



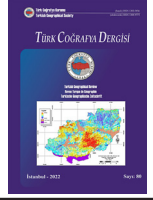
Basılı ISSN 1302-5856

Türk Coğrafya Dergisi

Turkish Geographical Review

www.tcd.org.tr

Elektronik ISSN 1308-9773



## Kayma tipi heyelanların farklı duyarlılık modellerinde kombinasyonu: Sakarya Havzası Yukarı Çığırı örneği

*Combination of slide-type landslides in different susceptibility:  
A case study of the Sakarya Basin Upstream*

Mehmet Emin Cihangir <sup>a\*</sup> 

<sup>a</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye.

ORCID: M.E.C 0000-0001-8881-5308

### BİLGİ / INFO

Geliş/Received: 31.01.2022

Kabul/Accepted: 23.03.2022

#### Anahtar Kelimeler:

Duyarlılık modeli  
Heyelan  
Sakarya  
Yamaç ünitesi

#### Keywords:

Landslide  
Susceptibility model  
Sakarya  
Slope unite

#### \*Sorumlu yazar/Corresponding author:

(M. E. Cihangir) m.e.cihangir@gmail.com

DOI: 10.17211/tcd.1065523



#### Atf/Citation:

Cihangir, M. E. (2022). Kayma tipi heyelanların farklı duyarlılık modellerinde kombinasyonu: Sakarya Havzası Yukarı Çığırı örneği. *Türk Coğrafya Dergisi*, (80), 21-38. <https://doi.org/10.17211/tcd.1065523>

### ÖZ / ABSTRACT

Heyelan duyarlılık haritaları heyelanın mekânsal tahmini için önem arz etmektedir. Bu nedenle heyelan duyarlılık modellerinin doğruluğu tehlike ve risk çalışmaları için temel oluşturmaktadır. Bir bölgede heyelanın tüm tipleri için tek bir model oluşturulması duyarlılığın başarısını etkilemektedir. Heyelanların her bir tipi, farklı mekanizma ve materyalde gerçekleştiği için heyelanı denetleyen hazırlayıcı koşullar da değişmektedir. Bu yüzden duyarlılık modellerinin tek bir heyelan tipine göre oluşturulması daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle çalışmanın amacı, tek bir heyelan ana mekanizmasına bağlı moloz ve toprak kayması tipine göre duyarlılık haritalarının nitel ve yarı nicel yaklaşımlarda nasıl sonuçlar verdiğini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda Sakarya havzasının yukarı çığırında bulunan çalışma alanı için, Varnes (1978) sınıflamasına göre moloz ve toprak kayması tipindeki heyelanlar için Frekans Oran, Analitik Hiyerarşi Süreci, Ağırlıklandırılmış Çakıştırma, Modifiye AHP ve CBS Matris Model yaklaşımları ile duyarlılık modelleri oluşturulmuştur. Model sonuçlarına bağlı duyarlılık oluşturulurken heyelanın yamacın tamamını etkileyeceğinden çalışma alanı yamaç ünitelerine bölünerek çalışılmıştır. Beş model sonucuna göre ROC eğrisinin altında kalan sonuçlar 0,79 ile 0,92 arasında değişmektedir. Bu durum modellerin çok iyi sonuçlar verdiğini ve çalışma sahasının heyelan duyarlılığı açısından iyi temsil edildiğini göstermektedir. Sonuçlara göre heyelanın en yüksek ve en düşük olabileceği alanlar tüm modelde ortak alanlara karşılık gelmektedir. Çalışmada sonuç olarak ana heyelan tipine göre oluşturulan modellerin yüksek sonuçlar verdiğini ortaya çıkarmıştır. Bu sonuçlar, tüm modelin tek bir modelde birleştirilmesinde kolaylık sağlamıştır. Böylece tüm modelden tek bir model çıktısı elde eden çalışma, heyelan tehlike ve risk çalışmalarının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

*Landslide susceptibility maps are important for the spatial prediction of landslides. Therefore, the accuracy of landslide susceptibility models is the basis for hazard and risk studies. The creation of a single model for all types of landslides in a region affects the success of susceptibility. Since each type of landslide occurs in different mechanisms and materials, the landslide controlling preparing conditions change. Creating susceptibility models according to a single landslide type gives better results. For this reason, it is the aim of the study to reveal how the susceptibility maps give results in qualitative and semi-quantitative approaches according to the type of a single landslide main mechanism which is debris and soil slide. For this purpose, susceptibility models were created for debris and soil type landslides using Frequency Ratio, Analytical Hierarchy Process, Weighted Overlay, Modified Analytical Hierarchy Process and GIS Matrix Models according to Varnes (1978) classification in the study area located at the upstream of the Sakarya basin. While creating susceptibility depending on the model results, the study area was divided into slope units, since a landslide would affect the entire slope. According to the five model results, the results under the ROC change vary between 0.79 and 0.92. This shows that the models give very good results and that the study area is well represented in terms of landslide susceptibility. According to the results, the areas where the landslide may be the highest and the lowest correspond to the common areas in all models. As a result of the study, it was revealed that the models created according to the main landslide type gave high results. These results made it easy to combine all models in a single model. Thus, the study, which obtains a single model output from all models, contributes to the improvement of landslide hazard and risk studies.*

## Extended Abstract

### Introduction

Landslide susceptibility studies are the basis for understanding the locality, magnitude, and impact of future landslides for landslide risk and hazard studies. The more accurate the landslide susceptibility map is, the more accurate the landslide hazard and risk maps are. Thanks to Geographical Information Systems, Remote Sensing, and science of statistics, landslide susceptibility approaches have diversified and evolved from the first examples to the present day (Brabb & Pampeyan, 1972; Carrara, 1977; Guzzetti et al., 2005; Zhang et al., 2022).

Some of the approaches used in landslide susceptibility studies have come to the fore periodically. However, most of these studies were evaluated independently of the landslide inventory. Inventory was misused in most of the studies that used inventory. The use of landslides occurring within a few decades in the landslide inventory provides more accurate information in terms of spatial forecasts (Guzzetti, 2021). Because the topographical conditions change due to time and process in paleo landslides, they may not accurately reflect the environmental conditions of the period in which the landslide occurred. Many researchers were used different methods when selecting sample data from the landslide inventory. (Clerici et al., 2006; Gorum et al., 2008; Nefeslioglu et al., 2008; Tribe, 1991; Yilmaz, 2010). In general, researchers prefer sampling for topographic and geological data values from the depletion region where the first movement occurred, rather than all parts of the landslide (Magliulo et al., 2008). In qualitative and semi-quantitative approaches, expert opinion is important in creating a landslide inventory, determining the preparing conditions, and taking samples from the inventory. The expert is also effective in factor selection. The use of too many factor parameters by the expert may reduce the accuracy of the results in the model by reducing the weight of the main factors causing the landslide in the model (Ayalew et al., 2005). Another problem is that susceptibility maps are only treated as raster or vector. Spatial objects (building, farmland, etc.) can be cropped in the resulting maps. This creates problems at the risk stage. Therefore, generating susceptibility maps as slope units partially solves this problem. In addition, since the movement, at any point of a hillslope affects the whole of the hillslope (Carrara et al., 1991), studying the slope unit is also important in terms of the morphology of the process. raster or vector-based results can be output as slope units. If all results give close results, combining them in a single result output as the common decision of all model results makes the result stronger in the positive direction.

### Data and Method

Topographic data were obtained from the 10 m resolution Topo DEM produced from the 1/25,000 topography map. Lithology was obtained from the geology maps of at a scale of 1:100,000 the General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA, 2002). The landslide inventory (between 1950 and 2020) was determined from current orthophoto (1m resolution), stereo aerial photographs (30x30m), and 1:25,000 scale local topography maps. The relationship between landslides and topographic and lithological factors was provided by Swath profiles. The study area was divided into physical slope units. Raster and vector-based qualitative,

quantitative, and semi-qualitative models were selected. Frequency Ratio (FR), Analytical Hierarchy Process (AHP), and Weighted Overlay Model (WOM) were used as raster. GIS Matrix Model (GIS MM) and Modified Analytical Hierarchy Process (M-AHP) models were used as vector models. Quantitative (FR and GIS MM), semi-quantitative (AHP and M-AHP), and qualitative (WOM) approaches were evaluated in the study. Raster and vector-based model outputs were transferred to slope units. Finally, all models were combined to create a single model.

This study; 1) The landslide inventory of the current soil and debris slide-type landslides in Varnes (1978) classification was associated with preparing conditions via expert knowledge. 2) For the sample data, the average values of the source part of the landslide were taken. 3) Vector and raster-based models were created using qualitative and semi-quantitative approaches. 4) These models were combined in slope units and a single susceptibility result was obtained.

### Results and Discussion

Many factors thought to be related to the landslide were evaluated in the study area. However, the swath profiles revealed that the main factors controlling the landslide were slope, elevation relief, and lithology. When the determined value classes of these factors were evaluated together with the landslide inventory, it was seen that there is significant variability in the transition between landslide areas and areas without landslides. Considering the slope factor of these, the landslide is intense on the slope between 7-30°. Landslides are more intense between 800-1000 m elevation values. Considering the relief factor, it was determined that the landslide occurred intensely between 200-450 m relief values. The results were given as slope units due to both raster-vector morphological shape problems that do not define the landslide in the model outputs, and the instability on a slope systematically affects the entire hillslope. According to the slope unit approach, since the landslide-related processes take place on the hillslope, the removal of wide valley floors from the models was a positive effect on the results.

The slope unit transfer of the results obtained in the raster-based model was determined by the majority of the value of the cells covered by each slope unit. The vector-based M-AHP model was evaluated directly on the slope unit basis. The results of the GIS Matrix Model, which is another vector-based model, were transferred to the slope units according to the majority value of each slope unit, as in the raster-based models. The results of these different types of models, ranging from raster-vector-based and qualitative-quantitative methods, were clearly revealed some results for the studied region. The highest value of the receiver operating characteristic (ROC) curve obtained according to the model results was found in the GIS Matrix Model (0.92). In terms of value, the models from high to low are AHP (0.87), frequency ratio (0.86), Weighted Overlay (0.86), M-AHP (0.79), respectively. The highest and lowest susceptibility areas in both raster and vector outputs correspond to close and common areas in all models.

The highest and lowest susceptibility areas in both raster and vector outputs correspond to close and common areas

in all models. Especially the West and Northwest regions of the study area correspond to low landslide susceptibility areas. It is thought that this is due to the correct parameter selection. The transition values between the lowest and highest values differ according to the models. The model with the largest difference is the M-AHP output. The main reason for this is that the model gives results according to 3 sharp decision points (low, medium, and high) rather than a smooth transition in this model. A hybrid model that can decide for the highest areas in terms of landslide susceptibility was revealed by combining all models where the common areas are close to each other. In this way, the spatial susceptibility in the study area was determined by a joint decision of the different models rather than a single model. This model was made to provide practicality and reliability in terms of use.

As a result 1) With the high success achieved above, study area-specific evaluation of the parameters to be used increased the success of the model results. 2) The study unites models with different bases such as raster or vector, and models with different approaches such as qualitative or quantitative on a common denominator in terms of susceptibility. 3) In general, the commonness of minimum and maximum landslide susceptibility areas in all models clearly reveals the safe and unsafe space. 4) As a hybrid model, the model provides more reliable decisions with the success of all models.

## Giriş

Heyelan duyarlılık çalışmaları gelecekte oluşabilecek heyelanların yerini, büyüklüğünü ve etkisinin tahmininde fayda sağlamaktadır. Dolayısıyla oluşturulan heyelan duyarlılık haritalarının tutarlılığı, heyelan tehlike ve risk haritalarının tutarlılığını ve güvenilirliğini etkilemektedir. Bu nedenle heyelan duyarlılık haritalarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar günümüze kadar devam etmiştir. Özellikle Coğrafi Bilgi Sistemleri, Uzaktan Algılama ve Bilgisayar Teknolojileri ile ilgili araçlar sayesinde, heyelan duyarlılık yaklaşımları ilk örneklerinden itibaren günümüze çeşitlenerek gelişmiştir (Brabb & Pampeyan, 1972; Carrara, 1977; Guzzetti vd., 2005; Zhang vd., 2022). Ayrıca teknik imkanların ilerleyen istatistik bilimi ile birleşmesi duyarlılık çalışmalarının gelişmesine katkı sağlamıştır. Duyarlılık çalışmalarını geliştikçe farklı yöntemsel yaklaşımlar ortaya çıkmış ve bunlardan bazıları dönemsel olarak ön planda tutulmuştur. Örneğin 1990-1993 yıllarında çakıştırma analizleri çok sık kullanılmıştır. Bu dönemi takip eden yıllarda literatürde 2000 yıllarının başında ikili veya çok değişkenli istatistiksel yaklaşımların kullanımı yoğunluk kazanmıştır. 2000 yıllarının ilerleyen dönemlerinde ikili ve çok değişkenli istatistiksel yaklaşımlar ve buna ek olarak Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve Yapay Sinir Ağları'na (YSA) ilişkin çalışmalar ağırlık kazanmıştır. 2010 ve sonrasında ise geçmiş dönemlerde kullanılan yaklaşımların karşılaştırılması, yapay zekâ, makine öğrenmesi ve mevcut yöntemlerin modifikasyonu çalışmaları yaygındır. Fakat bahsi geçen yaklaşımlarla yapılan duyarlılık haritalarının pek çoğu heyelan envanterinden bağımsız oluşturulduğu gibi heyelan envanterinin kullanıldığı çalışmaların çoğunda ise envanterin yanlış kullanımı söz konusudur. Heyelan envanterinin kullanılmaması duyarlılık haritalarının başarısını etkilediği gibi envanterler modellerin başarı ölçütünün kıstasıdır. Ayrıca envanter kullanımının bir diğer artışı da heyelanın dağılım deseninin ve heyelanı kontrol eden faktörlerin belirlenmesini sağlamakta-

dır (Casagli vd., 2004; Cihangir & Gorum, 2016; Du vd., 2020; Eeckhaut vd., 2009). Şimdiki zaman, geçmişin anahtarı olduğu kadar geleceğin de anahtarı anlayışıyla hareket edilirse güncel bir heyelan envanteri, mekânsal heyelan tahminini anlamına gelen duyarlılık haritalarını daha güvenilir hale getirir (Casagli vd., 2004; Cihangir & Gorum, 2016; Du vd., 2020; Eeckhaut vd., 2009). Heyelan envanteri kullanılırken bazı hususlara dikkat edilmesi gereklidir. Bunlardan biri mekânsal tahminler açısından envanterin birkaç bin yıllık çok uzun döneme ait heyelanlardan ziyade birkaç on veya yüz yıl içerisinde meydana gelen heyelanları içermesi daha doğrudur (Guzzetti, 2021). Çünkü zaman ve sürece bağlı olarak topografik koşullar önemli ölçüde değiştiğinden, paleo heyelanlar günümüz ortam koşullarını doğru yansıtmaz. Bir diğer husus heyelan envanterinden faydalanırken hazırlayıcı koşullara ilişkin örneklem verilerinin doğru seçilmesidir (Clerici vd., 2006; Suzen & Doyuran, 2004; Tribe, 1991). Çünkü bir heyelan sisteminde eğim, rölyef ve yükselti değerleri birikim bölgesinde en düşüktür (Gorum vd., 2008). Çok büyük heyelanlarda bu birikim zonlarında litoloji ve yeraltı suyu seviyeleri de değişebilmektedir (Cihangir vd., 2018). Örneklem verilerinin doğru alınarak parametrelerle ilişkilendirilmesi sonuçları pozitif yönde etkiler. Bu açıdan birçok araştırmacı, örneklem verilerini seçerken farklı yöntemler kullanmıştır (Clerici vd., 2006; Gorum vd., 2008; Nefeslioglu vd., 2008; Tribe, 1991; Yılmaz, 2010). Bunlardan bazıları çekirdek hücre örnekleme (Suzen & Doyuran, 2004), ana ayna zonun üst kısmını kullanmak (Clerici vd., 2006), yeniden yapılandırılmış topografya (Gorum vd., 2008) ve modifiye çekirdek hücre örnekleme stratejisidir (Dagdelenler vd., 2016). Genel olarak araştırmacılar heyelan envanterlerinden topografik ve jeolojik veri değeri için örneklem alımlarını heyelanın tüm bölümlerinden ziyade hareketin meydana geldiği kaynak bölgesinden tercih etmişlerdir (Magliulo vd., 2008).

Heyelan envanterini oluşturma, envanterle heyelana neden olan hazırlayıcı koşul parametrelerinin belirlenmesi ve envanterden örneklem alımında, uzman görüşü etkisi nitel ve yarı nicel yaklaşımlarda oldukça önemlidir. Uzmanın, neden-sonuç ilişkisi kurabilme becerisine sahip bilgi birikimine ve jeomorfolojik bakış açısına sahip olması da duyarlılık sonucunu etkilemektedir. Bu özelliklere sahip olmayan uzmanla oluşturulmuş model, yanlış bir temele dayandırılmıştır. Örneğin uzman hatasından kaynaklı olarak çok fazla faktör parametresi kullanmak, heyelana neden olan asıl ana faktörlerin ağırlığını azaltacağından model sonuçlarının doğruluğunu azaltır (Ayalew vd., 2005). Günümüze kadar yapılan duyarlılık haritalarında karşılaşılan bir diğer problem haritaların salt olarak raster veya vektör olarak değerlendirilmesidir. Bu durum, heyelan risk haritalarına geçişinde birtakım problemler oluşturabilir. Örneğin bir bina; raster hücre veri değerinin yüksek olduğu ve düşük olduğu iki piksel arasında kalabilir. Ya da farklı değerlere sahip iki vektör poligon bir binayı kesebilir. Bu nedenle çözüm olarak duyarlılık haritalarını vektör tabanda yamaç ünitesi olarak üretmek daha doğrudur. Ayrıca bir yamacın herhangi bir noktasındaki hareketlilik yamacın bütününe etkilediği için (Carrara vd., 1991) sonuçlarda jeomorfolojik bütünlükte bozulmaz. Aynı zamanda yamaç ünitesi kendi içinde homojenlik ve diğer birimler arasında ise heterojenlik sağladığından (Carrara vd., 1991; Carrara vd., 1995; Guzzetti vd., 1999; Guzzetti vd., 2006; Hansen, 1984; Rotigliano vd., 2012) süreç morfolojisinin her bir yamaçta ayrı değerlendirilmesini de sağlar. Bölgesel anlamda çalışma alanlarını jeomorfoloji açıdan yamaç ünitesi, mikro

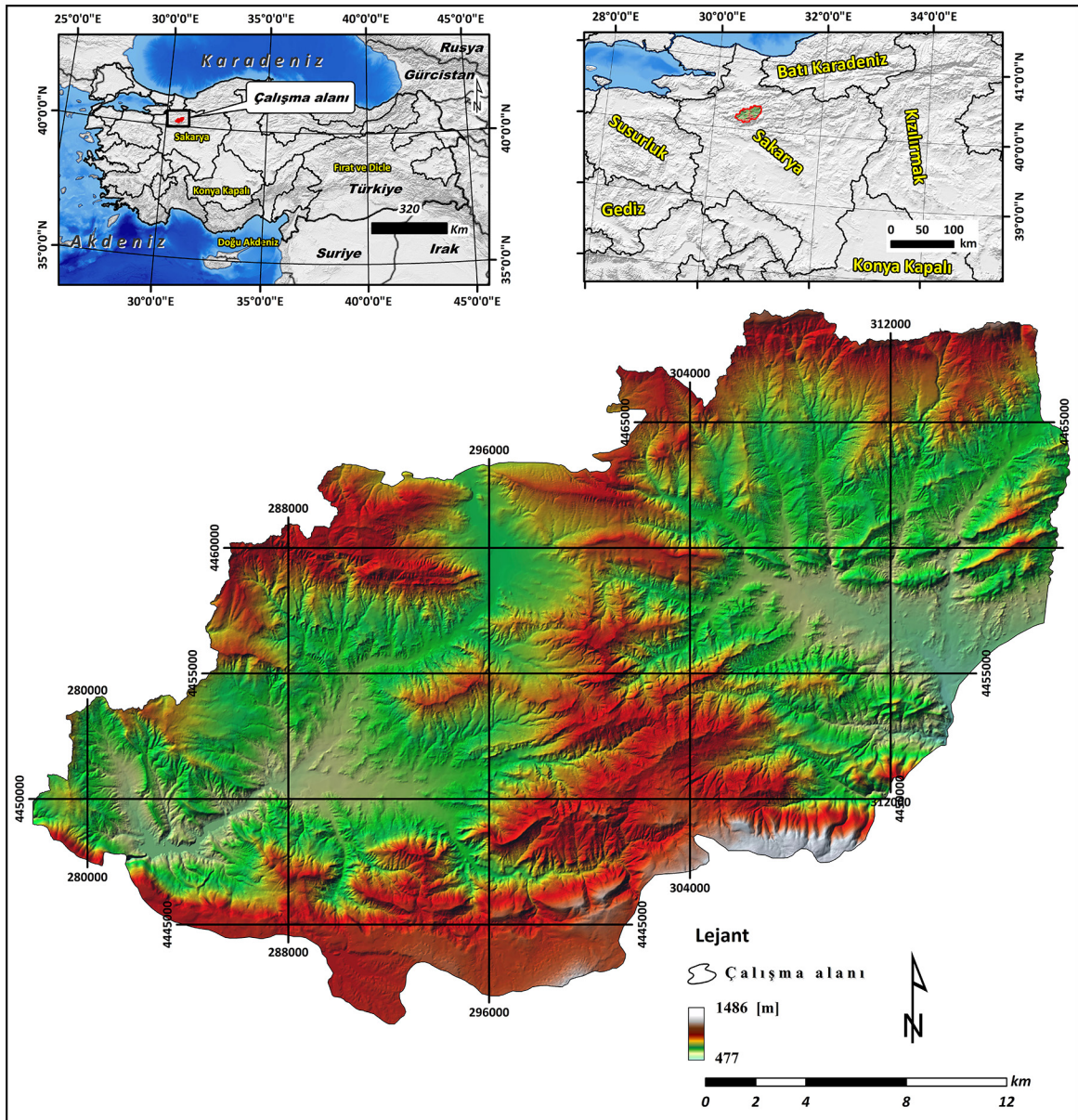
havza veya alt havza gibi fiziksel bütünlük içinde değerlendirilmek, duyarlılıkta hazırlayıcı koşulların yamaç üzerindeki etkinliğinin ölçüsünü ortaya konulmasında daha etkilidir.

Tüm bunlar değerlendirildiğinde, güncel heyelan envanterinin kullanılması ve envantere örneklem seçiminin kaynak noktasından ortalama bir değer ile alınması çalışmanın doğruluğunu artıracaktır. Bu durum model sonuçlarında heyelan duyarlılığının yüksek olduğu bölgeleri pozitif olarak etkileyeceği için daha az sorun oluşturacaktır. Bunun dışında çalışma alanında vektör ve raster tabanlı modeller için heyelana zemin hazırlayan koşulların doğru tespit edilerek buna göre parametre seçilmesi farklı modeller arasında yakın sonuçlar oluşturur. Bir diğer durum ise model sonuçlarının raster veya vektör olarak oluşturulmasıdır. Raster ve vektör model sonuçları, herhangi bir yamaçta gerçekleşecek heyelanın, yamacın tüm süreç dinamiğini etkileyeceğinden bağımsızdır. Bu nedenle, her iki farklı tabandaki model sonucunun (raster veya vektör) mekânsal duyarlılık açısından bir yamaç ünitesinde ortak bir kararla

birleştirilmesi kullanım açısından karar vericilere de kolaylık sağlar. Tüm modellerde sonuçlar yakın olduğu takdirde modellerin ortak karar olarak tek bir sonuç çıktısında birleştirilmesi nihai sonucu pozitif yönde güçlü kılar.

### 1.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Marmara ve Karadeniz Bölgesi arasında bulunan Sakarya Havzasının yukarı çığırında ~400 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplamaktadır. Bu alan Türkiye'nin kuzeybatı kesiminde, 40°16'20" K ile 40°08'54" K ve 30°23'26" D ile 30°51'14" D koordinatları arasında yer almaktadır (Şekil 1). Çalışma alanında 23,6 km<sup>2</sup>'lik heyelanlı yamaç bulunmaktadır. Buda havzanın yaklaşık %3,5'nin heyelanlı olduğunu göstermektedir. En küçük heyelanlı alan yüzölçümü 673 m<sup>2</sup>, en büyük heyelan yüzölçümü 1,1 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplamaktadır. Çalışma alanındaki tüm heyelanların %20,5'ini tükenme zonu geri kalan %79,5'ini ise birikim zonu oluşturmaktadır. Yüksek topografik rölyefe sahip olan çalışma alanının, yükseltisi 857,5 m ile 1486

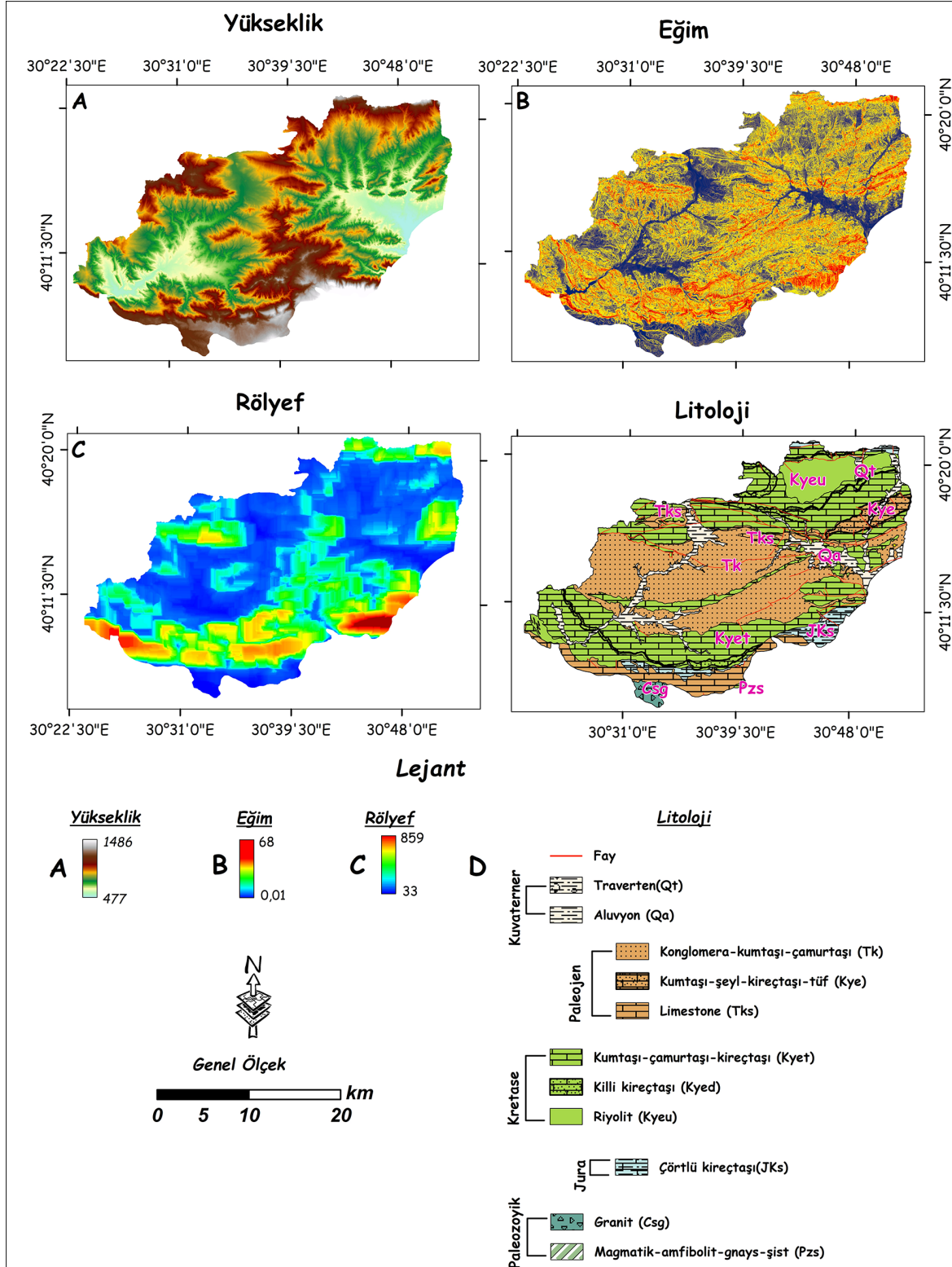


Şekil 1. Çalışma alanının konumu.  
Figure 1. Location of the study area.

m arasında değişmektedir (Şekil 2). Yüksek eğim değerlerine sahip bölgede eğim, 0° ve 68° arasında değişmektedir (Şekil 2). Çalışma alanına içerisinde bulunan Yenipazar meteoroloji istasyonu verilerine göre yıllık toplam yağış 427 mm'dir. Bu istasyona göre en yüksek yağış Aralık ve Ocak aylarında, en az yağış Temmuz-Ağustos aylarında düşmektedir.

Çalışma alanı Mesozoyik dönemde Tetis okyanusunun kuzeyde Sakarya kıtasını, güneyde Anatolid-Torid bloğunu ayırması, sonrasında Tetis okyanusunu Geç Kretase'de kuzeye doğru

dalmasıyla daralmıştır. Tersiyer başlangıcında kuzeyde Sakarya kıtasının güneyde Anatolid-Torid bloğu çarpışması bölgede deformasyona ve Alpin orojenezine neden olmuştur (Okay, 2011; Yılmaz & Özel, 2008). Sakarya zonu ve Toros-Anatolid tektonik birliği içinde yer alan çalışma alanı, Paleozoyikten-Kuvaterner dönemleri arasında çeşitli litolojik birimleri içermektedir. En yaşlıdan en gence doğru bu birimler; Paleozoyik Magmatik-Amfibolit-Gnays-Şist (Pzs) ve Granit (Csg), Jura dönemine ait Çörtlü kireçtaşı (JKs), Kretase dönemine ait Riyolit (Riyolit), Killi kireçtaşı (Kyed) ve Kumtaşı-Çamurtaşı-Kireçtaşı (Kyet), Pa-



Şekil 2. Çalışma alanının rölyef, yükselti, jeoloji ve eğim haritası

Figure 2. Illustration relief, elevation, lithology, and slope map of the study area

leojen dönemine ait Kireçtaşı (Tks), Kumtaşı-şeyl-kireçtaşı-tüf (Kye) ve Konglomera-Kumtaşı-Çamurtaşı (TK), Miyosen dönemine ait Andezit-Bazalt-Piroklastik kaya (Tgek), Kuvaterner dönemine ait Alüvyon (Qa), Yamaç molozu, Deposite konileri (Qy) ve Traverten (Qt) mevcuttur. Bu birimler içerisinde çalışma alanında en fazla %39,2 Kumtaşı-Çamurtaşı-Kireçtaşı (Kyet) ve %29,9 oranında Konglomera-kumtaşı-çamurtaşı (TK) bulunmaktadır (Şekil 2) (MTA, 2002).

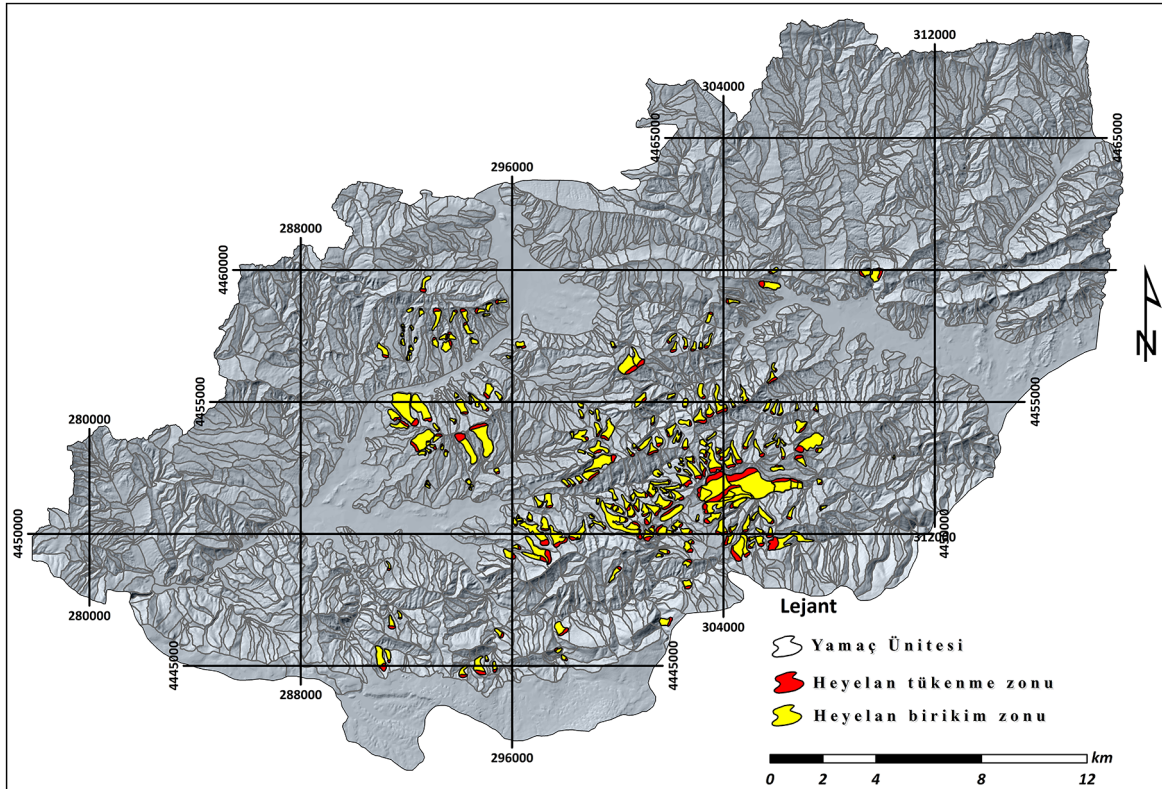
## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmanın amacını 1) Uzman bilgisi ile oluşturulan Varnes (1978) sınıflamasındaki toprak ve moloz kayma tipindeki güncel heyelan envanterinin hazırlayıcı koşullarla ilişkilendirmek 2) Örneklem verisinde heyelanın kaynak kısmının ortalama değerlerini kullanmak 3) Nitel ve yarı nicel yaklaşımlarla vektör ve raster tabanlı modeller oluşturmak 4) Son olarak tüm modelleri yamaç ünitelerinde birleştirilerek tek bir duyarlılık haritası elde etmektir.

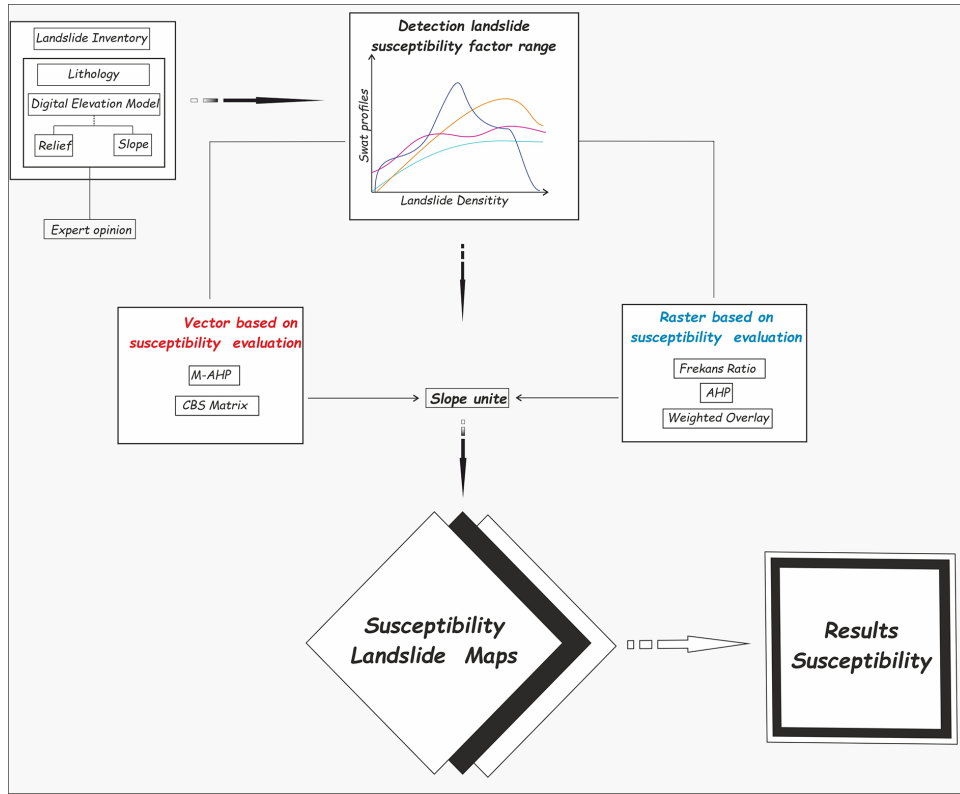
Bu doğrultuda çalışma alanında yükseklik verileri elde etmek için 10 m çözünürlüklü Topo DEM kullanılmıştır. 10 m çözünürlüklü eğim değerleri Topo DEM'den elde edilmiştir. Ayrıca 2000 m<sup>2</sup>lik dikdörtgen alanlar oluşturularak bu alanlardaki yükselti farklarından rölyef değerleri hesaplanmıştır. Litoloji 1: 100.000 ölçekli Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü haritalarından elde edilmiştir (MTA, 2002). Heyelan envanteri (Şekil 3) (1950-2020 yılları arasında) güncel ortofoto (1m çözünürlük), stereo hava fotoğrafları (30x30m) ve 1:25.000 ölçekli yerel topoğrafya haritalarından yararlanılarak belirlenmiştir. Envanter için heyelanlar morfolojik ilinti, örüntü ve taşınma süreçlerinin yoğun olduğu orta yamaç kısımları incelenerek tespit edilmiştir. Heyelan olduğu şüpheli alanlar arazi gözlemleri ve geçmiş

stereo hava foto çiftlerinin stereoskop ile 3 boyutlu incelenmesiyle belirlenmiştir. Heyelanların tükenme zonları, yamaç profillerinden tespit edilmiştir.

Çalışma alanında heyelanı kontrol ettiği düşünülen pek çok faktör parametresi swath profilleri ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede swath profilleri, hangi parametrelerin kullanılması yönünde bilgi sağlamıştır. Eğim, yükselti, rölyef ve litoloji olarak belirlenen parametrelerin sınıflandırılması heyelan içeriğinin oransal dağılımına bağlı istatistiksel değerlendirmelerle yapılmıştır. Sonraki aşamada çalışma alanı yamaç ünitelerine ayrılmıştır. Daha sonrasında raster ve vektör tabanlı nitel, nicel ve yarı nitel yaklaşımlara ait modeller analiz edilmiştir. Raster tabanda, Frekans Oran (FR), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve Ağırlıklandırılmış Çakıştırma (WOM) (*ing. Weighted Overlay Model*) modelleri kullanılmıştır. Vektör tabanda ise CBS Matris Model (CBS MM) ve Modifiye Analitik Hiyerarşi Süreci (M-AHP) modeli kullanılmıştır. Çalışmada yaklaşım olarak nicel yaklaşımda FR ve CBS MM modelleri, yarı nicel yaklaşımda AHP ve M-AHP, nitel yaklaşımda ise WOM değerlendirilmiştir. Değerlendirilen raster ve vektör modelleri yamaç ünitelerine aktarılmıştır. Raster tabanlı modelde elde edilen sonuçların yamaç ünitesi aktarımı, her bir yamaç ünitesinin kapsadığı hücrelerin değerinin çoğunluğuna göre belirlenmiştir. Vektör tabanlı M-AHP modeli, doğrudan vektör olarak yamaç ünitesi bazında değerlendirilmiştir. Diğer bir vektör tabanlı model olan CBS Matris Modelinin sonuçları ise, raster tabanlı modellerde olduğu gibi her bir yamaç ünitesinin çoğunluk değerine göre belirlenmiştir. Son aşamada, tek bir model oluşturmak için tüm modeller 0 ile 1 arasında değerinde normalize edilmiştir. Tüm modeller toplam %100 olacak şekilde model sayısına bağlı katkı oranı olarak tek bir model çıktısı oluşturmak için çakıştırılmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. Heyelan Envanter haritası  
Figure 3. Landslide inventory map.



Şekil 4. Genel olarak yöntem iş akışı.

Figure 4. General methodology flowchart

Genel hatlarıyla yukarıda yöntem aşamaları verilen çalışmada modellerin birebirde uygulanması aşağıda belirtilmiştir.

### 2.1 Frekans Oranı Modeli (FR)

Çalışmada raster tabanda değerlendirilen Frekans Oranı (FR) yöntemi, heyelan duyarlılığını değerlendirmek için olasılık modeline dayalı istatistiksel bir yaklaşıma sahiptir (Lee & Pradhan, 2007). Frekans Oranı, bir olayın olma olasılığının, olmama olasılığına oranı olarak tanımlanabilir (Erener & Düzgün, 2010). Frekans oranının hesaplanmasında birtakım eşitliklerden faydalanılmıştır. Bu eşitliklere bakıldığında

$$FR = \frac{N_i^p N}{N_i^l / N} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

İlk aşamayı oluşturan Frekans Oranı "RF" eşitliğinde; Burada  $N_i^p$  her bir heyelan koşullandırma faktörü sınıfındaki piksel sayısını,  $N$  ise çalışma alanındaki tüm piksellerin toplam sayısını,  $N_i^l$  her bir heyelan hazırlayıcı faktörü sınıfındaki piksel sayısını,  $N^l$  tüm piksellerin toplam sayısını ifade etmektedir (Eşitlik 1). Bu aşamadan sonra ikinci aşamayı oluşturan Rölatif Frekans "RF" gelmektedir. Rölatif Frekansın "RF" hesaplanmasında, Burada  $\sum FR$  her faktöre ait sınıfların toplam değerini,  $FR_i^{cl}$  ise her sınıf için FR değerini ifade etmektedir (Eşitlik 2). Üçüncü aşamada ise Tahmin Oranın hesaplanmaktadır.

$$RF = \frac{FR_i^{cl}}{\sum FR} * 100 \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Tahmin Oranında "PR",  $RF_{max}$  sınıflardaki her faktörün en büyük değeridir.  $RF_{min}$  ise sınıflardaki her faktörün en küçük değerini,  $\sum_{min}^{RF}$  ise sınıflardaki tüm faktörlerin minimum değerini oluşturmaktadır (Eşitlik 3) (Lee & Pradhan, 2007; Lee & Talib, 2005).

$$PR = \frac{RF_{max} - RF_{min}}{\sum_{min}^{RF}} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Her bir parametre alt grubu hesaplanan Rölatif Frekans değeri ile ve her bir faktör parametresinin Tahmin Oranı kat sayısı oluşturulmuştur. Elde edilen raster değer sonuçları her bir yamaç ünitesinde içerdiği raster ağırlık yüzdesine göre yamaç ünitelerine aktarılmıştır. Böylece Frekans Oran yöntemine ait heyelan duyarlılık haritası elde edilmiştir.

### 2.2 Ağırlıklandırılmış Çakıştırma Modeli (WOM)

Raster tabanda değerlendirilen bir diğer modeli ise Ağırlıklandırılmış Çakıştırma Modeli (ing. Weighted Overlay Modeli) oluşturmaktadır. Bu model çok katmanlı ve çok kriterli değerlendirme olarak da yorumlanabilir. Bu model nitel bir yaklaşıma sahiptir. Model, birden fazla raster katmanının birbirine ve kendi içlerine göre uzman görüşüyle ağırlıklandırılarak üst üste çakıştırılmasıyla elde edilir (Basharat vd., 2016; Shit vd., 2016). Elde edilen sonuç çıktısı, belirlenen kriterlere uygun ve uygun olmayan alanları içerir (Roslee vd., 2017). Bu modelin uygulanma aşamasında, ilk olarak giriş rasterindeki değerler ortak bir değerlendirme ölçeğine, uygunluk ya da benzer bir birleştirici ölçeğe göre yeniden sınıflandırılmaktadır. Daha sonra her girdi raster hücre değeri, raster önem derecesi ile çarpılmış ve çıktı rasterlerini oluşturmak için elde edilen hücre değerlerine eklenmiştir. Üçüncü aşamada rasterdeki her katman, uzman tarafından heyelan içeriği dikkate alınarak belirlenen önemlerine veya etki yüzdelere göre ağırlıklandırılmıştır. Atanan değerlerin toplamı 100'e eşit olacak şekilde değerlendirilmiştir. Son olarak oluşturulan raster tabanlı sonuç çıktısı, her bir yamaç ünitesinde içerdiği raster ağırlık yüzdesine göre yamaç ünitelerine aktarılmıştır.

### 2.3 Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

Raster tabanda değerlendirilen ve yarı nicel yaklaşıma sahip olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) modeli, analiz sürecinin her aşamasında izlenebilen ve kalibre edilebilen uzman görüşüne dayalıdır (Saaty, 1980). AHP'nin karar hiyerarşisi tanımlandığında; kararı etkileyen faktörlere göre karar noktalarının yüzde dağılımlarını veren bir karar verme ve tahmin yöntemi olarak da açıklanabilir (Nefeslioglu vd., 2013; Saaty, 1980). AHP sürecinin ilk adımını, karar noktalarının ve bunları etkileyen faktörlerin belirlendiği problemin tanımlanması oluşturmaktadır (Nefeslioglu vd., 2013; Saaty, 1980). İkinci adımı, faktörler arasında karşılaştırma matrisleri oluşturmaktır (Yaralıoğlu, 2004) (Eşitlik 4). Bu faktörler kullanılırken önem dereceleri belirlenir (Tablo 1). Karşılaştırmalar ise, karşılaştırma matrisinin tüm değerleri 1 olan köşegeninin üstünde kalan değerler için yapılır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 4})$$

**Tablo 1.** Karşılaştırma matrisinin önemi.

**Table 1.** The importance of comparison matrix.

Önem derecesi	Değer Açıklaması
1	Her iki faktörün eşit öneme sahip olması durumu
3	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı biraz üstün kılmaktadır.
5	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı oldukça üstün kılmaktadır.
7	Bir kriter diğerine göre çok güçlü bir şekilde tercih edilir; üstünlük pratikte kanıtlanmıştır
9	Bir kriterin diğerinden üstünlüğünü gösteren kanıt çok büyük güvenilirliğe sahiptir.
2, 4, 6, 8	Ara değerler

Diyagonalin altındaki bileşenler için Eşitlik 5 kullanılır (Nefeslioglu vd., 2013; Saaty, 1980). Üçüncü aşama olan faktörlerin %'lik önem dağılımlarının belirlenmesinde; faktörlerin bütün içerisindeki ağırlıklarını karşılaştırma matrisini oluşturan "B" sütun vektöründen (n adet ve n bileşenli) yararlanılır (Eşitlik 6). "B" vektörlerinin hesaplanmasında ise Eşitlik 7 kullanılır.

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (\text{Eşitlik 5})$$

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \vdots \\ b_{n11} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (\text{Eşitlik 7})$$

Faktörler için hesaplanan B sütun vektörlerinin, bir matris formatında bir araya getirilmesiyle "C" matrisi elde edilir. "C" matrisinden yararlanarak (Eşitlik 8), faktörlerin birbirlerine göre önem değerlerini gösteren yüzde önem dağılımları (Öncelik "W" Vektörü) elde edilir (Eşitlik 9).

$$A = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 8})$$

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \rightarrow W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

Dördüncü aşama faktör karşılaştırmalarındaki tutarlılığın ölçülmesi için Tutarlılık Oranının (CR) hesaplanması oluşturmaktadır. Tutarlılık Oranının "CR"nin hesaplanmasına ilişkin esas, faktör sayısı ile Temel Değer adı verilen ( $\lambda$ ) bir katsayının karşılaştırılmasına dayanmaktadır (Nefeslioglu vd., 2013; Saaty, 1980). Temel Değerin " $\lambda$ " hesaplanması için öncelikle "A" karşılaştırma matrisi ile "W" öncelik vektörünün matris çarpımı gerçekleştirilerek "D" sütun vektörü elde edilir (Eşitlik 10).

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

"D" sütun vektörü ile "W" sütun vektörünün karşılıklı elemanlarının bölümünden her bir değerlendirme faktörüne ilişkin Temel Değer (E) elde edilmektedir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması ise karşılaştırmaya ilişkin Temel Değeri ( $\lambda$ ) vermektedir (Eşitlik 11).

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \rightarrow \lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (\text{Eşitlik 11})$$

Temel Değeri " $\lambda$ " değerinin hesaplanmasından sonra, Tutarlılık Göstergesi (CI) hesaplanmaktadır (Eşitlik 12). Tutarlılığın değerlendirilmesinde, CI değeri Rastgele İndeks (RI) adı verilen bir düzeltme değerine bölünür ve CR değeri hesaplanır (Eşitlik 13) (Yaralıoğlu, 2004). Hesaplanan CR değerinin 0.10'dan küçük olması karar vericinin yaptığı karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir (Nefeslioglu vd., 2013; Saaty, 1980).

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (\text{Eşitlik 12})$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Eşitlik 13})$$

Beşinci aşamada faktörlerin m karar noktasındaki % önem dağılımları bulunmaktadır. Birebir karşılaştırmalar ve matris işlemleri faktör sayısı kadar (n adet) tekrarlanmaktadır. Bu aşamada her bir faktör için karar noktalarında kullanılan "G" matrisi karşılaştırma matrislerinin boyutunu oluşturmaktadır (Nefeslioglu vd., 2013; Saaty, 1980). Her bir karşılaştırma işleminden sonra boyutu değerlendirilen faktörün karar noktalarına göre yüzde dağılımlarını gösteren "S" sütun vektörleri elde edilir (Eşitlik 14).

$$S_i = \begin{bmatrix} s_{11} \\ s_{21} \\ \vdots \\ s_{m11} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 14})$$



Altıncı ve son aşamayı ise, karar noktalarındaki sonuç dağılımının bulunması oluşturmaktadır. Bu aşamada öncelikle, yukarıda anlatılan  $n$  adet boyutlu " $S$ " sütun vektöründen meydana gelen ve boyutlu " $K$ " karar matrisi oluşturulmaktadır (Eşitlik 15). Sonuç karar matrisi " $W$ " sütun vektörü (Öncelik Vektörü) ile çarpıldığında  $m$  elemanlı " $L$ " sütun vektörü elde edilmektedir (Eşitlik 16). Son olarak AHP için her faktör sınıfı " $W$ " vektör katsayı ile çarpılmıştır. " $W$ " vektör katsayı sınıf değerleri ile çarpılarak AHP duyarlılık haritası elde edilmiştir. Elde edilen sonuç çıktısı diğer raster tabanlı modellere uygulandığı gibi her bir yamaç ünitesinde içerdiği raster ağırlık yüzdesine göre yamaç ünitelerine aktarılmıştır.

Bu aşamaya kadar AHP, bu aşamanın devamında vektör duyarlılık haritası için Modifiye Analitik Hiyerarşi Süreci modelinin aşamaları olacaktır.

$$K = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$L = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{21} \\ \vdots \\ L_{m1} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 16})$$

#### 2.4 Modifiye Analitik Hiyerarşi Süreci (M-AHP)

Modifiye Analitik Hiyerarşi Süreci (M-AHP) yöntemi vektör tabanda yarı nicel bir yaklaşım olarak çalışma alanına uygulanmıştır. Bu yaklaşım AHP yönteminin subjektif değerlendirmesinden kaynaklanan belirsizliği ortadan kaldırmak için Nefeslioğlu vd. (2013) tarafından öne sürülmüştür. Bu nedenle

AHP ve M-AHP benzer aşamalar olsa da temelde farklılıklar vardır. Bu iki yaklaşım arasında iki fark bulunmaktadır. (Nefeslioğlu vd., 2013). Birincisinde; karşılaştırma matrisi uzman tarafından hazırlanmamıştır. Uzman, sistemdeki her faktör için yalnızca maksimum puanları verir. Sonrasında faktör puan fark matrisi hazırlanır. Faktör puan farkı değerleri, sistemdeki maksimum faktör puanına bağlı olarak normalleştirilir. Sistemdeki örneklem mekân boyutu, uzman tarafından verilen maksimum faktör puanına göre belirlenir. Faktör karşılaştırma matrisi, modifiye edilmiş önem değer ölçeği dikkate alınarak oluşturulur (Nefeslioğlu vd., 2013). İkinci farkta ise; koşullandırma faktörlerinin karar noktalarındaki önem dağılımlarının değerlendirilmesi ile ilgilidir. Bu aşamada her faktör kendi maksimum puanına göre normalleştirilir. Normalleştirilmiş faktör puanı ile sayısal bir eksende  $[0, 1]$  kapalı bir aralıktaki karar noktaları arasındaki doğrusal mesafeler ölçülür. Karar noktası karşılaştırma matrisi, modifiye edilmiş önem değer ölçeği dikkate alınarak oluşturulur (Nefeslioğlu vd., 2008).

Heyelan bir yamaç boyunca geliştiğinden bu model çalışma alanı yamaç ünitelerine ayrılarak vektör tabanda uygulanmıştır. Bu amaçla çalışma alanı 2597 jeomorfolojik yamaç ünitesine ayrılmıştır. Sonrasında parametreler önem derecelerine göre sıralanarak puanları verilmiştir. Sonraki adımda her bir model için 2597 kez M-AHP analizi yapılmıştır. Her bir modelde her bir yamaç ünitesinin düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç karar bilgisi puanları girilmiştir. M-AHP yaklaşımı 2597 kez her bir yamaca uygulandığından yöntemin anlaşılması açısından bir yamaç ünitesi için örnek M-AHP adımları gösterilmektedir.

İlk olarak model için öncelikle faktör puan fark matrisi ve normalize faktör puan fark matrisi oluşturulmuştur (Tablo 2). Daha sonra ikinci aşamada önem değerleri çizelgesi (Tablo 3) ve faktörler arası karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur (Tablo 4).

**Tablo 2.** Faktör puanı fark matrisi "A" Normalleştirilmiş faktör puanı fark matrisi "B".

**Table 2.** The factor score difference matrix "A" The normalised factor score difference matrix "B".

A	C1	C2	C3	C4	B	C1	C2	C3	C4
C1	0.00	2.00	3.00	7.00	C1	0.00	0.22	0.33	0.78
C2	0.00	1.00	5.00		C2	0.00	0.11	0.56	
C3	0.00	4.00			C3	0.00	0.44		
C4	0.00				C4	0.00			

**Tablo 3.** Modifiye edilmiş önem değer ölçeği (Saaty (1980)'den sonra Nefeslioğlu vd. (2013) tarafından modifiye edilmiştir.)

**Table 3.** The modified importance value scale (modified by Nefeslioğlu vd. (2013) after Saaty, (1980)).

Normalleştirilmiş parametre puan farkı										
		0	0.000-0.125	0.125-0.250	0.250-0.375	0.375-0.500	0.500-0.625	0.625-0.750	0.750-0.875	0.875-1.000
Önem değeri	> 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	< 0	1	0.5	0.333	0.25	0.2	0.167	0.143	0.125	0.111

**Tablo 4.** Faktör karşılaştırma matrisi; matris (A).

**Table 4.** The factor comparison matrix; the matrix (A).

"A" Matris				
	C1	C2	C3	C4
C1	1.00	3.00	4.00	6.00
C2	0.33	1.00	2.00	4.00
C3	0.23	0.50	1.00	3.00
C4	0.17	0.25	0.33	1.00

Üçüncü aşamada, faktörlerin %'lik önem dağılımları belirlenmiştir ("C" Matrisi ve "W" Öncelik Vektörü) (Tablo 5). Dördüncü aşama, faktör karşılaştırmalarındaki tutarlılığın ölçülmesini sağlamaktadır. Daha sonra "D" vektörü oluşturulmuştur. Bu vektör, "A" matrisinin her satırının her bir öncelik vektörünün "W" değerlerinin çarpımının toplamıdır. "D" vektörünün öncelik vektörüne "W" oranı ile de "E" vektörü elde edilmiştir (Tablo 6). "E" vektörünün ortalaması ile elde edilen " $\lambda$ " değeri ise 4,08'e eşittir. Modelde tutarlılık indeksi (bkz. (Eşitlik 12)) 0,03 olarak belirlenmiştir. Rastgele indeks ise 1'dir. Karşılaştırma matrisi ve ağırlık vektörü "W" için tutarlılık oranının (bkz. (Eşitlik 13)) 0,03 olarak hesaplanması, anlık faktör puanlarına dayalı olarak ilgili yamaç ünitesi için oluşturulan karşılaştırma matrisinin tutarlı ve rasyonel olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Yüzdelerik önem dağılımları.

Table 5. Percent distribution of importance.

C Matris					W vektör	
C1	0.57	0.63	0.55	0.43	0.54	
C2	0.19	0.21	0.27	0.29	0.24	
C3	0.14	0.11	0.14	0.21	0.15	
C4	0.10	0.05	0.05	0.07	0.07	

Tablo 6. Vektör D ve E.

Table 6. Vector D and E.

"A" Matris					W	"D" Vektör	"E" Vektör
	C1	C2	C3	C4			
C1	1.00	3.00	4.00	6.00	0.54	2.26	4.15
C2	0.33	1.00	2.00	4.00	0.24	0.99	4.11
C3	0.23	0.50	1.00	3.00	0.15	0.60	4.04
C4	0.17	0.25	0.33	1.00	0.07	0.27	4.03

Beşinci aşamayı karar noktalarının değerlendirilmesi ve sonuçların dağılımı aşaması oluşturmaktadır. Üç karar noktasında (düşük, orta ve yüksek) (Şekil 5) hazırlayıcı faktörlerin önem dağılımları değerlendirmek için önce "G" matrisleri oluşturulmuş ve ardından her koşullandırma faktörü için "S" vektörleri hesaplanmıştır. Bu aşamaya gelindiğinde her parametre kendi maksimum puanı üzerinden normalize edilmiştir. Her parametrenin karar noktalarına olan doğrusal uzaklıkları, 0 ile 1 aralığındaki normleştirilmiş bir sayı doğrusu üzerinde değerlendirilmiştir (Nefeslioglu vd., 2013).

Tablo 7. "C1" parametresi karar noktalarının belirlenmesi ve sonuç dağılımı.

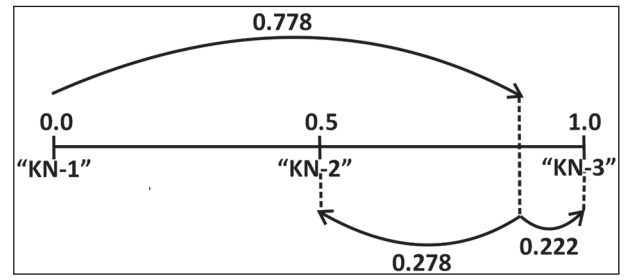
Table 7. Determination of "C1" parameter decision points and distribution of results.

C1 = 1.000		KN-1	KN-2	KN-3	S1
	KN-1	1.00	0.20	0.11	0.06
	KN-2	5.00	1.00	0.20	0.22
	KN-3	9.00	5.00	1.00	0.72
<b>Toplam</b>		<b>15.00</b>	<b>6.20</b>	<b>1.11</b>	

Tablo 8. Karar noktalarındaki sonuç dağılımı (Kırmızı ile belirtilen kısım nihai karardır).

Table 8. Result distribution at decision points (Red is the final result).

Karar matrisi (K Matris)					"L" Vektör		Heyelan Duyarlılık
	C1	C2	C3	C4			
KN-1	0.06	0.08	0.10	0.57	KN-1	0.10	Düşük
KN-2	0.22	0.34	0.62	0.34	KN-2	0.32	Orta
KN-3	0.72	0.57	0.28	0.08	KN-3	0.59	Yüksek



Şekil 5. Karar Noktasının (KN) Belirlenmesi.

Figure 5. Determination of Decision Point (DP).

- ❖ KN-1>KN-3: 0.222-0.778=-0.556
- ❖ KN-2>KN-3: 0.222-0.278=-0.056
- ❖ KN-1>KN-2: 0.278-0.778=-0.500

Heyelan duyarlılığının bir parametresine (C1; Normalize Parametre Puanı=1.000) ilişkin 3 Karar Noktası (KN) için örnek çözümlene gösterilmiştir. Bu çözümlene C2, C3 ve C4 parametreleri içinde yapılmıştır (Nefeslioglu vd., 2013).

"C1" parametresi için belirlenen (Tablo 7) KN-1, KN-2 ve KN-3 karar noktaları "C2" ve "C3" içinde belirlenmiştir.

Her bir parametrenin her bir karar noktası her bir öncelik vektörü "W" değerleri çarpımının toplamı o karar noktasının sonuç dağılımını vermektedir (Tablo 8). Karar noktalarındaki yüksek sonuç değeri, yamaç ünitesinin nihai sonucunu oluşturmaktadır (Nefeslioglu vd., 2013). "C1", "C2", "C3" ve "C4" parametreleri içinde karar noktaları belirlendikten sonra sonuç dağılımı elde edilmiştir. Bu işlem çalışma alanında 2597 yamaç ünitesi için uygulanmıştır. Her modelin düşük, orta ve yüksek kararı yamaç ünitelerine aktarılmıştır. Kararlar 0 ile 1 değerleri arasında olduğu için normalize edilmemiştir.

## 2.5 CBS Matris Model (CBS MM)

Bir diğer vektör modeli oluşturan CBS Matris Modeli "CBS MM" nicel bir yaklaşıma sahiptir. Bu model CBS ortamında heyelana neden olan faktör tipleri arasındaki olası tüm kombinasyonlara ve bunların heyelan envanteriyle korelasyonuna bağlı bir matrisin elde edilmesi ile oluşturulmaktadır (DeGraff & Romesburg, 2020; Fernández vd., 1999; Irigaray vd., 2007). Bunun için ilk olarak örneklemin heyelan kaynak noktası ve-

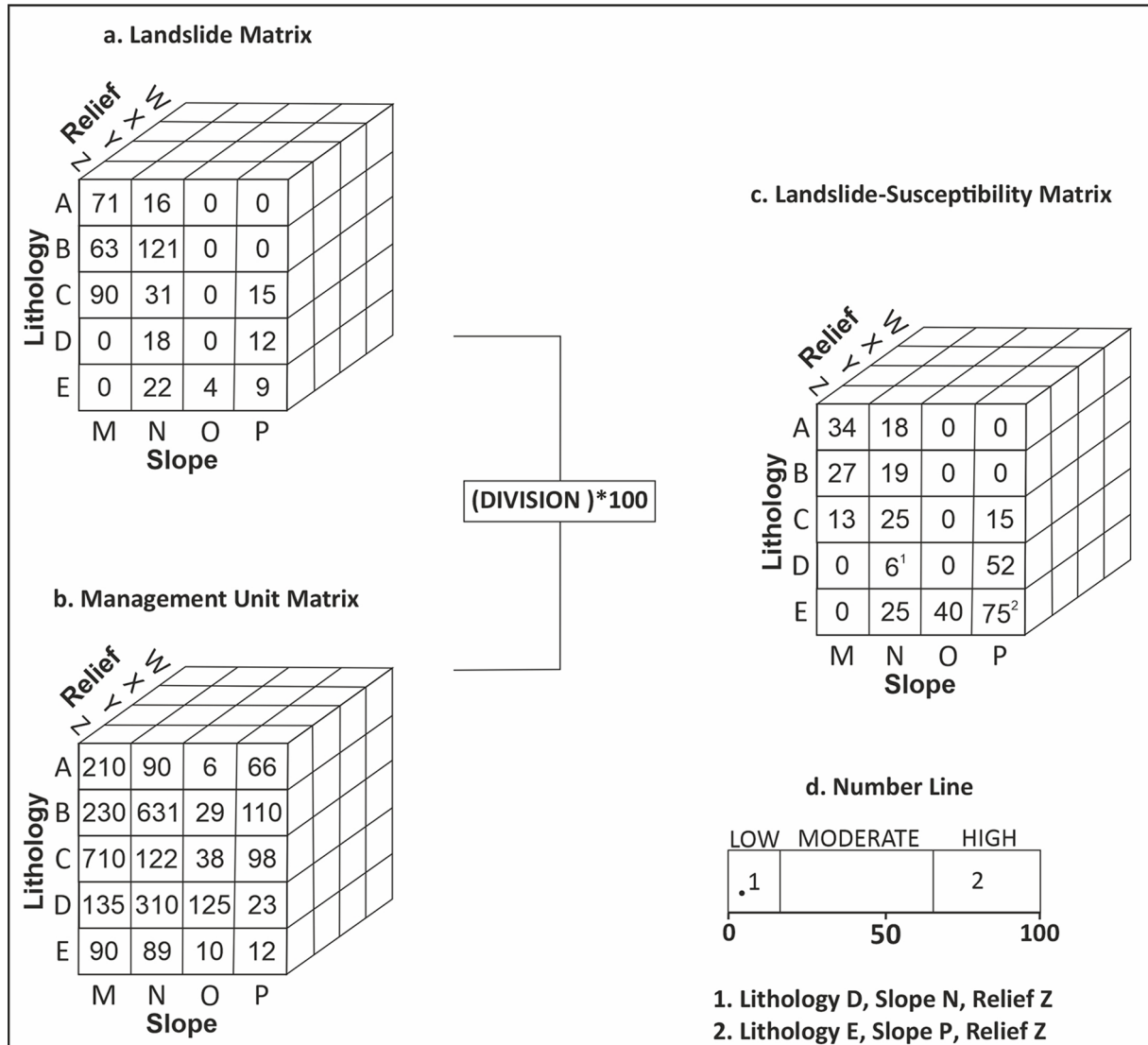
risine bağlı vektör heyelan envanterine bağlı olarak "Heyelan Matrisi" oluşturulmaktadır. Bu matriste her bir faktör kombinasyonunda heyelandan etkilenen yüzey alanı hesaplanmaktadır (Şekil 6a). Bir ikinci aşamayı ise her bir faktör kombinasyonunun kapladığı toplam yüzey alanı hesaplanmasıyla elde edilen "Yönetim Birimi Matrisi" (Şekil 6b) oluşturmaktadır. Üçüncü ve son aşamayı ise Heyelan Matrisini oluşturan değerlerin Yönetim Birim Matrisi değerlerine oranlanmasıyla elde edilen "Heyelan Duyarlılık Matrisi oluşturmaktadır (Şekil 6c). Heyelan duyarlılık matrisindeki değerler, çalışma alanının toplam heyelana oranını ve her bir noktadaki faktör kombinasyonunun rölatif duyarlılığını temsil etmektedir (Fernández vd., 1999; Irigaray vd., 2007). Sonuç çıktısında elde edilen vektör duyarlılık sonuçları sonrasında her bir yamaç ünitesinde içerdiği vektör ağırlık yüzdesine göre yamaç ünitelerine aktarılmıştır.

Beş model için belirlenen parametre sınıfları ve bu parametrelerin alt sınıfları (Tablo 9) heyelan içeriğinin istatistiksel olarak sınıf ve alt sınıflardaki değişimlerine bağlı olarak uzman tarafından belirlenmiştir. Parametre sınıflarına bağlı etki katsayıları FR, AHP, M-AHP modellerinde modelin kendi kat sayılarına göre oluşturulmuştur. WOM modelinde ise etki kat sayıları uzman görüşü ile elde edilmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1 Faktör Parametrelerinin Belirlenmesi

Duyarlılık çalışmalarında çalışma alanının büyüklüğüne bağlı olarak heyelanı kontrol eden faktörlerin sayısı değişmektedir. Ayrıca faktörlerin sayısını, duyarlılık haritası için alınan örneklem verisinin farklı tip heyelanlardan oluşturulması da değiştirmektedir. Bu nedenle tek bir heyelan tipine odaklanılarak parametre seçimi (Fell vd., 2008) çalışma alanı için daha doğrudur. Çalışma alanında heyelanları kontrol eden faktörleri anlama ve faktör seçimine karar verme açısından uzmana rehberlik etmesi amacıyla swath profilleri kullanılmıştır (Pérez-Peña vd., 2017). Böylece çalışma alanında heyelanla ilişkisi olduğu düşünülen pek çok faktör değerlendirilmiştir. Fakat heyelanı kontrol eden ana unsurların eğim, yükselti, rölyef ve litoloji olduğu belirlenmiştir. Heyelan kaynak noktasının alan sal dağılımının %90'ının seçilen faktörlerin minimum ve maksimum değerleri arasındaki değişime bağlı heyelanlanma da değişmektedir (Şekil 7). Aynı zamanda bu faktörlerin istatistiksel olarak belirlenen alt sınıfları heyelan envanteri ile değerlendirildiğinde, heyelan içeren ve içermeyen yamaçlar arasında geçişte belirgindir (Şekil 7). Belirlenen faktörlerden eğimin 7-30° değerleri arasında olduğu alanlarda heyelan yoğunlaş-



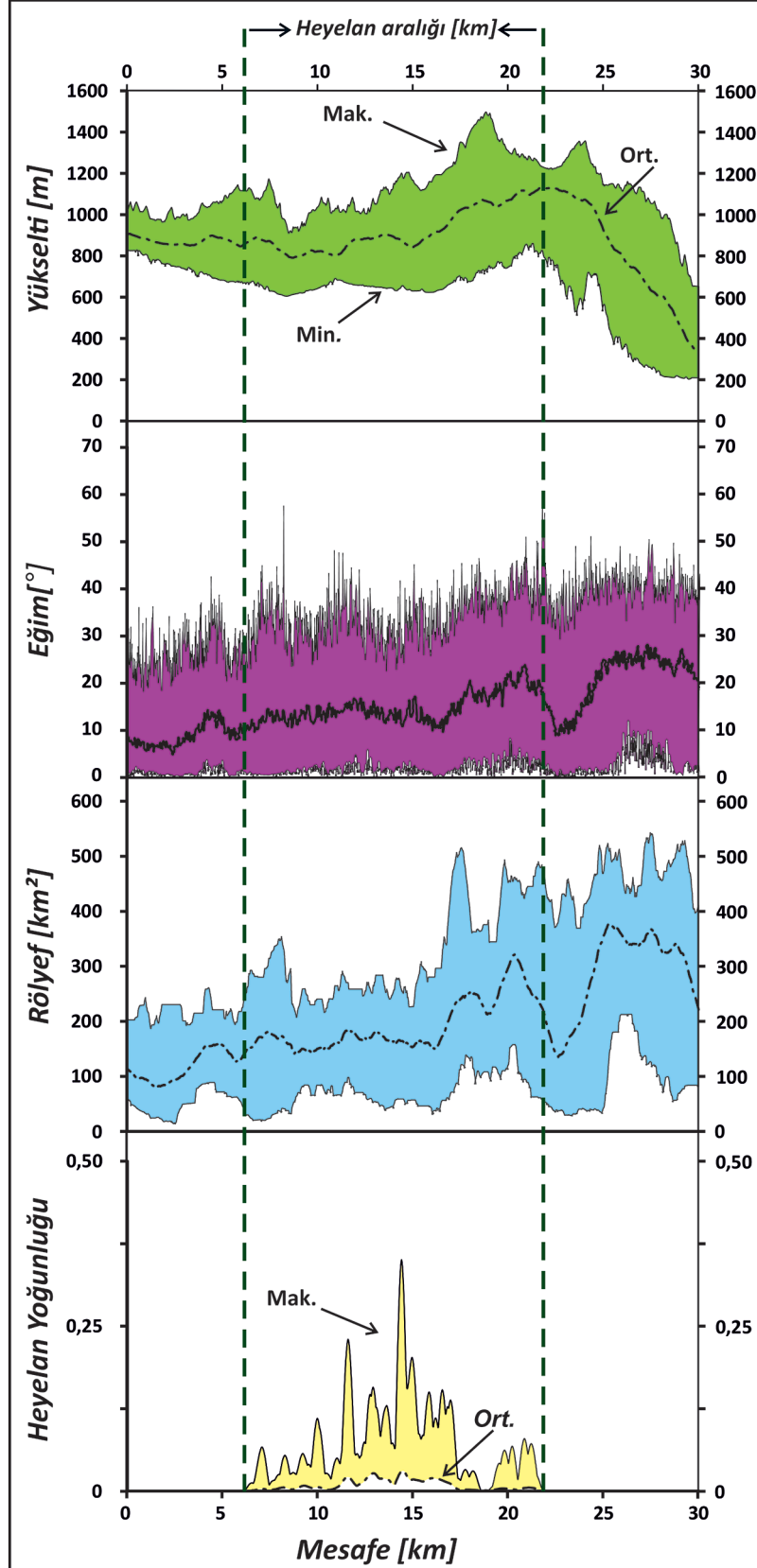
Şekil 6. Şematik olarak CBS Matris Model yöntemiyle heyelan duyarlılığının gösterimi ((Fernández vd., 1999; Irigaray vd., 2007)'den değiştirilerek).  
 Figure 6. Illustration of the determination of landslide susceptibility by the GIS Matrix Model (changed from (Fernández vd., 1999; Irigaray vd., 2007)).

**Tablo 9.** Frekans Oranı, Analitik Hiyerarşi Süreci, Ağırlıklandırılmış Çakıştırma ve Modifiye Analitik Hiyerarşi Süreci modelleri için tüm parametre sınıflarının katsayıları.  
**Table 9.** Coefficient of all parameter classes for Frequency Ratio, Analytical Hierarchy Process, Weighted Overlay, and Modified Analytical Hierarchy Process models

Faktörler	Sınıf	% Sınıf	% Sınıfların Heyelan İçeriği	FR		M-AHP	AHP		WOM
				Değer	PR (Etki %)	Değer	% Etki	Değer	% Etki
Eğim	0-7	27,74	8,7	0,31		1		1	
	7-14	29,53	34,2	1,16		6		6	
	14-21	22,10	35,1	1,59	1	9	0,29	9	27
	21-30	15,67	17,3	1,10		6		6	
	30-69	4,96	4,7	0,94		5		5	
Yükselti	477-747	27,29	1,3	0,05		1		1	
	747-835	22,08	8,5	0,39		1		1	
	835-925	18,77	13,6	0,72	2,15	1	0,47	4	32
	925-1020	14,44	24,1	1,67		4		4	
	1267-1486	16,02	52,5	3,27		9		9	
Litoloji	Kuvaterner, traverten	0,45	0,0	0,00		1		1	
	Kuvaterner, alüvyon	7,40	0,0	0,00		1		1	
	Kuvaterner, yamaç molozu, birikinti konisi	0,01	0,9	0,36		1		1	
	Lower , andezit bazalt-priyolastik kayaç	0,01	0,9	0,23		1		1	
	Paleosen, konglomera-kumtaşı-çamurtaşı	29,90	79,0	0,54		9		1	
	Paleosen, kumtaşı-şeyl-kireçtaşı-Tüf	2,20	10,0	0,00		1		1	
	Alt Paleosen, kireçtaşı	7,50	0,0	0,13	2,21	1	0,18	1	24
	Üst Kretase, kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı (Kyet)	39,20	4,9	2,58		1		9	
	Üst Kretase, killi kireçtaşı	2,90	2,4	0,58		1		2	
	Üst Kretase, riylolit	5,60	1,4	0,00		1		1	
	Kallovien-Aptiyen, çörtlü kireçtaşı	3,70	1,4	0,25		1		1	
	Karbonifer, granit	1,00	0,0	0,00		1		1	
Paleozoik, magmatik-amfibolit-gnays-şist	0,04	0,0	0,00		1		1		
Rölyef	33-150	9,31	0,2	0,03		1		1	
	150-210	20,62	1,6	0,08		1		1	
	210-313	41,30	64,3	1,56	1,88	9		9	17
	313-457	23,95	32,6	1,36		7		7	
	457-852	4,81	1,2	0,24		1		1	

maktadır. Bölgenin yarı-nemli iklim koşullarına sahip olması, bu eğim değerleri arasındaki topografyanın regolit oluşturmak için uygun ortama sahip olduğunu göstermektedir. Eğimin  $45^\circ$  olduğu alanların daha çok kaya yüzeyleri içermektedir. Bu alanlarda moloz ve toprak kayması nadir olarak görülmektedir (Şekil 7).

Yükselti faktöründe heyelanın daha çok 800 m'nin üzerindeki alanlarda yoğun olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu alanlarda yükseklik, sıcaklık ve nem koşullarına bağlı topografik koşullar ayrışma süreçlerini etkilemektedir. Rölyef faktöründe ise heyelan daha çok 200-450 m rölyef değerleri arasında yoğun olarak bulunmaktadır (Şekil 7). Bu değerlerden daha yüksek



Şekil 7. Çalışma alanında yükselti, eğim, rölyef ve heyelana ait K-G yönlü swath profilleri.

Figure 7. Altitude, slope, relief, and landslide distribution N-S direction swath profiles of the study area.

rölyef değerleri içeren alanlarda heyelanın seyrek görülmesinin nedeni bu alanlarda şekil-süreç sisteminin karşılıklı gelişimi için gerekli koşulların sağlanamadığı ve regolitin tutunamamasıdır.

### 3.2 Model Analizi

Heyelanın yoğun olduğu çalışma alanında ana tipi kayma olan heyelanlara ait duyarlılık haritaları farklı modellerle ortaya konularak karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Modellerde tetikleyici faktör olan yağış verileri, çalışma alanı için tek bir meteorolojik veri istasyonu bulunduğundan tüm alan için eşit kabul edilmiştir. Buradaki amaç, yağışın çalışma alanı için eşik değerini aşması durumunda hangi alanlarda heyelan oluşabileceğine ilişkin duyarlılığın tahmin edilmesini içerdiğinden tetikleyici faktör analizde kullanılmamıştır. Heyelan duyarlılık model sonuçlarının raster veya vektör olarak ortaya konulmasında birtakım problemlerle karşılaşmıştır. Bunlardan raster tabanlı sonuçlarda, komşu raster hücreleri arasında çok düşük veya çok yüksek duyarlı hücrelerin keskin geçişler yapması, duyarlılık değeri yüksek olan pikselin komşu pikseli etkilememesi problemleridir. Aynı zamanda bu problemin ve bunun yanında morfolojik bütünlüğün de çözünürlük detayına bağlı değişmesi sonuçların güvenilirliğini azaltmaktadır. Çünkü heyelan gibi farklı morfolojik yapılar sahip doğa olayları keskin geometrik şekiller oluşturmaz. Duyarlılık haritalarındaki şekilsel problem vektör tabanlı modellerde de mevcuttur. Bu durum heyelan duyarlılık haritaları üzerine inşa edilen tehlike ve risk çalışmalarının sonuçlarını da etkilemektedir. Heyelanı tanımlamayan raster ve vektör morfolojik şekil problemlerden ve bir yamaçtaki duraysızlığın sistematik olarak tüm yamaç etkilemesinden dolayı sonuçların yamaç ünitesi şeklinde verilmesi daha uygundur. Yamaç ünitesi yaklaşımında heyelanla ilgili süreçler yamaçta gerçekleştiği için geniş vadi tabanlarının modellerden çıkartılması sonuçlara pozitif katkı sağlar. Sonuç olarak Frekans Oran (FR), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve Ağırlıklandırılmış Çakıştırma (WOM) CBS Matris Modeli (CBS MM) ve Modifiye Analitik Hiyerarşi Süreci (M-AHP) modelleri seçilen parametre faktörler ile analiz edilmiştir.

#### 3.2.1 Frekans oran (FR) analizi

Frekans Oran modelinde, heyelan envanteri ile faktörler arasındaki istatistiksel yaklaşıma bağlı 0-1 arasında heyelan duyarlılık tahminleri oluşturulmuştur. Heyelana en az duyarlı yamaç ünitesini değeri 0,04 ve çok yüksek duyarlılıktaki yamaç ünitesinin değeri ise 0,97'dir. Yamaç ünitelerinden 507 tanesi düşük, 1223 tanesi orta, 817 yamaç ünitesi ise yüksek düzeyde heyelan duyarlılığına sahiptir. Modele göre çalışma alanı en fazla düşük ve orta seviyede duyarlı yamaçları içermektedir. (Şekil 8E). Bu orta ve düşük seviyedeki yamaçların çoğunluğu havzanın batı ve doğu kısımlarında yaygın olmakla birlikte bir kısmı da havzanın en güney kesimindeki yamaçlarda yer almaktadır. Havzada en yüksek duyarlılığa sahip yamaçlar havzanın orta kesiminin kuzey ve güneyinde yer almaktadır (Şekil 8E). Modelin tahmin başarısı için oluşturulan alıcı işlem karakteristiği (ROC) eğrisi altında kalan değer 0,86 'dır. Bu değer modelin yüksek başarıya sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 9).

#### 3.2.2 Analitik hiyerarşi süreci (AHP) analizi

Bu modelde faktörler subjektif olarak uzman tarafından belirlendiği için yarı nitel yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Model çıktıları 0-1 arasında normalize edilen AHP modeline göre çalışma alanında en az duyarlı yamaç ünitesi 0,11 değerine, çok yüksek duyarlılıktaki yamaç ünitesi ise 0,98 değerine sahiptir. Yamaç ünitelerinin seviye dağılımlarında 694 tanesi düşük, 1000 tanesi orta, 903 yamaç ünitesi ise yüksek heyelan duyarlılığına sahiptir. Çalışma alanındaki duyarlı alanlar Frekans Oran modeline benzer bir dağılımı sergilemektedir. Modelde düşük ve orta duyarlılıktaki yamaçlar daha yaygındır. Bu orta ve düşük seviyedeki yamaçlar havzanın batı ve doğu kısımlarındaki yamaç ünitelerinde yayılmaktadır. Bir kısım düşük ve orta seviye yamaçlar ise havzanın en güney kısmındaki yamaçlarda yer almaktadır. Modelde en yüksek duyarlılıktaki yamaçlar ise havzanın orta kesiminde yer almaktadır (Şekil 8F). Modelin tahmin başarısı için oluşturulan alıcı işlem karakteristiği (ROC) eğrisi altında kalan değer 0,87'dir. Bu değer modelin Frekans Orandaki gibi yüksek başarıya sahip olduğunu göstermektedir.

#### 3.2.3 Ağırlıklandırılmış çakıştırma (WOM) analizi

Faktör sınıflarının dışında kalan tüm etki katsayısının uzman tarafından belirlendiği bu modelin çıktısı Frekans Oran ve AHP modelinden biraz farklı olsa da genel hatları ile yamaçların duyarlılık dağılımları benzerdir. Model çıktı değerlerinin 0-1 arasında normalize edildiği bu modelde en düşük duyarlılığa sahip yamaç ünitesinde 0,12 değeri en yüksek yamaç ünitesinde ise 0,92 değeri tespit edilmiştir. Düşük, orta, yüksek duyarlılıktaki yamaçların dağılımında 576'sı düşük, 1172'si orta, 849'u ise yüksektir. Bu duyarlılıkların dağılımı Frekans Oran modeline çok benzerdir (Şekil 8G). Çakıştırma modelinin tahmin başarısı için oluşturulan alıcı işlem karakteristiği (ROC) eğrisi altında kalan değer 0,86'dır. Bu durum uzmanın etki katsayısı oranlarını belirlemeyi yüksek doğrulukta oluşturulduğunu göstermektedir.

#### 3.2.4 Modifiye analitik hiyerarşi süreci (M-AHP) analizi

Analitik Hiyerarşi Sürecinden en temel farkının karşılaştırma matrisinin uzman tarafından hazırlanmayıp, uzmanın sadece sistemdeki her faktör için yalnızca maksimum puanları verdiği bu modelin bulgularında orta ve yüksek duyarlılığa sahip yamaçlar havzada daha yaygındır. Karar değerlerinin 0-1 arasında normalize edildiği model çıktılarında yamaçların 383'ünün düşük, 814'ünün orta ve 1400'ünün ise yüksek duyarlılığa sahip olduğu tespit edilmiştir. En yüksek duyarlı yamaçların dağılımı Frekans Oran, AHP ve M-AHP modellerindeki gibi ortak olmasına rağmen orta duyarlılıktaki yamaçların dağılımı bakımından ise diğer modellerden farklıdır. M-AHP'de orta seviyede duyarlı yamaçlar daha fazladır (Şekil 8H). Modelin alıcı işlem karakteristiği (ROC) eğrisi altında kalan değer 0,79 olup, modeller içinde en düşük değere sahiptir. Buna rağmen modelin başarısı yüksektir.

#### 3.2.5 CBS matris modeli (CBS MM) analizi

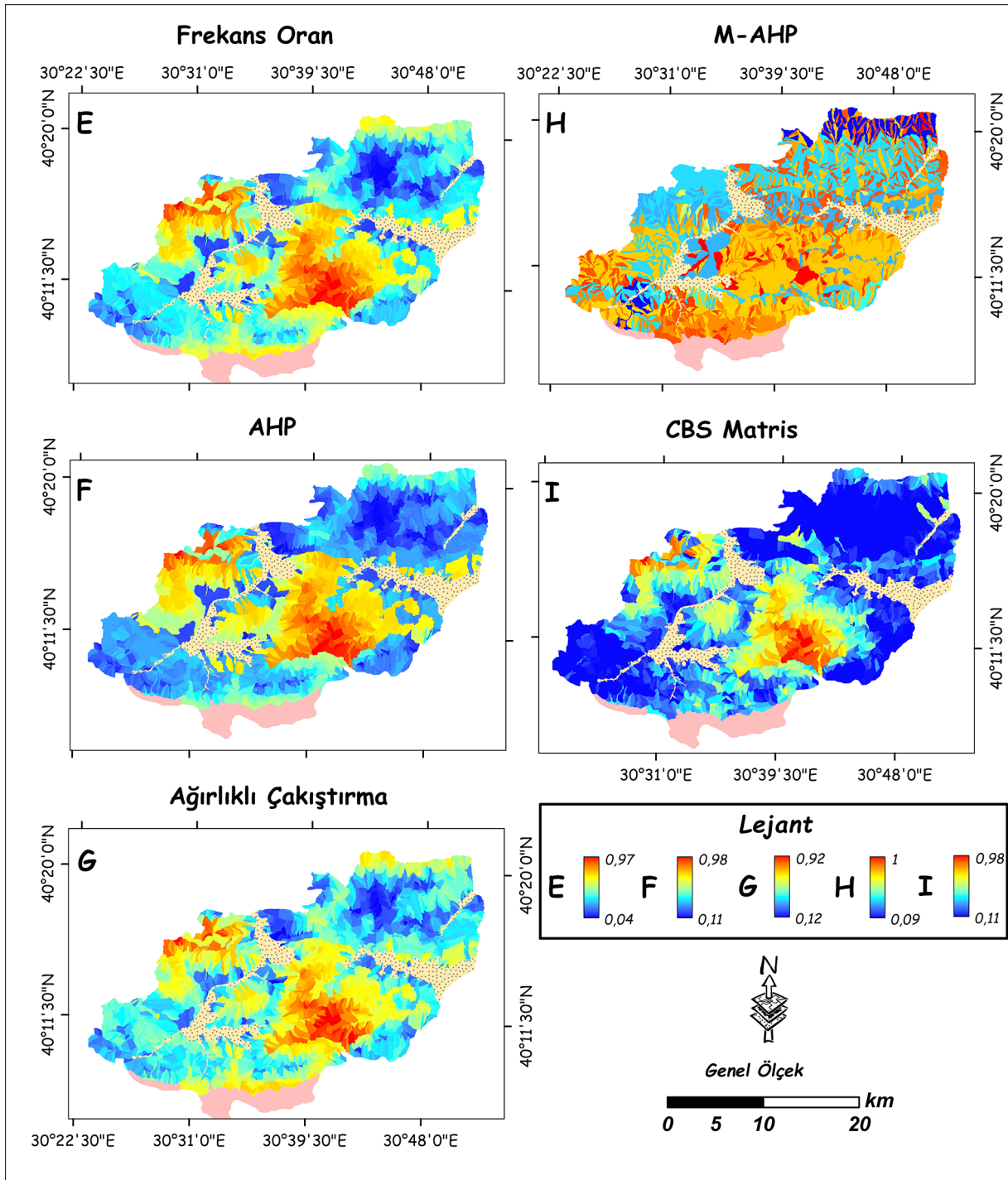
CBS Matris Modelinde faktör seçimi dışında uzmanın etkisi bulunmamaktadır. Heyelan envanteri ile hazırlayıcı faktörler arasındaki ilişkiye dayanan bir matris kombinasyonu oluşturan bu modelin bulgularında düşük seviyede 1505 yamaç ünitesi, orta seviyede 640, yüksek seviye duyarlılıkta ise 452 yamaç ünitesi tespit edilmiştir. Bu modelde düşük duyarlılıktaki yamaçların oranı diğer modellere göre fazlayken yüksek duyarlılığa sahip yamaçların oranı ise daha azdır. Modelde yüksek duyarlılıktaki yamaçlar diğer modellerde olduğu gibi havza ortasındaki ya-

maçlarda toplanmıştır (Şekil 8I). Düşük duyarlılıktaki yamaçlarda dağılım bakımından aynı benzerliği göstermekte olup, diğer modellerde orta seviyede duyarlılığa sahip yamaçlar bu modelde düşük duyarlılık olarak görünmektedir. Alıcı işlem karakteristiği (ROC) eğrisi altında kalan 0,92 değerine göre ise, model tüm modeller arasında en yüksek başarıya sahiptir.

Genel olarak hem raster hem de vektör çıktılarındaki en yüksek ve en düşük duyarlılıktaki yamaçlar tüm modellerde birbirine yakın ve ortak alanları oluşturmaktadır (Şekil 8). Çalışma alanının özellikle Batı ve Kuzeybatı bölgeleri düşük heyelan duyarlılık alanlarına karşılık gelmektedir. Bu parametre ve örneklem doğru seçiminden kaynaklanmaktadır. En düşük ve en yüksek değerler arasındaki geçiş değerleri modellere göre

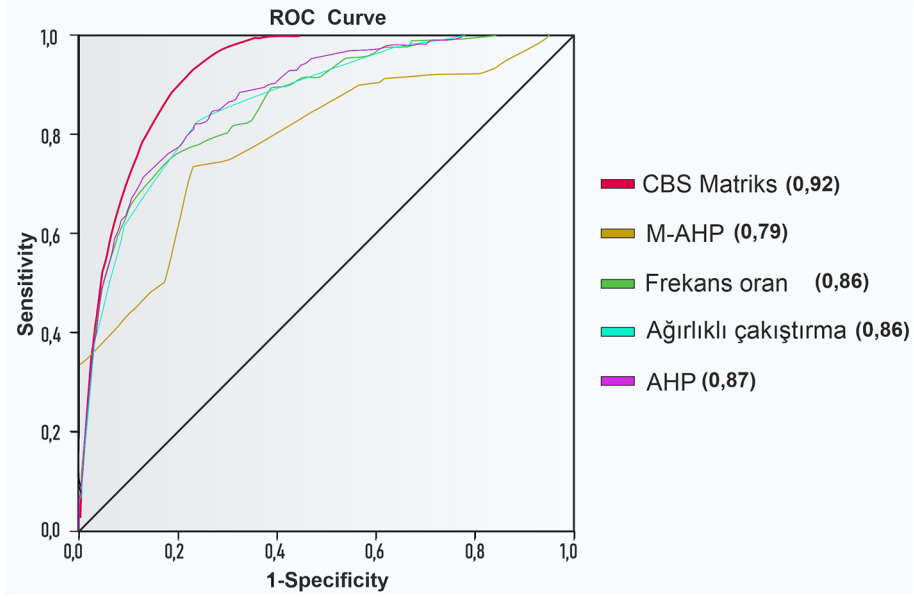
farklılık göstermektedir. En büyük farka sahip model M-AHP çıktısıdır (Şekil 8 H). Bunun temel nedeni, M-AHP modelinde kararların yumuşak bir geçişten ziyade 3 keskin karar noktasına (düşük, orta ve yüksek) göre sonuç vermesidir.

Ortak alanları birbirine yakın olan 0-1 arasında normalize edilmiş beş modelin her birinin %20 katkı oranında çakıştırılarak heyelan duyarlılığı açısından daha doğru karar verebilen hibrit bir model ortaya konulmuştur (Şekil 10). Bu sayede çalışma alanındaki mekânsal duyarlılık tek bir modelden ziyade farklı modellerin ortak kararı ile belirlenmiştir. Bu model kullanım açısından pratiklik ve güvenilirlik sağlamaktadır. Hibrit modelde diğer modellerde olduğu gibi yüksek duyarlılığa ve düşük duyarlılığa sahip alanlar ortaktır. Yüksek duyarlılıktaki yamaç-



Şekil 8. Vektör ve raster tabanlı model çıktıları.

Figure 8. Vector and raster-based model outputs.



Şekil 9. Farklı modeller için alıcı işletim karakteristiği eğrisi (ROC) gösterimi.  
Figure 9. Illustration of receiver operating characteristic (ROC) curve for different models.

lar havza ortasında, düşük duyarlılıktaki yamaçlar ise havzanın doğusu ve batısındaki yamaçlarda yoğundur.

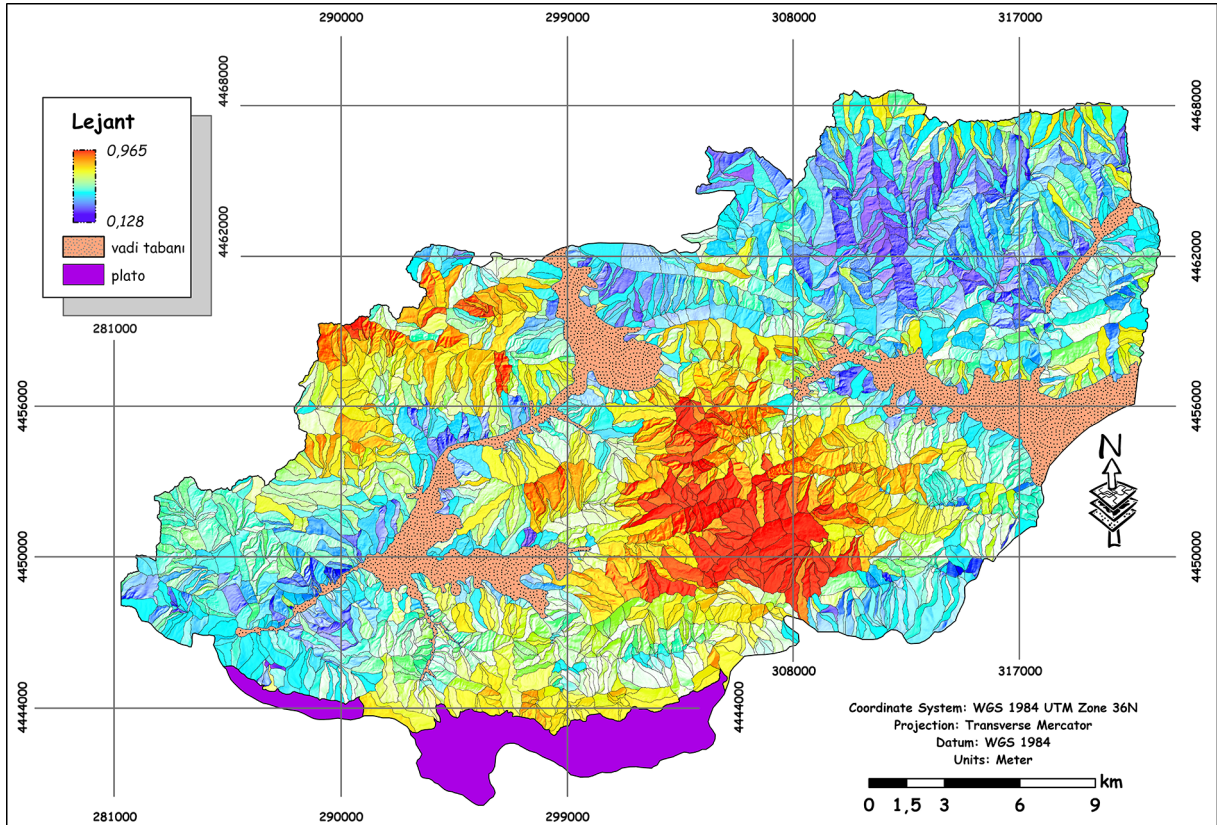
#### 4. Sonuç

Nihai olarak bu çalışmada 1) Bir heyelan duyarlılık çalışmasında kullanılacak parametrelerin çalışma alanına özgü değerlendirilmesiyle model sonuçlarının başarısı artırılmıştır. 2) Raster veya vektör gibi farklı tabandaki modeller ile nitel veya nicel farklı yaklaşımlara sahip modeller duyarlılık açısından ortak bir paydada birleştirmiştir. 3) Tüm modellerde minimum ve mak-

simum heyelan duyarlılık alanlarının ortak olması, az duyarlı veya çok duyarlı alanları açıkça ortaya koymuştur. 4) Hibrit model olarak bu modelin, tüm modellerin başarısı ile daha güvenilir kararlar vermesi sağlanmıştır.

#### Sınırlılıklar

Swath analizleri, mevcut heyelan envanterinin %90'ını yansıtmaktadır. Bu durum bazı heyelanların analiz dışında kalmasına neden olmuştur.



Şekil 10. Vektör ve raster tabanlı modellerin kombinasyonundan oluşturulan hibrit bir model.  
Figure 10. A hybrid model derived from a combination of vector and raster-based models.



## Katkı Belirtme ve Teşekkür

Yazar, öğretileri ve yardımları için Tolga Görüm ve Hakan Ahmet Nefeslioğlu'na teşekkür eder.

## Çıkar Çatışması – Conflict of Interest

Yazar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması bildirilmemiştir. *No potential conflict of interest was reported by the author.*

## Kaynakça

- Basharat, M., Shah, H. R., & Hameed, N. (2016). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 1-19.
- Brabb, E. E., & Pampeyan, E. H. (1972). *Preliminary map of landslide deposits in San Mateo County, California* (No. 344). US Geological Survey.
- Carrara, A., Carratelli E.P., Merenda L. (1977) Computer-based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 21 (1977), pp. 187-222.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5), 427-445. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160505>
- Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P. (1995) GIS technology in mapping landslide hazard. A. Carrara, F. Guzzetti (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands , pp. 135-175.
- Casagli, N., Catani, F., Puglisi, C., Delmonaco, G., Ermini, L., & Margottini, C. (2004). An inventory-based approach to landslide susceptibility assessment and its application to the Virginio River Basin, Italy. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(3), 203-216. <https://doi.org/10.2113/10.3.203>
- Cihangir, M. E., & Görüm, T. (2016). Kelkit vadisinin aşağı çıkışında gelişmiş heyelanların dağılım deseni ve oluşumlarını kontrol eden faktörler. *Türk Coğrafya Dergisi*, (66), 19-28. <https://doi.org/10.17211/tcd.84731>
- Cihangir, M. E., Görüm, T., & Nefeslioğlu, H. A. (2018). Heyelan tetikleyici faktörlerine bağlı mekânsal hassasiyet değerlendirmesi. *Türk Coğrafya Dergisi* (70), 133-142. <https://doi.org/10.17211/tcd.410998>
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., & Vescovi, P. (2006). A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the conditional analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environmental Geology*, 50(7), 941-961.
- Dagdelenler, G., Nefeslioglu, H. A., & Gokceoglu, C. (2016). Modification of seed cell sampling strategy for landslide susceptibility mapping: an application from the Eastern part of the Gallipoli Peninsula (Canakkale, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 575-590.
- DeGraff, J. V., & Romesburg, H. C. (2020). Regional landslide susceptibility assessment for wildland management: a matrix approach. Routledge. Coates D. , Vitek J. (Eds.), *Thresholds in Geomorphology*, George Allen and Unwin, London (1980), pp. 401-414.
- Du, J., Glade, T., Woldai, T., Chai, B., & Zeng, B. (2020). Landslide susceptibility assessment based on an incomplete landslide inventory in the Jilong Valley, Tibet, Chinese Himalayas. *Engineering Geology*, 270, p.105572. <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2020.105572>
- Eeckhaut, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Rossi, M., & Poesen, J. (2009). Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 507-521.
- Erener, A., & Düzgün, H. S. B. (2010). Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway). *Landslides*, 7(1), 55-68. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0188-x>
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 99-111.
- Fernández, C. I., Del Castillo, T. F., Hamdouni, R. E., & Montero, J. C. (1999). Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 24(6), 537-544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199906\)24:6%3C537::AID-ESP965%3E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199906)24:6%3C537::AID-ESP965%3E3.0.CO;2-6)
- Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., & Nefeslioglu, H. (2008). Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: The Melen Gorge (NW Turkey). *Natural hazards*, 46(3), 323-351.
- Guzzetti, F. (2021). Invited perspectives: Landslide populations—can they be predicted?. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(5), 1467-1471.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81(1-2), 166-184. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.007>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1), 272-299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
- Hansen, A., (1984). Landslide hazard analysis. In: Brunsten, D., Prior, D.B. (Eds.), *Slope Instability*. Wiley and sons, New York, pp. 523-602.
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., & Chacón, J. (2007). Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural hazards*, 41(1), 61-79.
- Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33-41.
- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.
- Magliulo, P., Di Lisio, A., Russo, F., & Zelano, A. (2008). Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy. *Natural hazards*, 47(3), 411-435.

- MTA. (2002). *1:100 000 jeoloji haritası (Adapazarı H24-H25)*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Ankara.
- Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., & Sonmez, H. (2008). An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology*, 97(3-4), 171-191. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.01.004>
- Nefeslioglu, H. A., Sezer, E. A., Gokceoglu, C., & Ayas, Z. (2013). A modified analytical hierarchy process (M-AHP) approach for decision support systems in natural hazard assessments. *Computers & Geosciences*, 59, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.05.010>
- Okay, A. (2011). Tavşanlı Zonu: Anatolid-Torid Bloku'nun Dalma-Batmaya Uğramış Kuzey Ucu. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* (142), 195-226.
- Pérez-Peña, J. V., Al-Awabdeh, M., Azañón, J. M., Galve, J. P., Booth-Rea, G., & Notti, D. (2017). SwathProfiler and NProfiler: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. *Computers & Geosciences*, 104, 135-150.
- Roslee, R., Mickey, A. C., Simon, N., & Norhisham, M. N. (2017). Landslide susceptibility analysis (LSA) using weighted overlay method (WOM) along the Genting Sempah to Bentong Highway, Pahang. *Malaysian Journal of Geosciences (MJG)*, 1(2), 13-19.
- Rotigliano, E., Cappadonia, C., Conoscenti, C., Costanzo, D., & Agnesi, V. (2012). Slope units-based flow susceptibility model: using validation tests to select controlling factors. *Natural hazards*, 61(1), 143-153.
- Saaty, T. (1980). *Analytical Hierarchy Process* McGraw Hill Company. New York. p. 287.
- Shit, P. K., Bhunia, G. S., & Maiti, R. (2016). Potential landslide susceptibility mapping using weighted overlay model (WOM). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 21.
- Suzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71(3-4), 303-321.
- Tribe, A. (1991). Automated recognition of valley heads from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(1), 33-49. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160105>
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- Yaraloğlu, K. (2004). *Decision support techniques in application*. İlkem Ofset.
- Yılmaz, H., & Özel, S. (2008). Crustal structure of the eastern part of Central Anatolia (Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(1), 169-185.
- Yılmaz, I. (2010). The effect of the sampling strategies on the landslide susceptibility mapping by conditional probability and artificial neural networks. *Environmental Earth Sciences*, 60(3), 505-519.
- Zhang, H., Song, Y., Xu, S., He, Y., Li, Z., Yu, X., Liang, Y., Wu, W., & Wang, Y. (2022). Combining a class-weighted algorithm and machine learning models in landslide susceptibility mapping: A case study of Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir, China. *Computers & Geosciences*, 158, 104966.