

## İki ve Çok Değişkenli İstatistik ve Sezgisel Tabanlı Heyelan Duyarlılık Modellerinin Karşılaştırılması: Ayvalık (Balıkesir, Kuzeybatı Türkiye) Örneği

*Comparison of Bivariate and Multivariate Statistical and Heuristic-Based Landslide Susceptibility Models: an Example From Ayvalık (Balıkesir, Northwestern Turkey)*

Aykut AKGÜN<sup>1</sup>, Necdet TÜRK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, TRABZON

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İZMİR

### ÖZ

Heyelanlar, ülkemizde ve dünyada depremlerden sonra en fazla sıklıkla meydana gelen ve en çok zarar verici potansiyele sahip doğal afetlerden birisidir. Mühendislik açısından, heyelan zararlarının en aza indirilmesi amacıyla, heyelan olayının önceden tahmin edilmesi büyük önem taşımakta olup, olasılığa dayalı yöntemlerle heyelana duyarlı alanların belirlenmesi, özellikle son yirmi yılda, gerek dünyada gerekse ülkemizde oldukça yaygınlaşmıştır. Bu çalışma kapsamında, heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında en fazla kullanılan yöntemlerden iki ve çok değişkenli istatistik yöntemler ile sezgisel yöntemin karşılaştırması yapılmıştır. Amaca yönelik olarak, Ayvalık ilçesi (Balıkesir) ve yakın çevresi inceleme alanı olarak seçilmiş ve toplam 45 heyelan haritalanmıştır. Morfolojik, jeolojik ve arazi kullanımı verileri, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kapsamında mevcut topoğrafik ve ilgili tematik haritalar kullanılarak üretilmiştir. Çalışma alanında, heyelana neden olan parametreler olarak; yamaç eğimi ve yönelimi, litoloji, kayaların ayrışma durumu, akarsu gücü indeksi (AGİ), topoğrafik nemlilik indeksi (TNI), drenaj ağından uzaklık, yapısal unsurların yoğunluğu, arazi ve bitki örtüsü yoğunluğu dikkate alınmıştır. Bu heyelan parametreleri, bulanık üyelik fonksiyonları yardımıyla ortak bir ölçekte standartlaştırılmıştır. Daha sonra, her bir parametrenin heyelan oluşumuna katkısı; benzerlik oranı, mantıksal regresyon ve analitik hiyerarşi yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve bu parametrelerin ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Her bir yöntemle belirlenen ağırlık değerleri dikkate alınarak heyelan duyarlılık haritaları üretilmiş, üretilen haritaların performansları, mevcut heyelan lokasyonları ile karşılaştırılarak Eğri Altındaki Alan (EAA) yaklaşımıyla sınanmıştır. Buna göre, EAA değerleri sırasıyla benzerlik oranı yöntemi için 0.76, mantıksal regresyon için 0.77 ve analitik hiyerarşi yöntemi için 0.89 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre inceleme alanı için en başarılı heyelan duyarlılık değerlendirmesinin, analitik hiyerarşi yöntemi ile olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Analitik hiyerarşi, Ayvalık, Benzerlik oranı, Heyelan, Mantıksal regresyon.

## ABSTRACT

*Landslides are one of the most destructive natural hazards which frequently occur after earthquakes in our country and in the world. From engineering point of view, prediction of landsliding before its occurrence has a great importance to mitigate the landslide related damages, and determination of landslide prone areas by the methods, based on probability, has spread out both in our country and in the world in the last two decades. In this study, a comparison of the most common landslide susceptibility mapping methods, namely bivariate, multivariate statistical and heuristic methods, were carried out. For this purpose, Ayvalık (Balıkesir) and its near vicinity were selected as study area, and in total 45 landslides were mapped. Morphologic, geologic and land-use data were produced in Geographical Information Systems (GIS) by using available topographical and relevant thematic maps. In the area, slope gradient and aspect, lithology, weathering conditions of the rocks, stream power index (SPI), topographical wetness index (TWI), distance from drainage, density of structural features, land-cover and vegetation cover density were considered as the parameters causing the landslides. All of the parameters were standardized in a common scale by using fuzzy membership functions. Then, the contribution of each of these parameters for the landslide occurrence were investigated by likelihood ratio, logistic regression and analytical hierarchy methods, and the weight values of the parameters were calculated. Considering the weight values determined by each method, landslide susceptibility maps were produced, and the performances of the produced maps were tested by comparing landslide locations using Area Under Curvature (AUC) approach. Based on this, the AUC values were determined to be 0.76, 0.77 and 0.89 for likelihood ratio, logistic regression and analytical hierarchy models, respectively. According to these results, analytical hierarchy model was considered to be the best landslide susceptibility method for the study area.*

**Key Words:** Analytical hierarchy, Ayvalık, likelihood ratio, Landslide, Logistic regression.

## GİRİŞ

Heyelanlar, genel olarak bir yamaç ya da sevi oluştururken toprak ya da kaya malzemesinin suyun taşıyıcı etkisi olmaksızın, yerçekimine bağlı olarak yamaç aşağı doğru hareketi olarak tanımlanmaktadır (Crozier, 1986). Soeters ve van Westen (1996) ise heyelanları daha ilişkisel bir tanımlama ile yamaç duraysızlığı sürecinin yerel jeomorfoloji, hidrojeoloji ve jeolojik durum ile bunların jeodinamik süreçler, bitki örtüsü, arazi kullanımı ve insan aktiviteleri gibi yan etkilerle kontrol edilmesinin yanı sıra, yağış ve sismik aktivite gibi faktörlerle tetiklenen bir ürün olarak ifade etmişlerdir.

Son 30 yıldır toplumlarda heyelan problemleriyle ilgili baş gösteren acil çözüm ihtiyaçları, pek çok araştırmacıyı bu konu ile ilgilenmeye teşvik etmiştir. Heyelan duyarlılığı ile ilgili araştırmacıların son 20 yıl içindeki eğilimleri ve heyelan duyarlılık analizinde kullanılan yöntem ve seçilen değerlendirme parametrelerine ilişkin genel bir değerlendirme van Westen (1993) (Çizelge 1) ve Chacon vd. (2006) ve tarafından verilmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen heyelan duyarlılık değerlendirmesi üzerine literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalara bakıldığında, büyük çoğunluğunun olasılıksal modeller kullanılarak yapıldığı görülmektedir (Lee ve Min, 2001; Baeza ve Coronimas, 2001;

Çevik ve Topal, 2003; Gökçeoğlu vd., 2005; Lee ve Dan, 2005; Komac, 2006; Clerici vd. 2006; Akgün ve Bulut, 2007; Akgün ve Türk, 2010). İstatistiksel yöntemlerden biri olan mantıksal regresyon, en sıklıkla kullanılan çok değişkenli istatistik yöntemlerin başında gelmektedir (Atkinson ve Massari 1998; Süzen ve Doyuran 2004; Ohlmacher ve Davis 2003; Lee, 2005; Yeşilnacar ve Topal, 2005; Lee ve Sambath 2006; Tunusluoglu vd., 2007; Akgün vd. 2008; Lamelas vd., 2008; Nefeslioğlu vd., 2008; Kıncal vd., 2009; Yılmaz, 2010). Heyelan duyarlılık değerlendirmesinde yeni bir yaklaşım olarak kabul edilen bulanık mantık, yapay sinir

ağları, karar ağacı gibi veri madenciliği yöntemleri de son yıllarda sıklıkla kullanılan yöntemler arasında yerini almaktadır (Ercanoğlu ve Gökçeoğlu 2002;Ermini, 2005; Castellanos Abella ve Van Westen 2007; Pradhan ve Lee 2007; Lee ve Pradhan, 2007 Chen vd., 2009; Yılmaz, 2009; Nefeslioğlu vd., 2010). Bu çalışmada, verilmiş olan referans çalışmalardan farklı olarak, istatistiksel değerlendirme yöntemlerinden iki ve çok değişkenli istatistik yaklaşımlar ile olasılıksal yöntemler içerisinde gösterilen sezgisel tabanlı uzman görüşüne dayalı yöntemlerin bir karşılaştırılması yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir.

Çizelge 1. Heyelan zarar ve duyarlılık zonlamasındaki yaygın yaklaşımlar (van Westen, 1993).

Table 1. Common approaches at landslide hazard and susceptibility zonations (van Westen, 1993).

<b>Duyarlılık Analiz Türü</b>	<b>Temel Özellikler</b>
1. Dağılım Analizi	Geçmişte olan erozyon ve heyelan alanlarının yerlerini gösteren harita formatında bilgi.
2. Kalitatif Analiz	Doğrudan veya yarı-doğrudan yaklaşım kullanan, kullanıcı deneyimine dayalı birçok haritanın birleştirilmesiyle elde edilen yöntem.
3. İstatistiksel Analiz	Bir seri parametre haritasından yararlanarak elde edilen ve istatistik yöntemler kullanarak olasılık sonuçları elde edilen dolaylı yöntemler.
4. Deterministik Analiz	Stabilite analiz sonuçlarını içeren parametre haritalarının birleştirilmesi yöntemini kullanan dolaylı yöntemler.
5. Frekans Analizi	Belirli bir frekanstaki sınır değerlerini elde etmek için bilinen lokasyonlar ile deprem, yağış gibi olayların korelasyonun kullanılması.

İnceleme alanında yüzeylenen kayalarda gözlenen yoğun ayrışma, yüksek eğimli yamaçların varlığı, yamaçlarda yapılan kazılar ve iklimsel etkiler gibi nedenlerden, bölgede yoğun bir erozyon gelişimi ile birlikte heyelan gelişimini de kolaylaştırmaktadır. Bu nedenlerden dolayı inceleme alanının heyelan duyarlılık açısından değerlendirilmesine karar verilmiş ve bu kapsamda yukarıda bahsedilen üç farklı yöntem kullanılarak üç ayrı heyelan duyarlılık haritası üretilerek doğruluk değerlendirmesi amacıyla bunların bir karşılaştırması yapılmıştır.

## İNCELEME ALANI VE JEOLojİSİ

Çalışma alanı Türkiye'nin Kuzeybatı Anadolu kısmında yer almakta olup, Balıkesir iline bağlı Ayvalık ilçesi ile İzmir iline bağlı Bergama ilçeleri arasında bulunmaktadır (Şekil 1). İnceleme alanı güneyden kuzeye doğru

yaklaşık 40 km, doğudan batıya ise ortalama 10 km olup toplam çalışma alanı olarak yaklaşık 424 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsamaktadır. Yarı-nemli Akdeniz ikliminin görüldüğü inceleme alanı, uzun yıllar yağış ortalamasına göre (1961-2000) 700-800 mm yağış alan bir bölgede yer almaktadır. İnceleme alanında topoğrafik yükseltiler 30-513 m arasında olup, yamaç eğim değerleri 25 derece ortalama ile 3-47 derece arasında değişmektedir. Yamaçlar genel olarak güneybatı yönelimli olup, yoğun bitki örtüsüne sahip yamaçlar çoğunlukla düşük eğimli yamaçları kaplarken, yüksek eğimli yamaçlarda bitki örtüsünün oldukça seyrek olduğu görülmektedir. Çalışma alanı Biga Yarımadası ile Menderes Masifi ve Kozak Plütunu arasında kalan kısımda yer almakta olup (Şekil 1), bölgesel anlamda otokton olarak Alt Triyas'tan Kuvaterner'e kadar çökel, magmatik ve metamorfik kayaların yüzeylendiği görülmektedir.

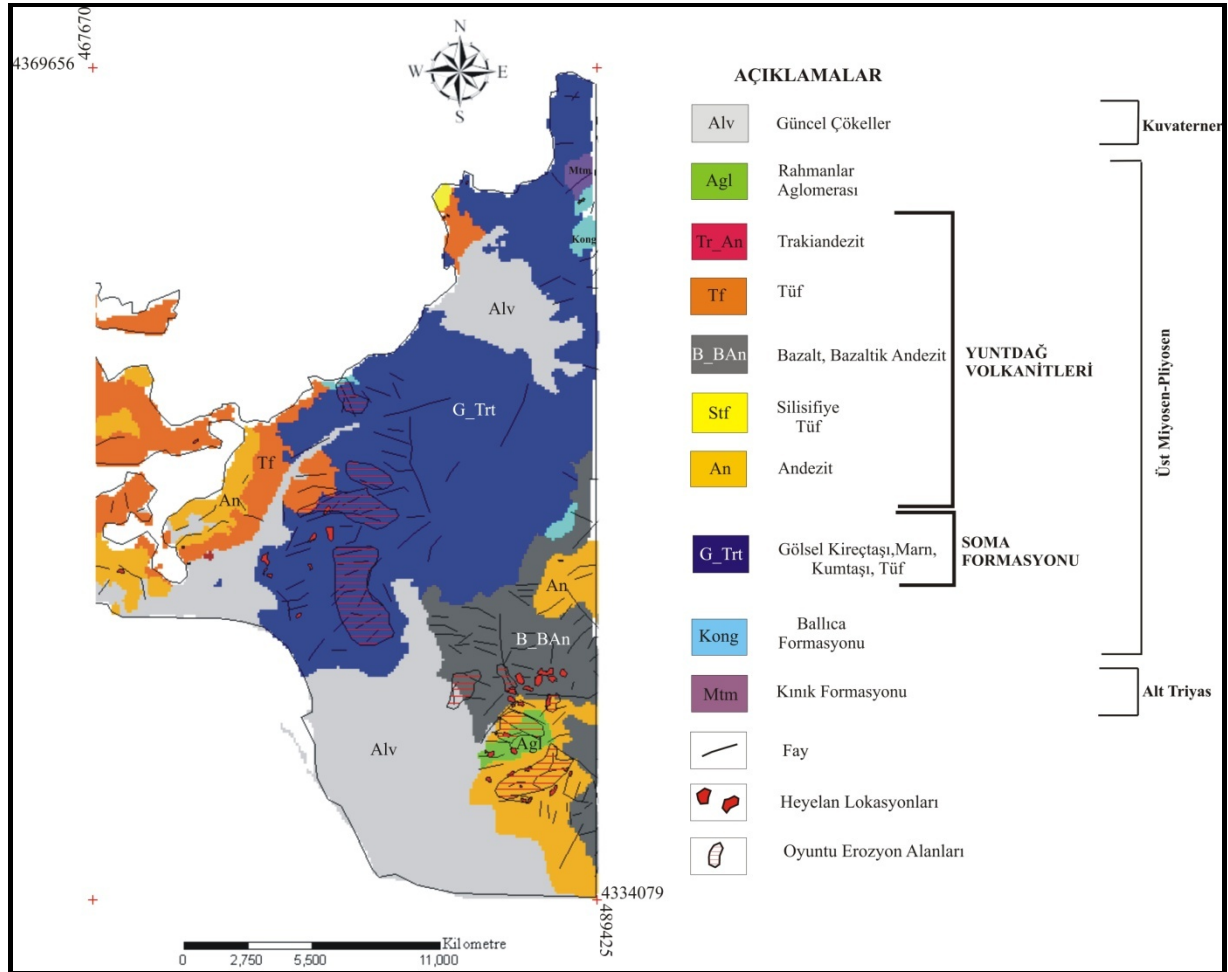


Şekil 1. İnceleme alanına ait yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.

İnceleme alanında yüzeylenen litolojik birimler alttan üste doğru; metamorfik bir seri olan Kınık formasyonu, andezit, bazalt, trakiandezit, trakit, dasit ve riyodasit birimlerini içeren Yuntdağ volkanitleri, konglomeratik bir seviye ile ifade edilen Ballica formasyonu, gösel tortulardan oluşan Soma formasyonu, andezitik

volkanizma ürünü aglomeralardan oluşan Rahmanlar aglomerası ile alüvyon olarak ayırtlanmıştır. Birimlerin inceleme alanındaki dağılım ve ilişkileri 1:25.000 ölçekli jeoloji haritasında gösterilmiş olup (Şekil 2), kaya birimleri ile bunlara ait özellikler genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesitte verilmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. İnceleme alanına ait genel jeoloji haritası (Akyürek, 1989'dan değiştirilerek hazırlanmıştır).

Figure 2. Geological map of the study area (Modified from Akyurek, 1989).

Sistem	Seri	Formasyon	Litoloji	Tanımlama
Kuvaterner		Güncel Tortullar		Güncel kıyı ve akarsu sedimanları
Tersiyer	Üst Miyosen-Pliyosen	Rahmanlar		Andezitik volkanizma ürünü aglomera
		Soma		Gösel kireçtaşı, marn, kil ve siltaşı, tuf ve kumtaşı
		Yuntdağ		Andezit, bazaltik andezit, bazalt, tuf, silisifiye tuf, trakiandezit, trakit, dasit ve riylolit içeren volkanik seri
	Balhca			Orta-kötü boylanmış, andezit, bazalt, riylolit, riyodasit, trakiandezit çakılları içeren konglomera
Triyas	Alt Triyas	Kimik		Metaçamurtaşı, metakumtaşı, metavolkanitten oluşan metamorfik seri

Şekil 3. İnceleme alanına ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit (Ölçeksiz) (Akyürek, 1989).

Figure 3. Generalized stratigraphical columnar section of the study area (Not to scale) (Akyürek, 1989)

## VERİ VE YÖNTEMLER

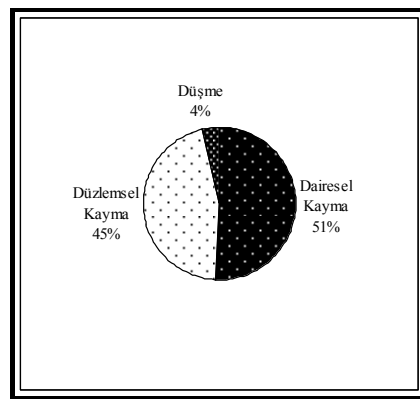
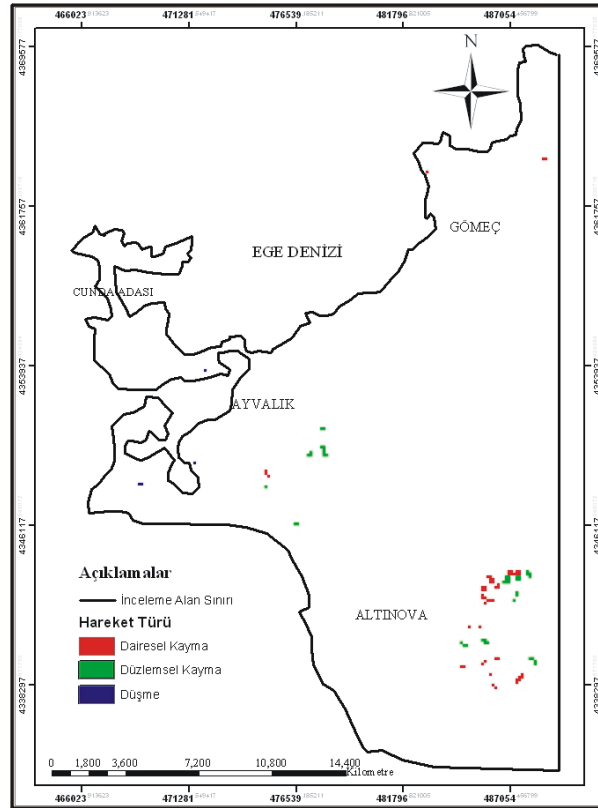
### Girdi Verilerinin Hazırlanması

Heyelan duyarlılık değerlendirmesindeki en önemli verilerin başında detaylı bir şekilde hazırlanmış heyelan envanter verisi gelmektedir. Bu maksatla inceleme alanında meydana gelen kütle hareketleri, ayrıntılı arazi gözlemleri, 1/35.000 ölçekli 1995 yılına ait stereo pankromatik hava fotoğrafları ve 15 m yersel çözünürlüklü, 2004 yılına ait Aster 3A01 uydu görüntüsü kullanılarak haritalanmıştır. Envanter haritalaması yapılırken hareketin türü, Varnes

(1978) tarafından önerilen kütle hareketi sınıflamasına göre sınıflandırılmıştır. Buna göre inceleme alanında haritalanan 45 kütle hareketi, dairesel kayma, düzlemsel kayma ve düşme olarak ayırtlanmıştır. Hareket alanlarının harita üzerine aktarılması sırasında heyelan kütlelerinin esas ayna (main scarp) yüzeyi ve yan kayma yüzeylerinden itibaren 50'şer metrelik bir zon dikkate alınmış, düzlemsel kayma ve düşme türü hareketlerin haritalanmasında ise hareketin meydana gelmiş olduğu yüzeyden itibaren yine 50 m'lik bir zon göz önüne alınmıştır. Buna göre ayırt edilen heyelanların %51'inin dairesel kayma, %45'inin düzlemsel kayma ve %4'ünün

ise düşme türü kütle hareketi olduğu görülmüştür (Şekil 4). Üretilen heyelan envanter haritasındaki heyelan lokasyonlarından rastgele seçilen 30 tanesi model oluşturulmasında, geri kalan 15

lokasyon ise doğruluk değerlendirmesinde kullanılmıştır.

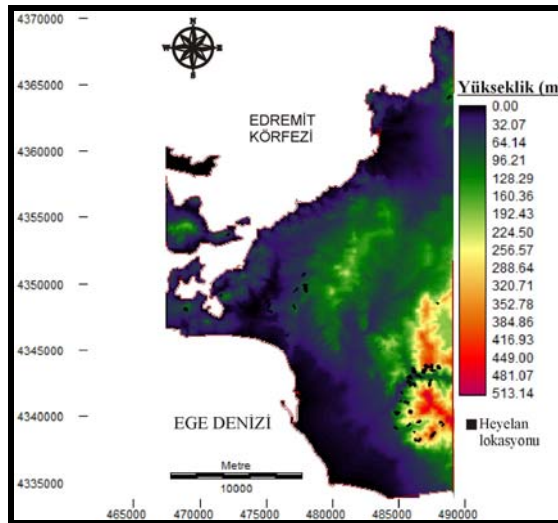


Şekil 4. İnceleme alanında haritalanan heyelan lokasyonlarını gösteren heyelan envanter haritası.

Figure 4. Landslide inventory map showing the landslide locations mapped in the study area.

Heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanılan morfometrik verilerden yamaç eğimi, yamaç yönelimi, akarsu güç indeksi (Moore vd., 1991) ve topoğrafik nemlilik indeksi verileri (Moore vd., 1991), 1:25.000 ölçekli topoğrafik haritaların sayısallaştırılması ve buna Düzensiz Üçgen Ağları (TIN) uygulanmasıyla elde edilen sayısal yükseklik modeli (SYM) kullanılarak üretilmiştir (Şekil 5) (Akgün ve Türk, 2010). Litoloji verisi, arazide doğrulaması yapılan 1:25.000 ölçekli jeoloji haritasının sayısallaştırılmasıyla elde edilmiştir. Ayrışma derecesi haritası yine arazide 1:25.000 ölçekli olarak yapılmış ve elde edilen harita sayısal formata dönüştürülmüştür. Bu aşamada, kayaların ayrışma durumları değerlendirilirken ISRM (1981) tarafından önerilen arazi değerlendirme ölçütleri dikkate alınmıştır. Arazi ve bitki örtüsü verileri, 16 Ekim 2001 tarihinde çekilen Landsat 7 ETM+ görüntüsü kullanılarak elde edilmiş olup görüntüye ait görünür ışık bantları 1:25.000 ölçekli topoğrafik harita baz alınarak 0.5526 piksel doğruluğunda jeo-

referanslanmıştır. Bu değer, tolere edilebilir maksimum Ortalama Karekök Hata (RMSE) değeri olarak bilinmektedir (Jensen, 2000). Jeoreferanslanan bantlar, Yapay Sinir Ağı Yöntemi (Huang ve Jensen, 1997) kullanılarak %94.77 Kappa doğruluk indeksi değeri ile sınıflandırılmış ve arazi örtüsü verisi elde edilmiştir. Aynı görüntünün Kıızıl Ötesi (KÖ) ve Kırmızı bantları ile normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (NBÖİ) algoritması (Gupta, 2003) kullanılarak da bitki örtüsü yoğunluk verisi üretilmiştir. 1:25.000 ölçekli topoğrafik harita üzerinden drenaj hatları sayısallaştırılmış, sayısallaştırılan veri ArcGIS 8.2 (ESRI, 2002) yazılımı kullanılarak drenaj hattı yoğunluk haritası elde edilmiştir. Benzer şekilde, gerek arazi gözlemleriyle, gerekse 15 m yersel çözünürlüklü Aster uydusunun görünür kıızıl ötesi bantlarından elde edilen kompozit görüntüler kullanılarak inceleme alanında belirlenen çizgisellikler sayısallaştırılmış ve bu veriden çizgisellik yoğunluk haritası elde edilmiştir.



Şekil 5. İnceleme alanına ait sayısal yükseklik modeli (SYM).

Figure 5. Digital elevation model of the study area.



## Verilerin Bulanık Küme Üyelik Derecelendirmesine Göre Standartlaştırılması

Çalışmanın bu aşamasında, duyarlılık değerlendirmesi yapılan faktörlerin standart puanlara dönüştürülmesi amacıyla her bir faktöre ait kural oluşturulması hedeflenmiştir. Kural tabanlı bir bulanık modelde anlam çıkarmak için sonuç çıkarıcı bir fonksiyona ihtiyaç vardır. Bu fonksiyon “eğer-o zaman (if-then)” veya bir bulanık durum ifadesi olarak adlandırılmaktadır (Alvarez Grima, 2000). Bulanık bir küme, bir üye çiftleri kümesi olup, bu üyeler için “güven” veya “dayanak”ın derecelerinden oluşmaktadır. “Yaklaşık 7” kavramı için bir bulanık küme örneği (0.1/5, 0.7/6, 1/7, 0.7/8, 0.1/9) olarak ifade edilebilir. Bir bulanık küme notasyonunda bölüm (/) işaretinden sonra gelen üyeler kümenin üyeleri, bölme işaretinden önce gelen sayılar ise kümeye ait üyelerin o kümeye aitlik derecelerini ifade etmektedir. Dilsel terimleri ifade etmek için bulanık kümelerin kullanımı, söz konusu şeyin tutarlı ve daha doğru bir şekilde ifade edilmesini sağlamaktadır (Juang vd., 1992). Değerleri kelimeler, ifadeler veya cümleler olan dilsel değişkenler, bulanık bir kümenin etiketleri olarak kabul edilmektedir (Zadeh, 1973). Bu noktadan hareketle, heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanılan parametrelerin bulanık mantık yöntemiyle bulanıklaştırılarak standart bir tip veri oluşturulması amaçlanmıştır. Bu aşamada, duyarlılık analizinde kullanılan eğim, yamaç yönelimi, ayrışma, jeoloji, bitki örtüsü, arazi örtüsü, drenaj yoğunluğu, drenaj ağlarına yakınlık, akarsu güç indeksi ve topoğrafik nemlilik indeksi parametrelerinin her biri için heyelana en çok ve en az duyarlı oldukları değerleri dikkate alınarak bir kural oluşturulmuştur. Bu kurallar oluşturulurken, her bir parametre grubu için heyelan oluşum frekansı değerleri ve arazi gözlemleri dikkate alınmıştır.

Bu kurallarda göz önünde bulundurulmuş ifadeler aşağıdaki biçimde düzenlenmiştir.

### *Kural 1 (Eğim faktörü için)*

1. Eğer yamaç eğimi düşük ( $3^{\circ}$ ) veya orta derecede dikse ( $15^{\circ}$ ), heyelan duyarlılığı düşüktür.
2. Eğer yamaç eğimi yüksekse ( $>15^{\circ}$ ) heyelan duyarlılığı yüksektir.

### *Kural 2 (Yamaç Yönelim faktörü için)*

1. Eğer yamaçlar Kuzeybatı'ya eğimli ise heyelan duyarlılığı yüksektir.
2. Eğer yamaçlar Kuzeybatı'ya doğru eğimli değilse heyelan duyarlılığı düşüktür.

Burada yamaç yönelimlerinin kuzeybatıya alınmasındaki amaç, inceleme alanındaki yıllık en fazla hakim yağış ve rüzgar alım yönünün kuzey batı olmasıdır.

### *Kural 3 (Ayrışma faktörü için)*

1. Eğer kayaların ayrışma derecesi çok düşükse heyelan duyarlılığı çok düşüktür.
2. Eğer kayaların ayrışma dereceleri orta, yüksek ve çok yüksekse heyelan duyarlılığı yüksektir.

### *Kural 4 (Bitki yoğunluk faktörü için)*

1. Eğer bitki yoğunluğu yüksek ise heyelan duyarlılığı düşüktür.

## Akgün ve Türk

2. Eğer bitki yoğunluğu düşükse ve tamamen örtüsüz bir arazi ise heyelan duyarlılığı yüksektir.

*Kural 5 (Drenaj yoğunluk faktörü için)*

1. Eğer drenaj yoğunluğu düşükse heyelan duyarlılığı düşüktür.
2. Eğer drenaj yoğunluğu yüksekse, heyelan duyarlılığı yüksektir.

*Kural 6 (Drenaj hatlarına uzaklık faktörü için)*

1. Eğer drenaj hatlarına uzaklık 50 metreden fazla ise heyelan duyarlılığı düşüktür.
2. Eğer drenaj hatlarına olan mesafe 50 metreden az ise heyelan duyarlılığı yüksektir.

*Kural 7 (Jeoloji faktörü için)*

1. Eğer litolojik birimler, konglomera, aglomera, silisifiye tuf, metamorfik, trakiandezit ve güncel çökeller ise heyelan duyarlılığı düşüktür.
2. Eğer litolojik birimler andezit, bazalt ve bazaltik andezit, tuf ve göl sel tortulları ise heyelan duyarlılığı yüksektir.

Burada kural oluşturulurken güncel heyelan oluşumlarının en çok hangi birimler içerisinde yer aldığı dikkate alınmıştır.

*Kural 8 (Arazi örtüsü faktörü için)*

1. Arazi örtüsü örtülü, tarım ve zeytin tarımı yapıyorsa, sulak alansa ve su kütlesi bulunuyorsa heyelan duyarlılığı düşüktür.

2. Arazi örtüsüz ve yerleşim alanı ise heyelan duyarlılığı yüksektir.

*Kural 9 (Akarsu güç indeksi faktörü için)*

1. Akarsu güç indeksi değeri düşükse heyelan duyarlılığı düşüktür.
2. Akarsu güç indeksi değeri yüksekse heyelan duyarlılığı yüksektir.

Yukarıda verilen kurallar ışığında her bir parametre haritası için bulanıklaştırma kuralları oluşturulduktan sonra hangi bulanık küme fonksiyonun seçilmesi gerektiği konusu gündeme gelmiştir. Bu amaçla, sigmoidal ve kullanıcı tanımlı üyelik fonksiyon türleri kullanılmış (Akgün ve Türk, 2010) ve heyelana neden olan parametre haritaları 0-1 arasında bir ölçekte standart puanlara dönüştürülmüştür.

**Yöntemler****İki Değişkenli İstatistik Değerlendirmesi**

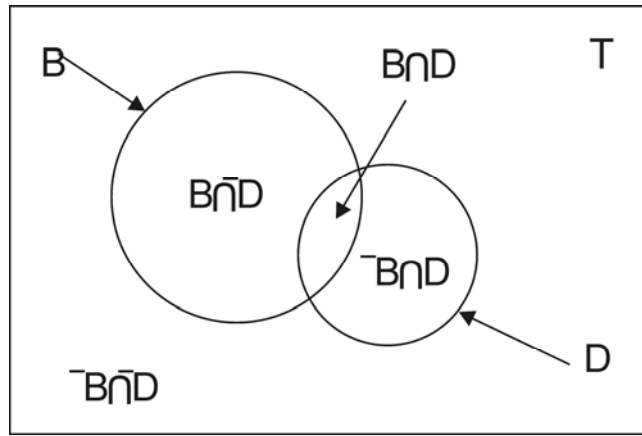
Genel olarak, heyelanların oluşumunu tahmin etmek için geçmişte, heyelana neden olduğu düşünülen faktörlerden dolayı meydana gelmiş bir heyelanın, gelecekte aynı faktörlerden dolayı yeni heyelanların meydana gelmesi konusuna ışık tutacağı kuralı temel alınmaktadır (Chung ve Fabbri, 1999). Bu yaklaşıma bağlı olarak, heyelanın meydana geldiği alanlar ile bu alanlardaki heyelana neden olan faktörler arasındaki ilişki, geçmişte heyelan olmamış alanlar ile heyelana neden olan faktörler arasındaki ilişkilerden ayırt edilebilir (Lee vd., 2004). Sayısal olarak bu ayrımı göstermek için sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisi de olasılık-benzerlik oranı yöntemidir. Bu oran, belirli bir doğal olayın meydana gelmesinin,

aynı olayın meydana gelmemesine oranının olasılığını ifade etmektedir (Bonham-Carter, 1996). Söz konusu doğal olayın heyelan olması durumunda, eğer heyelan olma olayını D ve heyelan neden olduğu düşünülen parametreleri de T olarak gruplandırırsak, D'deki olasılık-benzerlik oranı, şartlı olasılık olacaktır. (Eşitlik 1 ve Eşitlik 2).

$$P\{D|B\} = P\{D \cap B\} / P\{B\} = P\{D\} * P\{B|D\} / P\{B\} \quad (1)$$

$$P\{D|\bar{B}\} = P\{D \cap \bar{B}\} / P\{\bar{B}\} = P\{D\} * P\{\bar{B}|D\} / P\{\bar{B}\} \quad (2)$$

Burada  $P\{D\}$ , D olayının meydana gelme olasılığını,  $P\{B\}$  söz konusu olayı denetleyen deseni göstermektedir. Benzerlik oranını bir Venn diyagramı üzerinde Şekil 6'da gösterildiği gibi ifade etmek de mümkündür.



Şekil 6. Benzerlik oranını ifade eden Venn diyagramı (T: Tüm alan, B: Denetleyici desen var,  $\bar{B}$ : Denetleyici desen yok, D: Heyelan olayı var,  $\bar{D}$ : Heyelan olayı yok).

Figure 6. Venn diagram to show the likelihood ratio (T: Total area, B: Conditioning pattern present,  $\bar{B}$ : Conditioning parameter absent, D: Landslide occurrence present,  $\bar{D}$ : Landslide occurrence absent).

Eğer benzerlik oranı 1'den büyük olursa, heyelan ve heyelana neden olan parametre arasındaki ilişki o kadar yüksek, tersine, 1'den ne kadar küçük olursa bu ilişki o kadar düşük olacaktır. Bu yaklaşımdan hareketle, olasılık-benzerlik oranı değerlerini hesaplamak için mevcut heyelan verileri ve ilgili parametre ilişkileri kullanılarak bir olasılık çizelgesi hazırlanmıştır (Çizelge 2). Benzerlik oranı yönteminde izlenen işlem adımlarına ait bir iş akım şeması Şekil 7'de verilmektedir.

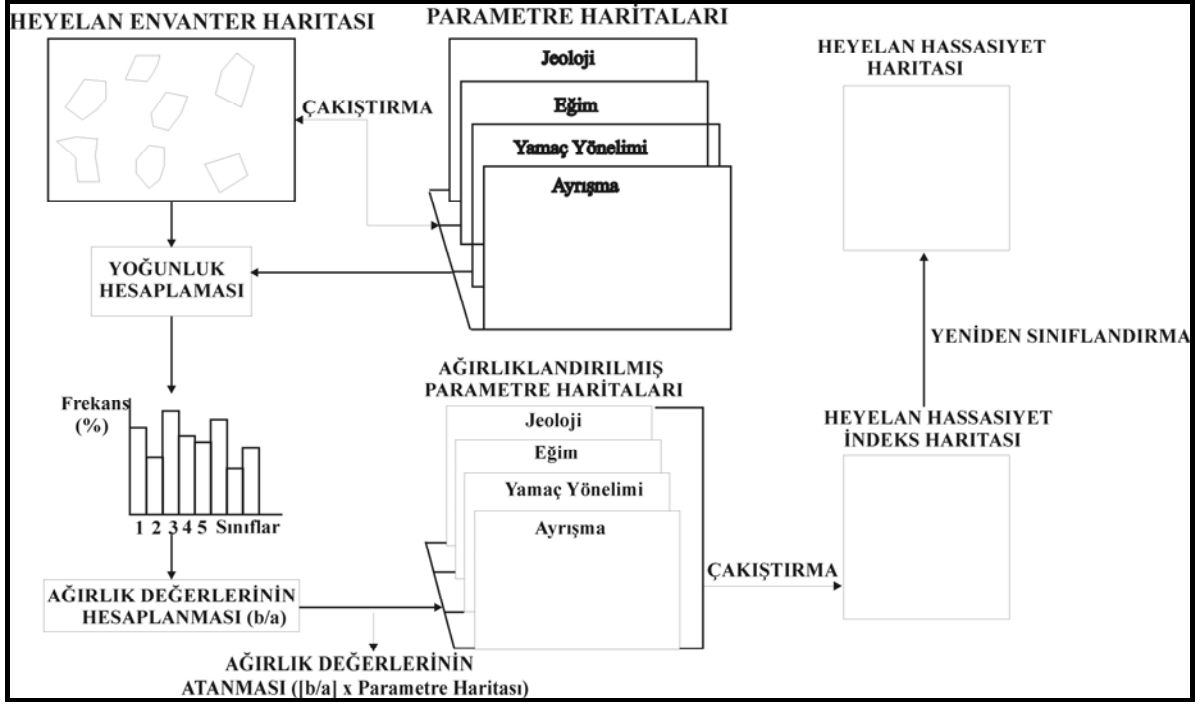
Çizelge 2'de, her bir parametreye ait alt parametre sınıfındaki piksel sayıları ve bunların yüzde değerleri (a) ve bu alt parametre alt

sınıflarında meydana gelen heyelanlı alanlara ait piksel sayıları ve bunların yüzde değerleri (b) hesaplanarak, elde edilen a ve b değerlerinden olasılık-benzerlik oranı  $[(b/a)]$  oranları hesaplanmıştır. Elde edilen bu olasılık-benzerlik değerlerine göre her bir parametre haritası yeniden sınıflandırılmış ve yeniden sınıflandırılan parametre haritaları birbirleri ile toplanarak bir heyelan duyarlılık indeks haritası elde edilmiştir. Bu harita, heyelan duyarlılık durumunun daha kolay yorumlanabilmesi için eşit aralık yöntemiyle yeniden sınıflandırılmış ve sonuçta çok düşük duyarlılık derecesinden, çok yüksek duyarlılık derecesine kadar beş heyelan duyarlılık sınıfı ayırt edilmiştir (Şekil 8). Bu

Akgün ve Türk

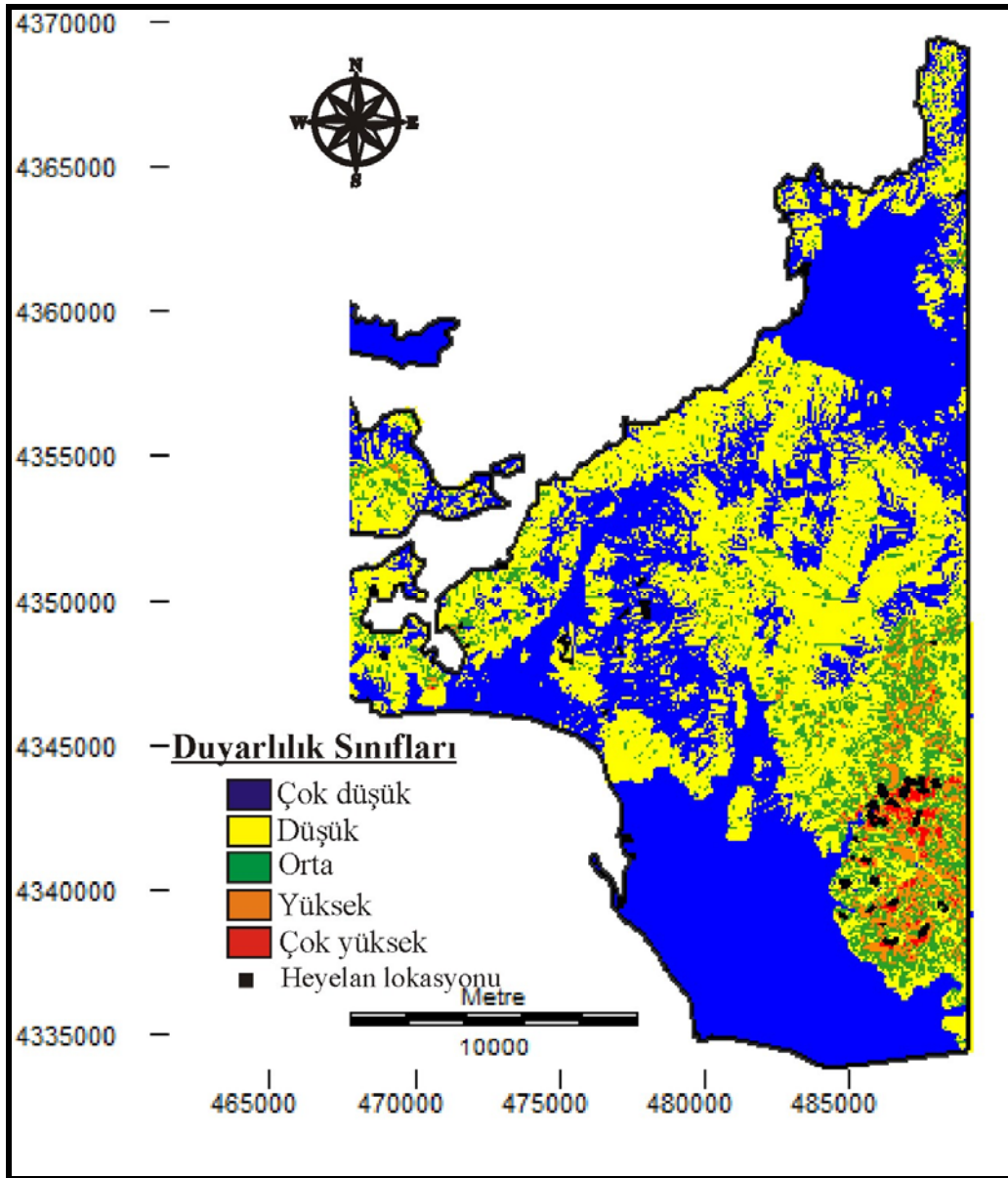
duyarlılık haritasına göre inceleme alanının % 34.27'si çok düşük duyarlılık, % 52.44'ü düşük duyarlılık, % 9.84'ü orta derece duyarlılık, %

2.73'ü yüksek duyarlılık ve % 0.72'si ise çok yüksek duyarlılık sınıfında olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Benzerlik Oranı yönteminde izlenen iş akım şeması.

Şekil 7. Flow chart followed for the likelihood ratio model.



Şekil 8. İki değişkenli istatistik yöntemle elde edilen heyelan duyarlılık haritası.

Figure 8. Landslide susceptibility map obtained from bivariate statistical model.

Çizelge 2. Olasılık-benzerlik oranı değerleri ve hesaplamada kullanılan parametre ilişkileri.

Table 2. Relationships between the likelihood-frequency ratio values and considered parameters.

PARAMETRE	DEĞER	HEYELANSIZ ALAN		HEYELANLI ALAN		(b/a)
		PİKSEL SAYISI	ORAN (%) <sup>(a)</sup>	PİKSEL SAYISI	ORAN (%) <sup>(b)</sup>	
Eğim (°)	0-10	340165	87.36	646	39.12	0.44
	10-20	38985	10.01	357	21.26	2.15
	20-30	8679	2.22	481	29.13	13.12
	30-40	1077	0.27	166	10.05	37.22
	40-50	154	0.03	1	0.06	2
	>50	290	0.07	0	0	0
	Yamaç Yönelimi (°)	0	29842	7.66	0	0
0-45		31104	7.98	112	6.78	0.85
45-90		25164	6.46	77	4.66	0.72
90-135		25860	6.64	130	7.87	1.18
135-180		36762	9.44	299	18.11	1.91
180-225		58518	15.02	413	25.01	1.66
225-270		73729	18.93	242	14.65	0.77
270-315		63380	16.27	219	13.26	0.81
315-360		44991	11.55	159	9.63	0.83
Litoloji		Alüvyon	102011	26.2	0	0
	Tüf	36851	9.46	79	4.78	0.5
	Andezit	48465	12.44	417	25.25	2.02
	Silisifiye Tüf	582	0.14	0	0	0
	Gösel Tortullar	151021	38.78	353	21.38	0.55
	Bazalt	41963	10.77	655	39.67	3.68
	Konglomera	3112	0.79	20	1.21	1.53
	Aglomera	3689	0.94	127	7.69	8.18
	Metasedimanter-Metavolkanik	1541	0.39	0	0	0
	Trakiandezit	115	0.02	0	0	0

Çizelge 2. Devamı.

Table 2. Continued.

PARAMETRE	DEĞER	HEYELANSIZ ALAN		HEYELANLI ALAN		a/b
		PİKSEL SAYISI	ORAN(%) <sup>(a)</sup>	PİKSEL SAYISI	ORAN(%) <sup>(b)</sup>	
Ayrışma	Taze	1518	0.38	9	0.54	1.42
	Az Ayrışmış	20376	5.23	470	28.46	5.44
	Orta Derece	10694	2.74	18	1.09	0.39
	Ayrışmış					
	Yüksek Derece	74361	19.09	750	45.42	2.37
	Ayrışmış					
	Tamamen Ayrışmış	145338	37.32	389	23.56	0.63
	Alüvyon Zemin	137063	35.2	15	0.9	0.02
Bitki Yoğunluğu	Örtüsüz	157516	40.45	611	37	0.91
	Çok Az	129623	33.29	469	28.4	0.85
	Az	85238	21.89	545	33.01	1.5
	Yüksek	15806	4.05	26	1.57	0.38
	Çok Yüksek	1167	0.29	0	0	0
Drenaj Yoğunluğu	Az	222065	57.03	529	32.04	0.56
	Orta	117323	30.13	380	23.01	0.76
	Yüksek	49962	12.83	742	44.94	3.5
Drenaj Hatlarına Uzaklık (m)	0-100	58320	14.97	458	27.74	1.85
	100-200	49802	12.79	414	25.07	1.96
	200-300	44213	11.35	260	15.74	1.38
	300-400	37235	9.56	94	5.69	0.59
	>400	199780	51.31	425	25.74	0.5
Arazi Örtüsü	Yerleşim+Örtüsüz	195854	50.3	674	40.82	0.81
	Arazi					
	Örtüsüz Arazi	101082	25.96	416	25.19	0.97
	Örtülü Arazi	52975	13.6	468	28.34	2.08
	Sulak Alan	2063	0.52	12	0.72	1.38
	Tarım Arazisi	16490	4.23	25	1.51	0.35
	Su Kütlesi (Deniz+Göl)	2910	0.74	0	0	0
	Zeytin Tarım Arazisi	17979	4.61	56	3.39	0.73

Akgün ve Türk

Çizelge 2. Devamı.

Table 2. Continued.

PARAMETRE	DEĞER	HEYELANSIZ ALAN		HEYELANLI ALAN		a/b
		PİKSEL SAYISI	ORAN(%) <sup>(a)</sup>	PİKSEL SAYISI	ORAN(%) <sup>(b)</sup>	
Akarsu Güç İndeksi	0-10	246418	63.28	420	25.43	0.4
	10-20	61349	15.75	351	21.25	1.34
	20-30	26170	6.72	152	9.2	1.36
	30-40	13015	3.34	111	6.72	2.01
	40-50	7885	2.02	87	5.26	2.6
	50-60	5304	1.36	68	4.11	3.02
	60-70	3873	0.99	51	3.08	3.11
	70-80	2933	0.75	52	3.14	4.18
	80-90	2339	0.6	62	3.75	6.25
	90-100	20064	5.15	297	17.98	3.49
Topoğrafik Islaklık İndeksi	1-4	3389	0.87	136	8.23	9.45
	4-8	211825	54.4	1379	83.52	1.53
	8-12	157839	40.53	128	7.75	0.19
	12-16	15455	3.96	8	0.48	0.12
	16-20	833	0.21	0	0	0
	20-24	9	0.002	0	0	0



## Çok Değişkenli İstatistik Değerlendirmesi

İnceleme alanına ait heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanılan ikinci yöntem, çok değişkenli istatistik yöntemlerden olan mantıksal regresyondur. Mantıksal regresyon, bağımlı bir değişken ile incelenen olayın (heyelan, erozyon, çığ düşmesi vb. gibi) olasılık durumunu etkileyebilecek bağımsız birden fazla değişken arasında çok değişkenli bir regresyon ilişkisi oluşturmaya imkan tanıyan bir yöntemdir. Lee ve Min, (2001), Atkinson ve Masari, (1998), ve Dai vd. (2001)'e göre, incelenen değişken ikili bir çıktıya (1 ve 0 gibi) sahipse, tahmin edici değişkensiz en iyi yöntem mantıksal regresyondur. Mantıksal regresyonun başarısının değerlendirilmesi ile ilgili değişik yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlardan birisi ikili, sıralı veya çok sayıda kategorik veri içeren bağımsız değişkenin doğru ya da yanlış sınıflandırılıp sınıflandırılmadığını gösteren sınıflandırma tablosunun kullanılmasıdır (Afifi ve Clark, 1998). Menard (1995) mantıksal regresyon modelinin veri setine ne kadar uygun olup olmadığını belirlemek amacıyla  $1 - (\ln L / \ln L_0)$  değerinden hesaplanan psödo  $R^2$  değeri kullanmayı önermiştir. Psödo  $R^2$  değeri 1'e eşit olması mükemmel bir uyumu, 0'a eşit olması ise hiç bir ilişki olmadığını göstermektedir. Psödo  $R^2$ 'nin 0.2'den büyük olması durumu göreceli olarak iyi bir uyumu ifade etmektedir (Clark ve Hoskin, 1986). Bu yöntemlere alternatif bir yaklaşım da elde edilen modelin gerçek anlamda bağımlı değişkeni nasıl tahmin ettiği'dir. Bu durum, "Göreceli Çalıştırma Karakteristiği (Relative Operating Characteristic (ROC))" yöntemi ile de yorumlanmaktadır. Bu yöntem, Boolean formatında olan "heyelan var/yok" haritası ile olasılık haritasını karşılaştırmaktadır. ROC değeri 0.5 ile 1 arasında değişmekte olup 1 değeri mükemmel uyumu, 0.5 ise rastgele bir uyumu işaret etmektedir (Ayalew ve Yamagishi,

2005). Bu çalışmada mantıksal regresyon metoduyla elde edilen heyelan duyarlılık haritasının performansının test edilmesinde de psödo  $R^2$  ve ROC değerleri kullanılmıştır. Bu kapsamda, ilk adımda, heyelan envanter haritası olarak hazırlanan ve mantıksal regresyon işleminde bağımsız değişken olarak yer alan veri girilmiştir. Daha sonra, heyelan gelişimine katkıda bulunduğu düşünülen jeolojik, jeomorfolojik ve ayrışma derecesi olarak tanımlanan bağımlı değişkenler girdi veri olarak tanıtılmıştır. Kontrol parametreleri olarak, tabakalandırılmış rastgele örnekleme yöntemi seçilmiş ve örnekleme oranı %10 olarak alınmıştır (Eastman, 2004). İşlem sonucunda iki tür veri elde edilmiştir. Birincisi, heyelan duyarlılık tahmin değerlerinin gösterildiği olasılık verisi, ikincisi ise mantıksal regresyon sırasında elde edilen istatistiksel veri gruplarıdır (Çizelge 4). Bu işlemler sonucunda elde edilen regresyon denklemi de aşağıda verilmiştir:

$$\text{logit(heyelan)} = -8.3514 - 0.003681 * YY - 0.004523 * A + 0.009711 * BY + 0.001479 * DHU + 0.001067 * DY + 0.014592 * YE + 0.005673 * JE - 0.000781 * AÖ + 0.002566 * AGİ \quad (3)$$

Burada YY: Yamaç yönelimi, A: Ayrışma, BY: Bitki yoğunluğu, DHU: Drenaj hatlarına uzaklık, DY: Drenaj yoğunluğu, YE: Yamaç eğimi, JE: Jeoloji, AÖ: Arazi örtüsü ve AGİ: Akarsu güç indeksi kavramlarını ifade etmektedir.

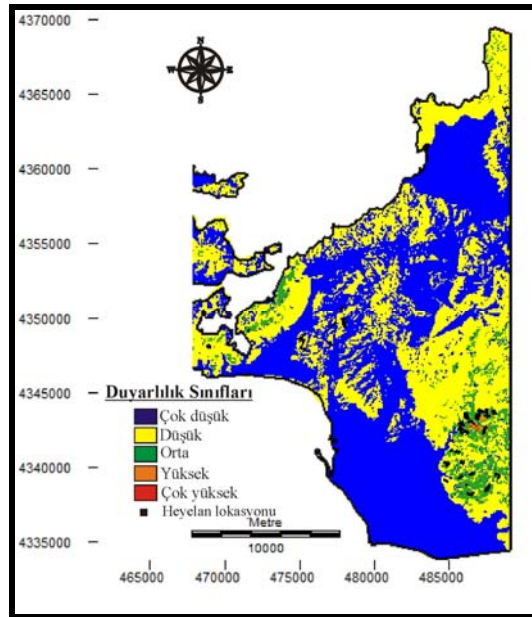
Eşitlik 3'te yer alan bağımsız değişkenlere ait katsayılar, ait oldukları bağımsız değişkenin, heyelan gelişimindeki görece ağırlık değerini ifade etmektedir.

Çizelge 3'te verilen değerlere bakıldığında bu çalışma için ROC değeri 84.57 (%) olarak

belirlenmiştir. Bu değer 0.5'ten, diğer bir ifadeyle % 50'den büyük ve 1'e yakın olduğu için elde edilen heyelan duyarlılık haritalamasının başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Mantıksal regresyon yöntemiyle olasılık haritasının elde edilmesinden sonra da bu haritanın anlamlandırılması ve heyelan duyarlılık derecelerinin verilmesi amacıyla yeniden sınıflandırılması gerekmektedir. Sürekli değerlerden oluşan bu tür verilerin sınıflandırılması amacıyla literatürde araştırmacılar değişik yöntemler önermişlerdir (Sturges, 1926; Emerson ve Hoaglin, 1983; Scott, 1992). Süzen (2002), bu yöntemlerin büyük çoğunluğunun bazı olumsuz tarafları olduğunu belirtmiş, bunları gidermek amacıyla kullanılan parametrelerin her birinin kaynak hücrelerinin persantillerini (yüzdeler) kullanarak yeniden sınıflandırma yöntemini önermiştir. Guzzetti vd. (1999), Lee ve Min (2001),

Ohlmacher ve Davis (2003) ve Ayalew ve Yamagishi (2005) de bu amaçla değişik yöntemler önermiş, bu yöntemlerde doğal kırılım, kantil (seri ayracı), eşit aralık ve standart sapmaya bağlı yöntemler kullanmıştır. Standart sapma yöntemi, sınıf eşik değerlerini oluşturmak için ortalamayı kullanarak olasılık haritasını duyarlılık değerlerine bölmeyi mümkün kılmaktadır (Ayalew ve Yamagishi, 2005). Bu çalışmada eşit aralık yaklaşımı kullanılarak yeniden sınıflandırma yapılmış ve lojistik regresyon yöntemiyle belirlenen heyelan olasılık haritası, heyelan duyarlılık haritasına dönüştürülmüştür (Şekil 9).

Üretilen heyelan duyarlılık haritasına bakıldığında, inceleme alanının % 13'ünün çok düşük, % 36'sının düşük, % 43'ünün orta, % 6'sının yüksek ve % 2'sinin çok yüksek heyelan duyarlılığına sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9. Çok değişkenli istatistik yöntemle elde edilen heyelan duyarlılık haritası.

Figure 9. Landslide susceptibility map obtained from multivariate statistical model.

Çizelge 3. Mantıksal regresyon istatistik sonuçları.

Table 3. Statistical results of the logistic regression.

İstatistik Sonuçları	
Toplam Gözlem Sayısı	389350
İnceleme Alanındaki 0 sayısı	387699
İnceleme Alanındaki 1 sayısı	1651
İnceleme Alanındaki 0 Yüzdesi	99.5760
İnceleme Alanındaki 1 Yüzdesi	0.4240
Otomatik Gözlemlenmiş Örneklem Sayısı	38847
Örneklem Alanındaki 0 Sayısı	38694
Örneklem Alanındaki 1 sayısı	153
Örneklem Alanındaki 0 Yüzdesi	99.6061
Örneklem Alanındaki 1 Yüzdesi	0.3939
-2logL0	1999.7023
-2log(benzerlik)	1540.4105
Psödo R <sup>2</sup>	0.2297
Uyum İyiliği	43302.9414
Model Ki-kare	459.2917
ROC (Göreceli Çalıştırma Karakteristiği) (%)	84.57

### Sezgisel Tabanlı Yöntem Değerlendirmesi

Sezgisel tabanlı değerlendirme yöntemi olarak Analitik Hiyerarşi İşlemi (AHI) olarak bilinen yöntem kullanılmıştır (Malczewski, 1999). Bu yöntem, bir oran matrisi oluşturmak için ikili karşılaştırmaları kullanmaktadır (Malczewski, 1999; Eastman, 2004). Yöntem, girdi veri olarak ikili karşılaştırmaları alır ve çıktı olarak bunların göreceli ağırlıklarını üretir. İkili karşılaştırma yöntemi üç temel adımı içermektedir. Bunlar: a) İkili karşılaştırma matrisinin geliştirilmesi, b) Parametre ağırlıkların hesaplanması ve c) Tutarlılık oranının tahmin edilmesidir. Bu bilgiler ışığında, heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanılan parametrelerin ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuş (Çizelge 4), her bir parametreye ait ağırlık değeri hesaplanmış (Akgün, 2006; Akgün ve Türk, 2010) ve elde edilen ağırlık değerinin

tutarlılık oranı aşağıda verilen eşitlik 4 ve eşitlik 5 kullanılarak belirlenmiştir.

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

Burada CR tutarlılık oranı, RI ise rastgelelik indeksidir ve karşılaştırılan elemanların sayısına bağlıdır. Eğer,  $CR < 0.10$  ise, ikili karşılaştırmadaki tutarlılığın kabul edilebilir bir seviyede olduğu söylenebilir. Buna karşın şayet  $CR > 0.10$  ise, oran değerleri tutarsız hükümlerin verildiğini işaret etmektedir (Saaty, 1980; Malczewski, 1999). CI değeri ise aşağıda verilen eşitlik kullanılarak belirlenmektedir:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n-1) \quad (5)$$

Burada CI; tutarlılık indisini,  $\lambda_{\max}$  karar matrisinin en büyük özvektörünü, n matrisin derecesini, CI ise tutarlılıktan sapmanın ölçüsünü göstermektedir (Saaty, 1980).

## Akgün ve Türk

Bu çalışmada oluşturulan ikili karşılaştırma matrisinin ve hesaplanan parametre ağırlık değerlerinin mantıklı ve tutarlı olup olmadığının ölçütü olan “Tutarlılık Oranı” (CR) değeri 0.04 olarak hesaplanmış (Çizelge 4), bu değer literatürde de belirtildiği üzere 0.1’den küçük olması nedeniyle üretilen matrisin ve hesaplanmış ağırlık değerlerinin tutarlı olduğu görülmüştür. Elde edilen ağırlık değerleri, heyelana neden olduğu düşünülen parametre haritaları ile çarpılmış ve böylece ağırlıklandırılmış parametre olarak isimlendirilen veri seti elde edilmiştir. Elde edilen

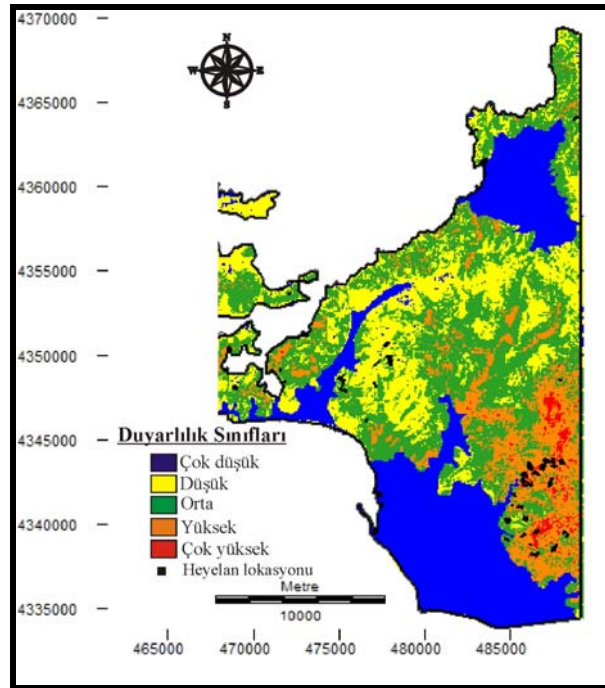
ağırlıklandırılmış parametre haritaları üst üste toplanmış ve bir heyelan duyarlılık indeks haritası elde edilmiştir. Elde edilen bu indeks haritası, iki ve çok değişkenli istatistik değerlendirmelerinde elde edilen heyelan duyarlılık indeks haritaları gibi eşit aralık yöntemi kullanılarak yeniden sınıflandırılmış ve heyelan duyarlılık haritası elde edilmiştir (Şekil 10). Üretilen bu haritaya göre, inceleme alanının % 54.20’sinin çok düşük, % 24.64’ünün düşük, % 15.97’sinin orta, % 4.74’ünün yüksek ve % 0.45’inin ise çok düşük duyarlılığa sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4. Heyelan duyarlılık analizi için “Analitik Hiyerarşi” yöntemiyle hesaplanan parametre ağırlık değerleri ve tutarlılık oranı (CR: Tutarlılık Oranı, AGİ: Akarsu Güç İndeksi, TNİ: Topoğrafik Nemlilik İndeksi).

Table 4. Parameter weight values, calculated by “Analytical Hierarchy” method, and consistency ratio for landslide susceptibility analysis (CR: Consistency ration, SPI: Stream Power Index, TWI: Topographical Wetness Index).

Parametre	Yamaç Yönelimi	Ayrışma	Bitki Örtüsü	Drenaj Yoğunluğu	Drenaj Hatlarına Uzaklık	Eğim	Litoloji	Arazi Örtüsü	AGİ	TNİ	Ağırlık Değerleri
Yamaç Yönelimi	1										0.0348
Ayrışma	5	1									0.1716
Bitki Örtüsü	1/3	1/5	1								0.0296
Drenaj Yoğunluğu	2	1/3	2	1							0.0472
Drenaj Hatlarına Uzaklık	2	1/3	2	2	1						0.0501
Eğim	7	3	6	4	5	1					0.2840
Litoloji	5	1/2	4	3	4	1/3	1				0.1424
Arazi Örtüsü	2	1/3	2	2	2	1/6	1/3	1			0.0595
AGİ	3	1/3	3	2	3	1/3	1/2	2	1		0.0991
TNİ	3	1/2	2	2	2	1/3	1/2	2	2	1	0.0818

T.O = 0.04 < 0.1



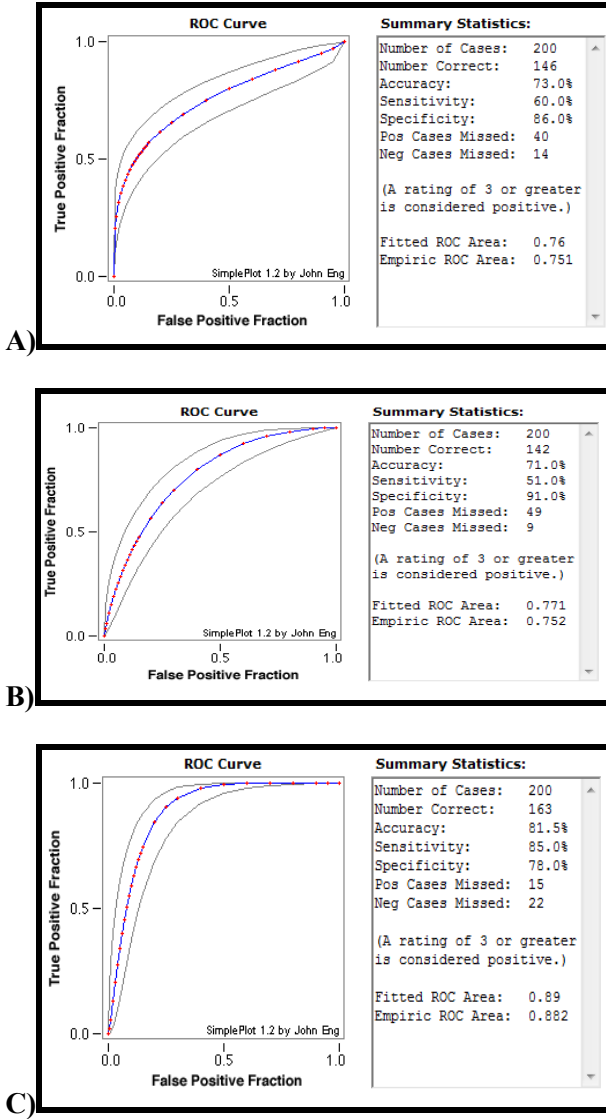
Şekil 10. Sezgisel tabanlı Analitik Hiyerarşi İşlemine göre üretilen heyelan duyarlılık haritası.

Figure 10. Landslide susceptibility map obtained from heuristic based Analytical Hierarchy Process.

### ÜRETİLEN DUYARLILIK HARİTALARININ DOĞRULUK DEĞERLENDİRMESİ

Bu çalışmada, doğruluk değerlendirmesi amacıyla seçilen heyelan envanter verisi üretilen heyelan duyarlılık haritalarının doğruluğunu test etmek için kullanılmıştır. Bu amaçla, İşlem Karakteristik Eğrisi (ROC) altında kalan alan (EAA) yöntemi kullanılmıştır (Lee, 2005). EAA yöntemi, bir olayın meydana gelme ya da gelmeme durumunu güvenli bir biçimde tahmin etme yeteneğini tanımlayarak oluşturulan modelin kalitesini ifade etmektedir (Yeşilnacar ve Topal, 2005; Nandi ve Shakoor, 2009; Yılmaz, 2010). İdeal model, EAA değerinin 1'e yakın olduğu durumu gösterirken, 0.5'e yakın bir değer, söz konusu modelin doğruluğunun oldukça az olduğunu işaret etmektedir (Fawcett,

2006). EAA yöntemini inceleme alanında uygulamak amacıyla, heyelan oluşmuş ve heyelan oluşmamış alanlardan rastgele seçilen pikseller kullanılarak hazırlanmış temsil edici bir veri seti kullanılmıştır. Bu işlem sonucuna göre, ROC eğrisinin altında kalan alan iki değişkenli istatistik bazlı heyelan duyarlılık haritası için 0.76, çok değişkenli istatistik tabanlı heyelan duyarlılık haritası için 0.77 ve sezgisel yaklaşıma dayalı Analitik Hiyerarşi İşlemi sonucu elde edilen duyarlılık haritası için 0.89 olarak belirlenmiştir (Şekil 11). Bu değerlere göre her üç haritanın doğruluk performanslarının kabul edilebilir seviyede olduğu, buna karşın diğerlerine göre en iyi performansın ise AHİ yöntemi ile elde edildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 11. Üretilen heyelan duyarlılık haritalarının doğruluk değerlendirmesinde kullanılan AUC eğrileri ve istatistik sonuçları (A: İki değişkenli istatistik yöntem sonucu, B: Çok değişkenli istatistik yöntem sonucu, C: Sezgisel tabanlı yöntem sonucu)

Figure 11. AUC curves used for validation of produced landslide susceptibility maps and the statistical results (A: Bivariate statistical model result, B: Multivariate statistical model result, C: Heuristic based model result).

## TARTIŞMALAR VE SONUÇLAR

Günümüze kadar yapılan heyelan duyarlılık analizi çalışmalarında, genel olarak değerlendirme yöntemlerinden birisi seçilmiş ve benzer sayı ve nitelikteki girdi verileri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan farklı olarak, birden fazla yöntem kullanılarak, bu yöntemlerin etkinliği ve performansı açısından karşılaştırma yapılmış olan çalışmalar da son yıllarda yaygınlaşmıştır (Süzen, 2002; Ercanoğlu, 2002; Lee, 2005; Ayalew vd., 2005; Akgün ve Bulut, 2007; Akgün vd., 2008; Yalçın, 2008; Yılmaz, 2009; Yılmaz, 2010). Bu çalışma kapsamında da, literatürde önerilmiş olan veriye dayalı istatistik yöntem ile uzman görüşüne dayalı sayısal analiz yöntemleri karşılaştırılmış ve bu yöntemlerin uygulamadaki sınırlamaları da tanımlamaya çalışılmıştır. İlk olarak istatistiksel analiz yöntemlerinden, çok değişkenli istatistik yöntemlerinden biri olan mantıksal regresyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile heyelan duyarlılık haritası üretimi üzerine son 5 yılda birçok çalışma yapılmış olması, bu yöntemin etkinliği açısından önemlidir. Ancak uygulama aşamasında, birtakım sorunlarla karşılaşılması da mümkündür. Örneğin, mantıksal regresyon yönteminde, bağımsız değişkenlere ait sınıfların seçiminde tartışma yarattığı için, kullanılan bağımsız değişkenlerin sürekli veriler olması istenmesine karşın Atkinson ve Massari (1998), Dai vd. (2001), Lee (2005), Ayalew vd. (2005), Akgün ve Bulut (2007), Kıncal vd. (2009) kategorik verilerin de mantıksal regresyon analizinde kullanılabilmesini göstermiştir. Bu çalışma sırasında, mantıksal regresyon analizinde kullanılan parametreler genellikle bulanık matematikte kullanılan üyelik dereceleri kullanılarak standartlaştırılmış ve veriler sürekli hale dönüştürülmüştür. Bir diğer önemli sorun, mantıksal regresyon sırasında gerçekleştirilen örnekleme veya kontrol spesifikasyonlarının

uygulanmasıdır. King ve Zeng (2001), olağan mantıksal regresyon yönteminin, (1) olayının, (0) olayına göre çok az sayıda yer aldığı durumlarda olasılık değerinin net bir şekilde tahmin edilemediğini ifade etmiştir. Bu durum, literatürde “nadir olay (rare event)” olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında da aynı sorun ile karşılaşmıştır. Çünkü 424 km<sup>2</sup> olan inceleme alanının 389350 piksel ile ifade edilmesine karşılık, heyelanlı alanlar (diğer bir ifadeyle 1 durumu) sadece 1651 piksel ile ifade edilmektedir ki bu durumda 0/1 oranı oldukça yüksektir ve nadir olay durumuna örnek teşkil etmektedir. Eechaut vd. (2006) yaptıkları çalışmada, söz konusu bu sorunun giderilmesi için veri setinin, King ve Zeng (2001) tarafından önerilen seviyelendirilmiş örnekleme (stratified sampling) yöntemiyle düzeltilmesini önermişlerdir. Bu yaklaşımda, temsil edici örneklemede eşit sayıda heyelanlı ve heyelansız piksel seçilmesi yerine, 1 heyelanlı piksele karşılık 5 heyelansız piksel seçilmesini, diğer bir ifadeyle % 20 örnekleme oranını önermiştir. Bu çalışma kapsamında da tabakalandırılmış örnekleme yöntemi kullanılmış ve örnekleme oranı olarak daha duyarlı bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla % 10 oranı seçilmiştir. Mantıksal regresyon ile heyelan duyarlılık analizinde benzer soruna Çan vd. (2005)'in yaptığı çalışmada da değinilmiştir. Bu çalışmada, sığ derinlikli akma zonlarının bölgesel ölçekte (1/25.000) haritalanması mümkün olmadığından, harita üzerine nokta ile işaret edildiği, bundan dolayı akma alanlarının, akma olmayan alanlara göre çok az sayıda piksel ile ifade edilmesini zorunlu kıldığını belirtmiştir. Bu sorunun çözümü için farklı 0/1 oranlarını seçmiş, dikkate aldığı her bir oran için farklı duyarlılık haritaları üretmiş ve elde ettiği bu haritaların performans analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu analizlerde, duyarlılık haritalarının yüksek doğruluk performansı göstermesini ve en az duyarlılıktan

en yüksek duyarlılığa kadar tüm akma duyarlılığı sınıflarını içermesini karar kuralı olarak seçmiştir. İkinci yöntem olarak iki değişkenli istatistik yöntemlerinden olan benzerlik oranı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, heyelan duyarlılık analizi için dikkate alınan parametrelere ait her bir alt parametre sınıfı ile heyelan lokasyonları karşılaştırılmış ve her bir sınıfa ait heyelan meydana gelme olasılık değeri hesaplanmıştır. Her bir sınıf için hesaplanan olasılık değerlerinin toplanması ile o sınıfların ait olduğu ana parametrelerin de ağırlık değeri elde edilmiş olmaktadır (Lee ve Min, 2001). Bu yöntem, öznel karar verme durumunu ortadan kaldırdığı için heyelan duyarlılık analizinde uygun bir yöntem olarak görülmektedir (Süzen ve Doyuran, 2004; Lee vd., 2004; Lee, 2005, Akgün vd., 2008; Yılmaz, 2009). Ancak, Süzen (2002), bazı parametre ağırlık değerlerinin, diğerlerine göre çok daha yüksek çıkması durumu söz konusu olabileceği için, parametre harita değerlendirmelerinin duyarlı bir şekilde yapılması gerektiğine dikkat çekmiştir. Üçüncü yöntem olarak, uzman görüşünün göreceli olarak daha baskın olduğu, sezgisel bir yöntem olan Analitik Hiyerarşi İşlemi (AHİ) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ilk aşamada, uzman görüşüne dayalı olmasından dolayı öznel kararların verildiği ve dolayısıyla heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanım açısından sakıncalı bir yöntem olarak düşünülebilir. Ancak AHİ yöntemi, kullanmış olduğu matematiksel ilişkiler nedeniyle yöntemin olası öznelliğinin ortadan kalkmasına olanak sağlamaktadır. Analitik hiyerarşi için oluşturulan ikili parametre karşılaştırma gruplarının birbirlerine göre önem derecelerinin verilmesi, ayrıntılı bir arazi gözlemi ile heyelan ve ilgili parametre arasındaki ilişkilerin de fiziksel olarak iyi tanımlanmış olmasını gerektirmektedir. Özellikle AHİ yöntemi uygulanarak yapılan heyelan duyarlılık haritalaması ile ilgili çalışmalarda bu konunun

öneminin vurgulanmamış olduğu da görülmektedir. Dolayısıyla bu yöntemin, istatistiksel bir başka yöntem ile birlikte kullanılmasının daha yararlı olabileceği açıktır.

Bu tartışmalar ışığında, Ayvalık ve yakın çevresinin heyelan duyarlılığı, üç farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiş, elde edilen üç farklı duyarlılık haritasından hangisinin en başarılı şekilde olasılık tahmininde bulunduğu incelenmiştir. Bu çerçevede elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1. Ayvalık ve yakın çevresinde meydana gelmiş olan 45 adet heyelan lokasyonunda yapılan ayrıntılı arazi gözlemleri, 1999-2001 ve 2004 yıllarına ait uydu görüntüleri yardımıyla da haritalanmış ve coğrafi bilgi sistemleri ortamında depolanmıştır. Tanımlanan heyelanların % 70'ten fazlası dairesel ve düzlemsel kayma şeklinde olup kayan malzemenin, çok-tamamen ayrıışmış veya aglomera türü, zayıf çimentolu litolojiler içinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Kalan kısım ise yine orta-yüksek derece ayrıışmış litolojiler içinde meydana gelmiş kaya düşmesi ve devrilme şeklinde yenilmelerdir.

2. İnceleme alanı için heyelanların oluşmasında tetikleyici ana faktörlerin yüzey suları (yağış) ve sismisite olduğu, heyelana neden olan diğer faktörlerin ise kayalarda gözlenen etkin ayrıışma, topoğrafik eğim ve kontrolsüz arazi kullanımı (antropojenik etkiler) olduğu belirlenmiştir.

3. İki değişkenli istatistik yaklaşım ile üretilen heyelan duyarlılık haritasına göre inceleme alanının % 34.27'si çok düşük, % 52.44'ü düşük, % 9.84'ü orta, % 2.73'ü yüksek ve % 0.72'si çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında bulunmaktadır.

4. Çok değişkenli istatistiksel analiz yöntemi olarak kullanılan "Mantıksal Regresyon" yöntemi sonucuna göre, inceleme alanının % 13'ü çok düşük, % 36'sı düşük, % 43'ü orta, % 6'sı yüksek ve % 2'si çok yüksek heyelan duyarlılığına sahiptir. Orta, yüksek ve çok yüksek heyelan duyarlılığı olan alanların, inceleme alanının güneydoğusundaki andezit, bazalt, trakiandezit, riyodasit lav ve piroklastik kayalarını içeren alanlar içerisinde yoğunlaştıkları gözlenmektedir. Bu alanların, aynı zamanda süreksizlik hatlarının ve drenaj dokusunun yoğun olduğu alanlarla örtüştüğü de görülmektedir.

5. Sezgisel yöntem olarak uzman görüşüne dayalı sayısal analiz yöntemi olan "Analitik Hiyerarşi İşlemi"ne göre inceleme alanının % 54.20'si çok düşük, % 24.64'ü düşük, % 15.97'si orta, % 4.74'ü yüksek ve % 0.45'i ise çok düşük duyarlılığa sahiptir.

6. Üç değişik yöntem ile elde edilen heyelan duyarlılık haritalarının birbirleriyle olan uyumları ve arazide gözlenen heyelan lokasyonları ile uyumları karşılaştırılmıştır. Buna göre oluşturulan üç heyelan duyarlılık haritasındaki orta, yüksek ve çok yüksek duyarlı alanların, güncel heyelan lokasyonları ile uyumlu oldukları, dolayısıyla üretilen heyelan duyarlılık haritalarının başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Kullanılan yöntemlerin başarı sıralaması ise güncel saha koşullarını yansıtan en uyumlu sonuçtan başlamak üzere Analitik Hiyerarşi İşlemi, mantıksal regresyon ve benzerlik-frekans oranı yöntemi olarak tespit edilmiştir.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü, Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 02. KB.FEN.052 numaralı proje ile



desteklenmiştir. Yazarlar, makalenin ilk nüshasının düzeltilmesinde değerli katkıları bulunan Prof. Dr. Işık Yılmaz'a ve diğer anonim hakeme teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- Affifi, A.A., Clark, V., 1998. Computer aided multivariate analysis. Chapman-Hall, London, 455p.
- Akgün, A., 2006. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında Çok Ölçütlü Karar Analizi (ÇÖKA) yönteminin kullanımı: Ayvalık (Balıkesir) Örneği. *Geosound*, 48-49, 87-101.
- Akgün, A., Bulut, F., 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environmental Geology*, 51, 1377-1387.
- Akgün, A., Türk, N., 2010. Landslide susceptibility mapping for Ayvalık (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis. *Environmental Earth Sciences*, 61 (3), 595-611.
- Akgün, A., Dağ, S., Bulut, F., 2008. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54, 1127-1143.
- Akyürek, B., 1989. 1:100.000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi: Ayvalık G 3 Paftası. M.T.A. Genel Müd. Yayınları.
- Alvarez Grima, M., 2000. Neuro-fuzzy Modelling in Engineering Geology. Balkema, Rotterdam, 244 p.
- Atkinson, P.M., Massari, R., 1998. Generalized linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Appennines, Italy. *Computers and Geoscience*, 24 (4), 373-385.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65, 15-31.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., Kanno, T., 2005. Landslide in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparison of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81, 432-445.
- Baeza, C., Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1251-1263.
- Bonham-Carter, G.F., 1996. *Geographic Information Systems for Geoscientists, Modelling with GIS*. Pergamon Press, Canada, 398p.
- Castellanos Abella, E.A., Van Westen, C.J., 2007. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides*, 4, 311-325.
- Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 65, 341-411.
- Chen, C.H., Ke, C.C., Wang, C.L., 2009. A back-propagation network for the assessment of susceptibility to rock slope failure in the eastern portion of the Southern Cross-Island Highway in Taiwan. *Environmental Geology*, 57, 723-733.
- Chung, C.F., Fabbri, A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65 (12), 1388-1399.
- Clark, W.A.V., Hoskin, P.L., 1986. *Statistical Methods for Geographers*. New York: John Wiley and Sons, 528p.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P., 2006. A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environmental Geology*, 50, 941-961.

- Crozier, M.J., 1986. Landslides: Causes, Consequences and Environment. Croom Helm, London, 245p.
- Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Duman, T.Y., 2005. Susceptibility assessment of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three subcatchments by logistic regression analyses. *Geomorphology*, 72, 250–271.
- Çevik, E., Topal, T., 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology*, 44, 949–962.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Xu, Z.W., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40 (3), 381-391.
- Eastman, J.R., 2004. IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs, Clark University, Worcester, USA, 328p.
- Eechaut, M.V.D., Vanwallegem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Vandekerckhove, L., 2006. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76, 392-410.
- Emerson, J.D., Hoaglin, D.C., 1983. Stem and leaf displays. In: *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. Hoaglin, D.C., Mosstelier, F. and Tukey, J.W., Wiley and Sons, New York.
- Ercanoğlu, M., Gökçeoğlu, C., 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology*, 41, 720–730.
- Ermimi, L., Filippo, C., Casagli, N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66, 327-343.
- ESRI, 2002. Getting to start ArcGIS. ESRI Books, USA, 250p.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27, 861-874.
- Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Nefeslioğlu, H.A., Duman, T.Y., Çan, T., 2005. The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity. *Engineering Geology*, 81, 65-83
- Gupta, R.P., 2003. *Remote Sensing Geology*, 2nd edition. Springer, Berlin, 655p.
- Guzetti, F., Carrarra, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multiscale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, 181-216.
- Huang, X., Jensen, R., 1997. A machine-learning approach to automated knowledge-base building for remote sensing image analysis with GIS data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, 1185–1194.
- ISRM, 1981. Rock characterization, testing and monitoring—ISRM suggested methods. Brown E.T. (ed.). Pergamon Press, Oxford. 211p.
- Jensen, J.R., 2000. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, Inc., 319p.
- Juang C.H., Lee, D.H., Sheu, C., 1992. Mapping slope failure potential using fuzzy sets. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118, 475–494.
- Kıncal, C., Akgün, A., Koca, M.Y., 2009. Landslide susceptibility assessment in the Izmir (West Anatolia, Turkey) city center and its near vicinity by the logistic regression method. *Environmental Earth Sciences*, 59, 745-756.
- King, G., Zeng, L., 2001. Logistic regression in rare events data. *Political Analysis*, 9, 137-163.
- Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology*, 74, 17-28.

- Lamelas, M.T., Marinoni, O., Hoppe, A., Riva, J., 2008. Doline probability map using logistic regression and GIS technology in the central Ebro Basin (Spain). *Environmental Geology*, 54, 963–977.
- Lee, S., 2005. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1477-1491.
- Lee, S., Min, K., 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40, 1095-1113.
- Lee, S., Dan, N.T., 2005. Probabilistic landslide susceptibility mapping in the Lai Chau province of Vietnam: focus on the relationship between tectonic fractures and landslides. *Environmental Geology*, 48, 778–787.
- Lee S, Sambath, T., 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology*, 50, 847–855.
- Lee, S., Pradhan, B., 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia, using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4, 33–41.
- Lee, S., Choi, J., Min, K., 2004. Landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2037-2052.
- Malczewski, J., 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. USA, 392p.
- Menard, S., 1995. *Applied Logistic Regression Analysis*. Sage university paper series o quantitative applications in social sciences, vol. 106. Thousand Oaks, California, 98p.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30.
- Nandi, A., Shakoor, A., 2009. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses, *Engineering Geology*, 110, 11–20.
- Nefeslioğlu, H.A., Duman, T.Y., Durmaz, S., 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology*, 94(3–4), 401–418.
- Nefeslioğlu, H.A., Sezer, E., Gökçeoğlu, C., Bozkır, A.S., Duman, T.Y., 2010. Assessment of Landslide Susceptibility by Decision Trees in the Metropolitan Area of İstanbul, Turkey. *Mathematical Problems in engineering*, doi:10.1155/2010/901095.
- Ohlmacher, G.C., Davis, C. J., 2003. Using multiple regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69, 331-343.
- Pradhan, B., Lee, S., 2007. Utilization of optical remote sensing data and GIS tools for regional landslide hazard analysis by using an artificial neural network model at Selangor, Malaysia. *Earth Science Frontiers*, 14, 143–152.
- Saaty, T.L., 1980. *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw Hill, New York. 350p.
- Scott, D.W., 1992. *Multivariate Density Estimation*. John Wiley, New York, 90p.
- Soeters, R., van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition analysis and zonation. In: Turner K.T., Schuster, R.L. (eds.). *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board National Research Council, Special Report No: 247, Washington, DC, 129-177.
- Sturges, H.A., 1926. The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21, 65-66.
- Süzen, M.L., 2002. *Data Driven Landslide Hazard Assessment Using Geographical Information Systems and Remote Sensing*, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Science, Ankara.
- Süzen, M.L., Doyuran, V., 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment

- using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu Catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71, 303-321.
- Tunusluoğlu, M.C., Gokceoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., Sonmez, H., 2007. Extraction of potential debris source areas by logistic regression technique: a case study from Barla, Besparmak and Kapi mountains (NW Taurids, Turkey). *Environmental Geology*, 54, 9–22.
- van Westen, C.J., 1993. Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. ITC Publication no: 15. International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey, Enschede, The Netherlands, 245p.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds.), *Landslides Analysis and Control*. Special Report, vol. 176. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, New York, 12-33.
- Yalçın, A., 2008. GIS-based Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process and Bivariate Statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of Results and Confirmations. *Catena*, 72, 1-12.
- Yeşilnacar, E., Topal, T., 2005. Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, 79, 251-266.
- Yılmaz, I., 2009. A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by Artificial Neural Networks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68 (3), 297-306.
- Yılmaz, I., 2010. Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional Probability, Logistic Regression, Artificial Neural Networks, and Support Vector Machine. *Environmental Earth Sciences*, 61 (4), 821-836.
- Zadeh, L.A., 1973. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 3 (1), 28-46.