

HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ  
ÜRETİLMESİNDE PARAMETRE ETKİLERİNİN  
DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSMENT OF PARAMETER EFFECTS IN  
PRODUCING LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPS

**GÖKÇE DENİZ HASEKİOĞULLARI**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
JEOLJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak hazırlanmıştır.

2010

# HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ ÜRETİLMESİNDE PARAMETRE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

## ÖZ

Bu tez çalışmasında, heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan parametre etkilerinin araştırılması ve veriye dayalı bir parametre seçim yönteminin ortaya konulması amaçlanmıştır. Amaç doğrultusunda; ilk aşamada, Batı Karadeniz Bölgesi' nde seçilen yaklaşık 567 km<sup>2</sup>' lik bir alanın heyelan envanteri hazırlanmış ve 101 adet heyelan haritalanmıştır. Heyelan duyarlılığının değerlendirilmesi için yamaç eğimi, bakı, yamaç eğriselliği, topoğrafik yükseklik, bitki örtüsü, arazi kullanımı, akarsuya uzaklık, yollara uzaklık, yapısal unsurlara uzaklık, sırtlara uzaklık, akış gücü indeksi, sediman taşıma kapasitesi indeksi ve topoğrafik nemlilik indeksi olmak üzere 13 girdi parametresi dikkate alınmıştır. Değerlendirme yöntemi olarak temelde Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) seçilmiş olup, ayrıca parametre seçim yöntemine yönelik olarak benzerlik ilişki modeli temelli bir yaklaşım da dikkate alınarak, AHP' ye uyarlanmıştır. Klasik AHP uygulamasının yanı sıra, bu çalışmada önerilen yaklaşımla da AHP analizleri yapılmış, parametrik etki analizleri gerçekleştirilmiş ve heyelan duyarlılık haritaları üretilmiştir. Üretilen haritalar içerisinde en yüksek performansın klasik AHP ile elde edilmesine karşın, önerilen yaklaşımla da yüksek performanslar elde edilmiştir. Yapılan tüm değerlendirmelere göre, bu çalışmada önerilen AHP yaklaşımının kullanılabilir, nesnel ve veriye dayalı bir yolla da uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), benzerlik ilişki modeli, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS), heyelan duyarlılığı

**Danışman:** Doç. Dr. Murat Ercanoğlu, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı.

## **ASSESSMENT OF PARAMETER EFFECTS IN PRODUCING LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPS**

### **ABSTRACT**

In this study, investigation of the parameter effects in preparing landslide susceptibility maps and evaluation of a data-driven parameter selection method is aimed. For this purpose, at the first stage, landslide inventory of an area located in the Western Black Sea region covering approximately 567 km<sup>2</sup> was prepared and 101 landslides were mapped. In order to assess the landslide susceptibility, totally 13 parameters such as slope, aspect, curvature, topographical elevation, vegetation cover index, land-use, distance to drainage, distance to roads, distance to lineaments, distance to ridges, stream power index, sediment transport capacity index and topographical wetness index were considered as the input parameters. However Analytic Hierarchy Process (AHP) was selected as the major assessment methodology, a similarity relation model based approach for parameter selection method, which was adapted to AHP, was also considered. Along with the conventional AHP application, AHP analyses were also performed by the proposed approach in this study, and parametric effect analyses were carried out and landslide susceptibility maps were produced. Despite the fact that the best performance was gathered from the classical AHP method among the all produced maps, high performance results were also obtained from the proposed approach. Based on the overall assessments, the proposed AHP approach in this study was concluded as utilizable, objective and also applicable in a data-driven way.

**Key Words:** Analytical Hierarchy Process (AHP), similarity relation model, Geographical Information System (GIS), landslide susceptibility,

**Advisor:** Assoc. Prof. Dr.. Murat Ercanoğlu, Hacettepe University, Faculty of Engineering, Geological Engineering Department Applied Geology Division.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince çalışmalarına yön veren, ilgi ve desteğini esirgemeyen ve tezimin şekillenmesinde büyük emeği geçen tez danışmanım Doç.Dr. Murat Ercanoğlu'na,

Saha çalışmaları sırasındaki yardımlarından ötürü Jeoloji Mühendisi Ahmet Temiz, Prof.Dr. Kadir Dirik, Doç.Dr. Ergün Tuncay, Dr. Erman Özsayın, Jeoloji Yüksek Mühendisi Özgü Kaşmer ve Jeoloji Mühendisi Beliz Aksoy'a,

Tez çalışması için yapmış oldukları önerilerden ötürü jüri üyelerine ve Yrd.Doç.Dr. Celal Tunusluoğlu'na,

Çalışmamın gerçekleştirilmesinde maddi destek sağlayan TÜBİTAK (Proje No: 108Y034)'a,

Çalışmanın her aşamasında, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, gösterdikleri sabır ve katkılardan dolayı değerli aileme ve Melih Çetingöz'e,

İÇTEN TEŞEKKÜRLERİMİ SUNARIM.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZ .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Çalışma Alanının Tanıtımı .....	3
1.2. Çalışma Alanının Bölgesel Jeolojik Özellikleri .....	3
1.2.1. Jeolojik Evrim .....	3
1.2.2. Genel Jeolojik Özellikler .....	5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	8
2.1. Jeolojik Parametreler .....	9
2.1.1. Litoloji .....	9
2.1.2. Yapısal Unsurlara İlişkin Özellikler .....	10
2.1.3. Malzeme Özellikleri .....	12
2.1.4. Toprak Kalınlığı .....	13
2.1.5. Bozunma Durumu .....	14
2.1.6. Süreksizliklerin Yamaçla Olan İlişkisi .....	15
2.1.7. Hidrojeolojik Özellikler .....	15
2.1.8. Yağış .....	16
2.1.9. Erozyon Durumu .....	17
2.1.10. Su Durumu ve Yeraltısuyu .....	17
2.2. Topoğrafik Parametreler .....	18
2.2.1. Yamaç Eğimi .....	18
2.2.2. Bakı .....	21
2.2.3. Yükseklik .....	23
2.2.4. Yamaç Geometrisi .....	25
2.2.5. Akarsular ile İlgili Özellikler .....	27
2.2.6. Topoğrafik İndeksler .....	28
2.2.7. Jeomorfolojik Özellikler .....	31
2.2.8. Havza Özellikleri .....	31
2.3. Çevresel Parametreler .....	32
2.3.1. Arazi Kullanımı .....	33
2.3.2. Bitkilere İlişkin Özellikler .....	34
2.3.3. İnsan Etkisi .....	37
3. HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ ÜRETİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER .....	38
3.1. Temel Kavramlar .....	38
3.2. Heyelan Duyarlılık Değerlendirmelerinde Kullanılan Yöntemler .....	39
4. HEYELAN ENVANTERİ VE KULLANILAN PARAMETRELER .....	42
4.1. Heyelan Envanteri .....	42
4.2. Heyelan Değerlendirmelerinde Kullanılan Parametreler .....	45

4.2.1. Yamaç Eğimi .....	46
4.2.2. Bakı .....	48
4.2.3. Yamaç Eğriselliği.....	50
4.2.4. Topoğrafik Yükseklik .....	51
4.2.5. Bitki Örtüsü.....	53
4.2.6. Arazi Kullanımı .....	56
4.2.7. Akarsuya Uzaklık .....	57
4.2.8. Yollara Uzaklık .....	59
4.2.9. Yapısal Unsurlara Uzaklık.....	61
4.2.10 Sırtlara Uzaklık.....	63
4.2.11 Akış Gücü İndeksi .....	65
4.2.12 Sediman Taşıma Kapasitesi İndeksi .....	67
4.2.13 Topoğrafik Nemlilik İndeksi .....	69
5. PARAMETRE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ OLUŞTURULMASI .....	71
5.1. AHP Yöntemine İlişkin Genel Bilgiler ve Kavramlar .....	71
5.2. AHP Yöntemi Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritalarının Oluşturulması .....	79
5.3. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Performans Değerlendirmeleri.....	96
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	101
7. YARARLANILAN KAYNAKLAR.....	103
EK 1. Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde kullanılan parametreler ve ait oldukları bilimsel çalışmalar	
EK 2. Parametrelerin Ağırlık Değerleri	
EK 3. Duyarlılık Haritaları	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.....	4
Şekil 1.2. Çalışma alanının genel jeoloji haritası (Yergök vd., 1987) .....	6
Şekil 2.1. Çalışmalarda dikkate alınan parametreler ve kullanım oranları.....	8
Şekil 2.2. Jeolojik parametrelerin dağılımı. ....	9
Şekil 2.3. Topoğrafik parametrelerin dağılımı. ....	18
Şekil 2.4. Çevresel parametrelerin dağılımı. ....	33
Şekil 2.5. Doğal yamaçların duraylılığını etkileyen yamaç-bitki etkileşimleri (Greenway, 1987' den). ....	35
Şekil 3.1. Heyelan özelliklerini tanımlayan terminoloji (Varnes, 1978; Cornforth, 2005' den). ....	38
Şekil 3.2. Heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanılan yöntemler.....	40
Şekil 4.1. Çalışma alanının heyelan envanter haritası. ....	43
Şekil 4.2. Çalışma alanındaki heyelan türlerinin dağılımı.....	44
Şekil 4.3. Çalışma alanındaki heyelan türlerinden bir görünüm: (a) toprak akması ve (b) dairesel kayma.....	44
Şekil 4.4. Çalışma alanının yamaç eğimi haritası.....	47
Şekil 4.5. Çalışma alanının bakı haritası.....	49
Şekil 4.6. Çalışma alanının planimetrik yamaç eğriselliği haritası.....	51
Şekil 4.7. Çalışma alanının yükseklik haritası. ....	53
Şekil 4.8. Çalışma alanının NDVI haritası. ....	55
Şekil 4.9. Çalışma alanının arazi kullanımı haritası.....	57
Şekil 4.10. Çalışma alanının akarsuya uzaklık haritası.....	59
Şekil 4.11. Çalışma alanının yola uzaklık haritası. ....	61
Şekil 4.12. Çalışma alanının yapısal unsurlara uzaklık haritası. ....	63
Şekil 4.13. Çalışma alanının sırtlara uzaklık haritası.....	65
Şekil 4.14. Çalışma alanının akış gücü indeksi haritası. ....	67
Şekil 4.15. Çalışma alanının sediman taşıma kapasitesi indeksi haritası. ....	68
Şekil 4.16. Çalışma alanının topoğrafik nemlilik indeksi haritası.....	70
Şekil 5.1. Basit bir hiyerarşi modeli (Yaralıoğlu, 1999) .....	72
Şekil 5.2 Heyelanlı alanlara karşılık gelen piksel değerlerinin bulunmasının iş- akış diyagramı.....	80
Şekil 5.3. MMY modülünün iş-akış diyagramı. ....	86
Şekil 5.4. 9 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası.....	91
Şekil 5.5. 9 parametre kullanılarak üretilen sınıflandırılmış heyelan duyarlılık haritası. ....	92
Şekil 5.7 G8 AHP modeli ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası.....	94
Şekil 5.8 Sınıflandırılmış G8 AHP modeli heyelan duyarlılık haritası. ....	95
Şekil 5.9. Parametrelerin CR değerleri.....	96
Şekil 5.10. 9 parametreden oluşan duyarlılık haritasının performansı. ....	99
Şekil 5.11. G8 duyarlılık haritasının performansı. ....	100

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Doğal afet türlerine göre yıkılan konut sayısı (Özmen vd., 2005).....	1
Çizelge 5.1. AHP yönteminde önem dereceleri ve kavramsal tanımlamalar (Saaty, 1977 ve Saaty, 2008' den).....	74
Çizelge 5.2. RI değerleri (Yaralıoğlu, 1999). ....	77
Çizelge 5.3. Parametreler ve alt gruplarına ilişkin heyelanlı ve toplam piksel değerleri ile hesaplanmış FR ve NFR değerleri. ....	81
Çizelge 5.4. $r_{ij}$ katsayılarına karşılık gelen önem derecesi puanları. ....	87
Çizelge 5.5 Parametrelere ilişkin hesaplanan BİG değerleri. ....	88
Çizelge 5.6. 9 parametre kullanılarak yapılan AHP için oluşturulan karşılaştırma matrisi. ....	90
Çizelge 5.7. BİG değerlerine göre seçilen parametrelerin ağırlık değerleri (9 parametre kullanılarak). ....	90
Çizelge 5.8 AHP için oluşturulan karşılaştırma matrisi.....	93
Çizelge 5.9. G8 işleminde seçilen parametrelerin ağırlık değerleri. ....	93
Çizelge 5.10.Duyarlılık haritalarının AUC ve CR değerleri.....	98

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

AHP	Analytic Hierarchy Process (Analitik Hiyerarşi Süreci)
AUC	Area Under Curve (Eğri Altındaki Alan)
BİG	Benzerlik İlişki Göstergesi
CI	Consistency Index (Tutarlılık Göstergesi)
CR	Consistency Ratio (Tutarlılık Oranı)
Eş.	Eşitlik
FP	False Positive
FR	Frequency Ratio
HP	Parametre Sınıfının Heyelanlı Piksel Sayısı
LS	Sediman Taşıma Kapasitesi İndeksi
MTA	Maden Tetkik ve Arama
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NFR	Normalized Frequency Ratio (Normalize Edilmiş Frekans Oranı)
rij	Benzerlik İlişki Katsayısı
ROC	Relative Operating Characteristic
SCI	Science Citation Index
SPI	Akış Gücü İndeksi
TP	True Positive
TP	Parametre Sınıfının Toplam Piksel Sayısı
TWI	Topoğrafik Nemlilik İndeksi

## 1. GİRİŞ

Doğal afet, sosyo-ekonomik sistem üzerindeki değişkenlerin, doğa olayları sonucunda değişimi olarak tanımlanabilir (Alexander, 1993). Son yıllarda, dünyadaki nüfus yoğunluğunda meydana gelen artışa, hızlı ve plansız kentsel gelişmeye de bağlı olarak; doğal afetler sonucunda oluşan can ve mal kayıplarında önemli oranda artış meydana gelmiştir. Türkiye, gerek jeolojik özellikleri, gerekse topoğrafik yapısı ve iklimsel özellikleri nedeniyle, doğal afetlerin sıklıkla yaşandığı ülkelerden birisidir. Doğal afetler, neden oldukları can ve mal kayıplarının yanı sıra, ekonomik kayıplara da neden olabilmektedirler. Konuyla ilgili istatistikler incelendiğinde, doğal afetlerin her yıl, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, gayri safi milli hasılanın % 1' i oranında ekonomik kayba yol açtığı görülmektedir (Aleotti and Chowdhury, 1999). Ancak, doğrudan kayıpların yanında pazar kaybı, üretim kaybı, işsizlik gibi dolaylı ekonomik kayıplar da göz önünde bulundurulduğunda, toplam kaybın, daha büyük olacağı tahmin edilmektedir (Schuster, 1996). Ülkemiz, başta depremler olmak üzere, heyelan, taşkın ve çığ gibi doğal afetlerle, yoğun olarak karşı karşıya kalmaktadır. Bu durumu özetleyen bir değerlendirme, Türkiye' de doğal afetler nedeniyle zarar gören konutlar ile ilgili olarak Çizelge 1.1' de sunulmuştur.

Çizelge 1.1. Doğal afet türlerine göre yıkılan konut sayısı (Özmen vd., 2005).

<b>Doğal Afet Türü</b>	<b>Yıkılan Konut Sayısı</b>	<b>Yüzde (%)</b>
Deprem	495000	76
Heyelan	89500	14
Taşkın	61000	9
Çığ	5154	1
<b>TOPLAM</b>	<b>650,654</b>	<b>100</b>

Bu tez çalışmasına da temel teşkil eden heyelanlar sonucunda, can ve mal kayıplarının yanı sıra, ormanlık ve tarımsal alanlar, akarsular gibi çevresel unsurlar da zarar görerek, ekosistem üzerinde olumsuz yönde etkiler söz konusudur (Brown, 1983; Schuster and Fleming, 1986; Brand, 1989; Brabb,

1989; Kotarba, 1989; Schuster, 1996; Kato et al., 1997; Lee, 2000; Smyth and Royle, 2000; Dykes, 2002; Ayalew et al., 2005' den). Gelişmekte olan veya gelişmemiş ülkelerde, heyelanların neden olduğu zararlar, genellikle kaydedilen ve belirlenebilen zarardan daha fazladır. Bunun nedeni, heyelanların doğrudan belirlenebilen can ve mal kayıpları gibi zararlarının yanı sıra, bir çok dolaylı etkisinin de olmasıdır. Heyelanlardan etkilenen bölgelerde, tarım ve orman alanlarında meydana gelen üretim kayıpları, bu alanlardaki gayrimenkul değerlerinin düşmesi, vergi kayıpları, heyelanların önlenmesi ve zararlarının azaltılmasına yönelik çalışmalarla ilgili harcamalar ve iş gücü kayıpları gibi, belirlenmesi oldukça güç olan dolaylı etkiler, ülke ekonomilerine, doğrudan etkilere göre daha fazla zarar verebilmektedir (Schuster and Fleming, 1986; Rosenfeld, 1994; Alexander, 1995; Guzzetti et al., 2000' den). Bu duruma koşut olarak, heyelanlara ilişkin çalışmaların sayısında, özellikle son yıllarda önemli bir artış söz konusudur. Bu durumun temel nedeni olarak, heyelanlar ve sonuçlarının, sosyo-ekonomik açıdan verdiği zararların gerek toplum, gerekse karar vericiler ve yerel yönetimler tarafından yeterince anlaşılması, çevre üzerindeki etkisi ve kentsel gelişim ve planlamaların önemini kavranması şeklinde değerlendirilmektedir (Aleotti ve Chowdhury, 1999).

Yukarıda değinilen konular da dikkate alınarak gerçekleştirilen bu çalışmada, Türkiye' de heyelanların sıklıkla meydana geldiği Batı Karadeniz Bölgesi içerisinde yer alan bir alan seçilerek, heyelanlara neden olabileceği düşünülen parametrelerin, heyelan oluşumu üzerindeki etkilerinin ortaya konulması ve etkin olan parametrelerin seçilmesine yönelik bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, hazırlanan heyelan envanteri temel alınarak, parametre haritaları oluşturulmuş ve heyelan oluşumu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Analiz yöntemi olarak AHP (Analytic Hierarchy Process) yöntemi dikkate alınmış ve heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. Son aşamada ise, dikkate alınan parametrelerin ve bu parametreler kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritalarının performansları test edilmiştir.

## 1.1. Çalışma Alanının Tanıtımı

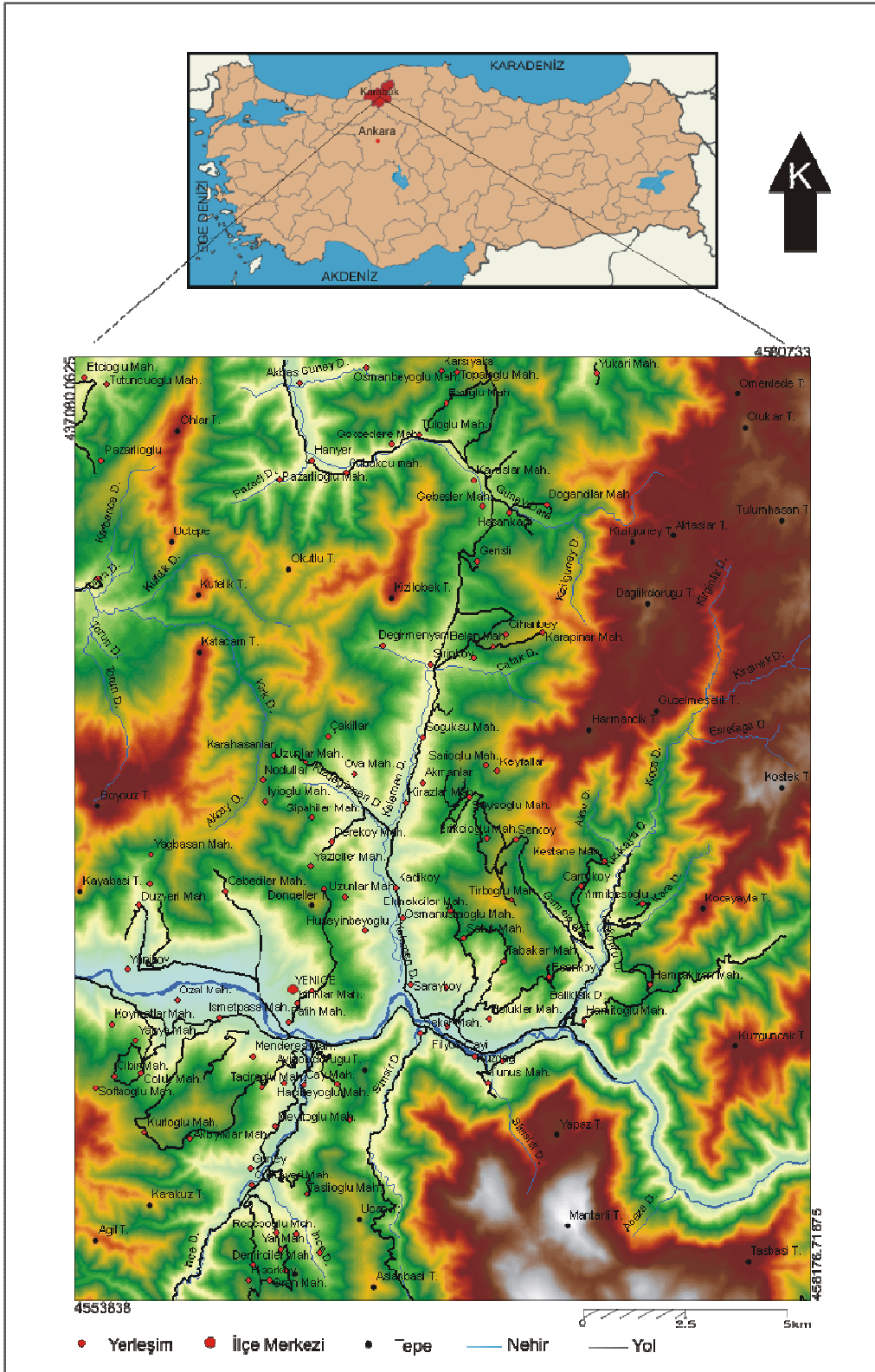
Çalışma alanı; Batı Karadeniz Bölgesi' nde Karabük ili sınırları içinde, 1/25.000 ölçekli Zonguldak F28-b4, Zonguldak F28-b3, Zonguldak F28-c1, Zonguldak F28-c2 paftaları içerisinde, 36. UTM zonunun N4553<sup>838</sup>-4580<sup>733</sup>/E437<sup>080</sup>-458<sup>176</sup> koordinatları arasında yer almakta ve yaklaşık olarak 567 km<sup>2</sup>' lik bir alanı kapsamaktadır.

Çalışma alanında yer alan en önemli yerleşim merkezi, Karabük ilinin Yenice ilçesi olup, bölgede kırsal bir yerleşim mevcuttur. Çalışma alanındaki önemli yükseltiler; Mantarlı Tepe (1736 m), Tarakçı Tepe (1714 m), Çal Tepe (1549.7 m) ve Dağlıkdoruğu Tepe (1358); önemli akarsular ise, Filyos Çayı, Güney Deresi ve İnce Dere' dir (Şekil 1.1). Çalışma alanında, tipik Karadeniz iklimi egemen olup, yıllık ortalama toplam yağış miktarı 518.2 mm' dir. (<http://meteor.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=KARABUK>)

## 1.2. Çalışma Alanının Bölgesel Jeolojik Özellikleri

### 1.2.1. Jeolojik Evrim

Çalışma alanının yer aldığı Batı Karadeniz Bölgesi; Paleotetis' in Triyas' ta kapanmasının ardından, Dogger boyunca bir sıkışma rejimi erkisi altında kalmıştır. Malm sırasında ise bölge sığ kalmış ve bu durum platform karbonatlarının çökmesine olanak sağlamıştır. Ulus havzası, Neotetis' in Geç Karboniferden Erken Permiyen' e kadar devam eden ve Avrasya ile Akdenizin doğusunu içeren açılması ile birlikte, Alt Kretase başında gelişmiştir. Alt Kretase sonunda Tetis Okyanusu' nun kuzey kolunun okyanusal kabuğunun Avrasya kıtası altına dalması ile birlikte Karadeniz oluşmuştur. Üst Kretase boyunca gelişen Neotetis' in kuzey kolunun kapanması sonucu oluşan yay tipi volkanizma, Anatolidler ve Pontidler arasında oldukça kalın bir örtü oluşturmuş, Anatolidler ve Pontidler kıta-kıta çarpışmasına maruz kalmışlardır. Kampaniyen-Maastrichtiyen arası bölgenin tektonik ve volkanik faaliyet açısından en aktif olduğu ve sıkışmalı yatay hareketler ile Çakraz, İnaltı, Kilimli, Ulus formasyonlarının su altı yüzeylenmesinin meydana geldiği dönemlerdir.

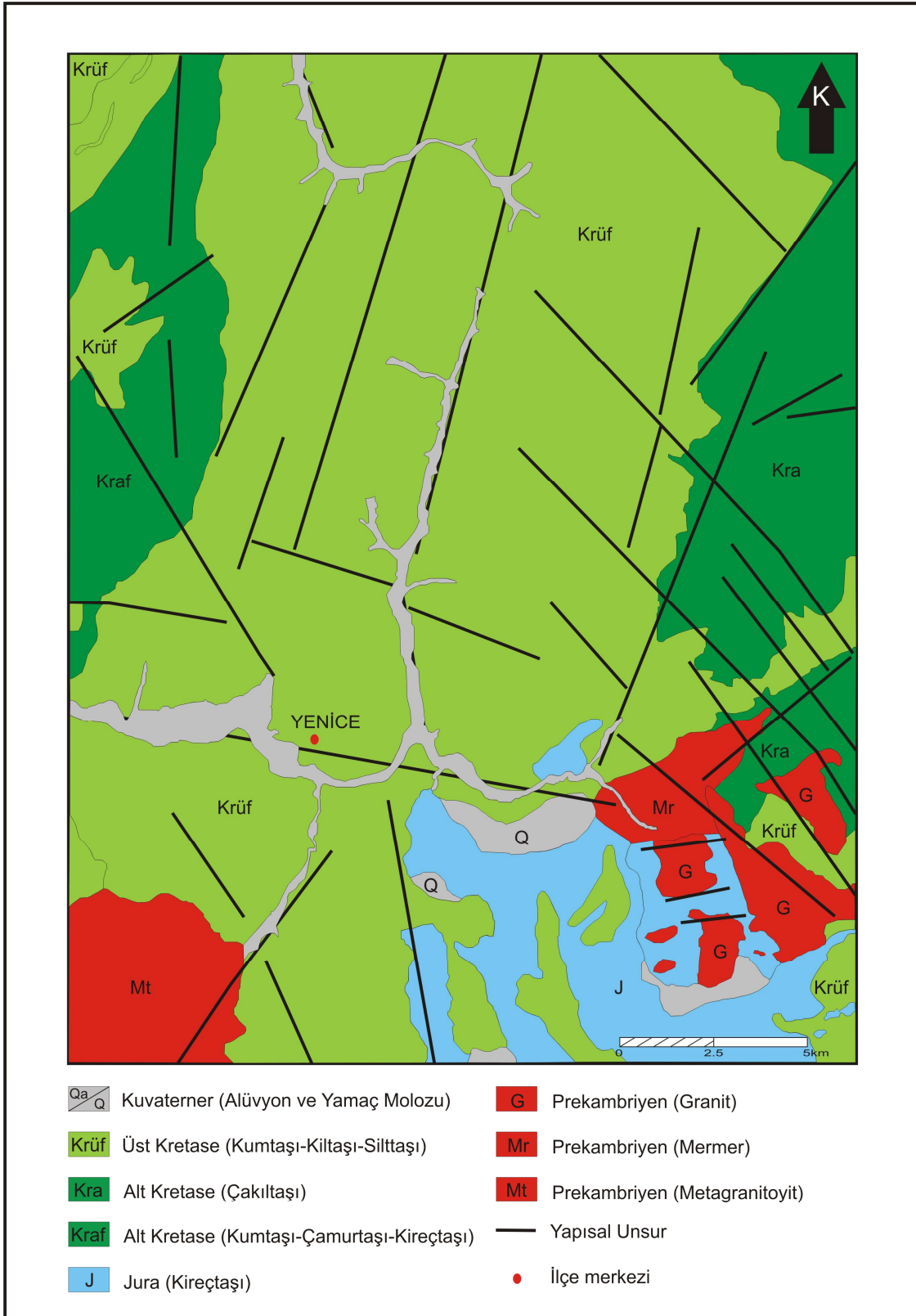


Şekil 1.1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.

Bölgenin tektonik olarak duraylılık kazandığı Maastrichtiyen döneminde, volkanitlere geçişli olarak Akveren formasyonunu pelajik-yarı pelajik kireçtaşları çökelmiştir. Bunun sonrasında Miyosen sırasında gelişen yatay hareketler, kabuk kalınlaşması ve faylanmaya neden olmuşlardır (Saner, 1980; Akbaş vd., 2002; Yüksel, 2007) .

### **1.2.2. Genel Jeolojik Özellikler**

Çalışma alanının genel jeolojik özellikleri, Şekil 1.2' de gösterilmiştir. Çalışma alanındaki en yaşlı birim, Dirgine Metagranitoyidi olarak adlandırılan ve başlıca granit, granitoyid, tonalit, kuvarsça zengin granodiyorit ile kuvars monzolitlerinden oluşan Prekambriyen yaşlı metagranitoyitlerdir. Metagranitoyidler üzerine faylanma ile Prekambriyen yaşlı mermer ve granitler gelmektedir (Tüysüz vd., 2004). Prekambriyen birimler üzerinde kalınlığı 150-1200 metre arasında değişen (Derman ve Sayılı, 1995) İnaltı formasyonu içerisinde yer alan Jura yaşlı kireçtaşları yer almaktadır (Tüysüz vd., 2004). İlgili birim masif ve son derece sert bir yapıda olup, genelde yüksek topoğrafik yükseltilere karşılık gelmektedir. Jura yaşlı birimler üzerine açısız uyumsuzlukla, Alt Kretase yaşlı oluşumlar gelmektedir. Birimin alt seviyeleri dolomitlerden ya da dolomitleşmiş laminallı kireçtaşlarından oluşmakta ve içerisinde birden fazla seviyede mercer geometrili, karasal karakterli kumtaşı içeren çamurtaşları ve bu seviyeler üzerinde mercan ve alg içeren kireçtaşları yer almaktadır (Derman, 1990). Ayrıca, Jura yaşlı İnaltı formasyonu ile de çoğunlukla geçişli olarak bulunmaktadır. Kapuz formasyonu üzerine Saner vd. (1979) tarafından adlandırılmış olan Ahmetusta Çakıltaşı üyesi gelmektedir. Birim alt kesimlerinde çok iyi çimentolanmış ve sert, üstte ise yer yer gevşek tutturulmuş, altta köşeli çakıllı, kötü boylanmalı ve derecelenmesiz, üstte ise kısmen derecelenme gösteren çakıltaşlarından oluşmaktadır. Birimin kalınlığı 100-800 metre arasında değişmektedir (Saner vd., 1979).



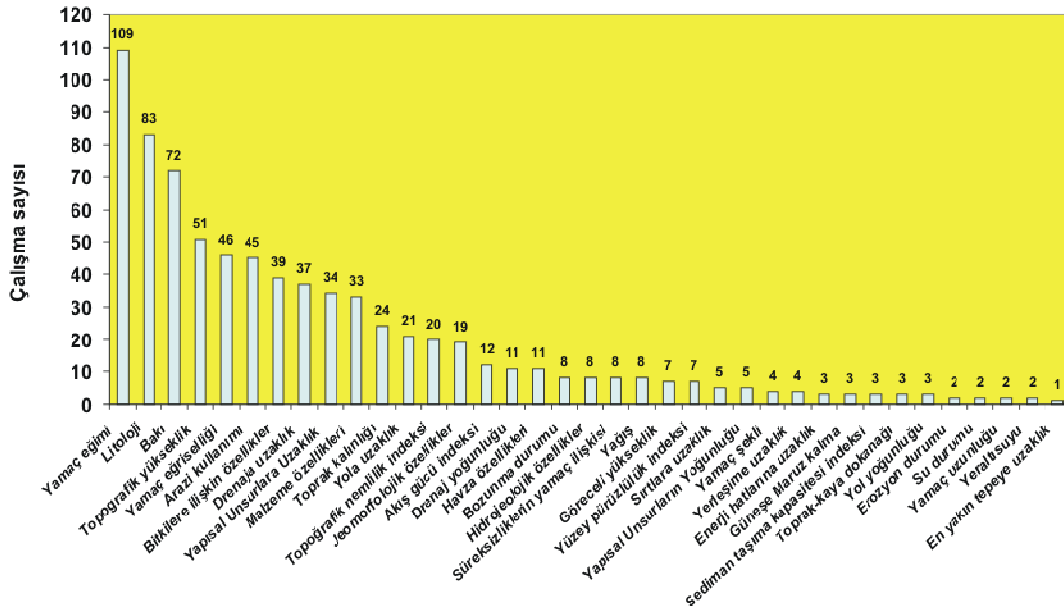
Şekil 1.2. Çalışma alanının genel jeoloji haritası (Yergök vd., 1987)

Alt Kretase yaşı birimler üzerine, Yemişliçay Üst Grubu içinde yer alan ve Batı Karadeniz Bölgesi' nde son derece geniş yayılım gösteren kumtaşı, kilitaşı ve silttaşı araldanmasından oluşan Üst Kretase yaşı Ulus formasyonu yer almaktadır (Tüysüz vd., 2004). Türbiditik filiş özelliği gösteren bu formasyon, çoğunlukla kumlu şeyl ile silttaşı araldanmalı, alt kısımlarında kumlu kireçtaşı ara katkılı olup, yer yer de kireçli kilitaşı ve kumtaşı araldanmasından oluşur. Bu formasyonun yayılımı son derece fazla olup, kalınlığı bazı yerlerde 3000 m' ye ulaşmaktadır (Yergök vd., 1987). Formasyon içerisinde heyelanların sıklıkla geliştiği ve bu formasyonun bozunmaya karşı son derece duyarlı olduğu bilinmektedir (Ercanoğlu, 2003). Ulus Formasyonunun litolojik özelliklerinin yanı sıra, jeolojik evrimi açısından etkin olan tektonizma ve deniz altı heyelanlarının, formasyonun zayıf özellikler göstermesinin, temel gerekçeleri olarak gösterilmektedir (Yergök vd., 1987; Tüysüz vd., 2004). Tüm birimler üzerine gevşek kil, kum ve çakıldan oluşan ve yaşı birimleri açısal uyumsuzlukla örten, genellikle akarsu yataklarında ve eski çukurluklar üzerine gelişmiş düz alanlarda görülen Kuvaterner yaşı alüvyonlar (Qa) gelmektedir. Kuvaterner yaşı yamaç molozları (Q), tutturulmamış veya az tutturulmuş blok ve çakıllardan oluşmakta ve yüksek yamaçların eteklerinde birikintiler halinde bulunmaktadır .

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamındaki bu bölüm, heyelan duyarlılığı konusundaki çalışmaları kapsamakta olup, güncel eğilimleri belirleyebilmek amacıyla, 2000 yılından itibaren SCI (Science Citation Index) kapsamında taranan dergilerde yayımlanmış, ulaşılabilen ve büyük çoğunlukla toprak zeminlerde meydana gelmiş heyelanlar ve bu heyelanların duyarlılık analizlerinde kullanılan parametreleri içeren, toplam 114 adet çalışmanın incelenmesi sonucunda ortaya çıkan genel değerlendirmeyi içermektedir. Sözü edilen çalışmalarda dikkate alınan parametreler “hazırlayıcı parametreler” olarak değerlendirilerek, jeolojik, topoğrafik ve çevresel parametreler olmak üzere, 3 ana grupta incelenmiş ve literatür özeti olarak sunulmuştur. Çizelge 2.1’ de sözü edilen bu parametreler ve bunların dikkate alındığı çalışmalar özetlenmektedir (EK-1. )

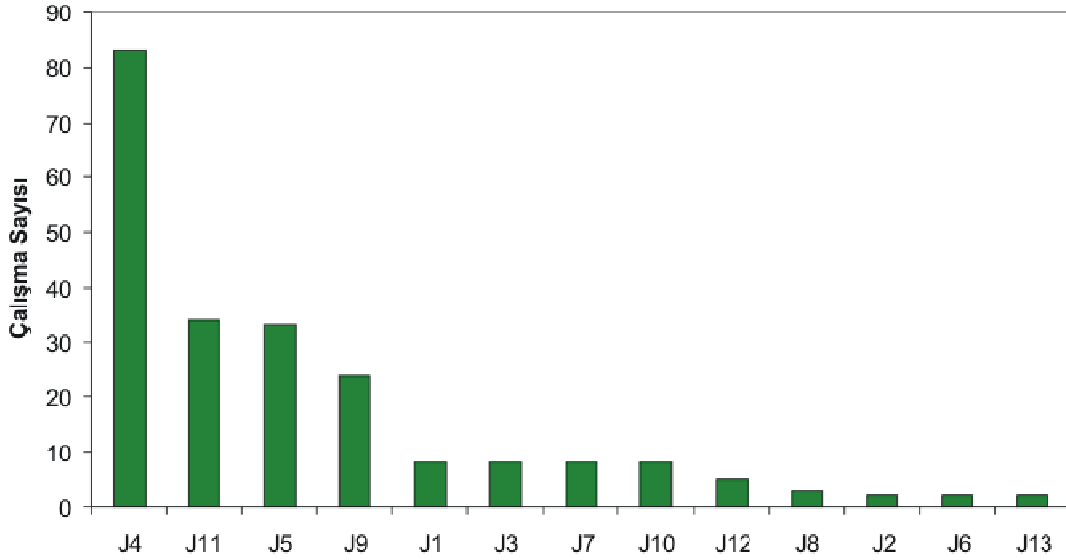
Yukarıda değinilen bu parametrelerin kullanım oranları ve bunların dağılımı ise, Şekil 2.1’ de sunulmaktadır.



Şekil 2.1. Çalışmalarda dikkate alınan parametreler ve kullanım oranları.

## 2.1. Jeolojik Parametreler

Litoloji (J4), yapısal unsurlara uzaklık (J11), malzeme özellikleri (J5), toprak kalınlığı (J9), bozunma durumu (J1), hidrojeolojik özellikler (J3), süreksizliklerin yamaçla olan ilişkisi (J7), yağış (J10), yapısal unsurların yoğunluğu (J12), toprak-kaya dokanağı (J8), erozyon durumu (J2), su durumu (J6) ve yeraltısuyu parametreleri (J13) jeolojik parametreler içerisinde değerlendirilmiştir. Söz konusu bu parametrelerin kullanımına yönelik dağılım diyagramı da, Şekil 2.2' de verilmektedir.



Şekil 2.2. Jeolojik parametrelerin dağılımı.

### 2.1.1. Litoloji

Litoloji parametresi, incelenen çalışmalarda en yaygın olarak kullanılan parametrelerden biri olup, 114 çalışmanın 83 tanesinde (% 73) girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Bu parametre kapsamında, doğrudan litolojik özelliklerin kullanımının yanında, en yakın litolojik sınıra uzaklık ve ana kayaç litolojisi gibi parametreler de değerlendirilmiştir. Litoloji, yamaç duraylılığını etkileyen en önemli parametrelerden biri olup, malzemelerin dayanım, geçirimsizlik, sertlik gibi birçok özelliği ile de doğrudan ilişkilidir (Baeza and Corominas, 2001).

Araştırmacılar litoloji parametresini, genellikle heyelanların hangi litolojik birimlerde daha yoğun olarak meydana geldiğini belirlemek amacıyla, farklı gruplandırmalar yaparak kullanmışlardır (Corominas et al., 2003; Ermini et al., 2005; Havenith et al., 2006; Van Den Eeckhaut et al., 2006; evik and Topal, 2003; Yeşilnacar and Topal, 2005; Can et al., 2005; Duman et al., 2006; Gorsevski et al., 2006; Melchiorre et al., 2008; Ruff and Czurda, 2008; Fernandez et al., 2003; Yılmaz, 2007; Clerici et al., 2006; Irigaray et al., 2007; Neuhuser and Terhorst, 2007; Conoscenti et al., 2008; Caniani et al., 2008; Bai et al., 2009; Wang et al., 2009; Yılmaz, 2009a). Remondo et al. (2003a), litoloji parametresinin, kohezyonu kontrol eden bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Van Den Eeckhaut et al. (2006), litolojinin heyelan başlangıcını doğrudan kontrol eden bir parametre olduğunu, Moreiras (2005) ise, heyelanların konumsal dağılımının belirlenmesinde, doğrudan bir parametre olarak kabul edilebileceğini vurgulamışlardır. Komac (2006), diğer araştırmacılarından farklı bir yaklaşımla, heyelanların litolojik farklılıkların gözlendiği bölgelerde daha çok meydana geleceğini vurgulamış, bu nedenle litolojik farklılıkların analizlerde dikkate alınması gereğine değinmiştir. Ayalew et al. (2005) tarafından litoloji, heyelan değerlendirmelerinde en önemli girdi parametresi olarak kabul edilerek, en yüksek parametrik ağırlık bu parametreye verilmiştir. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar bu parametreyi heyelan duyarlılık analizlerinde dikkate almamışlardır. Örneğin, Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2004), litolojik özellikler ile heyelan lokasyonlarını bir arada değerlendirdikleri çalışmalarında, heyelanların sadece bir birim içinde geliştiğini belirleyerek, analizlerde bu parametreyi girdi parametresi olarak dikkate almamışlardır. Yukarıda değinilen örneklere anlaşılacağı üzere, litoloji parametresi hemen hemen tüm çalışmalarda dikkate alınmakta ve çoğunlukla heyelan lokasyonları ile ilişkilendirilerek kullanılmaktadır.

### **2.1.2. Yapısal Unsurlara İlişkin zellikler**

İncelenen çalışmalarda yapısal unsurlara ilişkin özellikler olarak, 34 çalışmada yapısal unsurlara uzaklık ve 5 çalışmada yapısal unsurların yoğunluğu girdi

parametresi olarak kullanılmıştır. Tektonik aktivite, tektonik birimler, çizgiselliğe uzaklık, tektonik kırıktan uzaklık ve faylara uzaklık parametreleri yapısal unsura uzaklık parametresi; çizgisellik yoğunluğu ve fay çizgisi yoğunluğu parametreleri ise yapısal unsurların yoğunluğu parametresi içerisinde değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, diğer parametrelerin aksine, yapısal unsurlara uzaklık parametresinin heyelanların üzerindeki etkisi ile ilgili görüş birliği içerisinde olup, yapısal unsurlara uzaklık ile heyelan sıklığı arasında ters orantılı bir ilişki olduğunu savunmaktadırlar (Hudak, 2000; Fernández et al., 2003; Lee and Choi, 2004; Ercanoğlu and Gökçeoğlu, 2004; Duman et al., 2005; Lee and Talib, 2005; Lee and Dan, 2005; Havenith et al., 2006; Lee and Sambath, 2006; Lee, 2007; Ruff and Czurda, 2008; He and Beighley, 2008; Wang et al., 2009). Araştırmacılar, yapısal unsurlara uzaklık parametresini kullanırken, yapısal unsurlara uzaklık haritasında birbirlerinden farklı uzaklıkları dikkate alarak, birden fazla tampon bölge oluşturmuşlardır. Araştırmacıların büyük çoğunluğu heyelan yoğunluğunun, en yakın mesafeleri içeren gruplarda daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Lee and Choi (2004), Lee and Talib (2005) ve Lee and Sambath (2006) bu durumu, yapısal unsurlara uzaklık azaldıkça, kayacın içerdiği çatlak oranının ve bozunma derecesinin artmasıyla açıklarken, Ruff and Czurda (2008) yapısal unsurlara yakın mesafedeki ana kayanın, tektonik açıdan gerilim altında ve yüksek derecede duraysız oluşuyla ilişkilendirmişlerdir. Wachal and Hudak (2000) ise, yapısal unsurlara yakın mesafelerde daha fazla heyelan oluşmasını, yapısal unsurların, kendilerini çevreleyen malzemeyi zayıflatması ile ilişkilendirmişlerdir. Yapısal unsurların yoğunluğu ise, az sayıda araştırmacı tarafından kullanılmış parametrelerden biridir. Bu parametreyi çalışmalarında girdi parametresi olarak kullanan araştırmacılardan Neuhäuser and Terhorst (2007), potansiyel fay ve kırık çatlak zonlarını hesaba katarak haritalanmış yapısal unsurların yoğunluklarını belirlemişlerdir. İncelenen çalışmalardan görüldüğü üzere araştırmacılar arasında, yapısal unsurlara yakın bölgelerde heyelan oluşumunun fazla olduğu, bu durumun da malzemelerin daha zayıf ve bozunmaya daha açık olmasından kaynaklandığı yönünde bir fikir birliği bulunmaktadır.

### 2.1.3. Malzeme Özellikleri

Malzeme özellikleri parametresi, incelenen çalışmaların 33' ünde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Toprak türü, makaslama dayanım parametreleri, doku, geçirimsizlik gibi özellikler malzeme özellikleri parametresi içerisinde değerlendirilmiştir. Örneğin, Lee (2004) ve Lee et al. (2006), malzeme özelliklerini dikkate alarak yapmış oldukları çalışmada, heyelanların yoğun olarak asidik kayalarda ve aşırı drene olmuş toprak malzemesinde yer aldığını belirlemişlerdir. Lee et al. (2003) ise, toprak dokusu ve toprak drenajını sınıflayarak analiz ettikleri çalışmalarında, heyelanların çoğunlukla çakıllı kumlu, drenaj bakımından iyi drene olmuş ve aşırı drene olmuş topraklarda görüldüğünü belirlemişlerdir. Lee and Min (2001), Lee et al. (2002), Lee et al. (2004) ve Lee and Choi (2004), toprak drenajı iyiyse, heyelan oluşma olasılığının yüksek olduğu görüşünü savunmuşlardır. Bu araştırmacıların, toprak dokusuyla ilgili görüşleri ise, tane boyu ve taneler arasında boşluğun artmasının daha fazla su birikmesine neden olacağı yönündedir. Ohlmacher (2007), malzeme özelliklerine bağlı yaptıkları sınıflama sonucunda, her sınıftaki heyelan olma olasılığının fazla olmasını, doğrudan malzeme özelliklerinin değişimine bağlamıştır. Ayenew and Barbieri (2005) ise, toprak ve kayaların jeoteknik özelliklerine dayalı mühendislik jeolojisi/jeoteknik haritalarını oluşturarak, heyelan duyarlılık analizlerinde girdi parametresi olarak kullanmışlardır. Fall et al. (2006), malzeme özellikleri kapsamında, çalışma alanındaki topraklardaki kil içeriğinin bu malzemelerin duyarlılığını olumsuz yönde etkilediğini belirlemişlerdir. Federicia et al. (2007), malzeme özelliklerini, yerinde arazi deneyleri, tane boyu analizleri gibi farklı yöntemlerle tayin etmiş ve heyelan duyarlılık analizlerinde kullanmışlardır. Yalçın and Bulut (2007), malzemelere ilişkin makaslama dayanım parametrelerini sınıflayarak, bu gruplandırmalardaki heyelan yoğunluklarını analiz etmişlerdir. Araştırmacılar, 45-53 kN/m<sup>2</sup> dayanıma sahip zeminlerde daha fazla heyelan meydana geldiğini belirlemişlerdir. Godt et al. (2008), sınıfladıkları litolojik birimlerin hidrojeolojik ve dayanım parametrelerini incelemiş ve heyelan oluşumu ile ilişkilendirmişlerdir. Rey and Smedt (2009), kuru koşullar altında yamacın duraylılığının toprak kohezyonu, içsel sürtünme açısı ve yamaç eğimi tarafından

kontrol edildiğini ifade etmektedirler. Malzeme özellikleri parametresinin, litoloji parametresine oranla daha az sayıda çalışmada girdi parametresi olarak kullanıldığı görülmüştür. Bunun nedeni, makaslama dayanımı gibi özelliklerin belirlenebilmesi için gerekli olan, yerinde ve laboratuvar deneylerinin maddi olanaksızlıklardan ve/veya örnek alımı ve yerinde deneyler için uygun şartların olmaması ile açıklanabilir. Ayrıca, bu tür özelliklerin belirlenmesinde, temsil edici sayıda örnekleme yapmak da çoğu zaman olanaksız olacağından, kullanım oranının az olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Malzeme özelliklerini girdi parametresi olarak kullanan araştırmacıların çoğu, toprak dokusu ve toprak drenajını sınıflandırarak hangi gruplarda daha fazla heyelan meydana geldiğini belirlemiş ve toprak drenajının iyi olduğu bölgelerde, heyelan meydana gelme olasılığının yüksek olduğu görüşünü savunmuşlardır.

#### **2.1.4. Toprak Kalınlığı**

Toprak kalınlığı parametresi, incelenen çalışmaların 24' ünde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Toprak kalınlığı süzülme derecesine ve hareketin şekline doğrudan etki etmektedir (Fleming and Johnson 1994; Nagarajan et al., 2000' den). Toprak kalınlığının artması, yeraltısuyu akışını ve topraktaki yüksek gözenek suyu basıncı oluşumunu da arttırmaktadır (Baeza and Corominas, 2001). Bunlarla birlikte, farklı toprak kalınlıklarında farklı türde yenilmeler oluşmaktadır. Yüksek toprak kalınlıklarında dairesel kaymalar meydana gelirken, ince kalınlıklardaki topraklarda, düzlemsel-ötelenmeli kayma (süreksizlik yüzeyi boyunca) veya akma şeklinde heyelanlar meydana gelmektedir (Turner 1996; Nagarajan et al., 2000' den). Lee and Min (2001), Lee et al. (2002) ve Lee et al. (2004), toprak kalınlığının artışıyla heyelan olasılığının azaldığını belirtmişlerdir. Örneğin, Lee et al. (2003) yaptıkları toprak kalınlığı sınıflamasına göre, 20-50 cm ve 50-100 cm' ler arasında, Lee (2004) ve Lee et al. (2006) ise 20-50 cm arasında kalınlığa sahip toprakların bulunduğu alanlarda daha fazla heyelanın görüldüğünü belirlemişlerdir. Toprak kalınlığı yamaç eğimini analiz etmek için çok kritik bir parametre değildir çünkü sadece kohezyon üzerinde sınırlı bir etkisi

vardır (Acharya et al., 2006; Rey and Smedt, 2009' den). Bu parametre için araştırmacılar, kalınlığın artmasıyla birlikte heyelan olasılığının azaldığı yönünde bir fikir birliğine ulaşmışlar ve genel olarak heyelanların düşük toprak kalınlıklarında meydana geldiğini belirlemişlerdir.

### **2.1.5. Bozunma Durumu**

Araştırmacılar, incelenen heyelan duyarlılık haritalaması çalışmaları içerisindeki 8 çalışmada bozunma durumu, 3 çalışmada ise toprak-kaya dokanağı parametrelerini girdi parametresi olarak kullanmışlardır. Bozunma derinliği ve bozunma derecesi parametreleri, bozunma durumu parametresi içerisinde değerlendirilmiştir. Nagarajan et al. (2000), Hindistan' da yaptıkları çalışmada, bozunma durumu parametresinin potansiyel yenilme yüzeyini ve yeraltı hidrolojisini etkileyen en önemli faktör olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ana kaya ve üzerindeki örtü malzemesi arasındaki dokanağın, kayma yüzeyi gibi davrandığını belirlemişlerdir. Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002) ve Ercanoğlu et al. (2004), Yenice' nin kuzeyinde yaptıkları heyelan duyarlılık değerlenmesi çalışmasında, heyelanların büyük bir çoğunluğunun, özellikle de dairesel kaymaların, çalışma alanında bulunan Ulus formasyonunun bozunma zonunda meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Bu nedenle, Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002), yol yarmalarını kullanıp bozunma derinliğini belirleyerek, bozunma derinliği haritası hazırlamış, Ercanoğlu et al. (2004) ise, arazi araştırmaları ile her heyelan için kaydedilmiş bozunma derinlikleri ve bozunma durumunu içeren bir indeks haritası üretmişlerdir. Yalçın and Bulut (2007), Ceryan and Ceryan (2008) ve Yalçın (2008), bozunma durumu ve heyelan arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacıyla, bozunmayı sınıflandırarak bozunma haritası üretmişlerdir. Melchiorre et al. (2008), yaptıkları çalışmada, dairesel heyelanların genellikle bozunmuş birimlerde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bozunma durumunu inceleyen araştırmacılar, heyelanların büyük oğuluğunun bozunmuş birimlerin bulunduğu bölgelerde meydana geldiğini ve bu bölgelerdeki heyelanların türlerinin, dairesel kayma şeklinde olduğunu belirlemişlerdir.

### **2.1.6. Süreksizliklerin Yamaçla Olan İlişkisi**

İncelenen çalışmalar içerisindeki 8 çalışmada, süreksizliklerin yamaçla olan ilişkisi girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Araştırmacıların çalışmalarında kullandıkları yapısal jeoloji, çizgisellikler, süreksizlikler ve tabakalanma-yamaç ilişkisi parametreleri, tez çalışması kapsamında süreksizliklerin yamaçla olan ilişkisi parametresi içerisinde değerlendirilmiştir. Tabakalanma ve yamaç arasındaki ilişkisinin, yamaç duraylılığını nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla Clerici et al. (2002), yamaç eğimi, yamaç yönelimi ve tabaka yönelimi arasındaki açı farkı ile yamaç eğimi ve eğim açısı farkı arasındaki ilişkiyi temel alan 13 farklı tabakalanma-yamaç durumu üretilmiş haritaları ve yüksek eğimli tabakaların heyelan davranışına daha yatkın olduğunu ifade etmişlerdir. Bu parametre kapsamında incelenen bir diğer parametre olan çizgiselliği, çalışmalarında girdi parametresi olarak kullanan araştırmacılardan Gomez and Kavzoğlu (2005), çizgiselliğin sadece yüzey malzemesinin yapısını etkilemediğini, aynı zamanda, geçirimsizliği artırıcı yönde katkıda bulunduğunu ve yamaç duraysızlığını arttırabileceğini vurgulamışlardır. İncelenen çalışmalardan da görüldüğü gibi süreksizlikler üzerinde bulunan toprak malzemesi, süreksizlik yönelimine de bağlı olarak duraylılığını yitirmekte ve süreksizlikler yenilme yüzeyi gibi davranmaktadır.

### **2.1.7. Hidrojeolojik Özellikler**

Hidrojeolojik özellikler, incelenen çalışmaların 8' inde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Hidrojeolojik parametreler, hidrolik iletkenlik, hidrojeolojik koşullar, hidrojeolojik özellikler parametresi altında toplanmıştır. Geçirimsiz malzemenin, geçirimsiz malzeme üzerine gelmesiyle oluşan yapılarda, yağmur suyu önce dikey yönde süzülerek, daha sonra geçirimsiz tabakalar arasında yatay olarak akmakta ve son olarak karşı koyan kuvvetleri azaltarak heyelan oluşumunda etkin olabilmektedirler (Chigira et al., 2004). Ayenew and Barbieri (2005), çalışma alanlarındaki birçok kaymanın, derin oyulmuş su yolu ve dereler ile çevrili

olduğunu belirlemişlerdir. Fall et al. (2006), hidrolojik koşullar ve heyelanlar arasındaki ilişkiyi analiz edebilmek için, yüzey veya yağmur suyunun akış yönelimi ve bunların birleşme zonlarını belirlemişlerdir. Yılmaz et al. (2006) ve Yılmaz and Yıldırım (2006), çalışma alanlarındaki heyelana neden olan su koşullarının yağışlar olduğunu belirtmişlerdir. Yılmaz et al. (2006), karstik boşlukların, fisürlerin, tabakalanma düzlüklerinin ve oyukların, su akışında esas rolü oynadıklarını belirterek, heyelan gelişiminde olumsuz yönde bir etkiden söz etmektedirler. İncelenen çalışmalarda da belirtildiği üzere, yağış nedeniyle, su seviyesinin de yükselmesiyle doygun hale gelen malzeme, heyelana duyarlı olmakta ve yamaçların duraylılığını azaltmada önemli bir etken olmaktadır.

#### **2.1.8. Yağış**

İncelenen çalışmaların 8' inde, yağış parametresi bir girdi olarak kullanılmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında, 24 saat içindeki yağış ve ortalama yıllık yağış verilerinden yararlanmışlardır. Irigaray et al. (2007) çalışmalarında, hem 24 saat içindeki yağış, hem de ortalama yıllık yağışı dikkate almış, Fernández et al. (2003) ise, yalnızca yıllık yağış verilerini kullanmışlardır. Nagarajan et al. (2000), yeraltısuyunu, şiddetli olan veya olmayan yağışların bile yükselttiğini, yağış ve heyelan arasındaki ilişkinin, heyelan sürecinin anlaşılmasında son derece önemli olduğunu belirtmişlerdir. He and Beighley (2008), yüksek yağış alan yerlerde heyelan olma olasılığının daha fazla olduğunu, Gulla et al. (2008) ise, sürekli yağışların, sığ heyelanlar için kritik olabileceğini belirlemişlerdir. Yağış, toprak malzemesinin doygunluğunu arttıran, yeraltısuyu seviyesini yükselten ve malzemenin yükünü arttıran bir parametre olarak, yamaç duraylılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, yağış etkisinin çalışılan bölge üzerindeki etkileri çalışmalarda dikkate alınmalıdır. Bununla beraber, bu parametre çoğunlukla "tetikleyici heyelan parametresi" grubunda değerlendirildiği için, heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılmamaktadır.

### **2.1.9. Erozyon Durumu**

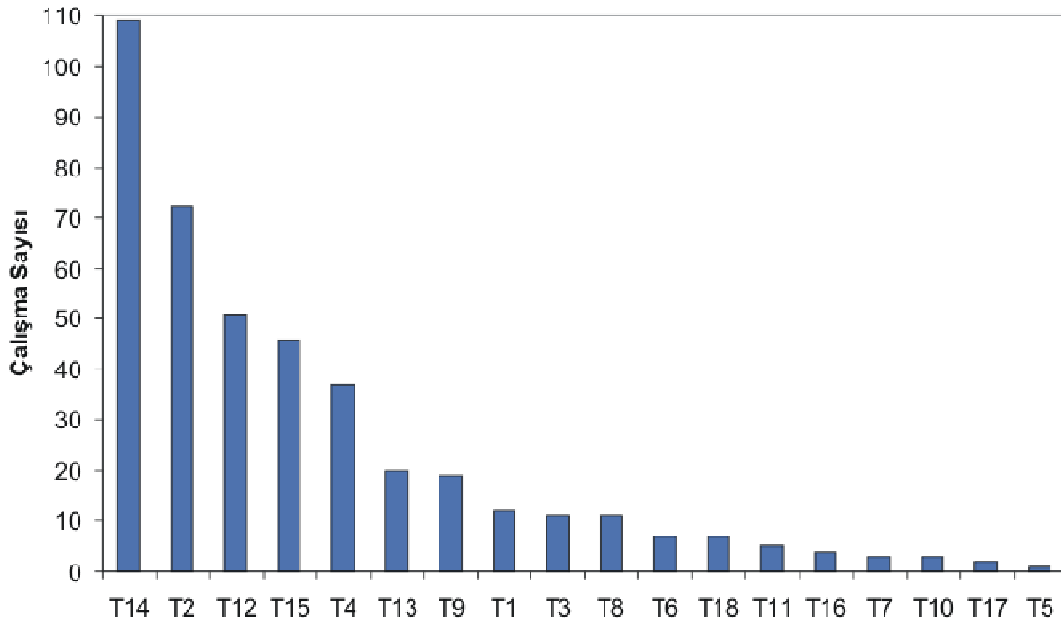
İncelenen çalışmaların, 2' sinde erozyon durumu girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Bunlardan Ruff and Czurda (2008), erozyon parametresini kullanırken özellikle nehir erozyonunu dikkate alarak, heyelan oluşumu ile ilişkilendirmiştir. Topukta meydana gelen aşınmanın, yamaç duraylılığını olumsuz yönde etkilemesi sonucunda, heyelanların geliştiği vurgulanmıştır. Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde bu parametrenin kullanımı çok az olup, çoğu çalışmada dikkate alınmamaktadır.

### **2.1.10. Su Durumu ve Yeraltısuyu**

Yeraltısuyu ve su durumu, incelenen çalışmaların 2' sinde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Su durumunu gözlemsel olarak belirleyen Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002) ve Ercanoğlu et al. (2004), heyelanların genellikle ıslak ve nemli alanlarda meydana geldiğini belirtmektedirler. Anbalagan (1992) sınıflaması kullanılarak değerlendirilen su durumu parametresi ile elde edilecek sonuçların, çalışma döneminden etkilendiğini ve bu durumun, tartışmaya açık olduğunu belirtmişlerdir. Dai et al. (2001) yaptıkları çalışmada, yeraltı su seviyesinin derinliğini, yeraltısuyunun korozyon potansiyelini ve yeraltısuyu artışını dikkate almışlardır. Godt et al. (2008) ise, Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla, yeraltısuyu akış modellemesi yaparak, heyelan oluşumu ile ilişkileri araştırmışlardır. Su durumu ve yeraltısuyu parametreleri, heyelan duyarlılık değerlendirmelerinin çoğunda dikkate alınmayan veya alınamayan parametreler olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumun temel nedenleri, özellikle yeraltısuyu özelliklerine yönelik yapılacak çalışmalarda, temsil edici verilerin elde edilemesinin hem ekonomik açıdan, hem de topoğrafik olanaksızlardan ötürü sınırlamalarının olmasıdır. Su durumuna yönelik değerlendirmelerin ise gözlemsel ve öznel olduğu, mevsimsel koşullardan ve kişisel yorumlamalardan etkilenebileceğinin unutulmaması gerekir.

## 2.2. Topoğrafik Parametreler

Çalışmalarda kullanılan yamaç eğimi (T14), bakı (T2), topoğrafik yükseklik (T12), yamaç eğriselliği (T15), drenaja uzaklık (T4), topoğrafik nemlilik indeksi (T13), jeomorfolojik özellikler (T9), akış gücü indeksi (T1), drenaj yoğunluğu (T3), havza özellikleri (T8), göreceli yükseklik (T6), yüzey pürüzlülük indeksi (T18), sırtlara uzaklık (T11), yamaç şekli (T16), güneşe maruz kalma (T7), sediman taşıma kapasitesi indeksi (T10), yamaç uzunluğu (T17), en yakın tepeye uzaklık (T5) parametreleri topoğrafik parametreler altında incelenmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Topoğrafik parametrelerin dağılımı.

### 2.2.1. Yamaç Eğimi

İncelenen 114 çalışmanın 109' unda, araştırmacılar yamaç eğimini girdi parametresi olarak kullanmışlardır. Wachal and Hudak (2000), Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002), Lee et al. (2003), Ayenew et al. (2004), Ercanoğlu et al. (2004), Ruff and Czurda (2008) gibi araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalarda yamaç eğimi parametresinin önem açısından ağırlığına, en yüksek değeri

vermişlerdir. Buna karşın, bir çok araştırmacının aksine Van Westen et al. (2003), İtalya' da gerçekleştirdiği heyelan duyarlılık değerlendirmesi çalışmasında tüm yamaç eğimi gruplarındaki heyelan olasılıklarının birbirine yakın çıkması nedeniyle, yamaç eğiminin çalışma alanı için etken bir parametre olmadığını belirtmiştir. Bununla birlikte, araştırmacılar arasında, yamaç duyarlılığı ile yamaç eğimi arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu, diğer bir deyişle, yamaç eğimi arttıkça heyelan duyarlılığının artacağı yönünde bir görüş de hakimdir (Lee and Min, 2001; Lee et al., 2002; Lee et al., 2004; Lee and Choi, 2004; Moreiras, 2005; Lee and Talib, 2005; Lee and Sambath, 2006; Van Den Eeckhaut et al., 2006; Yalçın and Bulut, 2007; Meusburger and Alewell, 2008; Canioni et al., 2008). Buna karşın, Ayenew and Barbieri (2005), heyelanların düşük eğimli yamaçlarda meydana geldiği görüşünü savunmaktadırlar. Gökçeoğlu ve Ercanoğlu (2001)' e göre, toprak zeminlerde heyelan oluşabilmesi için, toprak kalınlığının en az 1-2 m olması gerekmekte ve eğimin yüksek olduğu yamaçlarda, özellikle meydana gelen erozyon nedeniyle bu kalınlık değerlerine ulaşılması genellikle mümkün olmamaktadır. Örneğin, Ercanoğlu (2005) çalışma alanındaki heyelanların düşük eğimli yamaçlarda meydana geldiğini, bu durumu da yüksek eğimli yamaçlarda, dayanımlı kaya malzemesinin varlığı ile açıklamıştır. De Vita et al. (2006) ise, toprak kalınlığı haritası için jeofizik araştırmaların uygulamasını, heyelan duyarlılık değerlendirmesi için gerçekleştirdikleri çalışmada, piroklastik toprak kalınlığı ile yamaç eğimi arasında ilişki kurarak, yüksek eğimli yamaçlarda malzeme birikiminin çok az olduğunu, ya da olmadığını belirlemişlerdir. Gomez and Kavzoğlu (2005), yamaç eğiminin yamaç yüzey ve yeraltısuyu akışının hızına, toprak su içeriğine, toprak yapısına, erozyon potansiyeline ve jeomorfolojik süreçlere önemli oranda etki ettiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar hangi yamaç eğimlerinde heyelan sıklığının daha fazla olduğunu belirleyebilmek için, eğimleri birbirlerinden farklı şekillerde gruplamışlardır. Bunun sonucunda, heyelanların farklı sınıf aralıklarında yoğunlaştığını belirlemişlerdir. Gritzner et al. (2001) 25°-40° arasında, Corominas et al. (2003), 20°-23° arasında, Çevik and Topal (2003) 30°' den düşük, Remondo et al. (2003a) 20°-30° arasında, Remondo et al. (2003b) 21°-25°

arasında, Lee et al. (2003) ve Lee et al. (2004) 18°-23° arasında, Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2004) 10°-20° arasında, Lee and Choi (2004) ve Moreiras (2005) 31° nin üzerinde, Ayalew et al. (2004) ve Ayalew et al. (2005) 2.5°-15° ve 13°-17° arasında, Ayalew and Yamagishi (2005) 4°-30° arasında, Ercanoğlu (2005) ve Ercanoğlu et al. (2008) 10°-30° arasında, Scherthanner (2005) 12°- 60° arasında, Lee and Talib (2005) ve Lee and Dan (2005) 16°-25° arasında, Wang and Sassa (2005) 15°-20° arasında, Duman et al. (2005) ve Duman et al. (2006) 5°-15° arasında, Komac (2006) 11°-14° arasında, Havenith et al. (2006) 8°-16° arasında, Lee and Sambath (2006) 21°-25° arasında, Lee et al. (2006) 21°-35° arasında, Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002), Ercanoğlu et al. (2004) ve Lee (2007) 26°-30° arasında, Neuhäuser and Terhorst (2007) 11°-26° arasında, Demoulin and Chung (2007) 4°-10° arasında, Yılmaz (2007) 42° den düşük, Yalçın and Bulut (2007) 10°-40° arasında, Canioni et al. (2008) 6°-12°, Conoscenti et al. (2008) 11°-19° arasında, Ruff and Czurda (2008) 20°-40° arasında, Guzzetti et al. (2008) 5°-20° arasında, Nefeslioğlu et al. (2008a) ortalama 21°, Yalçın (2008) 40° nin altında, Nefeslioğlu et al. (2008b) 7°-21° arasında, Tangestani (2009) 45° üzerinde, Yılmaz (2009a) 5°-20° arasında, Falaschi (2009) 10°-24° arasında, Yılmaz (2009b) 14°-21° ve 21°-28° arasında eğime sahip yamaçlarda heyelan yoğunluğunun fazla olduğunu belirlemişlerdir. Chau and Chan (2005), 10°-15° ve 25°-30° eğimli yamaçların heyelan oluşumuna daha uygun olmasına karşın, heyelanların daha yüksek eğimlerde geliştiğine dikkat çekmektedirler. Clerici et al. (2006), yaptıkları çalışmada heyelan türlerine göre, heyelanların meydana geldiği eğimlerin farklılık gösterdiğini; dairesel kaymaların 26°-30° arası ve daha yüksek eğimlerde, karmaşık heyelanların 16°-25° arası eğimlerde ve akmaların 11°-20° arasındaki eğimlerde daha çok meydana geldiğini belirlemişlerdir. Ceryan and Ceryan (2008), ürettikleri heyelan duyarlılık haritasına göre, yüksek ve çok yüksek duyarlılık zonlarındaki yamaçların eğimlerinin 35° den küçük, orta derecede duyarlılığa sahip alanlardaki yamaçların eğimlerinin ise 25° den küçük olduğunu belirlemişlerdir. Akgün et al. (2008) ise, çok az eğimli yamaçlarda düşük makaslama kuvvetine bağlı olarak sığ heyelanların beklenmediğini, 10°-20° arasında ve 30° den

yüksek eğime sahip yamaçlarda heyelan olasılığının düşük olduğunu, 20°-30° arasındaki eğime sahip yamaçlarda ise heyelan oluşma olasılığının yüksek olduğunu belirtmişlerdir. İncelenen çalışmalarda, heyelanların çoğunlukla orta derecede eğime sahip yamaçlarda meydana geldiğini görülmektedir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlara dayanarak, 65° ve üzerinde eğime sahip yamaçlarda heyelan oluşumunun çok az olduğu ya da hiç olmadığı, 40°-65° arasında eğime sahip yamaçlarda olasılığın yüksek, 20°- 40° eğime sahip yamaçlarda olasılığın çok yüksek, 10°- 20° arasında olasılığın orta ya da az olduğu ve 5°-10° ile 5'' den düşük eğime sahip yamaçlarda ise, ancak yanal yayılma meydana gelebileceği ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, araştırmacılar arasında yamaç eğimi ile heyelan ilişkisi arasında farklı görüşlerin olduğu, bu durumun da bölgesel farklılıklar gösterebileceği ve heyelan meydana gelen yamaç eğimlerinin istatistiksel olarak değerlendirilip yorumlanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

### **2.2.2. Bakı**

İncelenen çalışmaların, 72' sinde bakı, 3' ünde ise güneşe maruz kalma, girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Güneşe maruz kalma parametresi, araştırmacılar tarafından çok fazla tercih edilmeyen bir parametredir. Santacana et al. (2003), güneşe maruz kalma durumunun, toprak nemi, bitki örtüsü miktarı ve drenaj özellikleri ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Remondo et al. (2003a) ise, heyelan duyarlılık değerlendirmesi yaptıkları çalışmalarında, 21 Mart tarihinde en fazla güneşe maruz kalma olacağı için, bu tarihteki değerleri kullanmışlardır. Gorsevski and Jankowski (2008)' ye göre güneşe maruz kalma parametresi, güneş ışığının az olması durumunda, yamaçtaki yüksek nem içeriği ve az buharlaşma oranı ile heyelan oluşumunun daha kolay olacağını savunmaktadırlar. Araştırmacılar arasında, bakı parametresinin heyelan üzerindeki etkisine yönelik net bir görüş birliği ise yoktur. Örneğin; Nagarajan et al. (2000), yamacı oluşturan malzemenin doygunluk derecesinin, heyelanın meydana gelişi üzerinde büyük bir kontrol olduğunu vurgulayarak, maksimum

yağış alan yamaçların heyelana daha duyarlı olacağını belirtmişlerdir. Dai and Lee (2002), bakının heyelan oluşumunda etken bir parametre olduğunu, yamacın nem tutmasının ve bitki örtüsünün bakı tarafından denetlendiğini belirtmişlerdir. Yamagishi (2005)' ye göre ise okyanuslara yakın bölgelerdeki heyelan dağılımının, dalga etkisi, bozunma ve takip eden kıyı erozyonunun etkisi ile arttığını ifade etmektedirler. Araştırmacılar, bakı değerlerini gruplandırıp analiz ettiklerinde, heyelanların birbirlerinden farklı yönelimlerde yoğunlaştığını belirlemişlerdir. Nagarajan et al. (2000) batı ve kuzeybatıya, Lee and Min (2001) ve Lee and Choi (2004) kuzey ve kuzeydoğuya, Dai and Lee (2002), Moreiras (2005), Lee and Dan (2005) ve Yılmaz (2009b) güneye, Ayenew et al. (2004) doğuya, Lee and Talib (2005) güney ve kuzeydoğuya, Ercanoğlu (2005) ve Ayalew and Yamagishi (2005) batıya, Havenith et al. (2006) kuzeydoğuya, Yılmaz (2007) güneybatı, batı ve kuzeybatıya, Yalçın and Bulut (2007) ve Tangestani (2009) kuzey ve batıya, Ruff and Czurda (2008) güneydoğu ve güneye, Canioni et al. (2008) kuzey ve güneydoğuya, Nefeslioğlu et al. (2008) ve Gorsevski and Jankowski (2008) ve Yılmaz and Keskin (2009) kuzeybatıya, Akgün et al. (2008), güneybatı ve batıya, Bai et al. (2009) batıya, Yılmaz (2009a) doğu ve güneydoğuya, Pradhan et al. (2009) ise güneydoğuya bakan yamaçlarda heyelanların daha yoğun olarak görüldüğünü belirlemişlerdir. Çalışmalarında, heyelan türlerine göre yamaç yönelimlerinin heyelan yoğunluklarını inceleyen Clerici et al. (2006) ise, dairesel kaymalar için doğu ve güneydoğu, akmlar için güneydoğu ve güneye bakan yamaçlarda heyelanların daha yoğun olduğunu belirlemişlerdir. Diğer araştırmacıların aksine, Çevik and Topal (2003) ve Wang and Sassa (2005) ise, çalışma alanındaki heyelanların, tüm yamaç yönelimlerinde eşit oranda meydana geldiğini belirlemiş ve bu durumdan dolayı çalışma alanları için bakının önemli bir parametre olmadığını belirtmişlerdir. Diğer araştırmacılardan farklı bir yaklaşımla, Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002), Ercanoğlu et al. (2004), Duman et al. (2005) ve Gökçeoğlu et al. (2005) bakının, alanın ve ana yağış yöneliminin genel fizyografik eğilimi ile ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002), Ercanoğlu et al. (2004) ve Duman et al. (2005) çalışma alanının genel fizyografik eğilimi

kuzeybatı-güneydoğuyken, heyelanların eğiminin bu doğrultuya dik olarak, kuzeydoğu-güneybatı olduğunu belirlerken, Gökçeoğlu et al. (2005) çalışma alanının genel fizyografik eğiliminin doğu-batı, heyelanların eğiminin bu doğrultuya dik yönde güney olduğunu belirlemişlerdir. İncelenen çalışmalardan görüldüğü üzere, bakı parametresi, her çalışma alanında farklılık gösteren bir parametredir. Bu nedenle, bakının tek başına heyelan duyarlılığı açısından etkin bir parametre olmasından çok, başka parametrelerle birlikte incelenmesi gerektiği şeklinde bir yorumlama yapılmıştır.

### **2.2.3. Yükseklik**

İncelenen çalışmalarda araştırmacılar yükseklik parametresi olarak, topoğrafik yükseklik ve göreceli yüksekliği, girdi parametresi olarak kullanmışlardır. Aynı zamanda en yakın tepeye uzaklık ve sırtlara uzaklık parametreleri de yükseklik ile bağlantılı olarak incelenen, diğer girdi parametreleri olarak değerlendirilmiştir. Topoğrafik yükseklik 51, göreceli yükseklik 7, sırtlara uzaklık 5 ve en yakın tepeye uzaklık 1 çalışmada kullanılmıştır. Topoğrafik yükseklik, deniz seviyesinden itibaren olan yüksekliği ifade etmektedir. Yükseklik, erozyon tipi ve derecesini de kontrol eden bir parametre olarak değerlendirilebilir (Dai and Lee, 2002; Ayelew et al., 2005' den). Aynı zamanda, biyofiziksel parametreleri, antropojenik aktiviteleri (Dai and Lee, 2002; Ayelew et al., 2005' den) ve toprak özelliklerini de etkileyen bir parametredir (Stallard and Edmond, 1983; Gomez and Kavzoğlu, 2005' den). Gritzner et al. (2001), yüksekliğin, yükseklik ile doğrudan bağlantılı olan diğer değişkenler için bir klavuz gibi değerlendirilebileceğini vurgulamışlardır. Araştırmacılar, heyelan ve yükseklik arasında net bir ilişki bulunmasa da, orman yoğunluğu ve yollarla ilişkili olarak, etkisinin olduğunu düşünmektedirler. Araştırmacıların büyük çoğunluğu, heyelan sıklığının düşük topoğrafik yüksekliklerde daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Örneğin, Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002), 100-500 m, Çevik and Topal (2003), 10-150 m, Ayenew et al. (2004), 201-500 m, Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2004), 300-600 m, Wang and Sassa (2005), 500-600 m, Ayalew et al. (2005), 200-360

m, Chau and Chan (2005), 0-100 m, Ayalew and Yamagishi (2005), 150-200 m, Yılmaz (2007), 120-230 m, Guzzetti et al. (2008), 400-700 m, Bai et al. (2009), 150-225 m, Yılmaz (2009a), 675-975 m, Yılmaz (2009b), 1230-1380 m arasındaki yüksekliklerde, Gorsevski and Jankowski (2008) ise düşük ve orta yüksekliklerde heyelan yoğunluğunun daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002), heyelanların daha düşük topoğrafik yüksekliklerde meydana gelmesini, çalışma alanındaki yüksek bölgelerin, duraylı birimlerden oluşması ve bu bölgelerin yoğun bitki örtüsü ile kaplı olmasıyla açıklarken, Çevik and Topal (2003) bu durumu, çalışma alanını oluşturan birimlerin litolojik karakterine ve yapısal kontrole bağlamışlardır. Chau and Chan (2005) ile Ayalew and Yamagishi (2005) ise, bu yüksekliklerde nüfusun fazla olması nedeniyle, yol yarmalarının büyük bölümünün bu bölgelerde olmasına bağlamaktadırlar. Bununla birlikte, topoğrafik yüksekliğin fazla olduğu alanlarda heyelan yoğunluğu tespit eden araştırmacılar da bulunmaktadır (Gritzner et al., 2001; Gökçeoğlu et al., 2005; Caniani et al., 2008). Clerici et al. (2006) ise, çalışma alanlarındaki yamaç yenilmelerinin 401-600 m ve 801-1000 m arasındaki birbirinden farklı yüksekliklerde görülmesini yağmur, kar yağışı ve donma-çözünme döngüsüne bağlamaktadırlar. Göreceli yükseklik, bir noktanın referans alınan bir diğer nokta ile olan yükseklik farkını tanımlar. Nefeslioğlu et al. (2008a), çalışma alanlarında, göreceli yüksekliğin en yüksek değeri 2350 m iken, heyelanların görüldüğü en yüksek değer 1544 m olduğunu, dolayısıyla göreceli yüksekliğin fazla olduğu yerlerde heyelana rastlamadıklarını belirtmişlerdir. Yükseklik parametresi içinde değerlendirilen bir diğer parametre olan sırtlara uzaklık parametresini, girdi parametresi olarak kullanan araştırmacılardan Nefeslioğlu et al. (2008b), çalışma bölgelerinde genellikle heyelanların sırtlardan uzak alanlarda meydana geldiğini belirlemişlerdir. Buna karşın, Yılmaz (2007) ise, sırtlara yakın alanlarda heyelan yoğunluğunun fazla olduğunu tespit etmiştir. Araştırmalarında girdi parametresi olarak yüksekliği kullanan araştırmacıların büyük çoğunluğu, heyelanların genellikle düşük yüksekliklerde meydana geldiğini belirlemişlerdir. Bununla beraber, yüksekliğin litoloji, bitki örtüsü, bozunma

durumu ve yamaç eğimi gibi diğer parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiği de göz ardı edilmemelidir.

#### **2.2.4. Yamaç Geometrisi**

Yamaç geometrisi; yamaç eğriselliği, yamaç şekli ve yamaç uzunluğu parametrelerini içermektedir. Yamaç eğriselliği parametresi, incelenen çalışmaların 46' sında, yamaç şekli 4' ünde ve yamaç uzunluğu ise 2' sinde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Yamaç eğriselliği parametresi içerisinde profil eğriselliği ve plan eğriselliği parametreleri ifade edilmektedir. Profil eğriselliği, yamaç yönelimi yönündeki eğrisellik; plan eğriselliği ise yamaç yönelimine dik olan eğrisellik (yatay yönde) olarak tanımlanabilir (Eastman, 2006). Lee (2004), Lee et al. (2004) ve Lee and Choi (2004)' ye göre, eğrisellik topoğrafyanın morfolojisini tanımlayan bir parametredir. Yamaç eğriselliği açısından yamaçlar dışbükey, içbükey ve düz olmak üzere üç sınıfta incelenmektedirler. Pozitif eğrisellik dışbükey yamacı, negatif eğrisellik içbükey yamacı, sıfır değeri ise düz yamacı işaret etmektedir. Ermini et al. (2005), içbükey yamaçlarda, yenilmelerin yamacın taç kısmında daha çok dairesel kaymalar şeklinde, dışbükey yamaçlarda ise kaymaların topuğun aşağı ve orta kesimlerinde gözlemlendiğini vurgulamışlardır. Araştırmacılar arasında, heyelanların ne tür yamaçlarda meydana geldiğine dair bir görüş birliği olmasa da büyük bir çoğunluğu, içbükey yamaçlarda daha fazla heyelan meydana geldiğini savunmaktadırlar (Lee and Min, 2001; Dai and Lee, 2002; Lee et al., 2002; Lee et al., 2004; Lee and Choi, 2004; Lee and Dan, 2005; Komac, 2006; Lee and Sambath, 2006; Lee et al., 2007; Coelho-Netto, 2007; Bai et al., 2009). Bir çok araştırmacı bu durumu, içbükey yamaçlarda daha fazla ve daha uzun süre, yamaç yağmur suyunun tutulmasıyla açıklamaktadırlar (Lee and Min, 2001; Dai and Lee, 2002; Lee et al., 2002; Lee et al., 2004; Lee and Choi, 2004; Lee and Dan, 2005; Komac, 2006; Lee and Sambath, 2006). Heyelanların, içbükey yamaçlarda daha fazla görüldüğünü savunan araştırmacıların aksine Çan et al. (2005), Havenith et al. (2006), Lee (2007) ve Yılmaz (2007) heyelanların,

dışbükey yamaçlarda daha çok meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Bununla beraber, Havenith et al. (2006), yaptıkları çalışmada heyelanların içbükey şekilli, heyelanın meydana geldiği yamaçların sırtlarının ise dışbükey şekilli olduğunu ve bu ayrımın iyi yapılmasını gerektiğini vurgulamışlardır. Ayanew et al. (2004), Lee and Sambath (2006) ve Lee et al. (2003) yaptıkları analizlerin sonucunda, hem içbükey hem de dışbükey yamaçlarda heyelanların yüksek oranda görüldüğünü, Lee et al. (2006) ise yaptıkları analizler sonucunda, heyelanların meydana gelme oranının, her üç yamaç şekli için de birbirine yaklaşık değerlerde olduğunu belirlemişlerdir. Ohlmacher (2007), toprak akmaları ve kaymalarının yaygın olduğu bir bölgede heyelan oluşma olasılığını değerlendirdiği çalışmasında, plan eğriselliğinin topoğrafik konturların eğriselliği olduğunu ifade ederek, heyelan duyarlılığını etkilediğini vurgulamıştır. Araştırmacı, arazi çalışmalarının, toprak akmalarının plan eğriselliğini dikkate almadan her alanda meydana gelebileceğini gösterdiğini belirtmiştir. Çalışma bölgesinde incelenen alanlardan elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda düz yamaçların, toprak akmaları ve toprak kaymalarına en duyarlı yamaç tipi olduğunu ve içbükey yamaçlarda, dışbükey yamaçlara oranla heyelan duyarlılığının daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, plan eğriselliği azaldıkça heyelana duyarlılığın da azalacağını vurgulamıştır. Yamaç uzunluğu parametresini inceleyen araştırmacılardan Gomez and Kavzoğlu (2005) ise, uzun yamaçların, malzemeyi yamaç aşağıya taşıyan ve boşaltan aşındırıcı faktörlerin potansiyelini ve aşağı akan suyun hızını arttırdığını belirtmişlerdir. Bu nedenle araştırmacılar, yamaç uzunluğunun heyelan aktivitesi açısından önemli bir parametre olduğunu savunmuşlardır. Yamaç eğriselliği parametresi konusunda araştırmacılar arasında bir görüş birliği yoktur ve örneklerden anlaşılacağı gibi heyelanlar hem dışbükey, hem içbükey ve hem de düz yamaçlarda meydana gelebilmektedirler. Ancak, yamaç eğriselliği parametresi girdi parametresi olarak değerlendirilirken, yamacın heyelan meydana gelmeden önceki ilksel durumunun dikkate alınması gerekmektedir.

### 2.2.5. Akarsular ile İlgili Özellikler

Akarsu uzaklık ve akarsu yoğunluğu parametreleri sırasıyla, incelenen çalışmaların 37' sinde ve 11' inde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Drenaj dağılımı, nehir kanalına uzaklık, yüzey suyuna uzaklık, su kaynağına uzaklık ve drenaj ağına uzaklık parametreleri, akarsuya uzaklık parametresi içerisinde incelenmiştir. Akarsuya uzaklık, heyelanın topuk kısmındaki nehir kıyısı erozyonun olasılığını belirlerken, akarsu yoğunluğu, birimlerin bölgesel hidrojeolojik özellikleri hakkında bazı ipuçları vermektedir (Süzen and Doyuran, 2004b). Akarsuların, aşındırıcı süreçleri kapsayan aralıklı akış rejimi ise, akarsu kanallarına yakın alanlarda şiddetli ve yüzeysel kütle kaybına neden olur (Barredo et al., 2000, Zhu and Huang, 2006' dan). Komac (2006)' a göre, akarsuya yakınlık iki sonuç doğurmaktadır: a) yeraltısuyunun varlığı ve b) yüzey suyu ile yüzeyin oyulmasıdır. Araştırmacılar, dreneja uzaklık parametresini sınıflarken, çalışma alanlarının boyutlarına da bağlı olarak, birbirlerinden farklı gruplandırmalar kullanmış ve genellikle akarsuya yakın bölgeleri içeren sınıflarda, heyelan yoğunluğunun fazla olduğunu belirlemişlerdir (Van Westen et al., 2003; Çevik and Topal, 2003; Lee and Talib, 2005; Lee, 2007; Federicia et al., 2007; Yalçın and Bulut, 2007; Thiery et al., 2007; Yalçın, 2008; Yılmaz ve Keskin, 2009). Bununla birlikte, Lee and Sambath (2006), akarsudan uzaklaştıkça, heyelan sıklığının arttığını ve çalışma alanında da heyelanların, akarsudan uzaklığın 500 m ve daha üstü olduğu alanlarda meydana geldiğini vurgulamışlardır. Diğer araştırmacılara oranla daha yüksek değerler içeren ve 0.5 km' den küçük, 0.5-1 km, 1-1.5 km, 1.5-2 km ve 2 km' den büyük alanları kapsayan 5 sınıftan oluşan bir gruplandırma yapan He and Beighley (2008), akarsuya uzaklık parametresini, bölgesel jeomorfoloji ve nehir kanalı erozyonu gibi sınırlandırılmış süreçlerin, heyelanlar üzerindeki etkilerini araştırmak için seçtiklerini ifade etmişlerdir. Akarsuya uzaklık parametresini 0–25 m, 25–50 m, 50–75 m, 75–100 m, 100–125 m, ve >125 m olmak üzere 6 sınıfa ayıran Duman et al. (2005), 125 m' den büyük uzaklıklarda heyelan yoğunluğunun yüksek çıkmasına rağmen, değerlendirmelerinde bu uzaklığı dikkate almamışlardır. Araştırmacılar, ilk 5 sınıfı kullanmış olmalarından dolayı, akarsuya uzaklık

parametresinin, kendi çalışma alanları için heyelanla ilişkilendirilebilir bir parametre olmadığını belirtmişlerdir. Yılmaz (2009a) bu parametreyi, uzaklıkları 0-150 m, 150-300 m, 300-450 m, 450-600 m, 600-750 m, 750-900 m, 900-1050 m, 1050-1200 m, 1200-1350 m ve 1350-2499 m olmak üzere 10 sınıfa ayırarak incelemiştir. Yılmaz (2009b), Yılmaz (2009a) ile benzer şekilde uzaklıkları 0-150 m, 150-300 m, 300-450 m, 450-600 m, 600-750 m, 750-900 m, 900-1050 m, 1050-1200 m, 1200-1350 m ve 1350-2097 m şeklinde 10 sınıfa ayırarak incelemiş ve heyelan yoğunluğunun 150-300 m sınıfında daha fazla olduğunu belirlemiştir. Falaschi (2009), uzaklıkları 0-100 m ve 100-500 m' lik 2 sınıfa ayırmış ve heyelanların 0-100 m arasında bölgede yoğunlaştığını belirlemiştir. Federicia et al. (2007), parametre etkisinin diğer parametrelere oranla daha zayıf olması durumunu, çalışma alanının küçük olmasına ve faktörlerin havza geometrisinden etkilenmesine bağlamışlardır. Nagarajan et al.(2000), akarsu yoğunluğunu, toplam nehir boyunun akarsu havzası alanına oranı olarak tanımlamışlardır. Araştırmacılar, akarsu yoğunluğu yüksekse, süzülmenin düşük ve yüzey akışının hızlı olduğunu, maksimum süzülmenin nehirlerin yanındaki yamaçlarda yani malzemenin permeabilitesinin maksimum olduğu yerde gözlendiğini belirtmişlerdir. Ng (2006), yüksek heyelan yoğunluğunun nehrin yan kollarında gözlendiğini belirlerken, Yılmaz (2007), heyelan duyarlılığının Devrek Nehri civarında düşük ve çok düşük çıkmasını, bu bölgenin çok düz olmasına bağlamıştır. İncelenen çalışmalardan görüldüğü üzere, akarsuya uzaklık mesafesi azaldıkça, akarsuyun, yeraltısuyu varlığı ve aşındırma gibi etkileri nedeniyle heyelan oluşma olasılığının arttığına işaret etmektedir.

#### **2.2.6. Topoğrafik İndeksler**

Araştırmacılar topoğrafik indeksler olarak; akış gücü indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi, yüzey pürüzlülük indeksi ve sediman taşıma kapasitesi indeksini çalışmalarında girdi parametresi olarak kullanmışlardır. İncelenen araştırmaların, topoğrafik nemlilik indeksinin 20' sinde, akış gücü indeksinin 12' sinde, yüzey pürüzlülük indeksinin 7' sinde ve sediman taşıma kapasitesi indeksinin 3' ünde

kullanıldığı belirlenmiştir. Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI), yerel toprak nemliliği durumunu veya hidrolojik-topoğrafik ilişkilere bağlı bir parametre olarak ifade edilebilir. Toprak nemi, yamaç duraylılığında özellikle sığ heyelanlar için önemli bir rol oynamaktadır (Gomez and Kavzoğlu, 2005). Topoğrafik nemlilik indeksi, boşalım alanındaki topoğrafik etkiyi ve bu alanın boyutunu tanımlamak için kullanılmaktadır (Moore et al., 1991; Gökçeoğlu et al., 2005 ve Nefeslioğlu et al., 2008b' den). Caniani et al. (2008), Gomez and Kavzoğlu (2005) ve Ercanoğlu (2005) ise, topoğrafik nemlilik indeksini, nehir tabanının herhangi bir noktasındaki akış birikiminin ölçümü olarak tanımlamışlardır. Topoğrafik nemlilik indeksi değeri, “yamaç ve akış yukarı alan, hesaplanan birimdeki toprak nemi derecesini etkiler” düşüncesine dayanmaktadır (Moore et al.,1991; Yeşilnacar and Topal, 2005 ve Nefeslioğlu et al., 2008a' den). Bu indeks, toprak nemliliğindeki topoğrafik kontrolü tanımlamak için tasarlanmış olduğundan, Gomez and Kavzoğlu (2005)' nun yapmış oldukları çalışmada, toprak su içeriğinin dolaylı ölçümü olarak dikkate alınırken, Ercanoğlu (2005)' nun yaptığı çalışmada, çalışma alanından geçen su akışının konumsal dağılımını tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. Gritzner et al. (2001) ise, çalışmalarında kullandıkları DYNWET modeli ile belirlenen topoğrafik nemlilik indeksinin, karmaşık yerçekiminde erozyon ve birikimin bolluğu ve dağılımını, toprak özelliklerini ve bitki örtüsünü modellemede yardımcı olduğunu belirtmiştir. Gorsevski and Jankowski (2008), topoğrafik nemlilik indeksi, yamaçlardaki yüzey malzemesinin doygunluk derecesini belirlediği için akma türü heyelanların bu faktörle pozitif yönde ilişkili olmasını beklemekteyken, analizler sonucunda akma türü heyelanların yüksek değerlerinin, indeksin orta değerleri ile çakıştığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, topoğrafik nemlilik indeksinin yüksek değerlerinin, düşük yamaç eğimine ve geniş havzalara sahip, vadi tabanları ile sınırlı yerlerde; düşük değerlerinin ise yüksek eğimli yamaçlar ve küçük havzalarda görüldüğünü belirlemişlerdir. Topoğrafik nemlilik indeksi hesaplaması için önerilen eşitlik (Moore et al., 1991; Gökçeoğlu et al., 2005' den), eşitlik 2.1' de verilmiştir.

$$TWI = \ln\left(\frac{As}{\tan \beta}\right) \quad \text{Eş.2.1}$$

Burada  $As$  havza alanı,  $\beta$  ise yamaç eğimine karşılık gelmektedir.

Akış gücü indeksi (SPI), boşalımın belirli bir havza alanı ile orantılı olduğu kabullenmesine dayanan, akan suyun erozyon gücünün ölçümüdür (Moore et al., 1991; Nefeslioğlu et al., 2008a ve Nefeslioğlu et al., 2008b' den). Havza alanı ve eğim arttığında, akış yukarı alan tarafından kontrol edilen su ve su akışının hızı artmakta, bundan dolayı akış gücü indeksi ve erozyon riski de, artış göstermektedir (Yeşilnacar and Topal, 2005). İndeks, akışın potansiyel erozyon gücünü, toprak zonlarının kalınlığını, organik maddeyi, pH' ı, silt ve kum içeriğini ve bitki örtüsü dağılımını kontrol eder (Moore et al.,1993; Yeşilnacar and Topal, 2005' den). Gorsevski and Jankowski (2008)' ye göre, yamacın eteklerinde akış gücü indeksinin değerinin yüksek çıkması, heyelanın tetiklenmesini olası kılmakta ve bu etki dairesel kaymalar için daha fazla olmaktadır. Gökçeoğlu et al. (2005) ise, akış gücü indeksi değerlerinin yüksek çıktığı alanların, yüksek hızlı akımlar için yüksek potansiyelli olduğunu belirtmişlerdir. Akış gücü indeksi hesaplaması için önerilen eşitlik (Moore et al., 1991; Gökçeoğlu et al., 2005' den), Eşitlik 2.2' de verilmiştir.

$$SPI = As \times \tan \beta \quad \text{Eş. 2.2}$$

Burada  $As$  havza alanı,  $\beta$  ise yamaç eğimine karşılık gelmektedir.

Yüzey pürüzlülük indeksi parametresini kullanan araştırmacılardan Santacana et al. (2003), yüksek pürüzlülüğe sahip yamaçların, heyelana daha yatkın olduğunu belirtmişlerdir. Gorsevski and Jankowski (2008), sediman taşıma kapasitesi indeksinin (LS), yüzey ve yeraltısuyu akışını hızlandırmaya etki ettiğini vurgulamışlardır. Nefeslioğlu et al. (2008a) ise, bu indeksi çalışmalarında ikincil bir parametre olarak kullanmışlardır. İncelenen çalışmalar, topoğrafik indekslerin az sayıda araştırmacı tarafından girdi parametresi olarak kullanıldığını gösterse

de, heyelan oluşumunda etkili olan parametreler arasında önemli bir yeri vardır. Sediman taşıma kapasitesi indeksi hesaplaması için önerilen eşitlik (Moore and Wilson, 1992; Nefeslioğlu et al., 2008' den), Eşitlik 2.3' de verilmiştir.

$$LS = (m+1) \left( \frac{As}{22.13} \right)^m \left( \frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n \quad \text{Eş.2.3}$$

Burada  $As$  havza alanı,  $\beta$  ise yamaç eğimi,  $m=0.4$  ve  $n=1.3$  değerlerine karşılık gelen katsayılarıdır.

### 2.2.7. Jeomorfolojik Özellikler

İncelenen çalışmaların 19' unda, jeomorfolojik özellikler girdi parametresi olarak kullanılmıştır. İksel rölyef, jeomorfoloji, jeomorfolojik alt birimler, morfolojik değişkenler ve yerşekilleri jeomorfolojik özellikler içerisinde incelenmiştir. Van Westen et al. (2003), jeomorfolojik bilginin başarı oranını yükselttiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, incelenen çalışmalarda jeomorfolojik özelliklerle ilgili parametreleri kullanırken, alanları jeomorfolojik birimlere ayırmış ve hangi sınıfta daha fazla heyelan meydana geldiğini belirlemişlerdir. Örneğin, Lee et al. (2002; 2006), Lee (2004), yaptıkları analizler sonucunda, heyelanların topoğrafik sınıflar içerisinde, en çok dağlık alanlarda, Duman et al. (2006) ise, yaptıkları jeomorfolojik sınıflama sonucunda heyelanların fan çökelleri, doldurulmuş alanlar, bataklıklar ve engebeli topoğrafyada yoğun olarak görüldüğünü belirlemişlerdir. Coelho-Netto (2007), çalışılan alanı morfometrik alt sınıflara ayırarak, heyelan duyarlılığını inceledikleri çalışma içerisinde hazırladıkları jeomorfolojik haritada, diğer araştırmacılardan farklı olarak arazinin yamaç geometrisi (eğrisellik) özellikleri ile yamaç eğimi sınıflarını sentezlemişlerdir.

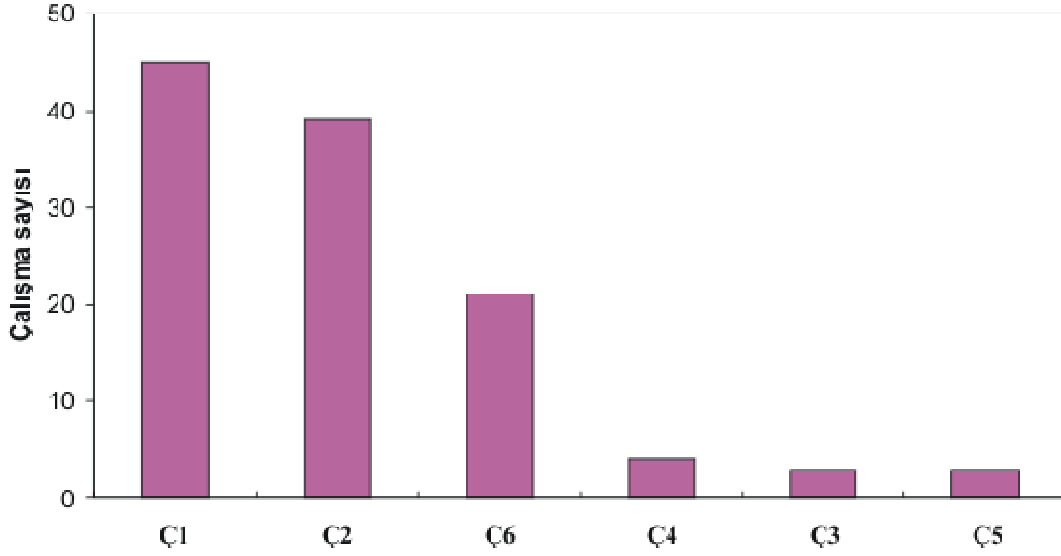
### 2.2.8. Havza Özellikleri

Havza özellikleri, incelenen parametrelerin 11' inde girdi parametresi olarak kullanılmış ve drenaj havzası, havza uzunluğu, havza alanı, havza eğimi, havza yüksekliği, ortalama havza açısı, akış yukarı birikim alanı ve akış yukarı birikim

uzunluğu, bu parametre içerisinde değerlendirilmiştir. Toprağın toplayabileceği ve szbileceği su miktarı, havza alanına bağlı olup, daha büyük alanlar, daha fazla su szlmesi ve daha fazla heyelan oluşumunu işaret edebilir (Santacana et al., 2003). Havzanın uzunluğu havza alanının boyutlarını, yeraltısuyu toplama kapasitesini ve sediman birikimini tanımlar (Oyagi, 1984; Santacana et al., 2003' den). Yüzey kkellerinin alanı ve uzunluğu, suyun, yenilmeye duyarlı olan malzeme içerisine süzülme kapasitesinin bir göstergesidir. Ortalama havza açısı ise suyun toprağa süzülmesine yardımcı olan kapasiteyi tanımlar (Santacana et al., 2003). Gorsevski and Jankowski (2008), havza ykseklieği değerlerinin, su dağılımının heyelan için kritik olduğu yerlerde, dar bir aralıkta dağılım gösterdiğini belirlemişlerdir. Baeza and Corominas (2001) ise, sığ heyelanların, az eğimli havzalarda meydana gelmesinin beklendiğini ifade etmişlerdir. Van Den Eeckhaut et al. (2006), akış yukarı birikim alanını, yüzey ve yeraltı akışına vekil olarak kullanmışlardır. Havza zellikleri, yüzey ve yeraltı suyu ile jeolojik malzeme arasındaki ilişkiyi tanımlamak amacıyla kullanılarak, heyelan oluşum mekanizmasının tanımlanabilmesi açısından önemli olarak değerlendirilmiştir.

### **2.3. Çevresel Parametreler**

Arazi kullanımı (1), bitkilere ilişkin özellikler (2), yola uzaklık (6), yerleşime uzaklık (4), enerji hatlarına uzaklık (3), yol yoğunluğu (5) parametreleri, çevresel parametreler içerisinde değerlendirilmiştir (şekil 2.4).



Şekil 2.4. Çevresel parametrelerin dağılımı.

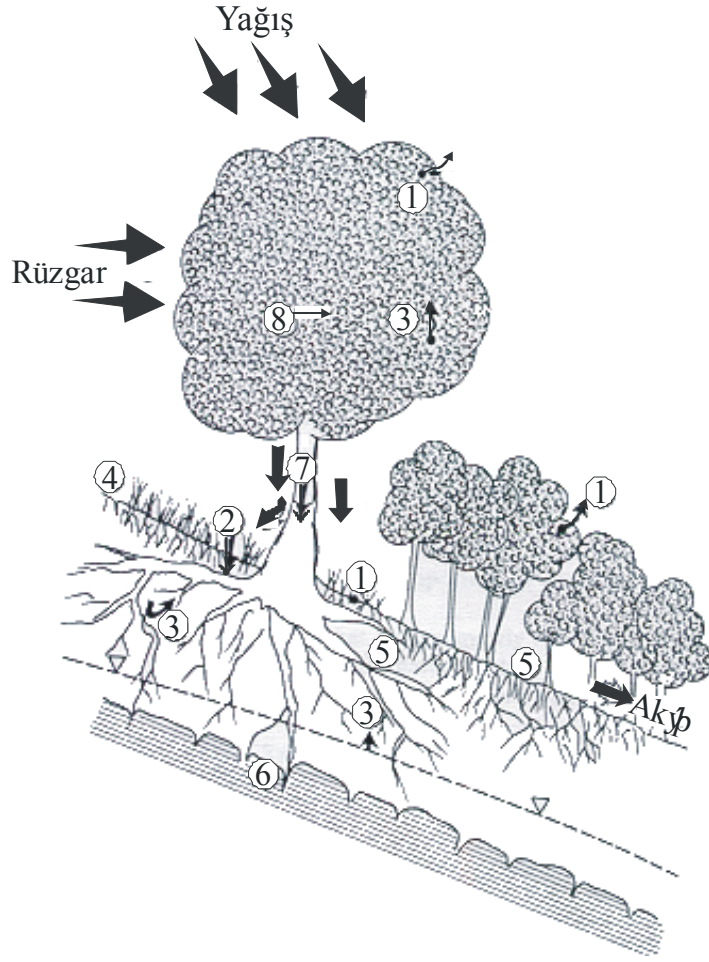
### 2.3.1. Arazi Kullanımı

İncelenen çalışmaların 45' inde arazi kullanımı, girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Arazi kullanımı parametresini kullanan bazı araştırmacılar, bitkilere ilişkin özellikleri içeren alanları da bu parametre içerisinde sınıflandırdıklarından, bitkilere ilişkin özellikleri ayrıca bir parametre olarak değerlendirmemişlerdir (Baeza and Corominas, 2001; Lee and Min, 2001; Ercanoğlu and Gökçeoğlu, 2002; Lee et al., 2002; Çevik and Topal, 2003; Van Westen et al., 2003; Ayenew and Barbieri, 2005; Lee and Sambath, 2006; Coelho-Netto, 2007; Federicia et al., 2007; Akgün et al., 2008; Melchiorre, 2008; Yalçın, 2008; Bai et al., 2009; Tangestani, 2009). Caniani et al. (2008)' ye göre, tarımsal aktiviteler, drenaj ağını ve süzülme etkileyerek, heyelan oluşumunu artırıcı yönde etkilerinin olduğunu vurgulamaktadırlar. Meusburger and Alewell (2008) yaptıkları çalışmada, arazi kullanımının, heyelanların konumsal dağılımını etkilediğini ve yeni heyelanların oluşumuna neden olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu parametreyi kullanırken, arazi kullanım alanlarına göre sınıflama yapmış ve her araştırmacı kendi çalışma bölgesine göre, farklı kullanım alanlarında heyelanların yoğunlaştığını belirlemişlerdir. Lee and Min (2001), Lee et al. (2002), Lee and

Sambath (2006) ve Federicia et al. (2007) ormanlık alanlarda; Dai and Lee (2002), yoğun otlak alanlarda; Çevik and Topal (2003), tarımsal alan ve ceviz ağaçlarının bulunduğu alanlarda; Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2004), boş ve tarımsal alanlarda; Wang and Sassa (2005), ormanlık ve litosollerin bulunduğu alanlarda; Ayenew and Barbieri (2005), ağaçların seyrek olarak bulunduğu alanlarda; Nefeslioğlu et al. (2008a), ormansız toprak alanlar ve tarım alanlarında; Yalçın (2008), çay ekim alanlarında ve ormanlarda; Akgün et al. (2008), yerleşim alanı ve çay ekim alanlarında; Bai et al. (2009), yağmur tarafından beslenmiş, dağlık tarımsal alanlarda; Falaschi (2009), tarım alanlarında heyelan yoğunluğunun yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2002) ise, ormanların, yamaç duraylılığı üzerinde pozitif etkisi olduğunu ve çayırılık alanlarda daha fazla heyelan olduğunu gözlemlemişlerdir. Çevik and Topal (2003), orta yükseklikte eğime sahip yamaçlardaki tarımsal alanların heyelana yatkın olmasını, bu alanlarda sulama yapılmasına bağlamaktadırlar.

### **2.3.2. Bitkilere İlişkin Özellikler**

Bitki örtüsü, ağaç çapı, ağaç yaşı, ağaç türü, ağaç yoğunluğu, kök dayanımı, bitki örtüsü indeksi ve bitki örtüsü yükü, bitkilere ilişkin özellikler parametresi içerisinde değerlendirilmiş ve bu parametrenin, incelenen çalışmaların 39' unda, girdi parametresi olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Bitki örtüsünün, heyelanlar üzerinde olumlu ve olumsuz yönde etkilerinin olduğu bilinmektedir (Şekil 2.5).



#### 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 arttırarak 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 arttırır.

#### MEKANİK SİSTEM

5. Kökler, zemini güçlendirerek makaslama dayanımını arttırır.
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 arttırır.
8. Bitkiler, rüzgarın yarattığı dinamik yükleri yamaçta 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

Şekil 2.5. Doğal yamaçların duraylılığını etkileyen yamaç-bitki etkileşimleri (Greenway, 1987' den).

Araştırmacılar çalışmalarında, bitki örtüsünün heyelanlar üzerindeki etkisi ile ilgili farklı görüşler belirtmişlerdir. Nagarajan et al. (2000)' e göre yoğun bitki örtüsü, süzülme için gereken suyun kullanılabilirliğini azaltırken, bitki kök sistemleri toprak dayanımını arttırmaktadır. Lee and Min (2001), Lee et al. (2002) ve Lee et al. (2004)' ye göre, geniş çaplı ağaçlar ve yaşlı ağaçların bulunduğu alanlarda, heyelan olma olasılığının daha az olduğu savunulmaktadır. Yoğun yağışlar olduğu zaman, bitkilerin su tutma ve toprak içindeki gözenek suyu basıncını azaltma etkisi vardır. Bununla birlikte, Schernthanner (2005), bitki örtüsünün, aşırı yağış nedeniyle koruyucu bir etki yaratmadığını ve pek çok heyelanın bitki örtüsünün yoğun olduğu dik alanlarda meydana geldiğini belirlemiştir. Lee and Choi (2004) ise, kök sistemi güçlü olan ağaçların olduğu alanlarda, heyelan olma olasılığının daha düşük olduğunu, Lee et al. (2003)' nin ifade ettiği gibi, küçük çaplı ve daha genç ağaçların olduğu alanlarda, heyelanların daha fazla görüldüğünü ve bitki örtüsü yoğunluğu azaldıkça heyelan olma olasılığının arttığını belirtmişlerdir. Gomez and Kavzoğlu (2005), kohezyonun, içsel sürtünme açısının, toprak ağırlılığının ve gözenek suyu basıncının, bitki varlığı nedeniyle değiştiğini, bitki örtüsünün kök desteği boyunca toprak kohezyonunu ve toprağa süzülmesini veya sızıntı boyunca negatif su basıncını artırabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarda kullanılan, bitkilere ilişkin diğer özellikler, bitki örtüsü indeksi ve bitki örtüsü yüküdür. Ercanoğlu (2005), Ercanoğlu et al. (2008) ve Yılmaz (2009b), yaptıkları heyelan duyarlılık çalışmasında bitki örtüsü göstergelerini belirlemek amacıyla, sıkça kullanılan, eğim tabanlı bitki örtüsü indeksi NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)' ı kullanmışlardır. Gorsevski et al. (2006) ise, çalışmalarında girdi parametresi olarak, bitki örtüsü yükünü kullanmış ve bu yükün, yamaç üzerinde ek bir yerçekimi kuvveti olacağını vurgulamışlardır. Bitki rts parametresini kullanan araştırmacılar, genellikle bitki örtüsünün hem olumlu hem de olumsuz etkileri üzerinde durmuşlar ve ağaç kökü, çapı, yaşı gibi özellikleri dikkate alarak değerlendirme yapmışlardır.

### 2.3.3. İnsan Etkisi

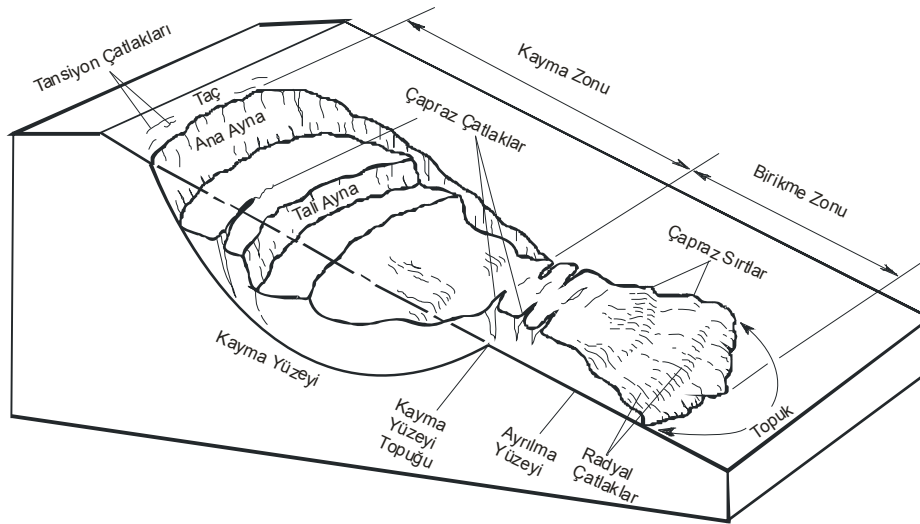
Yerleşime uzaklık, yol yoğunluğu ve yola uzaklık parametreleri, insan etkisi parametresi içerisinde incelenmiştir. Yola uzaklık, incelenen çalışmaların 21' inde, yerleşime uzaklık 4' ünde, enerji hatlarına uzaklık 3' ünde ve yol yoğunluğu 3' ünde, girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Nefeslioğlu et al. (2008a)' ne göre, yolların heyelan üzerinde iki çeşit etkisi vardır. Bunlardan ilki, yol yapımının heyelanlara neden olabileceği, ikincisi ise heyelanların, yollara uzun yıllar içerisinde zarar verebileceğidir. Ayalew and Yamagishi (2005), yol yarmalarının, antropojenik olarak duraysızlığı arttıran alanlar olduğunu, yolun bir engel, çukur ya da su akışı için bir geçiş koridoru olarak davranabildiğini ve dağlık alanlardaki yerlerine bağlı olarak, bir heyelan oluşum kaynağı olarak değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir. Yalçın and Bulut (2007) ise, yamaç kenarındaki yolların; hem topoğrafyadaki, hem de yamaç topuğundaki yüklerin artışına neden olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacıların büyük bir kısmı, yola yakın alanlarda heyelanların yoğunlaştığını belirlemişlerdir (Ayalew and Yamagishi, 2005; Duman et al., 2005; Akgün and Bulut, 2007; Yılmaz, 2007; Akgün et al., 2008; Yılmaz and Keskin, 2009). Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2004) ve Van Westen et al. (2003) ise çalışma alanları için, yollara uzaklık parametresinin önemli bir parametre olmadığını tespit etmişlerdir. Enerji hatlarına uzaklığı, çalışmalarında girdi parametresi olarak kullanan araştırmacılardan Yılmaz (2007), heyelanların enerji hatlarına yakın mesafelerde yoğunlaştığını belirlemiştir. Örneklerden de anlaşılacağı gibi, yerleşim alanları ve yol kazıları, doğal yamaç duraylılığını olumsuz yönde etkilemekte, bununla birlikte parametrik önemleri çoğunlukla düşük olarak değerlendirilmektedir.

### 3. HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ ÜRETİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Heyelanların değerlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, özellikle son 20 yılda önemli bir artış gözlenmektedir. Son yıllarda bilgisayar teknolojisi ve buna koşut olarak, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve bilgisayar yazılımlarındaki gelişmelerin de, bu konudaki artışa önemli katkıları olmuştur. Heyelan değerlendirmeleri kapsamında yapılan çalışmaları, envanter, duyarlılık, tehlike ve risk modellemeleri şeklinde gruplandırmak mümkündür (Van Westen et al., 2008). Bunlardan, tez çalışmasına da konu olan heyelan duyarlılığı üzerinde durulmuş, tehlike ve risk kavramlarına ise kısaca değinilmiştir. Tez çalışması kapsamında bu bölümde, heyelan duyarlılık haritalamasında kullanılan yöntemler kısaca değinilmiştir.

#### 3.1. Temel Kavramlar

Cruden (1991)' e göre, bir yamaçtaki kaya, toprak zemin veya molozların yamaç aşağı doğru hareket etmesi, heyelan olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.1. Heyelan özelliklerini tanımlayan terminoloji (Varnes, 1978; Cornforth, 2005' den).

Bir bölgedeki heyelan duyarlılığı, heyelan oluşumunda etkin olabilecek girdi parametrelerinin, başka bir ifadeyle hazırlayıcı parametrelerin dikkate alınmasıyla, heyelan gelişmesi olası alanların, göreceli olarak sınıflandırılması şeklinde tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle bu tanım, güncel ve/veya geçmişte meydana gelmiş heyelan özelliklerinin belirlenip, gelecekte meydana gelebilecek heyelan yerlerinin, dikkate alınan parametreler yardımıyla ortaya konulmasını kapsamaktadır (Varnes, 1984).

Aleotti and Chowdhury (1999)' ye göre bir heyelan duraylılık değerlendirmesi;

- Gelecekte de heyelanlar nerede oluşacak?
- Hangi tür heyelanlar oluşacak?
- Heyelanlar nasıl oluşacak?

sorularına cevap verir nitelikte olmalıdır.

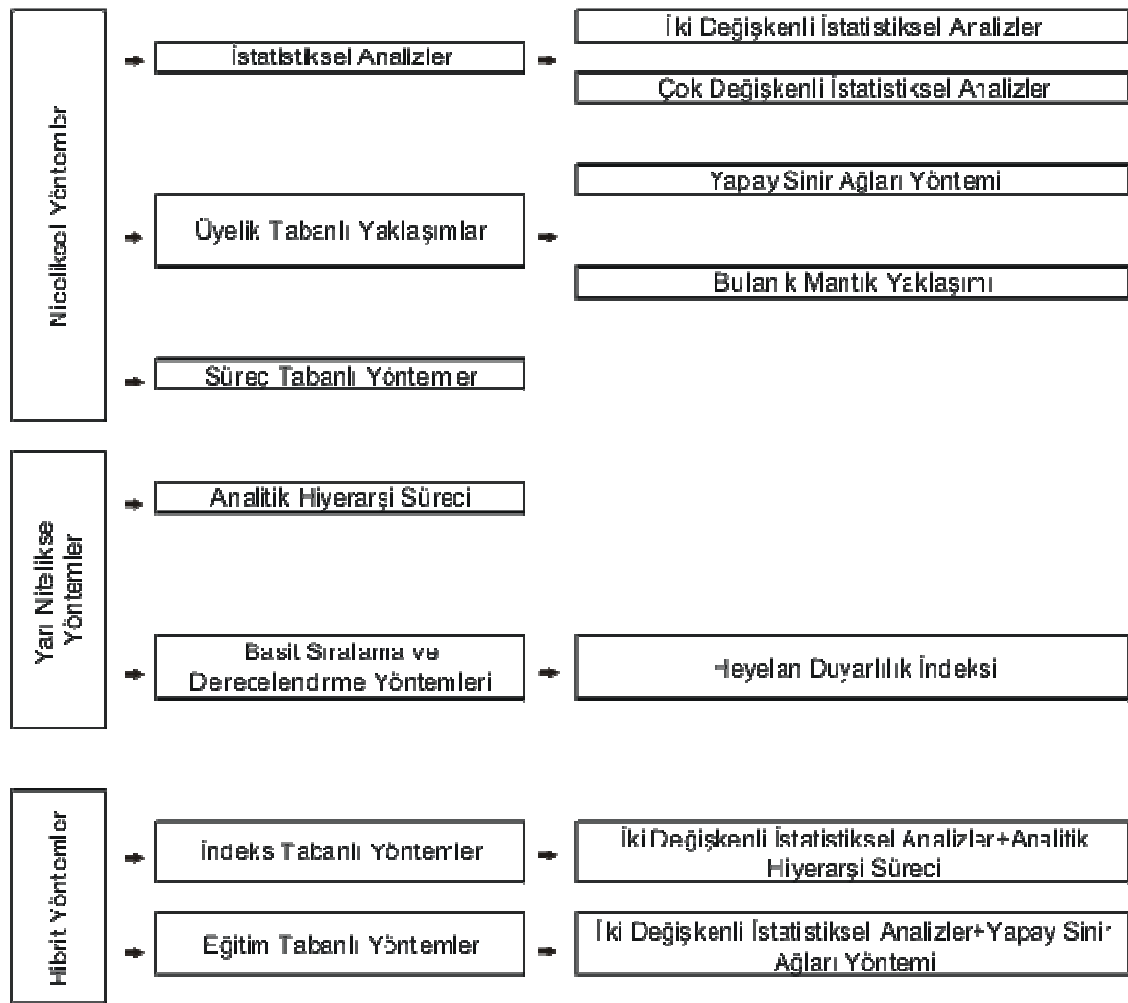
Heyelan tehlikesi ise, Varnes (1984) tarafından, belirli bir alanda ve zaman diliminde potansiyel olarak hasar verici bir etkiye sahip bir heyelanın oluşabilme olasılığı olarak tanımlanmıştır. Bu tanım, zaman ve konum faktörlerini bir arada içermekte ve heyelan tehlikesinin belirlenmesinde, yağış ve deprem gibi tetikleyici parametrelerin dikkate alınmasını gerektirmektedir.

Heyelan riski ise, heyelan duyarlılık ve tehlike kavramlarının yanı sıra; nüfus ve ekonomik maliyet gibi sosyo-ekonomik parametreleri de içeren bir kavramdır (Aleotti and Chowdhury, 1999).

### **3.2. Heyelan Duyarlılık Değerlendirmelerinde Kullanılan Yöntemler**

Ayalew et al. (2004), heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde kullanılan yöntemleri; niceliksel, yarı niteliksel ve hibrit yöntemler olmak üzere üç ana başlık altında incelemiştir. Araştırmacılar, niceliksel analizleri, süreç tabanlı yöntemler, istatistiksel analizler (iki değişkenli ve çok değişkenli istatistiksel analizler), üyelik

tabanlı yöntemler (yapay sinir ağları ve bulanık mantık yaklaşımı) olmak üzere üç; yarı niteliksel analizleri, basit sıralama ve derecelendirme yöntemleri (heyelan duyarlılık indeksi) ve analitik hiyerarşi süreci olarak iki, hibrit yöntemleri de indeks tabanlı yöntemler (iki değişkenli istatistiksel analizler+analitik hiyerarşi süreci) ve eğitim tabanlı yöntemler (iki değişkenli istatistiksel analizler+yapay sinir ağları yöntemi) olarak iki başlık altında incelemiştir.



Şekil 3.2. Heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanılan yöntemler.

Şekil 3.2' den de görüleceği üzere, heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde birçok yöntem mevcut olup, bu yöntemler birbirinden temelde çok önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin, heyelan duyarlılığı ile ilgili literatür incelendiğinde, özellikle son yıllarda, lojistik regresyon ve bulanık mantık-yapay sinir ağları gibi

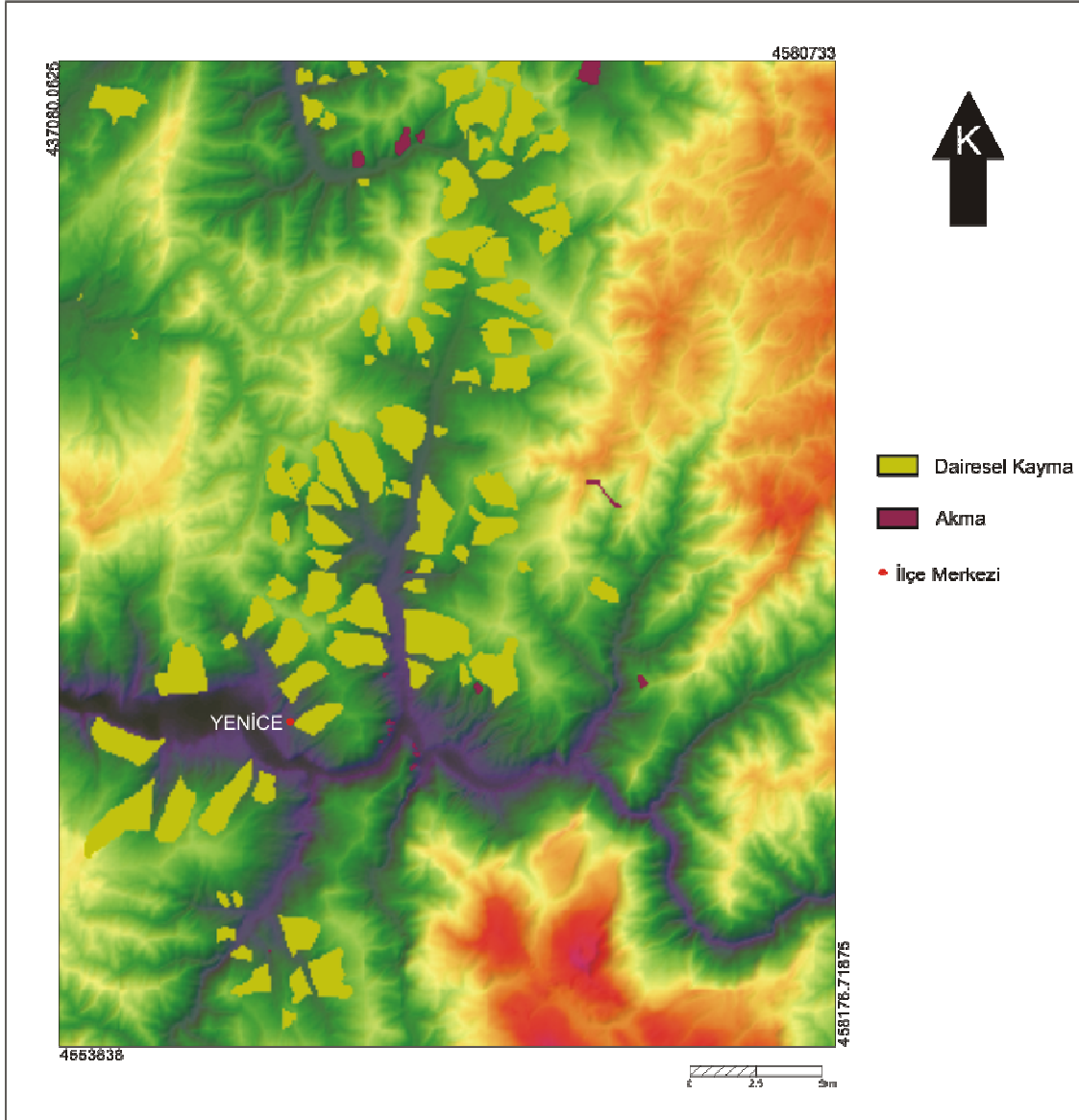
yapay zeka yöntemlerinin kullanımında, önemli bir artış söz konusudur. Bununla birlikte, basit sıralama ve derecelendirme, iki değişkenli istatistiksel analizler gibi, diğer yöntemlere göre daha basit sayılabilecek yöntemlerden de, iyi sonuçlar alınabilmektedir (Yılmaz, 2009a). Bu durum, heyelan duyarlılığının değerlendirilmesinde kullanılan yöntem(ler)den çok, dikkate alınan parametrelerin etkisinin de önemli bir rolü olduğuna işaret etmektedir. Diğer bir ifade ile heyelan oluşumunda etkin olan parametreler doğru seçilirse, üretilecek haritaların, daha temsil edici ve/veya mevcut durumu daha iyi yansıtıcı özellikte olacağı söylenebilir. Bu nedenle, yöntemler konusunda ayrıntılı bir değerlendirme yapılmamış, tez çalışmasının konusu da dikkate alınarak, daha çok heyelan değerlendirmelerinde kullanılan parameterler ve bunların etkilerinin araştırılması yoluna gidilmiştir. Söz konusu bu çalışmalara, izleyen bölümlerde değinilmiştir.

## 4. HEYELAN ENVANTERİ VE KULLANILAN PARAMETRELER

### 4.1. Heyelan Envanteri

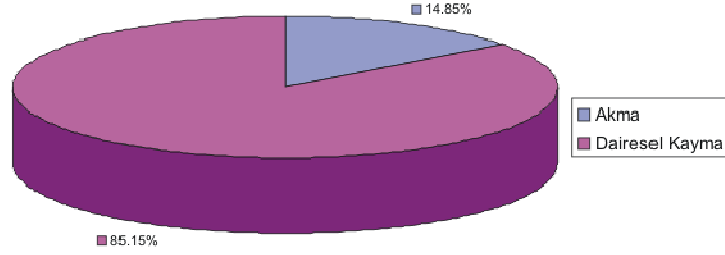
Heyelan envanteri, bir bölgedeki heyelanların konumu, türü, aktivitesi ve fiziksel özellikleri gibi konulara ilişkin bilgileri içeren, çoğunlukla bir harita ve bununla ilişkilendirilmiş bir veri tabanından oluşan veri topluluğu olarak tanımlanmaktadır (Fell et al., 2008). Ayrıca, heyelan duyarlılık, tehlike ve risk modellemeleri için temel altlık olmasından ötürü, son derece büyük bir öneme sahiptir. Diğer bir deyişle, yapılacak değerlendirme veya modelleme türü ne olursa olsun, herhangi bir heyelan çalışmasının başlangıç aşamasındaki en önemli unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir (Aleotti and Chowdhury, 1999; Guzzetti et al., 1999).

Tez çalışması kapsamında, gerek parametrik değerlendirmeler için, gerekse heyelan duyarlılık değerlendirme analizlerinde kullanılmak üzere, çalışma alanının heyelan envanter haritası oluşturulmuştur. Heyelan yerleri, ayrıntılı saha çalışmaları ile belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma alanının güney paftalarına (F28 c1 ve c2) ilişkin hava fotoğrafları da incelenmiş ve belirlenen heyelanlar sahada kontrol edilerek heyelan envanterine eklenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, çalışma alanında toplam 101 adet heyelan yeri haritalanmıştır (Şekil 4.1). Haritalanan heyelanlar ve bunlara ilişkin tür, boyut, yamaç eğimi, bakı, topoğrafik yükseklik gibi bazı tanımlayıcı özellikler, standart bir heyelan envanter formuna kaydedilmiştir. Bununla birlikte, parametrik değerlendirmeler içinde yer alan birçok sayısal heyelan özelliği (topoğrafik nemlilik indeksi, yamaç eğriselliği, NDVI gibi), otomatik olarak oluşturulan ve bir sonraki bölümde değinilen veri tabanından elde edildiği için, bu bölümde sadece tür ve boyutlara ilişkin özellikler özetlenmiştir.



Şekil 4.1. Çalışma alanının heyelan envanter haritası.

Çalışma alanındaki heyelanlar, Cruden and Varnes (1996) sınıflama sistemine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflamaya göre, çalışma alanındaki heyelanların 86 tanesi dairesel toprak kayması (59 adet çoklu, 27 adet tekil) ve 15 tanesi de (8 adet çoklu, 7 adet tekil) toprak akması şeklinde sınıflandırılmıştır (Şekil 4.2). Bu heyelan sınıflarına ilişkin örnekler, Şekil 4.3' te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Çalışma alanındaki heyelan türlerinin dağılımı.



Şekil 4.3. Çalışma alanındaki heyelan türlerinden bir görünüm: (a) toprak akması ve (b) dairesel kayma.

Çalışma alanında meydana gelen heyelanların boyutları incelendiğinde ise, alansal olarak en küçük boyutlu heyelan  $7655 \text{ m}^2$  lik bir alan kaplamaktayken, en büyük boyutlu heyelan ise  $1.94 \text{ km}^2$  lik bir alana karşılık gelmektedir. Sahada yapılan haritalamalar sırasında, heyelanlara ilişkin derinlik ölçümleri de mümkün olan lokasyonlarda gerçekleştirilmiştir. Buna göre dairesel kaymalar ağırlıklı

olarak 10 m' den fazla (derin), akmalara ise 1-5 m arasında (sığ) değişen derinliğe sahiptir.

#### **4.2. Heyelan Değerlendirmelerinde Kullanılan Parametreler**

Tez alışması kapsamında, heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde kullanılmak üzere, ilk aşamada 2. Bölümde değinilen parametre değerlendirmeleri dikkate alınmıştır. Buradaki amaç, değerlendirilen 114 adet bilimsel çalışmadaki genel eğilimden de yararlanarak, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde dikkate alınacak parametrelerin seçilmesidir. Şekil 2.1' de gösterilen ve araştırmacıların daha yüksek oranda kullandıkları parametreler, eldeki olanaklar dahilinde üretilmiştir. Buna göre, değerlendirilen çalışmalar dikkate alındığında ve ulaşılabilen verilerle, duyarlılık haritası hazırlamada kullanılmak üzere; yamaç eğimi, baki, yamaç şekli, yükseklik, bitki örtüsü indeksi (NDVI), arazi kullanımı, drenaja uzaklık, yollara uzaklık, çizgiselliğe uzaklık, sırtlara uzaklık, akış gücü indeksi, sediman taşıma kapasitesi indeksi ve topoğrafik nemlilik indeksi parametreleri olmak üzere, toplam 13 adet parametre haritası üretilmiştir. Araştırmacılar arasında yüksek oranda bir kullanıma sahip olan litoloji parametresi ise, heyelanların sadece Üst Kretase filii içinde gelişmiş olması nedeniyle dikkate alınmamıştır.

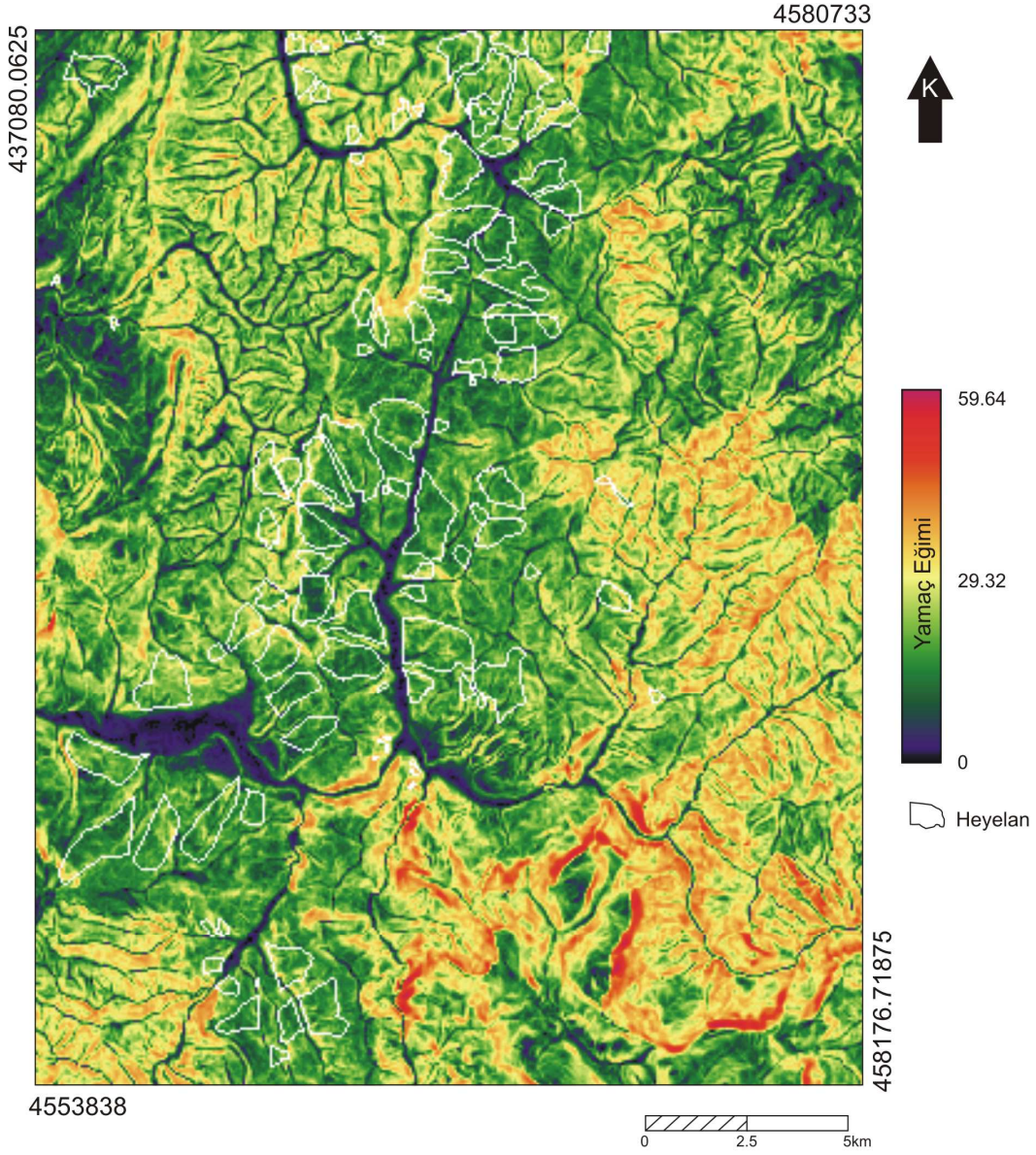
Farklı kaynaklardan oluşturulan parametre haritaları için Sayısal Arazi Modeli (SAM) altlık olarak dikkate alınmıştır. Çalışma alanının SAM' ı, Harita Genel Komutanlığı' ndan temin edilen 1/25000 ölçekli sayısal topoğrafik verilerden elde edilmiştir. 20m x 20m çözünürlüğe sahip olan SAM, 1418975 adet piksel içermektedir. Duyarlılık haritaları da dahil olmak üzere, tüm parametre haritaları SAM ile aynı görüntü özelliklerine sahiptir. Tez çalışmasında dikkate alınan parametreler ve bunlara ilişkin özelliklere, izleyen paragraflarda değinilmiştir.

#### 4.2.1. Yamaç Eğimi

Heyelan oluşumunda etkin parametrelerden biri olarak değerlendirilen yamaç eğimi parametresi, heyelan duyarlılığının değerlendirilmesinde de araştırmacılar tarafından en çok kullanılan parametrelerden biridir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001; Gritzner et al., 2001; Lee and Min, 2001; Lee et al., 2002; Lee et al., 2003; Westen et al., 2003; Ayenew et al., 2004; Ercanoğlu et al., 2004; Lee et al., 2004; Lee and Choi, 2004; Ercanoğlu, 2005; Gomez and Kavzoğlu, 2005; Lee and Talib, 2005; Moreiras, 2005; De Vita et al., 2006; Lee and Sambath, 2006; Van Den Eeckhaut et al., 2006; Yalçın and Bulut, 2007; Canioni et al., 2008; Guzzetti et al., 2008; Meusburger and Alewell, 2008; Nefeslioğlu et al., 2008a; Nefeslioğlu et al., 2008b; Yalçın, 2008; Falaschi, 2009; Yılmaz, 2009a; Yılmaz, 2009b). Yamaç eğiminin artmasıyla, genelde yamaçların duraylılığında azalma etkisi olacağı düşünülse de, bu çalışma alanında da olduğu gibi, son derece düşük eğimlerde de heyelan gelişimi olasıdır. Buradaki temel gerekçe, çalışma alanındaki fliš türünde malzemenin bozunması sonucunda oluşmuş toprak zeminlerin, daha az eğimli topoğrafyalarda birikmesi sonucunda diğer parametrelerin de etkisiyle heyelanların oluşmasıdır. Dik yamaçlar, çoğunlukla dayanıklı kayalarla örtüldüğü için, bu kesimlerde heyelanlara rastlanılmamaktadır.

Çalışmada kullanılan yamaç eğimi haritası, SAM yardımıyla Idrisi Andes programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4.4).

Çalışma alanındaki yamaç eğimi değerleri, 0-58.64° arasında değişmekte olup, yamaç eğimi parametresi, 0-10°, 10-20°, 20-30°, 30-40°, 40-50°, 50-60°' lik altı sınıfa ayrılarak incelenmiştir. Heyelanlı alanların yaklaşık % 60.3' ünün, 10-20° lik sınıfta yer aldığı belirlenmiştir.



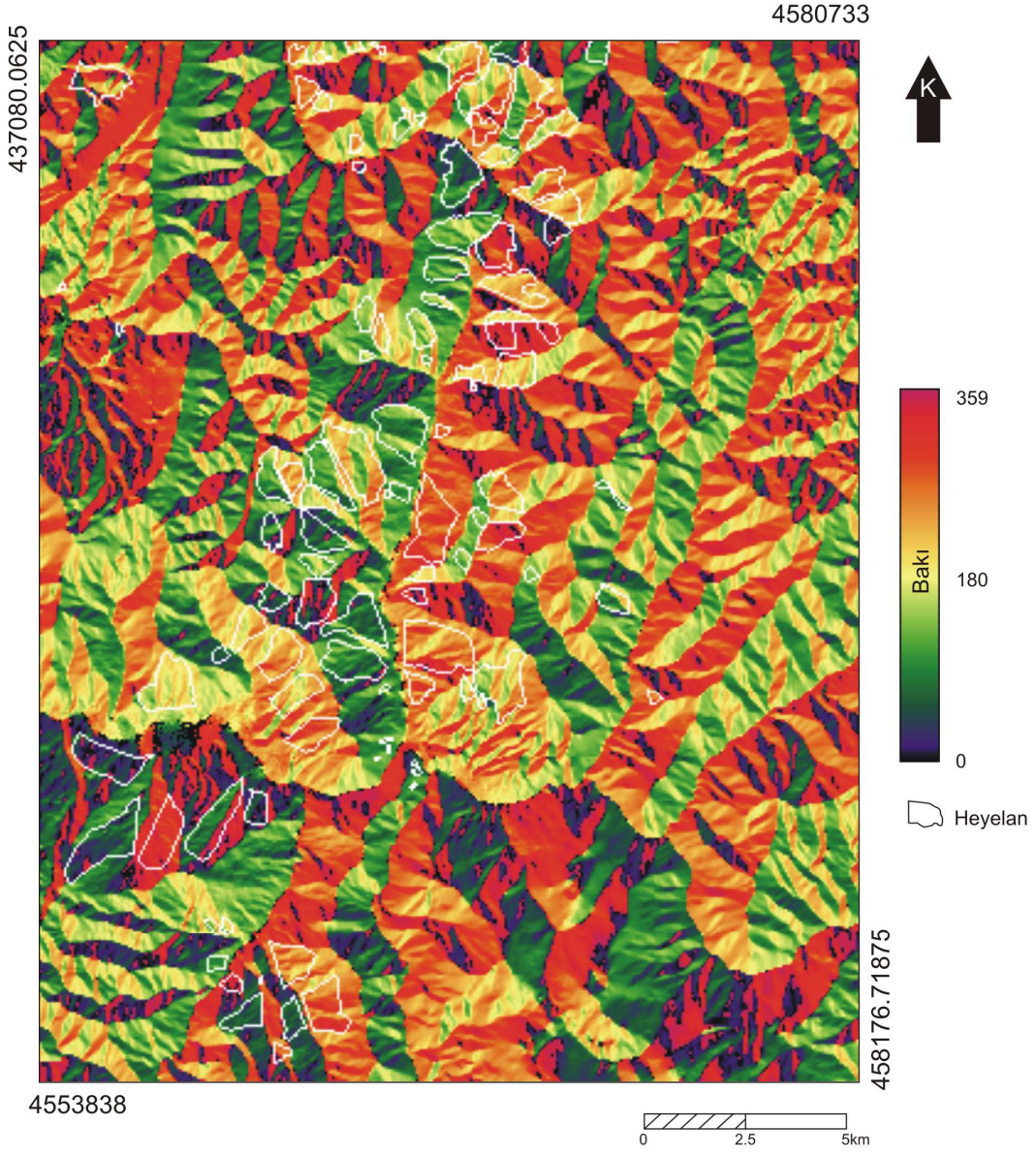
Şekil 4.4. Çalışma alanının yamaç eğimi haritası.

Heyelan türlerine göre yapılan incelemede, dairesel kaymaların 10-20° yamaç eğimi sınıfında; akmaların ise 20-30° sınıfında daha fazla görüldüğü belirlenmiştir.

#### 4.2.2. Bakı

Bakı, araştırmacılar tarafından tercih edilen fakat üzerinde görüş birliği sağlanamamış parametrelerden bir tanesidir (Nagarajan et al., 2000; Lee and Min, 2001; Lee and Choi, 2004; Lee and Dan, 2005; Moreiras, 2005; Havenith et al., 2006; Yalçın and Bulut, 2007; Nefeslioğlu et al., 2008; Ruff and Czurda, 2008; Yılmaz, 2009a; Pradhan et al., 2009). Bakı parametresi çoğunlukla, yamaçların yağış alması, kar örtüsünün güneş görmeyen yamaçlarda daha uzun süreli kalması gibi etkilerle ilişkilendirilerek, yamaç duraylılığında azalıma yol ağması şeklinde değerlendirilmektedir.

Çalışma alanının bakı haritası SAM yardımıyla, Idrisi Andes programı kullanılarak oluşturulmuştur (şekil 4.6). Bakı değerleri ana yönler dikkate alınarak, kuzey (337.5-22.5°) (K), kuzeydoğu (22.5-67.5°) (KD), doğu (67.5-112.5°) (D), güneydoğu (112.5-157.5°) (GD), güney (157.5-202.5°) (G), güneybatı (202.5-247.5°) (GB), batı (247.5-292.5°) (B), kuzeybatı (292.5-337.5°) (KB) ve düz olarak 9 sınıfa ayrılarak incelenmiş ve heyelanların güneybatıya bakan yamaçlarda, diğer yönelimlere oranla daha fazla geliştiği belirlenmiştir.



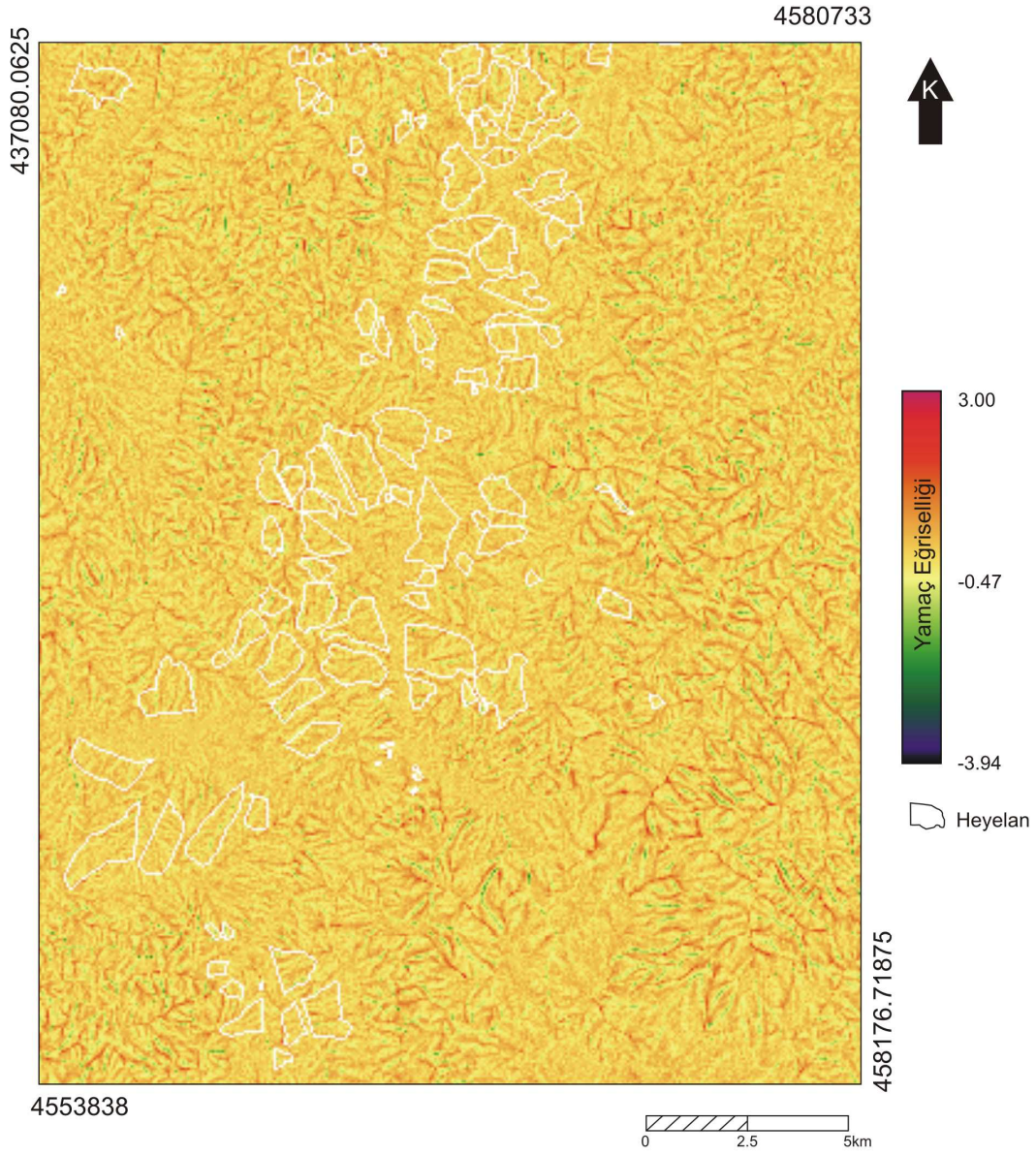
Şekil 4.5. Çalışma alanının baki haritası.

Baki parametresi heyelan türlerine göre ayrı ayrı incelendiğinde; dairesel kaymaların çoğunlukla güneybatı (GB), akmalara ise çoğunlukla doğu (D) sınıflarında meydana geldiği belirlenmiştir.

### 4.2.3. Yamaç Eğriselliği

Eğrisellik, topoğrafyanın morfolojisini tanımlayan bir parametredir (Lee, 2004). Yamaç eğriselliği parametresi, araştırmacılar tarafından tercih edilen bir parametre olmamakla birlikte, özellikle içbükey yamaçlarda dairesel kaymaların, dışbükey yamaçlarda ise akma türündeki heyelanların gelişeceğini vurgulamışlardır (Lee and Min, 2001; Komac, 2006; Lee and Sambath, 2006; Lee, 2007; Yılmaz, 2007). Araştırmacılar, yamaç eğriselliği parametresi içerisinde plan eğriselliği ve profil eğriselliği olarak, iki farklı türde bu parametreyi kullanmaktadırlar. Bu çalışmada, saha gözlemlerinin çoğunlukla plan eğriselliği üzerinde gerçekleştirilmesi nedeniyle, profil eğriselliği parametresi dikkate alınmamıştır. Plan eğriselliği haritası, çalışma alanının SAM kullanılarak, ArcGIS 9.3 programında üretilmiş ve daha sonra Idrisi Andes programına aktarılarak <-2, -2--1, -1-0, 0-1, 1-2, 2< olmak üzere 6 sınıfta incelenmiştir (Şekil 4.8).

Yamaç eğriselliği parametresi, heyelan türlerine göre incelendiğinde, heyelanların hem akma, hem de dairesel kaymalar için 0-1 sınıf aralığında daha fazla meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum, hem içbükey, hem de dışbükey yamaçlarda heyelanların sıklıkla gelişebileceğinin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.6. Çalışma alanının planimetrik yamaç eğriselliği haritası.

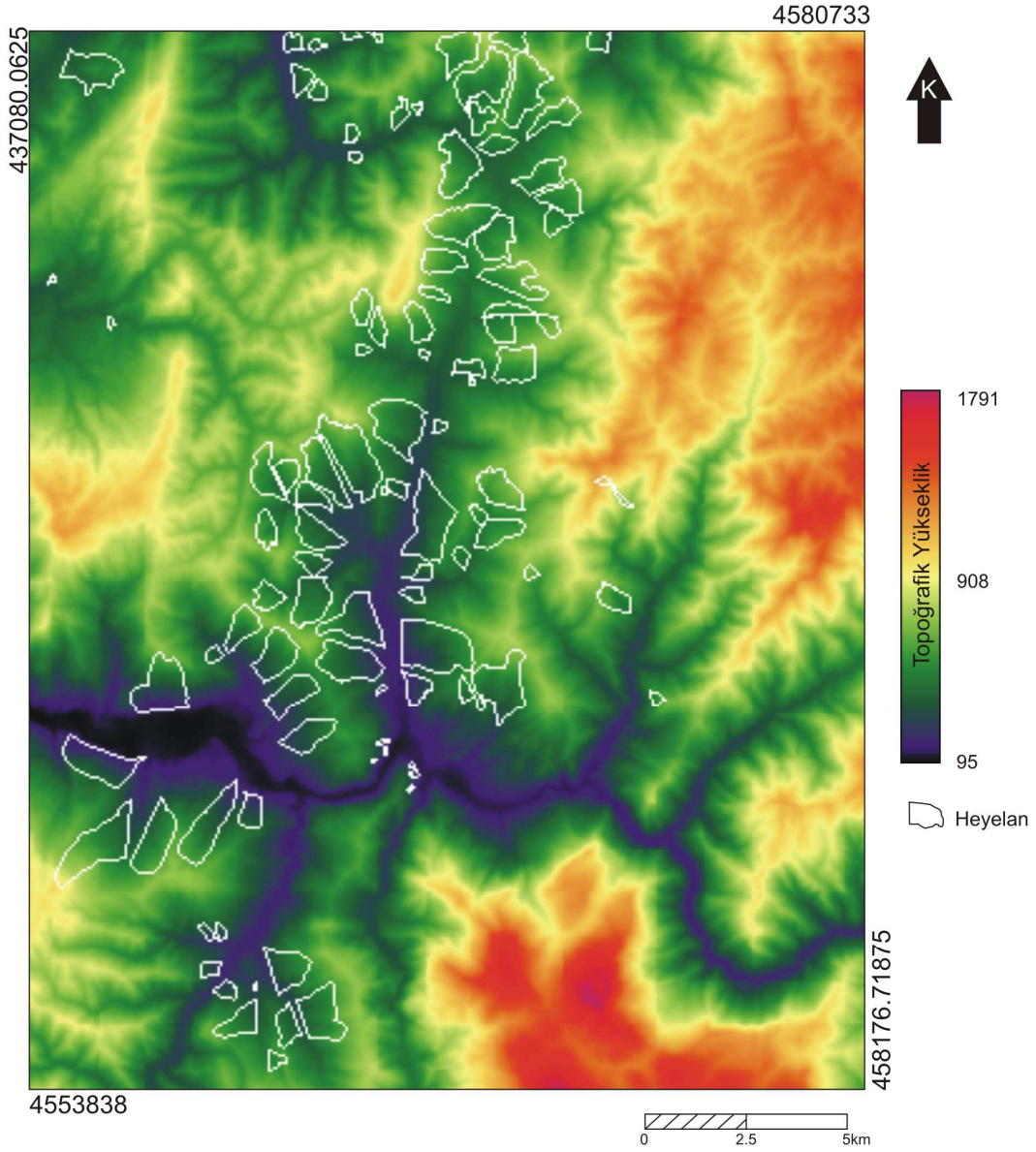
#### 4.2.4. Topoğrafik Yükseklik

Caniani et al. (2008) topoğrafik yüksekliği, deniz seviyesinden itibaren olan yükseklik olarak tanımlamaktadır. Yükseklik heyelan oluşumuna doğrudan etkileyen bir parametre olmasa da, erozyon ve bozunma durumunu kontrol eden

(Dai and Lee, 2002; Ayelew et al., 2005' den) ve toprak özelliklerini etkileyen bir parametredir (Stallard and Edmond, 1983; Gomez and Kavzoğlu, 2005' den).

Çalışma alanındaki yükseklik değerleri, 95 m ile 1721 m arasında değişmekte olup (şekil 4.10), yükseklik parametresi 0-250 m, 250-500 m, 500-750 m, 750-1000 m, 1000-1250, 1250-1500 ve 1500-1750 m' lik gruplar olmak üzere 7 sınıfa ayrılmıştır.

Heyelanlı alanların, her iki heyelan türü için çoğunlukla 250-500 m arasındaki yükseklik sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Bu durum da, yamaç eğimi parametresinde yapılan değerlendirme ile uyum içindedir. Buradaki temel gerekçe ise, çalışma alanındaki yüksek topoğrafyaya sahip alanların dik eğimli kayalarla örtülü olması, düşük topoğrafik yüksekliklerin ise, çoğunlukla bozunma ürünü olan toprak malzemelerden oluşmasıdır.



Şekil 4.7. Çalışma alanının yükseklik haritası.

#### 4.2.5. Bitki Örtüsü

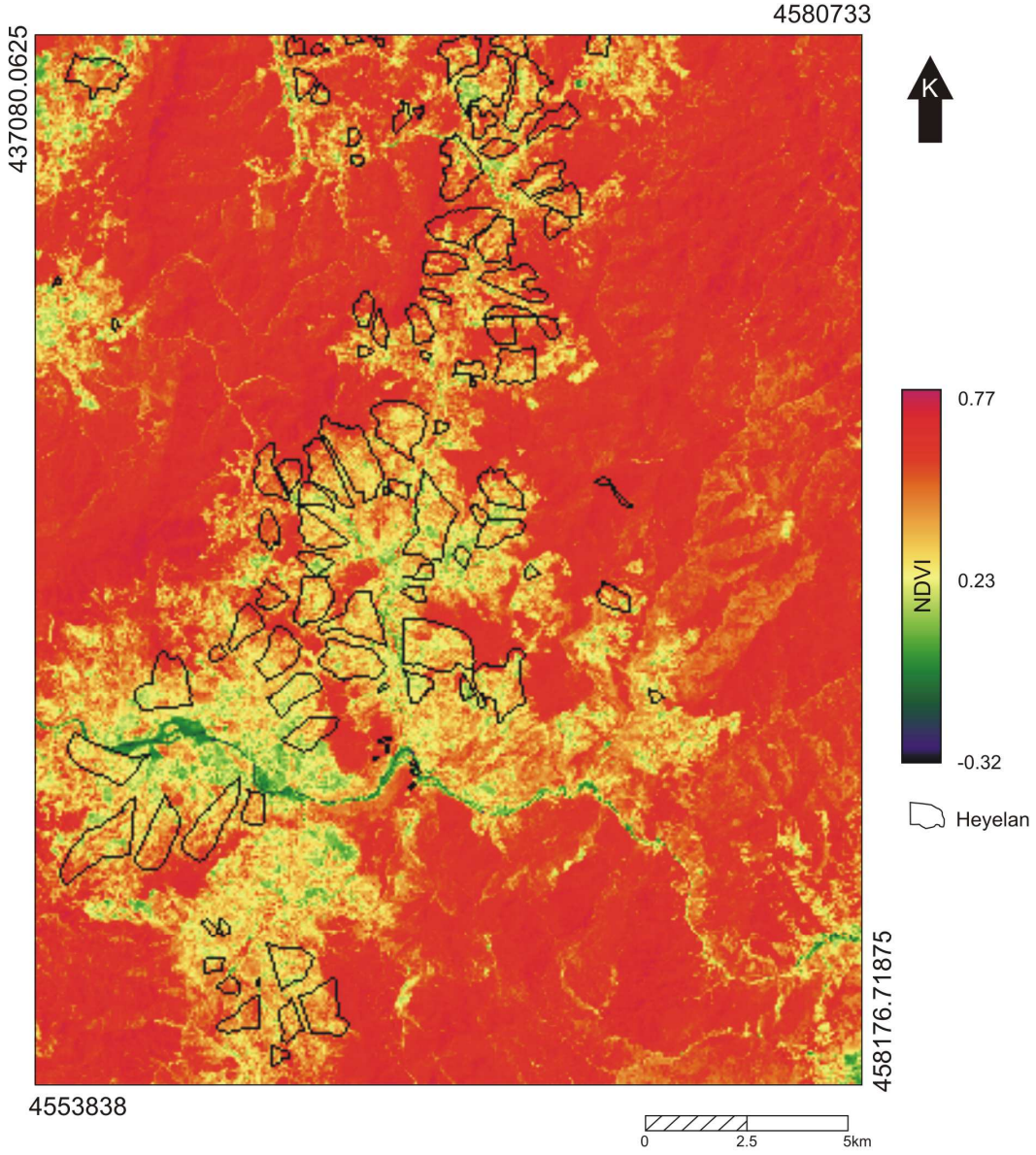
Bitki örtüsü parametresi, heyelan duyarlılığı çalışmalarında araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan parametrelerden biridir (Nagarajan et al.,

2000; Lee and Min, 2001; Lee et al., 2002; Lee et al., 2004; Schernthanner, 2005; Ercanoğlu et al., 2008; Yılmaz, 2009b).

Bitki örtüsü indeksi, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) olarak adlandırılan normalleştirilmiş bitki örtüsü indeksi değerine göre belirlenmiştir. NDVI, Rouse et al. (1974) tarafından önerilen, sağlıklı bitki örtüsü yoğunluğunun hesaplanmasını temel alan bir yaklaşım olup, güneş ışığının bitkiler tarafından absorbe edilmesi ve yansıtılması ilkesine dayanmaktadır. Elektromanyetik spektrumun, kırmızı ve yakın kızılötesi kesimindeki yansıma değerlerinden türetilen NDVI değerleri, fotosentetik olarak aktif olan sağlıklı bitki kütlelerinin göreceli olarak yerlerini ifade etmektedir (Eastman, 2003; Ercanoğlu, 2008' den). Yeşil bitkilerde bulunan klorofil, görünür dalga boyundaki ışığı (0.4-0.7 µm) absorbe ederken, kızıl ötesi dalga boyundaki ışığı (0.7-1.1 µm) yansıtmaktadır (Jensen, 2000). NDVI değerinin hesaplaması, Rouse et al. (1974) tarafından aşağıdaki eşitlik ile yapılmaktadır:

$$NDVI = \left[ \frac{NIR - red}{NIR + red} \right] \quad \text{Eş.4.1}$$

Bu eşitlikte “NIR”, yakın kızıl ötesi bant yansıma değerine, “red” ise kırmızı bant yansıma değerine karşılık gelmektedir. Çalışma alanının NDVI haritası Idrisi Andes programında, Çevre ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilen Landsat ETM+ uydu görüntüleri kullanılarak üretilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.8. Çalışma alanının NDVI haritası.

NDVI haritası,  $<-0.1$ ,  $-0.1-0$ ,  $0-0.1$ ,  $0.1-0.2$ ,  $0.2-0.3$ ,  $0.3-0.4$ ,  $0.4-0.5$ ,  $0.5-0.6$ ,  $0.6-0.7$  ve  $0.7<$  olmak üzere 10 sınıfa ayrılmış, heyelanlı alanların dairesel kaymalar için  $0.3-0.4$ , akmalara için  $0.6-0.7$  sınıflarında daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. Buradan, dairesel türdeki yenilmelerin, daha çıplak alanlarda, akma türündeki heyelanların ise, bitki örtüsünün daha yoğun olduğu alanlarda gerçekleştiği

söylenbilir. Bu değerlendirme, saha çalışmaları sırasında yapılan gözlemlerle de uyum göstermektedir.

#### **4.2.6. Arazi Kullanımı**

Arazi kullanımı parametresi, heyelan duyarlılık çalışmalarında çoğunlukla bitkilere ilişkin özellikler içinde ayrı bir parametre olarak kullanılmayarak, söz konusu parametre içerisinde değerlendirilmektedir (Baeza and Corominas, 2001; Lee and Min, 2001; Ercanoğlu and Gökçeoğlu, 2002; Lee et al., 2002; Çevik and Topal, 2003; Van Westen et al., 2003; Ayenew and Barbieri, 2005; Lee and Sambath, 2006; Coelho-Netto, 2007; Federicia et al., 2007; Akgün et al., 2008; Melchiorre, 2008; Yalçın, 2008; Bai et al., 2009; Tangestani, 2009).

Çalışma alanı için oluşturulan arazi kullanımı parametresi ise orman, çıplak alan, su ve tarım alanı olarak 4 sınıfa ayrılarak incelenmiştir. Söz konusu parametre haritası, Çevre ve Orman Bakanlığından temin edilen mescere haritası temel alınarak, Idrisi Andes programına raster veri formatında kategorik olarak aktarılmıştır (Şekil 4.14).

İlgili parametre, tüm heyelan türleri için birlikte ve ayrı ayrı incelendiğinde, tarım alanı sınıfında daha yüksek oranda heyelan meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum da, yine saha gözlemleri ile uyum içindedir.



Şekil 4.9. Çalışma alanının arazi kullanımı haritası.

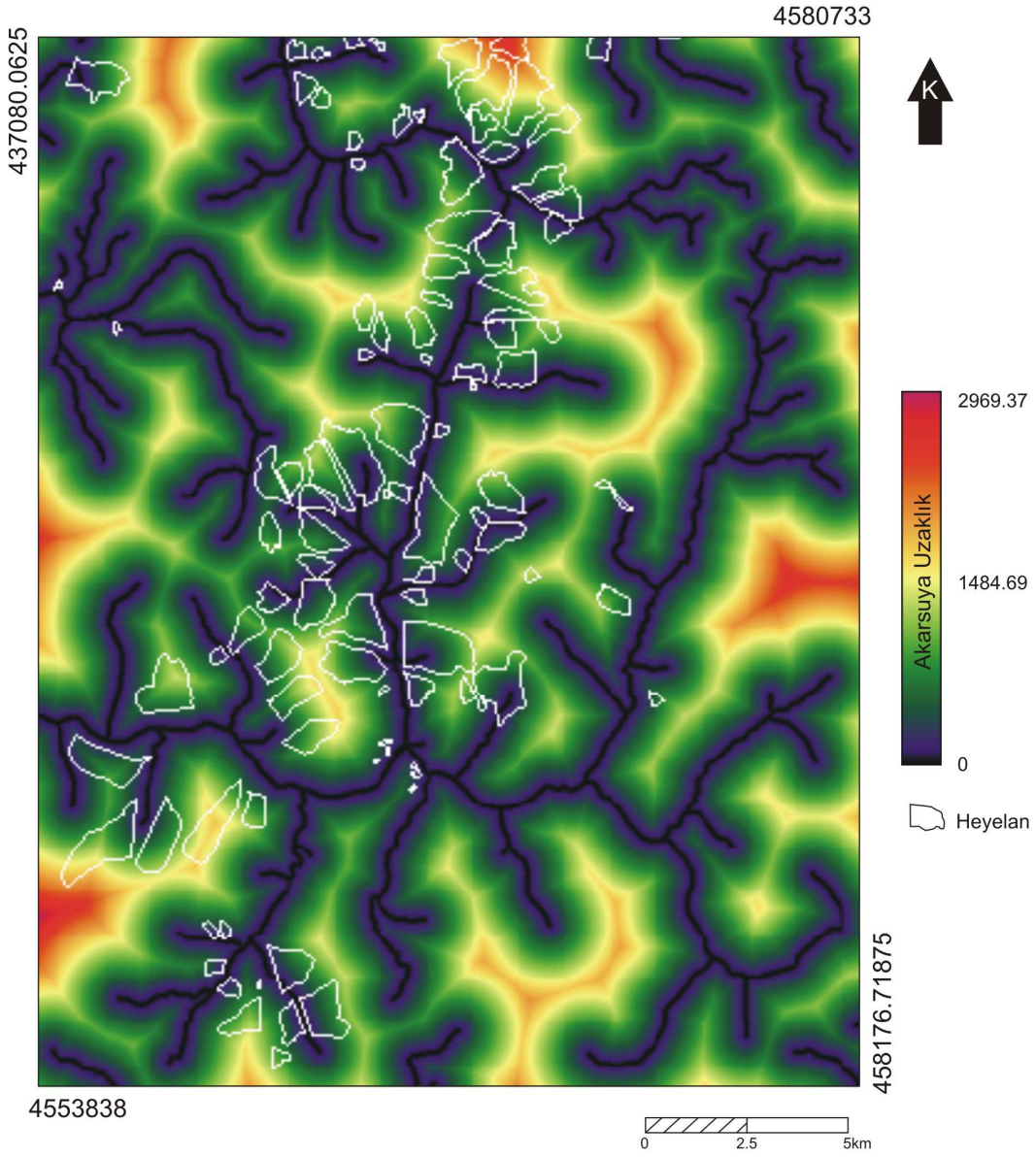
#### 4.2.7. Akarsuya Uzaklık

Akarsuya uzaklık parametresi araştırmacılar tarafından tercih edilen bir parametre olarak değerlendirilmektedir (Van Westen et al., 2003; Çevik and Topal, 2003; Lee and Talib, 2005; Lee, 2007; Federicia et al., 2007; Yalçın and Bulut, 2007; Thiery et al., 2007; Yalçın, 2008; Yılmaz ve Keskin, 2009). Süzen

and Doyuran (2004b)' e göre akarsuya uzaklık, heyelanın topuk kısmındaki erozyon nedeniyle, yamaç topuğunu zayıflatacağı ve yamaçları heyelana karşı daha duyarlı bir hale getireceği şeklinde yorumlanmıştır. Komac (2006), dreneja yakınlığının, yeraltısuyunun varlığı ve yüzey sularının akışı ile yüzeyin oyulması şeklinde iki sonuç doğurduğunu ve yamaçları heyelan oluşumuna karşı daha duyarlı bir hale getirdiğini belirtmiştir.

Çalışma alanındaki heyelanların, akarsuya olan uzaklıktan nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla, sahanın SAM kullanılarak, TauDEM programında akarsu ağı haritası üretilmiş, üretilen bu harita Idrisi Andes programına aktarılmıştır. Daha sonra, vektörel veri formatındaki bu parametre, Idrisi Andes programı kullanılarak raster formatına dönüştürülmüş ve ilgili yazılımın DISTANCE modülü ile akarsuya uzaklık parametresi elde edilmiştir (Şekil 4.16). Üretilen akarsu ağına uzaklık haritası 0-250 m, 250-500 m, 500-750 m, 750-1000 m, 1000-1250 m ve 1250 m' den büyük olmak üzere 6 sınıfa ayrılarak incelenmiştir.

İlgili parametre, dairesel kayma türündeki heyelanlar için incelendiğinde 1000 m' den büyük uzaklıkları içeren uzaklık sınıfında, akma türündeki heyelanlar ve tüm için incelendiğinde ise 250-500 m arası uzaklık sınıfında, daha fazla heyelan meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. Çalışma alanının akarsuya uzaklık haritası.

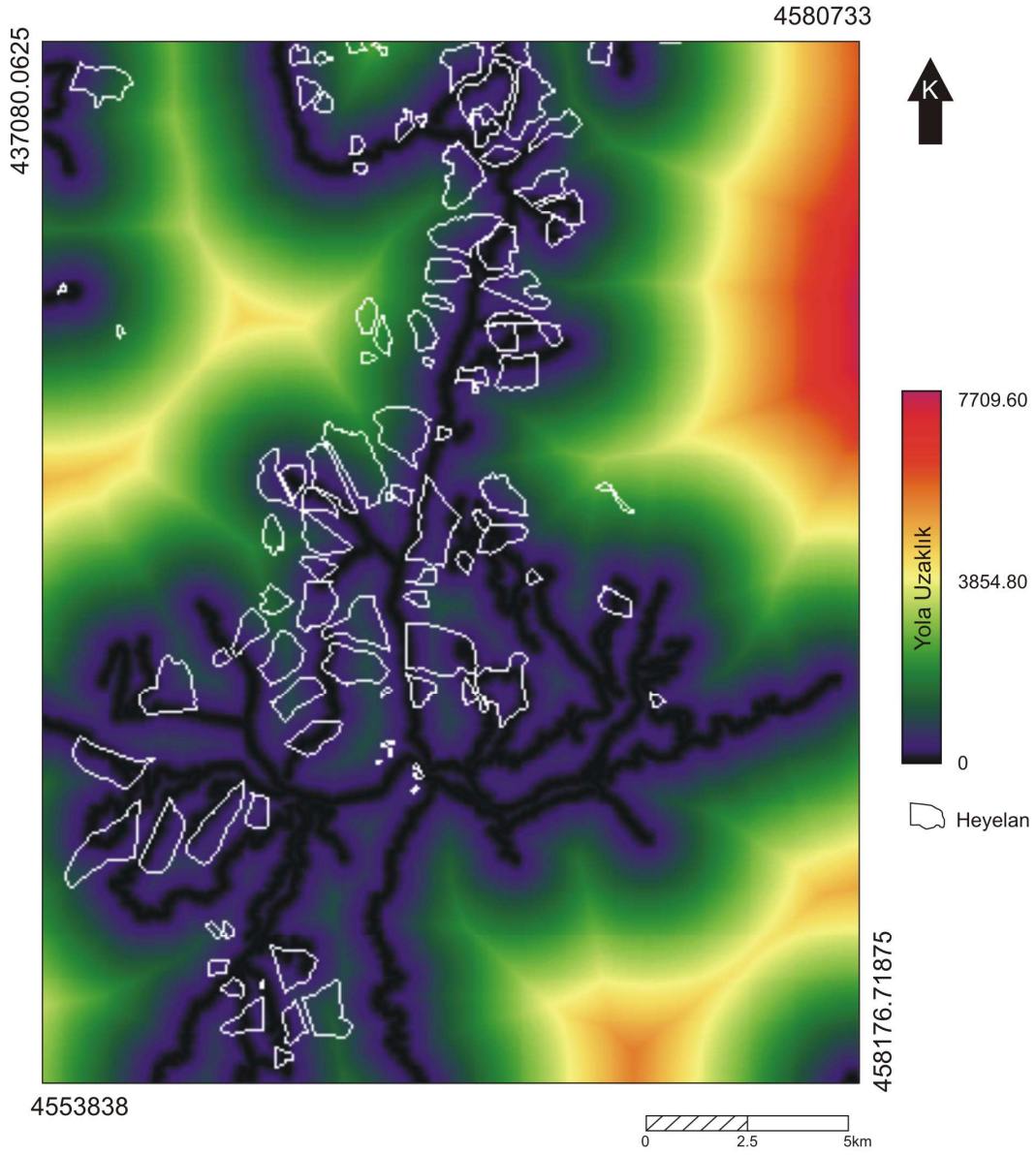
#### 4.2.8. Yollara Uzaklık

Yollara uzaklık parametresi, araştırmacılar tarafından çok tercih edilen bir parametre olmamasına karşın, parametreyi çalışmalarında kullanan araştırmacıların büyük bir kısmı heyelanların, yollara veya yol yarmalarına yakın alanlarda yoğunlaştığını belirlemişlerdir (Ayalew and Yamagishi, 2005; Duman et

al., 2005; Akgün and Bulut, 2007; Yılmaz, 2007; Akgün et al., 2008; Yılmaz and Keskin, 2009). Buradaki temel gerekçe, yol güzergahı boyunca yapılacak kazıların ve üzerine etkiyen dış yüklerin (örn.: ağır taşıtların geçmesi gibi), yamaç duraylılığına olumsuz etki etmesi şeklinde değerlendirilmektedir.

Çalışma alanında, yollar ile heyelan lokasyonları arasındaki uzaklığın, heyelan oluşumunu üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, çalışma alanının topoğrafik haritaları üzerindeki ana ve stabilize yollar sayısallaştırılarak, Idrisi Andes programına aktarılmıştır. Daha sonra, DISTANCE modülü ile yollara uzaklık haritası üretilmiştir (Şekil 4.18). Söz konusu parametre, 0-250 m, 250-500 m, 500-750 m, 750-1000 m, 1000-1250 m ve 1250 m' den büyük uzaklıkları içeren 6 sınıfa ayrılarak incelenmiştir.

İlgili parametre, dairesel kayma ve akma türündeki heyelanlar için incelendiğinde, yollara 0-250 m arası uzaklık sınıfının, diğer bir deyişle yollara yakın olmanın, daha fazla heyelan oluşumuna neden olabileceği ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.11. Çalışma alanının yola uzaklık haritası.

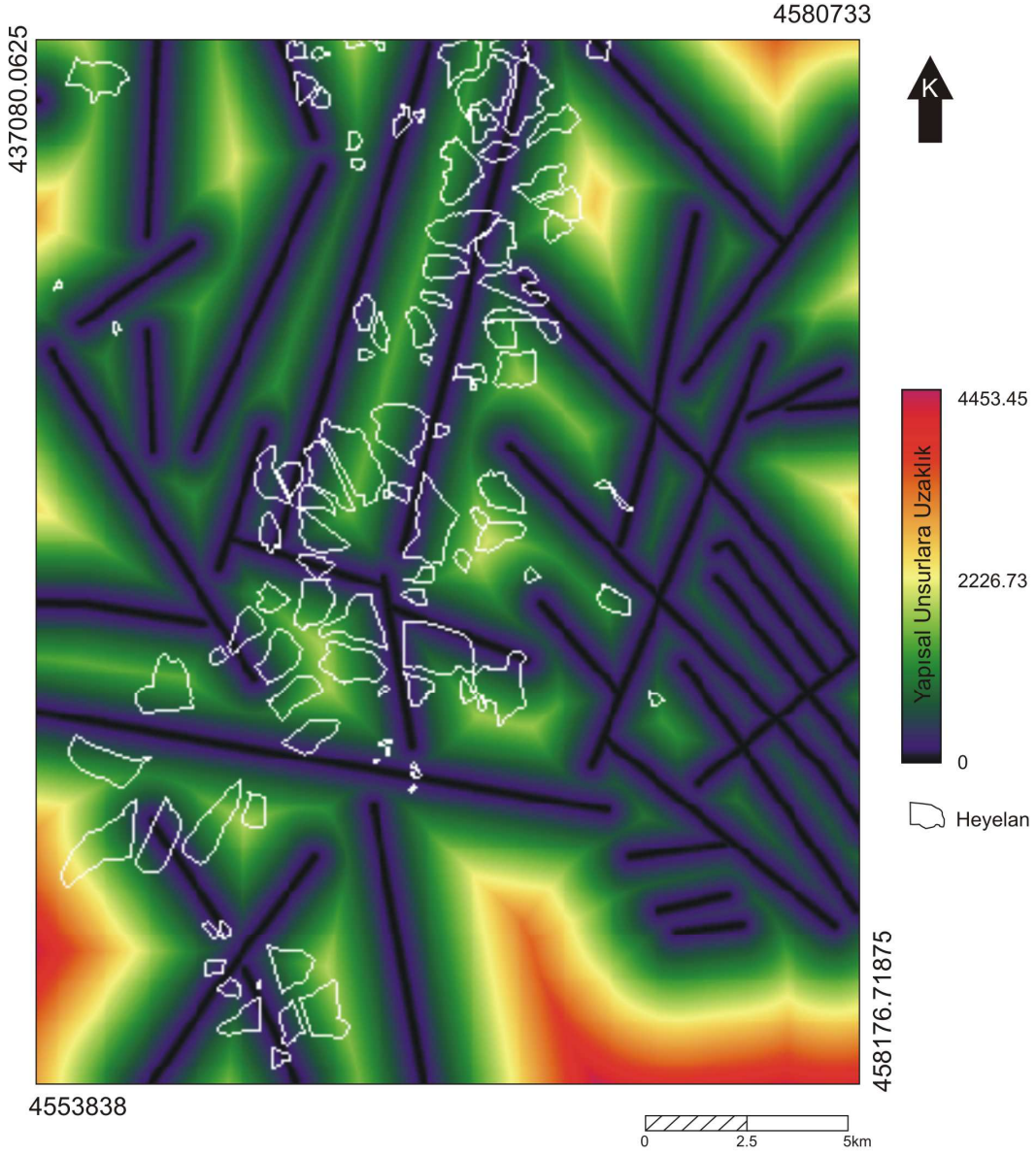
#### 4.2.9. Yapısal Unsurlara Uzaklık

Genel olarak araştırmacılar, fay, kıvrım eksenini, kırık/çatlak sistemleri gibi çizgisel unsurlara yakın alanlarda, heyelan oluşumunun daha fazla olacağı görüşünü savunmaktadırlar (Hudak, 2000; Fernández et al., 2003; Lee and Choi, 2004; Ercanoğlu and Gökçeoğlu, 2004; Duman et al., 2005; Lee and Talib, 2005; Lee

and Dan, 2005; Havenith et al., 2006; Lee and Sambath, 2006; Lee, 2007; Ruff and Czurda, 2008; He and Beighley, 2008; Wang et al., 2009). Buradaki temel gerekçe, söz konusu unsurlara yakın olan alanların, özellikle tektonik etkiler nedeniyle daha fazla deformasyona uğraması ve malzemeleri daha zayıf hale getirmesi şeklinde yorumlanmaktadır.

Çalışma alanında yer alan yapısal unsurların, heyelan oluşumunu üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, Yergök vd. (1987) tarafından verilen genel jeoloji haritasındaki çizgisellikler (bkz. Şekil 1.2) temel alınarak sayısallaştırılmıştır. Daha sonra, Idrisi Andes programına aktarılan vektörel veriler, raster formata dönüştürülerek, ilgili programın DISTANCE modülü ile çalışma alanının yapısal unsurlara uzaklık haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.20). Yapısal unsurlara uzaklık sınıfları olarak, diğer çalışmalarda dikkate alınan sınıflara benzer şekilde, 0-250 m, 250-500 m, 500-750 m, 750-1000 m, 1000-1250 m ve 1250 m' den büyük uzaklıkları içeren 6 sınıfa ayrılarak incelenmiştir.

İlgili parametre, dairesel kayma türündeki heyelanlar için incelendiğinde, 1000 m' den büyük uzaklık sınıfında, akma türündeki heyelanlar için incelendiğinde ise 0-250 m arası uzaklık sınıfında daha fazla heyelan meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. Çalışma alanının yapısal unsurlara uzaklık haritası.

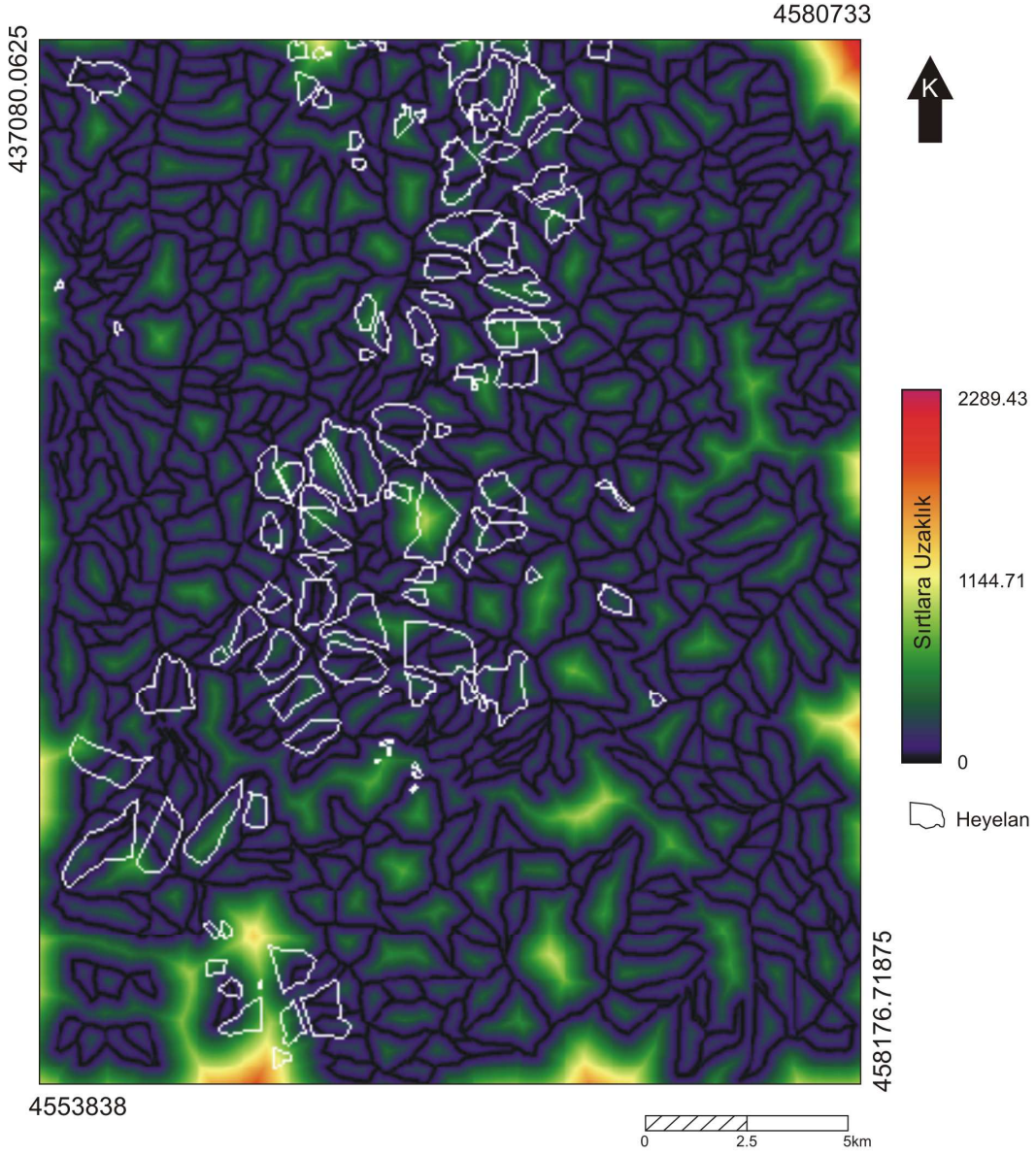
#### 4.2.10. Sırtlara Uzaklık

Sırtlara uzaklık parametresi, az sayıda araştırmacı tarafından kullanılan bir parametredir (örn.: Yılmaz, 2007; Nefeslioğlu et al., 2008b). Sırtlara yakın olmanın, heyelan gelişimi açısından yamaçları daha duyarlı yapacağı ve özellikle

yağışın ve akışın da etkisi düşünöldüğünde, bu yamaçlarda heyelanların daha fazla gelişeceği düşünölmektedir.

Çalışma alanında yer alan sırtların, heyelan lokasyonlarına olan uzaklıklarından yola çıkılarak heyelan oluşumu üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla, Idrisi Andes programında, sırtların havza sınırlarından geçtiği kabul edilmiş ve öncelikle bu sınırlar TauDEM programı yardımıyla belirlenmiştir. Daha sonra, diğer uzaklık parametrelerinde uygulanan yöntemler izlenerek, sırtlara uzaklık haritası üretilmiştir (Şekil 4.22). Parametre, 0-500 m, 500-1000 m, 1000-1500 m, 1500 m' den büyük olmak üzere 4 sınıfa ayrılarak incelenmiştir.

İlgili parametre, hem dairesel kayma, hem de akma türündeki heyelanlar için incelendiğinde 0-500 m arası uzaklık sınıfında, daha fazla heyelan meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.13. Çalışma alanının sırtlara uzaklık haritası.

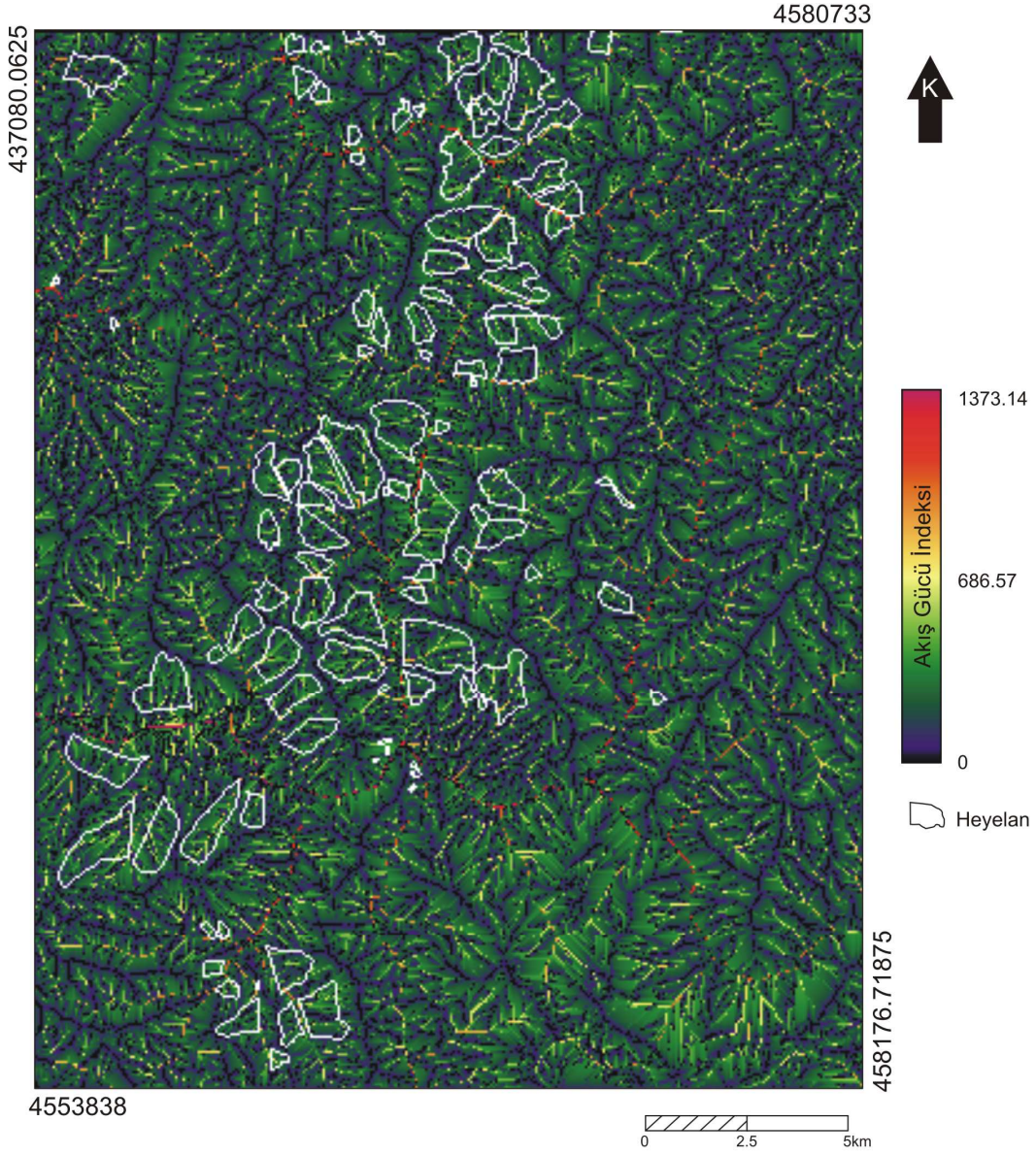
#### 4.2.11. Akış Gücü İndeksi

Parametre çalışmalarda, az sayıda araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Akış gücü indeksi, SAM ve türevleri (havza alanı ve yamaç eğimi) kullanılarak üretilmektedir (Eş. 2.2). Bu değerinin yüksek olması, ilgili lokasyonlarda yüzeysel

akışın daha fazla olmasına ve heyelanların tetiklenmesini daha olası kılmasına neden olmaktadır (Gorsevski and Jankowski, 2008).

Çalışma alanının akış gücü indeksi değerleri, SAM temel alınarak, TAS programı kullanılarak belirlenmiş (Şekil 4.24) ve Idrisi Andes programında 0-200, 200-400, 400-600, 600-800 ve 800' den büyük değerleri içeren 5 sınıfa ayrılarak değerlendirilmiştir.

İlgili parametre, dairesel kayma ve akma türündeki heyelanlar için incelendiğinde, 0-1000 indeks değerleri arasındaki değerlere sahip sınıfta daha fazla heyelan geldiği tespit edilmiştir.

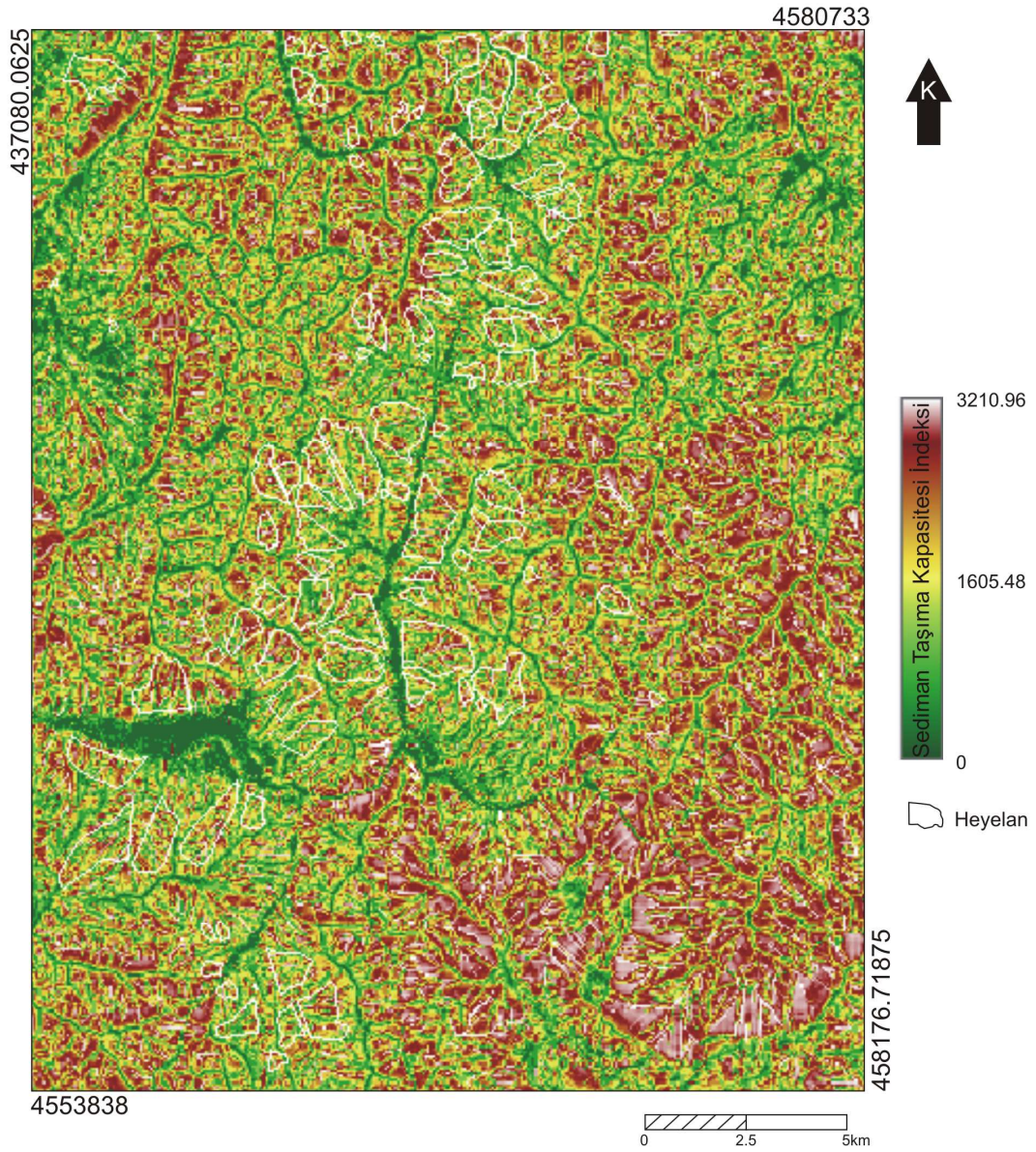


Şekil 4.14. Çalışma alanının akış gücü indeksi haritası.

#### 4.2.12. Sediman Taşıma Kapasitesi İndeksi

Az sayıda çalışmada kullanılan parametre, yüzey ve yeraltısuyu akışındaki hızlanmaya etki ederek, mevcut malzemelerin akış nedeniyle taşınmasını göreceli olarak ifade eden bir göstergedir (Eş.2.3) (Gorsevski and Jankowski, 2008),.

Çalışma alanının sediman kapasitesi indeksi değerleri de SAM kullanılarak TAS programı yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 4.26). Idrisi Andes programına aktarılan harita, 0-25, 25-50 , 50-100, 100-150 ve 200' den büyük değerler olmak üzere 5 sınıfa ayrılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.15. Çalışma alanının sediman taşıma kapasitesi indeksi haritası.

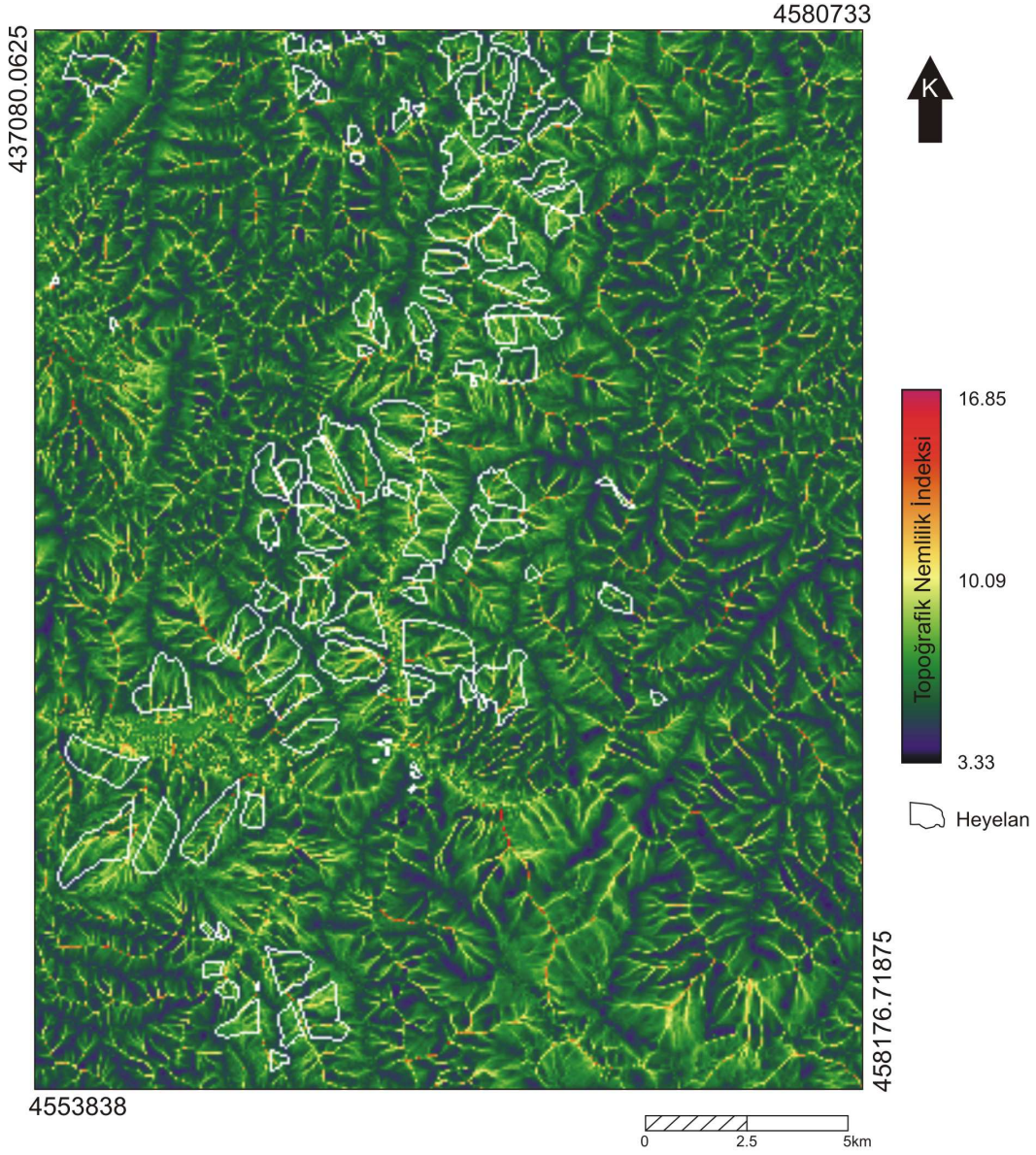
İlgili parametre, dairesel kayma ve akma türündeki heyelanlar için incelendiğinde, 0-25 arasındaki değerlere sahip sınıfta, daha fazla heyelan geldiği tespit edilmiştir.

#### **4.2.13. Topoğrafik Nemlilik İndeksi**

Az sayıda çalışmada girdi parametresi olarak kullanılan topoğrafik nemlilik indeksi, yerel toprak nemliliği durumunu, SAM ve türevlerini (havza alanı ve yamaç eğimi) dikkate alarak ifade eder (Eş. 2.1). Özellikle, yeraltısuyuna ilişkin veri olmadığı durumlarda, son derece önemli bilgiler sağlayan parametre (Ercanoğlu, 2005), göreceli olarak yüksek değerler sunması durumunda, ilgili alanlarda suyun daha çok birikerek, yamaçları heyelan oluşumuna karşı daha duyarlı hale getireceği şeklinde kullanılmaktadır.

Çalışma alanının topoğrafik nemlilik indeksi değerleri de, SAM temel alınarak, TAS programı yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 4.28). Idrisi Andes programına raster formatta aktarılan parametrik harita, 0-3 , 3-6 , 6-9, 9-12 ve 12' den büyük değerler olmak üzere, 5 sınıfa ayrılarak değerlendirilmiştir.

İlgili parametre, dairesel kayma türündeki heyelanlar için 6-9 arasında değerlere sahip sınıfta, akma türündeki heyelanlar için incelendiğinde ise, 3-6 arasındaki değerlere sahip sınıfta daha fazla heyelan meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.16. Çalışma alanının topoğrafik nemlilik indeksi haritası.

Üretilen tüm haritalar raster formatta saklanarak, heyelan yerleri ile ilişkilendirilmek üzere, parametrik etki değerlendirmesi ve duyarlılık analizlerine tabi tutulmuşlardır. Yapılan bu işlemlere ve uygulanan yöntemlere, bir sonraki bölümde değinilmiştir.

## **5. PARAMETRE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ OLUŞTURULMASI**

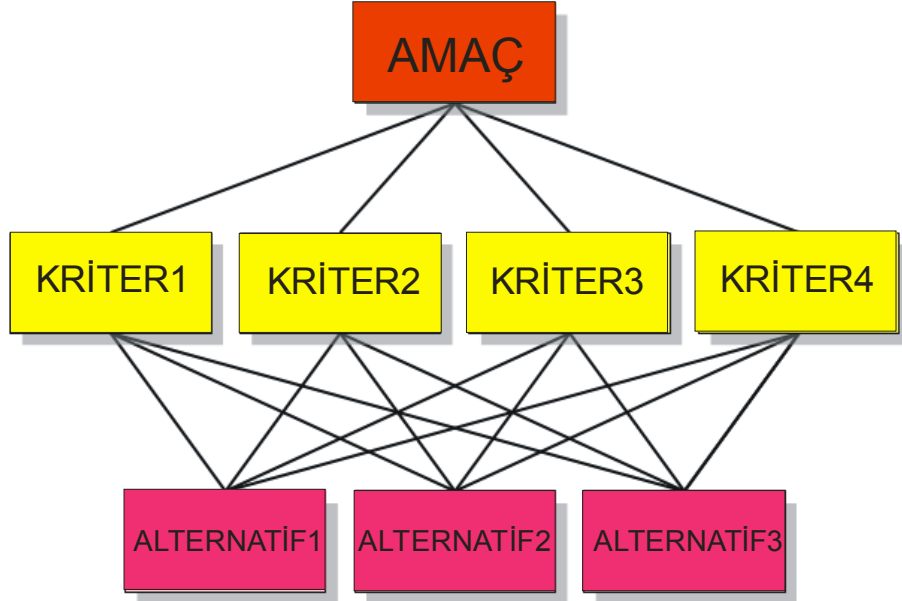
Heyelan duyarlılık çalışmalarında etkin olan parametreler ve bu parametrelerin heyelan oluşumundaki etkilerinin ortaya konulmasında, istatistiksel yöntemler (faktör analizi, diskriminant analizi, lojistik regresyon vb.), yapay zeka uygulamaları (bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar), uzman görüşü temelli (doğrudan haritalama, analitik hiyerarşi süreci vb.) birçok yöntem mevcuttur. Ayrıca, bu yöntemler kullanılarak heyelan duyarlılık haritaları da üretilmekte, kullanıcılara ve/veya karar vericilere sunulabilmektedir. Tez çalışması kapsamında, heyelan oluşumunda parametre etkilerinin ortaya konulmasında ve heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde temel olarak Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılmıştır. Bununla birlikte, nesnel bir parametre seçim yönteminin geliştirilmesi amacıyla, benzerlik ilişki modellerini (similarity relation models) temel alan ve tamamıyla veriye dayalı (data driven) bir yöntem bilim uygulaması da gerçekleştirilerek, AHP yöntemine uyarlanmıştır. Yapılan tüm bu çalışmalara, izleyen paragraflarda ayrıntılarıyla değinilmiştir.

### **5.1. AHP Yöntemine İlişkin Genel Bilgiler ve Kavramlar**

AHP yöntemi, ilk olarak Myers and Alpert (1968) tarafından ortaya atılmış ve Saaty (1977) tarafından bir model uygulama olarak geliştirilmiştir. İzleyen yıllarda, özellikle karar verme süreçleri içinde gerek sosyal bilimler, gerekse mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılır hale gelmiştir (Ercanoğlu et al., 2008). AHP yöntemi, karar hiyerarşisinin tanımlanabilmesi durumunda kullanılması daha uygun olan, parametrik etkilerin yüzde dağılımlarını dikkate alan bir karar verme ve tahminleme yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Saaty, 1997).

Yöntemin uygulanması sırasında, doğru bir karar verme süreci için, aşağıdaki adımlar uygulanmalıdır:

- Problem tanımı mümkün olan en iyi şekilde yapılmalı ve problemin çözümüne yönelik veri türleri (sayısal, kavramsal vb.) belirlenmelidir.
- Alınacak kararın amacı doğrultusunda, karar hiyerarşisi ve öncelikler, analiz sürecinin ilk aşamasında yapılandırılmalıdır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Basit bir hiyerarşi modeli (Yaralıoğlu, 1999) .

- İkili karşılaştırma matris seti oluşturulmalıdır (Eş. 5.2). Üst seviyedeki her parametre, kendisiyle ilgili ve ondan hemen sonra gelen parametrelerle karşılaştırılmalıdır. Bu karşılaştırma işlemi yapılırken, karar vericiler, parametreler ile ilgili verileri veya kişisel yargılarını (uzman görüşlerini) kullanmaktadırlar. Diğer bir deyişle, AHP yönteminin işleyişi, insan yargısına ve değerlendirmelerine benzer şekilde gerçekleşmektedir (Saaty, 2008).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Eş. 5.1

- Karşılaştırma matrisinin köşegeni üzerindeki bileşenler, ilgili faktör kendisi ile karşılaştırıldığında ( $i = j$  olacağından) 1 değerini almaktadır. Faktörlerin karşılaştırılması, birbirlerine göre sahip oldukları önem değerlerine göre karşılıklı etkileşimli olarak yapılır. Karşılaştırmalar yapılırken, Çizelge 5.1’ de verilmiş olan önem dereceleri kullanılmaktadır. Bu işlem, karşılaştırma matrisinin tüm elemanları için yapılmalıdır. Söz konusu değerlendirmeler için, Eşitlik 5.2’ den yararlanılmaktadır.

Çizelge 5.1. AHP yönteminde önem dereceleri ve kavramsal tanımlamalar  
(Saaty, 1977 ve Saaty, 2008' den).

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit önem	İki faktörün aynı düzeyde öneme sahip olması
2	Zayıf veya az önem	
3	Orta derecede önem	Bir faktörün, diğerinden az miktarda önemli olması
4	Ortadan fazla önem	
5	Kuvvetli düzeyde önem	Bir faktörün, diğerinden kuvvetli düzeyde önemli olması
6	Kuvvetliden fazla düzeyde önem	
7	İspatlanmış düzeyde önem	Bir faktörün, diğeri üzerindeki üstünlüğünün, uygulamada kanıtlanmış olması
8	Çok kuvvetli düzeyde önem	
9	Aşırı düzeyde önem	

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$$

Eş. 5.2

- Karşılaştırma matrisi, faktörlerin birbirlerine göre önem derecelerini belirli bir mantık içerisinde göstermektedir. Ancak, bu faktörlerin bütün sistem içerisindeki ağırlıklarını belirlemek için, karşılaştırma matrisini oluşturan sütun vektörlerinden yararlanılarak, n adet ve n bileşenli B sütun vektörü oluşturulmalıdır (Eş. 5.3)

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n1} \end{bmatrix}$$

Eş. 5.3

- B sütun vektörlerinin hesaplanmasında, Eşitlik 5.4 kullanılmaktadır.  $n$  adet B sütun vektörü hesaplanıp, bir matris formatında bir araya getirildiğinde ise, C matrisi oluşturulmuş olur (Eş. 5.5).

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

Eş.5.4

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

Eş.5.5

- C matrisi kullanılarak, faktörlerin birbirlerine göre önem değerlerini gösteren yüzdesel önem dağılımları elde edilebilir. Bu amaçla, Eşitlik 5.6' daki gibi, C matrisini oluşturan satır bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınarak "Öncelik Vektörü" olarak da adlandırılan, W sütun vektörü elde edilir (Eş. 5.7).

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n}$$

Eş.5.6

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix}$$

Eş. 5.7

- Karşılaştırmaların tutarlı olup olmadığının belirlenebilmesi için “Tutarlılık Oranı (CR, Consistency Ratio)” hesabının yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamaların temeli, faktör sayısı ile “Temel Değer ( $\lambda$ )” adı verilen bir katsayının karşılaştırılmasına dayandırmaktadır.  $\lambda$ ' nın hesaplanması için öncelikle A karşılaştırma matrisi ile W öncelik vektörünün matris çarpımından D sütun vektörü elde edilir (Eş. 5.8).

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix}$$

Eş.5.8

- Bulunan D sütun vektörü ile W sütun vektörünün karşılıklı elemanlarının bölümünden, her bir değerlendirme faktörüne ilişkin temel değer (E) elde edilir (Eş. 5.9). Bu değerlerin aritmetik ortalaması ise karşılaştırmaya ilişkin temel değeri ( $\lambda$ ) göstermektedir (Eş.5.10).

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Eş.5.9

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad \text{Eş.5.10}$$

- $\lambda$  hesaplandıktan sonra Tutarlılık Göstergesi (CI), Eş. 5.11' den yararlanarak hesaplanır.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad \text{Eş.5.11}$$

- Son aşamada ise CI, "Rasgelelik Göstergesi (Randomness Index, RI)" olarak adlandırılan, parametre sayısına uygun standart düzeltme değerine bölünerek (Çizelge 5.2), Eş. 5.12' de gösterildiği üzere, CR değeri elde edilir.

Çizelge 5.2. RI değerleri (Yaralıoğlu, 1999).

N	RI	N	RI
1	0	8	1.41
2	0	9	1.45
3	0.58	10	1.49
4	0.90	11	1.51
5	1.12	12	1.48
6	1.24	13	1.56

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Eş.5.12}$$

- Hesaplanan CR değerinin 0.10 dan küçük olması, karar vericinin yaptığı karşılaştırmalarda tutarlılığın iyi olduğunu gösterirken, CR değerinin 0.10 değerinden büyük olması, ya AHP' deki bir hesaplama hatasını ya da karar vericinin karşılaştırmalarındaki tutarsızlığını göstermektedir

(Yaralıoğlu, 1999). Bu durumda, karşılaştırma matrisinin yeniden oluşturup, işlemlerin tekrar edilmesi gerekmektedir (Eastman, 2006)

- CR değeri belirlendikten sonra, her bir faktör için, m karar noktasındaki yüzde önem dağılımları bulunur. Bu işlem için birebir karşılaştırmalar ve matris işlemleri faktör sayısı kadar (n kez) tekrarlanır. Her bir parametre için karar noktalarında kullanılacak G karşılaştırma matrislerinin boyutu,  $m \times m$  olacak şekilde oluşturulur. Her bir karşılaştırma işleminden sonra  $m \times 1$  boyutlu ve değerlendirilen faktörlerin karar noktalarına göre yüzde dağılımlarını gösteren, S sütun vektörleri elde edilir (Eş. 5.13).

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_{m1} \end{bmatrix} \quad \text{Eş.5.13}$$

- Karar noktalarındaki sonuç dağılımının bulunması için, n tane  $m \times 1$  boyutlu S sütun vektöründen meydana gelen ve  $m \times n$  boyutlu K karar matrisi oluşturulur (Eş. 5.14):

$$K = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{Eş.5.14}$$

- Karar matrisi, W sütun vektörü (öncelik vektörü) ile çarpıldığında ise m elemanlı L sütun vektörü, yani parametre ağırlık değerleri elde edilir (Eş. 5.15). L sütun vektörü karar noktalarının yüzde dağılımını vermektedir. Diğer bir deyişle, vektörün elemanlarının toplamının 1' e eşit olması

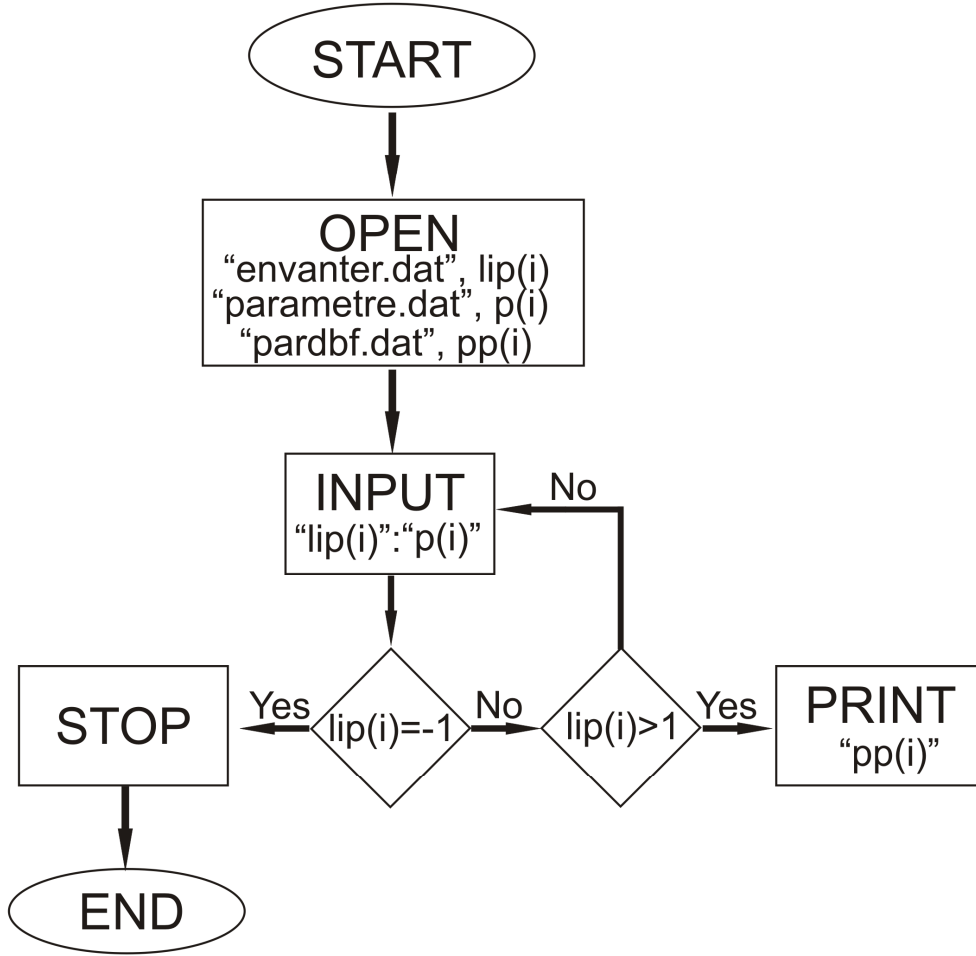
gerekmektedir. Bu dağılım aynı zamanda karar noktalarının önem sırasını da göstermektedir (Yaralıoğlu, 1999).

$$L = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} \\ l_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ l_{m1} \end{bmatrix} \quad \text{Eş.5.15}$$

## 5.2. AHP Yöntemi Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritalarının Oluşturulması

Çalışmada dikkate alınan AHP yöntemi, heyelan oluşumunda etkin olduğu düşünülen parametrelerin birbirlerine göre etkinlik derecelerinin belirlenmesi ve duyarlılık haritası oluşturulurken dikkate alınması gereken parametrelerin seçilmesi amacıyla uygulanmıştır.

Duyarlılık haritaları oluşturulurken heyelanların yalnızca Üst Kretase Filişi içinde meydana gelmesinden dolayı, bu birimin sınırları dikkate alınmıştır. Diğer bir deyişle, heyelan duyarlılık analizlerinde litoloji parametresinin etkisi, sabit kabul edilmiştir. Analizlerde kullanılacak olan envanter haritası ve parametre haritaları, raster formatında üretilip saklandıktan sonra, “\*.dat” uzantılı dosyalar haline dönüştürülmüştür. Buradaki amaç, heyelan envanteri içindeki heyelanlı ve heyelansız alanlardaki parametrik değişimlerin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, heyelan veri tabanının otomatik olarak oluşturulmasına yönelik bir amaç içindir. Bu amaç doğrultusunda, Ercanoğlu (2003) tarafından geliştirilen ve Ercanoğlu and Gökçeoğlu (2004) tarafından güncellenen FULLSA adlı program kullanılmıştır. Oluşturulan “\*.dat” dosyaları, heyelanlı alanların piksel sayılarını bulmak amacıyla, programda girdi verisi olarak kullanılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Heyelanlı alanlara karşılık gelen piksel değerlerinin bulunmasının iş-aκış diyagramı.

Buradaki amaç, "\*.dat" uzantılı envanter ve parametre dosyalarının, ilgili program yardımıyla karşılaştırılması ve heyelanlı piksellere karşılık gelen parametre değerlerinin ortaya konulmasıdır. Bunun için, eğer bir piksel heyelanlı ise (piksel değeri=1), söz konusu piksele karşılık gelen parametre değerleri, veri tabanını oluşturacak şekilde, yine "\*.dat" uzantılı farklı dosyalar halinde saklanmıştır. Eğer, söz konusu pikselde heyelan yoksa (piksel değeri=0), parametrik veri dosyalarında her hangi bir işlem yapılmadan, bir sonraki veri grubuna geçilmektedir. Bu şekilde, dikkate alınan her bir parametre ve alt grupları için, heyelanlı piksel sayıları ve çalışma alanındaki sayıları, otomatik olarak

belirlenmiştir. Ayrıca, duyarlılık analizlerine temel teşkil edecek ve heyelan duyarlılığını aynı ölçekte ifade eden ve Lee and Talib (2005) tarafından önerilen FR (Frequency Ratio) değerleri de, bu aşamada hesaplanmıştır (Eş. 5.16).

$$FR = \frac{PHPS/THPS}{PTPS/TPS} \quad \text{Eş. 5.16}$$

Bu eşitlikte, PHPS, sınıflandırılmış parametrelerin heyelanlı alanlara karşılık gelen piksellerinin sayısı; THPS, toplam heyelanlı piksel sayısı; PTPS; sınıflandırılmış parametrelerin toplam piksel sayısı, TPS ise, çalışma alanının toplam piksel sayısını ifade etmektedir.

Bu yöntemlerle elde edilen değerler, Çizelge 5.3' te verilmiştir. Hesaplanan FR değerleri normalleştirilerek (NFR), parametre haritaları ve alt gruplarına atanmıştır.

Çizelge 5.3. Parametreler ve alt gruplarına ilişkin heyelanlı ve toplam piksel değerleri ile hesaplanmış FR ve NFR değerleri.

	HP	TP	FR	NFR
<b>Arazi Kullanımı (ARAZIN)</b>				
Orman	12732	422559	0.22	0.10
Çıplak alan	2765	9956	2.04	0.93
Su	0	57	0.00	0.00
Tarımsal alan	80037	267763	2.19	1.00
<b>Bakı (ASPYN)</b>				
Düz	0	5001	0.00	0.00
K	7288	78985	0.68	0.52
KD	12055	83838	1.05	0.81
D	12847	89908	1.04	0.80
GD	12548	85127	1.08	0.83
G	13490	76106	1.30	1.00

GB	15364	87922	1.28	0.98
B	12450	96092	0.95	0.73
KB	9492	97356	0.71	0.55

Çizelge 5.3 (devam ediyor)

Yamaç Eğriselliği (CURVYN)				
< -2	5	44	0.83	0.76
-2 - -1	571	7279	0.58	0.51
-1 - 0	46086	306539	1.10	1.00
0 -1	48664	381599	0.93	0.85
1- 2	208	4855	0.31	0.28
2 <	0	19	0	0.00
Akarsuya Uzaklık (m) (DREYN)				
0-250	21561	139460	1.13	1.00
250-500	23498	154487	1.12	0.98
500-750	20101	136465	1.08	0.95
750-1000	16803	111143	1.10	0.97
1000-1250	13571	132438	0.75	0.66
1250 <	0	26342	0	0
NDVI (NDVIN)				
< -0.1	0	246	0.00	0.00
-0.1-0	57	1135	0.37	0.18
0-0.1	1508	8921	1.24	0.62
0.1-0.2	8643	34103	1.86	0.93
0.2-0.3	19592	72138	1.99	1.00
0.3-0.4	23740	93074	1.87	0.94
0.4-0.5	21048	100553	1.53	0.77
0.5-0.6	14415	178176	0.59	0.29
0.6-0.7	6448	207436	0.23	0.11
0.7<	83	4553	0.13	0.07
Yamaç Eğimi (°) (SLPN)				
0-10	4987	58973	0.62	0.46

10-20	57642	314612	1.34	1.00
20-30	30822	261800	0.86	0.64

Çizelge 5.3 (devam ediyor)

---

Yamaç Eğimi (°) (SLPN)

---

30-40	2076	62948	0.24	0.18
40-50	7	1968	0.03	0.02
50-60	0	34	0.00	0.00

---

Topoğrafik Yükseklik (m) (YUKSYN)

---

0-250	4353	36986	0.86	0.52
250-500	53634	235309	1.67	1.00
500-750	36922	272902	0.99	0.59
750-1000	561	88868	0.04	0.03
1000-1250	64	52407	0.01	0.01
1250-1500	0	12716	0.00	0.00
1500-1750	0	1147	0.00	0.00

---

Topoğrafik Nemlilik İndeksi (WIN)

---

0-3	0	0	0.00	0.00
3-6	35074	370494	0.69	0.48
6-9	54340	297951	1.33	0.91
9-12	5487	27538	1.46	1.00
12<	633	4352	1.06	0.73

---

Akış Gücü İndeksi (SPIN)

---

0-200	47685	412682	0.85	0.50
200-400	38755	240832	1.18	0.70
400-600	6881	31965	1.56	0.94
600-800	2213	9642	1.68	1.00
800<	0	5214	0.00	0.00

Çizelge 5.3 (devam ediyor)

---

Sediman Taşıma Kapasitesi İndeksi (LSN)

---

0-25	62268	473042	0.96	0.46
25-50	23848	166388	1.05	0.49

50-100	6721	43550	1.13	0.54
100-150	2697	9368	2.11	1.00
150 <	0	7987	0.00	0.00
<b>Sırtlara Uzaklık (m) (SIRTN)</b>				
0-500	90866	664228	1.00	0.92
500-1000	4498	30401	1.08	1.00
1000-1500	170	4914	0.25	0.23
1500 <	0	792	0.00	0.00
<b>Yollara Uzaklık (m) (YOLN)</b>				
0-250	30610	154356	1.45	0.88
250-500	25681	114031	1.65	1.00
500-750	17613	82037	1.57	0.95
750-1000	11043	60855	1.33	0.81
1000-1250	10587	218744	0.35	0.21
1250<	0	70312	0.00	0.00
<b>Yapısal Unsurlara Uzaklık (m) (CZGN)</b>				
0-250	11214	128390	0.64	0.29
250-500	16425	133306	0.90	0.42
500-750	17099	121012	1.04	0.48
750-1000	16994	102054	1.22	0.56
1000-1250	33802	114478	2.16	1.00
1250<	0	101095	0.00	0.00

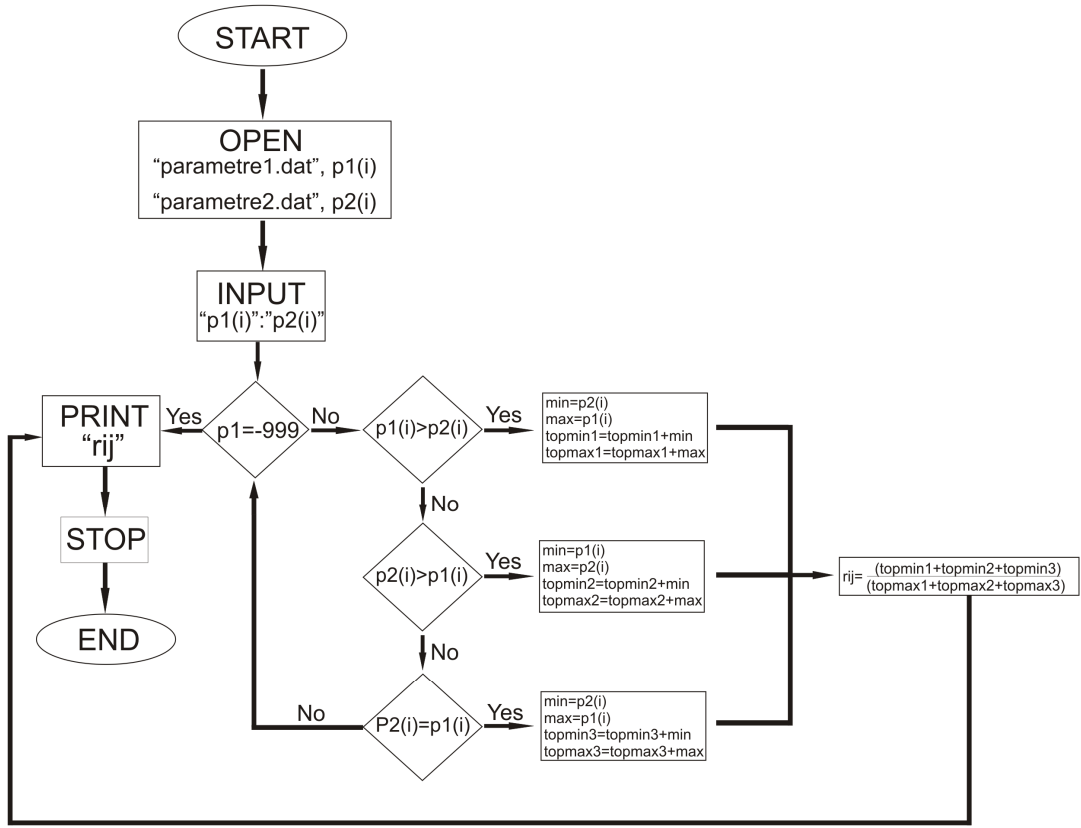
(HP, parametre sınıfındaki heyelanlı piksel sayısı; TP, parametre sınıfındaki toplam piksel sayısı; FR, frequency ratio; NFR, normalleştirilmiş frequency ratio)

Bu bölümün başında da değinildiği üzere, heyelan oluşumu üzerinde seçilecek parametrelerin nesnel bir şekilde elde edilebilmesine yönelik olarak, benzerlik ilişki modellerinden yararlanılmış ve AHP' ye uyarlanmıştır. Bunun için, benzerlik ilişki modellerinden "min-max" yöntemi (MMY) (Ross, 1995) dikkate alınmıştır. Bu amaç doğrultusunda, NFR değerlerine göre yeniden sınıflandırılan parametre

haritalarının “\*.dat” uzantılı dosyaları yardımıyla, parametrelerin heyelan oluşumu üzerinde ve birbirleriyle ilişkilerini ortaya koyabilmek için, MMY’ ni temel alan FULLSA programına eklenmiştir. Program dili olarak Quick Basic kullanılmış olup, parametrelerin heyelanlarla ve birbirleriyle olan ilişkilerini belirleyebilmek amacıyla,  $r_{ij}$  olarak adlandırılan ve Eşitlik 5.17 ile ifade edilen benzerlik ilişki değeri, yazılan program yardımıyla hesaplanmıştır.

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m \min(x_{ik}, x_{jk})}{\sum_{k=1}^m \max(x_{ik}, x_{jk})} \quad \text{Eş.5.17}$$

Bu eşitlikte,  $\min(x_{ik}, x_{jk})$  karşılaştırılan parametrelerdeki veri çiftlerinin en küçük değerine;  $\max(x_{ik}, x_{jk})$  ise karşılaştırılan parametrelerdeki veri çiftlerinin en yüksek değerlerini ifade etmektedir. MMY modülünün iş-akış diyagramı da, Şekil 5.3’ te sunulmuştur.



Şekil 5.3. MMY modülünün iş-akış diyagramı.

Eşitlik 5.17' de verilen benzerlik ilişki değeri  $r_{ij}$ , 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 0 değeri veri çiftlerinin arasında bir benzerlik olmadığına, 1 değeri ise, veri çiftleri arasındaki ilişkinin mükemmel olduğuna işaret etmektedir (Ross, 1995).

AHP yönteminde ve diğer tüm yöntemlerde, araştırmacılar ellerindeki olanaklar dahilinde parametrik harita üretimlerini gerçekleştirmekte, ya deneme-yanılma yoluna giderek, ya da istatistiksel analizler veya deneyimleri doğrultusunda, heyelan duyarlılık analizlerinde kullanacakları parametreleri seçmektedirler. Daha önce de değinildiği üzere, heyelan duyarlılık analizlerinde en önemli unsurlardan biri, heyelan oluşumunda etkin olan parametrelerin seçilmesidir. Bu nedenle, AHP gibi yüksek derecede öznellik içeren bir yöntem, veriye dayalı ve sayısal olarak ifade edilebilen bir yöntem bilimin ortaya konulması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, [0, 1] aralığında değişen benzerlik ilişki

değeri  $r_{ij}$ , kendi içinde gruplandırılarak, AHP yönteminde kullanılan ve 1-9 değerleri arasında değişen önem dereceleri puanlarına uyarlanmıştır (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4.  $r_{ij}$  katsayılarına karşılık gelen önem derecesi puanları.

$r_{ij}$ Değer Aralığı	Önem Derecesi
0-0.2	9
0.2-0.3	8
0.3-0.4	7
0.4-0.5	6
0.5-0.6	5
0.6-0.7	4
0.7-0.8	3
0.8-0.9	2
0.9-1.0	1

Örneğin, birbiriyle heyelan oluşumu üzerinde etkisi olmayan parametre çiftleri arasında, düşük bir  $r_{ij}$  değerinin (örn. 0-0.2 gibi) elde edilmesi, dolayısıyla AHP yönteminde, söz konusu parametre çiftinin arasındaki benzerliğin, yüksek bir puana (örn.: 9) karşılık gelmesi düşünülmüştür. Aynı şekilde, heyelan oluşumunda etkin olan bir parametre çiftinin arasındaki  $r_{ij}$  değerinin 1' e yakın olması beklenmelidir. Benzer olarak, her iki parametre grubu da heyelan oluşumu üzerinde etkin ise, bunların puanları da AHP sisteminde düşük veya birbirine yakın olmalıdır.

AHP' de veriye dayalı parametrik ilişkilerin ortaya konulması ve puanlamanın daha nesnel yapılabilmesinin yanı sıra, etkin olan parametrelerin seçimi için de benzerlik ilişki modelinden yararlanılmıştır. Diğer bir deyişle, AHP' de kullanılacak girdi parametrelerinin seçilmesi amacıyla, yine  $r_{ij}$  değerlerini temel alan ve hem heyelanlı alanlarda, hem de parametrelerin kendi arasında etkilerinin ortaya

konulabilmesi için, “Benzerlik İlişki Göstergesi (BİG)” adı verilen bir indeks değeri önerilmiştir. BİG değeri, parametrelerin birbirleriyle karşılaştırılması sonucu elde edilen  $r_{ij}$  değerlerinin toplamının ( $r_{ij(1)}$ ), aynı parametrenin heyelan envanteri ile ilişkisini ifade eden ilişki değeri ( $r_{ij(2)}$ ) ile çarpılması sonucunda elde edilmektedir (Eş. 5.18):

$$BİG = \sum r_{ij(1)} \times r_{ij(2)} \quad \text{Eş.5.18}$$

Eşitlikte  $r_{ij(1)}$ , parametrelerin birbirleri ile olan ilişkilerini ifade eden  $r_{ij}$  değerine,  $r_{ij(2)}$  ise parametrelerin envanter haritası ile ilişkilerini gösteren  $r_{ij}$  değerine karşılık gelmektedir. Bu şekilde hesaplanmış BİG değerleri, dikkate alınmış tüm parametreler için Çizelge 5.5’ de sunulmuştur.

Çizelge 5.5 Parametrelere ilişkin hesaplanan BİG değerleri.

Parametre	$r_{ij(1)}$	$r_{ij(2)}$	BİG	Önem Sırası
Arazi Kullanımı	6.061	0.266	1.612	9
Yollara Uzaklık	7.491	0.143	1.071	12
NDVI	9.143	0.232	2.121	3
Topoğrafik Yükseklik	7.402	0.248	1.836	4
Yamaç Eğimi	9.914	0.274	2.716	1
Sırtlara Uzaklık	6.963	0.087	0.606	13
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	8.131	0.199	1.618	8
Yamaç Eğriselliği	8.122	0.212	1.722	5
Sediman Taşıma Kapasitesi İndeksi	7.196	0.157	1.129	11
Akarsuya Uzaklık	8.112	0.269	2.182	2
Bakı	8.152	0.204	1.663	6
Akış Gücü İndeksi	7.992	0.205	1.638	7
Yapısal Unsurlara Uzaklık	7.351	0.165	1.213	10

Çizelge 5.5' de verilen BİG değerlerine göre, sadece MMY yöntemi dikkate alınır, heyelan oluşumu açısından en etkin parametrenin arazi kullanımı, en düşük etkiye sahip parametrenin de çizgiselliğe uzaklık parametresi olduğu ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu şekildeki bir değerlendirme ikili (binary) etkileri temel almakta, tüm sistemin çözümüne yönelik bir bilgi sağlamamaktadır. Bu nedenle, sonraki aşamada, etkin parametrelerin seçilebilmesi ve heyelan duyarlılık haritalarının AHP ile oluşturulabilmesi için, hesaplanan BİG değerleri, büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. AHP' nin uygulanmasında en az 3 adet parametreye gereksinim duyulmaktadır. Idrisi Andes programının AHP modülü ile BİG değeri en büyük olan ilk 3 parametre (arazi kullanımı, yollara uzaklık, NDVI) AHP' de kullanılmış, fakat CR değerinin 0.1' den büyük olması nedeniyle, duyarlılık haritası üretilmemiştir. BİG değerlerine göre yapılan sıralamada, CR değeri 6 parametre kullanımına değin 0.1 değerinin üzerinde hesaplanmıştır. Bu nedenle, BİG değeri en yüksek 6 parametre kombinasyonundan itibaren analizler başlatılmıştır. Daha sonra, BİG değerleri gözetilerek sırasıyla 7, 8, 9, 10, 11, 12 ve 13 parametre ile AHP analizleri gerçekleştirilmiş ve heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. Söz konusu haritalardan, bir sonraki bölümdeki performans değerlendirmeleri de dikkate alınarak, burada en yüksek performansın gözlemlendiği heyelan duyarlılık haritasına ilişkin özellikler verilmiştir. Söz konusu haritanın oluşturulmasında kullanılan karşılaştırma matrisi Çizelge 5.6' da, elde edilen parametre ağırlık değerleri Çizelge 5.7' de, üretilen heyelan duyarlılık haritası Şekil 5.4' te ve bu haritanın heyelan duyarlılığı açısından 4 grupta sınıflandırıldığı harita ise Şekil 5.5' te sunulmuştur.

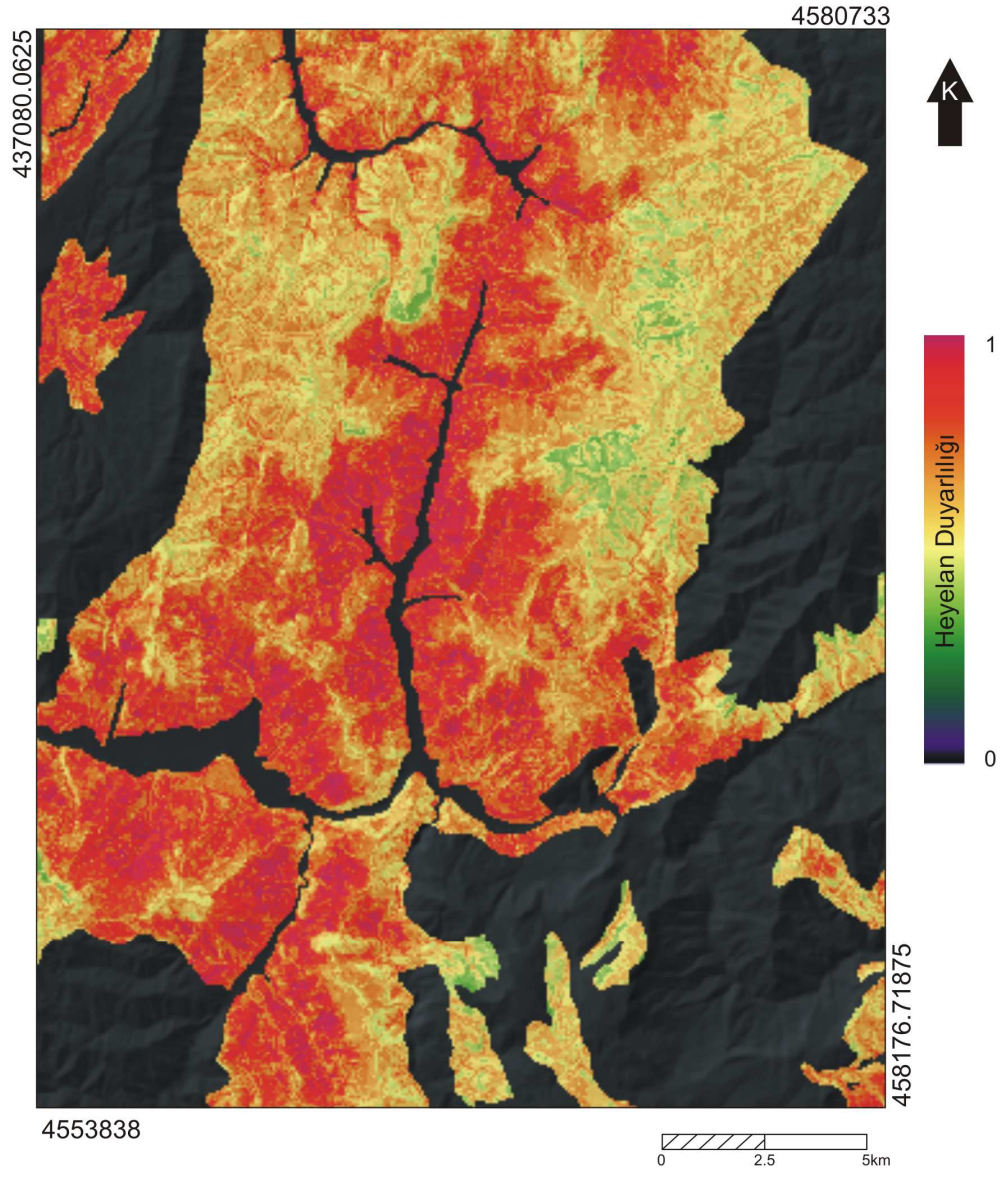
Çizelge 5.6. 9 parametre kullanılarak yapılan AHP için oluşturulan karşılaştırma matrisi.

	ARAZIN	ASPYN	CURVYN	DREYN	NDVIN	SLPYN	YUKSYN	WIN	SPIN
ARAZIN	1								
ASPYN	1/2	1							
CURVYN	2	1	1						
DREYN	3	3	3	1					
NDVIN	2	4	2	1/2	1				
SLPYN	4	3	4	2	3	1			
YUKSYN	1/2	2	2	1/3	1/2	1/3	1		
WIN	1	2	1	1/2	1/2	1/4	1/2	1	
SPIN	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/4	1/2	2	1

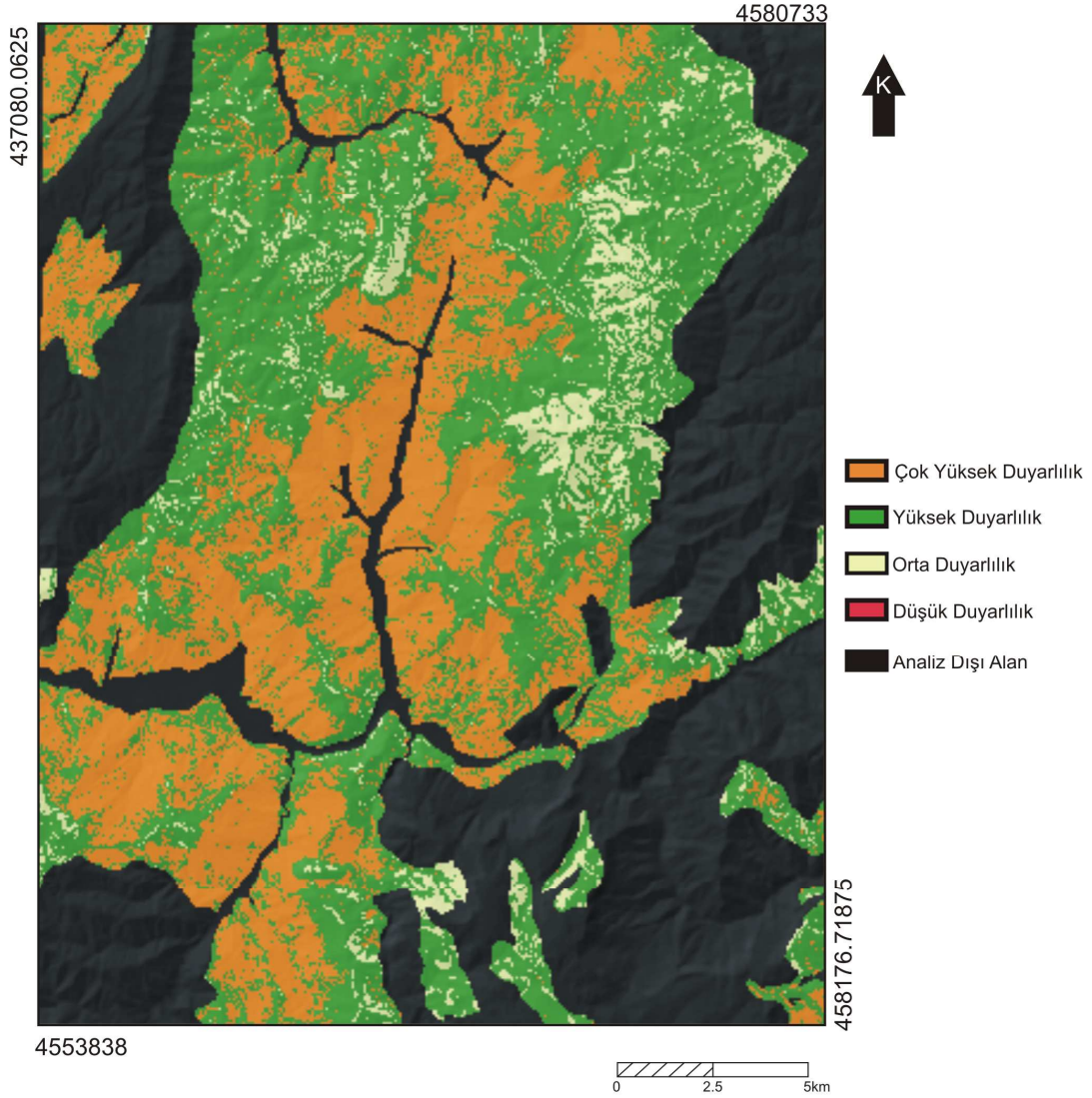
Çizelge 5.7. BİG değerlerine göre seçilen parametrelerin ağırlık değerleri (9 parametre kullanılarak).

Parametre	Ağırlık Değeri
Yamaç Eğimi	0.2656
Akarsuya Uzaklık	0.1783
NDVI	0.1312
Topoğrafik Yükseklik	0.0874
Yamaç Eğriselliği	0.0738
Bakı	0.0560
Akış Gücü İndeksi	0.0563
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	0.0651
Arazi Kullanımı	0.0863

Diğer parametre kombinasyonlarından elde edilen ağırlık değerleri EK-2' de, üretilen duyarlılık haritaları ve bunların sınıflandırılmış haritaları da, EK-3' de sunulmuştur.



Şekil 5.4. 9 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası.



Şekil 5.5. 9 parametre kullanılarak üretilen sınıflandırılmış heyelan duyarlılık haritası.

Tüm bu işlemlerden bağımsız olarak, AHP uygulamasının saha çalışmaları sırasında elde edilen bilgi ve gözlemler doğrultusunda heyelan oluşumunda etkin olduğu düşünülen parametreler, bu çalışmayı gerçekleştiren yüksek lisans öğrencisi tarafından seçilerek, AHP uygulamasına sokulmuştur. Seçilen 8 parametrenin AHP puanlaması tamamen kişisel yargılama doğrultusunda analizlere sokulmuş ve bu işlemlerin tümü G8 olarak adlandırılmıştır. G8

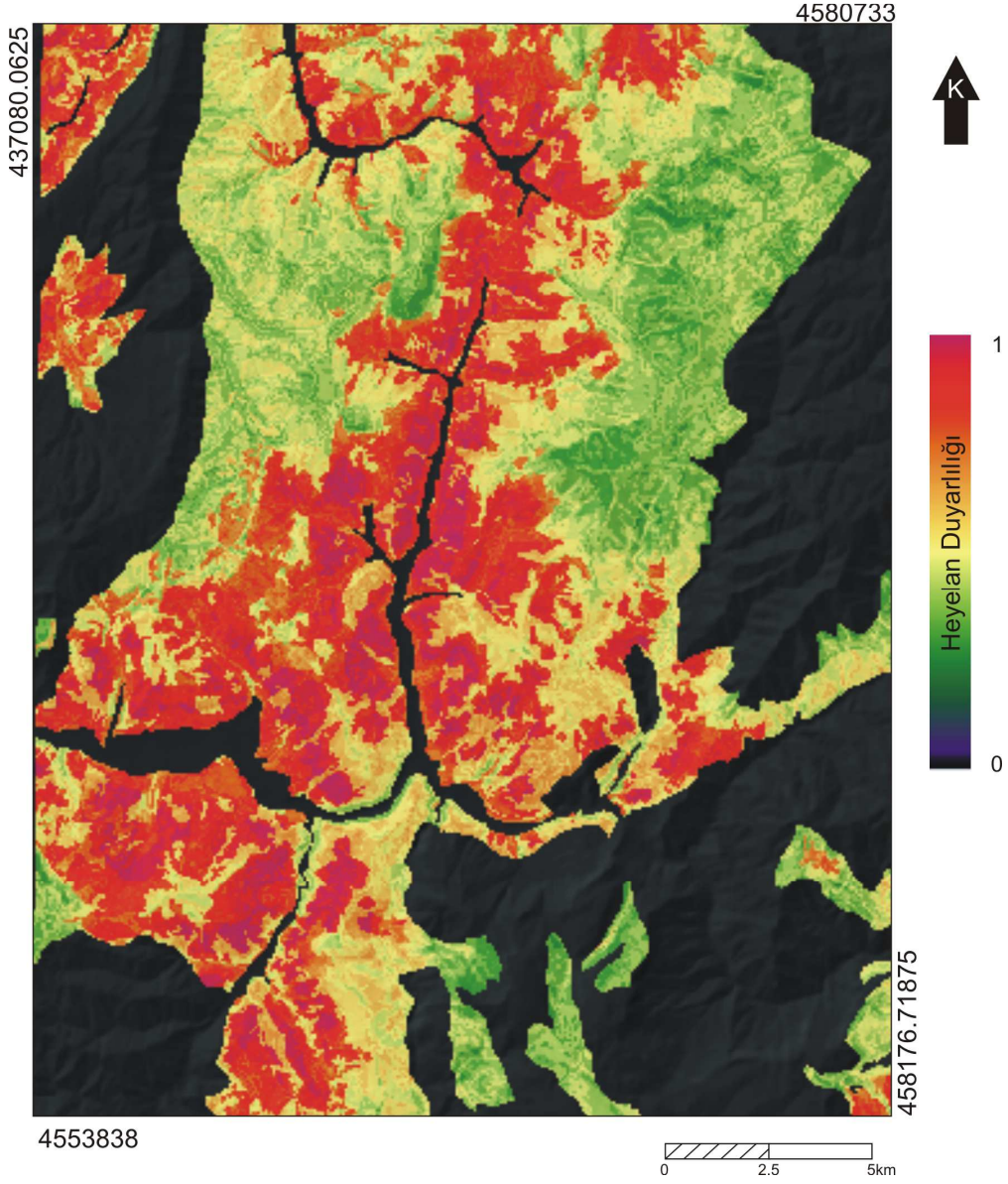
işleminde seçilen parametreler, karşılaştırma matrisi, üretilen heyelan duyarlılık haritası ve sınıflandırılmış harita, sırasıyla, Çizelge 5.8, Çizelge 5.9, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7' de sunulmuştur.

Çizelge 5.8 AHP için oluşturulan karşılaştırma matrisi

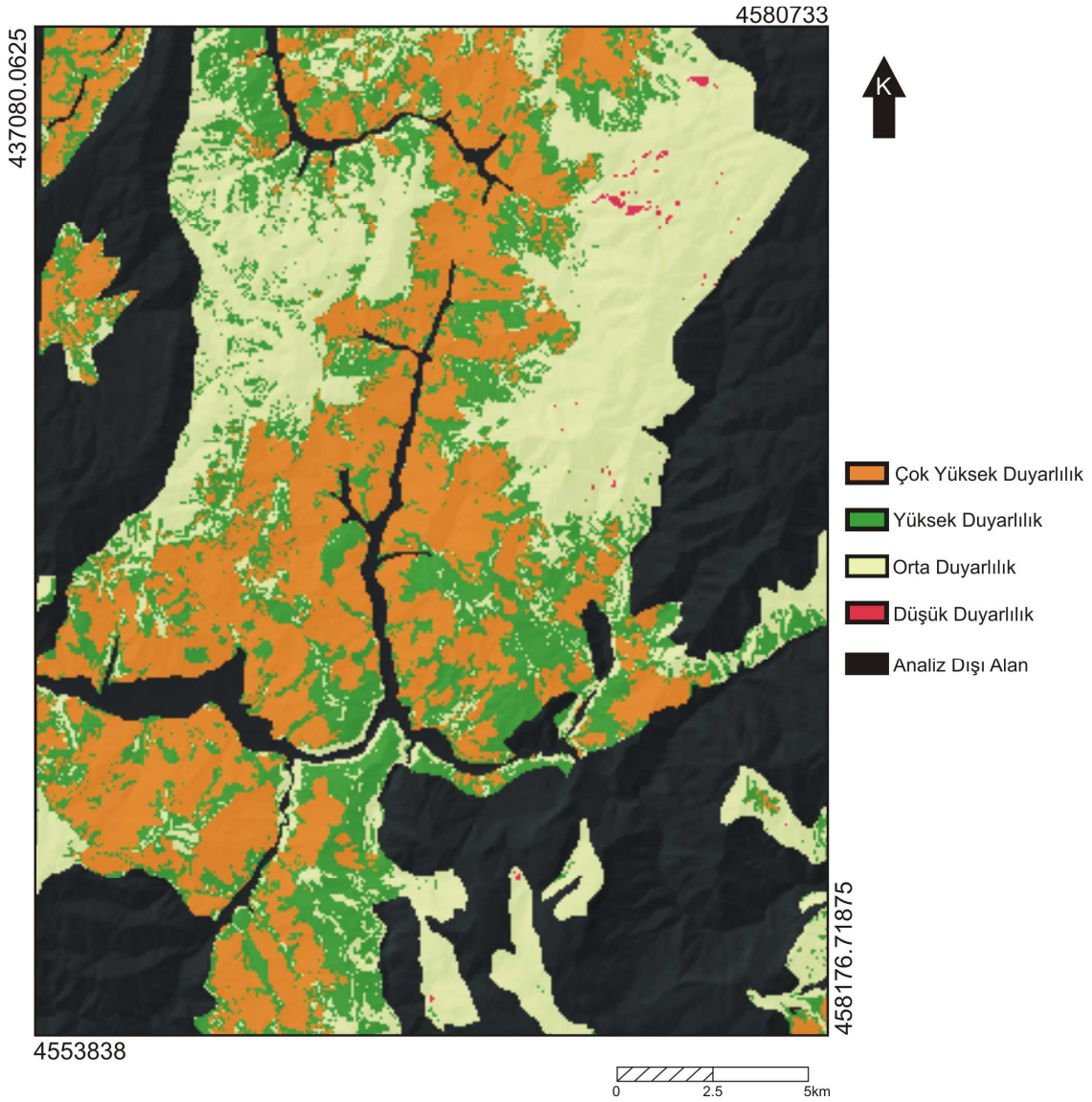
	ARAZIN	ASPYN	CURVYN	DREYN	NDVIN	SLPN	YUKSYN	YOLN
ARAZIN	1							
ASPYN	1/5	1						
CURVYN	1/6	1/2	1					
DREYN	1/2	3	4	1				
NDVIN	1/3	2	2	1/4	1			
SLPN	1/3	3	4	1/2	3	1		
YUKSYN	1/3	3	4	1/3	2	1/2	1	
YOLN	1/3	2	3	1/4	2	1/2	1/2	1

Çizelge 5.9. G8 işleminde seçilen parametrelerin ağırlık değerleri.

Parametre	Ağırlık Değeri
<i>8 parametre kullanarak yapılmıştır.</i>	
Arazi Kullanımı	0.2880
Yamaç Eğimi	0.1462
NDVI	0.0634
Topoğrafik Yükseklik	0.1119
Baki	0.0491
Yollara Uzaklık	0.0830
Yamaç Eğriselliği	0.0344
Akarsuya Uzaklık	0.2239

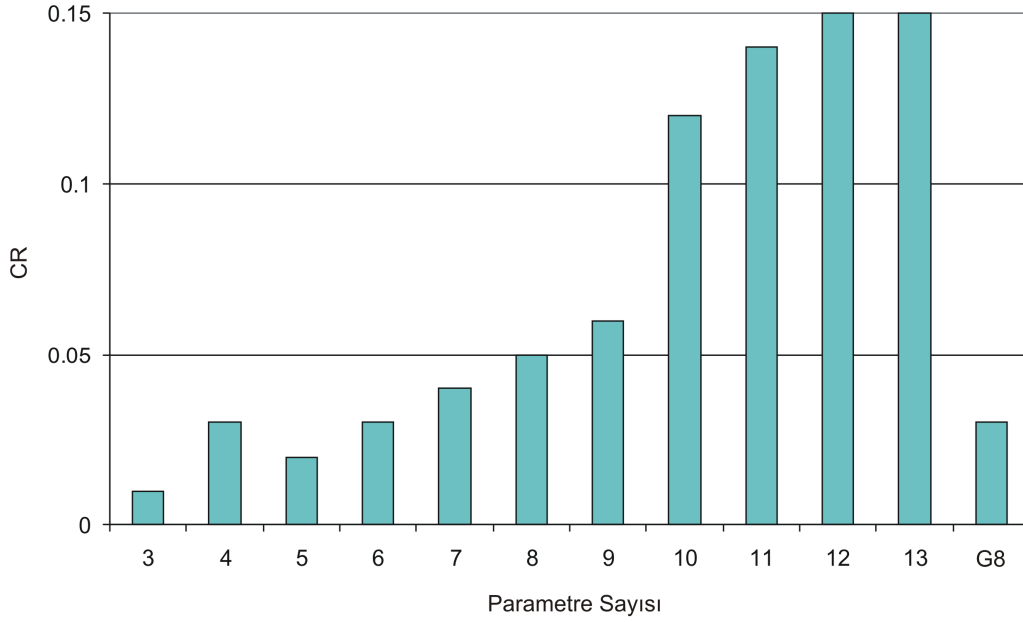


Şekil 5.6 G8 AHP modeli ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası



Şekil 5.7 Sınıflandırılmış G8 AHP modeli heyelan duyarlılık haritası.

Dikkate alınana tüm AHP modellerinin CR değerleri ise Şekil 5.8' da gösterilmiştir. Buna göre, BİG değerlerine göre sıralanan parametre kombinasyonlarından 9 parametre ve üzerindeki kombinasyonların kullanıldığı AHP modelleri geçersiz olarak tanımlanmışken, diğer tüm AHP modelleri  $CR \leq 0.10$  koşulu sağladığı için değerlendirmelerde dikkate alınmıştır.



Şekil 5.8. Parametrelerin CR değerleri

### 5.3. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Performans Değerlendirmeleri

Üretilen heyelan duyarlılık haritalarının doğruluk değerlendirmelerinin yapılması ve performanlarının denetlenmesi amacıyla, ROC (Relative Operating Characteristic) yönteminden yararlanılmıştır. ROC yöntemi, oluşturulan bir model veya üretilen bir haritanın doğruluğunu, yapılan sınıflamaların gerçekte yerinin ne olduğuyla karşılaştıran bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (Eastman, 2006). ROC yönteminde, “İlgili sınıf(lar)ın, göreceli olarak gerçek durumda ne şekilde sınıflandırıldığı ve yüksek uygunluğa sahip alanlardaki yoğunluğu ne kadar iyidir?” sorularına yanıt verilmektedir. Bu işlemler, AUC (Area Under Curve) olarak adlandırılan bir değer hesaplanması temeline dayanmaktadır. Yapılan sınıflama sonucunda, TP (True Positive) ve FP (False Positive) olarak sınıflandırılan alanlardaki oransal karşılaştırmalar sonucunda elde edilen eğrinin altında kalan alan, AUC değeri olarak ifade edilir. Bu değer, 0.5 ile 1.0 arasında değişmekte olup, 0.5 değeri harita çiftleri arasında ilişkinin olmadığını (rastlantısal

olduğunu), 1 değeri ise harita çiftleri arasındaki ilişkinin % 100 (mükemmel) olduğunu ifade eder (Eastman, 2006).

Üretilen duyarlılık haritalarının performanslarının sınanması için, Idrisi Andes programının ROC modülü kullanılmıştır. Heyelan özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan heyelanlı ve heyelansız piksellerden toplam 299730 adet piksel, hiç bir şekilde analizlere sokulmayıp, performans değerlendirmeleri için dikkate alınmıştır. Bunlardan 25639 tanesi heyelanlı, 274091 tanesi de, heyelansız olarak katmanlı rasgele (stratified random) olarak seçilmiştir. Heyelan envanter haritası referans görüntü olarak dikkate alınırken, üretilen duyarlılık haritaları da, girdi görüntüsü olarak alınmıştır. Idrisi Andes programının ROC modülü, AUC değerinin hesaplanmasında, eğrinin altında kalan alanı hesaplamak için aşağıdaki eşitliği kullanmaktadır:

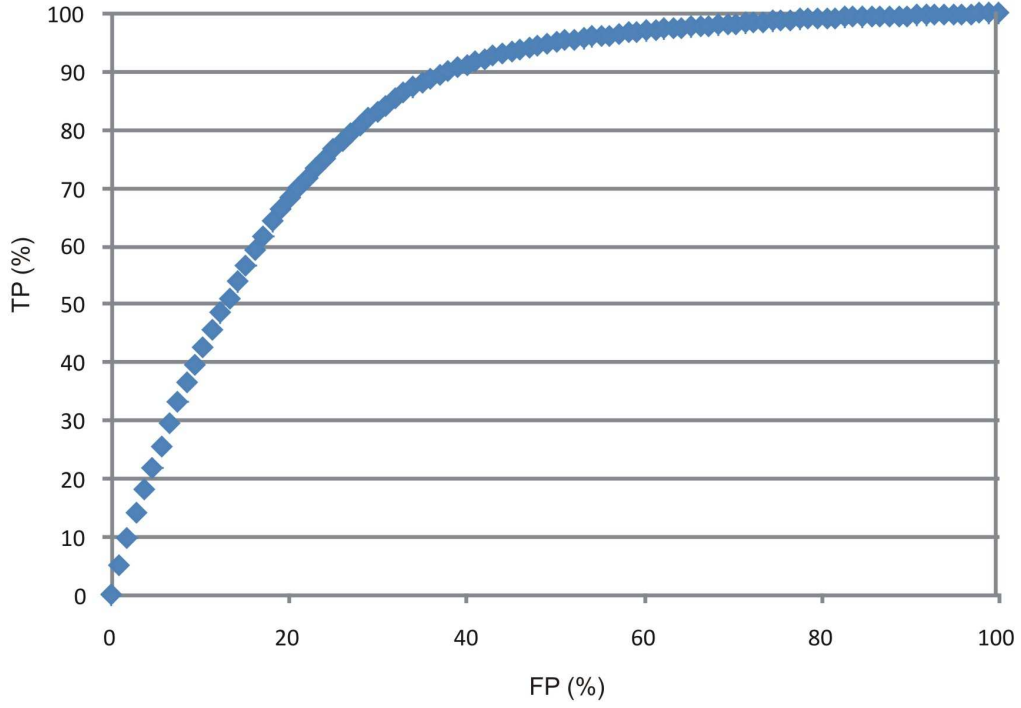
$$Alan = \sum_{i=1}^n [x_{i+1} - x_i] \times [y_i + (y_{i+1} - y_i) / 2] \quad \text{Eş. 5.19}$$

Burada  $x_i$ ,  $i$  eşik değeri için, heyelansız alanlarda heyelan varlığı gösteren piksellerin, başka bir deyişle “false positive (FP)” değerlerinin oranı;  $y_i$  değeri,  $i$  eşik değeri için heyelanlı alanlarda heyelan varlığı gösteren piksellerin, başka bir deyişle “true positive (TP)” değerlerinin oranı,  $n+1$  ise, eşik değerlerinin sayısıdır. Analizlerde eşik (threshold) değeri 100 olarak alınmıştır. ROC analizi sonucunda elde edilen elde edilen değerler, Çizelge 5.10’ da verilmektedir.

Çizelge 5.10.Duyarlılık haritalarının AUC ve CR değerleri.

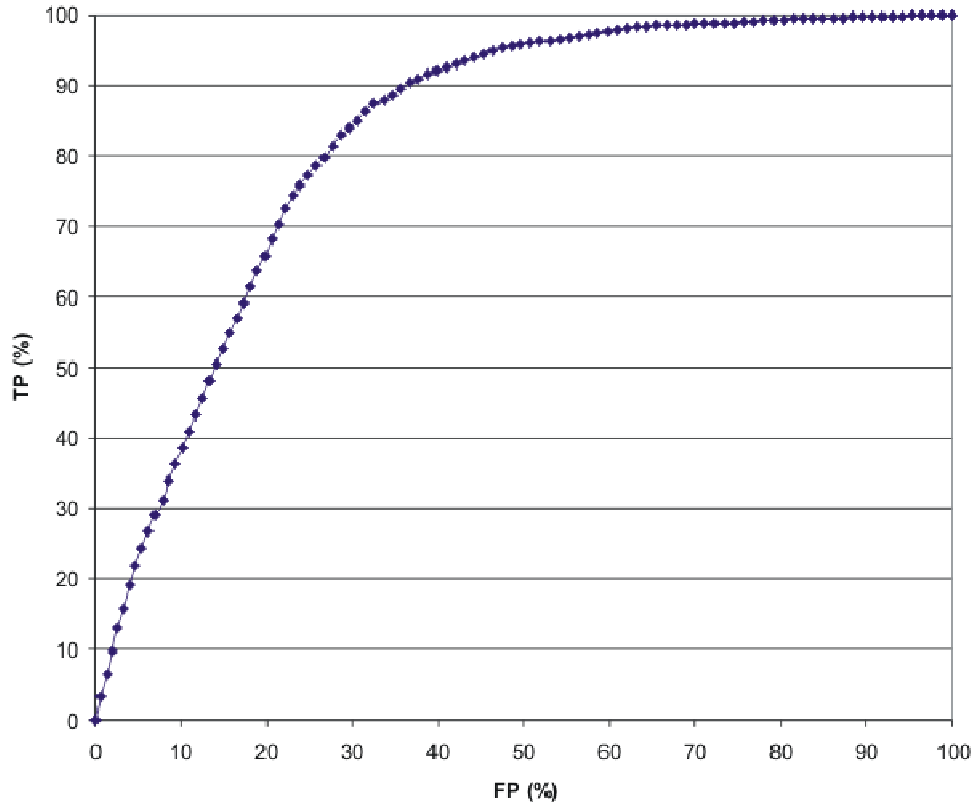
AHP Modelleri	CR Değerleri	AUC Değerleri (%)
3 Parametre	0.01	73.4
4 Parametre	0.03	76.8
5 Parametre	0.02	77.4
6 Parametre	0.03	78.5
7 Parametre	0.04	79.0
8 Parametre	0.05	79.1
9 Parametre	0.06	82.7
G8	0.03	82.8

Üretilen heyelan duyarlılık haritaları içinde en yüksek performansa sahip haritanın, AHP açısından en düşük CR değerine, performans açısından da en yüksek AUC değerine sahip olması beklenmelidir. Çizelge 5.10 incelendiğinde, bu çalışmada uygulanan yöntem bilim kullanılarak elde edilen en yüksek performansın, 9 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. 9 parametreden oluşan duyarlılık haritasının performansı.

Ayrıca, G8 olarak adlandırılan ve kişisel görüşe dayalı olarak üretilen haritadan ise, tüm haritalar içinde en yüksek doğruluk ve performans değerleri elde edilmiştir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. G8 duyarlılık haritasının performansı.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Batı Karadeniz Bölgesi Karabük ili sınırları içerisinde seçilen, yaklaşık 567 km<sup>2</sup> lik bir alanı kapsayan çalışma alanında 15 adet akma ve 86 adet dairesel kayma türünde toplam 101 adet heyelan tespit edilmiştir. Çalışma alanındaki heyelanların meydana gelmesinde etkin olduğu düşünülen ve literatürde yaygın olarak kullanılan; yamaç eğimi, eğim yönü, yamaç eğriselliği, topoğrafik yükseklik, bitki örtüsü, arazi kullanımı, akarsuya uzaklık, yollara uzaklık, çizgiselliğe uzaklık, sırtlara uzaklık, akış gücü indeksi, sediman taşıma kapasitesi indeksi ve topoğrafik nemlilik indeksi parametrelerinin, heyelanlar üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Yamaç eğimi değerleri için 10-20° arasında, bakı değerleri için güneye bakan yamaçlarda, yamaç eğriselliği değerleri için içbükey ve dışbükey sınıflarında, topoğrafik yükseklik değerleri için 250-500 m arasında, NDVI değerleri için 0.2-0.3 arasında, arazi kullanımı için tarımsal alanlarda, akarsuya 0-250 m arasındaki uzaklık sınıfında, yollara 250-500 m arasındaki uzaklık sınıfında, yapısal unsurlara uzaklığın 1000-1250 m arasında olduğu sınıflarda, sırtlara 500-1000 m arasındaki uzaklıklarda, akış gücü indeksi için 600-800 arasındaki sınıflarda, sediman taşıma kapasitesi indeksi için 100-150 arasındaki sınıflarda, topoğrafik nemlilik indeksi için ise 9-12 sınıf aralığında heyelanların yoğun olarak meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Çalışma alanının heyelan duyarlılık haritaları, heyelan envanteri haritası temel alınarak, Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHP) yardımıyla oluşturulmuştur. Öznel bir yöntem olan AHP yöntemine, benzerlik ilişki modellerinden MMY (min-max yöntemi) yöntemi ile belirlenen  $r_{ij(1)}$  ve  $r_{ij(2)}$  değerleri çarpımı sonucu elde edilen BİG değerlerinin adapte edilmesi ile yöntemin nesnel bir yöntem haline dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Heyelan duyarlılık haritaları oluşturulurken kullanılan parametrelerin etkinlikleri BİG (Benzerlik İlişki Göstergesi) değerlerine göre belirlenmiştir. “En yüksek BİG değerine sahip parametre, etkinliği en yüksek olan parametredir” ilkesine dayanarak parametre seçimi yapılmıştır. En etkin olan parametrenin yamaç eğimi olduğu ve bunu önem sırasına göre; akarsulara

uzaklık, NDVI, topoğrafik yükseklik, yamaç eğriselliği, bakı, akış gücü indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi, arazi kullanımı, yapısal unsurlara uzaklık, sediman taşıma kapasitesi indeksi, yollara uzaklık ve sırtlara uzaklık parametrelerinin takip ettiği saptanmıştır. Seçilen, en yüksek BİG değerlerine sahip ilk 3 parametreden itibaren, duyarlılık haritasında kullanılacak ağırlık değerlerinin hesaplanması amacıyla,  $r_{ij(1)}$  benzerlik ilişki değeri, AHP yönteminde kullanılan ve 1-9 değerleri arasında değişen önem dereceleri puanlarına uyarlanmıştır. AHP yöntemi uygulanan parametre kombinasyonlarından, CR değerlerinin 0.1' in altında olması nedeniyle, BİG değeri en yüksek olan ilk 3 parametre kombinasyonundan itibaren 10 parametre kombinasyonuna kadar elde edilen ağırlık değerleri ile heyelan duyarlılık haritaları üretilmiştir. 10 parametre ve üstündeki parametre kombinasyonlarından, CR değerinin 0.1'in üstünde olması nedeniyle duyarlılık haritaları üretilmemiştir. Duyarlılık haritalarının performans değerlendirmeleri, % FP değerlerine karşılık gelen % TP değerlerinin oluşturduğu eğrinin altında kalan alanın hesabına dayanan AUC değerinin hesaplanması ile yapılmıştır. Bu çalışmada uygulanan yöntem bilim kullanılarak, kabul edilen CR değerlerine karşılık gelen en yüksek AUC değerinin elde edildiği 9 parametre kullanılarak üretilen haritanın, en yüksek performansı sergilediği belirlenmiştir.

Çalışma alanının, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan yöntem bilim, AHP' de parametrik ilişkilerin ortaya konulmasını, puanlamanın daha nesnel yapılabilmesini sağlamakta ve etkin olan parametre(ler)in seçimine olanak sağlamaktadır. Klasik AHP yöntemi ile üretilen, heyelan duyarlılık haritasının (G8) performans değerlendirmesi sonucunun, bu çalışmada önerilen yöntem bilim kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritalarının performanslarının küçük bir aralıkta değişmesi ve birbirlerine yakın olması, yaklaşımın kullanılabilir olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

## 7. YARARLANILAN KAYNAKLAR

Akgün, A., Bulut, F., 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environmental Geology*, 51,1377-1387.

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.

Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 21-44.

Alexander, D., 1993, *Natural Disasters*, London UCL Press, 632s.

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. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81, 432-445.

Ayalew, L., Yamagishi, H., Ugawa, N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1, 73-81.

Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., Kanno, T., 2005. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81, 432-445.

Ayanew, T., Barbieri, G., 2005. Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie area, northern Ethiopia. *Engineering Geology*, 77, 1-15.

Baeza, C., Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1251-1263.

Bai, S.-B., Wang, J., Lü, G.-N., Zhou, P.-G., Hou, S.-S., Xu S.-N., 2009. GIS-Based and Data-Driven Bivariate Landslide-Susceptibility Mapping in the Three Gorges Area, China. *Pedosphere*, 19(1), 14–20.

Can, T., Nefeslioglu, H.A., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Duman, T.Y., 2005. Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology*, 72, 250-271.

Caniani, D., Pascale, S., Sdao, F., Sole, A., 2008. Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. *Natural Hazards* (2008) 45, 55–72.

Ceryan, N., Ceryan, S., 2008. An application of the interaction matrices method for slope failure susceptibility zoning: Doğankent settlement area (Giresun, NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 375–385.

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.

Chau, K. T., Chan, J. E., 2005. Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression: Case of Hong Kong Island. *Landslides*, 2, 280-290.

Chigira, M., Duan, F., Yagi, H., Furuya, T., 2004. Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics. *Landslides*, 1, 203-209.

Clerici, A., Perego, S., Tellini, P., Vescovi, P., 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48, 349–364.

Clerici, A., Perego, S., Tellini, P., 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.

Coelho-Netto, A.L., Avelar, A.S., Fernandes, M.C., Lacerda, W.A., 2007. Landslide susceptibility in a mountainous geoecosystem, Tijuca Massif, Rio de

Janeiro: The role of morphometric subdivision of the terrain. *Geomorphology*, 87, 120-131.

Conoscenti, C., Maggio, C.D., Rotigliano, E. , 2008. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). *Geomorphology*, 94, 325-339.

Cornforth, D.H., 2005. *Landslides in Practice. Investigations, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*, M.G. Anderson and K.S. Richards (eds.), John Wiley and Sons, 4.

Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J.M., Altimir, J., and Amigó, J., 2003. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30, 421-435.

Cruden, D.M., 1991. A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.

Dai, F.C., Lee, C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213-228.

Dai, F.C., Lee, C.F., Zhang, X.H, 2001. GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. *Engineering Geology*, 61, 257-271.

De Vita, P., Agrello, D., Ambrosino, F., 2006. Landslide susceptibility assessment in ash-fall pyroclastic deposits surrounding Mount Somma-Vesuvius: Application of geophysical surveys for soil thickness mapping. *Journal of Applied Geophysics*, 59, 126-139.

Demoulin, A. ve Chung, F., 2007. Mapping landslide susceptibility from small datasets: A case study in the Pays de Herve (E Belgium). *Geomorphology*, 89, 391–404.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (2010, 4 Mart), <http://meteor.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=KARABUK>

Duman, T.Y., Can, T., Gökçeoğlu, C., Nefeslioglu, H. A., 2005. Landslide susceptibility mapping of Cekmece area (Istanbul, Turkey) by conditional probability. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2, 155–208.

Duman, T.Y., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H. A., Sonmez, H., 2006. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environmental Geology*,51, 241-256.

Dymond, J.R., Ausseil, A.-G., Shepherd, J.D., Buettner, L., 2006. Validation of a region-wide model of landslide susceptibility in the Manawatu–Wanganui region of New Zealand. *Geomorphology*,74, 70-79.

Eastman, 2006. *Idrisi Andes Guide to GIS and Image Processing*. Clark University Press, Worcester, Massachusset, USA, 328 p.

Ercanoğlu, M., 2003. Bulanık mantik ve istatistiksel yöntemlerle heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi: Batı Karadeniz Bölgesi (Kumluca Güneyi-Yenice Kuzeyi). H.Ü. Fen Bil. Enst. Doktora Tezi, Ankara, 202 s.

Ercanoğlu, M., 2005. Landslide susceptibility assessment of SE Bartın (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*,5, 979-992.

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.

Ercanoğlu, M., Gökçeoğlu, C., 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, 75, 229-250.

Ercanoğlu, M., Gökçeoğlu, C., Van Asch, Th.W. J., 2004. Landslide susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. *Natural Hazards*, 32, 1-23.

Ercanoğlu, M., Kaşmer, Ö., Temiz, N., 2008. Adaptation and comparison of expert opinion to analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 565–578.

Ermini, L., Catani, F., Casagli, N. , 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66, 327-343.

Falasci, F., Giacomelli, F., Federici, P.R., Puccinelli, A., D' Amato Avanzi, G., Pochini, A., Ribolini, A., 2009. Logistic regression versus artificial neural

networks: landslide susceptibility evaluation in a sample area of the Serchio River valley, Italy. *Natural Hazards*, 50, 551-569.

Fall, M., Azzam, R., Noubactep, C., 2006. A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. *Engineering Geology*, 82, 241-263.

Federicia, P. R., Puccinellia, A., Cantarella, E., Giacomo, N. C., Avanzia, D' A., Falaschia, F., Giannecchinia, R., Pochinia, A., Ribolinia, A., Bottait, M., Salvatib, N., Testia, C. , 2007. Multidisciplinary investigations in evaluating landslide susceptibility—An example in the Serchio River valley (Italy). *Quaternary International*, 171-172, 52-63.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, 85-98.

Fernández, T., Irigaray, C., El Hamdouni, R., And Chacón, J., 2003. Methodology for Landslide Susceptibility Mapping by Means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain). *Natural Hazards*, 30, 297-308.

Godt, J.W., Baum, R.L., Savage, W.Z., Salciarini, D., Schulz, W.H., Harp, E.L., 2008. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Engineering Geology*, 102, 214–226

Gökçeoğlu, C., Ercanoğlu, M., 2001. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler

Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Nefeslioglu, H. A. Duman, T.Y., Can, T. , 2005. The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity. *Engineering Geology*, 81, 65-83.

Gomez, H. and Kavzoğlu, T., 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78, 11-27.

Gorsevski, P.V. , Gessler, P.E. , William, J.B. , Eliot, J., Foltz, R.B., 2006. Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. *Geomorphology*, 80, 178-198.

Gorsevski, P.V., Jankowski, P., 2008. Discerning landslide susceptibility using rough sets. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32,53-65.

Görüm, T., Gönençgil, B., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., 2008. Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NW Turkey). *Natural Hazards*, 46, 323–351.

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.

Gritzner, M.L., Marcus, W.A., Aspinall, R., Custer, S.G., 2001. Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology*, 37, 149-165.

Guinau, M., Pallas, R., Vilaplana, J. M., 2005. A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: A case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch. *Engineering Geology*, 80, 316-327.

Gullà, G., Antronico, L., Iaquinata, P., Terranova, O., 2008. Susceptibility and triggering scenarios at a regional scale for shallow landslides. *Geomorphology*, 99, 39–58.

Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Reichenbach, P., Rossi, M., 2008. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Geomorphology*, 96, 105-122.

Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. and Carrara, A., 2000. Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. *Environmental Management*, 25, 247-363.

Havenith, H.-B., Strom, A., Caceres, F., Pirard, E. , 2006. Analysis of landslide susceptibility in the Suusamyir region, Tien Shan: statistical and geotechnical approach. *Landslides*, 3, 39-50.

He, Y., Beighley, E., 2008. GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 380-393.

Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R., Chacon, J., 2007. Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards*, 41, 61-79.

Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geological Survey of Slovenia*, 74, 17-28.

Lee, C.F., Ye, H., Yeung, M.R., Shan, X., Chen, G., 2001. AIGIS-based methodology for natural terrain landslide susceptibility mapping in Hong Kong. *Episodes*, 24, 150-158.

Lee, S., 2004. Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to landslide susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management*, 34, 223-232.

Lee, S., 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 52, 615-623.

Lee, S., Choi, J., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. *International Journal of Geographical Information Science*, 18, 789-814.

Lee, S., Choi, J., Min, K., 2002a. Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*, 43, 120-131.

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., Min, K., 2001. Statistical Analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40, 1095-1113.

Lee, S., Ryu, I., Min, K., Choi, W., Won, J., 2000. Development and application of landslide susceptibility analysis techniques using Geographic Information System (GIS). *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1, 319-321.

Lee, S., Ryu, J.-H., Kim, I-S, 2007. Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea. *Landslides*, 4, 327-338.

Lee, S., Ryu, J.-H., Lee, M.-J., Won, J.-S., 2003a. Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea. *Environmental Geology*, 44, 820-833.

Lee, S., Ryu, J.-H., Lee, M.-J., Won, J.-S., 2006. The application of artificial neural networks to landslide susceptibility mapping at Janghung, Korea. *Mathematical Geology*, 3, 199-220.

Lee, S., Ryu, J.-H., Min, K., Won, J.-S., 2003b. Landslide susceptibility analysis using GIS and Artificial Neural Network. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 1361-1376.

Lee, S., Ryu, J.-H., Won, J.-S., Park, H.-J., 2004. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*, 71, 289-302.

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., Talib, J. A., 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47, 982-990

Lee, S., Chwae, U., Min, K., 2002b. Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea. *Geomorphology*, 46, 149–162.

Melchiorre, C., Matteucci, M., Azzoni, A., Zanchi, A., 2008. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation. *Geomorphology*, 94, 379-400.

Meusburger, K., Alewell, C., 2008. Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Urseren Valley, Switzerland). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 509–520.

Moreiras, S. M., 2005. Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology*, 66, 345-357.

Myers JH, and Alpert MI.,1968. Determinant buying attitudes: meaning and measurement. *J Mark*, 32, 13–20.

Nagarajan, R., Roy, A., Kumar, R.V., Mukherjee, A., Khire, M.V. , 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bull Engineering Geology Environment*, 58, 275-287.

Nandi, A. and Shakoor, A., 2009. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110, 11-20.

Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Durmaz, S., 2008a. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology*, 94, 401–418.

Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., 2008b. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology*, 97, 171-191.

Neuhäuser, B., Terhorst, B., 2007. Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86, 12-24.

Ng, K.Y., 2006. Landslide locations and drainage network development: A case study of Hong Kong. *Geomorphology*, 76, 229–239.

Ohlmacher, G.C., 2007. Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Engineering Geology*, 91, 117–134.

Özdemir, A., 2009. Landslide susceptibility mapping of vicinity of Yaka Landslide (Gelendost, Turkey) using conditional probability approach in GIS. *Environmental Geology*, 7, 1675–1686.

Özmen, B., Nurlu, M., Kuterdem, K., Temiz, A., 2005. Afet Yönetimi ve Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, 23-25 Mart 2005, Grand Yükseliş Hotel, Kocaeli

Pavel, M., Fannin, R. J., Nelson, J.D., 2008. Replication of a terrain stability mapping using an Artificial Neural Network. *Geomorphology*, 97, 356–373.

Pradhan, B., Lee, S., Buchroithner, M.F., 2009. Use of geospatial data and fuzzy algebraic operators to landslide-hazard mapping. *Appl Geomat*, 1, 3-15.

Ray, R. L., De Smedt, F., 2009. Slope stability analysis on a regional scale using GIS: a case study from Dhading, Nepal. *Environmental Geology*, 57, 1603-1611.

Remonda, J., González-Díez, A., Diaz De Terán, J.R., Fabbri, A., Chung, C.-J. F., 2003a. Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30, 437–449.

Remondo, J., González-Díez, A., Diaz De Terán, J.R., Cendrero, A., 2003b. Landslide susceptibility models utilising spatial data analysis techniques. A Case Study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain), *Natural Hazards*, 30, 267-279.

Ross, T.J., 1995. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Mc-Graw-Hill, New Mexico, 600 p.

Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., Peruccacci, S., 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology*, 114, 129-142.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 301–317. Greenbelt, MD: NASA.

Ruff, M., Czurda, K., 2008. Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology*, 94, 314-324.

Saaty, T.L. (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234-281.

Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1, 83-98.

Saito, H., Nakayama, D., Matsuyama, H., 2009. Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: The Akaishi Mountains, Japan. *Geomorphology*, 109, 108-121.

Saner, S., 1980, Batı Pontidler'in ve komşu havzaların oluşumlarının levha tektoniği kuramıyla açıklanması, Kuzeybatı Türkiye: Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 93-94, 1-19.

Saner, S., Taner, İ., Aksoy, Z., Siyako, M. Ve Bürkan, K.A., 1979. Karabük, Safranbolu yöresinin jeolojisi. Türkiye Pterollerı Anonim Ortaklığı, Arama Grubu, 1322.

Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A., Marturiá, J., 2003. A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain) . Natural Hazards, 30, 281-295.

Schernthanner, H., 2005. Fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping, "Rio Blanco", Nicaragua, Master Thesis, Institute of Geography, NAWI, Paris Lodron University Salzburg. Salzburg, 89s.

Schuster RL, 1996. Socio-economic significance of landslides. In: Turner, Shuster (eds) "Landslides: investigation and mitigation". Transportation Research Board – National Research Council, Special Report 247, 12–35.

Süzen, M.L., Doyuran, V., 2004a. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. Environmental Geology, 45, 665-679.

Süzen, M.L., Doyuran, V., 2004b. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. Engineering Geology, 71, 303-321.

Tangestani, M.H., 2003. Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran. Map India, 2003.

Tangestani, M.H., 2009. A comparative study of Dempster–Shafer and fuzzy models for landslide susceptibility mapping using a GIS: An experience from Zagros Mountains, SW Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 35, 66–73.

Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment . Geomorphology, 92, 38-59.

Tüysüz, O., Aksay, A. ve Yiğitbaş, E., 2004. Batı Karadeniz Bölgesi litostratigrafi birimleri. Stratigrafi Komitesi litostratigrafi birimleri serisi-1. MTA Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi.

Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, 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.

Van Westen, C.J, Castellanos, E., Kuriakose, S.L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102,112–131.

Van Westen, C.J., Rengers, N. ve Soeters, R. , 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30, 399-419.

Varnes DJ, 1984. Landslide hazard zonation - a review of principles and practice. *Natural Hazards* 3, 64 p. UNESCO, Paris

Wachal, D.J., Hudak, P.F. , 2000. Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. *GeoJournal*, 51, 245-253.

Wan, S., 2009. A spatial decision support system for extracting the core factors and thresholds for landslide susceptibility map. *Engineering Geology*, 108, 237-251.

Wang, H.B., Sassa, K., 2005. Comparative evaluation of landslide susceptibility in Minamata area, Japan. *Environmental Geology*, 47, 956-966.

Wang, W. D., Xie, C. M., Du, X. G., 2009. Landslides susceptibility mapping based on geographical information system, GuiZhou, south-west China. *Environmental Geology*, 58, 33-43.

Wang, W.D., Xie, C.M., Du, X.G., 2008. Landslides susceptibility mapping based on geographical information system, GuiZhou, south-west China. *Environmental Geology*, 55, 235-245.

Yalçın A., Bulut, F., 2007. Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). *Natural Hazards*, 41, 201–226.

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.

Yao, X., Tham, L.G., Dai, F.C., 2008. Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology*, 101, 572–582.

Yaraloğlu, K.,1999.Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) Modeli İle Genel Seçim Sonuçlarının Öngörülmesi, 4. Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu, Antalya.

Yergök, A.F., Akman, İL, İplikçi, E., Karabalık, N., Keskin, İ., Mengi, H., Umut, M, Armağan, F., Erdoğan, K., Kaymakçı, M., Çetinkaya, A., 1987, Batı Karadeniz Bölgesinin Jeolojisi 1, MTA, Derleme No:8273, Ankara

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, Ç., 2007. GIS-based landslide susceptibility mapping in Devrek (Zonguldak – Turkey). Master Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, 105s.

Yılmaz, İ. and Keskin, İ., 2009. GIS based statistical and physical approaches to landslide susceptibility mapping (Sebinkarahisar, Turkey). *Bull Eng Geol Environ*, 68, 459-471

Yılmaz, İ., 2009a. The effect of the sampling strategies on the landslide susceptibility mapping by conditional probability and artificial neural networks. *Environ Earth Sci*, 60, 505–519.

Yılmaz, İ., 2009b. A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by artificial neural networks.*Bull Eng Geol Environ*, 68, 297–306.

Yılmaz, İ., 2009c. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio,logistic regression,artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides(Tokat—Turkey). *Computers &Geosciences*, 35, 1125-1138.

Yılmaz, I., Ekemen, T., Yıldırım, M., Keskin, İ., Özdemir, G., 2006. Failure and flow development of a collapse induced complex landslide: the 2005 Kuzulu (Koyulhisar, Turkey) landslide hazard. *Environmental Geology*, 49, 467–476.

Yılmaz, İ., Keskin, İ., 2009. GIS based statistical and physical approaches to landslide susceptibility mapping (Sebinkarahisar, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68, 459–471.

Yılmaz, I., Yıldırım, M., 2006. Structural and geomorphological aspects of the Kat landslides (Tokat—Turkey) and susceptibility mapping by means of GIS. *Environmental Geology*, 50, 461–472.

Yoshimatsu, H., Abe, S., 2006. A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (AHP) method. *Landslides*, 3, 149-158.

Yüksel, N., 2007. Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Heyelan Duyarlık Haritalarının Oluşturulmasında İstatistiksel Yöntemlerin Ve Yapay Sinir Ağlarının Kullanılması: Kumluca-Ulus (Bartın) Bölgesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 275.

Zeng-wang, X., 2001. GIS and ANN model for landslide susceptibility mapping. *Journal of Geographical Sciences*, 11, 374-381.

Zhu, L., Huang, J.-f., 2006. GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 7, 2007-2017.

**EKLER**







EK-2. 1 Parametrelerin ağırlık değerleri (13 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.2126
Akarsuya Uzaklık	0.1429
NDVI	0.1154
Topoğrafik Yükseklik	0.0846
Yamaç Eğriselliği	0.0697
Bakı	0.0604
Akış Gücü İndeksi	0.0555
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	0.0668
Arazi Kullanımı	0.0854
Yapısal Unsurlara Uzaklık	0.0353
Sediman Taşıma Kapasitesi İndeksi	0.0310
Yollara Uzaklık	0.0242
Sırtlara Uzaklık	0.0162

EK-2. 2. Parametrelerin ağırlık değerleri (12 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.2222
Akarsuya Uzaklık	0.1488
NDVI	0.1174
Topoğrafik Yükseklik	0.0850
Yamaç Eğriselliği	0.0691
Bakı	0.0613
Akış Gücü İndeksi	0.0550
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	0.0672
Arazi Kullanımı	0.0613
Yapısal Unsurlara Uzaklık	0.0344
Sediman Taşıma Kapasitesi İndeksi	0.0299
Yollara Uzaklık	0.0238

EK-2. 3. Parametrelerin ağırlık değerleri (11 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.2343
Akarsuya Uzaklık	0.1566
NDVI	0.1208
Topoğrafik Yükseklik	0.0851
Yamaç Eğriselliği	0.0719
Bakı	0.0591
Akış Gücü İndeksi	0.0545
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	0.0674
Arazi Kullanımı	0.0893
Yapısal Unsurlara Uzaklık	0.0318
Sediman Taşıma Kapasitesi İndeksi	0.0292

EK-2. 4. Parametrelerin ağırlık değerleri (10 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.2492
Akarsuya Uzaklık	0.1666
NDVI	0.1254
Topoğrafik Yükseklik	0.0865
Yamaç Eğriselliği	0.0743
Bakı	0.0551
Akış Gücü İndeksi	0.0557
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	0.0689
Arazi Kullanımı	0.0879
Yapısal Unsurlara Uzaklık	0.0303

EK-2. 5. Parametrelerin ağırlık değerleri (8 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.2880
Akarsuya Uzaklık	0.1908
NDVI	0.1440
Topoğrafik Yükseklik	0.1041
Yamaç Eğriselliği	0.0707
Bakı	0.0652
Akış Gücü İndeksi	0.0669
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	0.0704

EK-2. 6. Parametrelerin ağırlık değerleri (7 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.3128
Akarsuya Uzaklık	0.2140
NDVI	0.1564
Topoğrafik Yükseklik	0.1063
Yamaç Eğriselliği	0.0753
Bakı	0.0735
Akış Gücü İndeksi	0.0616

EK-2. 7. Parametrelerin ağırlık değerleri (6 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.0715
Akarsuya Uzaklık	0.2400
NDVI	0.1669
Topoğrafik Yükseklik	0.1074
Yamaç Eğriselliği	0.0715
Bakı	0.0694

EK-2. 8. Parametrelerin ağırlık değerleri (5 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.3963
Akarsuya Uzaklık	0.2609
NDVI	0.1553
Topoğrafik Yükseklik	0.1100
Yamaç Eğriselliği	0.0776

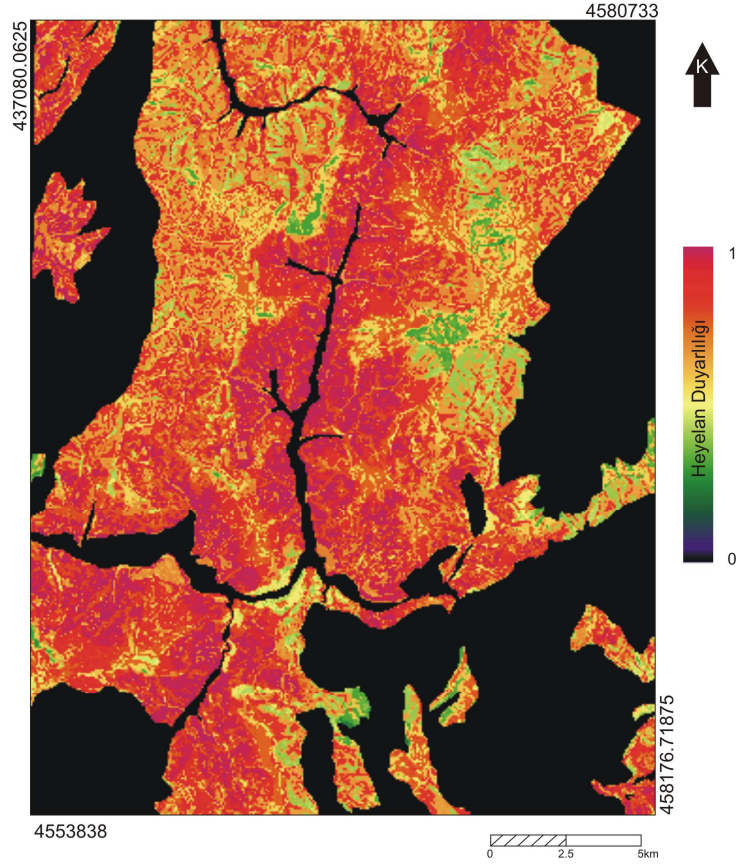
EK-2. 9. Parametrelerin ağırlık değerleri (4 parametre için).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yamaç Eğimi	0.4476
Akarsuya Uzaklık	0.2829
NDVI	0.2636
Topoğrafik Yükseklik	0.1059

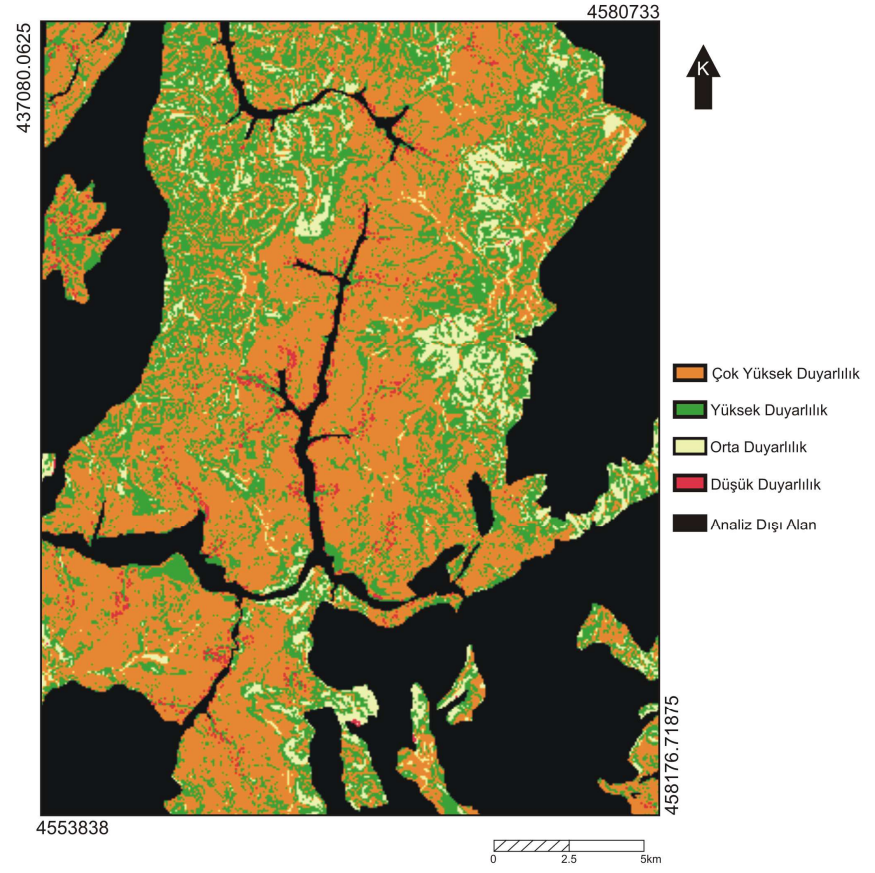
EK-2. 10. Parametrelerin ağırlık değerleri (3 parametre iin).

<b>Parametre</b>	<b>Ağırlık Değeri</b>
Yama Eğimi	0.5396
Akarsuya Uzaklık	0.2970
NDVI	0.1634

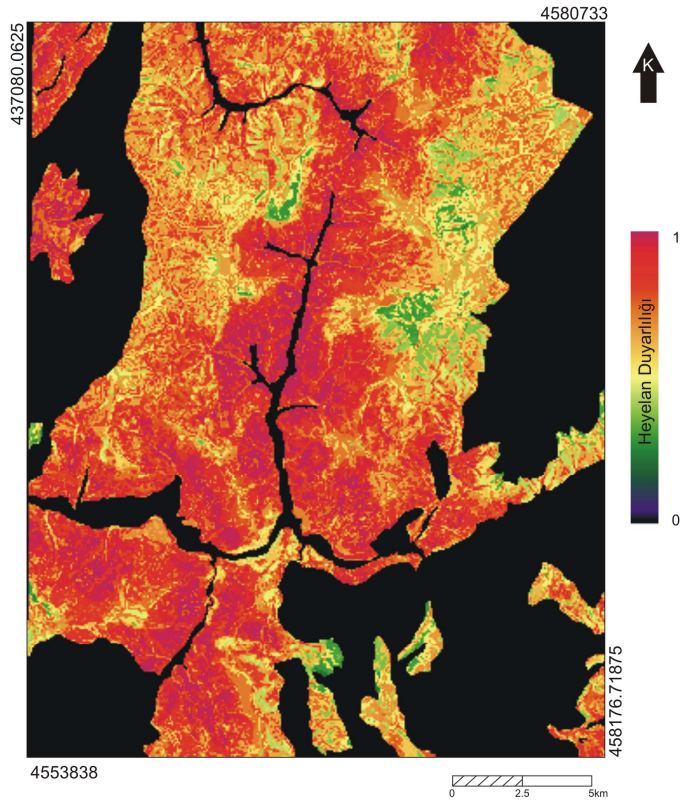
EK-3



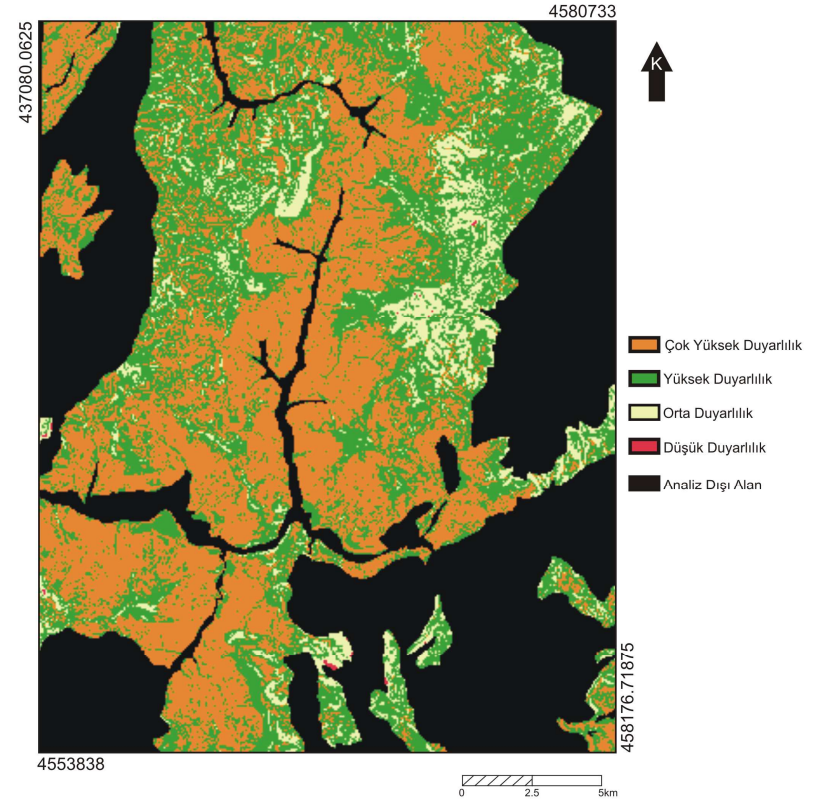
EK-3 .1. 3 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası.



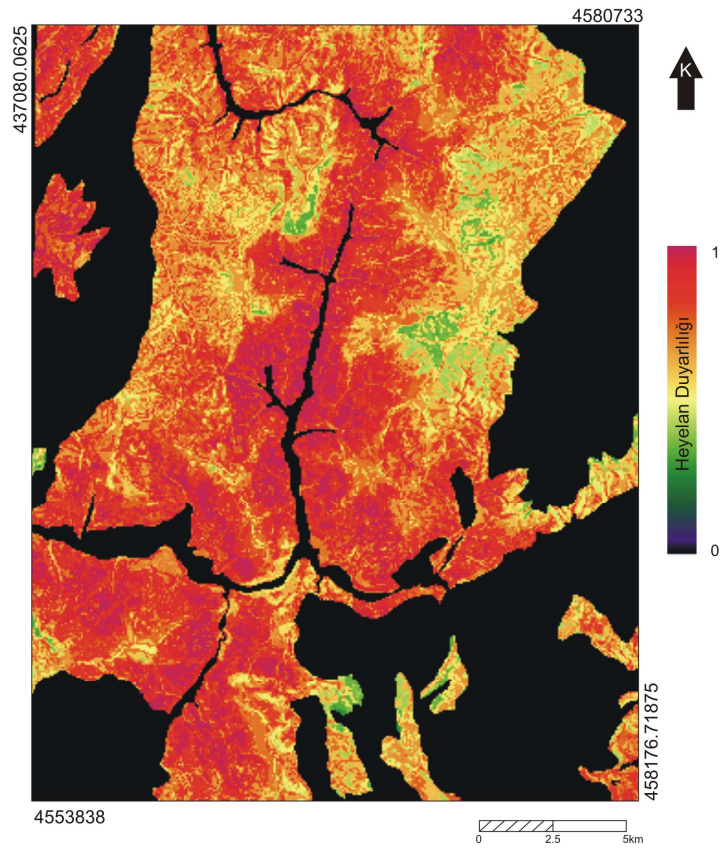
EK-3 .2. 3 parametre kullanılarak üretilen sınıflandırılmış heyelan duyarlılık haritası.



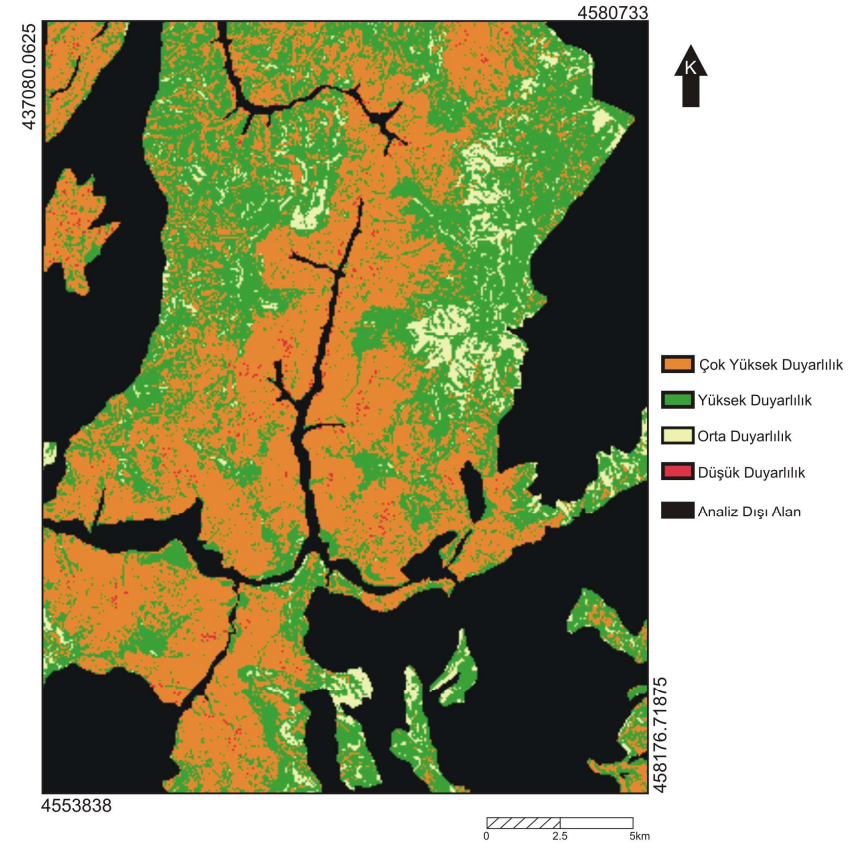
EK-3. 3. 4 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası.



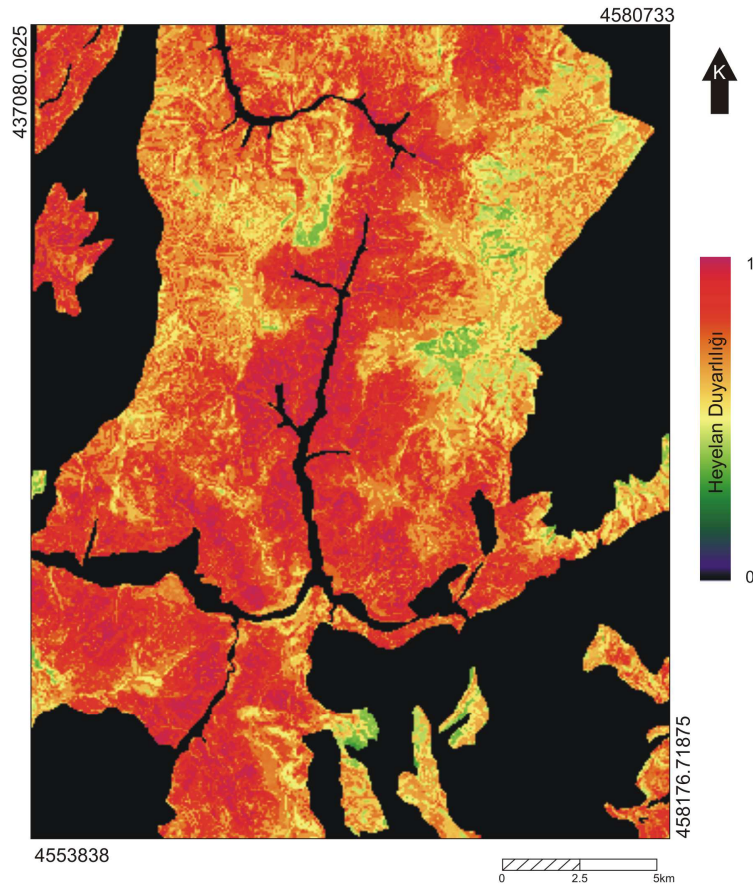
EK-3. 4. 4 parametre kullanılarak üretilen sınıflandırılmış heyelan duyarlılık haritası.



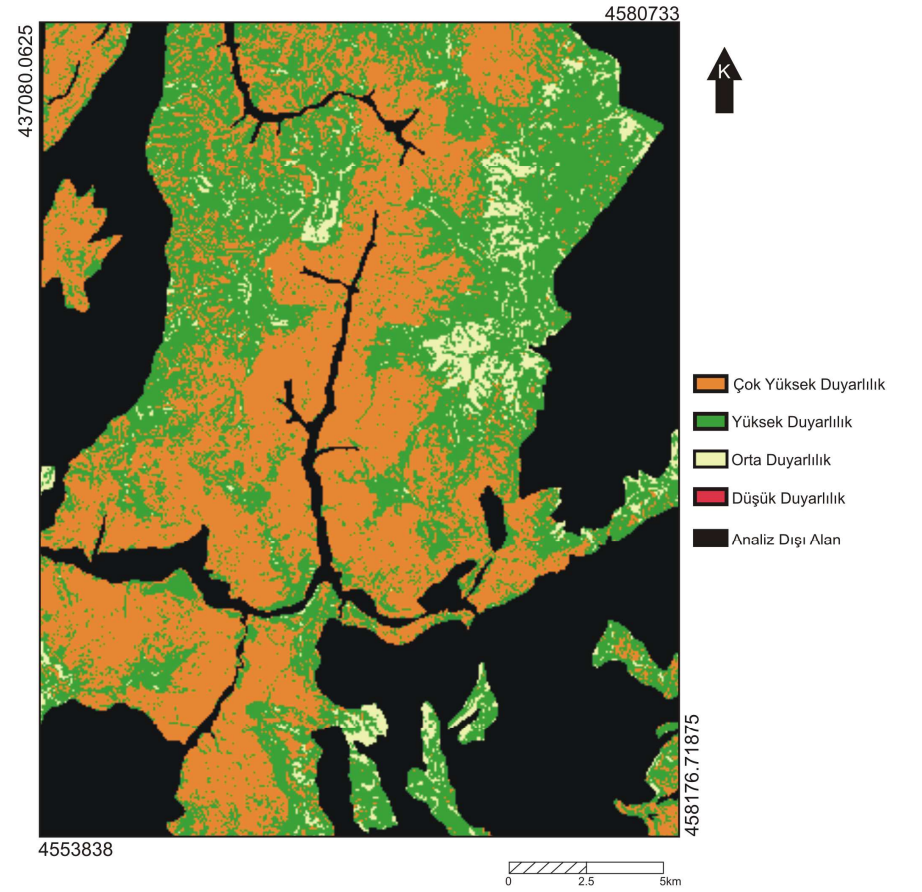
EK-3. 5. 5 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası.



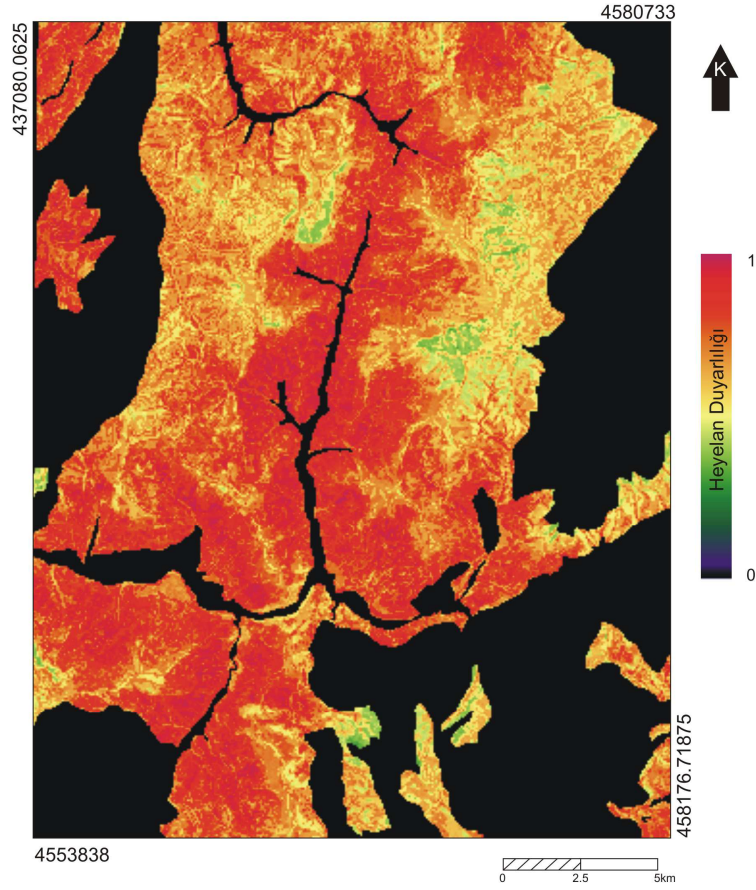
EK-3. 6. 5 parametre kullanılarak üretilen sınıflandırılmış heyelan duyarlılık haritası.



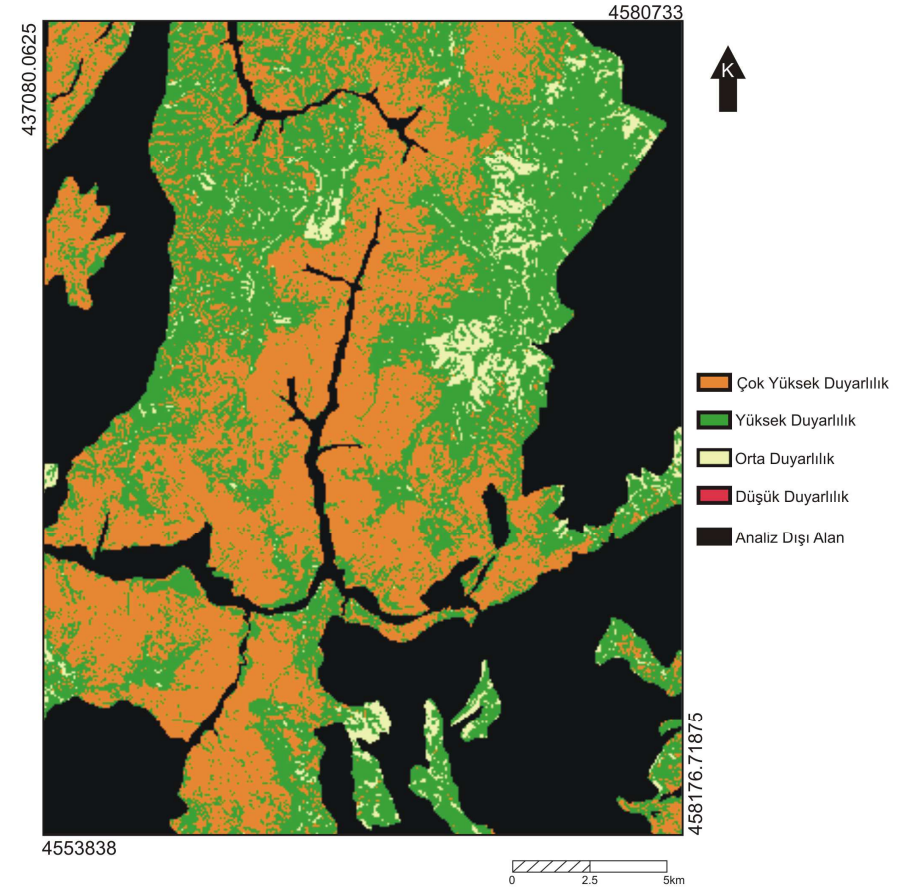
EK-3. 7. 6 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası.



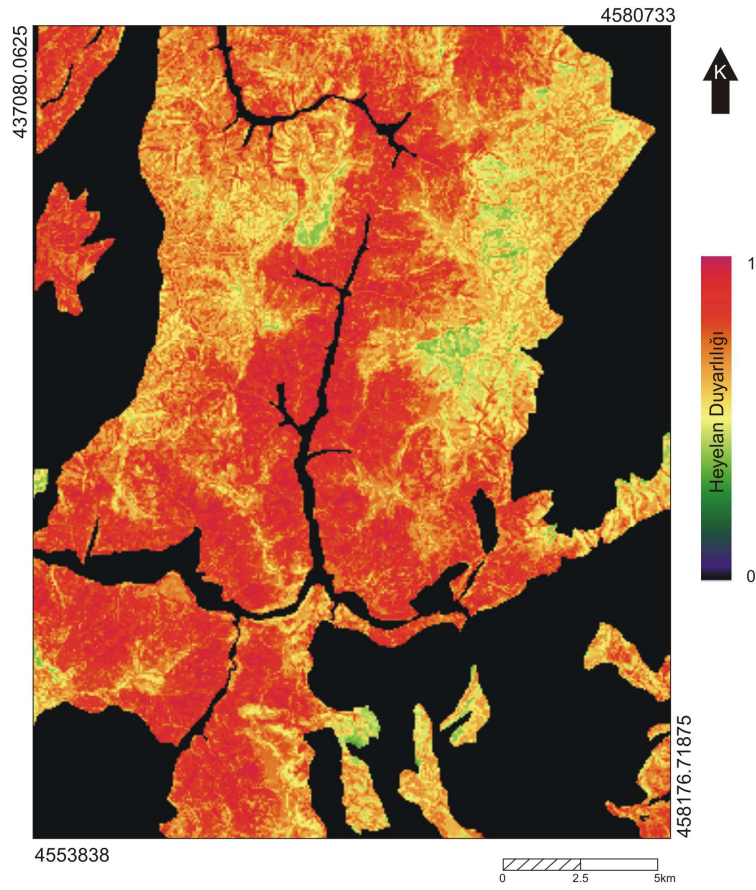
EK-3. 8. 6 parametre kullanılarak üretilen sınıflandırılmış heyelan duyarlılık haritası.



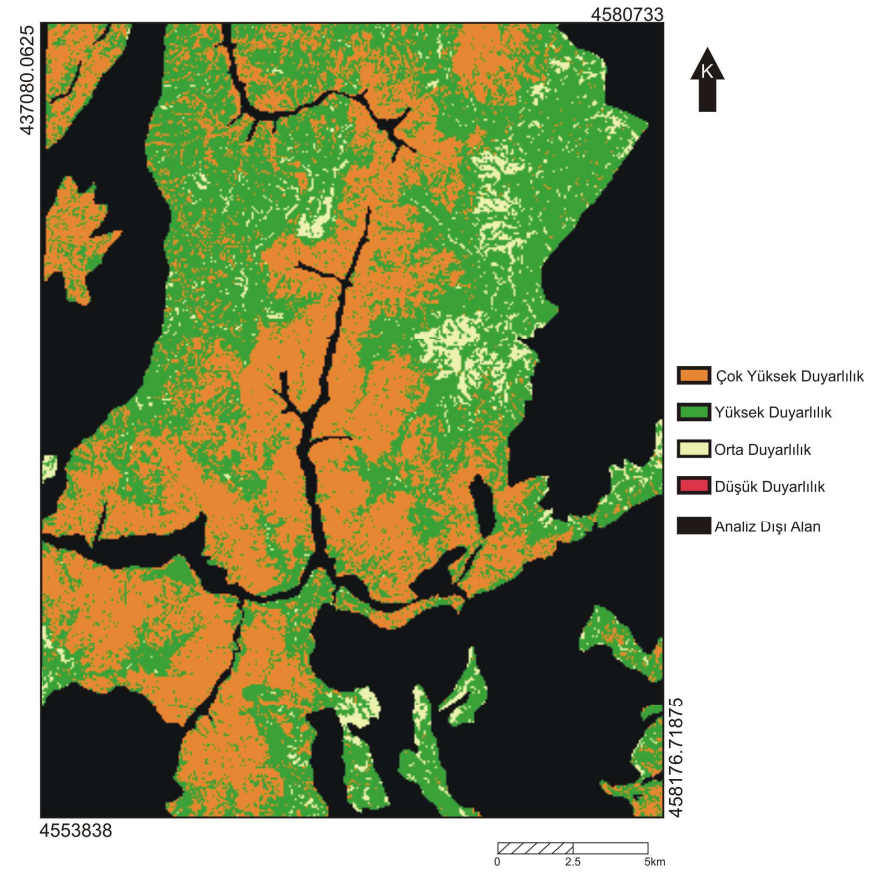
EK-3. 9. 7 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası.



EK-3.10. 7 parametre kullanılarak üretilen sınıflandırılmış heyelan duyarlılık haritası.



EK-3. 11. 8 parametre kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritası.



EK-3. 12. 8 parametre kullanılarak üretilen sınıflandırılmış heyelan duyarlılık haritası.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gökçe Deniz Hasekioğulları

Doğum Yeri : İzmir

Doğum Yılı : 1984

Medeni Hali : Bekar

### Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1998-2002 (İzmir Atatürk Lisesi, İzmir)

Lisans 2002-2007 (H.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara)

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi : 2007-2008 Jeoloji Mühendisi (Pustiler İnşaat, Ankara)