

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TRABZON ARAKLI KALKER OCAĞINDAKİ KAYA ŞEVLERİ DURAYLILIĞININ BULANIK
MANTIK SİSTEMİ İLE MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Şener ALİYAZICIOĞLU

**NİSAN 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TRABZON ARAKLI KALKER OCAĞINDAKİ KAYA ŞEVLERİ DURAYLILIĞININ
BULANIK MANTIK SİSTEMİ İLE MODELLENMESİ**

Şener ALİYAZICIOĞLU

ORCID : - - -

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 / 02 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 10 / 04 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Trabzon Araklı Kalker Ocağındaki Kaya Şevleri Duraylılığının Bulanık Mantık Sistemi ile Modellenmesi” başlıklı çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, modelleme ve analiz için KTÜ bünyesinde mevcut olan yazılımlar kullanılmıştır.

Tez çalışmasının her aşamasında bilgi, tecrübe ve görüşleri ile her daim desteğini esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayhan KESİMAL olmak üzere, Sayın Prof. Dr. Bayram ERÇIKDI, Sayın Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR ve Sayın Doç. Dr. Kadir KARAMAN’a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Teorik çalışmalar sırasında bilimsel hayata dair önemli öğretileri hayatıma katan ve felsefi açıdan ufkumu açan Sayın Prof. Dr. Fikri BULUT hocama ve KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü tüm akademik ve idari personele teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmaları sürecinde desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Serkan İNAL’a, Arş. Gör. Dr. İlker ERKAN’a, Arş. Gör. Dr. Cavit KUMAŞ’a, Arş. Gör. Mehmet Akif GÜNEN’e, Gümüşhane Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü akademik personeline teşekkürlerimi sunarım. Arazi çalışmaları ve sondajların temininde her türlü imkanı sağlayan Aşkale Çimento A.Ş.’ye ve Maden Mühendisi Muhammet KARA’ya ayrı ayrı teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her türlü desteği ile yanımda olan aileme en derin saygı ve şükranlarımı sunarım. Doktora tez çalışmamı, desteklerini esirgemeyen kıymetli annem, babam, kardeşlerim, eşim ve çocuklarıma ithaf ediyorum.

Şener ALİYAZICIOĞLU

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

“Doktora Tezi” olarak sunduğum “Trabzon Araklı Kalker Ocağındaki Kaya Şevleri Duraylılığının Bulanık Mantık Sistemi ile Modellenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ayhan KESİMAL’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/04/2023

Şener ALİYAZICIOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	3
1.3. Çalışma Alanı	5
1.3.1. Coğrafi Konumu	5
1.3.2. İklim ve Yağış Bilgisi.....	5
1.3.3. Jeolojisi.....	6
1.4. Kütle Hareketleri	9
1.5. Şev Duraylılığı.....	10
1.5.1. Açık Ocak Madenciliği Şev Terimleri.....	11
1.5.2. Şev Duraylılık Analizi Planlaması	12
1.5.3. Şev Duraylılığını Etkileyen Faktörler.....	14
1.5.4. Şev Yenilme Mekanizmasına Genel Bakış.....	14
1.5.5. Şev Yenilme Türleri	15
1.5.5.1. Düşme Türü Yenilmeler	15
1.5.5.2. Devrilme Türü Yenilmeler	16
1.5.5.3. Kayma Türü Yenilmeler	16
1.5.5.3.1. Dairesel Yenilmeler	16
1.5.5.3.2. Düzlemsel Yenilmeler	17
1.5.5.3.3. Kama Tipi Yenilmeler	18
1.5.5.3.4. Çok Yüzeyli (Birleşik) Yenilmeler.....	18
1.5.6. Şev Duraylılık Analizleri.....	19
1.5.7. Düzlemsel Kayma.....	20

1.5.7.1	Düzlemsel Kayma için Kinematik Analiz	20
1.5.7.2.	Düzlemsel Kayma için Grafik Yöntemi	21
1.5.8.	Şev Duraylılık Geometrisi	22
1.5.9.	Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütü	23
1.5.10.	Limit Denge Analizi	25
1.5.11.	Düzlemsel Kayma İçin Limit Denge Analizi	26
1.5.12.	Mohr Dairesi ve Yenilme Zarfı	29
1.6.	Bulanık Mantık	31
1.6.1.	Bulanık Mantık Sistemi	33
1.6.1.1.	Bulanıklaştırma.....	34
1.6.1.2.	Bulanık Kural Tabanı	35
1.6.1.3.	Bulanık Çıkarım Motoru	35
1.6.1.4.	Durulaştırma	36
1.7.	Önceki Çalışmalar	36
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	42
2.1.	Giriş	42
2.2.	Jeolojik Harita.....	43
2.3.	Sondaj Verilerinin Değerlendirilmesi.....	45
2.4.	Kaya Kalitesi Değeri (RQD)	47
2.5.	İndeks ve Dayanım Özellikleri	48
2.5.1.	Çalışma Alanındaki Killerin Özellikleri	48
2.5.2.	Deney Örneklerinin Hazırlanması	49
2.5.3.	Yoğunluk, Gözeneklilik, Boşluk Oranı	50
2.5.4.	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi.....	51
2.5.5.	Kaya Makaslama Deneyi.....	52
2.6.	Bulanık Mantık Çalışmaları.....	54
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	57
3.1.	Arazinin Modellenmesi	57
3.2.	Sondajlardan RQD Değerinin Elde Edilmesi	58
3.3.	Sondaj Verilerinin İrdelenmesi.....	58
3.4.	Yoğunluk ve Gözeneklilik Tayini	60
3.5.	Sondajlardan Kaya Malzemesinin Dayanım Özellikleri	62
3.5.1.	Tek Eksenli Basma Dayanımı Deneyi.....	62

3.5.2.	Kaya Makaslama Deneyi.....	64
3.6.	Bulanık Mantık Sistemi ile Şev Duraylılığı Yaklaşımı	65
4.	SONUÇLAR.....	96
5.	ÖNERİLER	98
6.	KAYNAKLAR.....	99
7.	EKLER	109
ÖZGEÇMİŞ		



ÖZET

TRABZON ARAKLI KALKER OCAĞINDAKİ KAYA ŞEVLERİ DURAYLILIĞININ
BULANIK MANTIK SİSTEMİ İLE MODELLENMESİ

Şener ALİYAZICIOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ayhan KESİMAL
2023, 108 Sayfa, 17 Sayfa Ek

Bu çalışmada, Taşönü (Trabzon-Araklı) kalker ocağındaki yenilmeler bulanık mantık sistemi ile irdelenmiştir. 2005-2007 yılları arasında 3 ayrı düzlemsel yenilmeye maruz kalan sahada, kayan bölgenin arkasında 5 ayrı noktada sondaj çalışması yapılmıştır. Sondajlardan elde edilen karot örnekleri üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmaları ile arazi gözlem ve değerlendirme sonuçları birleştirilerek arazinin 3 boyutlu modeli oluşturulmuş ve yeni muhtemel yenilme düzlemlerinin oluşabileceği ortaya konmuştur. 3 boyutlu model üzerinden muhtemel yenilme düzleminin yüzey konumu tespit edilerek ve kesitler alınarak muhtemel yenilmenin boyutu ortaya konmuştur. Limit denge yöntemi ile analiz edilen ocakta, 3 boyutlu modelden tespit edilen kayacak kütlenin geometrik boyutları kullanılmıştır. Ocağa ait veriler ile bulanık mantık sistemi modellenmiştir. Matlab Fuzzy Logic Designer arayüzü kullanılarak kurulan bulanık sistemde, uzman görüşü olarak gerçek verilerin alt-orta-üst sınırları kullanılarak veriler bulanıklaştırılmıştır ve Mamdani çıkarım sistemi ile sonuç durulaştırılmıştır. İlk olarak kohezyon, içsel sürtünme açısı ve birim hacim ağırlık girdi parametreleri ile farklı üyelik fonksiyonlarına ait sonuçlar elde edilmiştir. Sonrasında, kohezyon, içsel sürtünme açısı, çatlak suyu basıncı ve patlatma ivmesi girdi parametreleri ile farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bulanık mantık sistemi ile elde edilen güvenlik katsayısı çıktı sonuçları, RocPlane programı ile elde edilen analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Analitik çözüme kıyasla parametre sayısı azaltılarak oluşturulan bulanık çıkarım sisteminin, limit denge analiz sonuçlarına yakın sonuçlar ortaya koyduğu bulunmuştur. Çalışma kapsamında, bulanık mantık sistemi ile analitik çözüm sonuçlarının korelasyon analizinde pozitif yönde ve yüksek düzeyde ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaya mekaniği, Şev duraylılığı, 3 boyutlu modelleme, Limit denge yöntemi, Bulanık mantık, Bulanık çıkarım sistemi

SUMMARY

MODELING THE STABILITY OF ROCK SLOPES IN THE TRABZON ARAKLI
LIMESTONE QUARRY USING FUZZY LOGIC SYSTEM

Şener ALİYAZICIOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ayhan KESİMAL
2023, 108 Pages, 17 Pages Appendix

In this study, the failures in the Taşönü (Trabzon-Araklı) limestone quarry were examined with the fuzzy logic system. Drilling works were carried out at 5 different points behind the failure zone in the field, which was exposed to 3 different planar failures between 2005 and 2007. Physical and mechanical tests were applied to core samples obtained from the drillings. By combining laboratory studies with field observation and evaluation results, a 3D model of studying area was modelled and it was revealed that new possible failure planes could be formed. By determining the surface location of the new failure plane on the 3D model within sectioning, the extent of the possible failure zone has been formed. Limit equilibrium method has been applied to quarry by using the geometric dimensions of failure mass created by 3D model. The fuzzy logic system was modelled with the data of the quarry. In the fuzzy logic system, created by using Matlab Fuzzy Logic Designer, the data was fuzzified by using lower-middle-upper limits of real data as expert opinion and the result was defuzzified by Mamdani inference system. Firstly, the results of different membership functions were applied and compared within cohesion, angle of internal friction and unit weight input parameters. Afterwards, different results were analysed with input parameters as cohesion, angle of internal friction, water pressure and blasting acceleration. Factor of safety, as an output parameter, obtained from fuzzy logic system was compared with analytical results, calculated with RocPlane program. It was found that the fuzzy inference system, which was created by reducing the number of parameters compared to the analytical solution, produced results close to the limit equilibrium analysis results. Within the scope of the study, it was revealed that the fuzzy logic system and analytical solution results were positively and highly correlated in the correlation analysis.

Key Words: Rock mechanics, Slope stability, 3D modelling, Limit equilibrium method, Fuzzy logic, Fuzzy inference system

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Çalışma sahası yer bulduru haritası (Aliyazıcıoğlu vd., 2015).....	5
Şekil 2.	Araklı ilçesi Taşönü köyü pafta bölümlemesi (G44-a1).....	7
Şekil 3.	Araklı – Taşönü kalker ocağının jeolojik haritası (Ceryan, 2009).....	8
Şekil 4.	Açık ocak basamak tasarım parametrelerinin gösterimi (a) tek basamak (b) çoklu basamak tasarımı	11
Şekil 5.	Şev geometrisinin kesit görünümü.....	12
Şekil 6.	Şev duraylılık analizlerinde izlenecek mantıksal yol (Hoek ve Bray, 1981) (Aliyazıcıoğlu vd., 2017).....	13
Şekil 7.	Şev yenilme türlerinin sınıflandırılması (Eskikaya vd., 2005) (Aliyazıcıoğlu vd., 2017)	15
Şekil 8.	Düşme türü yenilmelerin oluşum diyagramı (Highland ve Bobrowsky, 2008)	15
Şekil 9.	Devrilme türü yenilmelerin oluşum diyagramı (Highland ve Bobrowsky, 2008)	16
Şekil 10.	Dairesel yenilmelerin oluşum diyagramı (Highland ve Bobrowsky, 2008)	17
Şekil 11.	Düzlemsel yenilmelerin oluşum diyagramı (Highland ve Bobrowsky, 2008)	17
Şekil 12.	Kama tipi yenilmenin oluşum diyagramı (Akbulut, 2012)	18
Şekil 13.	Birleşik yenilmeler: (a) çökme-devrilme (b) kama tipi – kaya düşmesi (Akbulut, 2012).....	18
Şekil 14.	Düzlemsel kaymanın kinematik analizi (Norrish ve Wyllie, 1996).....	21
Şekil 15.	Düzlemsel kayma için farklı durumlarda şev açısı ve şev yüksekliği fonksiyonları (Hoek, 1970).....	21
Şekil 16.	Düzlemsel kaymada şev açısı ve şev yüksekliğine bağlı güvenlik katsayısının belirlenmesi grafiği (Hoek, 1970).....	22
Şekil 17.	Eğik düzlem üzerindeki bloğa etkiyen kuvvetler.....	22
Şekil 18.	Mohr-Coulomb yenilme zarfı (Raghuvanshi, 2019).....	24

Şekil 19.	Düzlemsel kayma geometrisine etki eden kuvvetler: (a) şev arkasında (b) şev aynasında gerilme çatlağı durumları (Hoek vd., 1977)	27
Şekil 20.	Deprem yükleri (a) ve kaya saplamaları (b) etkisi (Hoek vd., 1977).....	29
Şekil 21.	Mohr dairesi ve Mohr-Coulomb yenilme zarfı	30
Şekil 22.	Klasik mantık ile bulanık mantık değer dağılım gösterimi	31
Şekil 23.	Sıcaklık sınıflandırmasının bulanık mantıkta kümelenmesine bir örnek.....	33
Şekil 24.	Bulanık mantık sistemi (Şen, 2020)	33
Şekil 25.	Üçgen, yamuk ve Gaussian üyelik fonksiyon tipleri	35
Şekil 26.	Heyelan sahasından bir görünüm	42
Şekil 27.	Heyelan sahasının görünüm ve jeolojik kesiti (Karaman vd., 2013)	43
Şekil 28.	Heyelan sahasının arkasında yapılan sondajlar	44
Şekil 29.	Kalker ocağı içindeki heyelan sahası ve sondaj konumları	44
Şekil 30.	Sondajlara ait litolojik ve yükselti bilgileri	45
Şekil 31.	Sondajlara ait stratigrafik kesitler	46
Şekil 32.	Kaya kalitesi değeri (RQD)'nin hesaplama yöntemi	47
Şekil 33.	Casagrande deneyi	49
Şekil 34.	Deney örneklemelerine ait bir görsel	49
Şekil 35.	Karot kesme ve düzeltme makinesi	50
Şekil 36.	Tek eksenli basınç dayanım deney cihazı (hidrolik pres)	52
Şekil 37.	Doğrudan makaslama deneyine tabi tutulan örnekler	53
Şekil 38.	Doğrudan kaya makaslama dayanımı cihazı	53
Şekil 39.	Taşönü kalker ocağının 3 boyutlu görünümü	57
Şekil 40.	Sondaj loglarından tespit edilen makaslama zonları	59
Şekil 41.	Sondaj konumları, mevcut gerilme çatlakları, muhtemel yenilme düzleminin yüzey konumunun 3 boyutlu görseli	59
Şekil 42.	Karot sandıklarından seçilerek sınıflandırılan örnekler	62
Şekil 43.	Tek eksenli basınç deneyi için sınıflandırılan örnekler	62
Şekil 44.	1-3-13 nolu örnek normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi	64

Şekil 45.	2-4-18 nolu örnek normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi	64
Şekil 46.	4-6-28 nolu örnek normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi	65
Şekil 47.	5-5-25 nolu örnek normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi	65
Şekil 48.	Taşönü kalker ocağından alınan kesitlerin konumu.....	66
Şekil 49.	3 boyutlu modelden A-A' kesiti (SK-4 için)	66
Şekil 50.	3 boyutlu modelden B-B' kesiti (SK-5 için).....	67
Şekil 51.	3 boyutlu modelden C-C' kesiti (SK-6 için).....	67
Şekil 52.	Sondajlar arasında kalan potansiyel kayma kütlesi.....	68
Şekil 53.	Matlab programı Bulanık Mantık Tasarımcısı (Fuzzy Logic Designer) arayüzü	69
Şekil 54.	Muhtemel yenilme düzlemi üçgen üyelik fonksiyonları.....	70
Şekil 55.	Muhtemel yenilme düzlemi yamuk üyelik fonksiyonları	71
Şekil 56.	Muhtemel yenilme düzlemi Gaussian üyelik fonksiyonları	71
Şekil 57.	Muhtemel yenilme düzlemin a) en küçük, b)orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (üçgen üyelik fonksiyonu).....	73
Şekil 58.	Muhtemel yenilme düzleminin a) en küçük, b)orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (yamuk üyelik fonksiyonu).....	74
Şekil 59.	Muhtemel yenilme düzleminin a) en küçük, b)orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (Gaussian üyelik fonksiyonu).....	75
Şekil 60.	Kil düzlemi için üçgen üyelik fonksiyonları.....	76
Şekil 61.	Kil düzlemi için yamuk üyelik fonksiyonları	76
Şekil 62.	Kil düzlemi için Gaussian üyelik fonksiyonları.....	77
Şekil 63.	Kil düzleminin a) en küçük, b)orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (üçgen üyelik fonksiyonu)	78
Şekil 64.	Kil düzleminin a) en küçük, b)orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (yamuk üyelik fonksiyonu).....	79

Şekil 65.	Kil düzleminin a) en küçük, b)orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (Gaussian üyelik fonksiyonu)	80
Şekil 66.	Bulanık sistem sonucunda kohezyon ve içsel sürtünme açısı için üretilen çıktı yüzeyleri.....	81
Şekil 67.	Üçgen üyelik fonksiyonu için korelasyon grafiği	83
Şekil 68.	Yamuk üyelik fonksiyonu için korelasyon grafiği.....	83
Şekil 69.	Gaussian üyelik fonksiyonu için korelasyon grafiği.....	84
Şekil 70.	En düşük $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %0)	86
Şekil 71.	Yeraltı su varlığı durumuna göre oluşturulan bulanık çıkarım modeli	88
Şekil 72.	Örnek parametrelere karşılık gelen bulanık çıkarım değeri.....	89
Şekil 73.	Bulanık mantık model tasarımı	89
Şekil 74.	Su durumu ile ivme dahil edilerek oluşturulan bulanık çıkarım sistemi.....	92
Şekil 75.	İvme dahil edilen örnek değerlere göre bulanık çıkarım değeri	93
Şekil 76.	Örnek parametrelere karşılık gelen deterministik modelleme grafiği	94
Şekil 77.	Analitik çözüm ile bulanık çıkarım güvenlik katsayısı değerlerinin korelasyonu	95
Ek Şekil 1.	En düşük $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %100)	118
Ek Şekil 2.	En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %0).....	118
Ek Şekil 3.	En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %0, ivme 0.5g)	119
Ek Şekil 4.	En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %100)....	119
Ek Şekil 5.	En düşük $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %0)	120
Ek Şekil 6.	En düşük $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %100)	120
Ek Şekil 7.	En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %0).....	121
Ek Şekil 8.	En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %0, ivme 0.5g)	121
Ek Şekil 9.	En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %100)....	122
Ek Şekil 10.	En düşük $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %0)	122
Ek Şekil 11.	En düşük $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %100)	123

Ek Şekil 12. En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %0).....	123
Ek Şekil 13. En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %0, ivme 0.5g)	124
Ek Şekil 14. En yüksek $c-\phi$ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %100)....	124
Ek Şekil 15. Örnek parametrelere karşılık gelen deterministik modelleme grafiği	125



TABLÖLER DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Trabzon iline ait 1974-2005 yılları arasındaki aylık meteorolojik veriler	6
Tablo 2.	Trabzon ili 2004-2006 yıllarına ait aylık yağış miktarları (Nacar, 2020)	6
Tablo 3.	Yenilme modeline göre kütle hareketlerinin sınıflandırılması	9
Tablo 4.	Hareket hızlarına göre kütle hareketlerinin sınıflandırılması	9
Tablo 5.	Heyelanların kapladığı alana göre kütle hareketinin sınıflandırılması	10
Tablo 6.	Şev duraylılığı denge analiz yöntemleri (Duncan vd., 2014)	19
Tablo 7.	Kuru ve boşluk suyu basıncına göre Mohr-Coulomb yenilme ölçütü kuvvet dağılımları ve eşitlikleri (Aliyazıcıoğlu vd., 2007)	24
Tablo 8.	Limit denge analiz yöntemlerinin karakteristik özellikleri	26
Tablo 9.	Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki genel farklılıklar	32
Tablo 10.	Sondajlara ait derinlik ve kalınlık bilgileri	45
Tablo 11.	Kaya kalitesi değeri (RQD) sınıflama indeksi (Deere, 1964)	48
Tablo 12.	Sondajlara ait kritik veriler	56
Tablo 13.	Sondajlarda “kalker” ve “toplam” mesafe için RQD değerleri ve kaya kalitesi sınıflandırması	58
Tablo 14.	Örneklerden yerinde yoğunluk tayini	60
Tablo 15.	Doygun-kuru birim hacim ağırlık, gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri	61
Tablo 16.	Tek eksenli basınç dayanım deneyi sonuçları	63
Tablo 17.	Kohezyon, içsel sürtünme açısı, normal ve makaslama gerilmesi değerleri	63
Tablo 18.	Potansiyel yenilme düzlemi ve kil düzlemi özellikleri	67
Tablo 19.	Muhtemel yenilme düzlemine göre güvenlik katsayısı değerleri	82
Tablo 20.	Kil düzlemine göre güvenlik katsayısı değerleri	82
Tablo 21.	Düzlemsel kayma analizinde kullanılan parametreler	85
Tablo 22.	Parametrelerin ve güvenlik katsayılarının gösterimi	95

Ek Tablo 1. Sondajların karot sandıklarındaki ilerleme mesafelerine göre RQD değerleri ve kaya kalite sınıflandırmaları.....	109
Ek Tablo 2. Yoğunluk değerleri	114
Ek Tablo 3. Tüm örneklerle ait doymun-kuru birim hacim ağırlık, gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri.....	115
Ek Tablo 4. Tek eksenli basınç dayanım deneyi sonuçları.....	116
Ek Tablo 5. Kohezyon, içsel sürtünme açısı, normal ve makaslama gerilmesi değerleri	117



SEMBOLLER DİZİNİ

τ	: Makaslama gerilmesi
σ	: Kayma yüzeyine etkiyen normal gerilme
c	: Kohezyon
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
H	: Şev yüksekliği
W	: Kayan kütlenin ağırlığı
M	: görünür kütle
A	: Kayan kütlenin taban alanı
Ψ_f	: Şev eğimi
Ψ_p	: Kayma yüzeyinin eğimi
U	: Kayma yüzeyine etkiyen su basıncı
V	: Gerilme çatlağındaki su basıncı
Z	: Gerilme çatlağının derinliği
Z_w	: Gerilme çatlağındaki su yüksekliği
a_{max}	: Yer ivmesi
T	: Kaya saplaması kuvveti
F	: Güvenlik katsayısı
$\mu(x)$	: Bulanık üyelik fonksiyonu
RQD	: Kaya kalite göstergesi
σ_c	: Tek eksenli basınç dayanımı
$ANFIS$	: Adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi
FIS	: Bulanık çıkarım sistemi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyada ve ülkemizde doğal veya yapay olarak oluşmuş eğimli yüzeylerde sürekli olarak kaymalar (yenilmeler) meydana gelmektedir. Bu yenilmelerin en temel sebebi, kaya veya zemin kütlesi dayanımının yerçekimi kuvvetine yenik düşmesidir. İnsan müdahalesi olmayan ve doğal olarak oluşan kütle kaymalarına heyelan denilmektedir. Heyelanlar, toprak veya kaya kütlelerinin düşme, kayma veya devrilme gibi hareketlerinin sonucu oluşan doğal afetlerdir. Yapısı gereği yüksek dağlık ve dik yamaçlarda gelişmekte ve olduğu bölgede yer alan yapıları ve yaşamı olumsuz etkilemektedir.

Doğal olarak oluşmuş eğimli yüzeylere mühendislik çalışmaları sonucunda yeniden şekil verilmesi sonucu ortaya çıkan şekillere şev denilmektedir. Şev kelime anlamı olarak eğimli yüzey anlamına gelmektedir. Doğal halde bulunan şevlere “yamaç” ya da “doğal şev” denilirken, insan müdahalesi sonucu oluşturulan şevlere “yapay şev” ifadesi kullanılmaktadır. Doğal olarak oluşan eğimli yüzeylere de şev denilse bile, genel kullanımda mühendislik çalışmaları sonucunda ortaya çıkan eğimli yüzeyler için ifade edilmektedir.

Şevler belirli modellerle ortaya çıkarılmış ya da doğal olarak oluşmuş (ya da oluşan) yapılardır. Genellikle madencilik, inşaat ve taşımacılık sektöründe önem arz etmekte olup, dünya üzerindeki doğal yaşamın da sürekliliğinde analiz ihtiyacı doğmuştur. Bu nedenle, şevlerin duraylı (stabil) yapısının korunması ve/veya yenilme sonrası parametrelerin belirlenmesi şevlerin güvenli bir şekilde çalışabilmesinin planlanması için önemlidir.

Klasik mantık, Aristoteles ile başlayan ikili mantık sistemine verilen addır. İkili mantıkta çıkarımlar “evet” veya “hayır”, “1” veya “0” ya da genel anlamıyla “olmak” ya da “olmamak” olarak ifade edilmektedir. Bu yaklaşım zaman içinde gelişerek çok değerli mantık yöntemlerini ortaya çıkarmıştır. Son olarak, bulanık mantık yöntemi geliştirilerek klasik mantığın “1” veya “0” gibi kesin (veya keskin) argümanı “1” ile “0” arasında değişkenlik gösterecek üyelik dereceleri ile aidiyet oluşturulmuştur. Bulanık mantık yöntemi

insanların düşünce süreçlerini taklit eden ve insani düşünce sistemi ile uyumlu olan bir yöntemdir (Zadeh, 1965; Zadeh, 1988; Zadeh, 1996).

Klasik mantık yöntemine göre daha esnek bir yapıda olup, daha az katı (strict) sonuç verme eğilimindedir. Bulanık mantık yöntemi ile birçok alanda karar verme süreçlerinde daha doğru sonuçlara ulaşılmıştır. Birçok alanda ortaya çıkan belirsizliklerin analizinde ve yorumlanmasında çok daha uygun olduğu ortaya çıkmaktadır.

Şevlerde belirsizlikler malzemelerin şev mukavemetine ilişkin belirsizlikler olarak öne çıkmaktadır. Bunlar genellikle malzemenin yapısı, geometrisi ve koşullarıyla ilgilidir. Malzeme örneğinin boyutları, şekli ve yüzey dokusu gibi özellikleri ile malzeme örneğinin test edildiği koşullar belirsizlikleri etkileyebilecek düzeydedir. Ayrıca, malzeme örneğinin sıcaklığı, nem oranı ve yükleme hızı gibi faktörler de belirsizlik ortaya çıkaran etkenler olabilmektedir.

Bulanık mantık yöntemi birçok alanda kullanıldığı gibi, şevler gibi belirsizlik içeren çalışmalarda da daha kullanışlı olduğuna dair örnekler mevcuttur. Şev duraylılığı değerlendirmelerinde şevin özellikleri ve koşullar hakkında kesin (keskin veya net) bir cevap verilememektedir. Bu nedenle, bu özellikler ve koşulları değerlendirilirken bulanık mantık yöntemi ile şevin duraylılığı belirli bir değer aralığında ifade edilebilmektedir.

Çalışma kapsamında, örnek çalışma yeri olarak, daha önce 3 farklı düzlemsel kaymaya maruz kalmış Aşkale Çimento Fabrikası'na hammadde sağlamış bir ocak seçilmiştir. Bu ocakta 2005-2007 yılları arasında 3 ayrı düzlemsel kayma meydana gelmiştir. Bu çalışma kapsamında, düzlemsel kaymanın gerçekleştiği sahada daha önce yapılmış çalışmalar ile kayma sonrası ocakta yapılan 5 ayrı sondaj verisi değerlendirilmiştir. Ocakta yerinde yapılan incelemeler ve sondaj verileri değerlendirilerek muhtemel yenilme düzlemine dair çıkarımlar yapılmıştır. 3 boyutlu modelleme ile fiziksel ve mekanik deneyler sonucu elde edilen veriler ışığında bulanık mantık modeli kurulmuştur. İlgili ocakta daha önce deterministik ve olasılıksal olarak çok sayıda değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmada bunlardan ayrı olarak bulanık mantık yönteminin etkinliğine ve ne derece uygulanabilir olduğuna detaylıca değinilmiştir.

1.2. Amaç ve Kapsam

Türkiye ekonomisine önemli katkılar sağlayan Aşkale Çimento Fabrikası'nın Araklı ilçesi Taşönü köyünde bulunan hammadde ocağında 3 ayrı düzlemsel kayma meydana gelmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalarda bu düzlemsel kaymaların bölgedeki aşırı yağışlar, düzensiz basamak patlatmaları ve üretim çalışmaları ile oluştuğu ifade edilmiştir (Ceryan vd., 2009; Erçikdi vd., 2006; Kesimal ve Erçikdi, 2012). Aşırı yağışlar ile uygun olmayan çalışma şartları sonucunda oluşan kayma bir kil dolgu tabakası üzerinde gerçekleşmiştir.

Düzlemsel kayma sonrası ocakta patlatma analizinden kil özelliklerine, düzlemsel kayma analizinden geriye dönük analize kadar çok sayıda analitik ve olasılıksal çözümler içeren çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara bu tezin “Önceki Çalışmalar” bölümünde değinilecektir. Literatürde bulanık mantık yönteminin düzlemsel kayma yönteminde irdelenmesine değinildiğine dair çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca, çalışma alanında daha önce düzlemsel kaymanın olmuş olması ve yenilmeye yönelik çalışmaların varlığı, tez kapsamında ortaya konacak bulanık mantık kapsamlı analizin doğrulamasının yapılabilmesine imkan sağlayacaktır. Bu açıdan bakıldığında, düzlemsel kaymada bulanık mantık sistemi hem literatüre katkı sağlayacağı hem de hali hazırda yenilme gerçekleşmiş ocakta sonuçlar doğrulanabileceği için önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ile, kayma sonrası ocaktan alınan ve laboratuvarından elde edilen verilerden ayrı olarak, düzlemsel kaymanın gerçekleştiği bölgenin arkasında kalan yerde 5 ayrı noktada toplam 193 metre derinliğindeki sondaj verileri irdelenmiştir. Deneysel çalışmalarla elde edilen veriler, daha önceki çalışmalarda ortaya çıkan verilerle değerlendirilerek analiz edilmiştir. Sonrasında, şevlerin duraylılığının bulanık mantık yöntemiyle analizine değinilmiştir. Şevlerin stabilitesini etkileyen faktörlerde bazı belirsizlikler bulunduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir (Brawner, 1977; Büyükkagıncı, 2019; Duncan vd., 2014; Özgenoğlu, 1986). Bu belirsizliklerin analizi ve belirsizlikleri gidermek amacıyla, bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, bulanık mantık yönteminin şevlerin stabilitesinde nasıl analiz edileceği ve sonuçların nasıl değerlendirileceğine, daha önce düzlemsel yenilmeye maruz kalmış Taşönü kalker (kireçtaşı) ocağından alınan veriler eşliğinde değinilmiştir.

Öncelikli olarak geri planda yapılan deneme-yanılma-doğrulama analizlerinde etkili parametreler olarak içsel sürtünme açısı, kohezyon ve birim hacim ağırlık belirlenmiştir. Dolayısıyla diğer parametreler sabit olarak alınmıştır. Aynı zamanda, bu üç parametrenin laboratuvarda pratik olarak belirlenebilmesi modelin pratikliğini ortaya koymaktadır. Buna ilave olarak, su içeriği ve patlatma ivmesi değişimi de yeni bir modele dahil edilerek bulanık sistem ile yenilme analizlerine dair karşılaştırmalar ortaya konulmuştur.

İlk olarak uygulanan modelde farklı üyelik fonksiyonları ile sonucun değişkenliği gözlemlenmiştir. Kural tabanını belirlemede ise analitik çözümlerden yola çıkarak uzman görüşü oluşturulmuştur. Sonrasında bulanık modelin deneme-yanılma değerleri ile çözümünde; birim hacim ağırlığı değişkeninin sonucu çok az bir oranda değiştirdiği anlaşılmıştır. Bulanık modelde birim hacim ağırlık değişkeni sabit kabul edilerek, su içeriği değişkeni eklenmiştir. İlk kurulan modelde farklı üyelik fonksiyon sonuçlarının kıyaslanması ile sonuçların benzerlik gösterdiği anlaşıldığından, ikinci modelde sadece yamuk üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca, ikinci modelin uzman görüşüne dayalı kural tabanını oluşturmak için RocPlane programından yararlanılmıştır. RocPlane programında olası bütün senaryolar çözülerek uzman görüşü oluşturulmuştur.

Çalışmada bulanık mantık yönteminin şev duraylılığı analizinde yapılan öncü bir çalışma olması yanında, indirgenen parametreler laboratuvarda kolaylıkla elde edilebilecek parametrelerdir. Ayrıca, bulanık mantık sisteminin uygulanmasına dair açık ve detaylı bir çalışma olarak görülmektedir. Bunun yanında, bulanık mantık sisteminin uygulanmasında en zor olan uzman görüşüne dayalı kural tabanının analitik çözüm sonuçları ile kurulabileceğinin açıklanması ile ayrı bir problem de açığa kavuşturulduğu düşünülmektedir. Ocakta daha önce büyük çaplı bir yenilmenin olmuş olması da bu çalışmanın sonucunda yenilme oluşacağı çıkarımı ile uyusmaktadır.

Özet olarak çalışmanın bulanık mantık ile şev duraylılığı analizine yönelik ilk çalışma olması, uzman görüşünün kişisel çıkarıma dayalı olmasının ortadan kaldırılması, bulanık mantık yöntemine dair uygulamalı ve kapsamlı bir çözüm sunması ile mümkün olan en az ve kolaylıkla elde edilebilen parametreler ile uygulanması yönünden özgün olduğu ve literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir.

1.3. Çalışma Alanı

1.3.1. Coğrafi Konumu

Çalışma alanı, Trabzon ili Araklı İlçesi'nin yaklaşık 5 km güney batısında ve Yanbolu deresi doğu yönünde kalmaktadır. Deniz seviyesinden ortalama 170 metre yüksekliktedir. Trabzon ilini Araklı ilçesine bağlayan sahil yolundan güneybatı yönünde yaklaşık 5 km içeride asfalt yol ile Taşönü köyüne ulaşılabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma sahası yer bulduru haritası (Aliyazıcıoğlu vd., 2015)

1.3.2. İklim ve Yağış Bilgisi

Taşönü köyü sahil şeridine yakın olduğu için, Doğu Karadeniz Bölgesi kıyı şeridinin iklim özelliklerini göstermektedir. Yöre yazlar genel olarak sıcak ve kışlar ılık olarak geçen, her mevsim yağış alabilen bir özelliktedir. (Ceryan, 2009) yaptığı tez çalışmasındaki 1975 –

2005 yılları arasındaki meteorolojik verilere göre, yıllık ortalama 15⁰C sıcaklık olduğu ve yağış miktarının 830 mm ye kadar ulaştığı görülmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Trabzon iline ait 1974-2005 yılları arasındaki aylık meteorolojik veriler

Aylar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık (Ort)
Ort. Sıcaklık °C	7.3	6.9	8.4	11.9	15.7	20.2	23.1	23.1	20	16.2	12.3	9.2	14.5
Yağış	77.5	65.7	58.6	59.5	52.9	55.1	37.3	49	75.3	116.5	96.2	86	830
Buhar.(mm)	35.9	37.7	51.2	63.3	80.6	105.5	116.5	107.8	82.5	60.3	46.2	41	829
Bağıl Nem (%)	66	67	70	74	76	74	74	74	73	72	68	65	71
Hakim Rüzgar Y.	G	G	G	KD	KD	G	G	G	G	G	G	G	G
	GB	GB	GB			GB	GB	GB	GB	GB	GB	GB	GB

Ayrıca düzlemsel yenilmenin olduğu yıllara (2005-2006) ayrı ayrı bakıldığında, 3 Ekim 2005 yılında ilk olarak meydana gelen düzlemsel yenilmenin, Ekim ayındaki aşırı yağıştan tetiklendiği ya da ilk yenilme tarihinde Trabzon ilinde geriye dönük aylara oranla çok fazla yağış düşmesinin önemli bir etken olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 2).

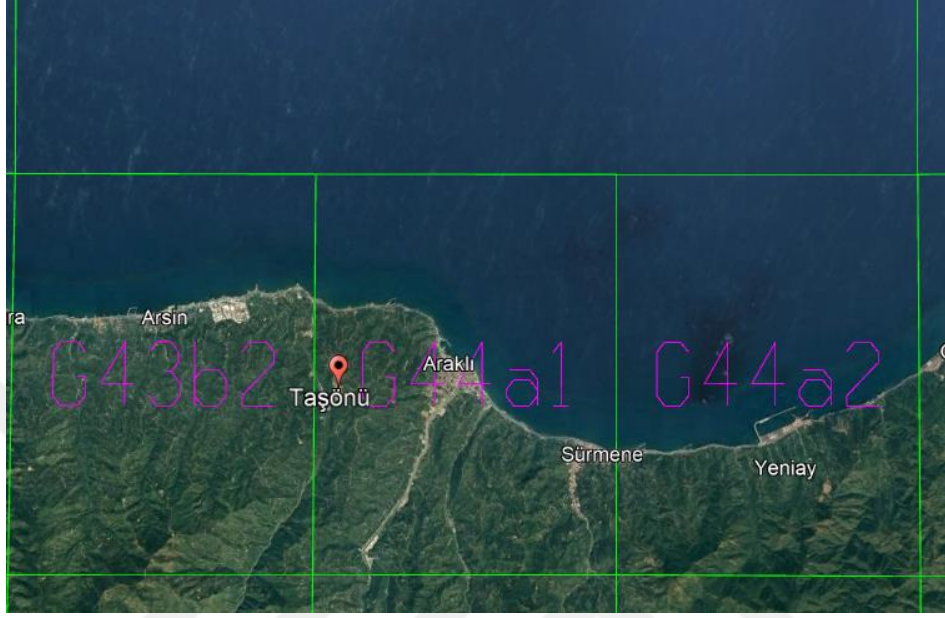
Tablo 2. Trabzon ili 2004-2006 yıllarına ait aylık yağış miktarları (Nacar, 2020)

Yıllar	2004			2005			2006		
	Toplam Yağış	Ortalama Sıcaklık	Buhar.	Toplam Yağış	Ortalama Sıcaklık	Buhar.	Toplam Yağış	Ortalama Sıcaklık	Buhar.
Ocak	64.9	8.2	17.71	53.2	9.2	21.19	108.6	5.5	9.50
Subat	76.2	7.2	14.31	38.8	8.4	18.19	81.2	6.4	11.91
Mart	83.5	9.3	26.52	71.8	7.6	19.36	32.7	10.2	30.63
Nisan	79.4	12.3	44.43	63.8	12.6	46.13	107.3	11.4	39.47
Mayıs	74.8	15.5	71.53	53.9	16.2	76.63	71.8	15.2	69.38
Haziran	94.7	19.8	105.26	36.4	20	106.92	34.7	21.1	116.23
Temmuz	28.1	22.5	130.72	31	24.1	145.50	24.5	22.4	129.82
Agustos	30.2	23.8	133.50	127.4	24.6	140.56	3.1	26.1	154.15
Eylul	31.1	20.4	91.66	40.9	21.2	97.32	76.9	21.1	96.61
Ekim	66.1	17.4	65.51	204	15.5	54.70	141.6	17.4	65.51
Kasım	134.7	12.5	33.97	81	12.7	34.82	131.6	10.9	27.44
Aralık	199	8.2	17.22	66.2	10.2	24.20	119.9	6.6	12.28

1.3.3. Jeolojisi

Çalışma alanı, Trabzon ilinden 40 km doğu yönünde, Araklı ilçesinden 5 km güney batı yönünde, deniz seviyesinden ortalama 170 metre yükseklikte ve Kaymaz mahallesine

1.5 km uzaklıkta bulunmaktadır. Türkiye pafta bölümlemesi sisteminde, Araklı Taşönü çalışma sahası G44a1 nolu pafta bölümüne denk gelmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Araklı ilçesi Taşönü köyü pafta bölümlemesi (G44-a1)

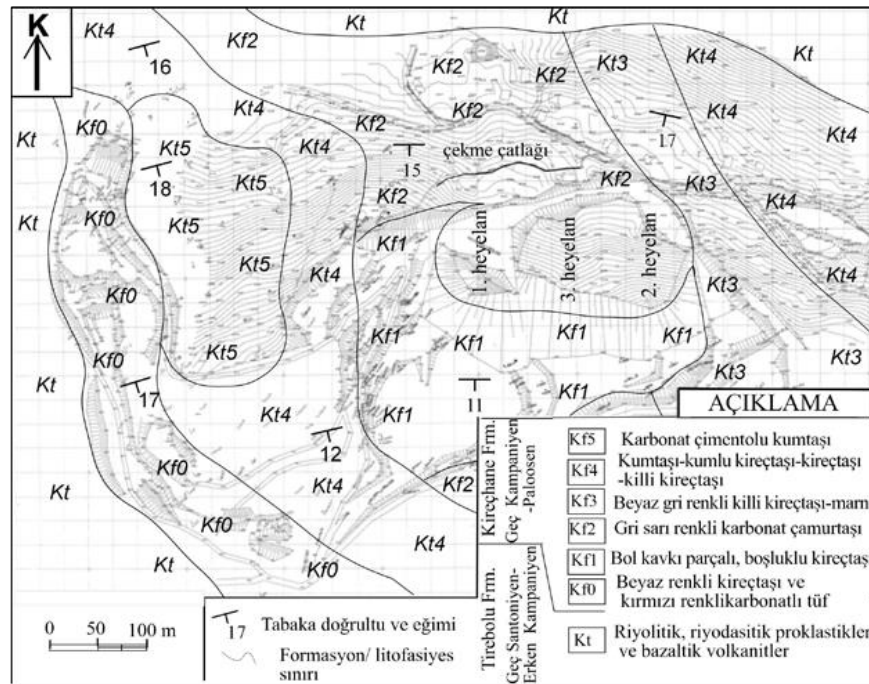
Doğu Karadeniz Bölgesi Doğu Pontid tektonik zonuna bağlı, Jura-Pliyosen zaman aralığında gelişmiş Pontid-Elbruz yayının bir parçasıdır (Dixon ve Pereira, 1974). Hamamcıoğlu ve Sawa (1971) çalışmasında Doğu Karadeniz Bölgesinin Kaledoniyen, Hersiniyen ve Alpin orojenilerinin etkisinde kaldığını ifade etmiştir. Bölgede Alpin yaşlı volkanizma Jurada başlamakta ve Üst-Kretase-Eosen zamanlarında yaygın bir şekil almaktadır (Yıldız, 1983). Şengör ve Yılmaz (1983)'a göre Alt Kretase başında Kuzey Anadolu Tetis kabuğu Pontidlerin altına dalmaya başlamıştır. Bu dalma sonucu Üst Kretase oluşmuştur.

Karadeniz Bölgesinin genel jeolojik yapısı üst krease volkanik fasiyesi, andezitik ve bazaltik lavlar ile volkanik tüf ve aglomeradan oluşan kalın bir örtü şeklindedir. Jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru paleozoyik yaşlı metamorfikler ve granitler; kumtaşı , marn ve spilit örtülü Kura (Kiyas) konglomeraları; üst Jura-Alt Kretase yaşlı spilitik bazalt, andezit, lav, aglomera ve piroklastlarından oluşan alt bazik seri; senoniyen yaşlı dasit, riyodasit lav, aglomera ve piroklastlarından oluşan alt dasitik seri; senoniyen-Eosen yaşlı bazalt-andezit lav ve siller ile piroklastlarından oluşan üst bazik seri; tersiyes yaşlı granitik

kayaçlar ile bazalt, andezitik breşler ve volkanik çakıltaşları ile marn ve kalkerden oluşan genç vakanizma şeklinde sıralanmaktadır (Schultze-Westrum, 1961) (Yıldız, 1983).

Iğdır (1971), çalışma sahasını da içine alan bölgede çok evreli volkanizmanın hakim olduğunu ifade etmiştir. Çınar (1977) çalışmasında Araklı ilçesini en altta bazalt; üstünde kireçtaşı, kumtaşı, marn, bazik tüf ve breş ardalanması olarak ayırmıştır (Odacı, 2013). Bunu kaplayan bazalt ve dasit ile dasidik tüf-breş ve en üstte kireçtaşı olarak tanımlamıştır. Tunoğlu (2001) Araklı ilçesinde yaptığı çalışmasında, stratigrafi kesitinde saptanan ostrakod fauna topluluğu ile Orta-Genç Ponsiyen yaşı karakterize eden farklı Tyrrhenocythere türü tanımlamıştır.

Sahada daha önce yapılan çalışmalara göre Erguvanlı (1975) raporunda sahanın genellikle marn, marnlı kalker ile kalker ve travertenden oluştuğunu ifade etmiştir. Ayrıca, bazı bölgelerde karstik boşlukların olduğu ifade edilmiş ve civarda önceleri galeri açılarak manganez üretildiği ifade edilmiştir (Erçikdi vd., 2004; Erçikdi vd., 2006). Çalışma alanında Geç Santoniyen-Erken Kampaniyen riyolitik ile riyodasitik piroklastikler ile bazaltik volanitleri içeren Tirebolu formasyonu hakimdir. Bu formasyon üzerinde Geç Kampaniyen-Paleosen yaşlı Kireçhane formasyonu olduğu ifade edilmiştir (Ceryan vd., 2009) (Şekil 3).



Şekil 3. Araklı – Taşönü kalker ocağının jeolojik haritası (Ceryan, 2009)

1.4. Kütle Hareketleri

Kütle hareketi jeomorfolojik bir terim olmakla birlikte (Conforth, 2005), yer üstündeki her türlü kaya ve zemin hareketi (akma, kayma, heyelan, taş düşmesi vs) olarak ifade edilmektedir (Tarhan, 1996). Bazı çalışmalarda bütün duraysızlıklar kütle hareketi olarak tanımlanırken (Tarhan, 1996), bazılarında ise heyelan olarak kabul görmüştür (Önalp, 1983) (Sekercioglu, 1993). Kütle hareketlerinde, yenilme modeline göre (Tablo 3) ve hareket hızlarına göre (Tablo 4) yapılan sınıflandırma sistemi (Varnes, 1978) halen kabul gören sınıflandırma sistemlerinden biridir.

Tablo 3. Yenilme modeline göre kütle hareketlerinin sınıflandırılması

Duraysızlık Türü			Malzemenin Türü	
			Kaya	Zemin
Kayma	Düşme		Kaya düşmesi	İri Taneli Moloz düşmesi
	Devrilme		Kaya devrilmesi	İnce Taneli Zemin devrilmesi
	Dairesel	Az sayıda birim	Kayada daireysel kayma	Molozda daireysel kayma
	Ötelenmeli	Çok sayıda birim	Kayada blok türü ötelenme	Zeminde blok türü ötelenme
	Yanal Yayılma		Kaya yayılması	Moloz yayılması
	Akma		Kaya akması	Zemin yayılması
	Karmaşık Kaymalar		Yukarıda belirtilen duraysızlık türlerinden iki veya daha fazlasının birleşmesiyle oluşan kaymalar	

Tablo 4. Hareket hızlarına göre kütle hareketlerinin sınıflandırılması

Duraysızlık Hızı	Sınıflama
>3,0 m/s	Aşırı hızlı
3,0 m/s – 0,3 m/dak	Çok hızlı
0,3 m/dak – 1,5 m/gün	Hızlı
1,5 m/gün – 1,5 m/ay	Orta hızlı
1,5 m/ay – 1,5 m/yıl	Yavaş
1,5 m/yıl – 0,06 m/yıl	Çok yavaş
<0,06 m/yıl	Aşırı yavaş

Ayrıca, literatürde kütle hareketlerinin ya da heyelanların kapladığı alan büyüklüğüne göre sınıflandırılma da yapılmıştır (Cornforth, 2005) (Tablo 5).

Tablo 5. Heyelanların kapladığı alana göre kütle hareketinin sınıflandırılması

Alan (m ²)	Sınıflama
<200	Çok küçük
200 – 2.000	Küçük
2.000 – 20.000	Orta
20.000 – 200.000	Büyük
200.000 – 2.000.000	Çok büyük
>2.000.000	Aşırı büyük

1.5. Şev Duraylılığı

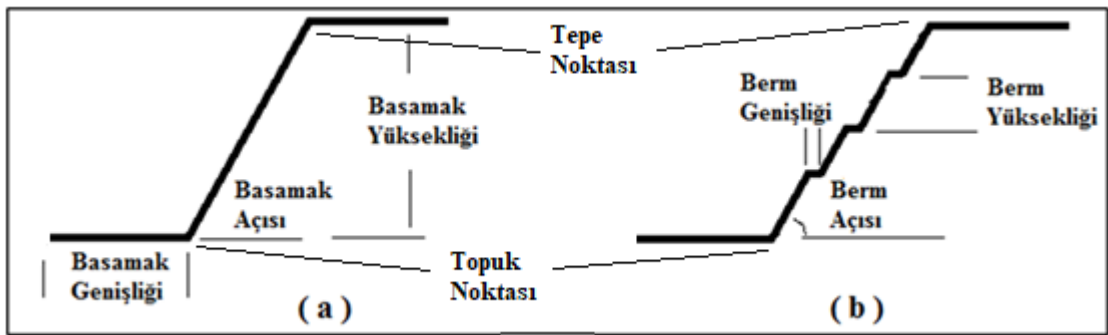
Doğal olarak veya mühendislik çalışmaları sonucu oluşan eğimli yüzeylere şev denilmektedir. Herhangi bir kaya veya zemin kütlelerinin bulunduğu mevcut konumu koruması kütlelerin duraylı (stabil) olması olarak ifade edilirken, duraylılığını (stabilitesini) kaybetmesi durumuna duraysızlık denilmektedir. Kaya veya zemin kütlelerinin yerçekimi ya da dış yükler altında duraylılığını kaybetmesine şev duraysızlığı denilirken, bu yenilme hareketlerini engelleyici ya da bu durumlara dair yapılan çalışmalara şev duraylılığı analizi denilmektedir (Büyükkıncı, 2019).

Şev duraylılık analizleri zeminlerde ve kayalarda statik ve dinamik koşullar göz önünde bulundurularak mekanik analizler bir bütün olarak ele alınmaktadır. Çoğu mühendislik çalışmalarında, doğal olarak duraylı olan eğimli yüzeyler (şevler) kazı sonucunda duraysız hale gelmektedir. Şev stabilitesi çalışmalarının yaklaşık 100 yıllık bir geçmişi olduğu ifade edilmektedir. 1916 yılında, kildeki stabilite problemlerinin analizinde dairesel kayma yüzeyleri analizi kullanılmıştır (Pettersen, 1955). İsveçlilerin demiryolları ve rıhtım inşaatı yapımında karşılaştıkları problemleri çözmek için geliştirdikleri şev çalışmaları ilkler arasında gösterilmektedir. İsveç demiryolları tarafından görevlendirilen Geoteknik Komisyonu, büyük ve maliyetli şev yenilmelerinin incelemesi sonrasında İsveç Kayma Dairesi yöntemini geliştirmiştir (Fellenius, 1940). Sonrasında yapılan analizler ile zemin ve kaya davranışları yerüstü yüzey koşulları, süreksizlik durumları ve yeraltı su seviyesini de değerlendiren genelleştirilmiş çalışmalara dönüştürülmüştür. Bu bağlamda geliştirilen zemin ve kaya kütle hareketleri analiz yöntemleri günümüzde halen geçerliliğini korumaktadır.

Mühendislik uygulamalarından olan açık ocak madenciliğinde kazı uygulamaları ile oluşturulan şevlerin (ya da basamakların) duraylılığı büyük önem teşkil etmektedir. Planlamadan üretime birçok aşamada ortaya çıkan teknolojik gelişmeler ile hammadde ihtiyacı hızla artmakta ve bunun sonucunda madencilik faaliyetlerinde daha da derinlere inilmesi zaruri olmuştur. Fakat açık ocak madenciliğinde derinlere inildikçe duraylılık azalarak çalışma ortamının güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu nedenle, açık ocak madenciliğinde en ideal basamak yüksekliği ve açısı ile nihai durumda ortaya çıkacak olan genel şev açısının güvenli tarafta kalacak şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Şev duraylılığındaki belirsizlikleri gidermek adına, bu parametrelere yönelik çalışmalar yönetmeliklerle belirlenmişse de, yeni yaklaşımlar geliştirilmeye devam etmektedir (Aliyazıcıoğlu vd., 2017).

1.5.1. Açık Ocak Madenciliği Şev Terimleri

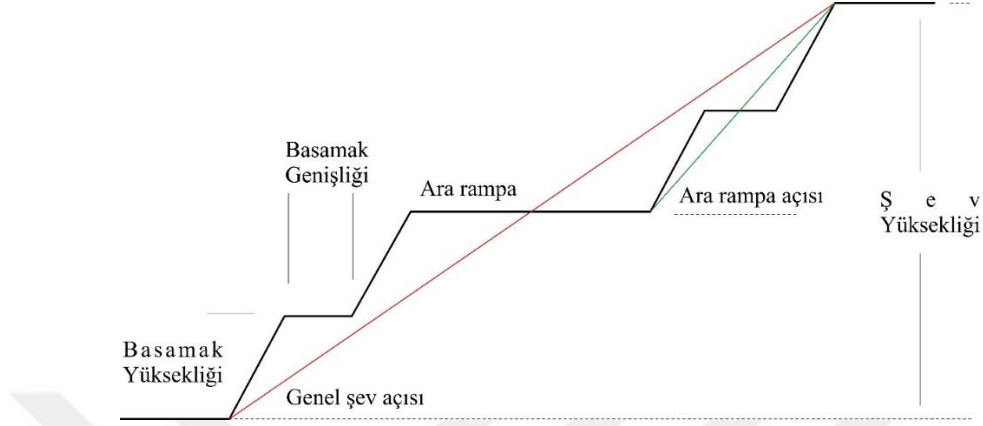
Açık ocak madenciliğinde üretim basamak modelleri oluşturarak gelişmektedir. Basamak modelleri oluşturulurken sadece çalışma ortamının uygunluğu (ekipman yüksekliği, patlatma delik derinliği vs) değil, kaya yapısının dayanımının da dikkate alınması gerekmektedir. Basamak tasarımında 3 önemli parametre ortaya çıkmaktadır. Bunlar basamak yüksekliği, basamak genişliği ve basamak açısıdır (Şekil 4).



Şekil 4. Açık ocak basamak tasarım parametrelerinin gösterimi (a) tek basamak (b) çoklu basamak tasarımı

Basamak açık ocak madenciliğinde tekil ve en küçük şev geometrisine verilen addır. Berm ise çoklu basamakların bir araya gelmesi sonucu, dayanımı artırmak için belirli aralıklarla bırakılan yatay genişliklere denilmektedir. Çoklu basamak tasarımında ise genel

şev açısı önem arz etmektedir. Nihai ocak geometrisinin duraylı olup olmadığını belirleyen önemli parametrelerden biridir (Şekil 5).

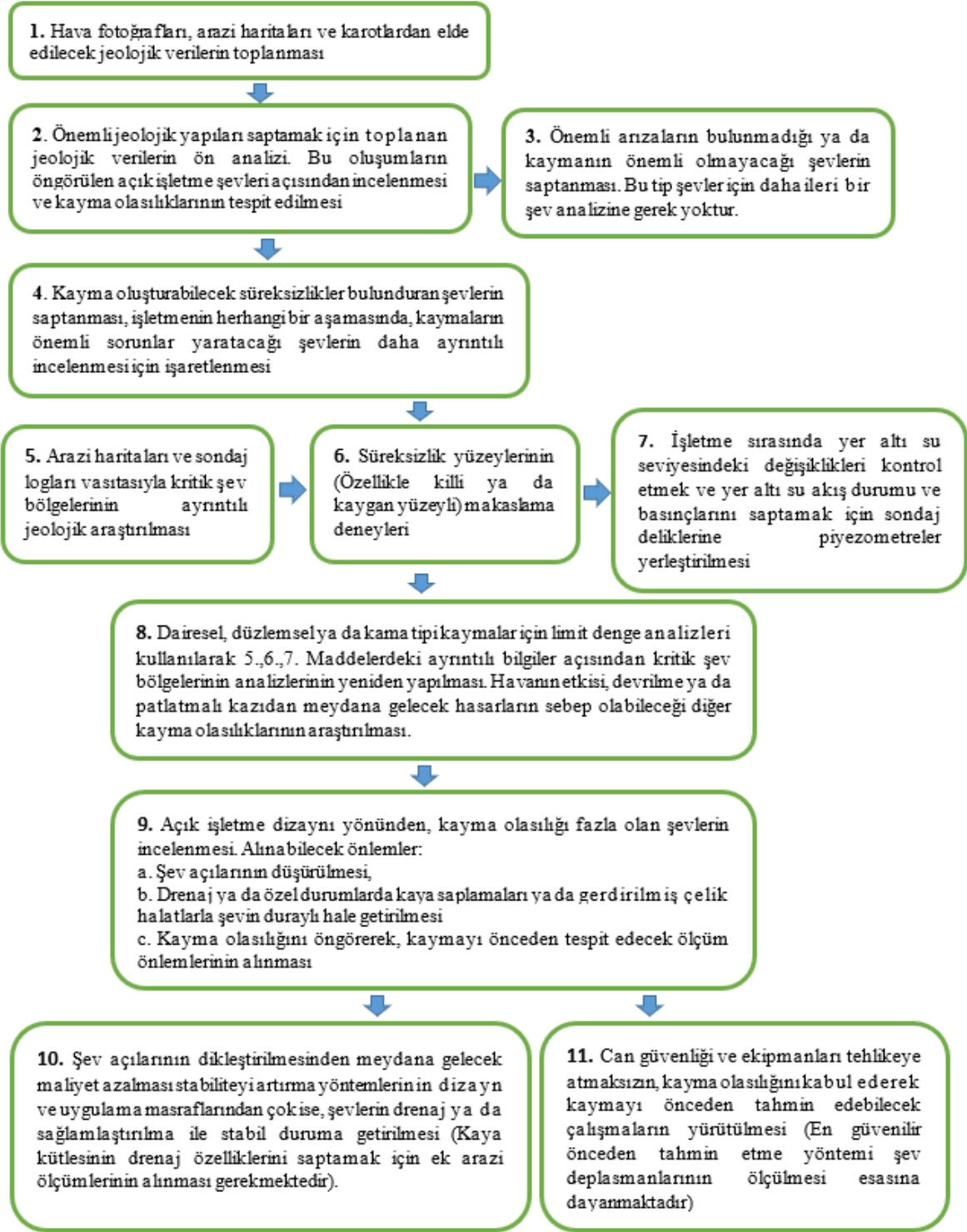


Şekil 5. Şev geometrisinin kesit görünümü

Çoklu basamak tasarımında genel şev açısının belirlenmesinde, en alttaki basamağın topuk noktasından, en üstteki basamağın tepe noktasına çizilen doğrunun eğimi ölçülmelidir. Eğim, eğik düzlemlerin yatayla yaptığı açıya denilmektedir.

1.5.2. Şev Duraylılık Analizi Planlaması

Şev duraylılığının analizi ve problemlerin çözümüne yönelik geliştirilen mantıksal şema jeolojik verilerin toplanmasından başlayıp duraylı şev tasarımı ortaya çıkarmaya kadar süren çok aşamalı bir planlamadır (Şekil 6).



Şekil 6. Şev duraylılık analizlerinde izlenecek mantıksal yol (Hoek ve Bray, 1981)

1.5.3. Şev Duraylılığını Etkileyen Faktörler

Genel prensip olarak, kaya ve zemin yapılarında kaymayı etkileyen en önemli faktör yerçekimidir. Yerçekimi etkisiyle duraylı kalma koşulunu sağlayamayan yapılan duraysız duruma geçmektedir. Açık ocak madenciliği çalışmalarında, kazı sonucu şev yüksekliğinin ve eğiminin artması, özellikle şevlerin topuk bölgesinde yapılan kazılar, yüzey suları tarafından topuk bölgesinin aşınması, süreksizlik çatlaklarının suyla dolup donma sonucu sürekli süreksizlik genişliğini artırması, şev üzerindeki yükün artırılması, basamak patlatmaları ve depremler gibi dış etkenler ile boşluk suyu basıncının artması, malzemenin kohezyonunun zamanla azalması gibi nedenlerle şevler duraysız hale geçebilmektedir. Bu durumda, güvenli şevler oluşturabilmek ve/veya duraysızlık sebeplerini ortaya çıkarabilmek için geometrik tasarımdan mekanik özelliklere, analitik çözümlerden deneysel modellemelere birçok farklı çalışma yöntemleri oluşturulmaktadır.

1.5.4. Şev Yenilme Mekanizmasına Genel Bakış

Doğal olarak veya mühendislik çalışmaları sonucunda oluşmuş eğimli yüzeylerin yükseklik farkı oluşturduğu bir gerçektir. Yerçekimi kuvveti nedeniyle eğim farklılıkları sığır indirgenmeye ve düz bir yüzey oluşturarak tam dengede bir yüzey oluşturma eğilimindedir. Fakat zemin veya kaya kütlelerinin bütünsel yapıda ve belirli dereceye kadar yerçekimine karşı koyabilme kabiliyeti bu eğilime karşı durabilmektedir. Bu karşı durma temel fizik bilgisinden de bilindiği üzere kütleler üzerinde potansiyel enerji oluşturmaktadır. Kaya kütlelerinin bünyesindeki veya süreksizlik, fay veya gerilme çatlakları gibi zayıflıklar kütle içinde parçalanmalara sebep olmaktadır. Bu kütleler yerçekimi kuvvetine karşı koyamadığı zaman yenilmeler meydana gelmektedir (Aliyazıcıoğlu vd., 2017).

Yenilme mekanizması en genel anlamda, kaya kütlelerinin potansiyel enerjisini oluşturan kütlelerinin oluşturduğu kayma eğiliminden meydana gelmektedir. Bunun dışında zayıf olan kayma yüzeyinin geometrisi, ivmelenme ile yeraltı suyu koşulları da etkilidir. Ayrıca, kaymaya karşı durmaya çalışan sürtünme kuvveti, kütlelerin kayma yüzeyine dik etkiyen bileşen kuvveti ile kohezyon da duraylılığı artırıcı yönde çalışmaktadır. En basit haliyle bu kaymaya karşı koyan kuvvetlerin kaymayı tetikleyen kuvvetlerden fazla olduğu durumlarda kütlelerin duraylı olması söz konusudur.

1.5.5. Şev Yenilme Türleri

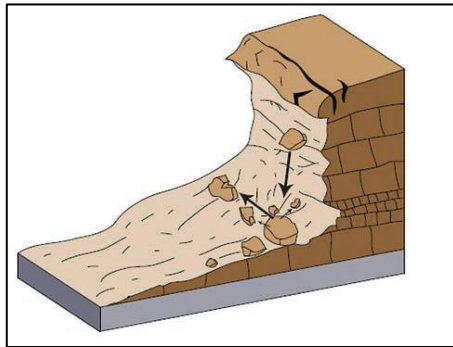
Genel olarak sürekli ve süreksiz ortam hesaplamalarında zemin ve kaya mekaniği hesaplamaları birbirinden ayrılmaktadır. Zeminlerde ortam koşulları kütlenin tamamında sürekli kabul edilirken, kayalarda süreksizlikler ortam koşullarını değiştirdiğinden süreksiz olarak kabul edilmektedir. Zayıf kaya malzemelerinde ise sürekli-süreksiz ortam davranışları geçerli olabilmektedir. Farklı şev yenilme türleri Şekil 7’de verilmektedir.



Şekil 7. Şev yenilme türlerinin sınıflandırılması (Eskikaya vd., 2005)

1.5.5.1. Düşme Türü Yenilmeler

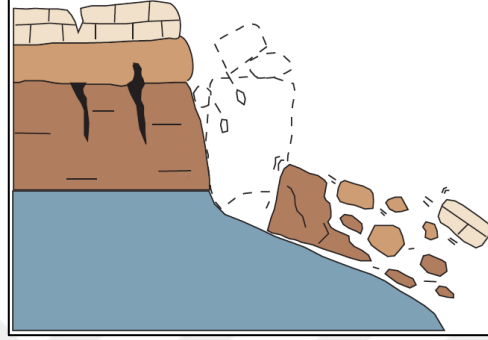
Doğal olarak ya da yapay yapılmış kazılarda, zemin/kaya kütlelerinin yerçekimi etkisiyle düşmesine denilmektedir (Şekil 8). Makaslama gerilmesine maruz kalmadan sadece yerçekimi etkisiyle oluşabilen bu yenilmeler; kaya, moloz ya da zemin düşmesi olarak tanımlanmaktadır (Highland ve Bobrowsky, 2008).



Şekil 8. Düşme türü yenilmelerin oluşum diyagramı (Highland ve Bobrowsky, 2008)

1.5.5.2. Devrilme Türü Yenilmeler

Bükülme, bloklu veya bloklu-bükülme yenilmeleri olarak tanımlanan bu tür yenilmelerde, eğim yönüne ters yönde olan şevlerdeki süreksizliklerin oluşturduğu kaya bloklarının devrilmesi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 9).



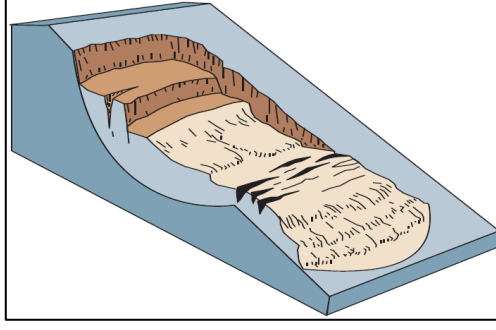
Şekil 9. Devrilme türü yenilmelerin oluşum diyagramı (Highland ve Bobrowsky, 2008)

1.5.5.3. Kayma Türü Yenilmeler

Makaslama gerilmesinin aşılmasıyla ortaya çıkan bir veya birden çok yüzey üzerinde gelişen yenilmelere denilmektedir. Eğimli bir yüzey üzerinde gerçekleşmesi sonucu dairesel kayma, bir düzlem üzerinde oluşması durumunda düzlemsel kayma, birden fazla düzlemin kesişmesi sonucu oluşması kama tipi kayma, birden fazla durumun aynı anda gerçekleşmesi durumunda çok yüzeyli (birleşik) kayma olarak ifade edilmektedir.

1.5.5.3.1. Dairesel Yenilmeler

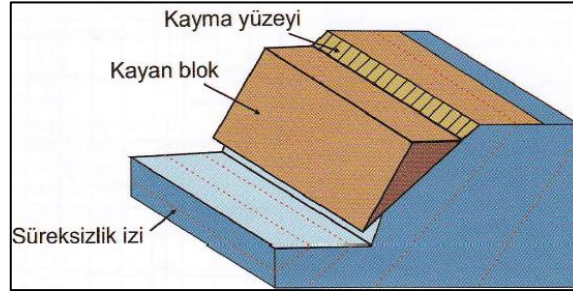
Eğimli bir yüzey üzerinde, genellikle kaşık şekline benzetilen, bir merkez noktaya göre kayma gerçekleştiren yenilme türüne denilmektedir (Şekil 10). Hareket yönüne göre dış bükey kayma gerçekleşmektedir.



Şekil 10. Dairesel yenilmelerin oluşum diyagramı (Highland ve Bobrowsky, 2008)

1.5.5.3.2. Düzlemsel Yenilmeler

Düzlemsel yenilme, makaslama gerilmesinin yenilmesi ile bir süreksizlik düzlemi boyunca yerçekimi etkisiyle kütlenin hareketine denilmektedir. Genellikle bir süreksizlik düzleminde blok şeklinde kayma olarak gerçekleşmektedir. Süreksizlik düzleminin makaslama gerilmesine göre kayan kütlenin makaslama gerilmesi çok daha fazla olduğundan, kayan kütle hareket halinde çok fazla deformasyona maruz kalmadan yapısını koruyabilmektedir (Şekil 11).



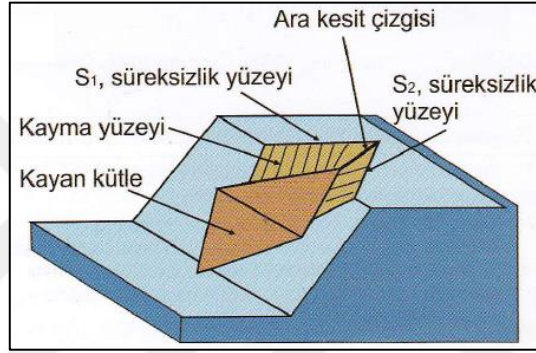
Şekil 11. Düzlemsel yenilmelerin oluşum diyagramı (Highland ve Bobrowsky, 2008)

Düzlemsel kaymanın gerçekleşebilmesi için kabul göre geometrik koşullar; yenilme düzleminin doğrultusunun şev yüzeyine paralel ya da paralele yakın ($\pm 20^\circ$) olması, yenilme düzleminin eğiminin şev yüzeyinin eğiminden düşük olması ve şev yüzeyini kesmesi (şev yüzeyinin arkasında ve yüzeyin altına doğru ise kayma gerçekleşmez) ve kayma yüzeyinin eğiminin kütlenin içsel sürtünme açısından büyük olması gerekmektedir (Hoek ve Bray, 1981; Piteau ve Martin, 1982). Aksi durumlarda düzlemsel yenilme gerçekleşmesi için

gerekli koşullar oluşmamış ya da yenilme olması durumunda düzlemsel yenilme olarak sınıflandırılmaması gerektiği anlaşılmaktadır.

1.5.5.3.3. Kama Tipi Yenilmeler

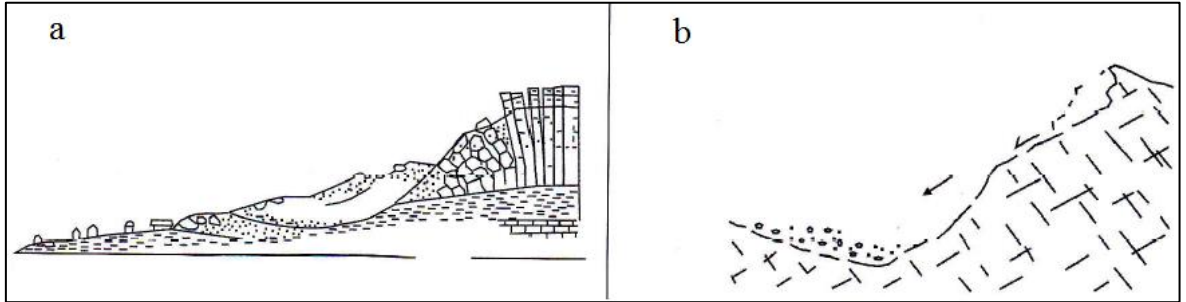
Genellikle şev tepesinde tetrahedral yapıda ya da eğimli yüzeylerde üçgen prizma şeklinde, iki ayrı süreksizlik düzleminin kesişmesi ile ortaya çıkan ve kesişim alanı içindeki kütlenin kayması şeklinde gerçekleşen yenilmelere denilmektedir (Şekil 12).



Şekil 12. Kama tipi yenilmenin oluşum diyagramı (Akbulut, 2012)

1.5.5.3.4. Çok Yüzeyli (Birleşik) Yenilmeler

Birden fazla kayma geometrisinin bir arada olması durumunda, kayma yüzeyinin tepe kısmı ile alt kısımları arasındaki farklı yenilme geometrilerinin birleşmesi ile oluşmaktadır (Şekil 13).



Şekil 13. Birleşik yenilmeler: (a) çökme-devrilme (b) kama tipi – kaya düşmesi (Akbulut, 2012)

1.5.6. Şev Duraylılık Analizleri

Şev duraylılık analizleri genel olarak kinematik analiz, limit denge analizleri, numerik (sayısal) analizler ve olasılıksal yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Son yıllarda paket programların ve algoritmaların gelişmesi ile sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemleri kullanılarak da yeni yaklaşımlar geliştirilmektedir. Ayrıca, yapay zekanın adaptasyonu ile yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritmalar gibi yöntemler de geliştirilmektedir.

Düzlemsel kayma analizlerine kıyasla dairesel kayma analizlerinin en büyük problemi kritik kayma dairesinin merkezinin yerini belirlemek ve kayan kütlelerin yük dengesini moment etkisi ile ele alarak hesaplama yapmaktır. Sadece dairesel değil, dairesel kayma ile dairesel olmayan eğri bir süreksizlik üzerinde kayma gerçekleşebildiğinden, kuvvet ve/veya momentum dengelerini ele alarak farklı yaklaşımlar ortaya çıkaran çok sayıda analiz yöntemi mevcuttur (Fellenius, 1940; Janbu, 1954; Bishop, 1955; Morgenstern ve Price, 1965; Jumikis, 1967; Spencer, 1967; Sarma, 1973; Craig, 1974; Fredlund ve Krahn, 1977; Hoek ve Bray, 1981) (Tablo 6). Tüm bu analizlerin temelinde limit denge analiz yaklaşımı bulunmaktadır. Bunlar dışında, 2 boyutlu (Lowe ve Karafiath, 1960; Seed ve Sultan, 1967; Sherard vd., 1967; US Army Corps of Engineer, 1970) ve 3 boyutlu (Anagnosti, 1969; Baligh ve Azzouz, 1975; Hovland, 1977; Chen, 1981; Chen ve Chameau, 1983; Leshchinsky vd., 1985; Hungr, 1987) geometrik modeller üzerinden yapılan çok sayıda analiz mevcuttur.

Tablo 6. Şev duraylılığı denge analiz yöntemleri (Duncan vd., 2014)

Yöntem	Kullanımı
İsveç Dilim ($\phi=0$) Yöntemi	$\phi=0$ olan şevlere uygulanabilir.
Logaritmik Spiral Yöntemi	Homojen şevler için uygundur. Şev duraylılık çizelgeleri geliştirmek için kullanışlıdır.
Sürtünme Dairesi Yöntemi	$\Phi>0$ olan homojen zeminlerde toplam ve efektif gerilme analizleri için uygundur.
Basit dilim yöntemi	Dairesel kayma yüzeyine sahip homojen olmayan ve $c-\phi$ zeminlere uygulanabilir. Elle hesaplama için çok uygundur.

Tablo 6'nın devamı

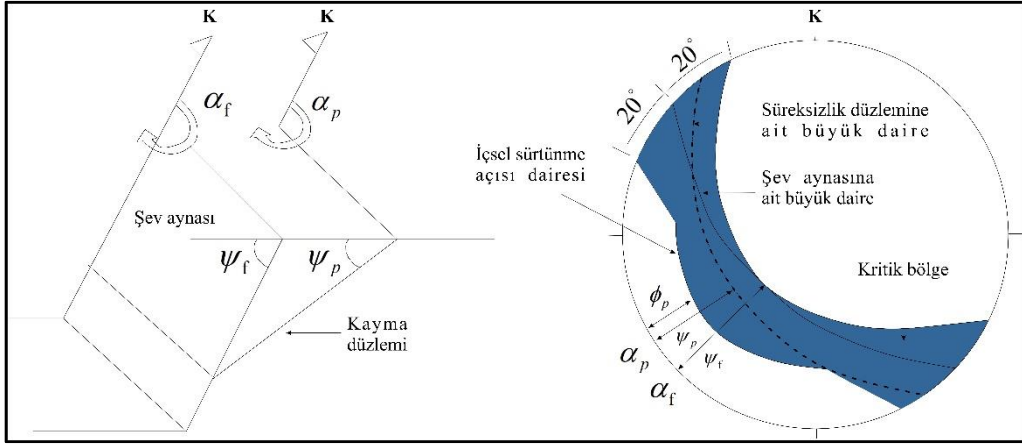
Basit Bishop Yöntemi	Dairesel kayma yüzeyine sahip homojen olmayan ve $c-\phi$ zeminlere uygulanabilir. Basit dilim yönteminden daha doğru sonuçlar verir.
Basit Janbu Yöntemi	Dairesel olmayan kayma yüzeylerine uygulanabilir. Ayrıca, yüzeye paralel olmayan sığ ve uzun düzlemsel kayma yüzeylerinde de kullanılabilir
Spencer Yöntemi	Nerdeyse tüm şev türleri ve zemin profilleri için geçerlidir. Güvenlik katsayısı için en basit tam denge yöntemidir.
Morgenstern ve Price Yöntemi	Nerdeyse tüm şev türleri ve zemin profilleri için geçerlidir. Titiz ve iyi planlanmış tam denge yöntemi sunar.
Sarma Yöntemi	Özellikle dikey olmayan dilim sınırlarının önemli olduğu karmaşık problemler için uygundur.

1.5.7. Düzlemsel Kayma

1.5.7.1 Düzlemsel Kayma için Kinematik Analiz

Şevlerin duraylılığı genel olarak kinematik, analitik ve nümerik analiz yöntemleri ile incelenmektedir. Kinematik analiz yöntemi, şevlerin duraylılığı süreksizlik sistemleri tarafından denetlenmekte olup, kaya kütlelerinde duraysız veya duraylı olan şevlerin ayırt edilmesinde, ayrıntılı analiz öncesi yararlanılan pratik bir yöntem olarak tanımlanmaktadır.

Kaya kütlelerinin eğimli bir yüzeyde kayabilmesi için, kaymayı tetikleyen kuvvetin kohezyon ve içsel sürtünme kuvvetini aşması gerekmektedir. Düzlemsel kayma için kinematik analiz sadece içsel sürtünme açısı tarafından oluşturulan kesme dayanımının olduğu ve kohezyonun sıfır kabul edildiği durumlarda uygulanabilmektedir. Ön analiz olarak ifade edilen kinematik analizde kaymanın süreksizlikler tarafından yönetilip yönetilmediği araştırılmaktadır. Bu yöntemde süreksizlik düzlemlerinin yönelimi (eğim ve doğrultu) ve sürtünme açıları ile şev eğimi stereografik abaklara çizilerek, düzlemsel kayma olup olmayacağının değerlendirilmesi yapılır (Şekil 14). Kohezyon, dış yükler, yeraltı suyu koşulları, kayan kütlelerin ağırlığı, şev geometrisi ve dinamik yükler göz ardı edilir.



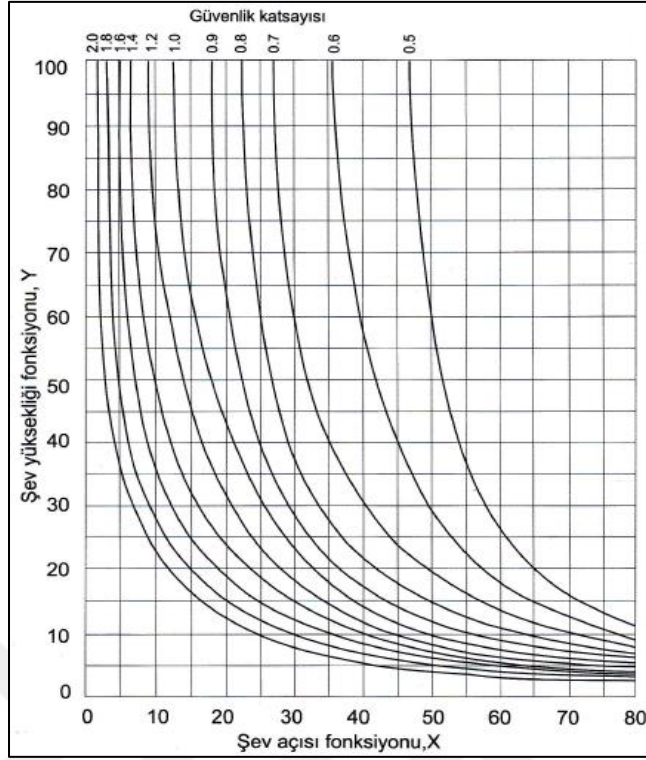
Şekil 14. Düzlemsel kaymanın kinematik analizi (Norrish ve Wyllie, 1996)

1.5.7.2. Düzlemsel Kayma için Grafik Yöntemi

Düzlemsel kayma analizinde ön değerlendirme yapmak için, homojen kaya şevlerinde gelişebilecek kayma parametreleri şev yüksekliğine, şev açısında, yenilme düzlemi açısına, yoğunluğa ve içsel sürtünme açısına bağlı şev açısı ve şev yüksekliği fonksiyonları Şekil 15'teki uygun grafikten belirlenerek, Şekil 16'dan güvenlik katsayısına ulaşılabilmektedir.

Şev Açısı Fonksiyonu, X	Şev Yüksekliği Fonksiyonu, Y
Drene olmuş şev $X = \sqrt{(i - \beta)(\beta - \phi)}$	Gerilme çatlağı yok $Y = \gamma H / c$
Normal eğimli akış $X = \sqrt{(i - \beta)(\beta - \phi(1 - 0.1(H_w/H)^2))}$	Kuru gerilme çatlağı $Y = (1 + (Z_o/H))(\gamma H) / c$
Yatay su akışı $X = 2\sqrt{(i - \beta)(\beta - \phi(1 - 0.5(H_w/H)^2))}$	Su dolu gerilme çatlağı $Y = (1 + (3Z_o/H))(\gamma H) / c$

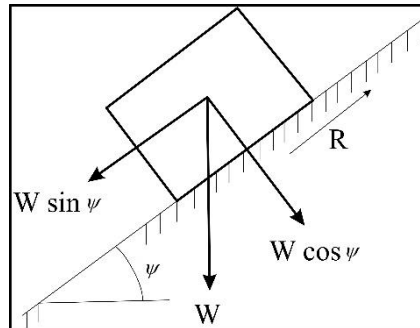
Şekil 15. Düzlemsel kayma için farklı durumlarda şev açısı ve şev yüksekliği fonksiyonları (Hoek, 1970)



Şekil 16. Düzlemsel kaymada şev açısı ve şev yüksekliğine bağlı güvenlik katsayısının belirlenmesi grafiği (Hoek, 1970)

1.5.8. Şev Duraylılık Geometrisi

Şev duraylılık analizlerinde genellikle üçüncü boyut (derinlik) birim metre kabul edilerek, kayma geometrisi iki boyuta indirgenmektedir. Eğimli yüzeyler için kayma geometrisine etkiyen kuvvetler Şekil 17'de verilmektedir.



Şekil 17. Eğik düzlem üzerindeki bloğa etkiyen kuvvetler

Bilindiği üzere, kayan kütlenin yüzeye dik ($W \cdot \cos \psi$) ve yüzeye yatay ($W \cdot \sin \psi$) iki ayrı bileşeni bulunmaktadır. Denge durumu sürtünme açısının yatay bileşene eşit olduğu durumdur. Düzlemsel kayma problemlerine de benzer durum söz konusu olup, birim derinlik için alan hesaplaması yapıldığında, normal gerilme ve makaslama gerilmesi aşağıdaki Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Normal Gerilme: } \sigma = \frac{W \cos \psi}{A} ; \quad \text{Makaslama Gerilmesi: } \tau = \frac{R}{A} \quad (1)$$

Burada, A yenilmeye maruz kalan kütlenin yenilme düzlemindeki temas alanını, R ise makaslama kuvvetini temsil etmektedir.

Kayalarda yenilme ölçütünün hesaplanmasında, Mohr-Coulomb, Barton (1973, 1976), Hoek-Brown (1980), Generalized Hoek-Brown ve Power Curve ölçütleri mevcuttur. Tez kapsamında, literatürde sıklıkla kullanılan Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne değinilmiştir.

1.5.9. Mohr-Coulomb Yenilme Ölçütü

Doğru denklemden yola çıkarak bulunan ve normal gerilme ile makaslama gerilmesi arasındaki doğrusal ilişkiyi esas alan bir ölçüttür. Formülü Eşitlik 2’de verilmektedir.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

Burada;

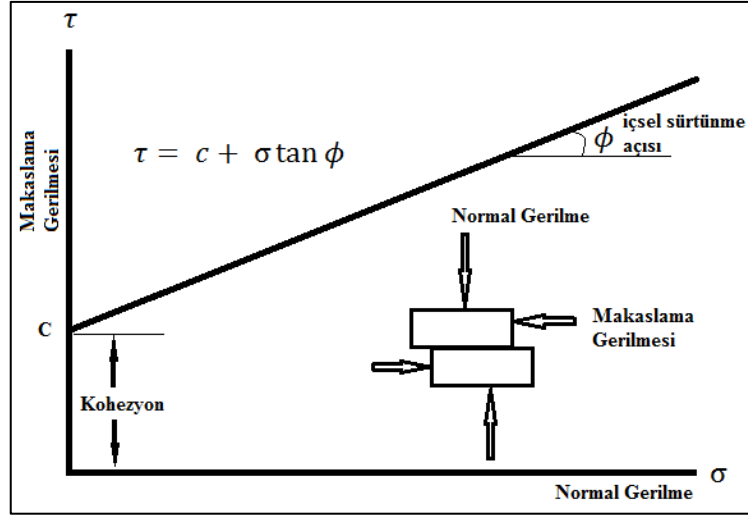
τ : makaslama dayanımı,

σ : kayma yüzeyine etkiyen normal gerilme

c: kohezyon

ϕ : içsel sürtünme açısıdır.

Grafiksel olarak gösterimi Şekil 18’de verilmektedir.



Şekil 18. Mohr-Coulomb yenilme zarfı (Raghuvanshi, 2019)

Ortamda su olduğunda, suyun varlığı direnen kuvvetlere azaltıcı, kolaylaştıran kuvvetlere artırıcı etki yapmaktadır. Mohr-Coulomb yenilme zarfı formülünde suyun varlığı normal kuvveti azaltırken, makaslama kuvvetine sudan kaynaklı ilave olarak boşluk suyu basıncı ilave edilmektedir (Tablo 7).

Tablo 7. Kuru ve boşluk suyu basıncına göre Mohr-Coulomb yenilme ölçütü kuvvet dağılımları ve eşitlikleri (Akbulut, 2012).

Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre kuru yüzeylerde kuvvet dengesi	Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre boşluk suyu basıncı olan yüzeylerde kuvvet dengesi
Normal Gerilme $\sigma = \frac{W \cos \psi}{A}$	Normal Gerilme (efektif normal gerilme) $\sigma' = \frac{(W \cos \psi - U)}{A}$

Tablo 7'nin devamı

Makaslama Gerilmesi $\tau = c + \sigma \tan \phi$ $\tau = c + \frac{W \cos \psi}{A} \tan \phi$ Kaymaya karşı koyan kuvvet $R = \tau A$ $R = cA + (W \cos \psi \tan \phi)$ Kayma anındaki limit denge $W \sin \psi = cA + (W \cos \psi) \tan \phi$	Makaslama Gerilmesi $\tau = c + \sigma' \tan \phi$ $\tau = c + \left(\frac{W \cos \psi - U}{A} \right) \tan \phi$ Kaymaya karşı koyan kuvvet $R = \tau A$ $R = cA + (W \cos \psi - U) \tan \phi$ Kayma anındaki limit denge $W \sin \psi + V = cA + (W \cos \psi - U) \tan \phi$
--	--

Mohr-Coulomb yenilme zarfında, malzemede kohezyon olmaması durumunda formülde $c=0$ olacağından, doğru denklemi grafikte başlangıç noktasından (0,0) geçecektir.

1.5.10. Limit Denge Analizi

Limit denge analizinde, süreksizlik düzlemi üzerinde potansiyel olarak kayabilecek kütleyle etkiyen kaymaya karşı koyan kuvvetlerin kaymayı kolaylaştıran kuvvetlere oranına bakılmaktadır. Bu oran 1 değerinden büyük olduğunda teorik olarak kaymanın gerçekleşmesi mümkün değildir. Yine de, güvenli tarafta kalabilmek için geçici şevlerde, karayollarında ve uzun süreli şevlerde farklı güvenlik katsayısı değerleri kabul görmektedir. Bir çalışmada, açık işletmelerdeki şevlerde genellikle güvenlik katsayısı 1.2 – 1.4 aralığında tasarlanması, üretim sırasında kısmi yenilmelerin olması kabul edilebilir olarak ifade edilmiştir (Wyllie ve Mah, 2004). Genel kabul olarak uzun süre duraylılık gerektirmeyen şevlerde 1.0-1.3 aralığında, uzun süre duraylı kalması gereken yol ve yapılara yakın şevlerde ise en az 1.5 olması gerekmektedir (Hoek ve Bray, 1981)

Limit denge analizi kapsamında geliştirilen yöntemlerin genel olarak karakteristik özellikleri Tablo 8'de verilmektedir.

Tablo 8. Limit denge analiz yöntemlerinin karakteristik özellikleri

Yöntem	Tarih	Sağladığı Denge	Kayma yüzeyinin şekli	Varsayım
Dilim yöntemi (Fellenius)	1910	Her dilimin kuvvet dengesi		Dilimler arası kuvvet yok
Basit dilim yöntemi (Fellenius)	1927	Tüm kütlenin denge momenti	Dairesel	Dilimin tabanına etkiyen normal kuvvet $W_{\cos\alpha}$ ve kesme kuvveti $W_{\sin\alpha}$
Geliştirilmiş Bishop yöntemi	1955	Düşey denge ve tüm moment dengesi	Dairesel	Kenar kuvvetler yatay
Lowe ve Karafiath yöntemi	1960	Yatay ve düşey kuvvet dengesi	Bütün kayma yüzey şekilleri	Kenar kuvvet eğimleri şev yüzeyi ve kayma yüzeyi ortalamasına eşit (dilimden dilime değişir)
Morgenstern ve Price yöntemi	1965	Dengenin bütün şartları	Bütün kayma yüzey şekilleri	Kenar kuvvet eğimleri önceden belirlenmiş şekli takip eder, dilimden dilime değişir
Spencer yöntemi	1967	Dengenin bütün şartları	Bütün kayma yüzey şekilleri	Kenar kuvvet eğimleri her dilim için aynı, çözüm esnasında hesaplanır
Basit Janbu yöntemi	1968	Kuvvet dengesi	Bütün kayma yüzey şekilleri	Kenar kuvvetler yatay
Genelleştirilmiş Janbu yöntemi	1968	Dengenin bütün şartları	Bütün kayma yüzey şekilleri	Kenar kuvvetlerin tabandan yüksekliğinin dilimden dilime değiştiği kabul edilir
Geliştirilmiş İsveç yöntemi	1970	Kuvvet dengesi	Bütün kayma yüzey şekilleri	Kenar kuvvet eğimleri şeve paralel ve eşit
Sarma yöntemi	1973	Dengenin bütün şartları	Bütün kayma yüzey şekilleri	Düşey kenar kuvvetlerin büyüklüğü önceden belirlenmiş şekli takip eder
Sürtünme dairesi (Taylor)	1973	Moment ve kuvvet dengesi	Dairesel	Sürtünme dairesine tanjant olan bileşke

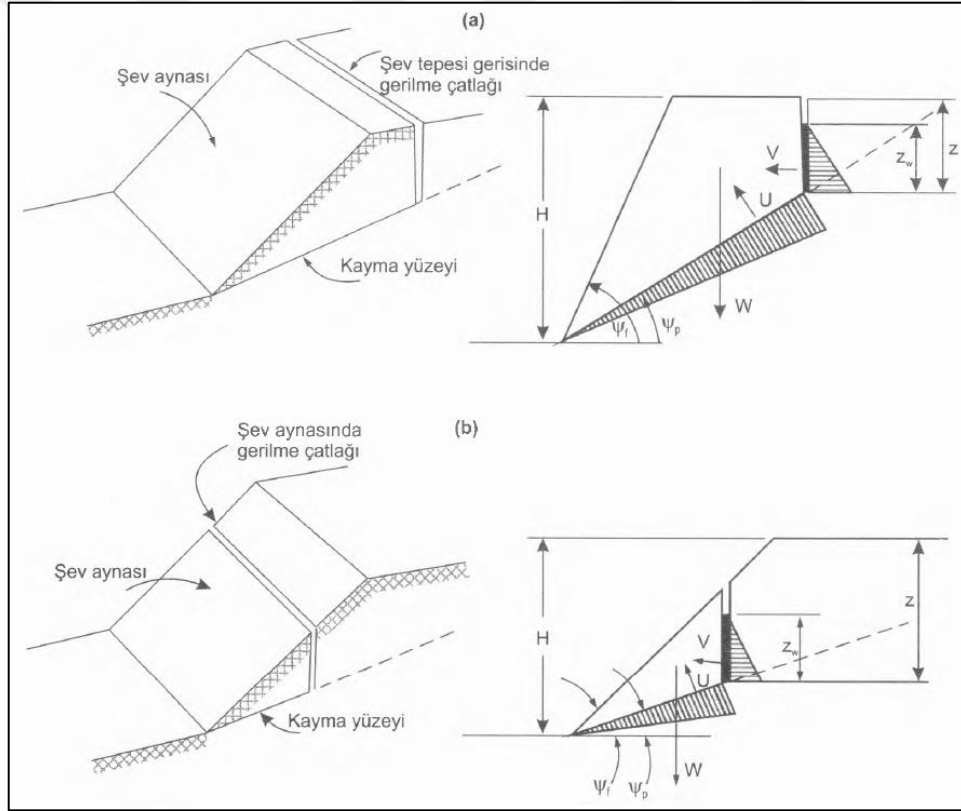
1.5.11. Düzlemsel Kayma İçin Limit Denge Analizi

Düzlemsel kayma analizlerinde, kaymayı tetikleyen (kolaylaştıran) ve engelleyen kuvvetlerin oranından güvenlik katsayısı hesaplamasında, kayan kütlenin taban alanı 1 metre derinlikte kabul edilir ve 2 boyuta indirgenmiş olur. Limit denge analizi kuvvet dengesi üzerine kurulmakla birlikte, kohezyonlu kaya kütlelerinde, kohezyonun kaymaya karşı koyan etkisi kayma yüzeyinin alanı ile çarpılarak bulunmaktadır. Kayma (ya da süreksizlik) düzleminin alanı derinlik değeri 1 alınarak hesaplandığında, birim kayma yüzeyi açısından bakılarak 2 boyutta hesaplama yapılmaktadır.

Ayrıca, düzlemsel kayma analizlerinde, şev aynası üzerinde veya şev arkasında gerilme çatlaklarının varlığına göre hesaplamalar değişmekle birlikte; su muhteviyatı, patlatma ya da deprem kaynaklı ivme ve (varsa) güçlendirme çalışmaları için uygulanan

kaya saplamaları varlığı sonucunda güvenlik katsayısı hesaplamaları değişkenlik göstermektedir. Yine de, tamamı karşı koyan kuvvetlerin kolaylaştırıcı kuvvetlere oranı olarak öne çıkmakta olup, ekstra ilave edilen değişkenler geometrik kuvvet dengesini değiştirmektedir.

Üçüncü boyuttan bakıldığında, kayan kütlenin sınırlarını belirleyen (ya da oluşturan) süreksizliklerin de olması gerekmektedir. Fakat üçüncü boyuttaki süreksizliklerin kayan kütlenin duraylılığı üzerinde etkisi olmadığı kabul edilerek, birim derinlik üzerinden 2 boyutlu analiz yapılmaktadır. İndirgenmiş düzlemsel kayma geometrileri Şekil 19'da verilmektedir.



Şekil 19. Düzlemsel kayma geometrisine etki eden kuvvetler: (a) şev arkasında (b) şev aynasında gerilme çatlaklı durumları (Hoek vd., 1977)

Şekil 19'daki parametreler:

H : şev yüksekliği

W : kayan kütlenin ağırlığı

A : kayan kütlenin taban alanı

Ψ_f : şev eğimi

Ψ_p : kayma yüzeyinin eğimi

U: kayma yüzeyine etkiyen su basıncı

V: gerilme çatlağındaki su basıncı

Z: gerilme çatlağının derinliği

Z_w : gerilme çatlağındaki su yüksekliği

a_{max} : yer ivmesi

T: kaya saplaması kuvveti

olarak tanımlanmaktadır.

Ortak eşitlikler Eşitlik 3-8'de verilmektedir.

$$A = (H - z) \text{Cosec } \psi_p \quad (3)$$

$$U = 0.5 \gamma_w Z_w (H - Z) \text{Cosec } \psi_p \quad (4)$$

$$V = 0.5 \gamma_w Z_w^2 \quad (5)$$

Gerilme çatlağının şev gerisinde olduğu durumda;

$$W = 0.5 \gamma H^2 \left[\left(1 - \left(\frac{Z}{H} \right)^2 \right) \text{Cot } \psi_p - \text{Cot } \psi_f \right] \quad (6)$$

Gerilme çatlağının şev aynasında olduğu durumda;

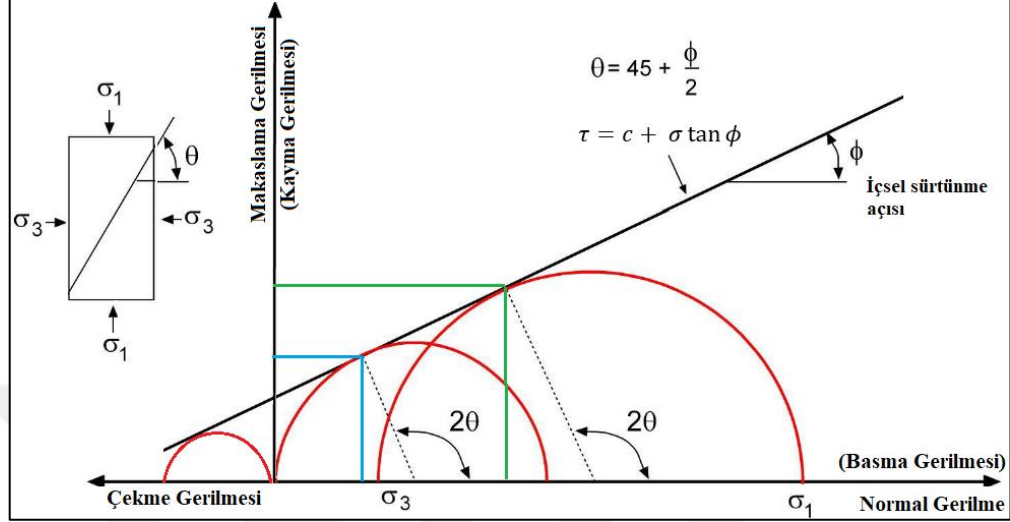
$$W = 0.5 \gamma H^2 \left[\left(1 - \frac{Z}{H} \right)^2 \text{Cot } \psi_p (\text{Cot } \psi_p \text{Tan } \psi_f - 1) \right] \quad (7)$$

İki durum için de kayan kütle eşitlikleri yukarıda verilmiştir.

Güvenlik katsayısı, F eşitliği;

$$F = \frac{cA + (W \text{Cos } \psi_p - U - V \text{Sin } \psi_p) \text{Tan } \phi}{W \text{Sin } \psi_p + V \text{Cos } \psi_p} \quad (8)$$

yüklemeye yapıldığında, kırılma yükünün örneğin kırıldığı yüzeyde ne kadar olduğunun tespitini geometrik olarak elde etmek Mohr dairesi ile mümkündür (Şekil 21).



Şekil 21. Mohr dairesi ve Mohr-Coulomb yenilme zarfı

Tek eksenli veya 3 eksenli basınç dayanımı değerleri ile kırılma açısı belirlenen çalışmalarda, Normal Gerilme-Makaslama Gerilmesi grafiğinde, tek eksenli için σ_1 değeri çap olacak şekilde (üç eksenli için $\sigma_1 - \sigma_3$ çap) daire çizilir. Dairenin merkezinden numunenin kırılma açısının 2 katı değerinde saat yönünün tersine açı ölçülerek işaretlenir. Bu nokta basınç dayanımı için, normal yükleme altında kırılan numunenin, kırıldığı düzleme düşen normal ve makaslama gerilmesi değerlerini vermektedir. Yani, silindirik kaya örneğine düşey yönde yapılan yükleme sonucunda yenildiği durumdaki gerilmenin, örneğin kırıldığı düzleme dönüşümü yapılmış olur. Ayrıca, kırılma açısının 2 katı alınarak belirlenen noktaya çizilen teğet, Mohr-Coulomb yenilme zarfını temsil etmektedir. Bu yenilme zarfının makaslama gerilmesi eksenine temas ettiği nokta kohezyonu ve eğimi de içsel sürtünme açısını vermektedir.

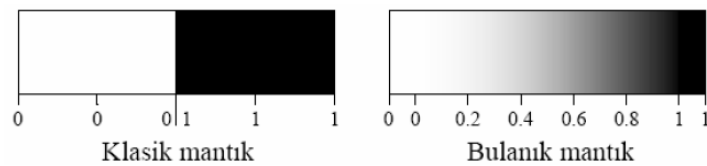
Üç eksenli basınç dayanım deney sonuçları ile, tek eksenli ve endirekt çekme (Brazilian) deney sonuçları da Mohr dairesi şeklinde çizilebilmektedir. Aynı kaya malzemesine ait bu sonuçlar sonunda oluşacak dairelerin tümünden geçen teğet çizgisi de yine Mohr-Coulomb yenilme zarfı olarak değerlendirilmektedir.

1.6. Bulanık Mantık

Mantık, bir düşünce veya ifadenin doğru olup olmadığının incelenmesi ve sonucunun çıkarımı için kullanılan bir bilim dalıdır. İlk olarak Aristoteles tarafından temel kuralları ve yöntemleri geliştirilerek sistematik bir düzene oturtulmuştur. Bu sistematik daha sonraki dönemlerde oldukça önem kazanarak, günümüzde halen etkinliğini devam ettirmektedir (İsmail, 2002).

Klasik mantık olarak adlandırılan Aristoteles mantığı, “doğru” veya “yanlış” ifadelerini ya da değerlerini temel almaktadır. Bu mantığa göre bir iddia, düşünce ya da çıkarım sonucunda sadece iki durum yer alabilmektedir. “Doğru” veya “Yanlış” zıtlığı yanında “1” veya “0”, “olmak” ya da “olmamak”, “kabul” ya da “ret” ifadeleri de klasik mantık sisteminin bir ifadesi olabilmektedir (Öner, 1970). Bulanık mantıkta ise klasik mantıktan farklı olarak “1” ve “0” arasındaki tüm değerler üyelik derecesi oranında olabilir.

Bulanık mantık ifadesi ilk kez Azerbaycan’lı matematikçi Zadeh tarafından, belirsizlik içeren tanımların matematiksel olarak ifade edilmesi olarak ortaya atılmıştır. Bu yöntem, kesin sınırlarla çizilmiş değerlerin bir çeşit genişletilmesi olarak da düşünülebilir. Zadeh yayınladığı “Fuzzy Sets” başlıklı çalışmasında bulanık kümeyi $[0-1]$ aralığında değişen üyelik derecesine sahip küme olarak tanımlamıştır (Zadeh, 1965). Bu mantıkta bir elemanın bulanık kümedeki yeri kesin değil, kısmi ve $[0-1]$ arasında bir “aralık değer” olarak ifade edilmektedir (Shimoda, 2002). Klasik ikili mantık küme teorisinde bir elemanın üyelik derecesi ya 0 ya da 1’dir. Yani ya o kümeye aittir ya da değildir. Bulanık kümede ise klasik kümedeki gibi kesinlik yoktur. Klasik küme siyah-beyaz arasını keskin ayırırken, bulanık kümede siyah-beyaz arasındaki gri bölge gibi dahil olma derecesi vardır (Vrusias, 2005) (Şekil 22).



Şekil 22. Klasik mantık ile bulanık mantık değer dağılım gösterimi

Bulanık mantık teorisi, kesin sınırlar kullanmak yerine, kavramları kümeleme veya sınıflandırma şeklinde değerlendirir. Örneğin, "uzak" veya "verimli" gibi ifadeler bulanık kavramlar olarak kabul edilir çünkü kesin sınırları belirsizdir ve kişiden kişiye ya da bölgeden bölgeye göre değişebilir. Bulanık mantık teorisi insanların çıkarım ve karar verme sürecine benzer şekilde çalışır ve uygun bilgiyi kullanarak problem çözme işlevini yerine getirir. Bu yaklaşım problemleri doğal bir şekilde ifade etme imkanı sağladığından, mühendislik ve karar verme problemlerinde kolaylıklar sunar. (Sarı vd., 2005).

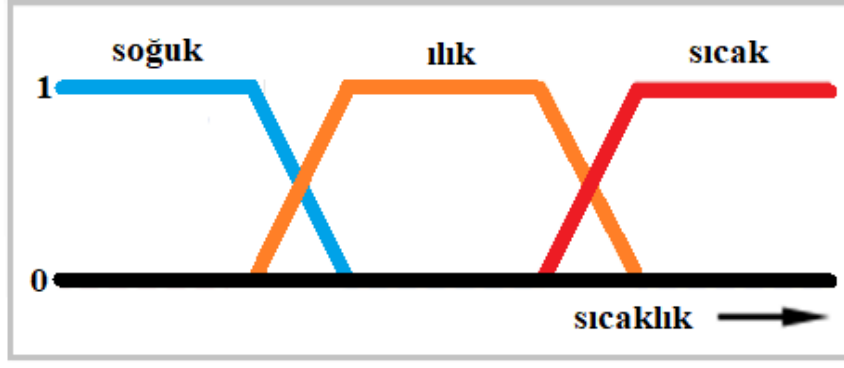
Bulanık mantık, genellikle uzman kişilerin bilgi ve deneyimlerinden yararlanma yoluna giderek, az, çok, pek çok, biraz, biraz çok gibi günlük hayatta kullanılan dilsel değişkenler kapsamında denetim gerçekleştirmektedir. Bu dilsel değişkenlerin belirli bir düzen ve mantıklı şekilde bilgisayara aktarılması ile uzman kişilerin etkinliği ortadan kalkabilmektedir. Genel olarak düşünüldüğünde, matematik sözel düşünce ve ifadelerin belirli sembollerle simgeleşmiş hali ise, bulanık mantık için matematiğin gerçek dünyaya uyarlanması olarak ifade edilebilir (Elmas, 2011).

Klasik mantıktaki küme kavramının aksine bulanık mantıkta bir elemanın kümeye ait olma derecesi $[0-1]$ aralığında değişkenlik göstermektedir. Klasik mantık kesin yargı verirken bulanık mantık kısmi yargı ortaya çıkarmaktadır. Klasik mantıkta hepsi veya hiçbirisi yargısı geçerli iken bulanık mantıkta belirli derecede yargısı geçerlidir (Tablo 9).

Tablo 9. Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki genel farklılıklar

Klasik Mantık	Bulanık Mantık
A veya A değil	A ve A Değil
Kesin	Kısmi
Hepsi veya Hiçbiri	Belirli derecelerde
0 veya 1	0 ve 1 arasında süreklilik
İkili birimler	Bulanık birimler

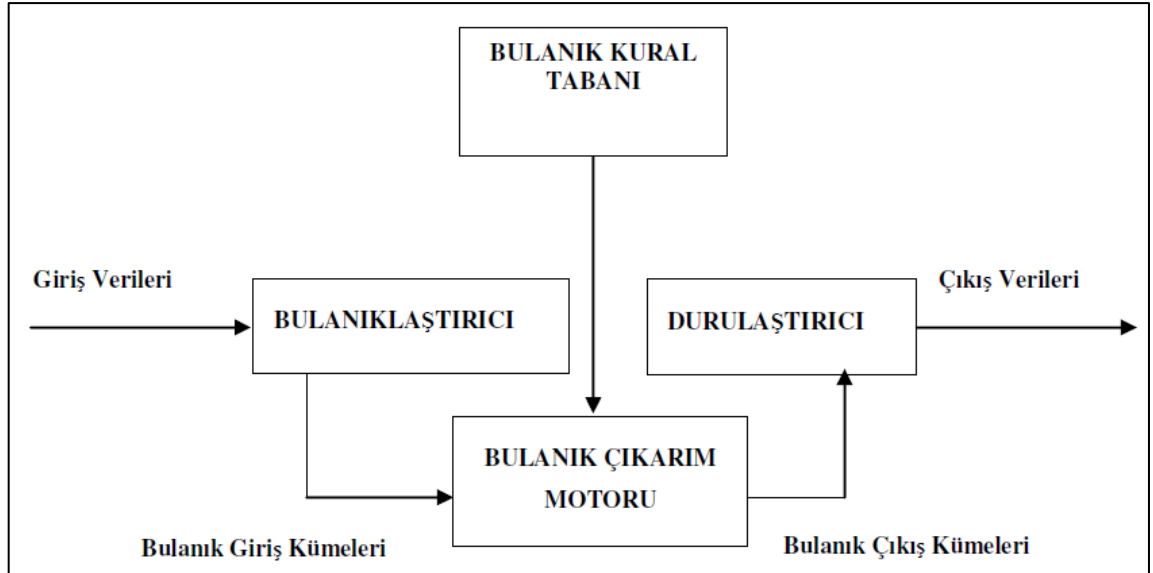
Örnek olarak, $0-25^{\circ}\text{C}$ arasının soğuk, $25-50^{\circ}\text{C}$ arasının ılık ve $50-100^{\circ}\text{C}$ arasının sıcak olarak kümelendiği bir sıcaklık sınıflaması ele alındığında, klasik mantığa göre 24.9°C ile 25.1°C farklı sınıflarda olmasına rağmen, gerçekte aralarında çok da bir fark olmadığı barizdir. Bulanık mantık kümelere ait olma derecesini $[0-1]$ aralığında sürekli hale getirerek kategoriler arası geçişi yumuşatmakta ve kısmi üyelik olarak ele almaktadır (Şekil 23).



Şekil 23. Sıcaklık sınıflandırmasının bulanık mantıkta kümelenmesine bir örnek

1.6.1. Bulanık Mantık Sistemi

Bulanık mantık sisteminin temel yapısı genel olarak verilerin sisteme alınarak bulanıklaştırma ve durulaştırma işlemlerinden sonra çıkış verilerine ulaşılmasıdır. Analitik çözümlerden bilinen bağımlı (Y) ve bağımsız (X) değişkenlerin bulanık sistemde giriş verileri bağımsız ve çıkış verileri bağımlı olarak düşünülebilir. Genel olarak ifade edilen bulanık mantık sistemi Şekil 24’te verilmektedir.



Şekil 24. Bulanık mantık sistemi (Şen, 2020)

1.6.1.1. Bulanıklaştırma

Klasik mantıkta sadece “doğru” veya “yanlış” kavramlarını ya da bunların sayısal ifadelerini kullanan sisteme karşın, bulanıklaştırma bu kavramlar ya da sayısal ifadelerin arasında ara değerler oluşturulmasını sağlamaktadır. “çok” “az” “biraz” “daha fazla” gibi kavramlar verilerin bulanıklaştırılması karşılığıdır. Bu yöntemle, gerçek hayatta karşılaşılan belirsizlik ve çelişkiler daha iyi ifade edilebilmektedir.

Bulanıklaştırmada üyelik (aidiyet) fonksiyonları kullanılarak klasik değerler bulanık değerlere dönüştürülmektedir. Her bir bağımsız değişkenin bulanık kümeye olan üyelik derecesi oluşturma ya da hesaplama adımıdır.

Bulanıklaştırmada üyelik derecesi fonksiyonları Eşitlik 11’deki gibi gösterilmektedir.

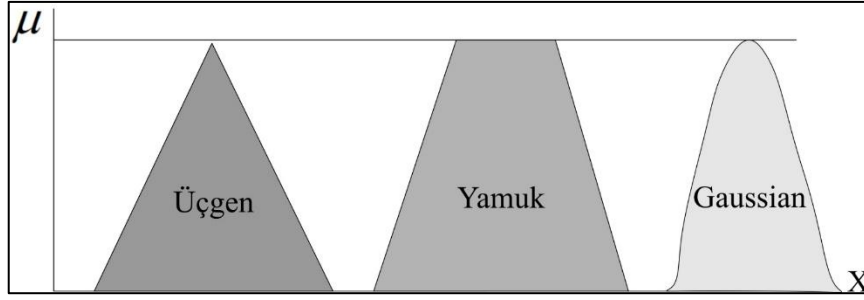
$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (11)$$

Burada A: bulanık küme, X: evrensel tanım kümesi, $\mu_A(x)$ ise üyelik fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Örnek olarak:

$$\mu_A(x) = \frac{x_1}{0,2} + \frac{x_2}{0,5} + \frac{x_3}{0,7} \quad (12)$$

olarak ifade edilsin. Klasik fonksiyonlardan bilinen $f(x)=y$ (bağımlı değişken), bulanık kümelerde $\mu(x)$ olarak gösterilmektedir. Eşitlik 12’de üstteki X_1 , X_2 ve X_3 bağımsız değişkenler olup, alttaki değerler bu kümeye ya da fonksiyona ait olma derecelerini göstermektedir. Ayrıca bu gösterim kesirli sayıların toplamı değil, aynı küme için farklı üyelik derecelerine sahip 3 ayrı bağımsız değişkenin fonksiyonda gösterim şeklidir.

Üyelik derecesi fonksiyonu olarak en sık kullanılan yöntemler üçgen, yamuk ve Gauss üyelik fonksiyon tipleridir. Bunların dışında, çan eğrisi, Sigmoidal, psigma, dsigma, pi gibi çok sayıda üyelik tipleri bulunmakla birlikte (Elmas, 2011), bu çalışmada en sık kullanılan yöntemlere değinilmiştir. Üyelik tipleri, üyelik derecesinin problemin içeriğine göre ne şekilde dağılım ya da değişim gösterdiğinin grafiksel gösterimidir (Şekil 22).



Şekil 25. Üçgen, yamuk ve Gaussian üyelik fonksiyon tipleri

1.6.1.2. Bulanık Kural Tabanı

Bulanıklaştırma aşamasından sonra, EĞER-O HALDE (IF-THEN) çatısı oluşturma aşamasındaki kurallara ait bilgi tabanıdır. Bu kuralların oluşturulmasında uzman kişilerin bilgilerinden yararlanılmaktadır (Başçetin ve Kesimal, 1999; Bay ve Atacak, 2006). İlgili verilerin hangi çıkarımlarla işleneceğine dair tüm kuralların belirlendiği aşamadır.

Örnek olarak ifade etmek gerekirse, gösterim olarak;

EĞER ($X_1 == \text{düşük}$) VE ($X_2 == \text{orta}$) VE ($X_3 == \text{yüksek}$) VE ($X_4 == \text{çok yüksek}$) İSE ($Y == \text{normal}$)
 ($X_1 == \text{düşük}$) & ($X_2 == \text{orta}$) & ($X_3 == \text{yüksek}$) & ($X_4 == \text{çok yüksek}$) $\rightarrow$ ($Y == \text{normal}$)

şeklinde ifade edilebilir. Burada, X_1 , X_2 , X_3 ve X_4 bağımsız değişkenler olup, Y bağımlı değişkendir. Düşük-orta-yüksek dilsel değişkenler farklı şekillerde (çok az-az-çok; güvensiz-sınırd-güvenli) gibi farklı tanımlamalarla kullanılabilir.

1.6.1.3. Bulanık Çıkarım Motoru

Bulanık kural tabanında oluşturulan kuralların işlenerek çıktı vermesi işlemidir. Burada farklı çıkarım ya da çözümleme yöntemleri devreye girmektedir. En önemli olarak bilinen yöntemler Mamdani ve Sugeno modelidir. Mamdani Çıkarım Sistemi uzman kişilerden elde edilen dilsel kontrol kurallarının harmanlanmasıyla bir kontrol sistemi oluşturma olarak ortaya çıkmıştır (Mamdani ve Assilian, 1975). Takagi-Sugeno-Kang olarak da adlandırılan Sugeno çıkarım sistemi, tekil çıkış üyelik fonksiyonları kullanmaktadır (Sugeno, 1985). Durulaştırma aşamasında iki boyutlu alan merkezi hesaplaması yerine birden fazla veri noktasının ağırlıklı ortalamasını veya ağırlıklı toplamını kullanması yönüyle Mamdani sistemine göre farklılık göstermektedir.

1.6.1.4. Durulaştırma

Bulanık çıkarım işleminden sonra sonuç bulanık küme ya da bulanık ifadedir. Bu bulanık ifadelerin anlamlandırılması için bilinen ya da anlaşılabilir bilgilere dönüştürülmesi işlemidir. Karar verme biriminden gelen bulanık bilgiden bulanık olmayan gerçek değerlerin elde edilmesidir. Durulaştırma işleminde en çok kullanılan yöntemler maksimum üyelik yöntemi, ağırlık merkezi yöntemi, ağırlık ortalaması yöntemi ve orta-maksimum üyelik yöntemidir.

Çıktı değerlerinin ortaya çıkarılmasında maksimum üyelik yöntemi çıkış değer grafiğinde en büyük değere eşitleme, ağırlık merkezi yöntemi çıkış değerine ait grafiğin ağırlık merkez noktasına eşitleme, ağırlık ortalaması yönteminde girdi değerlerinin üyelik değerleri kullanılarak ortalama noktasına eşitleme, orta-maksimum üyelik yöntemi maksimum değer bir aralık olduğu grafiklerde maksimum aralığın ortası olarak ifade edilmektedir (Elmas, 2011).

Bu yöntemlerden ağırlık merkezi yöntemi özellikle Mamdani çıkarım metodunda sıklıkla tercih edilmektedir. Ağırlık merkezi yöntemi ile kurallardan gelen üyelik değerlerinin oluşturduğu bulanık çıkış kümesinin geometrik ağırlık merkezi hesaplanarak ortaya çıkmaktadır.

1.7. Önceki Çalışmalar

Çalışma alanında daha önce yapılan çalışmalar kronolojik sıra ile verilmiştir.

İlk olarak son yıllardaki çalışmalar üzerinden elde edilen bilgiler, 1975 yılında yapılan bir çalışmada, Araklı kalker ocağındaki mevcut rezerv üzerinde yapılan incelemelerde arazinin jeolojik birimlerinin tanımlamasının yapıldığı ve ocakta yapılan 16 ayrı sondaj çalışmasında da günümüzde yenilmeye sebep olan kil düzleminin varlığına işaret edildiği anlaşılmaktadır (Erguvanlı, 1975).

Doğu Pontidlerin Jeolojisi üzerine yapılan bir başka çalışmada, Araklı kıyı şeridinin Eosen yaşlı andezitik-bazaltik volkanitlerden oluştuğu ve Taşönü ocağı yönüne gidildikçe

üst katmanlara doğru kumtaşı, marn ve en üste killi kireçtaşı ile şeyllerden oluşan birimin yer aldığı ifade edilmiştir (Güven, 1993).

Araklı-Taşönü kalker ocağında yapılan patlatmaların çevresel etkilerini inceleyen bir tezde, yakın çevredeki yapılara olan hasar etkileri araştırılmıştır. Ocaktaki mevcut düzende yapılan patlatmalardan titreşim değerleri kaydedilerek saha yakınındaki okul, cami ve tarihi eserlere etkisi incelenmiş ve zarar vermeyecek düzeyde yeni patlatma tasarımı geliştirilmiştir (Erçıkı, 2004).

Bir başka tez çalışmasında, ölçülen çok sayıda patlatma verisine ait parçacık hızı, ölçekli mesafe, titreşim frekansları, öz yapısal frekanslar, ivme ve yer değiştirme parametreleri arasındaki ilişkiler incelenerek uluslararası standartlar ile karşılaştırılmış ve sınıflandırılmıştır (Cihangir, 2006).

Bir makale çalışmasında, ocaktaki düzlemsel yenilmeler olduktan sonra şev duraylılığı yönelik deterministik çalışmalar yapılmış, heyelanlar sonrası şev arkasında yeni gerilme çatlaklarının oluştuğu, güvenlik katsayısının 1.2 limit seviyesinin altında olduğu ve ocağın bu haliyle terk edilemeyeceği ifade edilmiştir (Erçıkı vd., 2006).

Bir doktora tez çalışmasında, düzlemsel kayma sonrası kayan kütlelerin arkasında oluşan şevlerin duraylılıkları Monte Carlo benzeşim tekniği ile yenilme olasılığı incelenmiş, şevlerin arkasında yeni gerilme çatlakların varlığı ifade edilmiş ve olasılıksal analizde şevlerin duraysız oldukları ifade edilmiştir (Ceryan, 2009).

Bir diğer tez çalışmasında, aynı sahadaki heyelanlı bölgenin güneyinde kalan bölgedeki yeni şevlerin duraylılığı şev duraylılığı olasılıksal sınıflandırma (SSPC) ile incelenerek, kinematik analiz açısından şevlerin duraylı olduğu fakat şev açısının ve yüksekliğinin artırılması ile küçük ölçekli duraysızlıkların olabileceği ifade edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca güvenli bir çalışma düzeni için basamak şev açısı, genel şev açısı ve basamak yüksekliği için maksimum değerleri saptanmıştır (Karaman, 2011a).

Bunların dışında, arazi üzerinden alınan ve şev yenilmesi ile doğrudan veya dolaylı olarak bağlantılı olan ya da ocakla ilgili çok sayıda makale çalışması yapılmıştır (Erçıkı

vd., 2004a; Erçikdi vd., 2004b; Cihangir vd., 2005; Kesimal vd., 2008; Karaman vd., 2010; Karaman, 2011b; Ceryan vd., 2012; Ceryan vd., 2013; Karaman vd., 2013; Aliyazıcıoğlu vd., 2015).

Ayrıca, bulanık mantığın yer bilimleri ve çevre duraylılığı çalışmalarında kullanımına yönelik bazı çalışmalar tarihsel sıra ile verilmiştir.

Başçetin ve Kesimal (1999a) yaptığı bir çalışmada, madencilik karar problemlerinde kriter belirleme için yenilikçi bir araç olarak bulanık çoklu öznitelik karar verme sistemini kullanmıştır. Yerüstü madenciliğinde ekipman seçimi ve yeraltı madenciliğinde yöntem seçimine yönelik bulanık ortam irdelemesi yapılan çalışmada yöntemin uygunluğu vurgulanmakla birlikte, bulanık yöntemin madencilikte az bilindiği ve yaygınlaşması gerektiği de vurgulanmıştır.

Gökçeoğlu (2001) çalışmasında sadeleştirilmiş ve sınırları belirli sistemlerin çözümünde klasik sayısal analiz yöntemlerinin kullanışlı olmasına rağmen, kaya ve zemin dayanım parametreleri gibi karmaşık ve etkileşimli sistemlerde bulanık mantık yaklaşımını incelemiştir. Bu kapsamda, süreksizlik denetimli bir çevrenin duraylılık değerlendirmesinde bulanık mantık yöntemi limit denge yöntemi ile kıyaslanarak bulanık mantık yaklaşımının deterministik yöntemlere destekleyici olarak kullanılmasının yararlı olacağını ifade etmiştir.

Bir diğer çalışmada (Gokceoglu, 2002), laboratuvar çalışmalarında tek eksenli basınç dayanımı testlerinin sağlıklı yapılmasının karot kalitesine bağlı olduğu ve karot numunesi elde edilemeyen zayıf ve ince tabakalı kayaçlardan dolayı kestirim yöntemleri uygulandığı, bu bağlamda petrografik bileşimlerden tek eksenli basınç dayanımı tahmini için bulanık kural tabanı oluşturulduğu ifade edilmiştir. Toplam 15 üyelik fonksiyonu ile tanımlanan bulanık sistem sonucunda, bulanık çıkarım kapasitesinin çok yüksek olduğu ortaya konmuştur.

Q sisteminin tahkimat tahminine yönelik bir çalışmada, daha önce açılmış tünellerin verileri ile eğitilen bulanık uzman sistemler, verilerin eksikliklerini de tamamlayıcı özelliği ile Q sisteminin verdiği tahkimat sonucundan daha başarılı bir şekilde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Q sistemine ekstra girdi değişkenleri ekleyerek genişletilmiş bir bulanık sistem

ile tahkimatın daha iyi tahmin edildiği ifade edilerek, ön kullanım için önerildiği de vurgulanmıştır (Tzamos ve Sofianos, 2006).

Süreksizlik kontrollü kaya şevi duraysızlıklarının bulanıklaştırılmış kinematik analizi başlıklı bir çalışmada, sadece ana süreksizlik kontrollü düzlem kümelerini almak yerine tüm süreksizlikler stereografik izdüşüm ağı ile modellenmiş ve düzlemsel, kama ve devrilme tipi yenilmeler için kinematik analiz yapılmıştır. Sonrasında, FUDIKA (Bulanıklaştırılmış Dijital Kinematik Analiz) adı verilen bir bilgisayar programı geliştirilerek kaya şevlerinin duraysızlık potansiyelleri bulanık sistemler ile ortaya konmuştur (Aksoy ve Ercanoglu, 2007).

Şev stabilitesini bulanık bir sinir ağı modeli ile birleştiren bir çalışmada, bulanık üyelik fonksiyonları ile yapay sinir ağı eğitilerek, eğitilen model ile test edilen modelin uyumlu olduğu, tahmin edilen sonuçların şev stabilitesini tahmin etmede etkili olduğu ifade edilmiştir (Xinhua ve Xiaodong, 2007).

Diğer bir çalışmada, şev duraylılık değerlendirmesinin kaya kütlelerinin karakterizasyonu ve dayanımlarının belirlenmesindeki karmaşık yapılarından dolayı birçok belirsizlik içerdiği vurgulanarak, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI – Geological Strength Index) ve bulanık kümeler ile Hoek-Brown yenilme kriteri kullanılarak belirsizliklerin aşılabileceği ifade edilmiştir. Çalışmada, şev güvenilirlik analizi için belirsizliklerin bulanıklaştırılması ile şevlerin değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca, yaklaşımın performans değerlendirmesi için Monte Carlo yöntemi ile kıyaslanarak uygun olduğu ortaya konmuştur (Zhang vd., 2009).

2011 yılında yapılan bir başka çalışmada, bulanık küme teorisi, belirsiz verileri ve subjektif bilgileri işleyebilmek için jeoteknik alanında kullanılmıştır. Dört kategoride (temel bulanık çıkarım, genel bulanık çıkarım, bulanık olasılık teorisi ve Klisinski bulanık plastiklik) ele alınan yöntemler, şev duraylılığı, kaya mühendisliği, temel ve tünel açma konularındaki uygulamaları tanımlanmıştır. Ayrıca, nöro-bulanık çıkarım sisteminin (ANFIS) son yıllarda özellikle kaya mühendisliği ile ilgili konularda kullanılmaya başlandığı ifade edilmiştir (Adoko ve Wu, 2011).

Daftaribesheli vd. (2011) bir çalışmasında, Bieniawski (1973)'nin oluşturduğu kaya kütlesi indeksi (RMR)'den uyarlanarak, Romana (1985) tarafından şev duraylılığı için güncellenen şev kütle indeksi (SMR) üzerinde çalışmalar yaparak, klasik küme teorisini bulanık sistemde analiz etmiş ve Bulanık Şev Kütle İndeksi (FSMR) geliştirmiştir. Geliştirdiği indeksi Rocscience Slide programında oluşturduğu dairesel kayma modelleri ile kıyaslayarak FSMR metodunun kaya şev yenilmesini daha iyi tahmin edebildiğini ifade etmiştir.

Şev stabilitesi tahmini için bulanık mantık sistemi başlıklı bir çalışmada, girdi parametreleri olarak şev yüksekliği, şev malzemesinin birim ağırlığı, şev açısı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri ANFIS sisteminde modellenerek güvenlik katsayısı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonunda, deterministik yöntemlerle modellenen aynı veriler birbiri ile kıyaslanarak yapılan tahminin hesaplanan değerler ile birbirine yakın olduğu ortaya konmuştur (Mohamed vd., 2012).

Bulanık mantığın jeofizikte kullanımına yönelik yapılan bir çalışmada, bulanık mantığın son yıllardaki önemine vurgu yapılarak, bulanık mantık çalışma yöntemini içeren geçmişten çalışmanın yapıldığı tarihe kadar olan jeofizik uygulamaları irdelenmiş ve özet/tablo bilgisi olarak verilmiştir. Ayrıca ANFIS (adaptive neural fuzzy inference system – uyarlanabilir sinirsel bulanık çıkarım sistemi) üzerine bir örnek çalışmaya da yer verilmiştir (Kaftan vd., 2013).

Ayrıca, literatürde kaya sistemlerinde veya şev duraylılık hesaplamalarında bulanık mantık sistemini direk veya dolaylı olarak kullanan çok sayıda çalışma mevcuttur (Davis ve Keller, 1997; Ruigeng, 1998; Başçetin ve Kesimal, 1999b; Başçetin ve Kesimal, 1999c; Yuanyou ve Ruigeng, 2000; Karadoğan vd., 2002; Sonmez vd., 2003; Saboya Jr vd., 2006; Liu ve Chen, 2007; Karadoğan vd., 2008; Liu vd., 2008; Daftaribesheli vd., 2011a, Daftaribesheli vd., 2011b; Mohamed vd., 2012; Basarir ve Saiang, 2013; Su vd., 2014; Khakestar vd., 2016; Rafiee vd., 2016; Haghshenas vd., 2017; Fattahi, 2017; Chakraborty ve Goswami, 2022).

Genellikle bu çalışmalarda modellemeler ya bulanıklaştırılmış girdi parametreleri ile yapay sinir ağları modellemesi ya da adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi gibi birleşik

sistemler ya da bulanık mantığın olasılıksal yöntemler içindeki verilerin bulanıklaştırılması kapsamında kullanıldığı anlaşılmaktadır. Adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile bulanık çıkarım sistemi (FIS) arasındaki bariz farklılık, ANFIS'te çok sayıda veri yapay sinir ağıları modeli ile eğitilerek uzman görüşü olmadan eğitilmiş veri üzerinden bulanık sistemde modellenmesidir. FIS'te ise çok az sayıda veri ile kural tabanı tanımlanabilir fakat uzman görüşüne ihtiyaç vardır. Tez kapsamında az sayıda veriden bulanık sistem kurulurken, uzman görüşü yerine girdi verilerini sabit tutarak matematiksel çözüm üzerinden uzman görüşü yaklaşımı oluşturulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, düzlemsel yenilmeye maruz kalmış bir kalker ocağında daha önce yapılan deterministik ve olasılıksal çalışmalardan ayrı olarak, araziden ve sondajlardan elde edilen veriler ile bulanık mantık çıkarım sistemi kurulması amaçlanmıştır. Bu bulanık çıkarım sisteminde, en çok kullanılan üyelik fonksiyon tipleri ile üyelik derecesinin çeşitlendirilerek, en uygun yaklaşımın ortaya konulması hedeflenmektedir. Düzlemsel kaymanın olduğu heyelan bölgesinin geriye dönük analizleri ile kaymayı oluşturan durumlar diğer çalışmalarda ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, kayma bölgesinin arkasında kalan bölgede yapılan sondaj verilerinden, ileriki dönemlerde oluşabilecek yenilmeler ve bu yenilmelerin bulanık mantık sistemiyle olabilirlikleri araştırılmıştır.

Bulanık çıkarım sisteminin modellenmesi için gerekli girdi parametreleri, sondajlardan alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarından ve önceki çalışmalardan elde edilmiştir. Sondajların fiziksel incelenmesi ve irdelenmesi yanında tek eksenli basma dayanımı ve kaya makaslama deneyleri ile dayanım parametreleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarının değişkenliği ve ilave olarak RocPlane analitik çözümlerin sonuçlarından bulanık mantık sistemi için alt-orta-üst girdi parametreleri belirlenerek kural tabanı oluşturulmuştur. Kural tabanı uzman görüşüne bağlı olması ve tahmin edilebilirliği çok zor olduğundan, uzman görüşü analitik çözüm sonuçlarına dayandırılarak ortaya konmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Araklı-Taşönü kalker ocağında 2005-2007 yılları arasında (3 Ekim 2005, 20 Mart 2006, 19 Ekim 2006) 3 farklı düzlemsel kayma meydana gelmiştir (Şekil 26). Kayan kütlenin kaymasına neden olan etkenler olarak 2000'li yıllar öncesinde sahada yapılan galeri patlatmaları nedeniyle ayna gerisinde oluşan çatlaklar, aşırı yağış ve şev eğiminin ve yüksekliğinin fazla olması yanında, düzlemsel kaymanın gerçekleştiği süresizlik düzlemindeki 15-110 cm kalınlığındaki kil tabakası gösterilmiştir (Erçikdi vd., 2006).



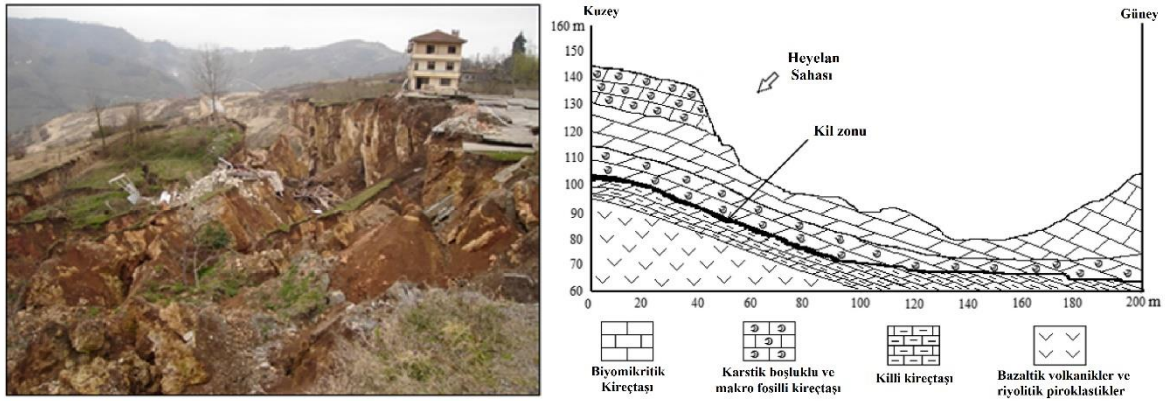
Şekil 26. Heyelan sahasından bir görünüm

Düzlemsel kaymadan sonra ocakta üretim durma noktasına gelmesi sonucunda, geriye kalan kalker rezervinin belirlenmesi için heyelanlı bölgenin arkasında 5 adet sondaj yapılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Öncelikli olarak sondaj verileri analiz edilmiş ve gerilme

çatlakları ile kil düzlemine dair izler aranmış ve kaya kalitesi ortaya konmuştur. 3 boyutlu yenilme düzlemi modelleri ile CAD (Computer Aided Design) modeller de oluşturulmuştur. Heyelanlı bölgenin yüzeyinden veya gerisinde kalan bölgede mevcut zemin özelliklerinden elde edilen verilerden daha fazla veri elde edilebileceğinden, doğrudan ve dolaylı olarak hesaplama yapılabilecek fiziksel ve mekanik deneyler yapılan sondajlardan alınan karotlara uygulanmıştır. Özellikle killi düzlemin veya düzlemsel kaymanın kalker formasyonu içine denk düşmesi, deneysel çalışmaların kalker formasyonuna denk gelen karotlarda yapılması gerektiği kanaati ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, karotların makro boşluklu kalker olması ve düşey yüklemeye geçmeden yatay yük altında yenilecek seviyede olması sebebiyle, üç eksenli basınç dayanım deneyinin yapılmasını imkansız hale getirmiştir.

2.2. Jeolojik Harita

Çalışma alanına ait bölge Kireçhane formasyonu içerisinde kalmaktadır (Ceryan, 2009). Ocak içinde heyelanlı bölgenin jeolojik formasyonu alttan üste volkanik breş, kil düzlemi, kireçtaşı (kalker) ve en üstte zemin (toprak) malzemesinden oluşmaktadır (Şekil 27).

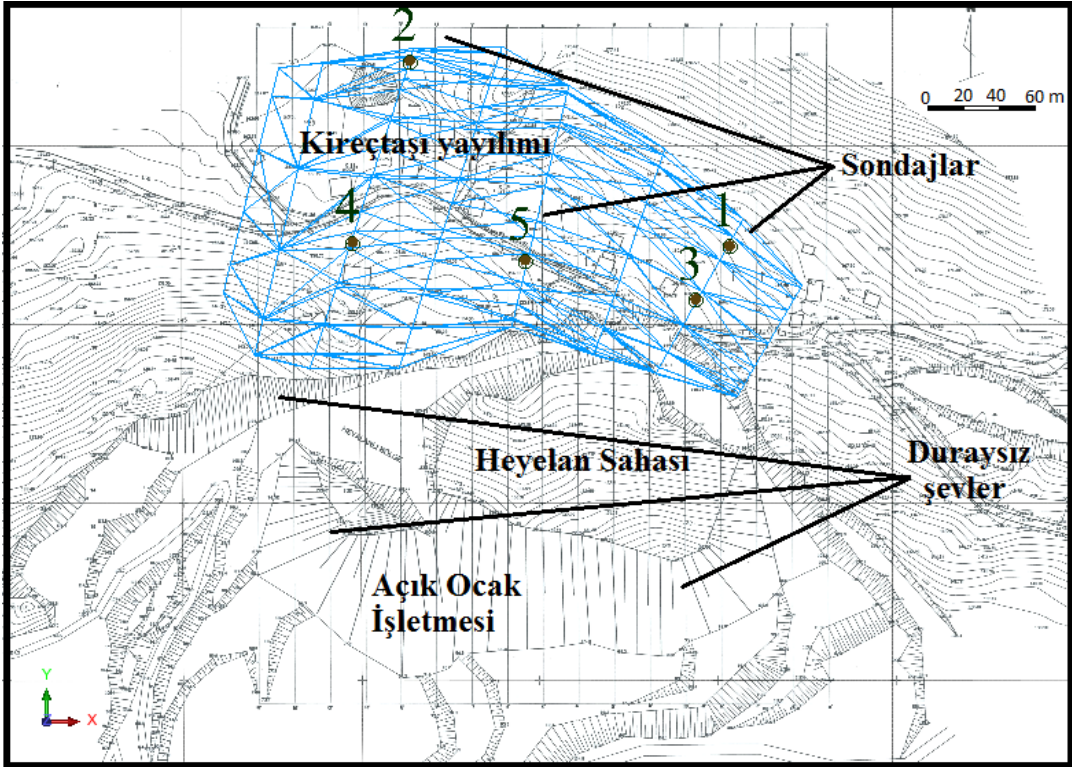


Şekil 27. Heyelan sahasının görünüm ve jeolojik kesiti (Karaman vd., 2013)

Sahada oluşan 3 ayır düzlemsel yenilmeden sonra, heyelan sahasının arkasında kalan bölgede yapılan 5 ayır sondaja ait loglar Şekil 28’de ve konumları Şekil 29’da verilmektedir.



Şekil 28. Heyelan sahasının arkasında yapılan sondajlar

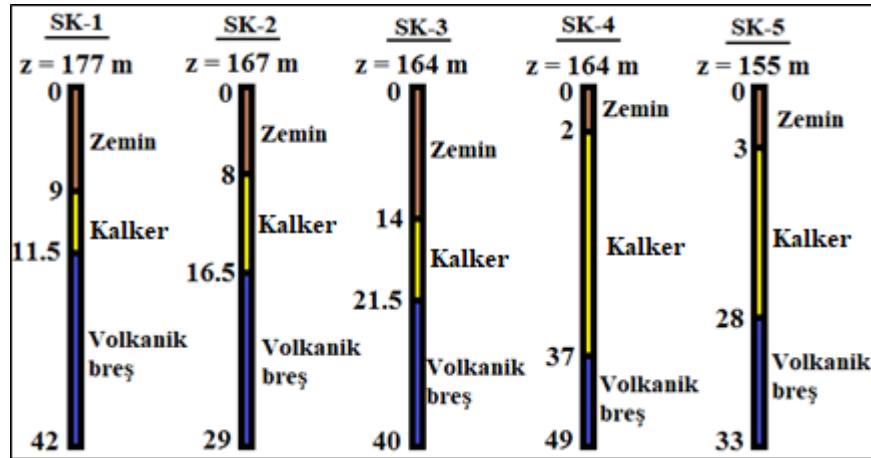


Şekil 29. Kalker ocağı içindeki heyelan sahası ve sondaj konumları

2.3. Sondaj Verilerinin Değerlendirilmesi

Yapılan sondajlar ayna gerisinde kaymaya neden olabilecek başka süreksizlik, fay düzlemi vb. ile jeoteknik analizlere yönelik tespitleri yapmak üzere incelenmeye alındıktan sonra deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Laboratuvar çalışmaları Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Laboratuvarında yapılmıştır.

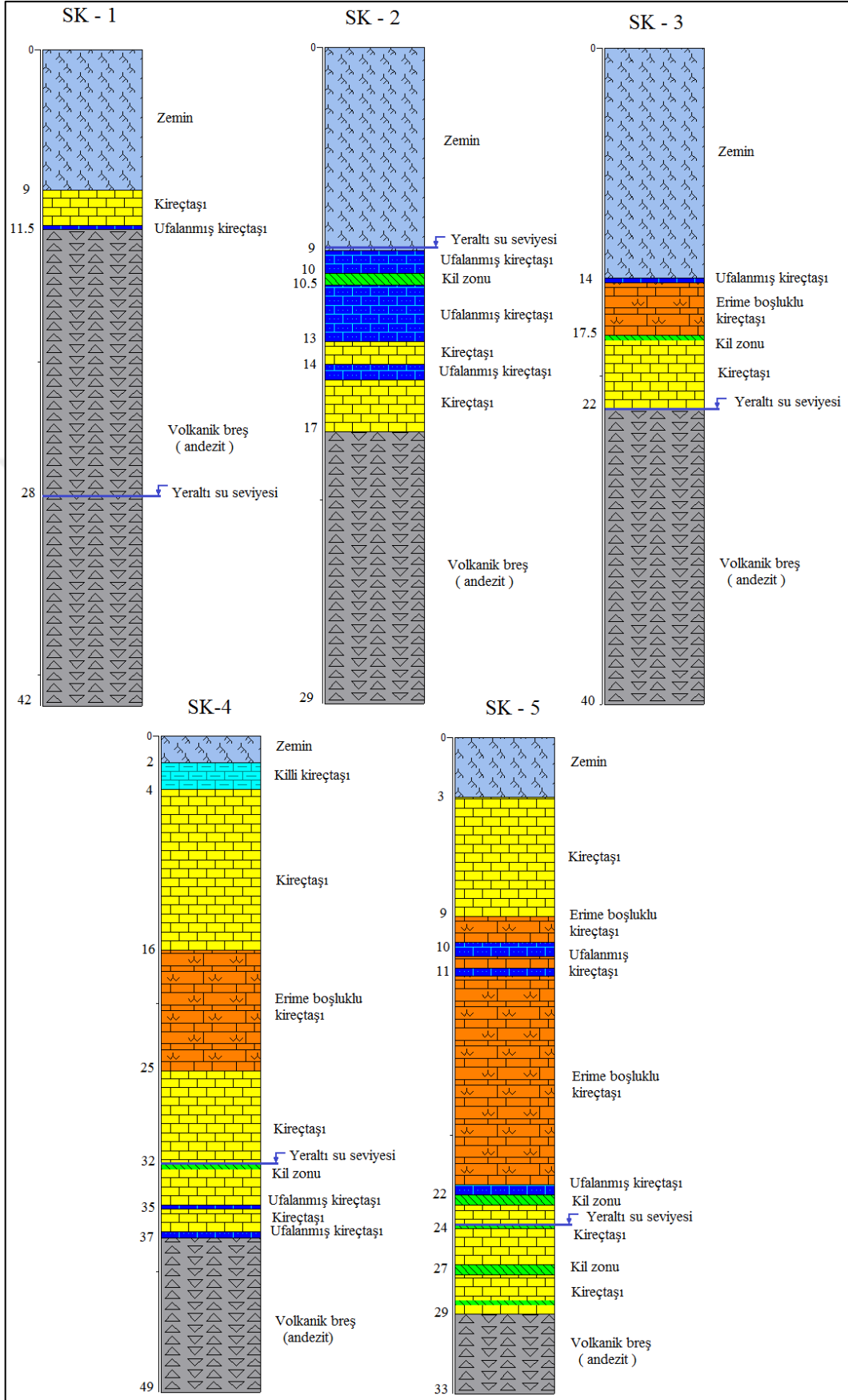
Toplamda 6 sondaj yapılan sahada, 6. sondaj heyelan bölgesinin ön kısmında ve daha önce açık ocak işletmeciliği yapılmış alanın içinde kaldığından, çalışmalarda değerlendirmeye alınmamıştır. Toplam 193 metre olan 5 sondaj değerlendirmeye alınarak ilgili çalışmalar yapılmıştır. Sondajlara ait zemin, kalker ve volkanik breş kalınlıkları ile sondajların yükselti değerleri Şekil 30'da verilmektedir. Ayrıca, toplam derinlik, kalker kalınlığı ile başlangıç ve bitiş metraj bilgileri Tablo 10'da verilmektedir. Sondajlara ait stratigrafik kesit Şekil 31'de verilmektedir. Yapılan sondajlar (SK-1, SK-2, SK-3, SK-4 ve SK-5) sırasıyla 42 m, 29 m, 40 m, 49 m ve 33 m derinlikte olup, 28 m, 9 m, 22 m, 32 m ve 24 m derinlikte yeraltı su seviyesi olduğu gözlemlenmiştir



Şekil 30. Sondajlara ait litolojik ve yükselti bilgileri

Tablo 10. Sondajlara ait derinlik ve kalınlık bilgileri

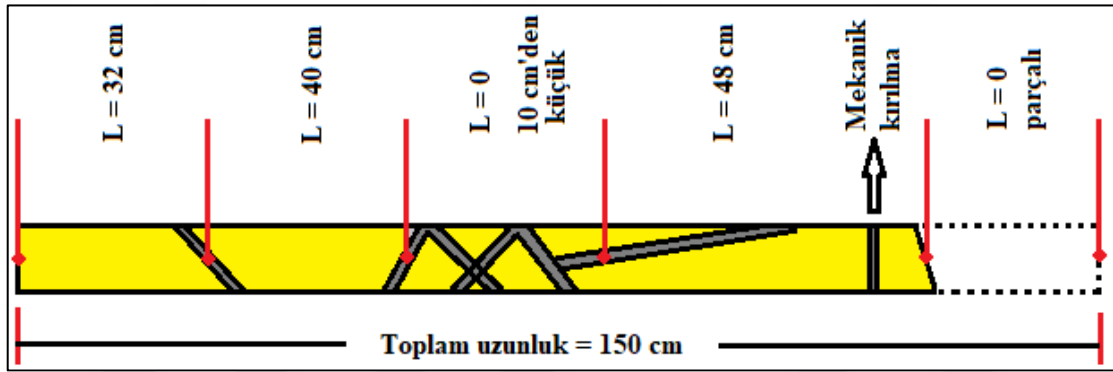
Sondaj No	Derinlik (m)	Kalker Başlangıç (m)	Kalker Bitiş (m)	Kalker Kalınlığı (m)
SK-1	42	9	11.5	2.5
SK-2	29	8.75	16.5	7.75
SK-3	40	14	21.5	7.5
SK-4	49	2	37	35
SK-5	33	3	28	25



Şekil 31. Sondajlara ait stratigrafik kesitler

2.4. Kaya Kalitesi Değeri (RQD)

Kaya Kalitesi Değeri (Rock Quality Designation – RQD) ilk olarak 1964 yılında, kaya kütleindeki süreksizlik veya kırıklı yapıların toplam kütleyle oranı olarak tanımlanmıştır (Deere, 1964). İlk olarak sondaj karot verilerinden süreksizlik ve kırıklı yapının toplam sondaj ilerlemesine oranı olarak ifade edilse de, benzer etki oluşturduğundan, tünellerde ve şev yüzeylerinde de süreksizlik ara uzaklıkları ölçülerek benzer şekilde RQD hesaplamaları yapılabilmektedir. RQD hesaplaması, genel olarak birim metredeki sondaj ilerlemesinde, kırıksız karot örneklerinin toplamının yüzde olarak ifadesidir (Şekil 32).



Şekil 32. Kaya kalitesi değeri (RQD)'nin hesaplama yöntemi

Sondaj verilerinden elde edilen uzunluk ölçümlerinde, RQD hesaplaması için kırıksız bütün yapısını koruyan her bir karot parçasının 10 cm (4 inç) ve üstü olanların toplamının toplam karot boyuna oranı RQD değerini vermektedir (Eşitlik 13).

$$RQD = \frac{\sum (10 \text{ cm ve üzeri sağlam karotların toplam uzunluğu})}{\text{Sondaj ilerlemesinin toplam uzunluğu}} * 100 (\%) \quad (13)$$

Şekil 32'de verilen örnek uzunluklarda 10 cm ve üzeri toplam uzunluk (32+40+48) 120 cm olduğu görülmektedir. Toplam (150 cm) uzunluğa oranı 80% olarak hesaplanır. İndeks olarak kabul edilmiş RQD hesaplamasında, RQD değerine göre kaya kütleinin kalitesine yönelik sınıflama indeksi Tablo 11'de verilmektedir.

Tablo 11. Kaya kalitesi değeri (RQD) sınıflama indeksi (Deere, 1964)

RQD (%)	Kaya Kalitesi
< 25 %	Çok zayıf
25 – 50 %	Zayıf
50 – 75 %	Orta
75 – 90 %	İyi
90 – 100 %	Çok iyi

2.5. İndeks ve Dayanım Özellikleri

Düzlemsel yenilmeye maruz kalmış çalışma sahasında, kaymaya neden olan killerin özellikleri ile mekanik özellikleri bu bölümde verilmektedir. Karot sandıklarından elde edilen örnekler genel olarak çok parçalı ve düşük dayanımlı olduklarından doğrudan dayanım değerlerine ulaşamayan örneklem kümesi için dolaylı dayanım deneyleri yapılmıştır.

2.5.1. Çalışma Alanındaki Killerin Özellikleri

Çalışma alanında daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen bilgilere göre, kil tabakasının %33-44'ü kum, %5-9.5'i silt ve %51-60.4'ü kil olarak tanımlanmıştır (Ceryan vd., 2009). Ayrıca, kil tabakası drenajsız koşullarda 10-21 kPa kohezyon ve 9-18 derece içsel sürtünme açısı değerleri arasında değiştiği ifade edilmiştir.

Killerin su içeriğinin değişimine yönelik davranışının ortaya konması için kıvam limitleri belirleme deneyleri yapılmıştır (Şekil 33). Kıvam limitleri Atterberg tarafından 1911 yılında geliştirilmiştir (Seed vd., 1964). Daha sonrasında Arthur Casagrande tarafından Casagrande cihazı geliştirilmiştir. Casagrande deneyi olarak ifade edilen bu yöntemde, kil malzemesinin su muhtevasının artırılmasıyla su içeriğinin hacime oranından katı, plastik ve sıvı sınırlarının belirlenmesi işlemidir. Çalışma sahasındaki heyelan bölgesinde mevcut killerin TS 1500 standardına göre sınıflandırması “düşük plastisiteli kil” olarak tanımlanmıştır. Daha önceki çalışmalarda killerin özellikleri irdelendiğinden, bu çalışmada detaylandırılmamıştır (Ceryan vd., 2009).



Şekil 33. Casagrande deneyi

2.5.2. Deney Örneklerinin Hazırlanması

Tez kapsamında olan sondaj sandıklarındaki karot çapları standart olduğundan (NQ-47.6 mm) deney standartlarına göre farklı boy oranlarında seçilen örnekler hazırlanmıştır. (Şekil 34).



Şekil 34. Deney örneklerine ait bir görsel

Örneklerin pürüzlü olan kesit yüzeyleri laboratuvar ölçekli kullanılan ASTM D4543 standartlarında üretilmiş olan karot kesme makinesinde düzeltilerek deneysel çalışmalara uygun hale getirilmiştir (Şekil 35).



Şekil 35. Karot kesme ve düzeltme makinesi

2.5.3. Yoğunluk, Gözeneklilik, Boşluk Oranı

Uluslararası kaya mekaniği topluluğunun önerilen metotları takip edilerek örnekler ait kuru ve doygun yoğunluklar karot numuneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (ISRM, 2007). Her bir ölçüm 5'er örnek kullanılarak tekrarlanmış ve ortalama değerler kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda suya doyurma işlemleri için saf su kullanılmış olup, kurutma işlemleri ise etüv içerisinde 105 ± 5 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Her iki durum içinde örnekler en az 24 saatlik süre boyunca açıklanan şartlarda bekletilmiş olmakla birlikte 2 saatlik sürelerle tekrar tartılan numunelerin kütlelerinde değişimin olmadığı noktada işlemler sonlandırılarak nihai tartımlar gerçekleştirilmiştir. Numunelerin boyutları ise 0,01 mm hassasiyete sahip kumpas yardımı ile yapılmıştır. Elde edilen kütle ve hacim değerleri baz alınarak yapılan hesaplamalarda ise Eşitlik 14-17 kullanılarak ilgili değerler hesaplanmıştır.

$$V_b = \frac{m_d - m_k}{\rho_{su}} \quad (14)$$

$$p_{gör} = \frac{V_b}{V} \times 100 \quad (15)$$

$$\rho_{kuru} = \frac{m_k}{V} \times 100 \quad (16)$$

$$\rho_{doygun} = \frac{m_d}{V} \times 100 \quad (17)$$

Burada;

$p_{gör}$: görünür gözeneklilik (%),

m_d : numune doygün kütle (g),

m_k : numune kuru kütle (g),

V : numune hacmi (cm^3),

M : görünür kütle (g),

V_b : boşluk hacmi (cm^3),

ρ_{su} : suyun yoğunluğu (g/cm^3),

ρ_{doygun} : doygün yoğunluk (g/cm^3),

ρ_{kuru} : kuru yoğunluk (g/cm^3) ' tur.

2.5.4. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Tek eksenli basınç dayanımı, bir malzemenin tek yönde uygulanan basınca karşı dayanma gücünü ifade eder. Bu özellik, malzemenin yapısı ve türüne göre değişebilir ve malzemenin uygulanacak olan yükleri taşıma kapasitesini belirler. Bu nedenle, tek eksenli basınç dayanımı önemlidir çünkü malzemenin güvenilir bir şekilde kullanılması için gerekli olan minimum dayanma gücünü belirler ve malzemenin çalışma koşullarına uygunluğunu garanti eder.

Tek eksenli basınç dayanımı ve kırılma açısı, bir malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir ve beraberinde malzemenin dayanma gücü ve kırılma eğilimini belirlemektedir. Kırılma eğiminde açı değeri malzemenin kırılma sırasında uygulanabilecek en küçük yük miktarını belirlemek için kullanılmaktadır.

Kaya şevleri, doğal afetlere, çevresel etkilere ve insan etkilerine maruz kalabilir ve bu nedenle dayanıklılık ve güvenilirlik önemlidir. Tek eksenli basınç dayanımı, kaya şevlerinin tek yönde uygulanabilecek yükleri taşıma kapasitesini belirler. Bu nedenle, tek eksenli basınç dayanımı, kaya şevlerinin güvenli bir şekilde tasarımı ve inşası için önemli bir parametredir. Kaya şevlerinin tek eksenli basınç dayanımı, malzemenin doğal afetlere, çevresel etkilere ve insan etkilerine karşı dayanma gücünü belirler ve kaya şevlerinin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar.

TEBD deneyleri KTÜ Maden Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan hidrolik pres ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler önerilen metotlara uygun olarak alınan karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (ISRM, 2007) (Şekil 36). Deneyler sonucunda elde edilen yenilme kuvvetleri ve kesit alanları verilerinden Eşitlik 25 ile tek eksenli basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 36. Tek eksenli basınç dayanım deney cihazı (hidrolik pres)

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (25)$$

Burada;

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

F : Yenilme yükü (N)

A: Numune kesit alanı (mm²)'dır.

2.5.5. Kaya Makaslama Deneyi

Kaya makaslama deneyi, kayalarda süreksizlik yüzeylerinin belirli normal yük altında makaslama yükünün tespiti amacıyla kullanılmaktadır. Süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının belirlenmesi tünellerde, barajlarda ve şevlerde oldukça önemlidir. Süreksizlik düzlemine direk olarak yüklenen normal yük altında makaslama dayanımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kaya makaslama gerilmesi ile normal gerilme arasındaki fonksiyondan elde edilen kohezyon ile içsel sürtünme açısı değerleri şev duraylılık

problemlerinde limit denge sınırı analizlerinde kullanılabilmektedir (Karpuz ve Hindistan, 2006).

Makaslama dayanımı normal ya da süreksizlik yüzeyine dik gelen kuvvetlere karşı oldukça hassas olup, normal kuvvet arttıkça makaslama kuvveti de artmaktadır. Sağlam, dolgu malzemesi içeren ya da süreksizlik ile ayrılmış örnekler uygulanan bir deney türüdür. Kaya numunelerinin veya süreksizlik düzlemlerinin tepe (pik) ve kalıcı (residual) makaslama dayanım değerleri, düzleme etki eden gerilmelerin bir fonksiyonu olarak belirlenmektedir. Deney sonucu genel olarak şev duraylılık problemlerinin limit denge analizlerinde ve temel tasarımında kullanılmaktadır.

Deneyin hazırlık aşamasında örnekler doğrudan makaslama deney aletine ait kalıplara dökülen çimento içine, süreksizlik düzlemleri yatay olacak şekilde yerleştirilmelidir (Şekil 37). Dikey yönde yüklenen kuvvet süreksizlik düzlemine dik olarak gelmelidir. Sabit yük altında kırılma gerçekleşene kadar yatay yönde yükleme yapılmalıdır. Deney prosedürü önerilen metotlara uygun cihaz kullanılarak yapılmıştır (ISRM, 2007) (Şekil 38).



Şekil 37. Doğrudan makaslama deneyine tabi tutulan örnekler



Şekil 38. Doğrudan kaya makaslama dayanımı cihazı

2.6. Bulanık Mantık Çalışmaları

Yapay zekanın içerisinde yer alan bulanık mantık çalışmalarında iki ayrı modelleme sistemi ele alınmaktadır. ANFIS (Adaptive Neural Fuzzy Inference System – Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi) yönteminde, Takagi-Sugeno bulanık çıkarım temeline dayanan bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmaktadır. FIS (Fuzzy Inference System – Bulanık Çıkarım Sistemi) ise bulanık mantık sistemini Mamdani, Takagi-Sugeno gibi farklı metotlarla ve uzman görüşü ile oluşturulan kural tabanı çerçevesinde uygulayan bir sistemdir. Temel farklılık olarak, ANFIS’te kural tabanını oluşturmak için yapay sinir ağları algoritmalarından faydalanılmaktadır. İki sistemde de üyelik fonksiyonlarından faydalanılmaktadır.

Bulanık sistemde kullanılan üyelik fonksiyonları, üyelik değerinin doğal ve kolay anlaşılabilir şekilde tanımlanmasına ve bulanık bir şekilde ifade edilmesine olanak sağlar. Ayrıca, bu fonksiyonlar, verilerin dağılımını belirli bir şekilde yansıtmak için kullanılabilir ve bulanık sistemlerin güncel veriler ile eşleştirilmesini ve çıkarımlarının yapılmasını kolaylaştırır. Bulanık mantık yaklaşımında çok sayıda üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda en fazla kullanılan bulanık sistem üyelik fonksiyonları üçgen ve Gaussian üyelik fonksiyonlarıdır. Tez kapsamında en fazla kullanılan iki üyelik fonksiyonunun yanı sıra yamuk üyelik fonksiyonunun etkinliği de araştırılmıştır. Bunun nedeni, bu üç fonksiyonun basit, anlaşılabilir ve uygulamalarda kolayca kullanılabilir olmalarıdır. Ayrıca, bu fonksiyonlar geniş bir veri dağılımını yansıtabilme kapasitesine sahiptir ve bulanık sistem modellerinde veri girdisi ile üyelik değerleri arasındaki ilişkiyi tanımlama için güçlü bir araç sunmaktadır.

Üçgen üyelik fonksiyonunda, üyelik değerinin artmasını ve azalmasını belirli bir noktada belirgin bir şekilde yansıtan bir şekil olarak tanımlanır. Bu fonksiyon 0 ile 1 arasında değer alır ve üyelik değeri 1 olan nokta belirli bir değer olarak tanımlanır. Yamuk üyelik fonksiyonu, üyelik değerinin ani bir şekilde artmasını ve azalmasını belirli bir noktada belirgin bir şekilde yansıtan bir şekil olarak tanımlanır. Bu fonksiyon 0 ile 1 arasında değer alır ve üyelik değeri 1 olan nokta belirli bir değer olarak tanımlanır. Gaussian üyelik fonksiyonu ise, üyelik değerinin belirli bir ortalama ve standart sapma değerleri ile tanımlanmış bir dağılıma uygun olarak değiştiğini belirten bir şekil olarak tanımlanır. Bu

fonksiyon da 0 ile 1 arasında değer alır ve üyelik değeri en yüksek olan nokta belirli bir ortalama değeri olarak tanımlanır.

Bulanık Sistemlerde bir kural “if-then (eğer-o halde)” tipinde bir önermedir ve bulanık sistem tarafından yapılan bir kararı veya tahmini desteklemek için kullanılır. Her bir kural, girdi değişkenleri ve bunların üyelik değerleri ile ilgili bir koşul ve bu koşula uygun olarak bir sonuç önerisi içerir. Bulanık sistem tarafından yapılan her tahmin, bir veya daha fazla kuralın uygunluk değerleri üzerinden hesaplanır ve bu uygunluk değerleri sonuç önerilerini etkiler. Bu çalışmanın ilk bulanık mantık modelinde oluşturulan bulanık sistemde 24 adet kural tanımlanmıştır. Bu verilen kurallar bir bulanık mantık sistemi tarafından yapılan bir değerlendirme modelidir. Bu kurallarda, "İçselSürtünmeAçısı", "Kohezyon" ve "BirimHacimAğırlık" gibi girdilerin belirli değerleri belirli bir "GüvenlikKatsayısı" sonucu ile ilişkilendirilmektedir. Bu kurallar:

1. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Düşük) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
2. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Orta) & (BirimHacimAğırlık=Düşük) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
3. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Yüksek) & (BirimHacimAğırlık=Düşük) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
4. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
5. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
6. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Orta) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
7. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Orta) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
8. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Yüksek) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
9. (İçselSürtünmeAçısı=Orta) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Düşük) → (GüvenlikKatsayısı=Sınırdı)
10. (İçselSürtünmeAçısı=Orta) & (Kohezyon=Orta) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Sınırdı)
11. (İçselSürtünmeAçısı=Orta) & (Kohezyon=Yüksek) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Sınırdı)
12. (İçselSürtünmeAçısı=Orta) & (Kohezyon=Orta) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Sınırdı)
13. (İçselSürtünmeAçısı=Orta) & (Kohezyon=Yüksek) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Sınırdı)
14. (İçselSürtünmeAçısı=Yüksek) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Düşük) → (GüvenlikKatsayısı=Güvenli)
15. (İçselSürtünmeAçısı=Yüksek) & (Kohezyon=Orta) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Güvenli)
16. (İçselSürtünmeAçısı=Yüksek) & (Kohezyon=Yüksek) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Güvenli)
17. (İçselSürtünmeAçısı=Yüksek) & (Kohezyon=Yüksek) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Güvenli)
18. (İçselSürtünmeAçısı=Yüksek) & (Kohezyon=Orta) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Güvenli)
19. (İçselSürtünmeAçısı=Düşük) & (Kohezyon=Yüksek) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Güvensiz)
20. (İçselSürtünmeAçısı=Orta) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Sınırdı)
21. (İçselSürtünmeAçısı=Orta) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Sınırdı)
22. (İçselSürtünmeAçısı=Yüksek) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Orta) → (GüvenlikKatsayısı=Güvenli)
23. (İçselSürtünmeAçısı=Yüksek) & (Kohezyon=Düşük) & (BirimHacimAğırlık=Yüksek) → (GüvenlikKatsayısı=Güvenli)
24. (İçselSürtünmeAçısı=Yüksek) & (Kohezyon=Orta) & (BirimHacimAğırlık=Düşük) → (GüvenlikKatsayısı=Güvenli)

Şev duraylılık analizlerinin bulanık mantık yöntemine entegre edilmesinde, limit denge analizi yöntemi kullanılmıştır. Taşönü kalker ocağından alınan sondaj verilerinden elde edilen bilgiler Tablo 12’de verilmektedir.

Tablo 12. Sondajlara ait kritik veriler

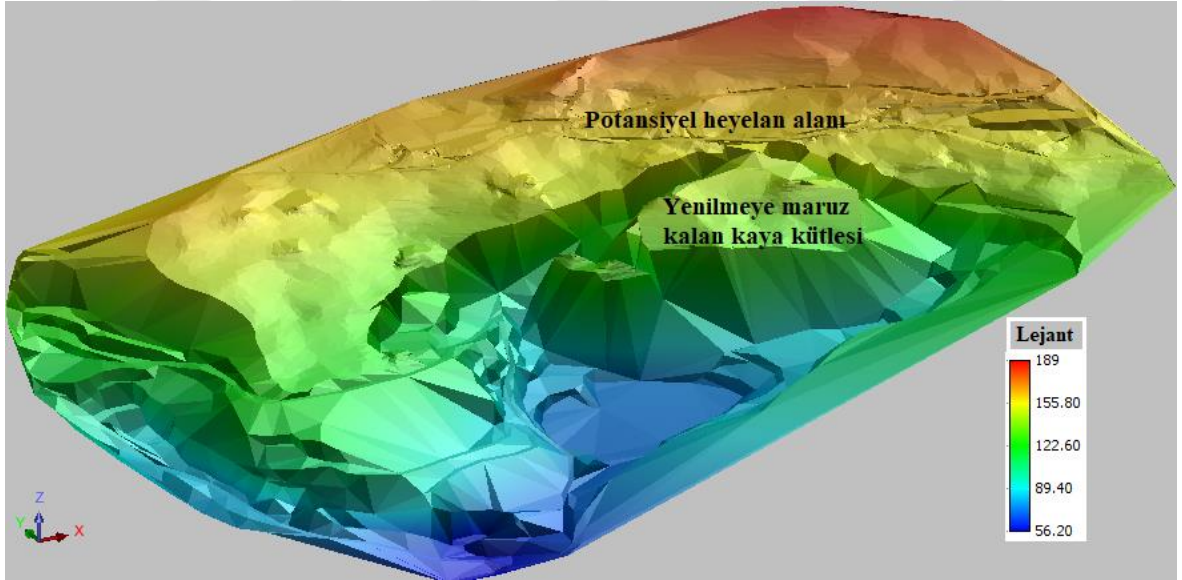
Metrajlar	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5
Toplam sondaj ilerlemesi	42	29	40	49	33
Makaslama zonu	-	-	17	34.5	24.5
Makaslama zonu eğimi	-	-	38	54	45
Kalker başlangıç	9	8	14	2	3
Kalker bitiş	11.5	16.5	21.5	37	28

Limit denge yönteminde, daha önce belirtildiği üzere, değişkenler şev yüksekliği, şev eğimi, yenilme düzlemi eğimi, kayan kütlelerin ağırlığı, kayma yüzeyi alanı, içsel sürtünme açısı, kohezyon olarak ifade edilmektedir. Tez çalışmasında, çok fazla sayıda değişken tanımlamak yerine, problemin bulanık mantık sisteminde modellenmesini kolaylaştırmak için değişkenleri azaltma yoluna gidilmiştir. Taşönü ocağının yüzey modeli ile kayma noktalarının derinlikleri ve kayan kütlelerin alanı (birim metrede hacime karşılık gelmekte) değerleri, ocağa özel uygulama için sabit olarak alınmıştır. Böylece, hem daha az değişken ile bulanık mantığın şev duraylılığı yaklaşımı irdelenmiş, hem de değişkenlerin değişiminin sonucu ne derece değiştirdiği ortaya konmaya çalışılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Arazinin Modellenmesi

Araklı-Taşönü kalker ocağındaki 3 farklı düzlemsel kayma sonrası, ocağın heyelanlı bölgesinden hammadde temini durma noktasına gelmiştir. Kayan kütle sonrası oluşan yeni şevlerin arkasında yeni gerilme çatlakları tespit edilmiştir. Bu gerilme çatlakları da ilk gözlemlere göre kayma eğiliminde olmakla birlikte, kayan kütle şevin ön tarafında topuk görevi görmektedir. İlk incelemelere göre, üretime yönelik çalışmalar kayan kütlelenin uzaklaştırılması ile başlanması durumunda, arkada yeni bir düzlemsel kayma oluşacağı yönündedir. Arazi topografyası ve heyelan sonrası yüzey ölçümlerinden alınan verilerle, daha iyi değerlendirme yapabilmek için, arazinin 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. 3 boyutlu model için bölüm bünyesinde bulunan lisanslı Netcad GIS ve Geovia Surpac 6.2 programları kullanılmıştır (Şekil 39).



Şekil 39. Taşönü kalker ocağının 3 boyutlu görünümü

Düzlemsel yenilme sonrası ocakta heyelan bölgesinin arkasında kalan bölgede (potansiyel heyelan alanı) geriye kalan rezerv durumunu değerlendirmek için 5 adet sondaj yapılmıştır. Aşkale Çimento tarafından sondajlar üzerinde yapılan fiziksel ve kimyasal

analizlerden sonra sondaj karotları, heyelan sonrası durumu ortaya koymak ve bu çalışma verilerini oluşturmak üzere kullanılmıştır.

3.2. Sondajlardan RQD Değerinin Elde Edilmesi

Araziden alınan sondajlar üzerinde yapılan çalışmalarda, ilk olarak sondaj karotları üzerinde süreksizlik mesafeleri ölçülerek kaya kalite değeri (RQD) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 13). Ayrıca, tüm sondaj loglarına ait karot sandıklarındaki ilerleme mesafelerine göre hesaplanan RQD tabloları Ek Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 13. Sondajlarda “kalker” ve “toplam” mesafe için RQD değerleri ve kaya kalitesi sınıflandırması

Sondaj No	RQD (%) (Kalker)	Kaya Kalitesi (Kalker)	RQD (%) (Toplam)	Kaya Kalitesi (Toplam)
SK-1	20.40	Çok zayıf	50.58	Orta
SK-2	26.13	Zayıf	44.15	Zayıf
SK-3	18.57	Çok zayıf	42.73	Zayıf
SK-4	50.09	Orta	40.13	Zayıf
SK-5	36.72	Zayıf	34.87	Zayıf

RQD değerleri incelendiğinde, sondaj loglarından SK-1 için toplam RQD ile SK-4 için kalker RQD değerleri “orta” olmasına rağmen, sınıflandırma aralıklarında zayıf bölgesinin sınırında, “zayıf” bölgesine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın ana amacı olmamasına rağmen, RQD değerleri için de aralıkların, bulanık olarak bakıldığında, “orta” sınıfına çok düşük bir üyelik derecesi ile dahil olduğu çıkarımı yapılabilmektedir.

3.3. Sondaj Verilerinin İrdelenmesi

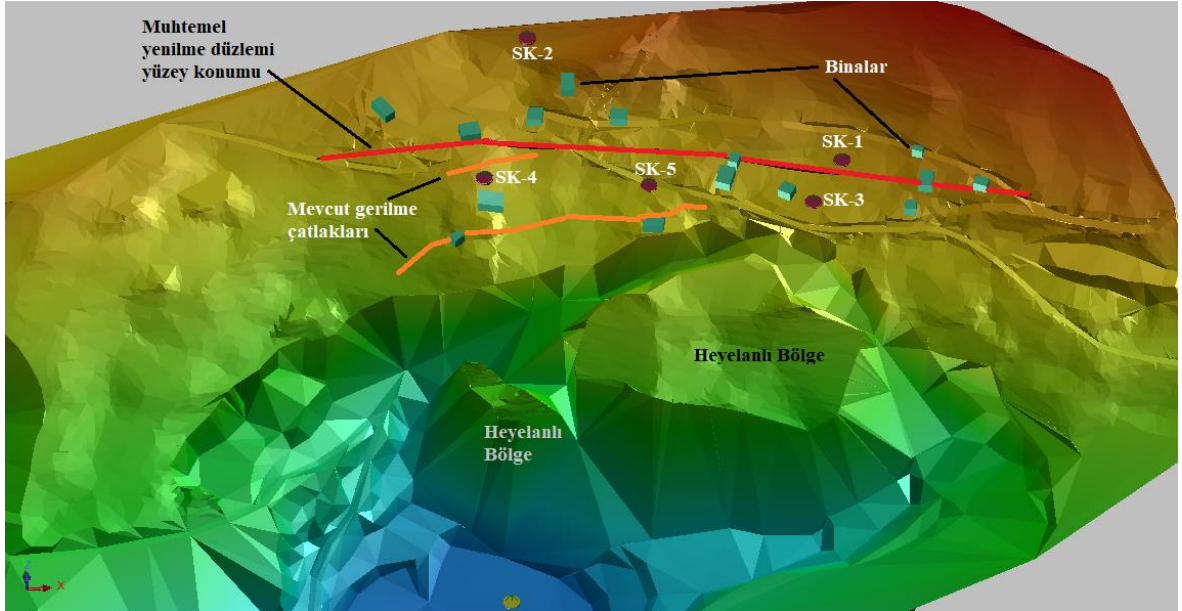
Sondaj loglarının detaylı incelenmesi sırasında, SK-3, SK-4 ve SK-5 sondajlarında sırasıyla 17, 34.5 ve 24.5.nci metrelerde makaslama zonları tespit edilmiştir (Şekil 40). Makaslama zonlarının eğim açıları sırasıyla 38, 54 ve 45° olarak ölçülmüştür. Sondaj noktalarının heyelan bölgesinin arkasında olması ve belirli derinliklerde bu makaslama zonlarının varlığı, arkada kalan bölgenin kaymaya eğimli olduğunun işareti olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, arazide yapılan incelemelerde, daha önce meydana gelen veya

düzlemsel yenilme sonrası ortaya çıkan ve genişliği yaklaşık 60 cm'yi bulan gerilme çatlakları tespit edilmiştir.



Şekil 40. Sondaj loglarından tespit edilen makaslama zonları

Bu verilerden yola çıkarak, mevcut durumu 3 boyutlu olarak görselleştirmek için, sondaj verileri ve mevcut gerilme çatlakları ile makaslama zonları (eğim açılarıyla birlikte), arazideki binalar da dahil edilerek Surpac programında modellenmiştir (Şekil 41).



Şekil 41. Sondaj konumları, mevcut gerilme çatlakları, muhtemel yenilme düzleminin yüzey konumunun 3 boyutlu görseli

[illegible]

Yoğunluk tayini yapılan numuneler, ayrıca ultrasonik dalga hızı ve tek eksenli basınç dayanım deneylerinde kullanılmıştır. Sondaj logları çok kırıklı – süreksiz yapıda ve genel olarak zayıf RQD değerine sahip olduğundan, sınırlı sayıda tek eksenli basınç dayanımı deneyi için uygun boy/çap oranına sahip örnekler elde edilebilmiştir. Tablo 3.2’de kalker formasyonu ve muhtemel makaslama zonu mesafeleri dikkate alınarak bilgiler verilmektedir. Çalışma kapsamında yapılan tüm yoğunluk deney sonuçları Ek Tablo 2’de verilmektedir. Ortalama yoğunluk değerleri kalker için kuru durumda 2.134 gr/cm^3 , doygun durumda 2.26 gr/cm^3 olarak hesaplanmıştır. Doygun kütle ve kuru kütle değerleri kullanılarak hesaplanan doygun ve kuru birim hacim ağırlık, gözeneklilik ve boşluk oranları Tablo 15’te verilmektedir.

Tablo 15. Doygun-kuru birim hacim ağırlık, gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri

Numune No	Doygun birim hacim ağırlığı (kN/m^3)	Kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3)	Gözeneklilik (%)	Boşluk oranı (%)
4-3-15	21.46	19.44	20.67	26.05
4-4-21	21.50	20.72	7.91	8.59
4-2-12	20.19	18.03	21.99	28.18
4-5-23	20.62	19.99	6.41	6.85
4-5-25	24.93	24.39	5.55	5.88
4-5-26	24.68	24.02	6.75	7.23
4-6-28	25.16	24.75	4.14	4.32
5-3-17	21.06	20.18	8.94	9.82
5-2-6	21.51	19.56	19.91	24.86
5-2-8	21.39	19.40	20.27	25.43
5-6-27	25.25	24.89	3.65	3.78
5-2-9	20.10	17.87	22.73	29.42
5-3-13	22.27	19.71	26.18	35.46
5-5-23	23.77	22.67	11.18	12.58
5-4-18	20.98	20.32	6.67	7.15
5-5-24	21.79	20.54	12.77	14.64
5-4-19	20.29	19.38	9.29	10.24

Kalker formasyonuna ait örneklerden elde edilen verilere göre, gözeneklilik oranı 4-26% arasında, boşluk oranı 4-35% arasında değişmektedir. Tüm örneklerle ait doygun ve kurum birim hacim ağırlıkları ile gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri ayrıca Ek Tablo 3’te verilmektedir.

3.5. Sondajlardan Kaya Malzemesinin Dayanım Özellikleri

3.5.1. Tek Eksenli Basma Dayanımı Deneyi

Laboratuvarında yapılan fiziksel ve mekanik deneylerde, arazide yapılan sondaj logları kullanılmıştır. Sondajlar NQ tip (47.6 mm) karot çapına sahip tijlerle yapılmıştır. Her karot sandığından alınan örnekler deney kriterlerine sağlama koşullarına göre sınıflandırılarak ve numaralandırılarak kategorilere ayrılmıştır. Karot örneklerinin çapı ortalama değer olarak belirli olduğundan, örnekler boylarına göre sınıflandırılarak (Şekil 42) deneyler öncesi hazır hale getirilmiştir (Şekil 43). Ayrıca, boy-çap oranını tek eksenli basınç deneyi için uzunluğu yaklaşık 15 cm'yi aşan parçalar kesilerek diğer deneyler için kullanılmıştır.



Şekil 42. Karot sandıklarından seçilerek sınıflandırılan örnekler



Şekil 43. Tek eksenli basınç deneyi için sınıflandırılan örnekler

Örneklerin numaralandırılmasında, X-Y-Z sayı yöntemi oluşturulmuştur. Burada X: sondaj numarasını, Y: ilgili sondaja ait sandık numarasını ve Z’de kaçınıcı metreden alındığını temsil etmektedir. Örnek olarak Şekil 51’deki görselden 5-2-6 değerlendirilirse, “5 numaralı sondajdan (SK-5), 2 numaralı karot sandığından ve sondajın 6.metresinden alınan örnektir” olarak ifade edilmektedir.

Tek eksenli basınç dayanımı hesaplamalarında, genel olarak boy/çap oranına uygun çok fazla sayıda örnek oluşturulamadığından, kısıtlı sayıda TEBD deneyi için uygun örnekler alınarak hesaplamalar yapılmıştır (Tablo 16). Deney sonuçlarının tamamı Ek Tablo 4’de verilmektedir. Doğrudan elde edilemeyen TEBD değerleri için tez kapsamında yapılan diğer deneyler ile dolaylı yoldan elde edilmiştir.

Tablo 16. Tek eksenli basınç dayanım deneyi sonuçları

Numune No	Çap (mm)	Boy (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Kırılma Açısı	Alan (mm ²)	TEBD (Mpa)
1-3-15	47.6	127.4	13.51	81	1779.52	7.59
5-2-8	46.2	113.95	23.84	85	1676.39	14.22
5-3-13	46	144.7	12.64	75	1661.90	7.61
5-5-23	46.8	134.15	26.37	65	1720.21	15.33
5-4-19	46.4	119.25	14.71	56	1690.93	8.70
4-2-8	46.2	117.3	29.52	77	1676.39	17.61
4-4-21	46.5	121.75	23.33	60	1698.23	13.74
4-5-25	46.9	133.95	37.5	60	1727.57	21.71
4-6-30	47.2	130.3	51.75	68	1749.74	29.58

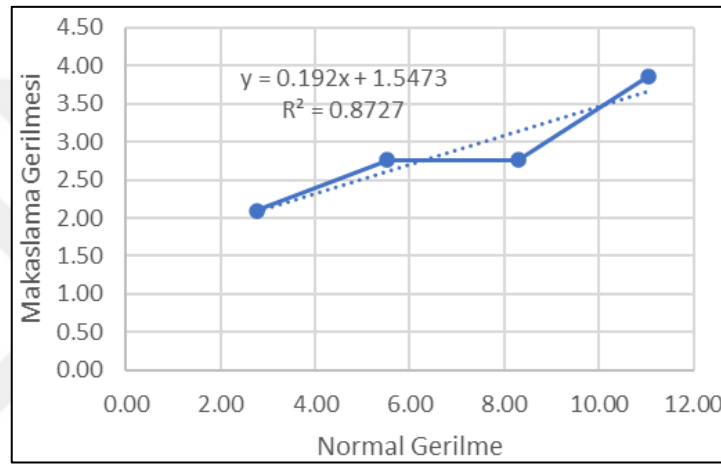
Tek eksenli basınç dayanım deney sonuçlarından hesaplanan tek eksenli basınç dayanım değeri ve kırılma açısı değerleri kullanılarak normal gerilme, makaslama gerilmesi, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri hesaplanmıştır (Tablo 17) (Ek Tablo 5).

Tablo 17. Kohezyon, içsel sürtünme açısı, normal ve makaslama gerilmesi değerleri

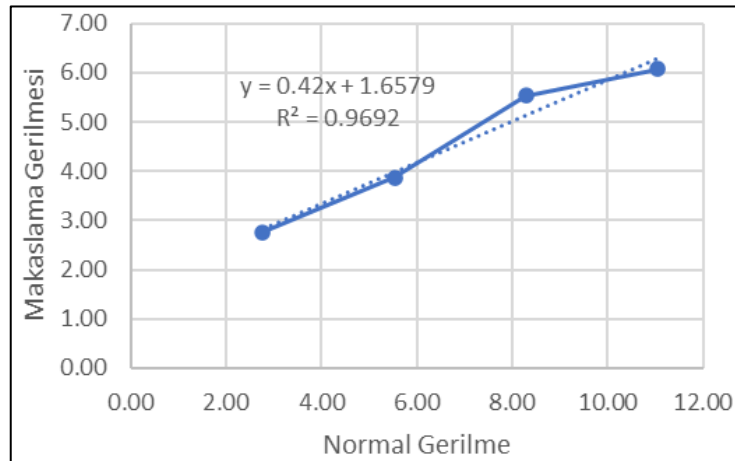
Numune No	TEBD (MPa)	Θ (°)	C (MPa)	ϕ (°)	Normal Gerilme (MPa)	Makaslama Gerilmesi (MPa)
1-3-15	7.59	9	3.24	72	0.19	1.17
5-2-8	14.22	5	6.52	80	0.11	1.23
5-3-13	7.61	15	2.92	60	0.51	1.90
5-5-23	15.33	25	4.88	40	2.74	5.87
5-4-19	8.70	34	2.31	22	2.72	4.03
4-2-8	17.61	13	7.00	64	0.89	3.86
4-4-21	13.74	30	3.97	30	3.43	5.95
4-5-25	21.71	30	6.27	30	5.43	9.40
4-6-30	29.58	22	9.97	46	4.15	10.27

3.5.2. Kaya Makaslama Deneyi

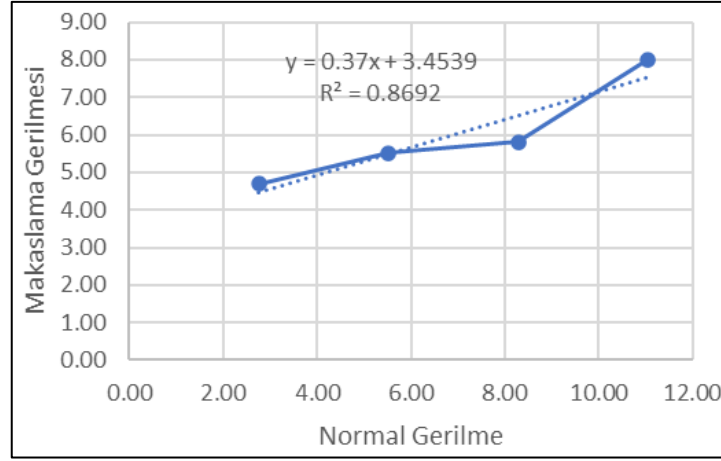
Kaya makaslama deneyinde, 7 ayrı örnek makaslama deneyi için deney standardında hazırlanarak deney için uygun kalıplar oluşturulmuştur. Düşey yönde, 5-10-15-20 kN yük altında makaslama yükü verilerek belirli aralıklardaki yer değiştirmelere karşılık gelen makaslama yük değerleri okunmuştur. Deney sonucunda elde edilen dayanım değerleri ile yer değiştirme değerlerine ilişkin, normal gerilme-makaslama gerilmesi grafikleri Şekil 44-47'de verilmektedir.



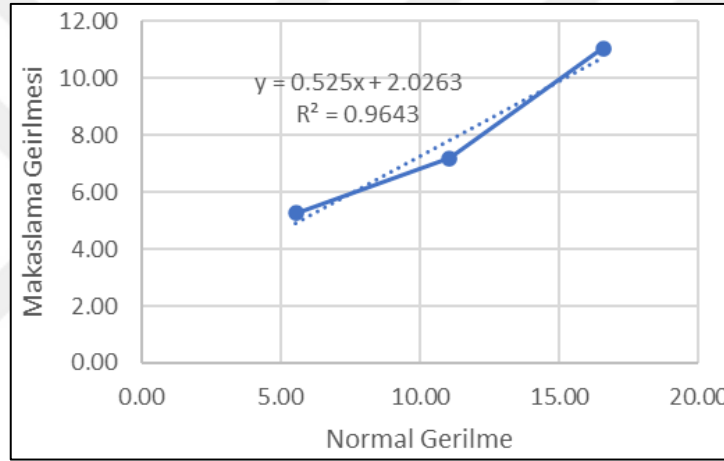
Şekil 44. 1-3-13 nolu örnek normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi



Şekil 45. 2-4-18 nolu örnek normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi



Şekil 46. 4-6-28 nolu örnek normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi

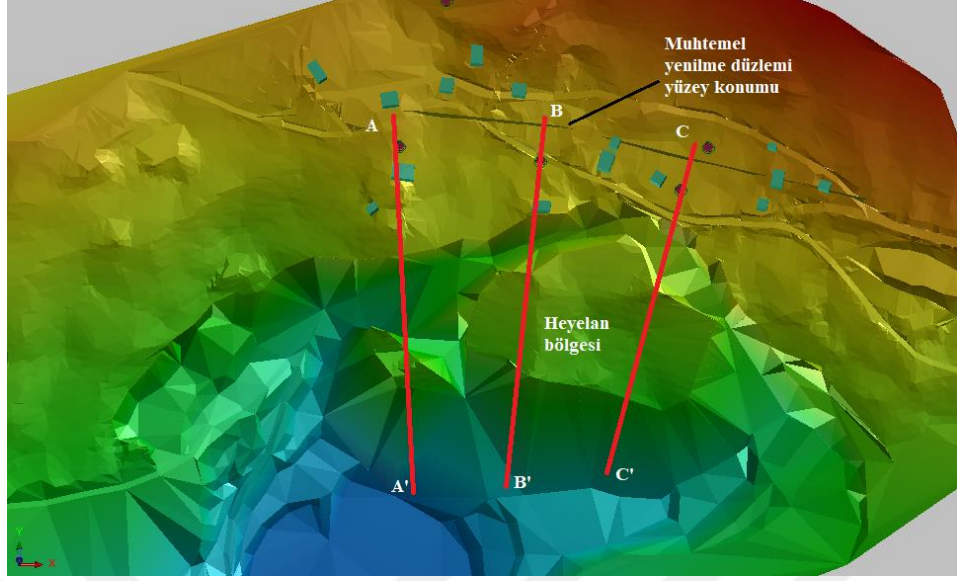


Şekil 47. 5-5-25 nolu örnek normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi

Kaya makaslama deneyinde süreksizlik içeren yüzeylerin doğrudan makaslama yüküne paralel yönde maruz kalması ile sonuçlar elde edilmektedir. Deney sonucunda kohezyon değeri 1.54-3.45 MPa arasında değişirken, içsel sürtünme açısı 12-28° arasında değişmektedir.

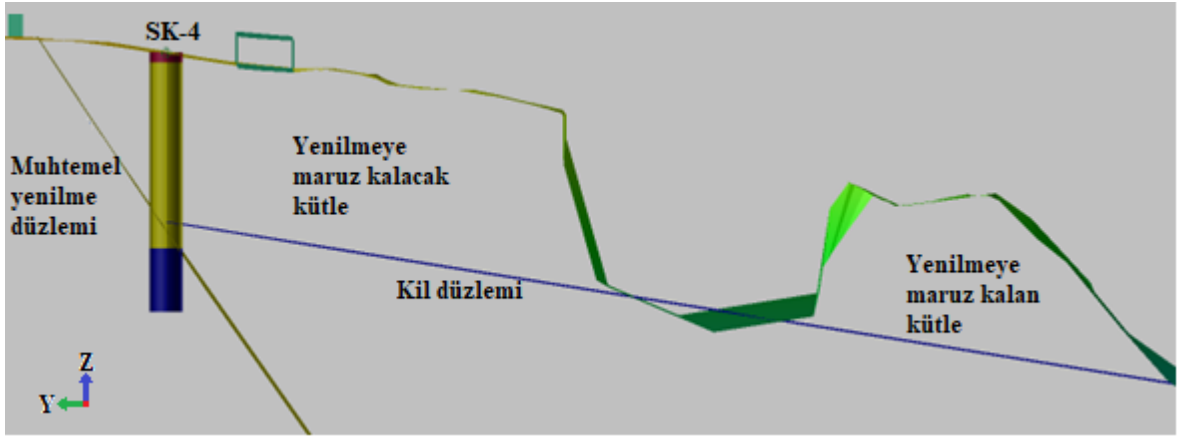
3.6. Bulanık Mantık Sistemi ile Şev Duraylılığı Yaklaşımı

Şev duraylılığında bulanık mantık yaklaşımına geçmeden önce limit denge yöntemindeki değişkenlerden, Taşönü kalker ocağına özel sabit kabul edilen değerler elde edilmiştir. Öncelikle arazi yüzeyinin 3 boyutlu modeli ve muhtemel yenilme düzlemi tespit edilen sondaj bilgileri ile muhtemel yenilme düzleminin yüzey konumu görselleştirilmiştir. Sonrasında sondajları da içine alan 3 ayrı kesit oluşturulmuştur. (Şekil 48).

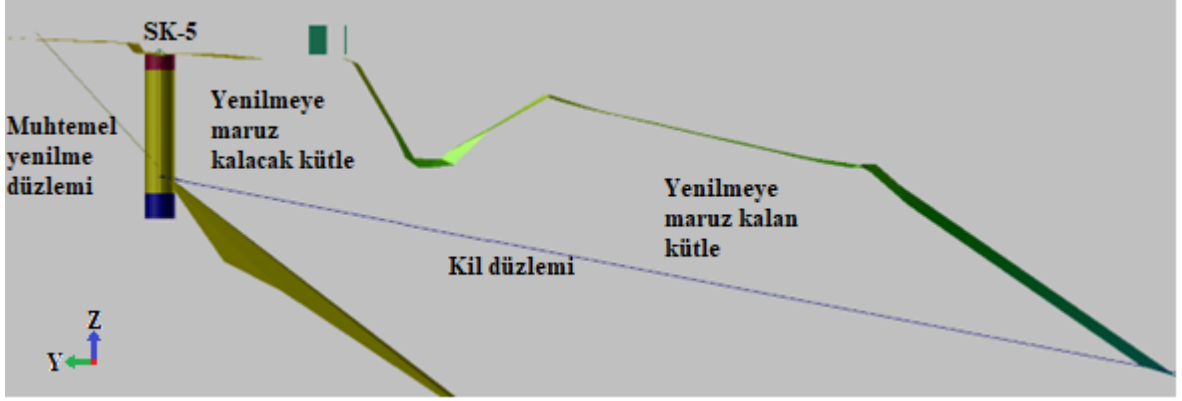


Şekil 48. Taşönü kalker ocağından alınan kesitlerin konumu

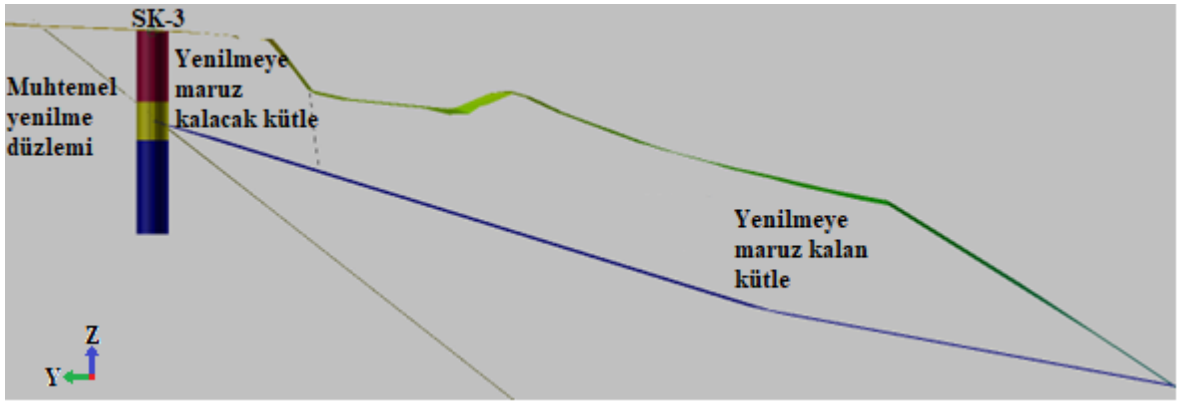
Yüzey modeli ve kesitler Surpac 6.2 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Oluşturulan kesitlerden yine program aracılığıyla potansiyel düzlemsel kaymaya maruz kalacak kütlelerin alanları tespit edilmiştir. Kesitler Şekil 49-51 verilmektedir.



Şekil 49. 3 boyutlu modelden A-A' kesiti (SK-4 için)



Şekil 50. 3 boyutlu modelden B-B' kesiti (SK-5 için)



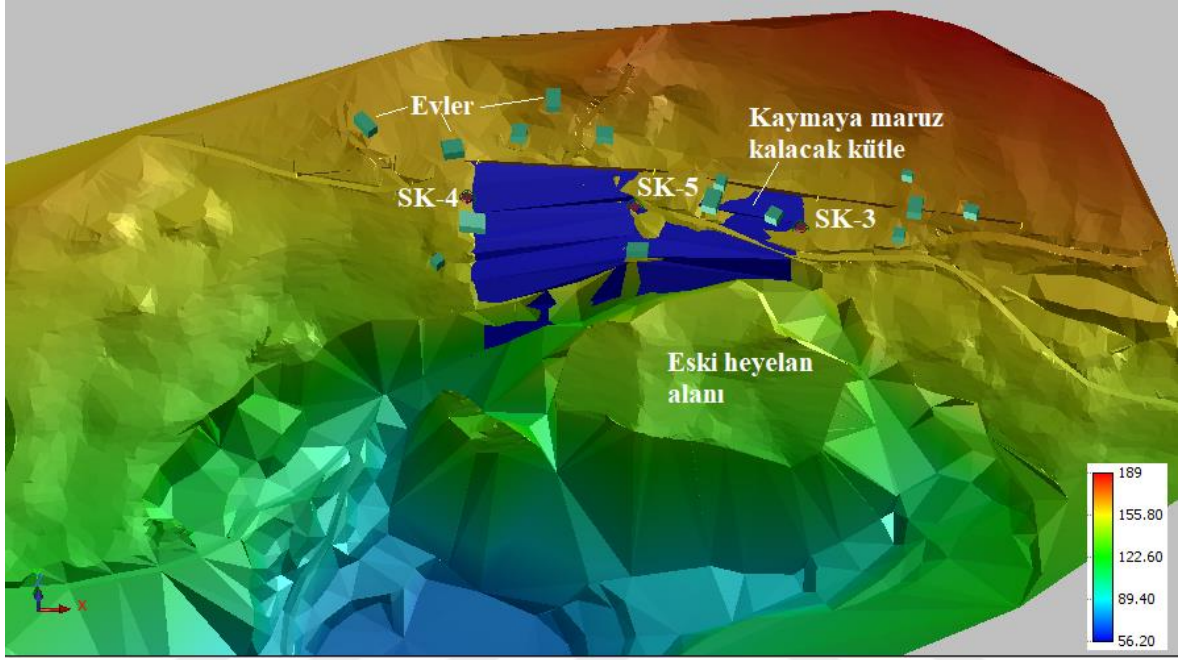
Şekil 51. 3 boyutlu modelden C-C' kesiti (SK-3 için)

Bunların yanında, sondaj bilgilerinden elde edilen muhtemel yenilme düzleminin eğimi, kil düzleminin eğimi de belirlenmiştir. Ayrıca, daha önce yenilmeye maruz kalmış kütlelerin kesit alanı hesaba katılmayarak, daha önceki kayan kütlelerin kazılması sonrası yeni ortaya çıkabilecek düzlemsel kaymanın potansiyel alanı tespit edilmiştir. Tüm bu bilgiler Tablo 18'de verilmektedir.

Tablo 18. Potansiyel yenilme düzlemi ve kil düzlemi özellikleri

Sondaj No	Hacim (m ³) (Alan x 1 m)	Yenilme düzlemi uzunluğu (m)	Yenilme düzlemi eğimi (°)	Kil düzlemi uzunluğu (m)	Kil düzlemi eğimi (°)
SK-4	2996.49	41.446	56.5	90.141	14
SK-5	1652.58	37.766	48	54.166	15
SK-3	828.96	29.989	39	34.527	17

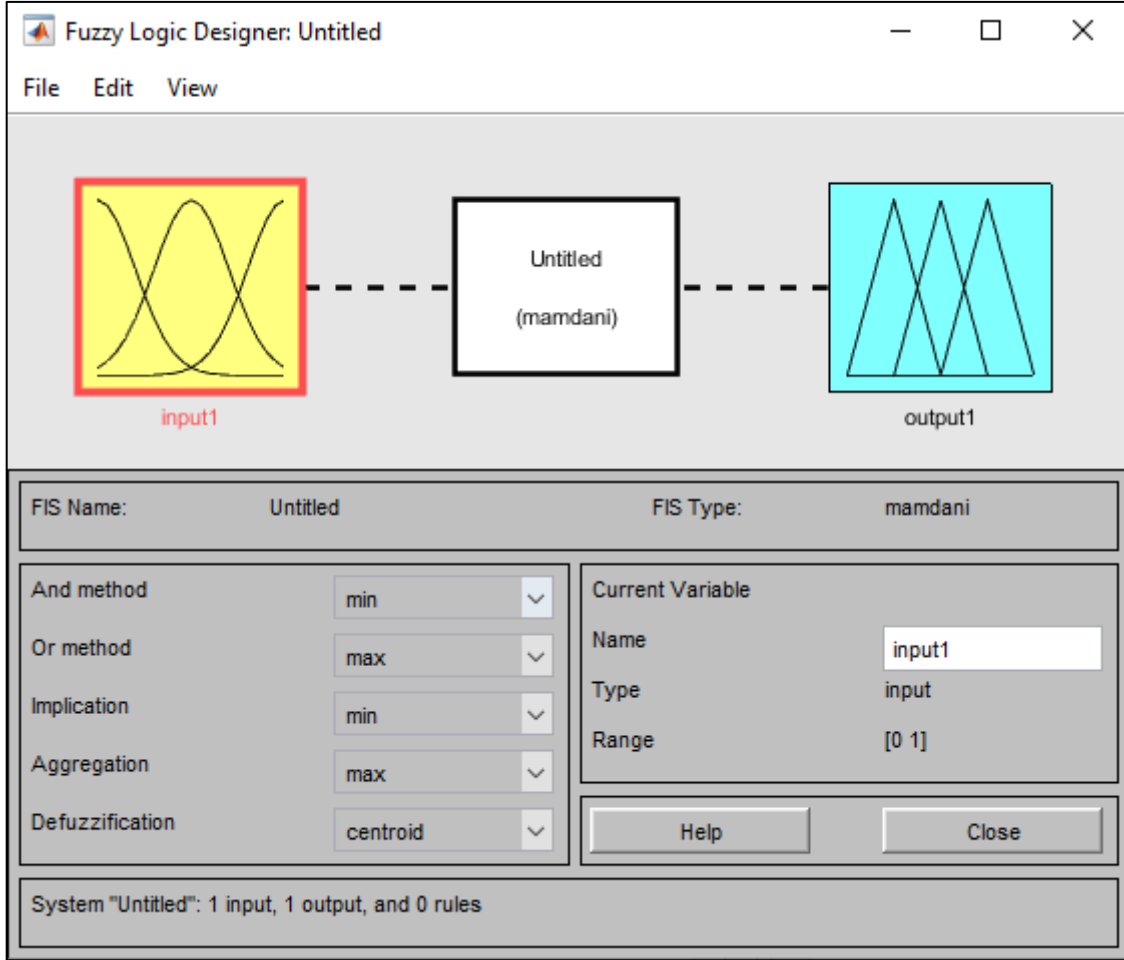
Makaslama zonunu içeren 3 sondajdan alınan potansiyel düzlemsel kaymaya maruz kalacak kütlelere ait kesitler 3 boyutlu olarak birleştirilerek sadece sondajlar arasında kalan potansiyel kayma kütlesi ortaya çıkarılmıştır (Şekil 52).



Şekil 52. Sondajlar arasında kalan potansiyel kayma kütlesi

3 ayrı sondajdan alınan kesitlere göre oluşturulan kütlenin hacmi yaklaşık 340.000 m^3 olarak hesaplanmıştır. Sondaj karotlarından elde edilen ortalama yoğunluk değeri ile çarpıldığında (kuru-doygun ortalaması 2.2 gr/cm^3) 748.000 tonluk bir kütle hareketi ortaya çıkacağı görülmektedir. Bu kütle miktarı sadece SK-4 ile SK-3 sondajları arasındaki 200 metrede ortaya çıkan miktar olup, iki sondajın da sağ ve sol taraflarındaki kütleler ile bütünleşik hareketi kütle miktarını çok daha fazla artırma potansiyelindedir.

Bulanık mantık çıkarım sistemi Matlab programı uygulamalarında, Bulanık Mantık Tasarımcısı (Fuzzy Logic Designer) uygulaması kullanılmıştır (Şekil 53).



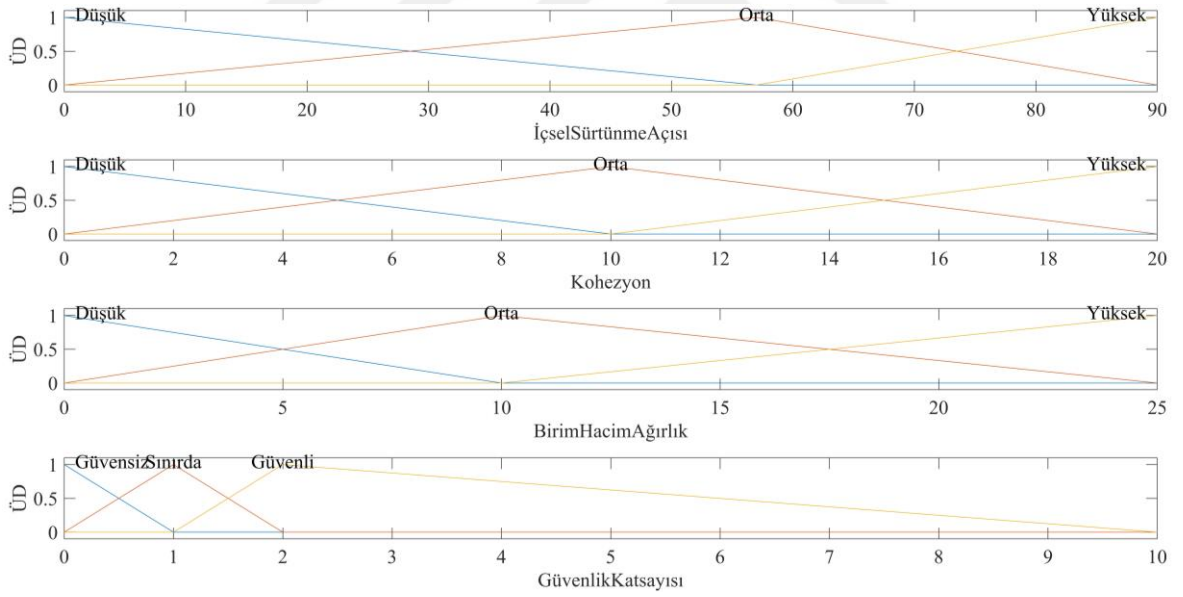
Şekil 53. Matlab programı Bulanık Mantık Tasarımcısı (Fuzzy Logic Designer) arayüzü

Uygulamada Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Şev duraylılığında limit denge yöntemi girdilerinden içsel sürtünme açısı, kohezyon ve birim hacim ağırlık değerleri giriş verisi olarak modellenmiştir. Diğer parametreler Taşönü ocağında 3 boyutlu olarak modellenerek değerler sabit olarak kabul edilmiştir. Böylece daha az girdi parametresi ile modellenebilirliği ile uygunluğu incelenmiştir. Çıktı parametresi olarak da güvenlik katsayısı işlenmiştir.

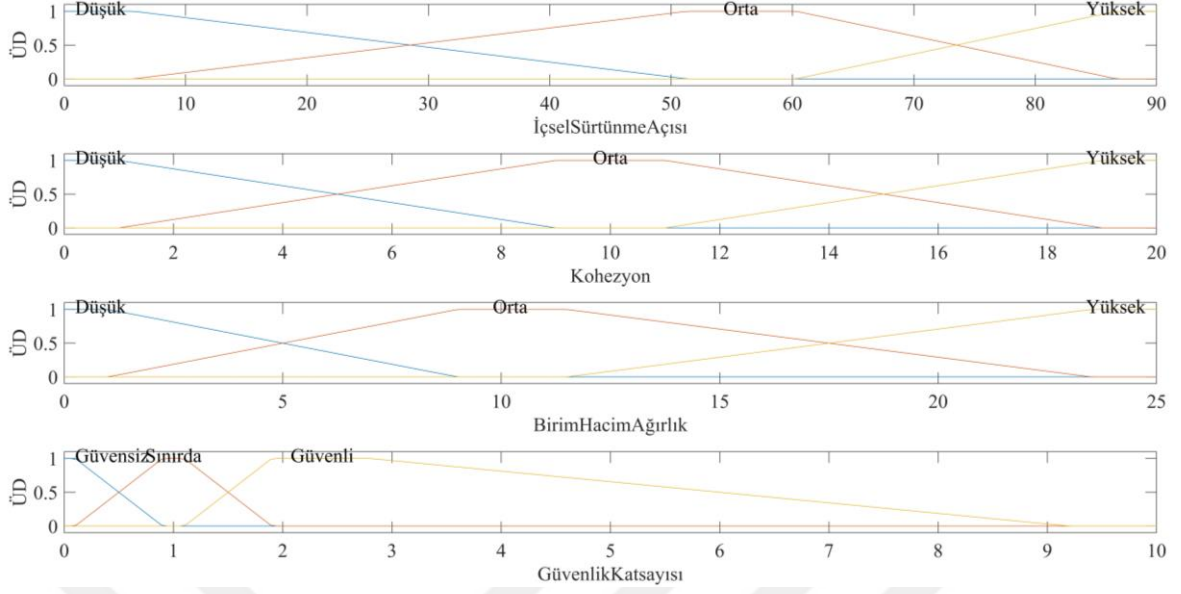
Parametrelerin sözel değişkenleri bulanık mantık sisteminde uzman görüşü ile elde edilmelidir. Bu tez çalışmasında, uzman görüşü matematiksel limit denge yöntemi çözümü ile, değişken dışındaki parametreler sabit tutularak, değişkenin değişiminin güvenlik katsayısını 3 ayrı kümede (<1 için güvensiz, $1-1.5$ aralığı için sınırda, >1.5 için güvenli) değiştirme kapasitesine göre düşük-orta-yüksek tanımlamaları yapılmıştır. Böylece bulanık çıkarım sisteminde, giriş verilerinin değişim aralıklarının uzman görüşü olarak limit denge

yöntemi çözümü baz alınmıştır. Bu tasarımda Taşönü ocağına özel fiziksel parametreler sabit kabul edildiğinden, bu çözüm yöntemi Taşönü ocağına ait olmakla birlikte, genelleştirmek için diğer parametrelerin de (şev yüksekliği, şev açısı, yenilme düzlemi eğimi, kayma yüzey alanı, varsa gerilme çatlakları vs) bulanıklaştırılması gerekmektedir. Uygulama kapsamında muhtemel yenilme ve kil düzlemleri için en küçük, orta ve en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametreleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

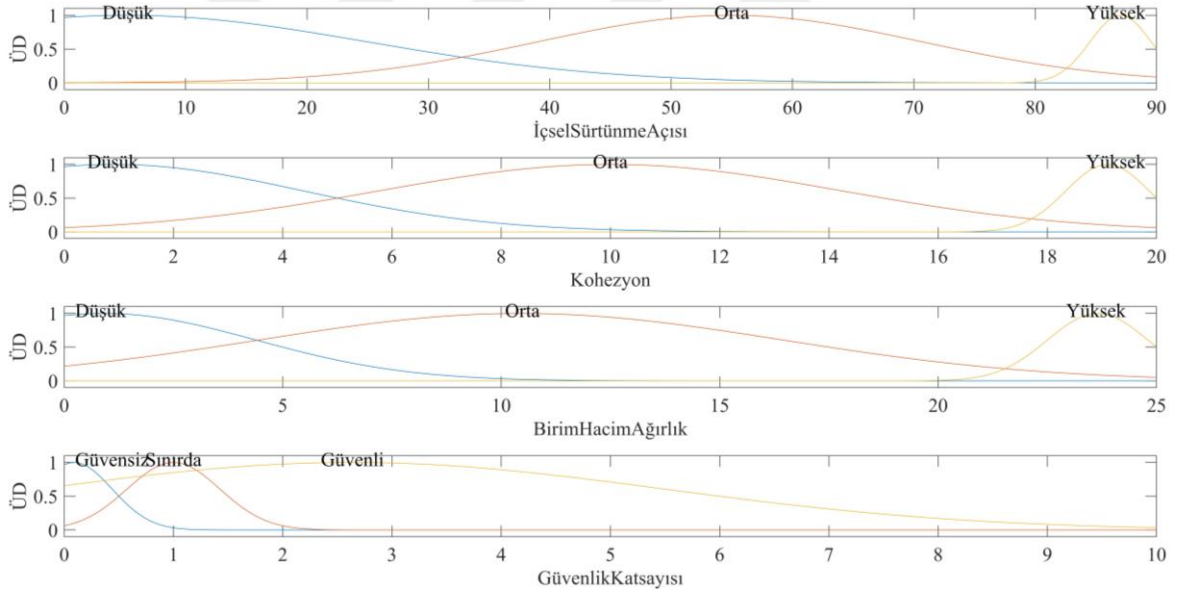
Üçgen, yamuk ve Gaussian üyelik fonksiyonu kullanarak muhtemel yenilme düzlemine ait bulanık kümelerin gösterimi sırasıyla Şekil 54-56'da, yenilme düzleminin düşük, orta ve yüksek değerlerine ait farklı üyelik fonksiyonları için hesaplanan içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramları Şekil 57-59'da verilmektedir.



Şekil 54. Muhtemel yenilme düzlemi üçgen üyelik fonksiyonları



Şekil 55. Muhtemel yenilme düzlemi yamuk üyelik fonksiyonları



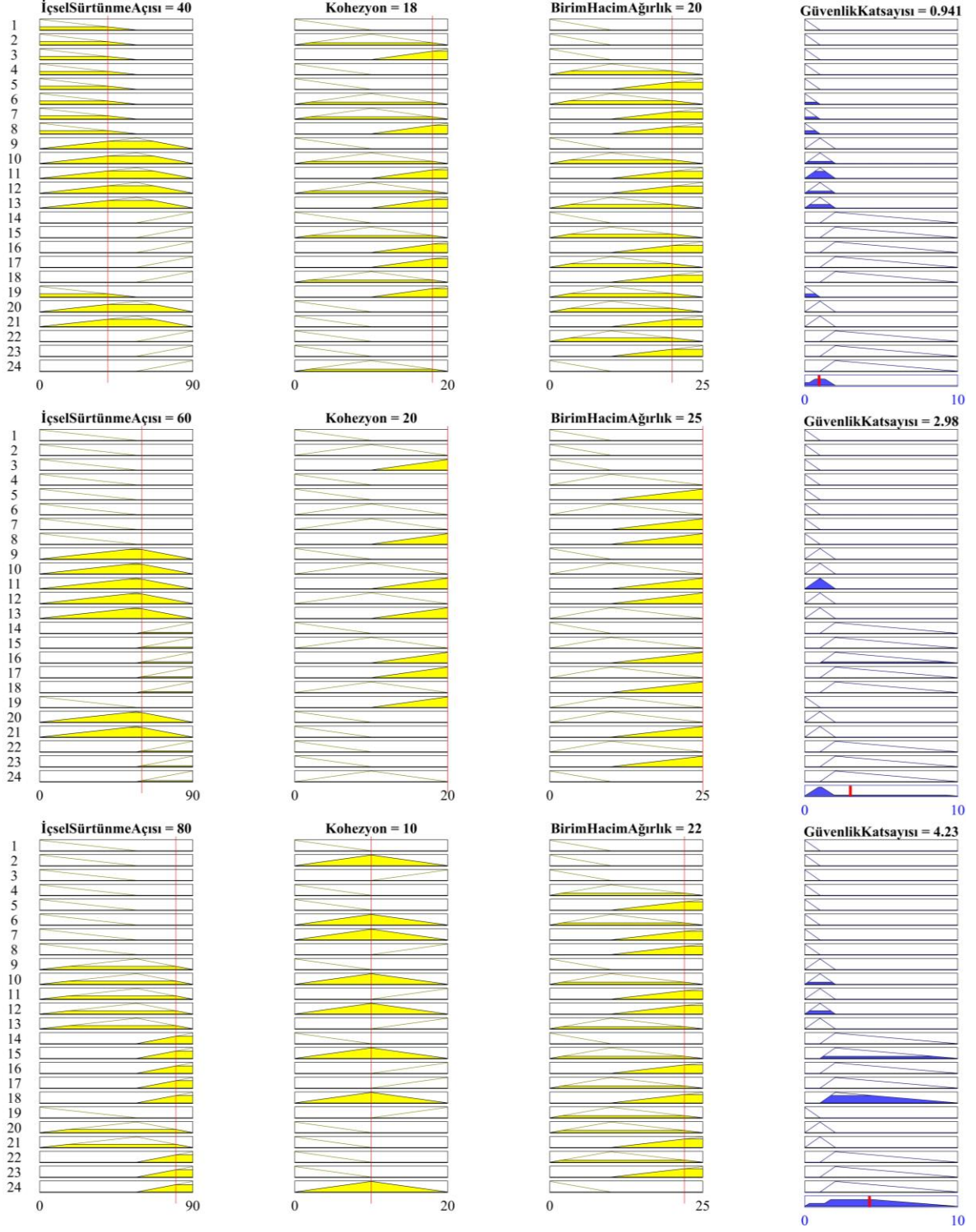
Şekil 56. Muhtemel yenilme düzlemi Gaussian üyelik fonksiyonları

Şekil 54-56'da muhtemel yenilme düzlemine göre, bulanık mantığın en önemli adımlarından olan üyelik fonksiyonları üçgen, yamuk ve Gaussian fonksiyonlarına göre oluşturulmuştur. Bu adımda uzman görüşüne ihtiyaç vardır çünkü ilgili giriş parametrelerinin düşük, orta ve yüksek dilsel ifadelerine karşılık gelecek matematiksel parametrelerinin bulanık çıkarım sistemi tarafından oluşturulması mümkün değildir. Muhtemel yenilme düzleminin tek başına kaymayı oluşturabilecek varsayımına göre

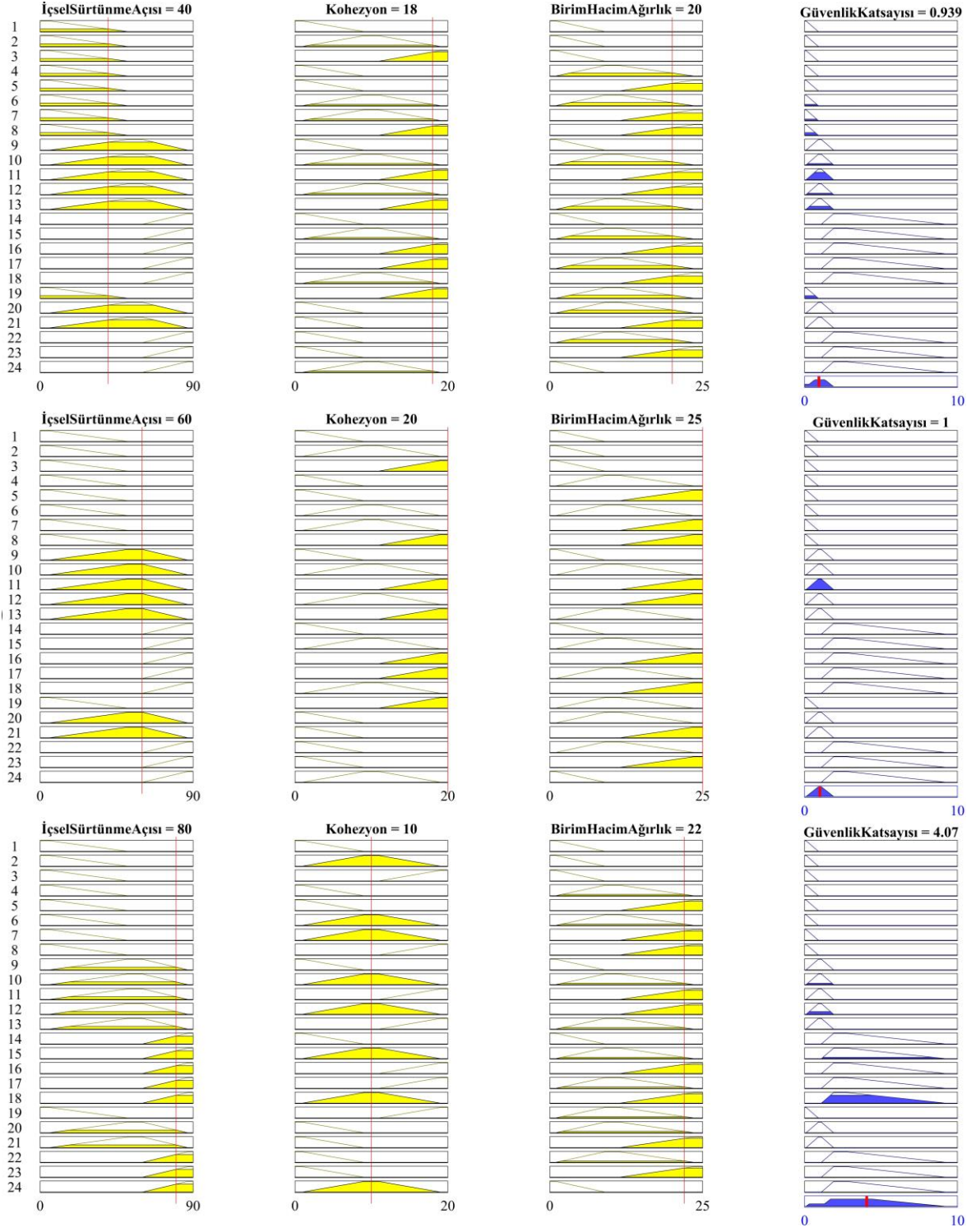
deneysel çalışmalardan elde edilen içsel sürtünme açısı, kohezyon ve birim hacim ağırlık değer aralıklarına göre giriş parametreleri sınırlandırılmıştır. Belirli değere kadar kaymaya karşı koyan, belirli değerden sonra kaydıran parametreler tek tek analiz edilerek, güvenlik katsayısı için güvensiz, sınırda ve güvenli çıktısına karşılık gelen değerler oluşturulmuştur.

şekil 57-59’da ise ilgili fonksiyonların kural tabanı ile Mamdani ıkarım sistemi kullanılarak durulaştırma yöntemi olarak da ağırlık merkezi metodu ile çıktılarının grafiksel gösterimi verilmektedir. Grafiksel gösterimdeki girdi parametreleri değerleri, deneysel çalışmalardan elde edilen parametreler olup, bu değerlere göre güvenlik katsayısının bulanık çıkarım sisteminde üçgen üyelik fonksiyonuna göre değişimi verilmektedir.

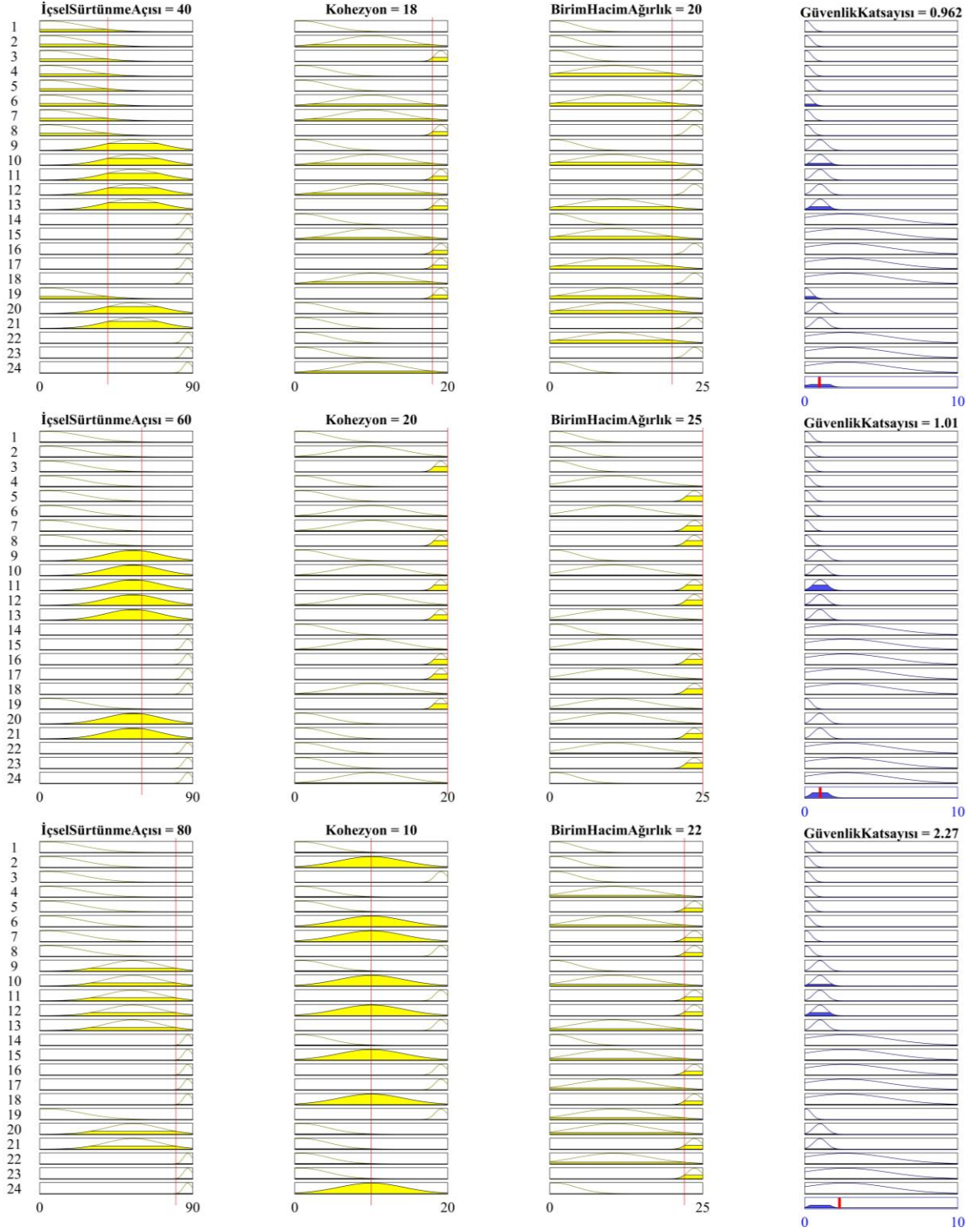




Şekil 57. Muhtemel yenilme düzlemin a) en küçük, b) orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (üçgen üyelik fonksiyonu)



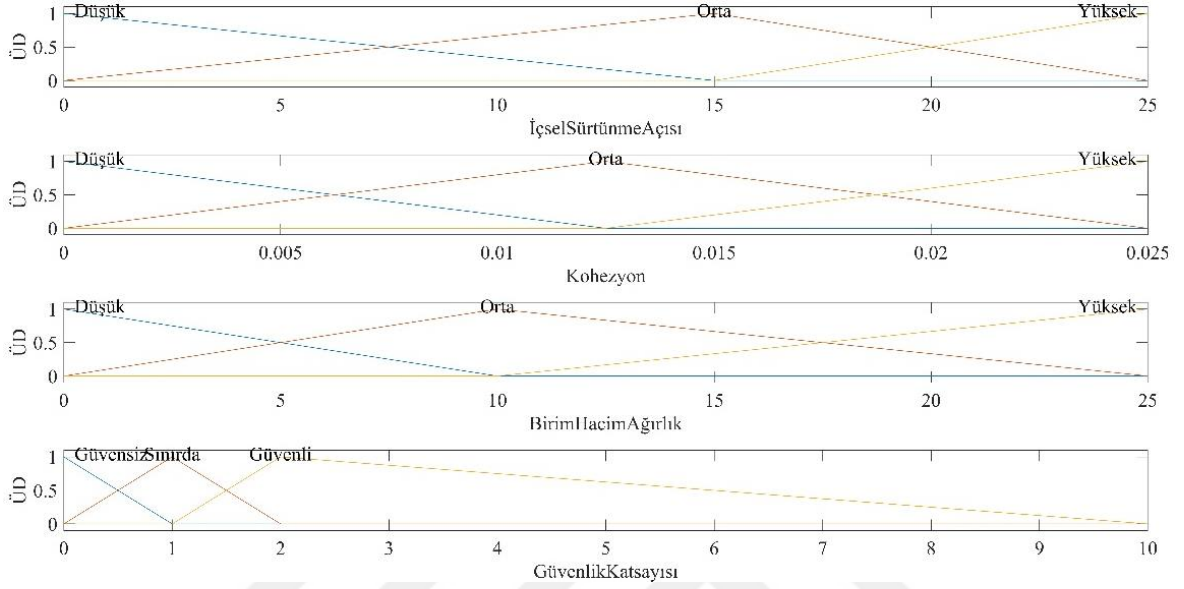
Şekil 58. Muhtemel yenilme düzleminin a) en küçük, b) orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (yamuk üyelik fonksiyonu)



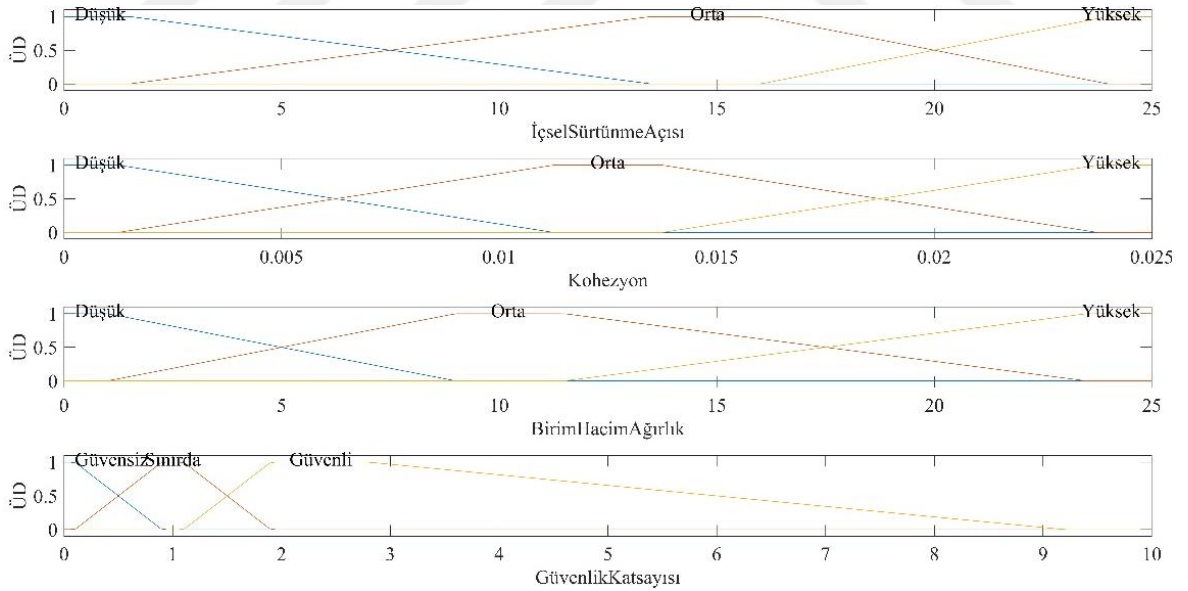
Şekil 59. Muhtemel yenilme düzleminin a) en küçük, b) orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (Gaussian üyelik fonksiyonu)

Üçgen, yamuk ve Gaussian üyelik fonksiyonu kullanarak kil düzlemine ait bulanık kümelerin gösterimi ise sırasıyla Şekil 60-62’de, kil düzleminin düşük, orta ve yüksek

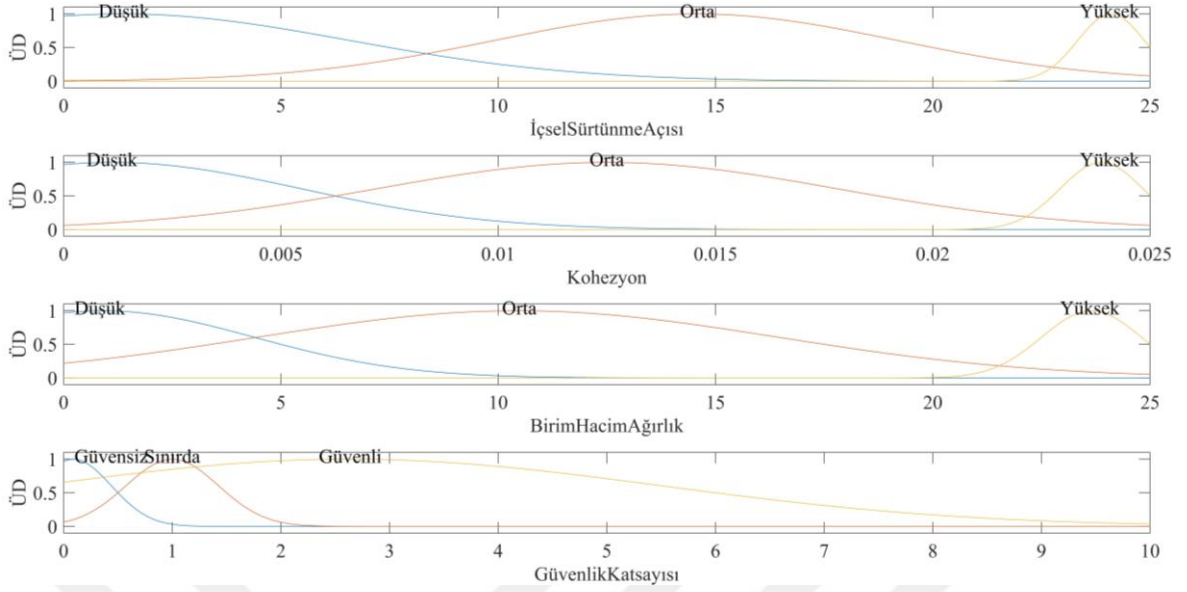
değerlerine ait farklı üyelik fonksiyonları için hesaplanan içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramları Şekil 63-65'te verilmektedir.



Şekil 60. Kıl düzlemi için üçgen üyelik fonksiyonları



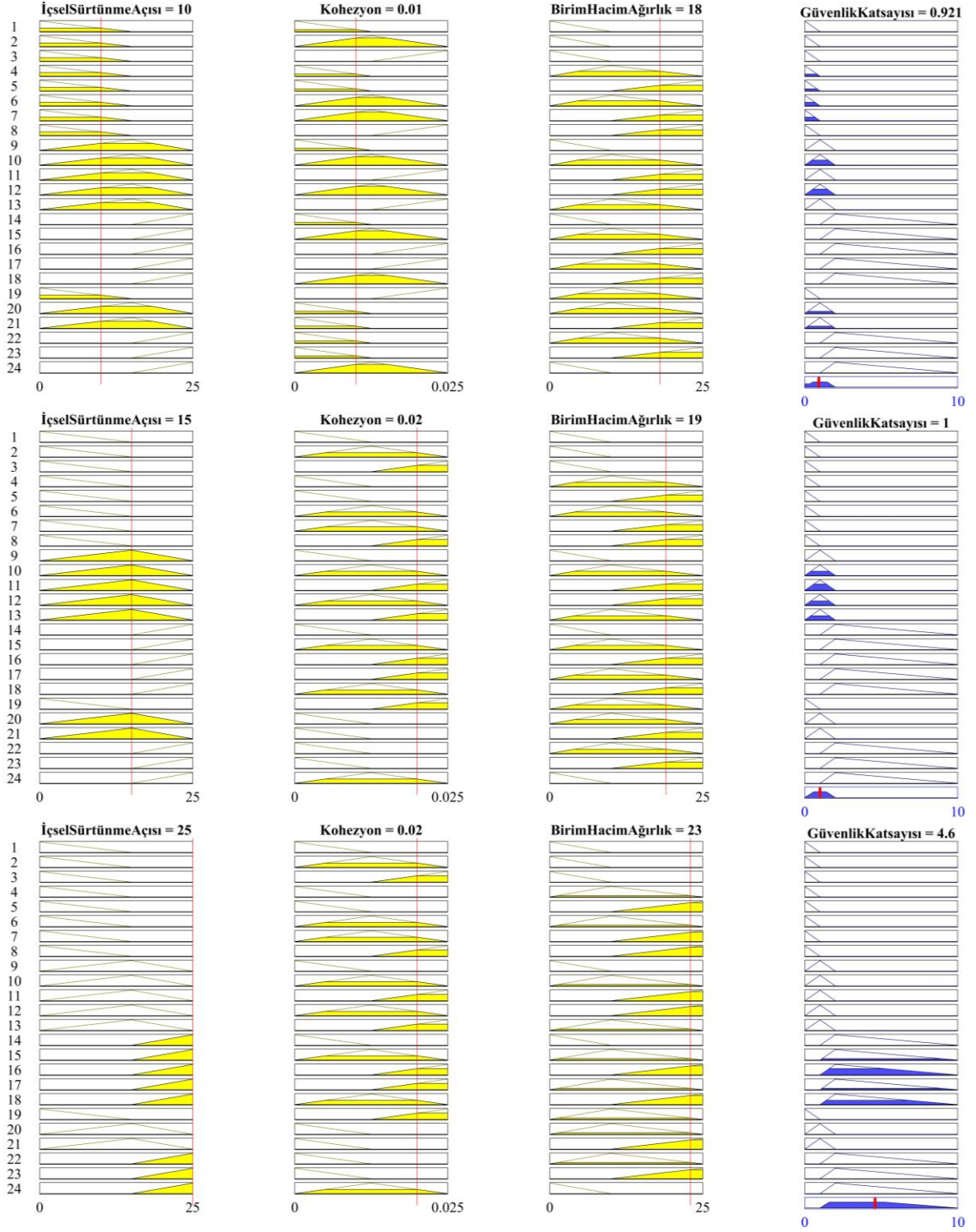
Şekil 61. Kıl düzlemi için yamuk üyelik fonksiyonları



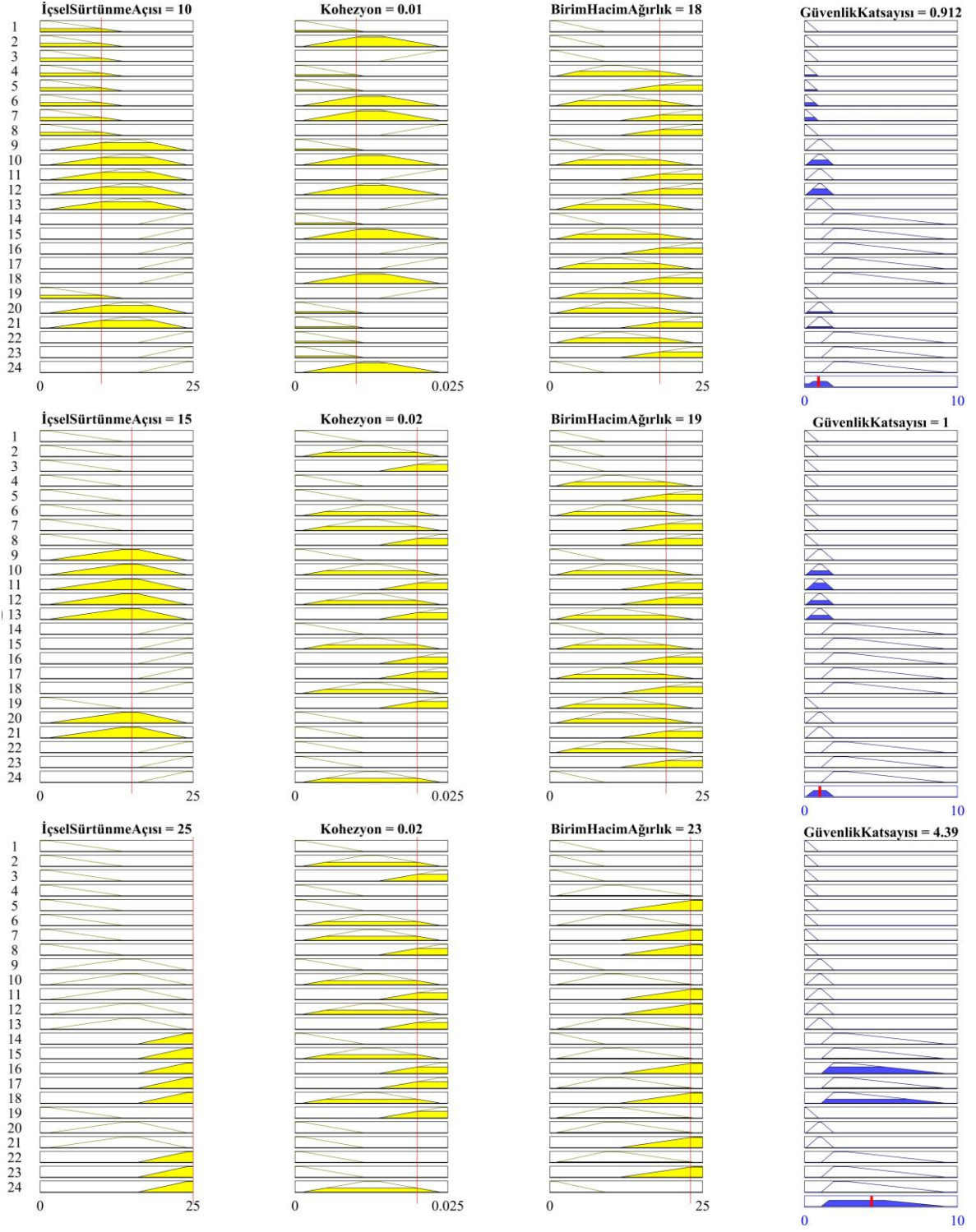
Şekil 62. Kil düzlemi için Gaussian üyelik fonksiyonları

Bulanık çıkarım sistemi için kil düzlemine göre oluşturulan model incelendiğinde, kil düzleminin kalker formasyonundaki muhtemel yenilme düzlemine göre çok daha düşük kohezyon ve içsel sürtünme açısına sahip olması farklı bir model oluşturma fikrini oluşturmuştur. Kaymaya maruz kalacak kütle kalker olmakla birlikte, kil düzlemi üzerinde yenilmeye maruz kalacağı için kalkere ait içsel sürtünme açısı ve kohezyon kaymayı belirleyici faktör olmayacaktır. Bu duruma göre oluşturulan farklı bulanık çıkarım sisteminde, yeraltı suyu olmadığı (kilde sabunlama etkisi oluşturmadığı) durumlara göre sonuçlar Şekil 66-68’de verilmektedir. Yine bu şekiller sıklıkla kullanılan üçgen, yamuk ve Gaussian üyelik fonksiyon tiplerinde, Mamdani çıkarım sistemi ve ağırlık merkezi metodu ile çözümlenmiştir.

Kil düzlemi için önceki çalışmalarda $9-18^{\circ}$ arasında içsel sürtünme açısı tespit edilmekle birlikte, kil düzlemi eğimini aşan içsel sürtünme açısı değerine kil düzlemi kuru durumda duraylılığı sağlayacağı görülmektedir. Kilde su varlığı sabunlama etkisi ile içsel sürtünmeyi azaltacağından duraysız olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 63. Kıl düzleminin a) en küçük, b) orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (üçgen üyelik fonksiyonu)



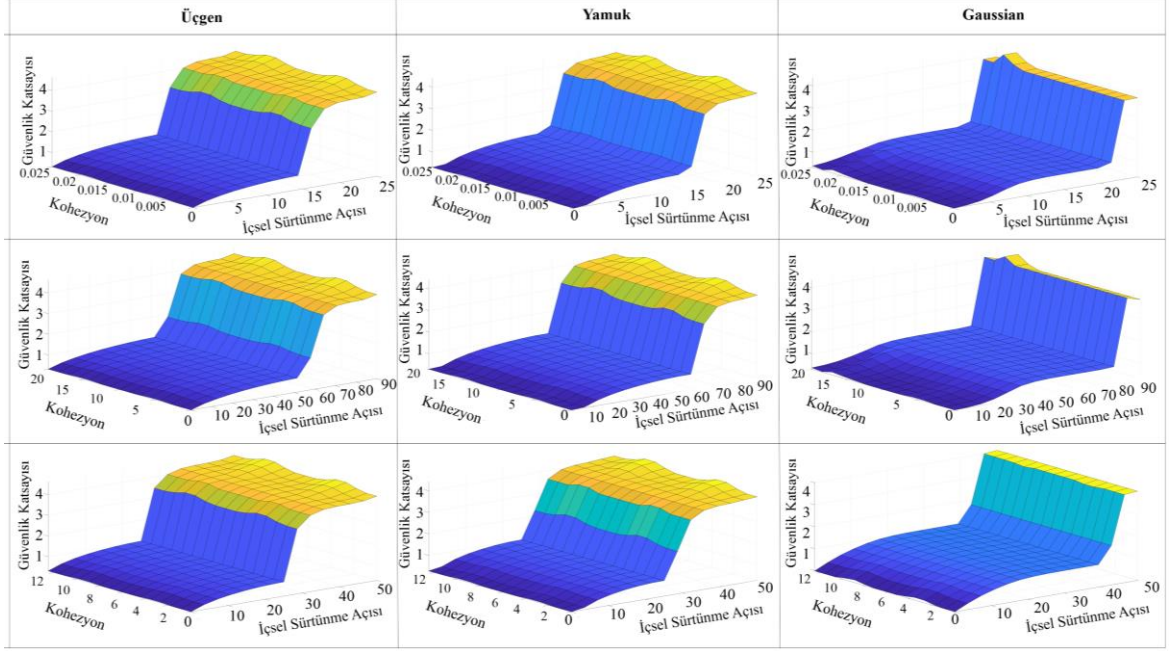
Şekil 64. Kil düzleminin a) en küçük, b) orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (yamuk üyelik fonksiyonu)



Şekil 65. Kil düzleminin a) en küçük, b) orta ve c) en yüksek içsel sürtünme, kohezyon ve birim hacim ağırlık parametrelerine göre bulanık çıkarım diyagramı (Gaussian üyelik fonksiyonu)

Kil düzlemi için içsel sürtünme açısı kile ait içsel sürtünme açısını aştığı durumlarda şevlerin güvenli olacağı Şekil 63-65'ten anlaşılmaktadır.

İki farklı düzlemin farklı üyelik fonksiyonlarınca bulanıklaştırılması sonucunda kohezyon ve içsel sürtünme açısı için üretilen çıktı yüzeyleri ise Şekil 66'da verilmektedir.



Şekil 66. Bulanık sistem sonucunda kohezyon ve içsel sürtünme açısı için üretilen çıktı yüzeyleri

Farklı üyelik fonksiyonlarına göre içsel sürtünme açısı ve kohezyonu içeren üç boyutlu uzaydaki yüzey görünüşleri güvenlik katsayısının güvensiz, sınırda ve güvenli olduğu bölgeleri göstermektedir. Kohezyon arttıkça güvenlik katsayısı az oranda artarken, içsel sürtünmenin artışının güvenlik katsayısı değerini doğrudan etkileyen parametre olduğu görülmektedir.

İki farklı düzlem üzerinde oluşturulan bulanık mantık sisteminde, üç ayrı üyelik fonksiyonunun içsel sürtünme açısı, kohezyon ve birim hacim ağırlık değişimlerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 18 ve 19'da verilmektedir. Tablolar incelendiğinde, aynı parametre değerleri için üç farklı üyelik fonksiyonuna ait güvenlik katsayısı değerlerinin birbirlerine yakın olduğu, üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarına nazaran, güvenlik katsayısının yüksek olduğu durumlarda, Gaussian üyelik fonksiyonunun güvenli tarafta kalmakla birlikte nispeten daha düşük değer verdiği gözlemlenmiştir. Burada, üç ayrı üyelik fonksiyonu karşılaştırması yapılarak, sonuçların tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

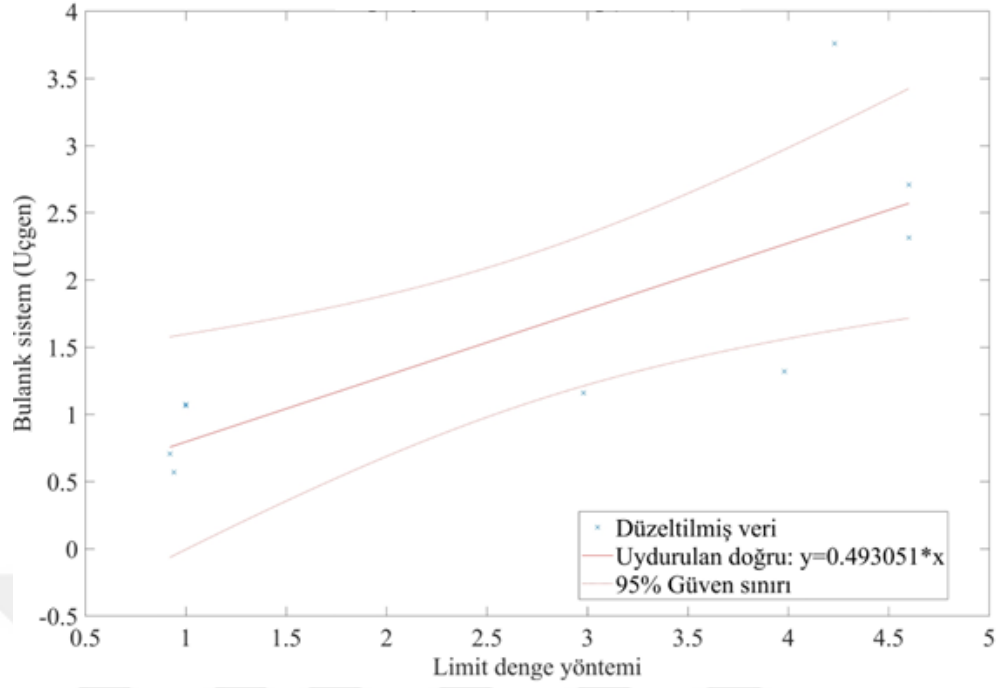
Tablo 19. Muhtemel yenilme düzlemine göre güvenlik katsayısı değerleri

Fonksiyon Türü	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Kohezyon (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Güvenlik Katsayısı
Üçgen Üyelik Fonksiyonu	40	18	20	0,941
	60	20	25	2,98
	80	10	22	4,23
Yamuk Üyelik Fonksiyonu	40	18	20	0,939
	60	20	25	1
	80	10	22	4,07
Gaussian Üyelik Fonksiyonu	40	18	20	0,962
	60	20	25	1,01
	80	10	22	2,27

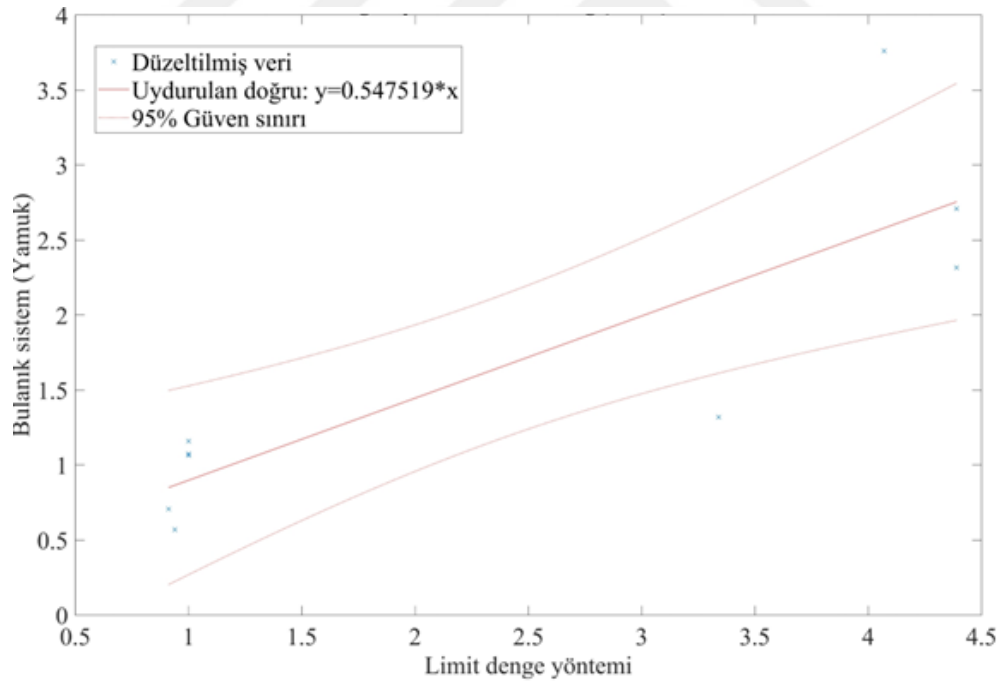
Tablo 20. Kil düzlemine göre güvenlik katsayısı değerleri

Fonksiyon Türü	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Kohezyon (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Güvenlik Katsayısı
Üçgen Üyelik Fonksiyonu	10	0,01	18	0,921
	15	0,02	19	1
	25	0,02	23	4,6
Yamuk Üyelik Fonksiyonu	10	0,01	18	0,912
	15	0,02	19	1
	25	0,02	23	4,39
Gaussian Üyelik Fonksiyonu	10	0,01	18	0,958
	15	0,02	19	1,01
	25	0,02	23	4,1

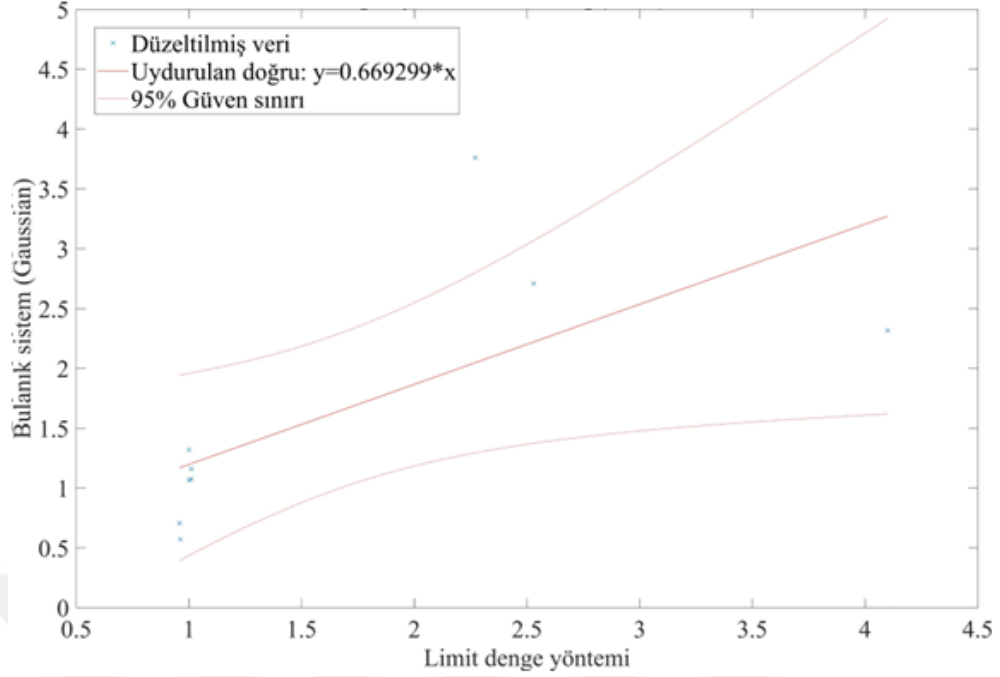
Doğrusal korelasyon, iki değişken arasındaki ilişkinin derecesini ölçen bir istatistiksel yöntemdir. Bu korelasyonda iki değişkenin doğrusal bir ilişki içinde olup olmadığı ortaya konmaktadır. Bu yöntem, iki ayrı hesaplama dayalı bağımsız değişkenin (limit denge yöntemi ile bulanık çıkarım sistemi) arasındaki ilişkiyi tanımlar. Farklı üyelik fonksiyonları tarafından minimum, orta ve maksimum noktaları için hesaplanan bulanık yöntem sonucunun limit denge yöntemi ile elde edilen sonuçlarla korelasyon grafiği çizilmiş ve sonuçları Şekil 67-69'da sunulmuştur. Sonuçlar irdelendiğinde, limit denge yöntemi ile hesaplanan güvenlik katsayısı değerinin bulanık mantık sistemi ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 67. Üçgen üyelik fonksiyonu için korelasyon grafiği



Şekil 68. Yamuk üyelik fonksiyonu için korelasyon grafiği



Şekil 69. Gaussian üyelik fonksiyonu için korelasyon grafiği

Bulanık mantık çıkarım sistemi modellenirken, girdi parametreleri olabildiğince indirgenmeye çalışılmıştır. Daha az parametre ile en doğru analiz yapmaya çalışılan bu çalışmada, Taşönü kalker ocağına ait şev duraylılığında güvenlik katsayısında kullanılan uzunluk ve açı parametreleri sabit olarak alınmıştır. Kaya malzemesinin yer yer değişmesi ve ortalama değerler üzerinden hesaplama yapıldığı çıkarımı sonucunda, yer yer değişebilen içsel sürtünme açısı, kohezyon ve birim hacim ağırlık değerleri girdi parametresi olarak kullanılmıştır.

ANFIS sistemine çok daha az veri ile işlem yapabilen FIS sisteminde bulanık kural tabanı uzman görüşüne bağlıdır. ANFIS sistemi bulanık çıkarım sisteminde kural tabanı oluşturmak için yapay sinir ağları yöntemi kullanılmaktadır. Yapay sinir ağlarında çok sayıda veri seti olmak üzere sağlıklı sonuçlar için yüzlerce veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Aksine, FIS sisteminde üyelik fonksiyonlarını belirleyebilecek kadar veri seti ile uzman görüşünün kural tabanı oluşmasının birleştirilmesi yeterlidir.

Tez çalışmasında uzman görüşü kapsamındaki bulanık kural tabanı kısmı, güvenlik katsayısını analitik olarak çözümleyen formülden yararlanılarak verilerin sabit tutulup sınırları belirlenecek verinin değiştirilmesi ile çıkabilecek sonuçlar üzerinden

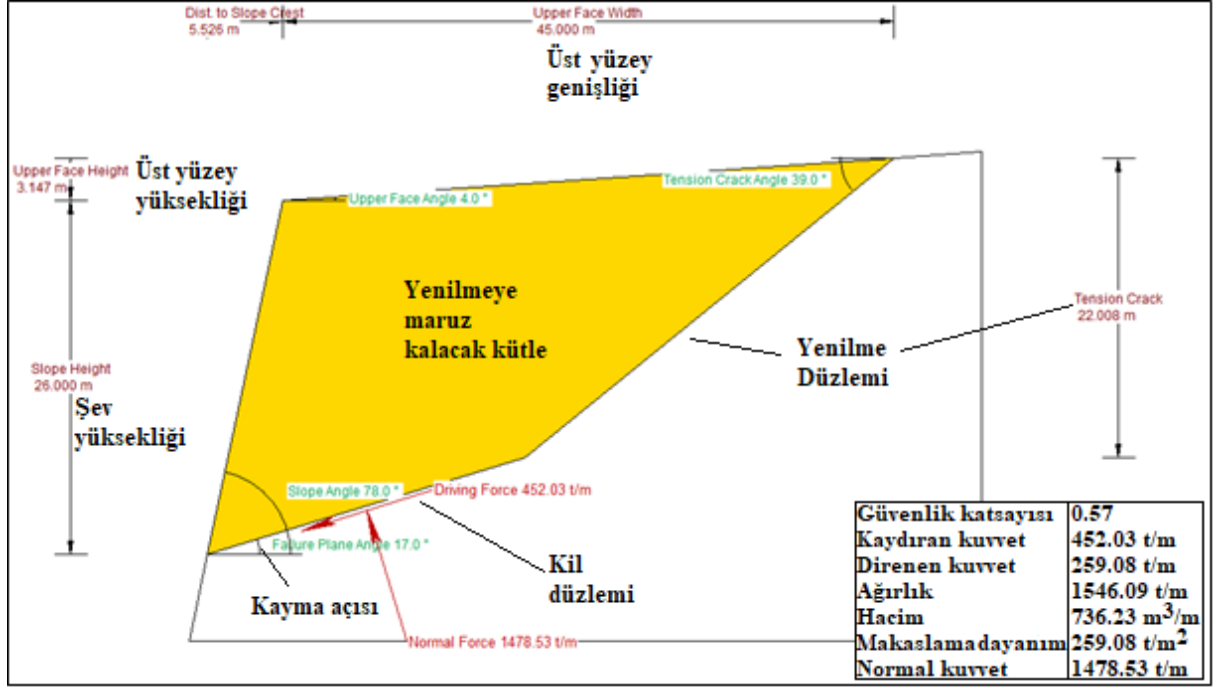
oluşturulmuştur. Böylece uzman kişinin dahi girdi parametrelerinden biri azalırken diğerinin artması durumunda sonucun ne derece değişebileceğinin kestirimindeki zorluk da aşılmış olmaktadır.

Oluşturulan sistemde, nispeten daha yüksek dayanımlara sahip muhtemel yenilme düzlemi parametreleri ile daha önce de kaymaya sebep olan kil düzlemi ayrı ayrı modellenerek sonuçları görülmüştür. Ayrıca, iki düzlemin bir arada çalışması durumu da göz önünde bulundurularak ağırlıklı ortalama üzerinden modellemeye gidilmiştir. Tez kapsamında çok önemli bir bulgu olarak, limit denge yöntemi güvenli katsayısını büyük oranda değiştiren parametrenin içsel sürtünme açısı olduğu ortaya çıkmıştır.

İkinci bir bulanık modelde, kohezyon, içsel sürtünme açısı, boşluk suyu basıncı ve patlatma ivmesi modellenmiştir. Bu 4 ayrı girdi parametresi için alt-orta-üst değerler ile uzman görüşü ile oluşan bulanık kural tabanı, RocPlane programından yapılan deterministik modellerden elde edilmiştir. Böylece uzman görüşünün zorluğu aşılmıştır Arazide yapılan 3 ayrı sondajdan tespit edilen muhtemel yenilme düzlemi kil düzlemine göre daha yüksek dayanıma sahip olması, kil düzlemine göre eğimi daha yüksek olması ve kısmen daha az genişliğe sahip olmasından dolayı RocPlane programında ikincil bir süreksizlik düzlemi olarak modellenmiştir. 3 ayrı sondajdan elde edilen bilgiler Rocscience RocPlane programında modellenerek güvenlik katsayısı değerleri incelenmiştir. Ayrıca SK-3, SK-4 ve SK-5 için analizlerde kullanılan değerler Tablo 21’de verilmektedir.

Tablo 21. Düzlemsel kayma analizinde kullanılan parametreler

Parametreler	SK-3	SK-4	SK-5
Şev Yüksekliği (m)	26	35	34
Şev Açısı ($^{\circ}$)	78	75	65
Kil Düzlemi Kayma Açısı ($^{\circ}$)	17	14	15
Muhtemel yenilme düzlemi açısı ($^{\circ}$)	39	57	48
Yüzey eğimi ($^{\circ}$)	4	8	5
Yüzey genişliği (m)	45	100	63
Kaya birim hacim ağırlığı (t/m^3)	2.1	2.1	2.1
Kohezyon (t/m^2)	1.02 - 2.14	1.02 - 2.14	1.02 - 2.14
İçsel sürtünme açısı ($^{\circ}$)	9 - 18	9 - 18	9 - 18
İvme (g)	0-1	0-1	0-1
Yeraltı suyu durumu (%)	0-100	0-100	0-100



Şekil 70. En düşük c - ϕ değerleri için düzlemsel kayma analizi (SK-3, çatlak suyu basıncı %0)

RocPlane programından SK-3 için yeraltı suyu %0 olacak şekilde en düşük c - ϕ değerleri için düzlemsel kayma analizi görüntüsü Şekil 70’te verilmektedir. Ekran görüntüsü programa ait orijinal görüntü olduğundan üzerine açıklamalar yazılmıştır. Program kapsamında “tension crack” olan parametre bu çalışma için yenilme düzlemi olarak modellenmiştir.

Bunun dışında yapılan modellere dair RocPlane programından alınan orijinal görüntüler; SK-3’e ait en düşük c - ϕ değerleri için düzlemsel kayma analizi Ek Şekil 1’de, SK-3’e ait en yüksek c - ϕ değerleri için düzlemsel kayma analizi Ek Şekil 2-4’te, SK-4’e ait en düşük c - ϕ değerleri için düzlemsel kayma analizi Ek Şekil 5-6’da, SK-4’e ait en yüksek c - ϕ değerleri için düzlemsel kayma analizi Ek Şekil 7-9’da, SK-5’e ait en düşük c - ϕ değerleri için düzlemsel kayma analizi Ek Şekil 10-11’de, SK-5’e ait en yüksek c - ϕ değerleri için düzlemsel kayma analizi Ek Şekil 12-14’de verilmektedir.

SK-3 numaralı sondaj logundan alınan kesitte yapılan düzlemsel kayma analizinde, c - ϕ değerleri için en düşük değerler ile çatlak suyu basıncı varlığı en düşük güvenlik katsayısı değerini vermektedir (Ek Şekil 1). En iyi durum ise c - ϕ değerinin yüksek ve çatlak suyu

basıncı olmadığı durum olduğu görülmektedir (Ek Şekil 2). Patlatma ivmesi eklendiğinde ise güvenlik katsayısının 0.39 değerine düşmektedir (Ek Şekil 3).

Sk-4 numaralı sondaj logundan alınan kesitte yapılan düzlemsel kayma analizine göre, en yüksek $c-\phi$ değerine ait modelde çatlak suyu basıncı olmadığı durumda şev duraylı olduğu gözükmemektedir. Yine de uzun süre duraylı olma koşulunu (>1.5) sağlamamaktadır. En yüksek güvenlik katsayısı değerini veren modele patlatma ivmesi eklendiğinde ise değerin 0.43'e düştüğü görülmektedir (Ek Şekil 8).

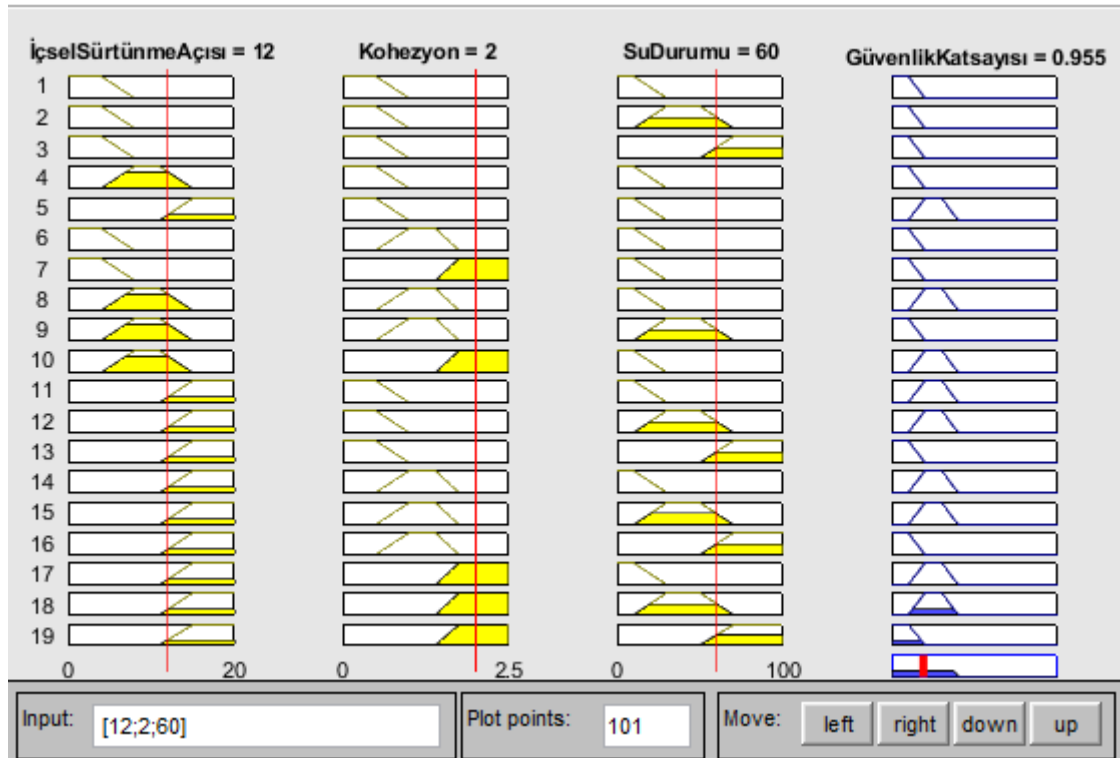
SK-5 numaralı sondaj için de benzer durumlar ortaya çıkmaktadır. Tüm bu deterministik modellerden anlaşıldığı üzere, kohezyon ve özellikle içsel sürtünme açısı değerinin düşük olması ve kil düzlemi ile yenilme düzleminde çatlak suyu basıncının varlığı güvenlik katsayısını oldukça etkilemektedir. Geçici olarak güvenli kabul edilebilecek (güvenlik katsayısı 1-1.5 aralığı için) düzeylerde ise patlatma ivmesinin varlığı şevleri güvensiz hale getirdiği anlaşılmaktadır.

Öncelikli olarak, hem yeraltı suyu varlığını modellemek hem de bulanık mantıkta kullanılan parametreleri azaltmak için, düzlemsel kayma üzerinde en çok değişime etkisi olan içsel sürtünme açısı, kohezyon ve yeraltı su varlığı değişkenleri girdi parametresi kullanılarak bulanık mantık modellemesi yapılmıştır. Bu model hem ocağın genelini yansıtabilecek düzeydedir hem de belirli içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerine göre suyun yüzdesel varlığının güvenlik sayısı üzerindeki değişimi hesaplayabilecek düzeydedir. Bu kapsamda oluşturulan kural tabanı aşağıda verilmektedir.

1. (İçselSürtünmeAçısı==Düşük)&(Kohezyon==Düşük)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
2. (İçselSürtünmeAçısı==Düşük)&(Kohezyon==Düşük)&(SuDurumu==Orta) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
3. (İçselSürtünmeAçısı==Düşük)&(Kohezyon==Düşük)&(SuDurumu==Çok) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
4. (İçselSürtünmeAçısı==Orta)&(Kohezyon==Düşük)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
5. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Düşük)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdı)
6. (İçselSürtünmeAçısı==Düşük)&(Kohezyon==Orta)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
7. (İçselSürtünmeAçısı==Düşük)&(Kohezyon==Yüksek)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
8. (İçselSürtünmeAçısı==Orta)&(Kohezyon==Orta)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdı)
9. (İçselSürtünmeAçısı==Orta)&(Kohezyon==Orta)&(SuDurumu==Orta) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
10. (İçselSürtünmeAçısı==Orta)&(Kohezyon==Yüksek)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdı)
11. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Düşük)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdı)
12. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Düşük)&(SuDurumu==Orta) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdı)

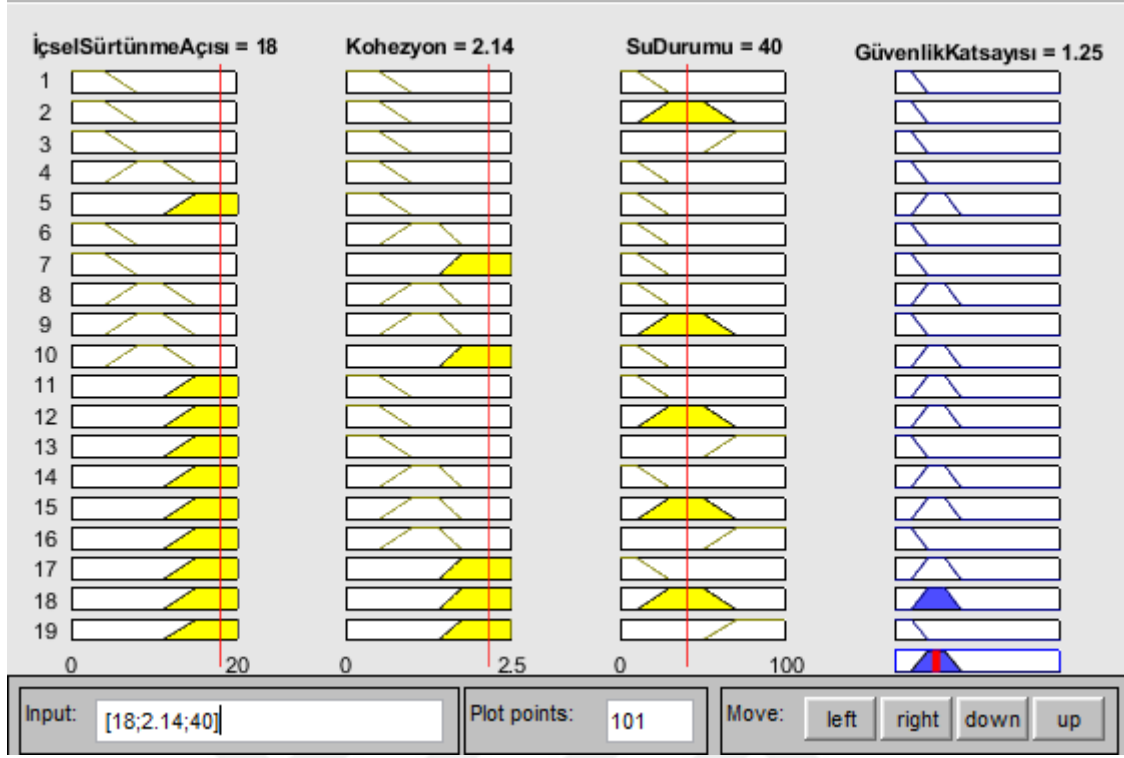
13. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Düşük)&(SuDurumu==Çok) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
14. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Orta)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdaki)
15. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Orta)&(SuDurumu==Orta) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdaki)
16. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Orta)&(SuDurumu==Çok) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
17. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Yüksek)&(SuDurumu==Az) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdaki)
18. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Yüksek)&(SuDurumu==Orta) → (GüvenlikKatsayısı==Sınırdaki)
19. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek)&(Kohezyon==Yüksek)&(SuDurumu==Çok) → (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)

Ayrıca kurallara ait bulanık çıkarım sistemi Şekil 71’de verilmektedir.



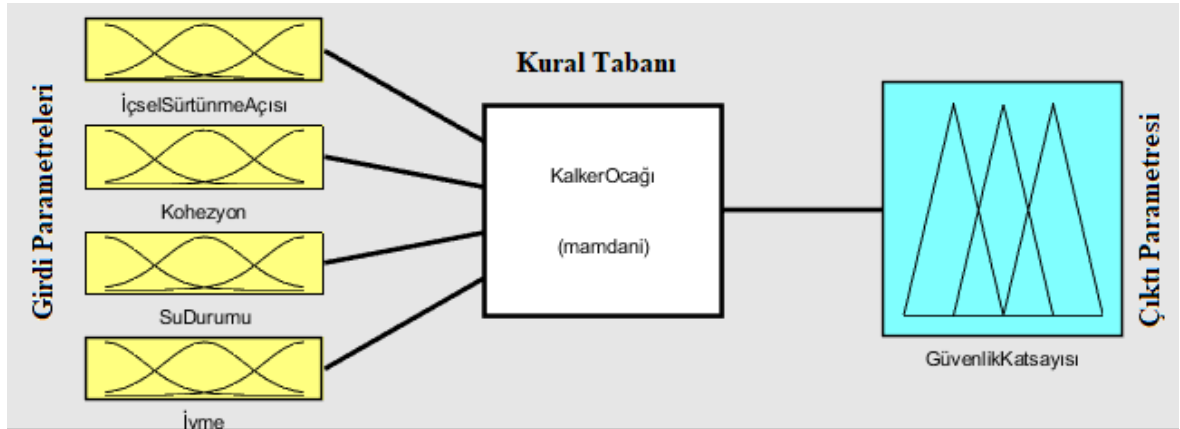
Şekil 71. Yeraltı su varlığı durumuna göre oluşturulan bulanık çıkarım modeli

Girdi parametreleri dışındaki parametreler (şev yüksekliği, şev açısı, gerilme çatlağı, yüzey eğimi ve açısı, kayacın birim hacim ağırlığı) ortalama değer üzerinden sabit alınarak RocPlane’de yapılan model üzerinden uzman görüşüne ait kural tabanları oluşturulmuştur. Yeraltı suyu varlığı sürekli değişkenlik gösterebildiğinden oluşturulan bulanık çıkarım modeli üzerinden suyun yüzde oranı ile güvenlik katsayısı değeri elde edilebilmektedir. Örnek olarak bu modelde $c=2.14 \text{ t/m}^2$; $\phi=18^\circ$ ve su yüzdesi %40 olarak alındığında güvenlik katsayısı 1.25 elde edilirken (Şekil 72), RocPlane programında aynı parametreler için 1.18 değeri elde edilmiştir (Ek Şekil 15).



Şekil 72. Örnek parametrelere karşılık gelen bulanık çıkarım değeri

İkincil olarak; çatlak suyu basıncı ile patlatma ivmesinin de etkisini araştırmak için, düzlemsel yenilme üzerinde en çok değişime etkisi olan içsel sürtünme açısı, kohezyon ve çatlak suyu basıncı ile birlikte patlatma ivmesi değişkenleri girdi parametresi kullanılarak bulanık mantık modellemesi yapılmıştır (Şekil 73).

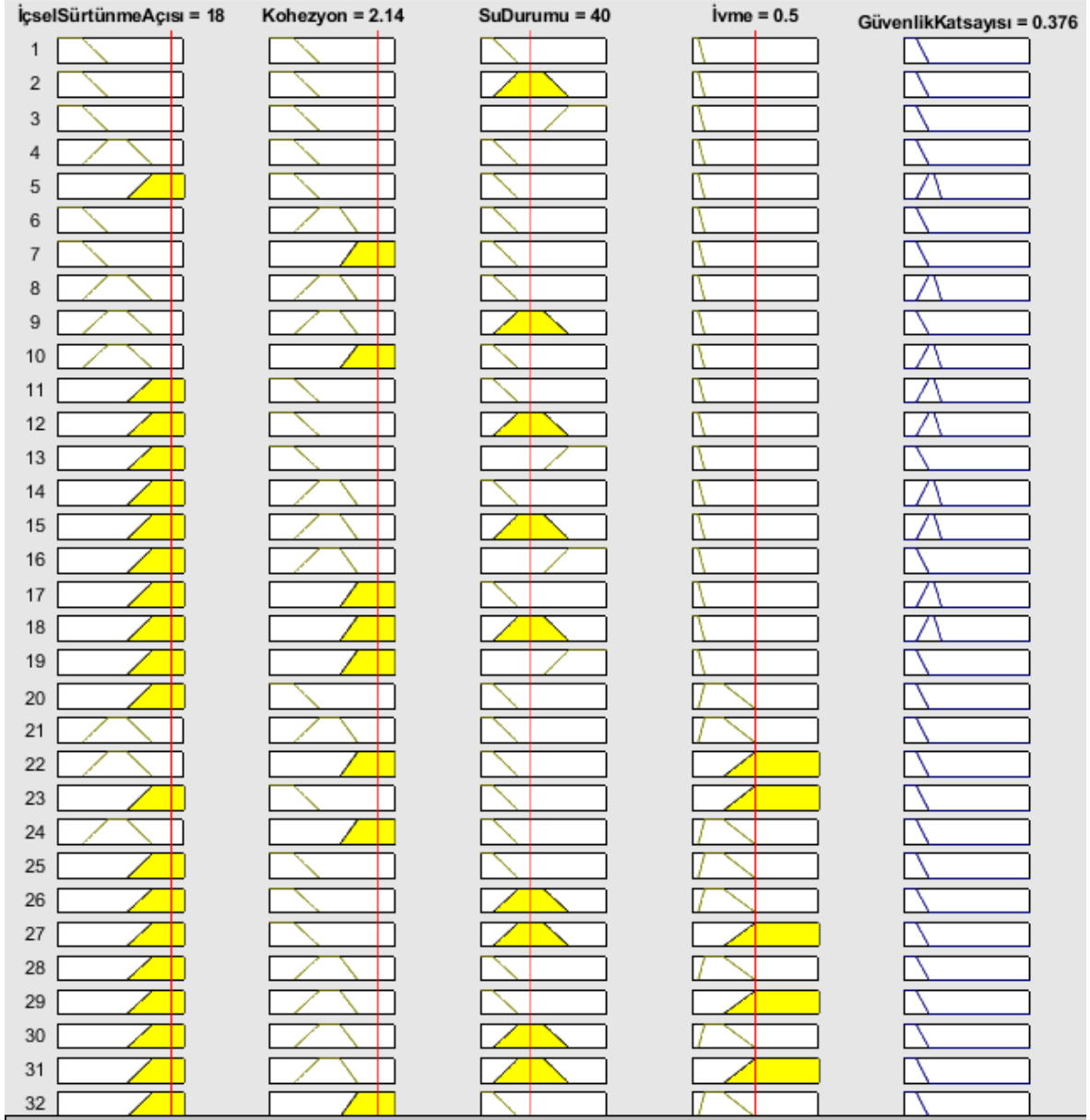


Şekil 73. Bulanık mantık model tasarımı

Bu model hem ocağın genelini yansıtabilecek düzeydedir hem de belirli içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerine göre suyun yüzdesel varlığının güvenlik katsayısı üzerindeki değişimi hesaplayabilecek düzeydedir. Ayrıca, ocakta yapılacak basamak patlatmasının şevlerdeki geçici duraylılığı da bozacağı ve kaya kütlelerini harekete geçireceği anlaşılmaktadır. Bu kapsamda oluşturulan kural tabanı aşağıda verilmektedir. Oluşturulan bulanık kurallara ait bulanık çıkarım sistemi ise Şekil 74’te verilmektedir.

1. (İçselSürtünmeAçısı == Düşük) & (Kohezyon == Düşük) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
2. (İçselSürtünmeAçısı == Düşük) & (Kohezyon == Düşük) & (SuDurumu == Orta) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
3. (İçselSürtünmeAçısı == Düşük) & (Kohezyon == Düşük) & (SuDurumu == Çok) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
4. (İçselSürtünmeAçısı == Orta) & (Kohezyon == Düşük) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
5. (İçselSürtünmeAçısı == Yüksek) & (Kohezyon == Düşük) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Sınırdı)
6. (İçselSürtünmeAçısı == Düşük) & (Kohezyon == Orta) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
7. (İçselSürtünmeAçısı == Düşük) & (Kohezyon == Yüksek) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
8. (İçselSürtünmeAçısı == Orta) & (Kohezyon == Orta) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Sınırdı)
9. (İçselSürtünmeAçısı == Orta) & (Kohezyon == Orta) & (SuDurumu == Orta) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
10. (İçselSürtünmeAçısı == Orta) & (Kohezyon == Yüksek) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Sınırdı)
11. (İçselSürtünmeAçısı == Yüksek) & (Kohezyon == Düşük) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Sınırdı)
12. (İçselSürtünmeAçısı == Yüksek) & (Kohezyon == Düşük) & (SuDurumu == Orta) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Sınırdı)
13. (İçselSürtünmeAçısı == Yüksek) & (Kohezyon == Düşük) & (SuDurumu == Çok) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
14. (İçselSürtünmeAçısı == Yüksek) & (Kohezyon == Orta) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Sınırdı)
15. (İçselSürtünmeAçısı == Yüksek) & (Kohezyon == Orta) & (SuDurumu == Orta) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Sınırdı)
16. (İçselSürtünmeAçısı == Yüksek) & (Kohezyon == Orta) & (SuDurumu == Çok) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Güvensiz)
17. (İçselSürtünmeAçısı == Yüksek) & (Kohezyon == Yüksek) & (SuDurumu == Az) & (İvme == Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı == Sınırdı)

18. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Yüksek) & (SuDurumu==Orta) & (İvme==Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı==Sınırdan)
19. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Yüksek) & (SuDurumu==Çok) & (İvme==Düşük) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
20. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Düşük) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
21. (İçselSürtünmeAçısı==Orta) & (Kohezyon==Orta) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
22. (İçselSürtünmeAçısı==Orta) & (Kohezyon==Yüksek) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Yüksek) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
23. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Düşük) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Yüksek) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
24. (İçselSürtünmeAçısı==Orta) & (Kohezyon==Yüksek) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
25. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Düşük) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
26. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Düşük) & (SuDurumu==Orta) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
27. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Düşük) & (SuDurumu==Orta) & (İvme==Yüksek) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
28. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Orta) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
29. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Orta) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Yüksek) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
30. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Orta) & (SuDurumu==Orta) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
31. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Orta) & (SuDurumu==Orta) & (İvme==Yüksek) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
32. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Yüksek) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
33. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Yüksek) & (SuDurumu==Az) & (İvme==Yüksek) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
34. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Yüksek) & (SuDurumu==Orta) & (İvme==Orta) →
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
35. (İçselSürtünmeAçısı==Yüksek) & (Kohezyon==Yüksek) & (SuDurumu==Orta) & (İvme==Yüksek) □
(GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)
- (GüvenlikKatsayısı==Güvensiz)

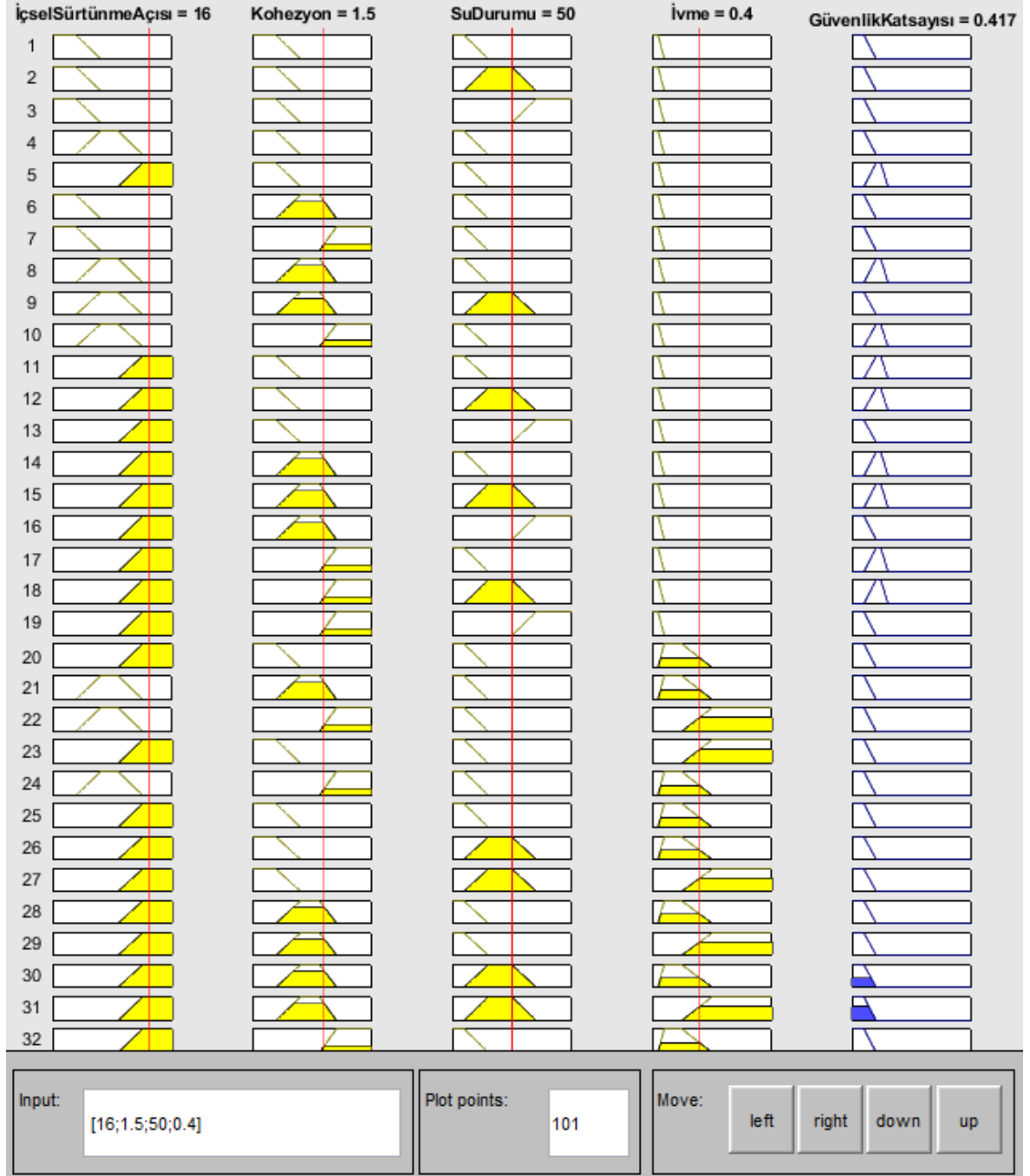


Şekil 74. Su durumu ile ivme dahil edilerek oluşturulan bulanık çıkarım sistemi

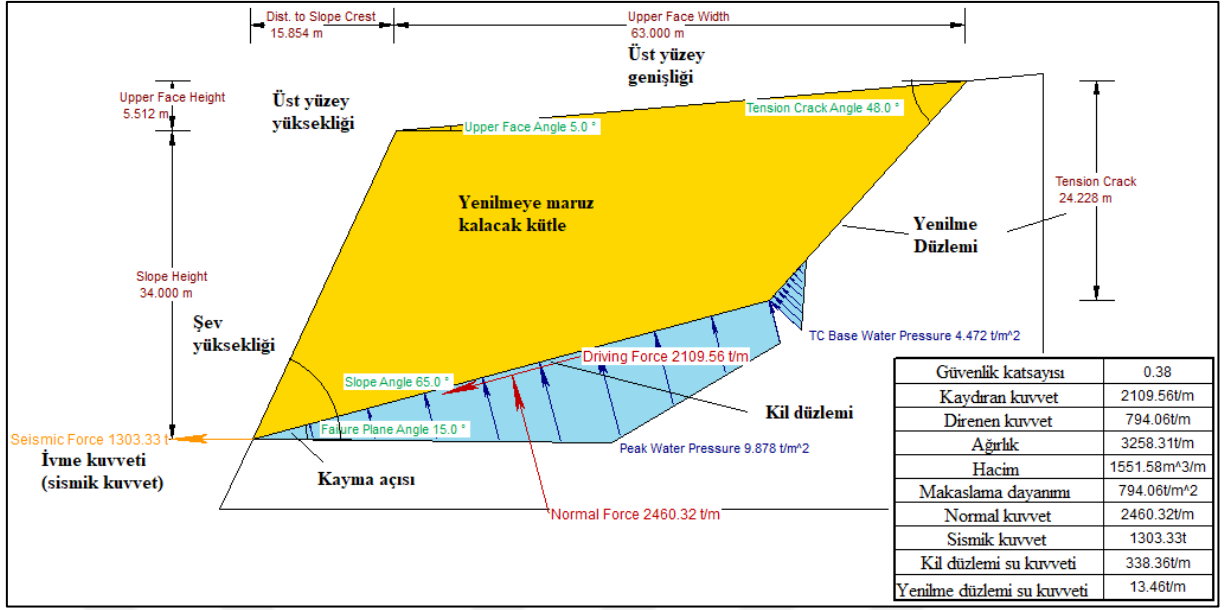
Girdi parametreleri dışındaki parametreler (şev yüksekliği, şev açısı, gerilme çatlağı, yüzey eğimi ve açısı, kayacın birim hacim ağırlığı) ortalama değer üzerinden sabit alınarak RocPlane’de yapılan model üzerinden uzman görüşüne ait kural tabanları oluşturulmuştur. Yeraltı suyu varlığı sürekli değişkenlik gösterebildiğinden oluşturulan bulanık çıkarım modeli üzerinden suyun yüzde oranı ile güvenlik katsayısı değeri elde edilebilmektedir.

Patlatma ivmesi açısından bakıldığında ise, basamak patlatmalarından elde edilen ivme değeri oluşturulan modele girilerek olası sonuçları hesaplanabilmektedir.

Örnek olarak bu modelde $c=1.5 \text{ t/m}^2$; $\phi=16^\circ$, su yüzdesi %50 ve ivme değeri $0.4g$ olarak alındığında güvenlik katsayısı $0,417$ elde edilirken (Şekil 75), RocPlane programında aynı parametreler için $0,38$ değeri elde edilmiştir (Şekil 76).



Şekil 75. İvme dahil edilen örnek değerlere göre bulanık çıkarım değeri



Şekil 76. Örnek parametrelere karşılık gelen deterministik modelleme grafiği

Bu çalışma kapsamında, bulanık mantık sistemi ile kurulan modellemenin, şev duraylılık analizinde etkili olarak kullanılabileceği, girdi parametrelerin indirgenmesi ile patlatma ivmesi ve laboratuvarında elde edilebilen verilerle kolaylıkla şev duraylılığı analizi yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

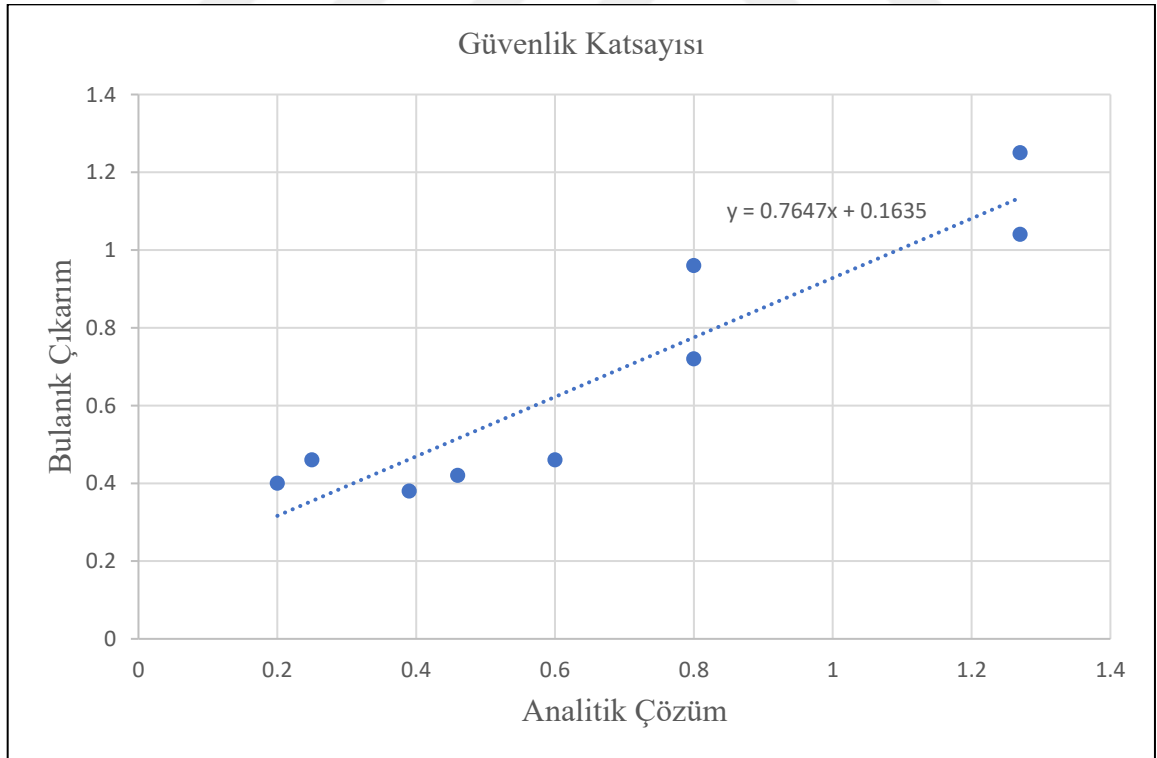
Tüm bu sonuçlara ait veriler Tablo 22’de verilmektedir. Tablodaki ivme değerinin olmaması, parametre olarak bulanık çıkarım sistemine eklenmediği modelleri ifade etmektedir. İvmenin parametre olarak eklendiği durumlarda ise “0” değeri ivme değerini göstermektedir.

Bulanık modelde bir parametrenin dahil edilmemesi ile dahil edilip değerinin sıfır olması arasında farklılık olmaktadır. Bunun sebebi, bulanık mantık bulanıklaştırılmış küme aralığını ifade ettiğinden, çıkarım yapılırken ivme için düşük küme aralığını dikkate almasıdır. Bu durumda, kullanılmayacak ya da sıfır değeri alınacak parametrenin eklenmemesi daha tutarlı sonuçlar ortaya çıkaracaktır.

Tablo 22. Parametrelerin ve güvenlik katsayılarının gösterimi

İçsel Sürtünme Açısı (°)	Kohezyon (t/m ²)	Su Durumu (%)	İvme (g)	Güvenlik Katsayısı (Bulanık Çıkarım)	Güvenlik Katsayısı (Analitik Çözüm)
12	2	60	-	0,96	0,8
12	2	60	0	0,72	0,8
12	2	60	0,5	0,46	0,25
12	2	100	-	0,46	0,6
12	2	100	0,5	0,40	0,2
18	2,14	40	-	1,25	1,27
18	2,14	40	0	1,04	1,27
18	2,14	40	0,4	0,42	0,46
18	2,14	40	0,5	0,38	0,39

Güvenlik katsayısı tahmin etmede kurulan modelin sonuçları analitik çözüm sonuçları olarak kıyaslandığında, birbiri arasında pozitif yönde doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir (Şekil 77). Güvenlik katsayısı değerlerinin birbiri arasındaki ilişki derecesini ifade eden korelasyon değeri 0,93 olarak hesaplanmaktadır. Buna göre, sonuçlar arasında pozitif yönde yüksek düzeyde ilişki olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 77. Analitik çözüm ile bulanık çıkarım güvenlik katsayısı değerlerinin korelasyonu

4. SONUÇLAR

Trabzon ili Araklı ilçesine bağlı Taşönü köyü sınırları içinde bulunan kireçtaşı (kalker) ocağında 2005-2007 yıllarında oluşan 3 ayrı düzlemsel kayma sonrası, heyelanlı bölgenin arkasında yapılan 5 ayrı sondaj verisinden elde edilen inceleme, gözlem ve sonuçlar aşağıdaki gibidir;

Yapılan incelemeler sonucunda, SK-3, SK-4 ve SK-5 nolu sondajlarda 17, 34.5 ve 24.5.nci metrelerde makaslama zonları tespit edilmiştir. Makaslama zonlarının eğim açıları sırasıyla 38, 54 ve 45° olarak ölçülmüştür. Makaslama zonlarının, önceki heyelanlardan sonra geliştiği ve yeni bir düzlemsel kaymayı işaret ettiği sonucuna varılmıştır. Sondajlardan elde edilen bilgilere göre, kalker formasyonunda kaya kalite değeri (RQD) çok zayıf-zayıf sınıfında, sondaj derinliklerine göre toplam RQD sınıfının zayıf-orta olduğu ortaya çıkmıştır.

Tespit edilen makaslama zonlarının derinlik ve eğim verisi ile muhtemel yeni düzlemsel yenilmenin yüzey hattının, sondajların arkasında ortalama 25 metre mesafeden, eski heyelan bölgesine ortalama 65 metre mesafeden geçtiği 3 boyutlu modelleme sonucu ortaya çıkmıştır. Heyelanlı bölgedeki kayan kütlelerin yerinden kaldırılmamış olması, yeni düzlemsel kayma kütlelerine topuk görevi gördüğü ve kaldırılması durumunda makaslama zonlarının da işaret ettiği muhtemel yenilme düzlemini de içine alan büyük çaplı bir kaymanın oluşabileceği kanaatine varılmıştır.

Limit denge analizinde kullanılan parametrelerin Taşönü kalker ocağına özel olan (kütle, yenilme düzlemi alanı, yenilme düzlemi eğimi, kil düzlemi eğimi, şev yüksekliği, şev açısı) parametreleri kuvvet dengesini oluşturmak ve kayacak kütlelerin boyutunu ortaya koymak için gerekli olduğundan, tüm bunlar 3 boyutlu model üzerinden elde edilmiş ve sabit veri olarak kabul edilmiştir. Böylece giriş veri sayısı indirgenerek sadece kohezyon, içsel sürtünme açısı ve birim hacim ağırlık değerleri değişken olarak tanımlanmıştır.

Kütle hareketinin muhtemel yenilme düzlemi veya kil düzlemi üzerinde olması durumundaki değişimi ile ağırlıklı ortalama ile oluşturulan bulanık modeller kurulmuştur. Tüm bu modellerde, kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı değerinin büyük çoğunlukta belirleyici olduğu ortaya çıkmıştır. Sabit kabul edilen diğer parametrelerin değişimi ile birim hacim ağırlığın deneylerle tespit edilen minimum-maksimum aralıklarındaki değişiminin, güvenlik katsayısını çok değiştirmedığı gözlemlenmiştir.

Ana unsur olarak, eğimli düzlemlerde içsel sürtünme açısının belirleyici olduğu ve bulanık çıkarım sistemi ile düzlemsel yenilme için model kurulabileceği, kurulan model sonuçlarının RocPlane programı ile elde edilen analitik çözümlerle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, içsel sürtünme açısı, kohezyon, yeraltı suyu durumu ve ivme ile oluşturulan bulanık çıkarım sisteminin yine RocPlane programı ile yapılan deterministik çözümlerle uyumlu olduğu sonucuna varılarak, belirli parametrelerin çok fazla etki etmemesi ve en çok etki eden parametrelerin belirlenmesi ile girdi sayısını en aza düşürerek düzlemsel yenilme analizinde uygun bir bulanık çıkarım sistemi kurulabileceği ve sonuçların tutarlı olacağı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, ocakta daha önce meydana gelen düzlemsel yenilmelerin varlığı ve muhtemel yenilmeye maruz kalacak kütlelerin de benzer parametreleri içermesi, bu çalışmanın önceki yenilme ile uyumlu olduğu ve bu çalışmanın doğrulanabileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Yapılan korelasyon analizlerinde, analitik çözüm ile bulanık mantık sistemi sonuçları kıyaslandığında, pozitif yönde bir ilişki olduğu ve güvenlik katsayısı değerlerinin birbiri arasındaki ilişki derecesini ifade eden korelasyon değerinin 0.93 olduğu bulunmuştur.

5. ÖNERİLER

- Taşönü kalker sahasında yapılacak rehabilitasyon çalışmalarında, önceki yıllarda yenilmeye maruz kalmış kütleden önce bu çalışmada tespit edilen muhtemel yenilme düzlemi hattının arkasından başlayarak düşük yükseklikte basamak tasarımı yapılarak ocak yeniden şekillendirilmelidir. Öncelikli olarak öndeki hareket etmiş kütlelerin topuk görev dengesi bozulmamalıdır.
- Yapılacak ocak tasarımında, çok düşük dayanım parametrelerine sahip ve daha önceki yenilmelere sebep olan kil düzleminin de kazınacağı şekilde tasarım yapılmalıdır. Böylece, en düşük dayanım parametrelerine sahip süreksizlik düzlemi ortadan kaldırılmış olacaktır.
- Düzlemsel yenilme için bulanık çıkarım sistemi kurulabilmektedir. Model kurulumunda, analitik çözümün güvenlik katsayısı değişimine etkisi aralıkları analiz edilerek, bulanık mantık için gerekli uzman görüşü, çözüm üzerinden elde edilmesi daha güvenilir olacağı önerilmektedir.
- Bulanık Çıkarım Sistemine yönelik tez kapsamındaki çalışma kalker ocağına özel olmakla birlikte, girdi parametrelerinin sınırları da ocağa özel olarak seçilmiştir. Sabit kabul edilen parametrelerin de sisteme dahil edilmesi mümkün olmakla birlikte, bu durumda kural tabanını oluşturmak oldukça zorlaşmaktadır. Bu nedenle girdi verileri artırıldığı durumlarda kural tabanı sayısı da artırılmalıdır.
- Analitik çözüm yapılırken, bulanık mantık sistemi için sabit kabul edilen parametreler de değişken olarak girildiği unutulmamalıdır. Bütün değişkenler üzerinden yapılan analitik çözüm sonuçları, azaltılmış değişkenler için bulanık mantık sisteminde uzman görüşü sonucu oluşan kural tabanını ortaya çıkardığından, yapılacak çalışmalarda analitik çözümlerde tüm parametreler değişken olarak kabul edilmelidir. Bulanık mantık modelinde de mümkün olan en az sayıda değişken ile de çok yakın sonuçlara ulaşılabileceği görülecektir.

6. KAYNAKLAR

- Adoko, A. C. ve Wu, L., 2011. Fuzzy Inference Systems-based Approaches in Geotechnical Engineering- a Review, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16,1, 1543-1558.
- Akbulut, İ., 2012. Şev Duraylılığı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Eğitim Serisi No:42, Ankara, 160 s.
- Aksoy, H. ve Ercanoglu, M., 2007. Fuzzified Kinematic Analysis of Discontinuity-Controlled Rock Slope Instabilities, *Engineering Geology*, 89, 3-4, 206-219.
- Aliyazıcıoğlu, Ş., 2011. Örnek Bir Bakır Madeninin Surpac Programı ile Modellenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Yüksek Lisans Tezi, 65 s. (yayınlanmamış).
- Aliyazıcıoğlu, Ş., Karaman, K., Kesimal, A., Cihangir, F. ve Erçikdi, B., 2015. Bir Kireçtaşı Ocağında (Araklı-Trabzon) Sondajların 3 Boyutlu Analizi Yoluyla Kaya Şev Duraylılığı Değerlendirmesi, Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Nisan 2015, Antalya, 24, 14-17.
- Aliyazıcıoğlu, Ş., Kesimal, A., Karaman, K., Erçikdi, B. ve Cihangir, F., 2017. Temel Madencilik Bilgileri, Editörler: Prof. Dr. C. Okay Aksoy, Dr. Eren Kömürlü, Hasan Eray Yaman, Bölüm 13: Şev Duraylılığı, Mayeb Basın yayın İnsan Kaynakları Ltd. Şti.
- Anagnosti, P., 1969. Three-Dimensional Stability of Fill Dams, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 275-280.
- ASTM, 2005. Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method, ASTM International.
- Baligh, M. ve Azzouz, A., 1975. End Effects on Stability of Cohesive Slopes, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101,11, 1105-1117.
- Barton, N.R., 1973. Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints. *Engng Geol.*, 7, 287-332.
- Barton, N.R., 1976. The Shear Strength of Rock and Rock Joints. *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13,10,, 1-24.
- Basarir, H. ve Karpuz, C., 2004. A Rippability Classification System for Marls in Lignite Mines, *Engineering Geology*, 74,3-4, 303-318.
- Basarir, H. ve Saiang, D., 2013. Assessment of Slope Stability Using Fuzzy Sets and Systems, *International Journal of Mining, Reclamation Environment*, 27, 5, 312-328.

- Başçetin, A. ve Kesimal, A., 1999a. Madencilikte Bulanık Mantık Uygulaması. İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 12, 135-144.
- Bascetin. A. ve Kesimal. A., 1999b. The Study of a Fuzzy Set Theory for the Selection of an Optimum Coal Transportation System from Pit to the Power Plant. International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment, 13, 97-101.
- Bascetin. A. ve Kesimal A., 1999c. Application of Fuzzy Logic in Mining, Istanbul University Engineering Faculty. Journal of Geosciences, 12, 1.
- Bay, Ö. F. ve Atacak, İ., 2006. Desing of a Single Phase Neuro-Fuzzy Controlled Uninterruptible Power Supply. Fifteenth Turkish Symposium on Artificial Intelligence Neural Network TAINN, Muğla.
- Bieniawski, Z. T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese, 1973, 12, 335-343.
- Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering, John Wiley & Sons.
- Bishop, A., 1955. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, Geotechnique, 5,1, 7-17.
- Brawner, C., 1977. Open-Pit Slope Stability Around the World, Canadian Mining Metallurgical Bulletin.
- Büyükkıncı, C. Z., 2019. Şev Stabilitesi Analizlerinde Kullanılan Farklı Tasarım Standartlarının Kıyaslanması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ceryan, N., 2009. Taşönü Kalker Ocağındaki (Trabzon) Kaya Şevleri Duraylılığının Olasılık Yöntemle Analizi ve Kazılabilirlik, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ceryan, N., Kesimal, A. ve Aydın, A., 2009. Trabzon-Taşönü Malzeme Ocağındaki Killerin Mühendislik Özellikleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15,3, 447-456.
- Ceryan, N., Okkan, U. ve Kesimal, A., 2012. Application of Generalized Regression Neural Networks in Predicting the Unconfined Compressive Strength of Carbonate Rocks, Rock Mechanics Rock Engineering, 45,6, 1055-1072.
- Ceryan, N., Okkan, U. ve Kesimal, A., 2013. Prediction of Unconfined Compressive Strength of Carbonate Rocks Using Artificial Neural Networks, Environmental Earth Sciences, 68,3, 807-819.
- Chakraborty, A. ve Goswami, A., 2022. The Application of Statistics and Fuzzy Logic in Predicting Slope Stability. In: Recent Advances in Civil Engineering: Proceedings of

the 2nd International Conference on Sustainable Construction Technologies and Advancements in Civil Engineering (ScTACE 2021). Singapore: Springer Nature Singapore, 137-147.

- Chen, R., 1981. Three-Dimensional Slope Stability Analysis. Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Chen, R. ve Chameau, J. L., 1983. Three-Dimensional Limit Equilibrium Analysis of Slopes, *Geotechnique*, 33,1, 31-40.
- Cihangir, F., 2006. Bir Kalker Ocağında Patlatmalı Kazılardan Kaynaklanan Yer Titreşimi ve Hava Şoku Etkilerinin İstatistiksel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Cihangir, F., Kesimal, A., Erçikdi, B. ve Durmuş, O., 2005. Bir Kalker Ocağında Patlatmalı Kazılardan Kaynaklanan Çevresel Etkilerin Analizi, *Madencilik ve Çevre Sempozyumu*, Ankara, 149-158.
- Conforth, D. H., 2005. Landslides in Practice: Investigations, Analysis and Remedial / Preventive Options in Soils, Wiley, 624 s.
- Craig, R., 1974. Soil mechanics, Taylor & Francis, 448 s.
- Çınar, S., 1977. Trabzon-Araklı-Dağbaşı-Taştepe Yöresinin 1/10000 Ölçekli Jeoloji Raporu, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Daftaribesheli, A., Ataei, M. ve Sereshki, F., 2011. Assessment of Rock Slope Stability Using the Fuzzy Slope Mass Rating (FSMR) System, *Applied Soft Computing*, 11,8, 4465-4473.
- Davis, T. J. ve Keller, C. P., 1997. Modelling Uncertainty in Natural Resource Analysis Using Fuzzy Sets and Monte Carlo Simulation: Slope Stability Prediction, *International Journal of Geographical Information Science*, 11,5, 409-434.
- Deere, D. U., 1964. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purpose, *Rock Mechanics Engineering Geology*, 1,1, 17-22.
- Dixon, C. ve Pereira, J., 1974. Plate Tectonics and Mineralization in the Tethyan Region, *Mineralium Deposita*, 9, 185-198.
- Duncan, J. M., Wright, S. G. ve Brandon, T. L., 2014. Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons, 336 s.
- Elmas, Ç., 2011. Yapay Zeka Uygulamaları, Seçkin Yayıncılık,, Ankara, 424 s.
- Ercikdi, B., Karaman, K., Cihangir, F., Yılmaz, T., Aliyazıcıoğlu, Ş. ve Kesimal, A., 2016. Core Size Effect on the Dry and Saturated Ultrasonic Pulse Velocity of Limestone Samples, *Ultrasonics*, 72, 143-149.

- Erçikdi, B., 2004. Araklı Taşönü Kalker Ocağında Yapılan Atımların Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Erçikdi, B., Cihangir, F. ve Kesimal, A., 2006. Düzlemsel Kaymanın Oluştığı bir Kireçtaşı Ocağında Güvenlik Katsayılarının Belirlenmesi: Örnek Uygulama, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 19, 2, 121-129.
- Erçikdi, B., Kesimal, A. ve Yılmaz, E., 2004a. Araklı-Taşönü Kalker Ocağında Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntılarının Değerlendirilmesi, VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas, 337-347.
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Cihangir, F., 2004b. Patlatma Kaynaklı Yersarsıntısı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi, Journal of Science Technology of Dumlupınar University, 7, 195-216.
- Erguvanlı, K., 1975. Trabzon Çimento Fabrikası Araklı-Taşönü Köyü Hammadde Raporu, 30 s.
- Eskikaya, Ş., Karpuz, C., Hindistan, M. ve Tamzok, N., 2005. Maden Mühendisliği Açık Ocak İşletmeciliği El Kitabı, TMMOB-Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 678 s.
- Fattahi, H., 2017. Prediction of Slope Stability Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based on Clustering Methods, Journal of Mining Environmental Earth Sciences, 8, 2, 163-177.
- Fellenius, W., 1940. Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion): und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen, W. Ernst & Sohn, 40 s.
- Fredlund, D. G. ve Krahn, J., 1977. Comparison of Slope Stability Methods of Analysis, Canadian Geotechnical Journal, 14, 3, 429-439.
- Gokceoglu, C., 2002. A Fuzzy Triangular Chart to Predict the Uniaxial Compressive Strength of the Ankara Agglomerates from Their Petrographic Composition, Engineering Geology, 66, 1, 39-51.
- Gökçeoğlu, C., Ulusay, R. ve Sönmez, H., 2000. Factors Affecting the Durability of Selected Weak and Clay-Bearing Rocks from Turkey, with Particular Emphasis on the Influence of the Number of Drying and Wetting Cycles, Engineering Geology, 57, 3-4, 215-237.
- Gökçeoğlu, C., Sönmez, H. ve Ercanoğlu, M., 2001. Bulanık Mantık: Özellikleri ve Süreksizlik Denetimli Bir Şey Duraysızlığına Uygulanması, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 23, 1, 19-32.
- Güven, İ., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, MTA Yayınları, Ankara, 65 s.

- Haghshenas, S. S., Mikaeil, R., Haghshenas, S. S., ZareNaghadehi, M. ve Moghadam, P. S., 2017. Fuzzy and Classical MCDM Techniques to Rank the Slope Stabilization Methods in a Rock-Fill Reservoir Dam, *Civ. Eng. J.* 3, 6, 382-394.
- Hamamcıoğlu, A. ve Sawa, T., 1971. Gelişen Yeni Görüşler Işığında Doğu Karadeniz Bölgesi Cu-Pb-Zn Yatakları, Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik II. Kongresi, 64-73.
- Highland, L. ve Bobrowsky, P. T., 2008. *The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides*, Reston, VA, USA: US Geological Survey Reston.
- Hoek, E., 1970. Estimating the Stability of Excavated Slopes in Opencast Mines, *Institution of Mining Metallurgy A*, 105, A132.
- Hoek, E., Bray, J., 1977. *Rock Slope Engineering*, The Institute of Mining ve Metallurgy 2nd, 402 s.
- Hoek, E. ve Bray, J. D., 1981. *Rock Slope Engineering*, CRC Press.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1980. Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106, 9, 1013-1035.
- Hovland, H. J., 1977. Three-Dimensional Slope Stability Analysis Method, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103, 9, 971-986.
- Hungr, O., 1987. An Extension of Bishop's Simplified Method of Slope Stability Analysis to Three Dimensions, *Geotechnique*, 37, 1, 113-117.
- Iğdır, İ., 1971. Sürmene-Araklı-Arsin-Yomra Bölgesinin Jeolojisi, MTA Rapor 1178.
- İsmail, K., 2002. Aristoteles Mantığı ile Felsefe-Bilim İlişkisi, *Ankara Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi*, 43, 2, 355-374.
- ISRM, 2007. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*, International Soc. for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods, 628 s.
- Janbu, N., 1954., *Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis*, European Conference on Stability of Earth Slopes, Sweden, 3, 43-49.
- Jumikis, A. R. 1967. *Introduction to soil mechanics*, 436 s.
- Kaftan, İ., Balkan, E. ve Müjgan, Ş., 2013. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) ve Jeofizikte Kullanım Alanları: Sismoloji Örneği, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15, 43, 15-29.
- Karadoğan, A., Kahriman, A. ve Başçetin, A., 2002. Yeraltı Üretim Yöntemi Seçimine Yeni Bir Yaklaşım, *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 15,1, 71-81.

- Karadogan, A., Kahriman, A. ve Ozer, U., 2008. Application of Fuzzy Set Theory in the Selection of Underground Mining Method, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108, 2, 73-79.
- Karaman, K., 2011a. Taşönü (Trabzon-Araklı) Kalker Ocağındaki Şevlerin Duraylılık Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karaman, K., 2011b. Kireçtaşlarının Ağırlıkça Su Emme Yüzdelere Göre Bir Ayırma Sınıflaması, İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 24, 2, 119-128.
- Karaman, K., Cihangir, F., Erçikdi, B. ve Kesimal, A., 2010. Killi-Karbonatlı Kayaçlarda Numune Uzunluğunun Ultrasonik P-Dalga Hızı Üzerindeki Etkisi, Bilimsel Madencilik Dergisi, 49, 4, 37-45.
- Karaman, K., Cihangir, F. ve Kesimal, A., 2013. Kaya Malzemesinin Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açısının Dolaylı Yöntemlerle İrdelenmesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4, 2, 13-19.
- Karaman, K., Ercikdi, B. ve Kesimal, A., 2013. The Assessment of Slope Stability and Rock Excavatability in A Limestone Quarry, Earth Sciences Research Journal, 17, 2, 169-181.
- Karaman, K. ve Kesimal, A., 2012. Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmininde Nokta Yüğü Deney Yöntemleri ve Porozenin Değerlendirilmesi, Bilimsel Madencilik Dergisi, 51, 4, 3-14.
- Karpuz, C., 1990. A Classification System for Excavation of Surface Coal Measures, Mining Science and Technology, 11, 2, 157-163.
- Karpuz, C. ve Hindistan, M. A., 2006. Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları, TMMOB Maden Mühendisleri Odası yayın No:116, 346 s.
- Kesimal, A., Ercikdi, B. ve Cihangir, F., 2008. Environmental Impacts of Blast-Induced Acceleration on Slope Instability at a Limestone Quarry, Environmental Geology, 54, 2, 381-389.
- Kesimal, B. ve Erçikdi, A., 2012. Düzlemsel Kaymanın Oluştığı Bir Kireçtaşı Ocağında Güvenlik Katsayılarının Belirlenmesi: Örnek Uygulama, İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 19, 2, 121-130.
- Khakestar, M.S., Hassani, M., Moarefvand, P. ve Madani, H., 2016. Application of Multi-Criteria Decision Making Methods in Slope Stability Analysis of Open Pit Mines, J. Geol. Soc. India, 87, 2, 213-221.
- Leshchinsky, D., Baker, R. ve Silver, M., 1985. Three Dimensional Analysis of Slope Stability, International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics, 9, 3, 199-223.

- Liu, Y. C. ve Chen, C. S., 2007. A New Approach for Application of Rock Mass Classification on Rock Slope Stability Assessment, *Engineering Geology*, 89, 1-2, 129-143.
- Liu, Z., Chen, F. ve Zhou, Y., 2008. Stability Evaluation of Depth Cutting Slope in Rock Mass Based on Fuzzy Probability Method. *Rock Soil Mech* 29, S1, 368–372.
- Lowe, J. ve Karafiath, L., 1960. Effect of Anisotropic Consolidation on the Undrained Shear Strength of Compacted Clays, *Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, 837-858.
- Mamdani, E. H. ve Assilian, S., 1975. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7, 1, 1-13.
- US Army Corps of Engineer, 1970. *Engineering and Design: Stability of Earth and Rock-Fill Dams*, Engineer Manual.
- Mohamed, T., Anuar, K. ve Mukhlisin, M., 2012. Prediction of Slope Stability Using Statistical Method and Fuzzy Logic, *TOJSAT*, 2, 4, 68-73.
- Mohamed, T., Kasa, A. ve Taha, M., 2012. Fuzzy Logic System for Slope Stability Prediction, *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 2, 38-42.
- Morgenstern, N. U. ve Price, V. E., 1965. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces, *Geotechnique*, 15, 1, 79-93.
- Nacar, S., 2020. İklim Değişikliğinin Doğu Karadeniz Havzası Sıcaklık ve Yağış Parametreleri Üzerindeki Olası Etkilerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Norrish, N. I. ve Wyllie, D. C., 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*, Chapter 15: Rock Slope Stability Analysis, *Transportation Research Board Special Report*, 247 s.
- Odacı, B., 2013. Araklı -Sürmene (Trabzon) Arasındaki Bölgenin Jeolojik Ve Yapısal Özellikleri (Kuzeydoğu Anadolu, Türkiye), *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Önalp, A., 1983. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, Cilt 2, K.T.Ü, Trabzon.
- Öner, N., 1970. *Klasik mantık*, Ankara Üniversitesi İlahiyat Fakültesi, 192 s.
- Özgenoğlu, A., 1986. Madencilikte Şev Duraylılık Analizi Yaklaşımları, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 25, 1, 17-27.
- Petterson, K. E., 1955. The early history of circular sliding surfaces, *Geotechnique*, 5,4, 275-296.

- Piteau, D. ve Martin, D., 1982. Mechanics of Rock Slope Failure, 3rd International Conference of Stability in Surface Mining, Vancouver, Canada, 113-169.
- Poole, R. W. ve Farmer, I. W., 1980. Consistency and Repeatability of Schmidt Hammer Rebound Data During Field Testing, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 17, 3, 167-171.
- Rabat, A., Cano, M., Tomas, R., Tamayo, A. E. ve Alejano, L. R., 2020. Evaluation of Strength and Deformability of Soft Sedimentary Rocks in Dry and Saturated Conditions Through Needle Penetration and Point Load Tests: A Comparative Study, Rock Mechanics and Rock Engineering, 53, 2707-2726.
- Rafiee, R., Ataei, M., KhaloKakaie, R., Jalali, S.M.E., Sereshki, F. ve 2016. A Fuzzy Rock Engineering System to Assess Rock Mass Cavability in Block Caving Mines, 27, 7, 2083–2094.
- Raghuvanshi, T. K. (2019). Plane Failure in Rock Slopes–A Review on Stability Analysis Techniques. Journal of King Saud University-Science, 31, 1, 101-109.
- Rahman, H. A. ve Mapjabil, J., 2017. Landslides Disaster in Malaysia: An Overview, 8, 1, 58-71.
- Romana, M., 1985. New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. In Proceedings of the International Symposium on Role of Rock Mechanics, Zacatecas, Mexico, 49-53.
- Ruigeng, Z., 1998. Multipersonmultilayer Fuzzy Comprehensive Decision Making for Control Plans of Unstable Slopes, Rock Soil Mech. J., S1, P642.22.
- Saboya Jr, F., da Gloria Alves, M. ve Pinto, W. D., 2006. Assessment of Failure Susceptibility of Soil Slopes Using Fuzzy Logic, Engineering Geology, 86, 4, 211-224.
- Sarı, M., Murat, Y. Ş. ve Kırabalı, M., 2005. Bulanık Modelleme Yaklaşımı ve Uygulamaları, Journal of Science Technology of Dumlupınar University, 9, 77-92.
- Sarma, S. K., 1973. Stability analysis of embankments and slopes, Geotechnique, 23, 3, 423-433.
- Schultze-Westrum, H. H., 1961. Giresun Civarındaki Aksu Deresinin Jeolojik Profili-Kuzeydoğu Anadolu'da Doğu Pontus Cevher ve Mineral Bölgesinin Jeolojisi ve Maden Yatakları ile İlgili Mütalaalar, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 57, 57.
- Seed, H. B. ve Sultan, H. A., 1967. Stability Analyses for a Sloping Core Embankment, Journal of the Soil Mechanics Foundations Division, 93, 4, 69-83.
- Seed, H. B., Woodward, R. J., Lundgren, R., 1964. Fundamental Aspects of the Atterberg Limits, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 90, 6, 75-106.

- Sekercioglu, E., 1993. Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, 28, 216.
- Sherard, J. L., Woodward, R. J., Gizienski, S. F. ve Clevenger, W. A., 1967. Earth and Earth-Rock Dams, John Wiley, İngiltere.
- Sonmez, H., Gokceoglu, C. ve Ulusay, R., 2003. An Application of Fuzzy Sets to the Geological Strength Index (GSI) System Used in Rock Engineering, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16, 3, 251-269.
- Spencer, E., 1967. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces, Geotechnique, 17, 1, 11-26.
- Su, H., Li, J., Cao, J. ve Wen, Z., 2014. Macro-Comprehensive Evaluation Method of High Rock Slope Stability in Hydropower Projects. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 28, 2, 213–224.
- Sugeno, M., 1985. An Introductory Survey of Fuzzy Control, Information Sciences, 36, 1-2, 59-83.
- Şen, Z., 2020. Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Şengör, A. ve Yılmaz, Y., 1983. Türkiye’de Tetis’ in Evrimi: Levha Tektoniği Açısından Bir Yaklaşım, Türkiye Jeoloji Kurumu Yerbilimleri Özel Dizisi, 1, 75.
- Tarhan, F., 1996. Mühendislik Jeolojisi Prensipleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Trabzon, 145, 384 s.
- Tunoğlu, C., 2001. Pontian aged Loxoconcha (Ostracoda) Species From Eastern Black Sea Region of Turkey, Yerbilimleri, 24, 127-142.
- Tzamos, S. ve Sofianos, A., 2006. Extending the Q System's Prediction of Support in Tunnels Employing Fuzzy Logic and Extra Parameters, International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 43, 6, 938-949.
- Varnes, D. J., 1978. Slope Movement Types and Processes, Special Report, 176, 11-33.
- Vrusias, B., 2005. Introduction to Fuzzy Logic. Lectures on Artificial Intelligence-CS364.
- Wyllie, D. C. ve Mah, C., 2004. Rock Slope Engineering, Civil and Mining, 4th Edition, CRC Press, 456 s.
- Xinhua, X. ve Xiaodong, Y., 2007. A Fuzzy Neural Network Model for Predicting Slope Stability, Journal of Engineering Geology, 15, 1, 77-82.
- Yıldız, B., 1983. Doğu Karadeniz Bölgesinde Cu-Pb-Zn Cevherleşmelerinin Uzay Görüntülerinden Saptanan Çeşitli Yapılar İle İlişkisi, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 99-100, 99-100, 1-9.

- Yuanyou, X., ve Ruigeng, Z., 2000. Analysis on Control Decision-Making of Unstable Rock Mass in Banyan Mountain, Huangshi City, Chin. J. Rock Mech. Eng, 4, P642.2.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets, Information Control, 8,3, 338-353.
- Zadeh, L. A., 1988. Fuzzy Logic, Computer, 21, 4, 83-93.
- Zadeh, L. A., Klir, G. L. ve Yuan, B., 1996. Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers. Vol. 6. World Scientific.
- Zhang, Y. J., Cao, W. G. ve Zhao, M. H., 2009. Application of Fuzzy Sets to Geological Strength Index (GSI) System Used in Rock Slope, In Soils and Rock Instrumentation, Behavior, and Modeling: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference, 30-35.



7. EKLER

Ek Tablo 1. Sondajların karot sandıklarındaki ilerleme mesafelerine göre RQD değerleri ve kaya kalite sınıflandırmaları

SK-1				
Formasyon	Başlangıç (m)	Bitiş (m)	RQD (%)	Kaya Kalitesi
Zemin	0	8	-	-
Kalker	8	9.2	10	Çok zayıf
	9.2	10.5	31	Zayıf
	10.5	11.7	10	Çok zayıf
	11.7	13	20	Çok zayıf
	13	14.3	20	Çok zayıf
	14.3	15.5	35	Zayıf
	15.5	16.7	60	Orta
	16.7	18	60	Orta
	18	19.3	54	Orta
	19.3	20.5	95	Çok iyi
	20.5	21.8	28	Zayıf
	21.8	23	62	Orta
	23	24	100	Çok iyi
	24	25.2	87	İyi
	25.2	26.4	58	Orta
Volkanik Breş	26.4	27.6	65	Orta
	27.6	28.7	96	Çok iyi
	28.7	30	42	Zayıf
	30	31.2	51	Orta
	31.2	32.5	24	Çok zayıf
	32.5	33.7	48	Zayıf
	33.7	34.8	85	İyi
	34.8	35.9	60	Orta
	35.9	37	66	Orta
	37	38	82	İyi
	38	39	75	İyi
	39	40	97	Çok iyi
	40	41	62	Orta
	41	42	86	İyi

Ek Tablo 1'in devamı

SK-2				
Formasyon	Başlangıç (m)	Bitiş (m)	RQD (%)	Kaya Kalitesi
Zemin	0	8	0	-
Kalker	8	9	0	Çok zayıf
	9	10	33	Zayıf
	10	11	56	Orta
	11	12	0	Çok zayıf
	12	13	23	Çok zayıf
	13	14	12	Çok zayıf
	14	15.2	38	Zayıf
	15.2	16.3	35	Zayıf
Volkanik Breş	16.3	17.6	12	Çok zayıf
	17.6	18.8	51	Orta
	18.8	20	58	Orta
	20	21.3	37	Zayıf
	21.3	22.5	42	Zayıf
	22.5	23.7	70	Orta
	23.7	24.9	57	Orta
	24.9	26	97	Çok iyi
	26	27	80	İyi
	27	28	96	Çok iyi
	28	29	86	İyi

Ek Tablo 1'in devamı

SK-3				
Formasyon	Başlangıç (m)	Bitiş (m)	RQD (%)	Kaya Kalitesi
Zemin	0	12.7	0	-
	12.7	14	0	-
Kalker	14	15	0	Çok zayıf
	15	16.2	65	Orta
	16.2	17.5	33	Zayıf
	17.5	18.8	0	Çok zayıf
	18.8	20	22	Çok zayıf
	20	21.3	10	Çok zayıf
Volkanik Breş	21.3	22.6	0	Çok zayıf
	22.6	24	13	Çok zayıf
	24	25.3	0	Çok zayıf
	25.3	26.5	10	Çok zayıf
	26.5	27.7	60	Orta
	27.7	29	72	Orta
	29	30	73	Orta
	30	31	61	Orta
	31	32	41	Zayıf
	32	33	67	Orta
	33	34	100	Çok iyi
	34	35	81	İyi
	35	36	60	Orta
	36	37	76	İyi
	37	38	81	İyi
	38	39	93	Çok iyi
	39	40	93	Çok iyi

Ek Tablo 1'in devamı

SK-4				
Formasyon	Başlangıç (m)	Bitiş (m)	RQD (%)	Kaya Kalitesi
Zemin	0	1.3	-	-
Kalker	1.3	2.5	11	Çok zayıf
	2.5	3.7	76	İyi
	3.7	4.9	72	Orta
	4.9	6.2	11	Çok zayıf
	6.2	7.5	49	Zayıf
	7.5	8.5	74	Orta
	8.5	9.7	75	İyi
	9.7	10.8	48	Zayıf
	10.8	12	36	Zayıf
	12	13	25	Zayıf
	13	14	94	Çok iyi
	14	15	55	Orta
	15	16	13	Çok zayıf
	16	17	27	Zayıf
	17	18	47	Zayıf
	18	19	85	İyi
	19	20	88	İyi
	20	21	83	İyi
	21	22	80	İyi
	22	23	96	Çok iyi
	23	24	83	İyi
	24	25	96	Çok iyi
	25	26	79	İyi
	26	27	0	Çok zayıf
	27	28	46	Zayıf
	28	29	38	Zayıf
	29	30	0	Çok zayıf
	30	31	23	Çok zayıf
	31	32	52	Orta
	32	33	15	Çok zayıf
	33	34	11	Çok zayıf
	34	35	34	Zayıf
	35	36	31	Zayıf
	36	37	26	Zayıf
Volkanik Breş	37	38.2	24	Çok zayıf
	38.2	39.4	51	Orta
	39.4	40.5	32	Zayıf
	40.5	41.7	26	Zayıf
	41.7	43	26	Zayıf
	43	44.3	0	Çok zayıf
	44.3	45.6	22	Çok zayıf
	45.6	46.8	12	Çok zayıf
	46.8	48	0	Çok zayıf
	48	49	0	Çok zayıf

Ek Tablo 1'in devamı

SK-5				
Formasyon	Başlangıç (m)	Bitiş (m)	RQD (%)	Kaya Kalitesi
Zemin	0	2	0	-
	2	3	0	-
Kalker	3	4	29	Zayıf
	4	5	55	Orta
	5	6	79	İyi
	6	7	43	Zayıf
	7	8	58	Orta
	8	9	37	Zayıf
	9	10	34	Zayıf
	10	11	25	Zayıf
	11	12	54	Orta
	12	13	49	Zayıf
	13	14	57	Orta
	14	15	57	Orta
	15	16.3	46	Zayıf
	16.3	17.6	56	Orta
	17.6	18.8	57	Orta
	18.8	20.1	49	Zayıf
	20.1	21.5	13	Çok zayıf
	21.5	22.9	0	Çok zayıf
	22.9	24.3	0	Çok zayıf
	24.3	25.6	59	Orta
Volkanik Breş	25.6	26.9	39	Zayıf
	26.9	28	22	Çok zayıf
	28	29	32	Zayıf
	29	30	46	Zayıf
	30	31	38	Zayıf
	31	32	12	Çok zayıf
	32	33	0	Çok zayıf

Ek Tablo 2. Yoğunluk değerleri

Numune No	Çap (mm)	Boy (mm)	Hacim (cm ³)	Doygun kütle (gr)	Kuru kütle (gr)	Doygun yoğunluk (gr/cm ³)	Kuru yoğunluk (gr/cm ³)
1-3-16	47.9	119.4	215.162	502.38	478.81	2.335	2.225
1-3-17	47	121.4	210.622	486.02	448.39	2.308	2.129
1-5-25	47.4	131.8	232.574	551.7	526.25	2.372	2.263
1-5-28	47.5	103.2	182.876	426.45	397.67	2.332	2.175
1-6-31	47.3	122.3	214.901	520.84	492.47	2.424	2.292
1-7-37	47.2	155.5	272.085	628.85	580.4	2.311	2.133
3-7-36	47.2	146.3	255.987	569.89	517.79	2.226	2.023
3-7-37	47.2	141.6	247.763	585.1	547.52	2.362	2.210
4-1-3	46.8	106.2	182.686	435.04	410.79	2.381	2.249
4-1-4-a	46.8	120.55	207.371	507.94	475.52	2.449	2.293
4-1-4-b	46.9	129.45	223.634	540.7	515.07	2.418	2.303
4-2-8	46.2	117.3	196.640	436.5	398.6	2.220	2.027
4-3-15	46	139.8	232.334	508.32	460.3	2.188	1.981
4-4-21	46.5	121.75	206.759	453.12	436.77	2.192	2.112
4-2-12	46.6	112.4	191.703	394.54	352.39	2.058	1.838
4-5-23	46.6	139	237.070	498.26	483.06	2.102	2.038
4-5-25	46.9	133.95	231.408	588.09	575.24	2.541	2.486
4-5-26	47.1	126.95	221.189	556.41	541.49	2.516	2.448
4-6-28	47.1	105.7	184.165	472.33	464.71	2.565	2.523
4-8-40	47.3	138.45	243.279	603.38	547.9	2.480	2.252
4-4-18	46.5	130.3	221.279	466.87	452.08	2.110	2.043
4-6-30	47.2	130.3	227.991	591.52	584.46	2.594	2.564
4-2-9-b	45.8	155.25	255.772	578.66	516.31	2.262	2.019
4-3-14	46.2	141.7	237.544	551.39	500.36	2.321	2.106
4-2-9-a	45.8	142.75	235.178	513.03	454.11	2.181	1.931
5-3-17	46.4	137.45	232.418	498.92	478.14	2.147	2.057
5-2-6	46.3	119.8	201.701	442.35	402.19	2.193	1.994
5-2-8	46.2	113.95	191.024	416.5	377.77	2.180	1.978
5-6-27	47.2	106.3	185.998	478.73	471.95	2.574	2.537
5-2-9	46.7	111.8	191.499	392.29	348.76	2.049	1.821
5-3-13	46	144.7	240.477	546.03	483.08	2.271	2.009
5-5-23	46.8	134.15	230.766	559.08	533.29	2.423	2.311
5-4-18	46.3	127.8	215.170	460.13	445.77	2.138	2.072
5-5-24	47.2	103.8	181.623	403.45	380.25	2.221	2.094
5-4-19	46.4	119.25	201.644	416.99	398.26	2.068	1.975

Ek Tablo 3. Tüm örneklere ait doymun-kuru birim hacim ağırlık, gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri

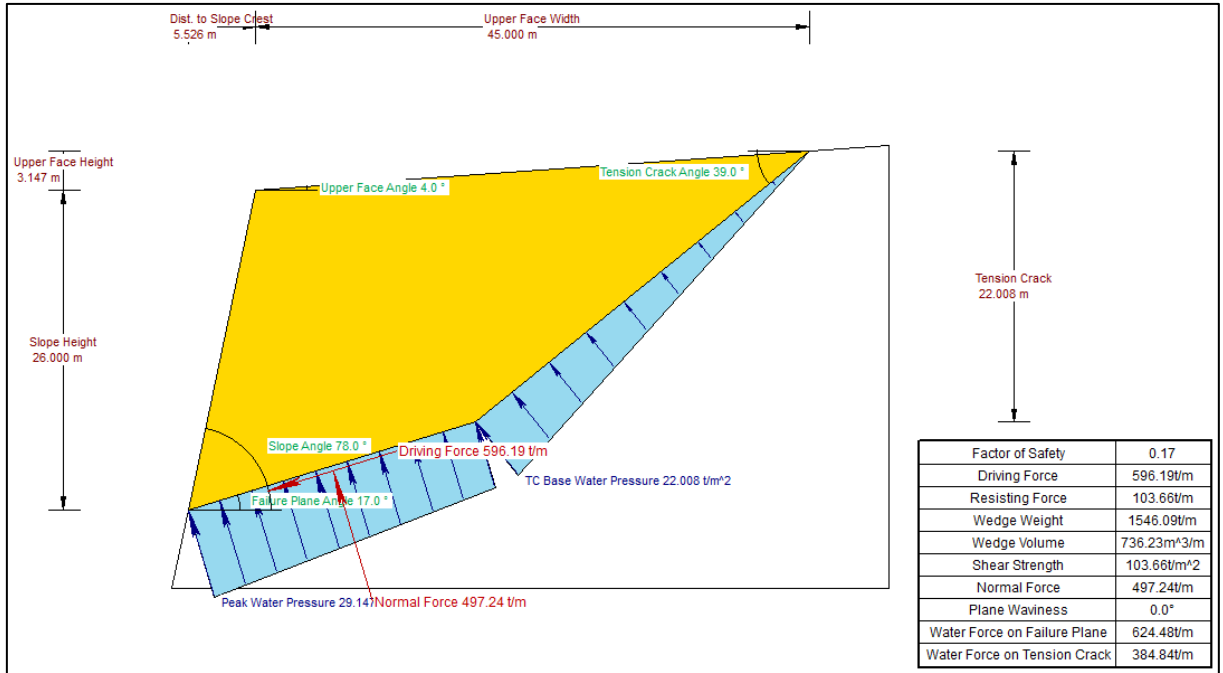
Numune No	Doygun birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	Kuru birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	Gözeneklilik (%)	Boşluk oranı (%)
1-3-16	22.91	21.83	10.95	12.30
1-3-17	22.64	20.88	17.87	21.75
1-5-25	23.27	22.20	10.94	12.29
1-5-28	22.88	21.33	15.74	18.68
1-6-31	23.78	22.48	13.20	15.21
1-7-37	22.67	20.93	17.81	21.66
3-7-36	21.84	19.84	20.35	25.55
3-7-37	23.17	21.68	15.17	17.88
4-1-3	23.36	22.06	13.27	15.31
4-1-4-a	24.03	22.50	15.63	18.53
4-1-4-b	23.72	22.59	11.46	12.94
4-2-8	21.78	19.89	19.27	23.88
4-3-15	21.46	19.44	20.67	26.05
4-4-21	21.50	20.72	7.91	8.59
4-2-12	20.19	18.03	21.99	28.18
4-5-23	20.62	19.99	6.41	6.85
4-5-25	24.93	24.39	5.55	5.88
4-5-26	24.68	24.02	6.75	7.23
4-6-28	25.16	24.75	4.14	4.32
4-8-40	24.33	22.09	22.81	29.54
4-4-18	20.70	20.04	6.68	7.16
4-6-30	25.45	25.15	3.10	3.20
4-2-9-b	22.19	19.80	24.38	32.24
4-3-14	22.77	20.66	21.48	27.36
4-2-9-a	21.40	18.94	25.05	33.43
5-3-17	21.06	20.18	8.94	9.82
5-2-6	21.51	19.56	19.91	24.86
5-2-8	21.39	19.40	20.27	25.43
5-6-27	25.25	24.89	3.65	3.78
5-2-9	20.10	17.87	22.73	29.42
5-3-13	22.27	19.71	26.18	35.46
5-5-23	23.77	22.67	11.18	12.58
5-4-18	20.98	20.32	6.67	7.15
5-5-24	21.79	20.54	12.77	14.64
5-4-19	20.29	19.38	9.29	10.24

Ek Tablo 4. Tek eksenli basınç dayanım deneyi sonuçları

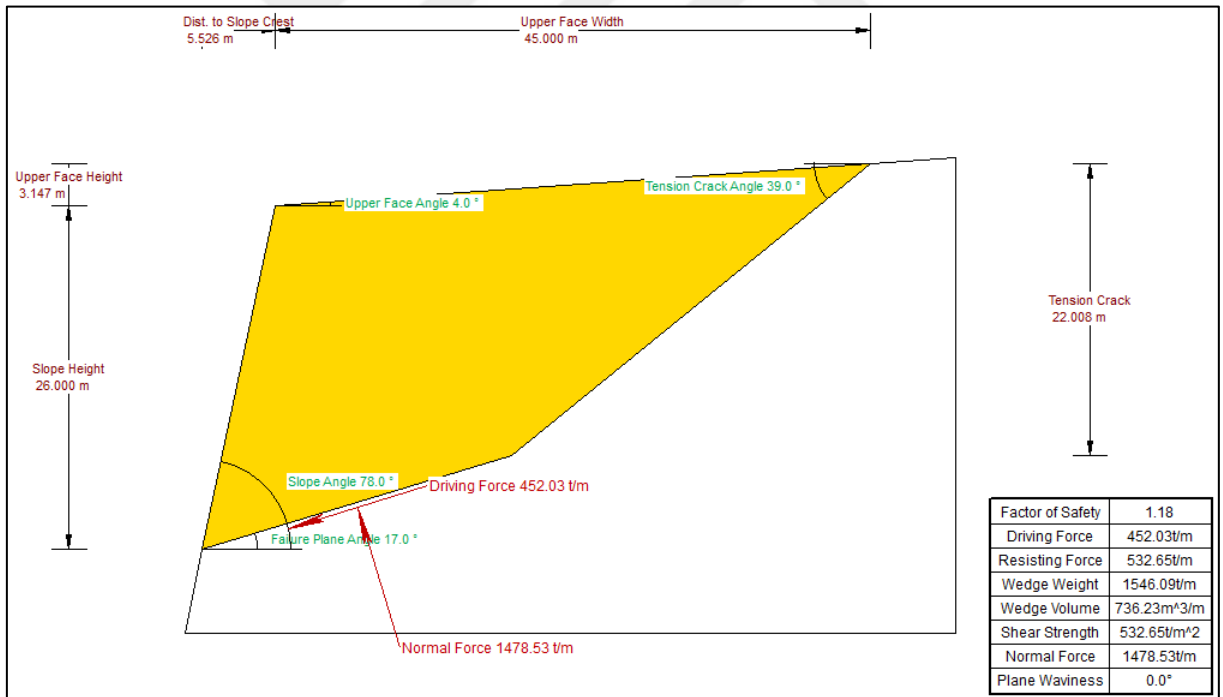
Numune No	Çap (mm)	Boy (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Kırılma Açısı (°)	Alan (mm ²)	TEBD (MPa)
1-3-17	47	121.3	13.36	82	1734.94	7.70
1-3-16	47.9	119.35	65.18	81	1802.03	36.17
1-5-25	47.4	131.7	82.38	78	1764.60	46.68
1-5-28	47.5	103.3	30.97	76	1772.05	17.48
1-6-31	47.3	122.5	31.3	74	1757.16	17.81
1-3-15	47.6	127.4	13.51	81	1779.52	7.59
1-4-19	47.1	119.3	20.79	82	1742.34	11.93
1-4-20	47.1	120.2	29.16	87	1742.34	16.74
5-2-6	46.3	119.8	24.23	68	1683.65	14.39
5-2-8	46.2	113.95	23.84	85	1676.39	14.22
5-6-27	47.2	106.3	36.26	62	1749.74	20.72
5-2-9	46.7	111.8	12.5	81	1712.87	7.30
5-3-13	46	144.7	12.64	75	1661.90	7.61
5-5-23	46.8	134.15	26.37	65	1720.21	15.33
5-4-18	46.3	127.8	20.39	55	1683.65	12.11
5-5-24	47.2	103.8	27.02	70	1749.74	15.44
5-4-19	46.4	119.25	14.71	56	1690.93	8.70
4-1-3	46.8	106.2	64.23	75	1720.21	37.34
4-1-4-a	46.8	120.55	61.23	62	1720.21	35.59
4-1-4-b	46.9	129.45	49.67	60	1727.57	28.75
4-2-8	46.2	117.3	29.52	77	1676.39	17.61
4-3-15	46	139.8	34.02	63	1661.90	20.47
4-4-21	46.5	121.75	23.33	60	1698.23	13.74
4-2-12	46.6	112.4	21.23	75	1705.54	12.45
4-5-23	46.6	139	31.99	70	1705.54	18.76
4-5-25	46.9	133.95	37.5	60	1727.57	21.71
4-5-26	47.1	126.95	33.44	64	1742.34	19.19
4-6-28	47.1	105.7	38.36	68	1742.34	22.02
4-8-40	47.3	138.45	19.05	71	1757.16	10.84
4-4-18	46.5	130.3	17.71	57	1698.23	10.43
4-6-30	47.2	130.3	51.75	68	1749.74	29.58
4-2-9-b	45.8	155.25	25.43	56	1647.48	15.44
4-3-14	46.2	141.7	22.17	76	1676.39	13.22
4-2-9-a	45.8	142.75	22.6	60	1647.48	13.72
5-3-17	46.4	137.45	23.33	57	1690.93	13.80
Minimum değer			12.5	55	1647.48	7.30
Maksimum değer			82.38	87	1802.03	46.68

Ek Tablo 5. Kohezyon, içsel sürtünme açısı, normal ve makaslama gerilmesi değerleri

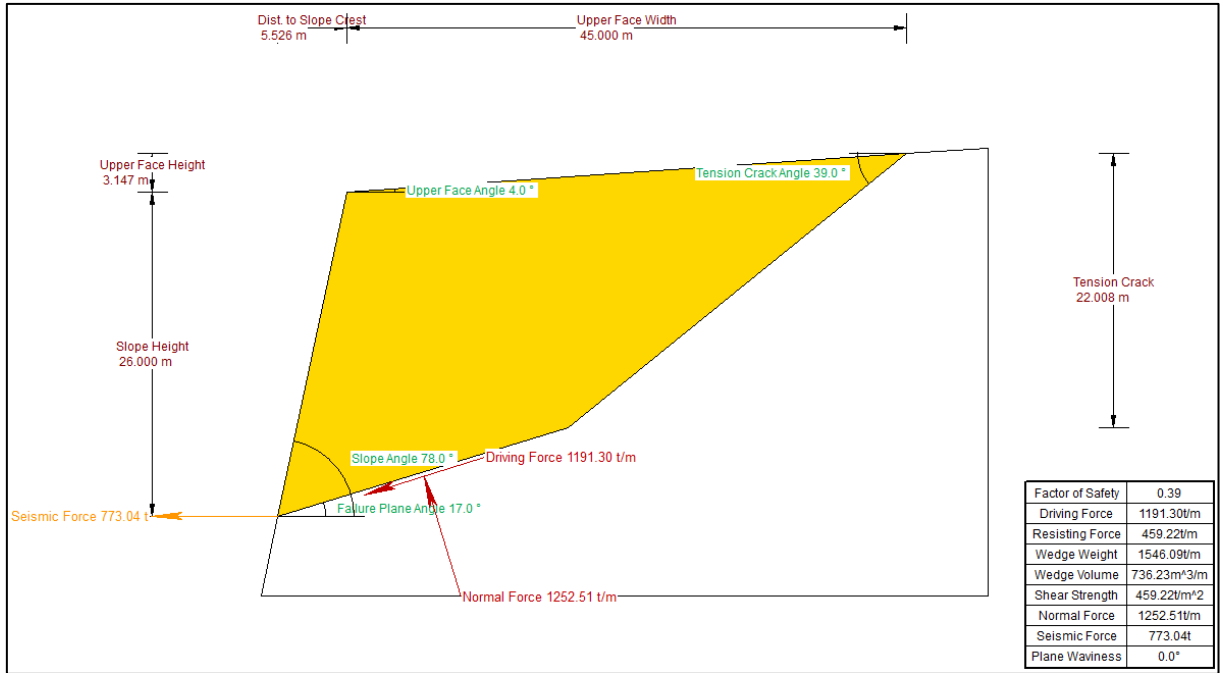
Numune No	TEBD (MPa)	Θ (°)	C (MPa)	$\emptyset$ (°)	Normal Gerilme (MPa)	Makaslama Gerilmesi (MPa)
1-3-17	7.70	8	3.35	74	0.15	1.06
1-3-16	36.17	9	15.45	72	0.89	5.59
1-5-25	46.68	12	18.90	66	2.02	9.49
1-5-28	17.48	14	6.83	62	1.02	4.10
1-6-31	17.81	16	6.71	58	1.35	4.72
1-3-15	7.59	9	3.24	72	0.19	1.17
1-4-19	11.93	8	5.19	74	0.23	1.64
1-4-20	16.74	3	7.94	84	0.05	0.87
5-2-6	14.39	22	4.85	46	2.02	5.00
5-2-8	14.22	5	6.52	80	0.11	1.23
5-6-27	20.72	28	6.23	34	4.57	8.59
5-2-9	7.30	9	3.12	72	0.18	1.13
5-3-13	7.61	15	2.92	60	0.51	1.90
5-5-23	15.33	25	4.88	40	2.74	5.87
5-4-18	12.11	35	3.15	20	3.98	5.69
5-5-24	15.44	20	5.41	50	1.81	4.96
5-4-19	8.70	34	2.31	22	2.72	4.03
4-1-3	37.34	15	14.33	60	2.50	9.33
4-1-4-a	35.59	28	10.69	34	7.85	14.75
4-1-4-b	28.75	30	8.30	30	7.19	12.45
4-2-8	17.61	13	7.00	64	0.89	3.86
4-3-15	20.47	27	6.27	36	4.22	8.28
4-4-21	13.74	30	3.97	30	3.43	5.95
4-2-12	12.45	15	4.78	60	0.83	3.11
4-5-23	18.76	20	6.57	50	2.19	6.03
4-5-25	21.71	30	6.27	30	5.43	9.40
4-5-26	19.19	26	6.00	38	3.69	7.56
4-6-28	22.02	22	7.43	46	3.09	7.65
4-8-40	10.84	19	3.87	52	1.15	3.34
4-4-18	10.43	33	2.83	24	3.09	4.76
4-6-30	29.58	22	9.97	46	4.15	10.27
4-2-9-b	15.44	34	4.10	22	4.83	7.16
4-3-14	13.22	14	5.17	62	0.77	3.10
4-2-9-a	13.72	30	3.96	30	3.43	5.94
5-3-17	13.80	33	3.75	24	4.09	6.30
Minimum değer			2.31	20	0.05	0.87
Maksimum değer			18.90	84	7.85	14.75
Ortalama değer			6.58	49	2.57	5.73



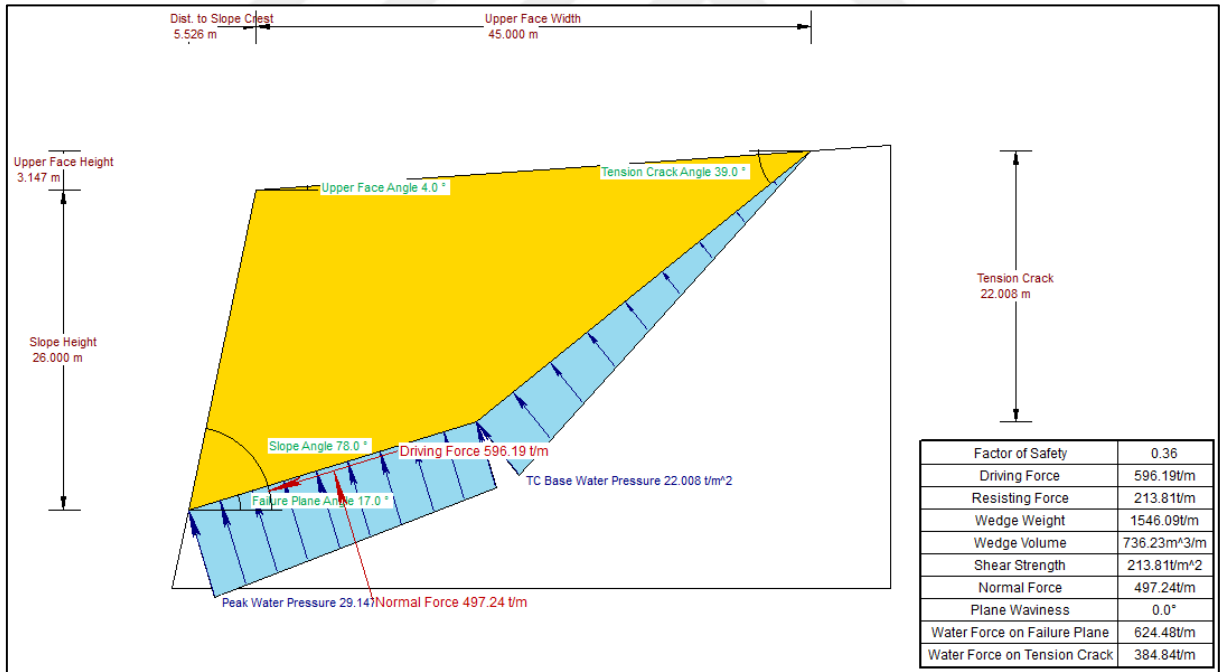
Ek Şekil 1. En düşük c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %100)



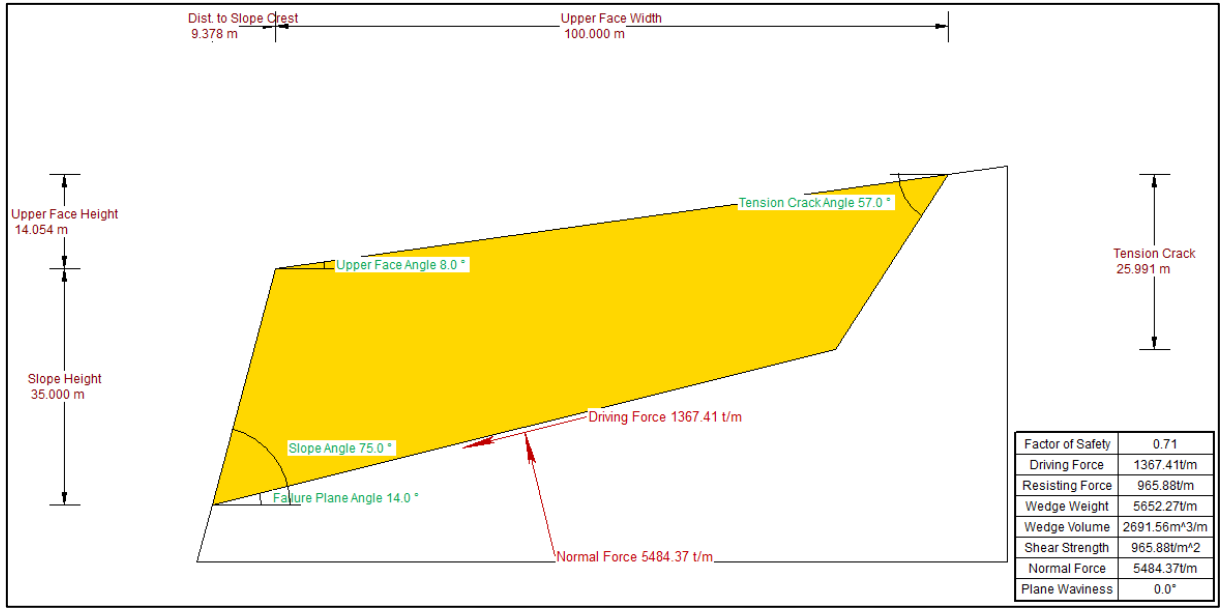
Ek Şekil 2. En yüksek c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %0)



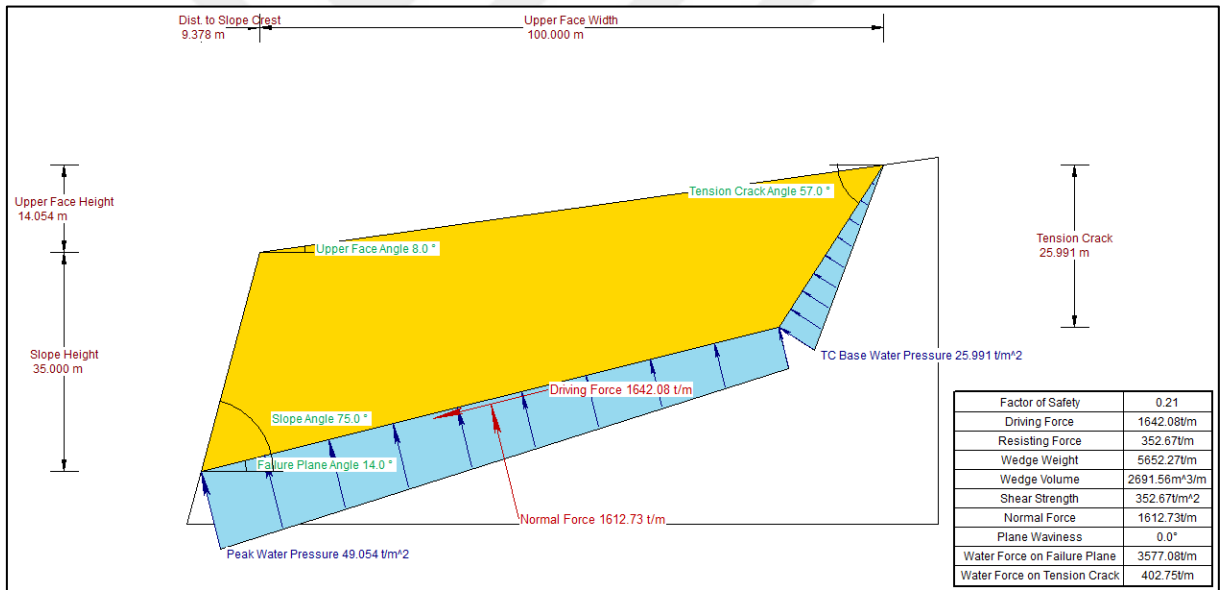
Ek Şekil 3. En yüksek c - ϕ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %0, ivme 0.5g)



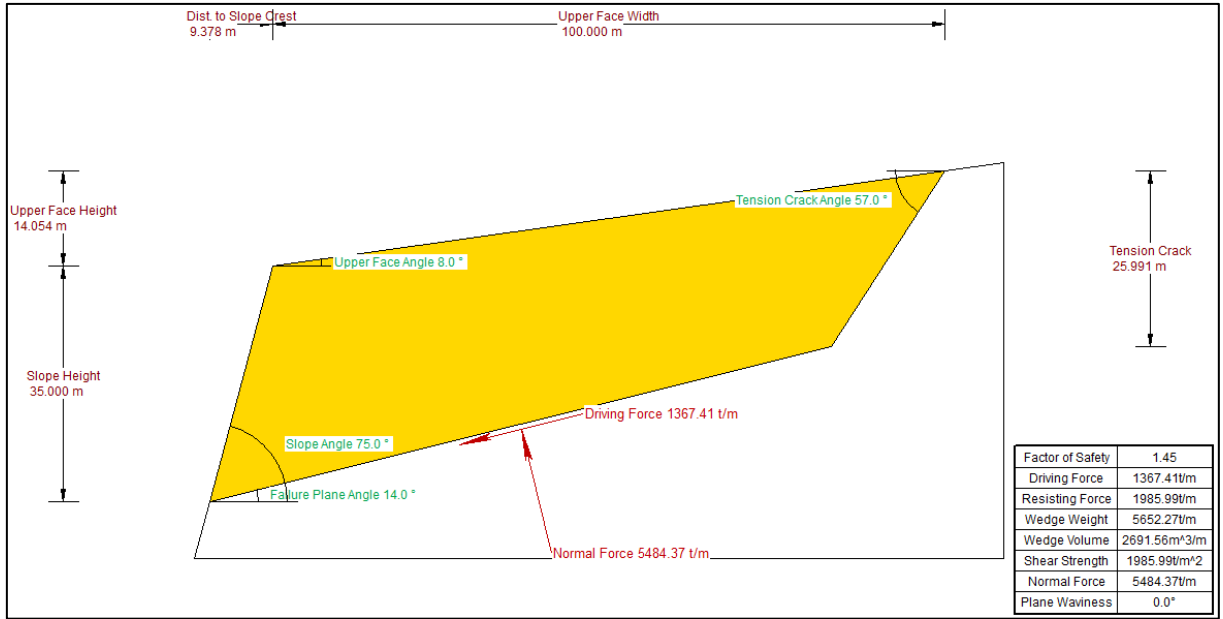
Ek Şekil 4. En yüksek c - ϕ için düzlemsel kayma analizi (SK-3, yeraltı suyu %100)



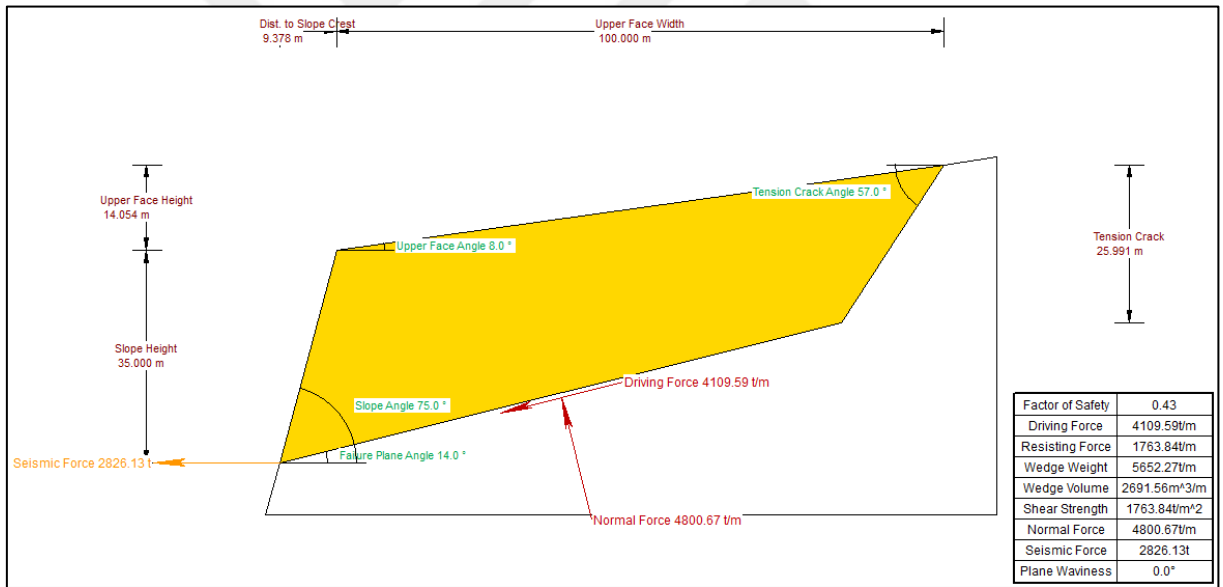
Ek Şekil 5. En düşük c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %0)



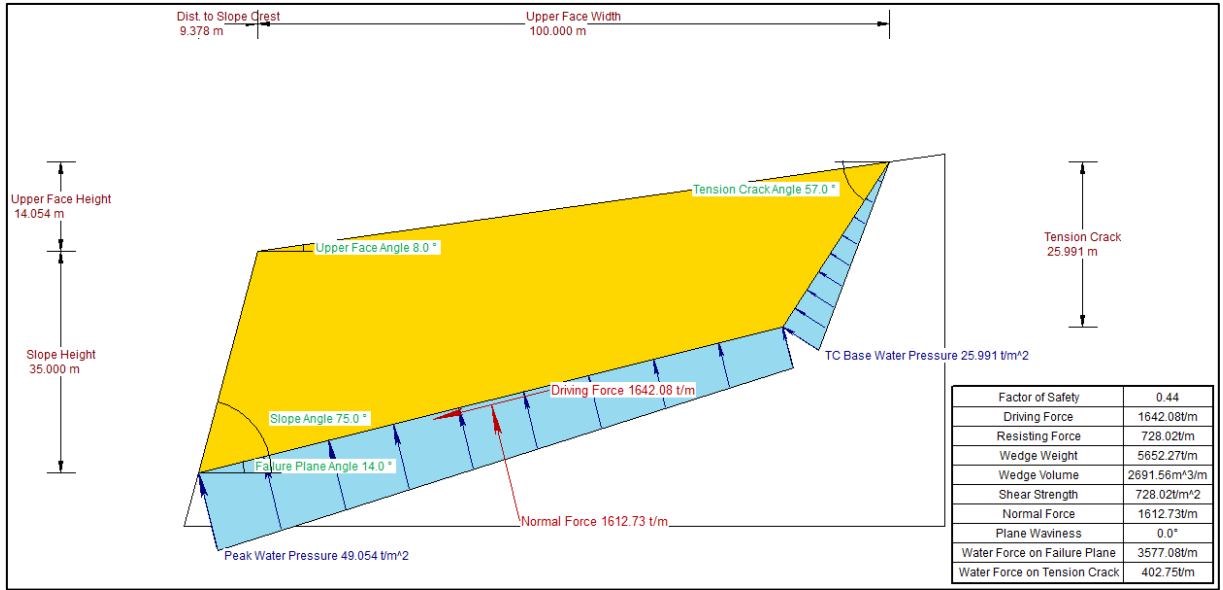
Ek Şekil 6. En düşük c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %100)



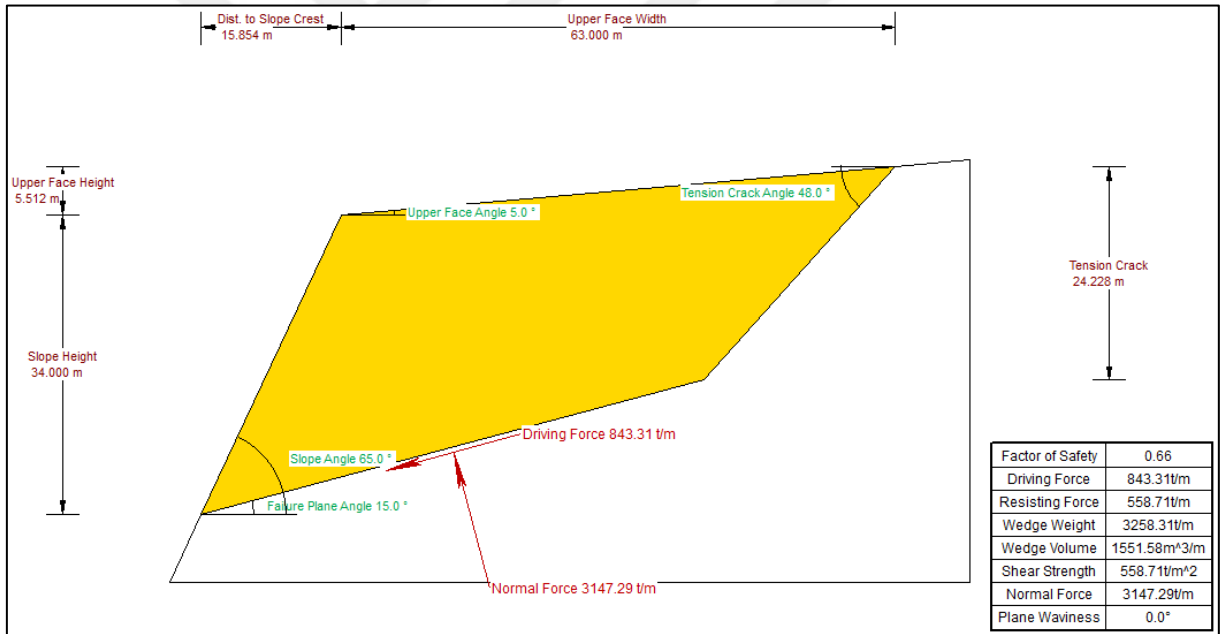
Ek Şekil 7. En yüksek c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %0)



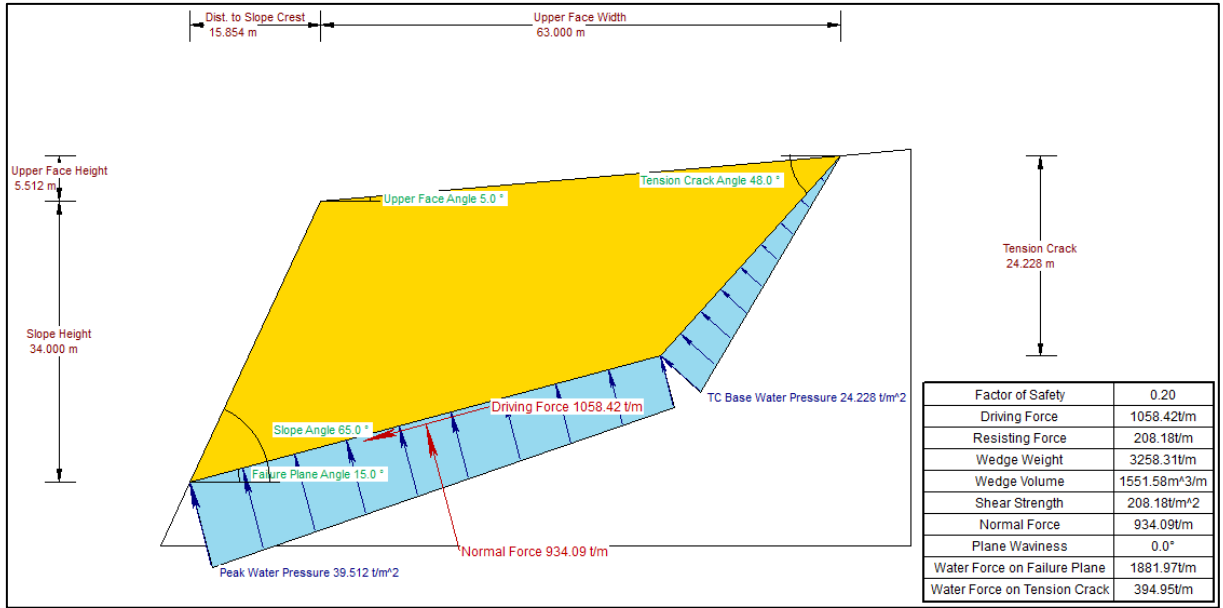
Ek Şekil 8. En yüksek c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %0, ivme 0.5g)



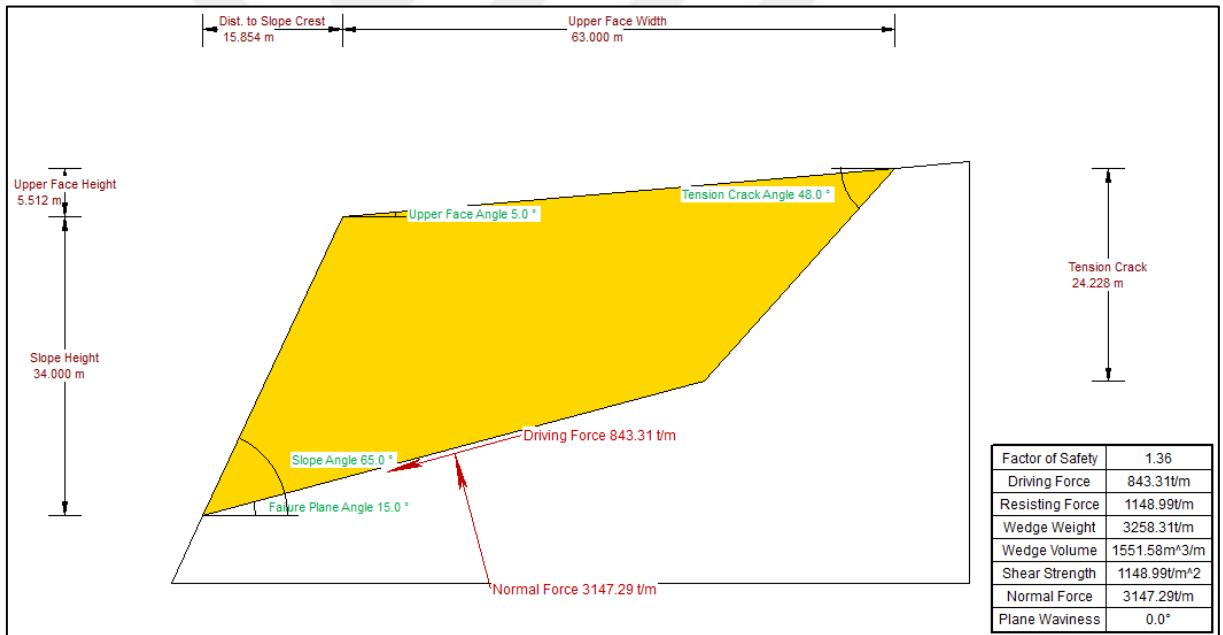
Ek Şekil 9. En yüksek c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-4, yeraltı suyu %100)



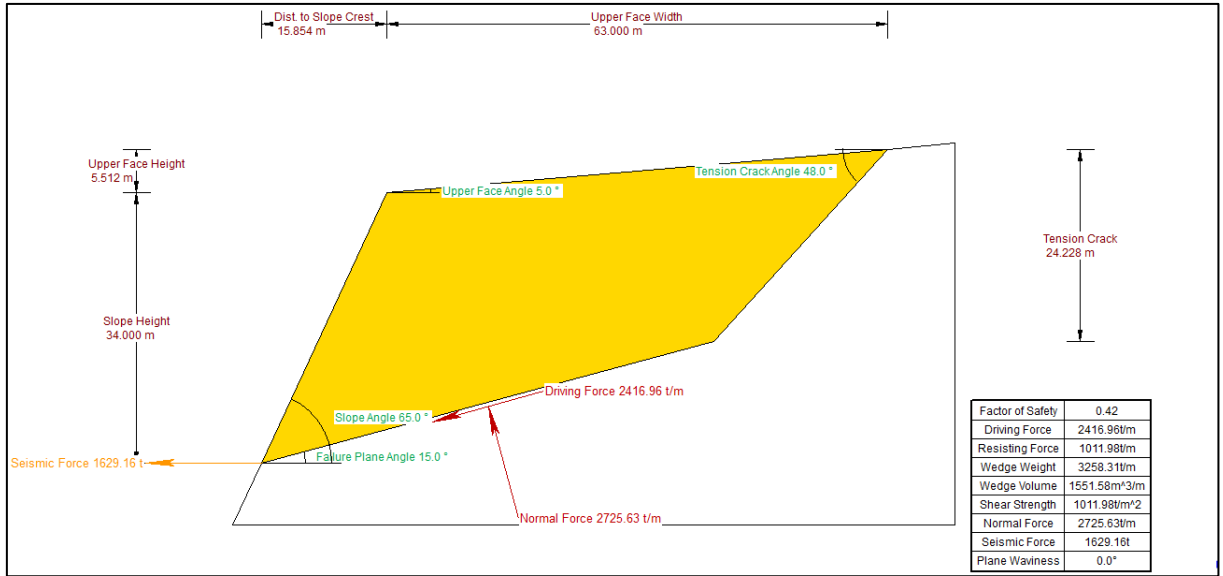
Ek Şekil 10. En düşük c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %0)



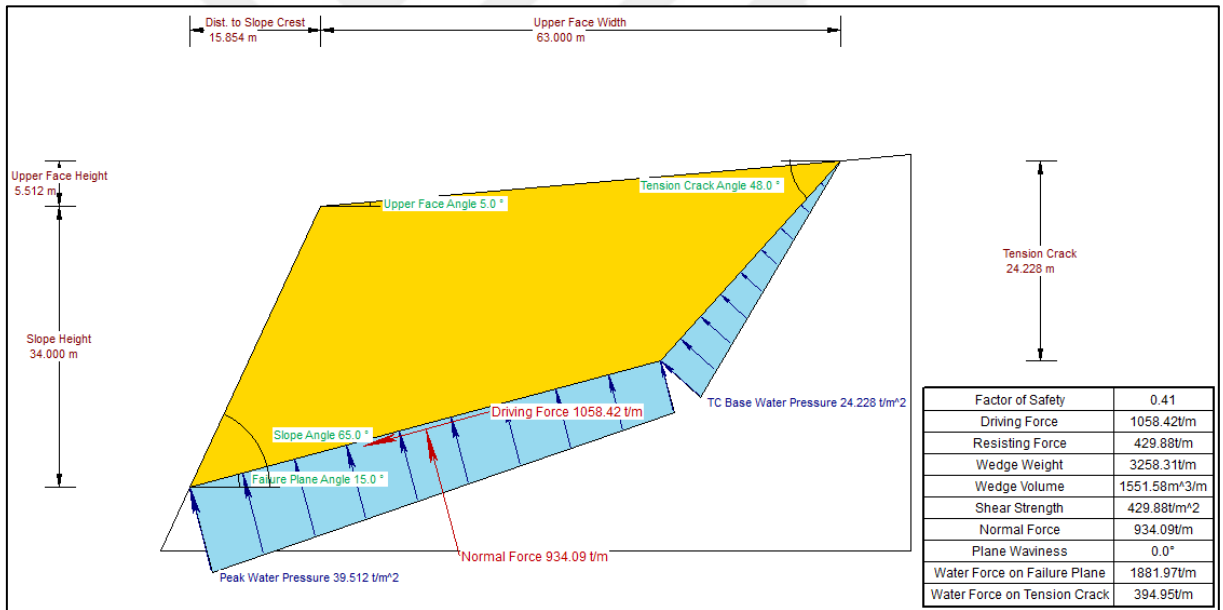
Ek Şekil 11. En düşük c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %100)



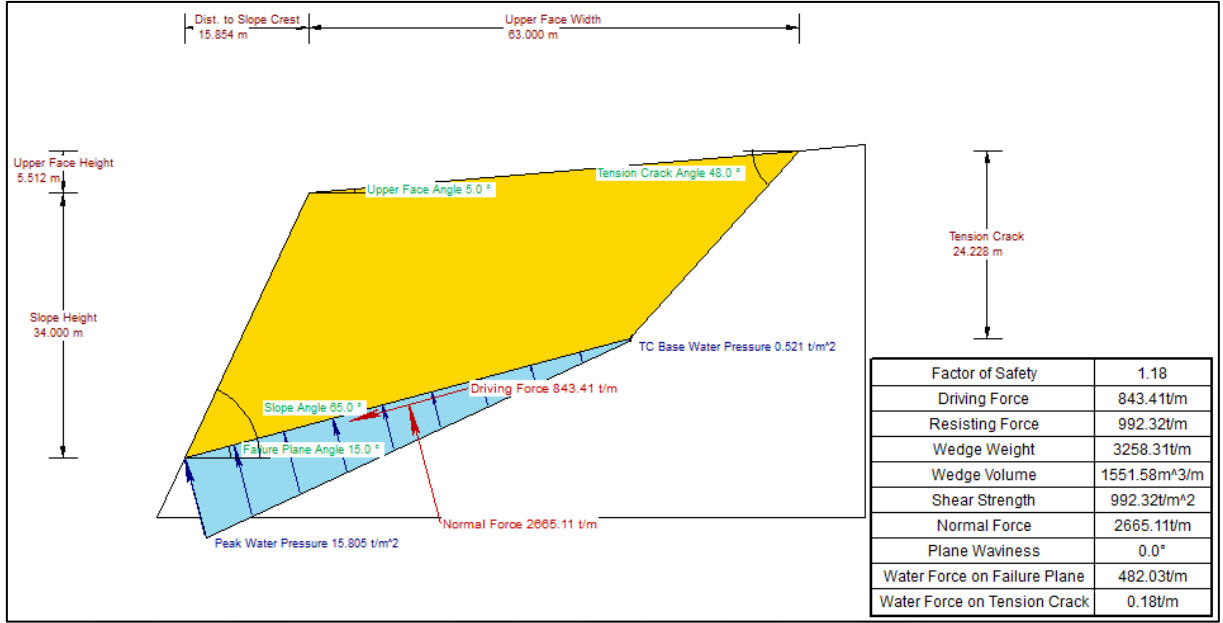
Ek Şekil 12. En yüksek c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %0)



Ek Şekil 13. En yüksek c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %0, ivme 0.5g)



Ek Şekil 14. En yüksek c-φ için düzlemsel kayma analizi (SK-5, yeraltı suyu %100)



Ek Şekil 15. Örnek parametrelere karşılık gelen deterministik modelleme grafiği

ÖZGEÇMİŞ

1995 yılında Dr. İbrahim Ustaömeroğlu İlkokulu'nu, 1998 yılında Gazi Ortaokulu'nu bitirdi. Lise eğitiminin 2001 yılında Trabzon Lisesi'nde tamamladı. 2001 yılında girdiği Ortadoğu Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında mezun oldu. Aynı yıl başladığı yüksek lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan 2011 yılında "Örnek Bir Bakır Madeninin Surpac Programı ile Modellenmesi" başlıklı çalışması ile bitirmiştir. 2012 yılında Erasmus programı ile 1 dönem boyunca Avursturya Montanuniversitat Leoben'de eğitim almıştır. Ayrıca, doktora eğitimi sırasında, 2017 yılında başladığı Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Bilgisayar Teknolojisi Bölümü Web Tasarımı ve Kodlama Programını 2019 yılında, 2019 yılında başladığı Hoca Ahmet Yesevi Uluslararası Türk-Kazak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Lisans eğitimini 2022 yılında tamamlamıştır. Alanında 6 uluslararası indeksli makale, 11 uluslararası bildiri ve 1 kitap bölümü vardır. Bilimsel araştırma ve döner sermaye destekli toplam 7 çalışmada yer almıştır. 2010 yılında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır ve halen devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilen Şener ALİYAZICIOĞLU, evli ve 2 çocuk babasıdır.