırmaktadır. Ayrıca Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere x ve y eksenlerinden elde edilen FS değerleri her zaman birbirine yakın olmamaktadır.



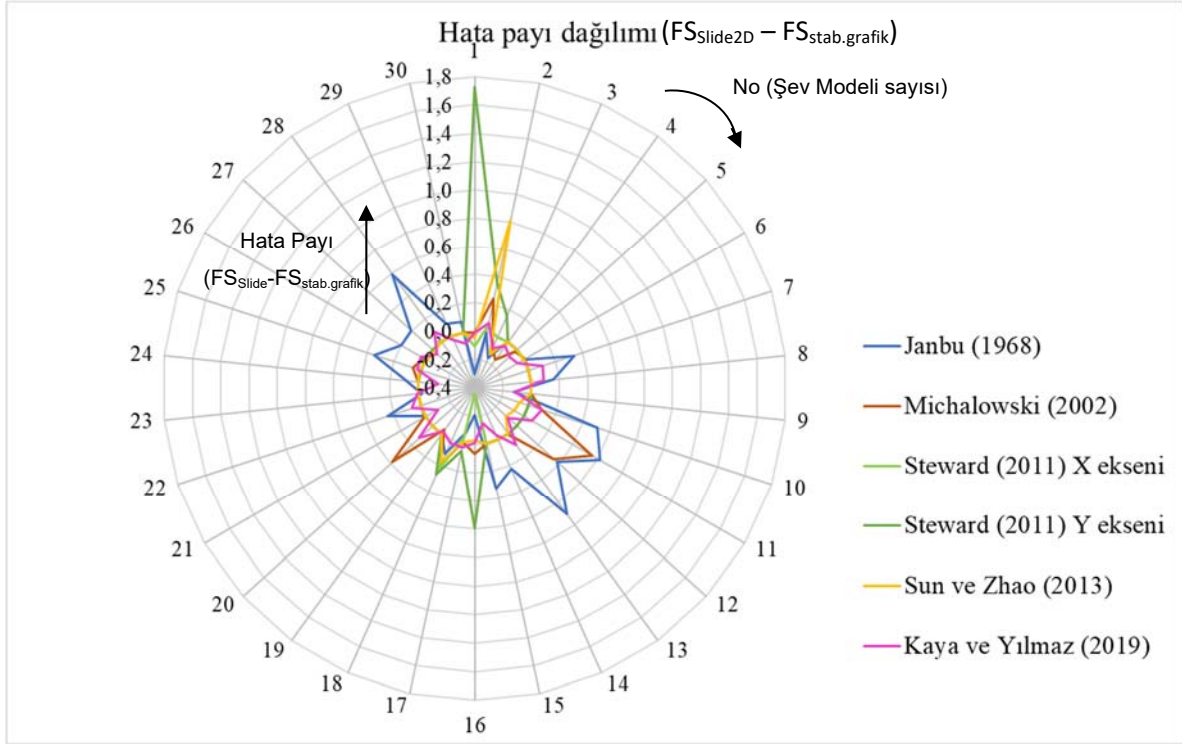
Şekil 4.8. Steward ve Diğerleri (2011) ile karşılaştırma

Sun ve Zhao (2013) tarafından oluşturulan grafiklerden elde edilen sonuçlar genel olarak tutarlı olup, gerçekçidir. Şekil 4.9’da bu grafiklerden elde edilen hata payının az oranda olduğu görülmektedir. Bu grafiklerde yalnızca su etkisi incelenmiş olup, deprem ve sürşarj etkileri düşünülmemiştir.

Literatürdeki çalışmalar, bu tez çalışması kapsamında hazırlanmış olan stabilite grafikleri, MATLAB ile MveP yöntemi ve Slide 2D ile MveP yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında oluşturulmuş olan stabilite grafiklerinden farklı değerlere sahip şev modelleri için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de sonuç elde edilemeyen hücreler “-” ile gösterilmiş olup, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlarda sonuç elde edilemeyen hücre bulunmamaktadır. Farklı değişken etkilerin aynı model için hesaba katılabilmesi bu çalışma diğer grafiklerden ayrılmaktadır. Şekil 4.9’de Slide 2D referans alınarak hesaplanan hata payları ($FS_{Slide} - FS_{stab.analiz}$) gösterilmiş olup, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ile oldukça uyumludur.

Çizelge 4.1. Farklı yöntemlere göre elde edilen güvenlik sayılarının karşılaştırılması

β°	Y:D	c (kPa)	Φ°	K_c	Q (kPa)	R_u	Güvenlik Sayısı (FS)							
							MATLAB ile M ve P Limit Denge Yöntemi	Slide 2D	Janbu (1968)	Michalowski (2002)	Steward ve Diğerleri (2011) X eksen ile bulunan	Steward ve Diğerleri (2011) Y eksen ile bulunan	Sun ve Zhao (2013)	Kaya ve Yılmaz (2019)
15	3,7:1	30	30	-	-	-	4,05	4,04	3,75	4,04	3,95	5,77	4,00	4,04
45	1:1	30	30	-	-	-	1,95	1,95	1,95	2,19	2,00	2,31	2,76	2,02
60	0,6:1	30	30	-	-	-	1,59	1,59	1,43	1,50	1,58	1,75	1,45	1,50
15	3,7:1	30	30	0,1	-	-	3,04	2,90	-	2,89	-	-	-	3,00
45	1:1	30	30	0,1	-	-	1,69	1,69	-	1,67	-	-	-	1,62
60	0,6:1	30	30	0,1	-	-	1,38	1,40	-	1,39	-	-	-	1,33
15	3,7:1	30	30	-	100	-	2,99	3,00	3,33	-	-	-	-	3,09
45	1:1	30	30	-	100	-	1,32	1,40	1,48	-	-	-	-	1,41
60	0,6:1	30	30	-	100	-	1,13	1,13	1,01	-	-	-	-	1,01
15	3,7:1	30	30	-	-	0,25	3,37	3,62	3,88	3,46	-	-	3,30	3,46
45	1:1	30	30	-	-	0,25	1,61	1,67	2,23	2,17	-	-	1,53	1,67
60	0,6:1	30	30	-	-	0,25	1,24	1,27	1,62	1,59	-	-	1,14	1,15
15	3,7:1	30	30	-	100	0,25	2,61	2,69	3,32	-	-	-	-	2,70
45	1:1	30	30	-	100	0,25	1,23	1,25	1,46	-	-	-	-	1,19
60	0,6:1	30	30	-	100	0,25	0,94	0,99	1,27	-	-	-	-	0,80
15	3,7:1	5	20	-	-	-	1,83	1,82	1,63	1,89	1,47	2,43	1,80	1,82
45	1:1	5	20	-	-	-	0,70	0,69	0,63	0,69	0,66	0,76	0,69	0,73
60	0,6:1	5	20	-	-	-	0,34	0,50	0,45	0,53	0,56	0,61	0,51	0,42
15	3,7:1	5	20	0,1	-	-	1,33	1,29	-	1,29	-	-	-	1,31
45	1:1	5	20	0,1	-	-	0,60	0,59	-	0,98	-	-	-	0,73
60	0,6:1	5	20	0,1	-	-	0,46	0,46	-	0,47	-	-	-	0,36
15	3,7:1	5	20	-	100	-	1,34	1,29	1,58	-	-	-	-	1,41
45	1:1	5	20	-	100	-	0,53	0,56	0,51	-	-	-	-	0,54
60	0,6:1	5	20	-	100	-	0,43	0,43	0,52	-	-	-	-	0,29
15	3,7:1	5	20	-	-	0,25	1,43	1,46	1,78	1,49	-	-	1,44	1,46
45	1:1	5	20	-	-	0,25	0,51	0,52	0,71	0,53	-	-	0,50	0,55
60	0,6:1	5	20	-	-	0,25	0,34	0,36	0,54	0,33	-	-	0,32	0,29
15	3,7:1	5	20	-	100	0,25	1,07	0,99	1,66	-	-	-	-	1,16
45	1:1	5	20	-	100	0,25	0,44	0,44	0,53	-	-	-	-	0,41
60	0,6:1	5	20	-	100	0,25	0,30	0,31	0,38	-	-	-	-	0,23



Şekil 4.9. Farklı yöntemlere göre hata payları

Literatürde oluşturulmuş olan grafik verileri MATLAB gibi yazılım programları ile otomatik oluşturulmadığı için, az sayıda veri ile oluşturulmuştur. Bu nedenle sürşarj, deprem, yer altı suyu gibi etkiler hepsinde incelenememiştir. Bu çalışma kapsamında bu etkiler ayrı ayrı veya aynı anda incelenebilmiştir. Hata payı ortalama %5 civarında olup, maksimum %15 lere ulaşmaktadır. Bu da sonuçları oldukça güvenilir elde edildiğini göstermektedir.

Duncan ve diğerleri (1987) sığ derinlikli, sonsuz kayma düzlemleri ve kohezyonsuz zemin koşulları için grafikleri oluşturmuş olup, kullanım alanı sınırlıdır. Eid (2013) tarafından oluşturulmuş grafiklerde lineer olmayan yenilme zarfı için grafikler oluşturulmuş olup, Mohr-Coulomb yenilme zarfı için kullanılamamaktadır.

4.3. Örnek Çözümler

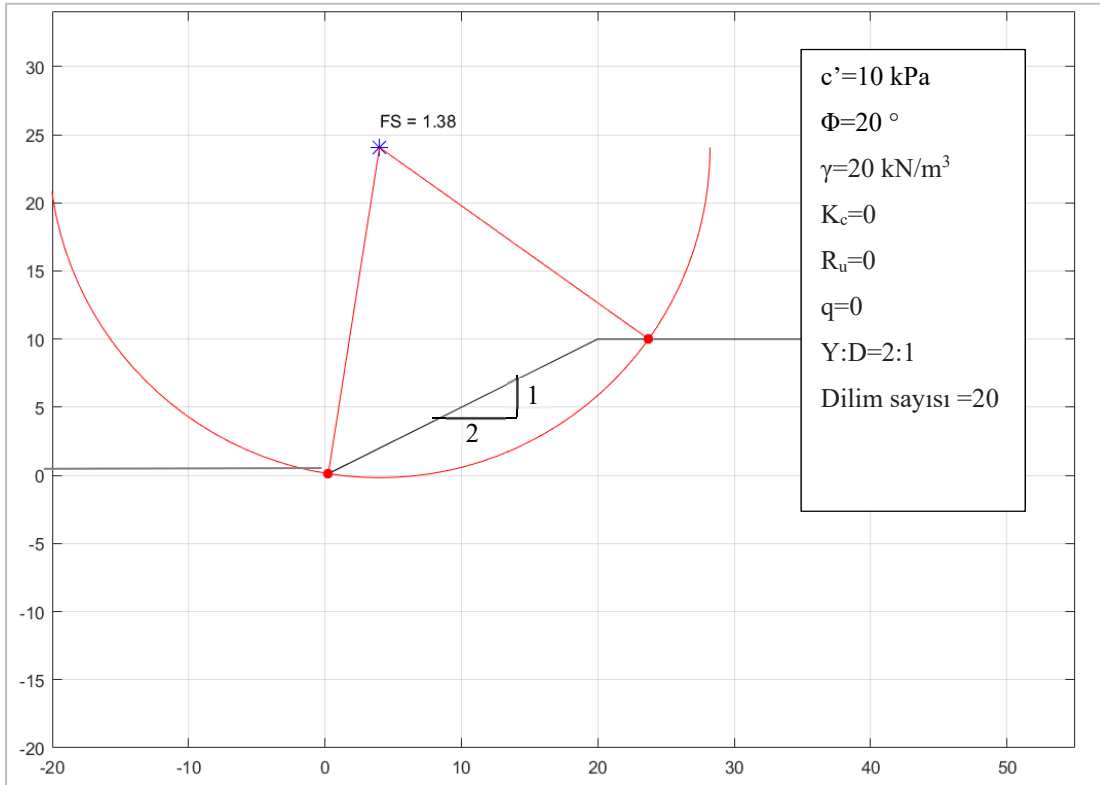
Örnek-1:

Şev yüksekliğinin 10 m, şev eğiminin Y:D=2:1 olduğu, boşluk suyu basıncının olmadığı, zemin parametrelerinin $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, $c'=10$, $\Phi'=20$ olduğu zemin koşullarında statik durum güvenlik sayısını ve kayma dairesi mekanizmasının stabilite grafikleri ile tespiti aşağıda gösterilmiştir.

$$\text{Eş. 4.1 kullanılarak; } N_s = \frac{c}{\gamma H \tan \Phi'} = \frac{10}{20 \cdot 10 \cdot \tan 20} = 0,138$$

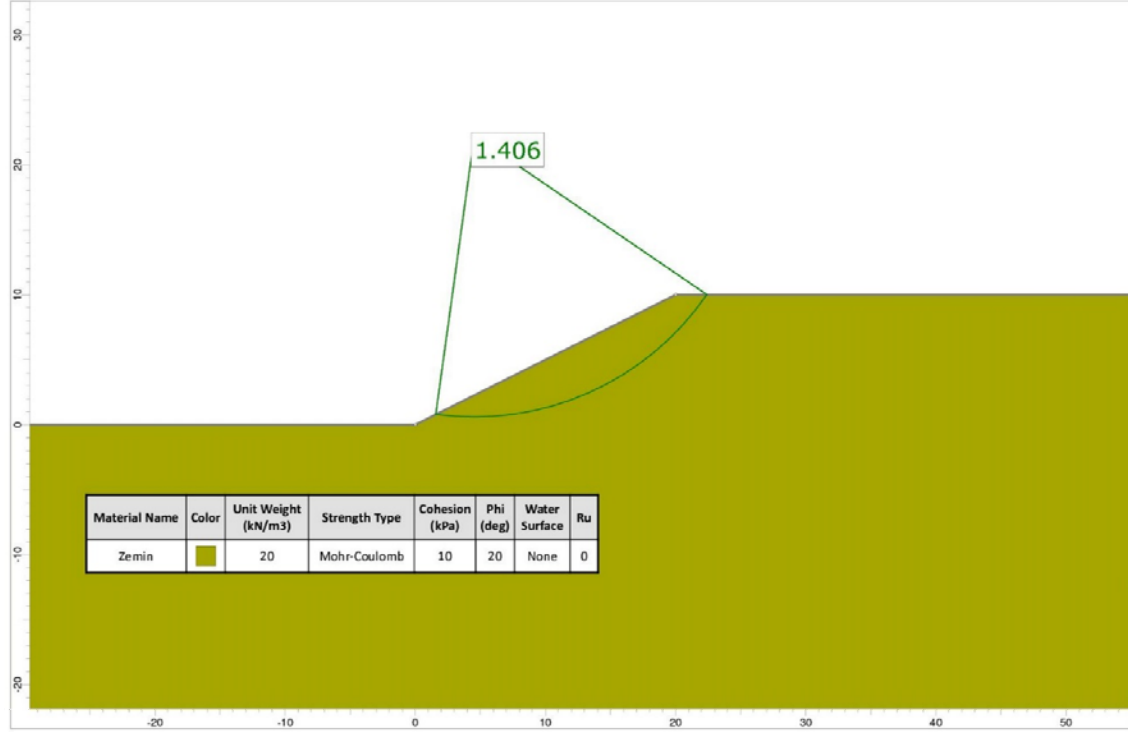
$$\text{Ek-2 -Şekil 2.1. kullanılarak; } \frac{FS}{\tan \Phi'} = 3,7 \rightarrow FS = 1,34$$

MATLAB ile oluşturulan kodla bu şev modeli için yapılan M ve P limit denge yöntemi analizden elde edilen güvenlik sayısı ve kayma dairesi mekanizması Şekil 4.10'da verilmiştir.



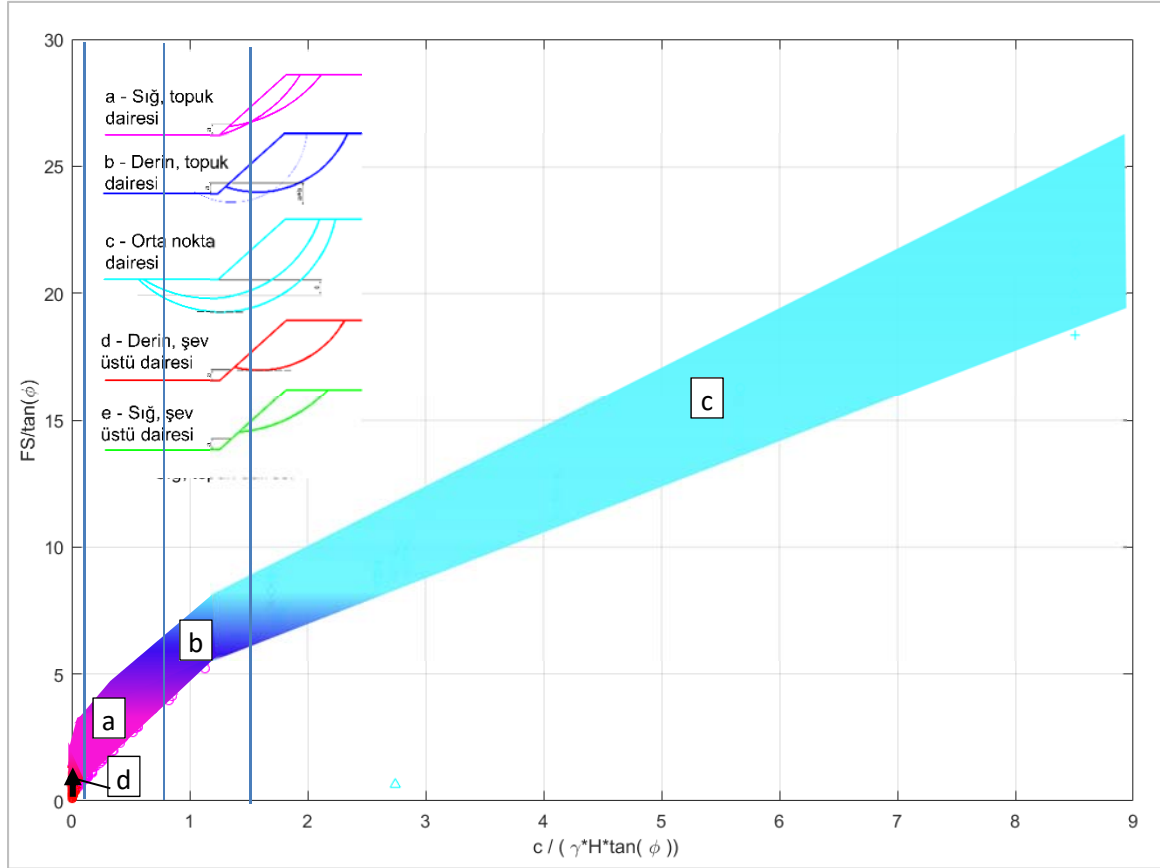
Şekil 4.10. Örnek-1 MATLAB limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı

Rocscience Slide 2D Programı ile elde edilen kayma dairesi ve güvenlik sayısı (FS), Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Örnek-1 Slide 2D limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı

Kayma dairesi mekanizmasının Şekil 4.12 kullanılarak “derin, şev üstü dairesi” şeklinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Örnek-1 Kayma dairesi mekanizmasının tespiti

Örnek-2:

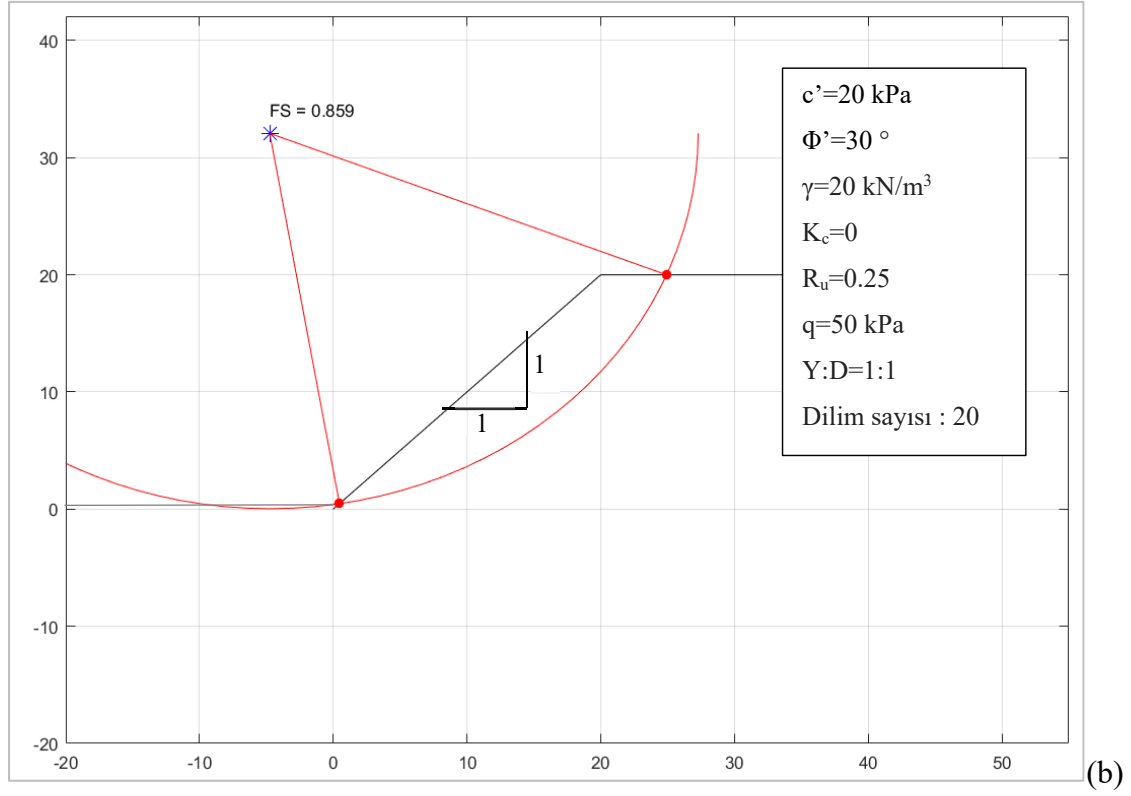
Şev yüksekliğinin 20 m, şev eğiminin Y:D=1:1 olduğu, boşluk suyu basıncının $r_u=0.25$, sürşarj yükünün 50 kPa, zemin parametrelerinin $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, $c'=20$, $\Phi'=30$ olduğu zemin koşullarında statik durum güvenlik sayısını ve kayma dairesi mekanizmasını stabilite grafikleri ile tespiti aşağıda gösterilmiştir.

$$\text{Eş. 4.1. kullanılarak, } N_s = \frac{c}{\gamma H \tan \Phi'} = \frac{20}{20 \cdot 20 \cdot \tan 30} = 0,087$$

$$\text{EK-2. Şekil 2.6. kullanılarak, } \frac{FS}{\tan \Phi'} = 1,6 \rightarrow FS_0 = 0,9$$

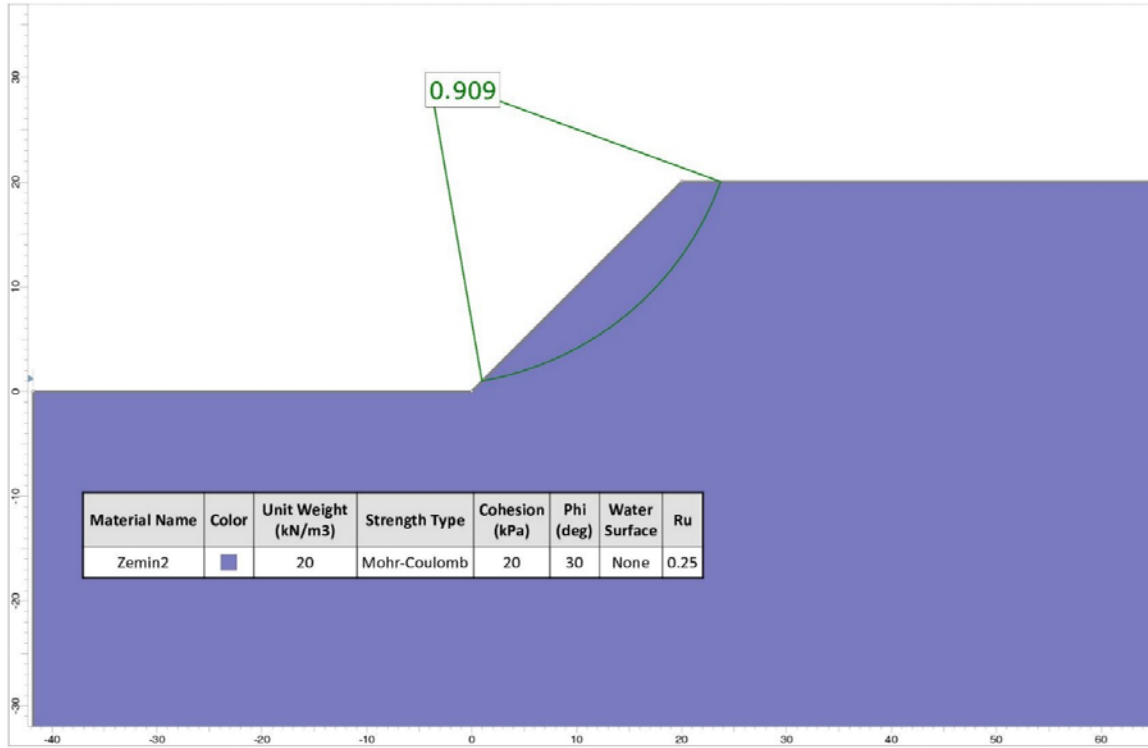
$$\text{Şekil 4.3 - a kullanılarak, } \frac{q}{\gamma H} = \frac{50}{20 \cdot 20} = 0,125 \rightarrow A1 = 0,82$$

$$\text{Şekil 4.4 - b kullanılarak, } \frac{\tan \Phi'}{c'} = \frac{\tan 30}{20} = 0,029 \rightarrow A2 = 0,045$$

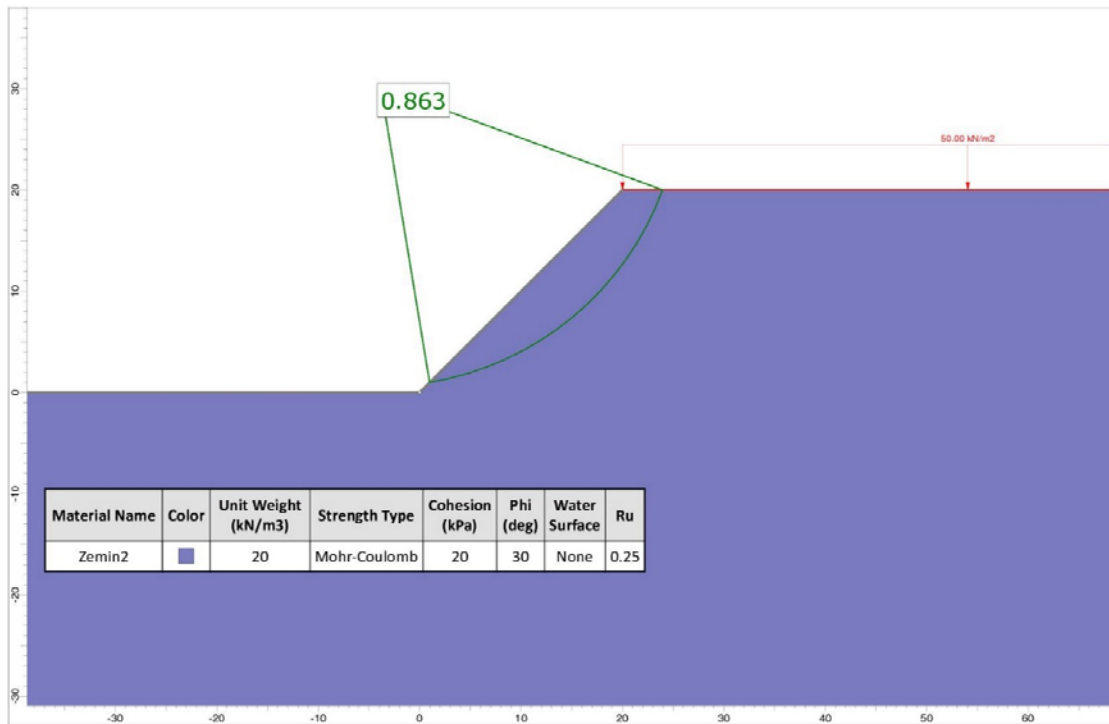


Şekil 4.13. (devam) Örnek-2 MATLAB limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı (a) $q=0$
(b) $q=50 \text{ kPa}$

Rocscience Slide 2D Programı ile elde edilen kayma dairesi ve güvenlik sayısı (FS)
Şekil 4.14 'te verilmiştir.



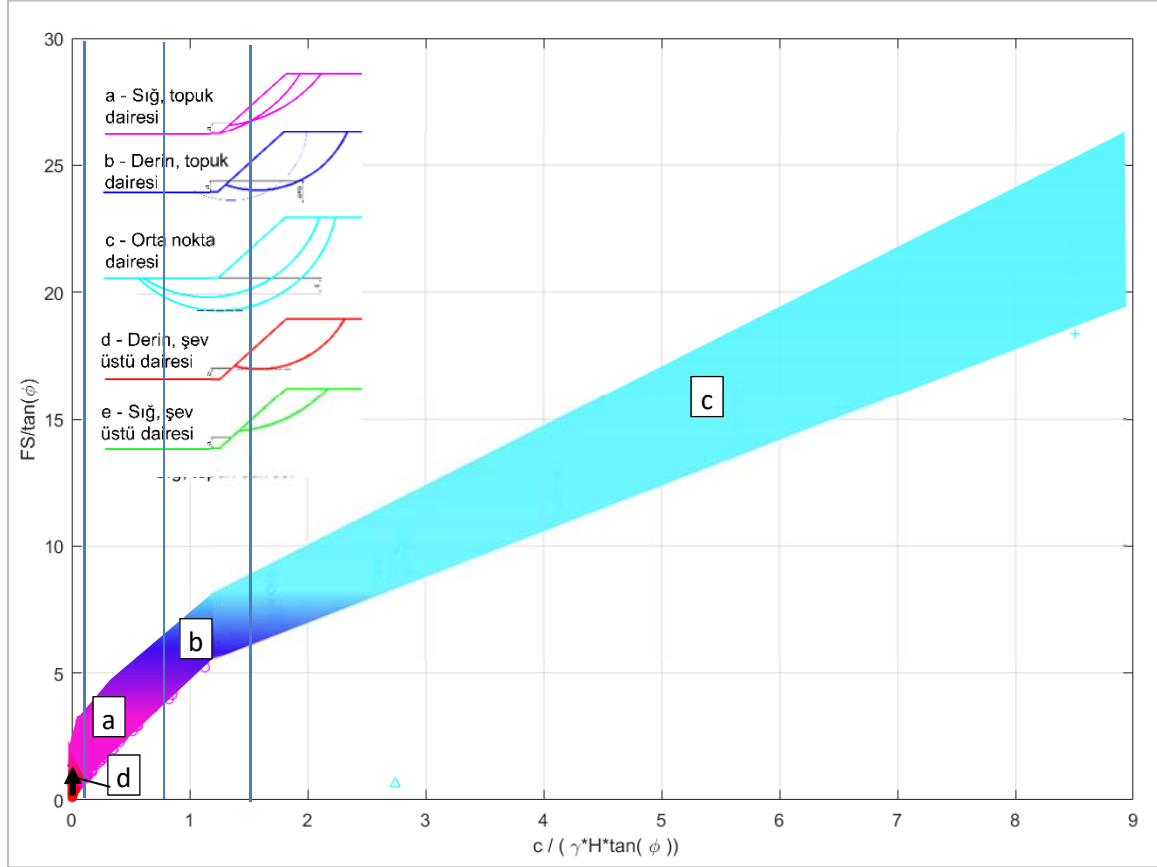
(a)



(b)

Şekil 4.14. Örnek-2 Slide 2D limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı (a) $q=0$
(b) $q=50$ kPa

Kayma dairesi mekanizmasının Şekil 4.15 kullanılarak “derin, şev üstü dairesi” şeklinde oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 4.15. Örnek -2 Kayma dairesi mekanizmasının tespiti

Örnek-3:

Şev yüksekliğinin 15 m, şev eğiminin Y:D=3:2 olduğu, boşluk suyu basıncının $u=0.25$, sürşarj yükünün 150 kPa, zemin parametrelerinin $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, $c'=10$, $\Phi'=40$ olduğu zemin koşullarında $K_c=0.1$ deprem durumu güvenlik sayısını ve kayma dairesi mekanizmasını stabilite grafikleri ile tespiti aşağıda gösterilmiştir.

$$\text{Eş. 4.1. kullanılarak, } N_s = \frac{c}{\gamma H \tan \Phi'} = \frac{10}{20 \cdot 15 \cdot \tan 40} = 0,039$$

$$\text{EK-2 Şekil 2.8 kullanılarak, } \frac{FS}{\tan \Phi'} = 1,4 \rightarrow FS_0 = 1,17$$

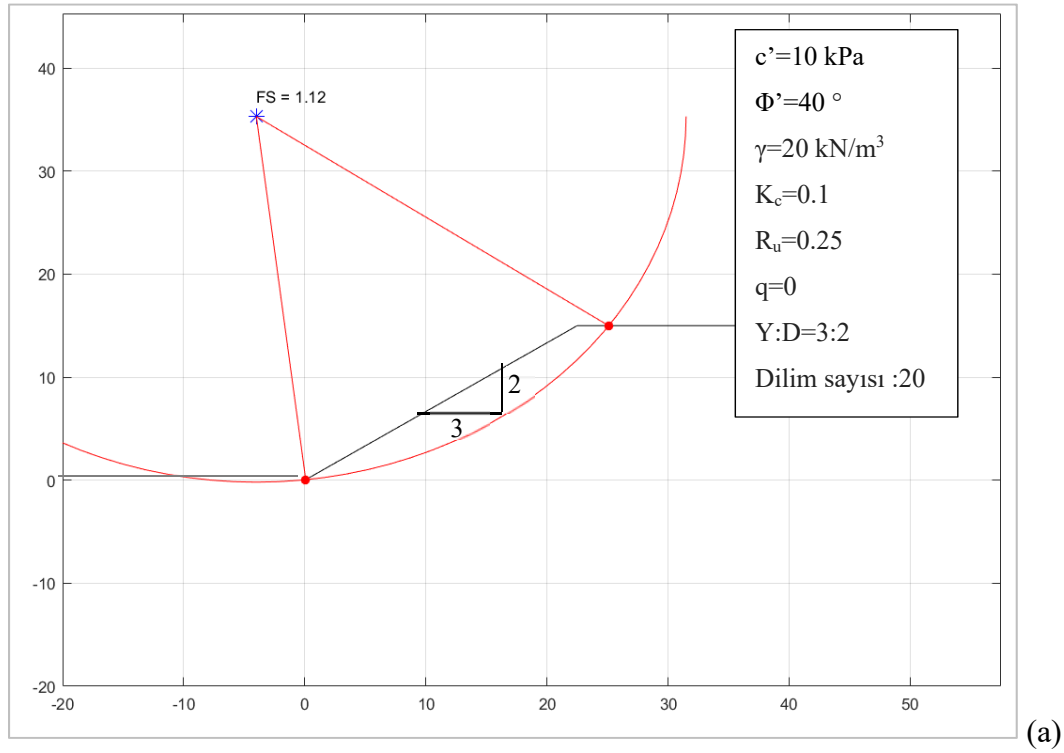
Şekil 4.3-c kullanılarak, $\frac{q}{\gamma H} = \frac{150}{20 \cdot 15} = 0,5 \rightarrow A_1=0,50$

Şekil 4.4-b kullanılarak, $\frac{\tan \Phi'}{c'} = \frac{\tan 40}{10} = 0,084 \rightarrow A_2=0,15$

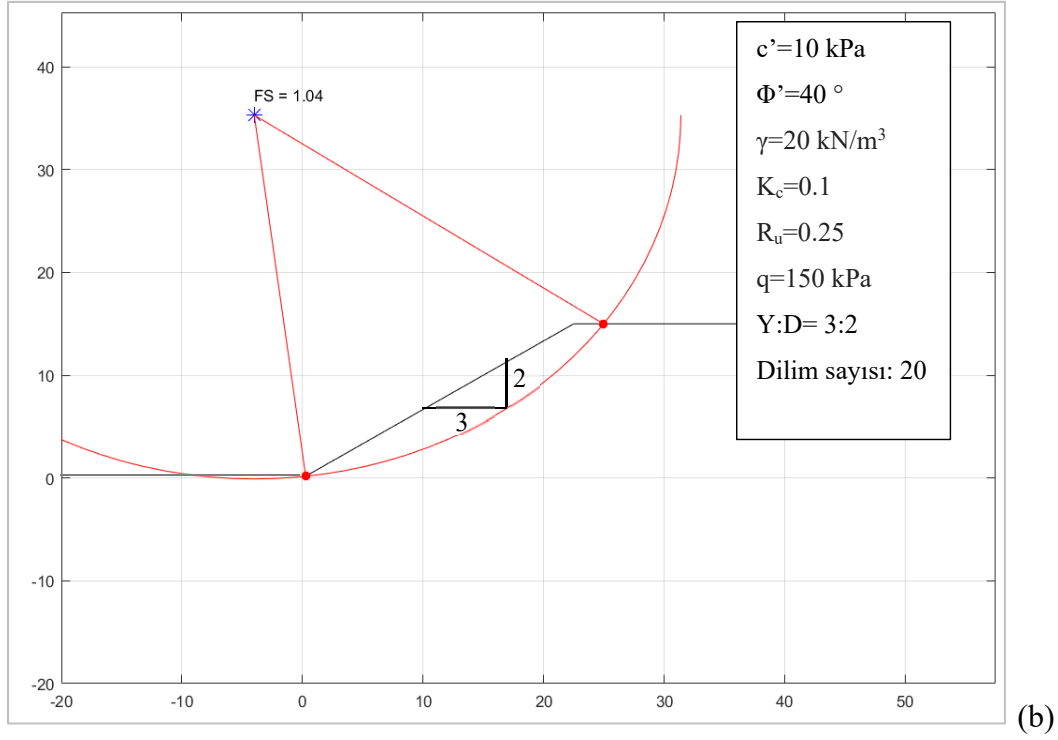
Eş. 4.5 kullanılarak, $\frac{FS \cdot \gamma H}{FS_0 \cdot (\gamma H + q)} = A_1 + A_2 = 0,50 + 0,15 = 0,65$

$$FS = 0,65 * \left(\frac{1,17 * (20 * 15 + 150)}{20 * 15} \right) = 1,14$$

MATLAB ile oluşturulan kodla bu şev modeli için yapılan M ve P limit denge yöntemi analizden elde edilen güvenlik sayısı ve kayma dairesi mekanizması Şekil 4.16'da verilmiştir.

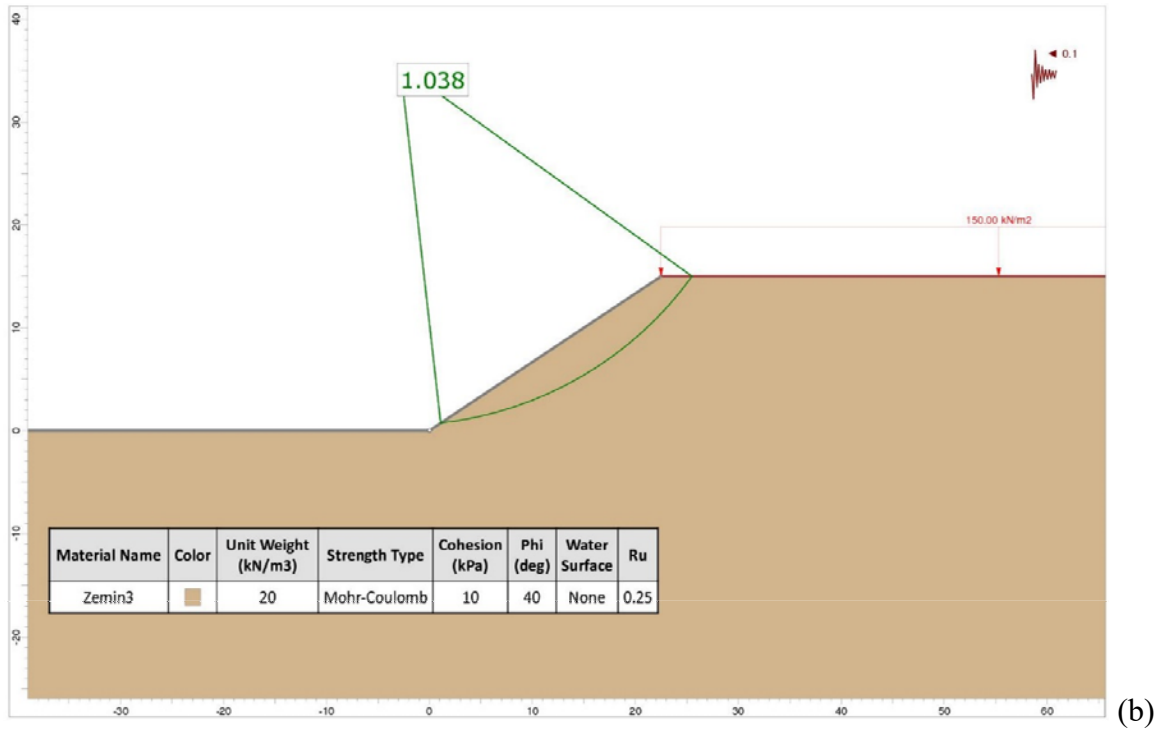
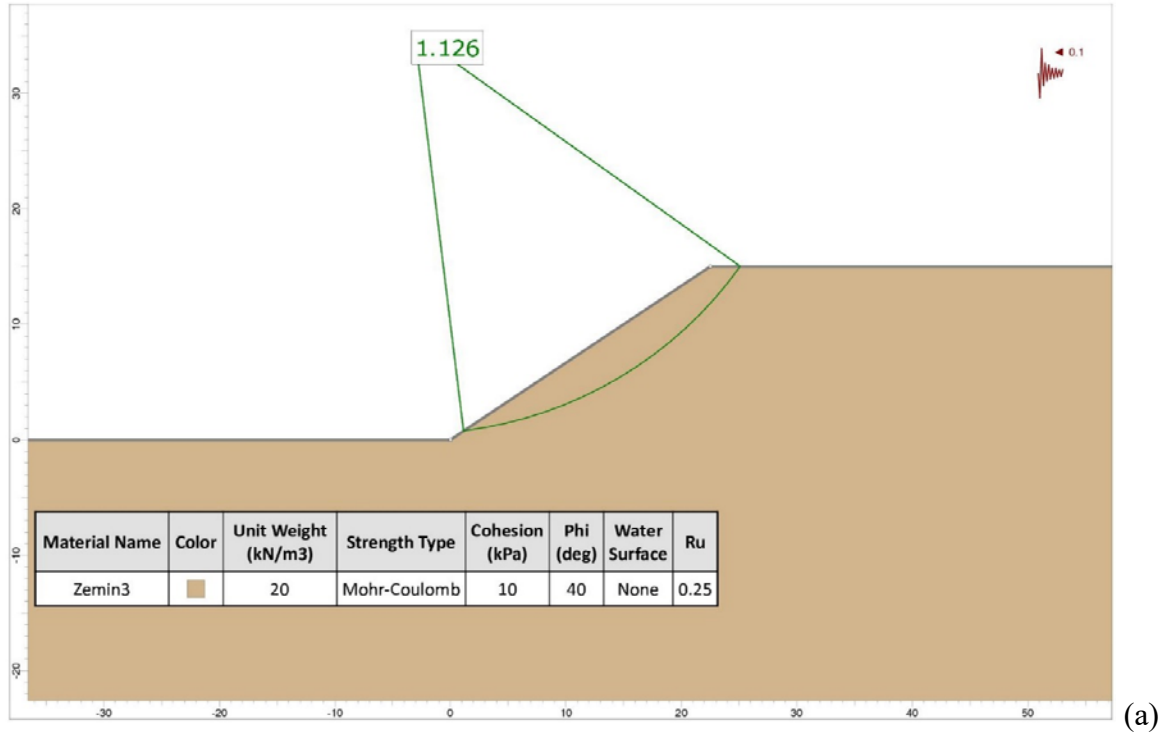


Şekil 4.16. Örnek-3 MATLAB limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı (a) $q=0$
(b) $q=150$ kPa



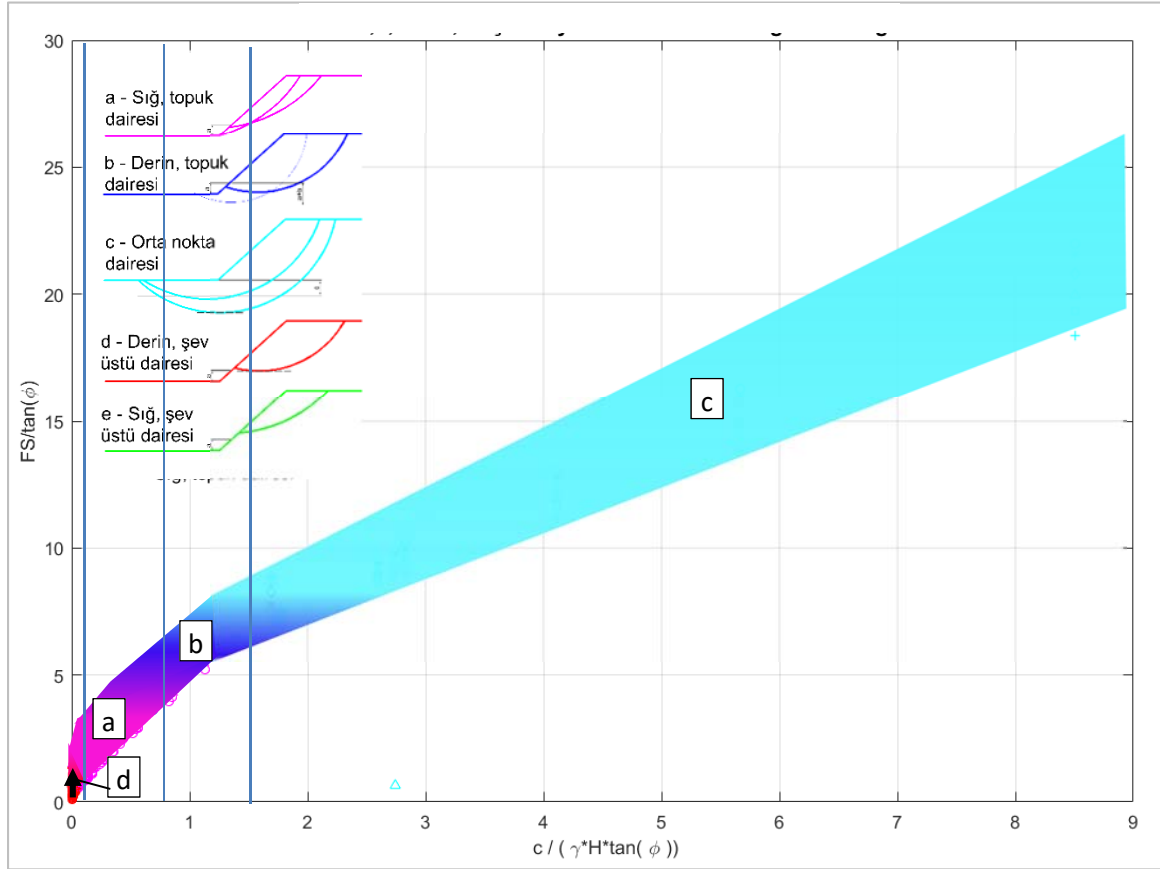
Şekil 4.14. (devam) Örnek-3 MATLAB limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı (a) $q=0$
(b) $q=150 \text{ kPa}$

Rocscience Slide 2D Programı ile elde edilen kayma dairesi ve güvenlik sayısı (FS) Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Örnek-3 Slide 2D limit denge yöntemi sonucu güvenlik sayısı (a) $q=0$
(b) $q=150$ kPa

Kayma dairesi mekanizmasının Şekil 4.18 kullanılarak “derin, şev üstü dairesi” şeklinde oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 4.18. Örnek-3 Kayma dairesi mekanizmasının tespiti

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında dilimler arası kuvvetleri en gerçekçi şekilde hesaba katan limit denge yöntemlerinden biri olan Morgenstern ve Price (1965) dilim yöntemi kullanılarak, homojen zemin koşulları için MATLAB Programı ile statik ve deprem durumlarındaki zemin dayanım parametreleri, su etkisi, şev üzerindeki sürşarj etkisi hesaba katılarak çok sayıda veri elde edilmiş, bu veriler ile stabilite grafik çözümleri farklı durumlar için oluşturulmuş ve irdelenmiştir. Ayrıca daha önce yapılmış olan çalışmalar ile bu tez çalışması kapsamında oluşturulan grafikler karşılaştırılmıştır.

Farklı araştırmacılar ile oluşturulmuş olan stabilite grafiklerinin dilimler arası yanal yükleri ihmal ederek veya farklı kabuller yaparak hesaplayan limit denge yöntemleri ile oluşturulması özellikle şev eğiminin dikleştiği problemlerde sonuçların hatalı elde edilmesine neden olabilmektedir. Morgenstern ve Price (1965) tarafından geliştirilen limit denge yöntemi ile bu problem ortadan kaldırılmakta olup, bu tez çalışması kapsamında bu yöntem kullanılmıştır. Bu grafikler ile özellikle homojen zeminlerde belirli bir şev modeline ait stabilite güvenlik sayılarına hızlı ve iterasyona ihtiyaç duyulmadan ulaşılabilmektedir. Ayrıca bu grafikler sayesinde tasarım alternatifleri hızlı bir şekilde değerlendirilebilmektedir. Ön tasarım aşamalarında, ön projelerde, zemin etüt raporlarında bu stabilite grafikleri ile şev stabilitesi güvenlik sayıları ve şev eğimleri belirlenebilecek veya hazırlanacak bir projenin ön tasarım sürecinde tasarıma yön vermek için kullanılabilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında M ve P Limit denge yönteminin kolaylaştırılmış algoritması kullanılmış olup, kayma dairesinin tespiti için algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca kayma dairesinin mekanizmasının tespiti için daha önceki yöntemlerden farklı 5 adet kayma mekanizması tanımlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen kazanımlar aşağıda madde halinde özetlenmiştir.

- Mevcut yazılım programlarının kara kutu olması nedeniyle algoritmalarının ve yazılım kabullerinin bilinmemesi, programlara herhangi bir kod yerleştirilememesi çok sayıda

analizin tek seferde yapılabilmesine imkan sağlamamaktadır. Bu çalışma kapsamında, gerekli algoritmalar şematize edilmiş, ayrıntılı olarak açıklanmış, yapılan yöntem kabulleri açık bir şekilde belirtilmiştir. Bu çalışmalar, başka araştırmacılara yol gösterici olabilecek ve gelecek çalışmalarda kullanılabilecektir.

- Daha önce farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda deprem sırasındaki sürşarj, boşluk suyu basıncı gibi etkiler düşünülmemiş olup, statik durumdaki sürşarj, boşluk suyu basıncı gibi etkileri düşünülmüştür. Bu çalışma kapsamında oluşturulan grafikler ile hem statik hem deprem durumundaki sürşarj ve boşluk suyu basıncı etkilerinin aynı anda olduğu durum için analizler yapılabilmektedir.
- Minimum hata payı bu tez kapsamına oluşturulan grafikler üzerinden elde edilmiş olup, kısıtlamalar en aza indirgenmiştir.
- Daha önce yapılan çalışmalardaki eksen değerleri referans alınarak bu çalışma kapsamındaki stabilite grafik çözümleri elde edilmiştir. Sürşarj yükünün olmadığı durum için grafikler oluşturulmuş, buna ek olarak sürşarj etkisi stabilite grafiklerine ikincil ve üçüncül grafikler ile eklenmiştir. Sürşarj etkisinin hesaba katılması için sadece bir ek grafiğin yeterli olmadığı sürşarjın güvenlik sayısına etkisinin zemin parametrelerinin değerlerine göre de değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Diğer bir deyişle sürşarj değişimi hem doğrudan olarak güvenlik sayısını değiştirmekte hem de zemin parametrelerine göre etki oranı değişmektedir.
- Sürşarj etkisinin olmadığı durumda statik ve deprem etkisi stabilite grafikleri ile irdelenmiş olup, eğrilerin deprem etkisi arttıkça sola kayan bir kırılma noktası oluşturduğu, bu değerden önce eğriler polinomik bir yol izlerken bu değerden sonra lineer artış gösterdiği saptanmıştır.
- Ayrıca MATLAB Programı aracılığıyla kayma dairesi mekanizmaları N_s sayısına bağlı olarak grafik üzerinde sınıflandırılmıştır. N_s değerinin yaklaşık 1,5'ten büyük olduğu yerlerde şev yüksekliklerinin giderek azaldığı gözlenmiş olup, düşük şev yüksekliğine sahip şevlerde dairelerin daha derinden kayma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca farklı deprem yatay ivme katsayıları ve farklı boşluk suyu basıncı değerleri için kayma mekanizma incelendiğinde, güvenlik sayısı mertebesi deprem yatay ivme katsayısının artmasıyla beklendiği şekilde azalırken, kayma mekanizmaları deprem yatay ivme katsayısının veya boşluk suyu basıncının değişiminden etkilenmediği gözlenmiştir.
- Bu tez çalışması kapsamında yer verilmiş daha önce oluşturulmuş olan bazı stabilite grafikleri için kullanılan veriler otomatik olarak elde edilmediği için az sayıda veri ile

oluşturulmuşlardır. Bu nedenle sürşarj, deprem, yer altı suyu gibi etkiler bir arada incelenememiştir. Bu çalışma kapsamında, bu etkilerin aynı anda olduğu durum için de sonuç elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasından elde edilen stabilite güvenlik sayıları Rocscience Slide 2D ile karşılaştırıldığında hata payları ortalama %5 civarında oluşmakta olup, maksimum %15 lere ulaşmaktadır. Bu da sonuçları oldukça güvenilir elde edildiğini göstermektedir.

Çok sayıda grafikte sonuca ulaşım sürecini uzatıyor olsa dahi, limit denge yöntemlerindeki karmaşık çözümler çok daha basite indirgenebilmiş ve buna kıyasla çözüm süreci hem kısalmakta hem de güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir.

Sonuç olarak, stabilite grafik çözümleri sayesinde iterasyona ve yazılım programlarına ihtiyaç duyulmadan hızlı bir şekilde sonuca ulaşılabilmekte ve özellikle bir projenin ön tasarım aşamasında tasarımcıya yol gösterici olabilmektedir.

Gelecek çalışmalarda drenajsız durum analizleri, çekme çatlağı etkisi, yer altı su seviyesi etkisi (H_u), log-spiral kayma dairesi etkisi, dilim sayısının stabilite güvenlik sayılarına etkisi incelenebilir veya tabakalı zeminlere ait MATLAB kodunun geliştirilmesi, limit denge yöntemlerinin çözümlenebildiği arayüze sahip bir program geliştirilebilecektir.

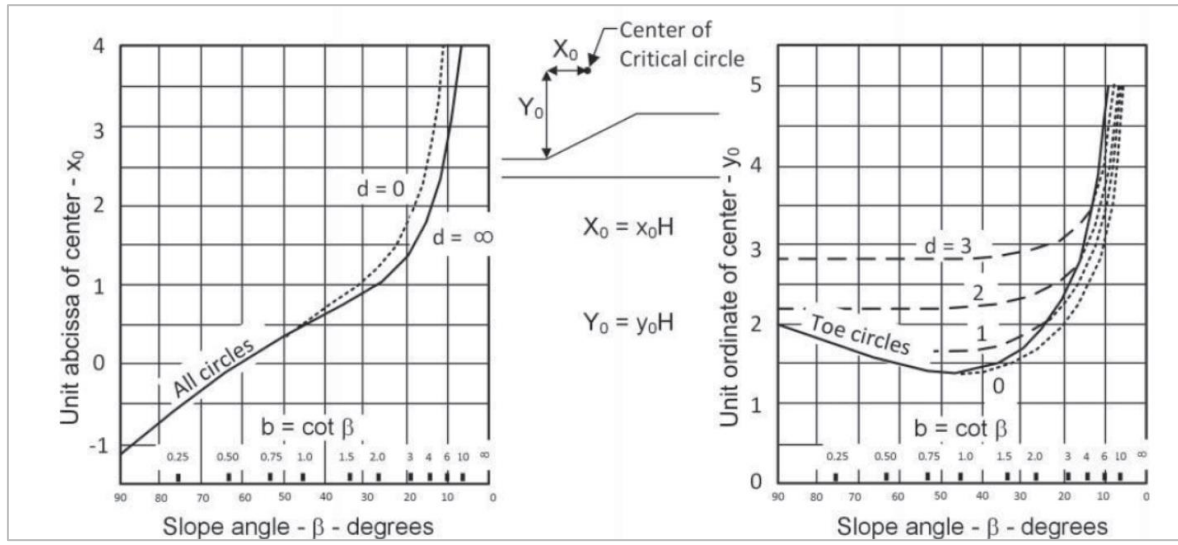
KAYNAKLAR

- Azizi, S. (2018), *Application of recent optimization algorithms on slope stability problems*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Baker, R. (2003), A Second look at Taylor's stability chart. *Journal of Geotechnical Engineer*, 129(12), 1102-1108
- Bishop, A. W. and Morgenstern, N. (1960), Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, 10(4), 129-150
- Cruden, D. M., Varnes, D. J. (1996), Landslide investigation and mitigation. *Transportation Research Board national Academy of Sciences*, 247, 36-75
- Çetin, T. (2010), *Şev stabilitesi analizleri için bilgisayar programının geliştirilmesi ve analiz yöntemlerinin karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa
- Duncan, J. M., Wright, S. G. and Brandon, T. L. (2014), *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey: John Wiley ve Sons, 103-108
- Eid, H. T. (2013). Stability chart for uniform slopes in soil with nonlinear failure envelopes. *Engineering Geology*, 168, 38-45
- Fan, K., Fredlund, D. G., Wilson, G. W. (1986). An interslice force function for limit equilibrium slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 23, 287-296.
- Fredlund, D. G., Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(3), 429-439.
- Fredlund, D.G. (1984). *Analytical Methods for Slope Stability Analysis*. 4th International Symposium on *Landslides*, 1, 229-250.
- İnternet: GeoSlope Int., Pore water pressures defined using Ru. URL: <http://downloads.geoslope.com/geostudioresources/examples/9/0/SlopeW/Pore-Water%20Pressure%20Defined%20Using%20Ru.pdf>, Son Erişim Tarihi: 20.03.2019
- Janbu, N. (1968), *Slope stability computation*, Soil Mechanics and Foundation Engineering Report, The Technical University of Norway, Trondheim, Norway.
- Hunter, J. H., Schuster, R. L. (1971). Chart solutions for analysis of earth slopes. *Committee on Embankments and Earth Slopes – the 50th Annual Meeting*, 78-89
- Knappett, J. A., Craig, R. F. (2012), *Soil mechanics*, (8. Basım) New York: Taylor ve Francis Group.
- Maksimovic, M. (1989), Nonlinear failure envelope for soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(4), 581-586

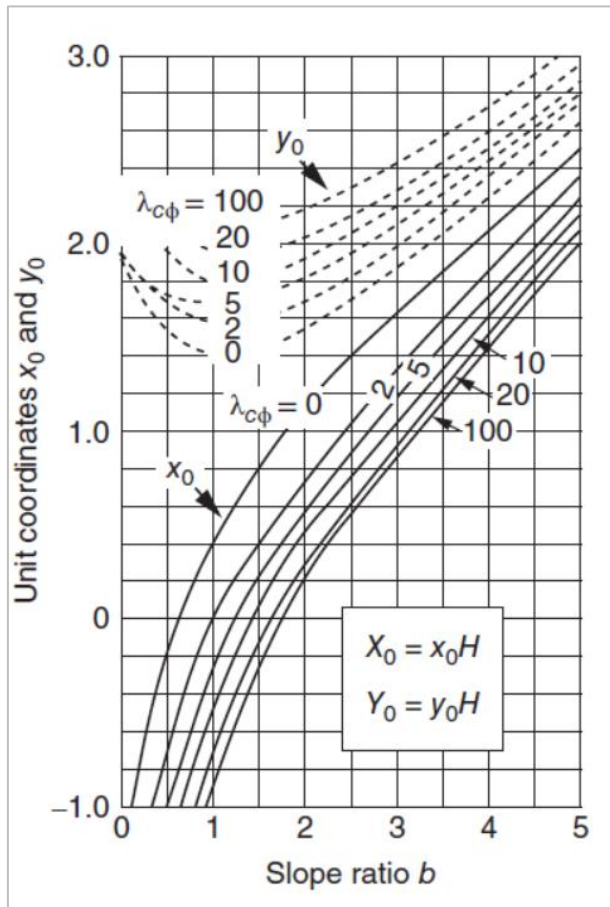
- Micholawski, R. L.(1995), Slope stability analysis: a kinematical approach. *Geotechnique*, 45(2), 283-293
- Micholawski, R. L.(2002), Stability chart for uniform slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(4), 351-355
- Morgenstern, N. R. (1964), *The limit equilibrium method of slope stability analysis*, Yüksek Lisans Tezi, Londra Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Londra
- Morgenstern, N. R., Price, V. E. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15, 79–93
- Morgenstern, N. R., Price, V. E. (1967), A Numerical Method for Solving the Equations of Stability of General Slip Surfaces, *The Computer Journal*, 388-393
- İnternet: Rocscience Inc. Slide 2D, Critical Slip Surface Search Method in Slide. URL: www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/8398.pdf, Son Erişim Tarihi: 20.03.2019
- Sun, J., Zhao, Z. (2013), Stability Chart for Homogenous Soil Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, 2212-2218
- Steward, T., Sivakugan, N., Shukla, S. K., Das, B. M. (2011), Taylor's Slope Stability Charts Revisited. *International Journal of Geomechanics*, 11(4), 348-352
- Taylor, D. W. (1937), Stability of earth slopes. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 24, 197-246
- Taylor, D. W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, New York: John Wiley ve Sons
- Tekin, A. (2011), *Sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile şev stabilitesi analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G. (1996), *Soil mechanics in engineering practice*, New York: Wiley
- US Army Corps of Engineers (2003), *Engineering and Design: Slope Stability Engineer Manual EM 1110-2-1902*. Washington. DC: Department of tge Army, Office of the Chief of Engineers.
- Yalçın, Y. (2018), *Integrated limit equilibrium method for slope stability analysis*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Zhu, D. Y., Lee, C. F., Qian, Q. H. ,Chen, G. R. (2005). A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern ve Price method. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 272–278.

EKLER

EK-1. Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri

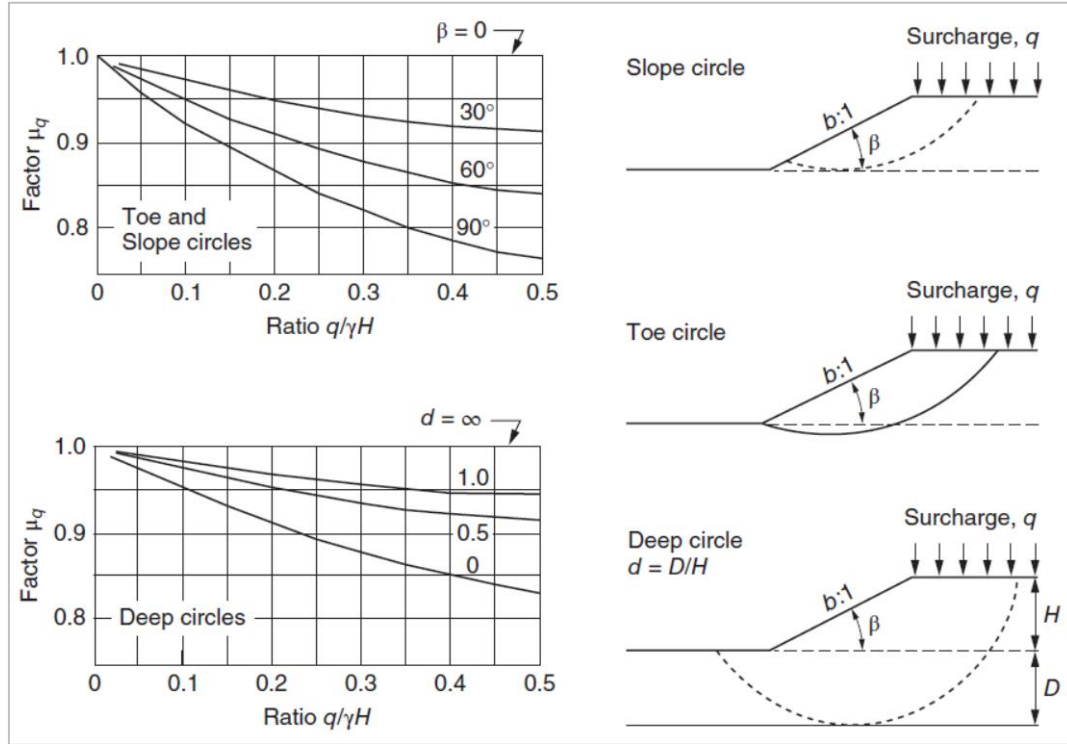


Şekil 1.1. Drenajsız durum için kayma dairesi lokasyonu (Janbu, 1968)

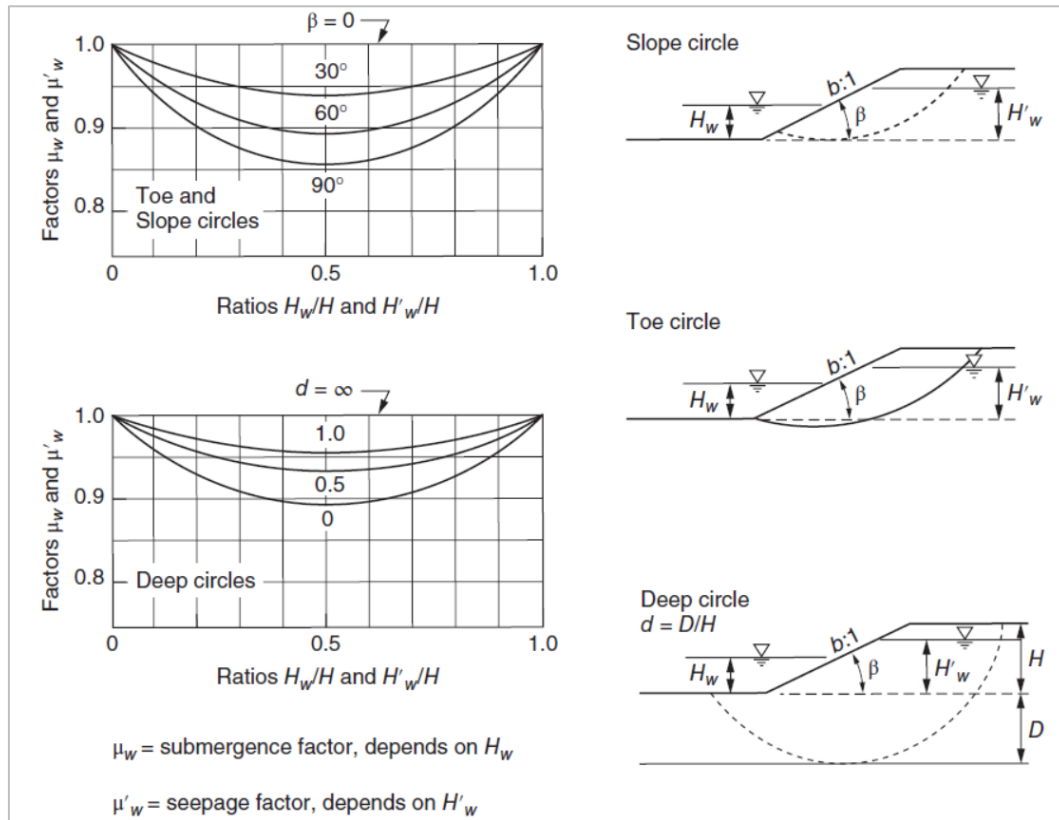


Şekil 1.2. Drenajlı durum için kayma dairesi lokasyonu (Janbu, 1968)

EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri

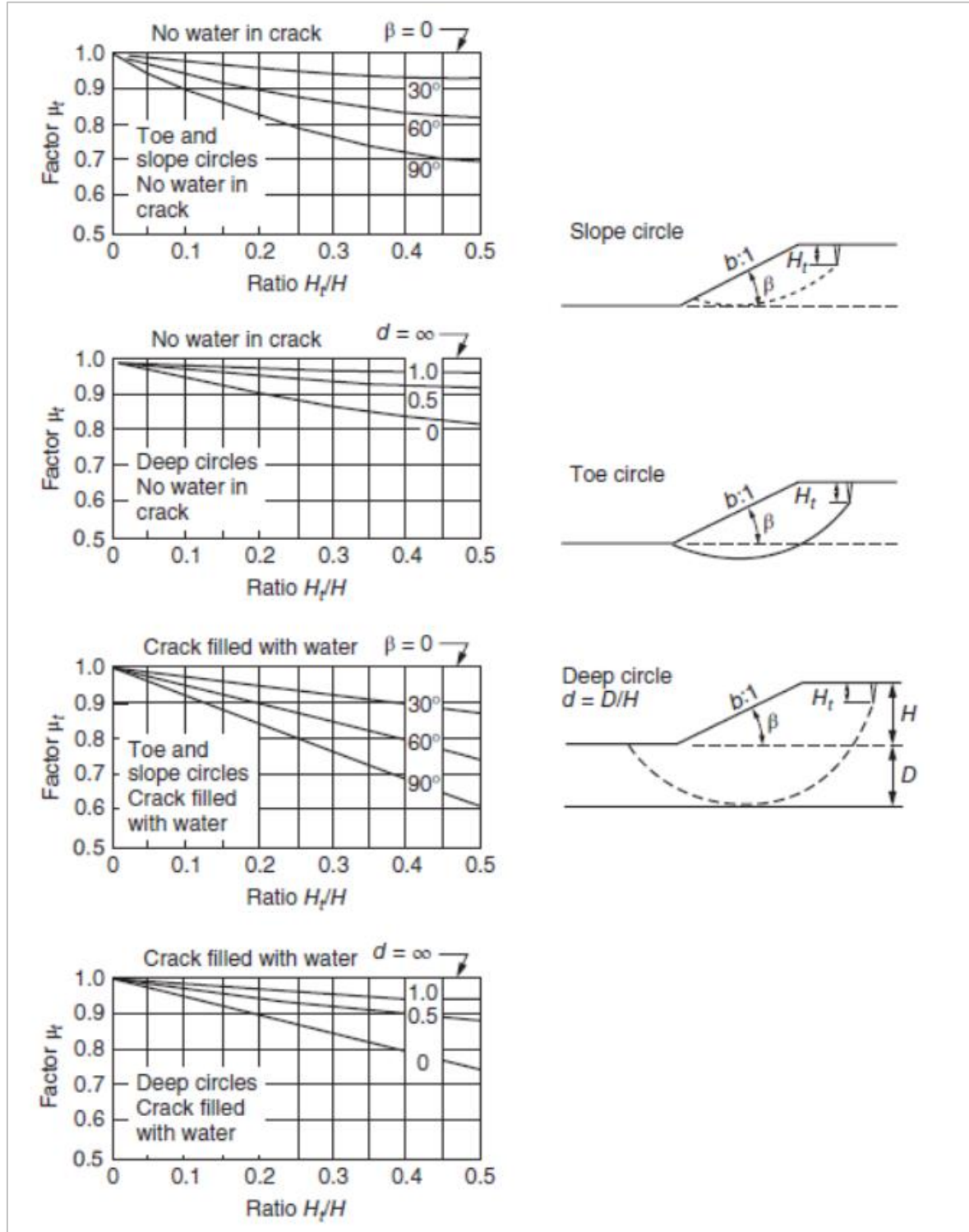


Şekil 1. 3. Sürşarj düzeltme katsayısı (Janbu, 1968)



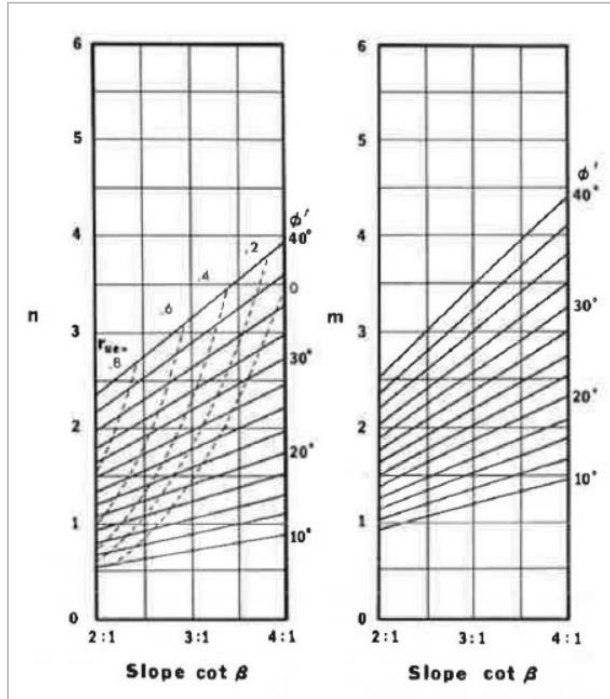
Şekil 1.4. Yer altı suyu düzeltme katsayısı (Janbu, 1968)

EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri

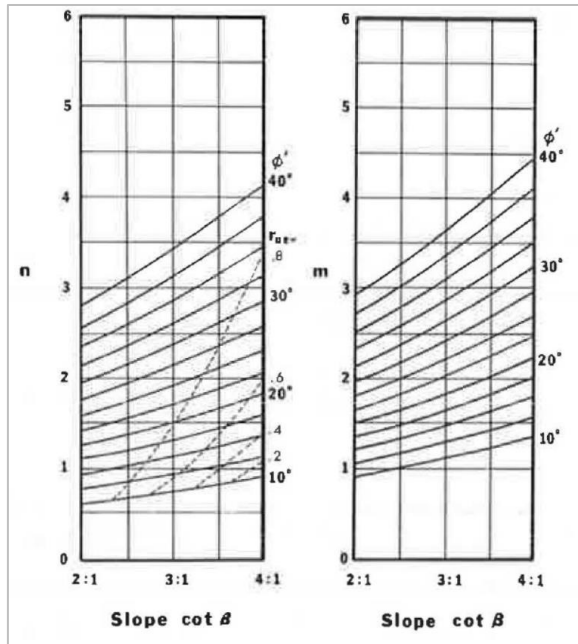


Şekil 1.5. Çekme çatlağı düzeltme katsayısı (Janbu, 1968)

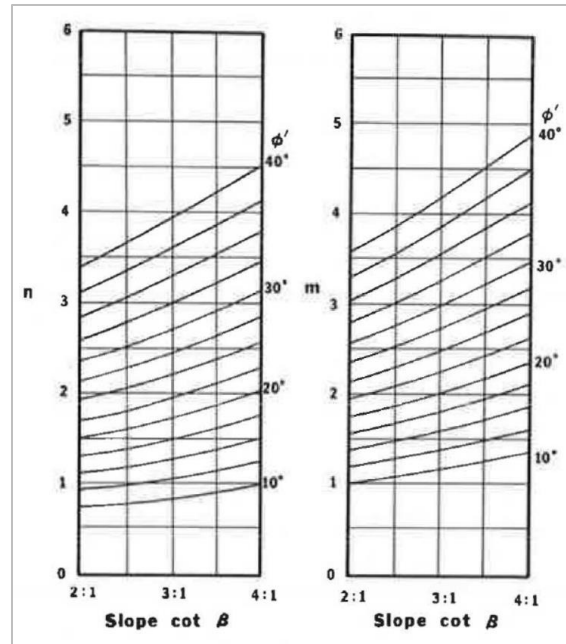
EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri



(a)



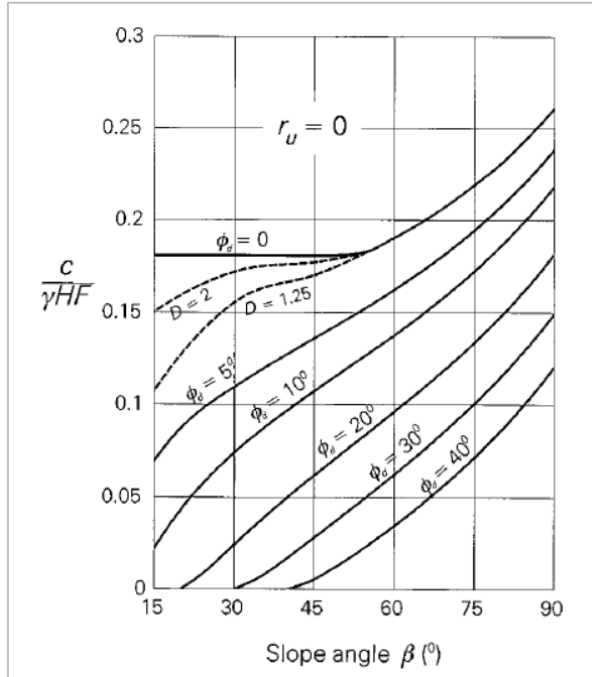
(b)



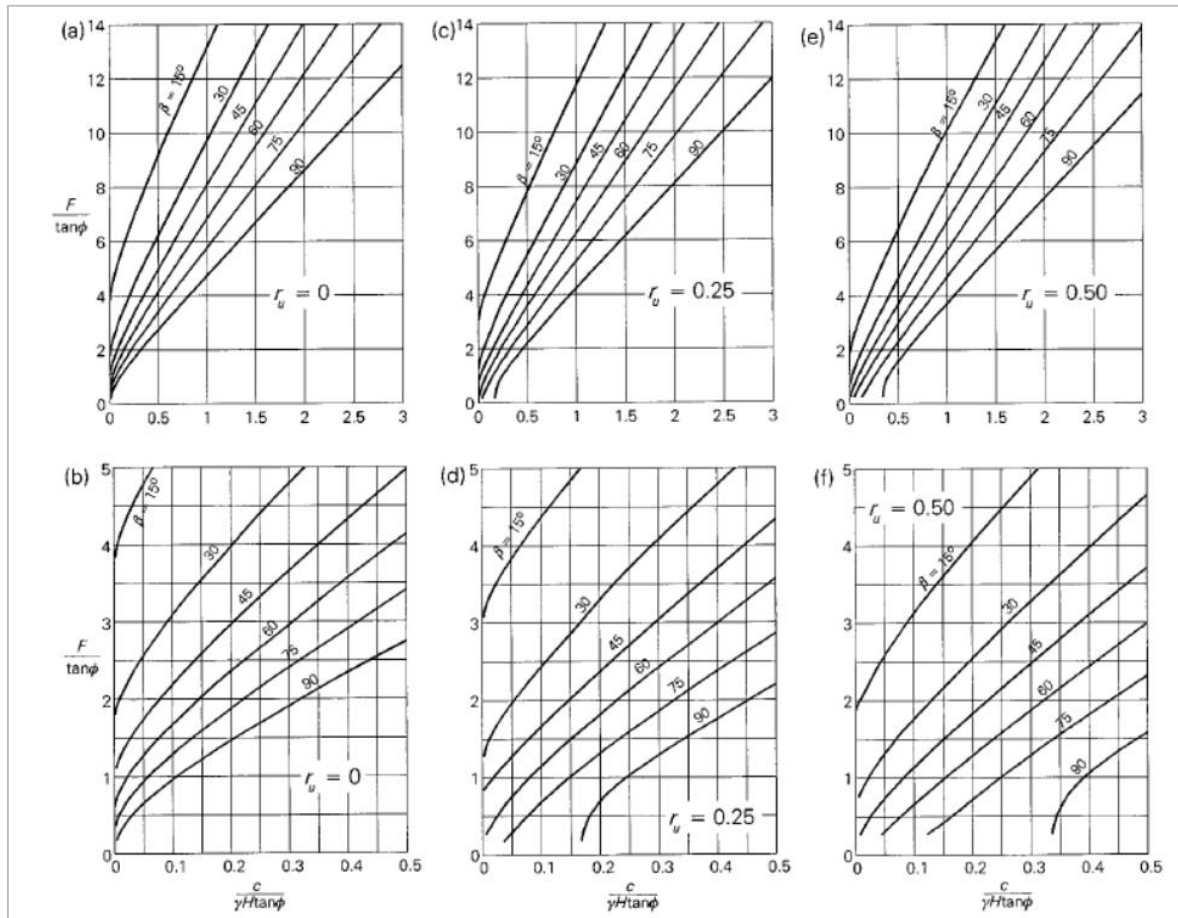
(c)

Şekil 1.6. m ve n stabilite sayıları, $c/\gamma H=0,05$, (a) $D=1,00$ (b) $D=1,25$ (c) $1,50$ (Bishop ve Morgenstern) (D , derinlik faktörü)

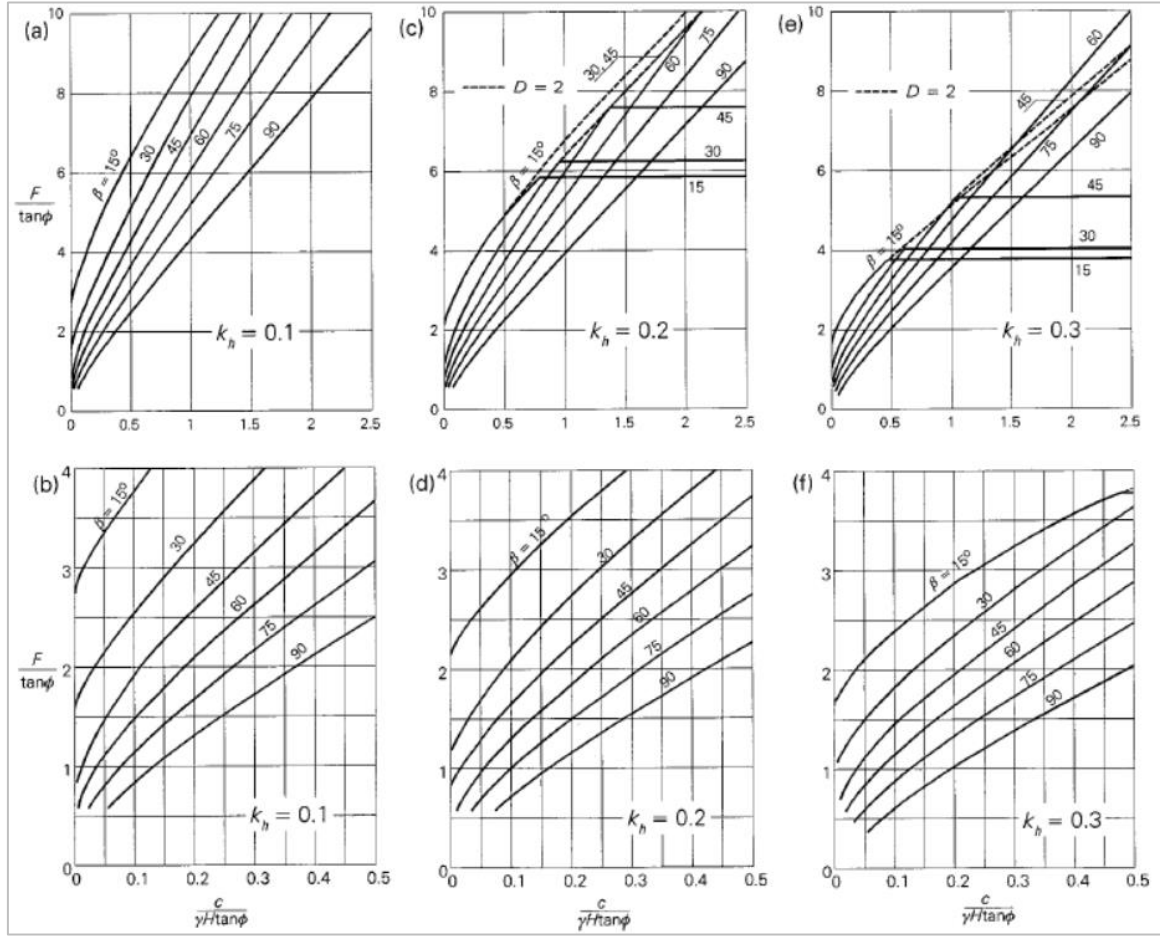
EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri



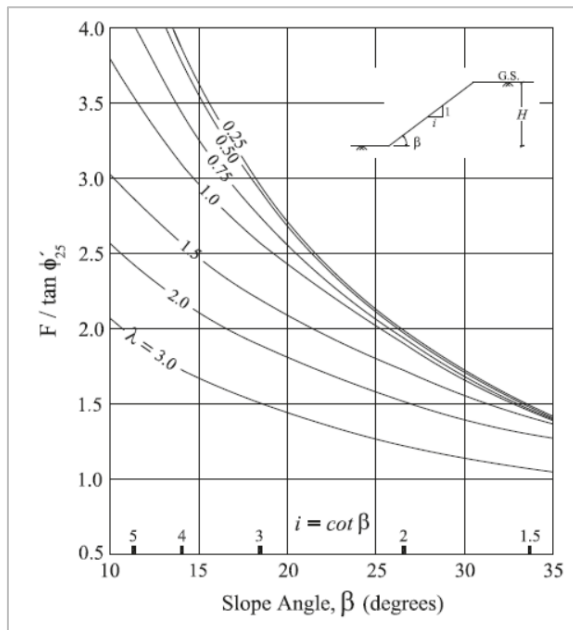
Şekil 1.7. Drenajsız durum stabilite grafiği (Michalowski, 1995)

Şekil 1.8. Drenajlı , statik durum stabilite grafiği, R_u etkisi (Michalowski, 2002)

EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri

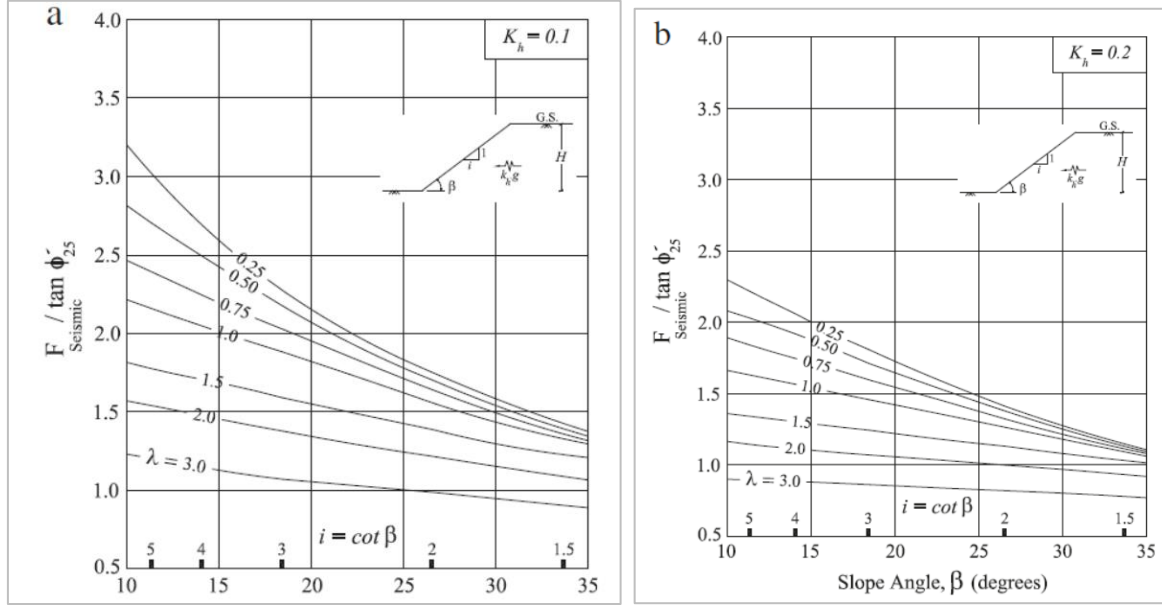
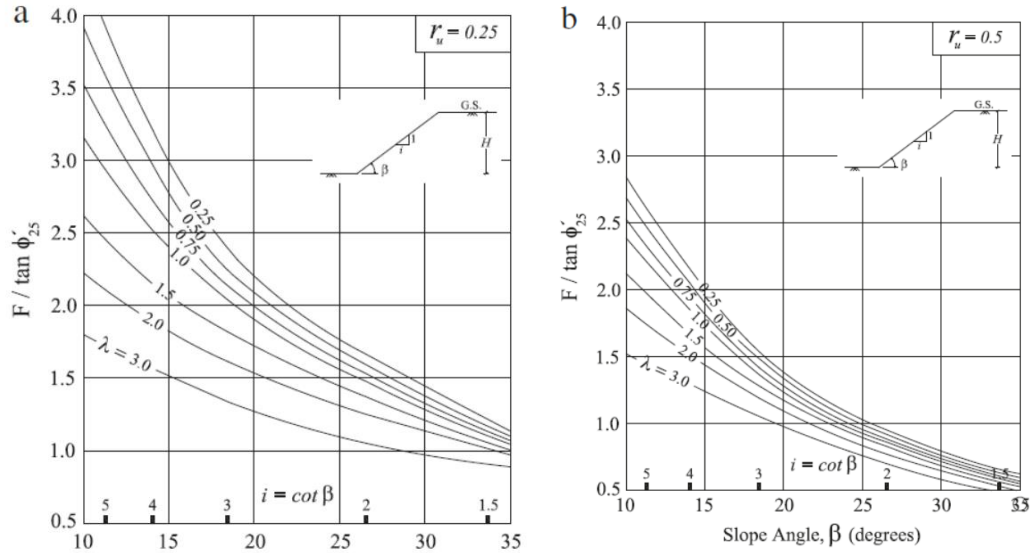


Şekil 1.9. Drenajlı , deprem durumu stabilite grafiği (Michalowski, 2002)

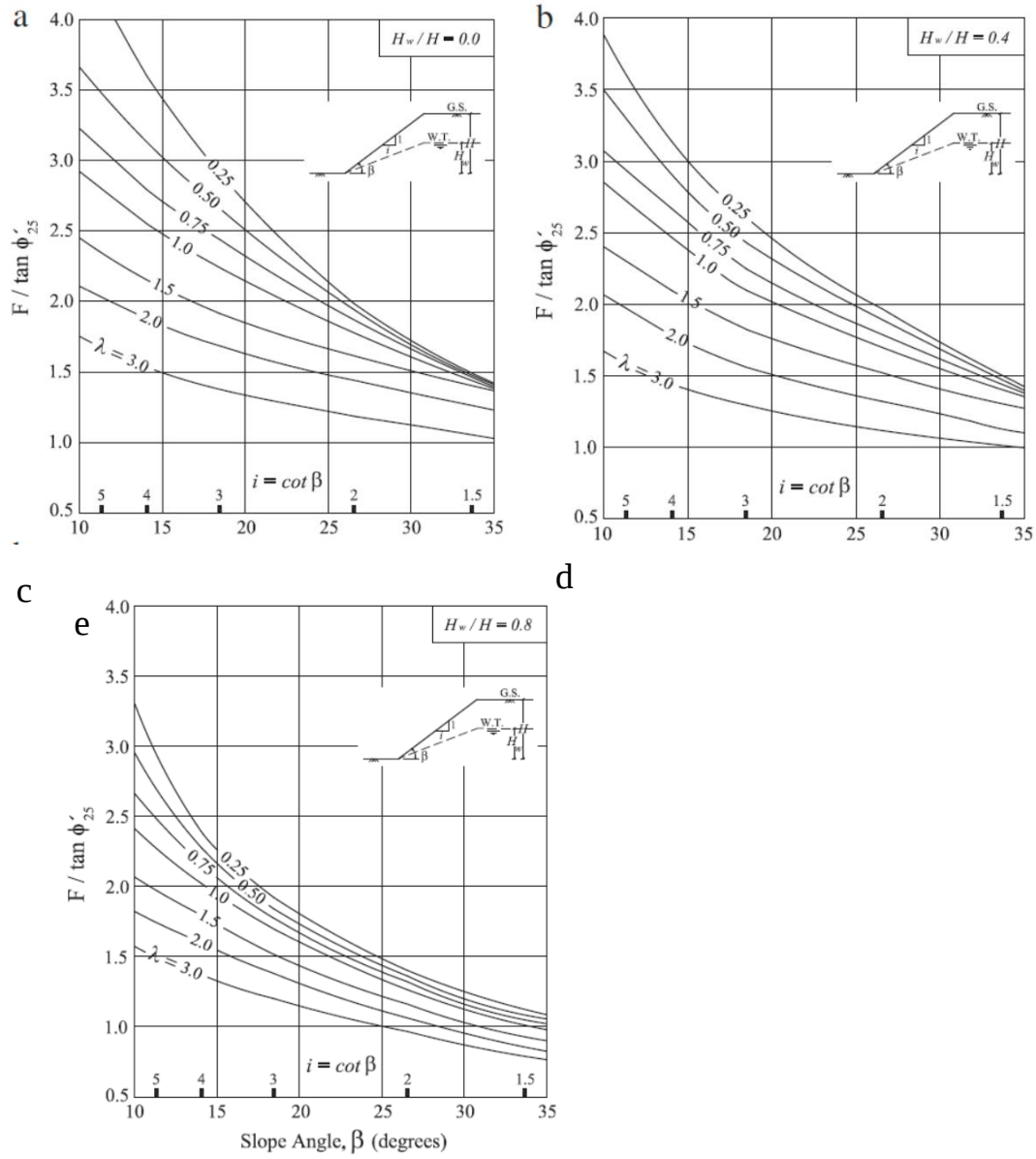


Şekil 1.10. Yer altı su seviyesinin olmadığı, statik durum stabilite grafiği (Eid, 2013)

EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri

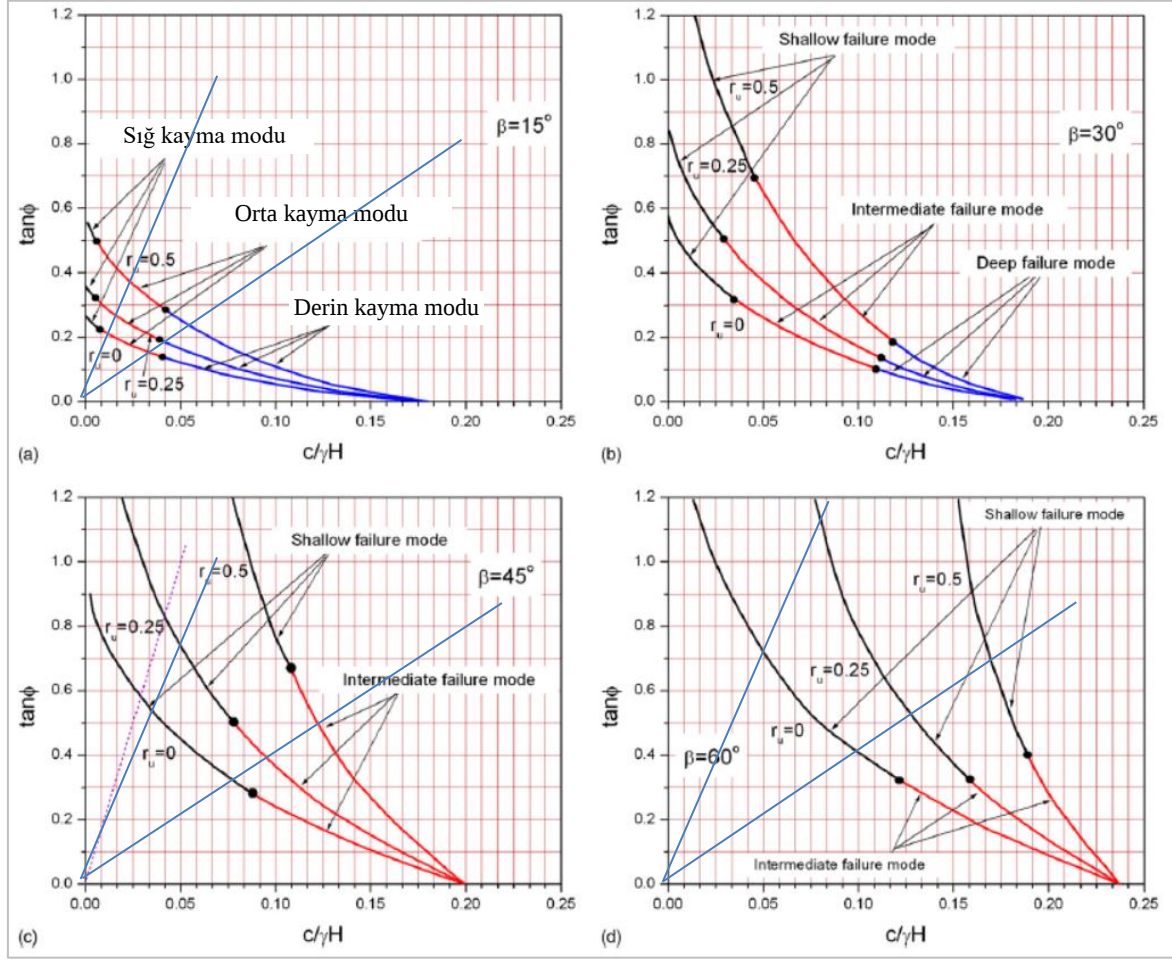
Şekil 1.11. Deprem durumu stabilite grafiği (Eid, 2013) (a) $K_h=0,1$ (b) $K_h=0,2$ Şekil 1.12. Statik durum durum yer altı suyu/boşluk suyu basıncı etkisi stabilite grafiği (Eid, 2013) (a) $r_u=0,25$ (b) $r_u = 0,5$ (c) $H_w / H = 0,0$ (d) $H_w / H = 0,4$ (e) $H_w / H = 0,8$

EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri

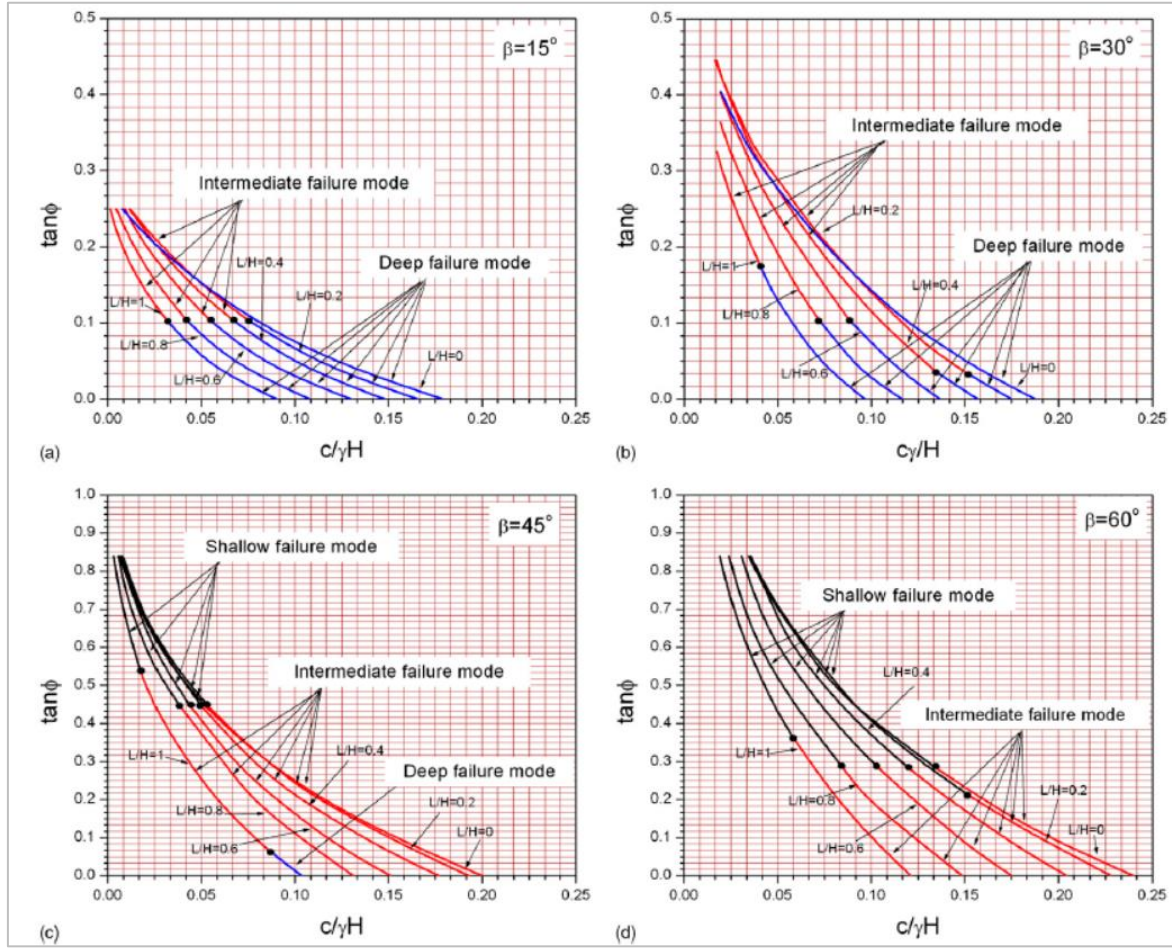


Şekil 1.13. (devam) statik durum durum yer altı suyu/boşluk suyu basıncı etkisi stabilite grafiği (Eid, 2013) (a) $r_u=0.25$ (b) $r_u=0.5$ (c) $H_w / H = 0.0$ (d) $H_w / H = 0.4$ (e) $H_w / H = 0.8$

EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri

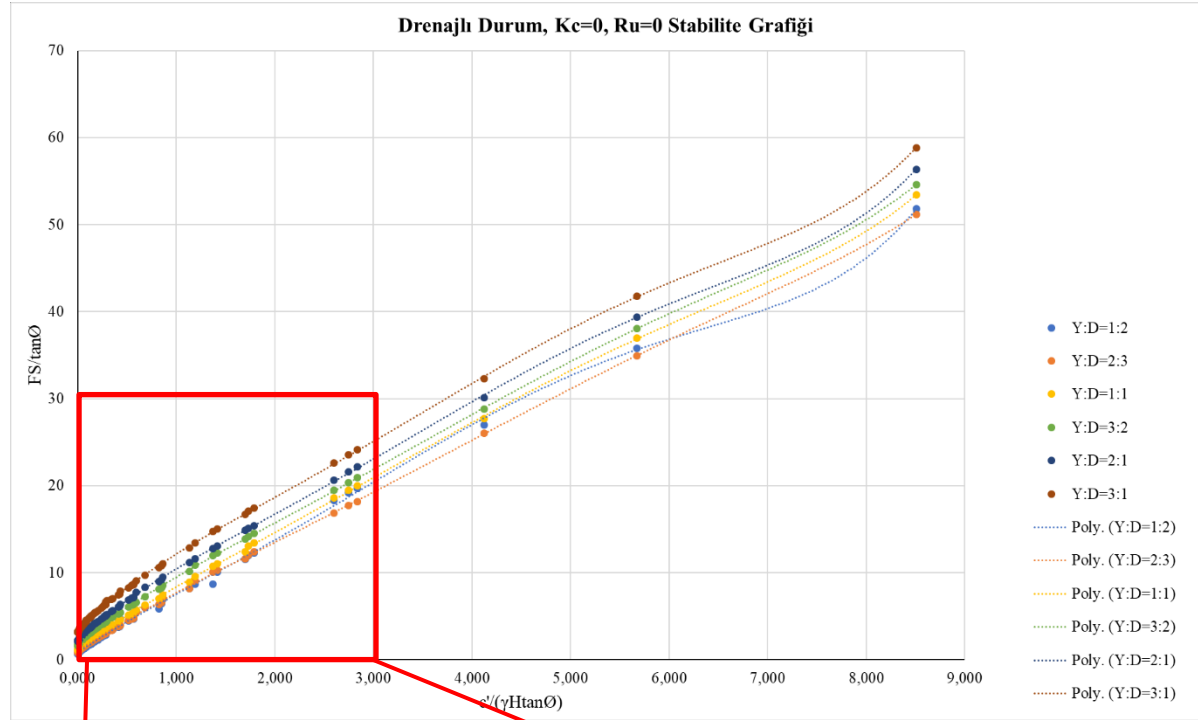
Şekil 1.14. Farklı r_u değerleri için stabilite grafikleri (Sun ve Zhao, 2013)

EK-1. (devam) Literatürde yer alan bazı stabilite grafik çözümleri

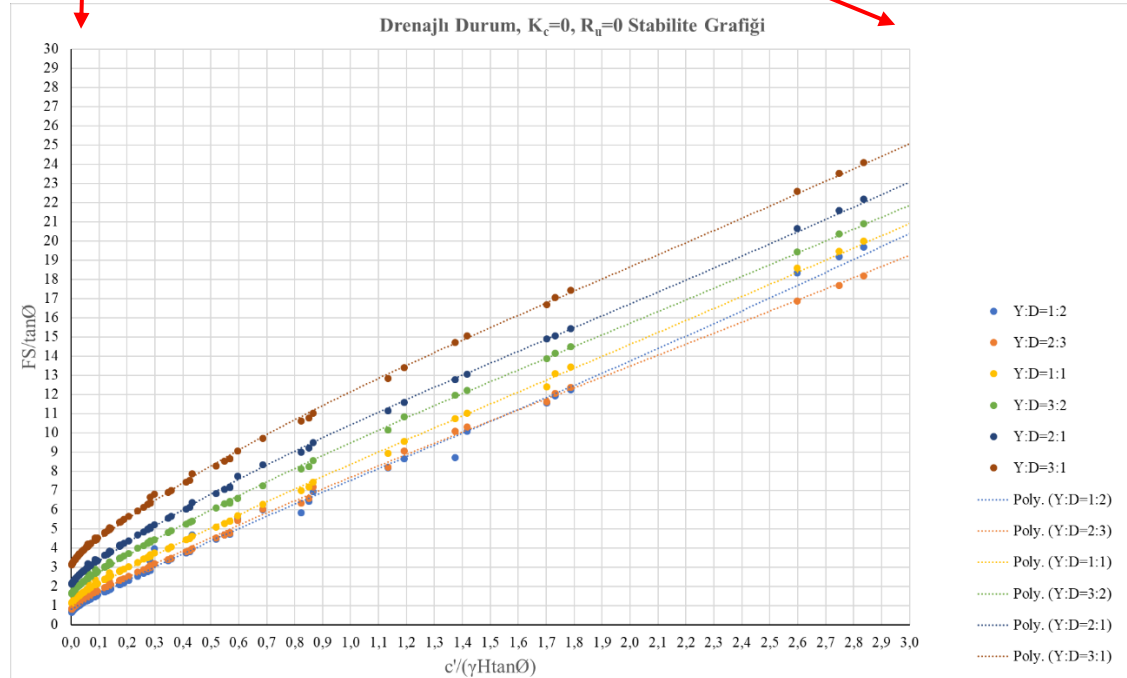


Şekil 1.15. Farklı L/H (su seviyesi/şev yüksekliği) değerleri için stabilite grafikleri (Sun ve Zhao, 2013)

EK-2. Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



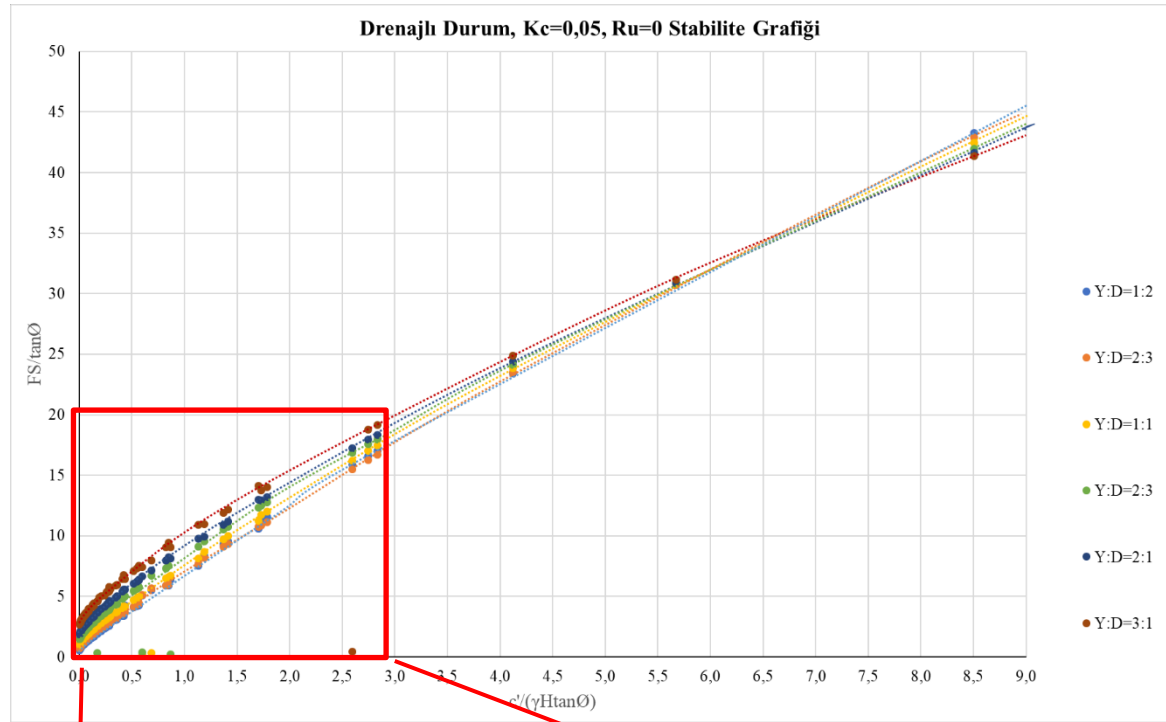
(a)



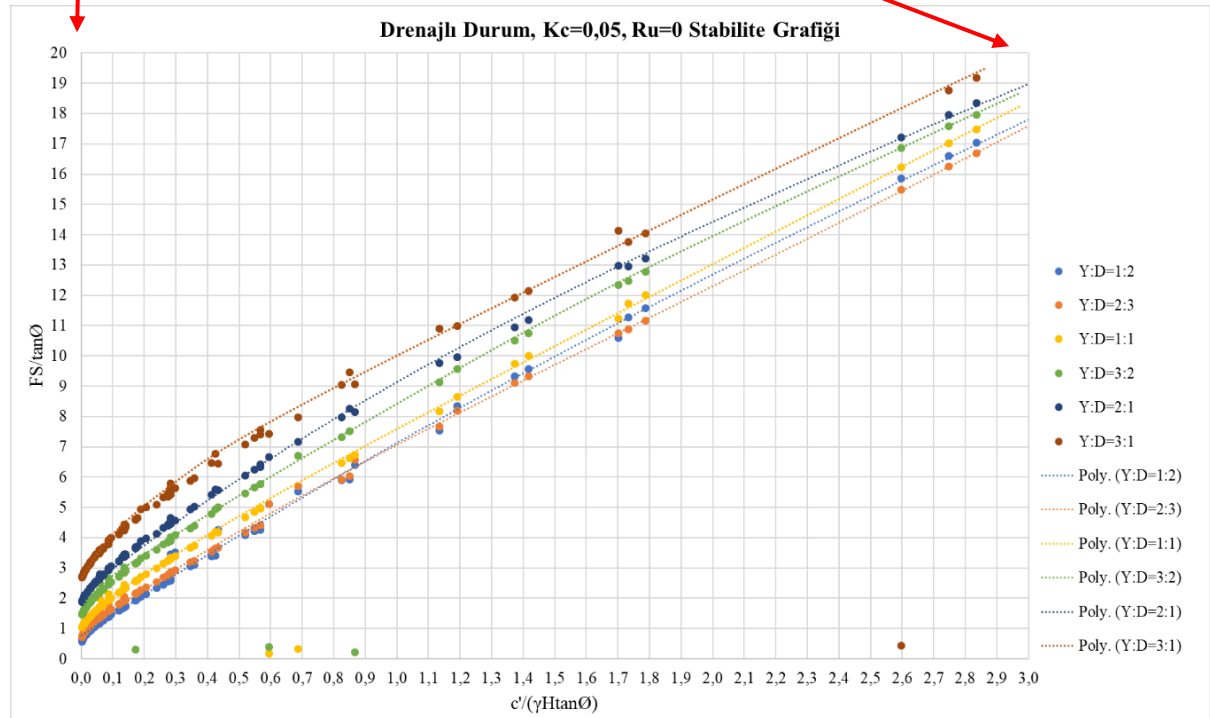
(b)

Şekil 2.1. Statik durum, drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



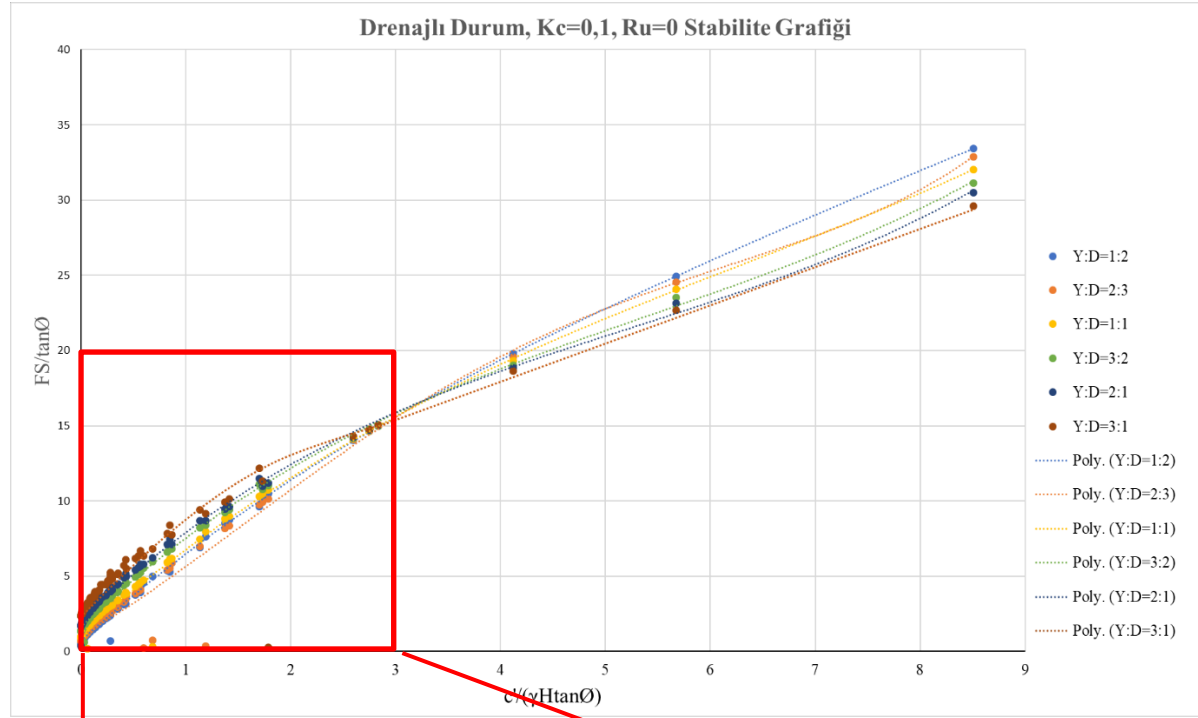
(a)



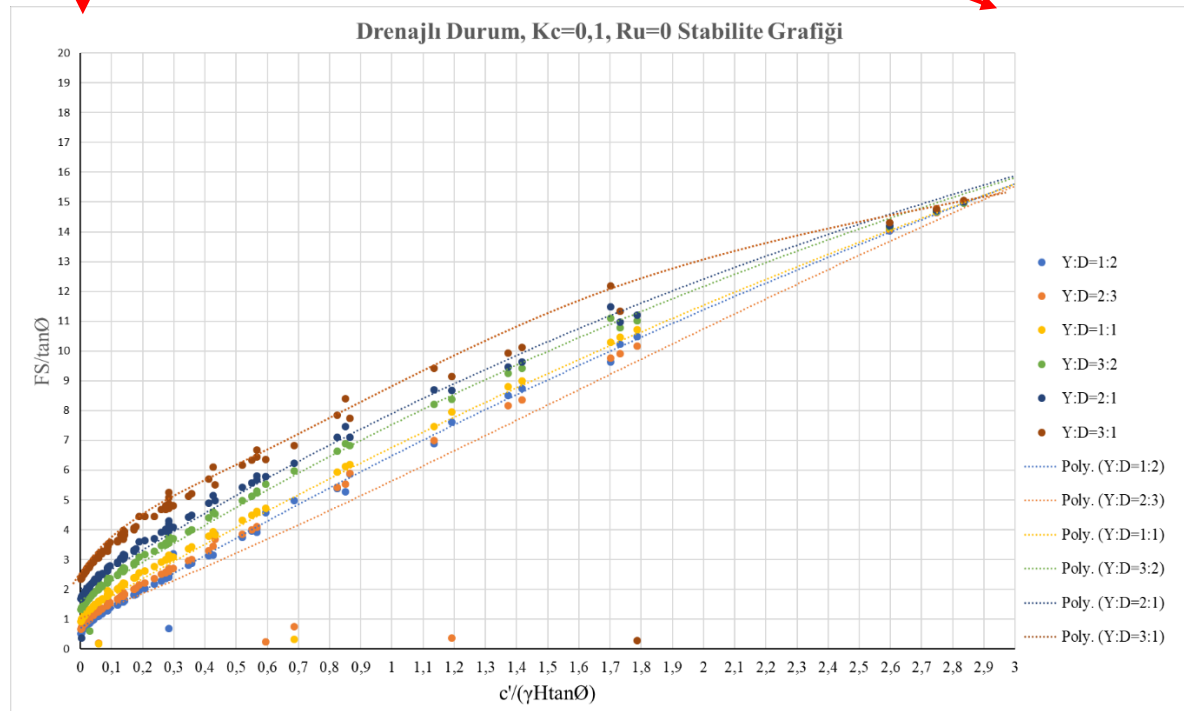
(b)

Şekil 2.2. Deprem durumu ($K_c=0,05$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0$ için stabilite grafiği
(a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



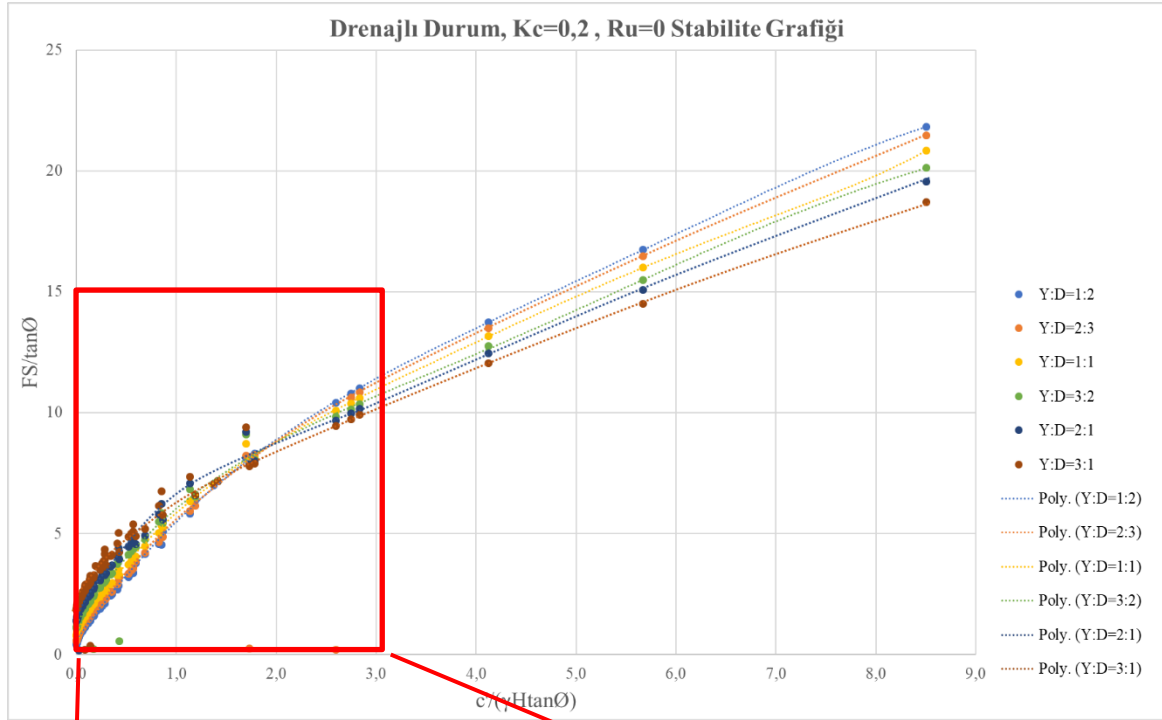
(a)



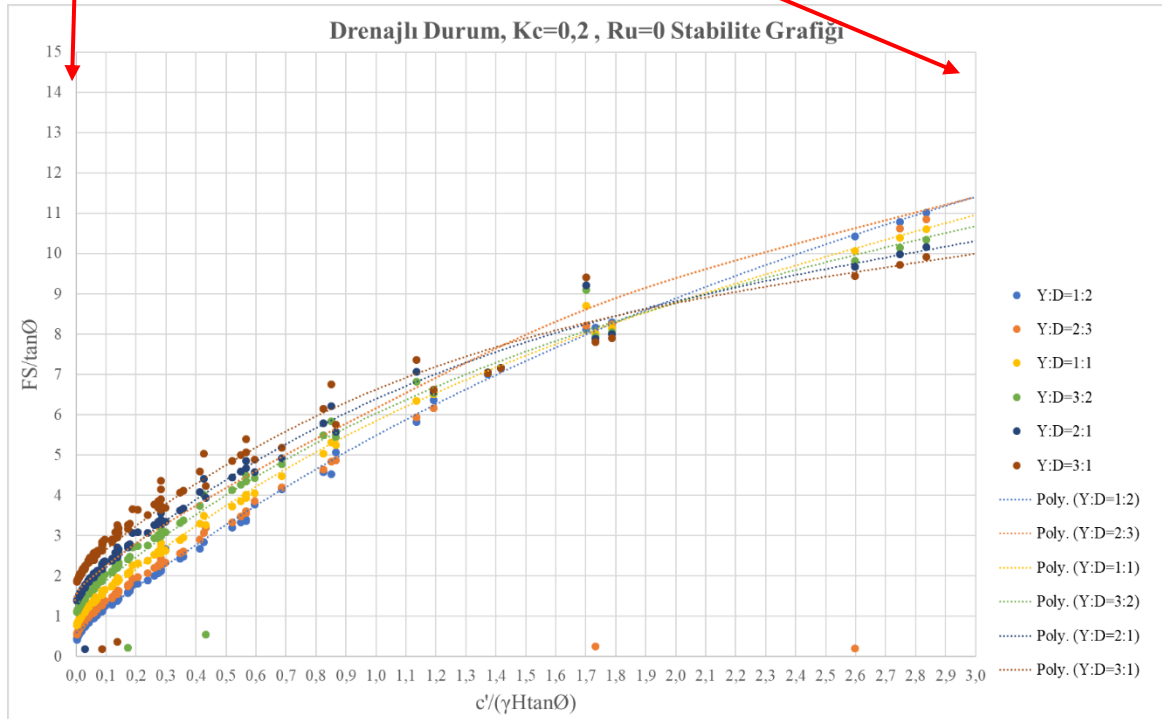
(b)

Şekil 2.3. Deprem durumu ($K_c=0,1$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0$ için stabilite grafiği
(a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



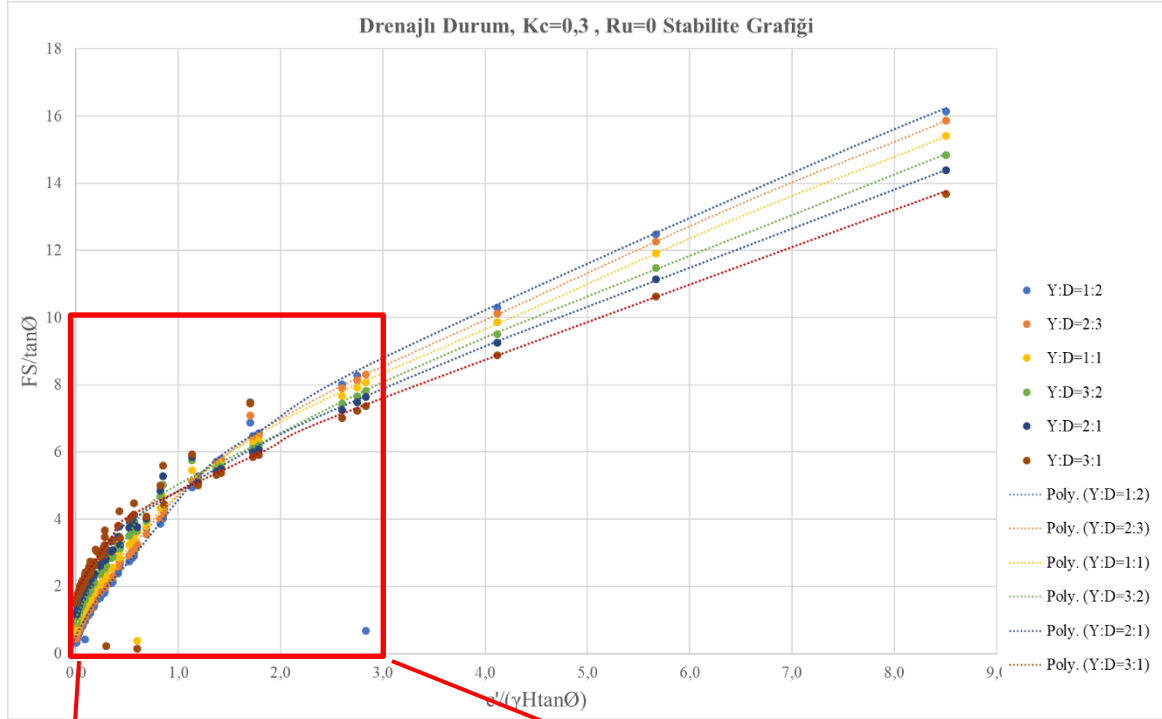
(a)



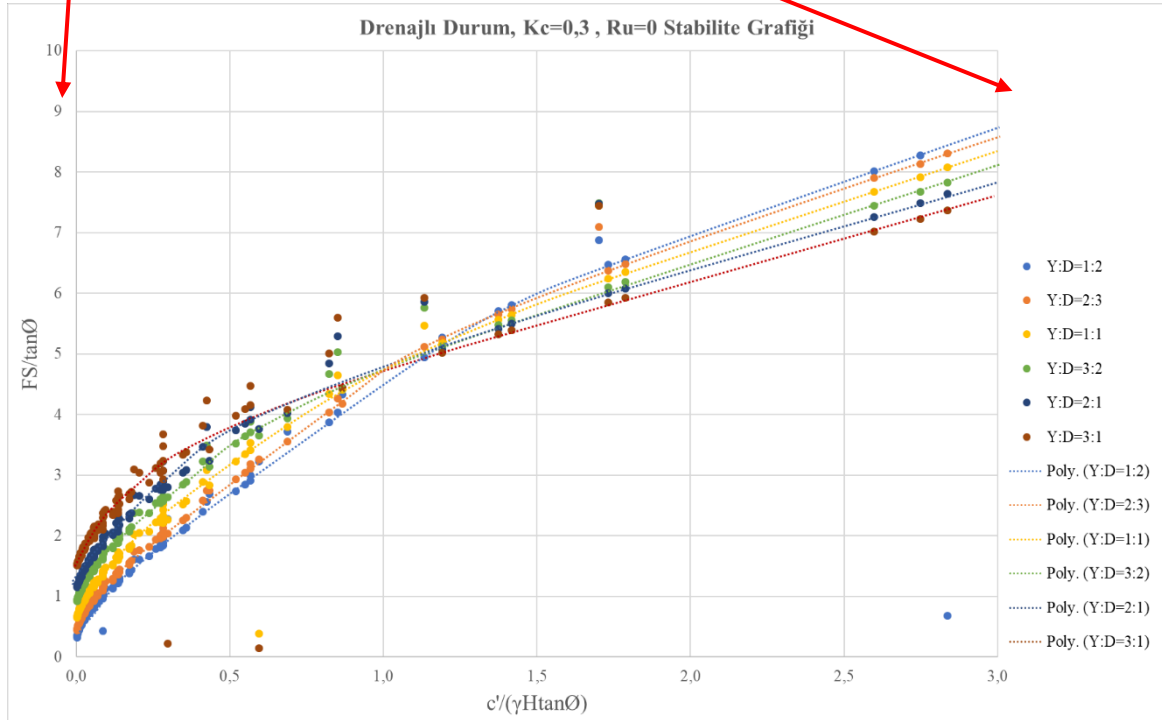
(b)

Şekil 2.4. Deprem durumu ($K_c=0,2$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0$ için stabilite grafiği
(a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



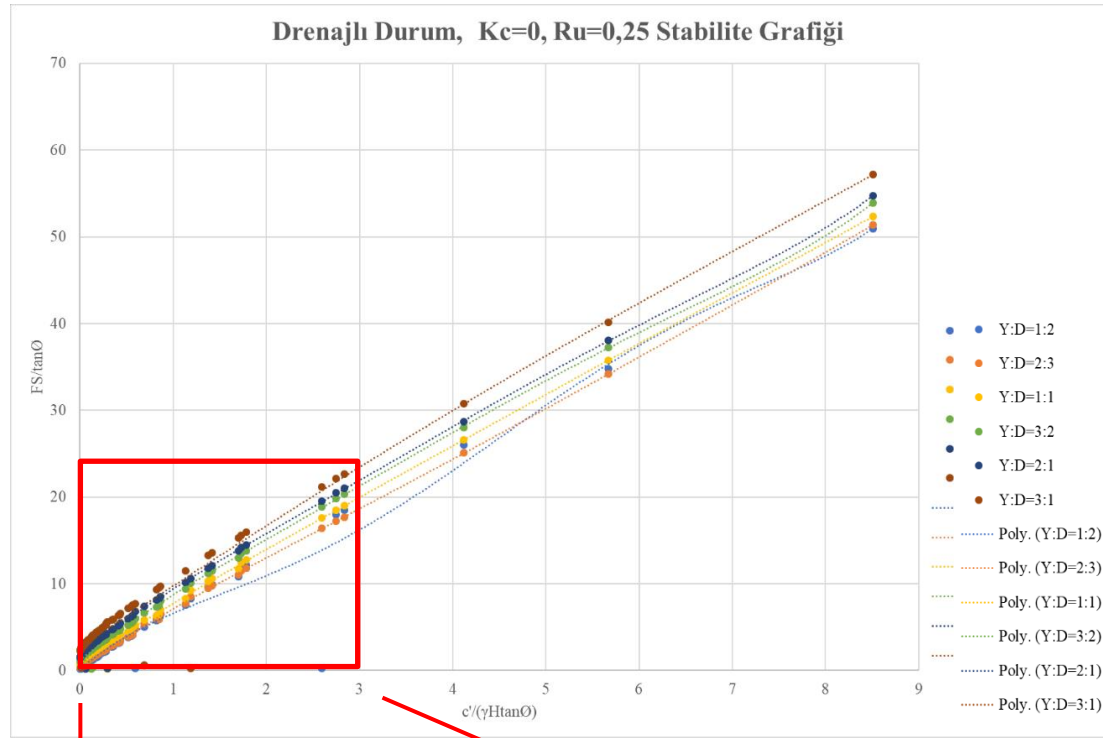
(a)



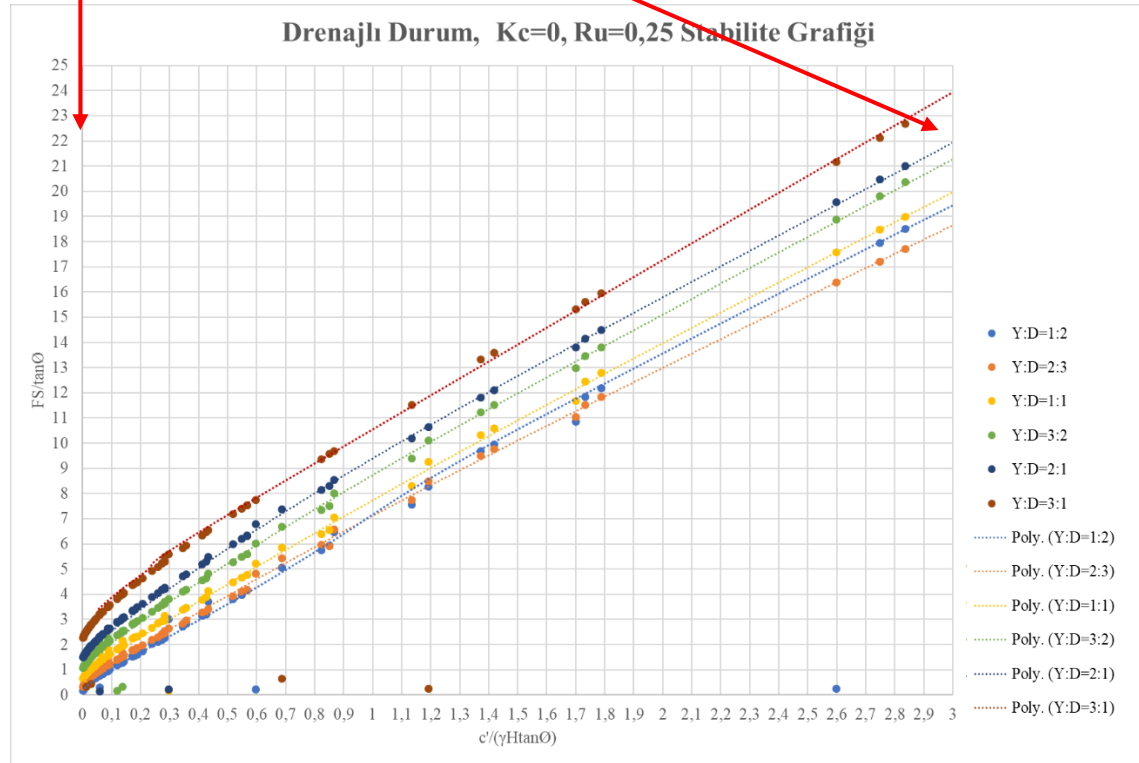
(b)

Şekil 2.5. Deprem durumu ($K_c=0,3$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0$ için stabilite grafiği
(a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli (c) Kayma daireleri mekanizmalarının dağılımı

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürüşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



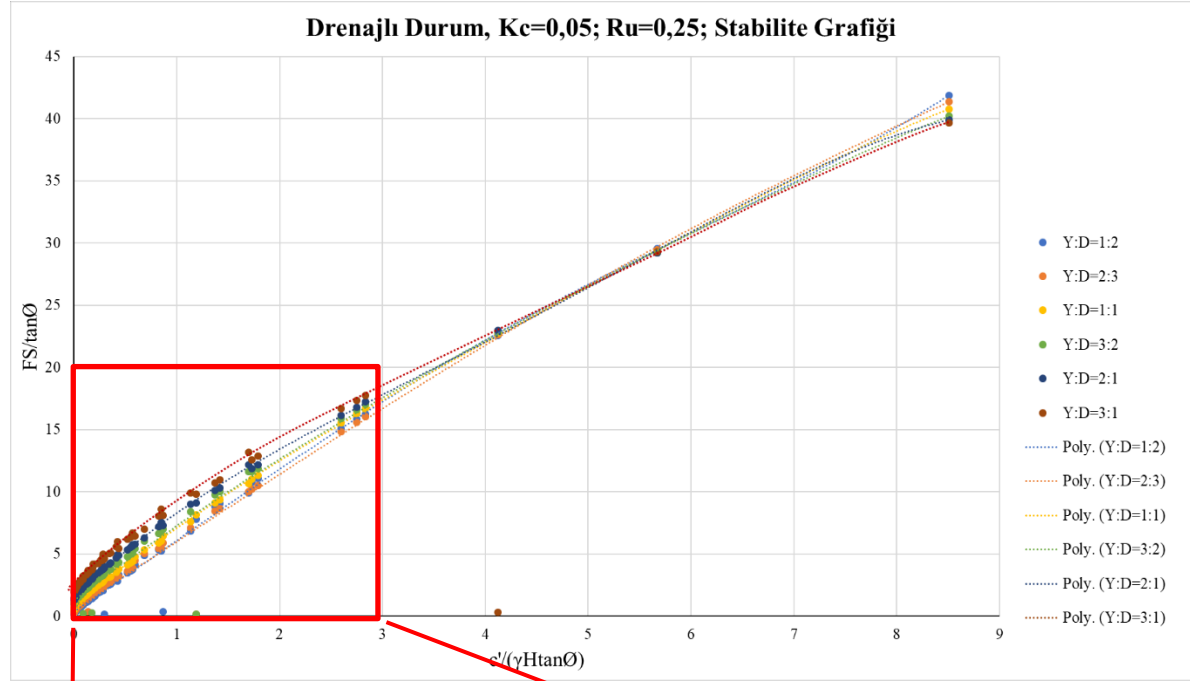
(a)



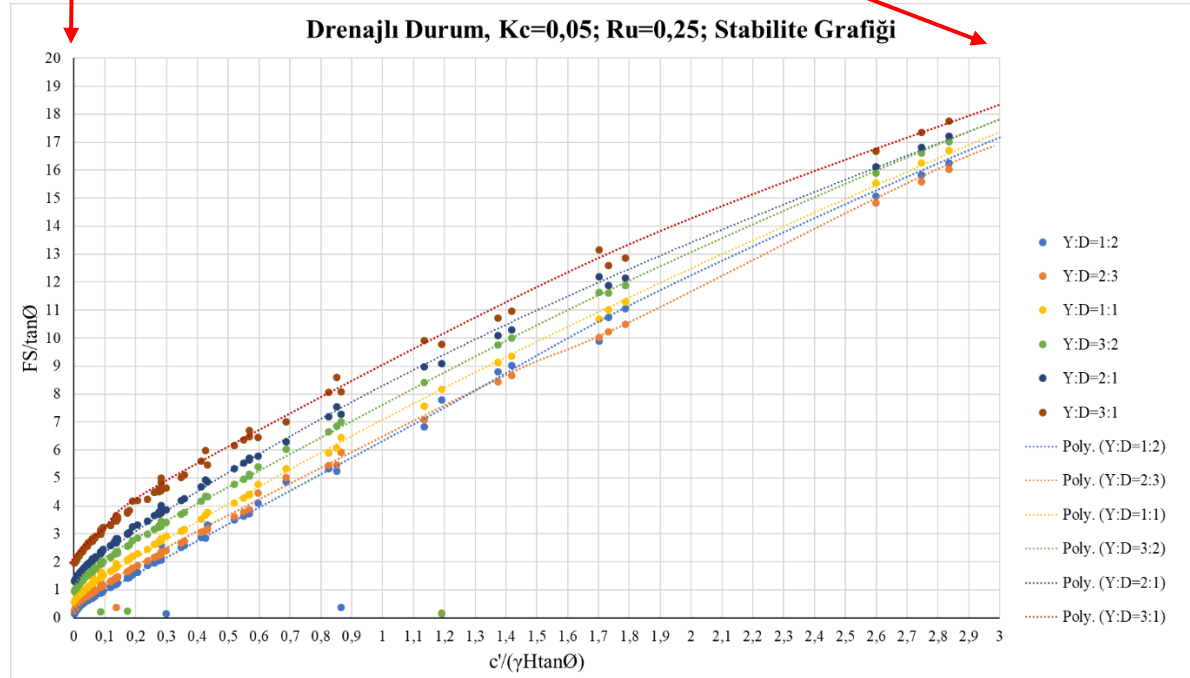
(b)

Şekil 2.6. Statik durum, drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,25$ için stabilite grafiği
(a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



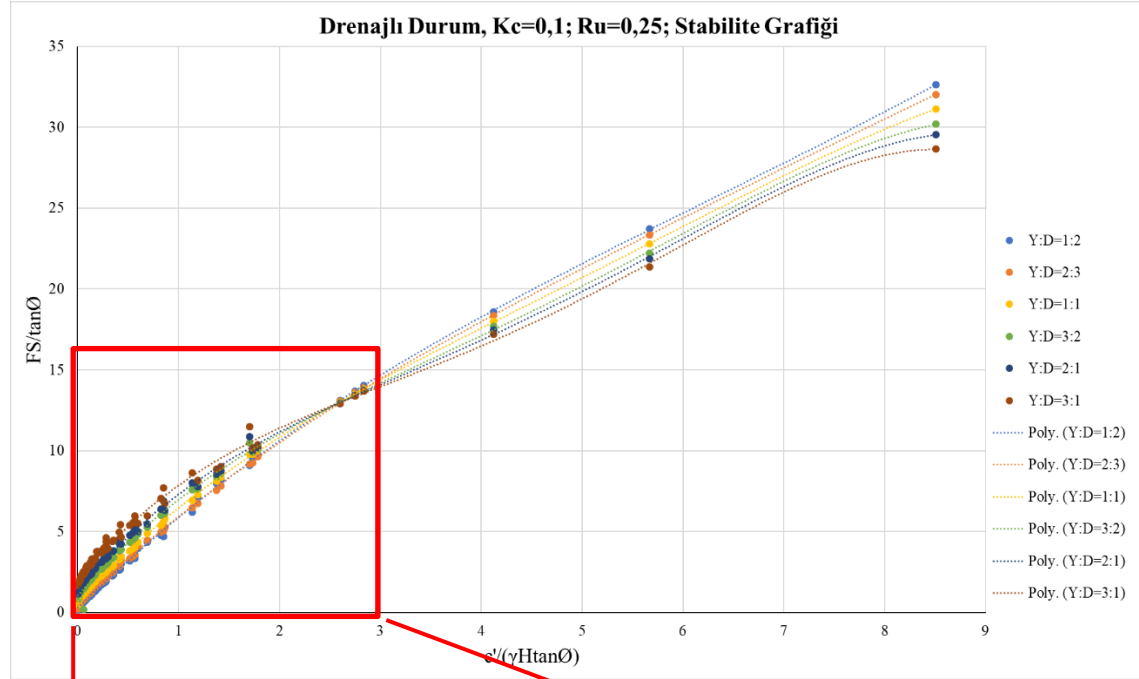
(a)



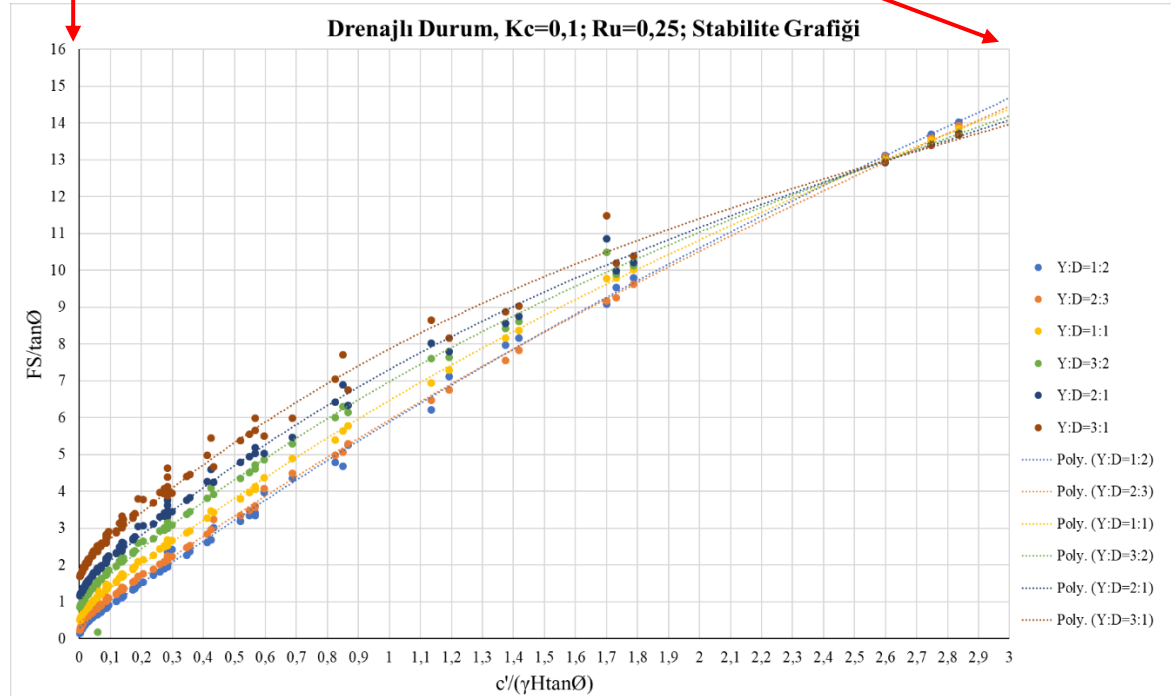
(b)

Şekil 2.7. Deprem durumu ($K_c=0,05$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,25$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



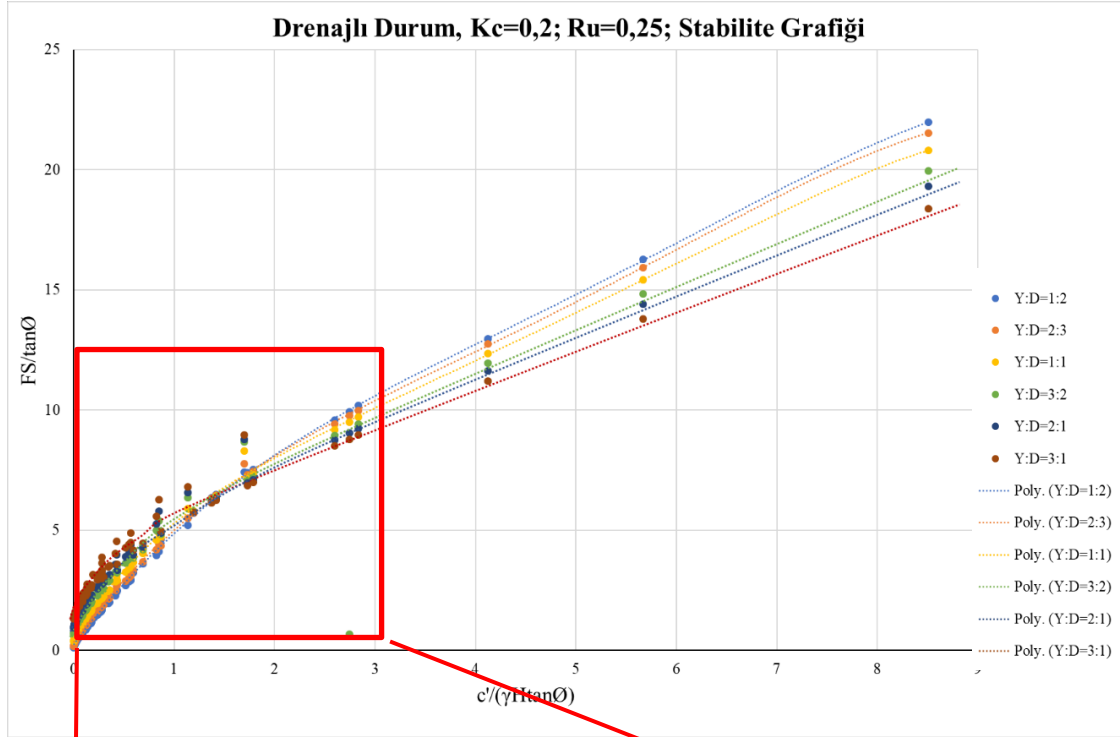
(a)



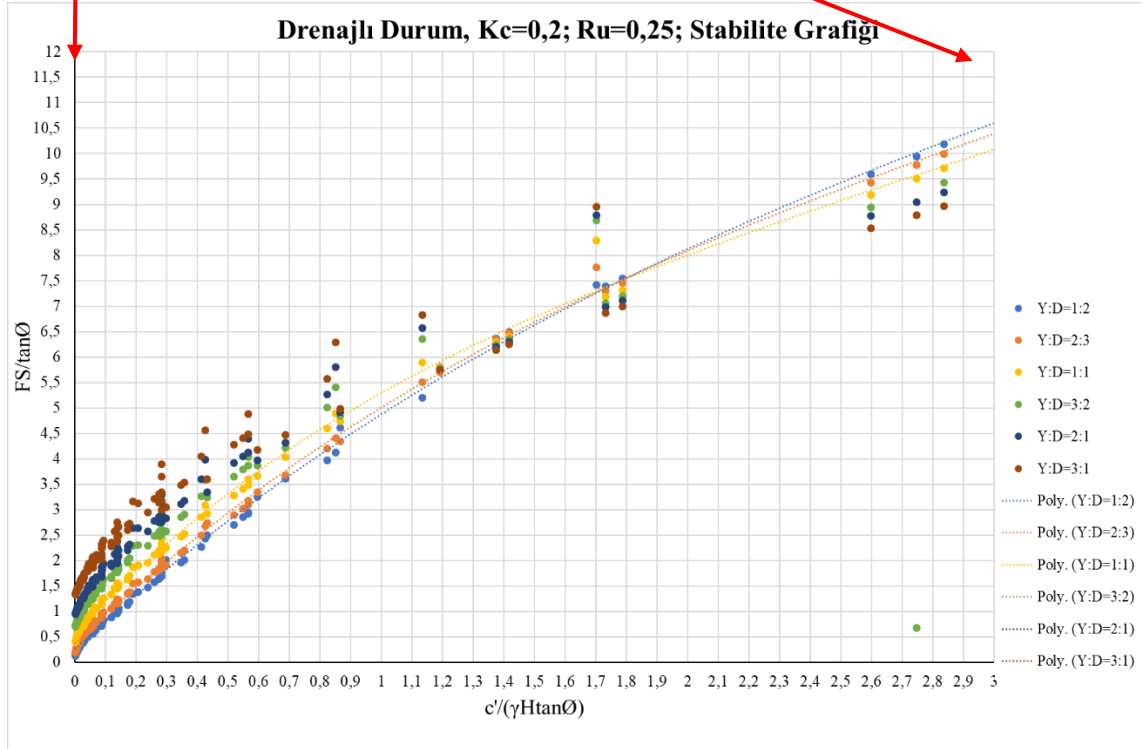
(b)

Şekil 2.8. Deprem durumu ($K_c=0,1$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,25$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürüşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



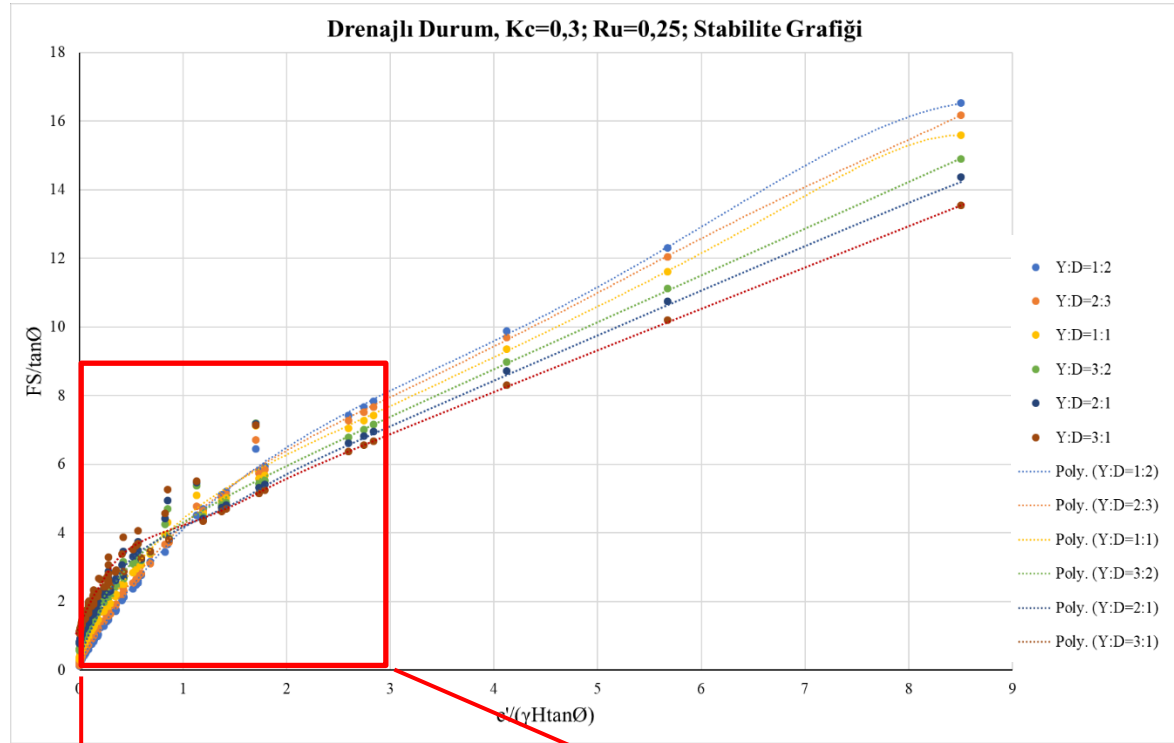
(a)



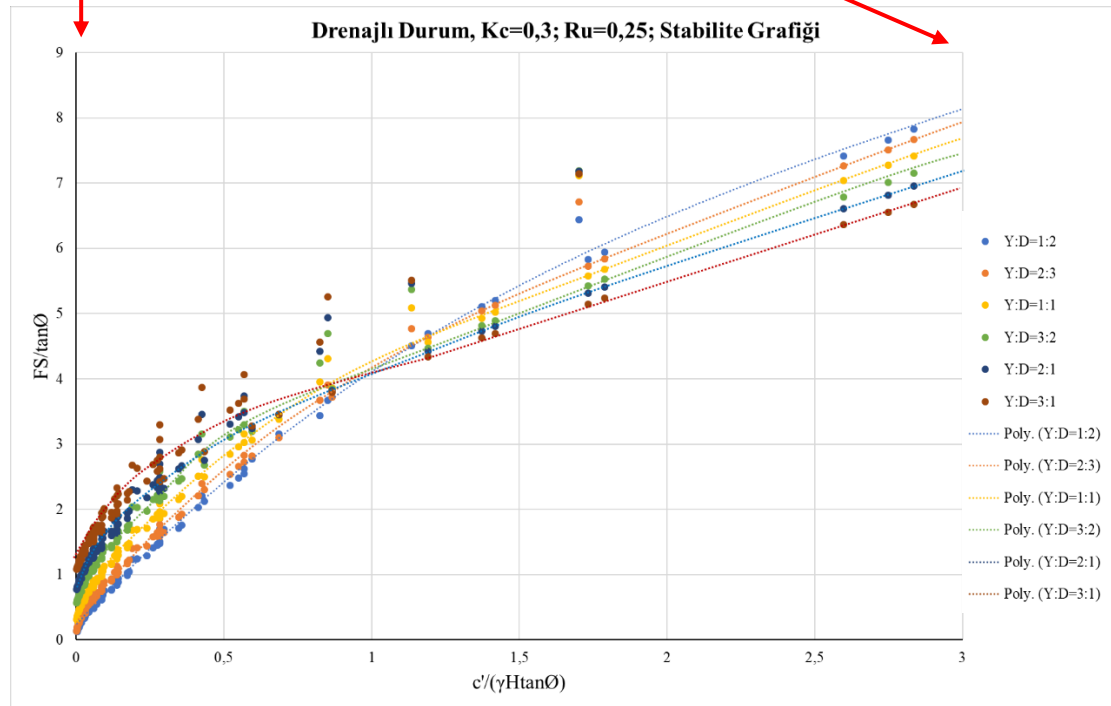
(b)

Şekil 2.9. Deprem durumu ($K_c=0,2$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,25$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



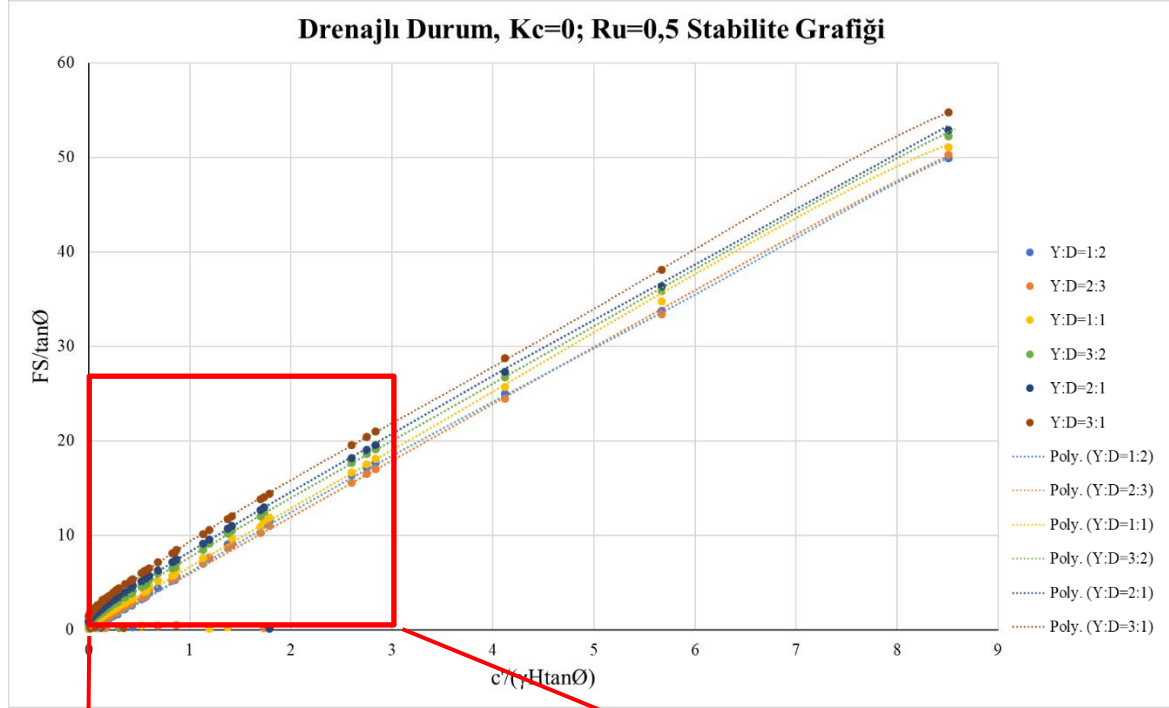
(a)



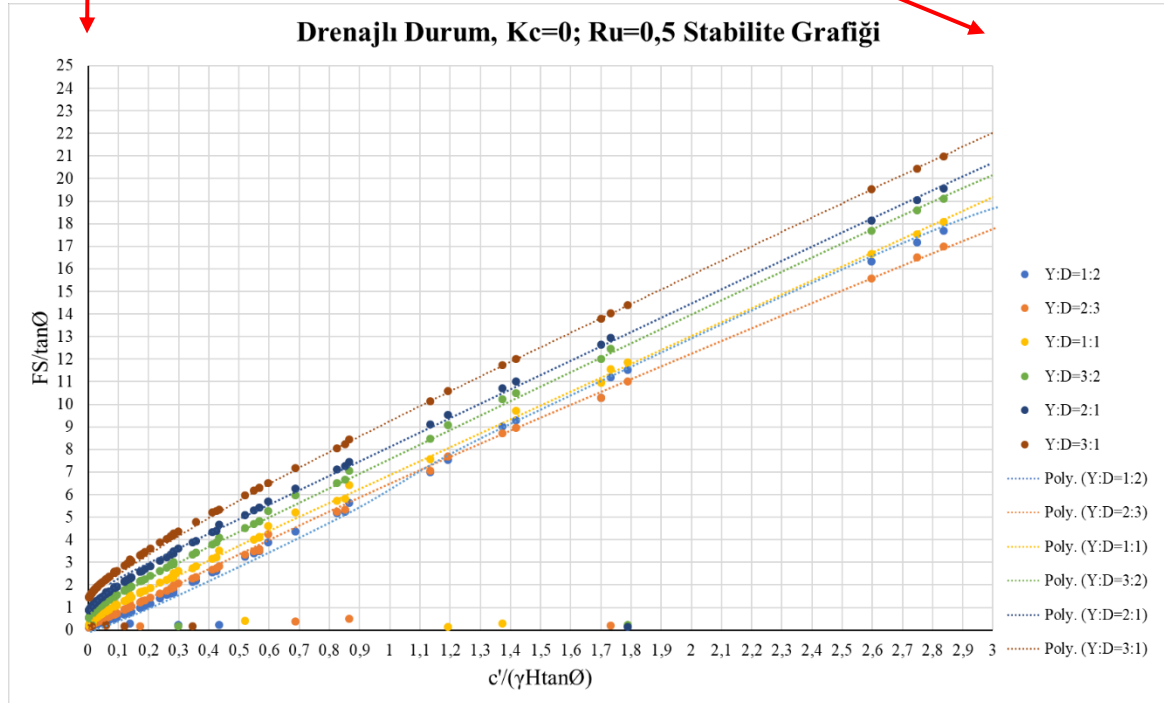
(b)

Şekil 2.10. Deprem durumu ($K_c=0,3$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,25$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürüşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



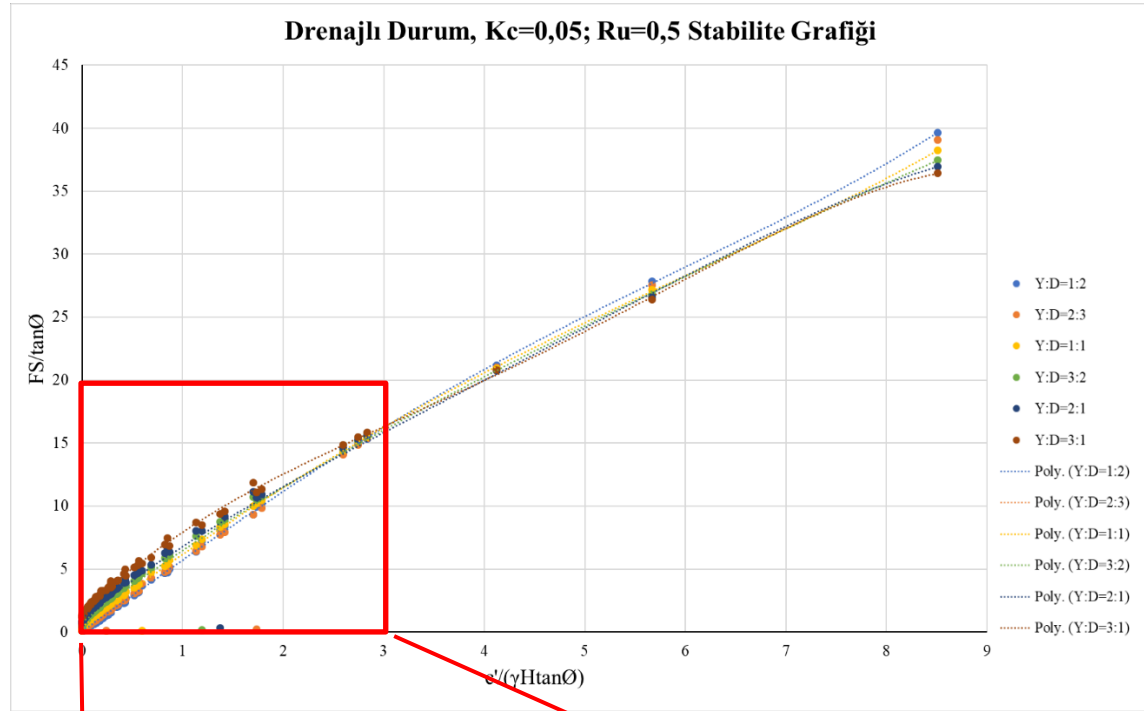
(a)



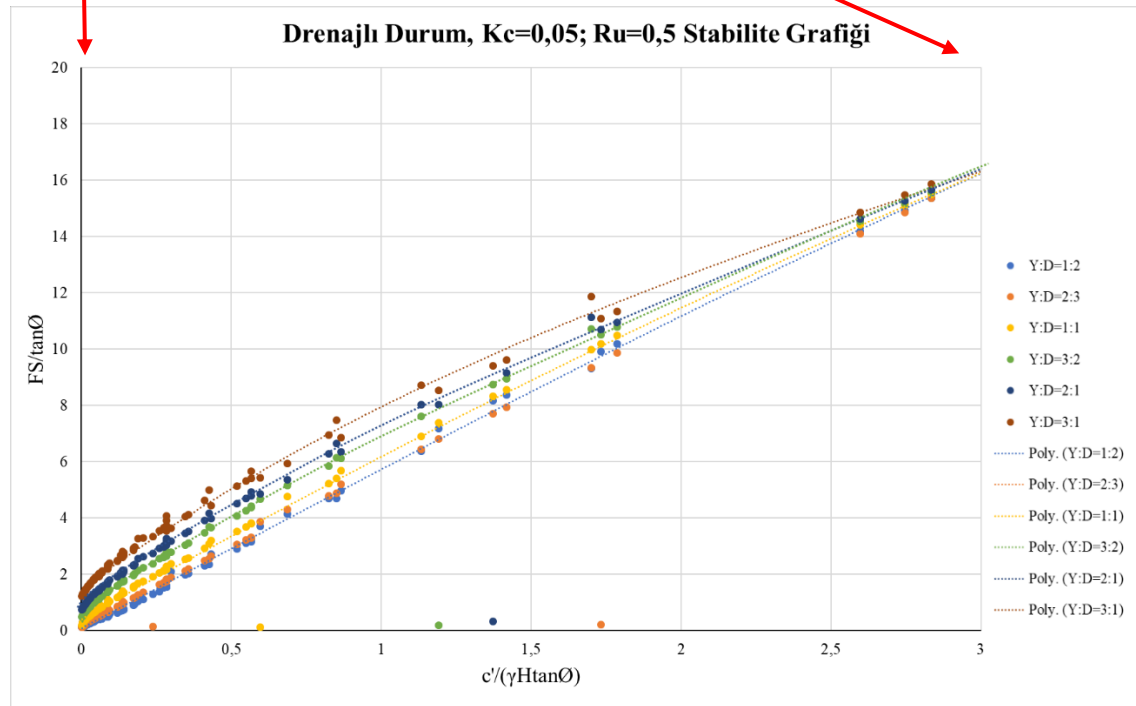
(b)

Şekil 2.11. Statik durum, drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,5$ için stabilite grafiği
(a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



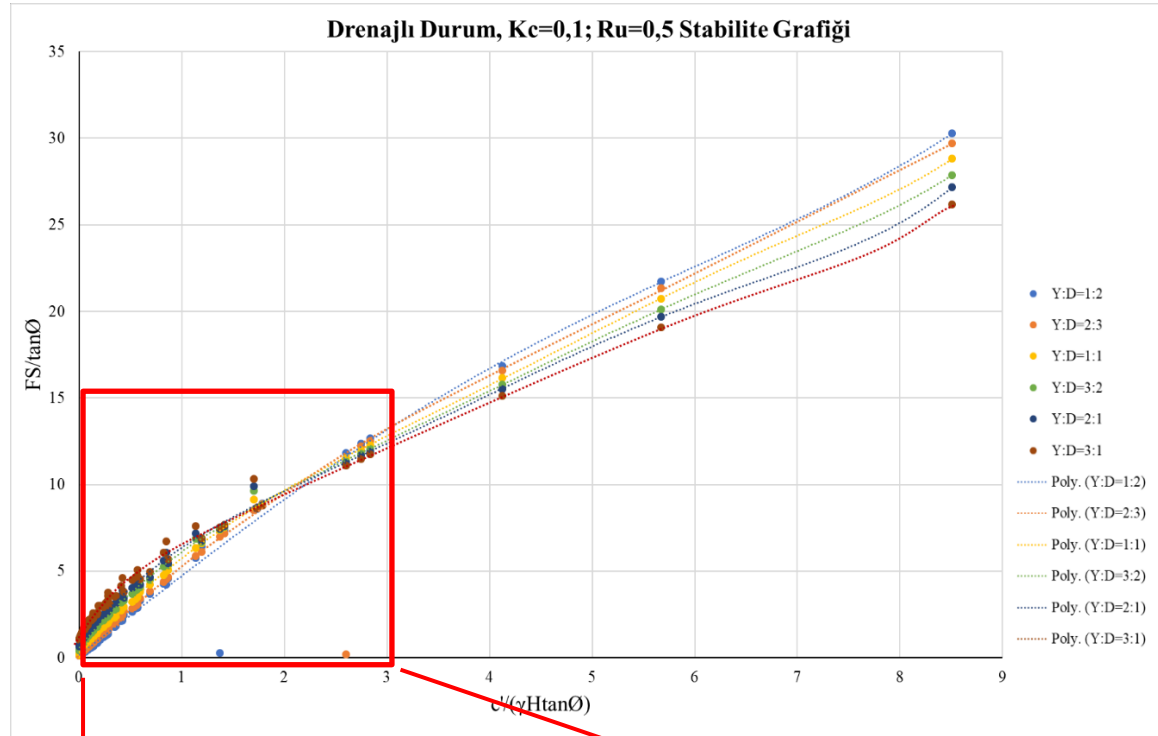
(a)



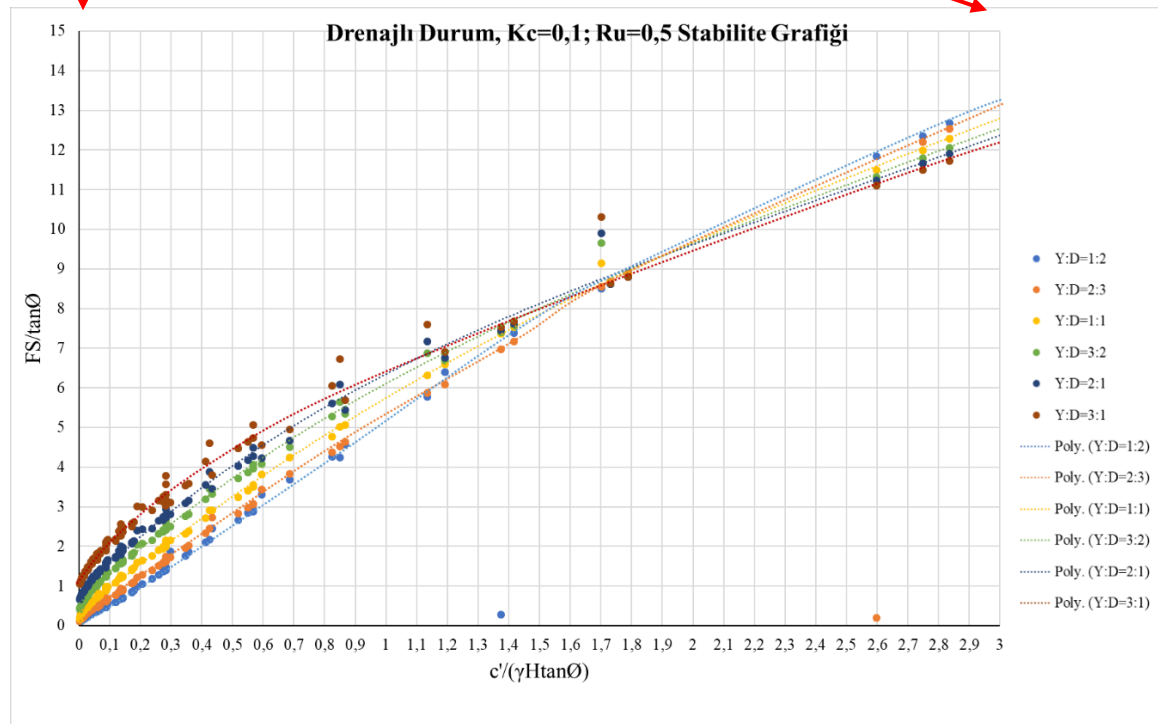
(b)

Şekil 2.12. Deprem durumu ($K_c=0,05$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,5$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



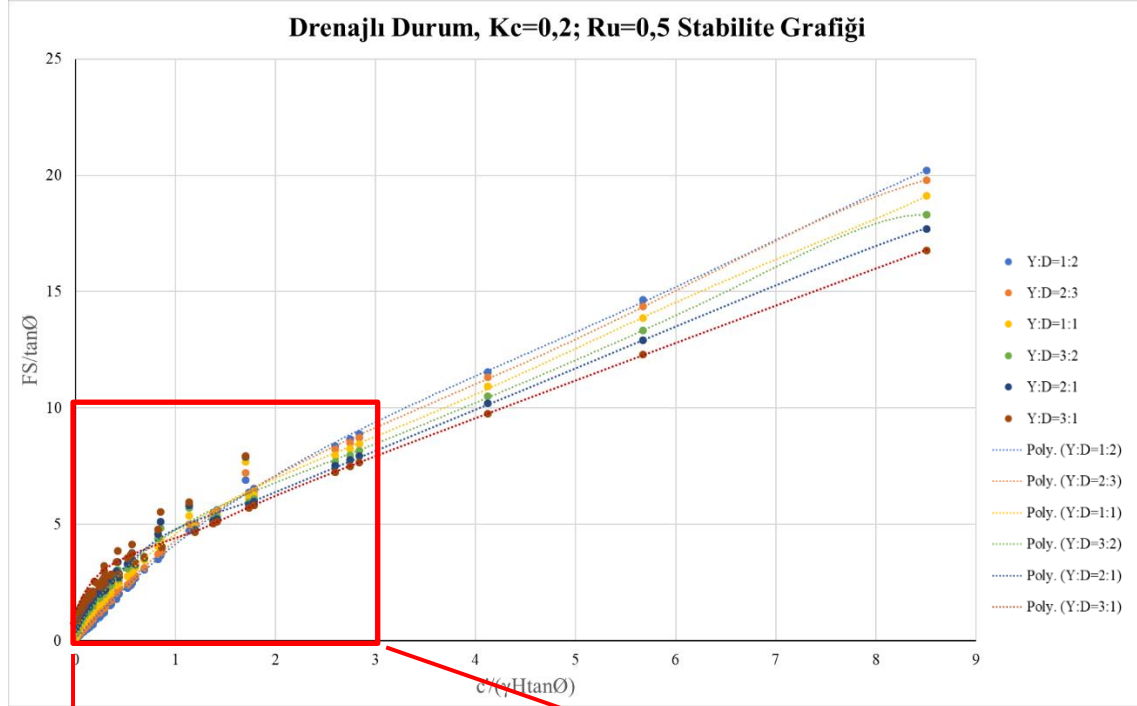
(a)



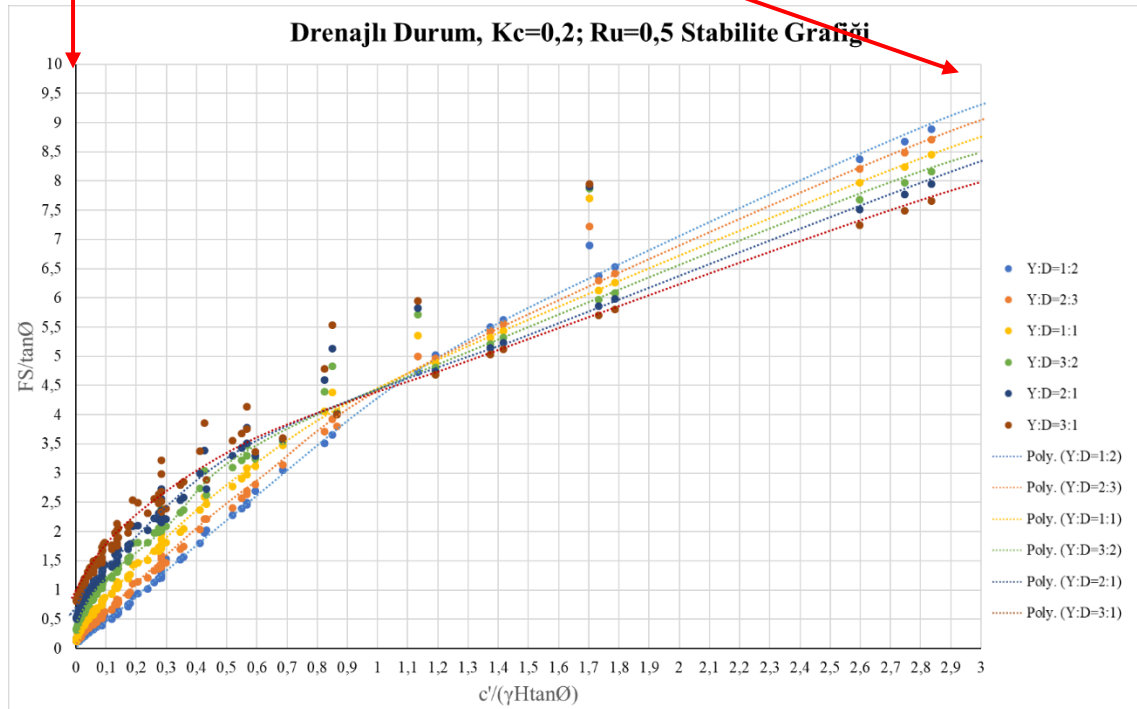
(b)

Şekil 2.13. Deprem durumu ($K_c=0,1$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,5$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



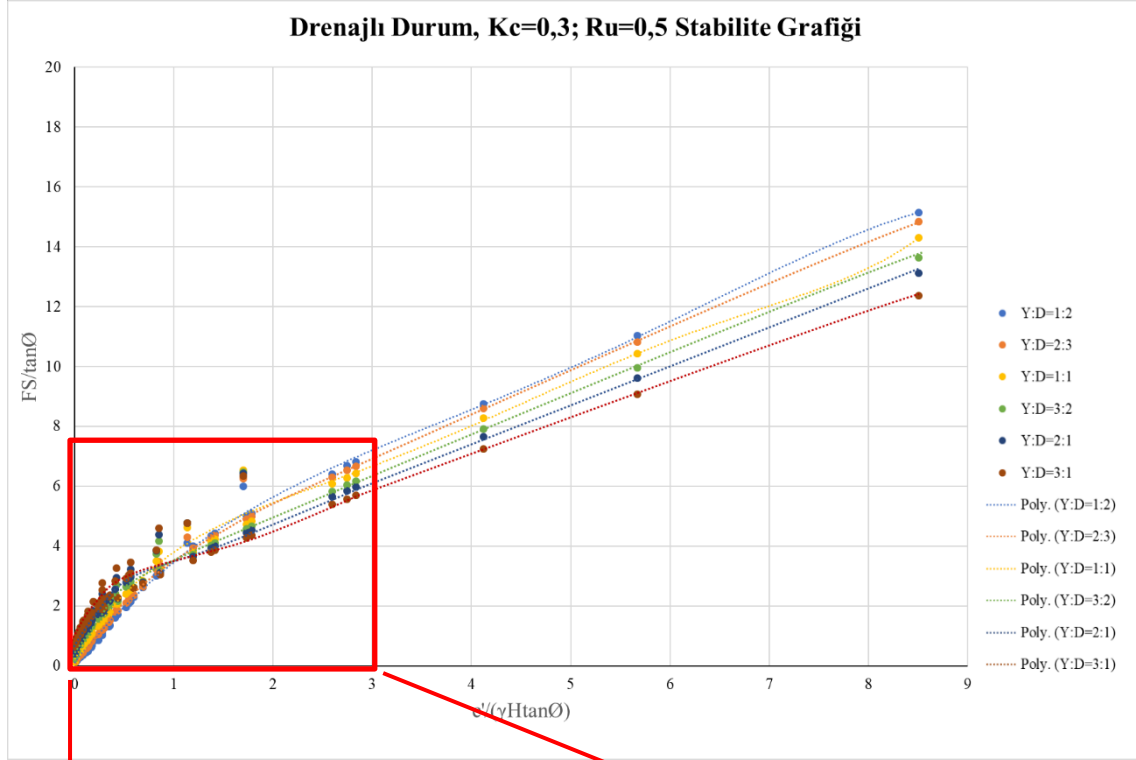
(a)



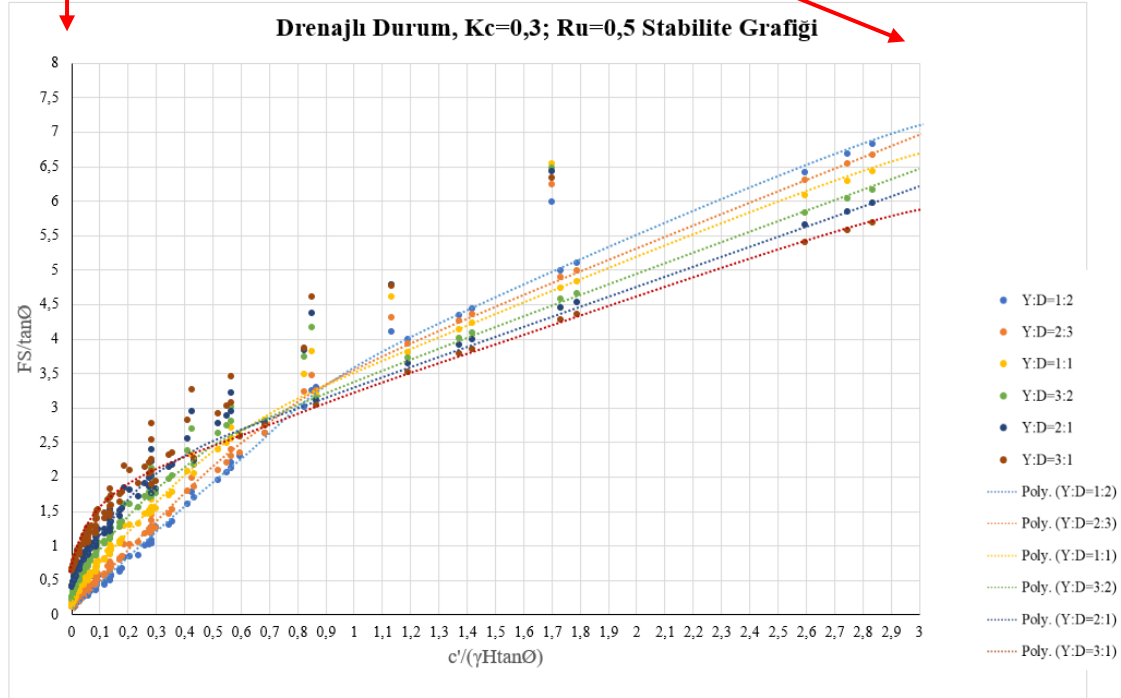
(b)

Şekil 2.14. Deprem durumu ($K_c=0,2$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,5$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli (c) Kayma daireleri mekanizmalarının dağılımı

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürüşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



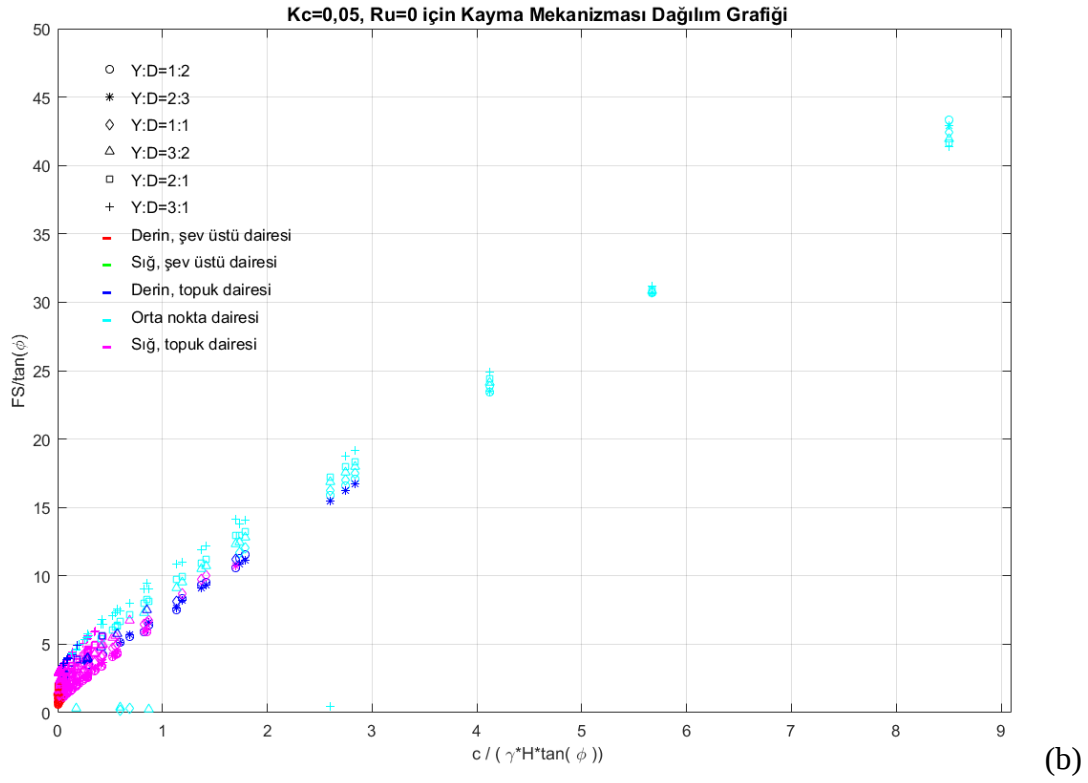
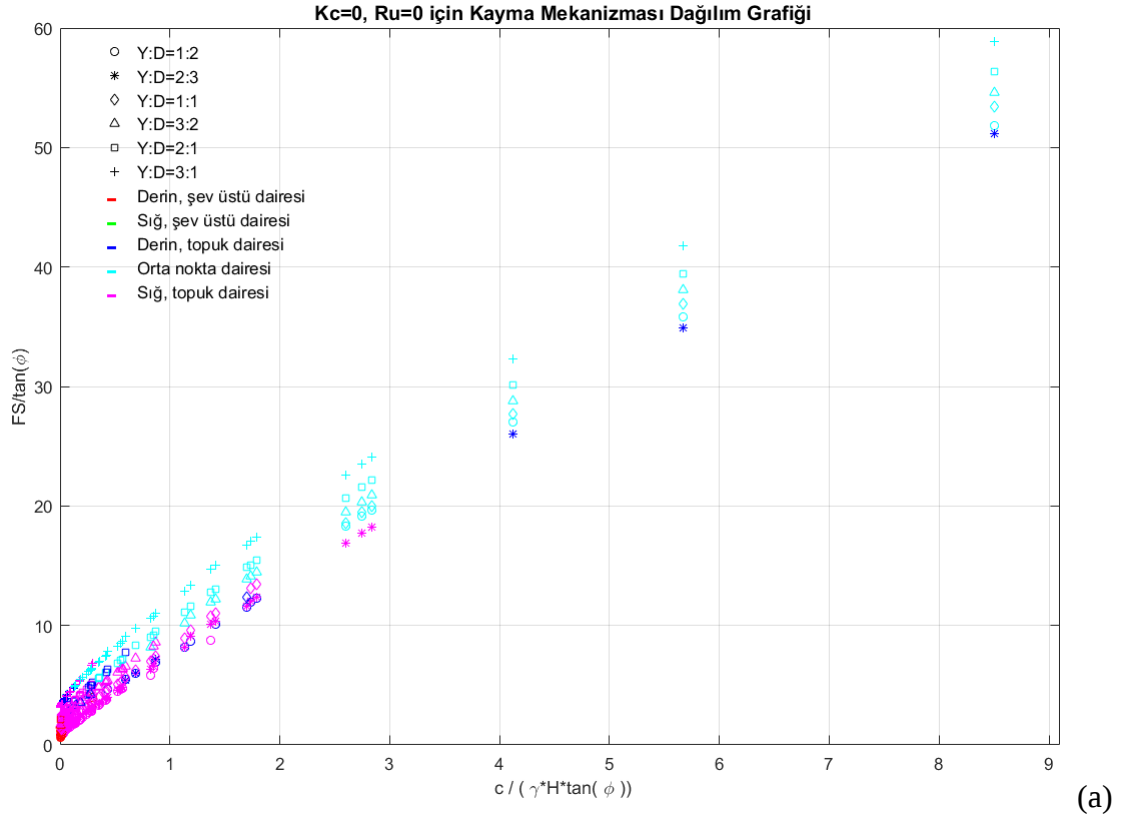
(a)



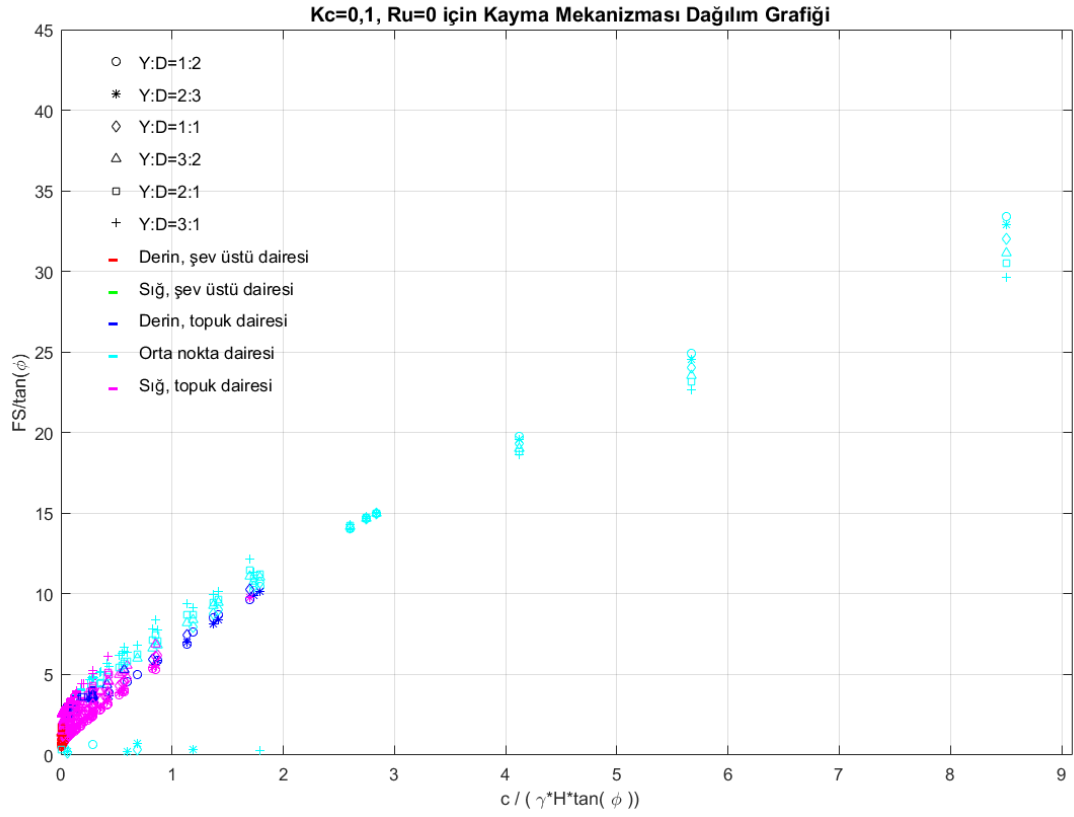
(b)

Şekil 2.15. Deprem durumu ($K_c=0,3$), drenajlı zemin koşulu, $Q=0$, $R_u=0,5$ için stabilite grafiği (a) tam ölçekli (b) yakın ölçekli

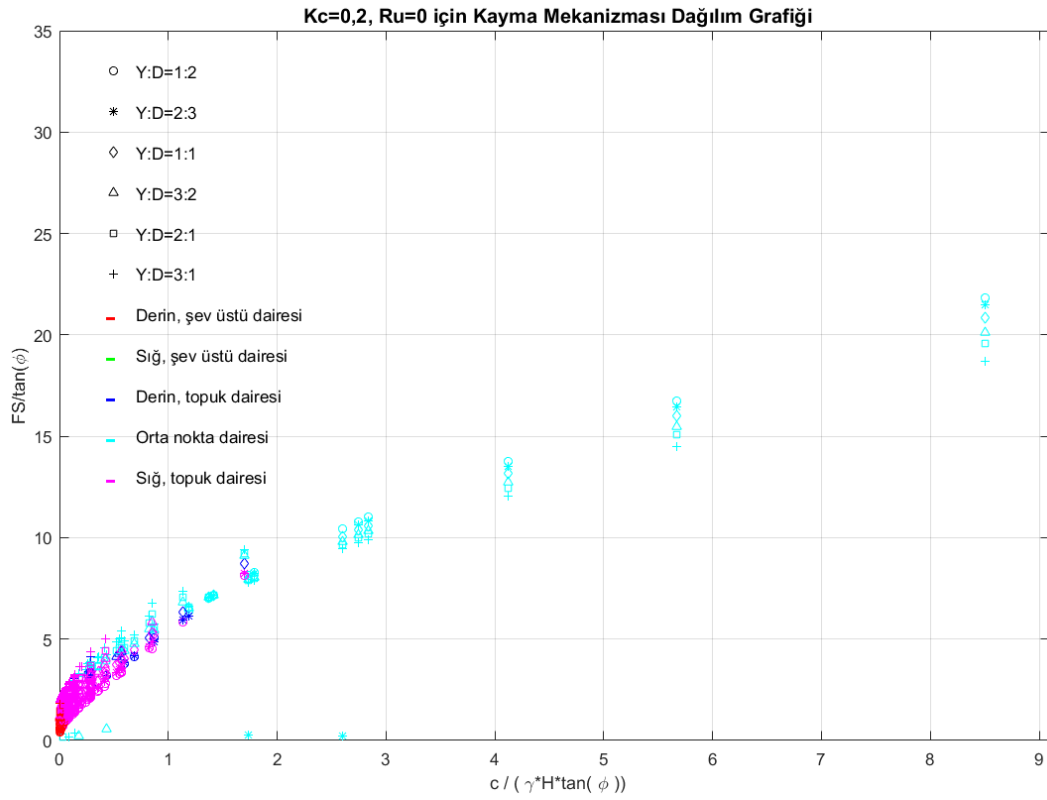
EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri

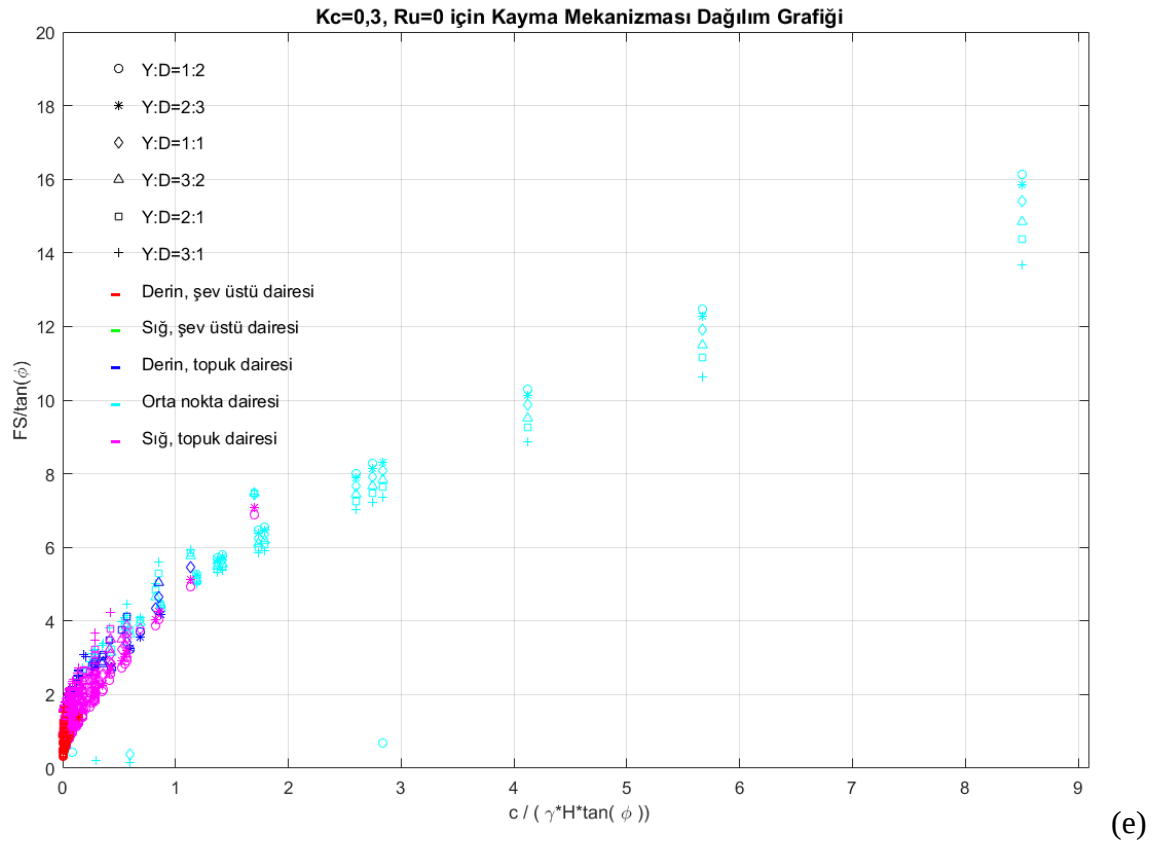


(c)



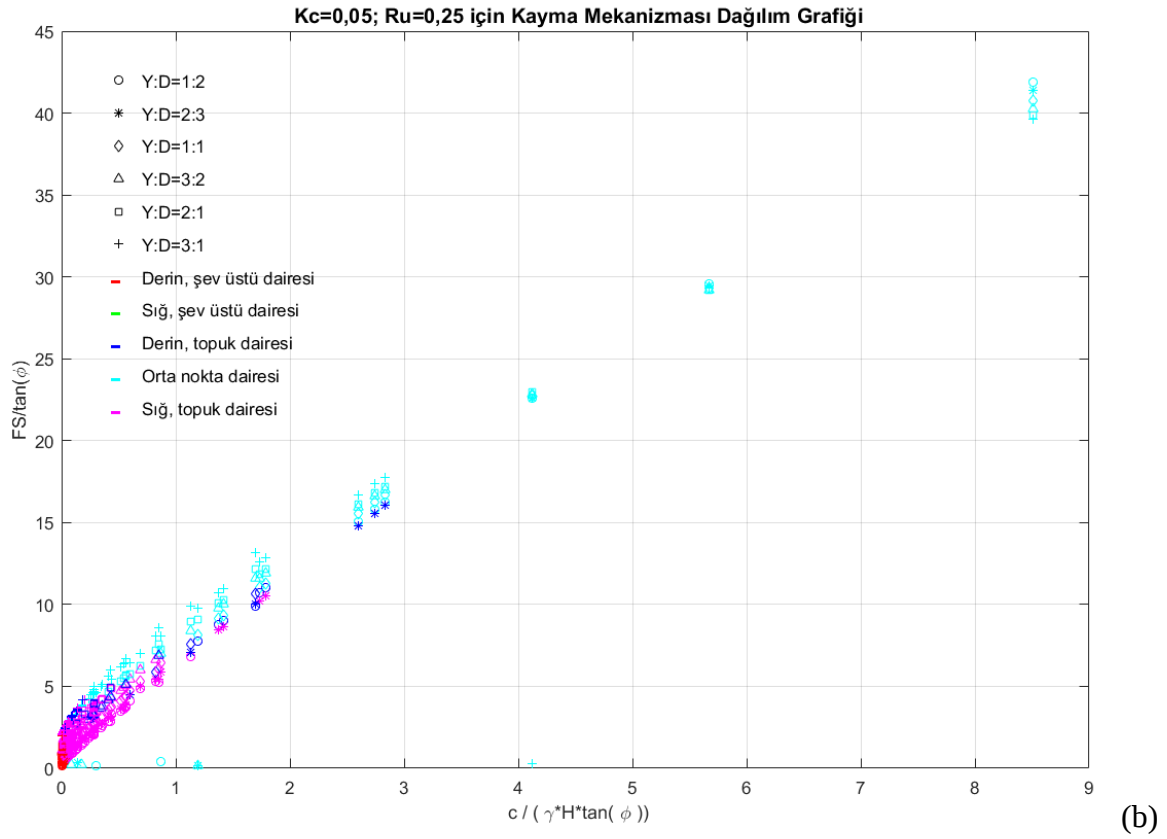
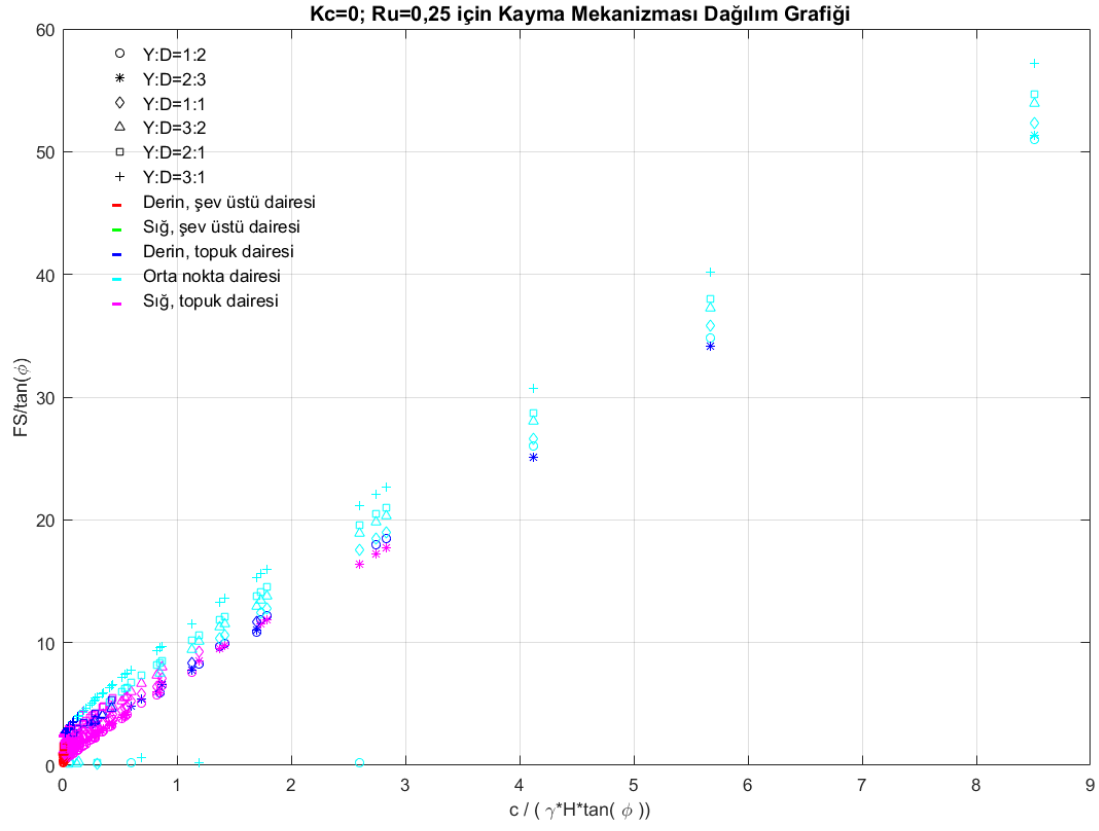
(d)

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri

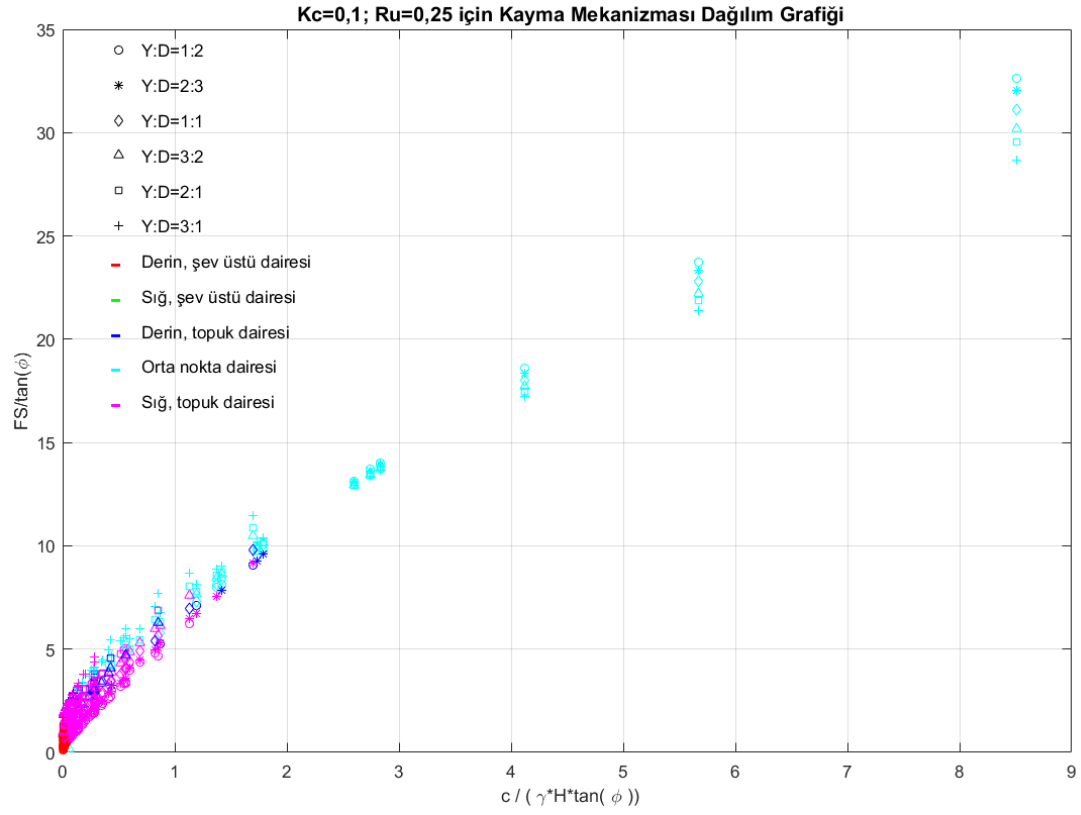


Şekil 2.16. Drenajlı zemin koşulu, $Q=0$; $R_u=0$ için kayma dairesi mekanizması dağılım grafiği (a) $K_c=0$ (b) $K_c=0,05$ (c) $K_c=0,1$ (d) $K_c=0,2$ (e) $K_c=0,3$

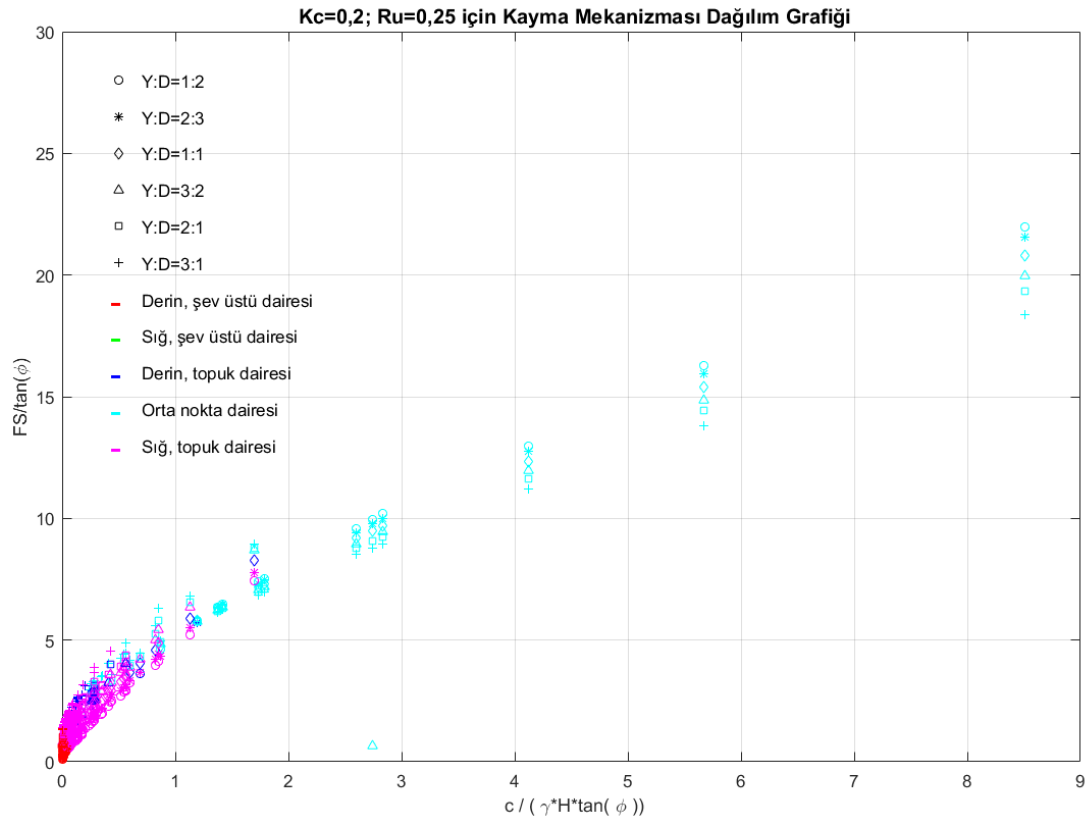
EK-2. (devam) Drenajlı durum sürüşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri

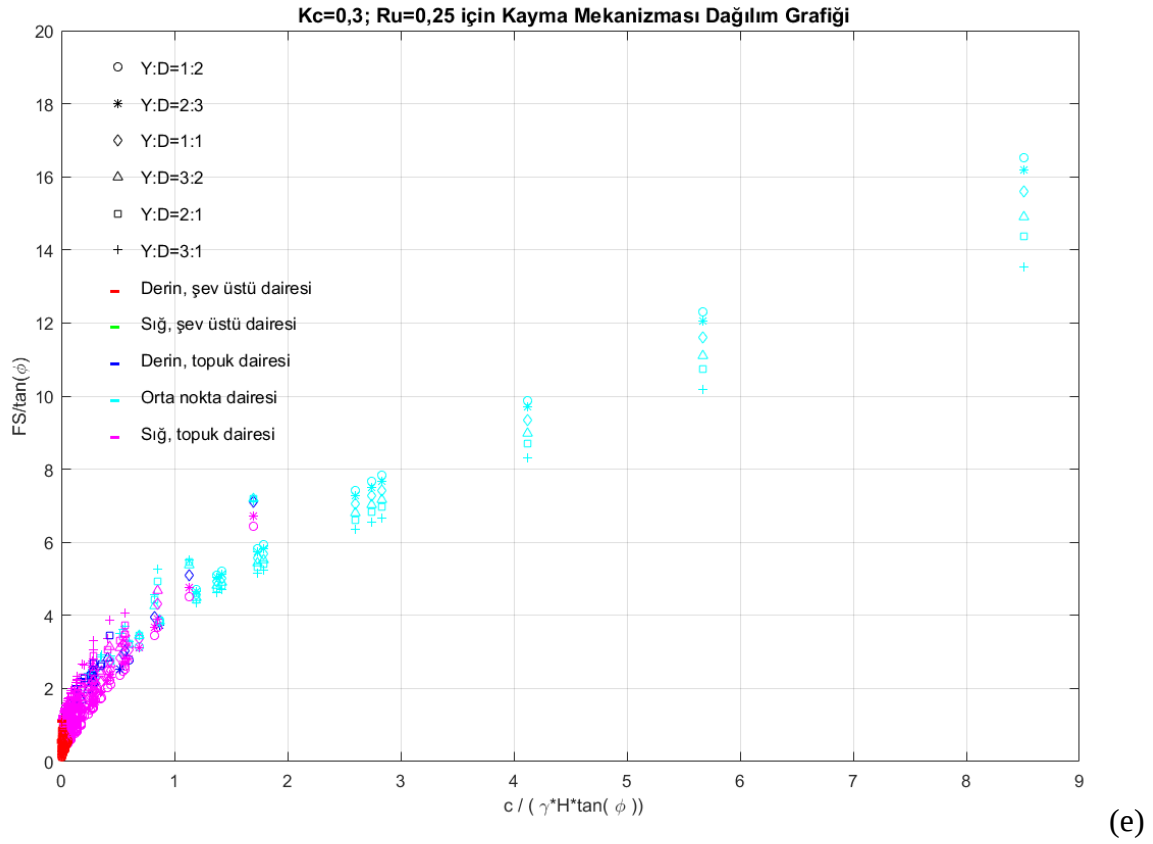


(c)



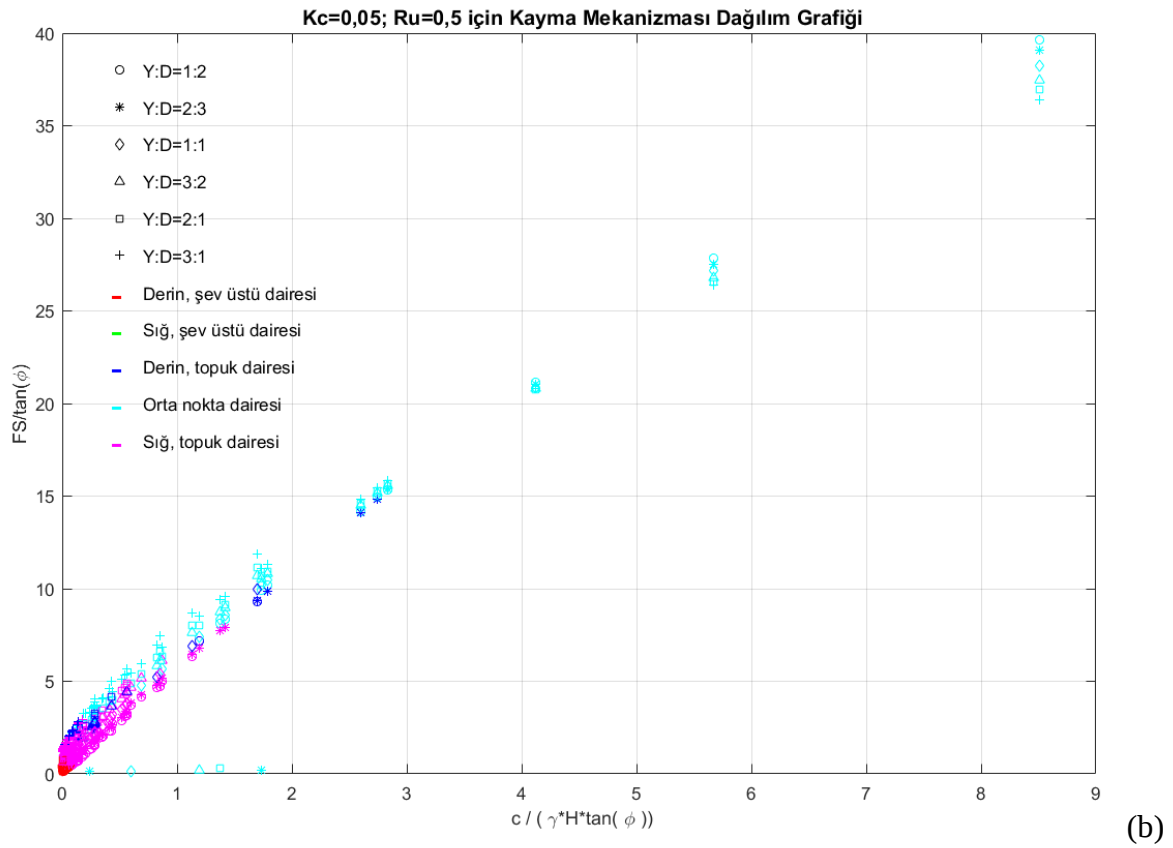
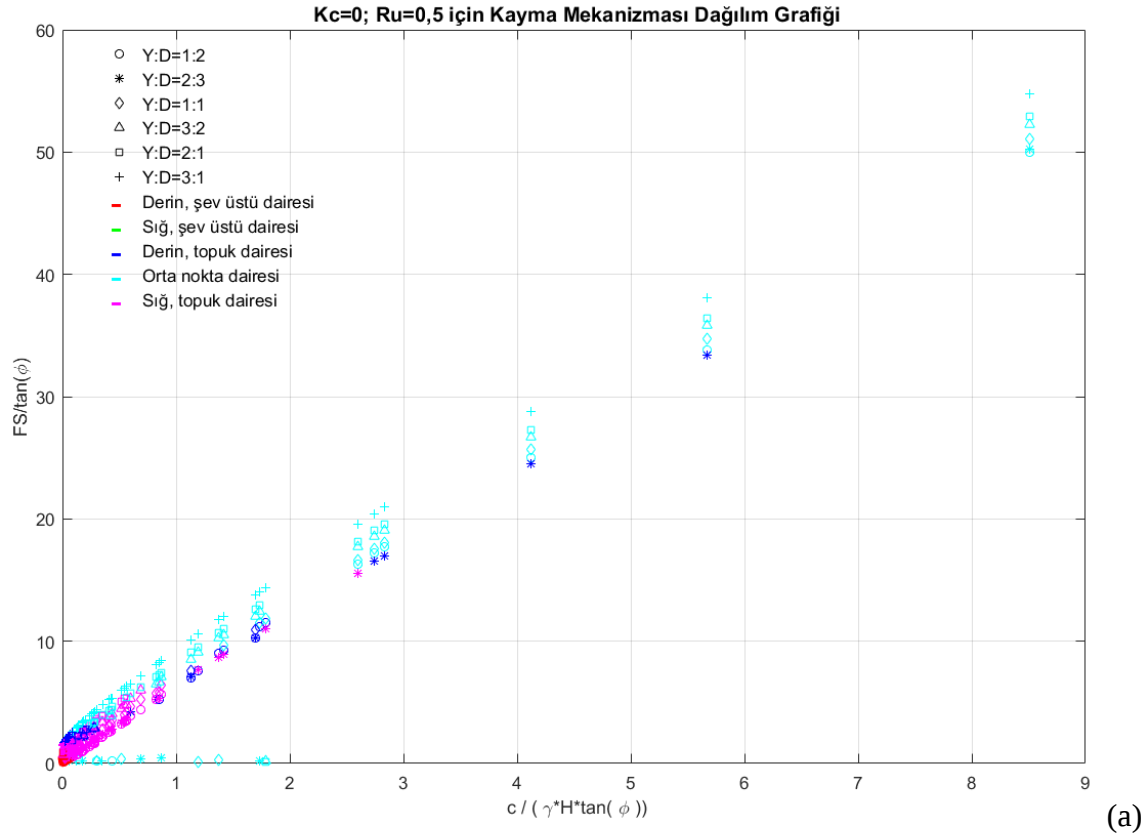
(d)

EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri

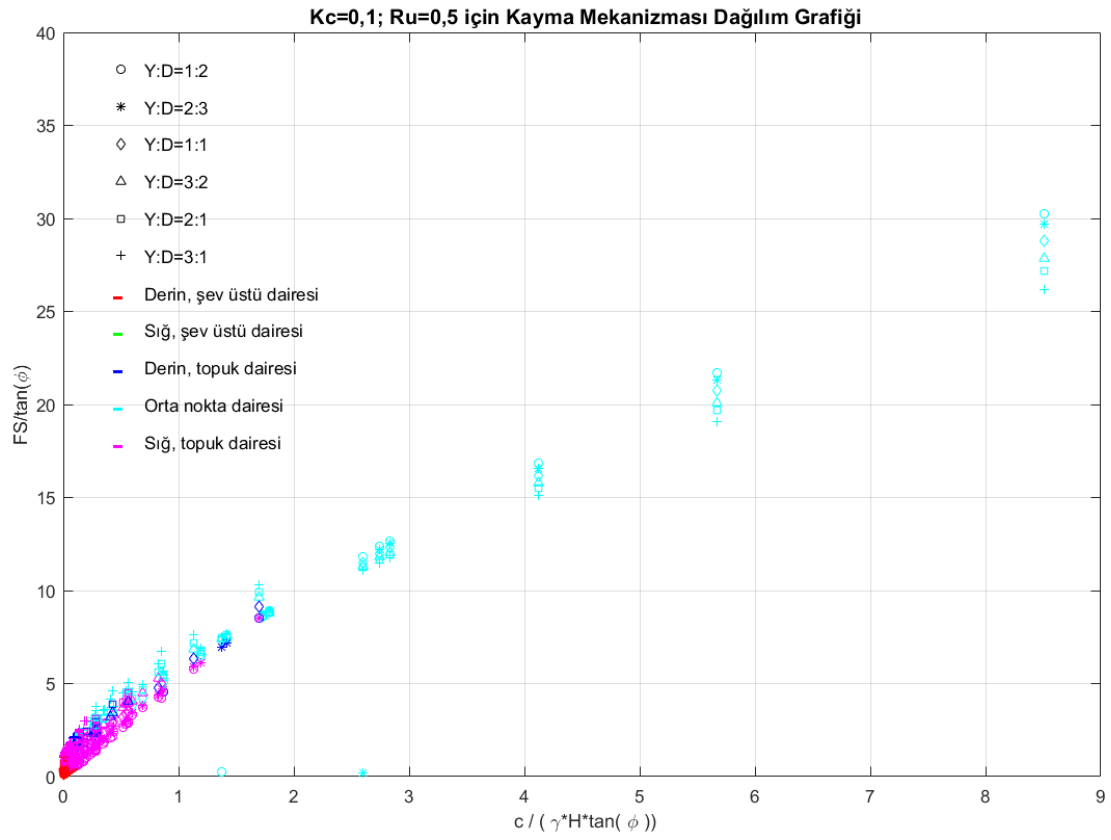


Şekil 2.17. Drenajlı zemin koşulu, $Q=0$; $R_u=0,25$ için kayma dairesi mekanizması dağılım grafiği (a) $K_c=0$ (b) $K_c=0,05$ (c) $K_c=0,1$ (d) $K_c=0,2$ (e) $K_c=0,3$

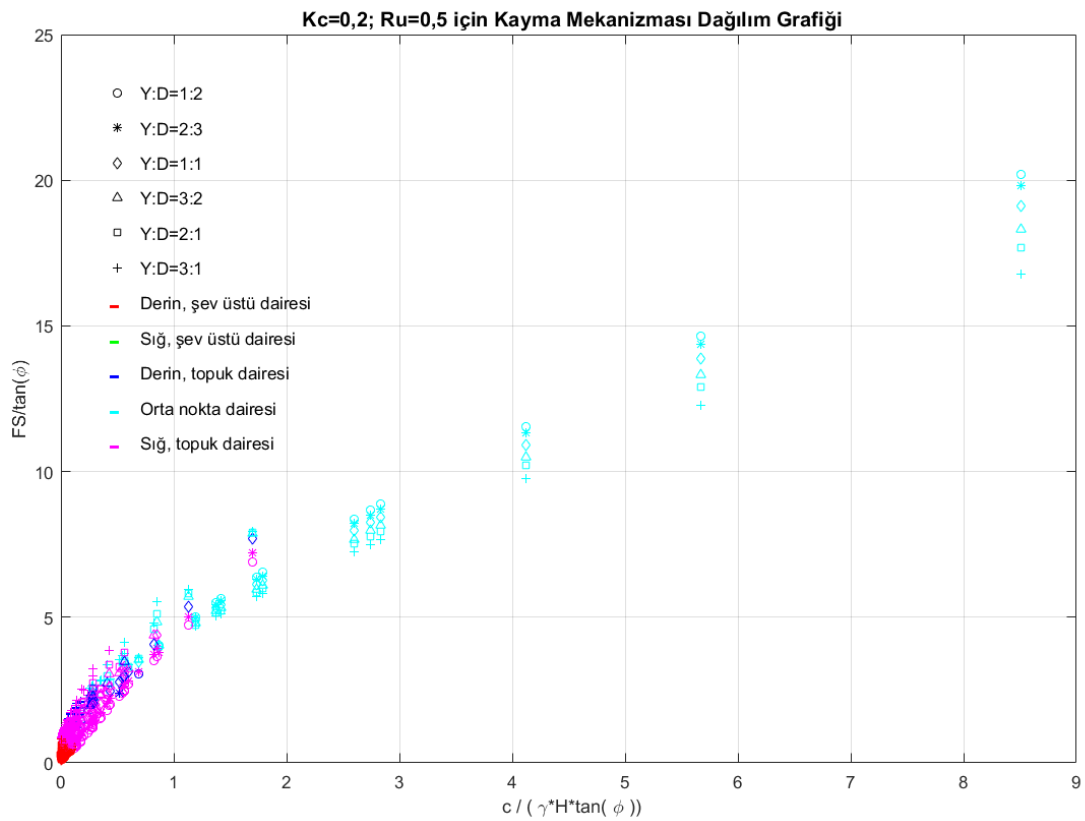
EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri

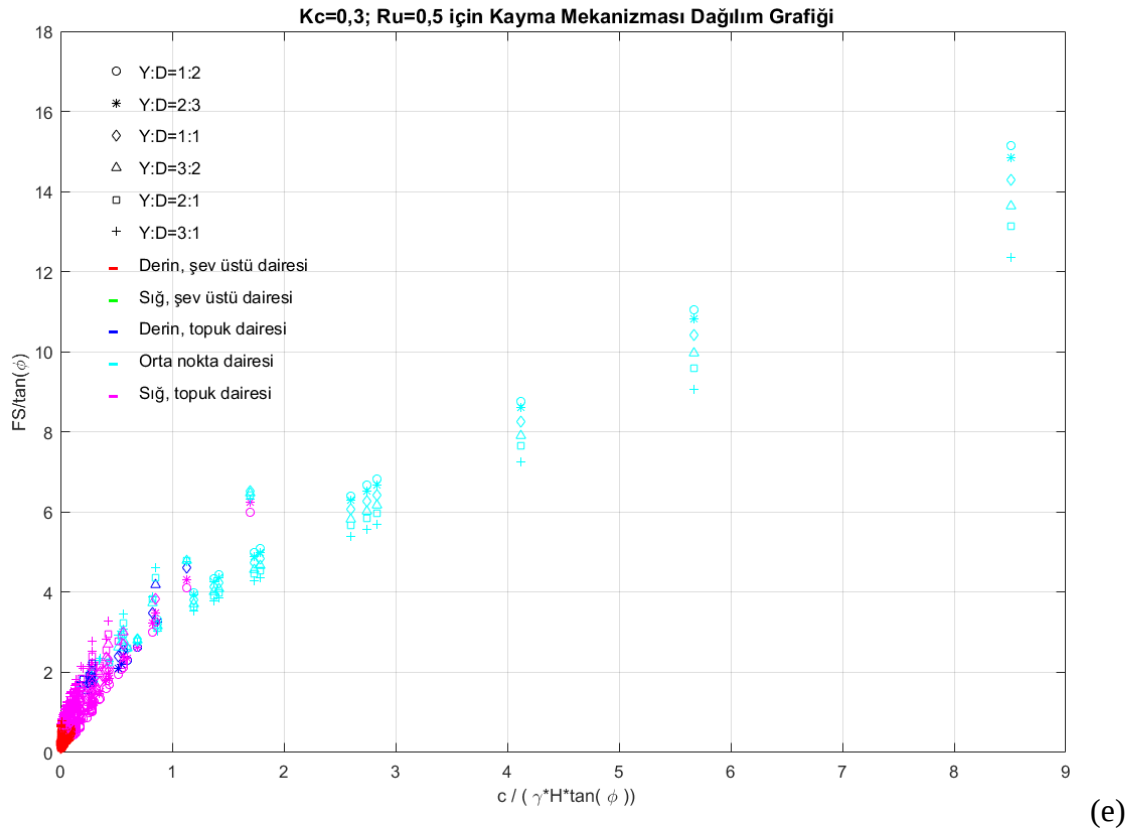


(c)

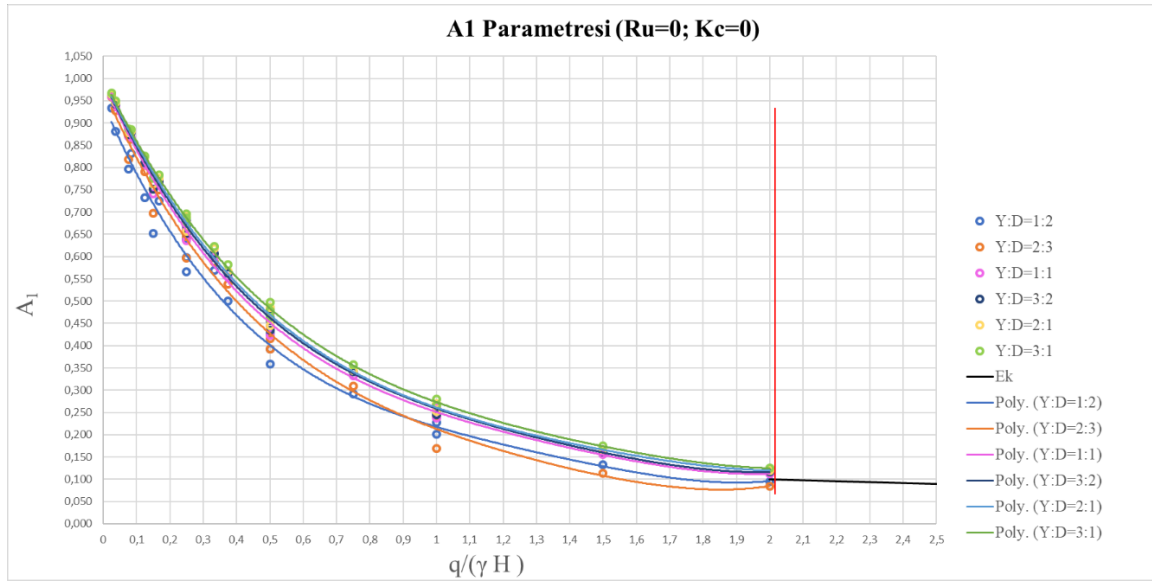


(d)

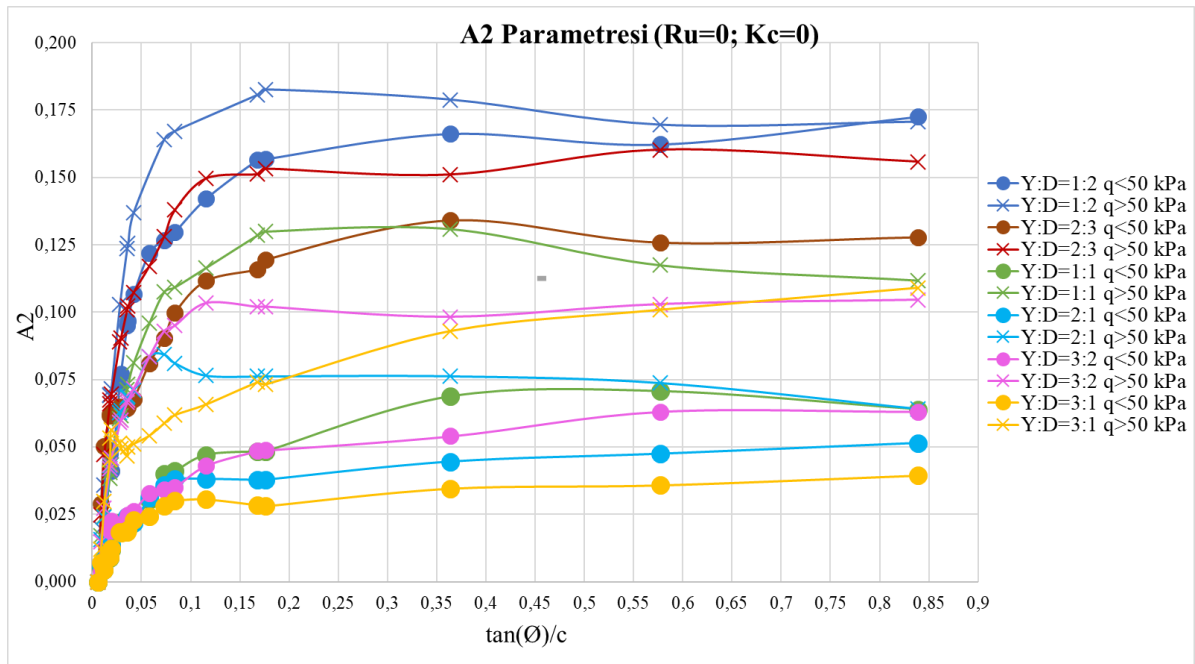
EK-2. (devam) Drenajlı durum sürşarj etkisinin alınmadığı şev stabilite grafik çözümleri



Şekil 2.18. Drenajlı zemin koşulu, $Q=0$; $R_u=0,5$ için kayma dairesi mekanizması dağılım grafiği (a) $K_c=0$ (b) $K_c=0,05$ (c) $K_c=0,1$ (d) $K_c=0,2$ (e) $K_c=0,3$

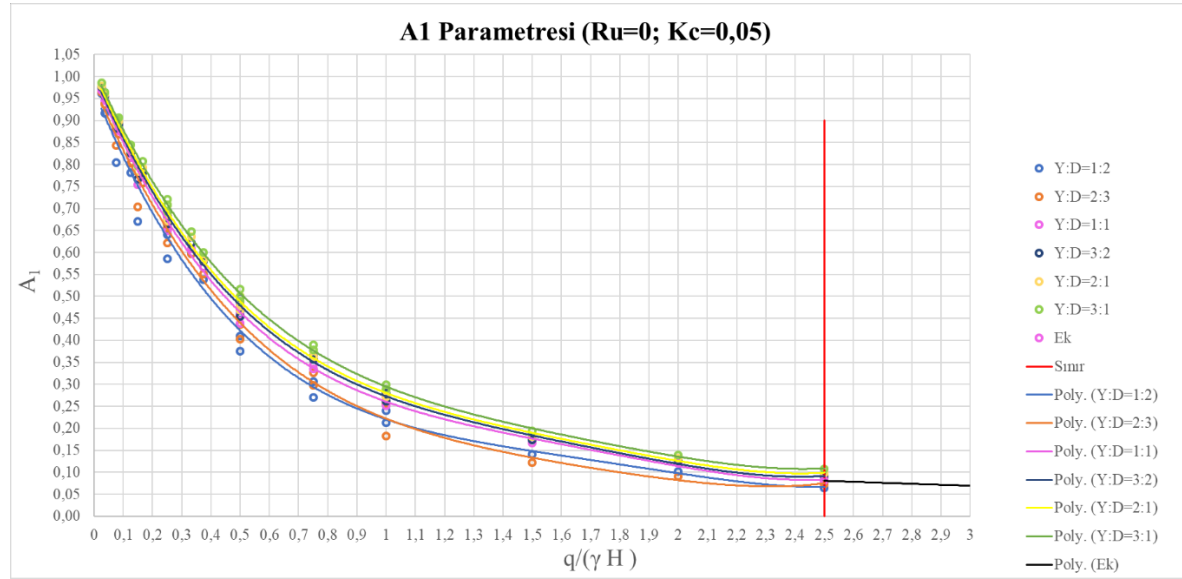
EK-3. Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

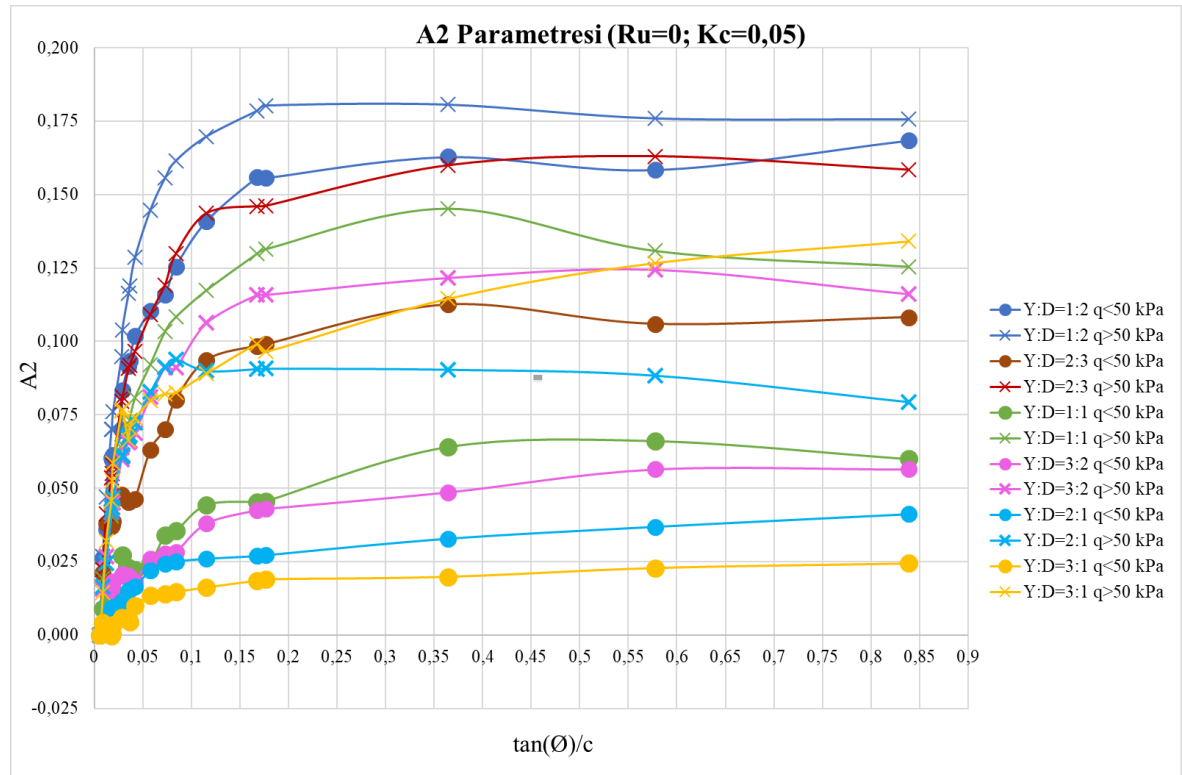


(b)

Şekil 3.1. Statik durum, drenajlı zemin koşulu, $R_u=0$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

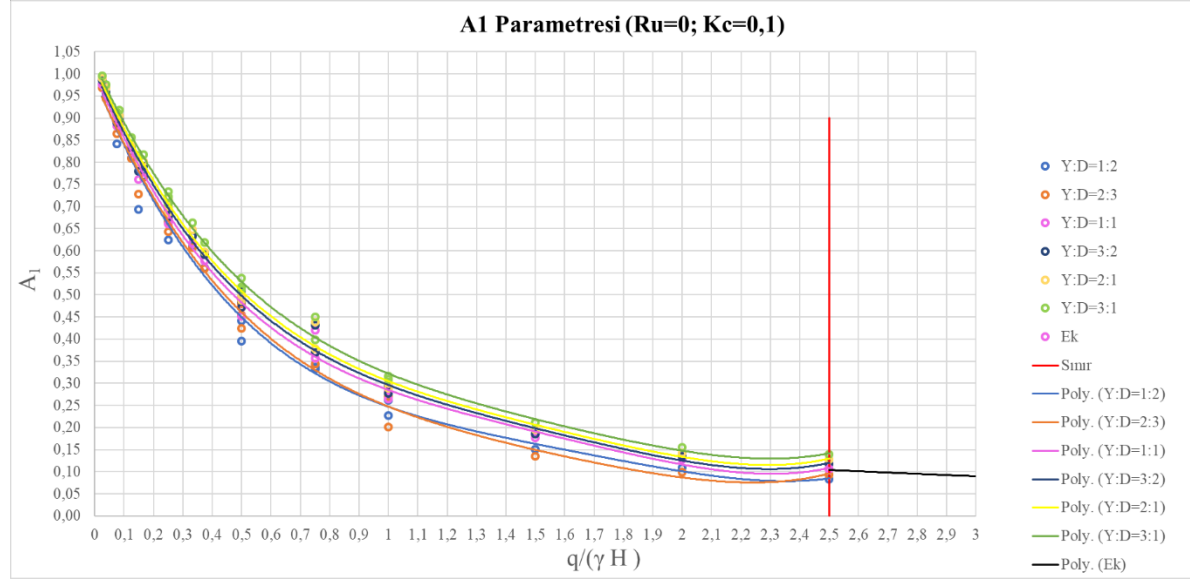
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

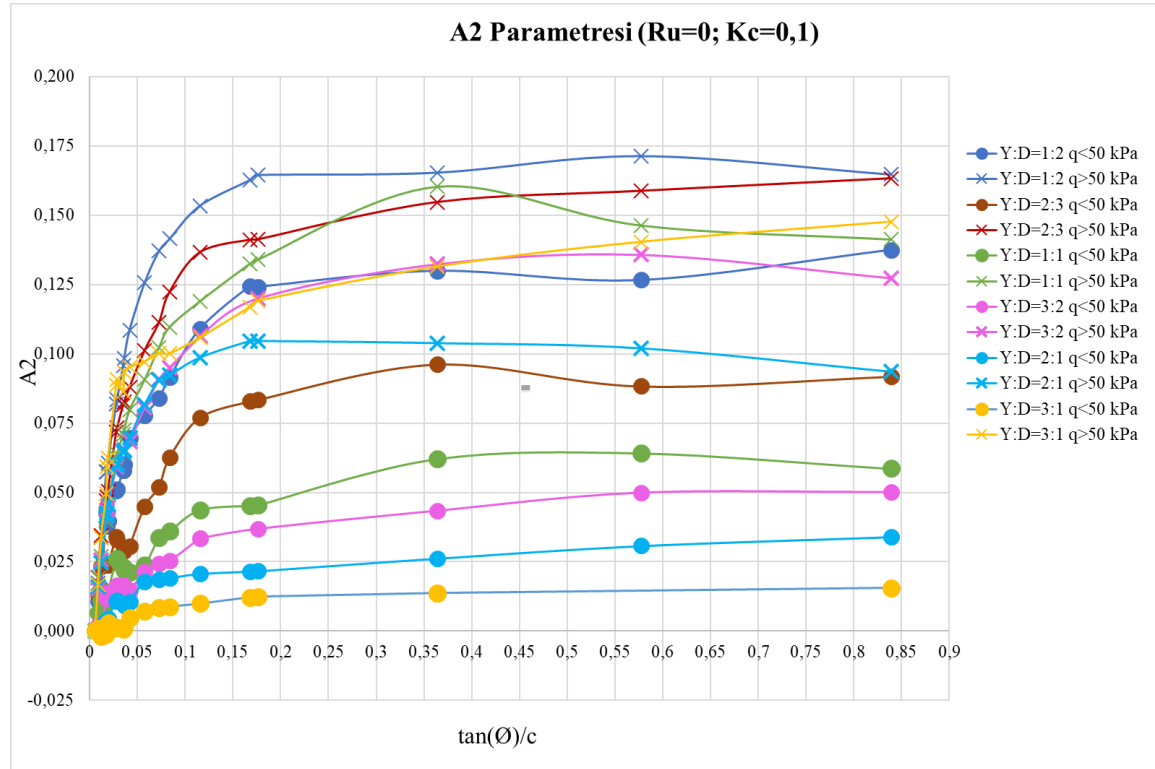


(b)

Şekil 3.2. Deprem durumu ($K_c=0,05$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

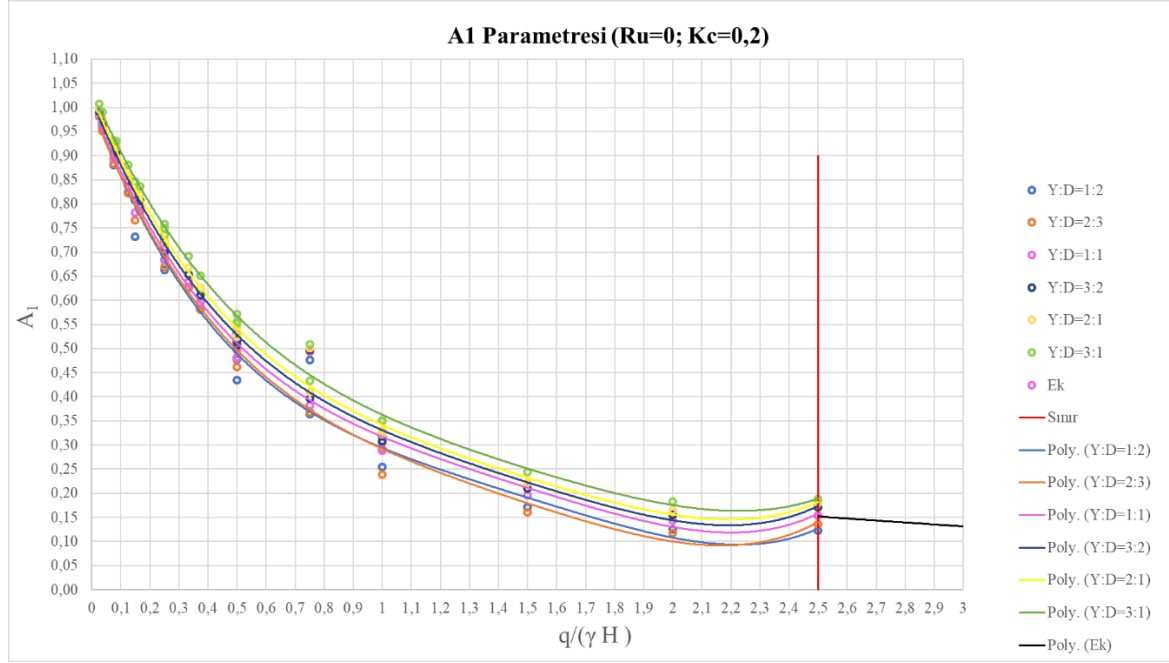
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

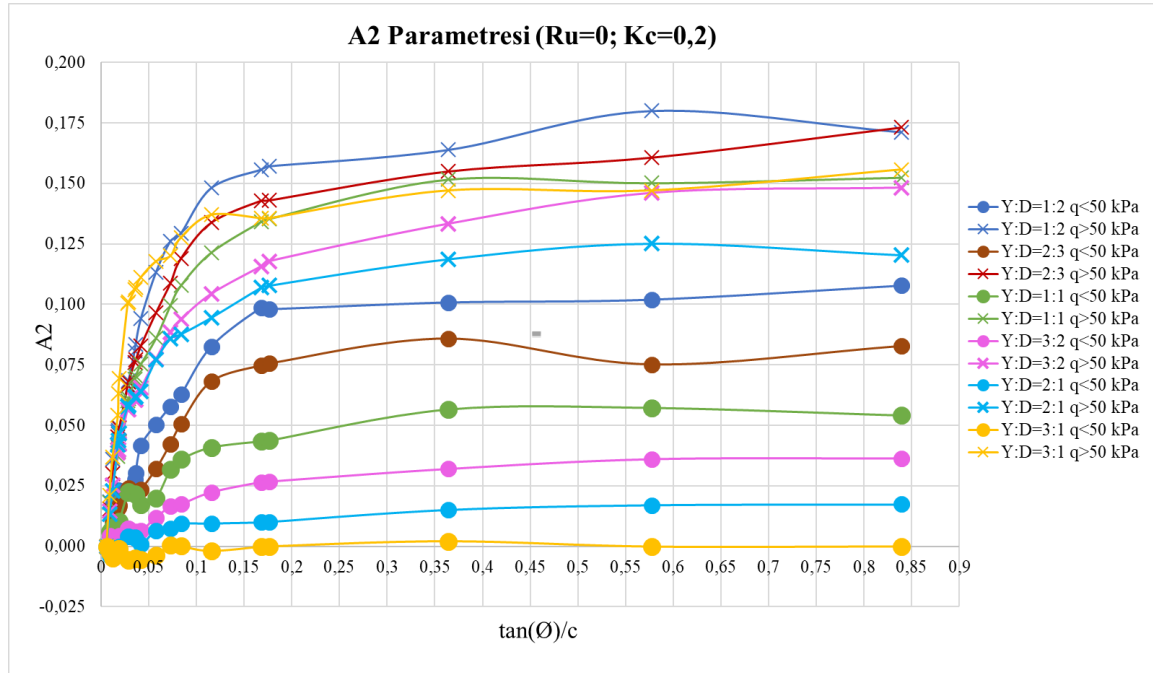


(b)

Şekil 3.3. Deprem durumu ($K_c=0,1$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

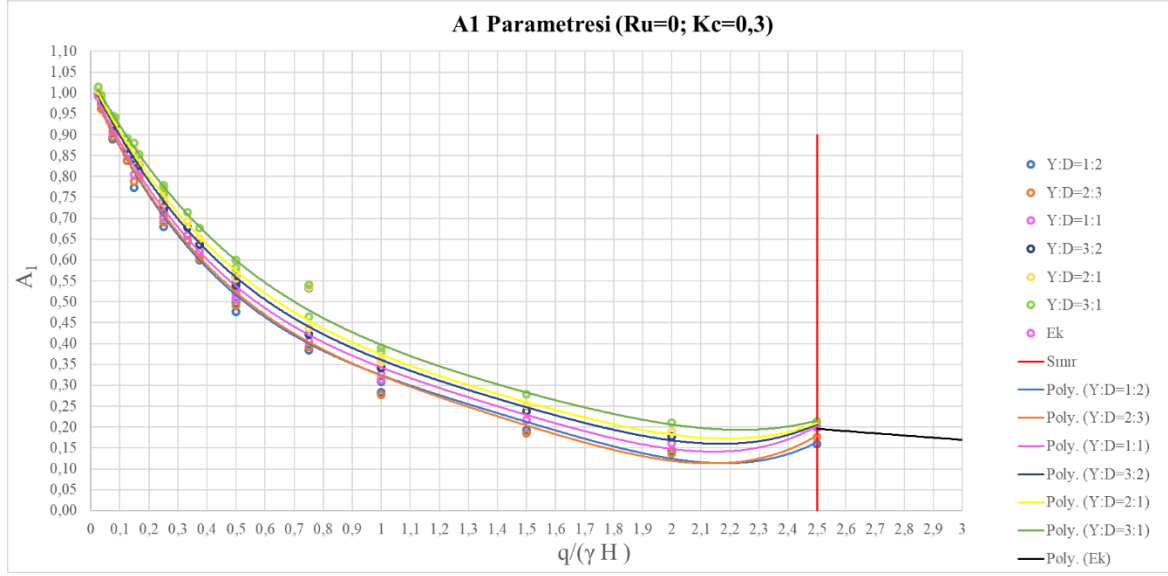
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

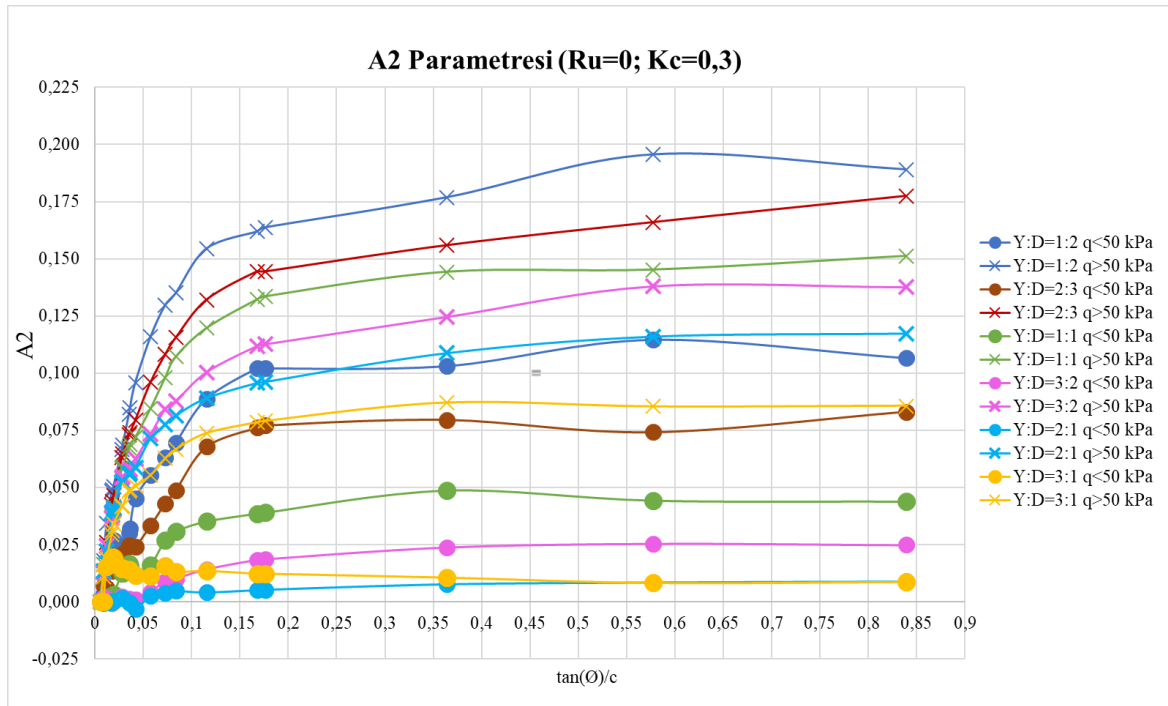


(b)

Şekil 3.4. Deprem durumu ($K_c=0,2$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

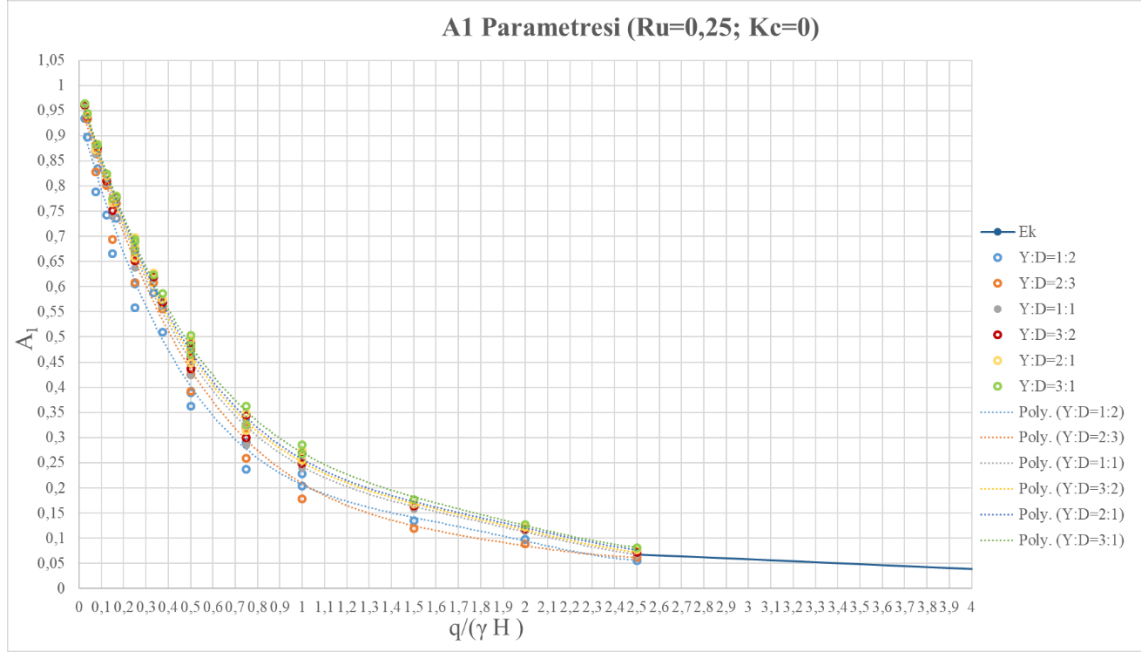
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

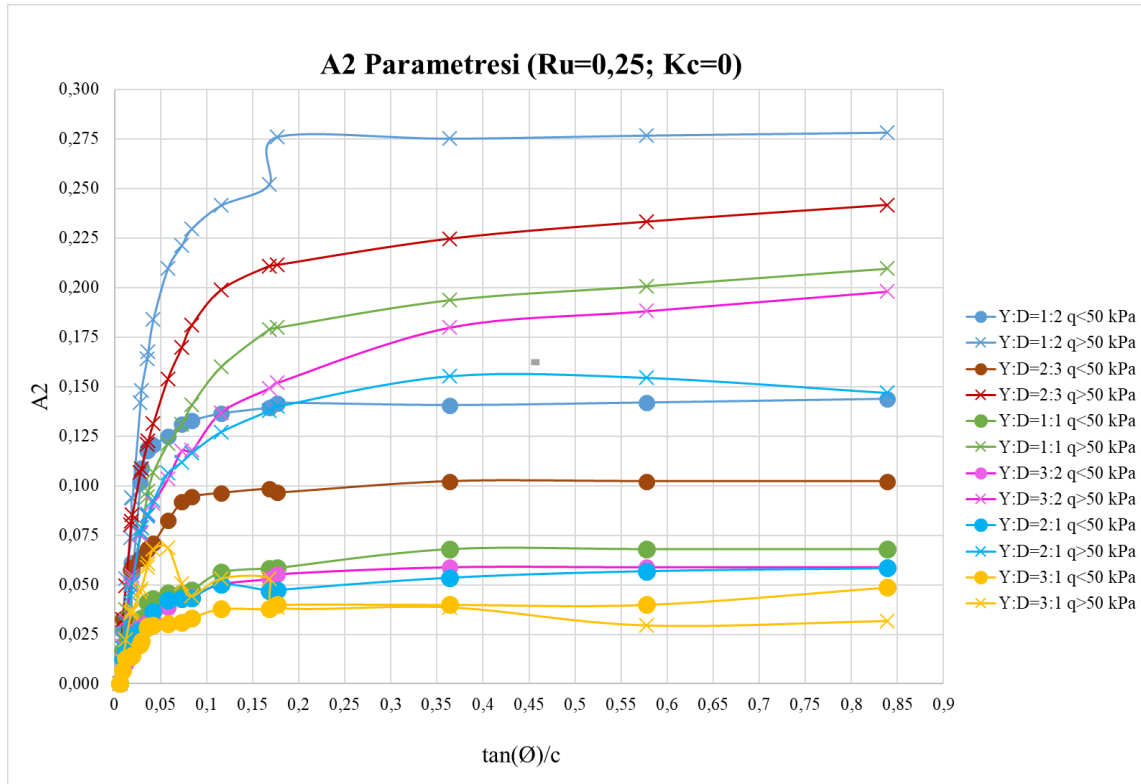


(b)

Şekil 3.5. Deprem durumu ($K_c=0,3$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

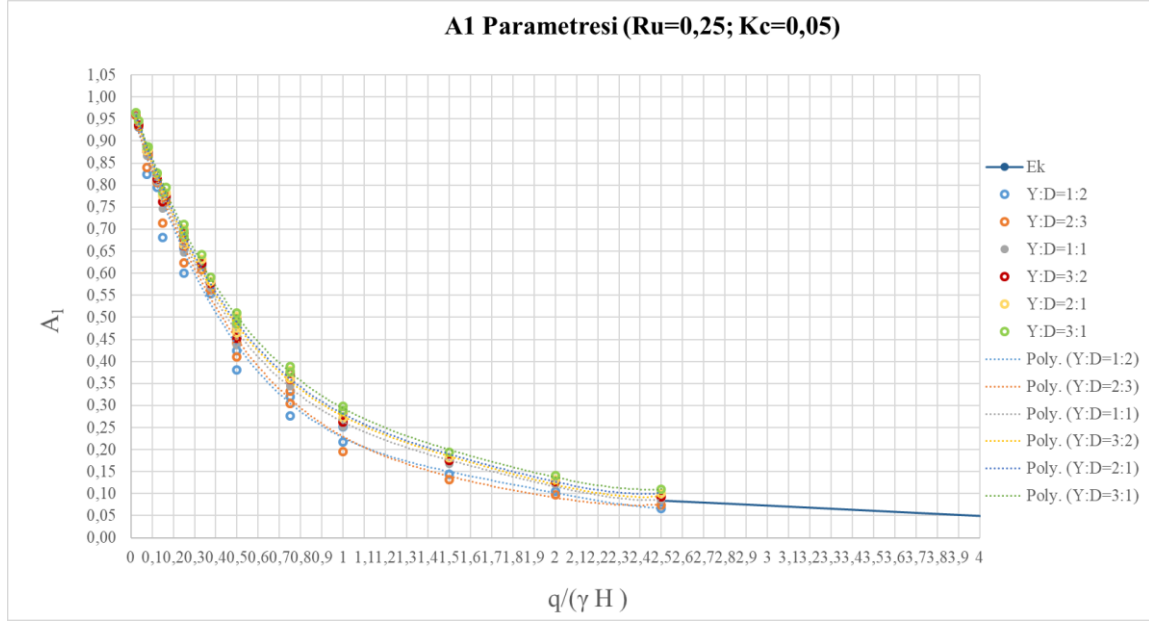
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

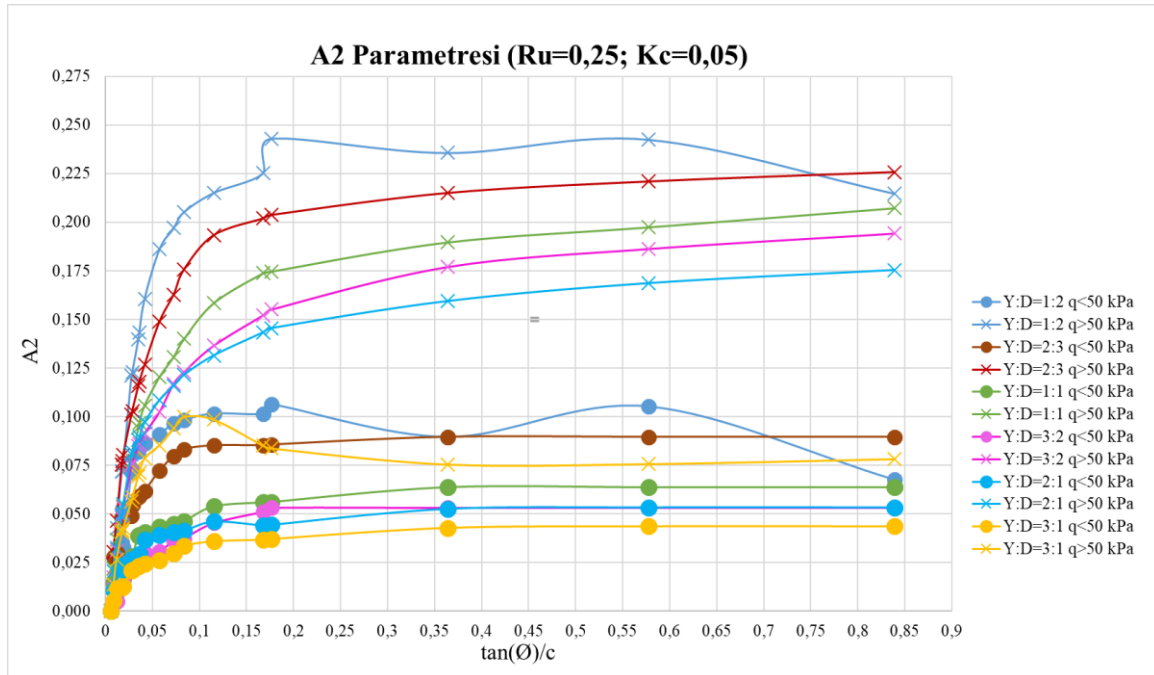


(b)

Şekil 3.6. Statik Durum, drenajlı zemin koşulu, $R_u=0,25$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

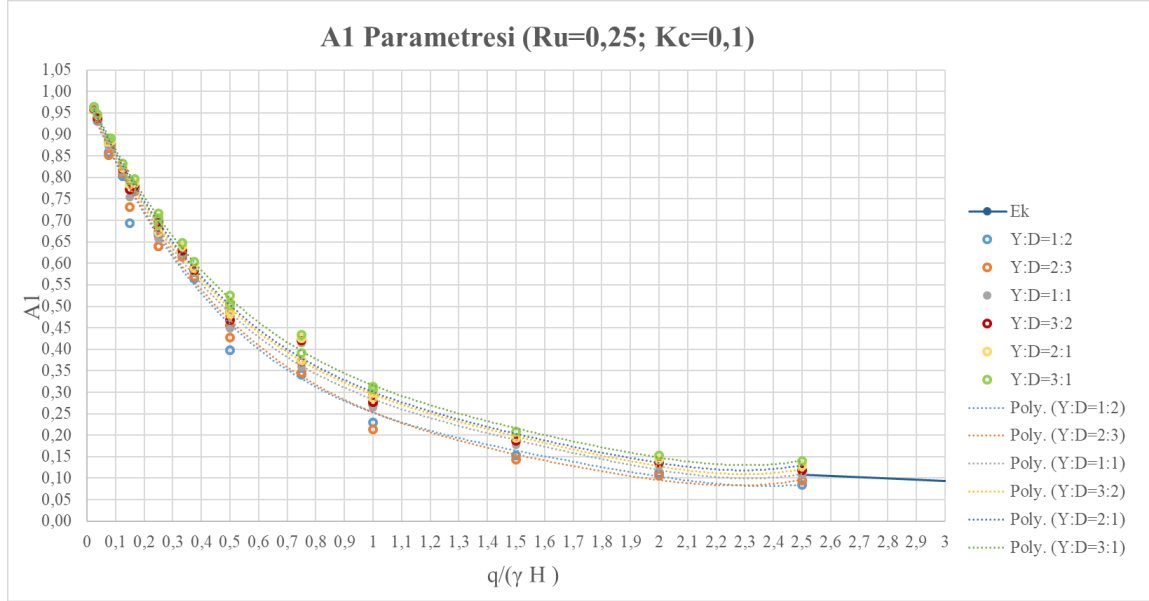
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

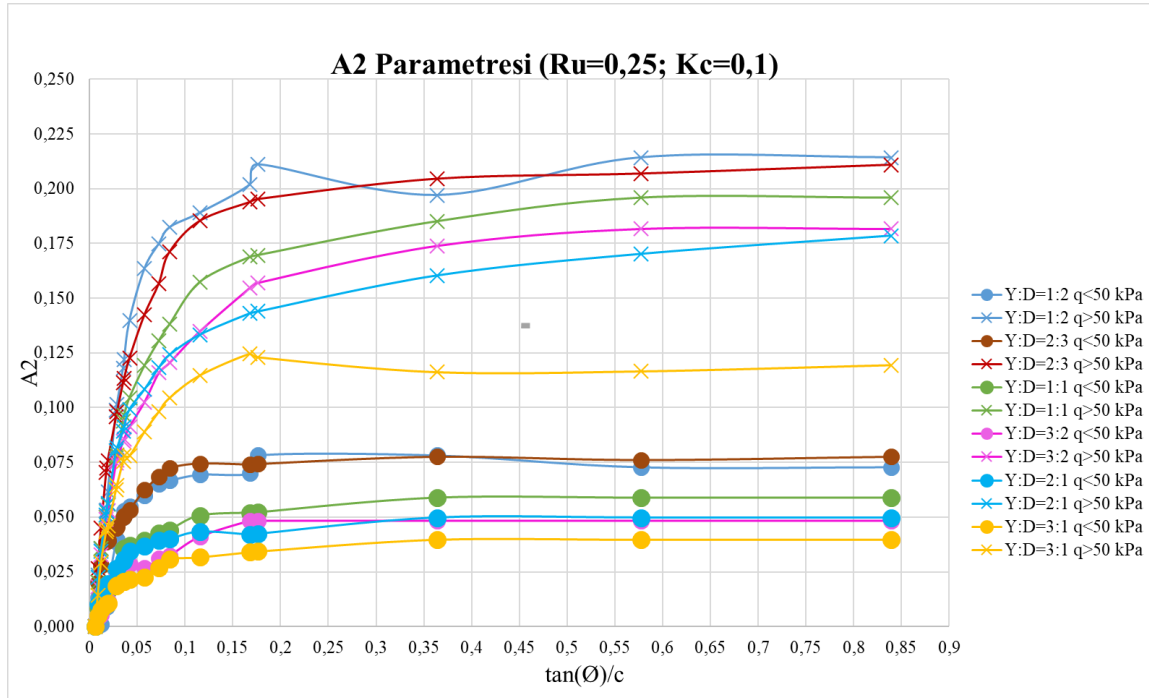


(b)

Şekil 3.7. Deprem durumu ($K_c=0,05$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0,25$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

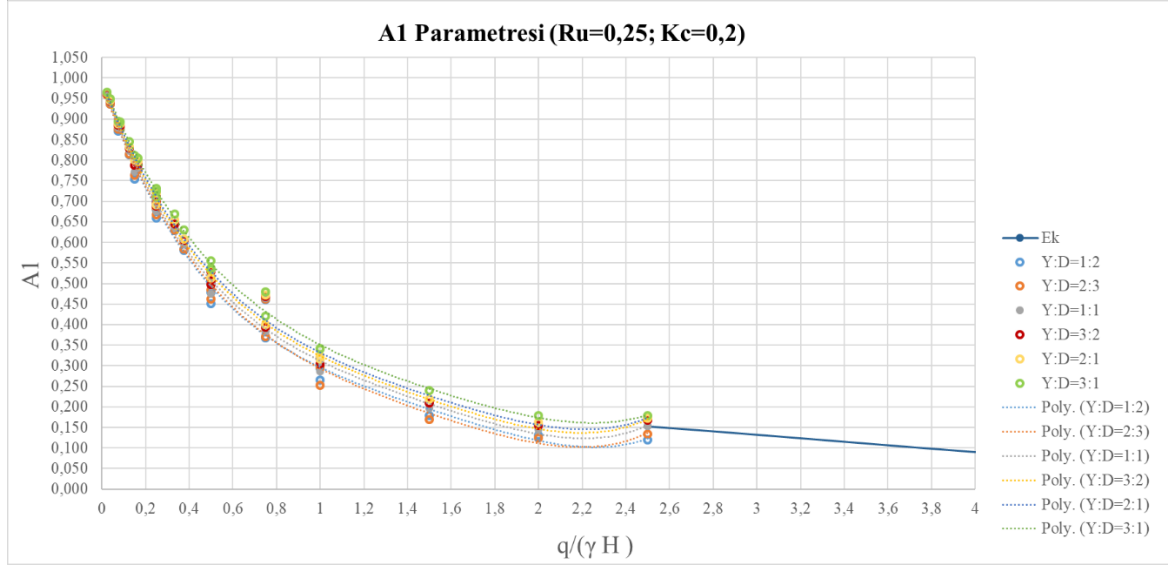
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

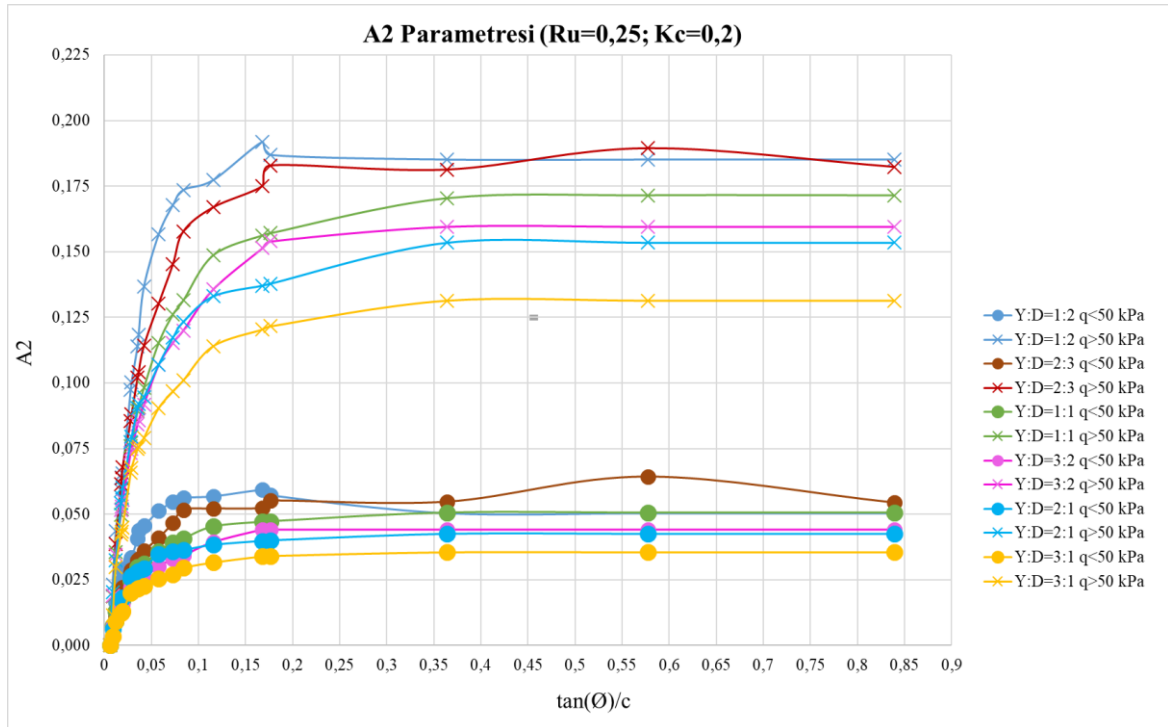


(b)

Şekil 3.8. Deprem durumu ($K_c=0,1$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0,25$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

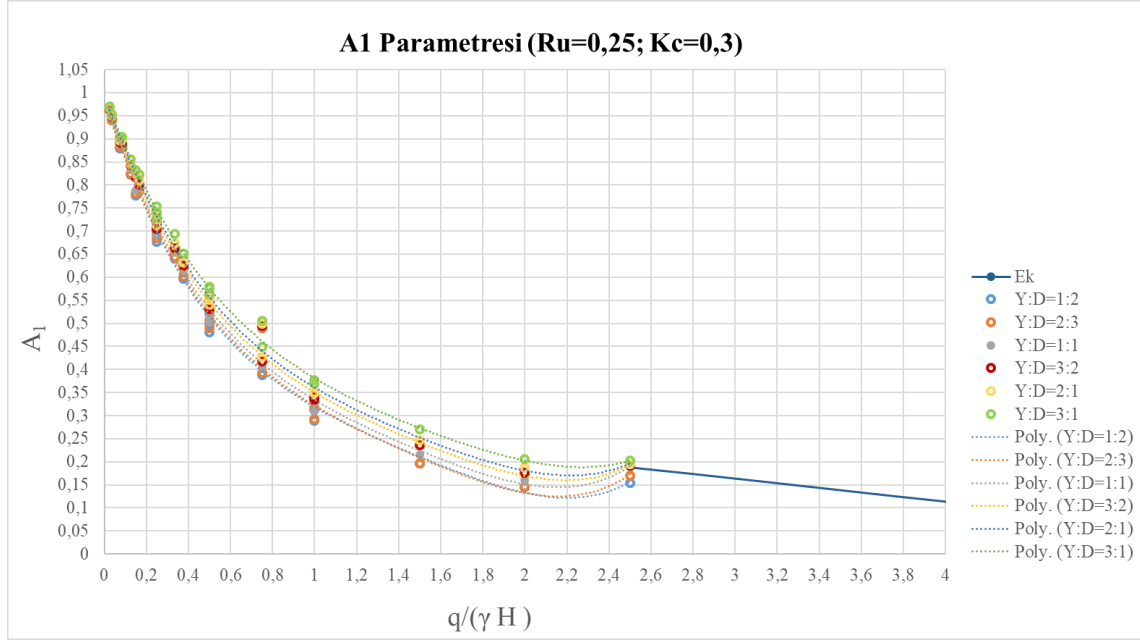
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

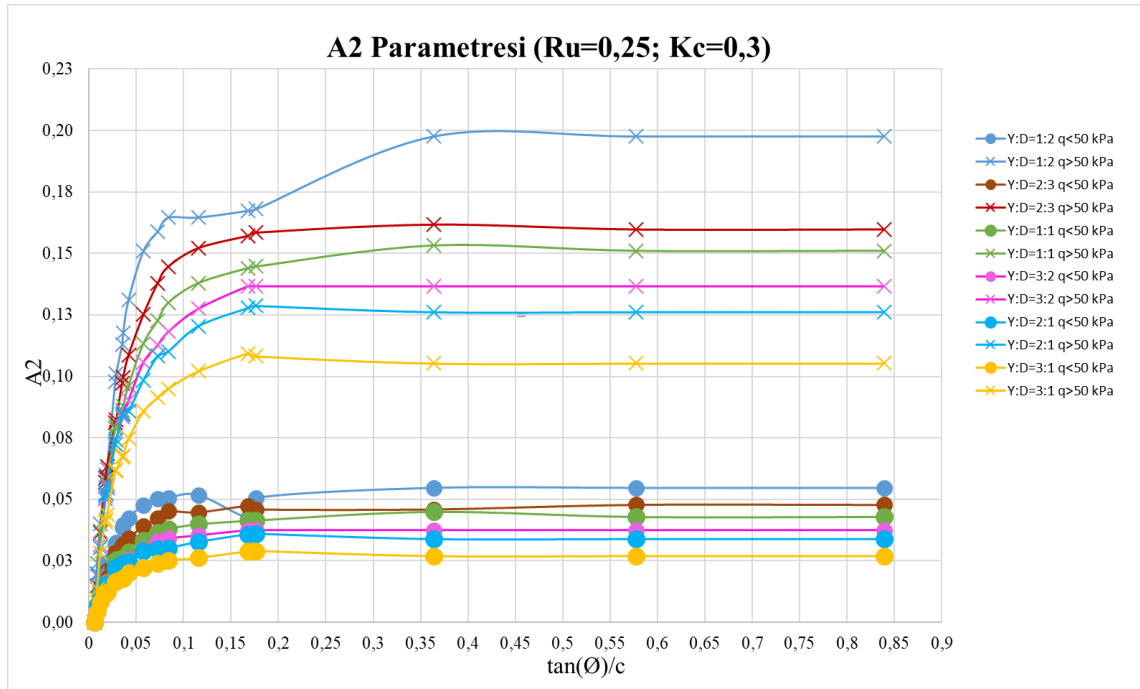


(b)

Şekil 3.9. Deprem durumu ($K_c=0,2$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0,25$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

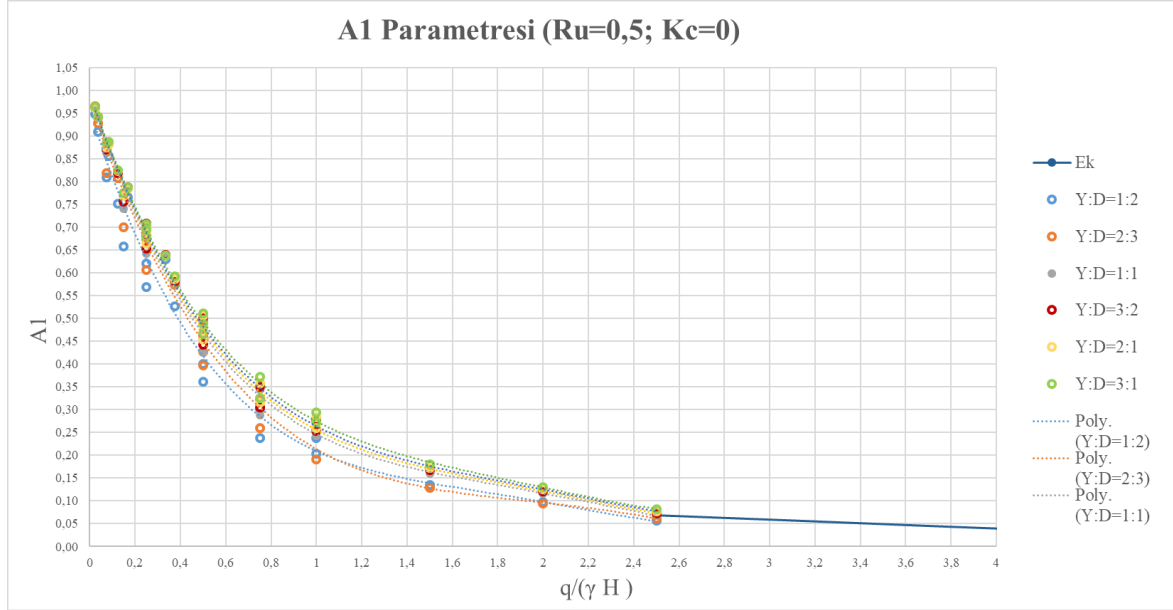
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

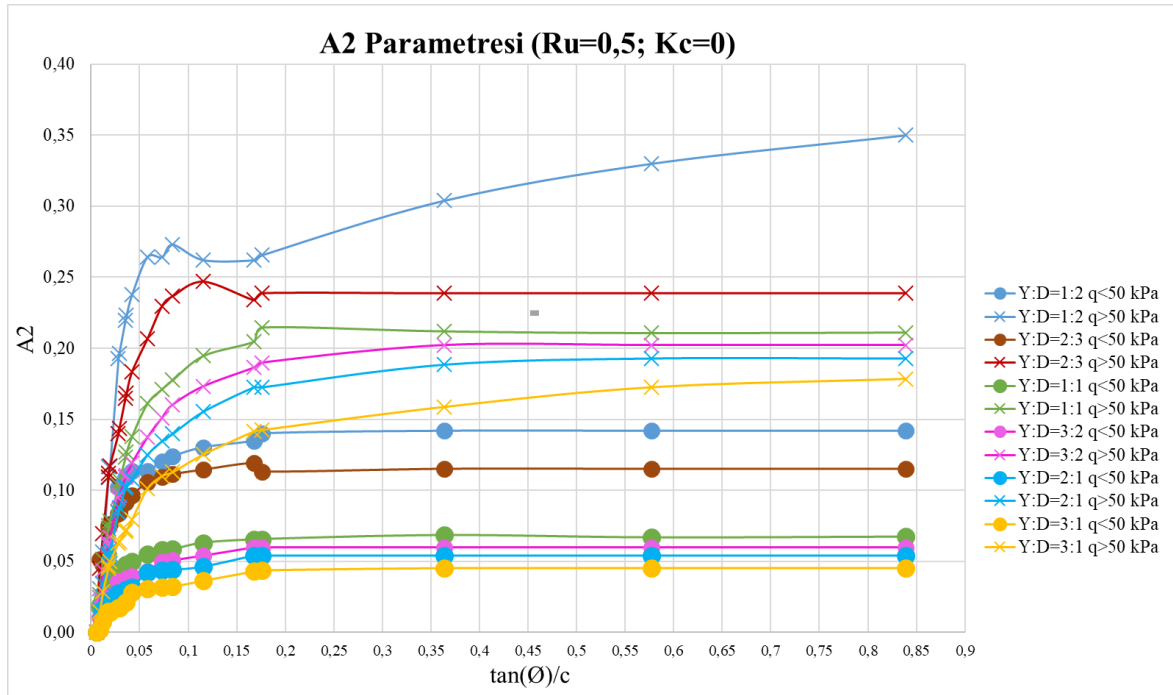


(b)

Şekil 3.10. Deprem durumu ($K_c=0,3$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0,25$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

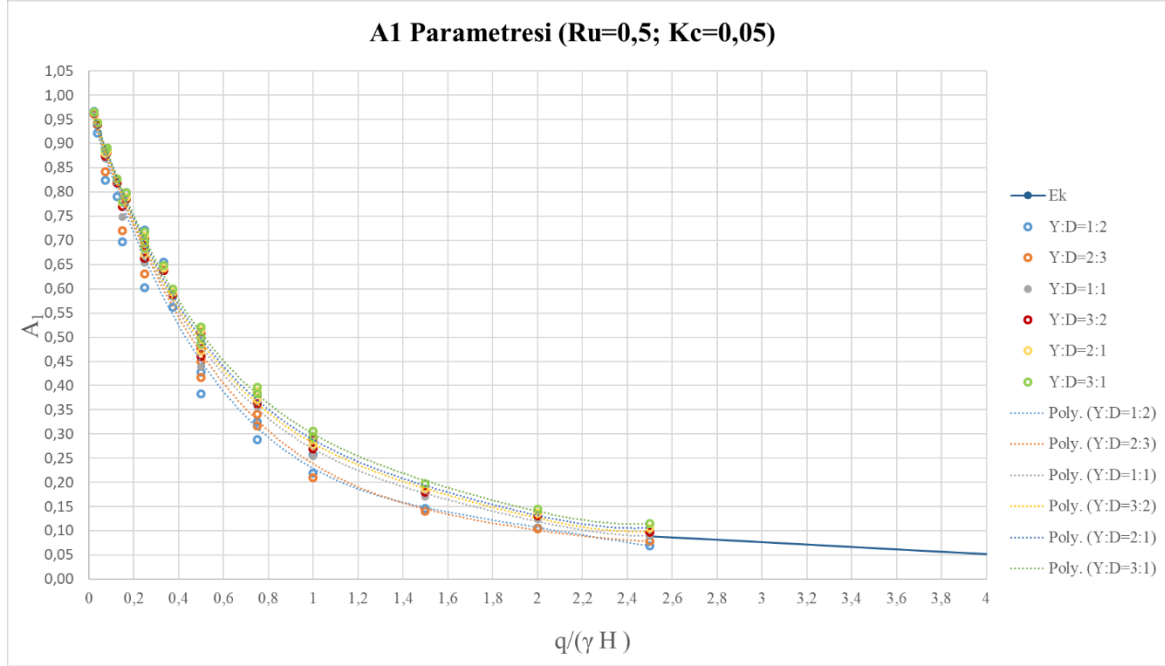
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

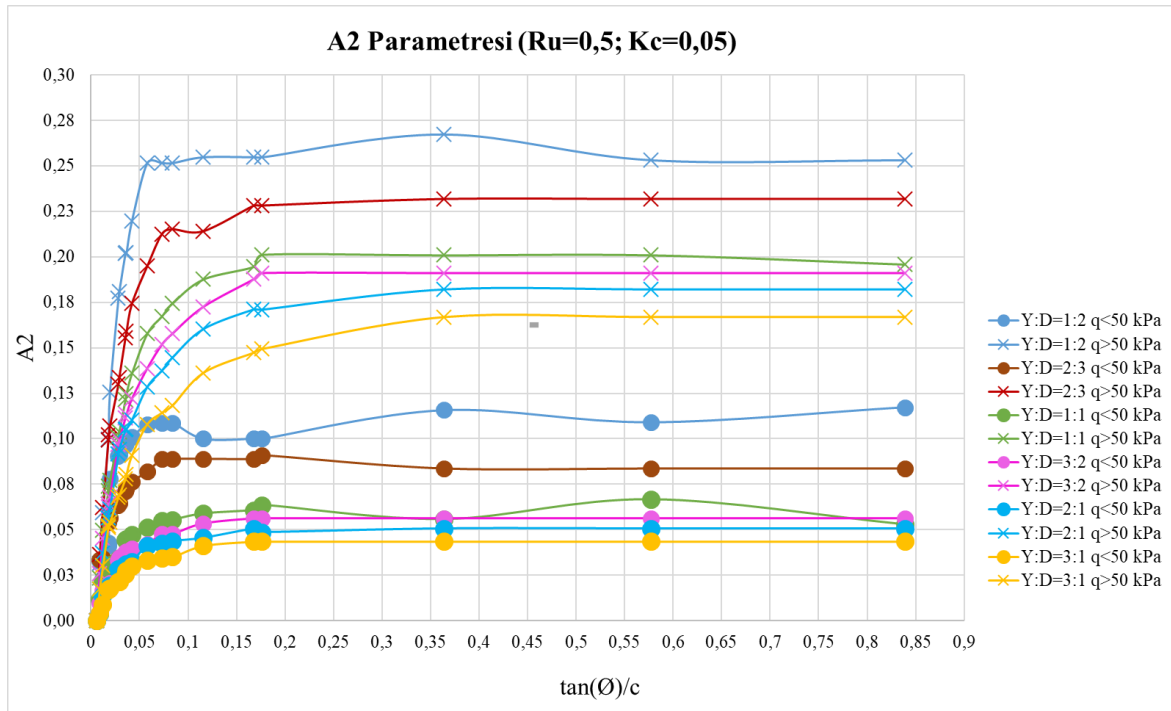


(b)

Şekil 3.11. Statik durumu, drenajlı zemin koşulu, $R_u=0,5$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

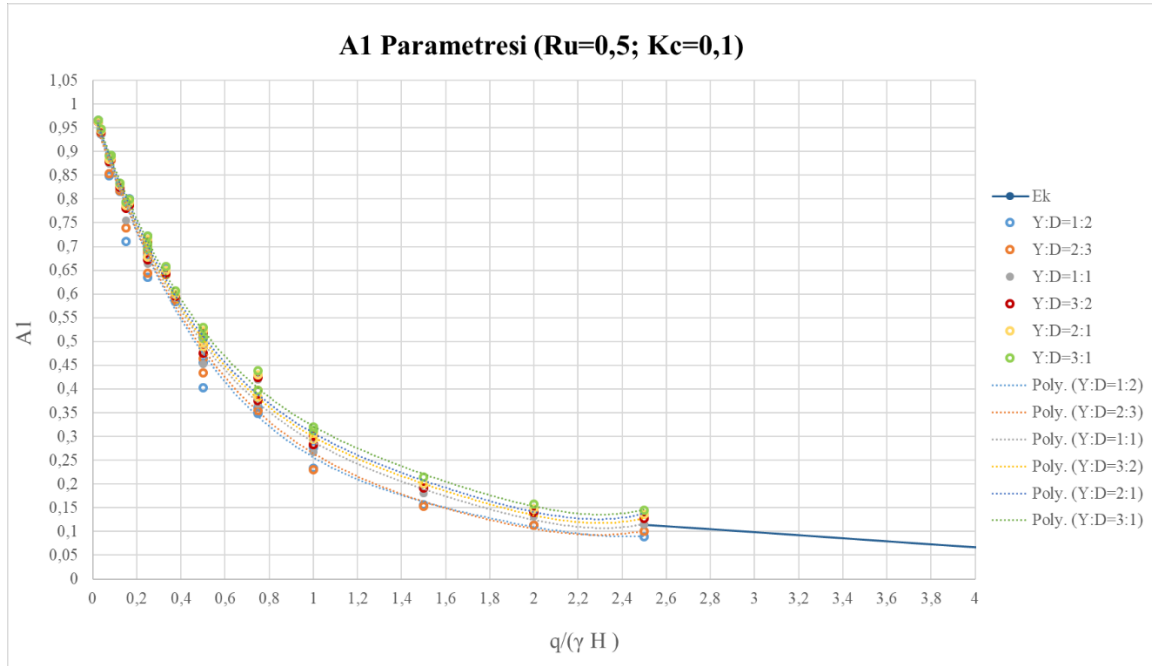
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

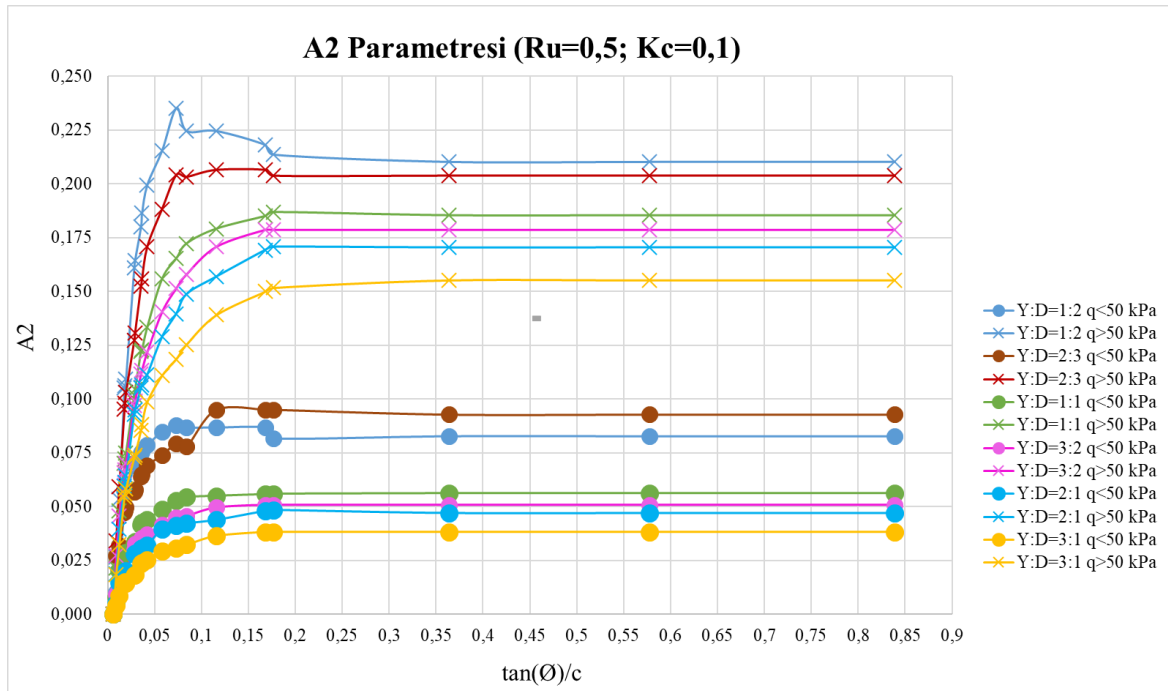


(b)

Şekil 3.12. Deprem durumu ($K_c=0,05$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0,5$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

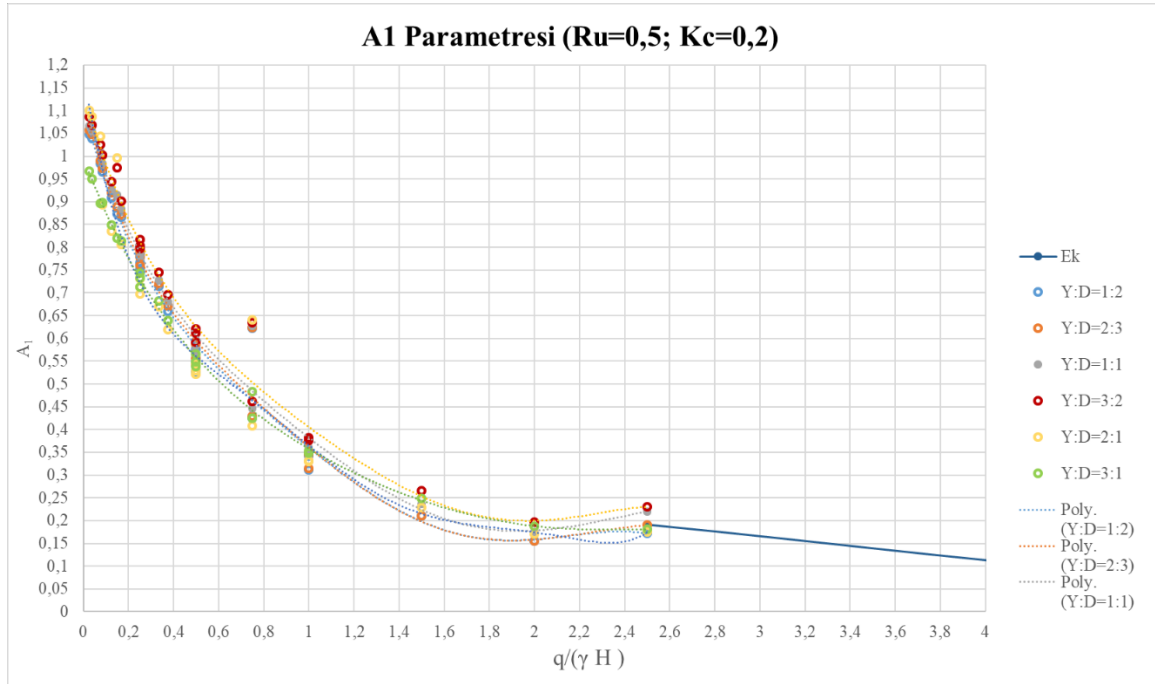
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

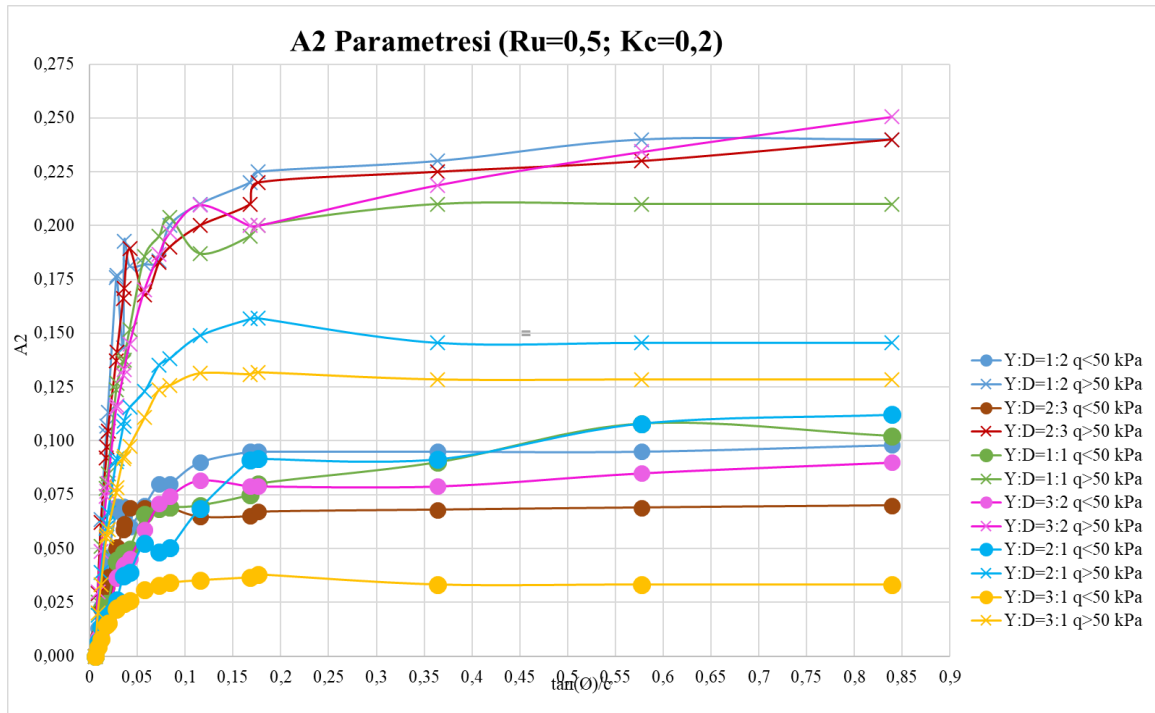


(b)

Şekil 3.13. Deprem durumu ($K_c=0,1$), drenajlı zemin koşulu, $R_u=0,5$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

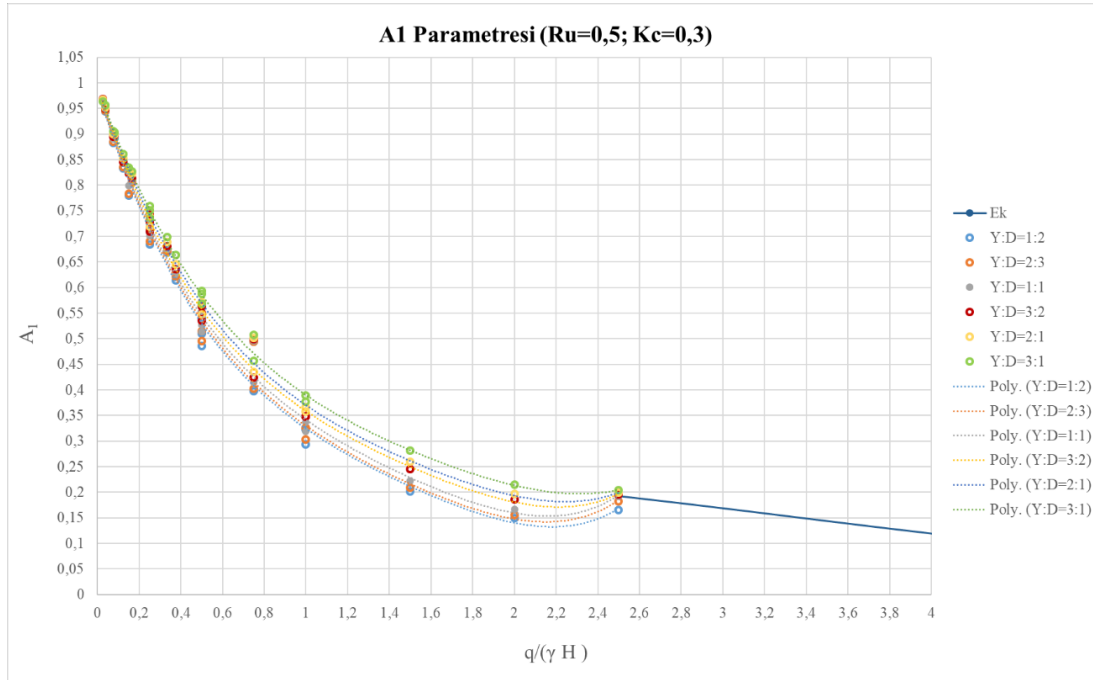
EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)

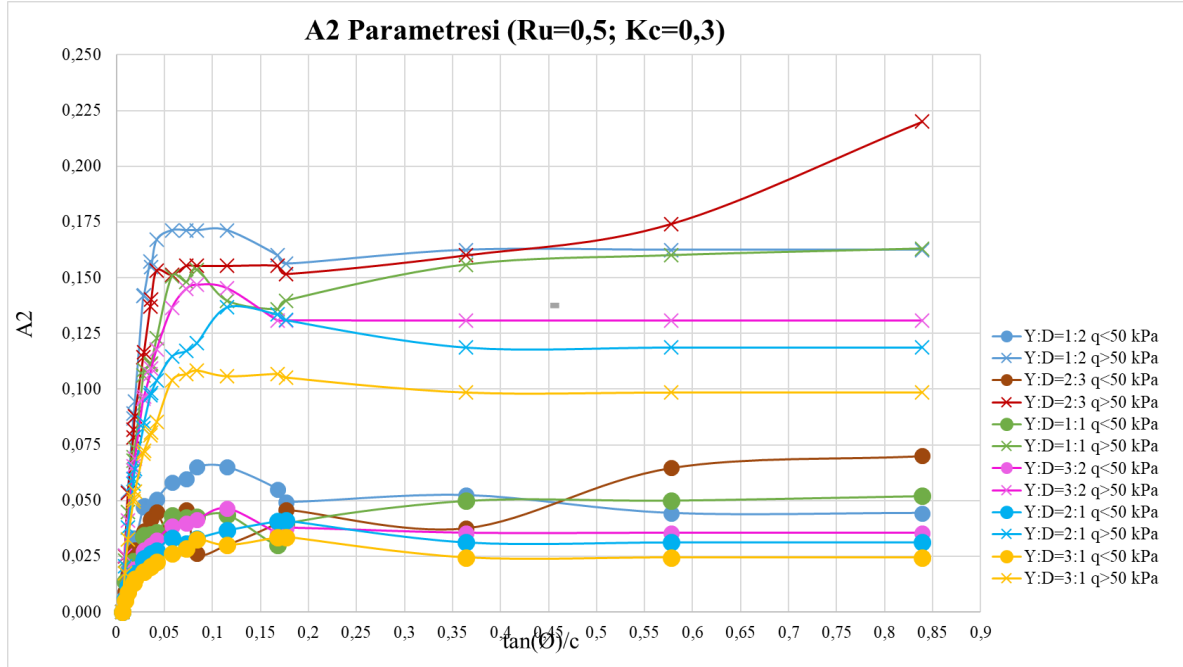


(b)

Şekil 3.14. Deprem durumu ($K_c=0,2$), drenajlı zemin koşulu, $r_u=0,5$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

EK-3. (devam) Sürşarj etkisinin incelendiği A_1 ve A_2 parametre grafikleri

(a)



(b)

Şekil 3.15. Deprem durumu ($K_c=0,3$), drenajlı zemin koşulu, $r_u=0,5$ için sürşarj etkisi
(a) A_1 grafiği (b) A_2 Grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAYA, Fatma Begüm
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 19.07.1991, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (553) 738 07 58
 e-mail : fatmabegum.kaya@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	ODTÜ / İnşaat Mühendisliği	2015
Lise	Çankaya Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.	Geoteknik Proje Mühendisi
2016-2017	Kilci Mühendislik	Geoteknik Proje Mühendisi
2015-2016	Sonar Sondaj ve Jeolojik Araştırma Merkezi	Teknik Ofis Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Kaya, B., Yılmaz, Y. (2019). *Toprak Şevlerin Stabilite Analizine Yönelik Grafik Çözümlerin İncelenmesi*. International Congress on Engineering and Architecture, ENAR 2019, Muğla, Turkey.

Hobiler

Kamp yapmak, fotoğrafçılık, trekking, yoga, seramik



GAZİ GELECEKTİR..