



## Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler

### *Uncertainties on the parameters employed in preparation of landslide susceptibility maps*

**Candan GÖKÇEOĞLU, Murat ERCANOĞLU**

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe Ankara

#### ÖZ

Son yirmi yılda, coğrafi bilgi sistemlerindeki ve sayısal haritaların hazırlanmasına ilişkin yöntemlerdeki gelişmelere ve bunların heyelan zararlarının azaltılması çalışmaları ile mühendislik çalışmalarındaki kullanımının artışına bağlı olarak, geniş ölçekli heyelan tehlike ve/veya duyarlılık haritalarına olan ilgi sürekli artmış ve uluslararası dergiler ve sempozyum bildiri kitaplarında da bu konuda çok sayıda çalışma yayımlanmıştır. Bununla birlikte, gerek bu haritaların hazırlanması sırasında kullanılan yöntemler, gerekse haritalarda kullanılan parametreler konusunda, araştırmacılar arasında henüz bir görüş birliği oluşmamıştır. Kavramsal ve işlemsel sınırlamaların, bu tür haritaların hazırlanması sırasında ortaya çıkan belirsizliklerin temel nedeni olduğu düşünülmektedir. Çoklu değişken analiz yaklaşımının kullanımı ile bu sınırlamaların bir ölçüde aşılması olasıdır. Ancak bu yaklaşım, ayrıntılı bir heyelan envanteri çalışmasını gerektirir. Bu nedenle, araştırmacılar genel olarak kişisel değerlendirmelerine bağlı olarak ürettikleri indeks haritalarının karşılaştırılması yaklaşımını tercih etmişlerdir. Ancak her araştırmacı çalıştığı sahaya ilişkin parametreleri dikkate aldığı için, çok sayıda parametre ve yöntemin kullanılması söz konusu olmaktadır. Özellikle eğim, litoloji, arazi kullanım potansiyeli ve bitki örtüsü parametrelerine ilişkin bir görüş birliği sağlanmış gibi gözükmesine karşın, yamaç yönelimi, yamaç şekli, topoğrafik yükseklik vb. gibi bir çok faktör üzerinde ise görüş birliği yoktur. Bu yazıda, bölgesel ölçekteki heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması sırasında kullanılan parametrelerden kaynaklanan belirsizlikler eleştirel bir bakış açısıyla tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Belirsizlik, hazırlayıcı faktörler, heyelan, heyelan envanteri, heyelan duyarlılık haritası, indeks harita, tetikleyici faktörler.

#### ABSTRACT

*In the last two decades, depending on the developments of geographical information systems and the methods employed in numerical cartography, landslide hazard mitigation efforts and the increase in their application to engineering projects, the interest to large-scaled landslide hazard and/or susceptibility maps has increased. As a consequence of these developments, many studies have been published in international journals and proceedings of symposiums. However, there is no agreement among the investigators both on the methods used in preparation of landslide susceptibility maps and the parameters employed. The conceptual and operational restrictions are considered to be the main uncertainties in the preparation of these maps. It seems possible to overcome these restrictions by employing multivariation analysis. But, a detailed landslide inventory is required for the application of this approach. For this reason, the investigators preferred to overlay the index maps based on their own assessments. But, this application resulted in the use of many parameters and methods. Although a consensus on some parameters, such as slope, lithology, land-use potential and vegetation cover has been established among the applicants, there is no agreement on many other factors, particularly slope orientation, shape of slope, elevation etc. In this paper, the uncertainties risen from the parameters employed in the preparation of landslide susceptibility maps of large areas are critically reviewed.*

**Key Words:** Conditioning factors, index map, landslide, landslide inventory, landslide susceptibility map, triggering factors, uncertainty.

## GİRİŞ

Genel olarak, bir yamaçtaki kaya, toprak zeminin veya molozların yamaç aşağı doğru hareket etmesi olarak tanımlanan heyelanlar (Cruden, 1991) nedeniyle, 1971-74 yılları arasında, dünyada her yıl yaklaşık 600 kişinin yaşamını yitirdiği bilinmektedir (Schuster ve Fleming, 1986). Bunun yanısıra, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Avusturya, Fransa, İtalya, İsviçre ve Hindistan'da heyelanlardan kaynaklanan yıllık ekonomik kayıpların 1 ile 5 milyar dolar arasında olduğu tahmin edilmektedir (Aleotti ve Chowdhury, 1999). Heyelanlar, can kayıplarının ve ekonomik zararlarının yanısıra, kentleşmeye zarar vermekte, tarım ve orman alanları ile akarsuların kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır (Schuster ve Fleming, 1986). Ancak, çoğu zaman heyelan zararları, heyelanı tetikleyen en önemli faktörlerden olan deprem ve aşırı yağış süreçleri içerisinde değerlendirilmekte ve bunun sonucu olarak da, heyelan zararlarının boyutları gerçeğinden daha düşük tahmin edilmektedir (Schuster, 1996). Örneğin, 1994 yılında Kuzeybatı İtalyadaki Piedmon bölgesinde yaşanan aşırı yağışlar ile buna bağlı gelişen heyelanlarda 44 kişi yaşamını yitirmiş, 2000 kişi evsiz kalmış ve 10 milyon doların üzerinde maddi kayıp oluşmuştur (Luino, 1999). Bu kayıpların meydana gelmesindeki temel nedenin kuşkusuz aşırı ve şiddetli yağışlar olmasına karşın, heyelanların da kayıplar üzerinde önemli ölçüde etkisi olmuştur. Gerçekte her iki olaydan kaynaklanan zararların ayırt edilmesi hemen hemen olanaksızdır. Bu nedenle konuyla ilgilenen araştırmacılar, ekonomik zararlarla can kaybına neden olan ve birbirine bağlı olarak gelişen doğa olaylarında genelde kabul ettikleri en önemli olayı, temel neden olarak dikkate almaktadırlar. Heyelanları depremler ile aşırı ve şiddetli yağışlar tetiklediğinden, çoğunlukla heyelanlar neden oldukları kayıplar açısından ikincil özelliğe sahiptir.

Heyelanlarda zamana bağlı bir artış sözkonusudur (Aleotti ve Chowdhury, 1999). Bu artışın temel nedenleri, Schuster (1996) tarafından, heyelana duyarlı bölgelerdeki kentsel ve endüstriyel gelişmeler, heyelana duyarlı bölgelerdeki ormanların tahrip edilmesi ve iklim değişikliklerinden kaynaklanan bölgesel yağışlardaki artışlar şeklinde açıklanmaktadır. Bu artışa ilişkin diğer bir nedenin de, bilimsel gelişmeye bağlı olarak, heyelan kayıplarının düzenli şekilde tutulması ve

bölgesel düzeydeki çalışmaların artması olduğudur. Doğal afet zararlarının azaltılması, doğal çevrenin korunması ve toplumun yaşam kalitesinin artırılması amacıyla yapılan çalışmalar arasında, heyelanlarla ilgili araştırmaların sayısı da gün geçtikte artmaktadır. Heyelan zararlarının azaltılması yönünde yapılan çalışmaların en önemli ve başlangıç aşamalarından biri de, çalışılan bölgenin heyelan tehlikesi veya duyarlılık haritasının hazırlanmasıdır. Ancak, bu haritaların hazırlanma yöntemleri ve kullanılan parametreler hakkında dünyada konu ile ilgili araştırmacılar arasında bir görüş birliği henüz oluşmamıştır. Bu yazının temel amacı, özellikle toprak türü zeminlerde gelişen yamaç duraysızlıkları konusunda hazırlanan heyelan duyarlılık haritalarında kullanılan parametrelerin belirlenmesi ve sınıflandırılması sırasında ortaya çıkan belirsizliklerden kaynaklanan sınırlamaların, eleştirel bakış açısıyla tartışılmasıdır. Bu amaçla literatürde bugüne değin yaygın olarak kullanılan ve yukarıda sözü edilen türdeki heyelanlar üzerinde etkili olan parametreler, hazırlayıcı (ortam faktörleri) ve tetikleyici faktörler başlıkları altında derlenmiş, bunların kullanımıyla ilgili sorunlar ve/veya belirsizlikler ortaya konularak tartışılmıştır. Kaya kütlelerinde meydana gelen sürekli denetimli şev duraysızlıklarının mekanizmaları, zemin türü malzemelerde gelişen duraysızlıklardan farklı olup, haritalamada esas alınan faktörlerin de farklı olmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, bu yazıda sadece toprak zeminlerde gelişmesi olası heyelanlara ilişkin hazırlanan duyarlılık haritalarında kullanılan parametreler üzerinde durulmuştur.

## TEMEL TANIMLAR VE BELİRSİZLİKLER

Varnes (1984)'a göre doğal tehlike, belirli bir alanda ve belirli bir zaman içerisinde potansiyel olarak hasar verici etkiye sahip bir olayın oluşabilme olasılığıdır. Bu tanım; büyüklük, coğrafik konum ve zaman gibi faktörleri bir arada içerir. Bölgesel heyelan kestirim modelleri ise, nerede heyelan olabileceğine yönelik bilgileri kapsamaktadır. Bir ölçüde heyelanın büyüklüğünün kestirebilmesi mümkün olsa da, heyelanın oluşum zamanını belirleyebilmek neredeyse olanaksızdır. Ayrıca, ayrıntıları daha sonraki bölümlerde verilen parametrelerle ilgili belirsizliklerden dolayı, üretilen haritalar için "heyelan tehlike haritası" yerine "heyelan duyarlılık haritası" teriminin kullanılmasının daha doğru bir yakla-

şım olacağı düşünülmektedir. Çünkü bu tür haritalar; genelde hangi bölgede, ne zaman ve hangi büyüklükte bir heyelanın olacağını değil, hangi bölge(ler)in heyelana karşı daha duyarlı, hangilerinin ise daha az duyarlı olabileceklerini ve bunların ara sınıflarını göreceli bir biçimde ortaya koymaya yarayan haritalardır. Benzer bir değerlendirme, Brabb (1984; Aleotti ve Chowdhury, 1999'den) tarafından da yapılmıştır. Ayrıca bu tür haritalarda zaman zaman öznel değerlendirmeye dayalı tanımlamalar da kullanılmaktadır. Dolayısıyla, bu haritaların sonuçları gerçekçi olsa bile, yalnızca incelenen bölgeleri göreceli sınıflara ayırmakta, kimi araştırmacılara (Luzi ve Pergalani, 1999) göre bu durum, mühendisler ve planlamacılar için çok fazla bir şey ifade edememektedir. Buna karşın, bu tür haritaların üretilmesinde sonsuz şev modeli (Skempton ve Delory, 1957) veya Newmark yöntemi (Newmark, 1965) gibi bazı yaklaşımların kullanılması mümkündür. Bu yöntemler yamaçları oluşturan malzemelerin jeoteknik parametrelerinin belirlenmesini gerektirmektedir. Bu nedenle, uygulamada tüm bölgeyi bir arada karakterize edebilmek için özellikle jeoteknik parametreler açısından bazı varsayımların, genellemelerin ve basitleştirmelerin yapılması gerekmektedir. Bu durumda da, çoğunlukla en kötü koşullar tercih edilmekte ve elde edilen harita da genelde aşırı tutucu olmaktadır. Ayrıca bu yöntemler, sadece zemin türü malzemelerin içinde gelişmesi olası duraysızlıkların analizi ile sınırlıdır. Dolayısıyla, bunların kaya kütlelerinde gelişmesi olası duraysızlıkların analizlerinde kullanılmaması gibi bir durum da sözkonusudur. Bunların yanı sıra, limit-denge analizi gibi klasik şev analiz yöntemlerinin uygulanması ayrıntılı jeoteknik araştırmaları gerektirmektedir. Çok büyük alanlarda yapılan heyelan duyarlılık haritalaması çalışmalarında limit-denge analizi yöntemlerinin kullanılması, birçok ayrıntının dikkate alınamamasına neden olacaktır. Bu durumu, Casti (1990; Juang vd., 1998'den) tarafından kavramsal olarak sözedilen varsayımlardan ve aşırı değişkenlikten kaynaklanan belirsizlikler ile tanımlamak mümkündür. Gerçekte varsayım ve değişkenlik çok farklı iki kavramdır. Değişkenlik nesnel bir özelliğe sahip olup, bundan kaynaklanan belirsizlikler olasılık teorisinin kullanılmasıyla önemli ölçüde giderilebilmektedir (Juang vd., 1998). Buna karşın, varsayımlar öznel olup, bunlardan kaynaklanan belirsizliklerin en aza indirilebilmesi için mesleki deneyime dayalı yo-

rumlamalara gereksinim vardır. Bu nedenle de, heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında deneyimi esas alan yorumlar sıklıkla kullanılmaktadır. Van Westen vd. (1999)'ne göre, bu tür bir yöntemle üretilmiş haritalarda genellikle hatalı sınıflamalara rastlanılmamaktadır. Ancak, bu haritaların üretilmesinde saha deneyimi çok fazla olan uzman elemanlara gereksinim vardır. Dolayısıyla, bu tür haritaların sınırlı deneyime sahip elemanlarca yapılması, hatalı sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Tüm bunların yanı sıra, heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması sırasında aşağıda sıralanan varsayımlar da araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır (Hutchinson, 1992).

- (a) Heyelanlar, geçmişte olduğu gibi, gelecekte de aynı jeolojik, jeomorfolojik, hidrojeolojik ve iklimsel koşullar altında oluşacaktır.
- (b) Heyelanlara neden olan temel koşullar, yamacı oluşturan malzemenin özellikleri, jeolojik, jeomorfolojik, hidrojeolojik ve meteorolojik koşullar gibi tanımlanabilen, ortama ilgili faktörlerdir.
- (c) Tehlikenin derecesi değerlendirilebilir.
- (d) Her türlü yamaç duraysızlığı modeli tanımlanabilir ve sınıflandırılabilir. Ancak, duraysızlıklara ilişkin ayrıntılı özelliklerin bölgesel çalışmalarda kullanılan ölçekteki haritalara yansıtılması güçtür.

Aleotti ve Chowdhury (1999)'ye göre, bir heyelan duyarlılık değerlendirmesi "hangi alanlarda heyelan oluşacak?", "oluşacak yenilme türleri nelerdir?" ve "heyelanlar hangi koşullar altında tetiklenecek?" sorularına yanıt verebilecek nitelikte olmalıdır. Her ne kadar yukarıda sözü edilen belirsizlikleri içerse de, heyelan duyarlılık haritaları özellikle son on yıl içerisinde, verilerin derlenerek farklı şekillerde değerlendirilip sunulması açısından önemli bir araç olan coğrafi bilgi sistemlerindeki gelişmelere de bağlı olarak, yaygın biçimde üretilmekte ve bölgesel ölçekteki çalışmaların ön aşamalarında dikkate alınmaktadır. Heyelan duyarlılık haritaları uygulamada yaygınlaşmasına karşın, uygulamacılar arasında gerek kullanılan parametreler, gerekse hazırlama yöntemleri üzerinde, henüz bir görüş birliği oluşmamıştır. Bu hususta bir görüş birliğine ulaşılamamasında, çalışılan alanların büyük olması ve farklı alanlarda farklı parametrelerin dikkate alınması, ayrıca bu amaçla kullanılacak mesleki deneyime dayalı yorumlamalar, çok de-

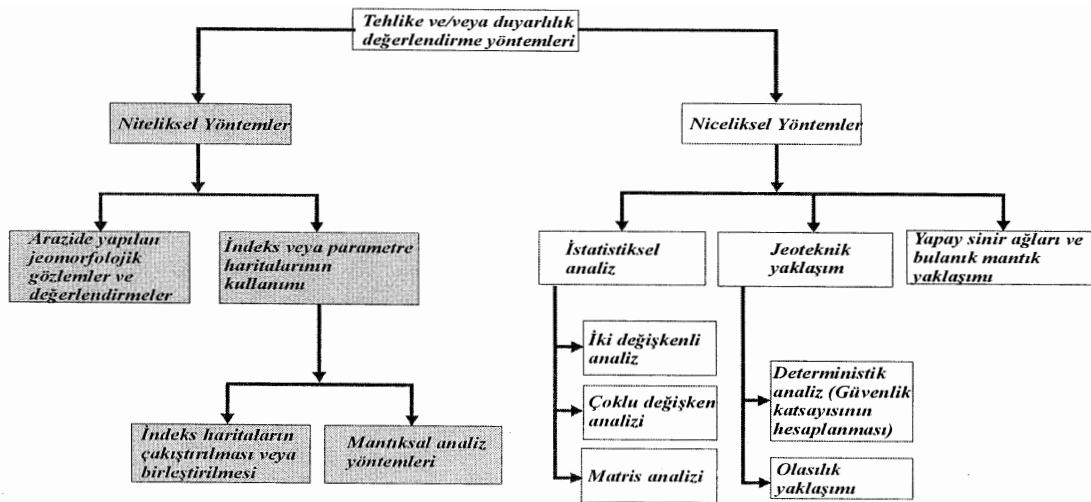
ğişkenli istatistiksel analiz, bulanık mantık, olasılık yaklaşımı vb. gibi çeşitli yöntemlerin varlığı gibi nedenler de etkili olmuştur. Farklı araştırmacılar tarafından kullanılan yöntemlere ilişkin genel bir sınıflama Aleotti ve Chowdhury (1999) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar uygulanan yöntemleri niteliksel ve niceliksel yöntemler olarak iki ana grup altında toplayarak, bunları beş alt gruba ayırmışlardır (Şekil 1).

## HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARINDA KULLANILAN PARAMETRELER

Özellikle 1990 yılından itibaren yaygınlaşan ve coğrafi bilgi sistemlerinden de yararlanan heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan yöntemler ve parametrelere ilişkin genel bir değerlendirme, yayımlanmış ve ulaşılabilen 21 adet çalışmanın istatistiksel yöntemlerle incelenmesiyle elde edilen sonuçlar kullanılarak yapılmıştır. Sözü edilen bu çalışmalardan 13 tanesinde, indeks haritalarında duraysızlığa neden olan faktörlerin heyelana etki oranları olarak tanımlanan (Van Westen vd., 1999) önem derecesi için ya eşit, ya da farklı ağırlıkların dikkate alındığı ve her bir faktörün özelliklerini yansıtan haritaların üstüste çakıştırılması yöntemi kullanılırken, dört tanesinde çoklu regresyon analizi, üç tanesinde bulanık mantık yaklaşımı, bir tanesinde ise matris analizi temel alınmıştır (Şekil 2 ve Çizelge 1). Etki derecelerinin saptanmasında bir ölçüde limit-denge analizlerini temel alan du-

yarlılık yaklaşımları kullanılabilir. Bu yazıda dikkate alınan çalışmaların önemli bir bölümü Hindistan kökenli olup, İtalya, İspanya, Tayvan, Türkiye, Jamaika, İran, Avustralya ve Yugoslavya gibi ülkelerde de bu tür araştırmalar yayımlanmıştır (bkz. Çizelge 1). Bu çalışmalarda toplam 23 adet farklı parametre kullanılmış olup, bunlar arasında Nagarajan vd. (2000) en fazla sayıda parametreyi temel alırken, Uromeihy ve Mahdaviyar (2000) sadece üç parametreyi dikkate almıştır (bkz. Çizelge 1).

Eğim parametresi 21 çalışmanın tamamında, litolojik özellikler 20 tanesinde, ana faylara olan uzaklık 11 tanesinde, topoğrafik yükseklik ile yamaç eğim yönü 10 tanesinde, arazi kullanım potansiyeli, bitki örtüsü ve drenaj özellikleri ise 8 tanesinde dikkate alınmıştır. Yukarıda verilen istatistiksel bilgilere göre, özellikle eğim ve litoloji parametresi üzerinde hemen hemen bir görüş birliği sağlanmış gibi gözükmektedir. Gerçekte bitki örtüsü ve bölgenin hangi kesimlerinin ormanlık, hangilerinin tarım veya yerleşim alanı olduğu vb. gibi bilgileri içeren arazi kullanım potansiyeli parametreleri de, heyelan duyarlılık haritalarında aynı amaca hizmet etmektedir. İki araştırma hariç (Van Westen ve Bonilla, 1990; Anbalagan, 1992a), tüm araştırmacılar ya bitki örtüsünü, ya da arazi kullanım potansiyelini dikkate almışlardır. Bu durumda, bu iki parametre toplam 14 farklı araştırmacı tarafından dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, heyelan duyarlılık harita-



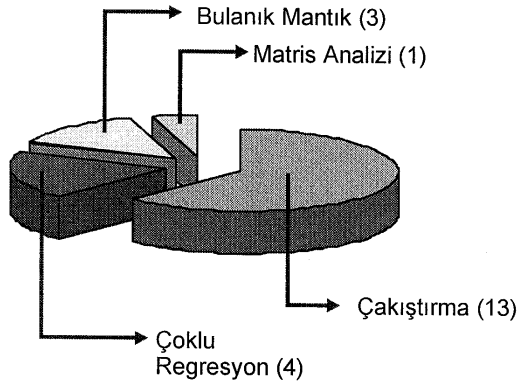
Şekil 1. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan yöntemler (Aleotti ve Chowdhury, 1999' dan değiştirilerek alınmıştır).

Figure 1. Methods employed in preparation of landslide susceptibility maps (modified from Aleotti and Chowdhury, 1999).

Çizelge 1. Değişik araştırmacılar tarafından yapılan heyelan duyarlılık haritası hazırlama çalışmalarında kullanılan yöntemler ve parametreler.  
Table 1. Parameters and methods employed in the landslide susceptibility mapping studies carried out by different investigators.

ARAŞTIRMACI	YÖNTEM	BÖLGE	HAZIRLAYICI FAKTÖRLER *																	TETİKLEYİCİ				
			JEOLJİK																	ÇEVRESEL		FAKTÖRLER		
			J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Ç1		Ç2	Ç3
Choubey ve Litoria (1990)	Çakıştırma	Garhwal Himalaya, Hindistan	✓	✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Van Westen ve Bonilla (1990)	Çakıştırma	Central Cordillera, Kolombiya	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anbalagan (1992b)	Çakıştırma	Kaithgodam, Hindistan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Carraira vd. (1991)	Çoklu regresyon analizi	Tescio Basin, İtalya	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Chang (1992)	Çakıştırma	Tayvan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Choubey vd. (1992)	Çakıştırma	Utarkashi-Tehri, Hindistan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mehrotra vd. (1992)	Çakıştırma	Garhwal Himalaya, Hindistan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Jiang vd. (1992)	Bulanık mantık	Kaohsiung, Tayvan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pachauri ve Pant (1992)	Çakıştırma	Aglar, Hindistan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Guillande vd. (1993)	Çakıştırma	Tahiti	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Jade ve Sarkar (1993)	Çoklu regresyon analizi	Srinagar, Hindistan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Maharaj (1993)	Çoklu regresyon analizi	St. Andrew, Jamaika	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mejia-Navarro ve Wohl (1994)	Çakıştırma	Medellin, Kolombiya	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gökçeoğlu ve Aksoy (1996)	Çakıştırma	Mengen, Türkiye	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Abdolmasov ve Obradovic (1997)	Bulanık mantık	Belgrad KD, Yugoslavya	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Chowdhury ve Flentje (1997)	Çakıştırma	Wollongong, Avustralya	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fernandez vd. (1999)	Matris analizi	Cordoba, İspanya	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Guzzetti vd. (1999)	Çoklu regresyon analizi	Unbria-Marche, İtalya	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Luzi ve Pergalani (1999)	Çakıştırma	Lombardia Bölgesi, İtalya	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nagarajan vd. (2000)	Çakıştırma	Konkan Coast, Hindistan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Uromehy ve Mahdaviifar (2000)	Bulanık mantık	Khorshostan, İran	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

\* J1: Litoloji; J2: Büyük faylara yakınlık; J3: Yapısal elemanların yamaçla ilişkisi; J4: Yeraltı suyu; J5: Zemin kalmılığı; J6: Süreksizlik yoğunluğu; J7: Bozunma zonu derinliği; J8: Zemin yapısı; J9: Zemin makaslama dayanımı; J10: Statik güvenlik katsayısı; T1: Eğim; T2: Drenaj ağı; T3: Göreceli yükseklik; T4: Yüzey süreçleri; T5: Yükseklik; T6: En yakın tepeye olan mesafe; T7: Yamaç şekli; T8: Yamaç eğim yönü; Ç1: Arazi kullanım potansiyeli; Ç2: Bitki örtüsü; Ç3: Yol yoğunluğu; TF1: Yağış; TF2: Sismisite



Şekil 2. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında esas alınan yöntemlerin kullanım sıklıkları (21 adet çalışmaya göre; parantez içindeki değerler kullanım sıklığını göstermektedir).

Figure 2. Utilization frequencies of the methods employed in preparation of landslide susceptibility maps (based on 21 studies; the numbers in the parantheses indicate the utilization frequency).

larının hazırlanmasında hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, ya da coğrafik konum ne olursa olsun; eğim, litoloji, arazi kullanım potansiyeli veya bitki örtüsü, yamaç eğim yönü, ana faylara olan uzaklık, drenaj ve göreceli yükseklik parametrelerinin kullanılması yönünde genel bir eğilim ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmaların en önemli ortak özelliği ise jeolojik, topoğrafik ve çevresel faktörlerden en az birer tanesinin kullanılmış olmasıdır (bkz. Çizelge 1). Yukarıda sıralanan parametreler dışında kalan diğerleri ise, özellikle çalışılan alanların özelliklerine bağlı olduğu düşünülen ve ayrıntıya yönelik parametrelerdir. Kuşkusuz, ayrıntıya yönelik parametreler zaman zaman belli bölgeler için çok büyük önem taşıyabilir ve bu parametrelerin daha az kullanılıyor olmaları, önemsiz oldukları anlamına gelmemelidir.

Bu yazıda; heyelanların meydana gelmesine neden olan faktörler, hazırlayıcı (ortam faktörleri) ve tetikleyici faktörler olarak iki ana grup altında toplanmıştır (Şekil 3). Özellikle hazırlayıcı faktörler bir bölgenin heyelan duyarlılık haritasının hazırlanması sırasında dikkatle değerlendirilmesi gereken faktörlerdir. Çünkü bunlar, bölgenin heyelan duyarlılığı açısından göreceli olarak sınıflandırılmasında esas alınan parametrelerdir. Ayrıca herbir parametrenin sınıf aralığının doğru ve duyarlı bir biçimde tanımlanması gerekmektedir. Bu husus, özellikle tehlike açısından

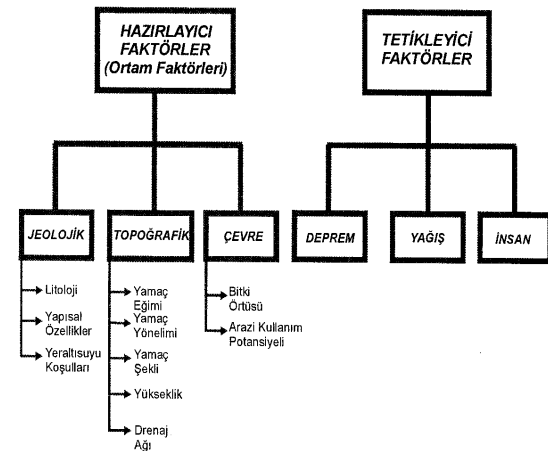
dan ele alındığında, heyelanın büyüklüğü, yeri ve zamanı kavramlarını içermektedir. Bu kavramlar arasında zaman kavramı en belirsiz özellik olup, özellikle heyelan açısından doğrudan tetikleyici faktörlerin yanı sıra, içinde bir heyelanın meydana gelmesinin olası olduğu malzemenin zamanla visko-elastik özelliklerinin değişimi, yeraltısuyu seviyesindeki ve gerilim koşullarındaki zamana bağlı değişimler gibi birçok etkene bağlıdır. Bu nedenle, heyelanın oluşma zamanını belirlemek olanaksızdır.

### Hazırlayıcı Faktörler (Ortam Faktörleri)

Bir bölgede heyelanların gelişmesi ve göreceli duyarlılık zonlaması açısından büyük öneme sahip olan hazırlayıcı faktörler; jeolojik, topoğrafik ve çevresel faktörler olup, bunlar ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir (bkz. Şekil 3).

### Jeolojik faktörler

Heyelanların oluşumundaki hazırlayıcı faktörlerden biri olan jeolojik özellikler, değişik araştırmacılar tarafından (örneğin Anbalagan, 1992a; Maharaj, 1993) farklı biçimlerde yorumlanmıştır. Gerçekte jeolojik yapı ve doğal yamacı oluşturan malzeme veya malzemelerin özellikleri, duraysızlık modellerini doğrudan denetlemektedir. Bu nedenle, bir heyelan duyarlılık haritası tek bir yenilme modeli için hazırlanmalı ve jeolojik özellikler amaca bağlı olarak değerlendirilmelidir. Örneğin, süreksizlik denetimli bir şev duraysızlığı ile bir dairesel yenilmeyi denetleyen faktörler



Şekil 3. Heyelanlara neden olan hazırlayıcı ve tetikleyici faktörler.

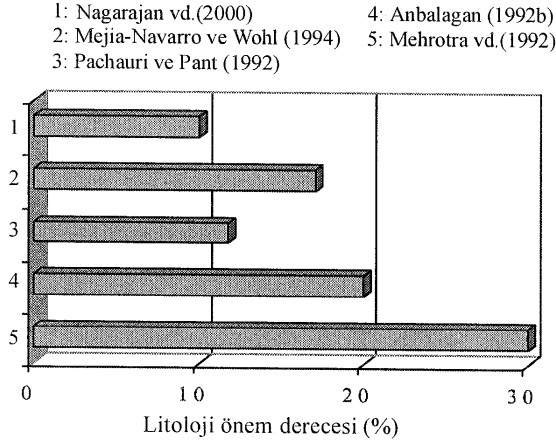
Figure 3. Conditioning and triggering factors causing landslides.

aynı değildir. Dolayısıyla, eğer bir bölgede birden fazla yenilme modeli söz konusu ise, herbir yenilme modeli için haritalar ayrı ayrı hazırlanmalıdır. Ancak, bazı araştırmacılar (Johnson ve Luza, 1981) birden fazla doğal tehlikenin bir arada tek bir harita üzerinde değerlendirildiği bölgesel çalışmalar yapmışlarsa da, bu tür haritalar özellikle kentsel gelişme ve mühendislik tasarımı açısından çok kullanışlı değildir. Çünkü, Aleotti ve Chowdhury (1999) tarafından da belirtildiği gibi, bu şekilde hazırlanacak bir doğal tehlike veya heyelan duyarlılık haritası, özellikle planlamacılar ve mühendisler tarafından haritanın anlaşılmasını güçleştirmesinin yanısıra, modeli daha karmaşık bir hale getirmekte ve belirsizliklerin artmasına neden olabilmektedir. Çünkü, bir yenilme modeli için çok önemli olan bir parametre, diğer bir model için önemsiz olabilmektedir. Örneğin, bir sahada hem zemin türü malzemelerde meydana gelen dairesel ve hem de süresizliklerle denetlenen düzlemsel kaymaların meydana gelebileceği düşünülürse, her iki yenilme modelini de denetleyen parametrelerin aynı olmayacağı açıktır. Dolayısıyla, bu iki model için de ayrı ayrı haritalama çalışmasının yapılması gereklidir.

### *Litoloji*

Litolojik özellikler, sahanın heyelana karşı duyarlılığı hakkında önemli veriler sağlayabilecek özelliktedir. Bu nedenle litolojik özelliklerin mutlaka sağlıklı bir şekilde gruplandırılması çok önemlidir. Bu amaçla, hazırlanan haritalarda bazı araştırmacılar doğrudan saha gözlemlerini temel alan nitel değerlendirmeleri (Higgins ve Rockaway, 1986; Choubey ve Litoria, 1990; Van Westen ve Bonilla, 1990; Pachauri ve Pant, 1992; Maharaj, 1993; Mejia-Navarro ve Wohl, 1994; Nagarajan vd., 2000), bazıları ise istatistiksel değerlendirmeleri ve/veya yamacı oluşturan malzemenin jeomekanik özelliklerini, diğer bir deyişle nicel değerlendirmeleri (Carrara vd., 1991; Chang, 1992; Anbalagan, 1992a; Juang vd., 1992; Gökçeoğlu ve Aksoy, 1996; Fernandez vd., 1999; Guzzetti vd., 1999; Luzi ve Pergalani, 1999; Uromeihy ve Mahdaviyar, 2000) esas almışlardır. Bunlardan nitel değerlendirmeler, çoğu zaman kişiye özgü değerlendirmelere neden olmakta ve haritanın güvenilirliğini tartışılır hale getirebilmektedir. Zayıf ve heyelana duyarlı olarak sınıflandırılan litolojik birimlerde bir duraysızlığın gözlenmemiş olması veya az du-

yarlı/duyarsız olarak sınıflandırılmış litolojik birimlerde ise duraysızlığın varlığı, bu konudaki hatalı sınıflamalara verilebilecek örneklerden (Guzzetti vd., 1999). Buna karşın, nicel veya istatistiksel değerlendirmeleri temel alan sınıflamaların sonuçları, nitel değerlendirmelere oranla göreceli olarak daha az hata içerirler. Çünkü istatistiksel değerlendirme, sahada mevcut heyelanların hangi birimler içerisinde dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Litolojik anlamda oldukça önemli diğer bir değerlendirme de, birimlerin bozunma dereceleriyle ilgilidir. Anbalagan (1992b) çalışmasında, litolojiyi özellikle erozyona uğrayabilme ve bozunmaya karşı duyarlı olabilme açısından dikkate almıştır. Çünkü, araştırmacı saha çalışmaları sırasında özellikle kuvarsit, kireçtaşı ve granitlerin diğer birimlere oranla bozunmaya karşı daha az duyarlı olduğunu ve sahadaki yüksek eğimli yamaçları bu birimlerin oluşturduğunu gözlemlemiştir. Aynı bölgede yer alan bir litolojik birim, farklı bozunma derecelerine ve derinliğine sahip olabilir. Bu nedenle, bozunma özelliklerinin ve derecelerinin hatalı biçimde değerlendirilmesi, hatalı sonuçlara kaynaklık edebilmektedir. Belirsizliğin giderilmesinde kullanılacak yöntemlerden birisi, sahada duraysızlığa uğramış yamaçlarda yenilme yüzeyi derinliklerinin saptanıp, istatistiksel olarak değerlendirilmesidir. Klasik anlamdaki jeoteknik çalışmalarla duraysızlıklar ayrıntılı bir şekilde değerlendirilebilir. Ancak, limit-denge şev analizleri malzemenin jeomekanik parametrelerinin ve hidrojeolojik koşulların ayrıntılı bir biçimde tayinini gerektirdiğinden, bölgesel ölçekte yapılan heyelan duyarlılık haritalaması çalışmalarında, gerçekçi bir jeoteknik uygulamanın yapılması mümkün değildir. Buna karşın, duraysızlıklar çok sayıda ve geniş alanları kaplıyorsa, heyelanlara ait tanımlanabilen yamaç eğimi, yamaç eğim yönü, litolojik özellikler vb. gibi temel bilgilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesiyle sağlıklı sonuçlar elde etmek mümkündür (Brunsden, 1973; Carrara vd., 1982'den). Kokis ve Ziourkas (1991) tarafından Yunanistan'da meydana gelen heyelanların %75'ten fazlasının filiş ve filişe ait geçiş zonu içerisinde geliştiği saptanmıştır. Konuya ilişkin bir diğer tartışma da, özellikle çakıştırma yöntemini temel alan çalışmalarda, litoloji faktörünün hangi ağırlıkta dikkate alınacağıdır. Birçok araştırmacı her bir faktörü eşit önem derecesinde dikkate almalarına karşın, bazı araştırmacılar ise, Şekil 4'te gösterildiği gibi, litoloji için farklı önem derecele-



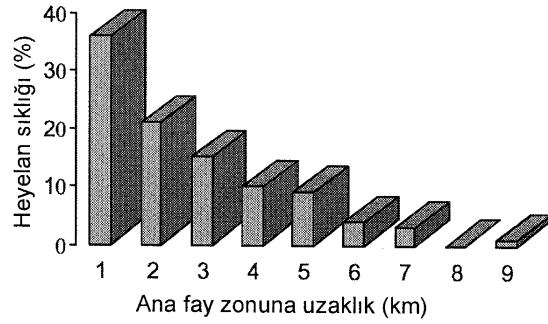
Şekil 4. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında bazı araştırmacılar tarafından litoloji parametresine verilen önem dereceleri.

Figure 4. Importance weights assigned by some investigators for the lithology parameter in preparation of landslide susceptibility maps.

rini esas almışlardır. Bu durum, heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelerin önem derecelerine ilişkin bir görüş birliğine ulaşamadığının açık bir göstergesidir.

#### Yapısal özellikler

Jeolojik faktör olarak kullanılan bir diğer girdi parametresi de, yapısal özelliklerdir. Bazı araştırmacılar haritalama yapılan bölgede yer alan ana fayları genelde yapısal unsur olarak değerlendirip, bu tip yapısal unsurlara yakınlığını dikkate almışlardır (Choubey ve Litoria, 1990; Van Westen ve Bonilla, 1990; Anbalagan, 1992b; Pachauri ve Pant, 1992; Maharaj, 1993; Mejia-Navarro ve Wohl, 1994; Gökçeoğlu ve Aksoy, 1996). Şekil 5'te Hindistan'ın Aglar bölgesinde heyelanların faylara olan uzaklığıyla ilgili istatistiksel bir değerlendirmenin sonuçları verilmiştir. Luzi ve Pergalani (1999) ise, faylara yakın olmanın kayalarda parçalanmaya neden olabileceğini ve yamaçların duraysızlığa karşı daha duyarlı bir hale geleceğini belirterek, duyarlılık için 0, 50, 150, 300, 500 ve 500 m'den büyük uzaklıkları esas alan bir sınıflama önermişlerdir. Bu durum, aktif olmayan fayların da duraysızlığın gelişimine katkıda bulunabileceğine işaret etmektedir. Mehrotra vd. (1992) tarafından yapılan bir çalışmada da, gözlenen heyelanların önemli bir bölümünün aktif fay zonuna 0-5 km uzaklıklar arasında meydana geldiği saptanmıştır. Bu değerlendirmeler, Luzi ve Pergalani (1999) tarafın-



Şekil 5. Aglar Bölgesi'nde (Hindistan) yapılan bir çalışmadan elde edilen heyelan sıklığı-faylara olan uzaklık ilişkisi (Pachauri ve Pant, 1992'den).

Figure 5. Histogram illustrating the relationship between landslide frequency and distance from main faults in Aglar Region (India)(after Pachauri and Pant, 1992).

dan önerilen sınıflamanın özellikle sismisitesi yüksek bölgelerde yapılacak heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında dikkate alınabilecek bir yaklaşım olduğunu desteklemektedir.

#### Yeraltısuyu koşulları

Yamaç duraylılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan yeraltısuyu birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar sırasında karşılaşılan güçlükler nedeniyle ya dikkate alınamamış, ya da yeraltısuyu özelliklerinin tüm alanda homojen olduğu kabul edilmiştir (Carrara vd., 1991; Juang vd., 1992; Pachauri ve Pant, 1992; Maharaj, 1993; Mejia-Navarro ve Wohl, 1994; Gökçeoğlu ve Aksoy, 1996; Guzzetti vd., 1999; Fernandez vd., 1999; Nagarajan vd., 2000; Uromehiy ve Mahdavifar, 2000). Heyelan duyarlılık haritaları hazırlanırken, yeterli düzeyde yeraltısuyu verisinin sağlanması genellikle çalışılan sahaların geniş olması nedeniyle, zaman alıcı ve masraflı sondaj işlemlerini gerektirir. Yazarlarca bu konuda ekonomik bir değerlendirme yapılmamış olmakla birlikte, bu tip çalışmalarda araştırma giderlerinin bazan çok önemli bir boyuta yükseldiğinden ve bu giderlerin değil yeraltısuyu, bu tür çalışmalarda sıklıkla kullanılan hava fotoğraflarının temini için bile çok yüksek olduğundan bahsedilmektedir (Choubey ve Litoria, 1990). Gerçekte bu tür çalışmalarda değişik zamanlarda çekilmiş hava fotoğraflarına gereksinim duyulur ve bu gereksinim araştırma giderlerinin artmasına neden olur. Sözü edilen güçlüklerle karşın, Anbalagan (1992a ve b) özellikle dağlık



bölgelerde düzenli bir yeraltısuyu akış ağının olamayacağını belirtmiştir. Ayrıca, bu tür bölgelerde ayrıntılı bir yeraltısuyu gözleminin yapılabileceğini de belirten aynı araştırmacı, su koşullarının tanımlanabilmesi için gözleme dayanan bir sınıflama önermiştir (Çizelge 2). Bu sınıflama ile çok genel bir yaklaşım yapılabilmesine karşın, heyelan duyarlılık haritalarında yeraltısuyunun herkes tarafından kabul edilebilecek gözlemsel ölçütlere göre değerlendirilmesinin yararlı olabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 2. Yeraltısuyu tanımlaması için Anbalagan (1992a) tarafından önerilen gözlemsel sınıflama.

Table 2. Observational classification proposed by Anbalagan (1992a) for the description of groundwater.

Yeraltısuyu koşulu için yüzey gözlemi	Yeraltısuyu koşulu için göreceli önem derecesi
Akış	1.0
Damlama	0.8
Islak	0.5
Nemli	0.2
Kuru	0.0

### Topoğrafik faktörler

Heyelan duyarlılık haritalarının önemli girdi parametreleri olan eğim, yamaç yönelimi, yamaç yüksekliği, yamaç şekli ve yüzey drenaj ağı gibi topoğrafyaya ilişkin parametrelerin birçoğu, artık bilgisayar ortamına sayısallaştırıcı tabla ve tarama gibi aletlerle aktararak değerlendirilebilmektedir. Sayısal arazi modeli olarak adlandırılan bilgisayar ortamındaki topoğrafik verilerin, algılayıcılar tarafından algılanabilen bir cisme ait tanımlanabilen en küçük ayrıntı olarak bilinen çözünürlük ve bununla ilgili tanımlanabilen en küçük alan olan piksel kavramları, topoğrafyaya ilişkin parametrelerin güvenilirliğini ve kalitesini doğrudan etkilemektedir. Çözünürlük ve buna bağlı piksel boyutları, sayısal arazi modelinin üretildiği haritanın ölçeğiyle doğrudan ilişkilidir.

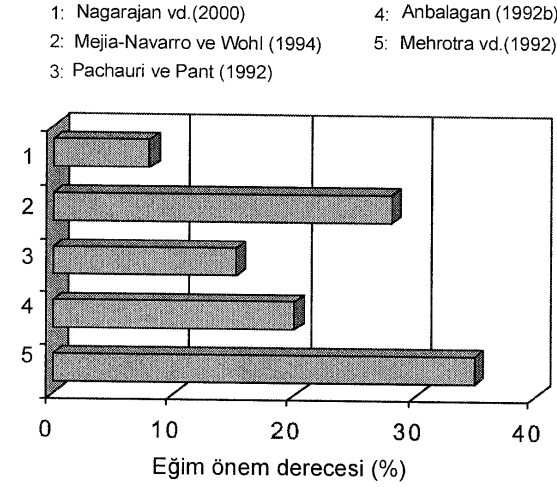
#### Yamaç eğimi

Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması konusunda çalışan tüm araştırmacılar, yamaç eğimini bir girdi parametresi olarak kullanmışlardır (bkz. Çizelge 1). Araştırmacılar arasındaki genel eğilim, eğim arttıkça, heyelana karşı duyarlılığın da artacağı yönündedir. Bu görüş, gözlenen he-

yanların meydana geldiği yamaçların en küçük ve en büyük eğim değeri aralığı için kabul edilebilir bir değerlendirme olmakla birlikte, genelde toprak zeminlerde kaymaların meydana gelmesi için zemin kalınlığının en az 1-2 m gibi belirli değerlere ulaşması gerekmektedir. Dik yamaçlarda zeminlerin belirli kalınlıklara ulaşması, özellikle erozyon nedeniyle genellikle mümkün olmamaktadır. Jakob (2000), British Columbia'da (Kanada) yaptığı bir çalışmada heyelanların 30° - 40° arasında, benzer biçimde Uromeihy ve Mahdaviyar (2000)'in İran'daki çalışmalarında heyelanların tamamının 25°'den daha küçük eğimli yamaçlarda, Koukis ve Ziourkas (1991) Yunanistan için yaptıkları envanter çalışmasında heyelanların %71'inin 30°'den daha az eğimli yamaçlarda geliştiğini saptamışlardır. California'da (A.B.D.) yapılan bir çalışmada da, heyelanların tamamına yakınının 15°-35° arasındaki eğime sahip yamaçlar boyunca meydana geldiği saptanmıştır (Roth, 1983). Garhwal Himalayalardaki (Hindistan) bir bölgede heyelanların tamamına yakını, 10°- 40° arasında değişen eğimlere sahip yamaçlarda gelişmiş olup, bu bölgede çalışan Mehrotra vd. (1992) eğimin duraysızlık üzerindeki en etkili parametre olduğunu öne sürerek, önerdikleri heyelan duyarlılık indeksini hesaplarken en yüksek etki faktörünü (% 35) eğim parametresine vermişlerdir (Şekil 6). Tüm bu örnekler dikkate alındığında, bir bölgede zemin türü malzemelerde meydana gelebilecek kaymalar için yapılacak heyelan duyarlılık haritası çalışmasında, yamaç eğimleri titizlikle değerlendirilmelidir. Yamaç eğimlerindeki artışın duraylılığı doğrudan azaltıcı bir faktör olarak kullanılması, heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında ortaya çıkan hatalı bir yaklaşım olmakla birlikte, literatürde eğim değerlerinin yaygın olarak bu şekilde kullanıldığı görülmüştür (örneğin, Choubey ve Litoria, 1990; Juang vd., 1992; Pachauri ve Pant, 1992; Guillande vd., 1993; Mejia-Navarro ve Wohl, 1994; Nagarajan vd., 2000).

#### Yamacın eğim yönü

Carrara vd. (1991)'ne göre, yamaç eğim yönü ile heyelanlar arasında bir ilişki olmasına rağmen, bu faktör üzerinde görüş birliği sağlanamamıştır. Buna karşın, birçok araştırmacı yaptıkları istatistiksel değerlendirmelerde heyelanların belli yönelimlere sahip yamaçlarda yoğunlaştığını sap-



Şekil 6. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında bazı araştırmacıların yamaç eğimi parametresine verdikleri önem dereceleri.

Figure 6. Importance weights assigned by some investigators for slope inclination parameter in the preparation of landslide susceptibility maps.

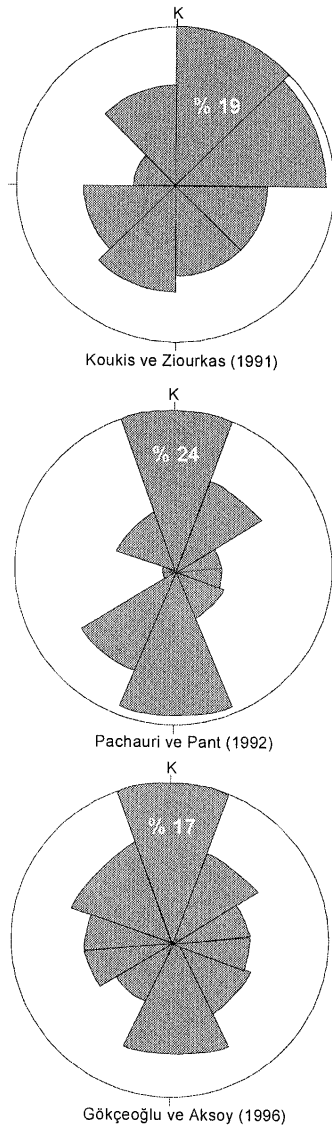
tamışlardır (Van Westen ve Bonilla, 1990; Carrara vd., 1991; Koukis ve Ziourkas, 1991; Anbalagan, 1992b; Juang vd., 1992; Pachauri ve Pant, 1992; Maharaj, 1993; Mejia-Navarro ve Wohl, 1994; Gökçeoğlu ve Aksoy, 1996; Fernandez vd., 1999; Guzzetti vd., 1999; Luzi ve Pergalani, 1999; Jakob, 2000; Nagarajan vd., 2000). Bu araştırmacılar Koukis ve Ziourkas (1991), Pachauri ve Pant (1992) ile Gökçeoğlu ve Aksoy (1996)'un verileri kullanılarak hazırlanan gül diyagramları Şekil 7'de verilmiştir. Koukis ve Ziourkas (1991) ile Gökçeoğlu ve Aksoy (1996) heyelanların belli yönelimlerde yoğunlaşmasının nedenini ağırlıklı olarak yağışla ilişkilendirirken, Pachauri ve Pant (1992) bu durumu sahanın genel morfolojik eğilimi ile ilişkilendirmektedir. Genel olarak, heyelanların belli yönelimlere sahip yamaçlarda yoğunlaşmasının nedenleri, sahanın genel morfolojik eğiliminin yanı sıra, özellikle bölgenin genel yağış yönü ve/veya güneş ışığını daha fazla alması gibi meteorolojik olaylar ile yakından ilgilidir. Yoğun yağış alan yamaçlar, topoğrafik eğim ile zeminin türü, geçirimsizliği, gözenekliliği, nem ve organik madde içeriği, bitki örtüsü ve yağışın meydana geldiği mevsim gibi birçok faktör tarafından kontrol edilen süzülme kapasitesine de bağlı olarak, egemen yönelimin dışındaki yönelimlere sahip yamaçlara oranla doyumluğa daha çabuk ulaşmakta ve zemin içerisinde daha yüksek göze-

nek suyu basınçlarının gelişmesine neden olmaktadır. Bu olayın daha yoğun yağış alan yamaçları heyelana karşı daha duyarlı hale getirebilmesi mümkündür. Yukarıda da söz edildiği gibi, süzülme kapasitesinin çok sayıda faktör tarafından denetlenmesi nedeniyle, bölgesel ölçekteki çalışmalarda yamaçları oluşturan malzemelerin süzülme kapasitelerinin sağlıklı bir biçimde belirlenebilmesini olanaksız hale getirmektedir. Bu nedenle yamaç eğim yönelimi faktörü, hazırlanacak indeks haritada, ya yoğun yağış alan yamaçların daha duyarlı olarak tanımlanması, ya da heyelanların yönelimlerinin istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmesi ile elde edilecek sonuçların yorumlanmasıyla ifade edilebilir. Ancak bunlardan istatistiksel değerlendirme, daha sağlıklı bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Çünkü, saha gözlemlerini esas alan bir değerlendirme, saha koşullarını daha iyi yansıtabilme özelliğine sahiptir.

#### Yamaç şekli

Yamaçlardaki topoğrafik düzensizlikler gerilim dağılımını olumsuz yönde etkilemekte ve duraysızlıkların gelişimine neden olabilmektedir. Özellikle dışbükey yamaçlar, içbükey yamaçlara oranla, heyelana karşı daha duyarlı olduğu yönünde genel bir eğilim mevcuttur (Hoek ve Bray, 1977). Buna karşın, Jakob (2000) yaptığı heyelan envanter çalışmasında, Clayoquot Sound (British Columbia, Kanada) bölgesinde gelişen heyelanların % 44'ünün içbükey, % 54'ünün düz, % 3'ünün ise dışbükey şekilli yamaçlarda geliştiğini istatistiksel olarak ortaya koymuştur. Bu şekilde bir sonuca ulaşmanın gerekçesi, aynı araştırmacı tarafından, özellikle içbükey yamaçlarda drenajın daha zayıf olduğu, dolayısıyla yüzey sularının zemine daha fazla nüfuz ettiğini ve bu nedenle de içbükey yamaçların daha duyarlı hale geldiği şeklinde açıklanmıştır. Ancak Juang vd.(1992)'nin bu husustaki görüşü ise, Jakob (2000)'un bulgularıyla uyumsuzdur.

Buna karşın, bu parametre Van Westen ve Bonilla (1990), Carrara vd. (1991), Juang vd. (1992), Guillaude vd. (1993), Mejia-Navarro ve Wohl (1994), Fernandez vd. (1999) ile Guzzetti vd. (1999) tarafından yapılan çalışmalarda dışbükey yamaçlar, içbükey yamaçlara oranla heyelana karşı daha duyarlı olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla bu parametreye ilişkin değerlendirmeler, belirsizliklere neden olabilmektedir.



Şekil 7. Bazı araştırmacıların verilerinden elde edilen heyelan yönü gül diyagramları.

Figure 7. Rose diagrams showing the landslide dip directions obtained from data of some investigators.

Ayrıca, bu parametrenin istatistiksel anlamda değerlendirmesi de oldukça güçtür. Çünkü heyelan sırasında çoğu zaman yamacın ilksel görünümü bozulmakta ve bu durum veri toplanması sırasında hatalı değerlendirmelere yol açabilmektedir.

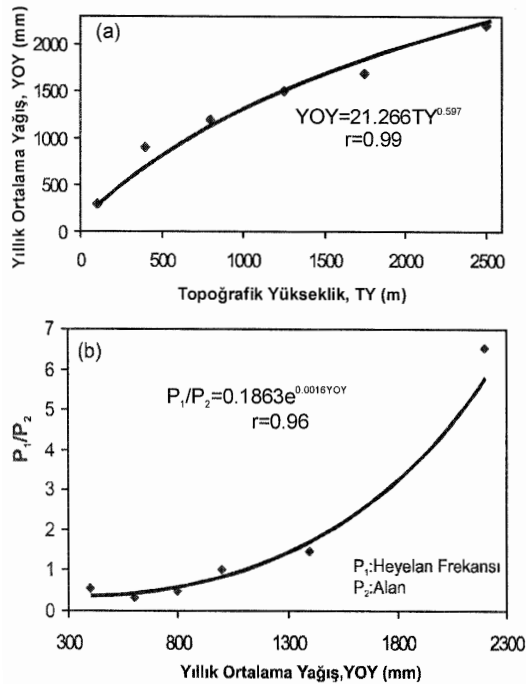
#### Yükseklik

Sayısal arazi modelinin çözünürlüğünden kaynaklanan piksel boyutları önemli bir parametre olduğu için, yamaç yüksekliğinin sayısal arazi

modelinden hesaplanması, neredeyse olanaksız denilebilecek kadar güçtür. Bu nedenle, bu tür çalışmalarda çoğunlukla yükseklikten bağımsız sonsuz şev modeli (Skempton ve Delory, 1957) tercih edilmektedir. Bu yöntemin en önemli sınırlaması, her piksel komşu piksellerden bağımsız olarak değerlendirildiği için, ya bir yamacın tamamı analiz edilememekte, ya da heyelanın meydana gelebileceği yamacın tamamından daha fazla bir kesimi analize tabi tutulabilmektedir. Bu durum, sahanın gerçek koşullarını yansıtamamakta ve yer yer hatalı sonuçlara neden olabilmektedir. Bu sınırlama, görüntü işlemedeki filtreleme yöntemleriyle bir ölçüde aşılabilir de, konu hala belirsizliğini korumaktadır. Bu hususla ilgili diğer bir sınırlama da, kayma türlerine göre farklı analiz yaklaşımlarının bulunmamasıdır. Yükseklikle ilişkili olarak kullanılan diğer bir parametre de, göreceli yüksekliktir. Göreceli olarak daha yüksek kotlardaki bölgeler, daha düşük kotlardaki bölgelere göre heyelana karşı daha duyarlı olarak değerlendirilmektedir. Bununla ilgili tipik bir veri grubu Koukis ve Ziourkas (1991) tarafından sunulmuştur (Şekil 8a ve b). Bu sonucun, özellikle dağlık bölgelerdeki yüksek kesimlerin daha fazla yağış alması ve vadilere oranla daha dik olan kesimlerde sismik ivmenin yatay bileşeninin 1.2 ile 1.5 kat daha fazla etkimesi (Zolotarev, 1976; Nagarajan vd., 2000'den) gibi iki temel gerekçesi mevcuttur. Göreceli yüksekliğin ayrıntılı tanımlanması, yağış ve sismik analizler ile bunların heyelanla ilişkisinin ortaya konulmasını gerektirir. Yağışın yükseklikle değişimi ile yatay ivmenin yüksekliğe bağlı değişimine ilişkin analizlerin sonuçları önemlidir. Ancak, bu konudaki en önemli sorun, bu tür analizlerin yapılmasına olanak sağlayacak ölçüde yağış gözlem istasyonu ve sismografların her bölgede bulunmamasıdır. Dolayısıyla, herhangi bir bölgede meydana gelen heyelanların hangi yüksekliklerde yer aldığı saptanması, sadece ön fikir verebilecek nitelikte bir veri olarak kabul edilebilir.

#### Drenaj ağı

Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında akarsulara yakınlık kaymaya karşı duraylılığı artırıcı bir faktör olarak dikkate alınmaktadır. Akarsuyun duraylılık üzerinde hem yamaç topuğunu erozyona uğratması, hem de yamacı oluşturan malzemenin akarsu seviyesine kadar olan kısmını suya doyurması şeklinde iki olumsuz et-



Şekil 8. (a) Topoğrafik yükseklik-yıllık ortalama yağış ilişkisi ve (b) yıllık ortalama yağış miktarı-göreceli heyelan frekans ilişkisi (Koukis ve Ziourkas, 1991'in verileri kullanarak üretilmiştir) (r: korelasyon katsayısı).

Figure 8. (a) Relationship between altitude and average annual precipitation and (b) relationship between average annual precipitation and relative frequency of landslides (produced by using the data of Koukis and Ziourkas, 1991) (r: coefficient of correlation).

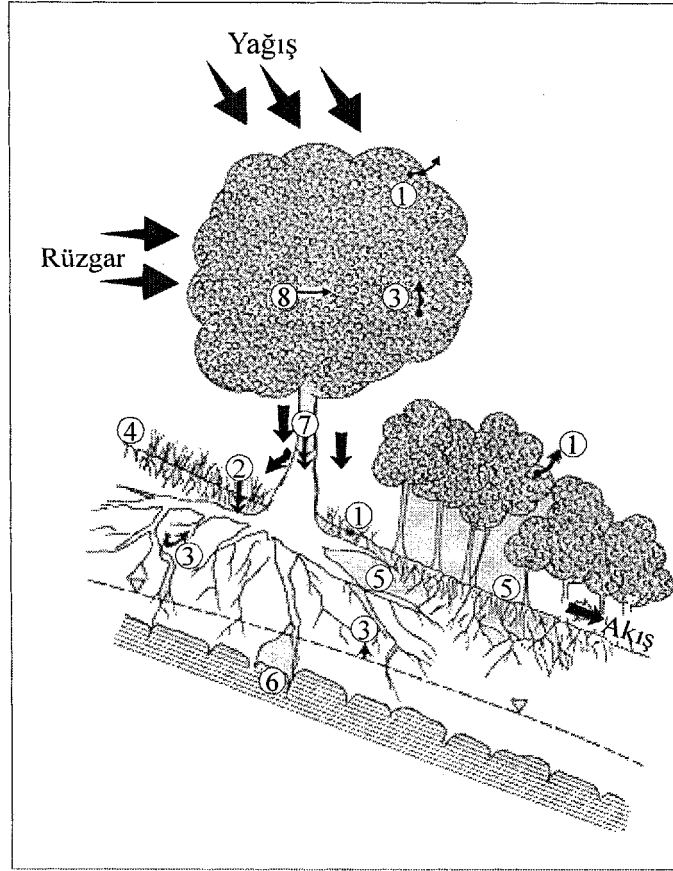
kisi sözkonusudur. Ancak, akarsu yatağından ne kadar uzaklıkta, hangi olumsuz etkinin nasıl geliştiği konusu belirsiz olup, bunun saptanabilmesi için sahadaki koşulların gözlemsel olarak değerlendirilmesi dışında bir yöntem de mevcut değildir. Ayrıca, akarsuların mevsimsel seviye değişimlerinin ayrıntılı incelenmesi ve yeraltısu-yu ile ilişkisinin ortaya konulması gerekir. Sözü edilen bu nedenlerden dolayı, bazı araştırmacılar deneyimlerini ve saha gözlemlerini kullanarak akarsu yataklarına yakınlığı bir duyarlılık parametresi olarak değerlendirmişlerdir (Choubey ve Litoria, 1990; Choubey vd., 1992; Guillande vd., 1993; Mejia-Navarro ve Wohl, 1994; Fernandez vd., 1999; Luzi ve Pergalani, 1999; Nagarajan vd., 2000). Bu yaklaşım, doğrudan saha koşullarını temel aldığı için heyelan duyarlılık haritaları için kabul edilebilir sonuçlar vermekle birlikte, belirli bir deneyimi gerektirmesi gibi önemli bir sorunu da mevcuttur.

### Çevresel faktörler

Heyelanları etkileyen çevresel faktörlerin sayısının fazla olmasına karşın, bu faktörler bitki örtüsü ve arazi kullanım potansiyeli şeklinde iki başlık altında değerlendirilmiştir.

#### Bitki örtüsü

Bitki örtüsünün heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında nasıl kullanılacağı konusu tartışmaya açıktır. Şekil 9, genel olarak bitkilerin bir yamacın duraylılığı üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini göstermektedir. Bu etkinin ortaya konulması, kuşkusuz, kapsamlı bir araştırmayı gerektirir. Bitki örtüsünün olumlu ve olumsuz etkileri önemli ölçüde bitki türüne ve dağılımına bağlıdır. Bu durum, heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması sırasında oldukça güç işlemlerin ve ek araştırmaların yapılmasını gerektirir. Birçok araştırmacı, özellikle ağaç türü bitkilerin duraylılık üzerindeki etkilerini olumlu yönde kabul etmiş ve bunları girdi parametresi olarak kullanmıştır (Choubey ve Litoria, 1990; Anbalagan, 1992a ve b; Juang vd., 1992; Pachauri ve Pant, 1992; Gökçeoğlu ve Aksoy, 1996; Fernandez vd., 1999; Guzzetti vd., 1999; Nagarajan vd., 2000). Buna karşın bazı araştırmacılar ise, heyelan duyarlılığının değerlendirilmesinde bitki örtüsünü tek başına dikkate almamışlar, bu faktörü arazi kullanım potansiyeli kavramı içinde değerlendirmişlerdir (Carrara vd., 1991; Maharaj, 1993; Mejia-Navarro ve Wohl, 1994; Luzi ve Pergalani, 1999; Uromeihy ve Mahdavifar, 2000). Tüm bu tartışmalı ve karmaşık duruma karşın, heyelan konusuyla ilgili bazı istatistiksel çalışmalarda, Şekil 10'da gösterildiği gibi, bitki örtüsünün göreceli olarak daha az olduğu, ya da olmadığı kesimlerde, heyelanların sayısında artış gözlenmektedir. Roth (1983), çalıştığı bölgede bitki örtüsünün genelde duraylılık üzerindeki olumlu etkisinden söz etmekte, ancak bu görüşün desteklenmesi hususunda ek verilere gereksinim olduğunu da belirtmektedir. Koukis ve Ziourkas (1991), Yunanistan'da meydana gelen heyelanların ancak % 9.4'ünün ormanlık alanlarda yer aldığı saptamışlardır (bknz. Şekil 10a). Jakob (2000)'un elde ettiği sonuçlara göre ise, tahrip edilmemiş ormanlık alanlardaki heyelan frekansı diğer alanlara göre 9 kat daha düşüktür. Benzer bir görüş de Anbalagan (1992a ve b) tarafından öne sürülmüştür. Bu araştırmacıya göre, bitki örtüsü duraylılık üzerinde ikincil

**HİDROLOJİK SİSTEM**

1. Yağış-yaprak etkileşimi ile suyu emme ve buharlaştırma özelliğinden dolayı yapraklar yağışın süzülme etkisini azaltırlar.
2. Kökler ve gövde zemin yüzeyinin pürüzlülüğü ile toprağın geçirgenliğini artırarak süzülme kapasitesinin yükselmesine neden olur.
3. Kökler zeminin nemini alarak, terleme yoluyla atmosfere verirler ve zemin içerisindeki gözenek suyu basıncının azalmasına neden olurlar.
4. Zemin içerisindeki nemin tüketimi zeminde kuruma çatlaklarının artışına neden olarak süzülme kapasitesini artırır.

**MEKANİK SİSTEM**

5. Kökler, zemini güçlendirerek makaslama dayanımını artırır.
6. Kökler, toprak tabakası altındaki yumuşak tabakalara girerek, toprak ve toprak altında yer alan tabakanın arasındaki yüzey için bir destek sağlar.
7. Ağaçların ağırlıkları yamaçtaki normal ve yatay gerilim bileşenini artırır.
8. Bitkiler, rüzgarın yarattığı dinamik yükleri yamaca aktarırlar.
9. Kökler, toprak tanelerini zemin yüzeyine bağlayarak erozyona karşı duyarlılığı azaltır.

**AÇIKLAMA**

- A : Duraylılık üzerinde olumsuz etki  
B : Duraylılık üzerinde olumlu etki

**ETKİ**

B

A

B

A

B

B

A/B

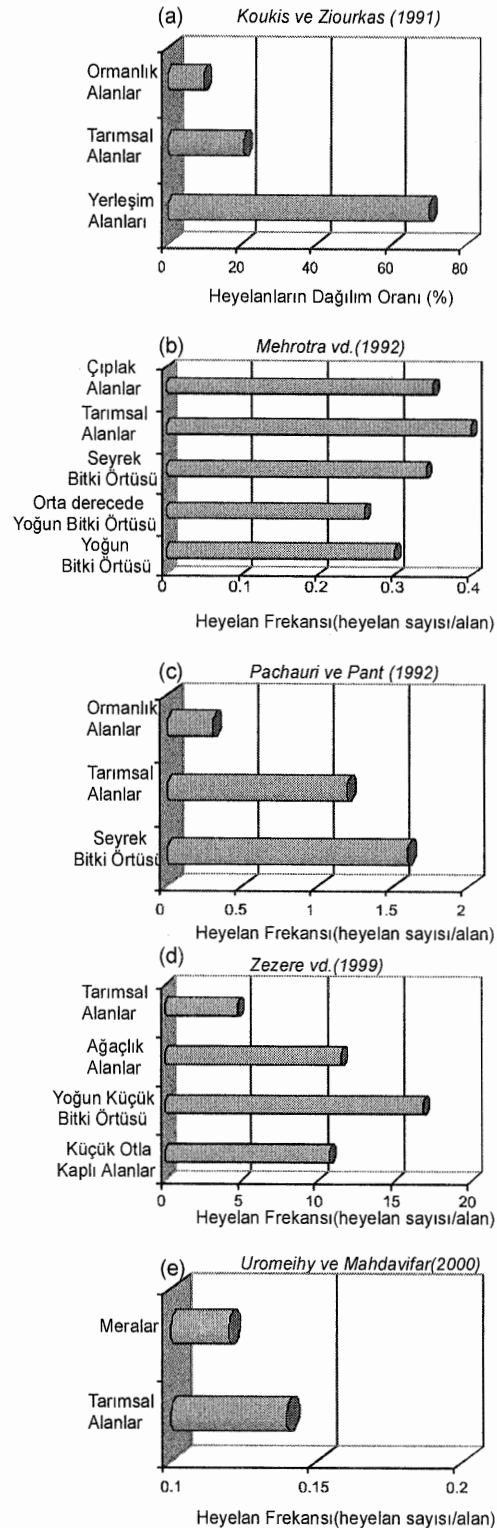
A

B

A

B

Şekil 9. Doğal yamaçların duraylılığını etkileyen yamaç-bitki etkileşimleri (Greenway, 1987'den).  
Figure 9. Slope-vegetation interactions influencing stability of natural slopes (after Greenway, 1987).



Şekil 10. Bazı araştırmacıların verilerinden elde edilen heyelan-bitki örtüsü ilişkileri.  
Figure 10. Relationships between landslide and vegetation cover obtained from the

bir etkiye sahip olmakla birlikte, özellikle orman örtüsü yamacı oluşturan malzemeyi bozunma ve erozyonun olumsuz etkisine karşı korumaktadır. Sözü edilen farklı araştırmacılar, her ne kadar benzer sonuçlara ulaşmışlarsa da, heyelan duyarlılık haritalarının girdi parametrelerinden olan bitki örtüsünün pratik olarak nasıl kullanılacağı konusundaki belirsizlikler hala mevcuttur.

#### Arazi kullanım potansiyeli

Mehrotra vd. (1992), değerlendirmelerinde heyelanların önemli bir kısmının ya tarım alanlarında, ya da bitki örtüsünün olmadığı kesimlerde meydana geldiğini saptamışlardır (bknz. Şekil 10b). Bazı araştırmacılar (Van Westen ve Bonilla, 1990), çalışmalarında bitki örtüsünü ayrı bir parametre olarak değerlendirmeyip, arazi kullanım potansiyeli haritası içinde değerlendirmişlerdir. Eğer arazi kullanım potansiyeli haritası kullanılacaksa, bitki örtüsü haritası kullanılmamalıdır. Çünkü bu işlem, bitki örtüsünün etkisinin iki kez dikkate alınmasına neden olur. Nitekim, araştırmacıların önemli bir kısmı (bknz. Çizelge 1) bu hususa dikkat etmişler ve bitki örtüsü ve arazi kullanım potansiyeli kavramlarından sadece birini dikkate almışlardır.

#### Tetikleyici Faktörler

Heyelanlar; sismik aktivite, şiddetli yağış ve kanal erozyonunun yanı sıra, MÖ 5000'den itibaren insan aktivitesi ile de tetiklenmektedirler (Gonzalez-Diez vd., 1999). Heyelan envanter çalışmaları; yeterli olmak koşuluyla, gerçekte heyelanlarla ilişkili parametrelerin saptanmasındaki en kullanışlı araçlardan biri olmasına rağmen (Wieczorek, 1984), bu çalışmaların en güç aşamalarından birisi heyelanı tetikleyen koşulları, ya da koşulların ortaya konulabilmesidir. Bu bölümde heyelanları yaygın biçimde tetikleyen deprem ve aşırı yağış gibi faktörler ayrı başlıklar altında kısaca tartışılmıştır.

#### Depremler

Depremler, yarattıkları sismik ivmeyle heyelanları tetikleyen en önemli faktörlerden birisidir. Keefer (1984)'e göre, depremlerin tetiklediği heyelanlar jeomorfolojik ve ekonomik önemlerine rağmen, yeterince anlaşılması değildir. "Depremin büyüklüğüne, sarsıntısının şiddetine ve diğer sismik parametrelere bağlı heyelanların sayısı

ve dağılımı nedir?”, “depremlerin neden olduğu heyelanların türleri nelerdir?”, “bunlardan hangileri insan yaşamı için en tehlikelidir?” ve “hangi tür zemin deprem sırasında heyelana karşı en duyarlıdır?” gibi soruların tam yanıtlanamaması, bu konudaki önemli eksikliklerdir (Keefe, 1984). Keefer (1984), dünyadaki 40 adet büyük depremin neden olduğu zemin yenilmelerine ilişkin değerlendirmesinde, Çizelge 3’de özetlenen sonuçlara ulaşmıştır. Ayrıca depremler, odaktan itibaren yüzlerce kilometre uzaklıktaki zeminlerde de heyelan, sıvılaşma, yanılma gibi çeşitli duraysızlıklara neden olabilmektedir. Ancak depremsellik, genel olarak heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması sırasında kullanılan bir faktör değildir (bkz. Çizelge 1). Büyük olasılıkla bunun temel nedeni, haritaların hazırlanmasında büyük ve/veya aktif faylara yakınlık parametresinin çoğu kez dikkate alınmış olması, dolayısıyla bir etkinin iki kez değerlendirilmesinden kaçınılmasıdır. Ayrıca, burada sözü edilen deprem parametrelerinin her yerde sağlıklı biçimde belirlenememesinin yanısıra, bu parametrelerin heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması sırasında kullanılan yöntemler açısından da bir faktör olarak dikkate alınması söz konusu değildir.

Çizelge 3. Keefer (1984) tarafından büyük depremlerin değerlendirilmesiyle zemin yenilmelerine ilişkin elde edilen sonuçlar.

Table 3. Results relating to ground failures obtained by Keefer (1984) assessing the big earthquakes.

En küçük $M_L$ *	Zemin yenilmesi
4.0	Kaya düşmesi, kaya kayması, zemin düşmesi, parçalanmış zemin kayması
4.5	Zemin kayması ve blok-zemin kayması
5.0	Kaya - blok kayması, yavaş zemin kayması, yanılma, hızlı zemin akması, yarı ıslak zeminlerde heyelan, sıvılaşma
6.0	Kaya çığı
6.5	Zemin çığı

\*Richter ölçeğinde depremin yerel büyüklüğü

### Şiddetli yağış

Heyelanlar ve iklimsel değişiklikler arasında bir ilişkinin kurulması her zaman kolay bir işlem değildir (Gonzalez-Diez vd., 1999). Bu görüşe ek olarak, yağış ve heyelan ilişkisini tam olarak ortaya koyabilmek çok güç ve pahalı işlemleri ge-

rektir. Sahayı genel olarak karakterize edebilmek için yapılan her türlü basitleştirme amaçlı varsayımlara karşın, bu tür işlemler yine de oldukça karmaşık olduğu gibi, birçok parametreyi gerektirir ve pratikte bu parametreler çoğu zaman tayin edilemezler (Polemio ve Sdao, 1999). Bu konudaki en temel eksikliklerden birisi heyelanın meydana gelme tarihinin çoğu kez bilinmemesidir. Özellikle yenilme yüzeyinin 1-2 m derinlikten geçtiği sığ heyelanlar, çoğunlukla daha dik yamaçlarda meydana gelir ve hemen her türlü iklim bölgesinde gözlenebilirler (Van Asch vd., 1999). Aynı zamanda sığ heyelanların geliştiği bölgelerde, zemin-su dengesi yağış sularının sızması ile denetlenir (Haneberg ve Önder, 1994). Bu nedenle özellikle sığ heyelanların (1-2 m) değerlendirilmesi sırasında, derinden geçen yenilme yüzeylerine sahip heyelanlara göre daha ayrıntılı meteorolojik verilere gereksinim duyulur (Van Asch vd., 1999). Finlay vd. (1997), bu konuyla ilgili çalışmalarında, özellikle sığ heyelanların gelişmesinde 1 ile 12 saat arasında devam eden yağışların çok etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Yunanistan için hazırlanan heyelan yoğunluğu (heyelan frekansı/alan) ile ortalama yıllık yağış miktarı arasındaki ilişki, Şekil 8b’de verilmiş olup, bu iki özellik arasında çok yakın bir ilişki mevcuttur. Bir heyelanın yağışa bağlı olarak tetiklendiğini saptayabilmek, heyelanın meydana gelme tarihi ile yağış verilerinin birlikte değerlendirilmesiyle mümkün olabilir. Dolayısıyla, yağış verilerinin heyelan duyarlılık haritalarında bir faktör olarak kullanılması mümkün gözükmemektedir. Her ne kadar Juang vd. (1992) oluşturdukları şev yenilme potansiyeli indeksinde meteorolojik faktörleri bir parametre olarak dikkate almışlarsa da, bunun sağlıklı bir yaklaşım olduğunu söyleyebilmek güçtür. Bu yazı kapsamında yapılan istatistiksel değerlendirmede (bkz. Çizelge 1) de araştırmacıların önemli bir bölümü yağış parametresini heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması sırasında kullanmayı tercih etmemişlerdir. Çünkü genelde yağış aktivitesi, yamaç eğim yönü ve göreceli yükseklik, ya da yeraltısu koşulları içerisinde dikkate alınmaktadır.

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Heyelandan kaynaklanan zararların azaltılması çalışmalarının önemli bir aşamasını oluşturan heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması çalışmalarında, heyelanların meydana gel-

mesinde etkin olan çok sayıda jeolojik, jeomorfolojik, topoğrafik ve meteorolojik parametre esas alınmaktadır. Ancak, duyarlılık haritaları bölgesel ölçekte hazırlanmakta olup, bu nedenle haritaların hazırlanmasına temel oluşturan parametrelerin tüm sahayı genelleyecek bir biçimde belirlenip dikkate alınması, bazı parametrelerin tanımlamaya dayalı olması gibi nedenlerden dolayı, belirsizlikler ortaya çıkmakta ve bu da sonuçta elde edilecek haritanın kalitesini ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, bugüne değin yapılan çalışmalarda, değişik araştırmacılar tarafından farklı parametreler kullanılarak çeşitli yöntemlerle heyelan duyarlılık haritaları hazırlanmıştır. Diğer bir deyişle, bu konuda çalışan araştırmacılar arasında, gerek heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması sırasında kullanılacak yöntemler, gerekse hangi parametrelerin dikkate alınması gerektiği hususunda bir görüş birliği oluşmamıştır. Bu nedenle, bu yazıda özellikle parametreler üzerinde durularak, hangi sınırlamaların, parametrelere ilişkin ne tür belirsizliklere neden olabileceği tartışılmaya çalışılmıştır.

Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasını konu edinen ve derlenebilen 21 çalışmada, toplam 23 farklı parametre dikkate alınmıştır. Bu parametrelerden eğim, litoloji ve arazi kullanım potansiyeli veya bitki örtüsü gibi faktörlerin, çalışmaların tamamına yakınında bir girdi parametresi olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu parametrelerin kullanımı üzerine bir görüş birliği sağlanmış gibi gözükse de, bunların hangi önem derecesi aralığında kullanılacağı hususu halen netlik kazanmamıştır. En fazla kullanılan diğer parametreler ise, ana faylara olan uzaklık, topoğrafik yükseklik, yamaç eğim yönü ve yüzey drenaj ağıdır. Yamaçların duraylılığı üzerinde tartışmasız çok büyük etkiye sahip olan yeraltısuyu özellikleri ise, bu tür haritalarda bir girdi parametresi olarak çok fazla dikkate alınamamaktadır. Bunun temel nedeni, yeraltısuyuna ilişkin bölgesel ölçekte veriye her zaman kolay ulaşılamaması şeklinde değerlendirilmektedir. Ayrıca, yeraltısuyu özelliklerinin mevsimsel değişimlere açık olmasını bu belirsizliğin diğer bir nedeni olarak değerlendirmek mümkündür.

Heyelan duyarlılık haritası çalışmalarında genelde indeks haritaların eşit, ya da farklı önem derecelerinde çakıştırılması, araştırmacıların

tercih ettiği bir yöntem olmuştur. Ancak bu yöntemde, hangi haritanın, hangi önem derecesinde dikkate alınacağı önemli bir tartışma konusudur. Bunun yanısıra, daha az tercih edilmesine karşın, çoklu regresyon analizini temel alan çalışmalarda bu husus daha az tartışılır niteliktedir. Ancak, ayrıntılı bir heyelan envanter çalışmasını ve parametrelere ilişkin verileri gerektirmesi, bu yöntemin daha az tercih edilmesine neden olmaktadır.

Özellikle bölgesel ölçekte hazırlanacak heyelan duyarlılık haritalarında kullanılacak parametrelerin değerlendirilmesinde izlenecek yöntemlerde, sağlıklı bir heyelan veri tabanı kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, Türkiye açısından büyük öneme sahip olan heyelanlara ilişkin zararların azaltılması yönünde yapılacak çalışmalara ışık tutabilecek nitelikte ve sağlıklı bir heyelan veri tabanının oluşturulmasında yarar vardır. Bunun yanısıra, böyle bir veri tabanının, haritaların hazırlanmasıyla ilgili yöntemlerin oluşturulması açısından da ayrı bir önemi olduğu açıktır.

## KATKI BELİRTME

Yazarlar, bu yazının değerlendirme aşamasında önemli görüş, öneri ve eleştirilerinden yararlandıkları Prof.Dr.Vedat Doyuran ile ismini bildikler diğer incelemeciye ve Bülten'in editörü Prof.Dr.Reşat Ulusay'a teşekkürlerini sunarlar.

## KAYNAKLAR

- Abdolmasov, B. and Obradovic, I., 1997. Evaluation of geological parameters for landslide hazard mapping. Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment. 23-27 June 1997, Athens, Greece, P.G. Marinos, G.C. Koukis, G.C. Tsiambaos and G.C. Stournaras (eds.), Balkema, 471-476.
- Aleotti, P., and Chowdhury, R.N., 1999. Landslide hazard assessments: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 58, 21-44.
- Anbalagan, R., 1992a. Terrain evaluation and hazard zonation for environmental regeneration and land-use planning in mountainous terrain. India. Proceedings of 6th International Symposium on the Landslides, 10-14 February 1992, Christchurch, England, D.H. Bell (ed.), Balkema, 861-868.



- Anbalagan, R., 1992b. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32, 269-277.
- Carrara, A., Sorisso-Valvo, M., and Reali, C., 1982. Analysis of landslide form and incidence by statistical techniques. *Catena*, 9, 35-62.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., and Reichenbach, P., 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427-445.
- Chang, S.C., 1992. The simple mapping and evaluation system for engineering geological and landslide hazard zonation. *Proceedings of 6th International Symposium on the Landslides*, 10-14 February 1992, Christchurch, England, D.H. Bell (ed.), Balkema, 905-910.
- Choubey, V.D., and Litoria, P.K., 1990. Landslide hazard zonation in the Garhwal Himalaya, A terrain evaluation approach. *Proceedings of 6th International Association of Engineering Geology Congress*, 6-10 August 1990, Amsterdam, Netherlands, D.G. Price (ed.), Balkema, 65-72.
- Choubey, V.D., Chaudhari, S., and Litoria, P.K., 1992. Landslide hazard zonation in Uttarakashi and Tehri districts, U.P. Himalaya, India. *Proceedings of 6th International Symposium on the Landslides*, 10-14 February 1992, Christchurch, England, D.H. Bell (ed.), Balkema, 911-917.
- Chowdhury, R.N., and Flentje, P.N., 1997. Relevance of mapping for slope stability in Greater Wollongong area, New South Wales, Australia. *Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, 23-27 June 1997, Athens, Greece, P.G. Marinou, G.C. Koukis, G.C. Tsiambaos and G.C. Stournaras (eds.), Balkema, 569-574.
- Cruden, D.M., 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.
- Fernandez, C.I., Del Castillo, T.F., El Hamdouni, R., and Montero, J.C., 1999. Verification of landslide susceptibility mapping: A case study. *Earth Surface Process and Landforms*, 24, 537-544.
- Finlay, P.J., Fell, R., and Maguire, P.K., 1997. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 811-824.
- Gonzalez-Diez, A., Remondo, J., Diaz de Teran, J.R., and Cendrero, A., 1999. A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides. *Geomorphology*, 30, 95-113.
- Gökçeoğlu, C., and Aksoy, H., 1996. Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44, 147-161.
- Greenway, D.R., 1987. Vegetation and slope stability. *In: Slope Stability*, M.G. Anderson and K.S. Richards (eds.), John Wiley and Sons, 187-230.
- Guillande, R., Gelugne, P., Bardintzeff, J.M., Brousse, R., Chorowicz, J., Deffontaines, B., et Parrot, J.F., 1993. Cartographie automatique de zones a aleas de mouvement de terrain sur l'île de Tahiti a partir de donnees digitales. *Bulletin Societe Geologique de France*, 164 (4), 577-583.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, 181-216.
- Haneberg, W.C., and Önder, A.G., 1994. Rapid water level fluctuations in a thin colluvium landslide west of Cincinnati, Ohio. *US Geological Survey Bulletin*, 2059C, 1-16.
- Higgins, J.D., and Rockaway, J.D., 1986. A graphic system for seismic response mapping. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 23 (1), 77-91.
- Hoek, E., and Bray, J.W., 1977. *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons Ltd., Hertsford, 402 pp.
- Hutchinson, J.N., 1992. Landslide hazard assessment. *Proceedings of 6th International Symposium on the Landslides*, 10-14 February 1992, Christchurch, England, D.H. Bell (ed.), Balkema, 1805-1842.
- Jade, S., and Sarkar, S., 1993. Statistical models for slope instability classification. *Engineering Geology*, 36, 91-98.
- Jakob, M., 2000. The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *Catena*, 38, 279-300.
- Johnson, K.S., and Luza, K.V., 1981. Preparation of regional maps showing natural and man-made geologic hazards. *Bulletin of International Association of Engineering Geologists*, 23, 15-19.

- Juang, C.H., Lee, D.H., and Sheu, C., 1992. Mapping slope failure potential using fuzzy sets. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 118 (3), 475-494.
- Juang, C.H., Jhi, Y.Y., and Lee, D.H., 1998. Stability analysis of existing slopes considering uncertainty. *Engineering Geology*, 49, 111-122.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 406-421.
- Koukis, G., and Ziourkas, C., 1991. Slope instability phenomena in Greece: A statistical analysis. *Bulletin of International Association of Engineering Geologists*, 43, 47-60.
- Luino, F., 1999. The flood and landslide event of November 4-6 1994 in Piedmont Region (Northwestern Italy): Causes and related effects in Tanaro Valley. *Physical and Chemical Earth (A)*, 24 (2), 123-129.
- Luzi, L., and Pergalani, F., 1999. Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: the "Oltre Po Pavese" case history (Regione Lombardia-Italy). *Natural Hazards*, 20, 57-82.
- Maharaj, R., 1993. Landslide processes and landslide susceptibility analysis from an upland watershed: A case study from St. Andrew, Jamaica, West Indies. *Engineering Geology*, 34, 53-79.
- Mehrotra, G.S., Sarkar, S., and Dharmaraju, R., 1992. Landslide hazard assessment in Rishikesh-Tehri area, Garhwal Himalaya, India. *Proceedings of 6th International Symposium on the Landslides*, 10-14 February 1992, Christchurch, England, D.H. Bell (ed.), Balkema, 1001-1007.
- Mejia-Navarro, M., and Wohl, E.E., 1994. Geological hazard and risk evaluation using GIS: methodology and model applied to Medellin, Columbia. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, 31(4), 459-481.
- Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A., and Khire, M.V., 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 275-287.
- Newmark, N.M., 1965. Effect of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15, 139-159.
- Pachauri, A.K., and Pant, M., 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*, 32, 81-100.
- Polemio, M., and Sdao, F., 1999. The role of rainfall in the landslide hazard: the case of the Avigliano urban area (Southern Apennines, Italy). *Engineering Geology*, 53, 297-309.
- Roth, R.A., 1983. Factors affecting landslide-susceptibility in San Mateo County, California. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, 20 (4), 353-372.
- Schuster, R.L., 1996. Socio-economic significance of landslides. *Landslides: Investigation and mitigation*. A.K. Turner and R.L. Schuster (eds.), Transportation Research Board, National Research Council, Special Report-247, National Academy Press, Washington DC, 12-35.
- Schuster, R.L., and Fleming, R.W., 1986. Economic losses and fatalities due to landslides. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, 23(1), 11-28.
- Skempton, A.W., and Delory, F.A., 1957. Stability in natural slopes of London clay. In: *Proceedings of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, 378-381.
- Uromeihy, A., and Mahdavi, M.R., 2000. Landslide hazard zonation of Khorshrostan area, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 207-213.
- Van Asch, Th. W.J., Buma, J., and Van Beek, L.P.H., 1999. A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, 30, 25-32.
- Van Westen, C.J., and Bonilla, J.B.A., 1990. Mountain hazard analysis using a PC-based GIS. *Proceedings of the 6th International Congress of Engineering Geology*. 6-10 August 1990, Amsterdam, Netherlands, D.G. Price (ed.), Balkema, 265-271.
- Van Westen, C.J., Seijmonsbergen, A.C., and Montovani, F., 1999. Comparing landslide hazard maps. *Natural Hazards*, 20, 137-158.
- Varnes, D.J., 1984. *Landslide hazard zonation-a review of principles and practice*. UNESCO Press, Paris, 63 p.
- Wieczorek, G.F., 1984. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, 21(3), 337-342.
- Zeze, J.L., Ferreira, A.B., and Rodrigues, M.L., 1999. Landslides in the North of Lisbon Region (Portugal): Conditioning and triggering factors. *Physical and Chemical Earth (A)*, 24 (10), 925-934.