

**KURAL TABANLI ALGORİTMA İLE HEYELAN
DUYARLILIK HARİTALAMASI (BENİ AHMED BÖLGESİ,
RİF DAĞLARI, FAS)**

**LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING BY RULE –
BASED ALGORITHM (BENI AHMED REGION, RIF
MOUNTAINS, MOROCCO)**

BEYAZID CEM ÖZER

Prof. Dr. CANDAN GÖKÇEOĞLU

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Hakan A. NEFESLİOĞLU

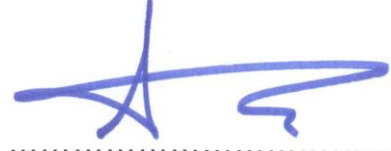
Eş Danışman

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
JEOLojİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

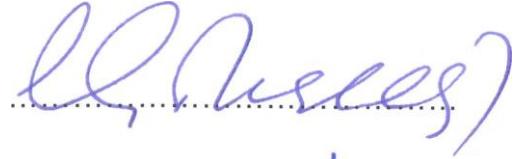
2017

BEYAZID CEM ÖZER' in hazırladığı "**Kural Tabanlı Algoritma ile Heyelan Duyarlılık Haritalaması (Beni Ahmed Bölgesi, Rif Dağları, Fas)**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

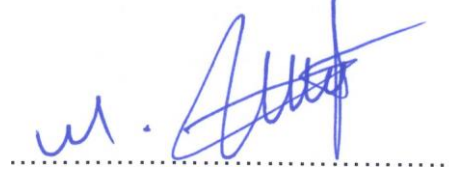
Prof. Dr. Ebru SEZER
Başkan



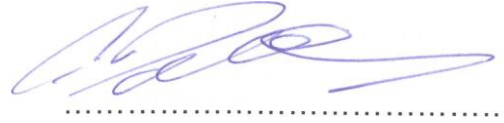
Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU
Danışman



Prof. Dr. Murat ERCANOĞLU
Üye



Doç. Dr. Mehmet celal TUNUSLUOĞLU
Üye



Doç. Dr. Dilek TÜRER
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMUŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.
(Bu seçenikle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)
- Tezimin/Raporumun 2022 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.
(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir)
- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.
- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

26. / 06 / 2022


Öğrencinin Adı Soyadı

Bayozid Cam ÖZER

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26/04/2017

İmza

Beyazid Cem Özer

ÖZET

KURAL TABANLI ALGORİTMA İLE HEYELAN DUYARLILIK HARİTALAMASI (BENİ AHMED BÖLGESİ, RİF DAĞLARI, FAS)

BEYAZID CEM ÖZER

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. CANDAN GÖKÇEOĞLU

Eş Danışman: Doç. Dr. HAKAN A. NEFESLİOĞLU

Mart 2017, 86 sayfa

Heyelanlar, sebep oldukları ekonomik kayıplar ve can kayıpları nedeniyle halen dünyanın her yerinde en önemli doğal tehlikelerden biridir. Son yıllarda çok sayıda çalışma yapılmış olsa da, heyelan tehlikesinin azaltılması ile ilgili araştırmalar güncelliğini korumaktadır. Bu sorunun temel nedeni, heyelanların karmaşıklığındaki artışın dünyanın hemen her coğrafyasında gözlemlenmesidir. Heyelan duyarlılık analizi, heyelanların mekansal olasılıklarının değerlendirilmesinin ilk ve en önemli aşamalardan birisidir; başka bir deyişle, orta ölçekten bölgesel ölçeğe yapılan heyelan değerlendirmelerinde heyelan tehlikesini azaltmak için gereklidir. Bu çalışmanın amacı, Fas'ın Rif Dağları'ndaki Beni Ahmed Bölgesi'nde, uzman görüşüne dayalı kural tabanlı bir bulanık algoritma olan katlı Mamdani bulanık algoritması kullanılarak bir heyelan duyarlılık modeli oluşturmaktır. Araştırmalar 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlar, (i) çalışma alanı için heyelan envanter haritasının üretilmesi, (ii) bölgedeki hazırlayıcı faktörlerin değerlendirilmesi, (iii) katlı Mamdani bulanık algoritmalarının ve uzman modellerin kural tabanlı yapılarının yorumlanması ve (iv) katlı bulanık çıkarsama sistemlerinin değerlendirilmesi, heyelan duyarlılıklarının haritalanması ve performans değerlendirmeleridir. Sonuç olarak, bölgede yapılan arazi çalışmaları, Google Earth'ten edinilen uydu görüntülerinin yorumlanması ve yakın zamanda mevcut literatürde yayınlanmış yayınlar doğrultusunda toplam 323 heyelan haritalanmıştır. Bu çalışmada üretilen heyelan envanteri, uzman modellerin doğrulaması için kullanılmıştır. Katlı bulanık

ıkarsama sistemlerinin mekansal tahmin performanslarını değerlendirmek için Alıcı İşletim zellikleri (ROC) eğrileri uygulanmıştır. Bu amaçla, ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) istatistikleri değerlendirilmiştir. AUC değerlerine göre en iyi performans, dar üyelik fonksiyonları ve Durulaştırmadan Bağımsız Hiyerarşik Bulanık Sistemin uygulandığı model için 0.67 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, gerekli veri tabanının sağlanması durumunda, bu çalışmada oluşturulan uzman modeller kullanılarak uzman tabanlı heyelan duyarlılık haritaları tüm Rif Dağları için üretilir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan Envanteri, Duyarlılık Haritalaması, Mamdani Bulanık Algoritması, katlı FIS, kestirim performansı, Rif Dağları (Beni Ahmed, Fas).

ABSTRACT

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING BY RULE – BASED ALGORITHM (BENI AHMED REGION, RIF MOUNTAINS, MOROCCO)

BEYAZID CEM ÖZER

Master of Science, Department of Geological Engineering

Advisor: Prof. Dr. CANDAN GÖKÇEOĞLU

Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. HAKAN A. NEFESLİOĞLU

March 2017, 86 pages

Landslides are still one of the most important natural hazards considering the economic losses and loss of life which they cause in all over the world. Even though numerous studies have been conducted over the last few decades, the researches related with reducing landslide hazard still keep up-to-date. The main reason for this issue the raise in complexity of the landslides observed in almost every geographical area of the world. Landslide susceptibility analysis is one of the first and the most important stage for the evaluation of landslide spatial probabilities; in other words, it is essential for landslide assessments performed in medium to regional scales to reduce landslide hazard. The purpose of this study is to produce a landslide susceptibility model by using a cascaded Mamdani fuzzy algorithm, a rule-based fuzzy algorithm based on expert opinion, in the Beni Ahmed Region in Rif Mountains in Morocco. The investigations were carried out in four stages. These are (i) producing of landslide inventory map for the study area, (ii) evaluation of the conditioning factors in the region, (iii) construction of the cascaded Mamdani fuzzy algorithms and rule-based structures of the expert models, and (iv) evaluation of the cascaded fuzzy inference systems, mapping of the landslide susceptibilities, and performance assessments. As a result, total 323 landslides were mapped in accordance with the field studies performed in the region, interpretations of satellite images which were acquired from the Google Earth, and recent papers which were already published in current literature. The landslide inventory produced in this study was used for verification of the expert models. The Receiver Operating

Characteristics (ROC) curves were implemented in order to assess spatial prediction performances of the cascaded fuzzy inference systems. For this purpose, the Area Under the ROC Curve (AUC) statistics were evaluated. According to the AUC values, the best performance was calculated to be 0.67 for the model in which narrow membership functions and Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy System (DF-HFS) were implemented. As a consequence, in case necessary database is provided, expert-based landslide susceptibility maps can be produced for all Rif Mountains by using the expert models constructed in this study.

Key Words: Landslide Inventory, Susceptibility Mapping, Mamdani Fuzzy Algorithm, Cascaded FIS, Prediction Performance, Beni Ahmed (Rif Mountains, Morocco)

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, bana her konuda yol gösterici olan ve gerek sabrı gerekse hoş görüşü ile bana destek olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU'na,

Tez çalışması boyunca tüm deneyimini ve bilgisini benimle paylaşan eş danışmanım Sayın Doç. Dr. Hakan A. NEFESLİOĞLU'na,

Tez çalışması süresince yol göstericiliği, bilgisi ve manevi desteğiyle katkıda bulunan sayın Prof. Dr. Ebru SEZER'e,

Tez çalışması kapsamında bilimsel katkıda bulunan Begüm MUTLU'ya,

Tez savunmam esnasında yapmış oldukları değerli yorumları ve önerileri sebebiyle Sayın Prof. Dr. Murat ERCANOĞLU'na, Sayın Doç. Dr. M. Celal TUNUSLUOĞLU'na, Sayın Doç. Dr. Dilek TÜNER'e,

Tez çalışması süresince beni yalnız bırakmayan, gerek maddi gerek manevi yardımlarını benden esirgemeyen arkadaşlarım Yasin BAŞKÖSE, Hulde Tuğba GİZLİ, Hasan YARADILMIŞ ve İbrahim Ethem ALMALI'ya,

Bugüne kadar benim için yapmış oldukları çok büyük fedakârlıklarla başarıya ulaşmamı sağlamış olan annem Çağlar ÖZER ve babam Gürkan ÖZER'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması, 114Y702 no'lu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1.GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Uzman Sistemlere Dayalı Duyarlılık Analizlerine İlişkin Önceki Çalışmalar....	4
2.2. Çalışma Sahasına İlişkin Önceki Çalışmalar	23
3. ÇALIŞMA SAHASININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	26
3.1. Jeoloji	26
3.1.1. Stratigrafi	29
3.1.1.1. Ketama Birimi	29
3.1.1.2. Tangier Birimi	29
3.1.1.3. Loukkos Birimi	30
3.1.2. Tektonik ve Depremsellik	32
3.1.3. Jeomorfoloji	34
3.1.4. İklim	35
4. HEYELAN ENVANTERİ	37
5. HEYELAN DUYARLILIK ANALİZLERİ	60

5.1. Hiyerarşik Bulanık Sistemler.....	60
5.2. Heyelan Duyarlılık Haritalaması	62
6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	78
7. KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 4.1. Varnes [38] heyelan sınıflaması.	39
Çizelge 4.2. Tez sahası içerisinde haritalanan heyelanlar ile değerlendirilen hazırlayıcı faktörler arasındaki korelasyonların incelenmesi; koşullu olasılık yaklaşımı.	56
Çizelge 4.3. Tez çalışması kapsamında verilen hazırlayıcı faktörlerin tanımlayıcı istatistikleri.	59
Çizelge 5.1. Katlı Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemi (Cascaded Hierarchical FIS) kullanılarak geliştirilen heyelan duyarlılık modellerinde değerlendirilen parametreler için uzman görüşe bağlı olarak tanımlanan standart üyelik fonksiyonları.	63
Çizelge 5.2. Katlı Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemi (Cascaded Hierarchical FIS) kullanılarak geliştirilen heyelan duyarlılık modellerinde değerlendirilen parametreler için uzman görüşe bağlı olarak tanımlanan daraltılmış üyelik fonksiyonları.	64
Çizelge 5.3. Katlı Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemi (Cascaded Hierarchical FIS) kullanılarak geliştirilen heyelan duyarlılık modellerinde değerlendirilen parametreler için uzman görüşe bağlı olarak tanımlanan genişletilmiş üyelik fonksiyonları.	64
Çizelge 5.4. Tez çalışması kapsamında geliştirilen modellerin tahmin performanslarının değerlendirilmesi; ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrileri altında kalan alan değerleri (AUC).	75
Çizelge 5.5. Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sisteminin (HFS) bir veri satırı için örnek gerçekleştiriminde bulanıklaştırma (fuzzification) aşaması.	76
Çizelge 5.6. Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sisteminin (HFS) bir veri satırı için örnek gerçekleştiriminde ara seviyelere ait hesaplamalar.	76
Çizelge 5.7. Proje çalışması kapsamında geliştirilen modellerin Intel® Xeon® CPU E5-2620 2.00 GHz 2 processors, 32 GB RAM bilgisayarda gerçekleştirim süreleri.	77

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1. Çalışma sahasına ait yer bulduru haritası.....	2
Şekil 3.1. Çalışma sahasının genel jeolojik haritası [33-34].	27
Şekil 3.2. Çalışma sahasında görülen kumtaşı malzemesine ilişkin örnek fotoğraf.	28
Şekil 3.3. Çalışma sahasında görülen şist biriminin yakından görünümü; kaya malzemesi oldukça zayıf görülmektedir.....	28
Şekil 3.4. Intrarif bölgesinin stratigrafisi. A: Ketama Birimi. B: Loukkos Birimi. C: Tangier Birimi [35]'den Türkçeleştirilerek alınmıştır.	31
Şekil 3.5. Günümüzde Gibraltar yayındaki gerilme alanı. (A): Gibraltar yayı içerisinde kıtasal kabuğun kalınlığının değişim gradyanları ve birleştirilmiş gerilme rejimi haritası. AB, Cezayir Havzası; AR, Alboran sırtı; EAB, Doğu Alboran havzası; SAB, Güney Alboran havzası; WAB, Batı Alboran havzası. NF: Normal faylar; NS: Doğrultu atım bileşenli ağırlıklı normal faylanma; SS: Doğrultu atım faylanması; TS: doğrultu atım bileşenli ağırlıklı bindirme faylanması; TF: Bindirme faylanması; U: Bilinmeyen gerilme rejimi. (B): Gibraltar yayının aktif fay yapısını gösteren tektonik taslağı, birleştirilmiş gerilme dönüşleri ve Afrika – Avrasya plaka sınırıyla parçalanmış deformasyonların önerilen biçimleri. SHmax Bölgesel gerilme alanına göre uyum ve gerilme dönüşleri (mavi çemberler, saat yönüne dönüş; kırmızı çemberler, saat yönünün tersine dönüş; beyaz, dönüş olmayan yerler). Büyük oklar NUVEL – 1A'ya göre karşılık gelen Afrika – Avrasya bağıl hareketi. AD, Alboran etki alanı; ALF, Alpujarras fay zonu; AF, Alhoceima fay zonu; AMF, Alhama de Murcia fay zonu; ARF, Alboran sırtı fayı; CD, Carboneras fayı; JF, El – Jebha fayı; MF, Maro – Nerja fay zonu; NF, Nekor fayı; OF, Palomares fayı; YF, Yusuf fayı (A. Chalouan et al. [35]'den alınmıştır).....	33
Şekil 3.6. Rif Dağları ve çevresinin yağış dağılımı [2].....	36
Şekil 4.1. Çalışma alanı içerisindeki heyelanların mekânsal dağılımları [1-2].	38
Şekil 4.2. Çalışma alanındaki heyelanların alansal dağılımları.....	39
Şekil 4.3. Taounate bölgesinde meydana gelen heyelanlara ait örnek fotoğraflar.	40
Şekil 4.4. (a,b,c,d). Taounate bölgesinde meydana gelen heyelanların (a) 2002, (b) 2006, (c) 2013, (d) 2016 tarihlerine ait uydu görüntüleri.....	42
Şekil 4.4. (devam ediyor).....	43

Şekil 4.5. (a,b,c,d) Taounate bölgesinde meydana gelen heyelanların (a) 2002, (b) 2006, (c) 2013, (d) 2016 tarihlerine ait uydu görüntüleri.	44
Şekil 4.5. (devam ediyor).....	45
Şekil 4.6. Çalışma alanının topoğrafik yükseklik haritası.	47
Şekil 4.7. Çalışma alanının yamaç eğimi haritası.	48
Şekil 4.8. Çalışma alanının yamaç yönelimi haritası.	49
Şekil 4.9. Çalışma alanının plan yamaç eğriselliği haritası.	50
Şekil 4.10. Çalışma alanının profil yamaç eğriselliği haritası.	51
Şekil 4.11. Çalışma sahasının yakınsaklık indeksi haritası.	52
Şekil 4.12. Çalışma alanının topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) haritası.	53
Şekil 4.13. Çalışma alanının sediman taşıma kapasite indeksi (LS) haritası.	54
Şekil 4.14. Çalışma alanının drenaja olan uzaklık haritası.	55
Şekil 5.1. Heyelan duyarlılık problemi için oluşturulmuş iki farklı HFS yapısı (a) AHFS (b) Karmaşık HFS.	65
Şekil 5.2. Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemleri (HFS) içerisinde bulanık kuralların üretilmesine yönelik bu çalışma kapsamında geliştirilen prosedür.	67
Şekil 5.3. Tez çalışması kapsamında geliştirilen Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemlerinin bir veri satırı için örnek gerçekleştirimi.	69
Şekil 5.4. Tez çalışması kapsamında geliştirilen Konvansiyonel (Conventional HFS) ve Durulaştırmadan Bağımsız (DF-HFS) Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemleri kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritaları; (a) daraltılmış üyelik fonksiyonları ve Conventional HFS; (b) daraltılmış üyelik fonksiyonları ve DF-HFS; (c) standart üyelik fonksiyonları ve Conventional HFS; (d) standart üyelik fonksiyonları ve DF-HFS; (e) genişletilmiş üyelik fonksiyonları ve Conventional HFS; (f) genişletilmiş üyelik fonksiyonları ve DF-HFS; şekil üzerinde heyelan envanter çalışmaları kapsamında derlenen ve haritalanan heyelanlar siyah çizgi rengine sahip poligonlar ile ayrıca gösterilmektedir.	70
Şekil 5.5. Uzman görüşe dayalı geliştirilen Hiyerarşik Anlamlandırma Sistemleri (HFSs) ve veri (heyelan envanteri) temelli Lojistik Regresyon Analizleri sonucu üretilen heyelan duyarlılık haritalarının mekânsal performanslarının değerlendirilmesi; ROC eğrileri; N daraltılmış üyelik fonksiyonları kullanılarak geliştirilen modeller; M: standart üyelik fonksiyonları kullanılarak geliştirilen modeller; W: genişletilmiş üyelik fonksiyonları kullanılarak geliştirilen modeller; rnd1p: lojistik regresyon modeli; Reference Line: AUC=0.5.	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

r_u : İlişki gücü

λ : Gamma operatörü

W_i : İstatistiksel indeks

W_f : Faktör ağırlığı

$D_{(\infty)}$: Heterojen set içerisinde kümelenmenin en yoğun olduğu genelleştirilmiş boyut

u : Bulanık kuralların sayısı

n : Girdi sayısı

f_i : i 'inci girdinin bulanık set sayısı

Kısaltmalar

RDP : Kaynak hasar potansiyeli

ROC : Alıcı işletim karakteristiği (Receiver Operating Characteristics)

AUC : Eğri altında kalan alan (Area Under Curve)

KAFZ : Kuzey Anadolu Fay Zonu

WLC : Ağırlıklı doğrusal kombinasyon

OWA : Sıralı ağırlıksal ortalama

LR : Lojistik regresyon

FIS : Bulanık çıkarsama sistemi (Fuzzy Inference System)

RMSE : Ortalama karekök hata (Root mean square error)

FA : Faktör analizi

MRA : Çoklu regresyon analizi (Multiple Regression Analysis)

AHP : Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytical Hierarchy Process)

GIS : Coğrafi bilgi sistemi (Geographical Information Systems)

ANN : Yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks)

FAHP : Bulanık analitik hiyerarşi süreci (Fuzzy Analytical Hierarchy Process)

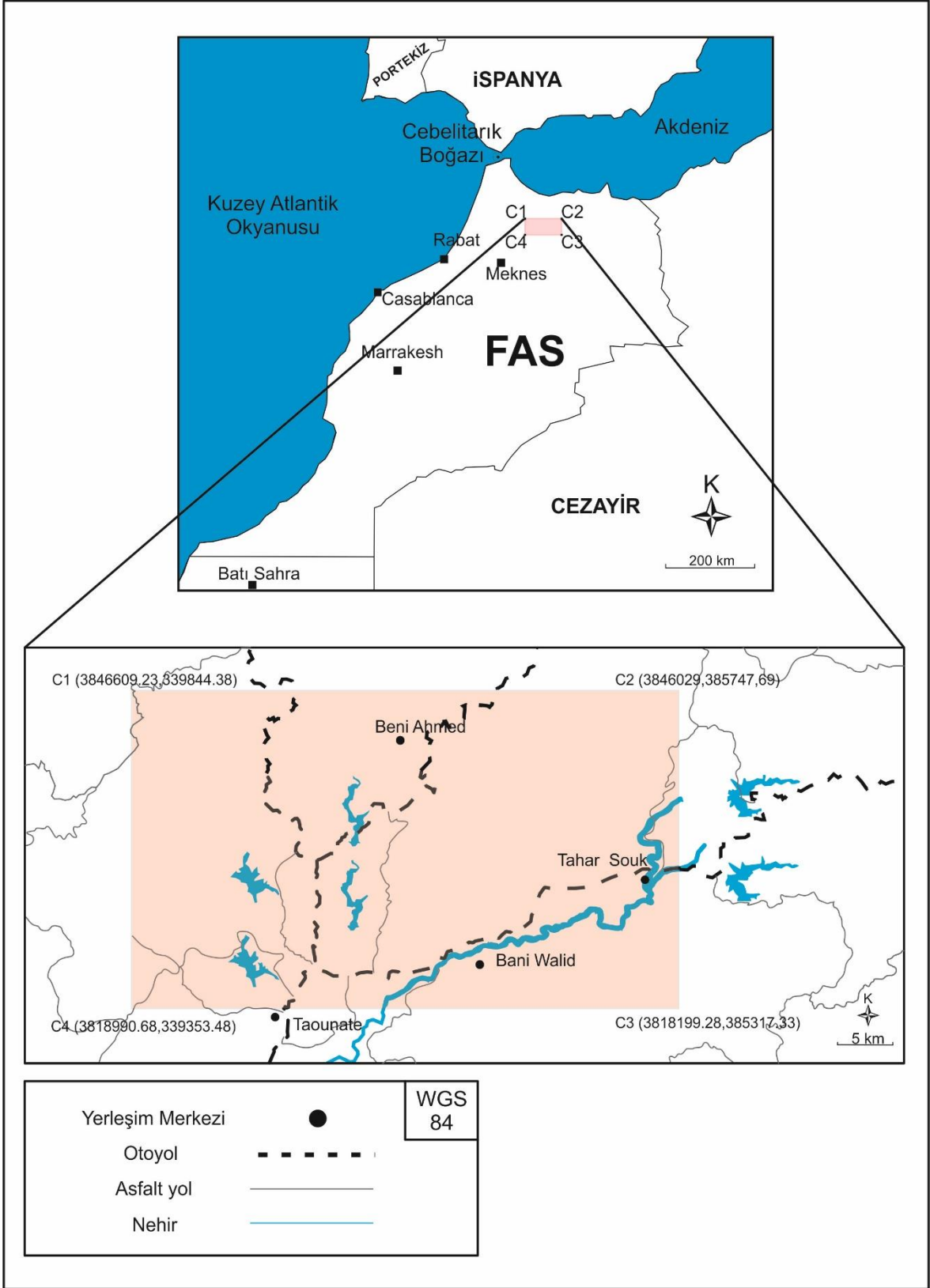
HFS : Hiyerarşik Bulanık Sistem (Hierarchical Fuzzy System)

DF – HFS : Durulaştırmadan bağımsız hiyerarşik bulanık anlamlandırma sistemi (Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System)

AHFS : Hiyerarşik Bulanık Sistemin Alternatif Modeli (Alternative Model of Hierarchical Fuzzy System)

1.GİRİŞ

Uzun yıllardan beri, dünya üzerinde yaşanan can ve mal kaybının en büyük nedenlerinden olan doğal afetler, günümüzde de tahmin edilmesi ve önlenmesi en zor olan süreçlerin başında gelmektedir. İnsanların eski çağlardan bu yana dağlık bölgelerde oluşturdukları yerleşimler ve bu bölgelerde yaşamaya mecbur kalması sonucunda, insanoğlu ile heyelan afeti arasında doğrudan bir bağlantı oluşmaktadır. Bu oluşumun sonucunda da, kütle hareketlerinin oluşturduğu can kayıpları ve ekonomik kayıpların miktarı her geçen gün artmaktadır. Yağış miktarının fazla olması, deprem, volkanik aktivite ve antropojenik etkiler (veya bu faktörlerin farklı birleşimlerinin sonuçları) gibi faktörler ile tetiklenen kütle hareketleri, dünya üzerinde çok ciddi kayıplara neden olmaktadır. Heyelanların neden olduğu doğrudan ve dolaylı kayıplar dikkate alındığında, koruyucu önlemlerin alınması ve önleme çalışmalarının yapılabilmesine yönelik olarak yapılacak çalışmalar, mevcut ve potansiyel kütle hareketlerinin mekansal dağılımı (envanter) bilgisini gerektirmektedir. Envanter bilgisinin bir sonucu olarak da heyelanlara ilişkin duyarlılık haritaları üretilerek çeşitli yöntemler ile duyarlılık değerleri hesaplanabilmektedir. Heyelan duyarlılık değerlendirmesine ilişkin hesaplamalar kuramsal olarak çok basit bir şekilde ifade edilebilirken, bu hesaplamaların yapılması uygulamada oldukça karmaşık süreçleri beraberinde getirmektedir. Özellikle, karar süreçleri içerisinde girdi parametrelerine ilişkin birçok doğal belirsizliğin olması, bu belirsizliklerin bir sonucu olarak uygulayıcıların yorumlarında farklılıkların oluşması, verilerin güncel olarak değişmesiyle mevcut sonuçların değişimi ve oluşturulan haritaların güvenilirliklerinin belirlenmesindeki güçlükler bu karmaşık süreçleri meydana getirmektedir. Tez çalışması kapsamında kütle hareketlerine ilişkin duyarlılık haritalama çalışmasının yapılması, ileride gerçekleştirilecek tehlike analizleri ile risk değerlendirmeleri ve gerekli önleme çalışmalarının yapılabilmesi için bir altlık oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Fas'ın Merkez Rif Dağları olarak adlandırılan bölge içerisinde yaklaşık 1152 km²'lik heyelana duyarlı bir alan çalışma sahası olarak seçilmiştir (Şekil 1.1). Çalışmada, Merkez Rif Dağları bölgesinin Güneydoğu kesiminde kalan Tounate ve Tahar Souk bölgeleri 1/50.000 ölçekli jeoloji haritaları kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 1.1. Çalışma sahasına ait yer buldur haritası.

Tez kapsamında yürütülen çalışmalar 4 ayrı başlık altında toplanmıştır. Bunlar sırasıyla, heyelanlara ilişkin envanter haritasının oluşturulması, çalışma sahası içerisindeki hazırlayıcı faktörlerin değerlendirilmesi, uzman görüş doğrultusunda kullanılan Mamdani bulanık algoritması için kuralların hazırlanması, heyelanlara ait duyarlılık değerlerinin katlı FIS yöntemiyle hesaplanması ve haritalanması olarak verilmektedir. Heyelan envanterinin oluşturulması amacıyla mevcut arazi gözlemleri, heyelanların yersel doğrulamasını yapabilmek için Google Earth uydu görüntüleri ve Rouai ve Jaaidi [1] ile Fonseca [2]'de verilen heyelan haritaları kullanılmıştır. Bununla birlikte, mevcut alanda yapılan arazi çalışmalarında heyelanlara ilişkin yersel kontroller yapılmıştır. Çalışma sahası içerisindeki mevcut heyelanlara ait hazırlayıcı faktörler litolojik, topoğrafik ve hidrojeolojik değişkenler olarak sınıflandırılmış ve tartışılmıştır. Sonuç olarak mevcut kısıtlı veri kaynağı (heyelan bilgisi) kullanılarak, koşullu olasılık yaklaşımı ile heyelanların parametreler ile korelasyonları incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında bu bölüm içerisinde, kütle hareketlerine ilişkin yapılmış olan duyarlılık analizlerinin uzman sistemlerin bir yöntemi olarak kullanıldığı çalışmalar ile tez sahasına ilişkin yapılmış olan incelemeler ayrı başlıklar altında özetlenmiştir.

2.1. Uzman Sistemlere Dayalı Duyarlılık Analizlerine İlişkin Önceki Çalışmalar

Ercanoğlu ve Gökçeoğlu [3], Türkiye'nin Kuzey Batısında bir heyelan duyarlılık çalışması gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacıların çalışmadaki esas amacı, bölgesel heyelan duyarlılık çalışmalarında kullanılan yöntemlerin, bilgi eksikliğinden kaynaklanan belirsizliklerini minimize ederek, daha gerçekçi sonuçlar ile duyarlılık haritalarını oluşturmaktır. Bu doğrultuda araştırmacılar, heyelan oluşumuna duyarlı olan bu bölgede, heyelan duyarlılık haritalarını oluşturmak amacıyla, bulanık mantık yaklaşımını çalışmalarında uygulamışlardır. Bu kapsamda çalışmalarını 5 ana kısma ayırmışlardır; heyelan envanter haritasının oluşturulması, faktör analizlerinin uygulanması, bulanık "eğer – ise" kurallarının çıkarımı, coğrafi bilgi sistemlerinin kullanımı ve sonuçta oluşturulan duyarlılık haritalarının güvenilirliğinin kontrol edilmesi. Çalışma alanı için, eğim, bakı, arazi kullanımı, bozunma derinliği, su koşulları ve topoğrafik yükseklik, koşul faktörleri olarak araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Toplamda 23 adet "eğer – ise" kuralı arazi verilerinden çıkarılmıştır. Bu kurallar çalışılırken, her bir koşul faktörü için bulanıklaştırılmış indeks haritaları araştırmacılar tarafından elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu haritalar birleştirilerek bölgenin heyelan duyarlılık haritası elde edilmiştir. Sonuç duyarlılık haritası, duyarlı olmayan, az duyarlı, orta derece duyarlı, yüksek duyarlı ve çok yüksek duyarlı olmak üzere beş sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflama sonucunda da, bölge içerisindeki heyelanların yaklaşık %53'lük kısmının yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfına girdiğini görmüşlerdir. Hazırladıkları bu haritanın, orta ölçekli bir heyelan duyarlılık haritası olarak kabul edilebileceğini söylemişlerdir. Bulanık mantık yönteminin performansı ile ilgili olarak da araştırmacılar, oldukça tatmin edici sonuçlar bulduklarını ve haritada belirlenen bölgelerin bağıl duyarlılık bölgeleri ile eşleştiğini belirtmişlerdir.

Ercanoğlu ve Gökçeoğlu [4], Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesinde bulunun Karabük ilinin Kuzey Batısındaki Yenice ilçesinde, 275.4 km²'lik bir alanda heyelan duyarlılık çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, heyelanların karmaşık doğası gereği, güvenilir bir duyarlılık haritalamasının yapılmasının kolay olmadığını belirtmiş ve bu nedenle çalışma kapsamında, daha güvenilir bir yöntem izlemek amacıyla bulanık mantık ilişkilerini kullanmışlardır. Bulanık mantık ilişkilerini kurmak için, araziden elde edilen veriler ile hava fotoğraflarını kullanmışlardır. Çalışma alanında toplamda 266 adet heyelan bulunmuştur. Bu heyelanların baskın karakteristikleri olarak da yenilmenin dairesel olduğunu, yer yer toprak akmalarının gözlendiğini ve sığ dairesel yenilmelerin olduğunu gözlemlemişlerdir. Heyelan envanter haritası ve parametre haritalarını birlikte analiz etmişler ve bu haritaları üretmek amacıyla FULLSA isimli bilgisayar programından yararlanmışlardır. Çalışmada 10 adet koşul faktörü belirlemişlerdir (litoloji, yapısal elemanlara olan yakınlık, uyumsuzluklar ve yamaçlar, eğim açısı, drenaj ağına olan uzaklık, topoğrafik yükseklik, yamaç şekli, bakı, bitki örtüsü ve ana yollar). Çalışmada kullanılan FULLSA adlı program, bulanık ilişkileri değerlendirerek aynı zamanda heyelan duyarlılık haritalarını otomatik olarak üreten bir programdır. Oluşturulan heyelan duyarlılık haritasına göre araştırmacılar, çalışma alanının %9.6'lık kesiminin çok yüksek duyarlılık, %10.3'lük kesiminin yüksek duyarlılık, %8.9'lük kesiminin orta derece duyarlılık, %27.5'lik düşük duyarlılık ve %43.8'lik kesiminin ise çok düşük duyarlılık veya duyarlı olmayan sınıflara girdiğini belirlemişlerdir. Duyarlılık haritasının tahmin performansını kontrol edebilmek için güncel heyelanları dikkate almışlardır. Bu amaç doğrultusunda da, ilişkinin gücü (r_{ij}) ve ortalama karekök hata (RMSE) değerlerini hesaplamışlar ve bu değerleri sırasıyla 0.867 ile 0.284 olarak elde etmişlerdir. Sonuç olarak, bu değerler doğrultusunda, hazırlanan duyarlılık haritasının yeterli derecede güvenilir olduğunu öne sürmüşlerdir.

Komac [5], Slovenya'nın merkezinde, Ljubljana'nın batı kesimlerinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, heyelan duyarlılık değerlendirmesi amacıyla, yaklaşık 1220 km² 'lik bir alanda merkez Slovenya'yı 78365 adet yamaç birimine ayırarak, 24 adet istatistiksel değişkeni hesaplamıştır. İlk olarak farklı heyelan türlerindeki konumsal faktörleri genel olarak heyelanlar için hesaplamış ve bu hesaplamaları yaparken Kolmogorov – Smirnov testi ile χ^2 testini kategorik ve sürekli değişkenler (litoloji, arazi tipi, yamaç eğimi, jeolojik sınırlara uzaklık, yapısal

elemanlara uzaklık ve akarsulara olan uzaklık) için kullanmıştır. Ayrıca Student's *t* testi de yine aynı sürekli değişkenler için kullanmıştır. Bu analizler sonucunda %95'lik bir güven limitine ulaşmıştır. Sonuç olarak da eğim, litoloji, arazi pürüzlülüğü ve arazi tipinin heyelan duyarlılığında önemli bir rol oynadığını söylemiştir. Çok değişkenli analizleri yapmak amacıyla, heyelan popülasyonunda rastgele örneklem yapmıştır (her heyelan tipi için benzer miktarda olacak şekilde %64.2 veya 394). Heyelanlar ve faktörler arasındaki çoklu ilişkileri Faktör Analizi (FA) ve çoklu regresyon analizi (MRA) ile test etmiştir. Çoklu analizleri gerçekleştirmek amacıyla alan otomatik olarak 78365 yamaç birimine bölünmüş ve 24 adet istatistiksel değişken hesaplanmıştır. Bütün konumsal veri üzerinde yapılan analizlerin tamamlanmasından sonra AHP (Analytical Hierarchy Process) metodu ile modeli üretmiştir. Bu yöntem %4.3 ile %73 tahmin hata aralığında değişen çeşitli sonuçlar vermiştir.

Saboya Jr. et. al. [6], Brezilya'nın Rio de Janeiro kentinin kuzeydoğusunda bulunan Itaperuna şehrinde, bulanık mantık yaklaşımını kullanarak yamaçlardaki yenilmelerin duyarlılık değerlendirmesi çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada amaçladıkları husus, bölgede yapılan arazi kullanımı çalışmalarını uygulamalarında yerleşim bölgelerinin çok büyük boşluklar içermesinin yapılaşma için çok uygun olmamasının birçok çalışmada olumsuzluklar oluşturmasıdır. Bu doğrultuda, bulanık mantık modellerini üreterek alan içerisindeki heyelanların meydana gelmesindeki duyarlılığı belirlemeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar, bulanık mantık yaklaşımının yargılamaya izin vermesi ve modellemenin sözel değişkenler ile oluşturulabilmesini bu yöntemi kullanmanın esas avantajı olarak belirtmişlerdir. Bu sayede modellerin yamaç yenilmesine etki eden faktörleri doğrudan yakalamasına olanak sağladıklarını söylemişlerdir. Çalışma kapsamında, eğim açısı, yükseklik, bitki örtüsü tipi, bitki örtüsü yoğunluğu, toprak geçirgenliği, toprak kalınlığı, maksimum günlük yağış, hareketin frekansı, hareketin işaretleri, drenaj çalışmaları, makaslama dayanımı ve katkı alanı olmak üzere 12 adet sözel değişken üzerinde çalışmalarını yürütmüşlerdir. Belirledikleri sözel değişkenleri bulanık mantık yöntemini kullanarak bulanık numaralara dönüştürmüşler ve böylelikle potansiyel yenilme indeksi değerini hesaplamışlardır. Bu hesaplamayı yaparken MAX – MIN Mamdani stratejisini kullanılan kural tabanlı yöntemde çıkarım yapmak için kullanmışlardır.

Champati ray et. al. [7], yüksek sismik aktiviteye sahip olan Himalaya Dağlarının Garhwal bölgesinde, Bhagirathi vadisi boyunca meydana gelen heyelanların duyarlılık haritalaması ve tehlike değerlendirmesi çalışmasını yapmışlardır. Bu çalışmayı gerçekleştirmek amacıyla, bulanık mantık yaklaşımından yararlanmışlardır. Çalışma alanı yaklaşık olarak 185km²'lik bir alandan oluşmaktadır. Araştırmacılar, nedensel faktörleri üretmek amacıyla yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verilerini, Hindistan uzaktan algılama uydusu aracılığıyla elde etmiş ve bu faktörlerin yorumlanabilirliğini geliştirmek amacıyla heyelan olaylarının öncesi ve sonrasını işlemişlerdir. Konumsal veri setini litoloji, kaya bozunması, jeomorfoloji, çizgisel yapılar, drenaj, arazi kullanımı, antropojenik faktörler, toprak tipi ve derinliği, eğim ve bakı faktörleri oluşturmuştur. Son duyarlılık haritası, 5 adet sınıfa ayrılmıştır (çok düşük duyarlılık, düşük duyarlılık, orta derece duyarlılık, yüksek duyarlılık, çok yüksek duyarlılık). Bu sınıflar 0.98'lik bir gamma değeri ile oluşturulmuştur. Sonuç çıktısında araştırmacılar, bilinen heyelan bölgesinin yaklaşık %72'lik bir kesiminin yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfına girdiği sonucunu elde etmişlerdir. Bölge için sismik aktivitenin ve yağışların heyelan meydana getirme olasılığının yüksek olduğu ve bu faktörlerin modellenmesinin gelecekte yapılacak iyileştirme çalışmalarına katkısı olacağı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Lee [8], Kore'nin Gangneung bölgesinde coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla, bulanık mantık yaklaşımını kullanarak heyelan duyarlılık haritalaması çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışmayı gerçekleştirmek amacıyla, bir veri türetme modeli olan frekans oranı yaklaşımı ile bilgi tabanlı bir yöntem olan bulanık mantık yaklaşımını birleştirmiştir. Çalışmada, heyelan lokasyonlarını belirlemek amacıyla KOMPSAT – 1 görüntülerini kullanmış ve bu lokasyonları arazi çalışmaları ile doğrulamıştır. Heyelan duyarlılık haritalaması amacıyla, topografya, çizgisellik, toprak, orman ve arazi örtüsü haritalarını konumsal veri setlerinden elde etmiş ve 8 adet faktörün (eğim, bakı, eğrilik derecesi, drenaja olan uzaklık, çizgisel yapılar olan uzaklık, toprak dokusu, bitki örtüsü tipi ve arazi örtüsü) heyelan meydana gelmesine yaptığı etkiyi veri tabanından elde etmiştir. Araştırmacı, elde ettiği bu veriler ve bulmuş olduğu heyelanları kullanarak bulanık üyelik değerlerini hesaplamıştır. Hesaplamış olduğu bu değerler doğrultusunda, bulanık matematiksel işlem uygulayarak heyelan duyarlılık haritasını üretmiştir. Sonuç olarak da, üretilen

bu haritanın mevcut heyelan lokasyonları ile doğruluk tahminini belirlemiştir. Bu hesaplamalar sonucunda araştırmacı, gamma operatörünün $\lambda = 0.975$ olması durumunda %84.68'lik bir değerle en iyi doğruluğu verdiğini ve %66.50'lik değerle de en kötü değeri verdiğini çalışma sonucunda elde etmiş ayrıca, birleştirilen iki yaklaşımın heyelan duyarlılık haritalamasında kullanımının tahmin doğruluğunun yeterli olduğunu öne sürmüştür.

Yalcin ve Bulut [9], Türkiye'nin Kuzey Doğu'sunda yer alan Rize'nin Ardeşen ilçesinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Belirlenen alan dahilinde, heyelanların oluşturduğu etkileri azaltmak amacıyla bir heyelan duyarlılık çalışması yapmışlardır. Ardeşen'deki yerleşim alanlarında şiddetli yağışların meydana getirdiği, önemli ölçüde hasara ve birçok can kaybına neden olan heyelanlar çalışma kapsamında araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bu heyelanları incelemek amacıyla, Ardeşen bölgesinin heyelan duyarlılık haritası, GIS (Geographical Information Systems) ile Dijital Fotogrametri Teknikleri (DPT) yardımıyla, AHP (Analytical Hierarchy Process) metodu kullanılarak araştırmacılar tarafından hazırlanmıştır. Heyelan envanteri, litoloji – bozunma, eğim, bakı, arazi örtüsü, makaslama dayanımı, akarsuya olan uzaklık, akış yoğunluğu ve yollardan uzaklık içerikli veri katmanlarını haritayı oluştururken kullanmışlardır. Araştırmacılar, alışma sahası içerisindeki Hemşindere Formasyonu birimlerinin farklı bozunma sınıflarında olduğunu ve bu sınıfların makaslama dayanımına önemli ölçüde etki ettiğini söylemişlerdir. Sonuç olarak yardımcı analizleri gerçekleştirerek, oluşturdukları katmanlardan elde ettikleri ağırlıklara göre heyelan duyarlılık haritası oluşturmuşlardır. Bu haritada, çalışma alanını 5 ana duyarlılık sınıfına ayırmışlardır (ok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek). Hesapladıkları duyarlılık derecelerine göre bölgenin %28'inin heyelan tehlikesi altında olduğunu belirlemişlerdir. Bölge içerisinde kullanımda olan evlerin %30'unda yaşayan yaklaşık 2.300 insanın, yüksek veya çok yüksek riskte heyelanlardan etkileniyor olduğunu söylemişlerdir.

Ercanoğlu et. al. [10], Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesinde, Bartın İlinin 35 km Güney Doğusunda yer alan yaklaşık 879.2 km²'lik bir alanda heyelan duyarlılık çalışması yapmışlardır. Çalışma kapsamında, uzman görüşe dayanan AHP (Analytical Hierarchy Process) metodunu kullanmışlardır. Ayrıca, aynı bölge içerisinde geçmişte yapılmış ve yapay sinir ağları (ANN) yönteminin uygulandığı çalışmayı da bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla vurgulamışlardır.

Araştırmacılar, eğim açısı, bakı, topoğrafik yükseklik, topoğrafik Şekil, su koşulları ve bitki örtüsü parametrelerini yaptıkları çalışmada kullanmışlardır. Uzmanlar, bölgenin heyelan duyarlılık haritalarını oluştururken, ikili grupları oranlamanın önemini ve geri bildirimini AHP içerisinde kullanmışlardır. Bu sonuçların doğruluğunu test etmek amacıyla, bölge içerisindeki mevcut heyelanların ilişki katsayısı (r_{ij}) ve alansal frekans dağılımı yaklaşımlarını kullanmışlardır. Bunun sonucunda da, 7 farklı uzman görüş için 7 farklı değer elde etmişlerdir. İlk yaklaşım olan ilişki katsayısı yaklaşımında, ortalama r_{ij} değerini 0.896 olarak elde etmişler ve sonuçların iyi bir ilişki gösterdiği sonucuna varmışlardır. İkinci yaklaşım olan alansal frekans dağılımı yaklaşımında ise, alan içerisinde bulunan heyelan piksellerinin %73.2'lik kısmının çok yüksek duyarlılık olarak sınıflandığını görmüşlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar, uygulamış oldukları AHP yönteminin tatmin edici olduğunu ve geçmişte aynı bölgede uygulanmış olan yapay sinir ağları yöntemi ile benzer sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, AHP metodunun heyelan duyarlılık haritalama çalışmalarında kullanılabilir olduğunu söylemişlerdir.

Kanungo et. al. [11], Himalaya Dağları'nın Darjeeling bölgesinde toplamda 3000 km²'lik bir alanda heyelan tehlike değerlendirme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, meydana gelen heyelanların oluşturduğu olumsuz etkiler ile yaŐanılan insan kayıplarının, potansiyel heyelan riski belirlenerek en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Heyelan risk değerlendirmesi heyelan potansiyelinin (LR) ve kaynak hasar potansiyelinin (RDP) bir fonksiyonudur. Heyelan risk değerlendirmesi ve kaynak hasar potansiyeli tipik olarak, heyelan duyarlılık haritalaması ve kaynak haritalaması ile karakterize olmuştur. Araştırmacılar bunları göz önünde bulundurarak, iki farklı yaklaşım olan bulanık mantık teorisi ile hasar piksel teorilerini üretmiş ve heyelan tehlike değerlendirmesi yapabilmek için bu teorileri uygulamışlardır. Ayrıca çalışmada, heyelan duyarlılık haritalaması yapmak için dört farklı yaklaşım kullanılmıştır (klasik ağırlık yaklaşımı, yapay sinir ağları kara kutu yaklaşımı, bulanık mantık yaklaşımı ve yapay sinir ağları ile bulanık mantığın birleŐtirildiđi yaklaşım). İlk yaklaŐıma dayanan heyelan risk değerlendirme haritası 1015 piksellik yerleşim ve 921 piksellik yol bölümünün heyelanlar açısından risk altında olduğunu göstermiştir. Bulanık mantık teorisinden üretilmiş olan heyelan risk değerlendirme haritası ise yerleşim alanının bir bölümünün (2496 piksel) heyelanlar açısından çok yüksek bir risk altında olduğunu göstermiştir. Aynı Şekilde, yerleşim

alanının geri kalan kısmı ile yol ağının bir bölümünün (7204 piksel) yine heyelanlar tarafından çok yüksek bir risk altında olduğu görülmüştür. Sonuç olarak araştırmacılar, hasar piksel teorisini temel alarak oluşturulan heyelan tehlike haritasının, heyelanlardan dolayı tehlike altında olan farklı kaynaklar altındaki pikselleri verdiğini buna karşılık, bulanık mantık teorisini temel alarak oluşturulan heyelan risk haritasının düşük ve yüksek tehlike bölgelerine koyarak kategorize ettiğini ve ileriye dönük çalışmalarda tehlike derecesini açıkladığını söylemişlerdir.

Yalcin [12], aynı şekilde Rize'nin Ardeşen ilçesinde GIS tabanlı bir heyelan duyarlılık çalışması gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik karakterinin heyelan meydana getirmeye çok elverişli olması ve şiddetli yağışların da bu olayı tetiklemesi ile çok büyük kayıpların yaşanması nedeniyle, duyarlılık haritalaması çalışmasını yapmıştır. Bu çalışmayı yaparken, çok değişkenli istatistiksel yöntemlerden olan AHP (Analytical Hierarchy Process) ve iki değişkenli istatistiksel yöntemlerden olan istatistiksel indeks (W_i) ile faktör ağırlığı (W_f) yöntemlerini heyelan duyarlılık haritalamasında kullanmıştır. Çalışma kapsamında, heyelan envanteri, litoloji – bozunma, eğim, bakı, arazi örtüsü, akarsulara olan uzaklık, drenaj yoğunluğu ve yollara olan uzaklık katmanlarını kullanmıştır. Çalışma sahasında meydana gelen heyelanların %98'inin yüksek derecede veya tamamen bozunmuş olduğunu görmüştür. Bu amaçla da, 16 adet aktif heyelan bölgesi içeren heyelan aktivite haritası ile 3 farklı duyarlılık haritasını doğrulama yapabilmek için birleştirmiştir. AHP metodunu uygulaması sonucunda, litoloji – bozunma, arazi örtüsü, eğim ve bakının çalışma sahası için önemli parametreler olduğunu söylemiştir. Ayrıca iki değişkenli istatistiksel metotları, heyelan yoğunluğundaki her bir bireysel parametreyi, ağırlık değerleri sınıflarında kategorize etmek için kullanmıştır. Uyguladığı yöntemlerin sonuç çıktılarında, aktif heyelan bölgelerinin tamamen yüksek veya çok yüksek duyarlılık sınıflarına girmediğini fakat bu bölgelerin %81.3'lük kesiminin AHP yönteminde yüksek veya çok yüksek duyarlılık sınıflarına girdiğini söylemiştir. Bu bölgelerin değerlerini, W_i metodunda %62.5 ve W_f metodunda %68.8 olarak belirlemiştir. Bu değerlerin sonucunda da, AHP yönteminin heyelan duyarlılık değerlendirmesinde daha gerçekçi bir çözüm ürettiğini öne sürmüştür.

Tangestani [13], İran'ın Zagros Dağlarındaki bir havza alanında Dempster – Shafer modeli ve bulanık modellemeyi heyelan tehlike haritalaması için kullanmıştır.

Çalışma sahası içerisindeki heyelanları bulmak ve yorumlamak için 1:40000 ölçekli hava fotoğraflarını kullanmıştır. Toplamda 0.30 km²'lik bir alanda 11 tane ana heyelan tanımı yapmıştır. Litoloji, eğim açısı, bakı, arazi örtüsü ve toprak derinliği heyelana neden olan faktörler olarak seçilmiştir. Bu veriler araştırmacı tarafından GIS ortamında girdi parametresi olarak girilmiş ve değiştirilmiş heyelan risk gelişim faktörü (MLHEF) ve bulanık üyelik fonksiyonları, birer fikir fonksiyonu olarak faktör haritalarında her bir sınıf için değerlendirilmiştir. Bulanık toplam, ürün ve gamma kombinasyon yaklaşımları incelenerek çıktı haritalarında bilinen heyelanlar temel alınarak değerlendirilmiştir. Bu çıktıların sonuçları çok da mantıklı değildir, çünkü bu yaklaşımlar, alanı sadece çok yüksek veya çok düşük duyarlılık bölgelerinde sınıflamıştır. Bu nedenle, arazi ve faktör haritalarıyla uyumlu olmamıştır. Yapılan analizler sonucunda γ 'nın 0.94'lük değeri heyelanlar için en güvenilir duyarlılık değerini vermiştir. Bilinen heyelanlar ile çıktı haritasının karşılaştırılması sonucunda bulunan heyelanları yüksek ve çok yüksek duyarlılık bölgelerinde olduğu araştırmacı tarafından belirlenmiştir. Tüm çalışma sonucunda araştırmacı, üretilen haritaların bir kısmının olayı desteklediğini ancak bir kısmının ise desteklemediği çıkarımına varmıştır.

Ercanoğlu ve Temiz [14], Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesinde, Kastamonu ili içerisinde toplamda 570.625 km²'lik bir alanda heyelan duyarlılık çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, heyelan duyarlılık analizleri için lojistik regresyon ve bulanık mantık yaklaşımlarını kullanmışlardır. Bu amaçla ilk olarak, geniş arazi çalışmaları ile bölgenin detaylı heyelan envanteri araştırmacılar tarafından üretilmiştir. Bu harita dahilinde toplam 96 adet heyelan haritalanmıştır. Heyelan duyarlılık analizlerini gerçekleştirmek için topoğrafik yükseklik, litoloji, arazi kullanımı, eğim, bakı ve akarsulara olan uzaklık olmak üzere altı adet girdi parametresi araştırmacılar tarafından dikkate alınmıştır. Bulanık mantık yaklaşımı için, matematiksel toplam, ürün ve gamma operatörü kullanılmıştır. Sonuç olarak 18 adet heyelan duyarlılık haritası lojistik regresyon ve bulanık mantık yöntemleri ile üretilmiştir. Sonuç haritalarının doğrulamasını yapabilmek amacıyla ROC eğrileri ve kosinüs büyüklük metodunu kullanmışlardır. Analizler temel alındığında, bulanık mantık gamma operatörü 0.975 seviyesi ile en iyi performansı göstermiştir. Yapılan analizlerin sonucunda, lojistik regresyon, bulanık mantık ürünü ve gamma operatörünün yüksek seviyelerinin üretilen haritalarda daha tatmin edici sonuçlar

verdiğini, ancak bulanık matematiksel toplam yaklaşımından elde edilen haritaların yeterli güvenilirlik sağlamadığı sonucuna varmışlardır.

Pradhan [15], heyelan duyarlılık haritalamasında, her bir hazırlayıcı faktörün (heyelan koşul parametreleri) rolünün belirlenmesinde kullanılan tekniklerden biri olan bulanık mantık yaklaşımını ve üyelik değerlerinin çapraz uygulamasını Malezya'da üç farklı çalışma sahası için uygulamıştır. Bu kapsamda, çalışma sahası olarak, çok ağır yağışlara maruz kalan Penang Hill, Bertam Vadisi ve Putrajaya alanlarını seçmiştir. İlk çalışma alanı olan Penang Hill 72 km², ikinci çalışma alanı olan Bertam Vadisi 105 km² ve üçüncü çalışma alanı olan Putrajaya toplamda 23 km²'lik alanlara sahiptirler. Araştırmacı, bulanık mantık yöntemini kullanmasındaki temel avantajları, yargılamayı yakalamadaki olasılık ve koşul faktörlerinin modellenmesi olarak belirtmiştir. Çalışma kapsamında, her bir çalışma alanı için tamamlanmış heyelan envanteri, arazi incelemeleri ve hava fotoğrafları kullanılarak araştırmacı tarafından oluşturulmuştur. Toplamda 12 tane topoğrafik ve litolojik değişken kullanmış ve bulanık mantık yaklaşımıyla heyelan duyarlılık modellerini üretmiştir. Bu modeller ile ürettiği faktör haritalarını bulanık ilişkileri kullanarak birlikte analiz etmiş ve duyarlılık haritalarını oluşturmuştur. Oluşturduğu heyelan duyarlılık haritasının kontrolünü yapabilmek için öncelikle arazi doğrulaması yöntemini kullanmıştır. Daha sonra bu haritayı ROC eğrileri tekniğiyle incelemiştir. Nitel olarak, ürettiği haritaların %82'den daha büyük bir kısmı 9 olayın hepsinde heyelan duyarlılığı sergilemiştir. Araştırmacı sonuç olarak, çalıştığı her üç bölge için hazırlanmış olduğu duyarlılık haritalarını karşılaştırdığında, çalışma alanlarında bulmuş olduğu heyelanların yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıflarına girdiğini belirlemiştir. Elde ettiği değerlerin, bulanık mantık yaklaşımının performansı ile ilişkili olduğunu ve oldukça tatmin edici sonuçlar elde ettiğini söylemiştir.

Bui et. al. [16], Vietnam'ın Hoa Binh bölgesinde, heyelan tehlikesinin konumsal tahminini yapabilmek için, kanıtsal güven fonksiyonu ile bulanık mantık yaklaşımlarının üretilmesi ve karşılaştırılması çalışmasını yapmışlardır. Çalışma alanı, yaklaşık olarak 4660 km²'lik bir alanı kaplamakta ve hazırlanan heyelan envanter haritasında, son on yılda yapılmış 118 tane heyelan noktası bulunmaktadır. Araştırmacılar, ürettikleri heyelan envanter haritasını alıştırma ve doğrulama veri setleri olarak rastgele parçalamışlardır (bilinen heyelan noktalarının %70'lik kısmı alıştırma bölümü için, %30'luk kısmı ise doğrulama bölümü için

kullanılmıştır). Çalışma kapsamında, heyelan envanter haritası ile birlikte, 9 tane heyelan koşul faktörü tanımı (eğim, bakı, rölyef genişliği, arazi kullanımı, toprak tipi, yollara olan uzaklık, akarsulara olan uzaklık ve faylara olan uzaklık) yapılmıştır. Bu faktörler kullanılarak, heyelan duyarlılık indeks değerleri kanıtsal güven fonksiyonu ve bulanık mantık modelleri ile hesaplanmıştır. Oluşturulan heyelan duyarlılık haritası, çok düşük (%40), düşük (%20), orta (%20), yüksek (%10), çok yüksek (%10) olmak üzere 5 sınıfta değerlendirilmiştir. Mevcut yüzdeler doğrultusunda, yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfına düşen heyelan piksellerinin bulanık SUM modeli için en düşük (%81.7), EBF model için de en yüksek (%88.49) olduğu araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Ayrıca, bulanık ürün ve bulanık gamma modellerinin hemen hemen aynı tahmin kapasitesine sahip olduğunu söylemişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar, hazırlanan tüm modellerin mantıksal sonuçlar sağladığını ve öncül arazi kullanımı planlama çalışmalarında kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir.

Hasekioğulları ve Ercanoğlu [17], Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesi'nde, Karabük şehrinin batısında bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 4 adet 1/25,000 ölçekli haritada yaklaşık olarak 567 km²'lik bir alanda çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, veri işleme yaklaşımı kullanılarak hazırlanan heyelan duyarlılık haritalarındaki parametre etkilerini araştırmışlar ve bu yönteme AHP (Analytical Hierarchy Process) yaklaşımını adapte etmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar, bölgenin heyelan envanter haritasında toplam 101 adet heyelanı haritalamışlardır. Heyelan duyarlılık değerlendirmesinde toplam olarak 13 parametreyi (eğim, bakı, eğrilik derecesi, topoğrafik yükseklik, bitki örtüsü indeksi, arazi kullanımı, drenaja olan uzaklık, yollara olan uzaklık, yapısal elemanlara olan uzaklık, yamaç sırtlarına olan uzaklık, akış aşındırma indeksi, sediman taşıma kapasitesi indeksi ve nemlilik indeksi) girdi parametresi olarak dikkate almışlardır. AHP yöntemini ana değerlendirme yöntemi olarak seçmiş ve veri çiftleri içerisinde bu yöntemi çalıştırmışlardır. Ayrıca, parametre seçim metodu olarak heyelan ilişki göstergesini (LRI) hazırlamışlardır. AHP ve parametre etki analizleri sonucunda 7 adet duyarlılık haritası oluşturmuşlardır. Bu haritalar doğrultusunda, 9 adet parametre tarafından üretilen ve en iyi performansı veren heyelan duyarlılık haritası üzerinde eğri altında kalan alan (AUC) yaklaşımını kullanmışlardır. Bu harita için, yaklaşımın sonucunu 0.797 olarak hesaplamışlar ve diğer sonuçları da 0.686 ve 0.771 arasında bulmuşlardır.

Bu sonuçlara göre de, çalışma alanının %38.3'lük kesimini çok düşük, %8.5'lik kesimini düşük, %15.0'lik kesimin orta, %20.3'lük kısmını yüksek ve %17.9'luk kısmı ise çok yüksek olarak sınıflamışlardır.

Mondal ve Maiti [18], Darjiling Himalaya bölgesindeki heyelan oluşumuna duyarlı olan alanlardan birisi olan Shiv – khola havzasında, uzaktan algılama teknikleri ile GIS tekniklerini kullanarak heyelan duyarlılık haritası hazırlama çalışmasını yürütmüşlerdir. Çalışma kapsamında 9 adet heyelan tetikleyicisi olan parametreyi (litoloji, eğim açısı, bakı, eğrilik derecesi, drenaj yoğunluğu, eğim yukarı etki alanı, arazi kullanımı ve arazi örtüsü, yollara etki alanı ve yerleşim yoğunluğu) temel alarak çalışmışlar ve AHP yöntemini uygulamışlardır. Bu yaklaşım doğrultusunda, faktörlerin miktarlarını belirlerken öncelikle, faktörlerin ikili gruplar halinde karşılaştırılmasını temel almışlardır. Faktörlerin çift karşılaştırma matrislerini mantıksal bir uyumluluk içerisinde, faktörlerin bağıl baskınlıklarını daha iyi anlayabilmek adına, her bir heyelan tetikleyici faktör için ortalama ağırlık tayini yaparak MATLAB yazılımında aritmetik ortalama metodunu kullanmışlardır. Araştırmacılar çalışma kapsamında, faktör haritalarını ve tematik veri katmanlarını üretirken SOI Toposheet, Erdas Imagine, PCI Geomatica, Arc View ve ArcGIS yazılımlarını kullanmışlardır. Her bir sınıfın tüm tematik veri katmanları için heyelan frekansını hesaplamışlar ve sınıf ağırlık değerlerini atamışlardır. Ayrıca, heyelan duyarlılık değeri katsayısını türetmek amacıyla ağırlıklı doğrusal birleşim modelini uygulamışlar ve GIS ortamında sınıf ağırlıklarının tayinini yapmışlardır. Sonuç aşamasında, Shiv – khola havzası için 7 adet heyelan duyarlılık sınıfı oluşturmuşlar ve bu sonuçların doğruluğunu mevcut heyelan lokasyonlarında sınıflama kapasitesi için 92.86 ve ortalama Kappa istatistik değerini ise 0.8919 olarak belirlemişlerdir.

Pourghasemi et. al. [19], İran'ın Haraz Havzasında, yaklaşık 114.5 km²'lik bir alanda, bulanık mantık ve AHP (Analytical Hierarchy Process) modellerini kullanarak heyelan duyarlılık haritası üretme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, heyelan lokasyonlarını belirlemek amacıyla hava fotoğraflarını kullanmış ve arazi araştırmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bunun sonucunda toplamda 78 adet heyelan lokasyonunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar, oluşturdukları heyelan envanterinin %70'lik (55 adet) kısmını modelleri çalışmak için, geri kalan %30'luk (23 adet) kısmını ise doğrulama çalışması yapabilmek için rastgele ayırmışlardır. Çalışmada, en duyarlı alanları belirleyebilmek için

koşullandırma faktörü olarak 12 tane veri katmanı belirlemişlerdir. Bu katmanlar, eğim açısı, bakı, eğrilik derecesi, yükseklik, litoloji, arazi kullanımı, akarsulara olan uzaklık, yollara olan uzaklık, faylara olan uzaklık, akış aşındırma indeksi, yamaç uzunluğu ve topoğrafik nemlilik indeksi olarak araştırmacılar tarafından verilmiştir. Çalışmada, heyelan duyarlılık haritaları bulanık mantık ve AHP yöntemleri ile elde edilmiş ve bu haritalar 4 farklı duyarlılık sınıfına ayrılmıştır (düşük, orta, yüksek, çok yüksek). Üretilen haritaların doğrulama çalışmalarını yapabilmek adına 2 farklı yöntem uygulanmıştır. Bunlar ROC eğrileri yöntemi ve frekans oranı modelleridir. Araştırmacılar, yaptıkları doğrulama çalışmaları sonucunda, bulanık mantık yaklaşımının (%89.7) AHP yaklaşımına göre (%81.1) çalışma alanında daha iyi performans gösterdiğini görmüşlerdir. Ayrıca, hazırlamış oldukları duyarlılık haritalarının gelecek arazi kullanımı ve iyileştirme çalışmaları için kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Reis et. al. [20], Türkiye'nin Kuzey Doğu kesiminde bulunan Rize ili içerisinde, yaklaşık 2700 km²'lik bir alanda, uzaktan algılama ve GIS yöntemleri tabanlı bir heyelan duyarlılık haritalama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmayı yürütürken, heyelan duyarlılık haritalarını oluşturmak amacıyla frekans oranı metodu ile AHP (Analytical Hierarchy Process) yaklaşımını kullanmışlardır. Araştırmacıların bu çalışmayı gerçekleştirmelerindeki temel nedenler, bölgenin iklimsel, jeolojik ve jeomorfolojik karakterinin heyelan oluşumuna çok elverişli olması, bu heyelanların sonucunda çok sayıda can ve mal kaybının oluşması ve ayrıca gelecekte yapılacak olan planlama ve iyileştirme çalışmaları için bilimsel bir araştırmanın yapılmasının gerekli olduğunu öngörmeleridir. Bu kapsamda, iki yöntem ile heyelan duyarlılık haritalarını üretmişlerdir. Bu haritaları üretirken, özellikle AHP yönteminin daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişler ve bunu da yöntemin, hem nesnel hem de öznel bakışının olmasına ve farklı faktörler için matris tabanlı çift karşılaştırma özelliğini içermesine bağlamışlardır. Bu amaçla, litoloji, eğim açısı, bakı, arazi örtüsü, akarsulara olan uzaklık, drenaj yoğunluğu ve yollara olan uzaklık olmak üzere 7 tane heyelana neden olan faktörü çalışma alanı için belirlemişlerdir. Çoklu jeoloji veri setlerini işleme aşamasını GIS ortamında bir hücre içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Litolojiyi mevcut saha çalışmaları ile jeolojik veri tabanından, arazi örtüsünü uzaktan algılama görüntülerinden ve geri kalan faktörleri ise oluşturdukları dijital yükseklik modeli üzerinden türetmişlerdir. Çalışmanın

sonucunda, analiz sonuçlarını güncel heyelan lokasyon verilerini kullanarak doğrulama yapmışlardır. Çalışmada, 5 adet duyarlılık sınıfı oluşturmuşlardır ve bu sınıfları çok düşük duyarlılık, düşük duyarlılık, orta duyarlılık, yüksek duyarlılık ve çok yüksek duyarlılık olarak belirlemişlerdir. Bu sınıfları, frekans oranı yaklaşımında sırasıyla %3.52, %30.59, %29.81, %26.75 ve %9.34 ve AHP yaklaşımında ise sırasıyla %7.14, %27.46, %37.27, %21.73 ve %6.39 olarak belirlemişlerdir. Doğrulama sonuçları kapsamında, çalışmada oluşturulan duyarlılık haritaları ile heyelan lokasyonları üzerindeki mevcut veri arasında tatmin edici sonuçlar bulduklarını belirtmişlerdir.

Demir et al. [21], Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde bulunan ve Tokat ilinde yer alan Kelkit Vadisi'nde 143.63 km²'lik bir alanda heyelan duyarlılık çalışması yürütmüşlerdir. KAFZ boyunca morfolojik ve litolojik özelliklerin heyelan meydana getirmeye yatkın olması ve daha önce bu hat üzerinde yaşanmış büyük can ve mal kayıplı heyelanların olması araştırmacıların bu çalışmayı yürütmesindeki esas amacı oluşturmuştur. Özellikle ülkemiz tarihinde yaşanmış en büyük heyelan felaketlerinden birisi olan Kuzulu heyelanı, KAFZ yanında bulunan ve kar erimesi ile tetiklenerek 15 kişinin ölmesine ve çok sayıda yerleşimin harap olmasına neden olmuştur. Bölgenin hala tehlikede olması ve meydana gelebilecek başka büyük felaketleri önlemek amacıyla araştırmacılar, bölgede heyelan duyarlılık çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda araştırmacılar, olasılık – frekans oranı modeli ile AHP (Analytical Hierarchy Process) yöntemini heyelan duyarlılık haritası oluştururken kullanmışlardır. Bu amaçla da, detaylı bir heyelan envanteri oluşturmuş ve heyelan oluşumuna etki eden faktörleri (litoloji, eğim, bakı, topoğrafik yükseklik, akarsulara olan uzaklık, yollara olan uzaklık, faylara olan uzaklık, drenaj yoğunluğu ve fay yoğunluğu) hazırlamışlardır. Heyelan duyarlılık değerlendirmesi için, alanı 5 ana duyarlılık bölgesine bölmüşlerdir (çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek). Ayrıca, olasılıksal model ile heyelanların bulunduğu alanlardaki verinin doğrulamasını yapmak amacıyla eğri altında kalan alan (AUC) yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntem sonucunda, olasılık – frekans oranı modelinin değerini 0.78 ve AHP metodunun sonucunu ise 0.64 olarak bulmuşlardır. Araştırmacılar, bu sonuçlar ile oluşturulmuş heyelan duyarlılık haritasının orta ölçekte kabul edilebilir olduğunu ve bölgesel planlamada kullanılabileceğini söylemişlerdir.

Feizizadeh ve Balschke [22], İnan'ın Kuzey Batısında bulunan Urmia Gölü havzasında 3 farklı GIS - çok kriterli karar analizi (GIS – MCDA) yöntemini heyelan duyarlılık haritalamasında uygulamışlardır. Heyelan duyarlılık haritalarını üretirken, AHP (Analytical Hierarchy Process), WLC (Ağırlıklı Doğrusal Kombinasyon) ve OWA (Sıralı Ağırlıksal Ortalama) yöntemlerini kullanmışlardır ve 9 adet nedensel faktör üzerinden çalışmayı yürütmüşlerdir (litoloji, yağış, arazi kullanımı, eğim, faylara olan uzaklık, akarsulara olan uzaklık, yollara olan uzaklık, baki, yükseklik). Mevcut heyelan envanteri ile üretilen duyarlılık haritalarını karşılaştırmışlardır. GIS – MCDA analizlerinin kesinlik analizlerinin yapabilmek için de Dempster – Shafer Teorisini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada bölgeyi 4 farklı duyarlılık sınıfına ayırmışlardır (duyarlı olmayan, az duyarlı, orta derecede duyarlı ve yüksek duyarlı). Araştırmacılar sonuç çıktılarında AHP yönteminde bilinen heyelanlar için , %21.2'lik kesimin yüksek duyarlılık kategorisine girdiğini, yaklaşık %75.7'lik kesimin orta derecede duyarlı sınıfına girdiğini ve %3.1'lik kesimin de az duyarlı sınıfına girdiğini belirlemişlerdir. OWA metodu için, yüksek duyarlılık kategorisine yaklaşık %20.16, orta derece duyarlı sınıfına yaklaşık %76.74 ve az duyarlı sınıfına ise yaklaşık %3.1 gibi bir kesimin girdiğini belirlemişlerdir. Son olarak WLC metodu için, yüksek duyarlılık sınıfının %10.57, orta derece duyarlılık sınıfının %86.33 ve düşük duyarlılık sınıfının %3.1 değerlerini içerdiğini belirlemişlerdir. Dempster – Shafer Teorisinin uygulaması ve değerlendirmeler sonucunda, heyelan duyarlılık çalışmaları için, AHP metodunun performansının en iyi olduğunu, bunu OWA metodunun takip ettiğini ve en zayıf sonucu ise WLC metodunun verdiğini söylemişlerdir.

Guettouche [23], yamaçlarda oluşan heyelanlardaki risk değerlendirmesini iki farklı yaklaşım kullanarak değerlendirmiştir. Araştırmacı çalışmasında, çok kriterli analiz yaklaşımını temel alarak risk seviyeleri için nitel bir değerlendirme ve sınıflama yapmış, ayrıca bulanık mantık yaklaşımını temel alan Mamdani modelini risk seviyelerinin sınıflanmasında nicel bir değerlendirme ve optimizasyon yapabilmek için kullanmıştır. Çalışma sahasını Cezayir'de 4 farklı bölge oluşturmaktadır (Azazga, Tizi Ouzou, Ain Taya ve Sidi Abdullah). Her bir çalışma sahası farklı türde oluşmuş hareketle karakterize olmuştur. Azazga'da kayma ve toprak akması, Tizi Ouzou'da heyelanlar, Ain Taya'da çökme ve kaya kayması ve Sidi Abdullah Şehrinde ise heyelanlar ve çamur akmaları çalışma kapsamında araştırmacı

tarafından değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda araştırmacı, her bir çalışma alanını genel olarak ihmal edilebilir, düşük, orta ve yüksek olmak üzere 4 farklı risk sınıfına ayırmıştır. Bu sınıflamada Sidi Abdullah için risk değerini yüksek sınıfta ve 87.6, Azazga için risk değerini orta sınıfta ve 62.5, Ain Taya için risk değerini orta sınıfta ve 62.5, son olarak da Tizi Ouzou için risk sınıfını yüksek ve 87.6 olarak elde etmiştir. Araştırmacı, bulanık mantık yaklaşımının kullanımının parametrelerin ölçülerinin veya arazi gözlemlerinin çeşitliliğine odaklanmasına izin verdiği ve bunun analiz içerisine girilebildiğini, ayrıca sınıf sınırlarında pratikteki problemlerin çözümünde ve operatörün standart sınıflarda kullanımındaki etkisini doğruladığını belirtmiştir.

Ma et. al. [24], Çin'in Kuzey Doğu'sunda bulunan, Yunnan – Guizhou platosu üzerinde 420 km boyunca uzanan doğal gaz boru hattının çevresindeki heyelanlara ilişkin duyarlılık analizi ve haritalamasını yapmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmada, dağlık alanlarla kesişen lineer mühendislik yapıları için rota seçimine etki eden heyelanların duyarlılık çalışmasını yürütmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışma kapsamında araştırmacılar, bölgesel bir duyarlılık çalışmasını yapabilmek için AHP (Analytical Hierarchy Process) ve en küçük kareler metodlarını kullanarak bir duyarlılık modeli oluşturmuş ve daha sonra da Visual Studio.NET ortamında GIS ArcEngine bileşenini kullanarak programlamışlardır. Zhong – Wu doğal gaz boru hattı için heyelan duyarlılık modelini, Zhongxian bölgesinden Wuhan'a kadar değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirmeyi yaparken 6 tane nedensel faktörü kullanmışlardır (litoloji, tektonizma, insan aktivitesi, akarsu ağı, topografya ve yağış). Heyelan duyarlılık değerlendirmesi için çok güvenli, güvenli, orta derece güvenli, duyarlı ve çok duyarlı olmak üzere 5 farklı duyarlılık sınıfı araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Analizler sonucunda, heyelan dağılımında sadece %5.3'lük kesimin çok güvenli ve güvenli sınıflara girdiği, %78.4'lük kesimin ise duyarlı ve çok duyarlı sınıflarına girdiğini görmüşlerdir. Çalışmanın sonucunda yapılan doğrulama ve tahmin testlerinde, modelin yüksek bir doğruluk ve tahmin kapasitesi olduğunu, heyelan duyarlılık değerlendirmeleri ve lineer yapılar için rota seçiminde modelin güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini söylemişlerdir.

Park et. al. [25], Kore'nin Gangwon Bölgesinde yaklaşık 16,875 km²'lik bir alanda heyelan duyarlılık haritalaması çalışmasını yürütmüşlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar, frekans oranı (FR), AHP (Analytical Hierarchy Process), lojistik

regresyon (LR) ve yapay sinir ağıları (ANN) yöntemlerini kullanarak heyelan duyarlılık indeksi (LSI) haritalarını üretmek, heyelanların meydana gelme olasılığını ve hasar kısıtlamasının belirlenmesinde bu yöntemlerin doğruluğunu değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmayı yaparken bu yöntemleri ayrı ayrı uygulamış ve ROC eğrilerinin altında kalan alanları belirlemişlerdir. Bu değerleri FR, AHP, LR ve ANN için heyelan duyarlılık indeksi haritalarında sırasıyla 0.794, 0.789, 0.794 ve 0.806 olarak belirlemişlerdir. Her bir model için benzer kesinlikte LSI haritaları üretmişlerdir. Heyelan oluşturan alanlara karşılık oluşturmayan alanların çapraz tablolama analizlerini yaparak 65.27, 64.35, 65.51 ve 68.47 % değerlerini sırasıyla FR, AHP, LR ve ANN modelleri için benzer ortalama kesinlikte bulmuşlardır. Modeller arasında korelasyon analizleri yaparak LR ve ANN modellerinin en yüksek korelasyona (0.829) sahip olduğunu ve buna karşılık FR ve AHP modellerinin en düşük korelasyona (0.619) sahip olduklarını ispat etmişlerdir.

Alimohammadlou et. al. [26], Azerbaycan bölgesinde bulunan Nir – Sarab yolu üzerindeki Saeen geçidinde, yağış etkisi ile oluşmuş olan heyelanların kestirimini yapabilmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, iki farklı yöntem olan ANN (Artificial Neural Networks) ve bulanık kümeleme yaklaşımlarını kullanmışlardır. Çalışmanın amacı temel olarak, tetikleyici faktörlerin seçilen bölge için gelecekteki davranışlarının belirlenmesi ve gelecekte meydana gelebilecek heyelan olaylarının tahmini için benzer koşulların çıkarılmasıdır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada genel olarak 4 tane heyelan oluşumunu yöneten faktörü belirlemişlerdir (yağış, deprem ve sismik aktivite, yolların yapısı, akarsu ve nehirler). Uyguladıkları yöntemlerden ANN için, doğrusal ve sabit olmayan davranışların veri yapısı içerisinde yakalanmasına olanak vermesini yöntemin avantajı olarak belirtmişlerdir. Diğer bir yöntem olarak bulanık kümeleme yöntemi için ise, belirlenen gruplardaki aynı davranışı sergileyen verileri yerleştirmekte başarılı olduğunu ve ayrıca kümelemenin amacı olarak, doğal gruplamanın büyük veri setleri için sistem davranışı içerisinde kestirim yapabilmesine olanak sağladığını belirtmişlerdir. ANN yöntemi için çalışmada, geçmiş gözlemler için kümülatif yağışta, üç katmanlı bir sinir ağı için, 12 girdi düğümü ve tek çıktı düğümünden oluşan tahmin edilen aylık yağış değerleri üretilmiştir. Bu yaklaşım kullanılarak elde edilen sonuçların, gerçekte bağdaştırıldığında çok da tatmin edici olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır. Bulanık kümeleme yönteminin uygulamasında, 3 kümeli, 5 kümeli, 7

kümeli ve 10 kümeli gruplar oluşturulmuştur. Yapılan gözlemlerde kullanılan kümeleme yaklaşımının son 19 yıl dikkate alındığında, davranışın tahmini için daha doğru sonuçlar verdiği araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Araştırmacılar çalışmanın sonucunda, bulanık küme yaklaşımının ileriki yıllarda meydana gelebilecek heyelan olaylarından kaynaklanacak muhtemel hasarların iyileştirilmesi için kullanılabileceğini ve daha iyi bir iyileştirme dizaynının bu yöntem ile üretilbileceğini öne sürmüşlerdir.

Althuwaynee et. al. [27], Kuzey Gyeongsang Bölgesinde, yaklaşık 170 km²'lik bir alanda heyelan duyarlılık haritalaması çalışması yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında, 4 adet uygulanabilir modeli heyelan duyarlılığı için karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Bu modelleri, (1) iki değişkenli Dempster – Shafer tabanlı kanıtsal güven fonksiyonu (EBF), (2) EBF'nin bilgi tabanlı AHP (Analytical Hierarchy Process) içerisinde bütün nedensel faktörler için bir çift karşılaştırma modeli olarak uygulanması, (3) EBF'nin yine AHP içerisinde bir çift karşılaştırma modeli olarak nedensel faktör ağırlıkları için uygulaması ve (4) EBF'nin lojistik regresyon içerisinde çok değişkenli bir model olarak yine sadece nedensel faktör ağırlıkları için uygulaması olarak sunmuşlardır. Çalışma kapsamında 296 adet heyelan lokasyonu içeren bir heyelan envanter haritası hazırlamışlardır. Bu haritalama çalışmasından sonra 15 adet nedensel faktör belirlemişlerdir (eğim açısı, bakı, eğrilik derecesi, pürüzlülük, yükseklik, drenajdan olan uzaklık, akış aşındırma indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi, ağaç yaşı, ağaç çapı, ağaç türü, orman yoğunluğu, toprak kalınlığı, toprak dokusu ve toprak drenajı). Yapılan analizler ve sonuç duyarlılık haritalarında araştırmacılar, iki modelin birbirine çok yakın sonuçlar verdiğini (%82.3 ve %80), ayrıca (1) ve (3) numaralı modellerin lojistik regresyon modeline göre de daha iyi bir sonuç gösterdiğini söylemişlerdir. Bu sonuç haritalarının, her bir nedensel faktör ile heyelan lokasyonu arasında bir ilişki kurmak ve iki değişken tabanlı istatistiksel modelin kapasitesini genişletmek için kullanılabileceğini ayrıca oluşturulan modelin her bir nedensel faktör için çok değişkenli istatistik model olmadan bir ara bağlantı sergileyebileceğini ve bunun oluşturulan grup modelde kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir. Sonuç çıktısı olarak da, oluşturulan bu güçlü modellerin doğal risk değerlendirmesi ve arazi kullanımı planlama çalışmalarında uygulanabilir olduğunu söylemişlerdir.

Osna et. al. [28], Türkiye'nin Trabzon şehrinde, yaklaşık olarak 300 km²'lik bir alanda heyelan duyarlılık çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, heyelan duyarlılık haritalamasını Mamdani bulanık çıkarım sistemi ile belirleyerek, tek bir bağımsız uygulama olan GeoFIS'i üretmişlerdir. Araştırmacıların uygulamış oldukları GeoFIS genel olarak iki ana açık kaynaklı uygulamadan, GIS operatörleri ve Mamdani FIS'in yaratılmasından oluşmaktadır. Bu yöntem ile uzman görüşe dayalı bir heyelan duyarlılık haritası üretmek mümkün olmuş, haritalar anlık olarak görselleştirilmiş ve modelin performansı ölçülebilmektedir. GeoFIS yöntemi, veri yerleştirme işleminden başlayarak ölçüm performansı ile sona eren heyelan duyarlılık haritalaması işleminin bütün adımlarını desteklediği çalışma kapsamında belirtilmiştir. Araştırmacılar ayrıca GeoFIS'in kendi içinde çıkarmış olduğu sonuçların kullanımına, görsellerin kontrolüne ve güncel heyelan meydana gelme bilgisini almaya ve ROC – AUC verilerinin otomatik olarak hesaplanmasına olanak sağladığı sonucunu yine çalışma içerisinde aktarmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda araştırmacılar, üretmiş oldukları AUC değerini 0.602 ile düşük ancak kabul edilebilir bir değer olarak bulmuşlardır. Bununla birlikte yöntem içerisinde üretilmiş oldukları Gerçek Pozitif Oran (TPR) değerini ise 0.902 bulmuşlardır. Çıkarmış oldukları bu sonuç ile uygulamış oldukları FIS modelinin, heyelan meydana gelmedeki duyarlılığı çok yüksek bir başarıyla tahmin edebildiği sonucunu elde etmişlerdir. TPR ve ROC – AUC değerlerini birlikte değerlendirdiklerinde, çalışma alanı için üretmiş oldukları heyelan duyarlılık haritasının başarılı olduğunu ve arazi planlayıcıları ile karar vericiler için kullanılabilir olduğunu öne sürmüşlerdir.

Roodposhti et. al. [29], yaptıkları çalışmada, heyelan duyarlılık haritalaması (LSM) oluşturmak amacıyla, iyi bilinen çok kriterli karar verme tekniği olan ve tercih dereceleme organizasyonu olarak adlandırılan PROMETHEE II ile kombinasyon içerisinde olan FAHP (Fuzzy Analytical Hierarchy Process) ağırlık tekniklerini kullanmışlardır. Bu kapsamda çalışma alanı olarak, İran'ın Gorgan Bölgesinde bulunan Minoo Dasht seçilmiş ve araştırmacılar 8 adet heyelan oluşturabilir katmanı belirlemişlerdir (eğim, bakı, akarsuya olan uzaklık, drenaj yoğunluğu, faylara olan uzaklık, ortalama yıllık yağış, yollara olan uzaklık ve litoloji). Bu kapsamda, 83 adet yakın zamanda meydana gelmiş heyelan ile tarihsel heyelanın envanteri çizilmiştir. Sonrasında oluşturulan heyelan duyarlılık haritalarının ROC eğrileri altında kalan alan hesaplaması yapılmış ve değer olarak 0.752 araştırmacılar tarafından elde

edilmiştir. Gelecek doğrulaması yapabilmek adına da, oluşturulan duyarlılık haritası ile heyelan envanter haritasına basit bir bindirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar duyarlılık haritasını toplamda çok düşük duyarlılık, düşük duyarlılık, orta derece duyarlılık, yüksek duyarlılık ve çok yüksek duyarlılık olmak üzere 5 adet sınıfa ayırmışlardır. Sonuç çıktılarında, meydana gelmiş heyelan noktalarının %11'lik kısmının çok yüksek duyarlılık sınıfına düştüğünü, fakat yaklaşık olarak %52'lik bir kesimin de aslında yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıflarına düştüğünü görmüşlerdir. Aynı zamanda, kayıt altına alınmamış heyelanların da çok düşük duyarlılık sınıfında meydana geldiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, yapılan ROC eğrisi analizleri ve basit bindirme işlemi değerlendirmesi sonucunda, üretilen haritaların iyi bir performans sergiledikleri sonucuna varmışlardır.

Shahabi et. al. [30], İran'ın Kuzey'inde bulunan Zab Havzası'nın merkezinde heyelan duyarlılık haritalaması amacıyla 3 farklı model kullanılarak bir karşılaştırma çalışması gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışma kapsamında, 3 farklı model olan frekans oranı (FR), lojistik regresyon (LR) ve AHP (Analytical Hierarchy Process) modellerini havza içerisindeki heyelan duyarlılık haritalaması için kullanmışlardır. Toplamda 8 adet faktör (eğim, bakı, arazi örtüsü, yağış, litoloji, yollara olan uzaklık, drenajlara olan uzaklık ve faylara olan uzaklık) belirlemişlerdir. Arazi kullanım haritası ve heyelan envanter haritası oluşturulurken Landsat ETM+ ve SPOT 5 uydu görüntülerini kullanmışlardır. Heyelan olaylarını bağımlı değişken ve veri katmanlarını da bağımsız değişken olarak seçip bu iki değişken tipini heyelan duyarlılık çalışmasını yaparken kullanmışlardır. Araştırmacılar oluşturdukları 3 modeli, bağıl heyelan yoğunluk indeksi (R – index) ve alıcı işletim karakteristik eğrisi (ROC) yöntemlerini kullanarak doğrulama yapmışlardır. Her model için tahmin etme kapasitesini, bu iki yöntemi kullanarak LR, AHP ve FR metotları için sırasıyla 0.8941, 0.8115 ve 0.8634 olarak belirlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda da araştırmacılar, lojistik regresyon ve frekans oranı yöntemlerinin çalışma alanı için daha iyi kestirim yaptığını söylemişlerdir. Heyelan duyarlılık haritalamalarını yorumladıklarında ise bölge için yağış, litoloji ve eğimin heyelan meydana gelmesinde ve dağılımında ana rolü üstlendiğini ve modellerin güvenilir olduğunu görmüşlerdir. Bütün bu yapılan analizler ve ulaşılan sonuçlar ışığında araştırmacılar, sonuç haritalarının bölgesel konum planlaması ve arazi kullanımı planlaması için kullanılabilir olduğunu söylemişlerdir.

Zhu et. al. [31], heyelan duyarlılık haritalamasında veriye dayalı yaklaşımın zorluklarından kaçınmak amacıyla, uzman görüşe dayalı yaklaşım ile bir duyarlılık haritalama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, Çin'de iki farklı bölgeyi yaklaşımı test etmek için seçmişlerdir. Bunlar, yaklaşık 250 km²'lik alanı kaplayan Kaixian bölgesi ile yaklaşık 4600 km²'lik bir alanı kaplayan Three Gorges çalışma alanıdır. Araştırmacıların hazırlamış oldukları yaklaşım üç tane genel adımdan oluşmaktadır (Heyelan duyarlılığı ile hazırlayıcı faktörlerin arasındaki ilişkilerin uzman kişi tarafından çıkarımı, GIS teknikleri kullanılarak hazırlayıcı faktörlerin karakterize edilmesi ve bulanık mantık yaklaşımı altında heyelan duyarlılığının tahmini). Çalışma alanlarından olan Three Gorges, hem taşınabilirlik hem de yaklaşımın uygulanabilirliğini büyük alanlar boyunca test edebilmek açısından kullanılmıştır. Çalışmada, hesaplanan değerler ile heyelan bölgeleri arasındaki istatistiksel farklılığı test edebilmek amacıyla z – score test uygulanmıştır. Kaixian bölgesi için hesaplanan z değeri 3.70 olarak bulunmuş ve bu değere denk gelen p değeri ise 0.001'den düşük olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler, heyelan duyarlılık değerlerinin heyelan oluşumunda iyi bir gösterge olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca Three Gorges bölgesi için de araştırmacılar bu değerleri hesaplamış ve hesaplamalar sonucunda bu bölge için z değerini 10.75 ve p değerini aynı şekilde 0.001'den düşük olarak elde etmişlerdir. Bunun haricinde, çalışmada duyarlılık değerleri, düşük (0.0 – 0.25), orta (0.25 – 0.5), yüksek (0.5 – 0.75) ve çok yüksek (0.75 – 1) olarak 4 sınıfa ayrılmıştır. Yapılan sınıflamanın sonucunda araştırmacılar, heyelan yoğunluğunun, orta duyarlılık sınıfında, çok yüksek duyarlılık sınıfına göre 3 kat, yüksek duyarlılık sınıfına göre de 2 kat daha fazla olduğu çıkarımını yapmışlardır. Three Gorges bölgesinde yapılan çalışmalarda, uzman görüşe dayalı olarak oluşturulan yaklaşımın, diğer çalışma alanlarına uygulanabilir olduğu ve üretilen yaklaşımın büyük ölçekli projeler için kullanılabilir olduğu araştırmacılar tarafından belirlenmiştir.

2.2. Çalışma Sahasına İlişkin Önceki Çalışmalar

Rouai ve Jaaidi [1], Fas'ın Merkez Rif Dağları olarak adlandırılan bölgesinde, yaklaşık olarak 4000 km²'lik bir yayılım gösteren alanda bulunan heyelanların çoklu fraktal analiz yöntemi ile analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sahası dahilinde toplamda 759 adet kaymanın konumsal dağılımlarını vermişlerdir. Bölgede genel olarak mezo – senozoik fliş ve marn dominasyonu olduğu ayrıca ikincil ve tersiyer

malzemenin karmaşık bir jeolojisi ile oluşan Alpin zinciri içerisinde bulunduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada uygulanmış oldukları çoklu fraktal analiz yönteminde, heyelan yoğunluğunun konumsal olarak dağılan ve tamamen ölçek özelliklerini içeren kümelenmeler şeklinde karakterize olduklarını ifade etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, doğal heyelanlar için SOC modelini de çalışma dahilinde oluşturmuşlardır. Oluşturdukları modeller ve analizlerin sonucunda heyelanların konumsal dağılımlarının bölge içerisinde homojen bir fraktal yapıya değil de heterojen bir fraktal yapıya sahip olduklarını belirlemişlerdir. Yapmış oldukları analizlerde boyutları $D_{(1)} = 1.713 > D_{(2)} > \dots > D_{(12)} = 1.325$ olarak üretmişlerdir. $D_{(12)} = D_{(\infty)}$ heterojen set içerisinde kümelenmenin en yoğun olduğu boyut olarak bulunmuştur. Çalışma kapsamında, Beni Ahmed bölgesi ve çevresindeki heyelanların boyut – frekans analizleri yapılmış ve bu analizlerin sonucunda dağılımın power – law şeklinde olduğu ayrıca kaymanın ölçek değişmezliğinin doğrulaması da araştırmacılar tarafından elde edilmiştir. Sonuç çıktısında araştırmacılar, doğal heyelanların tetikleyici olaylar ile ilişkide olduğunu ileri sürmüşlerdir.

El Khattabi ve Carlier [32], Fas'ın Merkez Rif Dağları olarak adlandırılan bölgesinin kuzey kanadında bulunan ve 1/50.000 ölçekli haritaları bulunan Beni Boufrah ve Rouadi bölgelerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın temel amacı, duraysızlığa neden olan faktörlerin çözümlenmesi ve bunun sonucunda güvenilir bir modelin oluşturulması olarak ifade edilmiştir. Araştırmacılar, çalışma sahasının genel olarak fliş birimlerinden oluştuğunu ve drenaj ağı içerisinde vadilerden kuzeyde Akdeniz'e doğru bir akış olduğunu belirtmişlerdir. Hidrolojik olarak bölgenin iyi bir şekilde drene olduğu ve akiferlerin kumtaşı tabakalarının içerisinde olduğu, vadilerde ise akiferlerin genel olarak alüvyon malzeme içerisinde olduğu ve yeraltı suyuna önemli bir katkı yaptığı tanımlamaları yapılmıştır. Bölgenin genel iklim karakteristiklerinin, çalışma alanı içerisinde bulunan bölgede daha ılıman olduğu ancak güney kesimlere gidildikçe çok şiddetli yağışların egemen olduğu ve bunun da yeraltı suyuna çok önemli bir katkı yaptığı belirtilmiştir. Bölgede genel olarak yeraltı suyunun kuzeye akma eğiliminde olduğu ve güney kesimde de hidrolik gradyanın önemli ölçüde dik olduğu tanımlamaları yapılmıştır. Çalışma sahası içerisinde bulunan heyelanların büyük çoğunluğunun güney kesimlerde bulunduğu ve genel olarak dik bir piyezometrik gradyana sahip oldukları belirtilmiştir.

Heyelanların, bölgede oluşmuş olan levha sıkışmasının tamamen incelendiği bölgelerde bulunduğu ve düşük bir pasif yüzey basıncı belirttiği arazi çalışmaları sonunda görülmüştür. Araştırmacılar heyelanların genel karakteristiklerini, temiz düz yüzeyleri, önceden meydana gelmiş yenilme yüzeyleri ve zayıf mekanik özellikleri ile geçirimsiz temel üzerinde buldukları tanımlamalarını yapmışlardır. Yapılan çalışmada, bölgenin yapısal ve hidrojeolojik analizleri ve tanımlamaları araştırmacılar tarafından gerçekleştirilerek, güvenlik katsayısı değerlerinin piyezometrik seviyeye bağlı olarak zamansal değişiminin değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonuç çıktısında, güvenlik katsayısının piyezometrik seviyeye bağlı olarak değiştiği ve güvenlik katsayısının zaman ve uzaklığın bir fonksiyonu olduğunu gösterdiği belirtilmiştir. Oluşturulmuş olan simülasyonda araştırmacılar, yağış süzülmesinin olduğu alandan 235 m ve üzerindeki uzaklıklardaki alanlarda güvenlik katsayısının azalmakta olduğu ve kritik seviyeye (≤ 1) ulaştığı sonucuna varmışlardır.

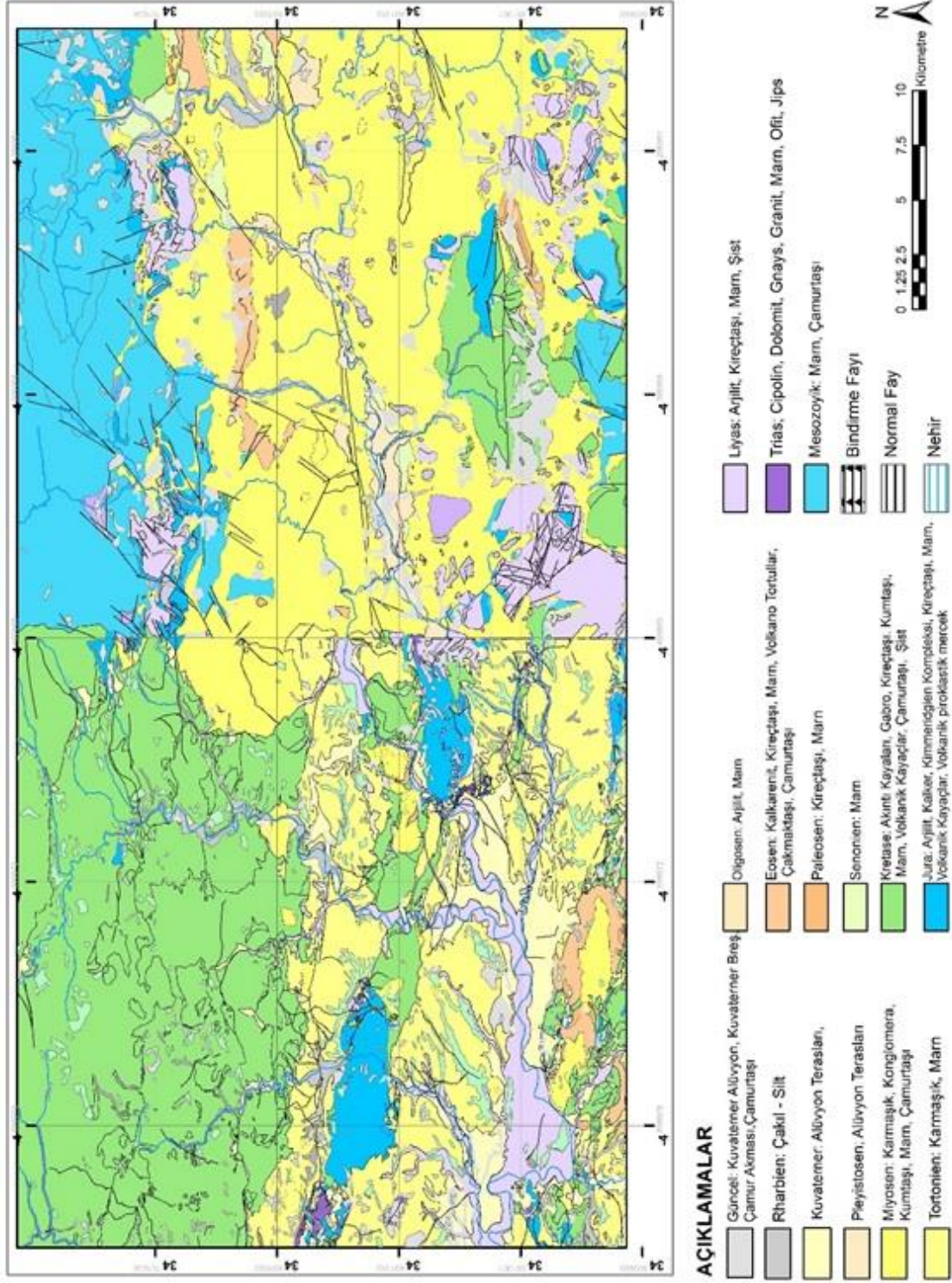
3. ÇALIŞMA SAHASININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Tez çalışması kapsamında bu bölümde, çalışılan Merkez Rif Dağları bölgesine ilişkin genel jeolojik, jeomorfolojik ve iklimsel özellikler ayrı başlıklar altında verilmektedir.

3.1. Jeoloji

Çalışma alanı jeolojik olarak, ikincil ve Tersiyer malzemenin karmaşık jeolojisiyle oluşmuş bir Alpin zinciri içerisinde [1]. Rif kuşağının yapısı genel olarak kuzeye yönelimli sıyrılma fayları ile karakterize olmuştur ve 3 ana etki alanı yapısından oluşmaktadır; 1) İç Bölge, 2) Maghrebian Fliş, 3) Dış Bölge. Bölgede KD – GB yönelimi olan Nekor ve Jebah transfer fayları, iç bölgenin ve Maghrebian fliş kuşaklarının tektonik yer değiştirmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma sahasının da içinde bulunduğu ve dış bölge olarak adlandırılan kesim, kuzeyden güneye 3 ana birime ayrılmıştır. Bu bölgeler İntrarif, Mesorif ve Prerif olarak adlandırılmaktadır. Bölgenin en kuzey kesiminde kalan İntrarif, Ketama, Tanger ve Loukkous birimleri olarak alt bölümlere ayrılmıştır [2]. Ketama birimi genel olarak Alt Kretase yaşlı karbonat ve siliklastik türbidit birimlerinden, Tangier ve Loukkous birimleri ise Eosen yaşlı marn ve pelitik formasyonlardan oluşmaktadır [2]. Mesorif ve Prerif en güneyde kalan birimlerdir ve Nekor fayının batısından doğusuna doğru yayılım göstermektedir. Merkez kesim kireçtaşları tarafından üstü örtülmüş olan Miyosen türbiditlerden ve Mesozoyik yaşlı pelitler ile kumtaşlarından oluşmaktadır. Doğuda, Liyastan Üst Kretaseye kadar olan yaşta bir volkano – sedimanter sekans (lav akmaları ve kireçtaşları içine sokulum yapmış olan gabro) yüzlek vermiştir. Prerif, marnlı – killi formasyonlar içermektedir ve Üst Kretase – Eosen'den Üst Miyosene kadar olan yaşta [2].

Tez kapsamında yapılan arazi çalışmalarında, bölgede genel olarak, kumtaşı, marn ve çamurtaşları gibi kırıntılı birimler ve ayrıca şist birimleri yoğun olarak görülmüştür. Bu malzemeler, Şekil 3.1'de verilmiş olan jeoloji haritasında Miyosen, Eosen ve Kretase yaşlarıyla karakterize edilmiş olan birimlere karşılık gelmektedir. Şekil 3.1'de verilmiş jeoloji haritası, Fas'ın yerel koordinat sistemi olan GCS_Merchich_Degree sisteminde koordinatlandırılmıştır.



Şekil 3.1. Çalışma sahasının genel jeolojik haritası [33-34].



Şekil 3.2. Çalışma sahasında görülen kumtaşı malzemesine ilişkin örnek fotoğraf.



Şekil 3.3. Çalışma sahasında görülen şist biriminin yakından görünümü; kaya malzemesi oldukça zayıf görülmektedir.

3.1.1. Stratigrafi

Çalışma sahası, bahsedilen 3 ana etki bölgesi göz önünde bulundurulduğunda dış bölge olarak adlandırılan alanın içerisinde kalmaktadır. Dış bölge kendi içinde Intrarif, Mezorif ve Prerif olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma sahası bu bölgelerden, Intrarif olarak adlandırılan kısımda bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında, belirtilen bu bölümlere ilişkin litolojik tanımlamalar ve stratigrafi, A. Chalouan et al. [35] tarafından gerçekleştirilmiş çalışmalara bağlı olarak özetlenmiştir. Intrarif bölgesi, eski Afrika sınırından ayrılmış ve kaynaktan en fazla uzaklaşmış olan birimleri içermektedir. Bu birimler, Maghrebian Fliş ve Dorsale Birimlerinin altından yüzlek vermiş durumdadır. Bu bölge 3 farklı birime ayrılmıştır [35] (Şekil 4.4).

3.1.1.1. Ketama Birimi

Ketama birimi, genel olarak Alt Kretase yaşlı siliklastik türbidit serilerinin hakim olduğu birimleri içermektedir. Bu birimler, yoğun bir şekilde faylanmış ve düşük bir metamorfizmadan etkilenmiştir. Ketama birimi, Merkez Rif içerisinde yayılım göstermektedir ve doğuda Nekor fayı ile sınırlanmıştır. Ketama birimi, en azından iki adet alt birim içermektedir. Bu alt birimlerden Güney birimi, Sinemuriyan masif kireçtaşları ile başlar ve kıtasal bir alt katmanı ifade eder. Daha sonra gelen Sin – Rift serileri amonitçe zengin marnlı kireçtaşları (Orta Liyas), siltli marn (Toarsiyen), hemipelajik (Aalenian) ve Posidonomya marnlarını (Dogger) içermektedir. Üzerini örten Post – Rift serileri ilk olarak Üst Jura “ferrysch” (marnlı – klastik formasyon) daha sonra bunu takiben üzerinde bulunan Tithoniyen – Berrisiyen pelajik kireçtaşlarını içermektedir. Bunların üzerinde bulunan pelitik – kumlu sedimentasyon yapısı Valanginiyen’e karşılık gelmektedir. Baremiyen ve Aptiyen – Albiyen zamanlarında ince kuartzlı türbiditler ile karakterize olmuş bir birim ve Vrakoniyen belemnit marnları ve spongolitler kuzey kesimde korunmuş şekilde bulunmaktadır [35].

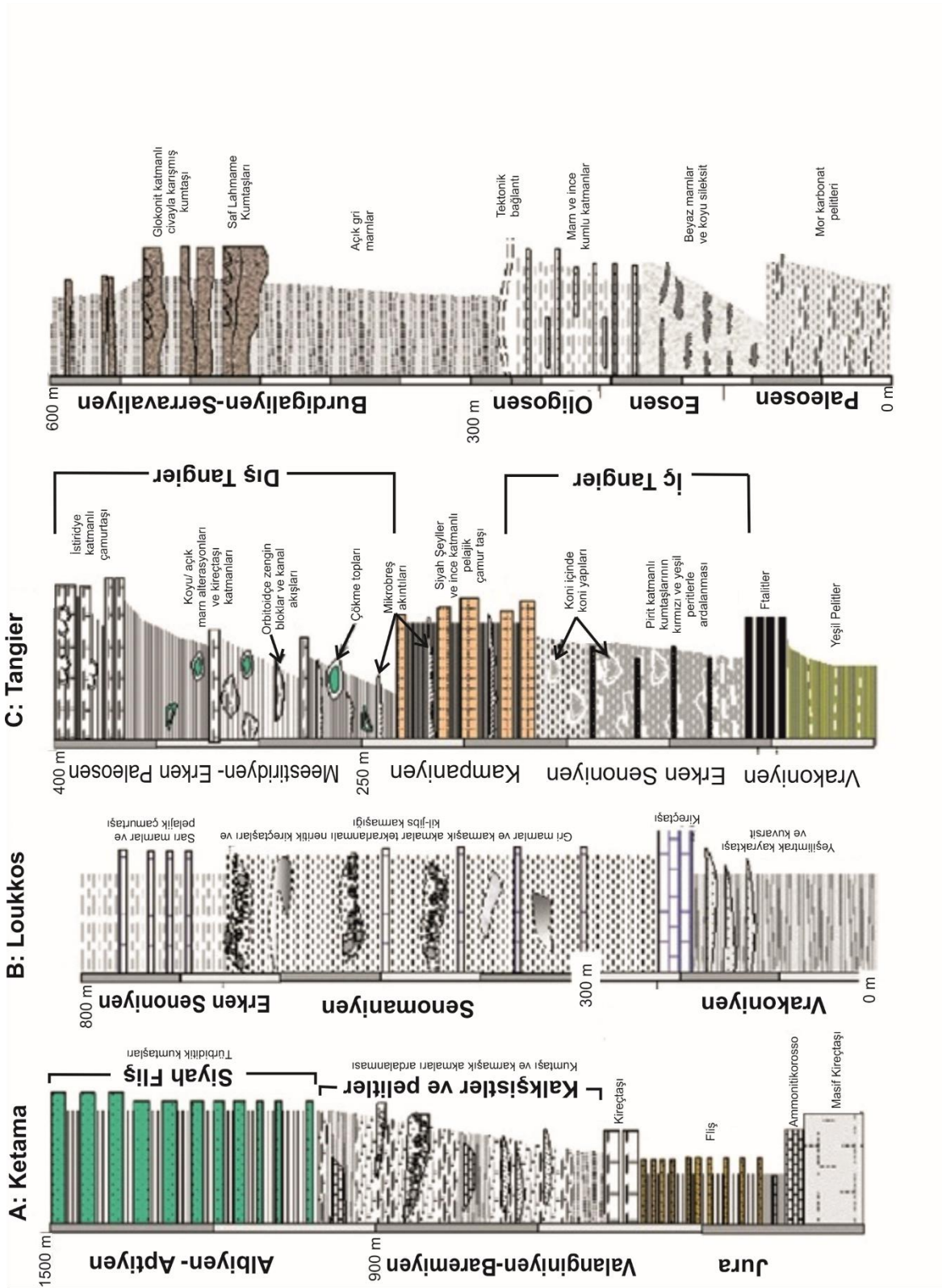
3.1.1.2. Tangier Birimi

Tanger birimi, üzerini örten Ketama biriminden ve Aknoul napından parçalı olarak ayrılmış, Mezorif ve Prerif üzerinden bir bindirme yapısı ile tamamen ayrılmış ve Intrarif bölgesinde Üst Kretase – Eosen boyunca marnlı – pelitik formasyonlar ile yayılım gösteren bir birimdir. Tanger serileri Merkez Rif içerisinde Senomaniyen – Meestridyen zaman aralığını kapsamakta, ancak Batı Rif içerisinde İç Tanger Birimi (Senomaniyen – Senoniyen) ve Dış Tanger Birimi (Kampaniyen – Paleosen) olarak

ayrılan uzantılara sahiptir. Bazı fasiyesler, Ketama – Tanger sınırı boyunca dominant pelitler, Senomaniyen – Turoniyen fitanitleri, Alt Senoniye koni içinde koni olarak bulunan nodülleri, Kampaniyen – Meestiridyen kalkerli mikrobreşleri ve Ostrea marnlı kireçtaşları ile bir kontrast içerisinde bulunmaktadır [35].

3.1.1.3. Loukkos Birimi

Loukkos birimi, genel olarak Intrarif'e ait olmakla beraber, Batı Mesorif'e bir geçiş formudur. Tanger birimi ile karşılaştırıldığında Loukkos birimi, ince Senomaniyen çökelleri, yüksek oranda karbonatlar ve Trias kil – jips karmaşığındaki yaygın diyapirik intrüzyonlar ile karakterize olmuştur. Intrarif havzasındaki daha genç formasyonlar için olduğu gibi, bölgesel olarak ayırdığımızda, uzantılara sahiptir ve ayrılmıştır. Güney ve Güney Doğu'da Ouezzane ve Tsoul napları ve Batı'da Hapt napı ile şekillenmiştir [36]. Aslında, Intrarif Eosen sedimanları beyaz silisli marnlar ve marnlı kireçtaşları ile bir ayrılma seviyesi gibi hareket eder. Kum girişi, Orta Eosen boyunca artmıştır. Oligosen süresince, Hapt'ın bir parçasında olistostromlar meydana gelmiş, halbuki Asilah – Larache kumtaşı olarak adlandırılan siliklastik fliş birimi Hapt alt havzasının dışında birikmiştir. Daha sonra gelen türbidit formasyonu Geç Oligosen – Burdigalyen olarak yaşanmış ve böylelikle Numidiyen'in yanal bir fasiyesine karşılık gelmektedir [35].



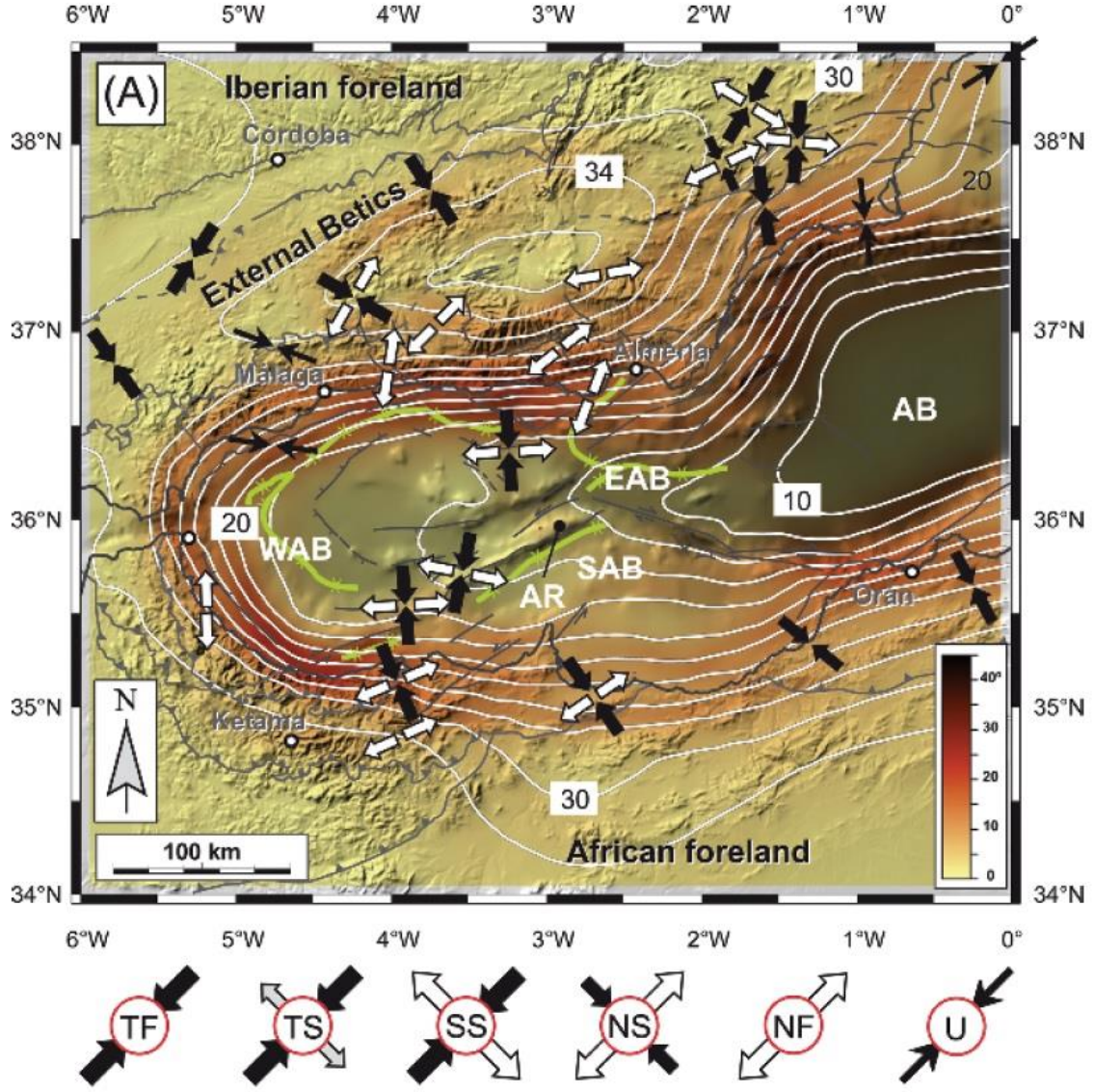
Şekil 3.4. Intra-rif bölgesinin stratigrafisi. A: Ketama Birimi. B: Loukkos Birimi. C: Tangier Birimi [35]'den Türkçeleştirilerek alınmıştır.

3.1.2. Tektonik ve Depremsellik

Oluşan ilk sıkışma fazı geç Eosen – Oligosen süresince Rif Dağlarında oluşan formasyona öncülük etmiş ve genel olarak Alboran dominasyonu içerisinde yoğunlaşmıştır. Erken Miyosen boyunca bu tektonik düzen K50°D'dan K90°D'ya eğilimli sol yanal ve K20°D'dan K160°D'ya eğilimli sağ yanal doğrultu atımlı faylarla karakterize olmuştur ve çarpışan sıkışma - gerilme eksenleriyle (σ_1) gelişen bir gerilme paternini kanıtlamaktadır [2]. Günümüzde, Betic – Rif bindirme kuşağı düşük bir sismik aktivitenin bulunduğu yayılan bir deformasyon bölgesi gibi görünmekte ve değişik tersiyer tektonik fazlardaki bindirmeler plakalar arası doğru bir deprem limitinin açıklanmasını engellemektedir. Kuzey Rif bölgesinde Afrika ve Avrasya kıtalarının birleşimi ve çarpışması, Kuzeydoğu Rif bölgesinde yüksek frekanslı bir sismik aktivite doğurmakta ve Al-hoceima depremi gibi (6.3M Şubat,2004) yüksek magnitüdü depremler oluşturmaktadır [2]. Rif Dağlarında 4 ana yapısal eğilim bulunmuştur.

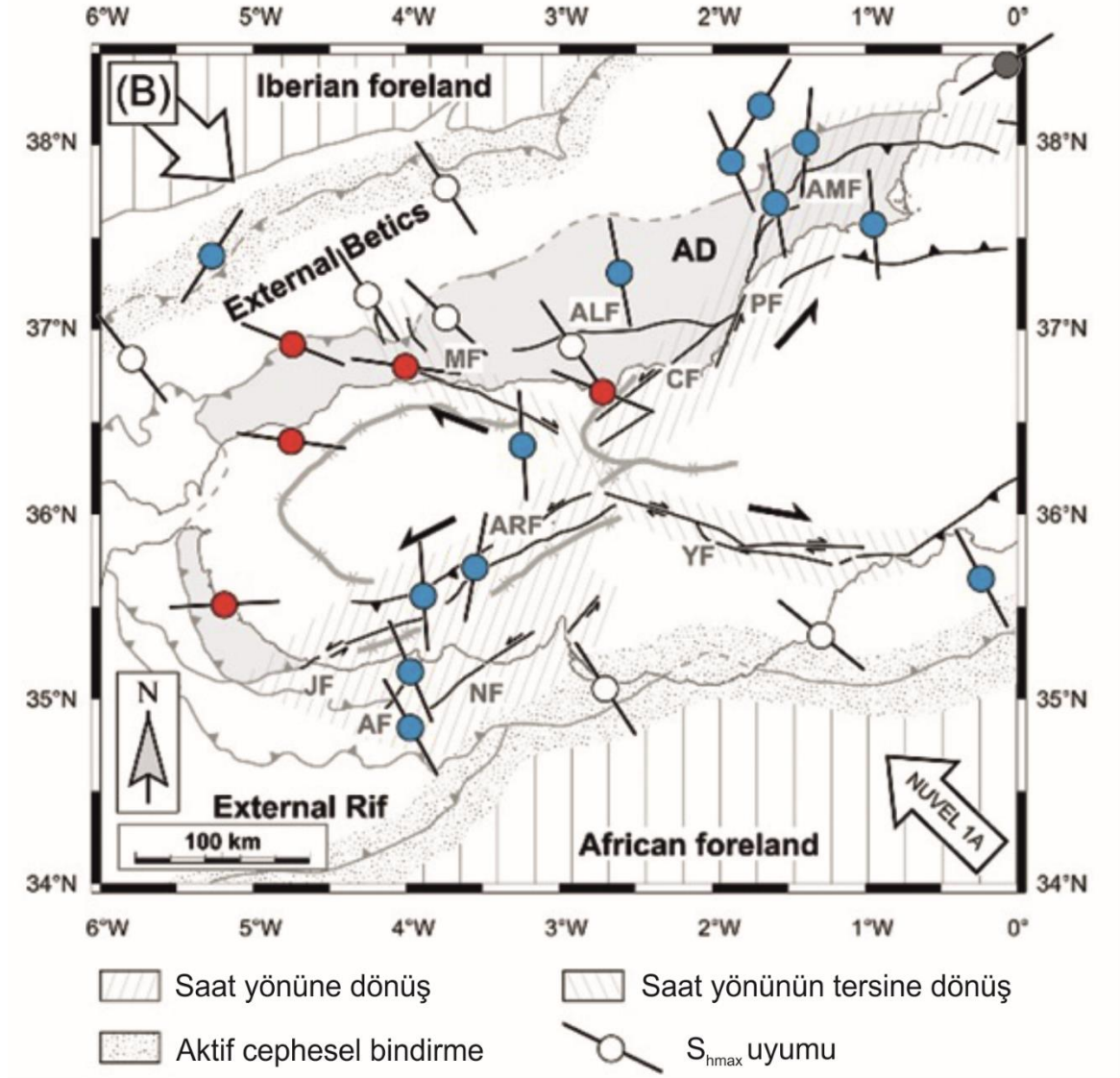
- I. KD – GB seti, Jebah ve Nekor fayları ile temsil edilmiştir.
- II. Topografya kontrollü yapıların bir K – G seti, Pliyosen ve Kuvaterner boyunca normal faylar ve ikincil doğrultu atımlı faylarla etki etmiştir.
- III. İç Bölge içerisinde KB – GD yönelimli yapılardan oluşan bir grup mevcuttur.
- IV. Rif Dağlarının kuzeybatı ve güneydoğu parçasına etki eden bir D – B seti. Rif bileşimi içerisinde, Jebah ve Nekor fayları Alboran makaslama zonundaki transfer fayları olarak çok büyük bir bölgesel öneme sahiptir [2].

[34] tarafından hazırlanan ve detaylı bir şekilde verilmiş olan günümüzde Gibraltar yayındaki gerilme alanları, Afrika – Avrasya plaka sınırının deformasyon biçimleri ve genel olarak bu bölgedeki yapısal unsurlarla mevcut fay hareketleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Günümüzde Gibraltar yayındaki gerilme alanı. (A): Gibraltar yayı içerisinde kıtasal kabuğun kalınlığının değişim gradyanları ve birleştirilmiş gerilme rejimi haritası. AB, Cezayir Havzası; AR, Alboran sırtı; EAB, Doğu Alboran havzası; SAB, Güney Alboran havzası; WAB, Batı Alboran havzası. NF: Normal faylar; NS: Doğrultu atım bileşenli ağırlıklı normal faylanma; SS: Doğrultu atım faylanması; TS: doğrultu atım bileşenli ağırlıklı bindirme faylanması; TF: Bindirme faylanması; U: Bilinmeyen gerilme rejimi. (B): Gibraltar yayının aktif fay yapısını gösteren tektonik taslağı, birleştirilmiş gerilme dönüşleri ve Afrika – Avrasya plaka sınırıyla parçalanmış deformasyonların önerilen biçimleri. SHmax Bölgesel gerilme alanına göre uyum ve gerilme dönüşleri (mavi çemberler, saat yönüne dönüş; kırmızı çemberler, saat yönünün tersine dönüş; beyaz, dönüş olmayan yerler). Büyük oklar NUVEL – 1A'ya göre karşılık gelen Afrika – Avrasya bağıl hareketi. AD, Alboran etki

alanı; ALF, Alpujarras fay zonu; AF, Alhoceima fay zonu; AMF, Alhama de Murcia fay zonu; ARF, Alboran sırtı fayı; CD, Carboneras fayı; JF, El – Jebha fayı; MF, Maro – Nerja fay zonu; NF, Nekor fayı; OF, Palomares fayı; YF, Yusuf fayı (A. Chalouan et al. [35]'den alınmıştır).



Şekil 3.5. (devam ediyor)(A. Chalouan et al. [35]'den alınmıştır).

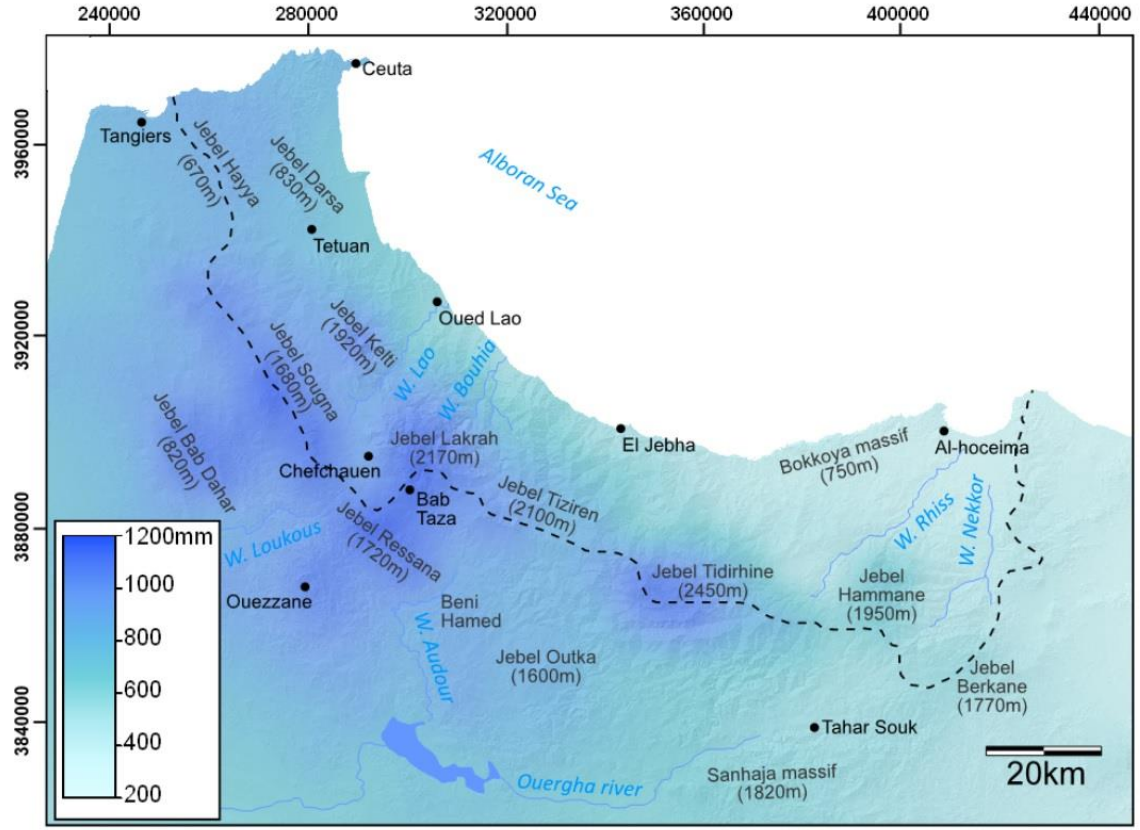
3.1.3. Jeomorfoloji

Merkez Rif Dağlarında yerel rölyef genel olarak, bir bölgede bulunan en yüksek zirvedeki en büyük eğim ile vadi tabanı arasındaki yükseklik farkı olarak belirtilmiş ve arazi üzerindeki maksimum parçalanmanın açıklandığı bir parametre olarak tanımlanmıştır [2]. Bölgenin en yüksek noktası olan Tidghine 2456 m yüksekliktedir.

Bölgenin kuzeydoğu tarafında topoğrafik yükseklik değerleri fazlayken, güneybatı tarafına inildikçe bu değerler azalmaktadır. Aynı şekilde eğim değerlerinde bir karşılaştırma yapıldığında, Atlantik kesiminde Akdeniz kesimine göre eğimlerin daha düşük olduğu görülmüştür. Ortalama eğim açıları topoğrafik yükseklik ile doğru orantılı olarak kuzeydoğu tarafında daha büyüktür ve 30° civarındadır. Güneydoğu tarafına gidildikçe bu değer azalmaktadır [2]. Çalışma sahasında yüksek enerjili akarsular mevcuttur. Bölge genel olarak iyi bir şekilde drene olmuştur. Fliş birimlerindeki drenaj ağı içerisinde vadilerden, kuzeyde Akdeniz'e doğru bir akış mevcuttur. Akiferler genel olarak, suyun süzülerek çatlaklara dolduğu yerlerde kumtaşı tabakalarındadır [32]. Merkez Rif Bölgesinde bulunan heyelanların, Tisirene levha sıkışmasının tamamen incelendiği bölgelerde bulunduğu ve düşük bir pasif yüzey basıncı belirttiği görülmüştür. Ayrıca bu heyelanlar, temiz düz yüzeyleri, önceden meydana gelmiş yenilme yüzeyleri ve zayıf mekanik karakteristikleri ile geçirimsiz temel üzerindedir [32].

3.1.4. İklim

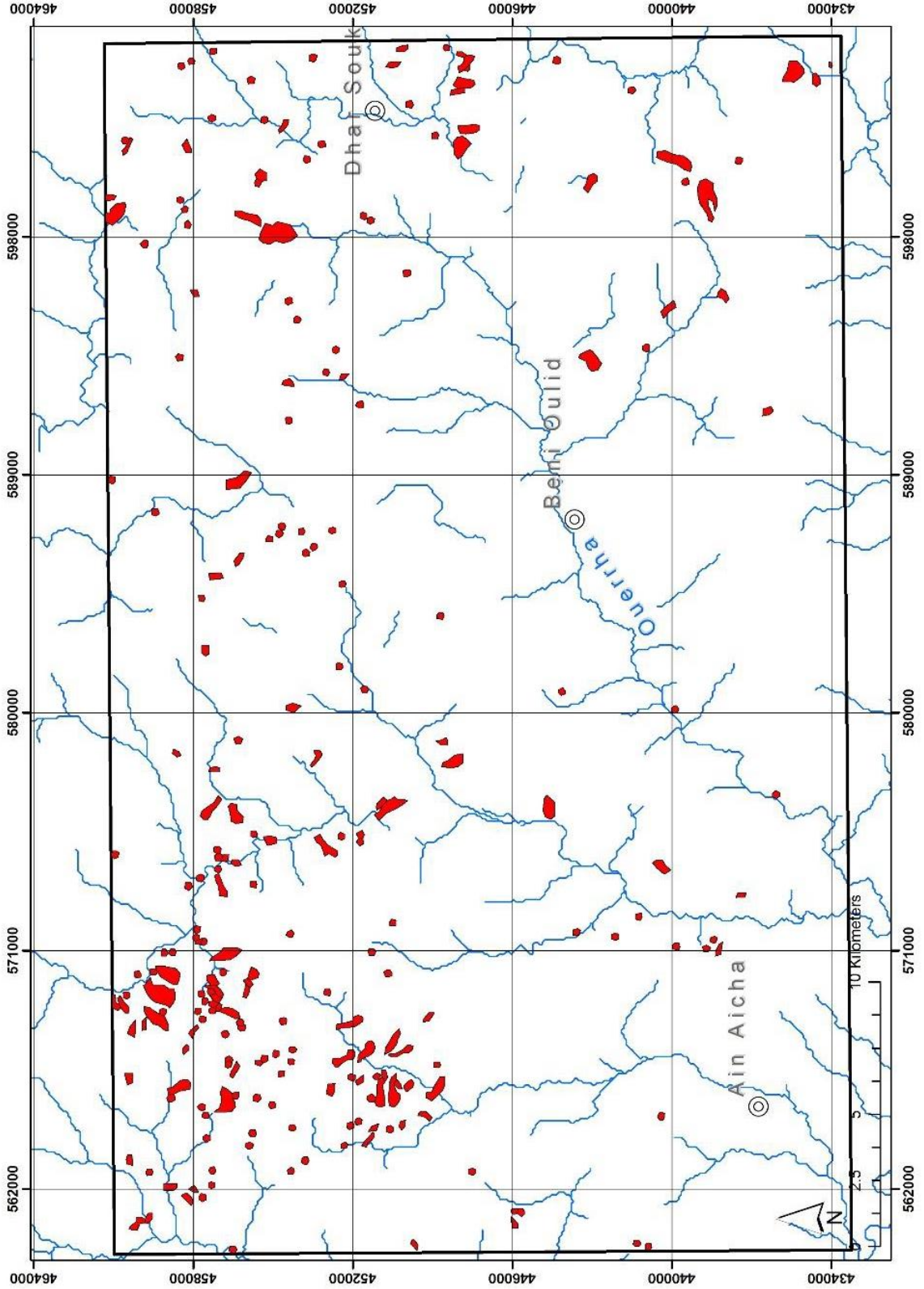
Günümüzde Rif Dağları Atlantik ve Akdeniz ikliminin etkisi altındadır. Okyanus etkisiyle birlikte bulutlar kuzeyden kuzeybatıya doğru hareket eder ve orografik yağışlar bölgede etkili olur. Bölge içerisinde yağışların daha sık görüldüğü dönem Aralık – Nisan dönemidir. Yaz dönemi ılımandır ve Ağustos ayında sıcaklık nadiren 30°C'yi aşar [32]. Daha güney bölgelere gidildikçe iklim karakteristiği değişmektedir. Dağlık bölgelerin iç kesimlerinde çok şiddetli yağışlar olmakta ve bu da yeraltısuyu depolama potansiyeline çok önemli bir katkı yapmaktadır. Ortalama yıllık yağış değerleri 300 - 400 mm/yıl seviyelerindedir. Şekil 3.6'da [2] tarafından verilmiş olan Rif Dağları ve çevresinin yıllık yağış dağılım haritası verilmiştir. Lokal olarak bazı bölgelerde bu değerler 2100 mm/yıl seviyelerine ulaşmakta ve genel olarak sonbahar – kış aylarında yoğunlaşmaktadır [1].



Şekil 3.6. Rif Dağları ve çevresinin yağış dağılımı [2].

4. HEYELAN ENVANTERİ

Bu bölüm içerisinde, tez çalışması kapsamında genel heyelan kavramı, sınıflaması, uzman görüşe dayalı olarak gerçekleştirilen heyelan duyarlılık analizleri ile mevcut heyelanların konumsal doğrulamalarını yapabilmek amacıyla oluşturulmuş heyelan envanteri verilmektedir. Literatürde, heyelan tanımlamasıyla ilgili birçok araştırmacı tarafından yapılmış tanımlamalar mevcut olsa da, Cruden and Varnes [37] tarafından yapılan tanımlama, genel olarak kabul görmektedir. Yapmış oldukları bu tanımlamaya göre heyelan, bir yamaçtaki kaya, toprak ve moloz türü malzemenin yerçekimi etkisi ile aşağı yönlü hareketi olarak tanımlanmaktadır [37]. Ayrıca yine Cruden and Varnes [38] yapmış oldukları heyelan sınıflamasıyla dünya genelinde kabul görmüşlerdir. Tez çalışması kapsamında yapılan bu sınıflama (Çizelge 4.1) dikkate alınmıştır. Bu sınıflama sistemi heyelanlardaki hareket ve malzeme türünü dikkate almaktadır. Gelecekte gelişmesi beklenen kütle hareketlerinin kestiriminin yapılabilmesi amacıyla gerçekleştirilecek çalışmaların temelini, eski ve halen aktivitesini sürdüren duraysızlıkların gözlenen hazırlayıcı faktörlerle birlikte haritalanması ve envanterinin çıkarılması oluşturur [39]. Heyelan envanteri, bir bölgedeki heyelanların konumu, türü, aktivitesi ve fiziksel özellikleri gibi konulara ilişkin bilgileri içeren veri olarak tanımlanmaktadır [40]. Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde yapılacak ilk aşama, geçmişte olmuş heyelanlar hakkında bilgi edinmektir. Gelecekte olabilecek heyelanların geçmişte olmuş heyelanlarla benzer koşullar altında gerçekleşebileceği varsayılmaktadır [41-42]. Çalışılan bölge, söz konusu doğal tehlike açısından daha önce az çalışıldığı için, heyelan envanter haritalaması çok sınırlı veri kaynaklarıyla yürütülmüştür. Veri eksikliğinden kaynaklanan belirsizliklerden dolayı, Rif Dağları bölgesinin heyelan tehlike ve duyarlılık haritalaması söz konusu olduğunda, özellikle uzman görüşe dayalı olarak uygulanan sistemler çalışma sahası açısından daha uygun hale gelmiştir. Bu amaçla tez çalışması kapsamında, inceleme alanına ait Google Earth uydu görüntüleri incelenmiş, yerinde arazi gözlemleri yapılmış ve mevcut literatürde Rouai ve Jaaidi [1] ile Fonseca [2]'da verilen envanter haritalarından yararlanılmıştır. Bunun sonucunda çalışma alanında toplam 323 adet heyelan belirlenmiş ve sahanın heyelan envanter haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Oluşturulan envanter haritası, bu veri kaynakları kullanılarak uzman görüş ile oluşturulan modellerin yersel doğrulamasını yapabilmek için kullanılmıştır.

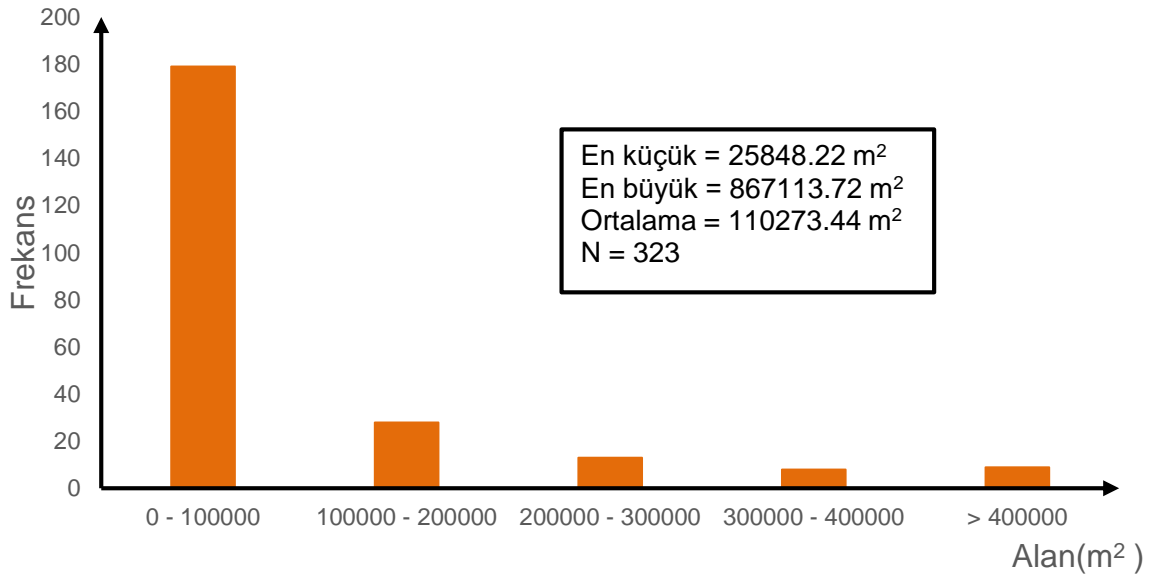


Şekil 4.1. Çalışma alanı içerisindeki heyelanların mekânsal dağılımları [1-2].

Çizelge 4.1. Varnes [38] heyelan sınıflaması.

Hareketin Türü	Malzemenin Türü		
	Kaya	Toprak	
		İri Taneli	İnce Taneli
Düşme	Kaya Düşmesi	Moloz Düşmesi	Toprak Düşmesi
Devrilme	Kaya Devrilmesi	Moloz Devrilmesi	Toprak Devrilmesi
Kayma	Dairesel	Kaya Akması	Moloz Kayması
	Ötelenmeli	Kaya Yayılması	Moloz Yayılması
Yayıma	Kaya Akması	Moloz Akması	Toprak Akması
Akma	Derin Krip	Toprak Krip	
Karmaşık	Genellikle iki veya daha fazla türün birarada oluşturduğu heyelanlardır.		

Çalışma alanında meydana gelen heyelanların boyutlarına bakıldığında, en küçük heyelan alanı 25848.22 m² iken en büyük heyelan alanı 867113.72 m²'dir. Belirlenen heyelanların alansal dağılımları Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2. Çalışma alanındaki heyelanların alansal dağılımları.

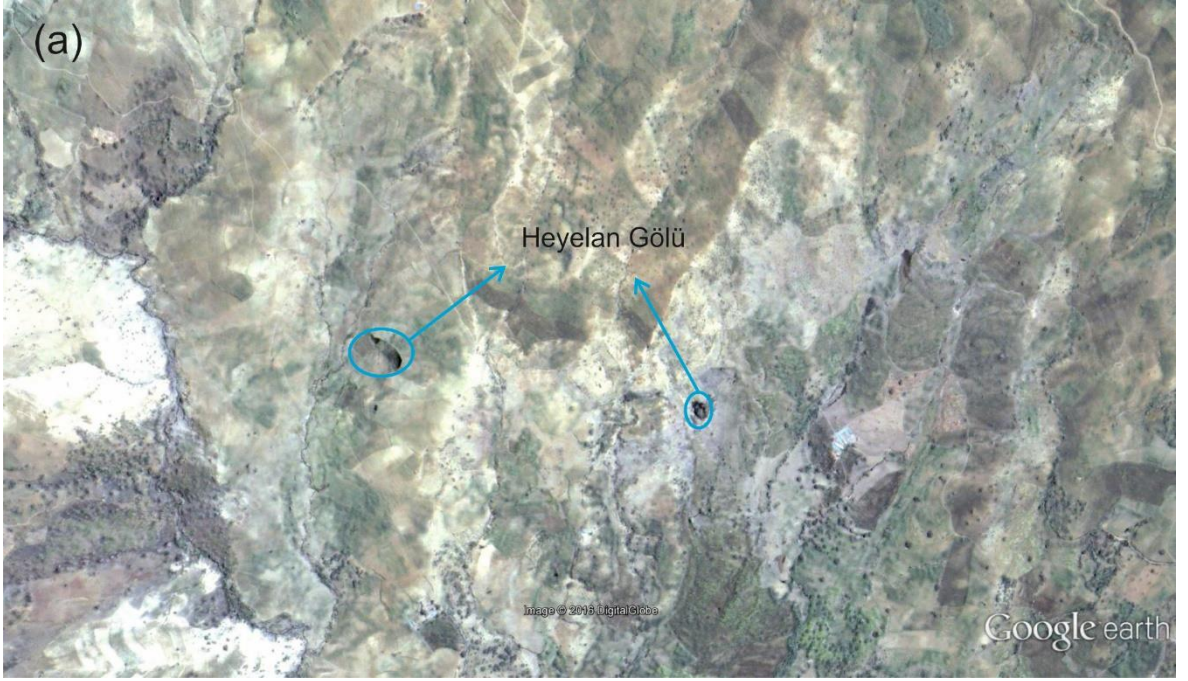
Yapılan arazi incelemeleri sonucunda, bölgede haritalanan heyelanların yer yer sığ kaymalar olsa da genellikle derin dairesel toprak kaymaları şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma alanı içerisinde bulunan Taounate bölgesinde meydana gelen heyelanlara ilişkin yapılan arazi çalışmalarına ait örnek fotoğraflar Şekil 4.3'de verilmiştir. Ayrıca tez çalışması kapsamında Taounate bölgesinin içinde kalan farklı iki bölgeye ait Google Earth uydu görüntüleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.



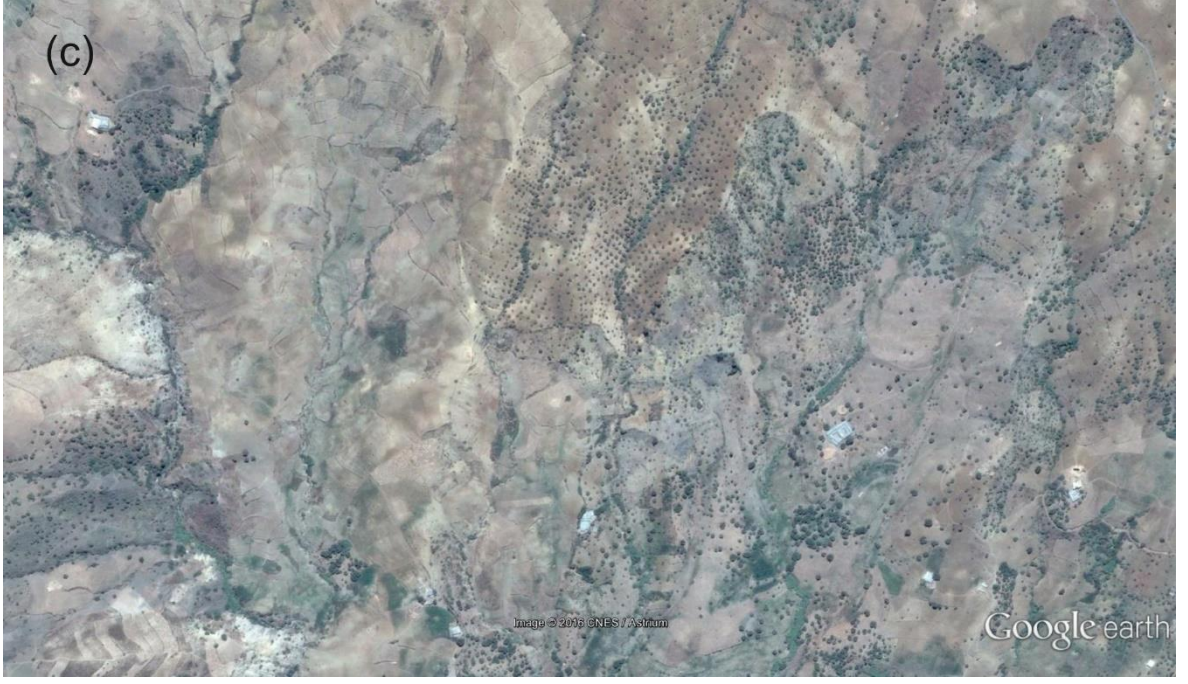
Şekil 4.3. Taounate bölgesinde meydana gelen heyelanlara ait örnek fotoğraflar.



Şekil 4.3. (devam ediyor)



Şekil 4.4. (a,b,c,d). Taounate bölgesinde meydana gelen heyelanların (a) 2002, (b) 2006, (c) 2013, (d) 2016 tarihlerine ait uydu görüntüleri.



Şekil 4.4. (devam ediyor)

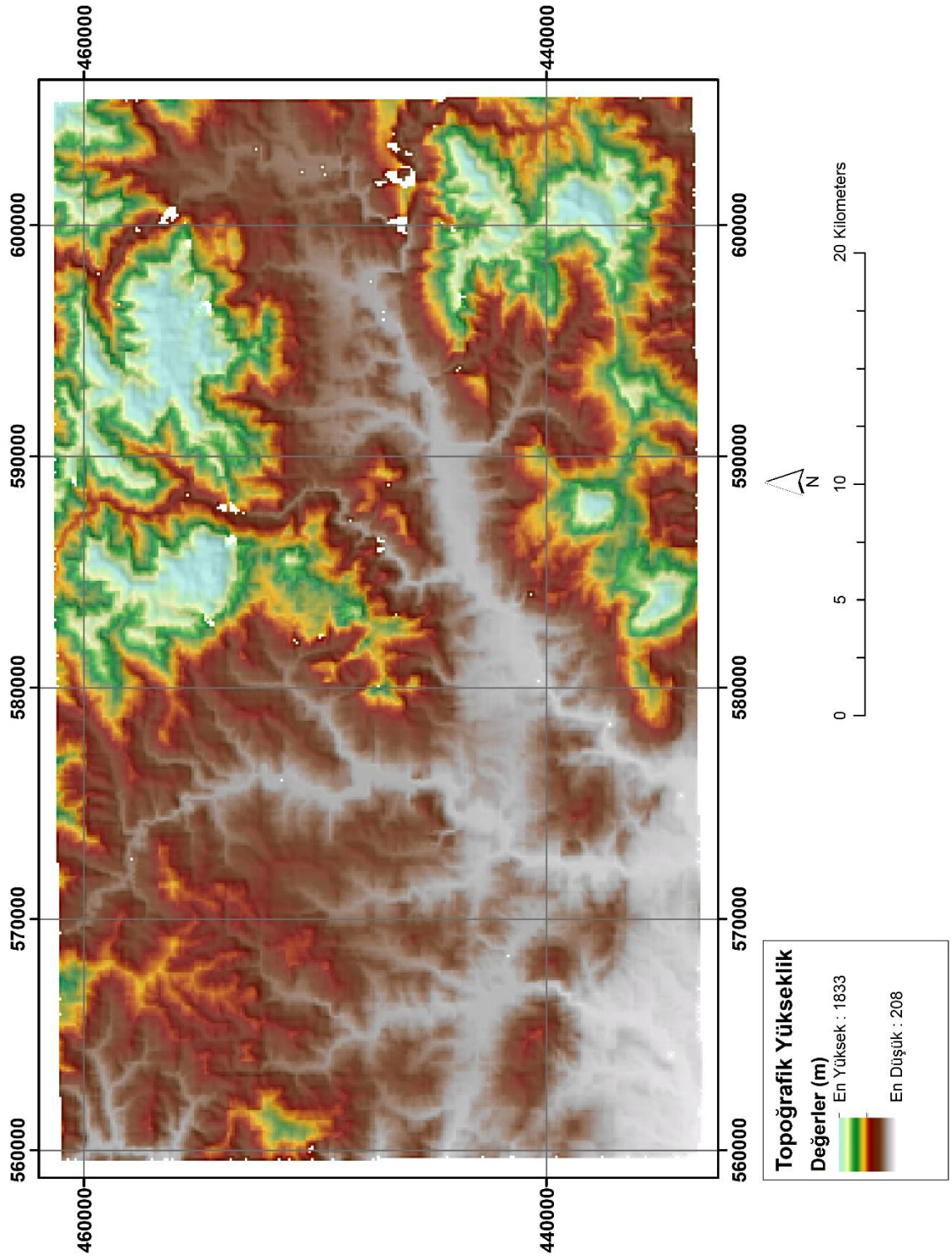


Şekil 4.5. (a,b,c,d) Taounate bölgesinde meydana gelen heyelanların (a) 2002, (b) 2006, (c) 2013, (d) 2016 tarihlerine ait uydu görüntüleri.

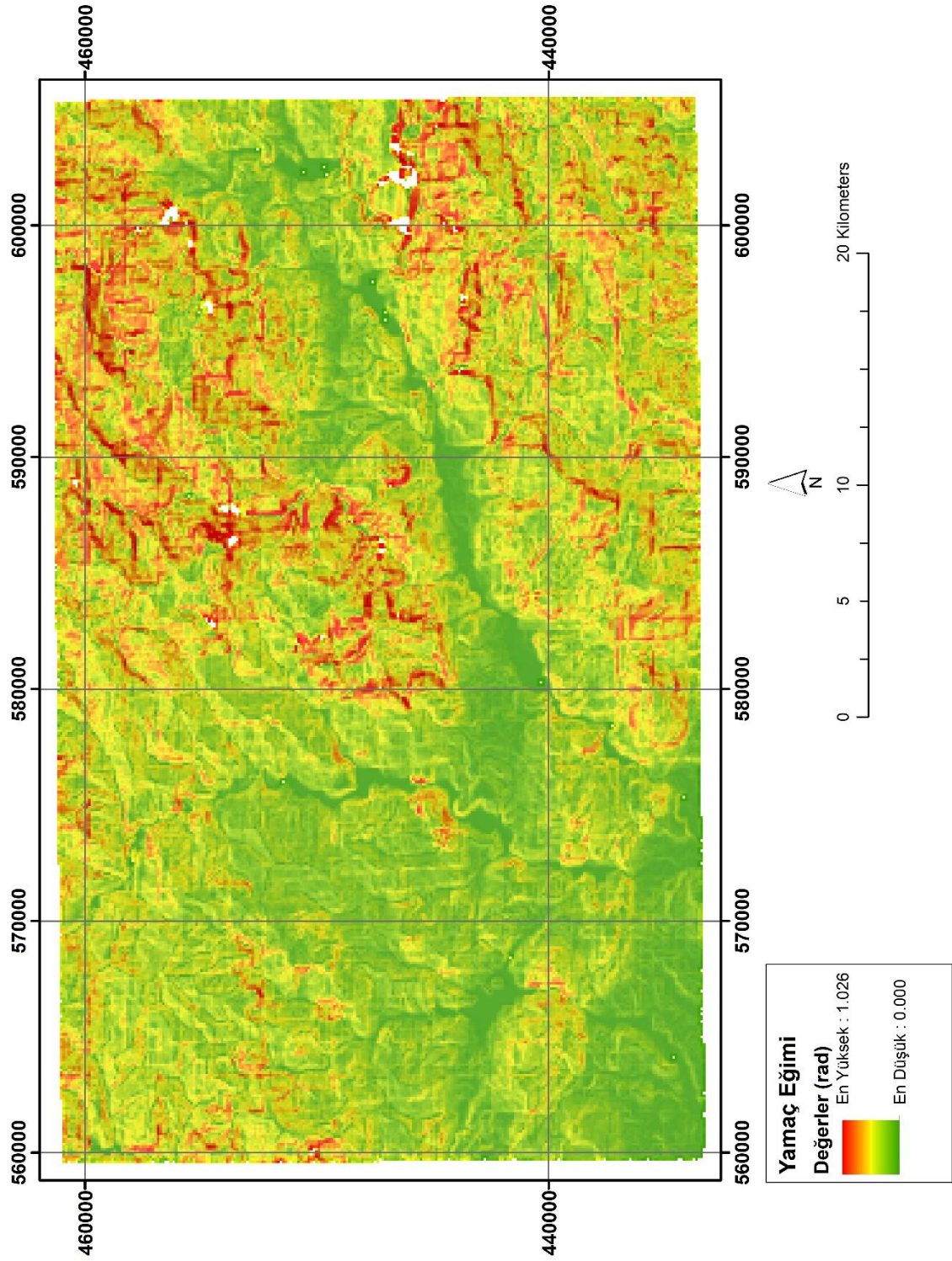


Şekil 4.5. (devam ediyor)

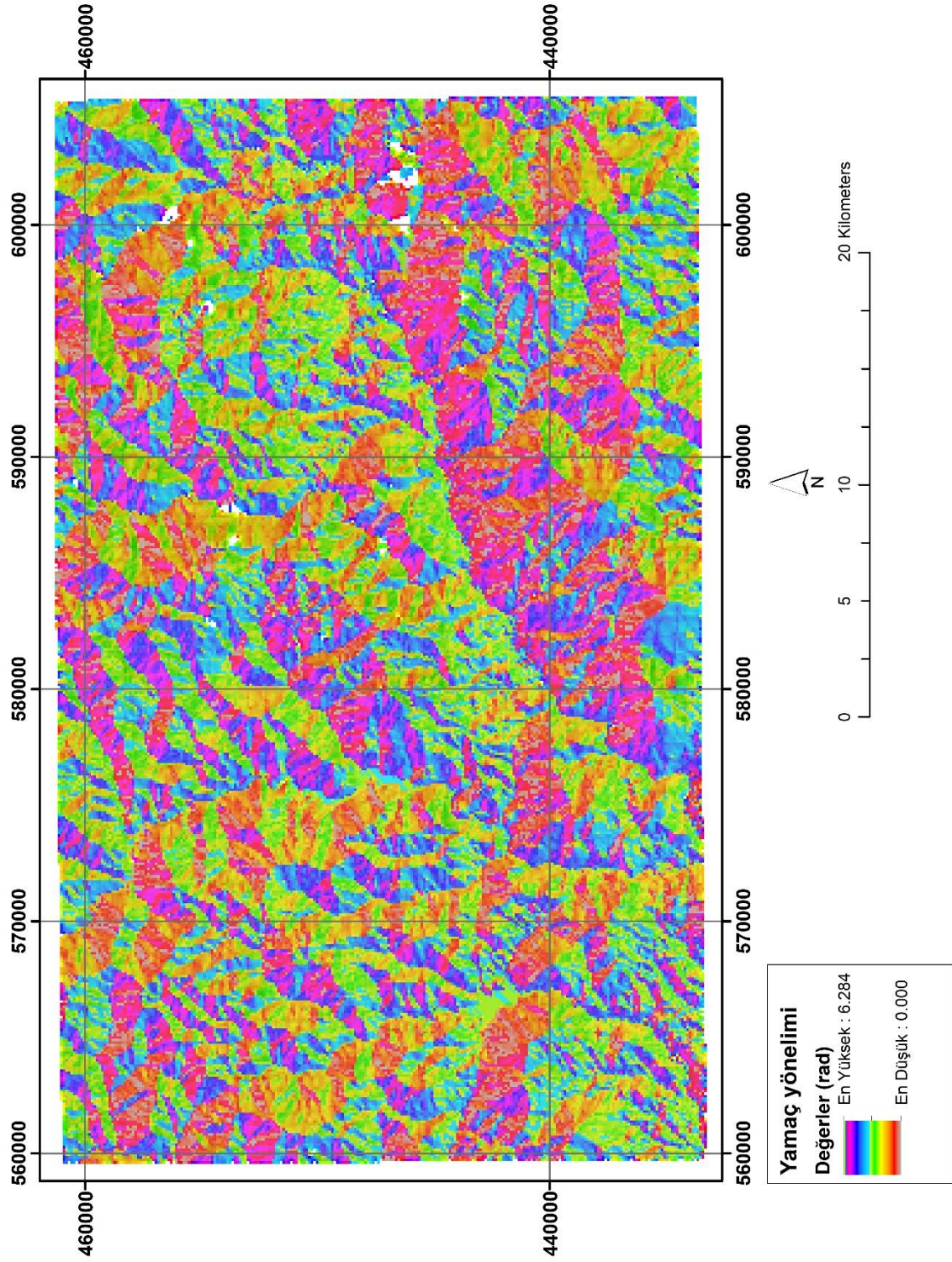
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen heyelan duyarlılık analizi çalışmaları literatürde çok büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde heyelan duyarlılık analizleri veri temelli bir takım yöntemlerle uygulanabildiği gibi, uzman görüşe dayalı sistemler kullanılarak da uygulanabilmektedir. Özellikle son dönemlerde, uzman görüşe dayalı sistemlerin gelecekte sürdürülebilir olması ve daha doğru sonuçlar vermesi nedeniyle bu tarz sistemlerin heyelan duyarlılık analizi uygulamalarında kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Tez kapsamında uygulanan katlı FIS yöntemi de uzman görüşe dayalı bir sistemdir. Bu sistemler uygulanırken kullanılan birçok hazırlayıcı faktör mevcuttur. Bu faktörler, uzmanın çalıştığı alan açısından bölgeye en fazla etki ettiğini düşündüğü hazırlayıcı faktörleri seçmesi ile sisteme yerleştirilir. Uzman bu faktörleri, gerek yapmış olduğu arazi gözlemleri, gerek literatür incelemeleri ve uydu görüntülerini kullanarak belirleyebilir. Bu doğrultuda yürütülen tez çalışmasında 11 adet hazırlayıcı faktör; topoğrafik yükseklik (m) (Şekil 4.6), yamaç eğimi (rad) (Şekil 4.7), yamaç yönelimi (rad) (Şekil 4.8), plan yamaç eğriselliği (Şekil 4.9), profil yamaç eğriselliği (Şekil 4.10), yakınsaklık indeksi (Şekil 4.11), havza alanı, topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) (Şekil 4.12), Sediman taşıma kapasite indeksi (LS) (Şekil 4.13), drenaja olan uzaklık (m) (Şekil 4.14) ve litoloji olarak uzman tarafından seçilmiş ve haritaları oluşturulmuştur. Aynı zamanda belirlenen bu hazırlayıcı faktörlerin arasındaki korelasyonların koşullu olasılık yaklaşımı ile değerlendirmesi yapılmıştır (Çizelge 4.2). Ayrıca genel olarak bir fikir vermesi adına tez çalışması kapsamında uzman tarafından dikkate alınmış olan tüm hazırlayıcı faktörlerin tanımlayıcı istatistikleri Çizelge 4.3'te sunulmaktadır.



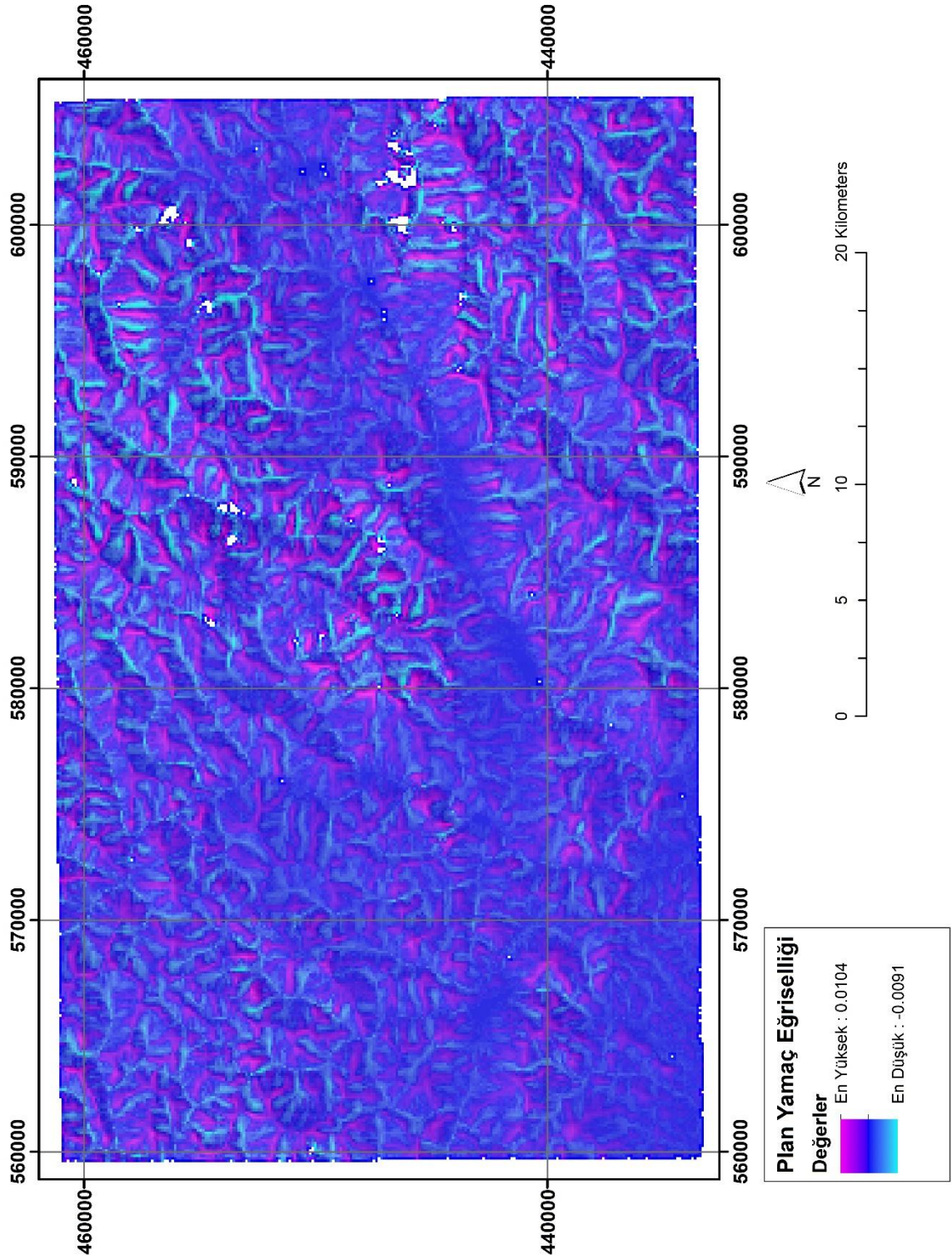
Şekil 4.6. Çalışma alanının topoğrafik yükseklik haritası.



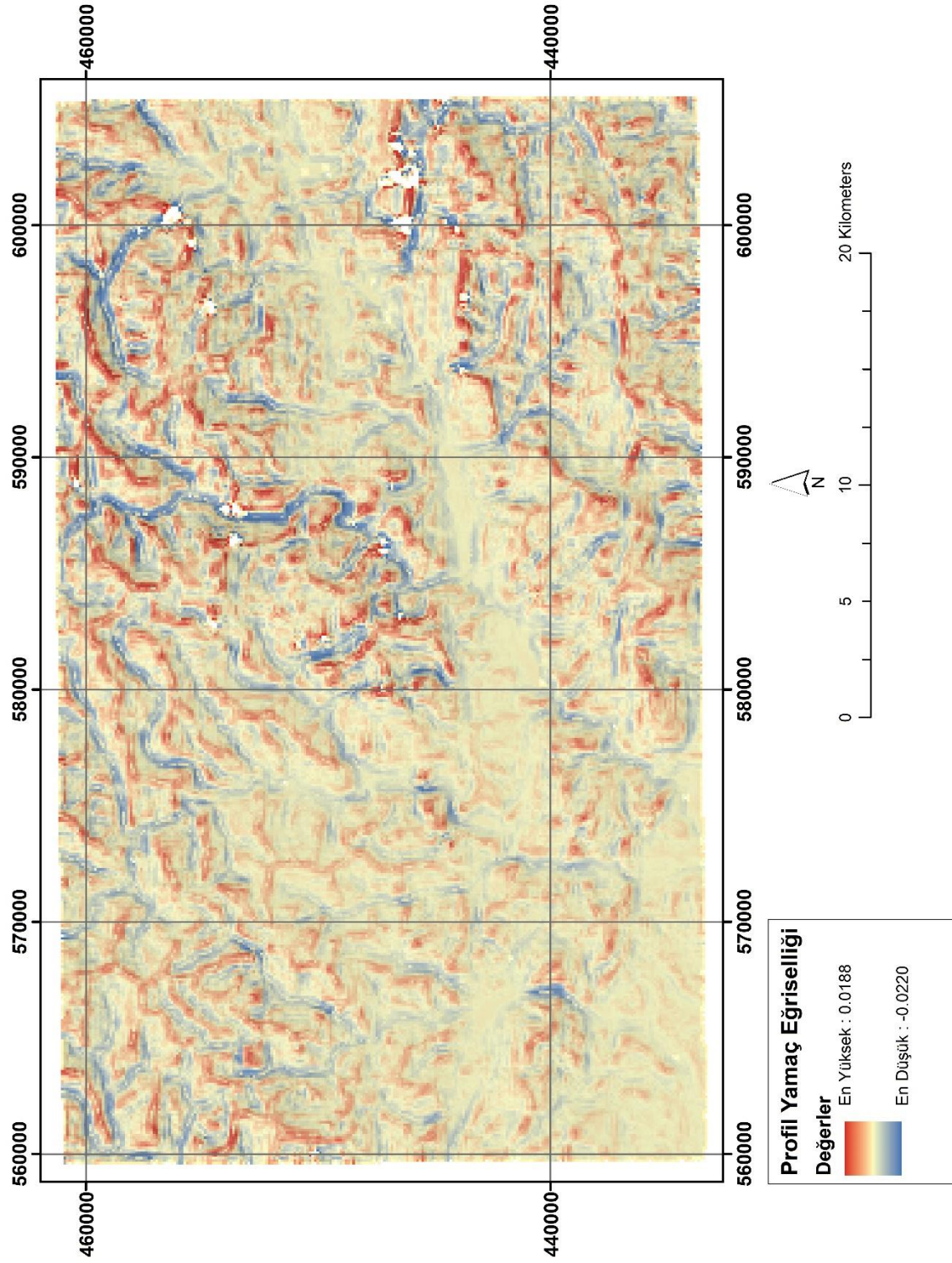
Şekil 4.7. Çalışma alanının yamaç eğimi haritası.



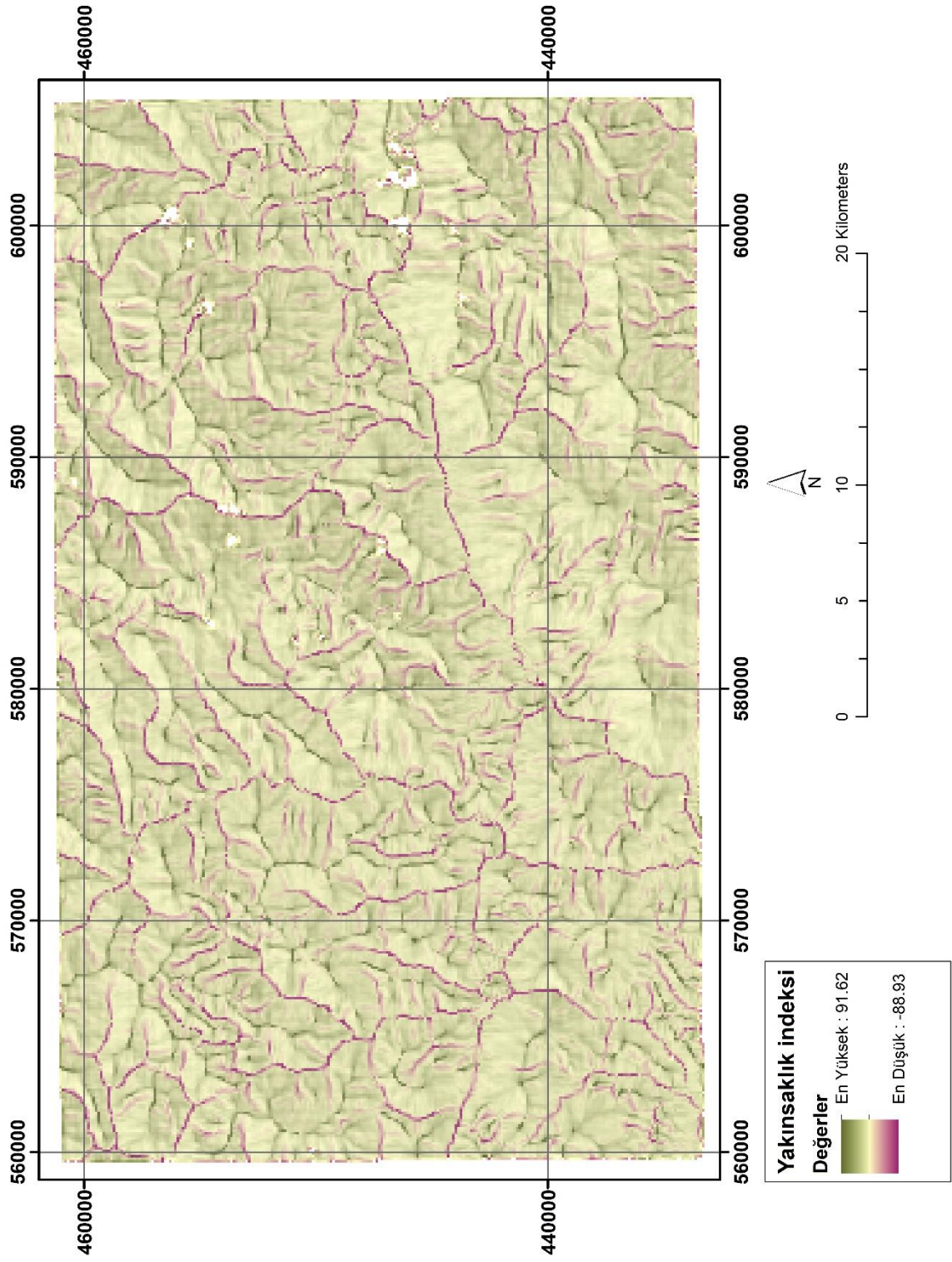
Şekil 4.8. Çalışma alanının yamaç yönelimi haritası.



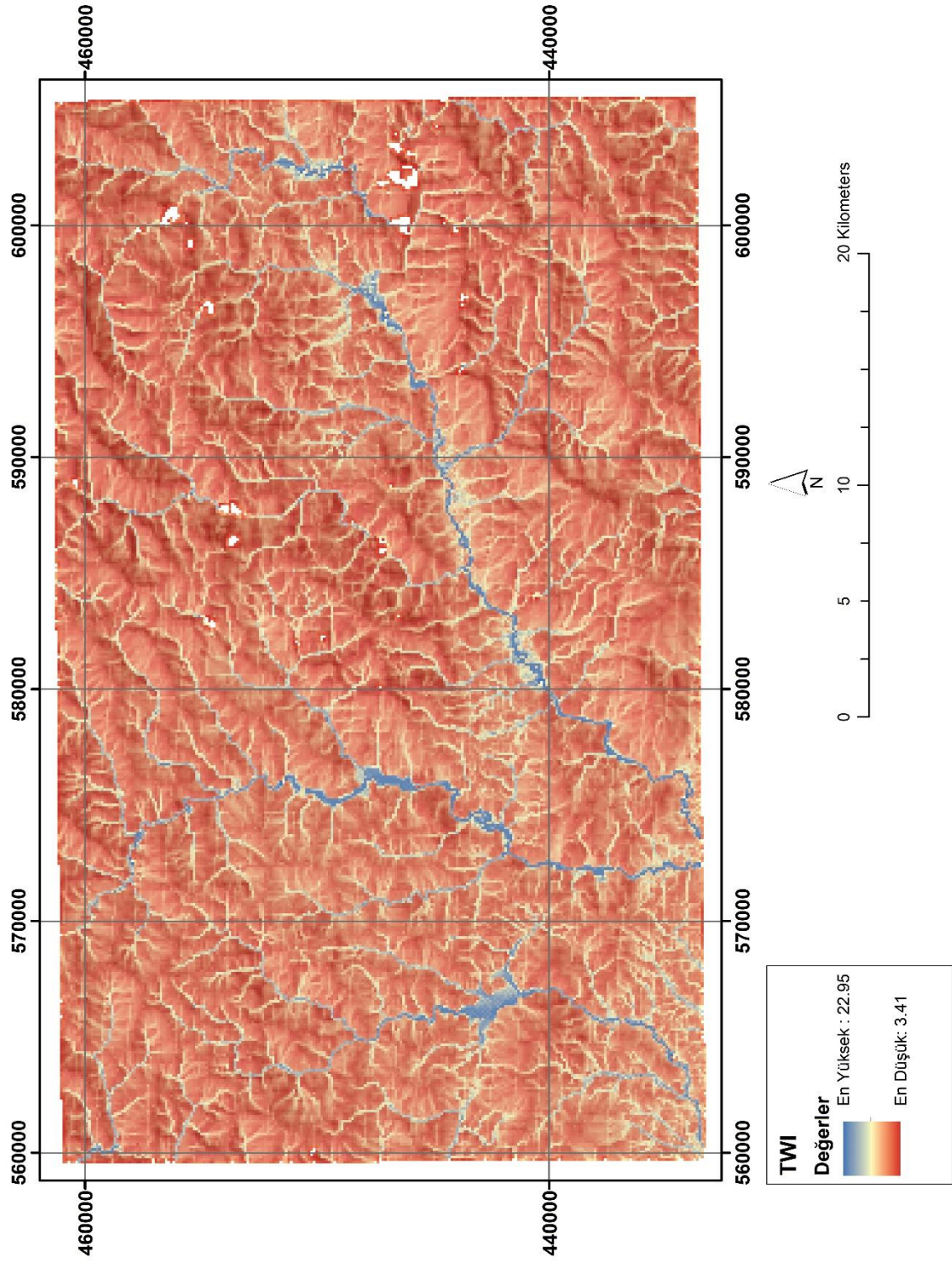
Şekil 4.9. Çalışma alanının plan yamaç eğriselliği haritası.



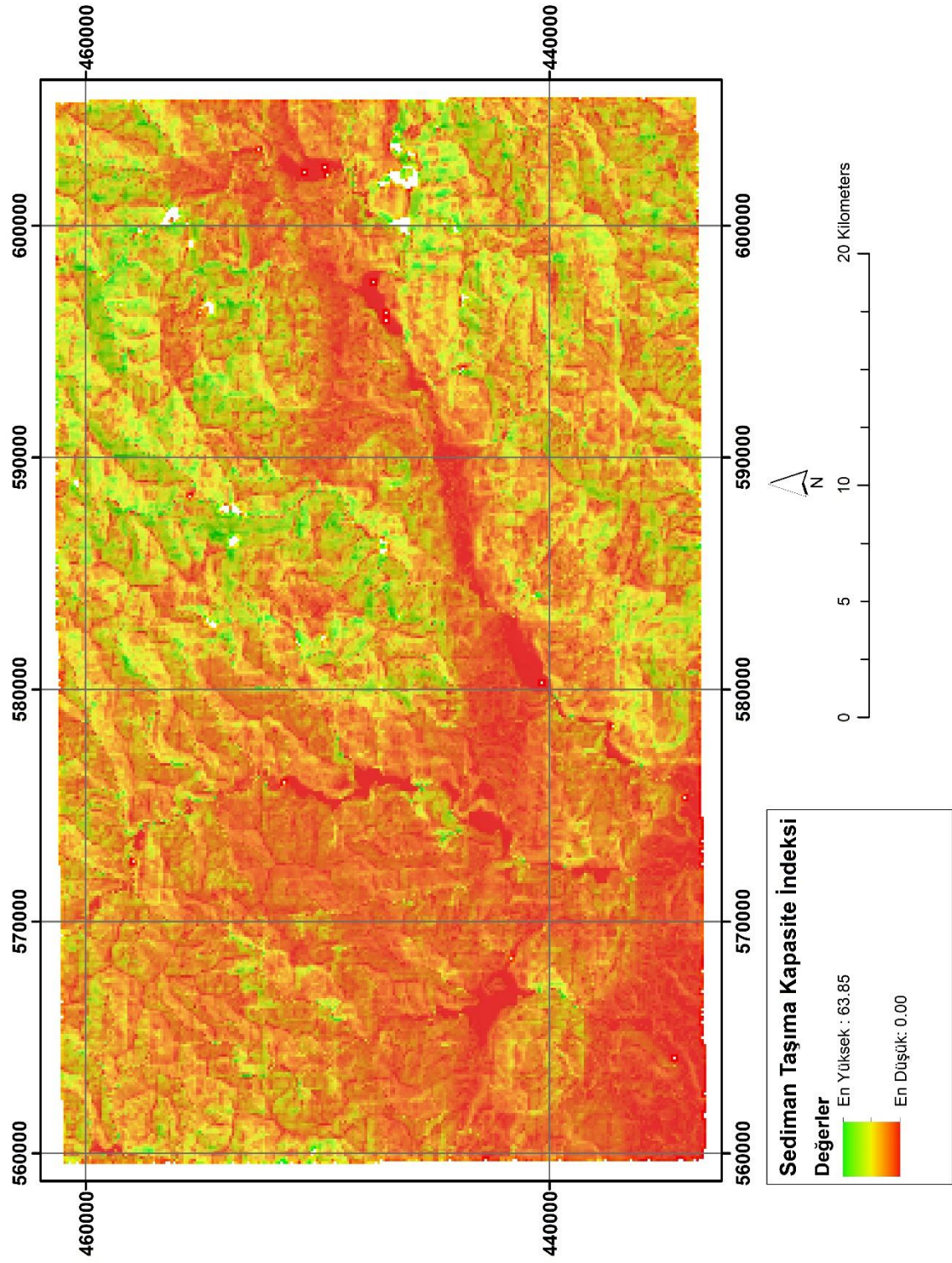
Şekil 4.10. Çalışma alanının profil yamaç eğriselliği haritası.



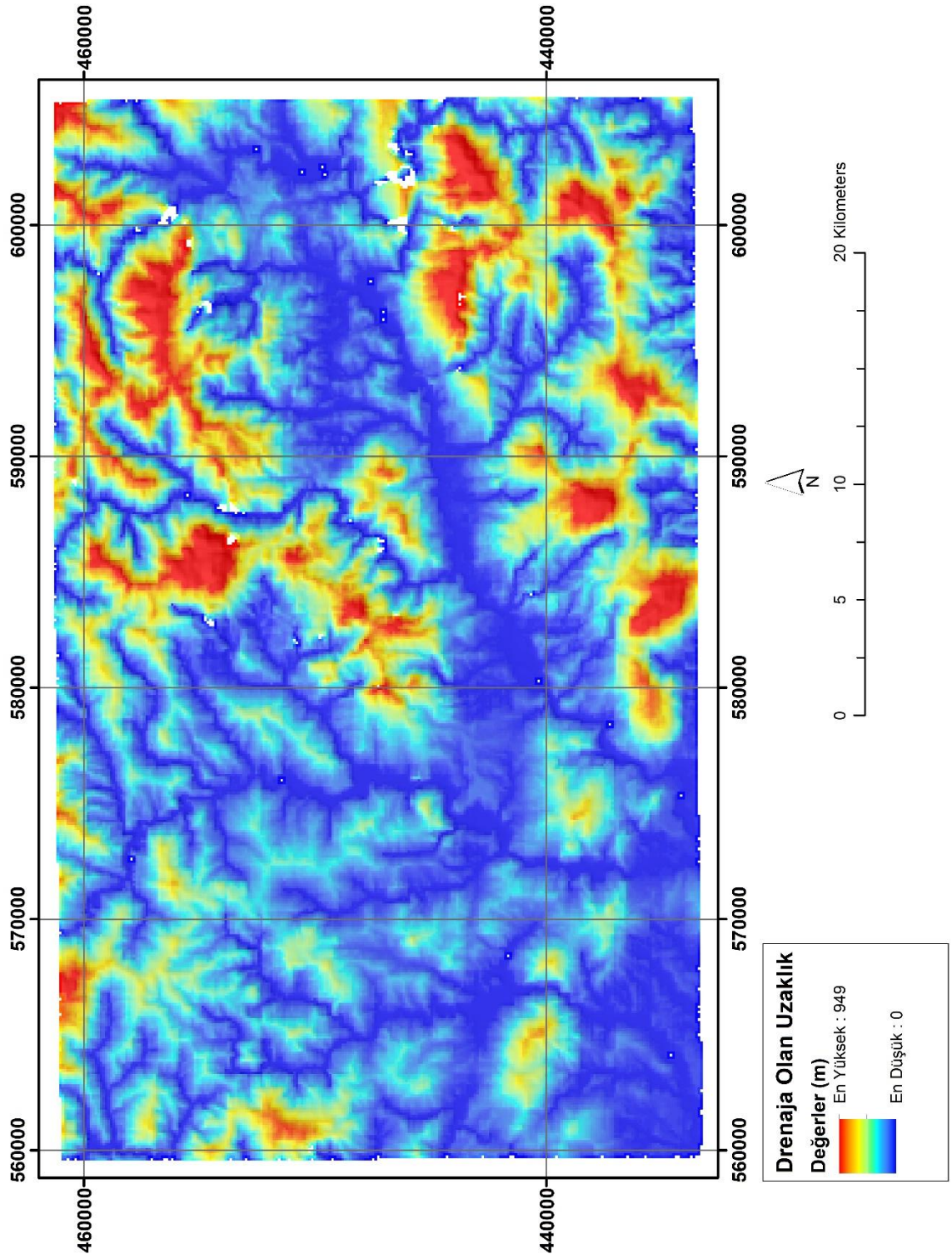
Şekil 4.11. Çalışma sahasının yakınsaklık indeksi haritası.



Şekil 4.12. Çalışma alanının topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) haritası.



Şekil 4.13. Çalışma alanının sediman taşıma kapasite indeksi (LS) haritası.



Şekil 4.14. Çalışma alanının drenaja olan uzaklık haritası.

Çizelge 4.2. Tez sahası içerisinde haritalanan heyelanlar ile değerlendirilen hazırlayıcı faktörler arasındaki korelasyonların incelenmesi; koşullu olasılık yaklaşımı.

Topoğrafik Yükseklik (m)	Piksel sayısı	Heyelanlı piksel	P(A/B _i)	P(B _i)	P(A)
208 - 468	31206	90	0.002884	0.199526	0.000575
468 - 606	31150	232	0.007448	0.199168	0.001483
606 - 778	31482	359	0.011403	0.201290	0.002295
778 - 1034	31333	217	0.006926	0.200338	0.001387
1034 - 1833	31230	168	0.005379	0.199679	0.001074
Yamaç eğimi (rad)					
0.000 - 0.137	30083	116	0.003856	0.192345	0.000742
0.137 - 0.225	31934	229	0.007171	0.204180	0.001464
0.225 - 0.314	31944	267	0.008358	0.204244	0.001707
0.314 - 0.427	31390	233	0.007423	0.200702	0.001490
0.427 - 1.026	31050	221	0.007118	0.198528	0.001413
Yamaç Yönelimi (rad)					
0.000 - 1.552	29942	270	0.009017	0.191444	0.001726
1.552 - 2.784	32156	279	0.008676	0.205600	0.001784
2.784 - 3.844	31503	184	0.005841	0.201425	0.001176
3.844 - 5.051	31132	140	0.004497	0.199052	0.000895
5.051 - 6.284	31668	193	0.006094	0.202480	0.001234
Plan yamaç eğriselliği					
(-)0.0091 - (-)0.0008	28927	238	0.008228	0.184954	0.001522
(-)0.0008 - (-)0.0002	30030	226	0.007526	0.192006	0.001445
(-)0.0002 - 0.0003	37606	201	0.005345	0.240446	0.001285
0.0003 - 0.0010	31103	218	0.007009	0.198867	0.001394
0.0010 - 0.0188	28735	183	0.006369	0.183726	0.001170
Profil yamaç eğriselliği					
(-)0.0220 - (-)0.0010	27575	251	0.009102	0.176310	0.001605
(-)0.0010 - (-)0.0004	29373	192	0.006537	0.187806	0.001228
(-)0.0004 - 0.0001	36856	198	0.005372	0.235651	0.001266
0.0001 - 0.0009	35870	233	0.006496	0.229346	0.001490
0.0009 - 0.0188	26727	192	0.007184	0.170888	0.001228

Çizelge 4.2. (devam ediyor).

Yakınsaklık indeksi	Piksel sayısı	Heyelanlı piksel	P(A/B _i)	P(B _i)	P(A)
(-)88.93 - (-)6.09	29635	224	0.007559	0.189481	0.001432
(-)6.09 - (-)1.13	32366	256	0.007910	0.206942	0.001637
(-)1.13 - 2.41	35303	220	0.006232	0.225721	0.001407
2.41 - 6.66	29929	219	0.007317	0.191361	0.001400
6.66 - 91.62	29168	147	0.005040	0.186495	0.000940
Havza alanı (m2)					
<8100	2424	13	0.005363	0.015499	0.000083
8100 - 1227722	145687	992	0.006809	0.931497	0.006343
1227722 - 4886587	4022	26	0.006464	0.025716	0.000166
4886587 - 19522048	2287	25	0.010931	0.014623	0.000160
19522048 - 311011648	1981	10	0.005048	0.012666	0.000064
Topoğrafik nemlilik indeksi(TWI)					
3.41 - 5.63	30232	223	0.007376	0.193298	0.001426
5.63 - 6.32	32473	266	0.008191	0.207627	0.001701
6.32 - 7.16	32897	219	0.006657	0.210338	0.001400
7.16 - 8.54	30996	182	0.005872	0.198183	0.001164
8.54 - 22.95	29803	176	0.005905	0.190555	0.001125
Sediman taşıma kapasite indeksi					
0.00 - 2.25	30445	104	0.003416	0.194660	0.000665
2.25 - 4.26	32975	253	0.007672	0.210836	0.001618
4.26 - 6.51	32620	260	0.007971	0.208566	0.001662
6.51 - 9.51	30802	252	0.008181	0.196942	0.001611
9.51 - 63.85	29559	197	0.006665	0.188995	0.001260
Drenaja olan uzaklık (m)					
0 - 30	31113	170	0.005464	0.198931	0.001087
30 - 93	31661	243	0.007675	0.202435	0.001554
93 - 173	31258	259	0.008286	0.199858	0.001656
173 - 304	31189	214	0.006861	0.199417	0.001368
304 - 949	31180	180	0.005773	0.199359	0.001151

Çizelge 4.2. (devam ediyor).

Jeolojik birim; litolojik tanım	Piksel sayısı	Heyelanlı piksel	P(A/B _i)	P(B _i)	P(A)
Marn; Mesozoyik; Triyas; Alt, Orta ve Üst jura; Kretase; Alt Paleosen; Alt Eosen; Orta Eosen - Oligosen; Miyosen; marnları gruplanmış	41377	167	0.004036	0.251297	0.001014
Çamurtaşı; Mesozoyik; Kretase, Aptiyen - Albiyen; Üst Eosen	19695	142	0.007210	0.119614	0.000862
Konglomera; Miyosen	4078	14	0.003433	0.024767	0.000085
Alüvyon terasları; Kuvaterner	12162	46	0.003782	0.073864	0.000279
Marn ve kireçtaşı; Alt Liyas; Dogger; Alt, Orta, Üst Kretase marn ve kireçtaşları gruplanmış	32418	228	0.007033	0.196886	0.001385
Çakıltası ve silttaşı; Pleyistosen	7956	43	0.005405	0.048320	0.000261
Melanj; Üst Miyosen, Tortoniyen	18142	81	0.004465	0.110183	0.000492
Şist; Alt Jura, Liyas; Alt Kretase şistleri gruplanmış	15333	364	0.23740	0.093123	0.002211
Kumtaşı; Alt Kretase, Aptiyen - Albiyen; Alt Miyosen kumtaşları gruplanmış	4996	17	0.003403	0.003403	0.000103

Çizelge 4.3. Tez çalışması kapsamında verilen hazırlayıcı faktörlerin tanımlayıcı istatistikleri.

	N	Min.	Max.	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Çarpıklık	Std, Hata	Basıklık	Std, Hata
Topoğrafik Yükseklik	1409637	106	2439	739,79	420,839	177105,863	0,692	0,002	-0,45	0,004
Yamaç Eğimi	1409637	0	1033	0,22575	0,140703	0,02	0,662	0,002	0,203	0,004
Yamaç Yönelimi	1409637	0	6283	3,28087	1,825971	3,334	-0,09	0,002	-1,161	0,004
Plan Yamaç Eğriselliği	1409637	-0,01	0,011	0,00007	0,001003	0	0,097	0,002	2,296	0,004
Profil Yamaç Eğriselliği	1409637	-0,013	0,011	-0,00007	0,00101	0	0,058	0,002	2,764	0,004
Yakınsaklık İndeksi	1409637	98,657	98,773	0,00766	12,401446	153,796	-0,183	0,002	7,18	0,004
Havza Alanı	1409637	7225	2123433344	2652196,36	37900340,21	1,436E+15	30,703	0,002	1202,739	0,004
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	1409637	3,257	24979	7,64972	2,548726	6,496	2,113	0,002	5,666	0,004
Sediman Taşıma Kapasite İndeksi	1409637	0	102,808	4,47733	3,527382	12,442	1,693	0,002	8,965	0,004
Drenaja Olan Uzaklık	1409637	0	1006,379	131,73492	134,638125	18127,425	1,611	0,002	2,965	0,004

5. HEYELAN DUYARLILIK ANALİZLERİ

5.1. Hiyerarşik Bulanık Sistemler

Bölgesel heyelan duyarlılık haritalamasında kullanılan yöntemlerin, bilgi ve veri eksikliğinden kaynaklanan belirsizliklerini en aza indirerek gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edebilmek amacıyla duyarlılık çalışmalarında bulanık sistemlerin kullanımı yaygın hale gelmiştir. Bulanık sistemler, doğrusal olmayan modellerde, girdi ve çıktı örneklem uzayları arasında ilişki kurmak için bulanık küme teorisini kullanan, uzman bilgisi ile sözel olarak ifade edilebilen anlam çıkarma mekanizmalarıdır. Söz konusu sistemlerin; bulanık mantık araştırmaları içerisinde önemli bir yeri vardır; veri sınıflaması, regresyon analizleri, karar verme, optimizasyon ve otomatik kontrol sistemleri gibi çok çeşitli araştırma problemlerinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [43-45].

Bulanık sistemlerin gerçekleştirimi çok yüksek boyutlu girdi parametresi; örneklem uzayı içeren bazı problemler için yapılamayabilir. Diğer bir ifade ile bir kural tabanlı sistemin yüksek tahmin modellemesi, sonuç çıktısı sayısız faktör tarafından etkilendiğinde çok uğraştırıcıdır. Bu durum; çok büyük bir sayıda girdinin çok karmaşık bir kural tabanlı bulanık sistem içerisinde modellenmesi anlamına gelmektedir. “Boyutsallık Sorunu; Curse of Dimensionality” olarak adlandırılan bu problem bazı çalışmalarda hala araştırılmaktadır [46-47]. Bu problem beraberinde şu sorunları ortaya çıkarmaktadır: (i) kural üretme ve değerlendirme aşamaları çok karmaşık bir hal alır ve uzmanın bütün girdi parametrelerini ilişkilendirmesi için daha fazla bilgiye ihtiyacı olmalıdır. Aslında insan bilgisi, bu karmaşa içerisinde bulanık kuralları üretirken bütün bu ilişkileri anlama ve doğrulamada yetersiz olabilir. (ii) Bulanık kuralların toplam sayısı katlanarak artar (“u” ile ifade edilen bulanık kuralların sayısı, n girdi sayısı ve f_i i’nci girdinin bulanık setlerinin sayısı tam bir kural tabanlı sistemde Eşitlik (1) ile hesaplanmaktadır). (iii) Kural sayısındaki bu artış hem gerçek zamanlı sayısal performansta hem de bellek kullanımında muhakkak negatif etkiler yaratacaktır. (iv) Bu da yorumlanabilirlik ve bulanık çıkarsama işlemlerine zarar verecektir. Kural sağlama zorluğunun yanısıra, sistem davranışlarını test etmek ve bir örneği öğrenmek, uzman kişi için çok zor bir hale gelecektir.

$$u = \prod_{i=1}^n f_i$$

(1)

Boyutsallık sorununun üstesinden gelmek için, literatürde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bazı girdiler arasındaki fonksiyonel ilişkilerin çözümlenmesinde ve bu ilişkilerin kural üretmeden harici olarak sistem içerisine yerleştirilmesi toplam kural sayısını azaltacaktır [46]. Başka bir çözüm ise, mevcut kurallar ile kural sonuçları arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesidir [48]. “Duyusal birleştirme” olarak adlandırılan bir üçüncü yaklaşımda ise, birbirinden farklı değişkenler birleştirilerek orijinal girdi bilgisini kapsayan farklı girdileri yaratmaktadır [49]. Oluşturulan bu girdi, bulanık kurallar içerisinde bulunuyor olmalı ve bu bulanık kuralları basitleştirmelidir. Bu yaklaşımlar ile bağlantılı olarak, kural sayısındaki katlanarak artışın üstesinden gelmek ve bu kuralların herbirinin boyutsallığını azaltmak için “Hiyerarşik Bulanık Sistemler” (HFSs) önerilmiştir [50]. Bir HFS içerisinde, yüksek boyutlu girdi örneklem uzayı daha düşük boyutlu alt girdi örneklem uzaylarına ayrılır ve her alt girdi uzayı kısmi bir çözüm üretmek için bağımsız bir parça içerisinde (alt bulanık sistem olarak) değerlendirilir. Daha sonra bu kısmi çözümler, sonuç çıktısını hesaplarken hiyerarşik olarak sonradan gelen alt bulanık sistemler ile ortak çalışır. Bu alt bulanık sistemlerin hiyerarşik yapısını belirleyen bu iş birliği nasıl yapılır? Diğer bir deyişle, burada ifade edilen “yapı” kavramı, alt bulanık sistemlerin sayısı, bunların arasındaki iletişim ve orijinal girdiler gibi HFS modellemesine ilişkin özellikler ile ilişkilidir. [51]’da hiyerarşik yapılar, paralel, sıralı ve melez olarak sınıflandırılmıştır. Paralel yapı içerisinde orijinal girdiler, alt bulanık sistemlerin birinci katmanı ile bağlıdır ve bu alt bulanık sistemlerin çıktıları sonradan gelen katman veya katmanlar içerisinde kümelenmiştir. Sıralı HFS içerisinde orijinal girdiler, tek bir alt bulanık sistem içeren her katman boyunca dağılmıştır. İlk Karar, çıktıların küçük bir alt kümesi tarafından verilir ve diğer alt katmanlarda yer alan faktörlere bağlı olarak nihai karar elde edilene kadar ilk katmanda alınan bu karar üzerinde iyileştirmeler/değişiklikler gerçekleştirilir. Diğer bir ifade ile melez yapı, karmaşık problemlerin çözümleri için geliştirilen HFS’nin paralel ve sıralı türünün özel birleşimidir.

Mamdani tip hiyerarşik bulanık çıkarımanın geleneksel yaklaşımı kullanılarak yakın zamanda çok sayıda uygulama yapılmış [52-56], hiyerarşi içerisindeki her alt

bulanık sistem sırasıyla bulanıklaştırma, kural değerlendirme, bir araya getirme ve durulaştırma gibi bir takım anlamlandırma adımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Burada bir alt bulanık sistemde elde edilen katı değer, sonradan gelen sistemin girdisi olarak transfer edilir ve bu girdi, tekrardan bu bulanık sistem içerisinde bulanıklaştırılır. Her bir alt sistemde yapılan durulaştırma işlemi, sistemlerin katı bir değer olarak bulanık çıktıları genellemesine neden olmaktadır. Takip eden katmanlarda bu katı değerlerin yeniden bulanıklaştırılması bütün hiyerarşideki bulanıklık seviyesinde bir dejenerasyona yol açmaktadır. Her ne kadar HFS içerisinde tek sistemin tahmin kapasitesi korunuyor olsa da dejenerasyon problemi, hiyerarşik sistem davranışının tek sistem çözümlerinden farklı olmasına neden olur. Burada ifade edilen sorun “Durulaştırmadan Bağımsız Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemi” (DF – HFS), [57] ile oldukça indirgenmiştir. DF – HFS’ de, iç katmanlarda gereksiz yere tekrar eden durulaştırma adımları HFS çıkarım işleminden kaldırılmıştır. Bir araya getirme işlemi ile elde edilen bulanık çıktı bir sonraki alt bulanık sistemin doğrudan girdisi olarak kullanılmaktadır. Böylelikle önceki sistemden gelen bulanık değer için alt bulanık sistem içerisinde yeniden bulanıklaştırma işlemi yapılmaz. Geleneksel HFS çıkarımında yapılan bu değişiklik, tek sistem yaklaşım kabiliyetini, seçilen bulanık yapıdan, bulanık çıkarsama yöntemlerinden veya durulaştırma yöntemlerinden bağımsız olarak korumuş olur. Buradaki tek zorlayıcı husus, sistemin eşdeğer kurallarının sağlanması gerekliliğidir. Diğer bir deyişle, HFS kurallarının sistem davranışını tek sistem kurallarında olduğu gibi yönlendirmesi gerekir.

5.2. Heyelan Duyarlılık Haritalaması

Bulanık kural tabanlı sistemler tarafından heyelan duyarlılık haritalamasına ilişkin anlamlandırma yapabilmek adına 11 adet girdi parametresi tanımlanmıştır. Bu girdilerden biri olan litoloji, 10 adet kategorik değer sunar ve diğer 10 girdiden herbiri 5 bulanık küme ile tanımlanmıştır. Çizelgeler 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3 bu bulanık kümelerin sınırlarını ve fonksiyon parametrelerini göstermektedir. Bu parametreler sırasıyla ikizkenar yamuk ve üçgen üyelik fonksiyonlarını temsil etmek üzere; (a,b,c,d) ve (a,b,c) harfleri ile sembolize edilmiştir. Üyelik fonksiyonlarının tanımlanmasında üç farklı yaklaşım değerlendirilmiştir; daraltılmış fonksiyonlar, standart ve geniş fonksiyonlar. Üyelik fonksiyonlarının standart tanımlaması (Çizelge 5.1), bulanık kümelerin alan uzmanı tarafından tanımlanan aralık

değerlerine bağlı olarak, üyelik fonksiyonlarının orta noktalarına uyumlu olan merkez dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra dar ve geniş çözümlenmede (Çizelge 5.2 – 5.3), merkezlerin yeri değiştirilmiş ve üyelik fonksiyonlarını destekleyen alanlar sistem davranışları içerisindeki değişimlerden en az etkilenecek şekilde mümkün olduğunca minimize edilerek bulanık setin orta noktasını saptamak için küçültülmüş ve genişletilmiştir.

Çizelge 5.1. Katlı Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemi (Cascaded Hierarchical FIS) kullanılarak geliştirilen heyelan duyarlılık modellerinde değerlendirilen parametreler için uzman görüşe bağlı olarak tanımlanan standart üyelik fonksiyonları.

Sözel Değişken Girdi İsmi	Çok Düşük (kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)			Düşük (Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Orta(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Yüksek(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Çok Yüksek(kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)		
	a=b	c	d	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c=d
Topoğrafik Yükseklik	208	288	487	288	487	692	487	692	956	692	956	1483.5	956	1483.5	1833
Yamaç Eğimi	0	0,0485	0,161	0,0485	0,161	0,2695	0,161	0,2695	0,3905	0,2695	0,3905	0,7465	0,3905	0,7465	1,026
Eğim Yönü	0	0,376	2	0,376	1,768	3,314	1,768	3,314	4,8475	3,314	4,8475	6,0675	4,8475	6,0675	6,284
Plan Eğriliği	-0,0091	-0,00515	0,0007	0,00515	0,0007	0,00005	0,0007	0,00005	0,00085	0,00005	0,00085	0,0059	0,00085	0,0059	0,0104
Profil Eğnili	-0,022	-0,0117	-	-0,0117	-	0,0009	-	0,00015	0,0007	-	0,0007	0,01005	0,0007	0,01005	0,0188
Yakınsaklık İndeksi	-88,93	-49,51	-5,61	-49,51	-5,61	0,64	-5,61	0,64	6,535	0,64	6,535	51,14	6,535	51,14	91,62
Havza Alanı	0	1050	61491	1050	61491	305715	61491	305715	1220731	305715	1220731	1,65E+08	305715	1,65E+08	3,11E+08
TWI	3,4	4,215	5,675	4,215	5,675	6,74	5,675	6,74	8,15	6,74	8,15	16,05	8,15	16,05	22,96
LS	0	0,125	2	0,125	2,255	5,385	2,255	5,385	9,01	5,385	9,01	37,68	9,01	37,68	63,85
Drenaja olan Uzaklık	0	5	51,5	5	51,5	133	51,5	133	248,5	133	248,5	636,5	248,5	636,5	949
Kategorik Değişken Girdi İsmi	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10					
Litoloji	1	2	3	4	5	6	9	12	13	22					
Sözel Değişken Çıktı İsmi	Çok Düşük (kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)			Düşük (Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Orta(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Yüksek(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Çok Yüksek(kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)		
	a=b	c	d	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c=d
Çıktı	0	0,1	0,3	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1

Burada ifade edilen bulanık kümeler ve girdi sayılarına bağlı olarak, geleneksel kural tabanlı sistemdeki kuralların sayısı yaklaşık 98 milyondur ($5^{10} \cdot 10 = 97.656.250$). Eğer tek bir kural belirlemede farklı kural ağırlıkları tanımlanırsa elbette bu sayı artacaktır. Bu da fazlaca uğraştırıcı olacaktır ve aslında bir uzman için bütün bu kuralları desteklemek imkânsız olacaktır. Bu kurallar herhangi bir şekilde oluşturulsa bile bulanık sistem çözümü, bir başka ifade ile kuralların sistem içerisinde değerlendirilmesine ilişkin harcanması gereken zaman çok fazla olacağından bulanık sistem uygulanabilir olmayacaktır. Bu nedenle bir HFS, aynı mantıkla ancak alt sistemlerin varlığına bağlı olarak daha düşük boyutlu ve daha az kuralla gerçekleştirilebilmekte ve tek bir bulanık sistem gibi uygulanabilmektedir.

Şekil 5.1 tez çalışması kapsamında uygulanmış olan iki adet HFS yapısını göstermektedir. $SFS_{l,s}$ uyumlu olan HFS'ye ait olan birinci katman içerisindeki s'inci alt bulanık sistemi sembolize etmektedir ve $SFS_{l,s}$ 'nin çıktısı ise $y_{l,s}$ olarak

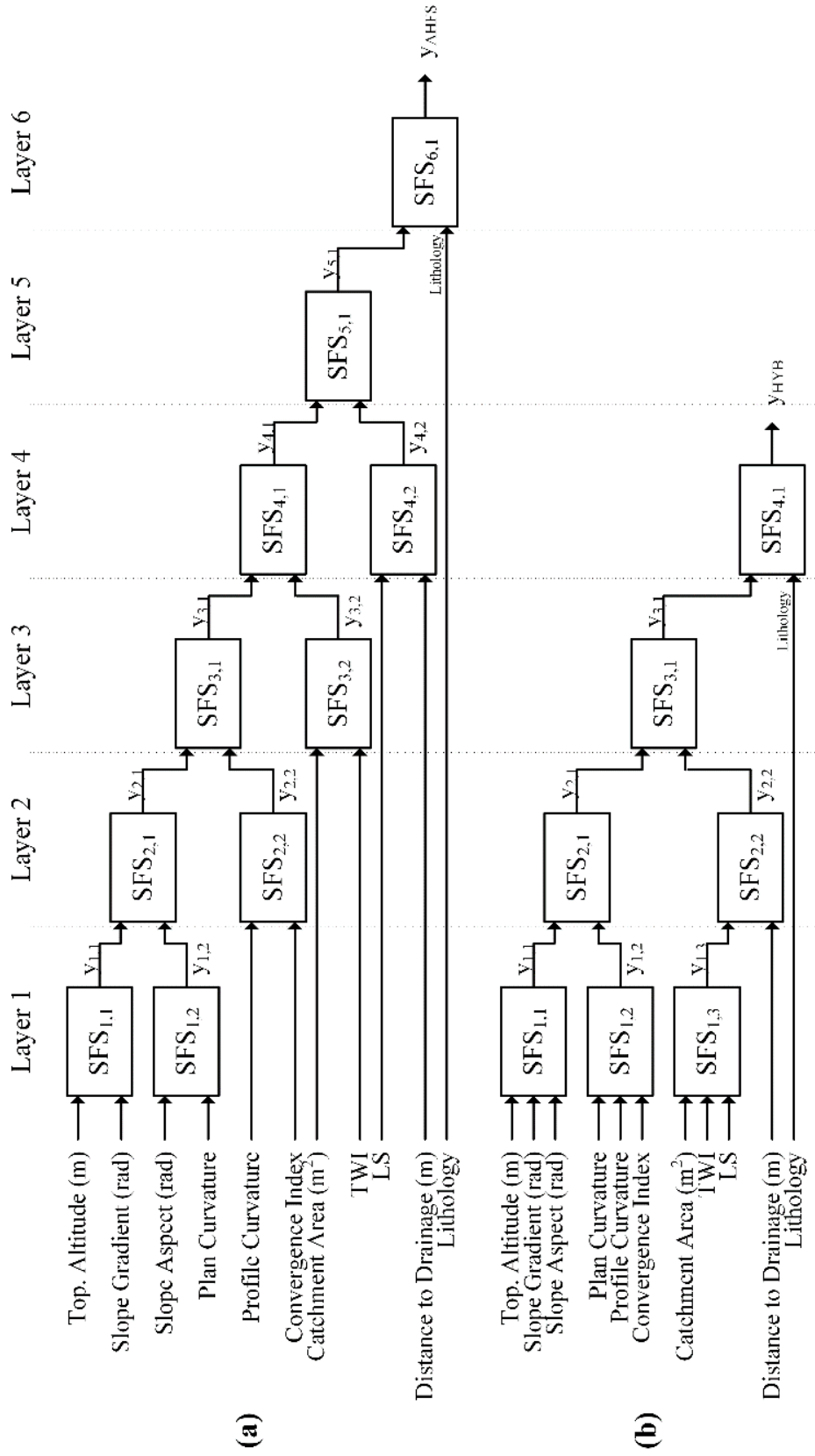
sunulmuştur. Şekil 5.1.a girdi örneklem uzayının çiftler halinde bölüdüğü AHFS tabanlı bir modeldir. Her çift bir alt bulanık sistem ile beslenir ve ağacımsı bir yapı formunda alt bulanık sistemlere aşamalı olarak bağlanmıştır. Her alt bulanık sistemin 2 tane girdi parametresi olana kadar, 275 ($9.5^2 + 5.10$) tane bulanık kuralla küçültülmüş bir kural tabanlı sistem halini alır. Burada kullanılan ikinci hiyerarşik yapı ise uzman bilgisi tarafından modellenmiş olan özelleştirilmiş karmaşık bir yapıdır.

Çizelge 5.2. Katlı Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemi (Cascaded Hierarchical FIS) kullanılarak geliştirilen heyelan duyarlılık modellerinde değerlendirilen parametreler için uzman görüşüne bağlı olarak tanımlanan daraltılmış üyelik fonksiyonları.

Sözel Değişken Girdi İsmi	Çok Düşük (kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)			Düşük (Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Orta(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Yüksek(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Çok Yüksek(kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)		
	a=b	c	d	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c=d
Topoğrafik Yükseklik	208	338	537	338	537	692	537	692	906	692	906	1433.5	906	1433.5	1833
Yamaç Eğimi	0	0,0685	0,181	0,0685	0,181	0,2695	0,181	0,2695	0,314	0,2695	0,314	0,7265	0,314	0,7265	1,026
Eğim Yönü	0	0,776	2,168	0,776	2,168	3,314	2,168	3,314	4,4475	3,314	4,4475	5,667	4,4475	5,667	6,284
Plan Eğriliği	-0,0091	-0,00495	-	-	0,00495	0,0005	-	0,00005	0,00065	0,00005	0,00065	0,0057	0,00065	0,0057	0,0104
Profili Eğnili	-0,022	-0,0115	-	-0,0115	-	-	-	-	0,0005	-	0,0005	0,00985	0,0005	0,00985	0,0188
Yakınsaklık İndeksi	-88,93	-47,51	-3,61	-47,51	-3,61	0,64	-3,61	0,64	4,535	0,64	4,535	49,14	4,535	49,14	91,62
Havza Alanı	0	4050	61791	4050	61791	305715	61791	305715	1220431	305715	1220431	1,65E+08	1220431	1,65E+08	3,11E+08
TWI	3,4	4,515	5,975	4,515	5,975	6,74	5,975	6,74	7,85	6,74	7,85	15,75	7,85	15,75	22,96
LS	0	1,125	3	1,125	3,255	5,385	3,255	5,385	8,01	5,385	8,01	36,68	9,01	36,68	63,85
Drenaja olan Uzaklık	0	15	61,5	15	61,5	133	61,5	133	238,5	133	238,5	626,5	238,5	626,5	949
Kategorik Değişken Girdi İsmi	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10					
Litoloji	1	2	3	4	5	6	9	12	13	22					
Sözel Değişken Çıktı İsmi	Çok Düşük (kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)			Düşük (Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Orta(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Yüksek(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Çok Yüksek(kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)		
Çıktı	a=b	c	d	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c=d
Çıktı	0	0,1	0,3	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1

Çizelge 5.3. Katlı Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemi (Cascaded Hierarchical FIS) kullanılarak geliştirilen heyelan duyarlılık modellerinde değerlendirilen parametreler için uzman görüşüne bağlı olarak tanımlanan genişletilmiş üyelik fonksiyonları.

Sözel Değişken Girdi İsmi	Çok Düşük (kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)			Düşük (Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Orta(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Yüksek(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Çok Yüksek(kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)		
	a=b	c	d	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c=d
Topoğrafik Yükseklik	208	388	587	388	587	692	587	692	856	692	856	1383.5	856	1383.5	1833
Yamaç Eğimi	0	0,0885	0,201	0,0885	0,201	0,2695	0,201	0,2695	0,3505	0,2695	0,3505	0,7065	0,3505	0,7065	1,026
Eğim Yönü	0	1,176	3	1,176	2,568	3,314	2,568	3,314	4,0475	3,314	4,0475	5,2675	4,0475	5,2675	6,284
Plan Eğriliği	-0,0091	-0,00475	0,0003	0,00475	0,0003	0,00005	0,0003	0,00005	0,00045	0,00005	0,00045	0,0055	0,00045	0,0055	0,0104
Profili Eğnili	-0,022	-0,0113	0,0005	-0,0113	0,0005	0,00015	0,0005	0,00015	0,0003	0,00015	0,0003	0,00965	0,0003	0,00965	0,0188
Yakınsaklık İndeksi	-88,93	-45,51	-1,61	-45,51	-1,61	0,64	-1,61	0,64	2,535	0,64	2,535	47,14	2,535	47,14	91,62
Havza Alanı	0	7050	62091	7050	62091	305715	62091	305715	1220131	305715	1220131	1,65E+08	1220131	1,65E+08	3,11E+08
TWI	3,4	4,815	6,275	4,815	6,275	6,74	6,275	6,74	7,55	6,74	7,55	15,45	7,55	15,45	22,96
LS	0	2,125	4	2,125	4,255	5,385	4,255	5,385	7,01	5,385	7,01	35,68	7,01	35,68	63,85
Drenaja olan Uzaklık	0	25	71,5	25	71,5	133	71,5	133	228,5	133	228,5	616,5	228,5	616,5	949
Kategorik Değişken Girdi İsmi	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10					
Litoloji	1	2	3	4	5	6	9	12	13	22					
Sözel Değişken Çıktı İsmi	Çok Düşük (kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)			Düşük (Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Orta(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Yüksek(Üçgen Üyelik Fonksiyonu)			Çok Yüksek(kizkenar Yamuk Üyelik Fonksiyonu)		
Çıktı	a=b	c	d	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c=d
Çıktı	0	0,1	0,3	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1



Şekil 5.1. Heyelan duyarlılık problemi için oluşturulmuş iki farklı HFS yapısı (a) AHFS (b) Karmaşık HFS.

Heyelan duyarlılık modeline ilişkin bulanık kuralların oluşturulması amacıyla, Şekil 5.1'de gösterilen HFS yapılarının her bir alt bulanık sistemi içerisinde çalıştırılacak basit bir algoritma geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Şekil 5.2). Burada gösterilen zahiri kod (pseudo code) I , girdi parametreleri i_n ve onların bulanık kümelerini kapsayan tek boyutlu matris, $y \{f_1, \dots, f_j\}$ sözel değişken çıktısını kapsayan bulanık kümeleri ve R ise sırasıyla öncül (R^{ant}) ve sonuç ($\overline{R^{cons}}$) bölümlerini birleştiren kural matrisidir. İlk olarak $n \times u$ boyutlu (R^{ant}) matrisi, uygun gelen SFS'nin (Satır 3) girdi boşluğuna ait olan bulanık kümesi Cartesian üstü tarafından doldurulmuştur. Burada n girdilerin sayısı ve u ise (1) tarafından tam bir kural tabanlı sistemin üretilmesindeki kuralların sayısıdır. 6. satır içerisinde bulunan $p_{i,j}$, girdi olan i 'nin j bulanık kümesindeki skor değerini sembolize etmektedir. Bu değer orijinal girdiler için önceden belirlendiği dikkate alınmalıdır. Öte yandan, ilgili üyelik fonksiyonunun özü, iç katman girdilerinin bulanık küme skorlarından atanmıştır. 7. satır içerisinde, $p_{i,j}$ normalize edilmiş ve $\overline{p_{i,j}}$ değeri (normalize değer) girdilerin her bulanık seti için $[0,1]$ aralığı içinden hesaplanmıştır. Daha sonra kural sonuç değeri R_r^{cons} , öncül r 'inci kural ile uyumlu bulanık kümelerin, normalize edilmiş skor değerlerinin ortalamasından hesaplanmıştır. R_r^{cons} değeri, satır 16'da belirlenmiş olan bir başka prosedür içerisinde, ilgili bulanık setin sözel değişken çıktısına dönüştürülmüştür. Burada çıktı değişkeni $\mu(c_{f_j})$ 'ye ait olan bulanık kümeler üzerindeki herhangi bir c değerinin tetikleme derecesi satır 17'de hesaplanmış ve maksimum derecede tetiklenen bulanık set (satır 18) geri dönmüştür. Satır 12'de, sonuç kısmına karşılık gelen kuralın $\overline{R_r^{cons}}$ şeklinde sembolize edildiği gibi, geri gelen bulanık set prosedüründe belirlenmiştir.

```

1: procedure RULEGENERATION( $I = [i_1, \dots, i_n], y = \{f_1, \dots, f_j\}$ )
2:    $R = [R^{ant} \overline{R^{cons}}$ 
3:    $R^{ant} = I_{f_j}^n$ 
4:   for all  $i \in I$  do
5:     for all fuzzy set  $|j \in i$  do
6:       determine  $p_{i,j}$ 
7:       calculate  $\overline{p_{i,j}} = \frac{p_{i,j} - \min_{i=1}^{f_i}(p_{i,j})}{\max_{i=1}^{f_i}(p_{i,j}) - \min_{i=1}^{f_i}(p_{i,j})}$ 
8:     end for
9:   end for
10:  for all  $r$  in  $R^{ant}$  do
11:     $\overline{R_r^{cons}} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{p_{i,j}}^r}{n}$ 
12:     $\overline{R_r^{cons}} = \text{MAPVALUETOFUZZYSET}(R_r^{cons}, y)$ 
13:  end for
14:  return  $R$ 
15: end procedure
16: procedure MAPVALUETOFUZZYSET( $c, y$ )
17:  calculate  $\overline{y} = \{\mu(c_{f_1}), \dots, \mu(c_{f_j})\}$ 
18:   $\exists f_k | \mu(c_{f_k}) = \max_{m=1}^j (\mu(c_{f_m}))$ 
19:  return  $f_k$ 
20: end procedure

```

Şekil 5.2. Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemleri (HFS) içerisinde bulanık kuralların üretilmesine yönelik bu çalışma kapsamında geliştirilen prosedür.

Heyelan duyarlılık modellerinin geliştirilmesi sürecinde örnek bir veri satırı için Şekil 5.1b'de gösterilen hibrit yapıda tasarlanmış geleneksel HFS ve DF – HFS sistemleri kullanılarak örnek bir çözüm sunulmuştur. Sözel değişkenlerin girdi değerleri ve onların ilgili bulanık kümelerindeki üyelik fonksiyonlarına karşılık gelen $\mu(X)$ bulanıklaştırmadan sonra Çizelge 5.4'te belirtilmiştir. Öncelikle kural oluşturma ve kümeleme işlemleri aynı şekilde tamamlanmış, DF – HFS sonradan gelen kümeleme adımında doğrudan desteklenen bulanık sete aktarılmıştır. Bu da kümeleme adımından sonra durulaştırmayı gereksiz yere uygulayan geleneksel HFS işlemine benzemektedir. Çizelge 5.5 DF – HFS ve geleneksel HFS için aktarılmış veriyi göstermektedir. Çizelge 5.5'te de açıkça görüleceği gibi geleneksel HFS'nin aktarılmış verisi kümeleme adımından sağlanan orijinal bulanık kümeyi

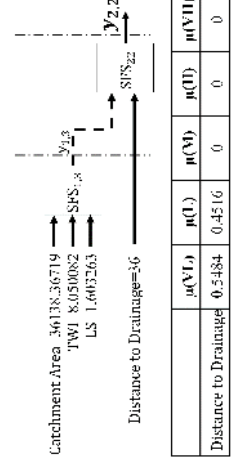
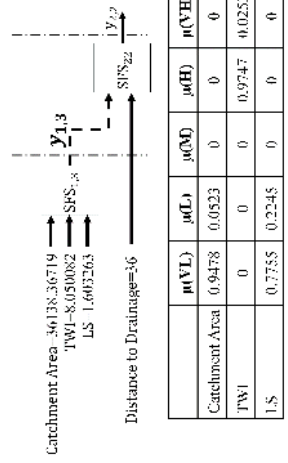
yeniden üretmez, hatta sonradan gelen katman içerisinde tekrardan bulanıklaştırılmaktadır.

DF – HFS'nin bulanık çıkarsama ve veri türetimi Şekil 5.3'te Şekil 5.1b'de sunulan karmaşık yapı için detaylandırılmıştır. Şekil 5.3'ün üst yarısında, ilk olarak havza alanı, TWI ve LS sözel değişken değerleri $SFS_{1,3}$ 'te bulanıklaştırılmıştır. Daha sonra kural yerleştirme adımında, kuralların tetikleme dereceleri hesaplanmış ve kural sonuçlarında aynı bulanık küme içerisinde haritalanan en yüksek tetikleme derecelerini kapsayan $y_{1,3} = \{y_{VL}^{1,3}, y_L^{1,3}, y_M^{1,3}, y_H^{1,3}, y_{VH}^{1,3}\}$ bulanık set hesaplanarak uygulanmıştır. Geleneksel HFS işleminde $y_{1,3}$ bulanık seti durulaştırılmış ve bulunan $y_{1,3} = 0.2155$ katı değeri takip eden katmandan aktarılarak dikkate alınmıştır. Diğer taraftan DF – HFS'de, $SFS_{2,2}$ 'nin bulanıklaştırılmış girdisi dikkate alınmıştır. $SFS_{2,2}$ 'deki çıkarım Şekil 5.3'ün altında sunulmuştur. Burada bulanıklaştırma olması için gereken tek girdi drenaja olan uzaklık sözel değişkenidir. Bulanık kümelerin yeniden üretilmiş $y_{VL}^{1,3}, y_L^{1,3}, y_M^{1,3}, y_H^{1,3}, y_{VH}^{1,3}$ tetikleme dereceleri, kural oluşturmayla doğrudan ilgilidir ve $y_{2,2} = \{y_{VL}^{2,2}, y_L^{2,2}, y_M^{2,2}, y_H^{2,2}, y_{VH}^{2,2}\}$ bulanık kümesi bir kümeleme adımından sonra takip eden $SFS_{3,1}$ alt bulanık sisteminde kullanılmak üzere elde edilir.

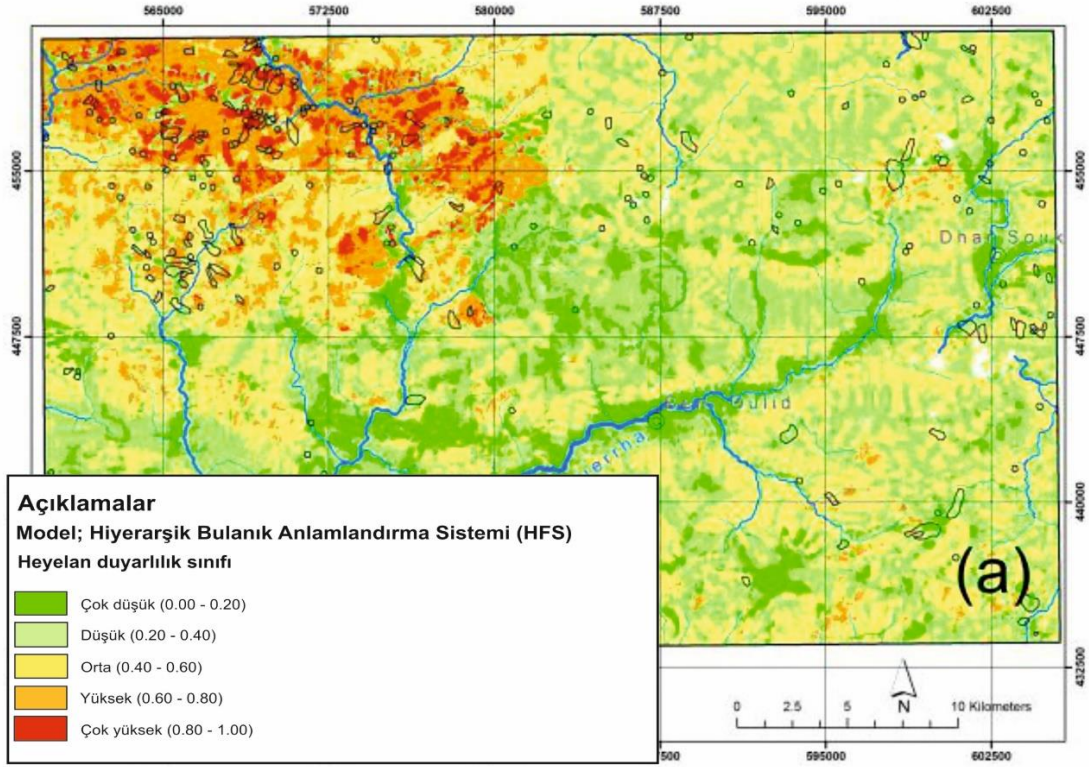
Deneylerde kullanılan heyelan duyarlılık haritalaması verisi 156401 veri satırı içermektedir; bunların her birinin 14 tane özneliği vardır: koordinatlar (enlem, boylam), tahmini bir anlamlandırma için 11 parametre (topoğrafik yükseklik (m), eğim (rad), eğim yönü (rad), plan yamaç eğriselliği, profil yamaç eğriselliği, yakınsaklık indeksi, havza alanı (m²), topoğrafik nemlilik indeksi (TWI), sediman taşıma kapasite indeksi (LS), drenaja olan uzaklık (m) ve litoloji) ve heyelan varlığını (1) ve yokluğunu (0) ifade eden sınıf değeri. Heyelan duyarlılık haritalaması kapsamında değerlendirilen veri matrisi içerisinde 1066 adet varlık (1) verisi bulunmaktadır. Söz konusu veri, modelleme aşamasında kullanılmamıştır. Bu veri, geliştirilen modellerin tahmin kapasitelerinin değerlendirilmesi amacıyla dikkate alınmıştır. Tez çalışması kapsamında esas alınan Hiyerarşik Anlamlandırma Sistemleri (HFS) kullanılarak geliştirilen heyelan duyarlılık modellerinin çalıştırılmasına bağlı olarak üretilen heyelan duyarlılık haritaları Şekil 5.4'te verilmiştir.

Rule Fitting in SFS _{1,3}		Aggregation in SFS _{1,3}	
16	If (Catchment Area is \underline{VL}) & (TWT is \underline{H}) & (LS is \underline{VL}) $\mu(VL)=0.0423$; $\mu(VL)=0.9747$; $\mu(VL)=0.7755$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.0423$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.7755$
17	If (Catchment Area is \underline{L}) & (TWT is \underline{H}) & (LS is \underline{VL}) $\mu(VL)=0.0523$; $\mu(VL)=0.9747$; $\mu(VL)=0.7755$	\underline{L} $\mu(VL)=0.0523$	\underline{L} $\mu(VL)=0.7755$
21	If (Catchment Area is \underline{VL}) & (TWT is \underline{VH}) & (LS is \underline{VL}) $\mu(VL)=0.0478$; $\mu(VL)=0.0233$; $\mu(VL)=0.7755$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.0478$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.7755$
22	If (Catchment Area is \underline{L}) & (TWT is \underline{VH}) & (LS is \underline{VL}) $\mu(VL)=0.0523$; $\mu(VL)=0.0233$; $\mu(VL)=0.7755$	\underline{L} $\mu(VL)=0.0523$	\underline{L} $\mu(VL)=0.7755$
41	If (Catchment Area is \underline{VL}) & (TWT is \underline{H}) & (LS is \underline{L}) $\mu(VL)=0.0478$; $\mu(VL)=0.9747$; $\mu(VL)=0.2245$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.0478$	\underline{L} $\mu(VL)=0.2245$
42	If (Catchment Area is \underline{L}) & (TWT is \underline{H}) & (LS is \underline{L}) $\mu(VL)=0.0523$; $\mu(VL)=0.9747$; $\mu(VL)=0.2245$	\underline{L} $\mu(VL)=0.0523$	\underline{L} $\mu(VL)=0.2245$
46	If (Catchment Area is \underline{VL}) & (TWT is \underline{VH}) & (LS is \underline{L}) $\mu(VL)=0.0478$; $\mu(VL)=0.0233$; $\mu(VL)=0.2245$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.0478$	\underline{L} $\mu(VL)=0.2245$
47	If (Catchment Area is \underline{L}) & (TWT is \underline{VH}) & (LS is \underline{L}) $\mu(VL)=0.0523$; $\mu(VL)=0.0233$; $\mu(VL)=0.2245$	\underline{L} $\mu(VL)=0.0523$	\underline{L} $\mu(VL)=0.2245$

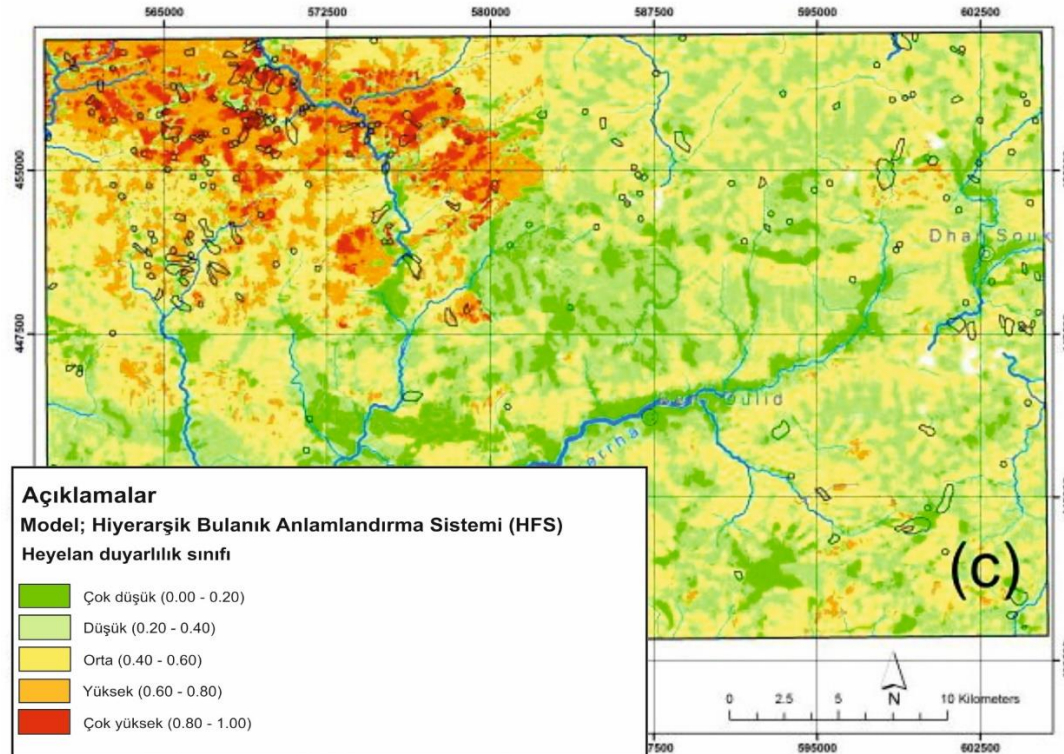
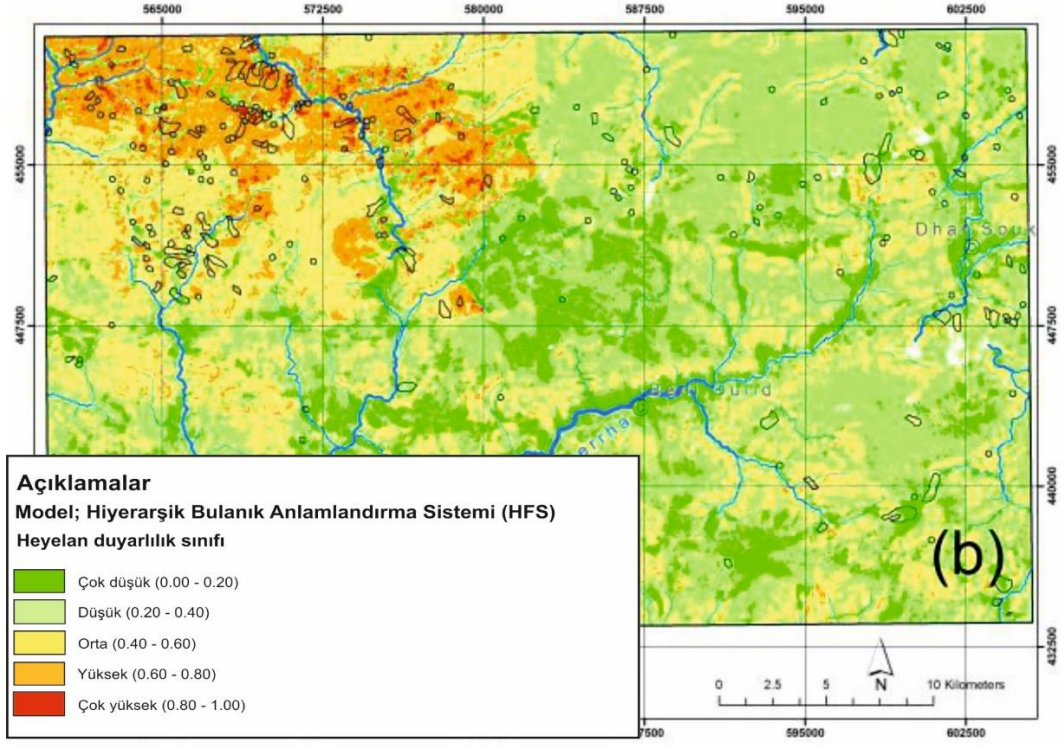
Rule Fitting in SFS _{2,2}		Aggregation in SFS _{2,2}	
1	If (Distance to Drainage is \underline{VL}) & (Y _{1,3} is \underline{VL}) $\mu(VL)=0.5484$; $\mu(VL)=0.4516$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.5484$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.4516$
2	If (Distance to Drainage is \underline{L}) & (Y _{1,3} is \underline{VL}) $\mu(VL)=0.4516$; $\mu(VL)=0.7755$	\underline{L} $\mu(VL)=0.4516$	\underline{L} $\mu(VL)=0.7755$
6	If (Distance to Drainage is \underline{VL}) & (Y _{1,3} is \underline{L}) $\mu(VL)=0.5484$; $\mu(VL)=0.2245$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.5484$	\underline{L} $\mu(VL)=0.2245$
7	If (Distance to Drainage is \underline{L}) & (Y _{1,3} is \underline{L}) $\mu(VL)=0.4516$; $\mu(VL)=0.2245$	\underline{L} $\mu(VL)=0.4516$	\underline{L} $\mu(VL)=0.2245$
16	If (Distance to Drainage is \underline{VL}) & (Y _{2,2} is \underline{VL}) $\mu(VL)=0.5484$; $\mu(VL)=0.0523$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.5484$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.0523$
17	If (Distance to Drainage is \underline{L}) & (Y _{2,2} is \underline{VL}) $\mu(VL)=0.4516$; $\mu(VL)=0.0523$	\underline{L} $\mu(VL)=0.4516$	\underline{VL} $\mu(VL)=0.0523$



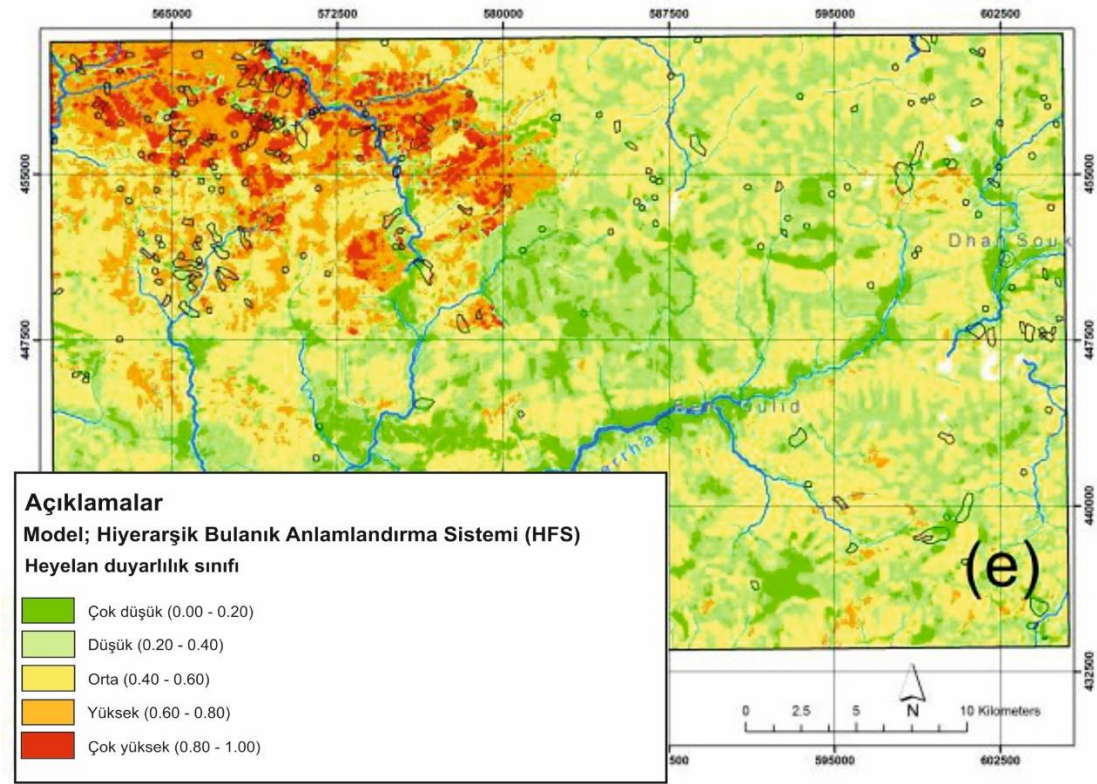
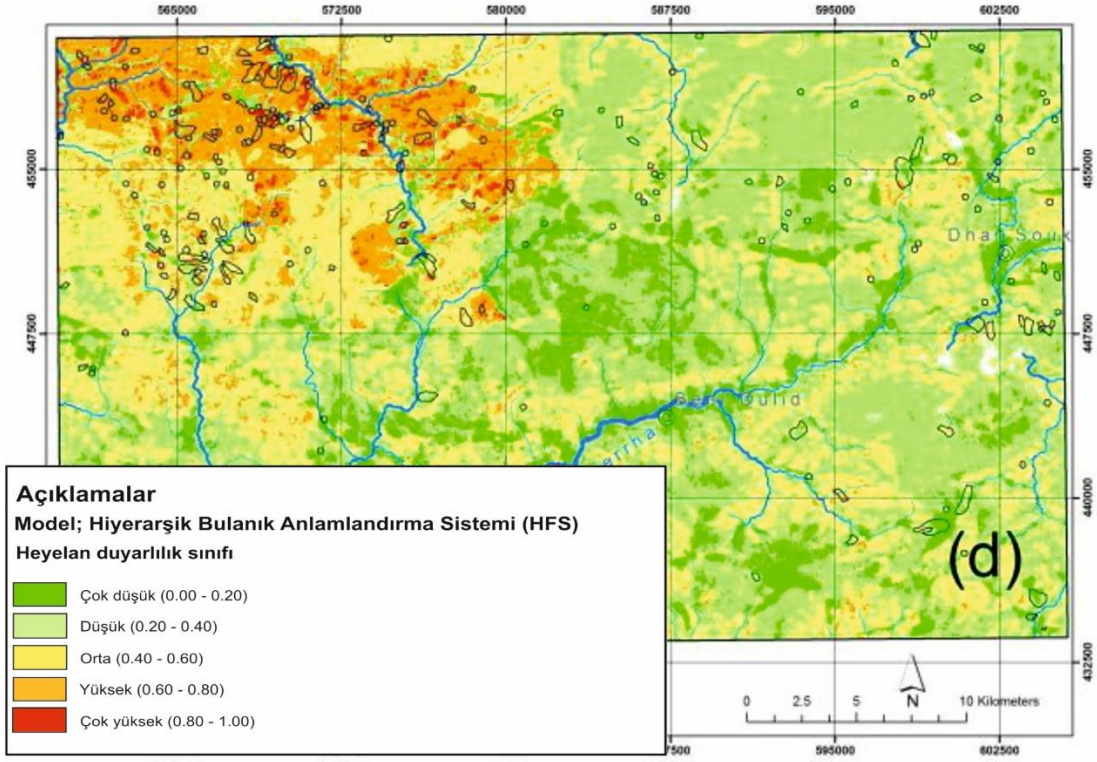
Şekil 5.3. Tez çalışması kapsamında geliştirilen Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemlerinin bir veri satırı için örnek gerçekleştirimi.



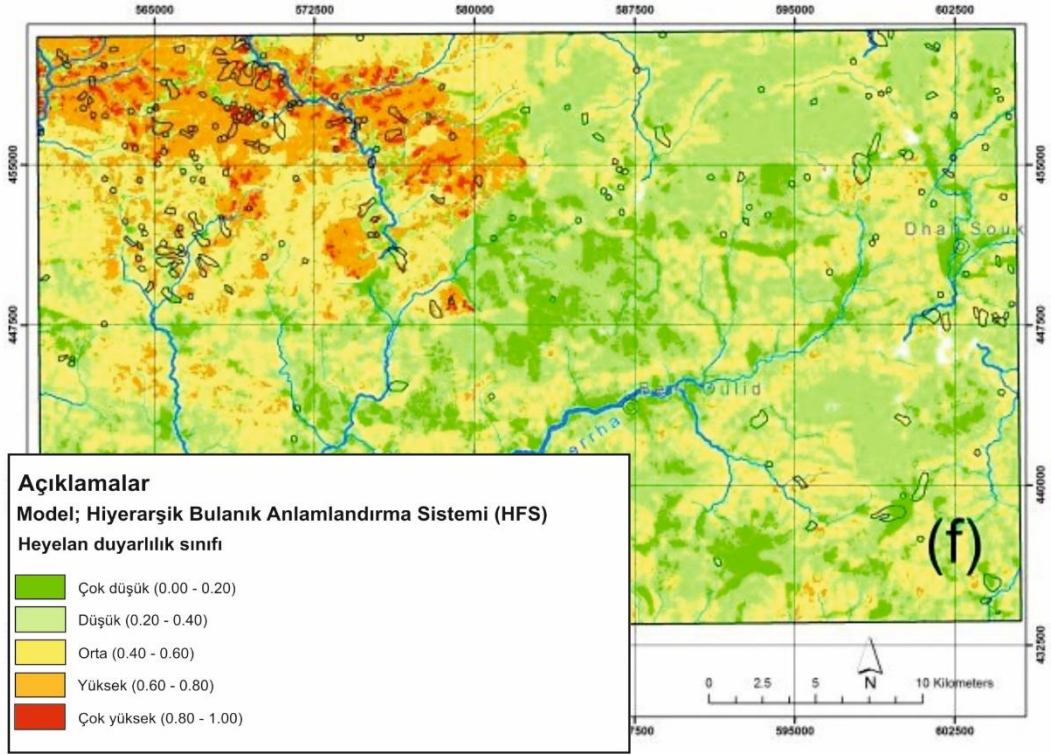
Şekil 5.4. Tez çalışması kapsamında geliştirilen Konvansiyonel (Conventional HFS) ve Durulaştırmadan Bağımsız (DF-HFS) Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sistemleri kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritaları; (a) daraltılmış üyelik fonksiyonları ve Conventional HFS; (b) daraltılmış üyelik fonksiyonları ve DF-HFS; (c) standart üyelik fonksiyonları ve Conventional HFS; (d) standart üyelik fonksiyonları ve DF-HFS; (e) genişletilmiş üyelik fonksiyonları ve Conventional HFS; (f) genişletilmiş üyelik fonksiyonları ve DF-HFS; şekil üzerinde heyelan envanter çalışmaları kapsamında derlenen ve haritalanan heyelanlar siyah çizgi rengine sahip poligonlar ile ayrıca gösterilmektedir.



Şekil 5.4. (devam ediyor).

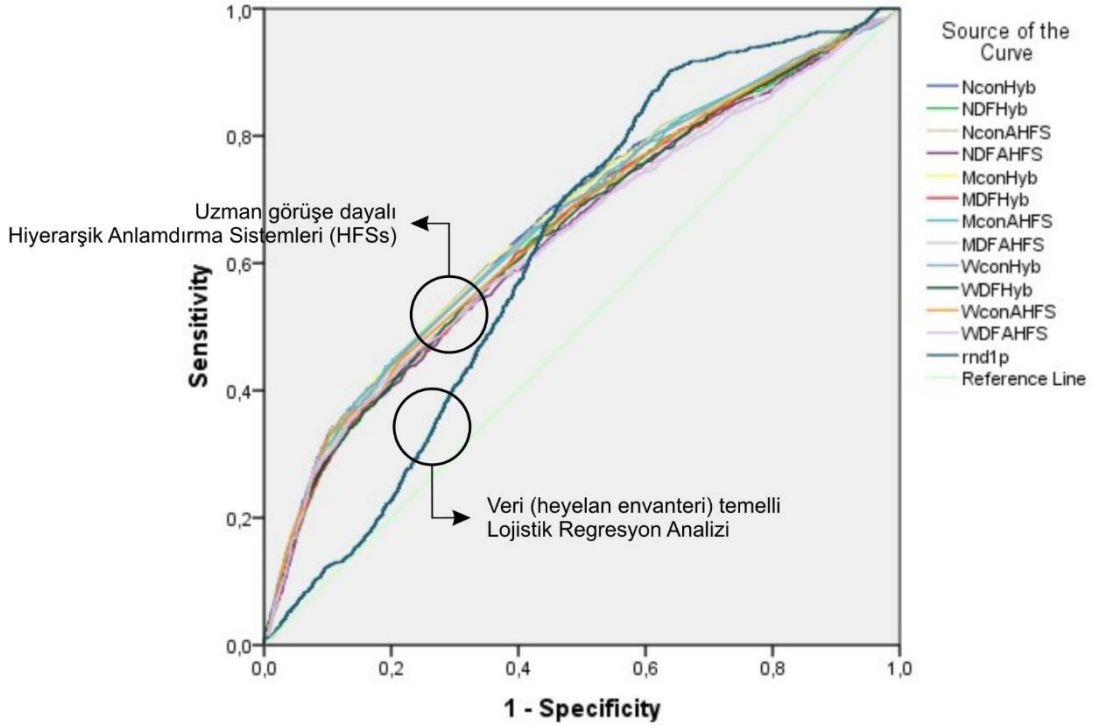


Şekil 5.4. (devam ediyor).



Şekil 5.4. (devam ediyor).

Üretilen modellerin çalıştırılmasına müteakiben elde edilen heyelan duyarlılık haritalarının mekânsal performanslarının değerlendirilmesi amacıyla her bir model için ROC (Receiver Operating Characteristics) eğrisi çizilmiştir (Şekil 5.5). ROC eğrileri altında kalan alan değerleri (AUC; Area Under Curve) Çizelge 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Uzman görüşe dayalı geliştirilen Hiyerarşik Anlamlandırma Sistemleri (HFSs) ve veri (heyelan envaneri) temelli Lojistik Regresyon Analizleri sonucu üretilen heyelan duyarlılık haritalarının mekânsal performanslarının değerlendirilmesi; ROC eğrileri; N daraltılmış üyelik fonksiyonları kullanılarak geliştirilen modeller; M: standart üyelik fonksiyonları kullanılarak geliştirilen modeller; W: genişletilmiş üyelik fonksiyonları kullanılarak geliştirilen modeller; rnd1p: lojistik regresyon modeli; Reference Line: AUC=0.5.

Çizelge 5.4. Tez çalışması kapsamında geliştirilen modellerin tahmin performanslarının değerlendirilmesi; ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrileri altında kalan alan değerleri (AUC).

Model		AHFS	Karmaşık HFS
Daraltılmış MFs	Geleneksel HFS İşlemi	0.659353143490403	0.666403680214146
	DF-HFS	0.663613876708126	0.670097847592172
Standart MFs	Geleneksel HFS İşlemi	0.663984557735092	0.664104189631677
	DF-HFS	0.660782810932641	0.668124155316225
Genişletilmiş MFs	Geleneksel HFS İşlemi	0.655378993570122	0.664837691774355
	DF-HFS	0.654587337746287	0.663455117369926

Intel® Xeon® CPU E5-2620 2.00 GHz 2 işlemci 32 GB RAM sistemi üzerinde oluşturulmuş HFS ve anlamlandırma işlemlerinde harcanan zamanlar hesaplanmıştır (Çizelge 5.6). Elbette AHFS tabanlı bir bulanık sistemin hem inşası hem de anlamlandırma süresi için gereken zaman, hibrit yapıya sahip HFS sistemi için gerekli olan zamandan daha azdır. Bunun nedeni, AHFS esas olarak daha düşük sayıda kuralla oluşturulmuş bir sistemdir. Diğer taraftan karmaşık hibrit HFS’de toplam kural sayısı, karmaşıklığa bağlı olarak daha fazladır. Kestirim yöntemleriyle ilişkili olarak, DF – HFS’nin hesaplama performansı dikkate değer bir avantaja sahiptir. Çünkü klasik HFS işleminde gereksiz yere tekrar eden adımlar DF – HFS’de ortadan kalkmaktadır.

Çizelge 5.5. Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sisteminin (HFS) bir veri satırı için örnek gerçekleştiriminde bulanıklaştırma (fuzzification) aşaması.

Sözel Değişken	Değer	$\mu(VL)$	$\mu(L)$	$\mu(M)$	$\mu(H)$	$\mu(VH)$
Topoğrafik Yükseklik	372	0.8291	0.1709	0	0	0
Yamaç Eğimi	0.105743	0.6690	0.3310	0	0	0
Eğim Yönü	1.675673	0.3537	0.6463	0	0	0
Plan Yamaç Eğriselliği	0.000650	0	0	0	1	0
Profil Yamaç Eğriselliği	0.000251	0	0	0.3831	0.6169	0
Yakınsaklık İndeksi	7.326855	0	0	0	0.9374	0.0626
Havza Alanı	36138.367190	0.9478	0.0522	0	0	0
TWI (Topoğrafik Nemlilik İndeksi)	8.050082	0	0	0	0.9747	0.0253
LS (Sediman Taşıma Kapasite İndeksi)	1.603263	0.7755	0.2245	0	0	0
Drenaja olan Uzaklık	36	0.5484	0.4516	0	0	0
Litoloji	6			1	0	0

Çizelge 5.6. Hiyerarşik Bulanık Anlamlandırma Sisteminin (HFS) bir veri satırı için örnek gerçekleştiriminde ara seviyelere ait hesaplamalar.

DF-HFS	Geleneksel HFS İşlemi
$y_{11} = \{0, 0.6463, 0.33105, 0.17085, 0\}$	$y_{11} = 0.42405$
$y_{12} = \{0, 0.61692, 0, 0, 0\}$	$y_{12} \cong 0.3000$
$y_{21} = \{0, 0.61692, 0.17085, 0, 0\}$	$y_{21} \cong 0.3000$
$y_{13} = \{0.77546, 0.22454, 0, 0.052273, 0\}$	$y_{13} = 0.2155$
$y_{22} = \{0.54839, 0.45161, 0.22454, 0.05227, 0\}$	$y_{22} = 0.314226$
$y_{31} = \{0.54839, 0.45161, 0.17085, 0.05227, 0\}$	$y_{31} \cong 0.3$
$y_{41} = \{0, 0.54839, 0.45161, 0.05227, 0\}$	$y_{41} = 0.4\bar{9}$

Çizelge 5.7. Proje çalışması kapsamında geliştirilen modellerin Intel® Xeon® CPU E5-2620 2.00 GHz 2 processors, 32 GB RAM bilgisayarda gerçekleştirim süreleri.

	Model	AHFS (ms)	Karmaşık HFS (ms)
Daraltılmış MFs	HFS Yapısı	52	114
	Geleneksel HFS İşlemi	319726	540651
	DF-HFS	108706	130794
Standart MFs	HFS Yapısı	15	69
	Geleneksel HFS İşlemi	344442	659883
	DF-HFS	108184	145310
Genişletilmiş MFs	HFS Yapısı	31	107
	Geleneksel HFS İşlemi	348286	624625
	DF-HFS	110942	154227

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında ROC eğrilerinin oluşturulması sürecinde varlık (1) verisi için Şekil 5.3'te ifade edilen veri matrisi içerisinde heyelanlı alan olarak tanımlanan 1066 adet veri satırı dikkate alınmıştır. Burada mevcut heyelan verisinin sadece modellerden itibaren üretilen heyelan duyarlılık haritalarının mekânsal performanslarının değerlendirilmesinde kullanıldığına dikkat edilmelidir. Üretilen heyelan duyarlılık haritaları esas olarak uzman görüşe dayalı oluşturulmuşlardır. Söz konusu performans istatistiği incelendiğinde, en başarılı sonucun standart üyelik fonksiyonlarının kullanıldığı durulaştırmadan bağımsız hibrit yapıda tasarlanmış HFS kullanılarak geliştirilen modelden alınan sonuç olduğu görülmüştür. Bu heyelan duyarlılık haritalaması için hesaplanan değer 0.67'dir. Bu sonuç ortalama bir değer olarak yorumlanmaktadır. Ancak söz konusu modelin esas olarak uzman görüşüne dayalı olduğu dikkate alındığında bu istatistik başarılı bir çıkarsama olarak değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, tez çalışması kapsamında üretilen uzman görüşe dayalı heyelan duyarlılık modellerinin veri temelli yöntemler ile karşılaştırma işleminin yapılabilmesi için, 1066 varlık (1) bilgisini içeren ve bağımsız değişkenleri HFS sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılan veri matrisi değerlendirilerek, veri temelli bir model daha geliştirilmiştir. Veri temelli modelleme aracı olarak, çok değişkenli istatistiksel analiz yöntemlerinden biri olan lojistik regresyon analizi kullanılmıştır. Lojistik regresyon analizinin gerçekleştirimine bağlı olarak üretilen heyelan duyarlılık haritasının mekânsal performansı ayrıca değerlendirilmiştir. Veri temelli yaklaşım ile üretilen heyelan duyarlılık haritası için ROC eğrisi altında kalan alan 0.62 olarak hesaplanmaktadır (Şekil 5.5). Bu durum, tez çalışması içerisinde daha önceden de belirtilmiş olan veri eksikliğinden kaynaklanan bir takım kısıtların, veri temelli yaklaşımların bu sahada kullanılması yönünde sınırlayıcı bir faktör olduğunun bir göstergesi olarak yorumlanmıştır. Bir başka ifade ile verisine yeteri kadar ulaşılamayan/bakir alanlarda heyelanların mekânsal olasılıklarının değerlendirilmesinde uzman görüşe dayalı yaklaşımların kullanılması daha doğru/kabul edilebilir sonuçlar üretmektedir.

Heyelan duyarlılık haritalarında duyarlılık değerleri eşit aralıklarla ayrılmış 5 alt sınıfta değerlendirilmiştir; çok düşük (0.00-0.20), düşük (0.20-0.40), orta (0.40-0.60), yüksek (0.60-0.80), çok yüksek (0.80-1.00). Şekil 5.4 üzerinde heyelan envanter çalışmaları kapsamında derlenen ve haritalanan heyelanlar da gösterilmektedir. Buna göre, üretilen heyelan duyarlılık haritalarının doku açısından değerlendirmesi ayrıca yapılmıştır. Yapılan görsel/ön değerlendirmelerde, çalışma alanı içerisinde yoğun heyelanların gözlemlendiği kesimlerin yüksek duyarlılık sınıfları içerisinde haritalandığı görülmektedir. Esasen AUC=0.67 değeri her ne kadar ortalama bir değer olarak yorumlansa da, harita görsel/ön değerlendirmede oldukça anlamlı ve başarılı olarak yorumlanmaktadır. Uzman modellerin en önemli kısıtlaması, özellikle sahanın batısında kalan daha küçük ölçekli heyelanları yakalayamamasıdır. Bu alanlarda duyarlılık değerleri genellikle orta ve düşük sınıfta çıkmaktadır. Bu durum, söz konusu AUC değerinin ortalama değerlerde hesaplanmasına neden olmaktadır. Tez çalışmasında, 2 adet 1/50.000 ölçekli topoğrafik pafta alanı içerisinde uzman görüşüne bağlı olarak geliştirilen heyelan duyarlılık modelleri, benzer jeolojik ve jeomorfolojik özelliklere sahip Rif Dağları için gerekli verinin sağlanması durumunda uygulanabilir olacaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] Rouai, M., Jaaidi, E. B., Scaling properties of landslides in the Rif Mountains of Morocco, *Engineering Geology*, 68, 353-359, **2003**.
- [2] Fonseca, A.F.P.S, *Large deep-seated landslides in the northern Rif Mountains (Northern Morocco). Inventory and analysis*, Universidade de Lisboa, **2014**.
- [3] Ercanoğlu, M., Gökçeoğlu, C., Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (North of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach, *Environmental Geology*, 41. 720-730, **2002**.
- [4] Ercanoğlu, M., Gökçeoğlu, C., Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey), *Engineering Geology*, 75, 229-250, **2004**.
- [5] Komac, M., A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia, *Geomorphology*, 74, 17-28, **2006**.
- [6] Saboya Jr., F., Alves, M., Pinto, W. D., Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic, *Engineering Geology*, 86, 211-224, **2006**.
- [7] Champati ray, P. K., vd., Fuzzy-based method for landslide hazard assessment in active seismic zone of Himalaya, *Landslides*, 4, 101-111, **2007**.
- [8] Lee, S., Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping, *Environmental Geology*, 52, 615-623, **2007**.
- [9] Yalcin, A., Bulut, F., Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey), *National Hazards*, 41, 201-226, **2007**.

- [10] Ercanoglu, M., Kasmer, O., Temiz, N., Adaptation and comparison of expert opinion to analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 67, 565-578, **2008**.
- [11] Kanungo, vd., landslide risk assessment using concepts of danger pixels and fuzzy set theory in Darjeeling Himalayas, *Landslides*, 5, 407-416, **2008**.
- [12] Yalcin, A., GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations, *Catena*, 72, 1-12, **2008**.
- [13] Tangestani, M., H., 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 Science*, 35, 66-73, **2009**.
- [14] Ercanoglu, M., Temiz, A., F., Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey), *Environmental Earth Science*, 64, 949-964, **2011**.
- [15] Pradhan, B., Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia, *Environmental Earth Science*, 63, 329-349, **2011**.
- [16] Bui, D., T., vd., Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models, *Catena*, 96, 28-40, **2012**.
- [17] Hasekioğulları, G., D., Ercanoglu, M., A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey), *National Hazards*, 63, 1157-1179, **2012**.
- [18] Mondal, S., Maiti, R., Landslide susceptibility analysis of Shiv-Khola watershed, Darjiling: A remote sensing & GIS based analytical hierarchy process (AHP), *J Indian Soc. Remote Sens.*, 40(3), 483-496, **2012**.

- [19] Pourghasemi, R., H., vd., Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran, *National Hazards*, 63, 965-996, **2012**.
- [20] Reis, S., vd., Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy methods in Rize province (Ne Turkey), *Environmental Earth Science*, 66, 2063-2073, **2012**.
- [21] Demir, G., vd., A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process methods, *National Hazards*, 65, 1481-1506, **2013**.
- [22] Feizizadeh, B., Blaschke, T., GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran, *National Hazards*, 65, 2105-2128, **2013**.
- [23] Guettuche, M., S., Modeling and risk assessment of landslides using fuzzy logic. Application on the slopes of the Algerian Tell (Algeria), *Arab J Geoscience*, 6, 3163-3173, **2013**.
- [24] Ma, F., vd., Application of analytical hierarchy process and least-squares method for landslide susceptibility assessment along the Zhong-Wu natural gas pipeline, China, *Landslides*, 10, 481-492, **2013**.
- [25] Park, S., vd., Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea, *Environmental Earth Science*, 68, 1443-1464, **2013**.
- [26] Alimohammadlou, Y., vd., Estimation of rainfall-induced landslides using ANN and fuzzy clustering methods: A case study in Saen Slope, Azerbaijan province, Iran, *Catena*, 120, 149-162, **2014**.
- [27] Althuwaynee, F., O., vd., A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and

- multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping, *Catena*, 114, 21-36, **2014**.
- [28] Osna, T., Sezer, E., Akgun, A., GeoFIS: An integrated tool for the assessment of landslide susceptibility, *Computers & Geosciences*, 66, 20-30, **2014**.
- [29] Roodposhti, S., M., vd., PROMETHEE II and fuzzy AHP: an enhanced GIS-based landslide susceptibility mapping, *National Hazards*, 73, 77-95, **2014**.
- [30] Shababi, H., vd., Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ration and logistic regression models, *Catena*, 115, 55-70, **2014**.
- [31] Zhu, A., vd., An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping usnig GIS and fuzzy logic, *Geomorphology*, 214, 128-138, **2014**.
- [32] El Khattabi, J., Carlier, E., Tectonic and hydrodynamic control of landslides in the northern area of the Central Rif, Morocco, *Engineering Geology*, 71, 255-264, **2004**.
- [33] Saadi, S. E. M., Hilali E. A., Bensoid M., Dhar Souk Bölgesi Jeoloji Haritası, Fas Enerji ve Madenler Bakanlığı, Jeolojik Araştırma Merkezi, Notlar ve Anılar Sayı: 298, **1979**.
- [34] Moulay Ahmed el Alaoui, Chefchaouni, Y. C., Diouri, M., Taounate – Ain Aicha Bölgesi Jeoloji Haritası, Fas Ticaret, El Sanatları, Sanayi ve Madencilik Bakanlığı, Madencilik ve Jeoloji Yönetimi Dairesi, Jeoloji Servisi Sürümleri, Notlar ve Anılar Sayı: 166, **1964**.
- [35] Chalouan, A., Michard, A., Saddiqi, O., Frizon de Lamotte, D. (eds.), *Continental Evolution: The Geology of Morocco*, Springer, Berlin, **2008**.

- [36] Zaghloul, M.N., Di Staso, A., Gigliuto, L.G., Maniscalco, R., Puglisi, D., Stratigraphy and provenance of Lower and Middle Miocene strata within the External Tanger Unit (Intrarif sub-domain, External domain, Rif, Morocco): first evidence, *Geol. Carpath*, 56, 517-530, **2005**.
- [37] Cruden, D. M., and Varnes, D. J., Landslide types and processes. In: Turner A. K.; Shuster R. L. (eds) Investigation and Mitigation Transp. Res Board, Spec Rep, 247, **1996**.
- [38] Varnes, D., Slope movement types and processes. In: Schuster R. L. & Krizek R. J. Ed., Landslides, analysis and control. Transportation Research Board Sp. Rep. No. 176, National Academy of Sciences, 11-33, **1978**.
- [39] Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Use of GIS technology in the prediction and monitoring landslide hazard. In: Carrara A & Guzzetti F. (eds.), Techniques and tools for mapping natural hazards and risk impact on the developed environment, Proceed. EGS97, Vienna, **1998**.
- [40] Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z., Guidelines for landslide susceptibility hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102, (3-4), 99-111, **2008**.
- [41] Varnes, D.J., Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, Commission of landslides of the IAEG, UNESCO, *Natural Hazards*, No. 3, 61pp, **1984**.
- [42] Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., GIS based techniques for mapping landslide hazard, <http://deis158.deis.unibo.it> (Nisan, **2016**).

- [43] V. Cherkassky, Fuzzy Inference Systems: A Critical Review, in: *Comput. Intell. Soft Comput. Fuzzy-Neuro Integr. with Appl.*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, **1998**: pp. 177–197. doi:10.1007/978-3-642-58930-0_10.
- [44] G. Feng, A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 14 (**2006**) 676–697. doi:10.1109/TFUZZ.2006.883415.
- [45] S. Guillaume, Designing fuzzy inference systems from data: An interpretability-oriented review, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 9 (**2001**) 426–443. doi:10.1109/91.928739.
- [46] V. Torra, A review of the construction of hierarchical fuzzy systems, *Int. J. Intell. Syst.* 17 (**2002**) 531–543. doi:10.1002/int.10036.
- [47] D. Wang, X. Zeng, J. a Keane, A Survey of Hierarchical Fuzzy Systems, *Int. J. Comput. Cognit.* 4 (**2006**) 18–29.
- [48] L. Kóczy, K. Hirota, Approximate reasoning by linear rule interpolation and general approximation, *Int. J. Approx. Reason.* 9 (**1993**) 197–225. doi:10.1016/0888-613X(93)90010-B.
- [49] Jamshidi Moh, *Large-Scale Systems: Modeling, Control and Fuzzy Logic*, **1997**.
- [50] G.V.S. Raju, Jun Zhou, Adaptive hierarchical fuzzy controller, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 23 (**1993**) 973–980. doi:10.1109/21.247882.
- [51] S. Aja-Fernandez, C. Alberola-Lopez, Matrix Modeling of Hierarchical Fuzzy Systems, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 16 (**2008**) 585–599. doi:10.1109/TFUZZ.2007.905905.
- [52] R.J.G.B. Campello, F.J. Von Zuben, W.C. Amaral, L.A.C. Meleiro, R. Maciel Filho, Hierarchical fuzzy models within the framework of orthonormal basis functions and their application to bioprocess control, *Chem. Eng. Sci.* 58 (**2003**) 4259–4270. doi:10.1016/S0009-2509(03)00309-9.

- [53] J. Lin, Z.Z. Huang, A hierarchical fuzzy approach to supervisory control of robot manipulators with oscillatory bases, *Mechatronics*. 17 (2007) 589–600. doi:10.1016/j.mechatronics.2007.07.008.
- [54] C. Qu, R. Buyya, A Cloud Trust Evaluation System Using Hierarchical Fuzzy Inference System for Service Selection, in: 2014 IEEE 28th Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl., IEEE, 2014: pp. 850–857. doi:10.1109/AINA.2014.104.
- [55] T.S. Letia, M. Hulea, F. Dinga, Optimization of Urban Vehicle Traffic Using Genetic Fuzzy Logic Control, in: Proc. 2nd WSEAS Int. Conf. URBAN Plan. Transp., 2009: pp. 171–176.
- [56] K. Renkas, A. Niewiadomski, Hierarchical Fuzzy Logic Systems and Controlling Vehicles in Computer Games, *J. Appl. Comput. Sci.* 22 (2014) 201–212.
- [57] B. Mutlu, E.A. Sezer, H.A. Nefeslioglu, A defuzzification-free hierarchical fuzzy system (DF-HFS): Rock mass rating prediction, *Fuzzy Sets Syst.* (2015). doi:10.1016/j.fss.2016.01.001.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Beyazıd Cem Özer

Doğum Yeri : Ankara

Medeni Hali : Bekar

E-posta : bozercem@gmail.com

Adresi : Uğur Mumcu Mah. 51 no'lu Koop. 1656.sok No: 70/5 Batıkent / ANKARA

Eğitim

Lise: Kayabayazıtöğlü Lisesi

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil Düzeyi

İngilizce (iyi)

İş Deneyimi

-

Deneyim Alanları

Mühendislik jeolojisi, Heyelan Duyarlılık, Uzman Sistemler

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Atlas Dağlarında Heyelan Tehlike Değerlendirmesi (Kuzeybatı Afrika Kıyısı, Fas)

TÜBİTAK – CNRST (FAS) ikili iş birliği projesi.

Proje bedeli : 73654 TL

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Ozer, B. C., Mutlu, B., Nefeslioglu, H. A., Sezer, E. A., Rouai, M., Dekayir, A., Gokceoglu, C., Evaluation of hierarchical fuzzy systems (HFS) for landslide susceptibility mapping: eastern part of Rif Mountains (Morocco), *Landslides(?)* (2017).

Ozer, B. C., Mutlu, B., Nefeslioglu, H. A., Sezer, E. A., Rouai, M., Dekayir, A., Gokceoglu, C., An expert-based landslide susceptibility mapping by using hierarchical fuzzy systems (HFS), *International Association for Mathematical Geosciences (IAMG) 2018 19th Annual Conference, Czech Republic(?)*, (2018).

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 25/04/2017

Tez Başlığı / Konusu: KURAL TABANLI BULANIK ALGORİTMA İLE HEYELAN DUYARLILIK HARİTALAMASI (BENİ AHMED BÖLGESİ, RIF DAĞLARI, FAS)

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 80 sayfalık kısmına ilişkin, 24/04/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5 'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimededen daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

25.04.2017

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: BEYAZID CEM ÖZER
Öğrenci No: N14128415
Anabilim Dalı: JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ
Programı: YÜKSEK LİSANS
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.


(Unvan, Ad Soyad, İmza)