

JEOFİZİK YÖNTEMLERLE HEYELAN ARAŞTIRMALARI

Landslide Investigation by Geophysical Methods

Osman DEMİRAĞ*

ÖZET

Heyelan araştırmalarında en geçerli ve pratik yöntemler sismik ve elektrik yöntemlerdir. Ancak son zamanlarda çok duyarlı gravite ve magnetik yöntemler de kullanılmaya başlanmıştır.

Heyelan alanlarında uygulanan sismik teknikler, soruna ve araştırılan alanın jeolojik karakteristiklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir.

Heyelan araştırmalarında elektrik yöntem uygulamaları ise ağ düzeninde ölçümleri, düşey elektrik sondajları (DES) ve çok yönlü ölçümleri içermektedir.

Heyelan dinamiğinin araştırılması sözkonusu olduğunda zaman bağımlı ve sistemli (regime-type) gözlemler yapılmaktadır.

Heyelan araştırmalarında kullanılan gravite yöntemi uygulamaları; tek noktada veya sistemli gözlemlerle gravite alanının zamana göre değişiminin ölçülmesi şeklinde yürütülmektedir. Aynı ölçüm ilkesi manyetik araştırmalar içinde geçerlidir. Ancak heyelan gelişme alanları genelde düşük magnetik parametre değeri taşıyan kayalardan oluşmaktadır. Bu nedenle çok duyarlı quantum magnetometreleri kullanılmaktadır.

Heyelan alanlarında uygulanan jeofizik yöntemlerle heyelanın sınırları, kayma yüzeyinin derinliği, heyelan külesinin farklı kayaç kesimleri, yeraltısuyu ve askılı su tablasının durumları, filtrasyon akışının hızı ve temel kayanın derinlik, yapı ve bileşimi gibi özellikleri saptanabilmektedir.

ABSTRACT

The most practical and currently used geophysical methods for landslide investigation are the seismic and electrical methods. Recently, high precision gravitational and magnetic methods have also begun to be used for the study of landslides.

The procedures used in seismic investigations on landslide areas are extremely varied, depending on the problem to be dealt with and on the geological characteristics of the site under study.

Characteristic future of the application of electrical exploration to the study of landslides include increased observation network density, contraction of (AB) line separations when performing electrical soundings, and the use of multiazimuth measurements. Regime-type electrical exploration observations are organized as the purpose is to study landslide process dynamics.

Gravitational exploration as applied to landslide is based on the study of the gravitational force either by single (one-off) measurements' or by analysis of time-dependent gravity variations as determined by multiple (regime) observations.

Magnetic exploration is based on the study of the magnetic field by way of one-off observations and on the study of magnetic-field observations with time using regime data for the same points. Magnetic exploration is feasible only if highly sensitive and highly precise equipment of the quantum magnetometer type is available.

Geophysical methods are applied on the determination of the outer boundaries of a landslide, determination of the depth of the surface failure, subdivision of the landslide body into separate rock complexes, determination of the position of the ground water table and temporarily perched ground water, determination of the direction and intensity of filtration flow and determination of bedrock depth, composition and structure.

GİRİŞ

Hızla artan dünya nüfusuna bağlı olarak aynı hızda artış gösteren endüstriyel ve tarımsal alan kullanımı ile Litosfer'e

yeni baskılar yapılmakta ve böylece çeşitli boyutlarda jeolojik olayların gelişmesine ortam hazırlanmaktadır. Bunlardan birisi de heyelanlardır.

* EİE Genel Müdürlüğü, Jeofizik Şubesi, Ankara

İnsantık tarihinin hemen hemen tüm kesitinde doğal afet olarak açıklanan ve büyük ölçüde arazi ve can kaybına neden olan bu olaylarda, insanın doğal ortamı olan Litosfer'deki ekonomik etkinlikleri büyük önem taşımaktadır.

Örneğin madencilik, konut yapımı ve benzeri etkinliklerle her yıl yaklaşık 100 milyon ton kaya kazılmakta ve yer değiştirilmektedir. Ayrıca baraj, konut, büyük endüstriyel yapı, sulama, geniş alanlarda yapılan toprak ıslah çalışmaları ile jeolojik ve meteorolojik süreçler bazen kökünden değişikliğe uğratılmaktadır.

Heyelanları da kapsayan ve devamlı olarak artan bu olayların oluşum mekanizmaları ve oluşumu etkileyen etmenlerin iyice kavranabilmesi, olumsuz etkilerinin azaltılması veya tümüyle engellenmesi olanağı; mühendislik jeofiziği, mühendislik jeolojisi ve diğer ilgili disiplinlerin ortaklaşa çalışmaları ile yaratılabilir.

Bugün dünyada tarım alanlarını, karayolu ve demiryollarını ve benzeri tüm mühendislik yapılarını heyelanlardan korumak için çalışma yapmayan tek bir ülke yoktur. Ancak önemli olan bu çalışmaların boyutu ve kurumsallaştırılmasıdır. Örneğin, Japonya'da bu disiplin 1958 yılında çıkartılan "Heyelan Önleme yasası" ve 1969 yılında çıkartılan "Dik Yamaçlardaki Çökmelerin Neden Olduğu Afetlerden Korunma Yasası" ve birçok düzenleyici yönetmelik ile sağlanmaktadır. Türkiye'de "Afetler Yasası"nın yeterliliği ise her zaman tartışmalıdır.

HEYELAN VE YAMAÇ YENİLMELERİ

Heyelanlar ve yamaç yenilmeleri, bir tepenin yamacı veya bir yamacın yüzey kısmı boyunca bazı etkileyici ve başlatıcı nedenlerle denge durumunun yitilmesiyle oluşan iki tür zemin çökmesidir. Bunlar aslında birbirine çok benzer olaylardır ve ayırdedilmeleri oldukça zordur. Ancak yine de kendilerine özgü bazı belirleyici özellikleri vardır. Bu konuda Japon

araştırmacılar tarafından geliştirilen bir yaklaşım Çizelge 1 de verilmektedir.

Çizelgedeki kıyaslamadan da görüleceği gibi heyelan, büyük kütlelidir ve nisbeten tatlı eğimli bir yamaç boyunca yavaş hareket etmektedir ve kayan kütle az bozuşmuştur. Oysa yamaç yenilmeleri daha dik eğimli yamaçlarda çok bozuşmuş kütlelerin hızlı hareketiyle gelişmektedir. Heyelanlar, çok geniş alanlardan yamaç yenilmesine benzer ölçüde küçük olanlarına kadar geniş bir aralıkta yer alırlar. Heyelanların belirteci sayılan etmenlerden birisi yamaç eğimidir. Genel olarak tipik bir yamaç yenilmesi, eğimi 30° - 60°, yüksekliği 10 - 30 m olan, 1 - 2 m derinlikli küçük ölçekli oluşumlardır. Heyelanlarda ise yamaç uzunluğu en az 100 - 200 m ve derinlik ise yine en az 20 metredir.

Büyük hacimli heyelanlar yoğun yağışların ortasında değil, yağışlar bittikten sonra oluşur. Çok hızlı hareket eden yamaç yenilmesi ise genellikle yağış doruk değerlerinin öncesi veya sonrası oluşabilirler. Ayrıca heyelanlarda 1000 metrekareden daha geniş bir alan ve 30° den daha düşük eğimler belirgin özelliklidir.

HEYELANLARIN ARAŞTIRILMALARI

Heyelanların önlenmesi planlarının uygulanabilmesi için ön araştırma, tanıma (reconnaissance) ve ayrıntılı araştırma gibi aşamaların geçilmesi gerekir. Ön araştırmalarda hava fotoğrafları, topoğrafik haritalar ve diğer ilgili bilgiler derlenir. Daha sonraki tanıma aşaması arazide başlatılır ve gözlemlere dayanılarak heyelanın özellikleri kavranmaya çalışılır. Önleme planları için ayrıntılı arazi deneyi, çalışma ve etütler sürdürülür.

Heyelanların temel araştırma başlıkları ve kullanılan yöntem ve teknikler Çizelge 2 de sunulmaktadır. Bu çizelgede yeralan tekniklerin ayrıntılarına bir başka incelememizde yer vermek üzere özellikle Jeofizik yöntemler üzerinde durulacaktır.

Çizelge 1. Heyelanlarla yamaç yenilmeleri arasındaki farklar

Table 1. Difference between landslides and slope failures

	HEYELANLAR	YAMAÇ YENİLMELERİ
JEOLOJİ	Özel jeolojik yapı ve formasyonların bulunduğu yerlerde oluşur	Jeolojik yapı ile çok az ilişkilidir.
ZEMİN	Özellikle kohezyonlu zeminlerde etkindirler (kayma yüzeyi gibi)	Çok sık olarak kumlu zeminlerde dahi oluşur (ayrışmış granit, örtü toprak vb.)
TOPOĞRAFYA	5° - 20° tatlı eğimlerde oluşur ve üst kesimlerinde çoğu kez plato şeklinde topoğrafyaya sahiptir	Genellikle 30° den daha dik yamaçlarda oluşur
ETKİNLİK DURUMU	Devamlı veya yinelenen oluşumlar şeklinde	Aniden oluşur
HAREKET HIZI	Hız normal olarak günde 0.01 - 10 mm den daha azdır	Günde 10 mm den daha fazla olmak üzere yüksek hızlıdır
KÜTLELER	Az bozuşmuş kütlelerdir ve genelde ilk şeklini koruyarak hareket eder	Çok bozuşmuş kütleye sahiptir.
KAYMA NEDENİ	Yeraltı suyu ile önemli ölçüde etkilenir	Sağanak yağmur sırasında yağış şiddetinden etkilenir
ÖLÇEK	1-100 ha ya kadar büyük ölçektedir.	Küçük ölçeklidir
BELİRTİLER	Kayma öncesi çatlaklar, topoğrafik bozulmalar yeraltı suyu seviyesinde dalgalanmalar	Birkaç belirtisi olur ve aniden kayar
EĞİM	10° - 25°	35° - 60°

HEYELAN ARAşTIRMALARINDA JEOFİZİK YÖNTEM UYGULAMALARI

Heyelan araştırmalarında jeofizik yöntemlerin kullanılmasının yaygınlaşmasının nedeni, heyelanı oluşturan kaya ve toprak kütlelerinin zaman içinde doğal koşullarda gelişebilecek değişimler hakkında güvenilir bilgilerin elde edilmesine olanak sağlamasıdır.

Jeofizik yöntemlerin bugün en yaygın kullanılanları sismik ve elektrik yöntemlerdir. Ancak son yıllarda yüksek duyarlılıklı gravite ve manyetik yöntemler de kullanılmaya başlanmıştır.

Sismik yöntemlerle heyelan gözlemleri yapılırken elde edilen verilerin irdelenmesinde sadece hızlar değil, daha çok seçilen bir noktadaki bazı dalga fazı varış zamanları gözönünde bulundurulmaktadır. Bu tür gözlemlerde ayrıca boyuna, enine dalgaların a_p , a_s soğurma sabitleri ve V_p , V_s hızlarındaki azalmalar ya da a_p , a_s etkin sönüm sabitlerinin ve V_p , V_s hız azalmalarının saptanması büyük önem taşır.

Elektriksel Araştırmalar

Hidrojeolojik ve mühendislik jeolojisi araştırmalarında bilindiği gibi çoğu kez yapay doğru akım veya elektrokimyasal ve filtrasyon kaynaklı doğru akım alanı kullanılmaktadır. Öl-

- Çizelge 2. Heyelan araştırmalarının temel yöntemleri ve kullanım sıklığı. A: her yerde kullanılır, B: birçok yerde kullanılır, C : gerektiği yerde kullanılır.**
- Table 2. Survey items and methods in landslide investigation and the frequency of their use. A: used at all sites, B: used at most sites, C: used where required.**

ARAşTIRMA BAşLIKLARI	ARAşTIRMA YÖNTEMİ	KULLANIM SIKLIğI
Heyelan alanının özelliklerinin ilk aşama değerlendirme çalışmaları	Hava fotoğrafları ve uzaktan algılama	B
	Yeraltı ısısı	C
	Sismik araştırmalar	B
	Doğal radyoaktivite araştırmaları	C
	Elektrik araştırmaları	C
	Elektrik logları	C
Yüzeysel deplasmanların araştırılması	Yüzey araştırmaları	A
	Havadan fotogrametri	B
	Ekstensometre ölçümleri	A
	Tiltmetre ölçümleri	A
Yeriçi ve kayma yüzeyindeki deplasmanların araştırılması	Sondaj	A
	Pipe Strain Gauge ölçümleri	A
	Eğim ölçer gözlemleri	A
	Hareket ölçer gözlemleri	C
Kayma yüzeyinde etkin yeraltısuyu basıncı araştırmaları	Yeraltısuyu seviyesi ölçümleri	A
	Boşluk suyu basıncı ölçümleri	C
Yeraltısuyu ve taşıma kapasitesinin araştırılması	Su kalitesi analizi	C
	Yeraltısuyu izlemeleri	B
	Yeraltısuyu gözlemleri	A
	Pompaj testi	C
	Yeraltısuyu model çalışmaları	C
Zemin Deneyleri	Fiziksel test	A
	Dayanım testi	A
Hidrolojik Testler	Yağış miktarı gözlemi	A
	Kar gözlemi	B
	Erime gözlemi	C

Sismik Yöntemler

Sismik ölçümler sırasında belirlenen sismik özellikler ve elastik titreşim alanının yapısı, kayaçların fiziko-mekanik özellikleri, bileşimi, konumu ve diğer bazı özellikleri ile yakından ilgili olduğundan heyelan alanlarındaki jeolojik yapı, hidrojeolojik koşullar ve heyelan kütlelerini oluşturan kayaların mühendislik jeolojisi parametrelerinin saptanmasında kullanılmaktadır. Uğraşılacak soruna ve heyelanın jeolojik karakteristiğine bağlı olarak birleştirilmiş sismik yöntem dizileriyle yüzeyde ve ortam içinde P, S, R, L dalga hızları ölçülmekte ve P, S için anizotropi sabitleri (μ_p , μ_s) hesaplanmaktadır. Heyelan alanlarının bu yöntemle araştırılmasında gözlenen en önemli olgu, açısız ölçümlerin kullanılışıdır.

çülen değerler ise elektriksel özdirenç ρ , kayaç polarizasyonu (% η olarak) ve doğal elektrik alanı E (mV/m).

Yoğun bir şebeke gözlemi, sığ elektrik sondaj ve açısız ölçümler kullanılır. Heyelan sürecinin dinamiğinin araştırılması amaçlandığında zamana bağlı gözlemler yapılır. Bu durumda özellikle özdirenç anizotropi parametreleri önem kazanır.

Gravite Yöntemi

Tek ölçümlerle ya da zamana göre sistematik gözlemlerle gravite değişimlerinin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmalardır. Bu değişimlerin, yapıyı ve heyelan oluşumundaki gelişmeleri yansıttığı SSCB de kanıtlanmıştır.

Aslında heyelan alanlarında bu değişim, ortalama değerden 1-3 gu sapma kadardır. Ancak bazı durumlarda, gözlem periyodu sırasındaki heyelan etkinliğinin düzeyine, gözlem noktalarının olduğu yerlerdeki jeolojik özelliklere ve diğer bazı etmenlere bağlı olarak bu saptamalar 4-8 gu olabilmektedir.

Eldeki verilere göre zamana göre gravite değişimi iki etmene bağlıdır. Bunlar, heyelan gelişimi nedeniyle oluşan yoğunluk değişimi ve heyelan kütlelerini oluşturan kayaların düşey yöndeki mikro hareketleriyle ilgili ivmedir. Bu ivmeye, heyelan işlevi, sismik mikro titreşimler ve atmosferik basınçtaki değişimlerden ötürü kaya yüzeyini etkileyen yüklerdeki değişim gibi etmenler neden olabilir. Kuramsal olarak bu düşey mikro hareketlerin hemen hemen eşit değişimli (equivariable) olduğu varsayılırsa, o zaman 1-20 gu ivmelerin oluşabilmesi için bu hareketlerin 1 Hertz'in binde birinden daha küçük titreşim frekanslı olması gerekir (milimetrik hareketler).

Mühendislik Jeofiziği çalışmalarında, birbirinden farklı seriler halinde zamana bağlı, sistemli (regime-type) gravimetrik ölçümler sırasında aynı nokta için elde edilen Bouguer anomalileri (Δg_B) kullanılmaktadır. Ancak tek noktadaki ölçüm hatası +0.2 - 0.3 gu dan fazla olmamalıdır.

Manyetik Yöntem

Uygulamalar tek tek gözlem veya aynı noktalarda yapılan zamana bağlı, sistemli gözlemlerle manyetik alan gelişiminden elde edilen verilere dayandırılmıştır. Heyelan gelişme alanları çoğu kez düşük manyetik parametre değerleri sunan kayalardan oluşmakta ve araştırmalar yalnızca çok duyarlı quantum magnetometreleri (duyarlılık 0.1 nT, doğruluk + 0.3 nT ye kadar) ile yapıldığında iyi sonuçlar alınmaktadır. Tekil gözlemler, kayaç litolojisinin belirlenmesi ve doğal kayaç çatlaklığı ve tektonik faylanmadan daha yüksek değerlerle karakterize olan alanların haritalanmasında yararlıdır. Zaman bağımlı ve sistemli gözlemlerde ise çok daha fazla mühendislik bilgisi üretilir.

Son yıllarda SSCB de yapılan çalışmalarda yüzeyden 1, 2, 3 m yükseklikte 2 m karesel ağ kullanılarak yapılan mikromanyetik ölçümler ile çok iyi sonuçlar alınmıştır. Mikromanyetik alan, yapıya ve kil, çamur ve çamurlu hafif kumlar gibi tipik heyelan malzemesinin dokusuna ilişkin ayrıntılı bilgiler sağlayabilmektedir. Ayrıca bu alan büyük gerilmeler sırasında bu tür kayalarda oluşan makro ve mikro çatlaklar nedeniyle meydana gelen ikincil dokunun bir göstergesi de olmaktadır. Mühendislik jeofiziği değerlendirmelerinde genel olarak manyetik alan eşdeğer grafiklerindeki anomalilere ve farklı zaman ve çeşitli yüksekliklerde ölçülmüş verilere göre hazırlanan güller (roses) önem kazanmaktadır.

HEYELANLARIN GELİŞME KOŞULLARININ ARAŞTIRILMALARI

Heyelanların geliştiği alanlardaki koşulların incelenmesi aşağıda sıralanan temel sorunları kapsamaktadır:

- 1) Heyelan alanının dış sınırlarının ve heyelan kütleleri içindeki blokların sınırlarının saptanması (bu blokların jeomorfolojik belirtilerle ayırdedilemediği durumlarda),
- 2) Kayma yüzeyinin derinliğinin belirlenmesi,
- 3) Litolojik bileşim, yapısal dayanım, çatlak yüzeyi ve özellikleri, gerilim durumu gibi özelliklere göre farklı kaya karmaşığının ayrılanması ve böylece heyelan kütlelerinin alt bölümlendirilmesinin yapılması,
- 4) Yeraltısuyu düzeyinin ve geçici askılı su tablası düzeyinin ve durumunun saptanması,
- 5) Filtrasyon akışının şiddet ve yönünün belirlenmesi,

6) Heyelan yamacını oluşturan kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin ve konularının değerlendirilmesi (yoğunluk, çatlaklık, deformasyon, filtrasyon özellikleri, dayanımları, gerilim, yüksek sismisiteli alanlarda ayrıca elastik özelliklerin saptanması),

7) Birçok durumda bunlara ek olarak temel kayanın derinlik ve biçiminin, litolojik-petrolojik bileşiminin, fay zonlarının yerlerinin ve karstlaşma düzeyinin belirlenmesi çok önem taşımaktadır.

Çok kapsamlı bir araştırma programının gereğini açıkça ortaya koyan bir modelde her aşamada yer alan jeofizik uygulamalar da P ve S dalgalarına uygulanan kırılma ilişki yöntemi (Refraction Correlation Method, RCM), düşey elektrik sondaj, elektrik profil ölçüsü (EP) ve yardımcı olarak da duyarlı gravite-manyetik, SP, IP, yer ısı ölçümleri (0.5 - 1 m derinliğe kadar) gibi yöntemler yer almaktadır. Ancak heyelan kütlelerinin karmaşık jeolojik yapısı, bu işlemlerin başarılmaması için bazı koşulların sağlanmasını gerektirmektedir. Bunlar;

- 1) Yeterli yoğunlukta bir gözlem ağının hazırlanması;
 - a) RCM- DES ve DES/IP yöntemleriyle yapılan araştırmalar da her heyelan sahasında en az iki-üç boyuna ve enine profil üzerinde çalışmalı ve bu profiller arasındaki optimal uzaklık boyuna olanlarda 20 - 50 m, enine profillerde 20 - 100 m olmalıdır. Jeofon aralıkları 2 - 5 m, DES noktaları arası ise 10 - 25 m olarak seçilmelidir.
 - b) EP, SP ve ısı ölçümlerinde gözlem noktaları arası 5 - 10 m, profil aralığı ise 10 - 50 m olmalıdır.
 - c) Yüksek duyarlı gravite ölçümlerinde profiller arası 20 - 100 m, gözlem noktaları arası ise 2 - 10 m olmalıdır.
 - d) Yüksek duyarlı manyetik ölçümlerde her kilometre-kare alana 10 - 40 bin ölçü noktası yayılmalıdır.
- 2) Çalışmaların olası en kısa sürede tamamlanması,
- 3) Zaman bağımlı sistemli gözlemler için ön hazırlıkların yapılması,
- 4) Yüzey çalışmalarının desteklenmesi için kuyu içi gözlemlerinin hazırlanması,
- 5) Jeofizik yöntemlerinin birleştirilmesidir.

Heyelan dış sınırlarının ve blok dış sınırlarının jeofizik yöntemlerle saptanması

Sınırları jeomorfolojik olarak belirlenemeyen (özellikle eski heyelanlar) heyelanların dış sınırları ancak uygun jeofizik yöntemlerle saptanabilir. Yamacın dengedeki kesiminden faylanmış kısmına geçiş çizgisi, kütlelerin sismik ve elektriksel özelliklerinde gözlenen süreksizlikler ve özellikle V_p , V_s hızlarında azalma, sismik ve elektriksel anizotropi sabitleri değerinde artmalar ile belirlenebilir.

Dış sınırların havadan ve alışılmış jeofizik yöntemlerle belirlenemediği durumlarda duyarlı gravite çalışmaları yararlı sonuç verebilir. Bu çalışmalarda atmosferik basınç farkının maksimum olduğu günlerde 3 - 5 adet periyodik ölçüm yapılır ve gravite değerinin büyüklüğünde gözlenecek büyük değişimler, araştırılan alandaki jeolojik özellikleri yansıtabilir.

Zaman-bağımlı sistemli ölçüm verilerine dayanılarak üretilen gravite kuvvetinin (σ) sapma (ortalama-kare) grafikleri, heyelanın tüm jeolojik yapısının temel elementleri hakkında çok belirgin bilgiler verir.

Heyelanın topuk kısmındaki çok altere olmuş materyaller σ nin yüksek ortalama değeri ile belirginlerdir. Heyelanın diğer kesimleri ve bloklar üzerinde ortalama σ değerleri daha düşüktür. Bu değer yamacın dengede olan kısmında en düşük değeri alır. Kesin heyelan alanlarında bitişik bloklar σ nin zamana göre değişiminin farklı fazları ile de belirginleşirler.

Kayma yüzeyinin derinliğinin bulunması

Heyelan kütleindeki yer değiştirmenin heterojen kütleler arasındaki ortamda (tali heyelanlarda olduğu gibi) ve özellikle temel kayanın, kayan kütleinin hemen altında bulunduğu durumlarda jeofizik uygulamalarla çok iyi sonuçlar alınmaktadır. Ancak kayma yüzeyinin eğrisel lineer (curvilinear) olduğu, homojen dizilmemiş kayaçların bulunduğu veya kayma yüzeyinin farklı litolojik bileşimdeki birimleri keştiği durumlarda kesin sonuca gidilmesi çok güçleşmektedir.

Tali kaymalardaki kayma yüzeyleri, gravite, elektrik ve ya sismik yöntemlerle tek tek belirlenebilir.

Kayma yüzeyinin tabakalanmamış homojen kayaç olduğu durumda derinlik ve geometri elektrik ve sismik uygulamalarla saptanmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi kayma yüzeyinin farklı litolojideki birimlerle kesildiği zor koşullar da sismik, jeofizik kuyu yöntemleri veya ikisi birarada uygulanmaktadır. Bunların en etkinini ultrasonik logdur (UL). Deneyimlere göre UL ile kayma yüzeylerine ilişkin hız sınırları en güvenilir şekilde saptanmaktadır. Yüzeylerin yapısı ise bu hız kriterine göre belirlenebilir (Goryainov ve Matveev 1988).

Heyelan kütleinin farklı kayaç karmaşıklarına göre bölümlendirilmesi

Kesit ve haritalar şeklinde bölümlendirmeler çok duyarlı manyetik, gravite ve çeşitli türde elektrik profil teknikleri ile yapılabilir. Manyetik gözlemler bir ağ düzeninde + 0.5 – 3 nT duyarlılıkla yürütülür. Bu uygulamalarla yeterli bilginin sağlanamadığı durumlarda tek tek seçilen profiller boyunca çok hassas gravite ölçümleri yapılır. Gözlem aralığı 5 - 20 m arasındadır. Sonuçlar ΔT , Δg haritaları ve grafikler şeklinde hazırlanır. Bu sorunun çözümü için sismik veriler de kullanılabilir. Sismik çalışmalar sabit patlatma noktası - jeofon aralığı ile yapılan profil ölçüleri ya da çeşitli düzenlemelerle boyuna-enine profiller ile yapılır. Heyelan alanının kesit olarak bölümlendirilmesi için genel olarak DES, DES/IP ve RCM sismik uygulamaları yapılır.

Yeraltısu ve Askılı Su Tablası Konumunun Saptanması

Bu sorun sismik araştırmalar ile çözümlenir. Bilindiği gibi doygun ve doygun olmayan formasyon veya katmanlar arasında V_p hızında da önemli farklılaşmalar olmaktadır. Tam doygunluk sınırında $V_p = 1450 - 2700$ m/s hız değeri bir ayırdedici özellik olarak alınmaktadır. Askılı su tablası daha hızlı bir sönüm gerçekleştirir ve $V_p = 1450 - 1700$ m/s değeri ile belirginleşir. Uygulama karşılıklı atışlı boyuna profiller ve enine profiller ile yapılır.

Filtrasyon Akımının Yön ve Şiddetinin Belirlenmesi

Heyelanlar genel olarak içinde filtrasyon akımının gerçekleştiği büyük bir drenaj oluştururlar. Bu tür bir akımın yapısı ve gelişmesi, doğal gerilim (SP) araştırmaları ile gözlemlenir. Ölçümler gerilim yöntemi ile ve günlük ısı değişimleri gözönünde bulundurularak yapılır. Güvenilirliği artırmak için aynı zamanda elektrik profil ve yer ısı ölçümleri de yapılabilir. Sonuçların güvenilirliği SP ölçümlerinin 0.5 – 1 m derinlikte yapıldığında artmaktadır. SP anomali ve dağılımları kayaç litolojisi ile önemli ölçüde etkilenmektedir. Yüksek oranda kil içeren kayaçlar pozitif anomali verirler. Benzeri anomaliler ise içe doğru su akıntılarının olduğu kesimler üzerinde de görülmektedir.

Homojen kayaçların yaygın olduğu yerlerde SP eş gerilim haritaları filtrasyon akımının şekli, yönü ve şiddeti hakkında yararlı bilgiler verir. Yeraltısu derinliğinin 10 metreye kadar olduğu durumlarda ise filtrasyon akımının hızı, yüklenmiş kütle yöntemi (charged body method, CBM) ile saptanabilir.

Temelkaya Derinliği, Bileşimi ve Yapısının Saptanması

Temelkaya derinliği standard sismik ve DES teknikleriyle belirlenebilir. Temelkayanın bileşim ve yapısı için ilk aşama da manyetik yöntemler uygulanır. Çeşitli bileşimdeki kayaçlar manyetik alan şiddeti ve karakterine göre haritalanır. Fay ve karstik zonlar genellikle uzamış (elongated) anomaliler ile ayırt edilir. Bunlar pozitif, negatif veya değişken değer verebilirler. Ancak karstik zonların salt manyetik verilere göre belirlenmesi çok zordur. Çünkü bu tür zonlar ya alan şiddetindeki çok küçük değişmeler (~10 nT ye kadar) ya da oldukça yüksek artışlar (20 - 30 nT ye kadar) ile karakterize olurlar. Ayrıca böyle zonlar üzerinde alınan anomalilerin şiddeti, boşlukların dolgu yüzeyi ve dolgu materyalinin manyetik özellikleri ile de doğrudan ilişkilidir. Manyetik verileri desteklemek için profiller boyunca 5 - 20 m aralıklı seçilen noktalar da gravite ölçümleri de yapılmalıdır. Temelkayanın tek blok olduğu durumlarda bu veriler yeterli bilgileri verebilir.

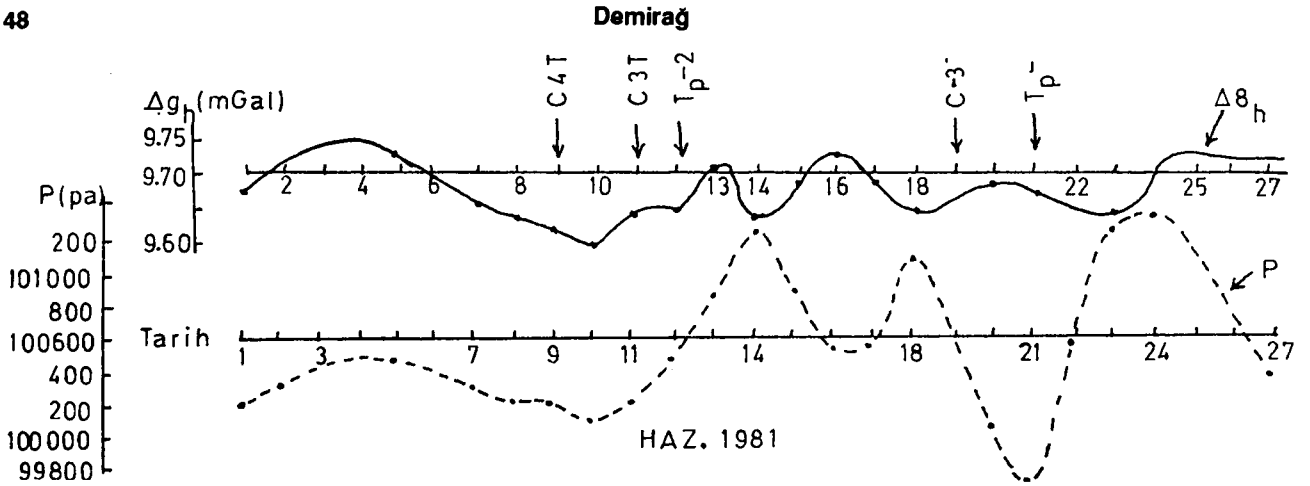
Elektrik profil ölçüsü ve DES çalışmalarıyla temelkaya bütün olarak incelenebilir. Ancak fayın karakter ve lokasyonunun, karstik zonların, temelkaya ayrışma zorunun kalınlığının ve yatay ve dişey yönde çatlaklık düzeyinin nicel kestirimlerle saptanmasında en etkin yöntem yine de sismiktir.

Tektonik fay zonlarının etkinliği ise sistemli gravimetrik gözlemlerle belirlenebilir. Kaya kütleisi içinde blokların makro deplasmana uğradığı ve büyük gerilmelerin oluştuğu diri tektonik fay zonları, yüzeydeki ortalama değeri düzeyine göre oluşan yerel anomaliler ile tanımlanabilir.

HEYELAN REJİMLERİNİN JEOFİZİK ARAŞTIRMALARI

Zaman-bağımlı, sistemli jeofizik araştırmalarda gözlem ağı; araştırma alanına ait verilere, yörede gelişmiş farklı dışsal (exogenic) oluşumlar ve ölçümlerde yanlığlara neden olacak etmenlere (yüksek gerilim hattı, yapay titreşimler vb.) dayanılarak hazırlanır. Gözlem noktaları jeodezik olarak yerleştirilir. Düzenli periyotlarda ölçümlerin yapılabilceği şekilde bu noktalar sabitleştirilir. Heyelan rejimlerinin araştırılmasında gravite yöntemi uygulamaları; çekim kuvvetinin zamanla değişiminin (magnitüd, faz, periyot vb.) heyelan gelişme ritmi ve kayaçların konum ve özelliklerinin zamana bağlı değişimlerini yansıttığı gerçeğine dayandırılmaktadır. Örneğin gravite ölçümünün yapıldığı yerdeki kütlelerin gerilme deformasyonundan (tensile strain) etkilendiği düşünülürse, o zaman kayaç yoğunluğu da azalacaktır. Çünkü dişey yönde mikro hareketler gelişecektir. Bunun karşıtı durumda yani sıkışma deformasyonunda (compressive strain) gravite kuvveti azalacaktır. Böylece devamlı gözlemlerle kütleinin ne zaman hangi tip deformasyona uğradığı saptanabilecektir.

Heyelan deplasmanının maksimum huza eriştiği periyotların, gravite kuvvetinin göreceli olarak azaldığı periyotlara rastladđı kanıtlanmıştır. Gravite kuvvetinin maksimuma çıktığı periyotlar ise genellikle olaydan birkaç gün öncesine rastlar. Bu nedenle manyetik ve gravite gözlemleri, heyelanların önceden kestirilmeleri için çok önem taşır (Şekil 1).



Şekil 1. Heyelanın bir noktasında gravite (Δg_N) ve çevredeki atmosferik basıncın (P) zamana göre değişim grafikleri. Oklar, en büyük heyelan deplasman oranlarının $T_p - 2$ çatlak ölçer ve S4, S3 yer göstergeleri okumalarına göre belirlendiği noktaları göstermektedir.

Fig. 1. Graphs of the time variation of gravity (Δg_N) at a point in a landslide and of atmospheric pressure (P) in the vicinity of the landslide. The arrows indicate the time of maximum landslide displacement rates measured by a $T_p - 2$ crack meter and S-4 ve S-3 placement indicators.

Son yıllarda deneysel olarak ulaşılan sonuçlar, bir heyelan gelişme ritminin, düzgün bir hareket dizisi şeklinde olmadığı ve sönüm süresinin aylarca ve hatta yıllarca sürebileceğini göstermiştir. Böyle ritimler daha ziyade heyelan alanının ömrünün çeşitli evrelerinde gelişen durum ve özellik değişimlerini yansıtan çok sayıda periyotlardan oluşmaktadır. Örneğin bir heyelan alanında tek bir noktada yapılan gravite ölçümü, çekim kuvvetinin 5 dakika gibi çok kısa periyotlarda dahi değişebileceğini göstermiştir. Bu değişimler düşey yönlü mikro hareketlerle ilişkilidir. Ayrıca tek nokta da günlük olarak yapılan ölçümlerde gravite kuvveti magnitudünde görülen iniş çıkışlar, atmosferik basınçtaki değişimlerle nitel olarak ilişkilendirilmiştir (Şekil 1).

Profiller üzerinde yapılan rejim-tipi manyetik gözlemlerle heyelan formasyonlarının deplasmanlarının yönü ve oranı hakkında önemli bilgiler sağlanır. Heyelan alanını uzunlamasına kesen ve "manyetik strip" olarak bilinen bölgeler üzerinde yapılan rejim-tipi mikromanyetik ölçümlerle ise her gözlem devri için hazırlanan elemanter manyetik alandan izodayn gülleri ile kayaçların mikro-makro kırıklılığının doğrultuları saptanır. Bunlar gerilim düzeyindeki değişimlere çok duyarlıdır. Heyelan işlevinden etkilenmemiş kayaçlar için hazırlanan izodayn gülleri, pratik olarak zamana göre sabit kalmışlardır.

Heyelan rejimlerinin elektrik yöntemlerle araştırılması, elektrik alan parametrelerinin kayaçların durum (state) ve özelliklerine doğrudan bağlı olduğu üzerine dayandırılmıştır. Bilindiği gibi özdirenç birçok etmene bağlıdır. Genel olarak;

$$\rho = P_c \cdot P_s \cdot P_p \cdot P_w \cdot P_{sat}$$

şeklinde yazılır. Bu bağıntıda; P_c iletkenlik parametresi, P_s yüzey iletkenlik parametresi, P_w formasyon suyunun elektrik özdirenci, P_{sat} doygunluk parametresi ve P_p porozite parametresidir.

Heyelan kütlelerinin durumuna (katı, doygun vb.) ilişkin bilgi özellikle P_p parametresi ile sağlanır. Formasyon durumundaki değişimler, Diğer tüm parametrelerin zamana göre sabit kaldığı (P_c, P_s, P_w, P_{sat}) durumda özdirenç (ρ) değeri ile incelenebilir. P_c ve P_s nin gerçekten zamana göre sabit kaldığı koşullarda formasyon suyu içindeki mineral konsantrasyonu ve formasyonun nem içeriği önemli ölçüde değişebilir. İşte bu nedenle heyelan kütlelerinin durumunun, özdirenç kullanılarak

gözlenmesinde hidrolojik koşulların zamana göre değişmediği ($P_w = \text{sabit}, P_{sat} = \text{sabit}$) varsayılır. Temel hidrojeolojik koşulların sabit olması gerekliliği ise heyelan sürecinin göreceli olarak hızlı olduğu durumlarda (örneğin maden ve taş ocaklarında yamaç kaymaları 10 - 20 gün sürebilir) karşılanabilmektedir.

Heyelan gelişimine bağlı olarak kayaçların yapısında gelişecek değişimler, özdirenç anizotropi parametrelerine dayanılarak gözlemlenebilir. Bu yaklaşım şu şekilde özetlenebilir:

- Gelişimin yönsel karakteri; (kırık tipinin lineer yapısal formundaki gelişmeleri hızlandırır)
- Anizotropi parametrelerinin yalnızca ortamın yapısına bağlılığı
Bilindiği gibi anizotropi sabiti;

$$\lambda_p = \sqrt{p_y/p_x}$$

$$P_y = P_c \cdot P_s \cdot P_{py} \cdot P_{sat} \cdot P_w$$

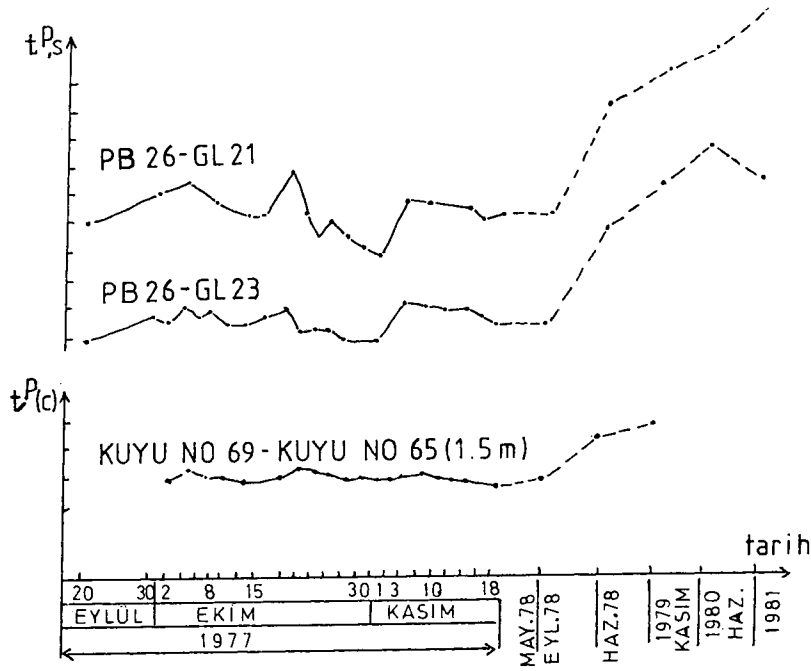
$$P_x = P_c \cdot P_s \cdot P_{px} \cdot P_{sat} \cdot P_w$$

P_y, P_x anizotropi elipsinin büyük ve küçük eksenleri boyunca özdirenç değeridir ve buradan

$$\lambda_p = \sqrt{P_{py} / P_{px}}$$

şeklinde hesaplanır. Burada anizotropi değerinin hidrojeolojik koşullara bağlı olmadığı ve sadece ortamın yapısı ile belirlenebileceği görülmektedir.

Aynı sonuç IP anizotropi sabiti için (λ_η) geçerlidir. λ_p ve λ_η anizotropi sabitlerinin hidrojeolojik koşullardan bağımsız oluşu gerçeği, bu değerlerin kullanılarak bir heyelanın deplasman öncesi hazırlık aşamasındaki durumunun gözlenebileceğini göstermektedir. λ_p ve λ_η birkaç yolla ölçülebilir. ancak en güvenilir yöntem "quadripole" kullanılarak iki azimut veya dairesel ölçümlerin yapılması ya da iki-bileşen yöntemidir (TCM). Ölçümde gereken duyarlılığın sağlanabilmesi için sabit ölçümlü TCM dizilimi kullanılarak dairesel ölçümlerin yapılması önerilmektedir. Ayrıca TCM ile profillemeye yapılabilir. Profil aralıkları heyelan kütlelerinin kalınlığına göre seçilir. Ölçüm periyotları ise heyelan prosesinin sürecine göre düzenlenir. Bu tür



Şekil 2. Zhukovka (Crimea) heyelanındaki sabit sismik gözlem sonuçları (T_p - P dalgası yayılım süresidir).
Fig. 2. Results of stationary seismic observations at the "Zhukovka" landslide area.

ölçümlerin sonuçları, λ_p , λ_n zaman serileri olarak veya ortalama değerden veya alana ait temel değerden sapmalar şeklinde gösterilebilir.

Özdirenç anizotropi parametrelerinin zaman - bağımlı, sistemli ölçümleri, bir heyelanın gelişiminin çeşitli evrelerinin tanınmasında ve sürelerinin saptanmasında kullanılabilir.

Heyelan rejimlerinin araştırılmalarında sismik yöntemlerin kullanılmasının fizik temeli ise süreç sırasında elastik titreşim alan parametrelerinde gelişecek değişimlerin bilinen kurallarıdır. Bunlar heyelan kütesinin gerilme durumunda ve dayanım (strength) özelliklerindeki değişimlerle ilgilidir. Zaten bu parametrelerin birbirleriyle ilişkileri de sonuçta kaya duraylılığını belirlemektedir. Genel olarak söylemek gerekirse heyelan, gözlenen sismik hızlarda bir değişim ölçüldüğü anda başlamış varsayılır. Sismik özelliklerde oluşan bu değişimler, çok büyük olasılıkla, deplasman yönünde (kayma eksenini boyunca) saptanmaktadır. Hareketin başlamasından önceki evrede, yamacın geçici olarak dengedeki kesiminde veya plato kenarlarında ölçülen hızlar sonrakilere oranla yüksektir.

Heyelan sürecinin dinamiğinin kavranabilmesi için yapılan zaman-bağımlı, sistemli (regime-type) sismik gözlemler, yamacın dengedeki kısmını da kapsayan 1-2 eksenel profil boyunca yapılır. Eğer gerekirse en aktif zon üzerinde seçilecek 1-2 adet enine profil boyunca da ölçümler sürdürülür. Ayrıca heyelan kütesinin en ilgi çekici kesimlerinde tek tek dairesel sismik sondaj (circular seismic sounding, CSS) yöntemi kullanılarak çalışmalar yapılabilir. Yüzeyden yapılan gözlemler genellikle kuyu için sismik sondaj (IBSS) ve düşey sismik profil (VSP) teknikleri ile yapılacak ölçümlerle birlikte sürdürülür. IBSS kuyuları yamacın henüz kaymaya başlamamış bölümünde bir eksenel profil boyunca delinirler. Böylece gözlem ağı o alanda deplasman başlayana kadar sabit kalmış olur. Dolayısıyla sismik özelliklerdeki değişimler heyelanın başlangıcının belirteci olurlar. IBSS kuyuları genel olarak 5-15 m aralıklı

olarak 3-6 adet delinirler. Sismik alıcılar kuyu içine çeşitli derinliklerde ve en az 3 - 4 kademeyle yerleştirilir.

Heyelan sürecindeki gelişimin özelliği düzlemsel ve bir kesit boyunca genellikle VSP yönteminin dairesel tekniği ile (CVSP) incelenir. CVSP, IBSS gözlemi için kullanılan tüm kuyularda yapılır. Ayrıca kütenin en hareketli zonlarında (bozulmuş zonlar) CVSP ölçümü yapılması da önerilmektedir. Sismik alıcılar, kuyu yerine göre en az birisi kayma ekseninde olmak üzere çeşitli açılarda yerleştirilir. Profil boyu 30 - 50 m, alıcıların aralığı ise 5 - 10 m olarak seçilmelidir.

Sismik yöntem uygulamalarına ilişkin bir örnek Şekil 2 de verilmiştir. Şekilde, platonun geçici olarak dengede olan kısmında küçük deplasmanların görülmeye başladığı yerde, boyuna dalga yayılım sürelerinden (t_p) önemli artışlar olduğu görülmektedir. Bu gözlem, platodaki kütlelerin dengesindeki azalma ile de uyum göstermiştir. Nitekim bu yönelim plato kaymalarının kaymasından 2.5 - 3 yıl öncesini göstermektedir.

SONUÇ

Heyelanların jeofizik mühendisliği uygulamaları ile küçük ayrıntılara kadar incelenebileceği, ancak bunun hiç de kolay olmadığı ve özellikle ölçü aygıtı olanaklarının yanısıra pilot çalışmalara, deneyim ve bilgiye, sağlıklı bir örgütlenmeye gereksinim duyulduğunu vurgulamaya çalıştık. Türkiye'de yukarıda sıralanan tüm modelin uygulandığını söyleyebilmeyi çok isterdik. Ancak yetersiz de olsa yapılan çalışmaların örneklerinin çoğalması sevindiricidir. Kamu kurumlarının ve özel mühendislik firmalarının işbirliği içinde çalışmalarını bu modelin daha da geliştirilerek ülkemizde de tüm özellikleriyle uygulamaya aktarılacağını umuyoruz.

KAYNAKLAR

Goryainov N.N. and Matveev V.S., 1988, Landslides and Mudflows, UNEP/UNESCO, Moscow 1988.