



**Alınış tarihi (Received):** 02.12.2022

**Kabul tarihi (Accepted):** 20.12.2022

## **İstatistiksel Yöntemler Uygulanarak Tokat İl Merkezinin Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi**

**Ayhan BAŞALAN<sup>1\*</sup>, Gökhan DEMİR<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tokat*

<sup>2</sup>*Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun*

\*Sorumlu yazar: [ayhanbasalan@gmail.com](mailto:ayhanbasalan@gmail.com)

**ÖZET:** Özellikle Türkiye'nin Karadeniz bölgesinde meydana gelen heyelanlar bölge sakinlerinin yaşamları için büyük tehditler oluşturmaktadır. Bu tehditlerin ortadan kaldırılması için bölgede meydana gelebilecek olası heyelanların oluşmadan önceki durumlarının belirlenmesi hayatidir. Bu amaçla bölgedeki heyelan duyarlılıklarının araştırılması ileride meydana gelebilecek olası heyelanların tahmini için önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada Türkiye'nin Orta Karadeniz bölgesinde yer alan Tokat il merkezi araştırma alanı olarak seçilmiştir. Çalışmada, heyelan duyarlılık haritaları (HDH) üretmek için istatistiksel yöntemlerden olan Frekans Oranı (FO) ve Lojistik Regresyon (LR) yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma alanında heyelan duyarlılık değerlendirmeleri için eğim, bakı, eğrilik, yükseklik, yağış, litoloji, faylara olan uzaklık, yollara olan uzaklık ve akarsulara olan uzaklık olmak üzere dokuz adet etki parametresi dikkate alınmış ve bu parametre verileri FO ve LR yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 5 farklı heyelan duyarlılık kategorisi belirlenmiş ve HDH'ler bu kategorilere göre oluşturulmuştur. Kullanılan yöntemlerin performanslarının değerlendirilmesi için Göreceli Çalışma Karakteristiği (ROC) değerlendirme yöntemi kullanılarak eğri altında kalan alan (AUC) değerleri belirlenmiştir. ROC değerlendirme sonuçlarına göre AUC değerleri sırasıyla FO yöntemi için 0,803, LR yöntemi için 0,783 olarak elde edilmiştir. Bu kapsamda üretilen HDH'lerin uygulanabilir olduğu ve 0,803 performans değeri ile FO yönteminin daha etkili yöntem olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler–** *Heyelan duyarlılık haritası, Coğrafi Bilgi Sistemi, Frekans oranı, Lojistik regresyon, Tokat*

## **Production of Landslide Susceptibility Maps of Tokat City Center by Statistical Methods**

**ABSTRACT:** Landslides, especially in the Black Sea region of Turkey, pose great threats to the lives of residents. In order to eliminate these threats, it is vital to determine the conditions of possible landslides that may occur in the region before they occur. For this purpose, the investigation of landslide susceptibility in the region has an important place in the prediction of possible landslides that may occur in the future. In this study, the city center of Tokat, located in the Central Black Sea region of Turkey, was chosen as the research area. In the study, Frequency Ratio (FR) and Logistic Regression (LR) methods, which are statistical methods, were used to produce landslide susceptibility maps (LSM). For landslide susceptibility assessments in the study area, nine impact parameters were taken into account, including slope, aspect, curvature, height, precipitation, lithology, distance to faults, distance to roads and distance to rivers, and these parameter data were analyzed using FR and LR methods. LSMs produced using two different methods are divided into five different landslide susceptibility classes as very low, low, medium, high and very high susceptibility. In order to evaluate the performance of the methods used, the Relative Operating Characteristic (ROC) evaluation method was used to determine the area under the curve (AUC) values. According to the ROC evaluation results, the AUC values were obtained as 0,803 for the FR method and 0,783 for the LR method, respectively. In this context, it has been concluded that the LSMs produced are applicable and the FR method is the more effective method with a performance value of 0,803.

**Keywords–** *Landslide susceptibility map, Geographic Information System, Frequency ratio, Logistic regression, Tokat*

## 1. Giriş

Dünya'daki en tehlikeli jeolojik tehlikelerden biri olan heyelanlar hem insanlar hem de yapılar için büyük tehditler oluşturmaktadırlar. Bu nedenle heyelanların oluşumunu engellemek ve verdikleri zararları azaltmak için çok sayıda girişimde bulunulmuştur (Lee, 2019). Heyelanların oluşumlarının önlenmesi ve verdikleri zararların azaltılması için araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapılmış ve halen bu tür çalışmalar yoğun bir şekilde yürütülmektedir. Bu tür çalışmalar arasında, HDH'lerin üretilmesi önemli bir yer tutmaktadır. HDH çalışmalarında az maliyet ve az insan kaynağına ihtiyaç duyulmasından dolayı, araştırmacılar tarafından en çok tercih edilen çalışma türüdür. Heyelan duyarlılığı kavramı araştırmacılar tarafından çeşitli şekillerde tanımlanmıştır. Heyelan duyarlılığı; Brabb (1984)'e göre, yerel arazi koşullarına bağlı olarak bir alanda meydana gelen heyelan olasılığı; Guzzetti ve ark. (2005)'e göre, heyelanların "nerede" meydana geleceğini tahmin edildiğini ve bir bölgenin heyelanlara göreli duyarlılığı içindeki yerlerin sınıflandırılması; Reichenbach ve ark. (2018)'e göre, bir alanda ve yerel arazi koşullarına bağlı olarak heyelanların meydana gelebileceği "nerede" heyelan olasılığını tahmin edebileceği; Van Dao ve ark. (2020)'e göre, mekânsal ve zamansal olarak doğru bir şekilde tahmin edebilmek, dünya çapında heyelan eğilimli birçok alanın yönetim için temel olarak tanımlanmıştır.

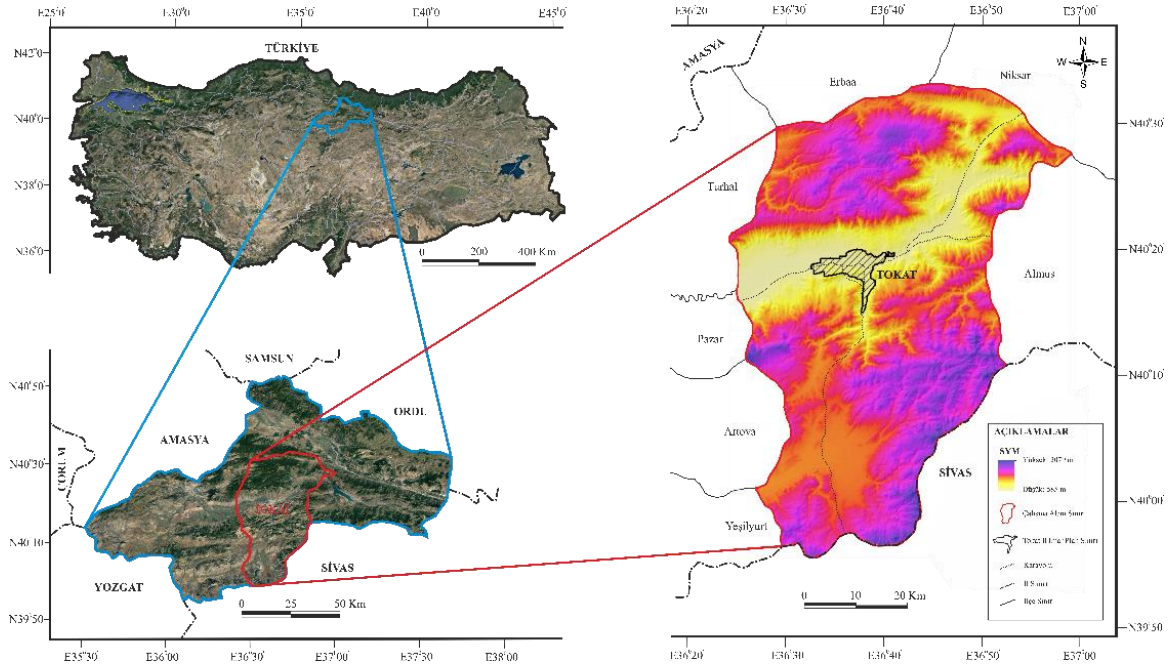
Son zamanlarda HDH'ler üretmek için coğrafi bilgi sisteminin (CBS) kullanımı önemli ölçüde artmış olup heyelan duyarlılığını belirlemek ve çeşitli yöntemler/modeller kullanarak mekânsal modellerini tanımlamak için çok sayıda girişimde bulunulmuştur. Gerçekte, tahmine dayalı modelleri kullanan modelleme çabaları, heyelan anlayışımızın büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Heyelanlarla ilgili soruların ele alınması için basit istatistiksel modellerden (frekans oranı ve istatistiksel indeksler gibi) karmaşık makine öğrenme modellerine (destek vektör makineleri, sinir ağları ve nöro bulanıklık gibi) kadar birçok model önerilmiş ve mevcut tahmin modelleri olarak kullanılmıştır (Pham ve ark. 2016; Pourghasemi ve Rahmati, 2018; Chen ve ark. 2019; Jaafari ve ark. 2019). Ayrıca son yıllarda teknolojik gelişmelerin hız kazanması nedeniyle HDH çalışmaları daha sık tercih edilmekte ve bu da çalışmaların daha üst düzeyde olduğunu göstermektedir.

Araştırmacılar, HDH üretirken çeşitli parametreler ve analizler için ise farklı yöntem/yöntemler benimsemektedirler. Bu süreçleri belirleyen oluşum iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi hangi parametrelerin kullanılacağına, ikincisi ise analizlerde hangi yöntem veya yöntemlerin kullanılacağına karar vermektir. Karar verme aşamasında parametrelerin seçimi için çalışılacak bölgenin coğrafik koşulları ile verilere ulaşım etkenleri rol oynarken yöntem/yöntemler seçiminde ise teknolojiye erişim şartları rol oynamaktadır.

Bu çalışmanın amacı kapsamında HDH'lerin oluşturulması için, çalışma alanında daha önce meydana gelen heyelanların verileri toplanmıştır. Daha sonra heyelanlara neden olan özellikler belirlenmiş ve belirlenen parametreler kullanılarak HDH'lerin üretilmesi amaçlanmıştır. HDH üretmek için literatürde sıkça kullanılan eğim, bakı, eğrilik, yükseklik, yağış, litoloji, faylara olan uzaklık, yollara olan uzaklık ve akarsulara olan uzaklık dahil olmak üzere 9 parametre kullanılmıştır. HDH'lerin üretilmesi için istatistiksel yöntemlerden olan ve çoğunlukla yüksek doğrulukta sonuçlar veren FO ve LR yöntemlerinin kullanımları benimsenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

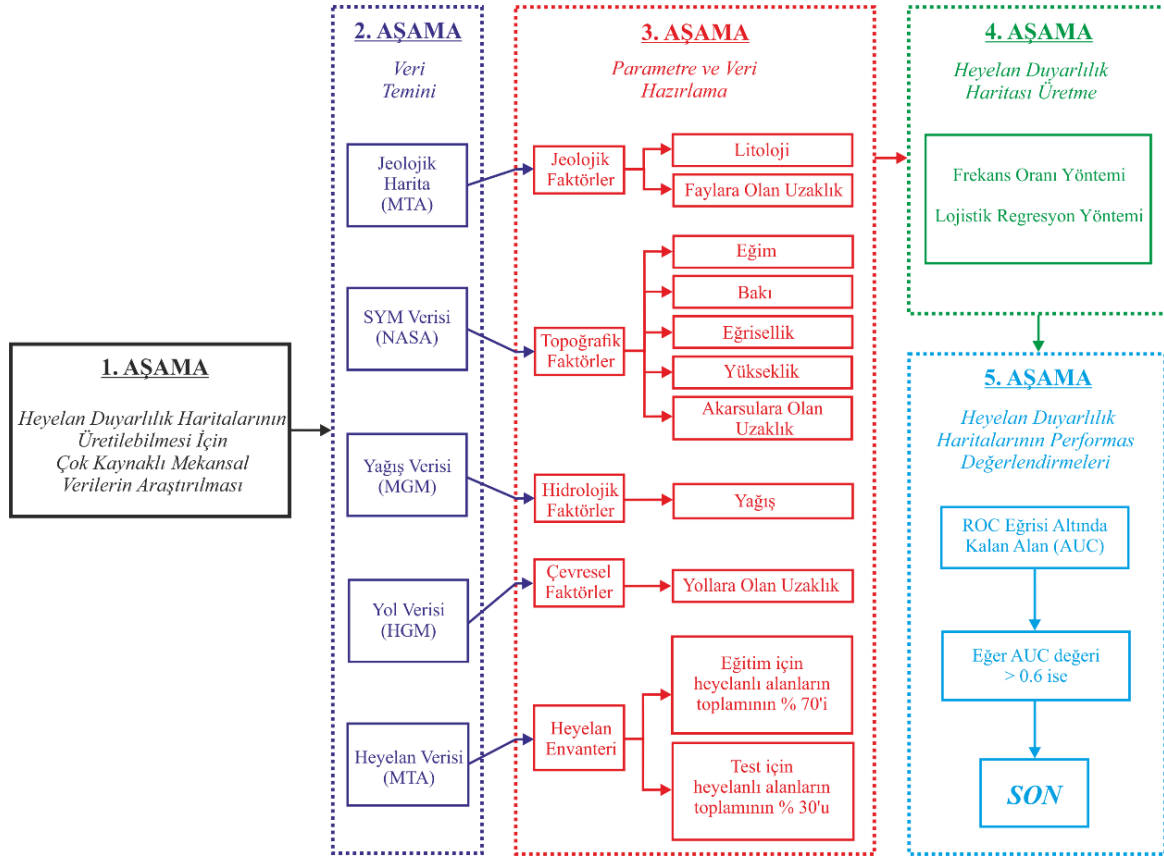
Çalışmada Tokat il merkezinin sınırları çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Tokat ili, ülkemizin Orta Karadeniz Bölgesi'nde yer almaktadır. Çalışma alanı yaklaşık 2003 km<sup>2</sup>'lik bir alana sahip olup 36°25' ve 37°00' doğu boylamları ile 39°55' ve 40°35' kuzey enlemleri arasında yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanının konumunu gösteren yer bulduru haritası  
Figure 1. Locator map showing the location of the study area

Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinin en önemli aşamalarından biri, araştırma bölgesindeki heyelanlara ilişkin verilerin toplanması (Şekil 2) ve heyelanların oluşumunda etkili olduğuna inanılan parametre verilerinin geliştirilmesidir. Üretilen HDH'ler için elde edilen verilerin niteliği ve niceliği güvenilir olmalıdır. Buna bağlı olarak heyelan verileri ve parametre verilerindeki hata ve eksiklikler üretilen HDH'lere olumsuz olarak yansımaktadır (Van Westen, 1994).

HDH'ler üretilmeden önce hangi verilerin, parametrelerin ve yöntemlerin kullanılacağı konusunda detaylı bilgiler elde edilmiş olup çalışma kapsamında HDH'leri üretmek için izlenen adımlar Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. HDH'ler üretmek için izlenen adımlar  
Figure 2. Steps followed to produce LSMs

Şekil 2. değerlendirildiğinde yapılan çalışma 5 aşamadan oluşmaktadır. 1. aşama HDH üretmek için çalışma alanını temsil eden parametrelerin ve uygun yöntem/yöntemlerin belirlendiği aşama olup, bu aşamada kapsamlı literatür ve saha çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu çalışma alanını temsil eden eğim, bakı, eğrilik, yükseklik, yağış, litoloji, faylara olan uzaklık, yollara olan uzaklık ve akarsulara olan uzaklık olmak üzere 9 adet parametre ile literatürde yaygın olarak kullanılan ve istatistiksel yöntemlerden olan FO ve LR yöntemleri HDH üretmek üzere belirlenmiştir. 2. aşama ise kullanılacağı belirlenen verilerin hangi kurum veya kuruluşlardan temin edileceği aşamasıdır. Bu aşamada ilgili kurumlardan çalışma alanına ait heyelan, sayısal yükseklik modeli SYM, jeoloji, yağış, fay ve yol verileri temin edilmiştir. 3. aşama ise temin edilen veriler yardımıyla parametre verilerinin ve haritalarının oluşturulması ile analizlere hazırlık aşamasıdır. 4. aşama ise oluşturulan parametre harita verilerinin yardımı ile HDH'lerin üretildiği aşamadır. Bu aşamada seçilen yöntemlerin uygulanabilmesi için ilgili CBS yazılımlarından faydalanılmıştır. Son aşama olan 5. aşama ise üretilen HDH'lerin performanslarının değerlendirilmesini ve yorumlanmasını kapsamaktadır.

Yukarıdaki verilen bilgiler ışığında çalışma alanında üretilmesi düşünülen HDH'ler için birçok kaynaktan veriler elde edilmiştir. Bahsi geçen veri kaynakları ve bu verilerden üretilen parametrelere ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veriler, verilerin formatları ve temin yerleri  
 Table 1. Data used in the study, data formats and places of supply

Veri Setleri	Veri Formatı	Veri Temin Yeri
Heyelan Envanteri	Polygon Shapefile	MTA
Eğim	Raster	NASA
Bakı	Raster	NASA
Eğrisellik	Raster	NASA
Yükseklik	Raster	NASA
Yağış	Point Shapefile	CLIMATE-DATA
Jeoloji	Polygon Shapefile	MTA
Fay	Line Shapefile	MTA
Yol	Line Shapefile	HGM
Akarsu	Raster	NASA

## FO Yöntemi

Heyelan bölgelerindeki parametre alt katmanlarının gözlem frekanslarının hesaplanmasına dayalı olan FO tekniği, heyelan duyarlılık alanlarının tahmininde parametre haritalarının alt katmanlarıyla objektif olarak ağırlıklandırılmasına olanak vermektedir. Parametre haritalarının çalışma alanındaki alt katmanları, FO yöntemine göre heyelanların meydana geldiği yerlere bağlanabilir.

FO yöntemi basit, anlaşılabilir ve kolay uygulanabilir bir yöntem olması araştırmacıların yöntemi yaygın bir şekilde kullanmasına yol açmıştır (Ataol ve Yeşilyurt, 2014; Pham ve ark. 2015; Park ve ark. 2012; Silalahi ve ark. 2019 ve Demir, 2019). Yöntem için kullanılan formül aşağıda sunulmuştur;

$$FO = \frac{PLO}{PIF} \quad (1)$$

Formülde, PLO; heyelanı etkileyen her bir alt katman içindeki heyelan varlığının yüzdesini ve PIF; parametre haritasındaki heyelanı etkileyen her bir alt katmanın yüzdesini temsil etmektedir. Yukarıdaki formülle hesaplanan FO, parametre haritalarına ağırlık atamak için kullanılmaktadır (Erener ve Lacasse, 2007; Demir, 2018). HDH, düşük değerlerin düşük heyelan duyarlılığını, yüksek değerlerin ise yüksek heyelan duyarlılığına karşılık geldiği ağırlıklı parametre haritalarının eklenmesiyle geliştirilmiştir. Bu değerler, HDH'lerin son durumunu elde etmek için eşit aralıklarla yeniden sınıflandırılmalıdır (Karaman ve ark. 2022).

## LR Yöntemi

HDH'lerin üretiminde, çoklu lojistik regresyon yöntemlerinden biri olan LR yönteminden oldukça fazla şekilde yararlanılmaktadır (Kleinbaum ve ark. 1998; Altural, 2012). LR yöntemi, bağımlı bir değişken ile birkaç bağımsız değişken arasında çok değişkenli bir

regresyon ilişkisi oluşturmaya izin vermektedir. Bağımlı değişken ikili, bağımsız değişken ise aralıklı, ikili veya kategorik olabilir (Atkinson ve Massari 1998). LR analizleri yapılırken bağımlı değişkenlerin rakamsal değerlerinin 0 veya 1 olması gerekmektedir. Analizler sonucunda elde edilen LR katsayıları bağımsız değişkenlerin üretilmesini sağlamaktadır. LR analizlerine ait veriler arasındaki ilişki aşağıda verilen formülle ifade edilmektedir (Hosmer ve ark. 1989);

$$p = \frac{1}{(1+e^{-z})} = \frac{e^z}{1+e^z} \quad (2)$$

Bu formülde 'p' heyelan olayının olma olasılığını göstermekte olup bu değer 0 ile 1 arasında değişen bir S şekilli eğri biçimindedir. LR;

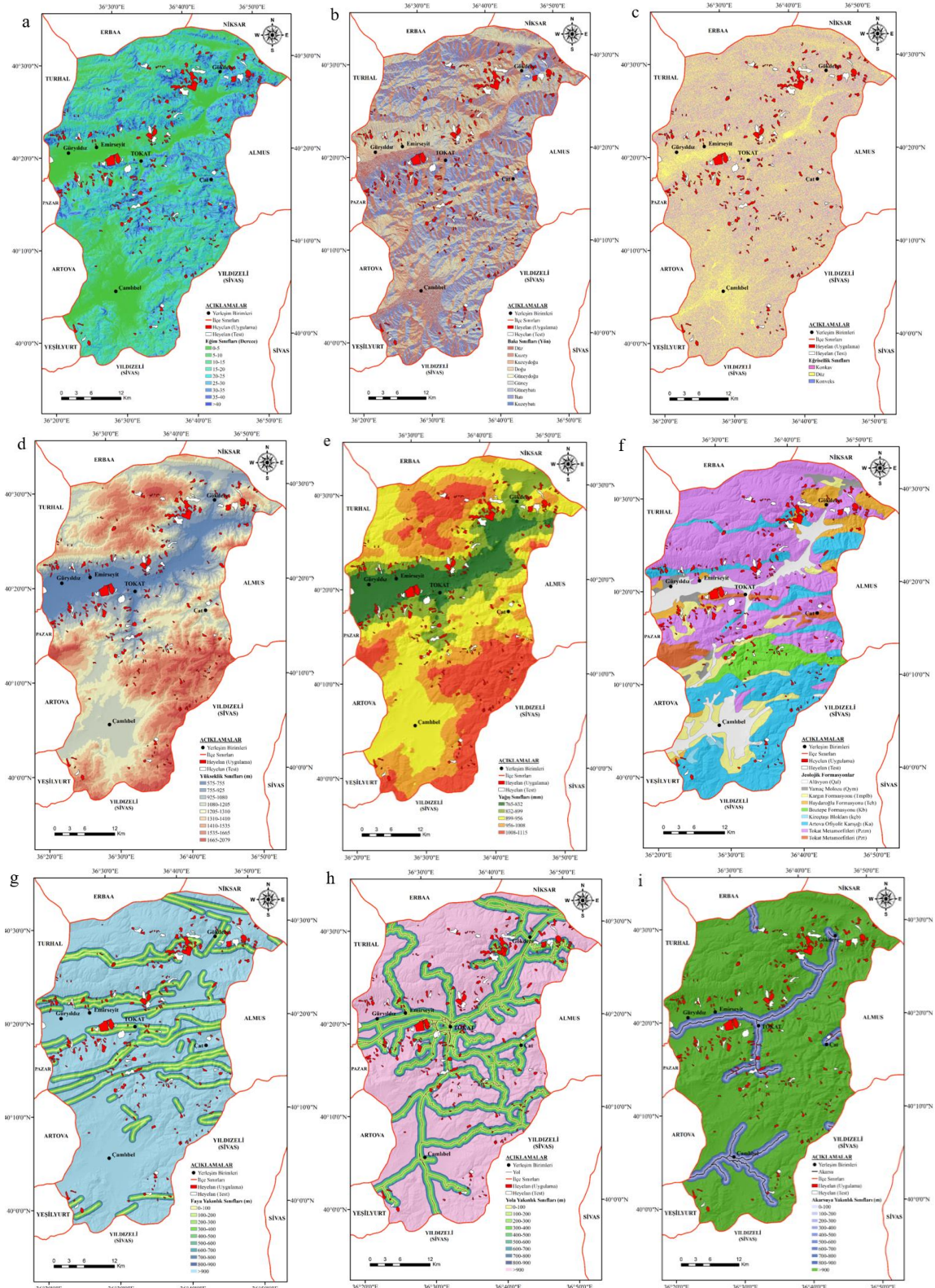
$$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n \quad (3)$$

denklemini içerir ve bu denklem yukarıda verilen z değerini vermektedir. Formülde  $\beta_0$  modelin sabit değerini,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  bağımsız değişkenlerin katsayılarını,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  bağımsız değişkenleri ve z'de bağımlı değişken olan heyelan durumunu belirtmektedir. Oluşturulan model heyelanın bağımsız değişkenleri üzerinde heyelan olduğunu (1) ve heyelan olmadığını (0) ortaya çıkarmaktadır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Heyelan duyarlılık analizlerini yapabilmek için ilk olarak önceden meydana gelmiş heyelan haritaları ile parametre haritalarının hazırlanması gerekmektedir. Çalışmada bu haritaların oluşturulması için ilgili CBS yazılımlarından yararlanılmıştır. Bu kapsamda önce çalışma alanında kullanılması planlanan parametreler literatür araştırmaları ve saha çalışmaları sonucunda belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra ilgili CBS yazılımı ile 9 adet parametre haritası oluşturulmuş (Şekil 3) ve parametre verileri analizlere hazırlanmıştır.

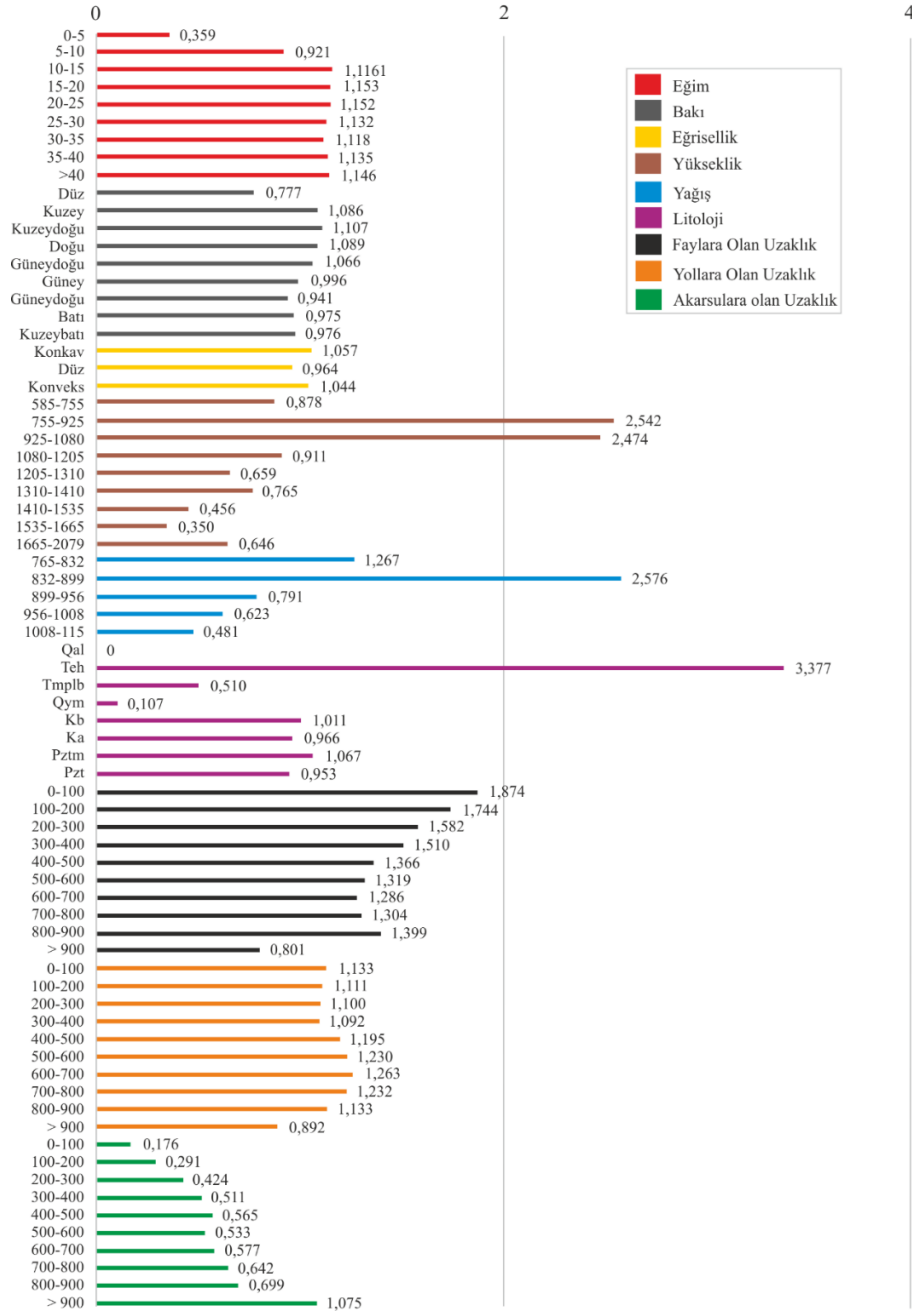
Elde edilen veriler ışığında çalışma alanı, sayısal yükseklik modeli (SYM) verilerine göre 12.5x12.5 metre boyutlarında toplam 12837020 pikselden oluşmaktadır. Haritalanan toplam heyelanlı alanlar ise 482649 pikselden oluşmaktadır. Oluşturulan parametre haritalarının toplam heyelanlı alan piksellerinin yaklaşık %70'i (341019 adet piksel) rastgele seçilerek HDH üretmek üzere kalan % 30'luk (141630 adet piksel) kısmı ise yöntemlerin doğruluğunu test etmek amacıyla ayrılmış ve kullanılmıştır. İki farklı yöntemle üretilen HDH'leri sınıflandırılmak için çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek duyarlı olmak üzere beş farklı heyelan duyarlılık sınıfına ayrılmıştır.



Şekil 3. Parametre haritaları; (a) eğim, (b) baki, (c) eğrissellik, (d) yükseklik, (e) yağış, (f) jeoloji, (g) faylara olan uzaklık, (h) yollara olan uzaklık, (i) akarsulara olan uzaklık  
 Figure 3. Parameter maps; (a) slope, (b) aspect, (c) curvature, (d) elevation, (e) rainfall, (f) geology, (g) distance to faults, (h) distance to roads, (i) distance to streams

## FO Yöntemi ile HDH'nin Üretilmesi

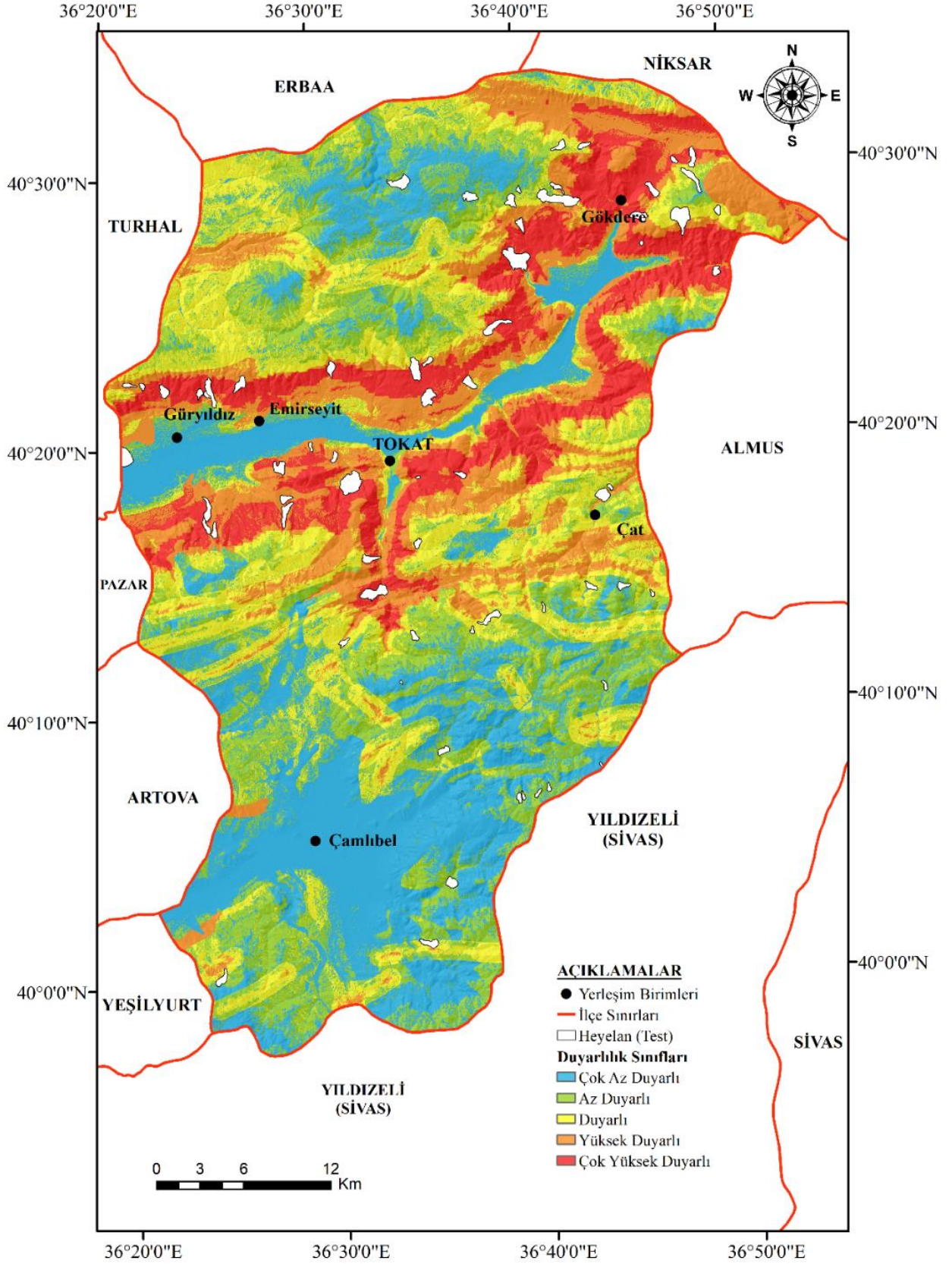
Çalışma kapsamında tüm parametrelerin haritaları oluşturulduktan sonra bu parametrelerin alt katmanlarına FO formülü (1) uygulanmış ve her bir parametre için ayrı ayrı FO değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan alt katman verileri Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4. Parametrelere ait FO değerleri  
Figure 4. FR values of the parameters

FO değerlerine göre hesaplanan parametre haritaları ilgili CBS yazılımında yeniden sınıflandırılmıştır. Sınıflandırılan yeni parametre haritaları yine aynı yazılımın ilgili modülleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ortaya çıkan harita tekrar yeniden sınıflandırılarak FO yöntemi ile çalışma alanına ait HDH üretilmiştir (Şekil 5).





Şekil 5. Çalışma alanına ait FO yöntemi ile üretilmiş HDH  
 Figure 5. LSM produced by the FR method of the study area

## LR Yöntemi ile HDH'nin Üretilmesi

Bu yöntemde yapılan analiz sonucunda ilgili CBS yazılımı çalışma alanına ait yeni HDH oluşturmak için bir LR denklemi ve bu denkleme ait istatistiksel veriler üretmiştir (Tablo 2 ve Tablo 3).

Tablo 2. Çalışma alanına ait CBS yazılımı ile üretilen LR denklemi

Table 2. LR equation produced with the GIS software of the study area

### LR Denklemi:

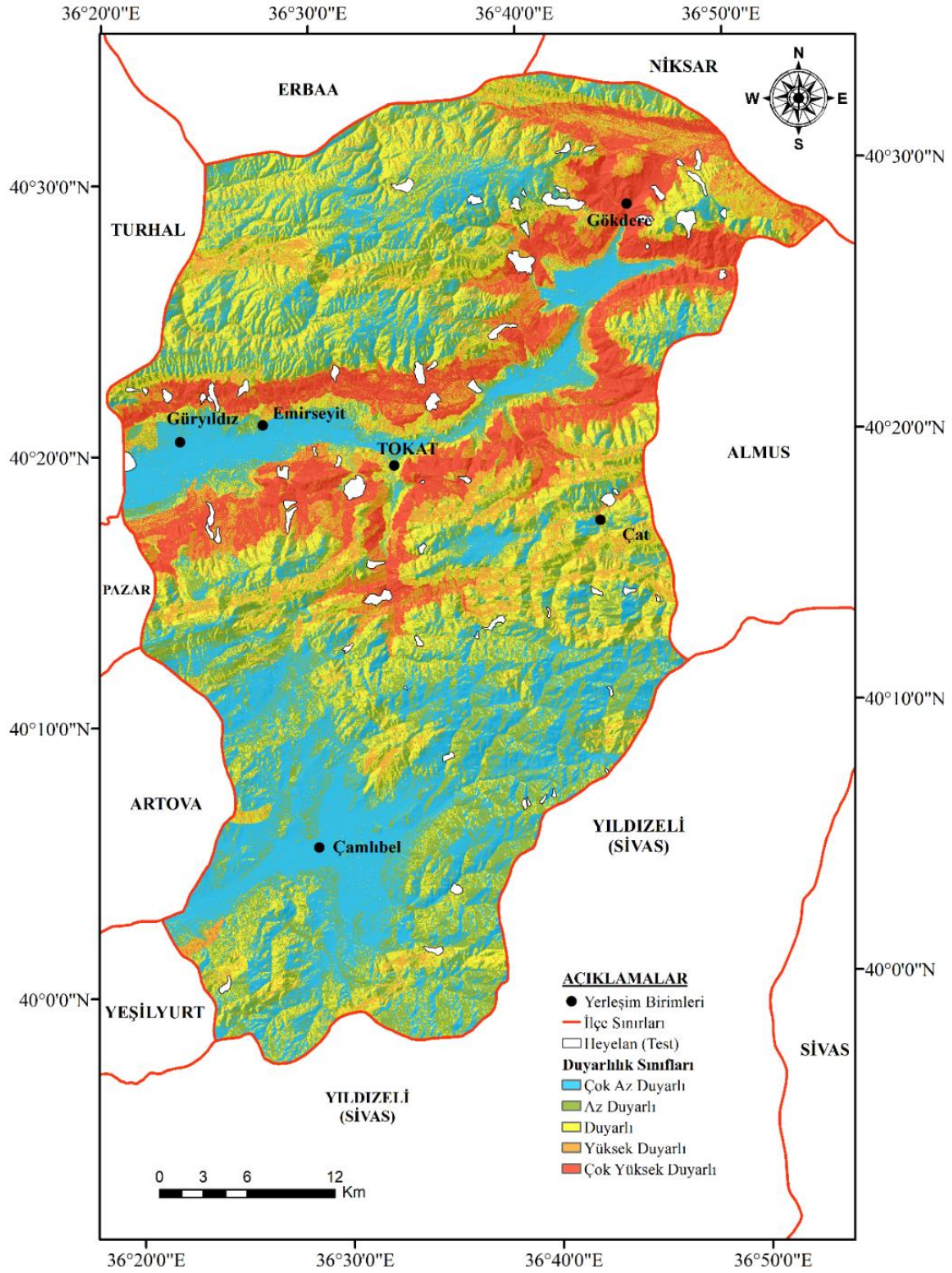
$$\text{logit (heyelan)} = 3,8577 - 0,2214 * \text{akarsulara olan uzaklık} + 3,9821 * \text{bakı} + 1,5355 * \text{eğrisellik} + 0,3579 * \text{eğim} + 0,5618 * \text{faylara olan uzaklık} - 1,2303 * \text{litoloji} - 0,1821 * \text{yağış} + 1,9804 * \text{yollara olan uzaklık} - 3,5103 * \text{yükseklik}$$

Tablo 3. LR yöntemine ait istatistiksel özetleri

Table 3. Statistical summaries of the LR method

İstatistik	Değer
Toplam Piksel Sayısı	12.837.020
-2logL0	297.093,9400
-2log (olası)	162.258,7882
Uyum Derecesi	1.086.878,7391
Yalancı R <sup>2</sup>	0,4538

Tablo 2'deki denklem LR yöntemi ile HDH üretmek için bir regresyon katsayısı ve her bir parametre için ayrı ayrı katsayılar vermiştir. LR denkleminde elde edilen katsayılar, önceden üretilmiş olan parametrelere uygulanmak üzere ilgili CBS yazılımında ilgili modüllerde kullanılarak toplama işlemine tabi tutulmuştur. Toplama işlemiyle ortaya yeni bir HDH çıkmıştır. Bu harita yeniden sınıflandırılarak LR yöntemi ile çalışma alanına ait HDH üretilmiştir (Şekil 6).

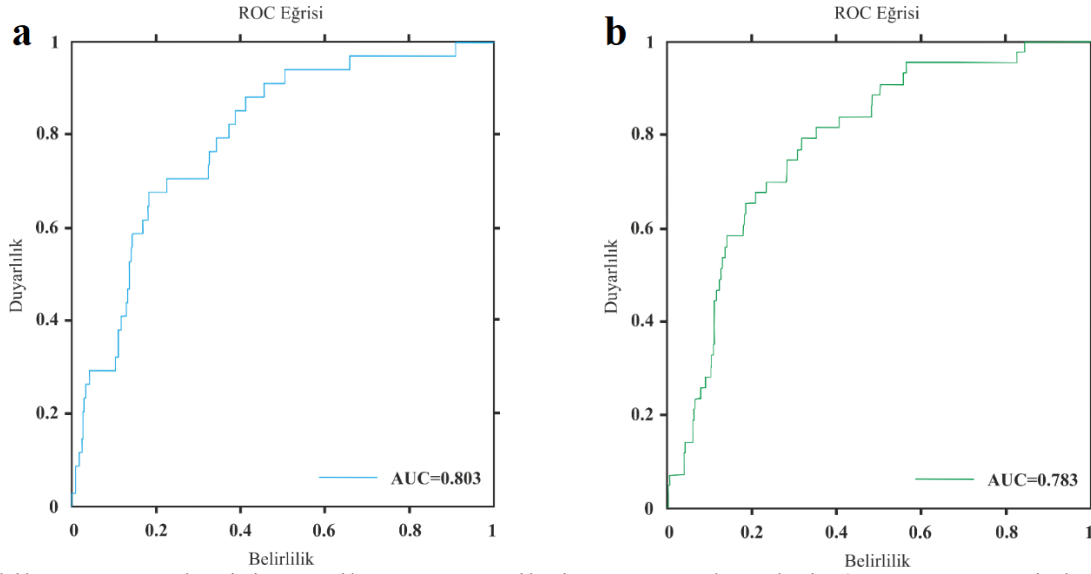


Şekil 6. Çalışma alanına ait LR yöntemi ile üretilmiş HDH  
 Figure 6. LSM produced by the LR method of the study area

### Üretilen HDH'lerin Performans Değerlendirmeleri

Çalışmada, FO ve LR yöntemleri ile üretilen HDH'lerin performanslarının değerlendirilmesi için ROC eğrileri ve AUC değerleri kullanılmıştır (Şekil 7). Performans değerlendirmeleri için üretilen HDH'ler ile toplam heyelanlı alanlardan test için ayrılan yaklaşık % 30'luk alan

(141.630 adet piksel) kullanılmış ve bu veriler ile ROC işlemi yapılmıştır. Buna göre FO'nun AUC değeri 0,803 (Şekil 7a), LR'nin AUC değeri 0,783 (Şekil 7b) olarak bulunmuştur.



Şekil 7. Yöntemler için üretilen ROC eğrileri ve AUC değerleri; (a: FO yöntemi, b: LR yöntemi)

Figure 7. ROC curves and AUC values produced for the methods; (a: FR method, b: LR method)

Elde edilen ROC eğrisi ve AUC değerlerine göre iki farklı yöntemle üretilen HDH'lerin gerçeği yansıttığı ve haritaların kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca FO yöntemi ile üretilen HDH'nin LR yöntemi ile üretilen haritadan göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir

Çalışmanın ana amacı, doğal afetlerin tanınması açısından önemli olan HDH'lerin üretilmesidir. Çalışma kapsamında, istatistiksel yöntemlerden olan FO ve LR yöntemleri kullanarak çalışma alanının HDH'ler üretilmiştir. Ayrıca HDH'lerin üretilmesi için en sık tercih edilen parametreler kullanılmıştır. Çalışmada, 2 farklı yöntemle üretilen HDH'nin başarılı bir performans sergilediği dolayısıyla çalışmanın amacına ulaştığı görülmüştür.

Ancak çalışmanın sonuçları, çalışmada kullanılan verilerin ne kadar kesin, güncel ve güvenilir olduğuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Performansları daha yüksek HDH'lerin üretilmesi, kullanılan verilerin doğru ve güncel olmasıyla mümkün olacaktır. Çalışma alanı için güncel veriler kullanılması sonuçların olumlu yönde değişmesine olanak sağlayabilir (Demir, 2018).

Ek olarak, bundan sonraki yıllarda yapılması düşünülen HDH çalışmalarında yüksek performans değeri veren yöntemlerin seçilmesi ile küçük alanlarda çalışmalar yapmak ve bu haritaları olabildiğince fazla üretmek HDH'lerin kalitesini ve kullanılabilirliğini artırabilir.

Ayrıca HDH üretilmesi için gereken verilerin oluşturulması maliyetlidir ve zaman almaktadır. Bu tür araştırmalarda maliyeti düşürmek ve zaman kaybını önlemek için temel verilerin sağlanabileceği bir veri tabanı geliştirmek önemlidir. Böylece, HDH'lerin oluşturulması için gereken sürede, aynı alan için tehlike ve risk haritaları üretilir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Tokat ilinde HDH'lerin üretilmesi amaçlanmış olup, heyelanların mekânsal olarak tahmin edilmesi için FO ve LR yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada daha önceki çalışmalarda sıklıkla kullanılan en yaygın 9 parametre (eğim, bakı, eğrisellik, yükseklik, yağış, litoloji, faylara olan uzaklık, yollara olan uzaklık ve akarsulara olan uzaklık) incelenmiştir. Araştırmanın verileri ve yöntemleri literatür taraması doğrultusunda belirlenmiştir. Tüm parametre haritaları, çalışma alanı sınırları, tipi, ölçeği, raster çözünürlüğü ve koordinat sistemi açısından aynı standartlara sahip olacak şekilde düzenlenmiştir. Üretilen HDH'ler 5 duyarlılık sınıfına (çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek) ayrılmış olup HDH'ler ile ilgili olarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- HDH'lerin üretilmesinde kullanılan parametrelerin alt gruplarına ait veriler değerlendirildiğinde çalışma alanında meydana gelen heyelanların en çok;
  - 5° ile 30° arasında bulunan eğim değerleri arasında meydana geldiği,
  - Doğuya bakan yönde olduğu,
  - Düz eğrisellik grubunda olduğu,
  - 755-1080 m yüksekliklerde yoğunlaştığı,
  - 832-956 mm'lik yağış alan bölgelerde yoğunlaştığı,
  - Tokat metamorfite, Artova ofiyolit karışığı ve Haydaroğlu formasyonunda geliştiği,
  - Faylara, yollara ve akarsulara uzak bölgelerde geliştiği görülmüştür.
- FO yöntemiyle üretilen HDH değerlendirildiğinde;
  - % 26,40'ının çok az duyarlı,
  - % 23,92'sinin az duyarlı,
  - % 20,72'sinin duyarlı,
  - % 16,93'ünün yüksek duyarlı ve
  - % 12,03'ünün ise çok yüksek duyarlılık sınıflarında yer aldığı görülmüştür.
- LR yöntemiyle üretilen HDH değerlendirildiğinde;
  - % 28,06'sinin çok az duyarlı,
  - % 24,46'sinin az duyarlı,
  - % 22,07'sinin duyarlı,
  - % 16,56'sinin yüksek duyarlı ve
  - % 8,85'inin ise çok yüksek duyarlılık sınıflarında yer aldığı görülmüştür.
- FO ve LR yöntemleriyle üretilen HDH'lerin performanslarının test edilmesi için ROC yöntemi kullanılarak AUC değerleri bulunmuştur; Bu değerlere göre,
  - FO yönteminde AUC değerinin 0,803 ile çok iyi,
  - LR yönteminde AUC değerinin 0,783 ile iyi olarak tespit edilmiş olup elde edilen değerlere göre iki yöntemin de başarılı olduğu ve performanslarının yüksek olduğu görülmüştür.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, Tokat il merkezinde ve yakın yerleşim alanlarında ileriki dönemlerde imara açılması planlanan yerlerin seçiminde ve yeni yapılması planlanan yapıların tesisinde çalışma kapsamında üretilen HDH'lerin ilgili kurumlar tarafından dikkate alınmasının faydalı olacağı düşünülebilir.

Sonuç olarak genel bir değerlendirme yapılacak olursa, heyelanların olumsuz etkilerinden korunmak veya tamamen ortadan kaldırmak için HDH'lerin oluşturulması ve bu haritaların gelecekteki mühendislik çalışmalarında ve yeni yerleşim yerlerinin seçiminde kullanılmasının büyük önem taşıdığı söylenebilir. Ayrıca heyelan duyarlılık haritalarının

üretmesinde daha fazla parametrenin kullanımı ile farklı yaklaşımlar ve yöntemler kullanılarak üretilecek yeni heyelan duyarlılık haritalarının çalışılan bölgenin ve ülkenin bilimsel olarak ilerlemesine ve ekonomik olarak kalkınmasına yardımcı olabilir.

## 5. Kaynaklar

- Altural, T., 2012. Coğrafi Bilgi Sistemiyle Akşehir (Konya) Çevresinin Heyelan Duyarlılık İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 112.
- Ataol, M., ve Yeşilyurt, S., 2014. Çankırı-Ankara karayolu boyunca (Akyurt-Çankırı Arası) Heyelan Risk Bölgelerinin Belirlenmesi. *Journal of Geography (DergiPark)*. 0, 29, 51-69.
- Atkinson, P.M. ve Massari, R., 1998. Generalized Linear Modelling of Susceptibility to Attributes. *Engineering Geology*. 32, 81-100.
- Brabb, E.E., 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping. Proc. 4th. International Symposium, Landslides. Google Scholar, Toronto, 1, 307-324.
- Chen, W., Panahi, M., Tsangaratos, P., Shahabi, H., Ilija, I., Panahi, S., Ahmad, B.B., 2019. Applying population-based evolutionary algorithms and a neuro-fuzzy system for modeling landslide susceptibility. *Catena*. 172,212-231.
- Demir, G., 2018. Landslide Susceptibility Mapping by Using Statistical Analysis in the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) on the Northern Part of Suşehri Town, Turkey. *Natural Hazards*. 92(1)133-154.
- Demir, G., 2019. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping for a Part of the North Anatolian Fault Zone between Reşadiye and Koyulhisar (Turkey). *Catena*. 183,104211.
- Erener, A., Lacasse, S., 2007. Landslide susceptibility mapping using GIS, 28th Asian Conference on Remote Sensing, 2007, Kuala Lumpur, Malesia.
- Hosmer, D.W., Jovanovic, B., Lemeshow, S., 1989. Best Susbets Logistic Regression. Division of Public Health, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, U.S.A.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*. 272-299.
- Jaafari, A., Termeh, S.V.R., Bui, D.T., 2019. Genetic and firefly metaheuristic algorithms for an optimized neuro-fuzzy prediction modeling of wildfire probability. *Journal of Environmental Management*. 243, 358-369.
- Karaman, M.O., Çabuk, S.N., Pekkan, E., 2022. Utilization of Frequency Ratio Method for the Development of Landslide Susceptibility Maps: Karaburun Peninsula Case. Turkey. Research Square.
- Kleinbaum, D.G., Kupper, L.L., Muller, K.E., 1998. Applied regression analysis and other multivariable methods. 3rd Edition, Duxbury Press, California, 798.
- Lee, S., 2019. Current and Future Status of GIS-based Landslide Susceptibility Mapping: A Literature Review. *Korean Journal of Remote Sensing*. 35, 1, 179-193.
- Park, S., Choi, C., Kim, B., Kim J., 2012. Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio, Analytic Hierarchy Process, Logistic Regression and Artificial Neural Network Methods at the Inje Area. Korea. *Env. Earth. Sci*. 68(5): 1443-1464.
- Pham, B.T., Bui, D.T., Indra, P., Dholakia, M., 2015. Landslide Susceptibility Assessment at a Part of Uttarakhand Himalaya, India using GIS - based Statistical Approach of Frequency Ratio Method. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2278-0181, 4, 11.
- Pham, B.T., Pradhan, B., Bui, D.T., Prakash, I., Dholakia, M.B., 2016. A comparative study of different machine learning methods for landslide susceptibility assessment: a case study of Uttarakhand area (India). *Environmental Modelling and Software*. 84, 240-250.
- Pourghasemi, H.R., Rahmati, O., 2018. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*. 162,177-192.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B.D., Mihir, M., Guzzetti, F., 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. Elsevier. 180, 60-91.
- Silalahi, F.E.S., Arifianti, P.Y., Hidayat, F., 2019. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor. West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*. 6,10.
- Van Dao, Dç, Jaafari, A., Bayat, M., Gholami, D.M., Qi, C., Moayedi, H., Van Phong, T., Ly, H.B., Le, T.T., Trinh, P.T., Luu, C., Quoc, N.K., Thanh, B.N., Pham, B.T., 2020. A spatially explicit deep learning neural network model for the prediction of landslide susceptibility. *Catena*. 188, 104451.
- Van Westen, C.J., 1994. GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia. In: Price MF, Heywood DI (eds) Geographical information systems in landslide hazard zonation GIS applications for mountain areas. London, England, 135-165.