ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bülent DERİN

KOHEZYONLU ZEMİNLERDE KAYMA DÜZLEMLERİ BOYUNCA OLUŞAN ROTASYON

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2005

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOHEZYONLU ZEMİNLERDE KAYMA DÜZLEMLERİ BOYUNCA OLUŞAN ROTASYON

Bülent DERİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez …/…/2005 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.

İmza	İmza	İmza
Doç.Dr. Hasan ÇETİN	Prof.Dr. Aziz ERTUNÇ	Doç.Dr. Mustafa LAMAN
DANIŞMAN	ÜYE	ÜYE

Bu tez Enstitümüz Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No :

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: MMF.2004.YL.55

- **Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOHEZYONLU ZEMİNLERDE KAYMA DÜZLEMLERİ BOYUNCA OLUŞAN ROTASYON

Bülent DERİN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Doç. Dr. Hasan ÇETİN
Yıl: 2005, Sayfa: 58

Jüri : Doç. Dr. Hasan ÇETİN
Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Doç. Dr. Mustafa LAMAN

Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada, özel olarak hazırlanmış killi zemin örneklerinden yaptırılan ince kesitler kullanılmıştır. Bilgisayar ortamında zemin örneklerinin tane, boşluk ve diğer bileşenlerinin yönlenmeleri ölçülmüş ve mikro dokuda (fabrik) değişikliğe neden olan en büyük asal gerilme ile ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Çalışmada, zemin taneleri ve boşluk yönlenme ölçümlerinden elde edilen açılar gül diyagramlarıyla değerlendirilerek rotasyonun tane yönlenmesi ve maksimum asal gerilme (σ_1) yönü üzerindeki etkisini belirlemek amaçlanmıştır.

Zemin mekaniğine konu olan zeminlerin mühendislik ve yapısal özellikleri; doğrudan doğruya tane karakteristikleri, tanelerin konumları ve taneler arasında oluşan kuvvetler tarafından kontrol edilirler. CU (Hızlı) ve CD (Yavaş) deneyleri ile zemin bileşenleri tek tek incelenerek her bir ince kesitten 600-1100 arasında tane, boşluk ve kil domain ölçümü alınmıştır. CorelDRAW programında tanelerin, boşlukların ve kil domainlerinin uzun eksenleri çizilerek yatay ve düşey düzlemlerle yaptıkları açılar bulunmuştur. Açılar gül diyagramı formatında düzeltilerek dips programında rotasyonu belirlemek için gül diyagramları çizilmiştir. Her yenilme miktarında ince kesitlerin uygun yerlerinden zemin dokularının fotoğrafları alınmıştır.

CU (Hızlı) ve CD (Yavaş) deneylerinde tane bileşenlerinin düşeyle $0\text{-}10^0$ arasında açı yapan bileşen yüzdelerinin, tane bileşenlerin düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerleri ile orantılı bulunmuş ve rotasyonun gerçekleştiği doğrulanmıştır. Rotasyonun tane yönlenmesi ve maksimum asal gerilme yönü üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Rotasyon, Yönlenme, Asal Gerilme , Zemin Dokusu

ABSTRACT

MSc THESIS

ROTATION ALONG SHEAR PLANES IN COHESIVE SOILS

Bülent DERİN

DEPARTMENT OF GOELOGICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF ÇUKUROVA

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hasan ÇETİN
Year: 2005, Pages: 58

Jury : Assoc. Prof. Dr. Hasan ÇETİN
Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Assoc. Prof. Dr. Mustafa LAMAN

In this study, soil thin sections of artificially prepared clayey soil samples were used. Orientations of particle, pore and other constituens were measured and the relationship between the soil structure and maximum principal stress was studied using various computer programs. The results were plotted as rose diagrams and the effects of rotation on the orientation and maximum principal stress were investigated.

Engineering properties of soils in soil mechanics are controlled mainly by the charecteristics and orientations of the particles as well as forces acting on these particles. About 600-1100 particle, pore and clay domain orientations in CU (fast) and CD (slow) direct shear tests were measured on each thin section. Using CorelDRAW program, angles between long axes of the particles, pores and clay domains and verticle and horizontal planes were measured. Then, using Dips program rose diagrams of the measurements were prepared. Photographs were taken from representative structures of each thin sections.

Orientations between 0-10 degrees and average angles with the vertical planes were found to corelate well in both CU (fast) and CD (slow) direct shear tests indicating that the roration has taken place in both tests. Effects of rotation on both orientation and maximum principal stress were determined.

Key words : Rotaion, Orientation, Principal Stress, Thin-section

TEŞEKKÜR

Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında yapmış olduğum Yüksek Lisans tez çalışmamın her aşamasında bana güvenen, özeleştiri ve önerileri ile beni yönlendirip destekleyen değerli hocam tez danışmanım Doç.Dr. Hasan ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bölüm imkanlarını kullanmamı sağlayan Jeoloji Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof.Dr. Fikret İŞLER'e, Jüri üyelerimden Prof.Dr. Aziz ERTUNÇ'a ve İnşaat Mühendisliği Zemin Mekaniği Laboratuvarının tüm aletleriyle çalışmalarım için kullanımına izin veren Doç.Dr. Mustafa LAMAN'a teşekkür ederim.

Çalışmamda doktora çalışmasından verdiği ince kesitler ve önerileri ile bana yardımcı olan Dr. Mehmet SÖYLEMEZ'e teşekkür ederim.

Çalışmam süresince yardımlarını benden esirgemeyen Arş. Gör. Mustafa FENER'e, Osman GÜNAYDIN'a değerli Jeoloji Mühendisi arkadaşlarım Ali GÖKOĞLU'na Mustafa KAVUZLU'ya, Fatih KARAOĞLAN'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Benim bugünlere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen ve her zaman yanımda hissettiğim canımdan çok sevdiğim **aileme** teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarımın her aşamasında benimle birlikte yorulan, yardımlarını benden esirgemeyen sevgili nişanlım Jeoloji Mühendisi Handan GÜZEL'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT II
TEŞEKKÜR III
İÇİNDEKİLER IV
ÇİZELGELER DİZİNİ VI
ŞEKİLLER DİZİNİ VII
SİMGELER VE KISALTMALAR XI
1. GİRİŞ 1
1.1. Kohezyonlu ve Kohezyonsuz Zeminlerde Doku 2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 8
3. MATERYAL VE METOT 12
3.1. Materyal 12
3.2. Metot 12
3.2.1. Kesme Kutusu Deneyinin Teorisi 12
3.2.2. İnce Kesitlerin Hazırlanması 13
3.2.2.1. Zemin örneğinin suyunu çıkarma 13
3.2.2.2. Örneği Sertleştirme 14
3.2.2.3. Sertleşmiş Örneği İnceltme 14
3.2.2.4. Sertleşmiş Örneği Parlatma 14
3.2.3. Hazırlanan İnce Kesitlerin Dokularının Belirlenmesi 15
3.2.4. İnce kesitlerin Mikroskop Altında İncelenmesi 16
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 17
4.1. İnce Kesit Analizleri ve Rotasyon 17
4.2. CU (Hızlı) Kesme Kutusu Deneyinde Oluşan Rotasyonun Gül Diyagramları ile Değerlendirilmesi 19
4.3. CD (Yavaş) Kesme Kutusu Deneyinde Oluşan Rotasyonun Gül Diyagramları ile Değerlendirilmesi 37
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 54
KAYNAKLAR 55
ÖZGEÇMİŞ 57

EKLER 58

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 4.1. Kesilmemiş örnek ile CU (Hızlı) deneyleri sonucu rotasyona neden olan yönlenmelerin sayısal değerleri 36
Çizelge 4.2. Kesilmemiş örnek ile CD (Yavaş) deneyleri sonucu rotasyona neden olan yönlenmelerin sayısal değerleri..... 53

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 1.1. Yayılı (a) ve topaklanmış (b) dokular 2
Şekil 1.2. Domain, salkımlaşma ve ped ilişkilerini gösteren zemin yapısı 3
Şekil 1.3. Temel tane düzenlemelerinin şematik görünüşü 4
Şekil 1.4. Zemin tanesinin üç boyutlu yönlenmesi 5
Şekil 1.5. İnce kesitte tane yönlenmesinin tayini 6
Şekil 1.6. (a) Basit tane yapısı, (b) Bal peteği yapısı 7
Şekil 4.1. Düşey gerilme sonucu oluşan rotasyon 17
Şekil 4.2. Kesme kutusu deneyinde oluşan rotasyon. 18
Şekil 4.3. İnce kesitler üzerinde görülen rotasyon. 18
Şekil 4.4. Kesilmemiş zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 20
Şekil 4.5. Kesilmemiş zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 21
Şekil 4.6. Kesilmemiş zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 21
Şekil 4.7. CU (hızlı) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 22
Şekil 4.8. CU (hızlı) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 22
Şekil 4.9. CU (hızlı) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 23
Şekil 4.10. CU (hızlı) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 24
Şekil 4.11. CU (hızlı) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 24
Şekil 4.12. CU (hızlı) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 25
Şekil 4.13. CU (hızlı) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 26
Şekil 4.14. CU (hızlı) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 26

Şekil 4.15. CU (hızlı) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 27
Şekil 4.16. CU (hızlı) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 28
Şekil 4.17. CU (hızlı) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 28
Şekil 4.18. CU (hızlı) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 29
Şekil 4.19. CU (hızlı) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 30
Şekil 4.20. CU (hızlı) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 30
Şekil 4.21. CU (hızlı) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 31
Şekil 4.22. CU (hızlı) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 32
Şekil 4.23. CU (hızlı) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 32
Şekil 4.24. CU (hızlı) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 33
Şekil 4.25. CU (hızlı) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 34
Şekil 4.26. CU (hızlı) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 34
Şekil 4.27. CU (hızlı) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 35
Şekil 4.28. Kesilmemiş örnek ile CU deneyleri sonucu oluşan rotasyonun düşeyle yaptıkları ortalama açılar ve 0-10^0 açı yapan bileşen yüzdelerinin karşılaştırılması. 37
Şekil 4.29. CD (Yavaş) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 38

Şekil 4.30. CD (Yavaş) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 39
Şekil 4.31. CD (Yavaş) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 39
Şekil 4.32. CD (Yavaş) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 40
Şekil 4.33. CD (Yavaş) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 41
Şekil 4.34. CD (Yavaş) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 41
Şekil 4.35. CD (Yavaş) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 42
Şekil 4.36. CD (Yavaş) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 43
Şekil 4.37. CD (Yavaş) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 43
Şekil 4.38. CD (Yavaş) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 44
Şekil 4.39. CD (Yavaş) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 45
Şekil 4.40. CD (Yavaş) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 45
Şekil 4.41. CD (Yavaş) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 46
Şekil 4.42. CD (Yavaş) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 47
Şekil 4.43. CD (Yavaş) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 47
Şekil 4.44. CD (Yavaş) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 48

Şekil 4.45. CD (Yavaş) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 49
Şekil 4.46. CD (Yavaş) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 49
Şekil 4.47. CD (Yavaş) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf. 50
Şekil 4.48. CD (Yavaş) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı. 51
Şekil 4.49. CD (Yavaş) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi. 51
Şekil 4.50. Kesilmemiş örnek ile CD deneyleri sonucu oluşan rotasyonun düşeyle yaptıkları ortalama açılar ve 0-10^0 açı yapan bileşen yüzdelerinin karşılaştırılması. 53

SİMGELER VE KISALTMALAR

c : Kohezyon
cm : Santimetre
dr : Kesme hızı
e : Boşluk oranı
kgf : Kilogram kuvvet
Log : Logaritma
mm : Milimetre
N : Normal yük
t : Zaman
t_f : Yenilme zamanı
T_{max} : En büyük kesme kuvveti
% : Yüzde
α : Zemin taneciğinin uzun ekseninin yatay düzlemle yaptığı açı
β : Zemin taneciğinin uzun ekseninin düşey düzlemle yaptığı açı
ϕ : İçsel sürtünme açısı
ϕ' : Efektif içsel sürtünme açısı
θ : İnce kesitte zemin taneciğinin uzun ekseninin yatay ile yaptığı dar açı
σ : Gerilme
σ_n : Normal gerilme
$\sigma_{ön}$: Ön konsolidasyon gerilmesi
τ : Kayma gerilmesi
τ_{max} : En büyük kayma gerilmesi

1. GİRİŞ

Zeminlerde tane düzeni 1950'lerin ortalarında optik, x ışın kırılmalı ve elektron mikroskop tekniklerinin gelişmesine kadar tam olarak anlaşılamamıştır. Bu yıllarda çalışmalar kil taneciklerinin düzeni, dizilimi veya pozisyonlarının mekanik özelliklere etkisi üzerine çalışılmıştır. 1960 lı yılların sonuna doğru numune hazırlama ve çalışma teknikleriyle birlikte hassas elektron mikroskopların gelişmesi bu konudaki çalışmaları hızlandırmıştır. 1970 li yılların başlamasıyla taneli zeminler üzerindeki çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Zemin mekaniğine konu olan zeminlerin mühendislik ve yapısal özellikleri; doğrudan doğruya tane karakteristikleri, tanelerin konumları ve taneler arasında oluşan kuvvetler tarafından kontrol edilirler (Mitchell, 1976). Zeminlerde taneler arasındaki ilişki optik ve elektron mikroskobu tekniklerinin gelişmesiyle anlaşılabilmiştir. Bu mikroskop teknikleriyle kil taneciklerinin ve taneler arasındaki boşlukların düzeni, dizilimi veya konumları ve bu tane konumunun zeminin mekanik özelliklerine etkisi incelenebilmektedir.

Zeminleri etkileyen gerilmelerin zemin dokusu üzerinde meydana getirdiği değişiklikleri saptamaya yönelik çalışmalardan biri, zeminlerden hazırlanan ince kesitlerin mikroskop altında incelenmesidir. Zeminlerde tane ve boşluk yönlenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ancak bu çalışmaların çoğunda ya gözlemsel olarak veya birefringence (ince kesitlerin mikroskop altında döndürülerek minerallerin renk değişiminden yönlenme tayini) oranı ile yani dolaylı olarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Tane bazında birebir yönlenme ölçümleri Cetin ve Söylemez, (2004) tarafından yapılmıştır.

Zeminleri etkileyen gerilmelerin zemin dokusunda meydana getirdiği değişikliklerin incelenebilmesi için, o zeminden yapılan ince kesitlerden 400-500 adet bileşenin yönlenme ölçümlerinin yapılması istatistiksel olarak iyi sonuçlar verebilmektedir (Barton, 1974).

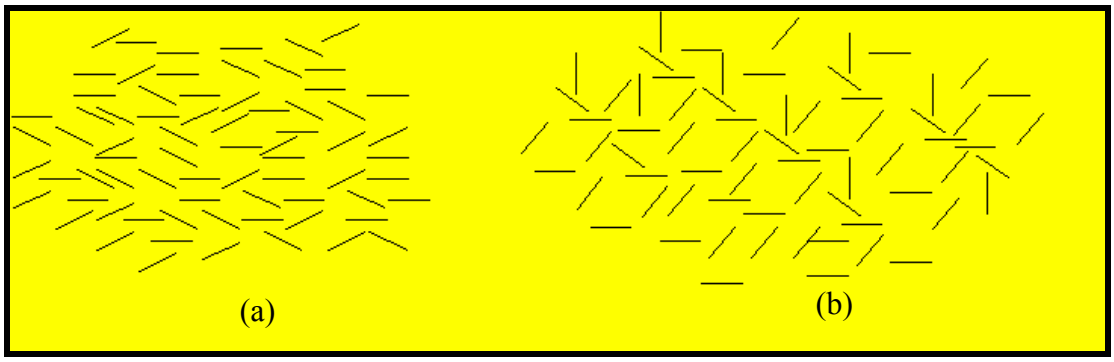
Bu çalışmada, özel olarak hazırlanmış killi zemin örneklerinden daha önce farklı amaç için yaptırılan ince kesitler kullanılmıştır. Bilgisayar ortamında zemin örneklerinin tane, boşluk ve diğer bileşenlerinin yönlenmeleri ölçülmüş ve mikro

dokuda (fabrik) değişikliğe neden olan en büyük asal gerilme ile ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Çalışmada, zemin taneleri ve boşluk yönlenme ölçümlerinden elde edilen açılar gül diyagramlarıyla değerlendirilerek rotasyonun tane yönlenmesi ve maksimum asal gerilme (σ_1) yönü üzerindeki etkisini belirlemek amaçlanmıştır.

1.1. Kohezyonlu ve Kohezyonsuz Zeminlerde Doku

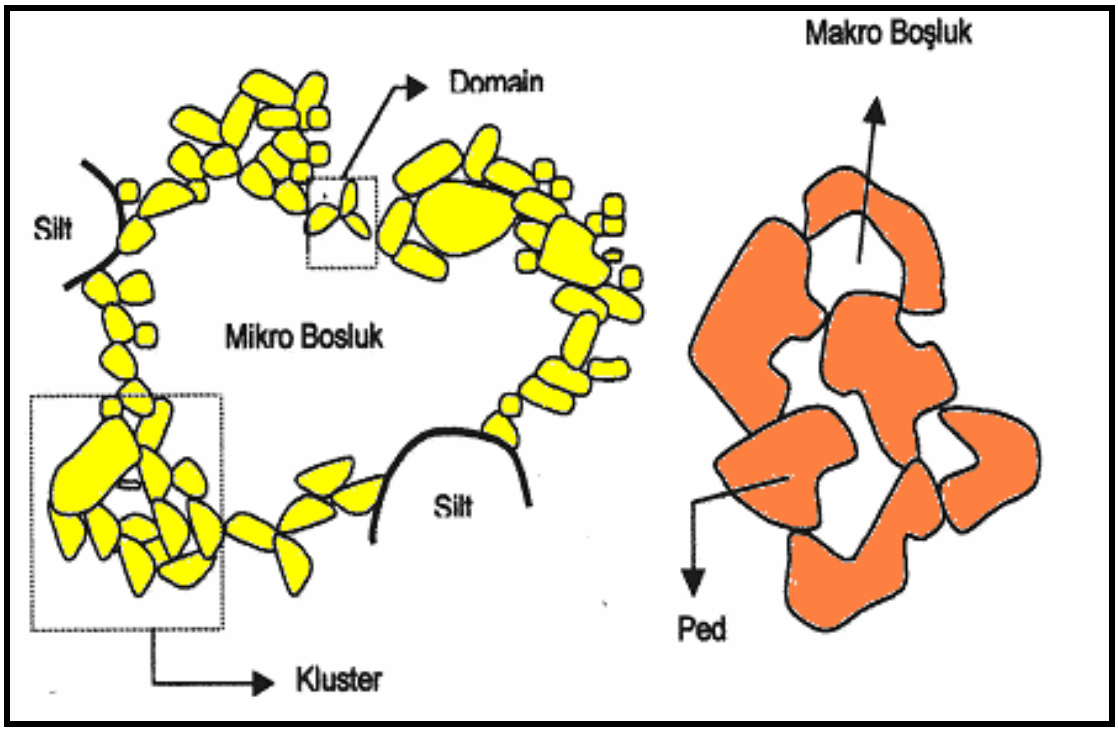
Kohezyonlu zeminlerde dokuyu anlayabilmek için su eriyiği içindeki kil taneciklerinin arasında etkili olan kuvvetleri tanımlamak gerekir (Das, 1990). Kil minerali zerreciklerinin yüzeyindeki negatif yükün etkisiyle zemin boşluklarında bulunan zemin suyu içerisindeki katyonlar kil yüzeyine doğru çekilirler. Bu katyonlar kil yüzeyine sıkıca yapışmazlar ve suyun karakteri değiştiği zaman kolayca başka katyonlarla yer değiştirirler. Katyonlar killer üzerindeki negatif yükler tarafından çekilirler, aynı zamanda da termal enerjilerinden dolayı birbirlerinden uzaklaşma eğilimleri vardır. Bu itme ve çekmenin net etkisiyle kil zerreciğine bitişik bir katyon tabakası oluşur. Bu tabakaya disperse (yayılmış) tabaka adı verilir. Bu negatif yüklü kil yüzeyi ve disperse katyon tabakası birlikte çift tabaka diye adlandırılır. Disperse dokuda kil zerreciklerinin yüzeyleri aşağı yukarı birbirlerine paralel olmasına rağmen zerrecikler arasında bir bağ yoktur ve tamamıyla ayrık durumdadırlar.

Eriyik içerisindeki dağınık kil zerrecikleri gelişigüzel hareketlerle birbirine yaklaştıkları zaman kenar-yüzey teması oluşturarak kümelenme eğilimi gösterirler. Bu sırada meydana gelen çekme kuvveti kümeleri bir arada tutar. Eğer kümeler büyürlerse yer çekimi etkisi ile çökelirler. Bu şekilde meydana gelen dokuya kenar-kenar temaslı topaklanmış doku adı verilir (Şekil 1.1).



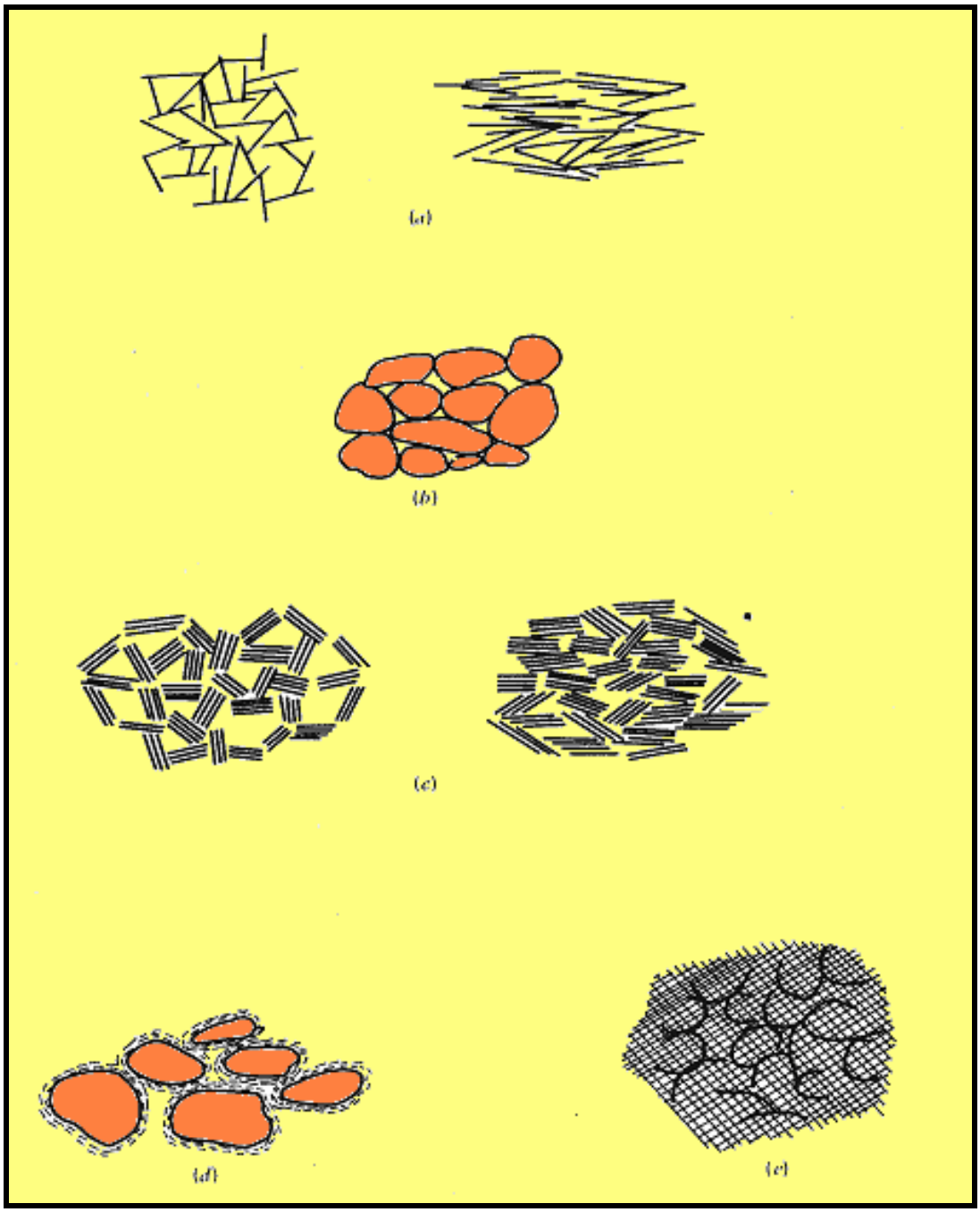
Şekil 1.1. Yayılı (a) ve topaklanmış (b) dokular (Mitchell, 1976).

Doğada saf kil yatakları oldukça azdır. Kil genellikle daha iri taneli zemin parçacıkları arasında matriks halinde bulunur. Killere göre daha geniş yer tutan bu karışımların yapıları oldukça karışıktır. Her bir kil taneciği diğer bir kil taneciği ile yüz yüze birleşerek küçük gruplar meydana getirirler. Bu mikroskobik küçük gruplar domain olarak adlandırılır (Craig, 1989; Das, 1990). Domainler kendi aralarında gruplar oluşturarak aydınlatmalı mikroskoplar altında görülebilen salkımlaşmaları oluştururlar. Salkımlaşmalar da kendi aralarında gruplar oluşturarak mikroskopla görülebilen ped'leri meydana getirirler. Pedlerde bir araya gelerek aralarında makro boşluklar bulunan makro yapıları oluştururlar (Das, 1990) (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Domain, salkımlaşma ve ped ilişkilerini gösteren zemin yapısı (Das, 1990).

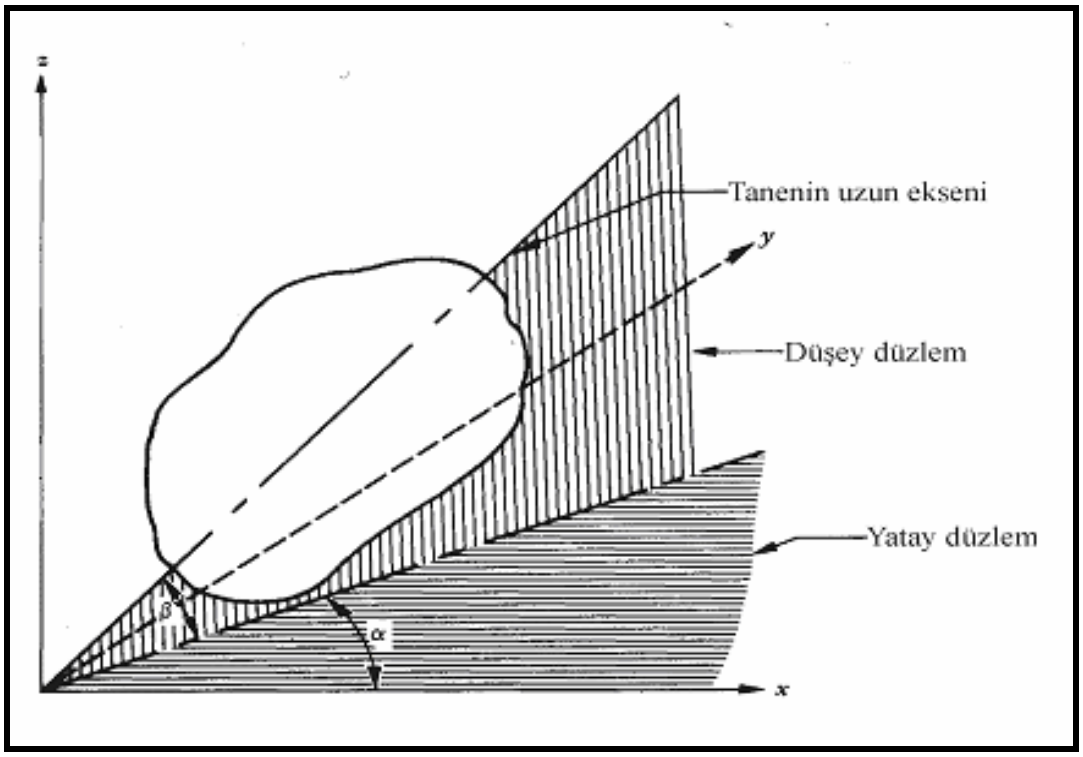
Zemin taneleri ve kil zerreciklerinin oluşturduğu gruplardan tane düzenlemelerinin şematik görünüşü Şekil 1.3'de verilmiştir.



Şekil 1.3. Temel tane düzenlemelerinin şematik görünüşü: (a) bireysel kil levhacıkları etkileşimi, (b) bireysel silt veya kum tane etkileşimi, (c) kil levhacıklarının gurup etkileşimi, (d) kaplanmış silt veya kum etkileşimi, (e) kısmen fark edilmeyen tane etkileşimi (Collins ve Mc Gown, 1974).

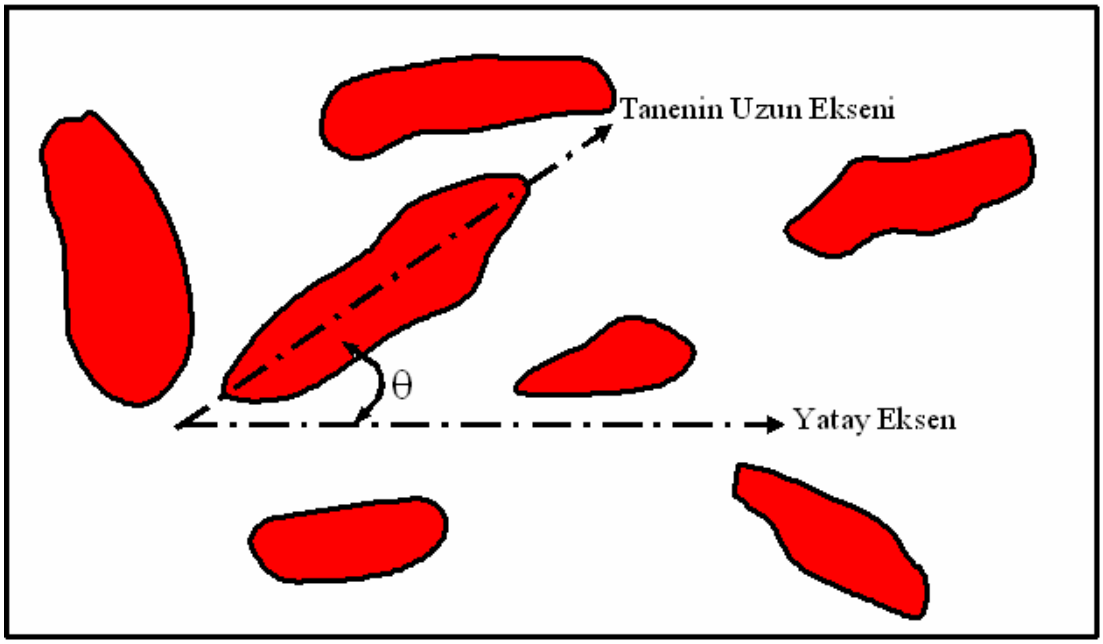
Kohezyonsuz zeminlerde zemini oluşturan taneler eşit büyüklükte değildirler. Küçük taneler daha büyük taneler arasındaki boşlukları doldurarak aynı büyüklükteki küresel tanelerin meydana getirdiği yapıya göre daha yüksek yoğunluk,

düşük boşluk ve boşluk oranları oluştururlar. Diğer taraftan şekilleri düzgün ve küresel olmayan değişik şekillerdeki taneler daha az yoğunluk, yüksek boşluk ve boşluk oranları verirler. Doğada basit tane dokulu zeminlerin boşluk ve boşluk oranları düzgün kürelerin meydana getirmiş oldukları boşluk ve boşluk oranlarından çok da farklı değildir. Birçok çalışma (örn; Mahmood, 1973; Mitchell, 1976) taneli zeminlerin aynı boşluk oranı ve rölatif yoğunluklarda farklı dokular gösterebileceğini ortaya koymuştur. Taneli bir zeminin doku özellikleri; tane şekli, tane yönlenmesi ve taneler arası temas yönü ile ilgilidir. Mika haricindeki kil minerali olmayan birçok mineral, zemin içinde iri taneler olarak bulunurlar. Bu tanelerin tüm boyutları birbirine eşit olmayıp, en azından biraz uzun ve yassıdırlar. Kum tanelerinin yönlenmesi ve rotasyonu, tane uzun ekseninin bir takım referans eksenlerle yapmış olduğu eğimle tanımlanır (Şekil 1.4).



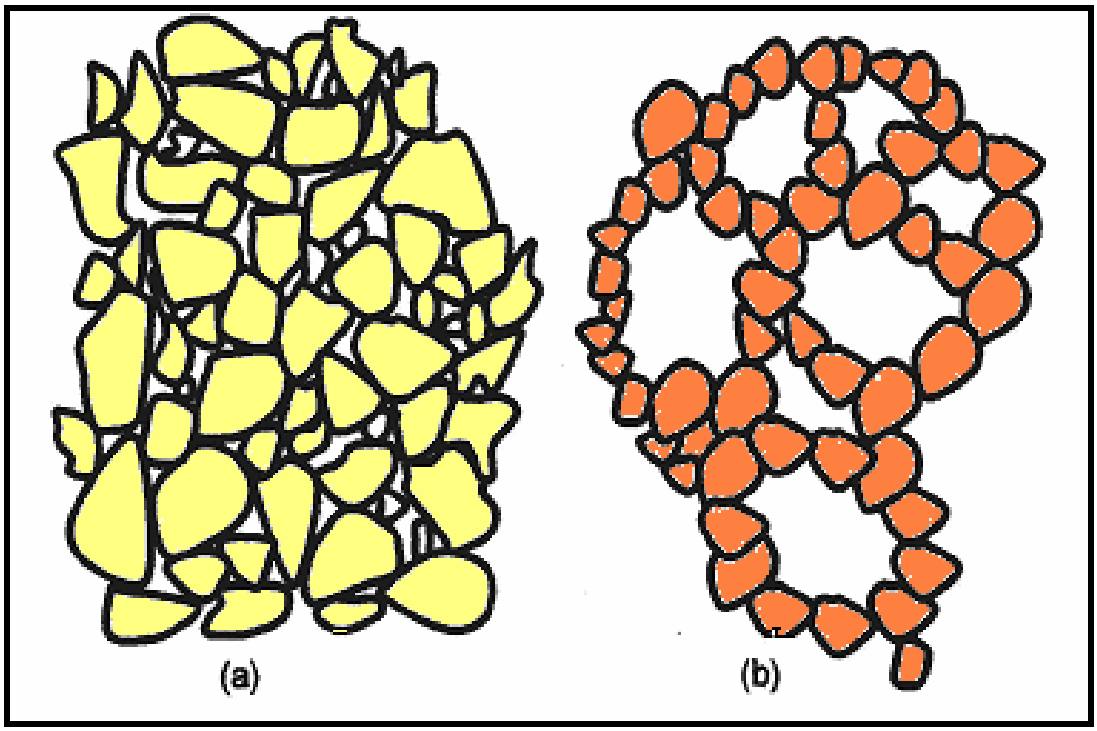
Şekil 1.4. Zemin tanesinin üç boyutlu yönlenmesi (Mitchell, 1976).

Bir çok çalışmada tane yönlenmesi ve rotasyon, ince kesit kullanılarak tanenin uzun ekseninin yatayla yapmış olduğu açı ile gösterilmiştir (Lafeber, 1966; Oda, 1972; Mahmood, 1973; Mitchell, 1976), (Şekil 1.5.).



Şekil 1.5. İnce kesitte tane yönlenmesinin tayini (Mitchell, 1976).

Kohezyonsuz zeminlerde görülen yapı "basit taneli yapı" ve "bal peteği yapısı" olarak iki önemli gruba ayrılır. Basit taneli yapıda tanecikler duraylı olup, birbirleriyle temas halindedirler. Tanelerin şekil, boyut ve göreceli konumları zeminin yoğunluğunu etkiler. Küçük taneli zemin parçacıkları ile iri taneli zemin parçacıkları beraber bulunduklarında, ince taneler daha iri taneler arasındaki boşluklara yerleşirler. Böylece boşluk oranları azalarak daha yoğun zemin dokularını oluştururlar. Tane şekillerinin düzensiz olması, boşluk oranlarının artmasına ve daha gevşek dokuların oluşmasına sebep olur. Bal peteği yapısında daha küçük kum ve silt tanecikleri zincirler oluşturarak kemerler meydana getirirler. Bu tür dokular, daha büyük boşluk oranlarına sahiptirler. Daha çok normal durgun yüklere dayanıklı olup, büyük ve şok yüklemeler altında bu yapılar kırılarak aşırı oturmalara sebep olurlar (Mitchell, 1976; Das, 1990), (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. (a) Basit tane yapısı, (b) Bal peteği yapısı (Mitchell, 1976 ve Das, 1990).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Zeminlerin mikro yapıları, dokuları ile zemin tanecikleri ve boşluklarının yönlenmesi ve oluşan rotasyonun mühendislik özelliklerine etkisi konularında yapılan çalışmaların bir kısmı şunlardır.

Casagrande (1932) "The structure of clay and its importance in foundation engineering" adlı çalışmasında killerdeki bal peteği dokusunun hassas denizel zeminlerde bulunduğunu, bitişik silt taneleri arasındaki en küçük boşluklarda yerleşmiş, kil tanecik yapılarının oldukça fazla sıkışmaya maruz kalırken, daha büyük boşluklarda yerleşmiş tane yapılarının daha az sıkışmaya maruz kaldıklarını belirtmiştir. Birinci durumdaki kil taneciklerine yapışkan kil, ikinci durumdakine ise matriks kil adını vermiştir.

Lambe (1953) "The structure of inorganic soils" adlı makalesinde inorganik zemin yapılarının ve mevcut kil mineral yapılarının deniz suyundan tatlı suya kadar elektrokimyasal ortamlarda oluşmuş tortullarda birlikte bulunduklarını, düşük elektrolit konsantrasyonu sonucu oluşan tortullaşmanın taneler arasındaki elektriksel çekim kuvvetinden dolayı flakule yapıları oluşturdukları ve bu şartlar altında bireysel platelerin kenar-kenar veya kenar-yüzey temaslı açık yapıları oluşturduklarını belirtmiştir. Goldschmidt'in cardhouse diye tanımladığı yapıları tuzsuz flakulasyon olarak tanımlamıştır.

Slone ve Nowatzki (1967) "Electron optical study of fabric changes accompanying shear in a kaoline clay" adlı çalışmasında elektron mikroskobu kullanarak kısmen suya doygun kaolin kilinin dokusundaki değişiklikleri incelemiştir. Kaolinin kayma zonunun dik uzantısının hemen hemen her zaman, kayma düzleminin ortasında geliştiğini, kayma zonu boyunca düzgün olarak ince, bireysel paralel yönlenmeli zon veya düzlemler sayesinde kayma düzleminin geliştiğini, kayma deformasyonu artarken bireysel yönlenmiş düzlemdeki paralellik derecesinin daha da belirginleştiğini belirtmişlerdir.

Ingles ve Lafeber (1967) "The initation and development of crack and joint systems in granular marses" adlı makalelerinde bir zemin numunesinin boşluk ve taneciklerinin dağılımının ve belli bir yöne meyilli olmalarının, zemine uygulanmış

gerilmenin yönüne ve büyüklüğüne, gözenek ve taneciklerin zemin içindeki dağılım ve pozisyonları da, daha önce zemine uygulanmış bu gerilmenin etkisinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Push (1970) "Microstructural changes in soft quick clay at failure" isimli çalışmasında aşırı hassas denizel killer üzerinde bir seri serbest basınç deneyi yaparak, mikro yapı gözlemleri için küçük numuneler hazırlamış ve bu numunelerdeki doğal mikro yapı modellerinin tane bağlarıyla birleşmiş küçük agrega şebekeleri tarafından karekterize edildiklerini, bu bağların artan kayma deformasyonlarında ard arda kırıldıklarını ve domain benzeri tane guruplarının oluştuğunu, çıplak gözle görülebilen kayma zonunda kayma kuvvetlerinin zemin taneciklerini deforme edip, yönlendirmeye çalıştıklarını belirtmiştir.

Ingles ve Lee (1971) "The influence of initial grain shape and pore anizotropy on strength of brittle soils" adlı makalelerinde statik olarak kompakte ettikleri ve levha şekilli taneler içeren anizotropik bir zemin örneği elde etmişler ve bu zemin örneğinde kaolin ve florit gibi küçük lamellerin olması durumunda deformasyon davranışının anizotropik, dayanımın ise izotropik olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak mika ve dolerit gibi büyük lamellerin bulunması durumunda ise hem deformasyonun, hem de dayanımın anizotropik olduğu sonucuna varmışlardır.

Kirkpatrick ve Rannie (1972) "Directional properties of consolidatied kaolin" adlı çalışmalarında yönlenmenin birçok kil için anizotropik deformasyonun bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir. Anizotropik deformasyona rağmen c ve ϕ efektif gerilme parametreleri göz önüne alındığında bu durumun izotropik olacağını söylemişler, farklı konsolidasyon seviyelerinde zemin taneciklerinin yönlenme eğilimlerinin, daha önce rast gele, düzensiz olan pozisyonları, sonradan uzun eksenlerinin normal ve maksimum konsolidasyon gerilmesi altında yatay pozisyona geldikleri sonucuna varmışlardır.

Barden (1972) "The influence of structure on deformation and failure in clay soil" adlı makalesinde anizotropik kil yapılarının izotropik bir dayanım özelliği gösteriyor olmasının sebebini, yenilme düzlemi veya zonunda kil levhacıklarının yeniden yönlenme gösterme özelliğine bağlamış ve polarizan mikroskobu ile kaolin türü killer üzerinde yenilme düzlemlerinden yapılmış ince kesit incelemeleriyle bu

sonucu doğrulamıştır. Aynı zamanda genel olarak killerin davranışlarının anizotropik deformasyon ve izotropik dayanım özellikleriyle kumlara benzediğini belirtmiştir.

Collins ve McGown (1974) "The form and function of microfabric featurres in a variety of naturel soils" adlı çalışmalarında zeminlerin bazı özel mühendislik davranışlarının, bazı özel tane yapılarıyla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Çökelme alanı ile mikro yapı özellikleri arasındaki değişmez ilişkilere bazı kanıtlar bulunurken, belirli mühendislik davranış tipleriyle, belirli özelliklerin etkileşimlerinin birlikte bulunduklarını öne sürmüşlerdir.

Love ve diğerleri (1982) "Soil pore orientation and faults" adlı çalışmalarında faylanmış ve faylanmamış zemin numunelerindeki gözeneklerin dağılımını araştırmışlar, sonuçta faylanmamış örneklerdeki toplam gözeneklerin ortak yönlenmelerini yatay veya yataya yakın tespit edilmiş, bu durumun zeminin jeolojik yükünden kaynaklanan kompaksiyon altında düşey maksimum asal gerilme tarafından oluşturulduğunu göstermişlerdir. Yazarlar New Mexico da bulunan kuvaterner yaşlı Lajencia normal fayındaki çalışmalarında zemin tabakaları boyunca gözeneklerin yönlenmeleri ile fay boyunca elde ettikleri numunelerden hazırladıkları parlak kesitlerin, fayın hareketiyle rotasyona uğradıklarını makroskobik gözlemleriyle ispatlamışlardır.

Douglas ve diğerleri (1983) "The mikromorfology of two soils fault-breccias" adlı çalışmalarında faylanma sonunda mikromorfolojik yapıda karbonatlaşma, kum ve daha küçük tane boyutundaki malzemenin yeniden yönlenmeye uğradığını, bu yönlenmenin fay zonundan uzaklaştıkça hafif, yakınlaştıkça daha şiddetli ve yüksek derecede olduğunu belirtmişlerdir.

Luza ve diğerleri (1987) "İnvestigation of the Meers fault, Southwestern Oklahoma"adlı çalışmalarında güneybatı Oklahoma da sol yönlü oblik Meers Fayı üzerinde açtıkları trençlerde birkaç riyolit parçacığının uzun eksenlerinin kesme sırasında fay düzlemi boyunca yaklaşık paralel olarak yeniden yönlenme gösterdiğini belirtmişlerdir.

Çetin (1998) "Soil pore and particle orientations caused by active faulting; a micromorphological perspective" adlı makalesinde aktif fayların zemin tane ve boşlukları üzerindeki etkisini belirlemek için, Meers Fayı zonunun 3 ve 5 cm

yakınından alınan örselenmemiş zemin örneklerinden yaptığı ince kesitlerde, zemin tane ve gözeneklerinin uzun eksenlerinin, faylanmaya sebep olan maksimum asal gerilme yönüne dik olarak belirgin bir yönlenme gösterdiğini söylemiştir. Bu yönlenmelerin maksimum ve minimum asal gerilme yönlerinin belirlenmesinde ve bir oblik fayda oblik ve yatay kayma miktarının tayininde belirleyici olduğunu göstermiş, fakat bazı durumlarda zemin boşluklarının ikincil kalsitle dolacağını ve daha sonra yönlenme analizinin net olamayabileceğini belirtmiştir. Ayrıca zeminlerdeki gözenek ve tane yönlenmelerinin, faylanmayı meydana getiren maksimum asal gerilmenin yönünü işaret ettiğini ve yönlenmelerin fayın aktivitesinden kaynaklandığını belirtmiştir

Çetin ve Söylemez (2004) "Soil-particle and pore orientations during drained and undrained shear of a cohesive sandy silt-clay soil" adlı makalelerinde, zemin bileşenlerinin yönlenmesi ile kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi belirlemek için CD ve CU deneyleri yapmışlar ve kayma düzlemine yakın bölgelerde bu ilişki artmakta, düzlemden uzaklaştıkça azalmakta olduğunu söylemişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu çalışmada daha önce farklı bir amaç için kullanılan ince kesitler materyal olarak kullanılmıştır. İnce kesitler CU ve CD kesme kutusu deneyi sonucu oluşturulmuş ve isimlendirilmiştir. Her seride örnekler 1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, 11 mm ve 13 mm kesilmiştir. İnce kesitlerden her ilerleme için oluşan rotasyon bulunmaya çalışılmıştır. Çalışmada, ince kesitler, polarizan mikroskop, CorelDRAW programı ve Dips programı materyal olarak kullanılmıştır.

3.2. Metot

3.2.1. Kesme Kutusu Deneyinin Teorisi

Bu deneyin temel prensibi; bir zemin numunesini belirli bir normal gerilme altında, uygulanan kesme kuvveti ile önceden belirlenmiş yatay bir düzlem boyunca yenilmeye zorlamaktır. En az üç deneyin yenilme sonucunda yenilmeye sebep olan kesme kuvvetleri ile normal kuvvetler arasındaki ilişkiden zeminin kayma mukavemeti parametreleri olan c ve ϕ hesaplanır.

Bu deney kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için uygun olmakla birlikte daha çok kumlar için uygundur. Kohezyonlu zeminlerden, ucu keskin, kare enkesitli örnek alıcı ile alınan kare prizma şeklindeki örnek numune, kutuya yerleştirilir. Zemin yüzlerinin alt ve üst yüzlerini iyi kavramak için, çıkıntıları kesme hareketine dik olan iki metal plaka kullanılır. Drenajlı deneylerde, deney sırasında, zemin numunesinden suyun çıkabilmesi için, çıkıntılı plakanın alt ve üstüne geçirimli taş plakalar yerleştirilir. Çıkıntılı plakalar, drenajlı deneylerde delikli olurlar. Zemin örneği üzerine 9, 18, 36, 72 kg gibi sabit bir düşey yük uygulanır. Düşey yük sabit iken, yatay olarak sabit bir kesme deformasyonu elektrik motoru ile otomatik bir şekilde uygulanır. Gittikçe artan kesme kuvvetine karşı, zemin örneği iki halkayı ayıran düzlem boyunca kesilir ve zeminde bir kayma düzlemi oluşur. Uygulanan kesme kuvveti bir yük halkası vb ile ölçülür. Zemin örneğinin deney sırasındaki sıkışma ve kabarma miktarı da, yükleme plakası üzerine konulan bir deformasyon saati ile ölçülür. Deneyin başlangıcından sonuna kadar, zemin numunesinin hem

düşey deformasyonları, hem de kesme deformasyonları belli zaman aralıklarıyla kaydedilir. Zemin örneği kesildikten bir süre sonra, deneye son verilir. Kesilme anındaki, normal ve kesme gerilmeleri şu şekilde hesaplanır.

σ_n=N/A=N/(6x6 cm)=sabit $\tau_{max}=T_{max}/A=T_{max}/(6x6\ cm)$

σ_n = Normal Gerilme (kg/cm^2) τ_{max}= Maksimum Kesme Gerilmesi (kg/cm^2)

N = Normal Kuvvet (kg) T_{max}= Maksimum Kesme Kuvveti (kg)

A = Numune Alanı (cm^2)

3.2.2. İnce Kesitlerin Hazırlanması

Zeminlerden ince kesitlerin hazırlanması kayaçlardan ince kesit yapma tekniğine benzer bir teknikle yapılır. Fakat zemin kesilmeden, inceltilmeden ve parlatılmadan önce mutlaka reçinelerle doygun hale getirilmeli ve sertleştirilmelidir. Bu reçineler genellikle polyester polystyrene veya epoxy bileşenleridir. Zeminlerden ince kesitlerin hazırlanması aşağıdaki adımlarda yapılır (Fitzpatrick, 1984).

Zemin Örneğinin Suyunu Çıkarma
Örneği Sertleştirme
Sertleşmiş Örneği İnceltme
Sertleşmiş Örneği Parlatma

3.2.2.1. Zemin örneğinin suyunu çıkarma

Normal olarak zemin örneklerinin oda sıcaklığında (20 ^{0}C) kurumasına izin verilir. Bunu 50 ^{0}C de 48 saat ısıtma izler. Bu çok şiddetli bir işlem olmamasına rağmen bir çok zeminin yapısında küçük bir etki bırakır. Buna rağmen genişleyebilir kafes yapılı veya organik madde içeren kil içeriği fazla zeminler kurutulduklarında önemli ölçüde küçülebilirler. Böyle durumlarda kurutmadan kaçınılmalı ve su asetonla yer değiştirdikten sonra sertleştirme yapılmalıdır.

3.2.2.2. Örneği Sertleştirme

Gözenekli zeminlerin sertleştirilmesi önemli bir problem oluşturmaz fakat sıkı zeminler çift sertleştirme gerektirebilir. En iyi sertleştirmeler düşük viskoziteli bir reçine kullanıldığında ve sertleştirme bir vakum aleti içinde yapıldığında elde edilir. En çok kullanılan sertleştiriciler polyester epoxy ve carbowax 6000 (polyetylene glycol) reçineleridir. Islak zemin numunesindeki su asetonla yer değiştirilir ve numune ince bir reçineyle sertleştirilir. Bu teknik uzun ve titizlik gerektiren bir çalışma olup iyi sonuç vermektedir.

Reçine seçimindeki en önemli faktörlerden biri reçinenin refraktif indeksi 1.54 olan Kanada balzamına mümkün olduğu kadar yakın olmasıdır ki bu mineralojik çalışmalar için bir standarttır.

3.2.2.3. Sertleşmiş Örneği İnceltme

Zemin reçine ile doyurulduktan sonra ince kesit halinde kesilir. Bu ince kesitler inceltici tozlar veya zımpara kağıdıyla inceltilebilir. Eğer inceltici toz kullanılırsa tozun kalitesine dikkat edilmelidir. Küresel şekilli tanelerden oluşması ve kendisi parçalanmadan zımparalayabilme özelliğinden dolayı Aloxit (Alüminyum oksit) en çok tercih edilmesi gereken tozdur. İnceltme işlemi elle veya inceltme makinesi (Lapmaster gibi) kullanılarak dönen plakalar yardımıyla da yapılabilir. Bu şekilde zemin blokları otomatik ve eş zamanlı olarak hızlı bir şekilde inceltilebilirler.

3.2.2.4. Sertleşmiş Örneği Parlatma

Bu işlem için birçok prosedür vardır. Putty tozu iyi bir parlatıcıdır. Yumuşak bir bez üzerine konan putty tozu ile iyi bir parlatma elde edilir fakat bu tozun ince kesitin tüm yüzeyine aynı oranda temas etmediği durumlarda farklı parlatmalar oluşabilir.

Bununla beraber kesme kutusu cihazına konulmadan ve konulduktan sonra farklı kesme kuvveti ve deformasyon kademelerinde hazırlanan numunelerden mikroskopla tane yönlenmelerinin belirlenmesi için ince kesitlerin hazırlanması ABD deki The National Petrographic Inc. labaratuvarına yaptırılmıştır.

3.2.3. Hazırlanan İnce Kesitlerin Dokularının Belirlenmesi

Zemin dokularının belirlenmesinde kullanılan çok çeşitli yöntemler vardır. Bunlardan bazılar şunlardır:

Optik (polarize) Mikroskop Yöntemi

Elektron Mikroskobu Yöntemi

Boşluk Ölçüm Dağılım Yöntemi

Akustik Hız Yöntemi

X ışını Dağılımı Yöntemi

Termal İletkenlik Yöntemi

Yalıtkanlık Dağılımı ve Elektrik İletkenliği Yöntemi

Mekanik Özellikler Yöntemi

- Mukavemet Yöntemi
- Geçirgenlik Yöntemi
- Sıkışabilirlik Yöntemi
- Büzülme ve Şişme Yöntemi

Bu metotlardan ilk dört tanesi zemin dokularının doğrudan gözlenmesine imkan tanır ve üzerinde çalışılan zemin numuneleri ana malzemenin özelliklerini eksiksiz taşır. Bu metotlarla incelenecek zemin numunelerinin hazırlanmaları sırasında esas doku bozulmaz. Ancak küçük örneklerin çalışılması sırasında numune hazırlanırken dokuda bozulma olur. Diğer metotlarda bu bozulma olmamasına rağmen, arazide doku belirlenmesinde, kesme ve sıkışma işlemleri sırasındaki doku değişimlerinin çalışılmasında tam ve kesin sonuçlar vermemektedirler.

İlk dört Yöntemin dışındaki dolaylı metotlar doğal su muhtevalarındaki örselenmemiş numuneler üzerinde uygulanırlar. İlk dört metot numunelerin boşluklarındaki sıvının alınması veya başka bir sıvıyla değiştirilmesini gerektirirler. Bu işlemler sırasında esas dokunun bozulma ihtimali olabileceğinden özen gösterilmelidir (Mithcell, 1976).

Çok uzun zamandan beri zeminlerin dokularının oluşmasında çevrenin etkisinin çok büyük olduğu biliniyordu. Özellikle elektron mikroskobunun zeminlerin dokularının araştırılmasında kullanılmasıyla, aynı tip zeminlerin aynı

dokuya sahip olmadıkları, aynı çevre şartlarında bulunan aynı tip zeminlerin dokularının aynı olduğu ve bunun da doku çevre ilişkisini gösterdiği görülmüştür (Mithcell, 1976; Berry ve Raid, 1987).

3.2.4. İnce kesitlerin Mikroskop Altında İncelenmesi

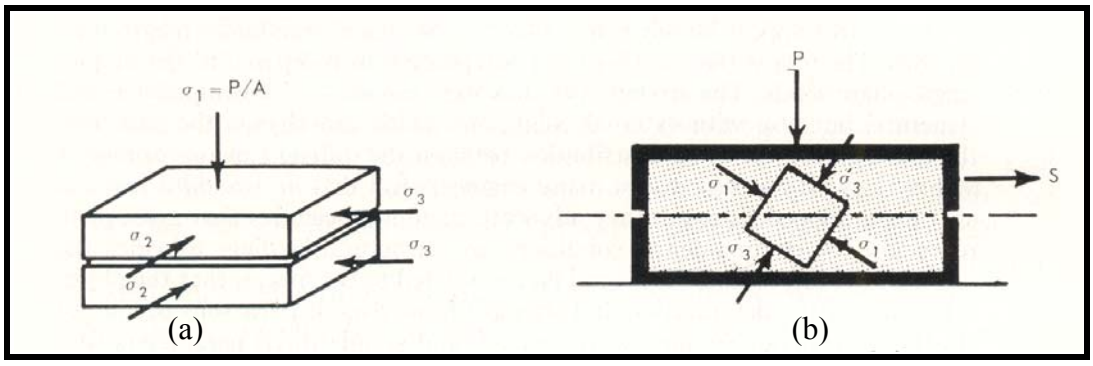
İnce kesitler tek tek incelenerek her bir ince kesitten 600-1100 arasında tane, boşluk ve kil domain ölçümü alınmıştır. CorelDRAW programında tanelerin, boşlukların ve kil domainlerinin uzun eksenleri çizilerek yatay ve düşey düzlemlerle yaptıkları açılar bulunmuştur. Açılar gül diyagramı formatında düzeltilerek dips programında rotasyonu belirlemek için gül diyagramları çizilmiştir.
Her kesme miktarında ince kesitlerin uygun yerlerinden fotoğraflar alınmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. İnce Kesit Analizleri ve Rotasyon

Daha önce farklı bir amaç için kullanılan ince kesitler, üsten aydınlatmalı mikroskop altında incelenerek uygun alanlarından her kesme kademesi için fotoğraflar çekilmiştir. İnce kesitler CorelDRAW programında yüksek çözünürlükte taratılıp istenilen oranda büyütülerek yönlenmiş taneciklerin uzun eksenleri çizilmiş ve bu uzun eksenlerin düşeyle yaptıkları açılar ölçülmüştür. Her bir kesme kademesi için tane yönlenme ölçümleri, ölçümlerden elde edilen gül diyagramları, fotoğraflar ve çizimler analiz edilerek kayma düzlemi boyunca oluşan rotasyon araştırılmıştır.

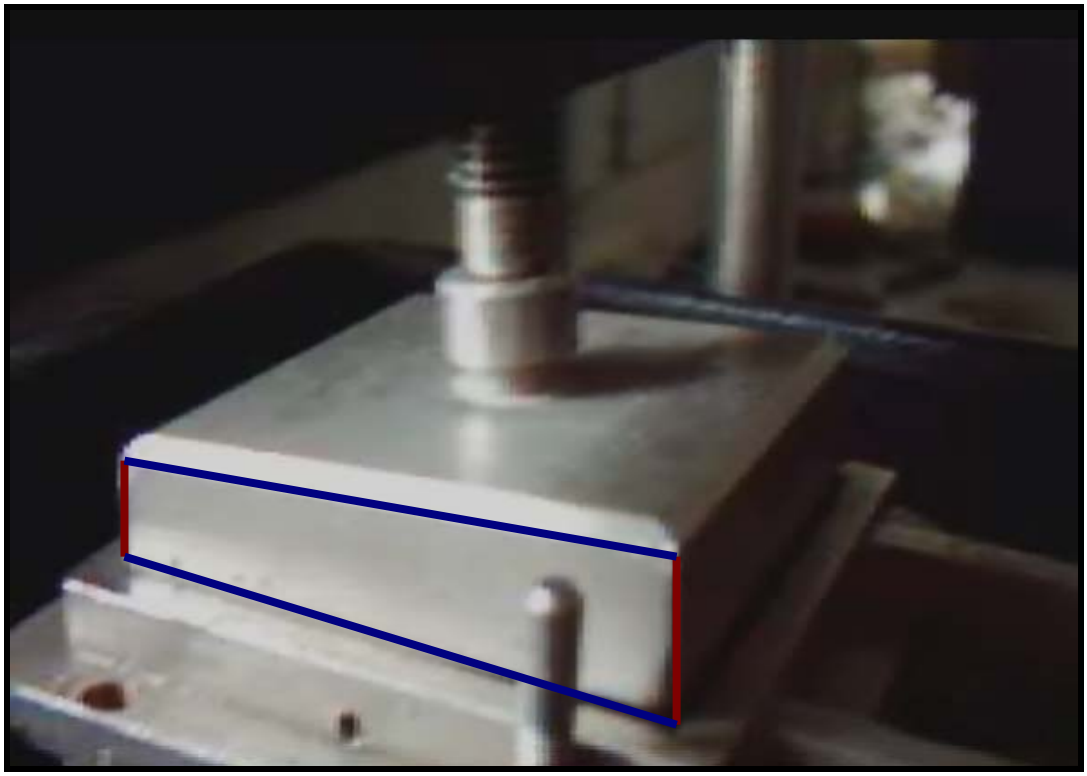
Kesme kutusu deneyinde deney başlamadan önceki asal gerilme yönleri Şekil 4.1a'da görülmektedir. Görüldüğü gibi maksimum asal gerilme (σ_1) düşey, diğerleri (σ_2 ve σ_3) ise yatay konumdadır. Şekil 4.1b'de görüldüğü gibi kesme başladıktan sonra bu yönler rotasyona uğrayarak değişmekte ve rotasyon kesme süresince devam etmektedir (Sowers, 1965).



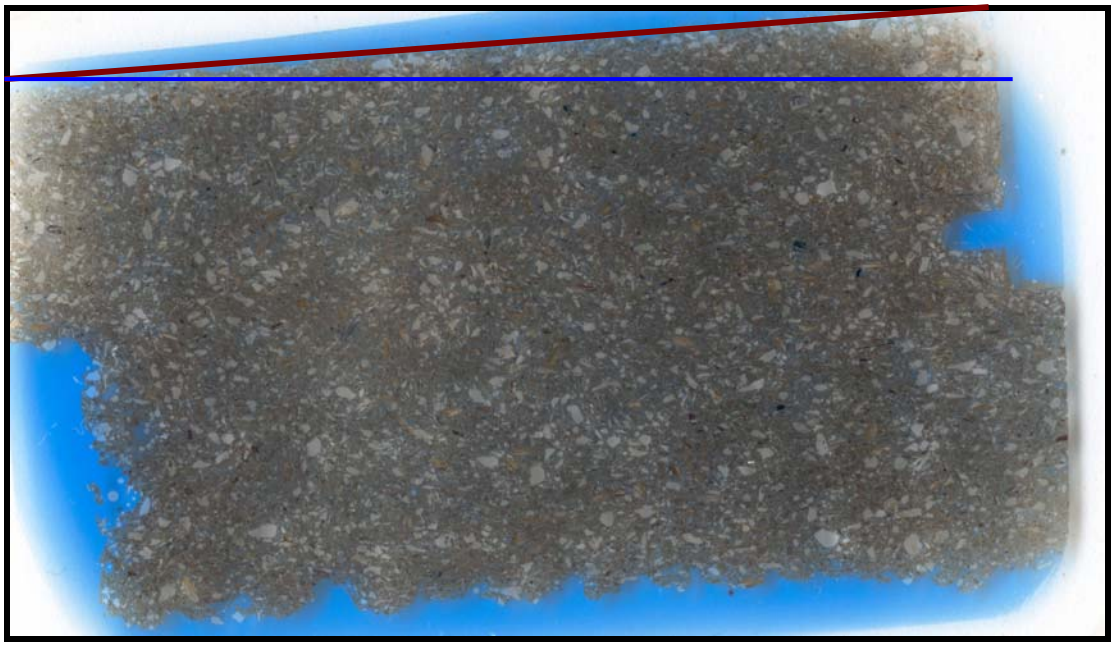
Şekil 4.1. Düşey gerilme sonucu oluşan rotasyon (Sowers, 1965)

Rotasyon σ_1'in dönmesi bundan dolayıda tanelerin dönmesi sonucu oluşur. Bu kesme kutusu deneyinde numune üzerine konan başlığın yukarı doğru hareket etmesi ile kendini göstermektedir (Şekil 4.2).

Ayrıca kullanılan ince kesitlere bakıldığında da oluşan rotasyon açıkça görülmektedir. İnce kesitlerde farklı kesme miktarlarında rotasyon dokularda oluşan değişimlerle kendini göstermektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2. Kesme kutusu deneyinde oluşan rotasyon.



Şekil 4.3. İnce kesitler üzerinde görülen rotasyon.

4.2. CU (Hızlı) Kesme Kutusu Deneyinde Oluşan Rotasyonun Gül Diyagramları ile Değerlendirilmesi

Kayma düzlemleri arazide fay, heyelan veya herhangi bir mühendislik yapısından dolayı temel zeminde meydana gelen yenilme düzlemleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bir zeminin dokusu ile mühendislik özellikleri arasında sıkı bir ilişki vardır (Holtz ve Kovacs,1981). Zemini oluşturan bileşenlerin dokusal ve kimyasal özelliklerinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koyabilmek, zeminlerin oluşum şekilleriyle günümüzden önce etkisi altında kaldığı gerilmeleri ve bu gerilmelerin zemin yapısı üzerindeki etkilerini belirlemeye bağlıdır.

Zemin bileşenlerinin yönlenmelerinin istatistiksel değerlendirilmesini yaparak, rotasyonun tane yönlenmesi ve maksimum asal gerilme (σ_1) yönü üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla gül diyagramları hazırlanmıştır.

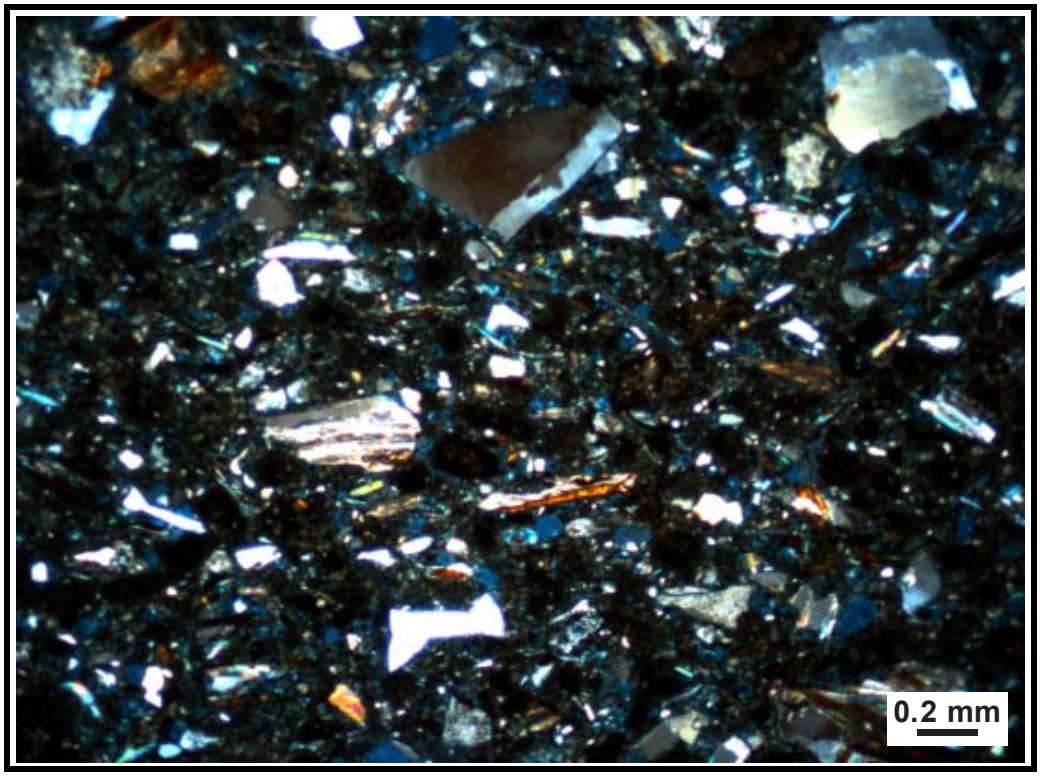
Zeminleri etkileyen gerilmelerin zemin dokusunda meydana getirdiği değişikliklerin incelenebilmesi için, o zeminden yapılan ince kesitlerden 400-500 adet bileşenin yönlenme ölçümlerinin yapılması istatistiksel olarak iyi sonuçlar vermektedir (Barton, 1974). Bu çalışmada, ince kesitler üzerinde ortalama 600-1100 arasında ölçüm alınmıştır. Ölçümlerin fazla olması çalışmayı istatiksel olarak daha doğru değerlendirmemizi sağlamıştır.

Yönlenmiş tane, boşluk ve kil domainlerinin uzun eksenleri birer düzlem olarak varsayılmış ve düşeyle yapmış oldukları açılar ölçülmüştür. CU (Hızlı) kesilen zeminlerde elde edilen ince kesitlerdeki tane bileşenlerinin yönlenme açıları kullanılarak gül diyagramları hazırlanmıştır. Bu gül diyagramlarında zemin bileşenlerinin yönlenmeleri düşeyle yapılan açı ortalamaları, $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ve ölçüm yapılan toplam tane, boşluk ve kil domain sayısı belirtilmiştir.

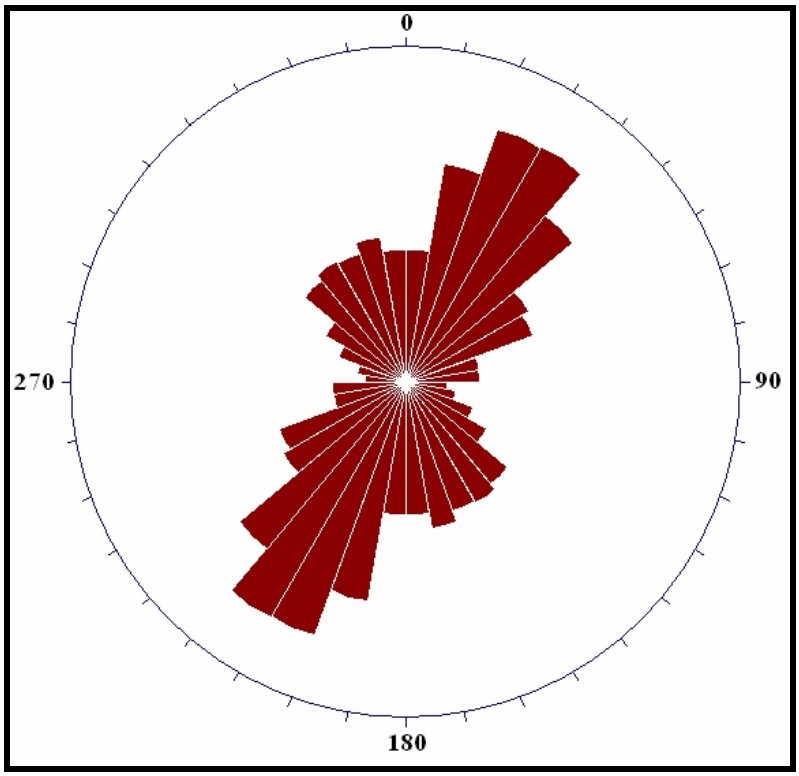
İnce kesitlerden, kesilmemiş zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.4). İnce kesit üzerinde toplam 1142 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 44.93^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 11,29 dur (Şekil 4.5). Ölçüm yapılan 1142 adet tane bileşeninden 125

adeti boşluk, 211 adeti kil domaini, 395 adeti kuvars ve 411 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.6). Kesilmemiş zemin örneğinin ince kesitinde düzeltilmiş açılar ve tane cinsleri EK-1'de verilmiştir.

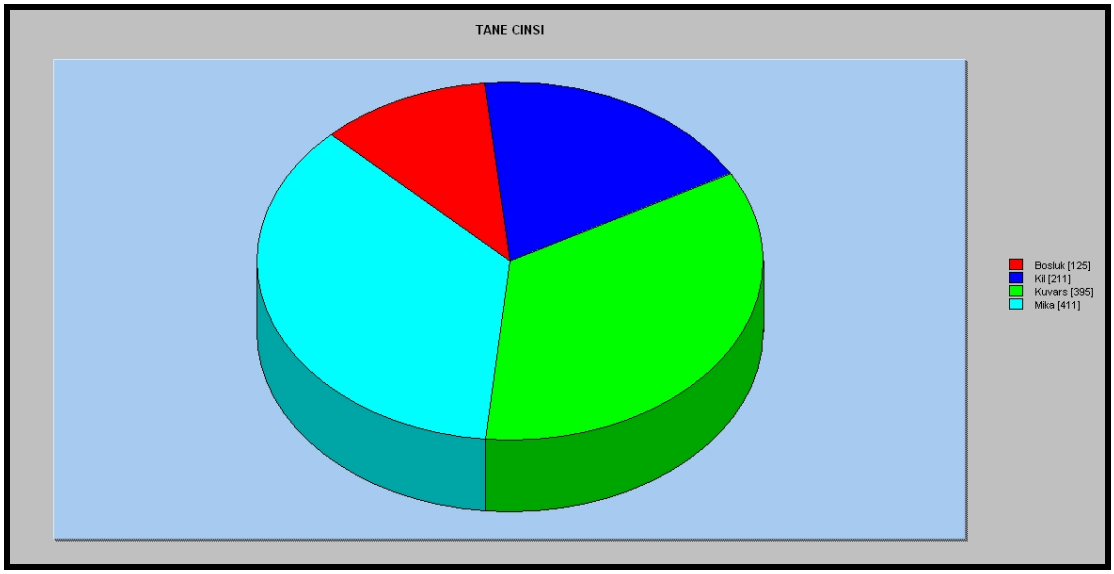
CU (hızlı) deneyi ile 1 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.7). İnce kesit üzerinde toplam 733 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 56.84^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 16,14 dür (Şekil 4.8). Ölçüm yapılan 733 adet tane bileşeninden 20 adeti boşluk, 156 adeti kil domaini, 328 adeti kuvars ve 229 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.9). CU (Hızlı) 1 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-2'de verilmiştir.



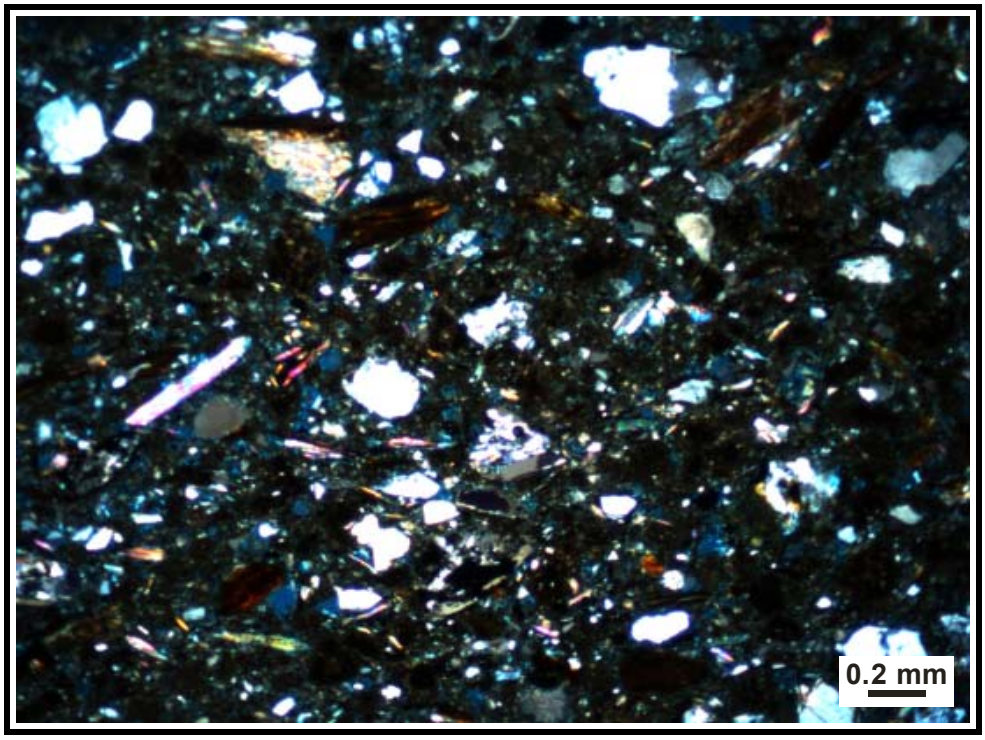
Şekil 4.4. Kesilmemiş zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.



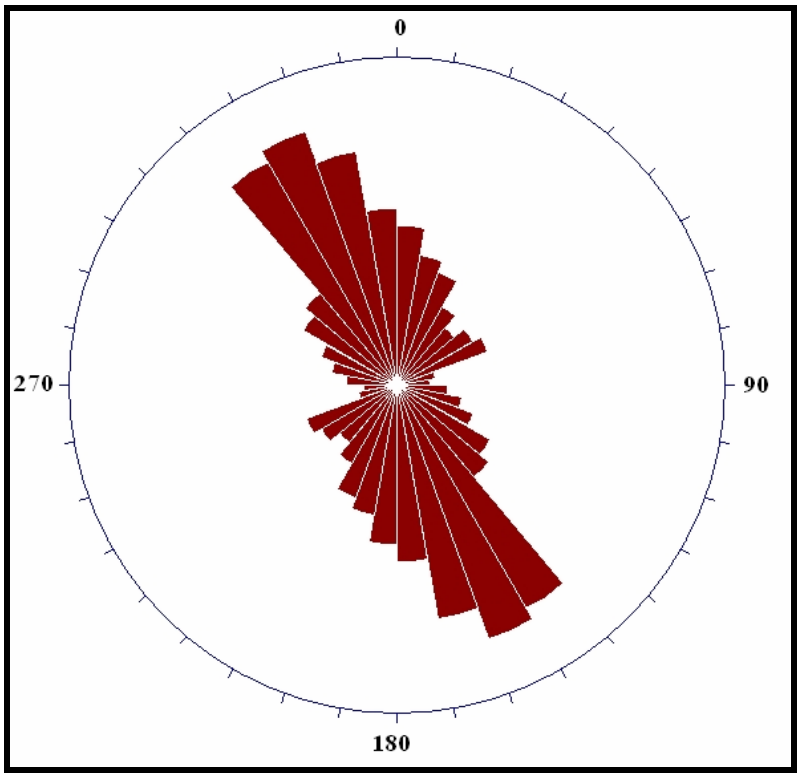
Şekil 4.5. Kesilmemiş zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.



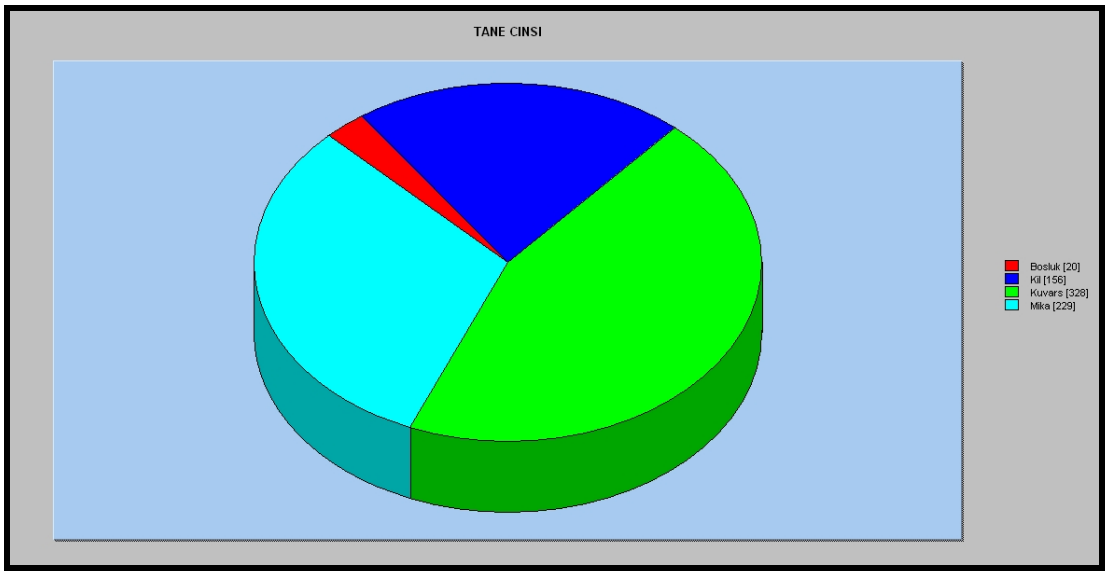
Şekil 4.6. Kesilmemiş zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.



Şekil 4.7. CU (hızlı) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

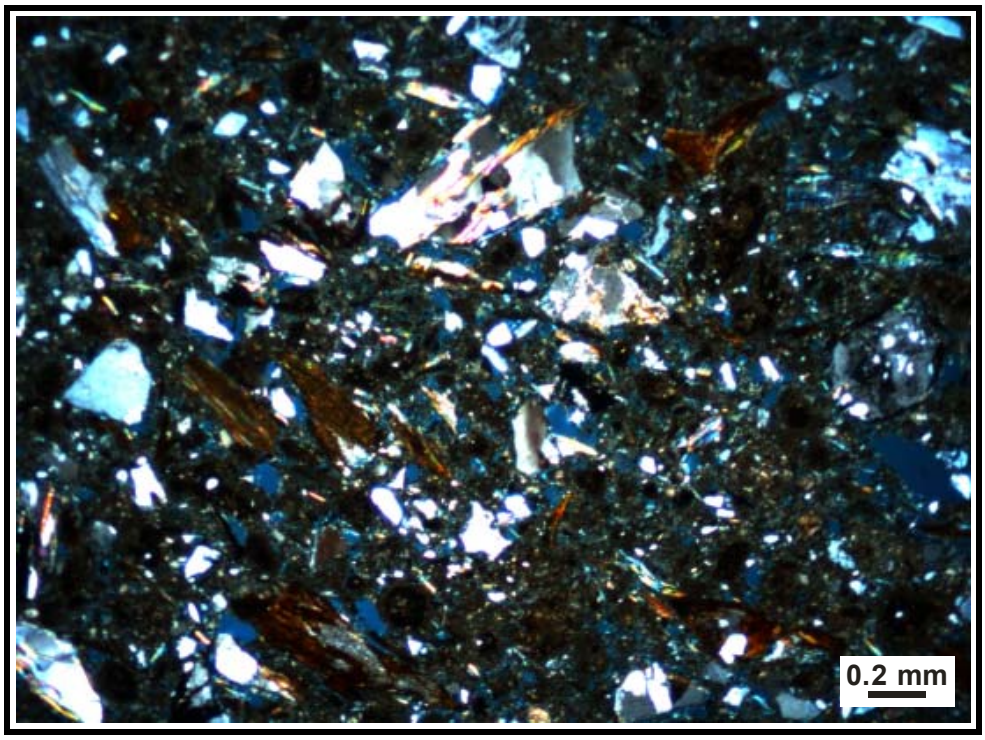


Şekil 4.8. CU (hızlı) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

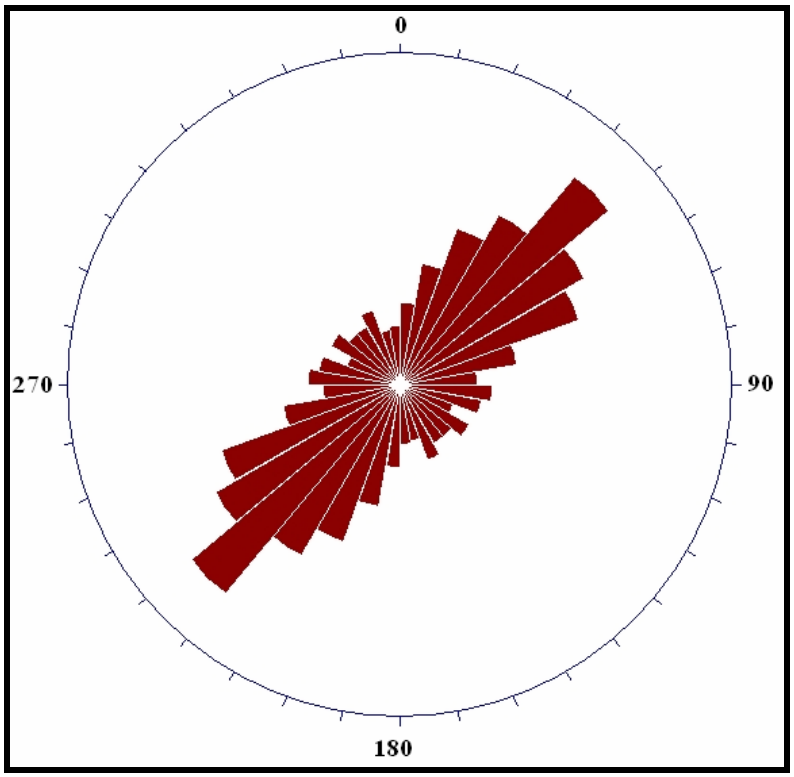


Şekil 4.9. CU (hızlı) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

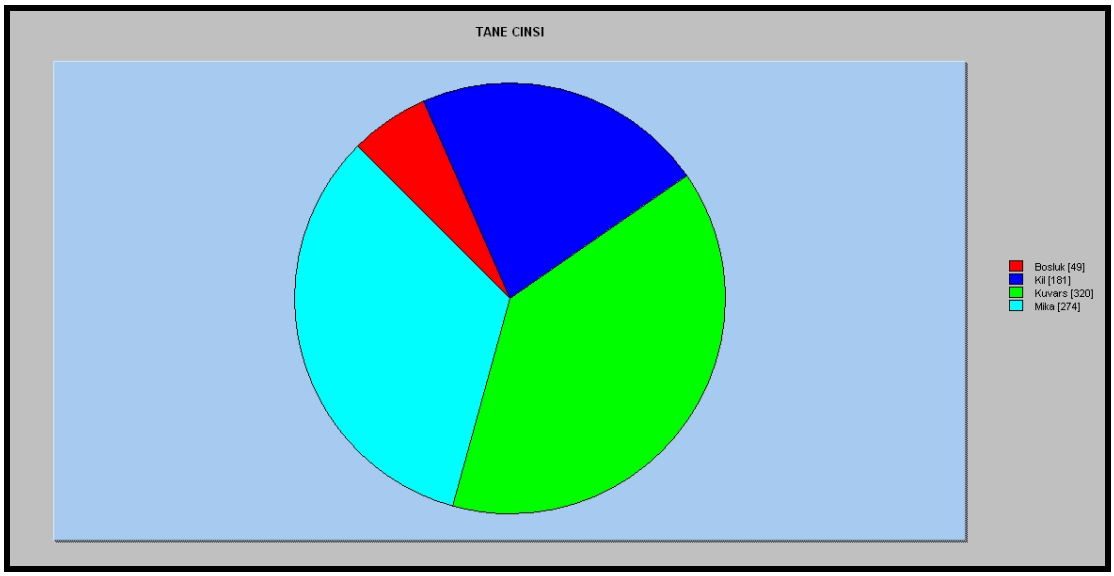
CU (hızlı) deneyi ile 3 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.10). İnce kesit üzerinde toplam 824 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 44.93^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 7.7 dir (Şekil 4.11). Ölçüm yapılan 824 adet tane bileşeninden 49 adeti boşluk, 181 adeti kil domaini, 320 adeti kuvars ve 274 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.12). CU (Hızlı) 3 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-3'de verilmiştir.



Şekil 4.10. CU (hızlı) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

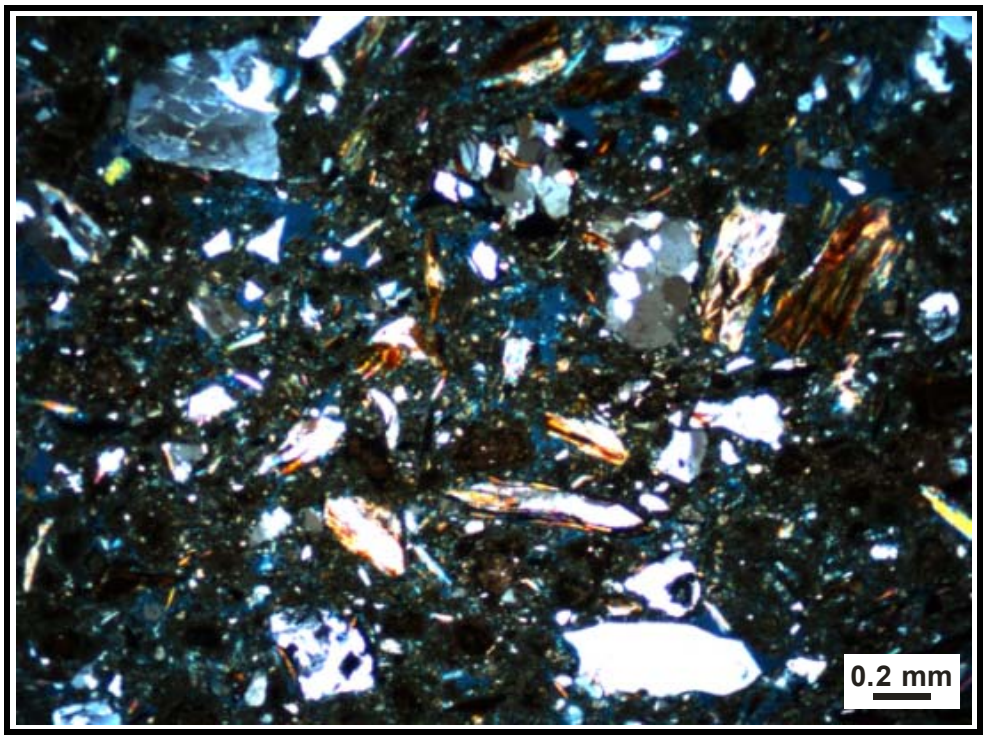


Şekil 4.11. CU (hızlı) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

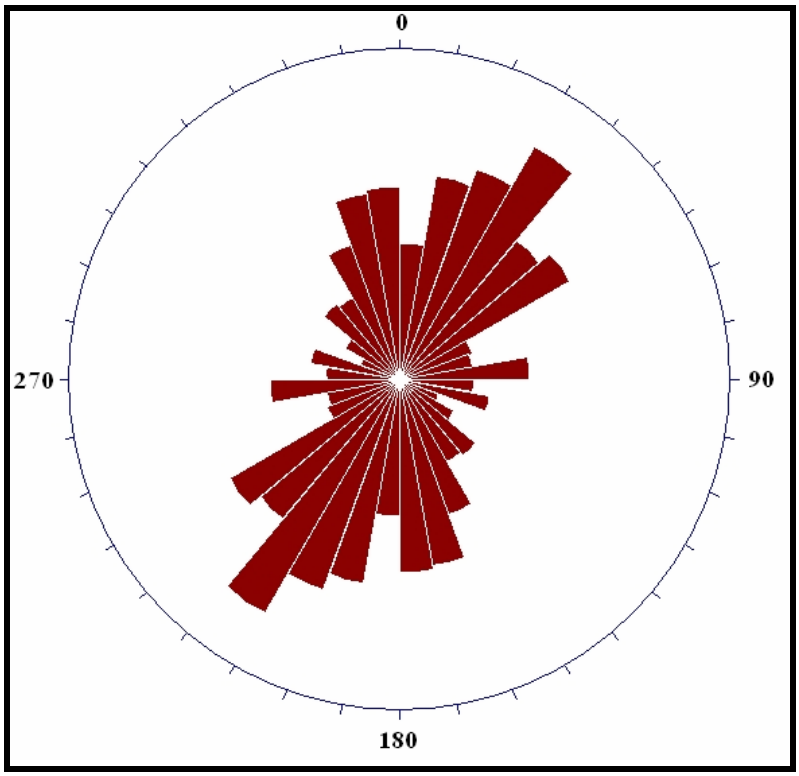


Şekil 4.12. CU (hızlı) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

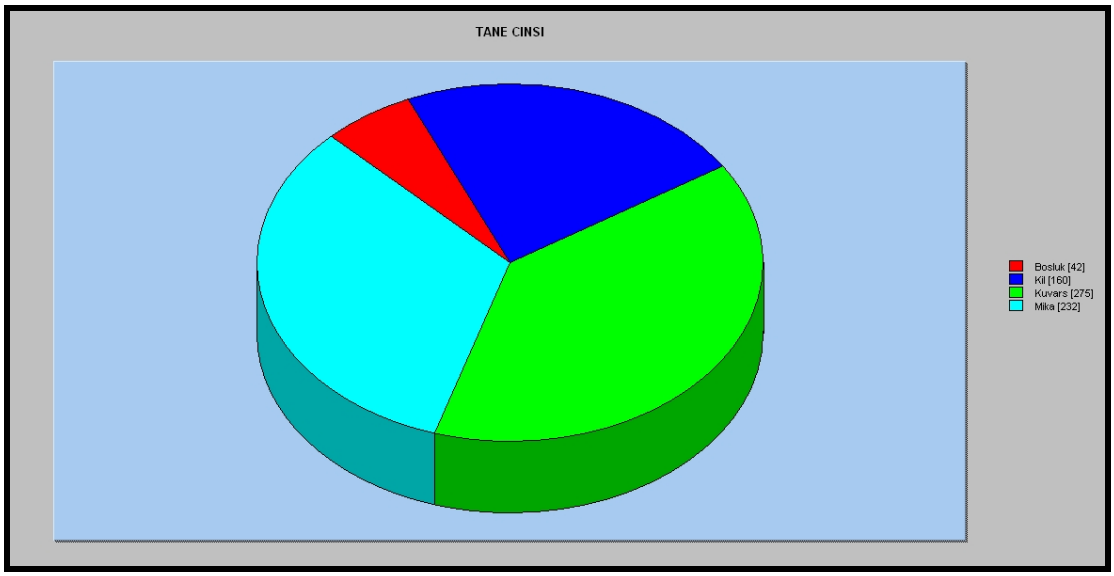
CU (hızlı) deneyi ile 5 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.13). İnce kesit üzerinde toplam 709 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 52^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 11,76 dır (Şekil 4.14). Ölçüm yapılan 709 adet tane bileşeninden 42 adeti boşluk, 160 adeti kil domaini, 275 adeti kuvars ve 232 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.15). CU (Hızlı) 5 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-4'de verilmiştir.



Şekil 4.13. CU (hızlı) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

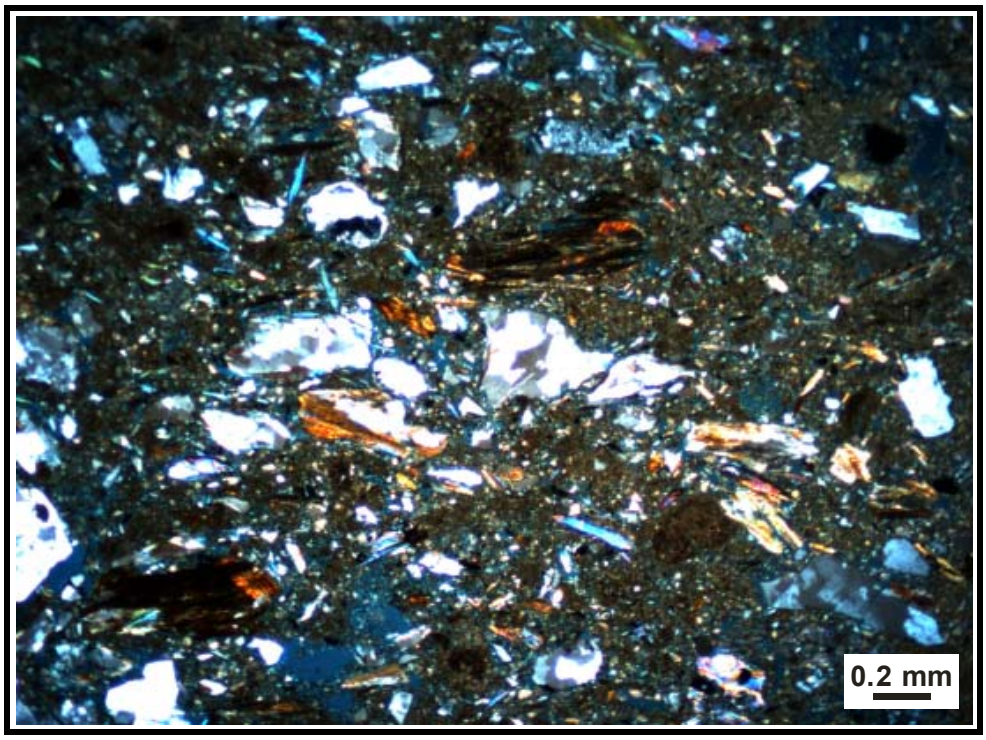


Şekil 4.14. CU (hızlı) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

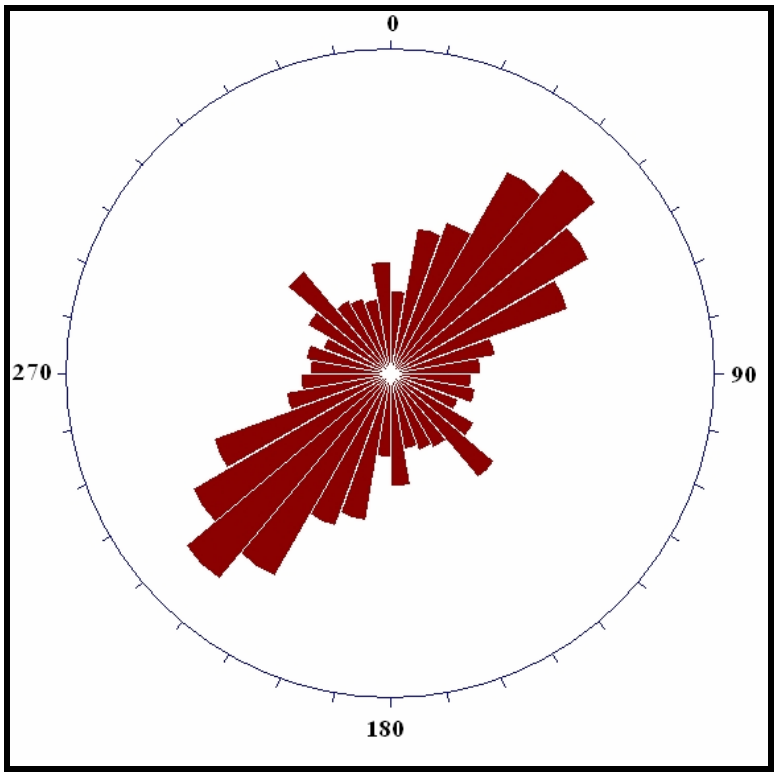


Şekil 4.15. CU (hızlı) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

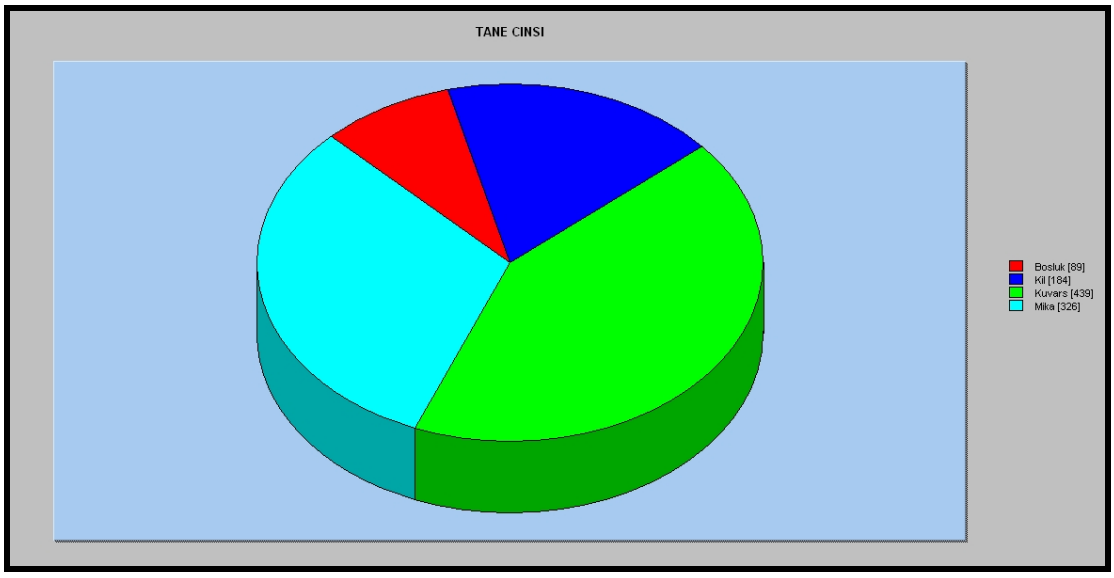
CU (hızlı) deneyi ile 7 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.16). İnce kesit üzerinde toplam 1038 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri $46{,}32^0$ olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 9,38 dir (Şekil 4.17). Ölçüm yapılan 1038 adet tane bileşeninden 89 adeti boşluk, 184 adeti kil domaini, 439 adeti kuvars ve 326 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.18). CU (Hızlı) 7 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-5'de verilmiştir.



Şekil 4.16. CU (hızlı) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

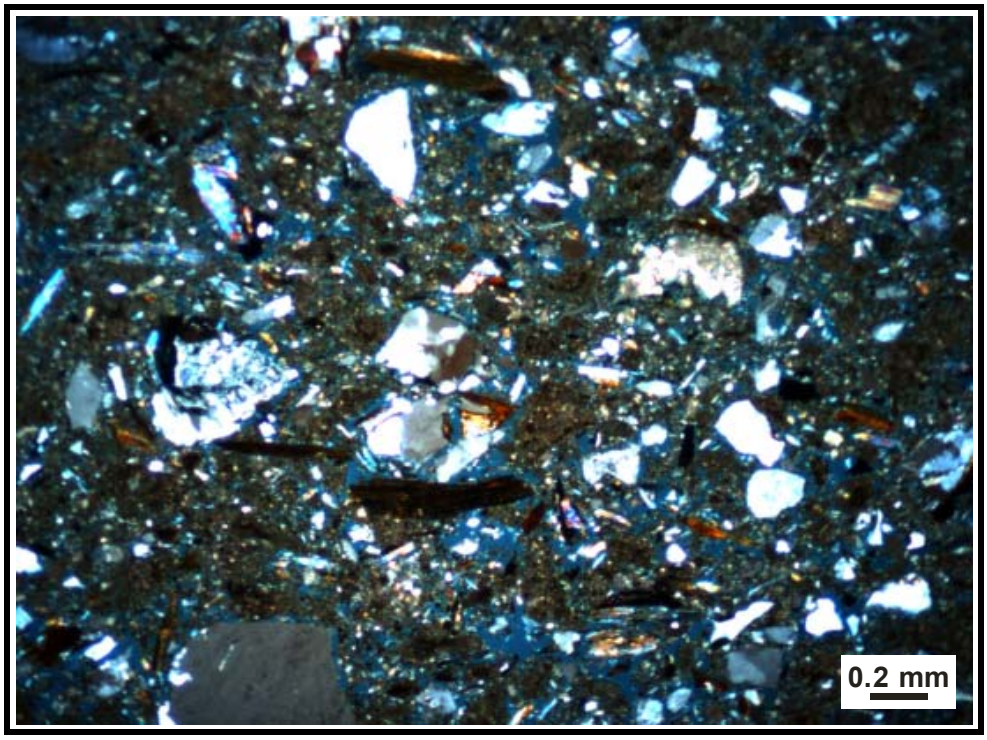


Şekil 4.17. CU (hızlı) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

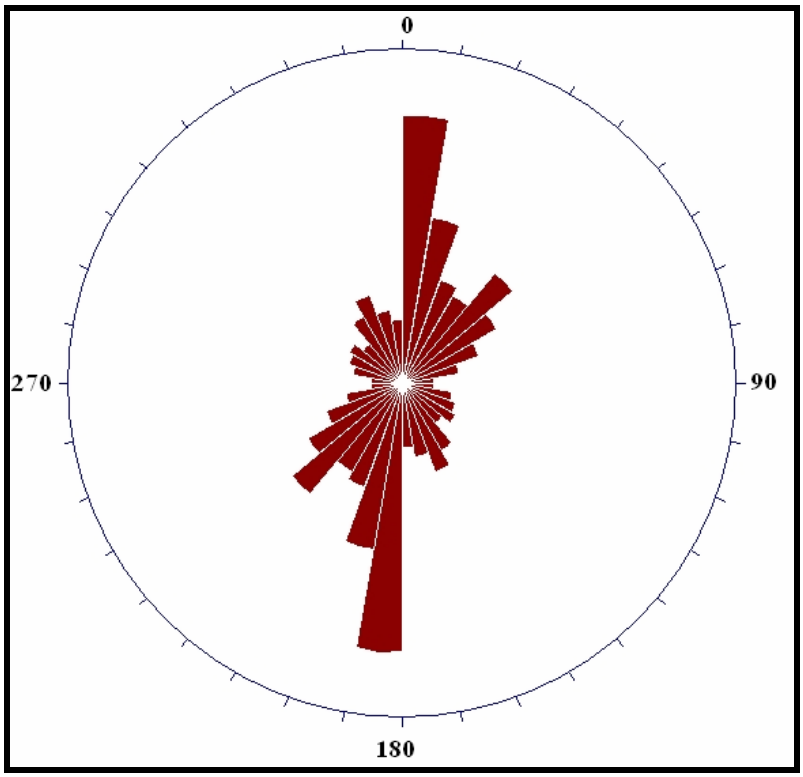


Şekil 4.18. CU (hızlı) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

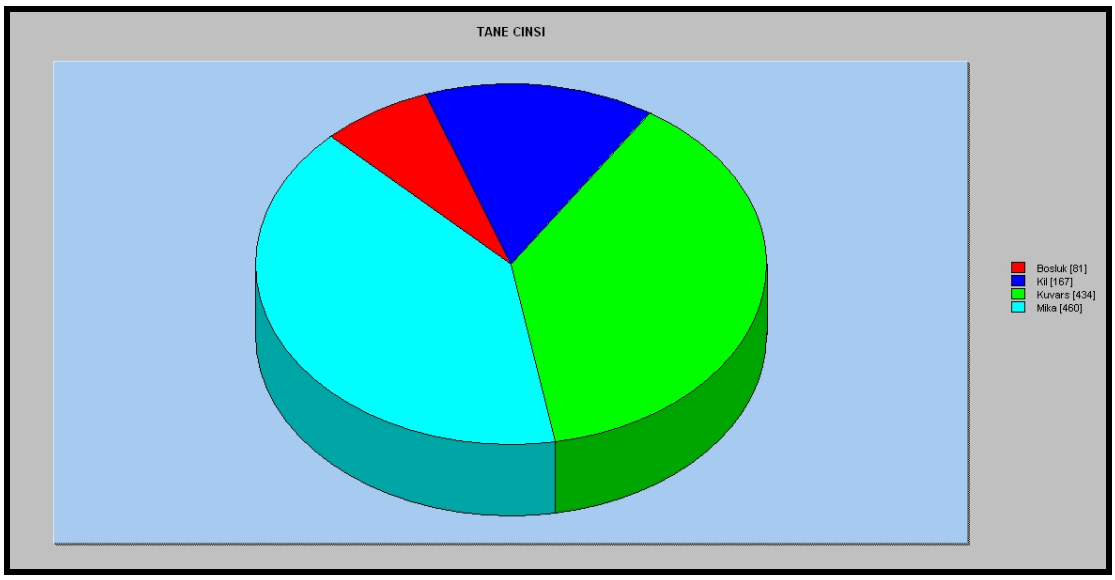
CU (hızlı) deneyi ile 9 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.19). İnce kesit üzerinde toplam 1157 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri $55{,}52^0$ olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 21,34 dür (Şekil 4.20). Ölçüm yapılan 1142 adet tane bileşeninden 81 adeti boşluk, 167 adeti kil domaini, 434 adeti kuvars ve 460 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.21). CU (Hızlı) 9 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-6'da verilmiştir.



Şekil 4.19. CU (hızlı) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

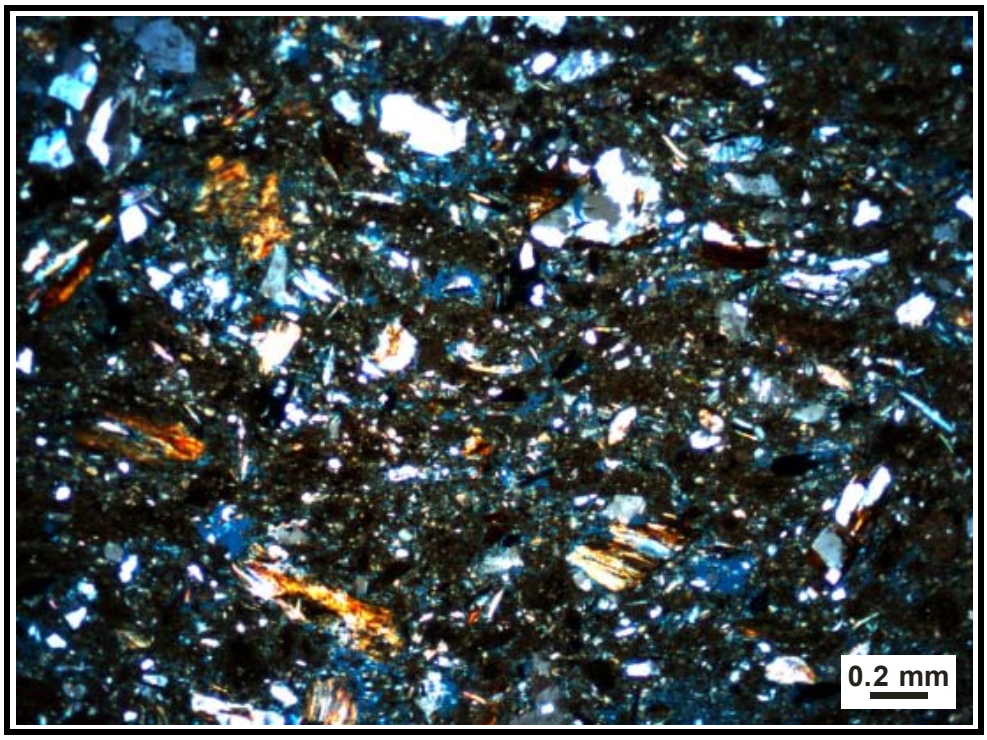


Şekil 4.20. CU (hızlı) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

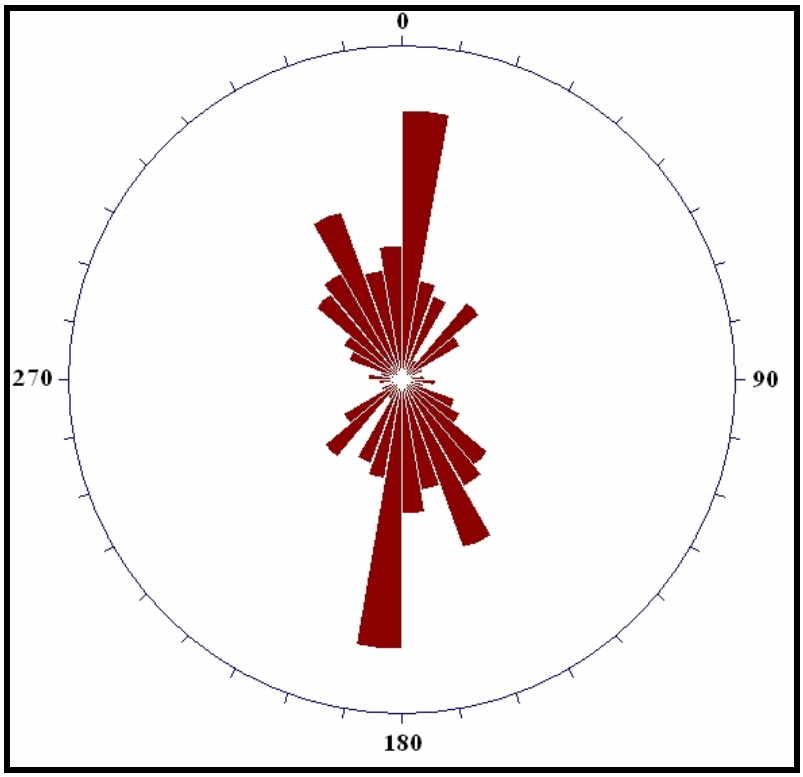


Şekil 4.21. CU (hızlı) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

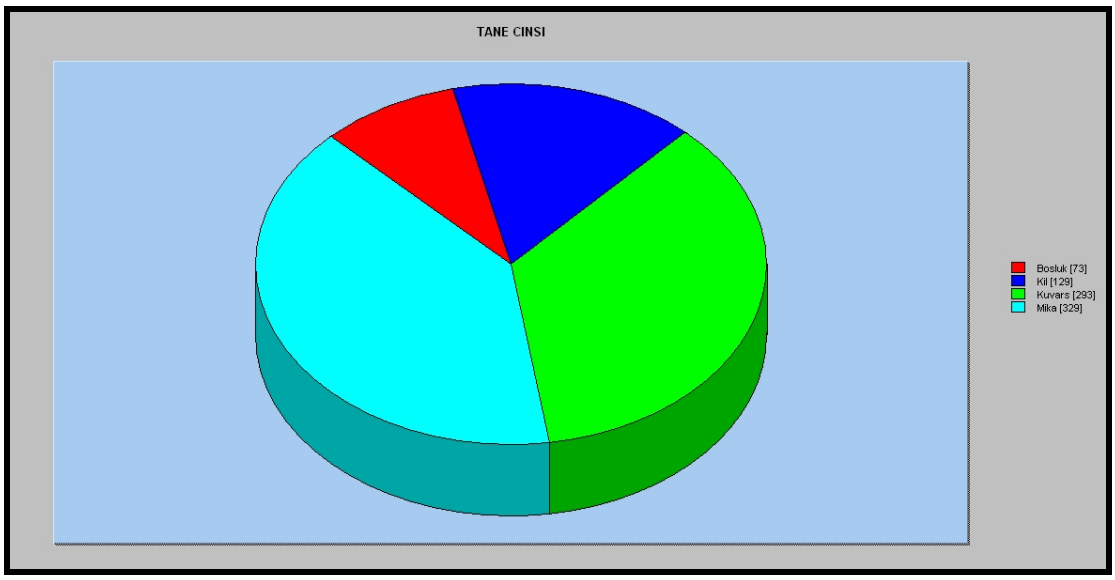
CU (hızlı) deneyi ile 11 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.22). İnce kesit üzerinde toplam 824 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri $55,71^0$ olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 22,57 dir (Şekil 4.23). Ölçüm yapılan 824 adet tane bileşeninden 73 adeti boşluk, 129 adeti kil domaini, 293 adeti kuvars ve 329 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.24). CU (Hızlı) 11 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-7'de verilmiştir.



Şekil 4.22. CU (hızlı) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

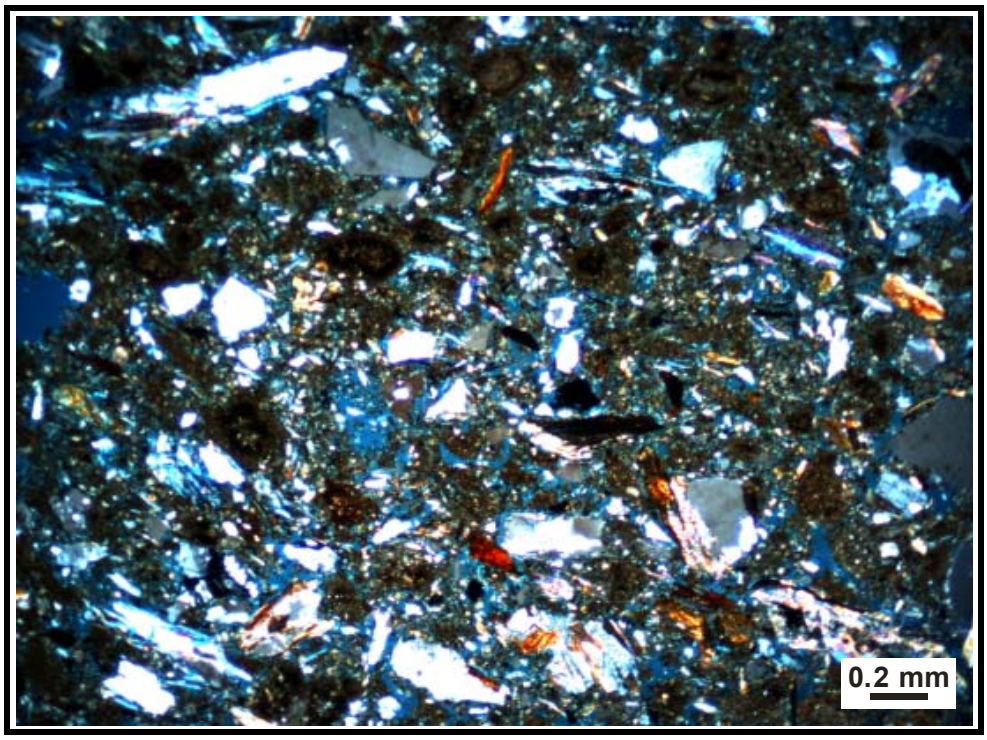


Şekil 4.23. CU (hızlı) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

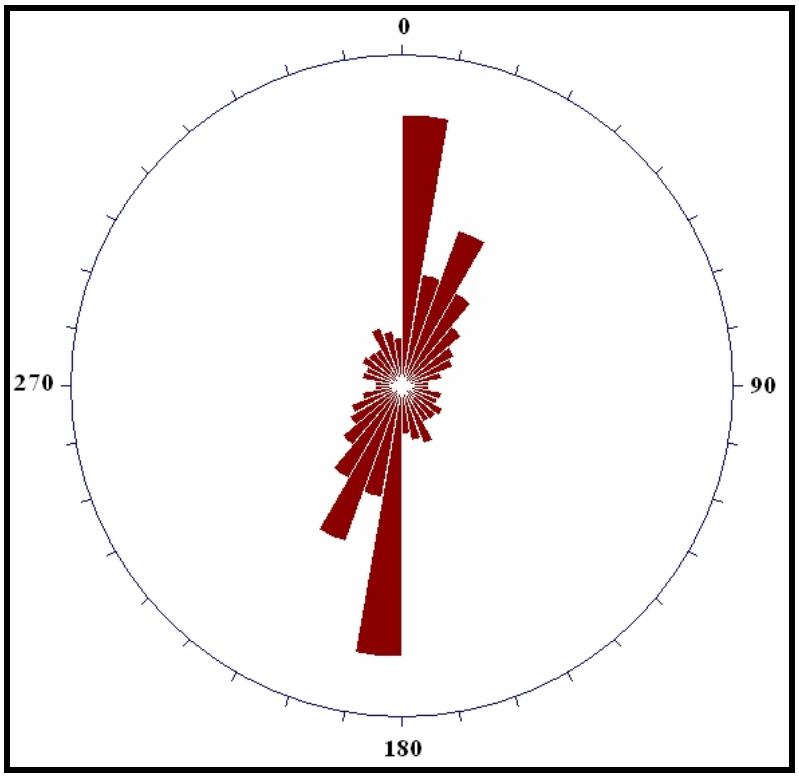


Şekil 4.24. CU (hızlı) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

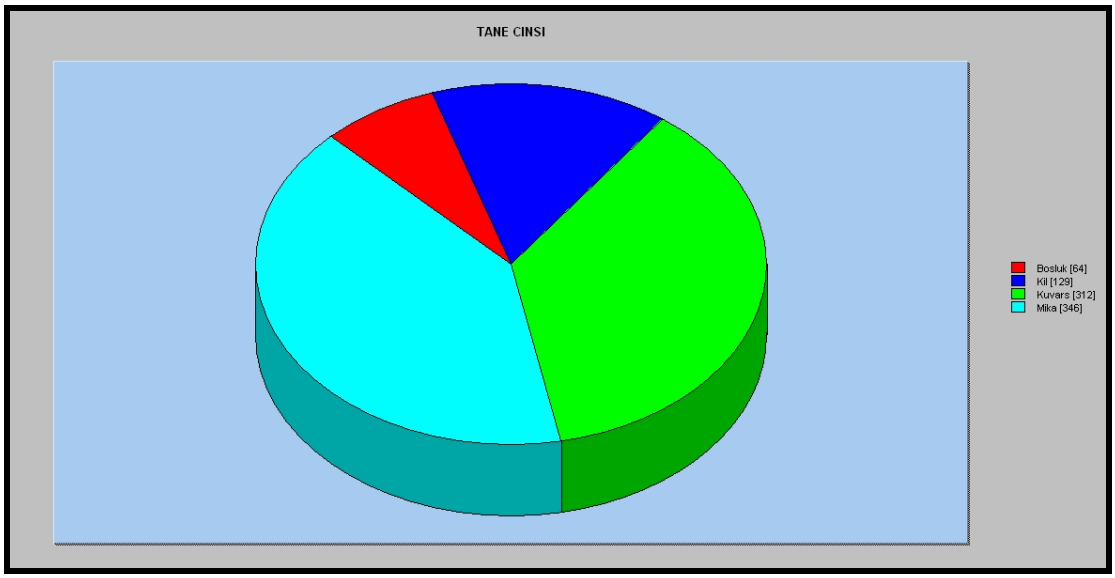
CU (hızlı) deneyi ile 13 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.25). İnce kesit üzerinde toplam 851 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri $55{,}762^0$ olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 22,63 dir (Şekil 4.26). Ölçüm yapılan 851 adet tane bileşeninden 64 adeti boşluk, 129 adeti kil domaini, 312 adeti kuvars ve 346 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.27). CU (Hızlı) 13 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-8'de verilmiştir.



Şekil 4.25. CU (hızlı) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.



Şekil 4.26. CU (hızlı) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.



Şekil 4.27. CU (hızlı) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

CU (Hızlı) kesme kutusu deneyi ile kesilen örneklerin kayma düzlemi boyunca yenilmeye başladığı andan itibaren ilk dokularını koruyamadıkları düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerlerinden ve düşeyle yapmış oldukları $0\text{-}10^0$ arasında açı yüzdelerinden açıkça görülmektedir.

Zemin örneklerinin düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerlerinin inişli-çıkışlı biçimde pikler yapması kesilen örneğin rotasyona uğramasından kaynaklanmaktadır. Kesilen örneklerden 1 mm, 3mm, 5mm ve 7 mm'lik kesme miktarlarında zemin rotasyona uğramış ve inişli-çıkışlı açılar meydana gelmiştir. Tane bileşenlerinin düşeyle yaptıkları açı ortalamalarının inişli-çıkışlı olması tanelerin konumuylada ilgilidir. Eğer tanenin ilk konumu düşey çizgisinin sol tarafında ise düşeyle yapılan açı küçülmekte, sağ tarafında ise düşeyle yapılan açı büyümektedir. Bundan dolayı tanelerin yapmış oldukları açı değerleri de inişli-çıkışlı bir grafik oluşturmuştur.

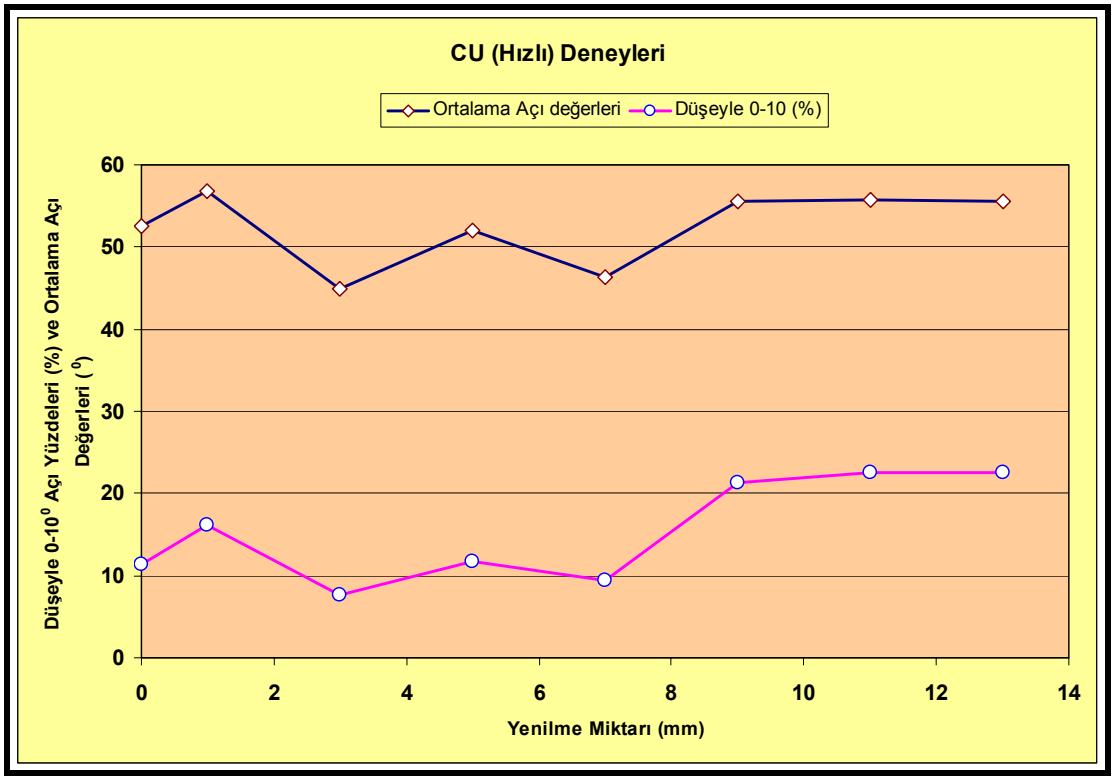
CU (Hızlı) deneyi ile tane bileşenleri 9 mm'lik kesme sonucu kayma düzlemi oluşturarak yenildiği kabul edildikten sonra tanelerde rotasyon fazla görülmemekte ve 9 mm'den sonra grafik yatay bir seyir halinde devam etmektedir.

Bunun nedeni yenilme 9 mm'de gerçekleştikten sonra tanelerin artık hızlı bir şekilde uygulanmakta olan kesme kuvvetine tepki gösterecek yeterli zamanı bulamamasıdır.

Tanelerin düşeyle yapmış oldukları $0\text{-}10^0$ arasında açı yapan bileşen yüzdelerinin, tane bileşenlerin düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerleri ile orantılı olması rotasyonun gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Bu değerlendirmelere ait toplu sonuçlar Çizelge 4.1'de ve Şekil 4.28'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Kesilmemiş örnek ile CU (Hızlı) deneyleri sonucu rotasyona neden olan yönlenmelerin sayısal değerleri

Uygulanan Yanal Hareket Miktarı (mm)	Ölçüm Yapılan Bileşen Adedi	Yönlenmiş Açıların Düşeyle Yaptıkları Ortalama Açılar (^{0})	Düşey ile $0\text{-}10^0$ arasında açı yapan bileşenlerin oranı (%)
0	1142	52,62	11,29
1	733	56,84	16,14
3	824	44,93	7,7
5	709	52	11,76
7	1038	46,32	9,38
9	1157	55,52	21,34
11	824	55,71	22,57
13	851	55,62	22,63



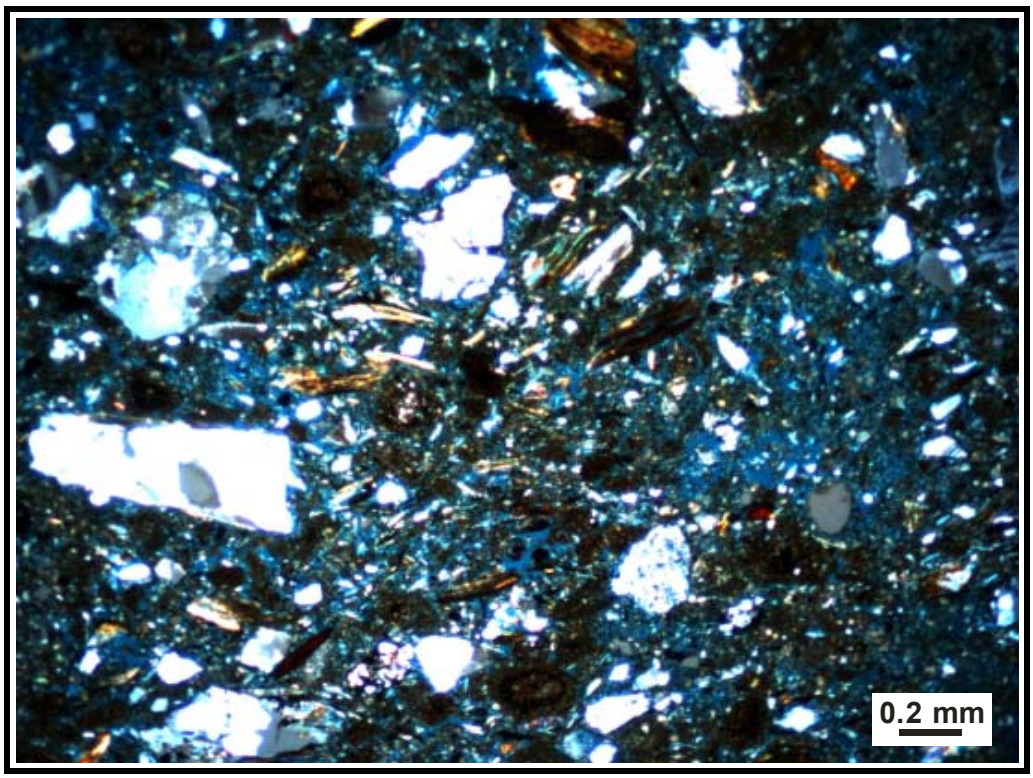
Şekil 4.28. Kesilmemiş örnek ile CU deneyleri sonucu oluşan rotasyonun düşeyle yaptıkları ortalama açılar ve 0-10^0 açı yapan bileşen yüzdelerinin karşılaştırılması.

4.3. CD (Yavaş) Kesme Kutusu Deneyinde Oluşan Rotasyonun Gül Diyagramları ile Değerlendirilmesi

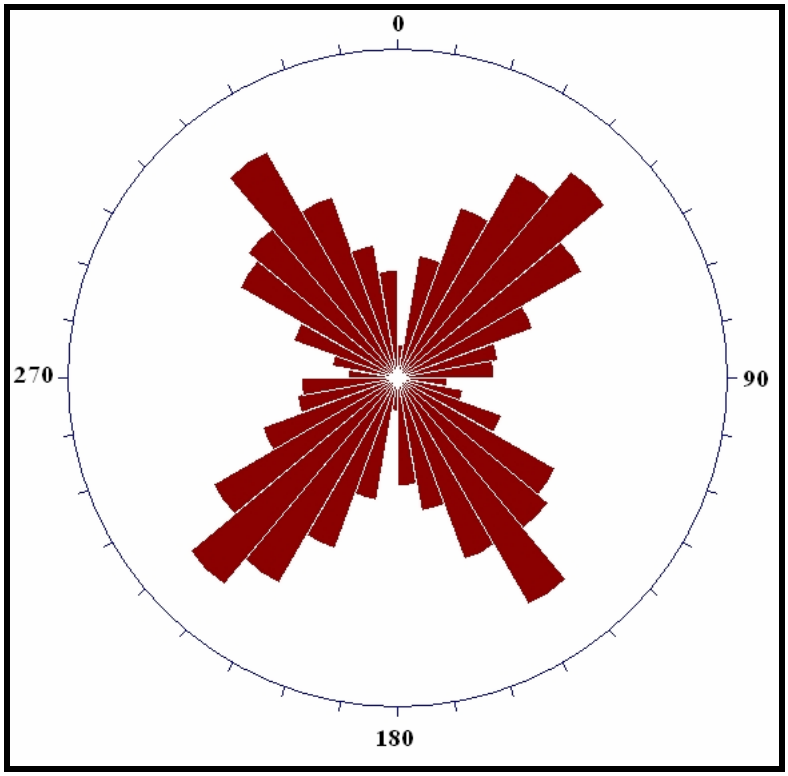
Yönlenmiş tane, boşluk ve kil domainlerinin uzun eksenleri birer düzlem olarak varsayılmış ve düşeyle yapmış oldukları açılar ölçülmüştür. CD (Yavaş) kesilen zeminlerde elde edilen ince kesitlerdeki tane bileşenlerinin yönlenme açıları kullanılarak gül diyagramları hazırlanmıştır. Bu gül diyagramlarında zemin bileşenlerinin yönlenmeleri düşeyle yapılan açı ortalamaları, 0-10^0 arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ve ölçüm yapılan toplam tane, boşluk ve kil domain sayısı belirtilmiştir.

CD (Yavaş) deneyi ile 1 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.29). İnce kesit üzerinde toplam 980 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 48.45^0 olarak bulunmuştur. 0-10^0 arasında düşeyle açı

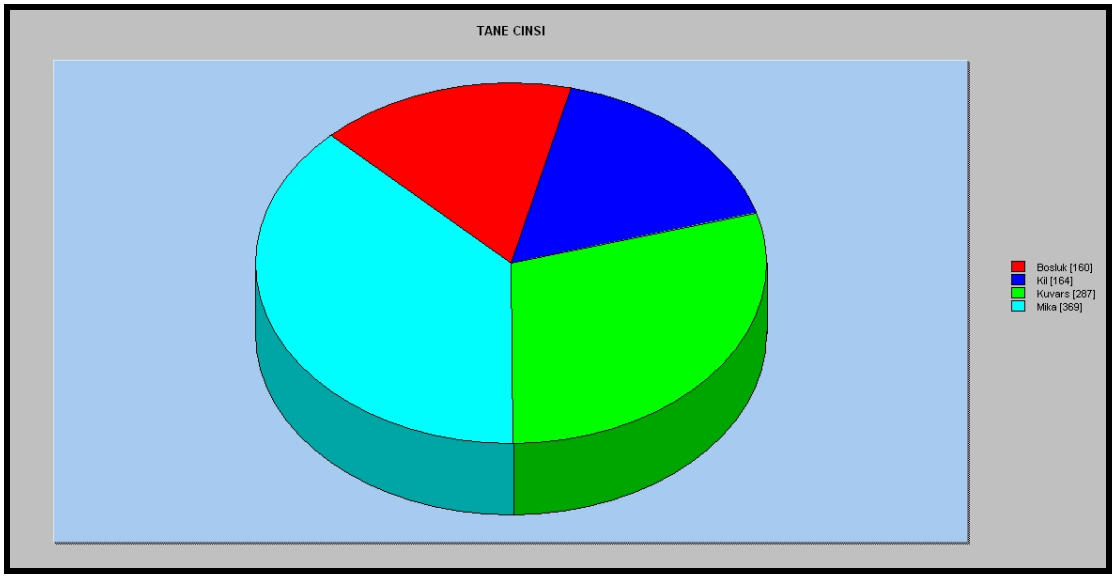
yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 6,03 dür (Şekil 4.30). Ölçüm yapılan 980 adet tane bileşeninden 160 adeti boşluk, 164 adeti kil domaini, 287 adeti kuvars ve 369 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.31). CD (Yavaş) 1 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-9'da verilmiştir.



Şekil 4.29. CD (Yavaş) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

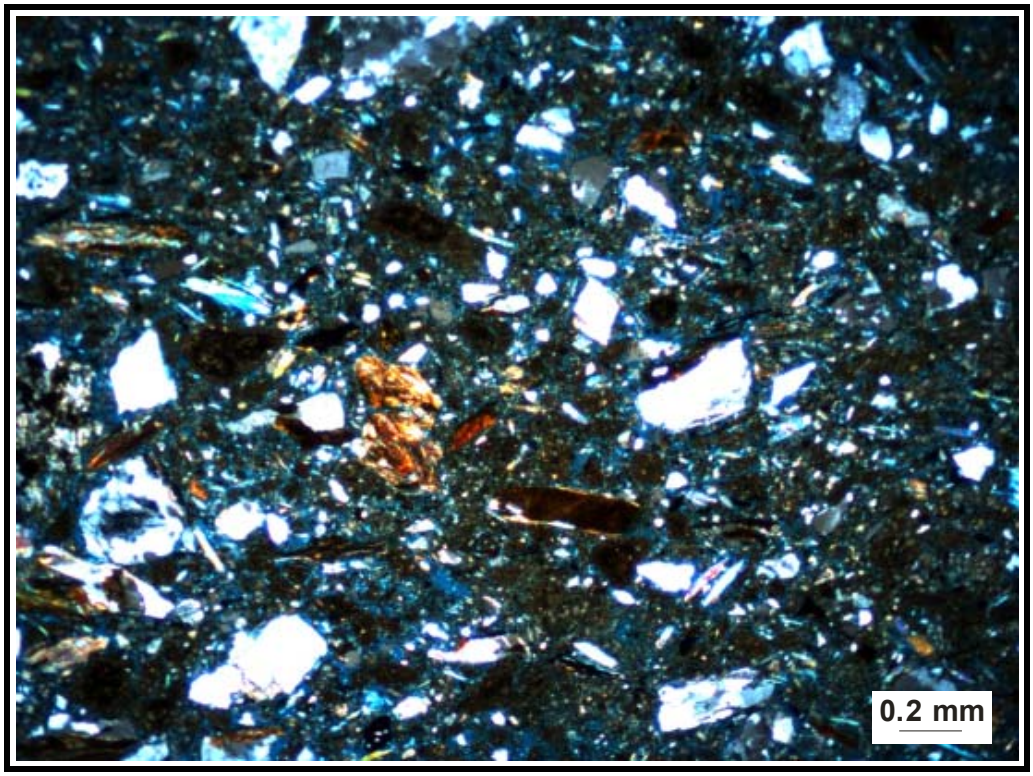


Şekil 4.30. CD (Yavaş) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

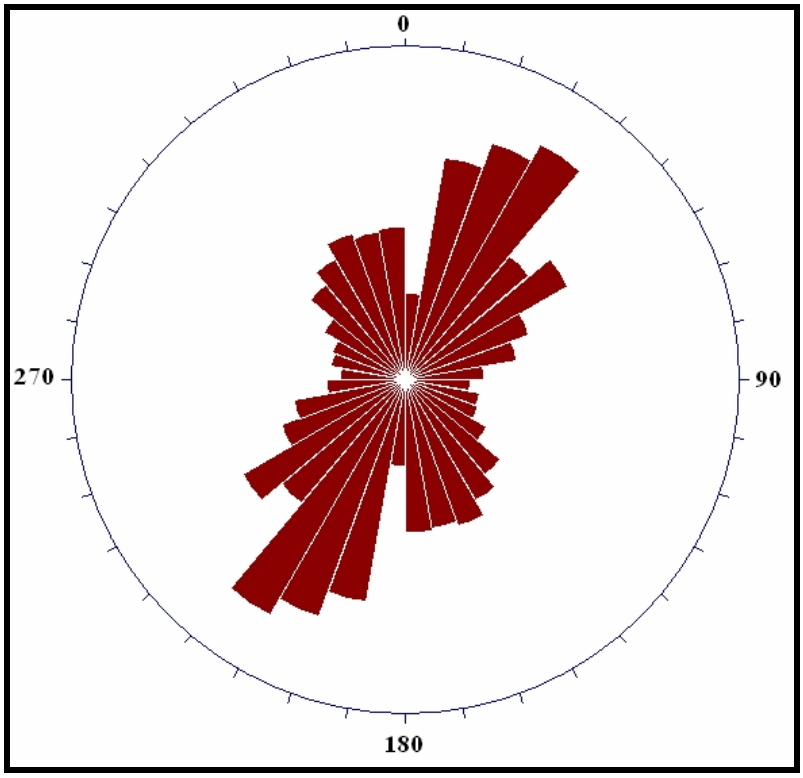


Şekil 4.31. CD (Yavaş) deneyi ile 1 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

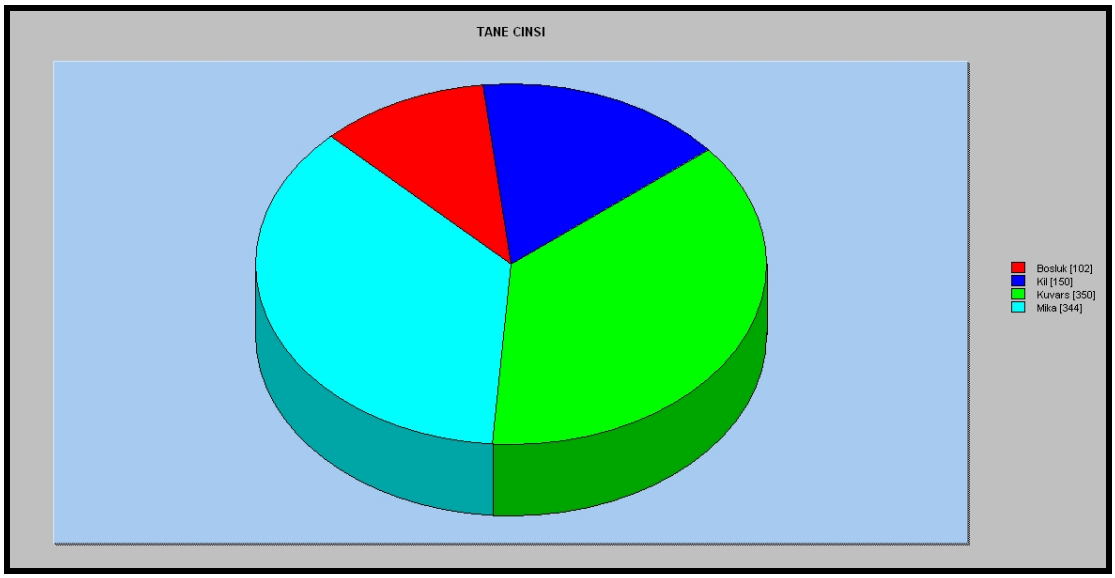
CD (Yavaş) deneyi ile 3 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.32). İnce kesit üzerinde toplam 946 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 50.89^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 10,57 dir (Şekil 4.33). Ölçüm yapılan 946 adet tane bileşeninden 102 adeti boşluk, 150 adeti kil domaini, 350 adeti kuvars ve 344 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.34). CD (Yavaş) 3 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-10'da verilmiştir.



Şekil 4.32. CD (Yavaş) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.



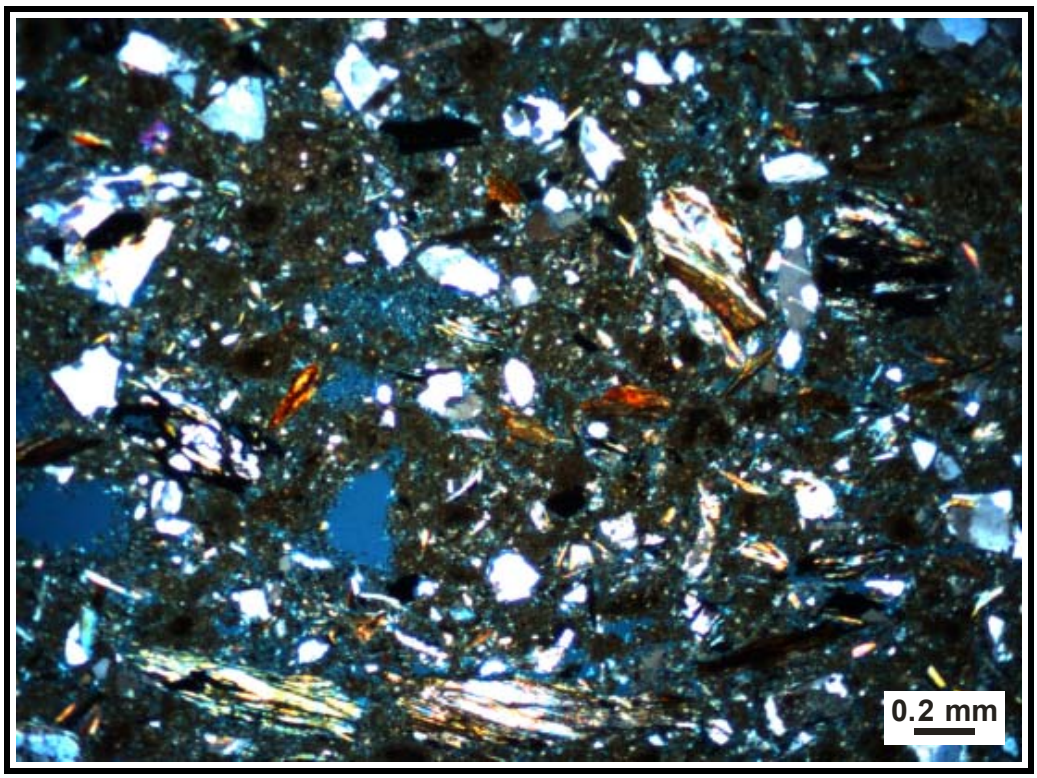
Şekil 4.33. CD (Yavaş) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.



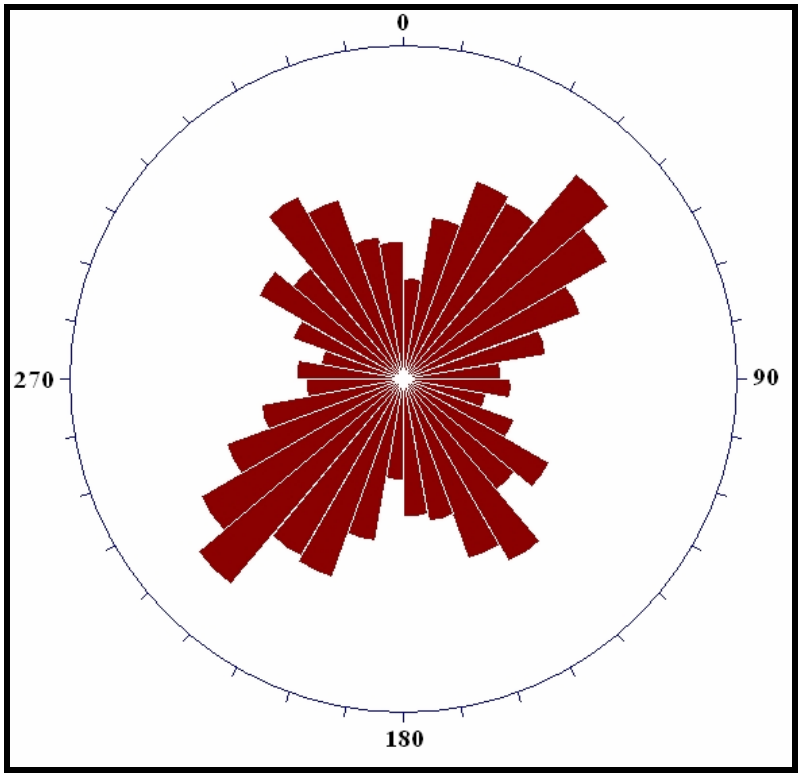
Şekil 4.34. CD (Yavaş) deneyi ile 3 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

CD (Yavaş) deneyi ile 5 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil

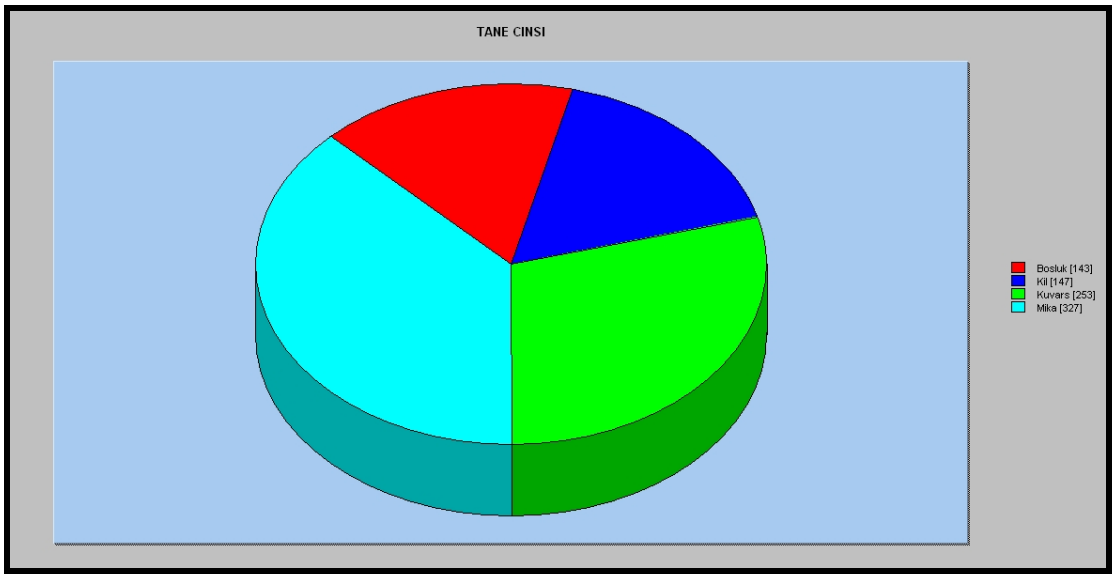
4.35). İnce kesit üzerinde toplam 870 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 48.29^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 7,71 dir (Şekil 4.36). Ölçüm yapılan 870 adet tane bileşeninden 143 adeti boşluk, 147 adeti kil domaini, 253 adeti kuvars ve 327 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.37). CD (Yavaş) 5 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-11'de verilmiştir.



Şekil 4.35. CD (Yavaş) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

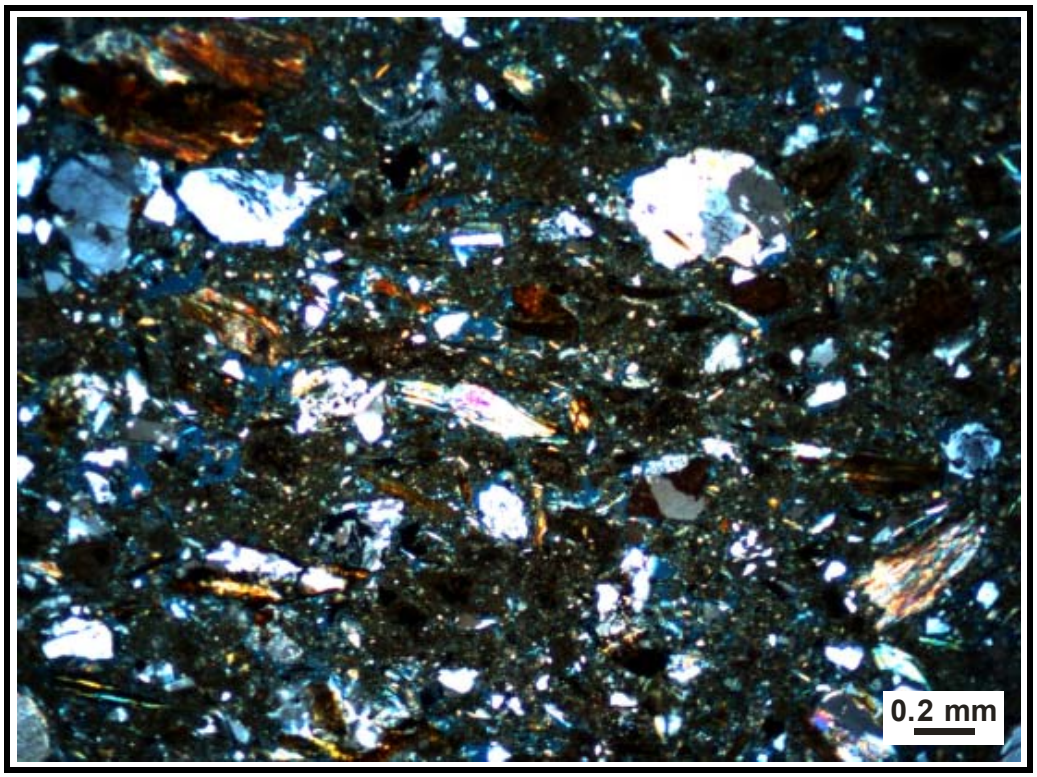


Şekil 4.36. CD (Yavaş) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

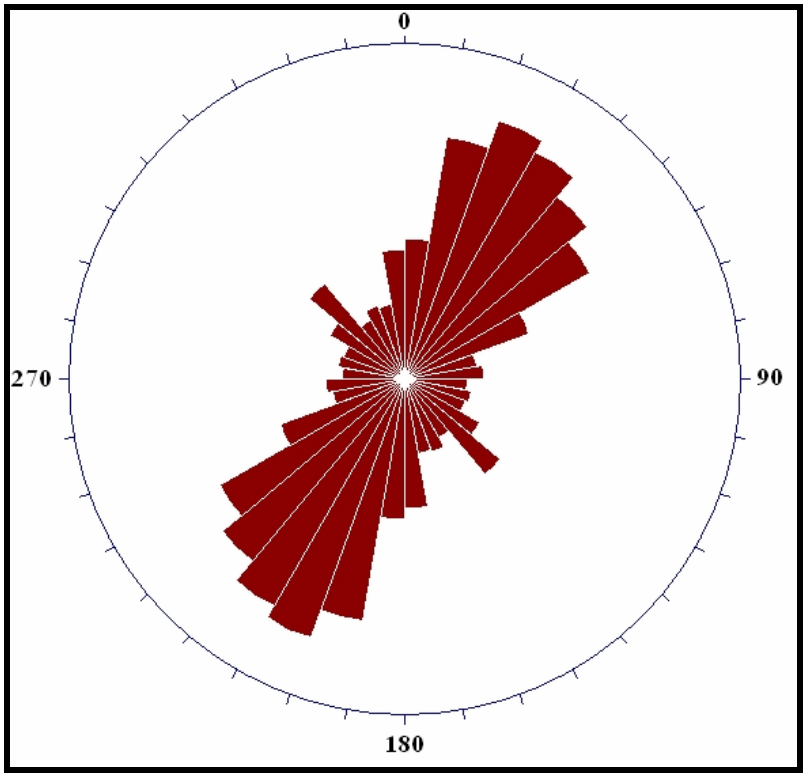


Şekil 4.37. CD (Yavaş) deneyi ile 5 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

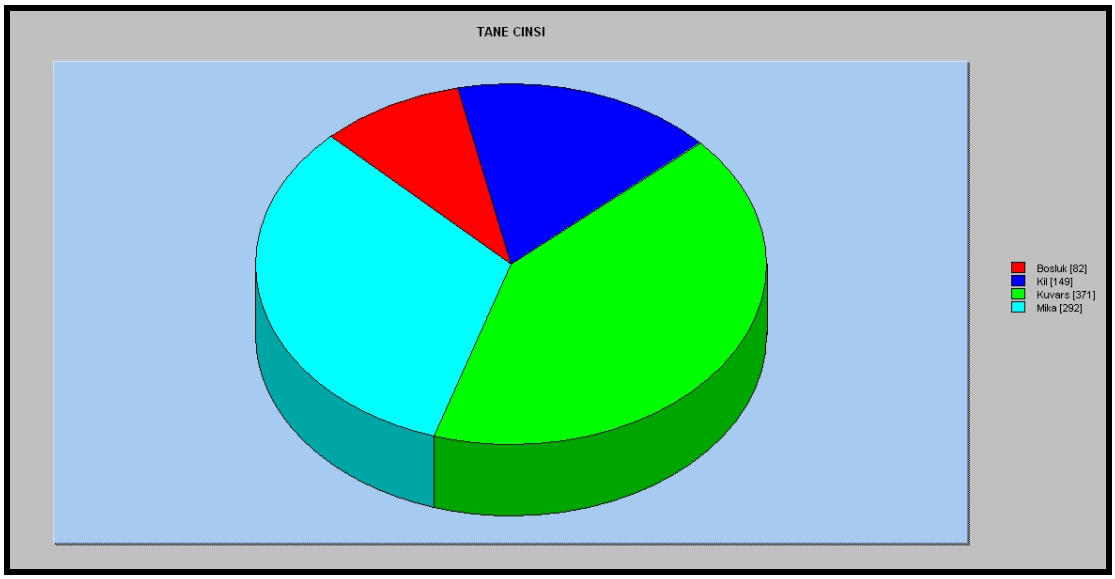
CD (Yavaş) deneyi ile 7 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.38). İnce kesit üzerinde toplam 894 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 51.03^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 12,21 dir (Şekil 4.39). Ölçüm yapılan 894 adet tane bileşeninden 82 adeti boşluk, 149 adeti kil domaini, 371 adeti kuvars ve 292 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.40). CD (Yavaş) 7 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-12'de verilmiştir.



Şekil 4.38. CD (Yavaş) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

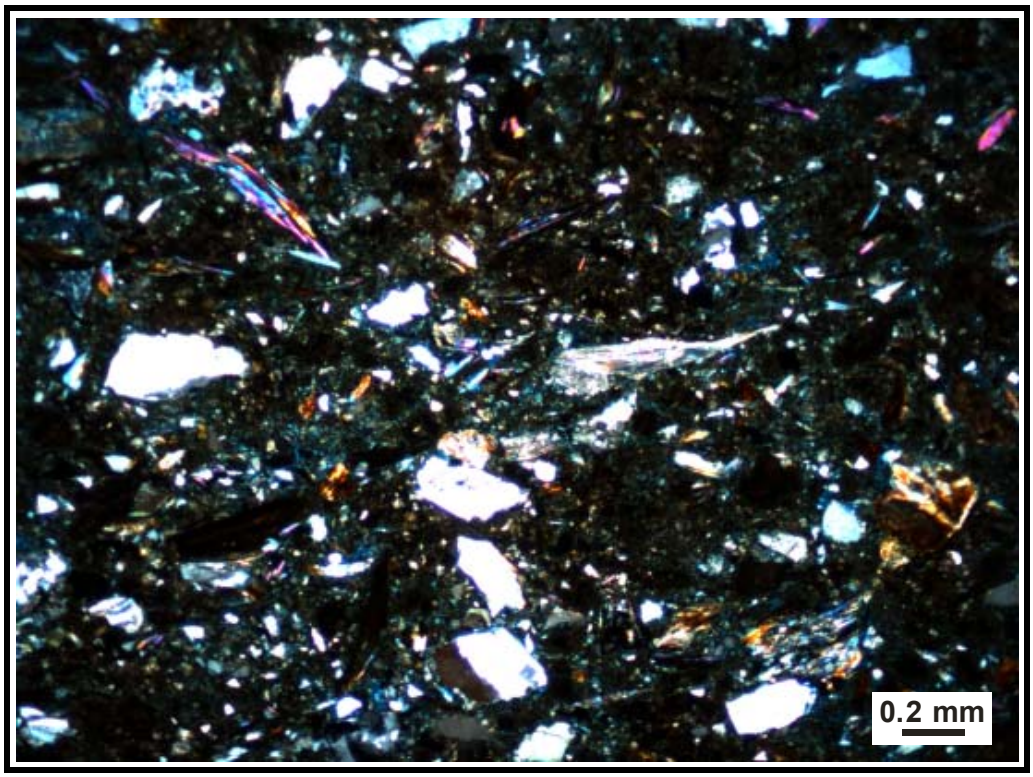


Şekil 4.39. CD (Yavaş) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

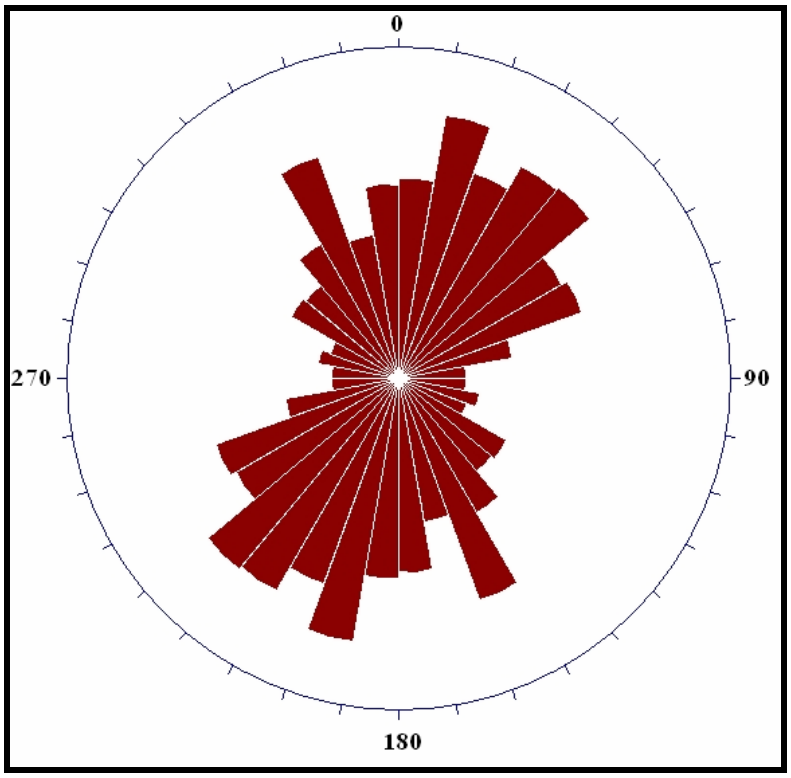


Şekil 4.40. CD (Yavaş) deneyi ile 7 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

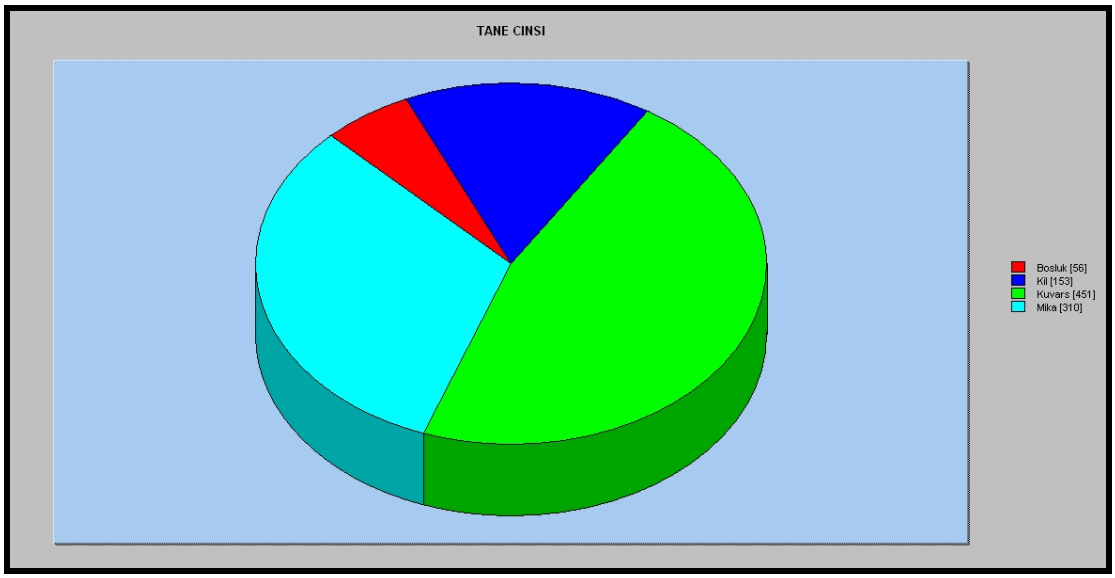
CD (Yavaş) deneyi ile 9 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.41). İnce kesit üzerinde toplam 970 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 52.41^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 13,98 dir (Şekil 4.42). Ölçüm yapılan 970 adet tane bileşeninden 56 adeti boşluk, 153 adeti kil domaini, 451 adeti kuvars ve 310 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.43). CD (Yavaş) 9 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-13'de verilmiştir.



Şekil 4.41. CD (Yavaş) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

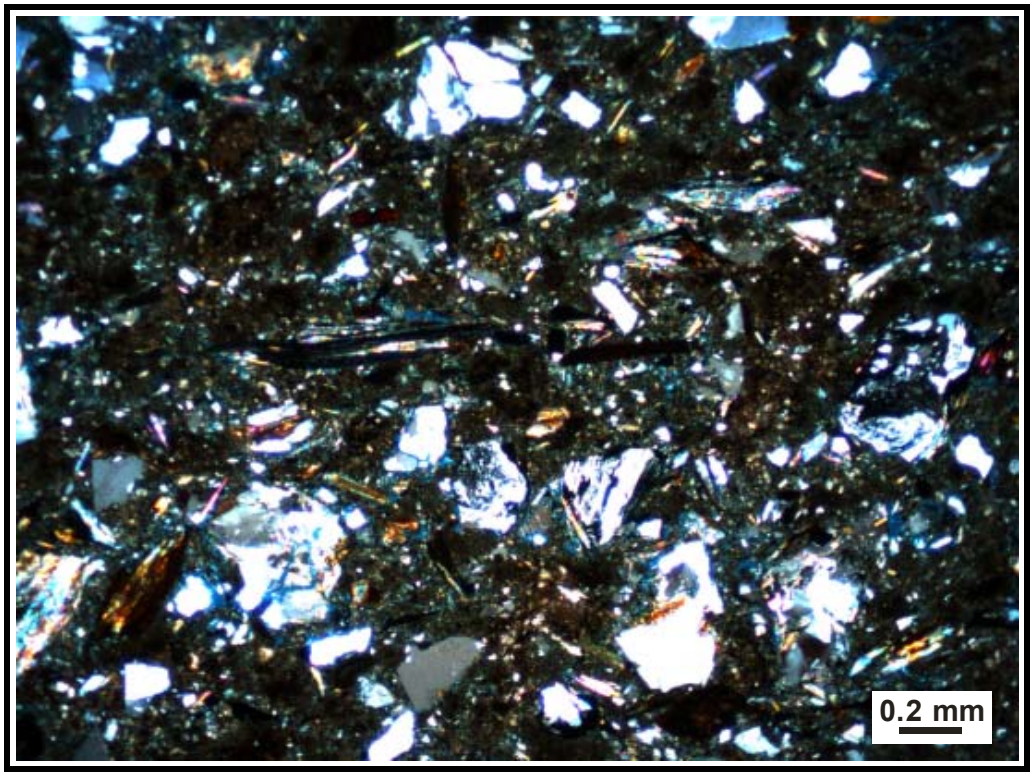


Şekil 4.42. CD (Yavaş) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

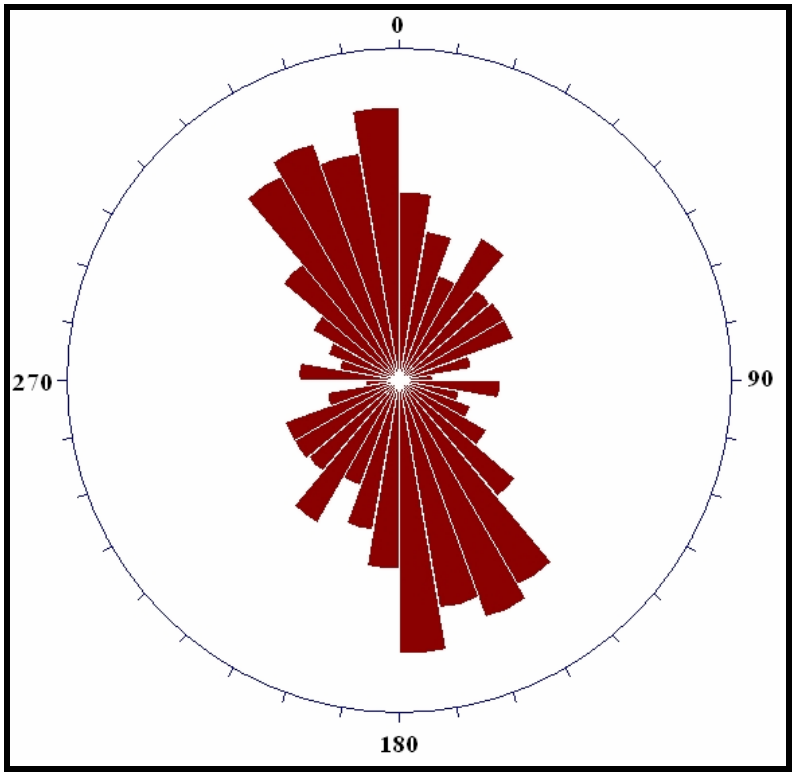


Şekil 4.43. CD (Yavaş) deneyi ile 9 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

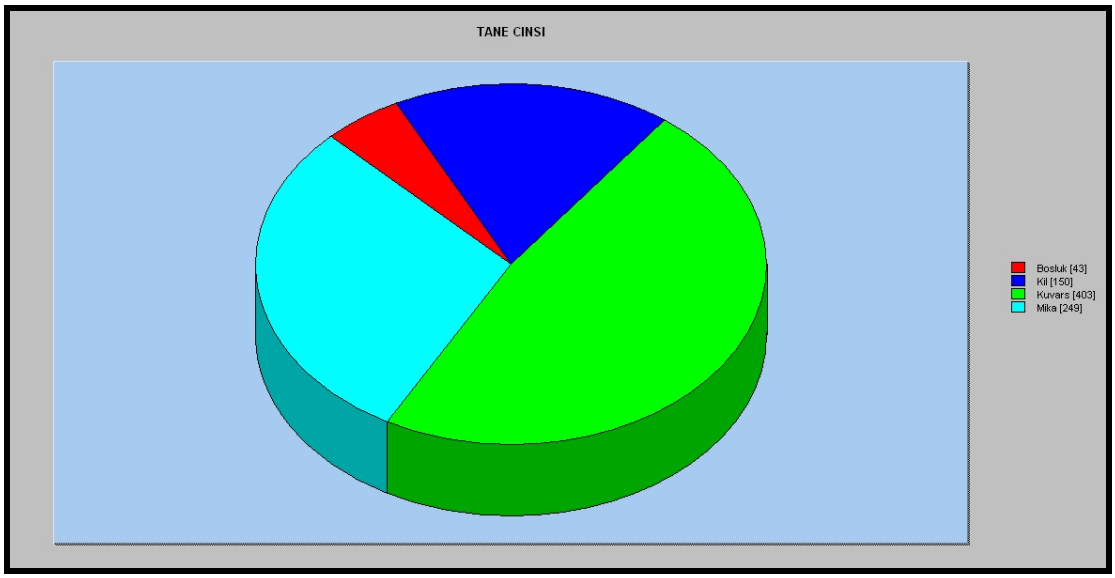
CD (Yavaş) deneyi ile 11 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.44). İnce kesit üzerinde toplam 845 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 54.35^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 18,21 dir (Şekil 4.45). Ölçüm yapılan 845 adet tane bileşeninden 43 adeti boşluk, 150 adeti kil domaini, 403 adeti kuvars ve 249 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.46). CD (Yavaş) 11 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-14'de verilmiştir.



Şekil 4.44. CD (Yavaş) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.

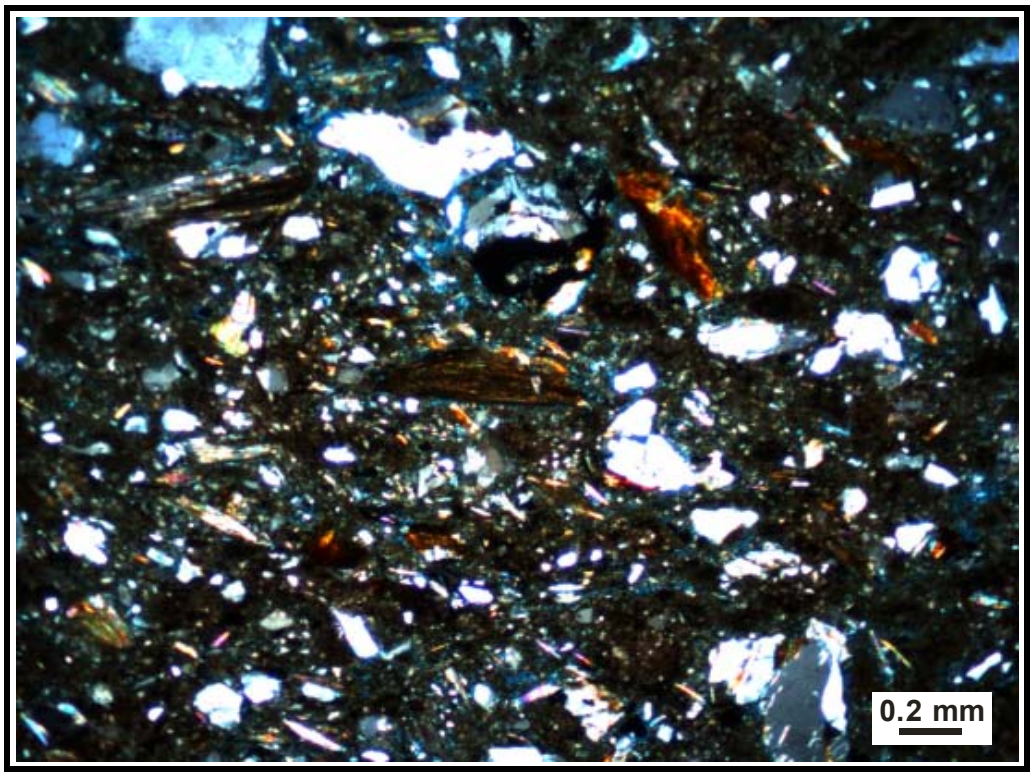


Şekil 4.45. CD (Yavaş) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

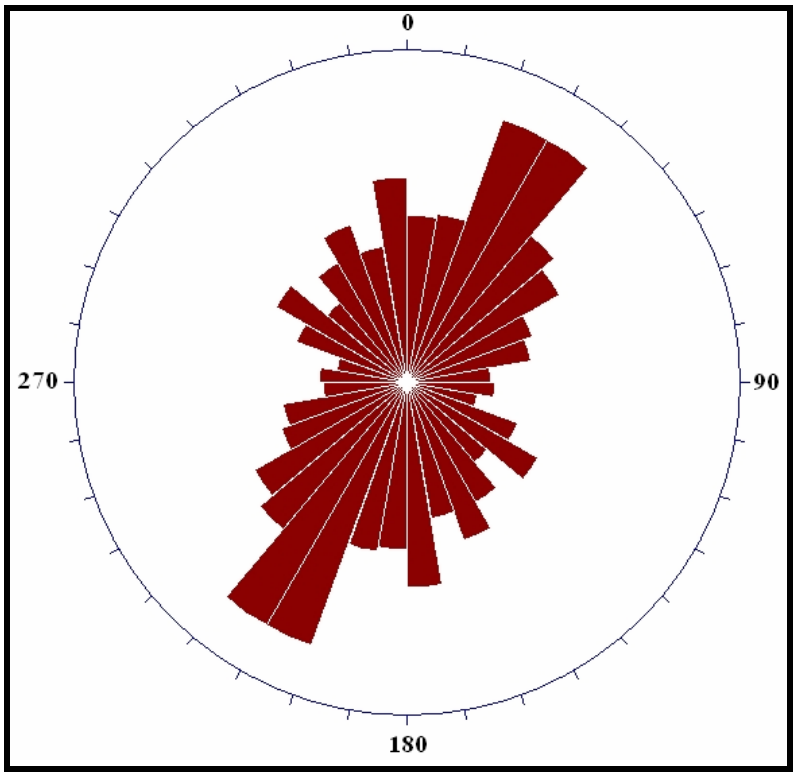


Şekil 4.46. CD (Yavaş) deneyi ile 11 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

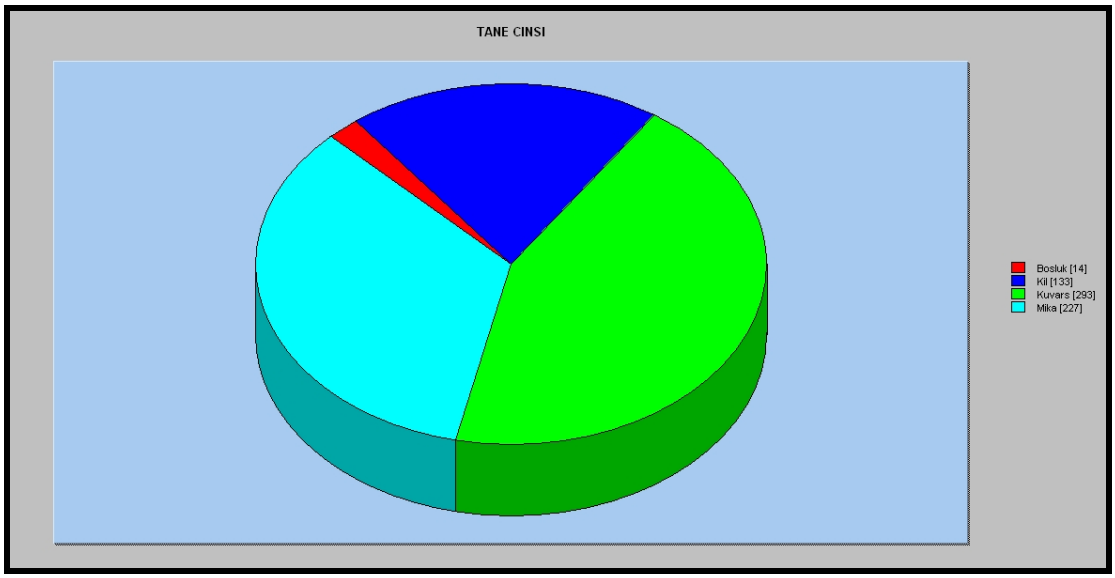
CD (Yavaş) deneyi ile 13 mm'lik kesme yer değiştirmesi uygulanan zemin örneğinin uygun alanından tane yönlenmelerini gösteren fotoğraf çekilmiştir (Şekil 4.47). İnce kesit üzerinde toplam 667 adet tane bileşeni ölçülmüş ve düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değeri 51.03^0 olarak bulunmuştur. $0\text{-}10^0$ arasında düşeyle açı yapan bileşenlerin toplam yüzdesi ise % 15,23 dir (Şekil 4.48). Ölçüm yapılan 667 adet tane bileşeninden 14 adeti boşluk, 133 adeti kil domaini, 293 adeti kuvars ve 227 adeti mika tanesinden oluşmaktadır (Şekil 4.49). CD (Yavaş) 13 mm'lik ince kesitinin düzeltilmiş açıları ve tane cinsleri EK-15'de verilmiştir.



Şekil 4.47. CD (Yavaş) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren fotoğraf.



Şekil 4.48. CD (Yavaş) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin tane yönlenmesini gösteren gül diyagramı.

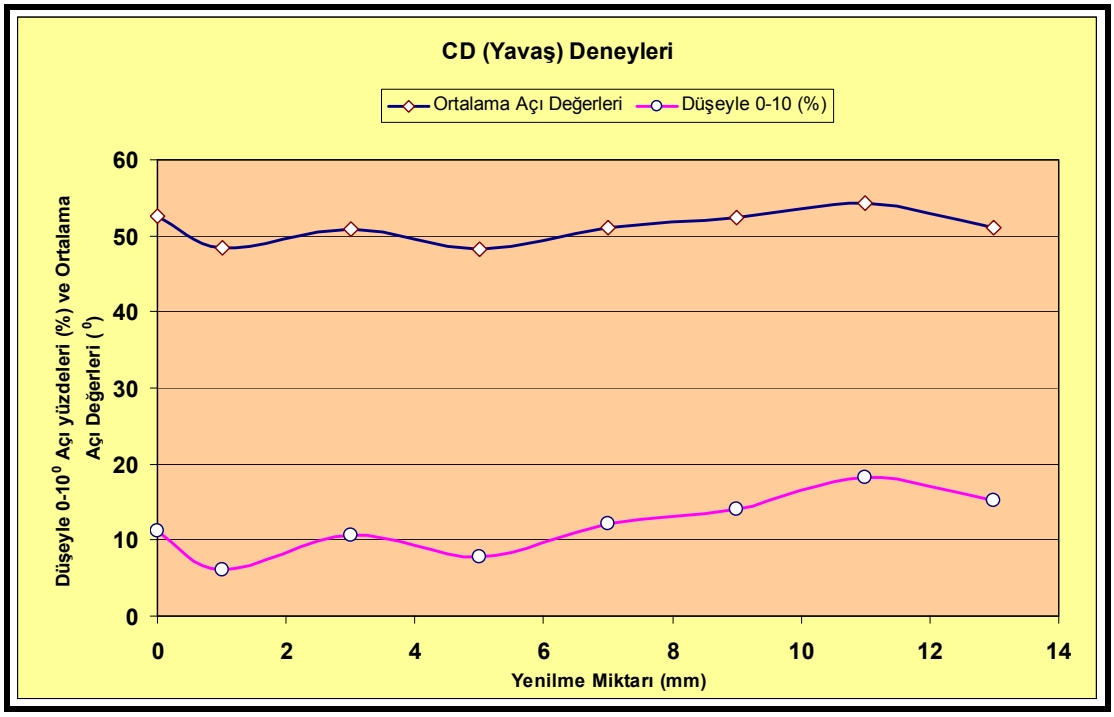


Şekil 4.49. CD (Yavaş) deneyi ile 13 mm kesilen zemin örneğinin Boşluk, Kil Domaini, Kuvars ve Mika tanelerinin ölçüm adedi.

CD (Yavaş) kesme kutusu deneyi ile kesilen örneklerin kayma düzlemi boyunca yenilmeye başladığı andan itibaren ilk dokularını koruyamadıkları düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerlerinden ve düşeyle yapmış oldukları $0\text{-}10^0$ arasında açı yüzdelerinden açıkça görülmektedir. Zemin örneklerinden kesilmemiş örneğe göre 1 mm'lik yenilme miktarında düşeyle yapılan ortalama açı değerinde ani bir düşüş olmuştur. 3 mm'lik yenilme miktarında tekrar artış olmuş, 5 mm'lik yenilme miktarında düşmüş ve 7 mm, 9 mm, 11 mm, lik yenilme miktarlarında düzenli bir artış gözlenmektedir. 13 mm'lik yenilme miktarında zeminin düşeyle yapmış olduğu ortalama açı değeri tekrar düşüse geçmiştir. Zemin örneklerinin düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerlerinin inişli-çıkışlı biçimde pikler yapmasının nedeni kesilen örneğin rotasyona uğramasından kaynaklanmaktadır. Tane bileşenlerinin düşeyle yaptıkları açı ortalamalarının inişli-çıkışlı olması tanelerin konumuylada ilgilidir. Eğer tanenin ilk konumu düşey çizginin sol tarafında ise düşeyle yapılan açı küçülmekte, sağ tarafında ise düşeyle yapılan açı büyümektedir. Bundan dolayı CD (Yavaş) deneyleri sonucunda 1 mm'lik ve 5 mm'lik yenilme miktarındaki tanelerin konumu düşey çizginin sol tarafındadır. CD (Yavaş) deneylerinde zemin 9 mm'lik bir yer değiştirme sonucunda dahi rotasyona devam etmektedir. Bunun nedeni CD (Yavaş) deneyi yavaş gerçekleştiğinden zemin bileşenleri yavaş bir şekilde uygulanan asal gerilmeler karşısında rotasyon için yeterli zaman bulduklarından dolayı 9 mm'lik yenilme miktarından sonra da rotasyona uğramalarından kaynaklanmaktadır. Tane bileşenlerinin düşeyle yapmış oldukları $0\text{-}10^0$ arasında açı yapan bileşen yüzdelerinin, tane bileşenlerin düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerleri ile orantılı olması bu sonuçları desteklemektedir. Bu değerlendirmelere ait toplu sonuçlar Çizelge 4.2'de ve Şekil 4.50'de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Kesilmemiş örnek ile CD (Yavaş) deneyleri sonucu rotasyona neden olan yönlenmelerin sayısal değerleri

Uygulanan Yanal Hareket Miktarı (mm)	Ölçüm Yapılan Bileşen Adedi	Yönlenmiş Açıların Düşeyle Yaptıkları Ortalama Açılar (^{0})	Düşey ile 0-10^0 arasında açı yapan bileşenlerin oranı (%)
0	1142	52,62	11,29
1	980	48,45	6,03
3	946	50,89	10,57
5	870	48,29	7,71
7	894	51,03	12,21
9	970	52,41	13,98
11	845	54,35	18,21
13	667	51,03	15,23



Şekil 4.50. Kesilmemiş örnek ile CD deneyleri sonucu oluşan rotasyonun düşeyle yaptıkları ortalama açılar ve 0-10^0 açı yapan bileşen yüzdelerinin karşılaştırılması.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, özel olarak hazırlanmış killi zemin örneklerinden daha önce farklı amaç için yaptırılan ince kesitler kullanılmıştır. Bilgisayar ortamında zemin örneklerinin tane, boşluk ve diğer bileşenlerinin yönlenmeleri ölçülmüş ve mikro dokuda (fabrik) değişikliğe neden olan en büyük asal gerilme ile ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Çalışmada, zemin taneleri ve boşluk yönlenme ölçümlerinden elde edilen açılar gül diyagramlarıyla değerlendirilerek rotasyonun tane yönlenmesi ve maksimum asal gerilme (σ_1) yönü üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Kesilmemiş zemin numunesi ve farklı yenilme miktarlarında kesilen CU ve CD deneyleri sonucunda 15 adet ince kesit üzerinde toplam 13.435 adet zemin bileşenin yönlenmesi ölçülerek oluşan rotasyon belirlenmeye çalışılmıştır.

CU (Hızlı) deneyinde zemin 9 mm'lik kesme sonunda yenildikten sonra rotasyon durmaktadır. Bunun nedeni yenilme 9 mm'de gerçekleştikten sonra tanelerin artık hızlı bir şekilde uygulanmakta olan kesme kuvvetine tepki gösterecek yeterli zamanı bulamamasıdır. Tane bileşenlerinin düşeyle yapmış oldukları $0\text{-}10^0$ arasında açı yapan bileşen yüzdelerinin, tane bileşenlerin düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerleri ile orantılı bir ilişki sunması bu sonuçları desteklemektedir.

CD (Yavaş) deneylerinde zemin 9 mm'lik kesme sonunda yenildikten sonra dahi rotasyona devam etmektedir. Bunun nedeni CD (Yavaş) deneyi yavaş gerçekleştiğinden zemin bileşenleri yavaş bir şekilde uygulanan asal gerilmeler karşısında rotasyon için yeterli zaman bulduklarından dolayı 9 mm'lik yenilme miktarından sonra da rotasyona uğramalarından kaynaklanmaktadır. Tane bileşenlerinin düşeyle yapmış oldukları $0\text{-}10^0$ arasında açı yapan bileşen yüzdelerinin, tane bileşenlerin düşeyle yapmış oldukları ortalama açı değerleri ile orantılı olması bu sonuçları desteklemektedir.

CD (Yavaş) şartlarında yenilmeden sonra rotasyon devam ettiği için taneler arasındaki boşluklar azaldığından dolayı zemin daha sıkı hale gelirken, CU (Hızlı) şartlarında yenilmeden sonra rotasyon durduğu için zemin yenilme anındaki dokusunu korumakta yani tanelerin sıkılaşması durmakta buda CD şartlarındaki zeminin daha dayanımlı davranabileceği anlamına gelmektedir.

KAYNAKLAR

BARDEN.L., 1972. The Influence of Structure on Deformation and Failure in Clay Soil. Geotechnique, 22, 159-164.

BARTON,C. M., 1974. The Micromorphological Soil-Investigation Work of Dr. Lafeber. In Soil Microscopy. G.K Rutherford (ed.). The Limestone Press, Kingston, Ontario, 1-19.

BERRY,P. L, and RAID, D., 1987. An Introduction to Soil Mechanics. McGraw Hill, England, 317.

CASAGRANDE, A., 1932. The Structure of Clay and its Importance in Foundation Engineering. Journal of Boston Soc.of Civil Engineering, 19, 168-208.

COLLINS, K., and McGOWN, A., 1974. The Form and Function of Microfabric Featurres in a Variety of Naturel Soils. Geotechnique, 24 (2), 234-254.

CRAIG, R,F., 1989. Soil Mechanics. ELBS, London, 410.

ÇETİN,H., 1998. Soil Pore and Particle Orientations Caused by Active Faulting; A Micromorphological Perspective. Soil Science, USA, 163, 374-381.

ÇETİN, H., SÖYLEMEZ, M., 2004, Soil-particle and pore orientations during drained and undrained shear of a cohesive sandy silt-clay soil. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, No. 6, pp. 1127-1138.

DAS, B.M., 1990. Principles of Geotechnical Engineering. PSW-KENT,Boston, 665.

DOUGLAS,L.A 1981. Soil Micromorphology and Faulting. U.S. Geological Survey Open File Report 81-942.

DOUGLAS, L. A., SOLE-BENET, A., LOW, A. J., and D. W. PLATT, 1983. The Micromorphology of Two Soils Fault-Breccias. In Soil Micromorphology .P. Bullock, and C.Murphy (eds.). AB Academic Publishers, Berkhamsted, Herts, UK, 347-353.

FITZPATRICK, E. A., 1984. Micromorphology of Soils.Chapman and Hall, London and NewYork, 433.

HOLTZ,R, D., and KOVACS,W. D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.733.

IINGLES,O. G., and LAFEBER, D., 1967. The Initiation and Development of Crack and Joint Systems in Granular Masses. Proc. Symp. Stress and Failure Around Underground Opennings. Dept. Miner. Engineering, Univ. of Sydney 7, 1-7.

INGLES, O. G., and LEE, I. K., 1971. The Influence of Initial Grain Shape and Pore Anizotropy on Strength of Brittle Soils. Geotechnique, 21, 143-153,

KIRKPATRICK, W. M., and RANNIE, I. A., 1972. Directional Properties of Consolidated Kaolin. Geotechnique, 22, 166-169.

LAFEBER, D., 1966. Aspects, of Stress-Induced Differential Movements of Fabric Elements in Mineral Soils. Australian Road Research Board 1, 1059-1067.

LAMBE, T.W., 1953. The Structure of Inorganic Soils. Prog. Am. Soc Civil Engineering, 79, 315.

LOVE, A. J., DOUGLAS, L. A., and PLATT., D. W. 1982. Soil Pore Orientation and Faults. Soil Sci. Soc. Am. 46, 789-792.

LUZA, K V., R.F. MADOLE, and A.J.CRONE. 1987. Investigation of the Meers fault, Southwestern Oklahoma, Oklahoma Geological Survey, Norman, ok, Special Publication.

MAHMOOD, A., 1973. Fabric-Mechanical Property Relationship in Fine Granular Soils. Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

MITCHELL, J. K., 1976. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley and Sons. New York, 422.

ODA, M., 1972. Initial Fabrics and Their Relations to Mechanical Properties of Granular Material, Soils and Foundations, 12 (1). 17-37.

PUSH,R., 1970. Microstructural Changes in Soft Quick Clay at Failure. Can. Geotech. J., 7, 1-7.

SLOANE, R. L., NOWATZKI,E. A., 1967. Electron Optical Study of Fabric Changes Accompanying Shear in a Kaoline Clay, III.C.P.M.S.I.F., 1, 215-225.

SOWERS, G. F., 1965 “Strength testing of soils” ASTM Special Technical Publication No: 361, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp.3-21.

ÖZGEÇMİŞ

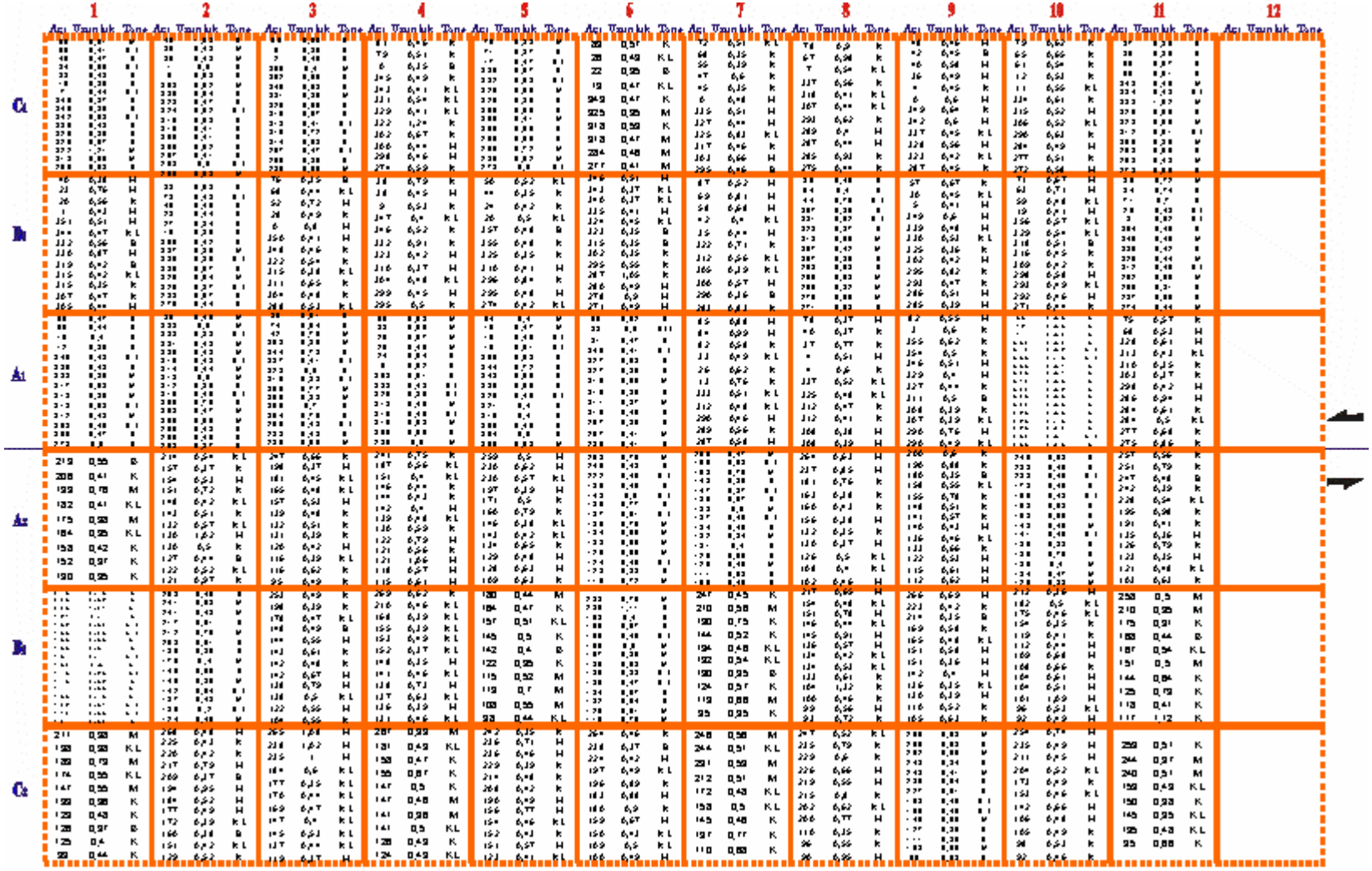
10.08.1977 yılında Adana ilinde doğdu. Lise öğrenimini 1994 yılında Malatya Hacı Ahmet Akıncı Lisesin de tamamladıktan sonra 1998 yılında Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünü kazanarak 2002 yılında jeoloji mühendisi olarak mezun oldu. 2003 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans hakkı kazandı ve halen öğrenimine devam etmektedir.

EKLER

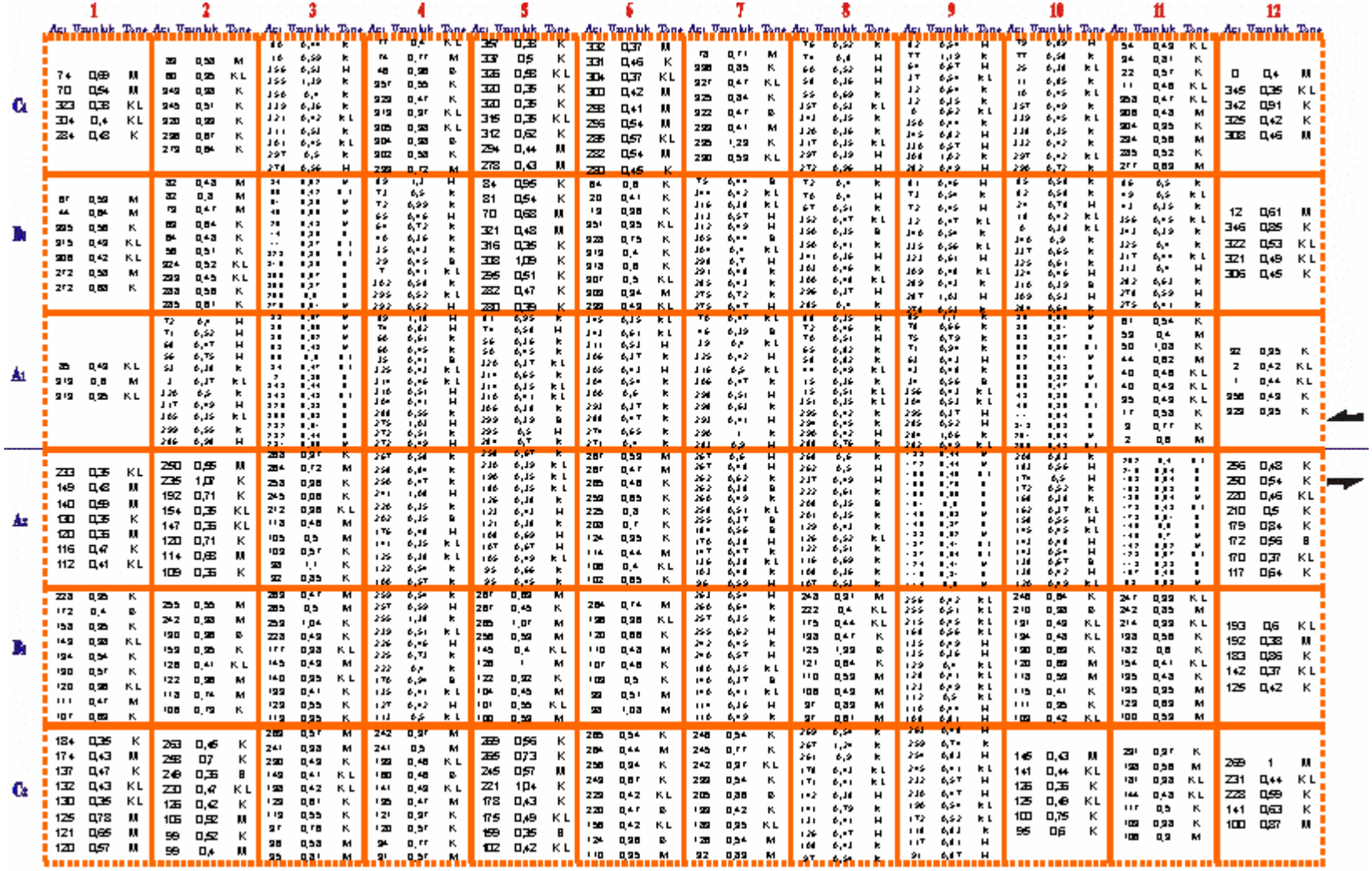
EK-1 Kesilmemiş Zemin İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-2 CU (Hızlı) 1 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-3 CU (Hızlı) 3 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-4 CU (Hızlı) 5 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-5 CU (Hızlı) 7 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-6 CU (Hızlı) 9 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-7 CU (Hızlı) 11 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-8 CU (Hızlı) 13 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-9 CD (Yavaş) 1 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-10 CD (Yavaş) 3 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-11 CD (Yavaş) 5 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-12 CD (Yavaş) 7 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-13 CD (Yavaş) 9 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-14 CD (Yavaş) 11 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri
EK-15 CD (Yavaş) 13 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş açıları ve Tane Cinsleri

EK1 Kesilmemiş Zemin Numunesi İnce Kesitinin Düzeltilmiş Açıkım ve Tane Sınırları (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Donanı, B: Boşluk)

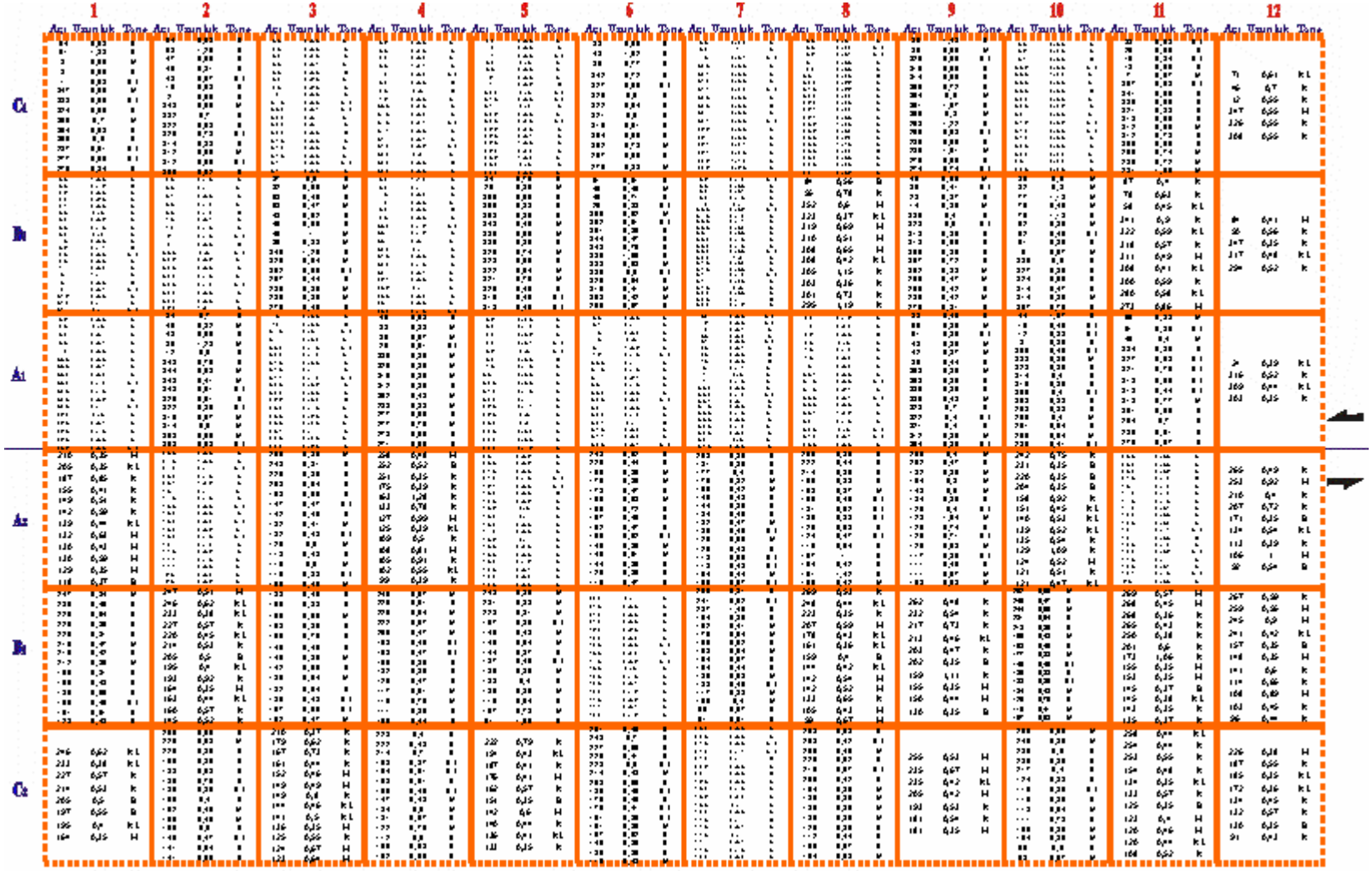
EK-2: CU(HIZLI) 1 mm Tiki İnce Kesitinin Dizaltılmış Aydınlık Tane Örnekleri (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Dokusu, B: Boşluk)



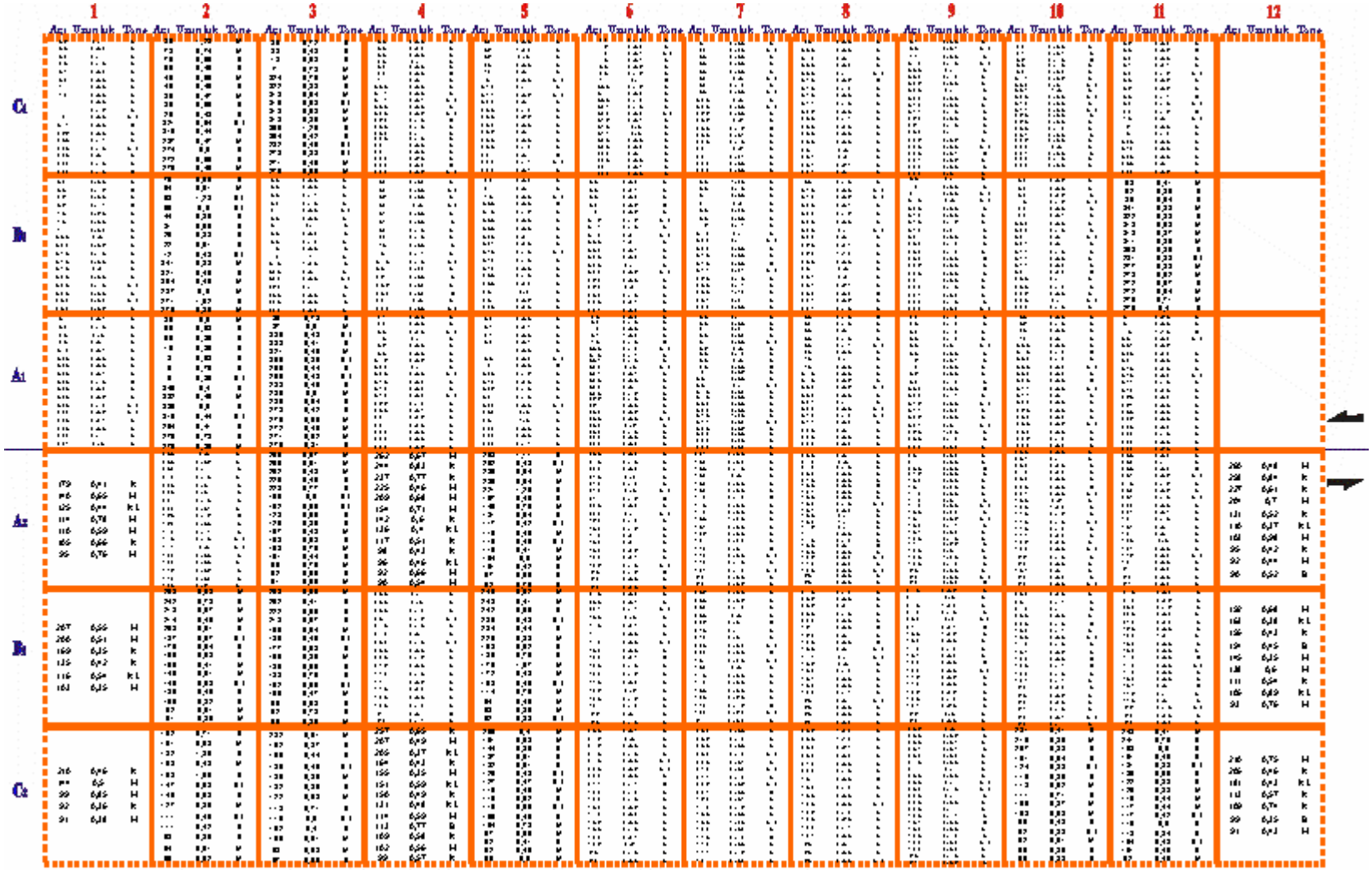
EK-3 CU (HIZLI) 3 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Aşılanma ve Tane Cinsleri (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Domain, B: Boşluk)



EK-4 CU(HIZLI) 5 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Aşılanma ve Tane Cinsleri (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Domain, B: Boşluk)

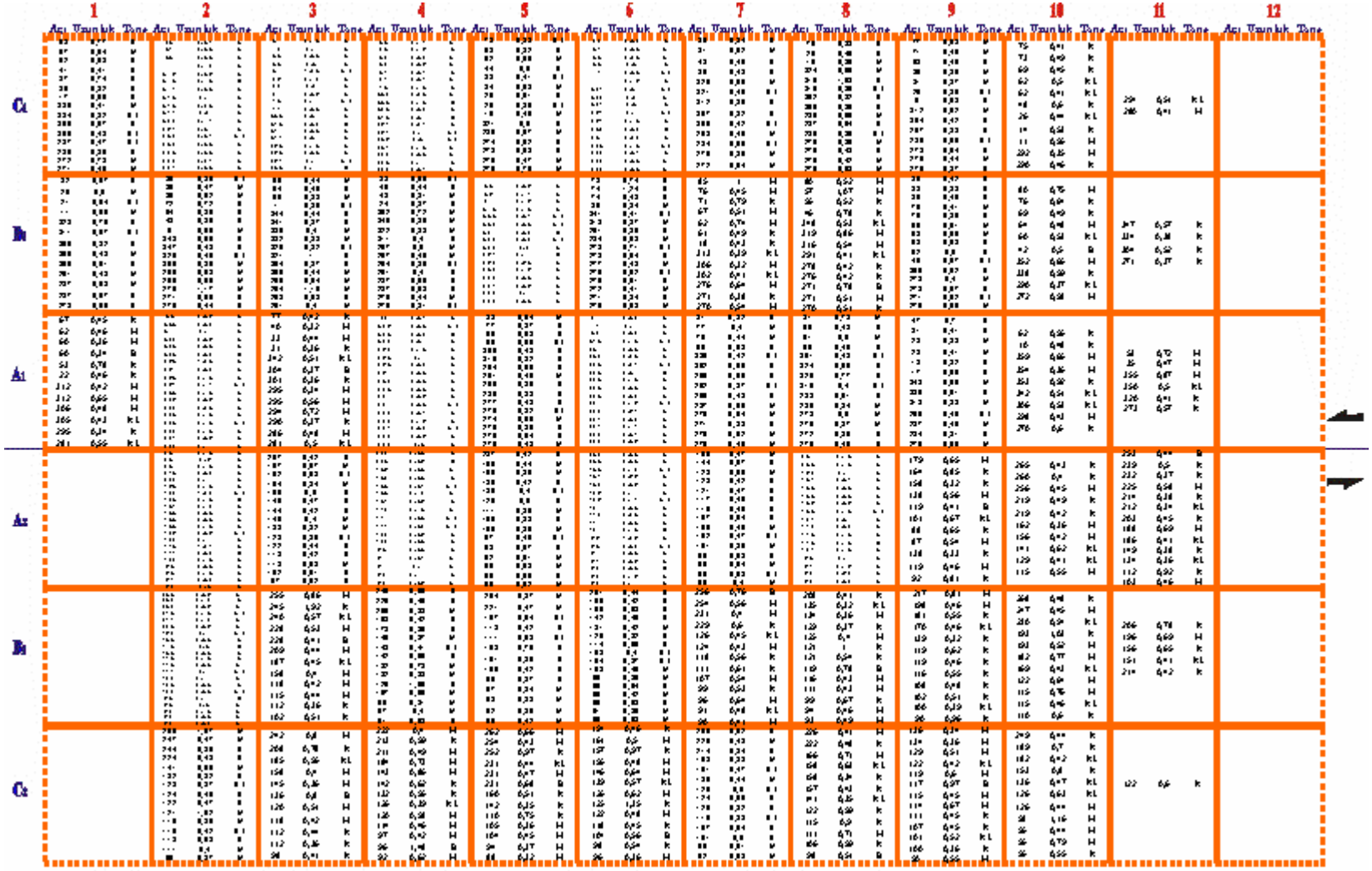


EK-5 CU (HIZLI) 7 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Aşılanma ve Tane Cinsleri (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Domain, B: Boşluk)



EK-6 CU(HIZLI) 9 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Aşılanma ve Tane Cinsleri (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Domain, B: Boşluk)

EK-7 ÇUĞULD) 11 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Aplanve Tane Çizileri (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Donanı, B: Boşluk)



EK-8 CU (HIZLI) 13 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Açıları ve Tane Cinsleri (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Domain, B: Boşluk)

Ek-9 CD (YÖNTEM) 1 mm'lik İnce Kesitlerin Düzeltilmiş Ağırlıkve Tane Grafiği (M: Milia, K: Kireç, KİL: Kil Donanı, B: Boşluk)

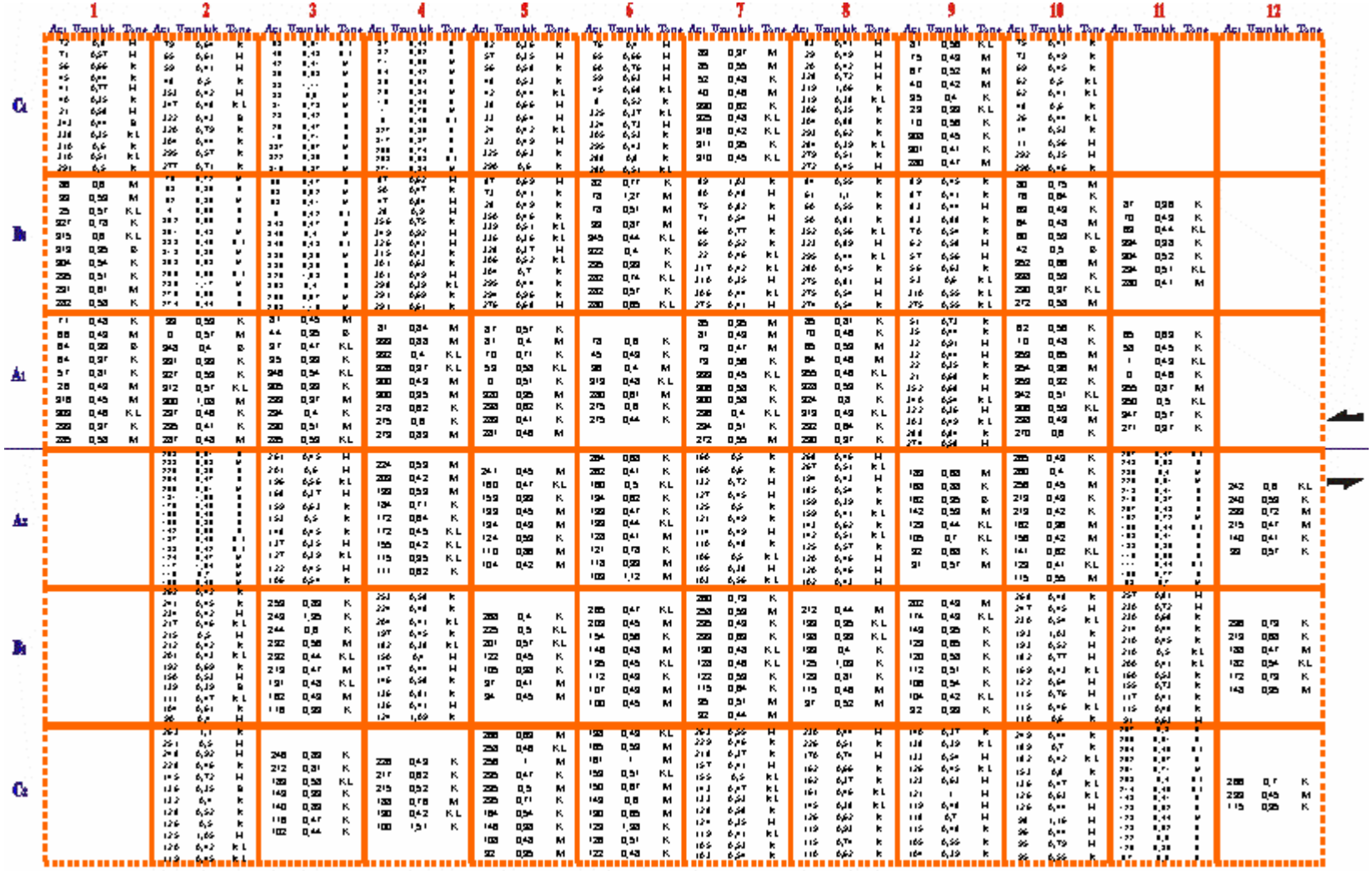
EK-10 ÇD (YAYA) 3 mm Tik: İnce Kesitlerin Düzeltilmiş Açıları ve Tane Çizgileri (M: Miliç, K: Kuvars, KİL: Kil Dönüşüm, B: Boşluk)

EK-11 CD (YAVAŞ) 5 mm'lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Açılım ve Tane Ölçüleri (Ö1: Miks, K: Kırıntı, KİL: Kil Domain, B: Boşluk)

EK-12 CD (YAVAŞ) 7 mm Tik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Ayarlanır Tane Grafiği (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Donanı, B: Boşluk)

EK-13 CD (YAVAŞ) 9 mm'lik İnce Kesitlerin Düzeltilmiş Aplanx ve Taue Grafiği (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Domain, B: Boşluk)

EK-14 CD (YAVAŞ) 11 mm'lik İnce Kesitinin Dizeltilmiş Aplanve Tane Cinleri (M: Mika, K: Kuvars, KİL: Kil Donanı, B: Boşluk)



EK-15 CD (YAVAŞ) 13 mm lik İnce Kesitinin Düzeltilmiş Açıları ve Tane Cinsleri (M: Milka, K: Kırvars, KİL: Kil Domain, B: Boşluk)