



Süreksizlik denetimli şev duraysızlıklarının değerlendirilmesinde olasılığa dayalı kinematik analiz yaklaşımı ve bir uygulama

Probabilistic kinematical approach for the assessment of discontinuity controlled slope failures and an application

Ergün TUNCAY, Reşat ULUSAY

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

ÖZ

Arazide gözlenme olasılığı en fazla olan süreksizlik yönelimleri esas alınarak yapılan deterministik kinematik analiz, eklemlili kaya kütlelerinde açılan şevlerin duraylılığı ile ilgili ön değerlendirilmelerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak, kaya kütlesi içinde en fazla gözlenen süreksizlik yönelimlerinin yanı sıra, bu yönelimlerin etrafında dağılım gösteren daha düşük frekansa sahip süreksizlikler de bulunabilmekte ve bunlar da duraysızlıkların gelişmesinde rol oynayabilmektedirler. Bu tür süreksizliklerin duraysızlıklar üzerindeki etkileri, olasılığa dayalı kinematik analiz yaklaşımıyla incelenmektedir. Bu çalışmada, Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) tarafından işletilen Himmetoğlu (Göynük-Bolu) linyit açık işletmesinde üretimde duraksamalara neden olan duraysızlıkların meydana geldiği güney şevi sektörlerine ayrılarak, deterministik ve olasılığa dayalı kinematik yaklaşımlarla incelenmiştir. Her iki yöntemden elde edilen sonuçlar, şevin tamamı ve bu şevin batısında gelişmiş yerel bir düzlemsel kayma için karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ayrıca, kuzeye eğimli basamaklar için faylar ve eklemler tarafından denetlenen kama türü kaymaların olası olabileceği de belirlenmiştir. Bununla birlikte, hem doğuya, hem de yaklaşık batıya doğru eğimli basamakların açılıyor olması ve tabakalanma düzlemlerinin değişim aralığı gözönünde bulundurularak, bir tek riskli şev yönelimi değeri yerine, risk taşıyan basamak yönelimlerinin alabileceği değerlerin değişim aralığının belirlenmesinin, tasarım açısından daha yararlı olacağı düşünülmüştür. Bu amaçla belirli güven aralıkları ve tabakalanma düzlemlerinin yönelimindeki değişimler dikkate alınarak güney şevinde düzlemsel kayma riskine maruz kalabilecek basamak aynası yönelimlerinin kestiriminde kullanılmak üzere olasılık esaslı grafikler önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Himmetoğlu linyit işletmesi, kinematik analiz, olasılık analizi, süreksizlik, şev duraylılığı

ABSTRACT

Deterministic (conventional) kinematical approach based on the use of most observable discontinuity orientations, is the commonly employed method for the preliminary assessments of stability of slopes excavated in jointed rock masses. But, other possible discontinuity orientations distributed around the central clusters may exist and they may also contribute to failures. The effects of such discontinuities on instabilities are assessed by probabilistic kinematical approaches. In this study, the southern slope of the Himmetoğlu lignite open pit mine operated by the Turkish Coal Enterprises (TKİ) and subjected to instabilities causing interruption of coal production, is investigated by both kinematical approaches. The results derived from both methods are compared and evaluated for the whole slope and for a local planar failure occurred at its west. Besides, it is shown that wedge failures controlled by the intersection of faults and joints seem to be probable on bench faces. However, from the design point of view, determination of unsafe bench orientations within a risk interval seems to be more useful than introducing a single orientation value. For this purpose, on the basis of given confidence limits and variations in the orientations of bedding planes, probability graphs are suggested to estimate the orientations of unsafe bench faces in the southern slope along which planar failures are probable.

Key Words: Himmetoğlu lignite pit, kinematical analysis, probabilistic analysis, discontinuity, slope stability

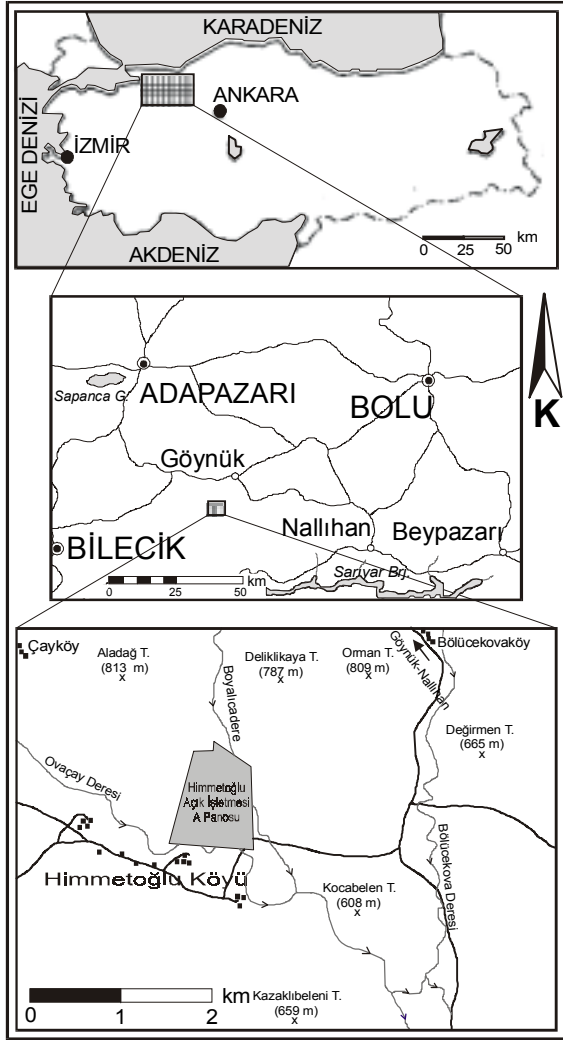
GİRİŞ

Şev duraylılığının incelenmesinde ve şev tasarımı ilk aşama, şevde gelişmesi olası yenilme modellerinin belirlenmesidir. Eklemlili kaya kütlesi ortamlarında süreksizlikler boyunca meydana gelebilecek duraysızlık riski, sağlam kayaçta gelişebilecek bir yenilme riskinden daha fazladır. Dolayısıyla bu tür ortamlarda duraysızlıkları denetleyen faktörlerin başında, süreksizliklerin yönelimi (uzaydaki konumları) ve bunların şev aynasının konumuyla olan ilişkileri gelmektedir. Süreksizliklerin yönelimleri, süreksizlik düzlemlerinin eğim ve eğim yönleriyle tanımlanmaktadır. Araziden derlenen çok sayıdaki yönelim verisi stereografik izdüşüm yöntemi ile değerlendirilerek çalışma alanındaki süreksizlikler için karakteristik (en fazla gözlenme olasılığı olan) yönelimler belirlenmektedir. Şev duraylılığının incelenmesine yönelik ayrıntılı analizlere (analitik veya nümerik) geçilmeden önce, kritik olabilecek şev yönelimlerinin saptanması amacıyla deterministik (geleneksel) kinematik analiz tekniği yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, kohezyon, gözenek suyu basıncı, dış yükler vd. gibi faktörler dikkate alınmaksızın, sadece süreksizliklerin ve şevin yönelimleri ile süreksizliklerin içsel sürünme açısı girdi parametreleri olarak kullanılmaktadır. Deterministik yöntem uygulanırken, süreksizlik kutuplarının stereografik izdüşüm netinde en fazla yoğunlaştığı noktayı temsil eden düzlemin yönelimi (egemen süreksizlik seti) esas alınmakta, aynı sete ait olmakla birlikte, egemen yönelimin etrafında dağılım gösteren noktalar ihmal edilmektedir. Dolayısıyla şev duraylılığının kinematik anlamda değerlendirilmesi amacıyla kullanılacak süreksizlik yönelimi olarak egemen düzlemlerin yönelimlerinin esas alınması, daha güvenilir bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, süreksizlik ölçüm bölgesinde en fazla sayıda gözlenmiş egemen yönelimlerin yanısıra, daha az sayıda (düşük frekansta) gözlenen ve egemen yönelim değerinin etrafında dağılım gösteren yönelimler de bulunabilmekte ve daha düşük bir olasılıkla da olsa, bu yönelimdeki süreksizlikler de duraysızlıkların gelişmesinde rol oynayabilmektedir. Bu nedenle, deterministik kinematik analizlerin yanısıra, olasılığı esas alan kinematik analiz yaklaşımları da, yaygın olmamakla birlikte, 70'li yıllardan bu yana kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar, süreksizlik setlerinin istatistiksel dağılımları gözönünde bulundurularak daha düşük frekanstaki yönelimler ile bunların neden olabileceği

duraysızlık risklerinin değerlendirilmesine de olanak sağlayabilmektedir.

Şev duraylılığının olasılığa dayalı olarak incelenmesi konusundaki çalışmalar daha çok analitik analiz yöntemleri üzerinde yoğunlaşmış (örneğin; Priest ve Brown, 1983; Chowdhury, 1987; Pine, 1992; Young, 1993; Whittlestone vd., 1995) olup, kinematik yaklaşımı kullanan olasılık esaslı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Olasılık esaslı kinematik analiz yaklaşımı konusundaki en ayrıntılı çalışmalar, McMahon (1971), Zambak (1977) ve Canmet (1981) tarafından gerçekleştirilmiştir. McMahon (1971), istatistiksel dağılım modelleri kullanılarak stereografik izdüşüm ağında süreksizlik kontur diyagramlarının yeniden düzenlenebileceğini belirtmiştir. Aynı araştırmacı, bunun yanısıra, stereonet üzerinde süreksizliklerin olasılıklı dağılımlarını esas alarak değişik şev açıları için düzlemsel kayma olasılığını da araştırmıştır. Zambak (1977), kinematik analizlerde egemen süreksizlik yönelimi değerlerinin (ortalama yönelim) kullanılmasının en güvenilir çözümü vereceğini ifade etmekle birlikte, daha düşük frekanstaki yönelimlerin de önem taşıyabileceğini ve bunların da analizlerde dikkate alınmasının, olası duraysızlık risklerinin belirlenebilmesi açısından önem taşıyacağını vurgulamıştır. Adı geçen araştırmacı, ayrıca McMahon (1971)'un uyguladığı gibi, istatistiksel dağılım modelleri kullanılarak süreksizlik kontur diyagramlarının yeniden düzenlenebileceğini göstermiş ve kaya şevlerinin boyutlandırılmasında risk taşıyabilecek düzlemlerin belirlenmesi için olasılık kavramının da ele alınması gerektiğini belirtmiştir. Canmet (1981) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da değişik dağılım modelleri incelenmiş, McMahon (1971) ve Zambak (1977)'ın da belirttiği gibi, süreksizlik yönelimlerinin olasılık kavramı dikkate alınarak değerlendirilmesi amacıyla normal dağılım modelinin kullanılması önerilmiştir. Ayrıca, Gökçeoğlu vd. (2000), yukarıda değinilen araştırmacıların önerdiği şekilde, yönelim verilerinin normal dağılım gösterdiğini kabul ederek ve bu yönelim verilerinin ortalaması ile standart sapmasından elde edilecek teorik normal dağılım eğrisini kullanarak yönelim değerlerinin normalleştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) tarafından işletilmekte olan Himmetoğlu (Göynük-Bolu) linyit açık işletmesinde (Şekil 1) zaman zaman üretimin aksamasına neden olacak boyutta şev duraysızlıkları meydana gelmektedir. Söz



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası
Figure 1. Location map of the study area

konusu duraysızlıkların giderilmesi ve çevreye yaptığı olumsuz etkilerin azaltılması amacıyla işletmede yapılan ayrıntılı jeoteknik amaçlı çalışmalar (Ulusay vd., 1998; Tuncay, 1999) sırasında işletmenin en kritik konumdaki güney şevinde, gözlenme frekansı düşük olmakla birlikte, duraysızlıklara neden olan bazı süreksizliklerin varlığı da saptanmıştır. Bu husus dikkate alınarak ve söz konusu jeoteknik incelemeye koşut olarak, güney şevinin duraylılığı yazarlar tarafından ayrıca deterministik ve olasılığa dayalı kinematik yaklaşımlarla da değerlendirilmiştir. Bu amaçla, şev sektörlerine ayrılarak, istatistiksel değerlendirmeler için basamak aynalarından yeterli sayıda yönelim ölçümü alınmış, süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımı parametreleri laboratuvar deneyleriyle tayin

edilmiş ve şevin batı ucunda meydana gelmiş bir düzlemsel kaymanın geometrisi belirlenmiştir. Veriler, her iki kinematik analiz yönteminde kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve belirli olasılık seviyeleri için belirlenen riskli şev yönelimleri irdelenmiştir. Ayrıca, ön tasarım amacıyla kritik basamak ve tabakalanma yönelimlerinin belirlenebileceği grafikler hazırlanmıştır.

JEOLÖJİ VE ÖRTÜ KAYACININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Himmetoğlu linyit açık işletmesi ve yakın civarında, yaşlıdan gence doğru; Kretase ve Paleojen'e ait temeli temsil eden formasyonlar, Tersiyer formasyonları ve Kuvaterner yaşlı çakıllar ile alüvyonlar yer almaktadır (Ulusay vd., 1998). Bu formasyonları oluşturan litolojik birimler, Şekil 2'de verilen stratigrafik dikme kesitte gösterilmiştir. Üretilmekte olan kömür damarının da içinde yer aldığı Himmetoğlu formasyonu, sahada en yaygın olarak gözlenen formasyon olup, ağırlıklı olarak marlarla temsil edilmektedir. Marlar, aynı zamanda işletmede duraysızlıkların en yaygın şekilde geliştiği dekapaj (kazı) malzemesini oluşturmakta ve işletmenin kenarlarına doğru gevşek alüvyon çökeller tarafından üzerlenmektedir. Her iki birimin bu çalışma kapsamında incelenen güney şevindeki konumları Şekil 3'de verilen basitleştirilmiş ocak planında gösterilmiş olup, burada sadece marların özelliklerine değinilmiştir. Marlar açık yeşil-gri olup, üst kottlara doğru içerdikleri lamina düzlemleri belirginleşmektedir. İçinde yer yer linyitli silt, ince kilaşı ve tüfit arakatıklarının da gözlemlendiği birim, özellikle havayla temas etmesi halinde ince levhalar halinde ayrılmaktadır. Birimin kömür damarına yakın olan kesimlerinde kalınlığı 0.1 ile 1m arasında değişen bitümlü şeyllerin bulunduğu da gözlenmektedir.

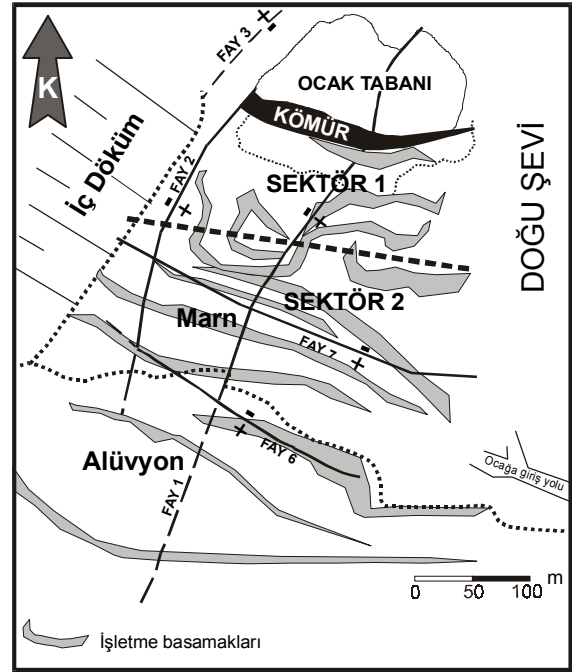
İşletmenin de içinde bulunduğu bölge, Miyosen öncesinde K-G yönlü bir sıkışmaya maruz kalmış ve kıvrımlanma yapıları gelişmiştir. Neotektonik dönemde ise, yine K-G yönünde etkiyen gerilimler sonucu normal faylar oluşmuştur (Şener, 1992). Saha genelinde numaralandırılarak tanımlanan faylardan (Ulusay vd., 1998) bu çalışmaya konu olan güney şevinde gözlenenlerin konumları Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu faylar, KD-GB ve yaklaşık D-B doğrultulu olup, duraysızlıkların gelişmesinde denetleyici olabilmektedirler.

SİSTEM	SERİ	FORMASYON	KALINLIK (m)	SİMGE	LİTOLOJİK SİMBOL	LİTOLOJİK TANIMLAMA
KRETASE	PALEOJEN	NEOJEN	HİMMETOĞLU	120-250	Th	Alüvyon
						Çakıtaşı (Kocabelen T. çakılları)
						Marn - bitümlü marn - ince tuf - silttaşı ardalanması
						Bitümlü şeyl
						Linyit, killi linyit, linyitli kil
						Konglomera, yeşil kil (taban kili) ve kırmızı kil
						Çamurtaşı - kilitaşı - kumtaşı ardalanması
						Kireçtaşı - marn
						Çamurtaşı - kumtaşı - konglomera ardalanması
						Biyomikrit - biyosparit, resifal kireçtaşı
KRETASE	PALEOJEN	NEOJEN	HİMMETOĞLU	120-250	Th	Orta - kalın tabakalı kumtaşı - konglomera ardalanması (marn aratabakalı)
						Şeyl-Marn (ince kumtaşı bantlı)

Şekil 2. Himmetoğlu linyit sahasının genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti (Şener, 1992'den düzenlenmiştir).

Figure 2. Generalized stratigraphic column of the Himmetoğlu lignite field (rearranged from Şener, 1992)

Yerel kıvrımlanmalar dikkate alınmazsa, tabakalanmanın genellikle sahanın kuzeyinde güneye, güneyinde ise kuzeye doğru eğimli olduğu kabul edilebilir. Güney şevinin yaklaşık ortasından ve D-B yönünde geçen bir kıvrım ekseninin varlığı dikkate alınarak, Şekil 3'de gösterildiği gibi, süreksizlik yönelimlerinin şevin iki sektöre ayrılarak ölçülmesi öngörülmüştür. Bu amaçla tabaka ve eklem yüzeylerinden sırasıyla 480 ve 622 adet yönelim ölçümü alınmış ve DIPS (Diedrichs ve Hoek, 1989) isimli program kullanılarak bu veriler değerlendirilmiştir. Yönelim analizlerinden tabakalanma düzlemlerinin yönelimlerinin sektör bazında değiştiği, buna karşın eklem setlerinin işletme genelinde bir farklılık göstermediği ve Tabakalanma ve eklem yüzeylerinin en fazla gözlemlendiği yönelimler (egemen setler) Şekil 4'ten, faylar için ise basamak aynalarında alınan



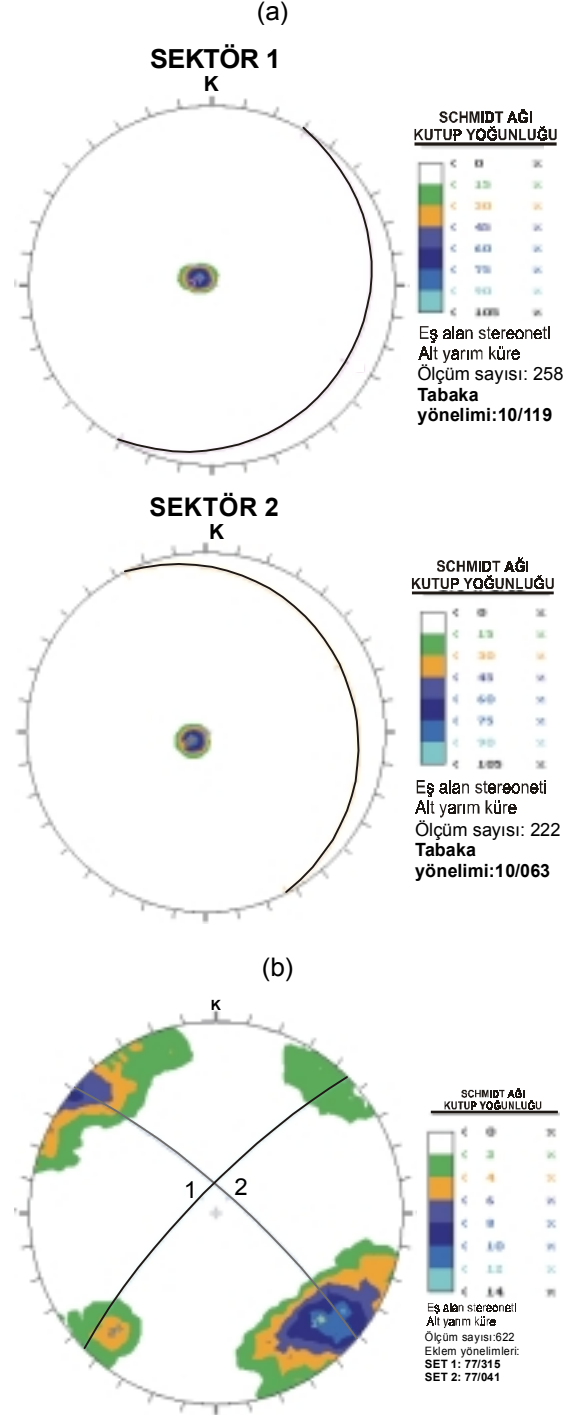
Şekil 3. İşletmenin güney şevinde tabakalanma düzlemlerinin yönelimine göre ayrılmış sektörler

Figure 3. The sectors based on orientation of bedding planes in the south slope of the pit

münferit ölçümlerden belirlenerek Çizelge 1'de verilmiştir.

Kinematik analizlerin diğer bir girdi parametresi olan süreksizlik yüzeylerinin içsel sürtünme açısı, makaslama deneyleriyle tayin edilmiştir. Saha gözlemleri sırasında tabakalanma düzlemlerinin kil sıvımalı ve oldukça düz, eklemelerin ise az pürüzlü yüzeylere sahip oldukları belirlenmiştir. Fay düzlemlerinin karşılıklı yüzeyleri arasında ise, plastik killerin varlığı saptanmıştır. Eklem yüzeylerinden deney standartlarına uygun örnek alınamamış olmakla birlikte, işletmede gözlenen duraysızlıkların daha yüksek eğime sahip eklem yüzeyleriyle değil de, daha çok tabakalanma ve fay düzlemleri tarafından denetlendiği görülmüştür. Dolayısıyla makaslama dayanımı parametrelerinin tayinleri, tabakalanma ve fay yüzeylerinden alınmış örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneyler, düşük normal gerilimler altında daha iyi sonuçların alındığı gerekçesiyle Ulusay ve Yoleri (1993) tarafından önerildiği şekilde, deformasyon kontrollü doğrudan makaslama cihazında ve ASTM (1985) standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, Çizelge

2'de verilmiş olup, özellikle tabakalanma yüzeylerinin 10° gibi oldukça düşük bir artık içsel sürtünme açısına sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. İşletmenin güney şevinde tabakalanma düzlemleri (a) ile işletme genelinde eklemlerin (b) kontur diyagramları

Figure 4. Contour diagrams of bedding planes (a) at the south slope, and joint planes through the pit (b)

Çizelge 1. Himmetoğlu İşletmesi'nin güney şevinde gözlenen egemen süreksizliklere ait yönelim değerleri

Table 1. Major discontinuity orientations observed at the south slope of the Himmetoğlu open pit

Süreksizlik türü	Eğim/Eğim yönü
Tabakalanma	1 no.lu sektör 10/119
	2 no.lu sektör 10/063
Ekleme	1 no.lu ekleme 77/315
	2 no.lu ekleme 77/041
Fay düzlemi	1 no.lu fay 75/300
	2 no.lu fay 75/300
	6 no.lu fay 45/360
	7 no.lu fay 45/360

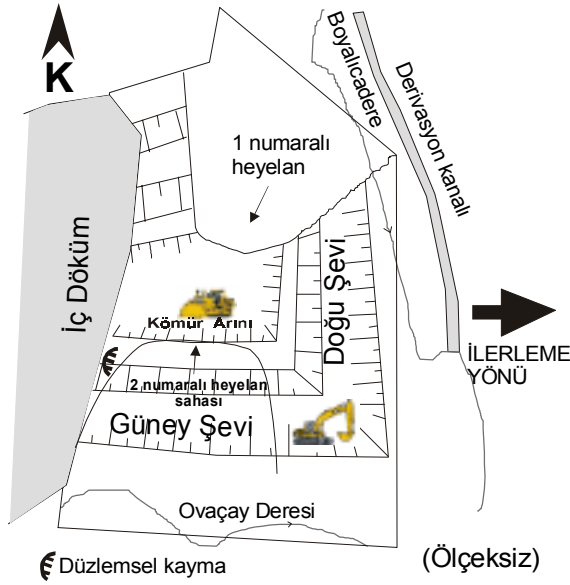
Çizelge 2. Süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımı parametreleri

Table 2. Shear strength parameters of discontinuity surfaces

Süreksizlik	Kohezyon (kPa)	İçsel sürtünme açısı ($^\circ$)
Tabakalanma	Doruk 3.7	16.8°
	Artık 1.8	10.1°
Fay Dolgusu	Doruk 14.8	20.8°
	Artık 12.9	19.6°

ŞEV DURAYSIZLIKLARI VE KİNEMATİK YAKLAŞIMLARIN UYGULANMASI

Himmetoğlu İşletmesi'nde kazıya başlandıktan bu yana, işletmeyi çevreleyen derelerin alüvyonlarından sızan sular hem drenaj, hem de şev duraylılığı açısından olumsuz etkiler yaparak üretimin aksamasına yol açmıştır. Ocak, doğuya doğru ilerledikçe, güneyde Ovaçay, kuzeyde ise Boyalıcadere gibi akarsulara çok yakınlaşmış ve hem güney, hem de kuzey şevlerinde duraysızlıklar gelişmeye başlamıştır (Şekil 5). İşletmenin Boyalıcadere'ye yakınlaşılması sonucu kuzeyde meydana gelen 1 numaralı büyük heyelandan sonra geçici bir önlem olarak Boyalıcadere'nin yatağı Şekil 5'de görüldüğü gibi, TKİ tarafından bir derivasyon kanalına alınmıştır. Ayrıca güney şevinin batı ucunda da yerel olarak bir düzlemsel kayma gözlenmiştir (bkzn. Şekil 5). İşletmede yapılan gözlemler, gevşek zemin özelliği taşıyan alüvyon malzemesinde üst kotlarda açılmış basamaklardaki sığ duraysızlıklar hariç tutulursa, esas duraysızlığın süreksizliklerde bölünmüş marn örtü kayacında meydana geldiğini göstermiştir. Bu nedenle, işletmenin en kritik konumdaki güney şevinde süreksizliklerin

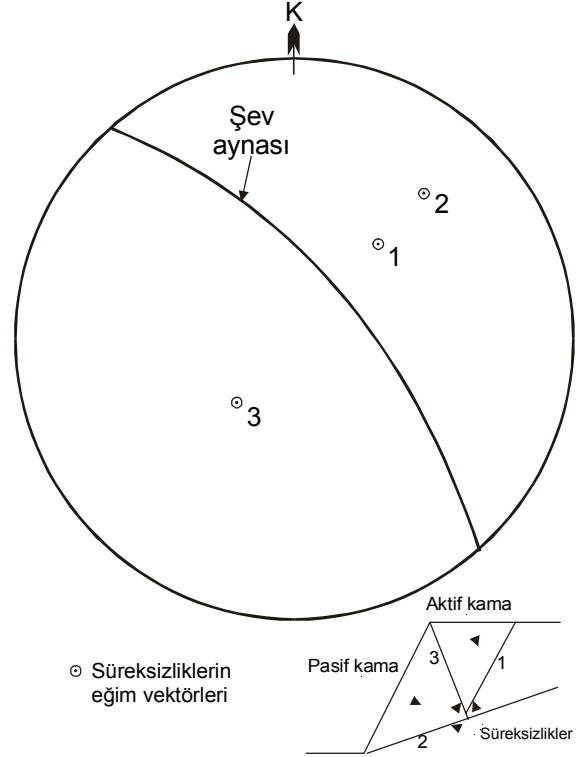


Şekil 5. Başlıca şev duraysızlıklarının konum ve yayılımlarını gösteren basitleştirilmiş işletme planı

Figure 5. Simplified plan of the pit, showing the locations and extends of the major slope instabilities

denetiminde gelişebilecek duraysızlık türlerinin ve bunların risk derecelerinin belirlenmesi amacıyla deterministik ve olasılığa dayalı kinematik yaklaşım yöntemleri uygulanmıştır.

Ulusay vd. (1998) ve Tuncay (1999) tarafından yapılan hareket izleme çalışmalarıyla tüm şevi etkileyen en önemli hareketin fay ve tabaka düzlemlerinin birleşmesiyle orataya çıkan çok yüzeyli kayma (aktif-pasif kama) şeklinde geliştiği belirlenmiştir. Kinematik analiz yöntemleri, düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızlıklar için geliştirilmiştir. Bununla birlikte, Canmet (1977) tarafından aktif-pasif kama yenilme modelinin stereografik izdüşüm neti üzerinde tanımlanması için basit bir işlem (Şekil 6) önerilmişse de, içsel sürtünme açısını da dikkate almayan bu işlem, söz konusu yenilme modelinin kinematik analizi için yeterli değildir. Bu işlemde kaymanın sadece iki yüzey üzerinde gerçekleştiği, şev tepesi ile bu yüzeylerin kesişme noktasından geçen bir üçüncü yüzeyin ise kayan kütleli iki bloğa ayırdığı varsayılmaktadır. Ayrıca kaymanın gerçekleşebilmesi için Şekil 6'da görülen 1 numaralı yüzeyin şevin eğiminden daha yatık olması gerekmektedir. Ancak doğada da yaygın olarak gözlenen bu tür duraysızlıklarda, 1 numaralı



Şekil 6. İki yüzeyli (aktif-pasif kama) duraysızlığının stereografik projeksiyonda görünümü (CANMET, 1977)

Figure 6. Characteristic spherical projection for two-block sliding (CANMET, 1977)

yüzeyin eğimi şev aynasından daha dik olabilmekte ve kayma yüzeyi ikiden fazla sayıda birleşik yüzeyler boyunca da gelişebilmektedir. Özellikle topuktan geçen 2 numaralı yüzeyin (bkz. Şekil 6) eğimi ve uzunluğu, bu tür duraysızlıklarda kaymayı denetleyen en önemli faktör olarak dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla, yukarıda belirtilen işlem, çok yüzeyli kaymaların kinematik olarak analizini sağlayamamaktadır. Bu nedenle, aşağıda sunulan kinematik analizlerde düzlemsel, kama ve devrilme türü yenilme modelleri incelenmiştir.

Deterministik Kinematik Analizler

Çok sayıda basamaktan oluşan güney şevinin genel eğimi oldukça düşük olmasına karşın, basamak aynalarının eğimi 50-60 derecedir. Dolayısıyla kinematik anlamda, öncelikle basamakların duraylılığının incelenmesi öngörülmüştür. Basamak geometrisi parametreleri (basamak eğim açısı ve eğim yönü), yer

yer değişkenlik göstermekle birlikte, güney şevinin eğim yönü kuzeye doğru ve işletmedeki basamak aynalarının ortalama eğiminin 60° olmasından dolayı, analizlerde basamakların yönelimi 60/360 olarak alınmıştır. Analizlerde süreksizlik yüzeylerinin artık içsel sürtünme açısı değerleri kullanılmıştır.

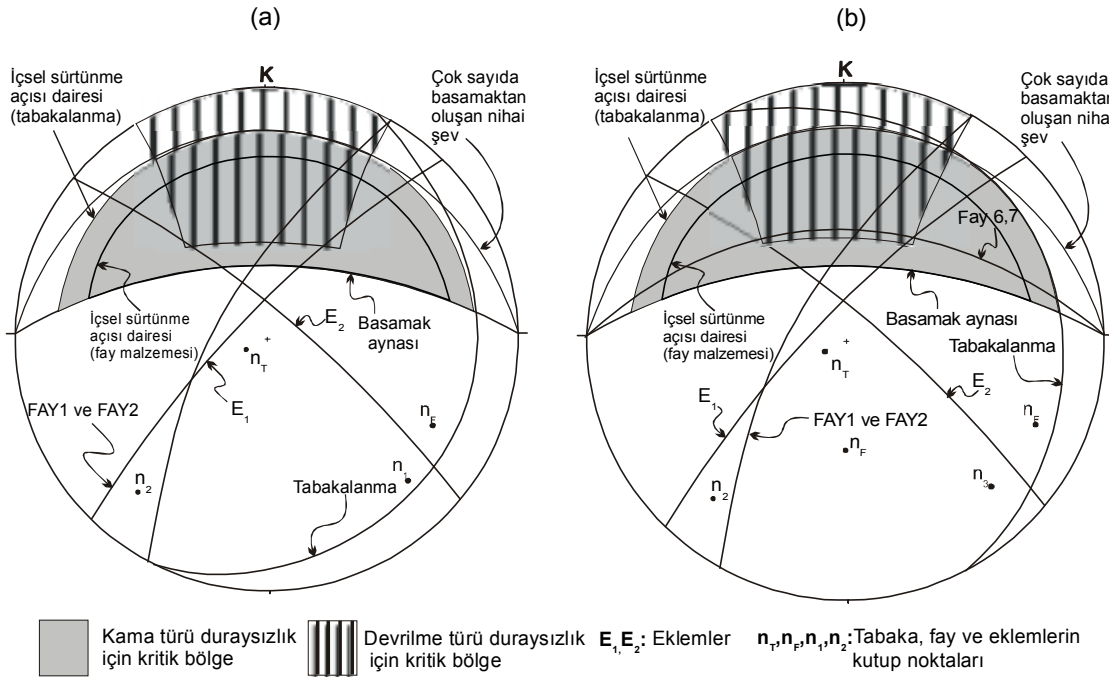
Egemen süreksizlik setleri (gözlenme olasılığı en yüksek olan süreksizlikler) esas alınarak yapılan deterministik kinematik analizlerin sonuçları; 1 no.lu sektörde duraysızlık riski beklenmemekle birlikte (Şekil 7a), 2 no.lu

sektörde 6 ve 7 no.lu fay düzlemleri boyunca kinematik anlamda ve basamak bazında düzlemsel kayma riskinin söz konusu olabileceğini göstermiştir (Şekil 7b). Ancak, bu çalışma devam ederken söz konusu faylar oluşturulan basamakların aynalarını henüz kesmediği için, bu tür bir duraysızlıkla karşılaşmamıştır. Bununla birlikte, kazının güneye ilerlemesi sırasında basamakların fayları kesmeyecek şekilde düzenlenmesinde yarar vardır. 1 ve 2 no.lu eklem setleri ile 6 ve 7 no.lu fay düzlemlerinin, ayrıca 1 ve 2 no.lu faylar ile 6 ve 7 no.lu fayların kesişme hatları boyunca, yerel de olsa, kama türü duraysızlık riski belirlenmiştir (Şekil 7b). Her ne kadar yerel de

olsa, bu riskin giderilebilmesi için basamak eğiminin 45° 'ye düşürülmesi gerekmektedir. Güney şevinde ayırtlanan iki sektörde de genel şev eğimi oldukça düşük olup, Şekil 7'de görüldüğü gibi, çok sayıda basamağı içeren genel şev boyunca kinematik anlamda düzlemsel, kama veya devrilme türü bir duraysızlığın beklenmesi söz konusu değildir.

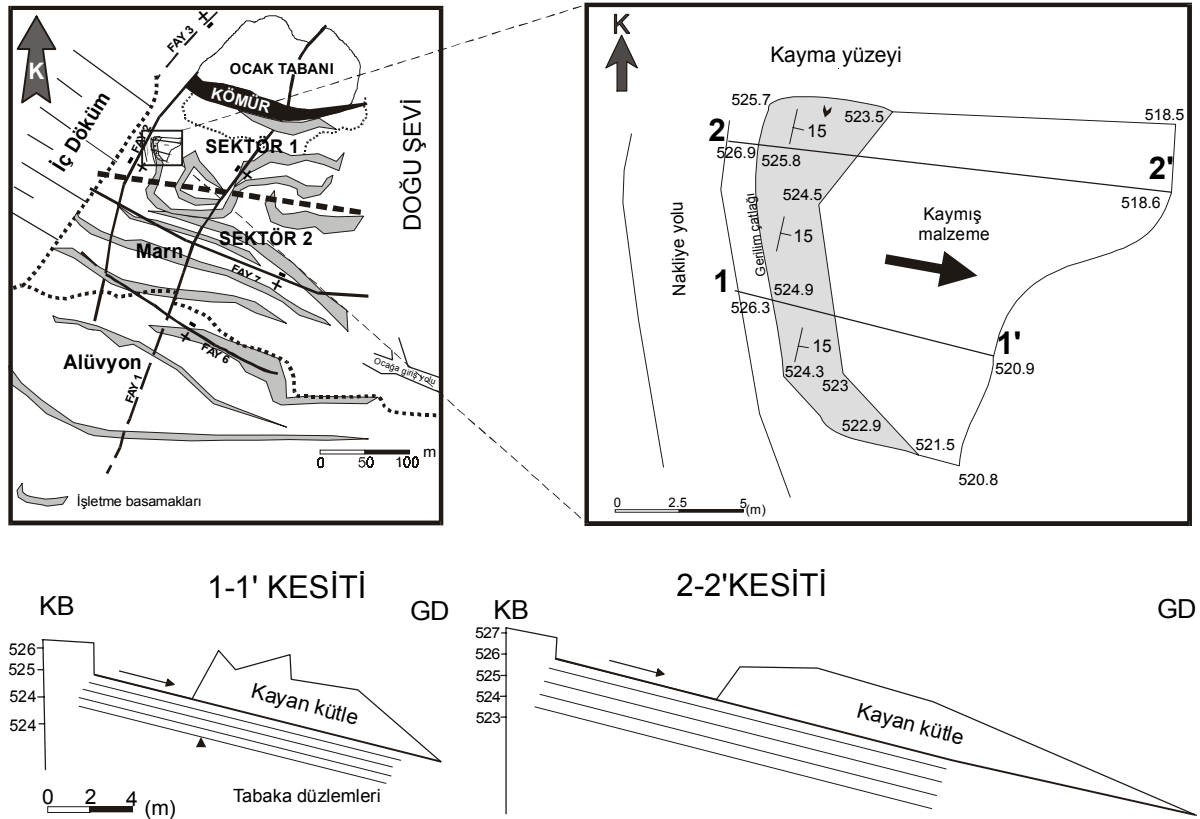
Olasılığa Dayalı Kinematik Analizler

Güney şevinin batı ucunda eğim yönü doğuya doğru olan geçici basamaklar açılmış ve 1 no.lu sektörün içinde yer alan bu basamakların ocak tabanına inen nakliye yolunun kenarında 15/105 yönelimli tabaka yüzeyi boyunca bir düzlemsel kayma gerçekleşmiştir (Şekil 8). Eğer ocağın bu kısmında doğuya eğimli basamakların açılacağı önceden planlanmış ve ölçümlerle belirlenen ortalama tabaka yönelimine göre (10/119) kinematik analiz yapılmış olsaydı, bu kesimde şevin (090) ve tabakalanmanın (119) eğim yönleri arasındaki fark 20° 'den büyük olacağı için, herhangi bir duraysızlık riskinin beklenmeyeceği şeklinde bir değerlendirme yapılabilirdi. Ancak bu durum, egemen süreksizlik sistemlerinin yönelimlerinde, yerel de olsa, bazı sapmaların olması halinde önceden kestirilemeyen bazı duraysızlıkların



Şekil 7. Güney şevindeki münferit basamaklar ve çok sayıda basamaktan oluşan genel şev için 1 no.lu (a) ve 2 no.lu (b) sektörlere ait deterministik analizler

Figure 7. Deterministic kinematical analyses of the individual benches and overall slope in sectors 1(a) and 2(b)



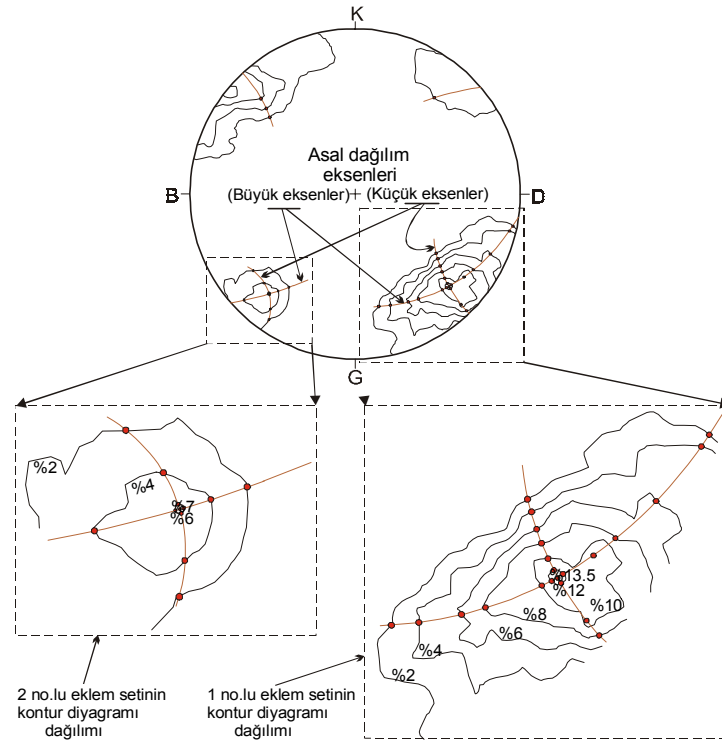
Şekil 8. 1 no.lu sektörde meydana gelen düzlemsel kaymanın konumu, planı ve kesitleri
Figure 8. Location, plan and sections of the planar failure occurred in sector 1.

gelişebileceğini göstermesi bakımından önem taşımaktadır. Dolayısıyla incelenen şevde, bu yerel kaymaya benzer türde ve beklenmeyen duraysızlıkların meydana gelebilme olasılığının da araştırılması öngörülerek, bu amaçla olasılığa dayalı kinematik analiz yaklaşımından yararlanılmıştır.

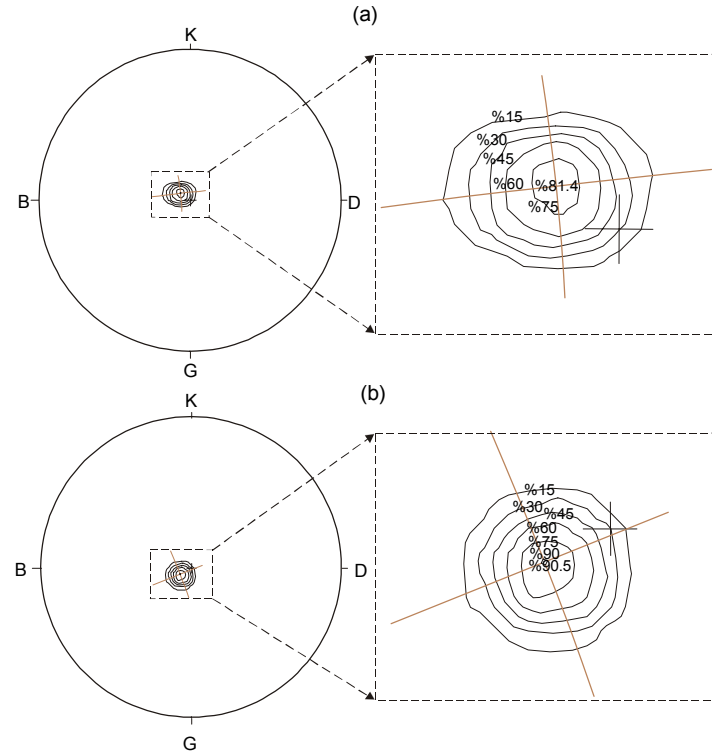
Bu amaçla, öncelikle süreksizlik yönelimlerinin dağılımı incelenmiş ve dağılımı temsil eden istatistiksel model araştırılmıştır. 1 ve 2 no.lu sektörlerde tabakalanma ve eklem yüzeylerinin yönelimlerinin kontur diyagramındaki dağılımları genel olarak elipse benzerdir. McMahon (1971) ve Zambak (1977) tarafından önerilen yöntemden yararlanılarak, bu elipslerin büyük ve küçük eksen düzlemleri, diğer bir ifadeyle asal dağılım eksenleri çizilmiştir (Şekil 9 ve 10). Bu eksenler boyunca konturların eksenleri kestiği noktaların dağılım merkezinden uzaklıkları ve her konturun temsil ettiği frekans değeri kullanılarak, eksenler boyunca iki boyutlu olarak dağılan noktalar ile bunların frekansları

belirlenmiştir (Çizelge 3). Konturların eksenleri kestiği noktaların dağılım merkezinden uzaklıkları stereonet üzerindeki derecelendirme esas alınarak belirlenmiştir. Çizelge 3'teki veriler gruplandırılarak histogramları hazırlanmış (Şekil 11) ve ki-kare testleri yapılarak verilerin hangi istatistiksel dağılım modeline uygun olduğu araştırılmıştır. Sonuçlar, incelenen dağılımın normal dağılımı ile en iyi şekilde temsil edilebileceğini göstermiş (Çizelge 4) ve bundan sonra yapılan analizlerde bu dağılım modeli esas alınmıştır.

Stereografik izdüşüm ağında belirlenen konturların (bkz. Şekil 9 ve 10) yüzde olarak değerleri, bu konturlar üzerindeki her bir noktanın (süreksizliklerin kutup noktası) arazide bulunma olasılığını tanımlanmaktadır. Aynı şekilde, ortalama yönelimin yüzdesi de bu yönelimin bulunma olasılığını ifade etmektedir. Örneğin, 1 no.lu sektördeki ortalama tabaka yöneliminin bulunma olasılığı % 81.4'tür. Olasılığa dayalı kinematik analizlerde, bu



Şekil 9. 1 ve 2 no.lu eklem setlerinin kontur diyagramında dağılımları ve asal dağılım eksenleri
 Figure 9. Distribution of the joint sets 1 and 2 on the contour diagram and major axes for each peak orientation of joints



Şekil 10. 1 no.lu (a) ve 2 no.lu (b) sektörlerdeki tabakalanma düzlemlerinin kontur diyagramlarındaki dağılımları ve asal dağılım eksenleri

Figure 10. Distribution of the bedding planes from sectors 1 (a) and 2 (b) on the contour diagram, and major axes for peak orientations of joints

Çizelge 3. Asal dağılım eksenleri üzerindeki süreksizlik kutuplarının en yoğun kümeleşme noktasına olan uzaklıkları

Table 3. Distribution of poles around the maximum density points

(a) 1 no.lu sektöre ait tabaka yönelimleri için büyük ve küçük eksenler boyunca dağılım değerleri

Frekans	15	30	45	60	75	81.4	75	60	45	30	15
Büyük Eksen	-11.9	-9	-7	-5.8	-2.8	0	2.8	6.1	8	10.5	13.6
Küçük Eksen	-8.7	-7.5	-6.4	-5.5	-3.3	0	3.4	6	7	8.4	9.8

(b) 2 no.lu sektöre ait tabaka yönelimleri için büyük ve küçük eksenler boyunca dağılım değerleri

Frekans	15	30	45	60	75	90	90.5	90	75	60	45	30	15
Büyük Eksen	-11.7	-9.8	-7.8	-6.1	-3.8	-0.4	0	0.4	3.3	5.2	7	8.4	11.2
Küçük Eksen	-9.9	-7.7	-6.1	-4.8	-2.6	-0.4	0	0.4	4.3	7	9	10.7	13.1

(c) 1 no.lu eklem seti için büyük ve küçük eksenler boyunca dağılım değerleri

Frekans	2	4	6	8	10	12	13.5	12	10	8	6	4	2
Büyük Eksen	-34.9	-32.6	-21.6	-11.9	-7.2	-1.2	0	1.2	3.2	14.8	19.3	27.7	33.2
Küçük Eksen	-26.6	-22	-16	-11.3	-6.2	-2.3	0	1.8	14	18.9	39.7	47.3	54.1

(d) 2 no.lu eklem seti için büyük ve küçük eksenler boyunca dağılım değerleri

Frekans	2	4	6	7	6	4	2
Büyük Eksen	-9.3	-4.2	-0.5	0	0.6	10.3	39.5

değerler esas alınarak gerçekleştirilecek duraysızlıkların olasılıkları belirlenmektedir. Bu tür analizlerde, örneğin, “kama türü kayma olasılığı %24’tür” veya “düzlemsel kayma olasılığı %30’dur” şeklinde tanımlamalar sıkça kullanılmakta olup, uygulanabilirliği tartışmalı olan sonuçlar elde edilmektedir. Bu çalışmada, bu tür bir tanımlama yerine, yine olasılık yaklaşımı esas alınarak (teorik normal dağılım eğrisi altındaki alan kullanılarak), sonuçlardan uygulamada da yararlanılması amacıyla belirli güven aralıkları seçilmiş ve bu aralıklarda yer alan tüm süreksizlik yönelimleri kullanılarak risk yaratabilecek duraysızlık türleri ve buna bağlı riskli şev yönelimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

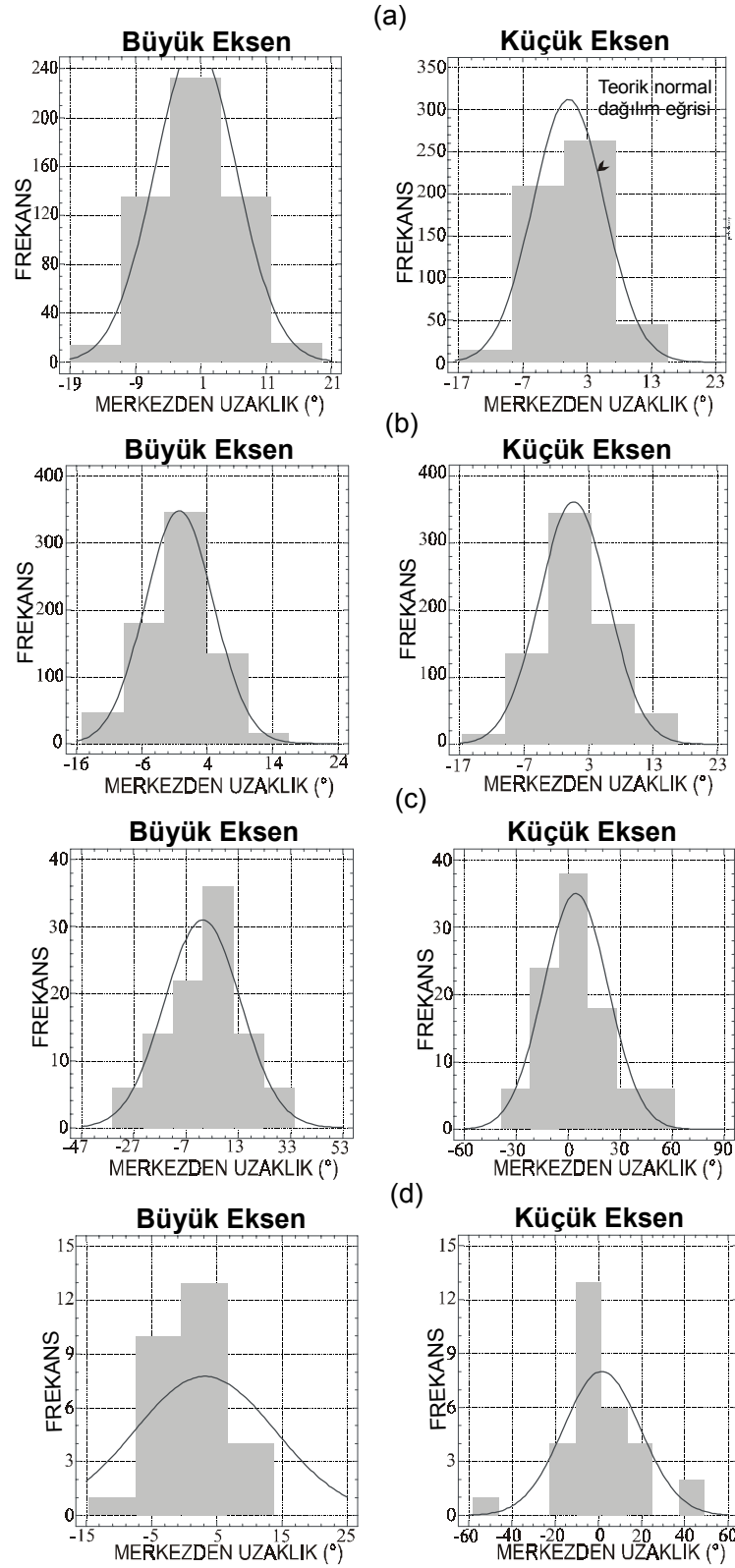
Bu çerçevede, asal dağılım eksenleri boyunca elde edilen teorik normal dağılım eğrilerinin (bknz. Şekil 11) altında kalan %25, %50, %75 ve %90’lık alanlar (güven aralıkları), merkezin orta nokta olması koşuluyla, Şekil 12’de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Bu işlemler, STATGRAPH isimli paket program (STSC Inc.,

1991) kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra, bu alanları sınırlayan x (merkezden uzaklık) değerlerinin gerçek olasılıkları, asal dağılım merkezini tanımlayan 0 (sıfır) noktasının gerçek

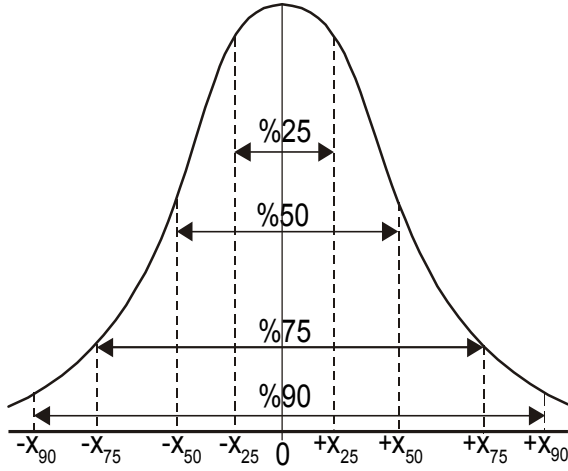
Çizelge 4. Süreksizlik yönelimlerinin kontur diyagramındaki dağılımlarının büyük ve küçük eksenlerine (asal dağılım eksenleri) ait ki-kare (χ^2) testlerinin sonuçları

Table 4. Chi-square (χ^2) test results of the major and minor distribution planes from the contour diagrams

Süreksizlik (Sektör)	Asal dağılım eksenleri	χ^2	Serbestlik derecesi
Tabaka (Sektör 1)	Büyük	3.024	1
	Küçük	7.291	1
Tabaka (Sektör 2)	Büyük	6.777	1
	Küçük	13.9	1
1 no.lu eklem seti	Büyük	4.075	3
	Küçük	3.315	2
2 no.lu eklem seti	Büyük	6.454	1
	Küçük	5.652	1



Şekil 11. 1 (a) ve 2 (b) no.lu sektörlerdeki tabaka yönelimleri ile 1(c) ve 2 no.lu (d) eklem setlerine ait asal dağılım eksenlerinden elde edilen verilerin frekans histogramları ve teorik normal dağılım eğrileri
 Figure 11. Frequency histograms for bedding planes from sectors 1(a) and 2(b), and joint sets 1(c) and 2(d), and their theoretical normal distribution curves



Şekil 12. Normal dağılım eğrisi altında kalan alanlara göre belirlenen güven aralıkları
 Figure 12. Confidence limits determined from the areas below the normal distribution curve

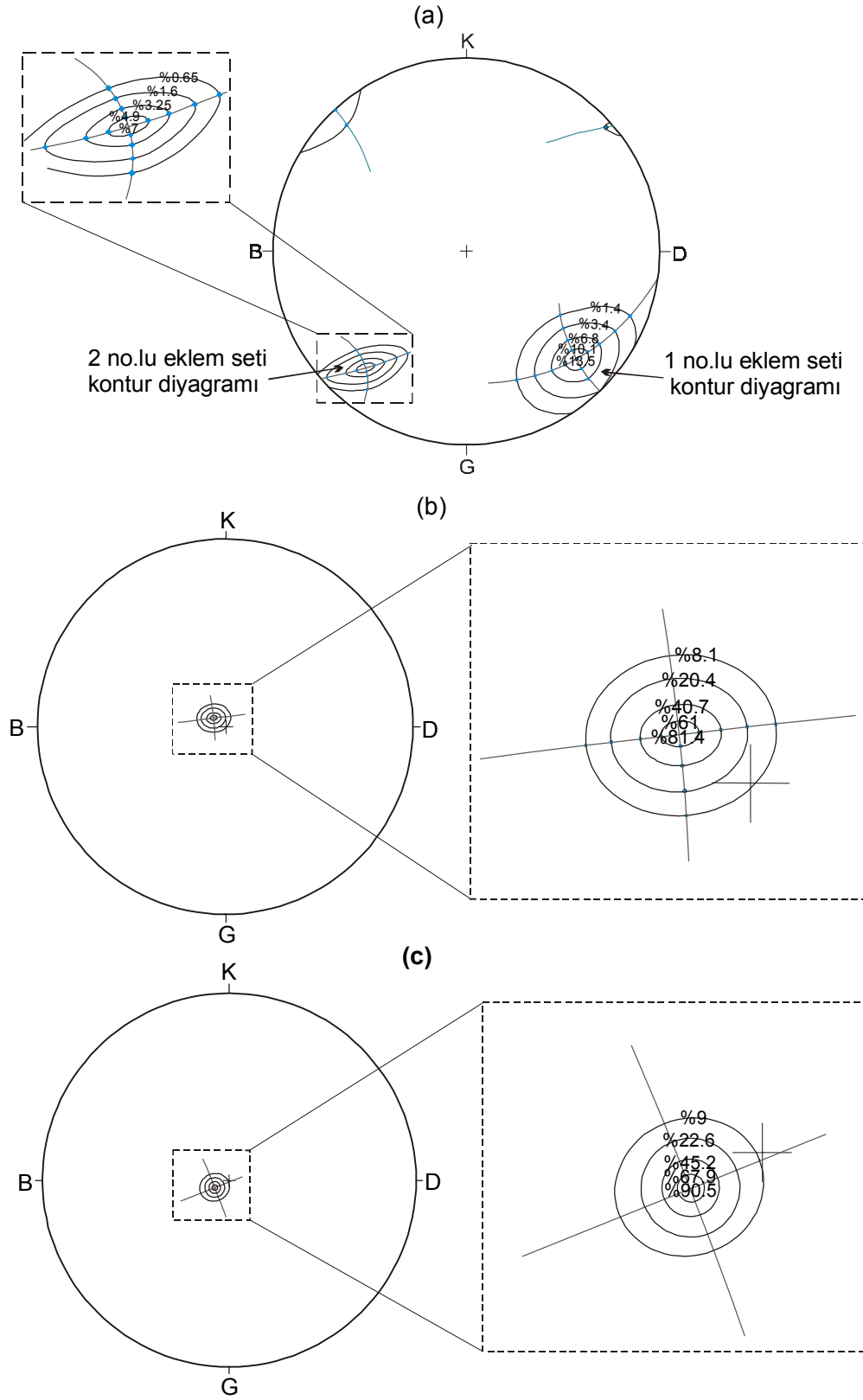
olasılık değerinden yararlanılarak hesaplanmış ve kontur diyagramları bu değerlere göre normalleştirilerek yeniden düzenlenmiştir (Şekil 13). Böylelikle, her süreksizlik setinin kendisini temsil eden egemen süreksizlik yönelimi etrafındaki dağılımına göre bir anlamda güven aralıkları oluşturulmuştur. Sunumda kolaylık sağlaması açısından, bu alanlara değinilirken “güven aralıkları” tanımlaması kullanılmıştır. Analizlerde süreksizlik setlerinin %25, %50 ve %75 güven aralıklarındaki yönelimleri kullanılmış ve öncelikle her süreksizlik setine ait aynı güven aralığındaki (örneğin, tüm setlere ait %50 güven aralığı) belirli eğim yönlerine karşılık gelen en düşük ve en yüksek eğim açıları saptanmıştır.

Süreksizlik setinin örneğin, %50 güven aralığı için eğim yönlerine karşılık gelen eğim açılarının belirlenmesi Şekil 14’de gösterilmiştir. Bu işlem, %25, %50 ve %75 güven aralıkları için de yapılmış ve elde edilen değerler kinematik analizlerde kullanılmıştır (Şekil 15-17). Böylece, bu süreksizlikler bir tek büyük daire yerine birden fazla büyük daireyle tanımlanmıştır. Dairelerin her biri, temsil ettikleri süreksizlik setlerinin belirtilen güven aralığı içinde bir olasılık değerine sahiptir. Dolayısıyla, kama türü duraysızlık riskini taşıyan kesişme noktaları da değişik olasılık yüzdelere karşılık gelmektedir. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada bu olasılıkların belirlenmesi yerine, merkezden itibaren belirli güven aralıklarındaki

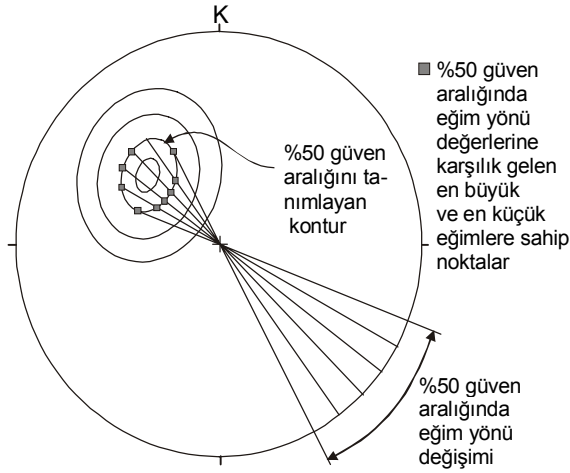
süreksizliklerin tümü birlikte değerlendirilerek, risk yaratabilecek duraysızlık modelleri araştırılmıştır.

Güney şevinde kuzeye eğimli 60°’lik basamak aynaları için %25 güven aralığında yapılan analizlerin sonuçlarına göre, 1 no.lu sektörde herhangi bir risk beklenmezken (Şekil 15a), 2 no.lu sektörde 6 ve 7 no.lu faylar ile 1 ve 2 no.lu faylar ve 1 ve 2 no.lu eklem setlerinin kesişme hatları boyunca kama türü duraysızlık riski söz konusudur (Şekil 15b). Bu sonuçlar, 2 no.lu sektör için egemen süreksizlik yönelimleri esas alınarak yapılan deterministik kinematik analizin sonuçlarından farklı değildir. Dolayısıyla, yerel olarak gelişmesi olası bu riskin giderilebilmesi için, basamak aynalarının eğimlerinin 50-60°’den 45°’ye düşürülmesi gerekmektedir. %50 güven aralığı için yapılan analizlere göre; 1 no.lu sektörde yine bir risk gözlenmezken (Şekil 16a), 2 no.lu sektörde %25 güven aralığında olduğu gibi, fay ve tabakalanma düzlemlerinin kesişmesi sonucu kama türü duraysızlık riskinin söz konusu olacağı anlaşılmaktadır (Şekil 16b). Söz konusu kama türü duraysızlık riskinde etkin olan süreksizlik düzlemlerinden birisi 6 veya 7 no.lu fay olarak ortaya çıkmaktadır. Bu açıdan, 2 no.lu sektörde bu fayların gözlemlendiği basamak aynalarının eğimlerinin 45°’ye düşürülmesi gerekmektedir. %75 güven aralığındaki analizlere göre ise, 1 no.lu sektörde 1 veya 2 no.lu faylar ile 2 no.lu eklem setinin kesişme hatları boyunca, sınır koşuluna yakın olmakla birlikte, kama türü duraysızlık riski belirlenmiştir. Böyle bir riskin gerçekleşmemesi için, basamak aynası eğiminin 60°’den 54°’ye indirilmesi gerekmektedir (Şekil 17a). 2 no.lu sektörde ise, %50 güven aralığı için yapılan analizlerden farklı olarak, 1 veya 2 no.lu faylar ile 2 no.lu eklem setinin kesişme hatları boyunca kama türü duraysızlık riski belirlenmiştir (Şekil 17b). Bu yaklaşımla faylara yakın bölgelerde lokal olarak gözlenebilecek kama türü duraysızlık riskinden kaçınılabilmesi açısından, basamak aynalarının 45°’lik bir eğimle oluşturulması yerinde olacaktır. Her iki sektörde ve tüm güven aralıklarında çok sayıda basamaktan oluşan nihai şevin ise, bu çalışmada incelenen üç duraysızlık türü açısından bir risk taşımadığı belirlenmiştir.

Güney şevinde, kazının gelişimine bağlı olarak daha sonra değiştirilmek üzere geçici de olsa, eğim yönleri yer yer yaklaşık doğuya ve batıya doğru olan basamak aynaları da oluşturulmaktadır. Basamak bazında gelişecek



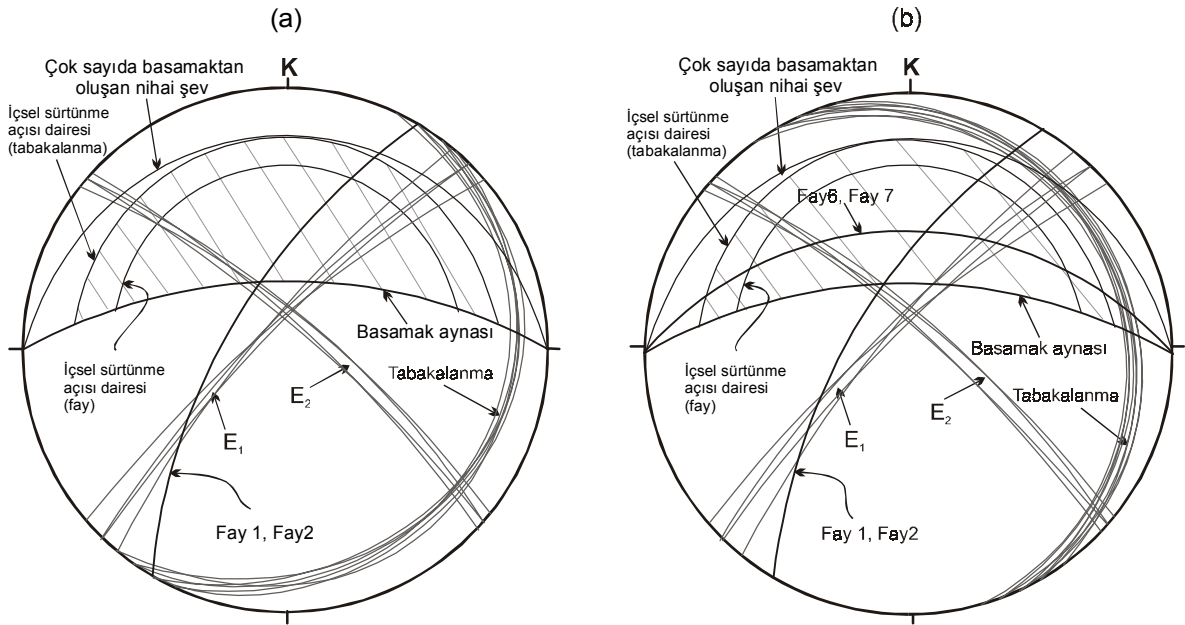
Şekil 13. 1 ve 2 no.lu eklem seti(a) ile 1(b) ve 2(c) no.lu sektörlerdeki tabakalanma yönelimlerine ait normalleştirilmiş kontur diyagramları
 Figure 13. Normalized contour diagrams for the joint sets 1 and 2 (a), and for bedding planes from the first (b) and second (c) sectors



Şekil 14. %50 güven aralığını temsil eden konturlar üzerinde belirli aralıklarda eğim yönlerine karşılık gelen eğim değerlerinin belirlenmesinde izlenen yöntem

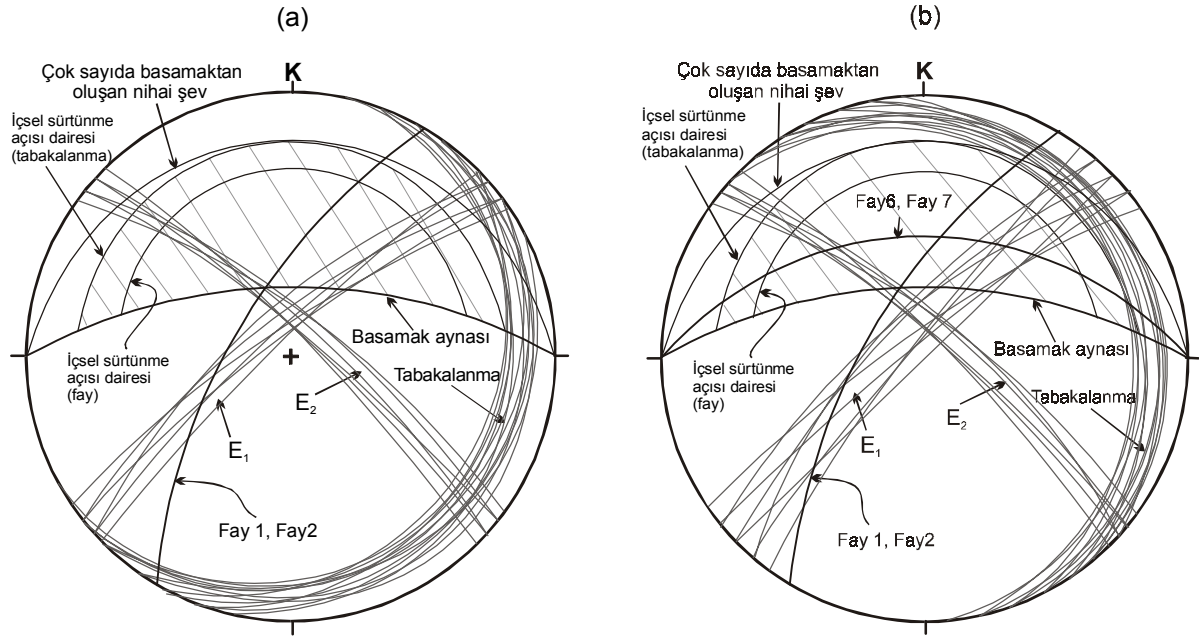
Figure 14. The procedure followed to determine the dip values corresponding to dip directions in certain intervals selected from the contours representing 50% confidence limit

bir duraysızlık, tüm şevi kapsayan bir duraysızlığın yanında göreceli olarak daha az tehlikeli görünmekle birlikte, can ve mal kaybına neden olabileceği için önem taşımaktadır. Şekil 15, 16 ve 17'de de görüldüğü gibi, geçici olarak açılan bu basamaklarla ilgili en kritik yapısal unsur tabakalanma yüzeyleri, dolayısıyla en riskli duraysızlık modeli de düzlemsel kaymadır. Çünkü ocak içinde gerçekleşen duraysızlıkların tümünde dayanımları oldukça düşük olan tabakalanma yüzeylerinin rolü bulunmakta ve kalıcı olmayan şevlerin eğim yönleri bu tabakalanma yüzeylerinin yönelimlerinin değişim aralıkları içinde kalmaktadır. Bu nedenle %25, %50 ve %75 güven aralıklarına göre sadece tabaka yönelimleri esas alınarak, 1 ve 2 no.lu sektörlerde düzlemsel kayma açısından risk taşıyabilecek şev yönelimleri de belirlenmiştir. Analiz sonuçlarının grafiksel olarak gösterildiği

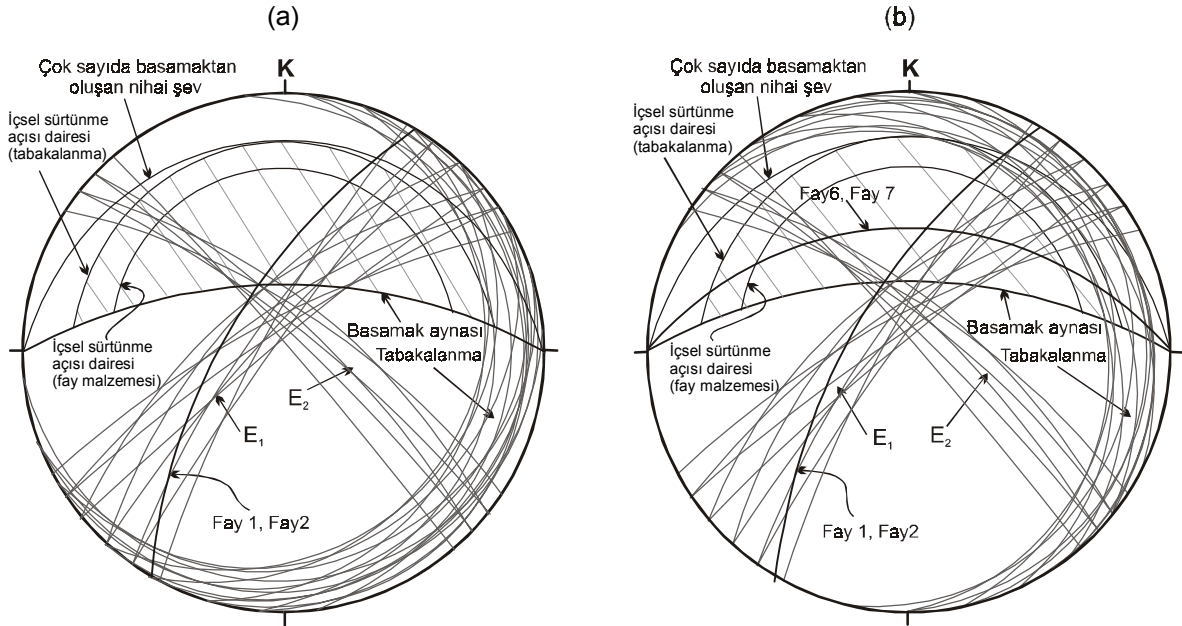


Şekil 15. 1(a) ve 2 no.lu(b) sektörler için %25 güven aralığında gözlenen süreksizlik yönelimleri esas alınarak gerçekleştirilmiş kinematik analizler

Figure 15. The kinematical analyses based on the discontinuity orientations observed in 25% confidence interval for the sectors 1(a) and 2(b)



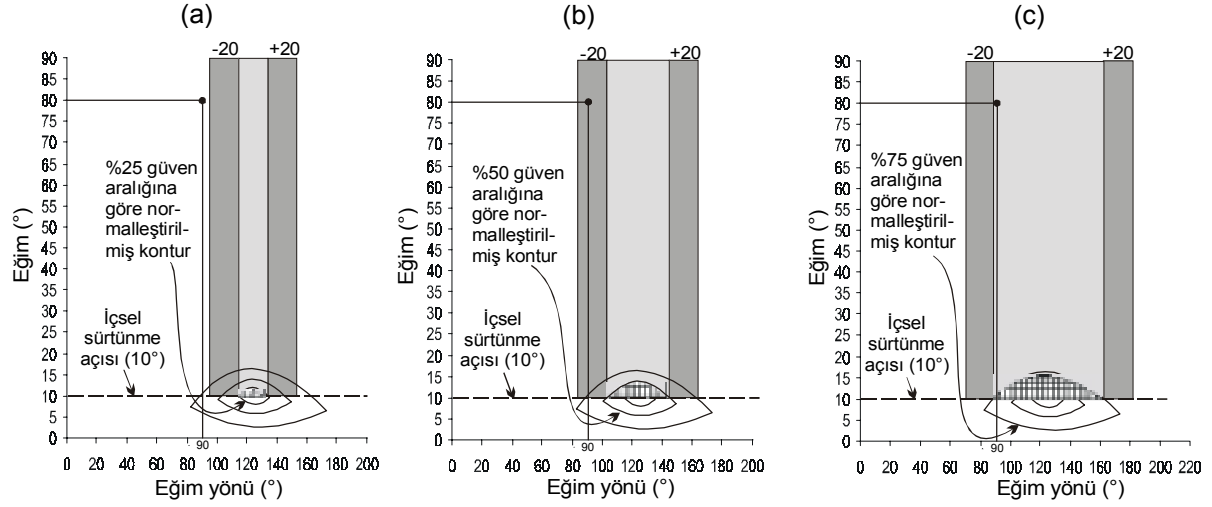
Şekil 16. 1(a) ve 2 no.lu(b) sektörler için %50 güven aralığında gözlenen süreksizlik yönelimleri esas alınarak gerçekleştirilmiş kinematik analizler
 Figure 16. The kinematical analyses based on the discontinuity orientations observed in 50% confidence interval for the sectors 1(a) and 2(b)



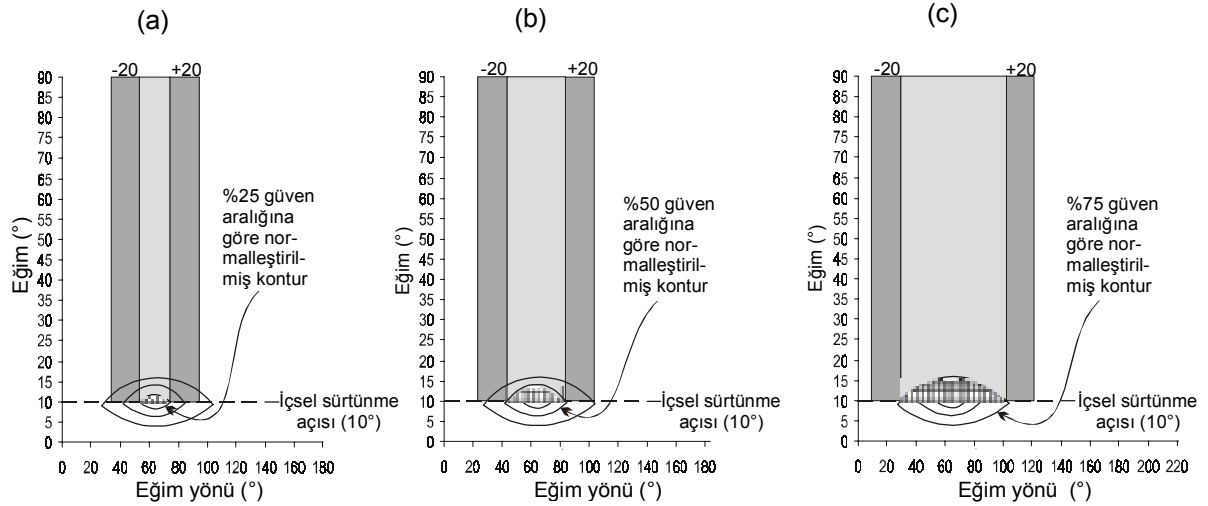
Şekil 17. 1(a) ve 2 no.lu(b) sektörler için %75 güven aralığında gözlenen süreksizlik yönelimleri esas alınarak gerçekleştirilmiş kinematik analizler
 Figure 17. The kinematical analyses based on the discontinuity orientations observed in 75% confidence interval for the sectors 1(a) and 2(b)

Şekil 18 ve 19'daki ovaloidler, stereografik izdüşüm ağında değişik güven aralıklarına göre normalleştirilmiş konturlara karşılık gelmektedir. Ovaloidin içinde kalan her bir nokta, daha

yüksek frekansa sahip tabaka yönelimlerini ifade etmektedir. Ovaloidlerin yaklaşık olarak ortalarına doğru egemen süreksizlik yönelimi yer almaktadır. Kinematik anlamda bir



Şekil 18. 1 no.lu sektör için %25(a), %50(b) ve %75(c) güven aralıkları içinde yeralan tabaka yönelimleri esas alınarak gerçekleştirilmiş kinematik analizlere göre riskli basamak aynası yönelimleri
 Figure 18. Bench face orientations having risk determined from the kinematical analyses based on the bedding plane orientations in the confidence intervals of 25% (a), 50% (b) and 75% (c) for sector 1



Şekil 19. 2 no.lu sektör için %25(a), %50(b) ve %75(c) güven aralıkları içinde yeralan tabaka yönelimleri esas alınarak gerçekleştirilmiş kinematik analizlere göre riskli basamak aynası yönelimleri
 Figure 19. Bench face orientations having risk determined from the kinematical analyses based on the bedding plane orientations in the confidence intervals of 25%(a), 50%(b) and 75%(c) for sector 2

süreksizlik yüzeyinin düzlemsel kayma riskine neden olabilmesi için, şev ile süreksizliklerin eğim yönü veya doğrultuları arasında en fazla 20°'lik farkın bulunması (Hoek ve Bray, 1981) ve süreksizliğin eğim açısının şevin eğiminden küçük, içsel sürtünme açısından büyük olması gerekmektedir. Bu nedenle, ovaloidin içine düşen tabaka düzlemleri arasında, sadece eğimleri içsel sürtünme açısından büyük olanlar risk taşıyacaktır. Şekil 18 ve 19'da kesikli çizgiyle gösterilen içsel sürtünme açısı

çizgisinin üzerinde ve bu çizginin ovaloidi kestiği noktalardaki eğim yönleri ile sınırlı alan (taralı alan), belirtilen güven aralığında risk taşıyan tabaka yönelimlerini temsil etmektedir. Bu durumda taralı alan da dahil olmak üzere, bu alanın üstünde kalan açık gri alan ile düzlemsel kayma açısından $\pm 20^\circ$ eğim yönü farkının ifade edildiği koyu gri alana düşecek bir şev yönelimi, belirtilen güven aralığı içinde risk taşıyor anlamına gelmektedir. Örneğin, güney şevinin 1 no.lu sektörde düzlemsel kaymanın meydana

geldiği basamak aynasının yönelimi (80/090), Şekil 18'de gösterildiği gibi, %25 güven aralığına göre oluşturulan riskli alana düşmezken, %50 ve %75 güven aralıklarında riskli bölgeye düşmekte, dolayısıyla saha gözlemleriyle olasılığa dayalı analiz sonuçları uyum sağlamaktadır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, eklemlili kaya kütlelerinde açılan şevlerin duraylılığını denetleyen en önemli faktörlerden biri olan süreksizlik yönelimleri üzerinde durulmuş ve uygulamada kinematik analizlerde yaygın olarak esas alınan egemen süreksizlik yönelimlerinin yanısıra, daha az frekansta gözlenen yönelimlerin de duraysızlık riskine neden olabileceği tartışılmıştır. Bu amaçla, Himmetoğlu linyit açık işletmesinin duraysızlık riski taşıyan güney şevi deterministik ve olasılığa dayalı kinematik yaklaşımlarla değerlendirilmiştir. Her iki yöntemin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, güney şevinde faylarla eklem setlerinin kesişmesi nedeniyle, basamak boyutunda da olsa, kama türü duraysızlık riskinin varlığını göstermiştir. Söz konusu riskin gerçekleşmemesi amacıyla basamak aynalarının eğimlerinin 45° ile 54° arasında tutulmasının yerinde olacağı belirlenmiştir. Gerek basamak, gerekse nihai şev boyutunda herhangi bir düzlemsel ve devrilme türü kayma riski saptanmamıştır. Bununla birlikte, olasılığa dayalı analizler, genellikle D-B yönünde açılan basamakların doğrultularında yapılacak bir değişiklik halinde, gözlenme olasılığı daha az olan süreksizlik yönelimlerinin düzlemsel kayma riskini arttıracaklarını göstermiştir. Bu belirleme, incelenen şevin batı kesiminde meydana gelmiş olan düzlemsel kaymanın varlığıyla da desteklenmektedir. Yeterli sayıda süreksizlik yönelimi verisinin elde edilmesi koşuluyla, belirli güven aralıkları arasında yeralan süreksizlik yönelimleri esas alınarak yapılacak olasılık esaslı kinematik analizlerin sonuçlarına göre risk taşıyabilecek şev yönelimlerini tanımlayan grafiklerin hazırlanması, şev duraylılığına ilişkin ön değerlendirmelere katkı sağlayabilecek bir uygulama olarak dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- ASTM (American Society for Testing and Materials), 1986. Annual Book of ASTM Standards - Soil and Rock, Bulding Stones, Section-4, Construction, V. 04.08. ASTM Publication, 972 p.
- CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology), 1977. Pit Slope Manual: Supplement 5-1, Plane Shear Analysis. Canmet Report 77-16, 307p.
- CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology), 1981. Pit Slope Manual: Chapter 2, Structural Geology. Canmet Report 77-41, 123p.
- Chowdhury, R.N., 1987. Risk of slip along discontinuities in a heterogeneous medium. Mining Science and Technology, 4, 241-255.
- Diedrich, M.S., and Hoek, E., 1989. DIPS: A computer program for stereographic net (ver. 2.2, Advanced Version). Rock Engineering Group, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada.
- Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., and Ercanoğlu, M., 2000. Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of Altındağ (settlement) Region in Turkey. Engineering Geology, 55, 277-296.
- Hoek, E., and Bray, J.W., 1981. Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons Ltd., 3rd edition, London, 358p.
- McMahon, B. K., 1971. A statistical method for the design of rock slopes. Proceedings of 1st Australia - New Zealand Geomechanics Conference, Melbourne, 314-321.
- Pine, R. J., 1992. Risk analysis design applications in mining geomechanics. Transaction of Institution of Mining and Metallurgy. (Section A: Mining Industry), 101, A149-A158.
- Priest, S.D., and Brown, E.T., 1983. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes. Transaction of Institution of Mining and Metallurgy. (Section A: Mining Industry), 92, A1-A12.
- STSC Inc., 1991. Statgraphics: Statistical Procedures Reference Manual. V. 5.0, 1750 p.
- Şener, M., 1992. Himmetoğlu (Bolu-Göynük) Neojen baseninin jeolojik-mineralojik ve jeokimyasal incelemesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 145s (yayımlanmamış).

- Tuncay, E., 1999. TKİ-Himmetoğlu Linyit Açık İşletmesindeki şevlerin duraylılığının deterministik ve olasılığa dayalı yöntemlerle değerlendirilmesi. Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 167s (yayımlanmamış).
- Ulusay, R., and Yoleri, M.F., 1993. Shear strength characteristics of discontinuities in weak, stratified, and clay-bearing coal measures encountered in Turkish surface coal mining. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 48, 109-117.
- Ulusay, R., Ekmekçi, M., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Tuncay, E. ve Erdoğan, S., 1998. TKİ Himmetoğlu (Göynük-Bolu) linyit açık işletmesi şev duraylılığı projesi (1. Aşama: A panosu şevlerinin duraylılığı). Proje No. 97-0056, 245s (yayımlanmamış).
- Whittlestone, J. D., Johson, J. D., Rogers, M. E., and Pine, R. J., 1995. Probabilistic risk analysis of slope stability. Transaction of Institution of Mining and Metallurgy. (Section A: Mining Industry), 104, A19-A24.
- Young, D.S., 1993. Probabilistic slope analysis for structural failure. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstracts, 30(7), 1623-1629.
- Zanbak, C., 1977. Statistical interpretation of discontinuity contour diagrams. International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics Abstracts, 14, 114-120.