

BARTIN, ULUS İLÇESİ İÇİN YAPAY SİNİR AĞI VE LOJİSTİK REGRESYON YÖNTEMLERİNİN HEYELAN DUYARLILIK ÇALIŞMASINA UYGULANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI

**Arif Mert EKER^a, Mehmet DİKMEN^b, Selim CAMBAZOĞLU^a, Şebnem H.S.B.
DÜZGÜN^c, Haluk AKGÜN^a**

^aJeoteknoloji Birimi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

^bBaşkent Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

^cOrta Doğu Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

mekeker@metu.edu.tr

(Geliş/Received: 31.03.2011; Kabul/Accepted: 26.10.2011)

ÖZET

Bu çalışma, Coğrafi Bilgi Sistemlerine (CBS) dayalı lojistik regresyon (LR) ve yapay sinir ağı (YSA) analizlerini kullanarak, Karadeniz bölgesindeki Bartın ilinin Ulus ilçesi için bir heyelan duyarlılık haritası hazırlamayı amaçlamaktadır. Bu araştırma kapsamında, Maden Tetkik ve Araştırma Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan heyelan envanter haritası, heyelan sınıflandırma haritasına temel olarak alınmıştır. Çalışma alanındaki analizlerin tamamı aktif heyelanlara istinaden gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, on dört açıklayıcı değişken CBS’de sayısallaştırılmış, birleştirilmiş ve düzenlenmiştir. Çalışma alanı 250 m x 250 m’lik hücelere bölünmüş ve heyelan envanter bilgisinin, alan üzerindeki yayılımının daha anlamlı bir popülasyon dağılımı göstermesini sağlamak için çekirdek (Kernel) yoğunluğu yöntemi uygulanmış, tüm değişkenler, oluşturulmuş olan bu envanter verisine dahil edilmiştir. Bağımlı değişken, kalibrasyon ve doğrulama olarak iki veri setine ayrılmıştır. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi bulmak ve farklı tekniklerin oluşturduğu heyelan duyarlılık bölgelemesi sonuçlarını karşılaştırıp en uygun duyarlılık yöntemini değerlendirmek için LR ve YSA olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan Duyarlılığı, Lojistik Regresyon, Yapay Sinir Ağı, Ulus, Bartın.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND LOGISTIC REGRESSION METHODS TO LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING AND COMPARISON OF THE RESULTS FOR THE ULUS DISTRICT, BARTIN

ABSTRACT

The purpose of this study is to prepare a landslide susceptibility map for the Ulus district in Bartın, in the Black Sea region of Turkey, by utilizing logistic regression (LR) and artificial neural network (ANN) analyses. In this study, the landslide classification map prepared by The General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) was used as a base map for landslide occurrence. The entire analyses were implemented with respect to active landslides. Fourteen explanatory variables were digitized, compiled and manipulated within a GIS environment. The study area was divided into 250 m x 250 m grid cells and Kernel density estimation technique was applied to obtain more meaningful population distribution over the area for the landslide inventory information. All variables were incorporated into this developed inventory data (dependent variable). The dependent variable was divided into two data sets as calibration and validation. Two different methods, LR and ANN analyses were utilized to find the relationship between the dependent and independent variables and also to compare the results of these techniques for the production of landslide susceptibility zonation, and to evaluate the optimum susceptibility zonation method.

Keywords: Landslide Susceptibility, Logistic Regression, Artificial Neural Network, Ulus, Bartın.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Heyelanlar hem dünyada hem de Türkiye’de en az deprem veya sel gibi diğer doğal afetler kadar önem kazanmıştır [1,2]. Türkiye’deki heyelan sayısı ve bu heyelanlardan etkilenen yapıların sayısı göz önünde bulundurulduğunda, hem heyelan konusunun hem de bu konudaki çalışmaların önemi öne çıkmaktadır [1].

Heyelan tahmininde deterministik (belirleyici) ve istatistiksel olmak üzere iki temel yaklaşım mevcuttur. Deterministik yaklaşım, fiziksel mekaniklerin (mekanizmanın) matematiksel modellerine dayanmakta, ayrıntılı veriler (malzeme özellikleri, su tablası durumu, vb.) gerektirdiğinden, veri edinimi açısından özellikle geniş alanlarda uygulanması zor bir yaklaşımdır [3]. Bunun aksine istatistiksel yöntemler şev kaymasını kontrol eden bu mekanizmaları göz önünde bulundurmaz ve veriyi stokastik bir süreç olarak değerlendirerek geçmişte gerçekleşen heyelanların ölçülebilir arazi özellikleri ile alakalı olduğunu varsayar [4], [5]. Bu yaklaşımın kullanılmasıyla elde edilen bilgi o noktanın heyelan duyarlılığı olarak isimlendirilir.

Heyelan duyarlılığı bir alanın şev kaymasına sebep olacak gerekli koşulları oluşturma eğilimi olarak tanımlanmaktadır. Bir heyelan duyarlılık haritasında, geçmiş şev kaymasına katkı yapan temel etmenler değerlendirilerek heyelan potansiyeli olan aday alanların dağılımı gösterilir [6]. Buradaki temel varsayım; gelecekte olması muhtemel bir heyelanın geçmişteki ile aynı koşullara sahip olmasıdır [7]. Oluşturulan bu duyarlılık haritaları bir heyelanın ne zaman ve nasıl olacağını ve şev kaymasının ne kadar yıkıcı olacağına dair bilgi vermemesine rağmen [8], tehlike haritalamasının ilk adımını oluşturur [9]. Yakın zamanda bir çok araştırmacı [2, 5, 9-16] belirli alanlarda gelecekteki potansiyel heyelanların dağılımını haritalamak üzere yapay sinir ağı, bulanık yaklaşım, lojistik regresyon, doğrusal ve karesel

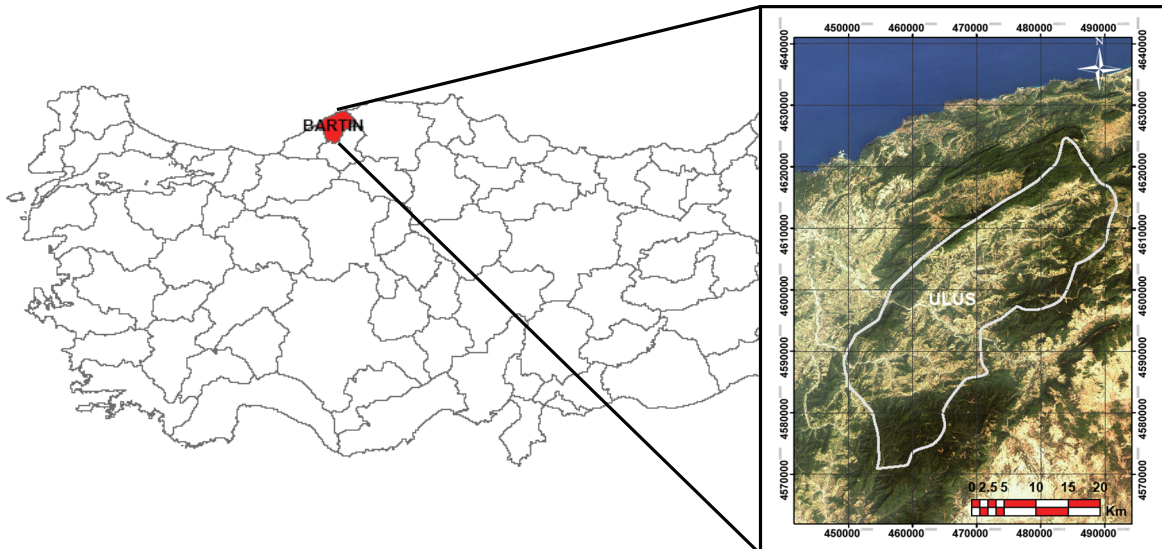
(sınıflama) ayırtaç analizi, mekansal regresyon, coğrafi olarak ağırlıklandırılmış regresyon vb. gibi farklı istatistiksel modeller kullanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, heyelan duyarlılığı yönünden incelenen Bartın ilinin Ulus ilçesinde dolaylı ve nicel bir yöntem olan istatistiksel model yaklaşımı uygulanmıştır. Bu çerçevede, on dört açıklayıcı değişken (başka bir deyişle: yükseklik, eğim, bakı, eğrilik, plan eğrilik, profil eğrilik, normalize edilmiş vejetasyon farklılık endeksi (NDVI), topografik nemlilik endeksi (TNE), Ulus, İnalıtı ve Çakraz formasyonları, Sunduk ve Ahmetusta üyeleri ve alüvyon çökelleri) coğrafi bilgi sistemleri ortamında işlenerek, bu değişkenler ve heyelana eğilimli alanlar arasında bir ilişkinin bulunması amaçlanmıştır. Bu çalışmada hedeflenen diğer bir konu da, yapay sinir ağı ve lojistik regresyon arasında bir karşılaştırma yaparak alan için heyelan duyarlılığı değerlendirmesi açısından uygun olan yöntemi belirlemektir.

2. ÇALIŞMA ALANI (STUDY AREA)

Karadeniz bölgesinde yer alan, Bartın ilinin Ulus ilçesi çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 1). Çalışma alanı toplam 892 km²’lik bir bölgeyi kaplamakta ve Evrensel Ters Merkator (UTM) grid sistemi Bölge 36 ve Dünya Jeodezik Sistemi (WGS) datumuna göre Kuzey-Güney yönünde 4624769 ile 4570918 ve Doğu-Batı yönünde 449306 ile 491755 koordinatları arasında yer almaktadır.

Çalışma alanındaki yükseklik ve eğim farkı sırasıyla 1602 metreye ve 55,78 dereceye ulaşmaktadır. Bunlarla birlikte, bölgenin özelliklerinden biri olan yoğun yağış (Aralık ayında 125,1 kg/m³) [17] ile birlikte zayıf zemin ve kaya formasyonları da göz önünde bulundurulduğunda, bölge heyelanlara meyilli bir alan oluşturmaktadır. Bölgede, 19-21 Mayıs 1998 yılında gerçekleşen yoğun yağış döneminde sellerin ve heyelanların gerçekleştiği, bunların sonucunda 10



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası. (Location map of the study area.)

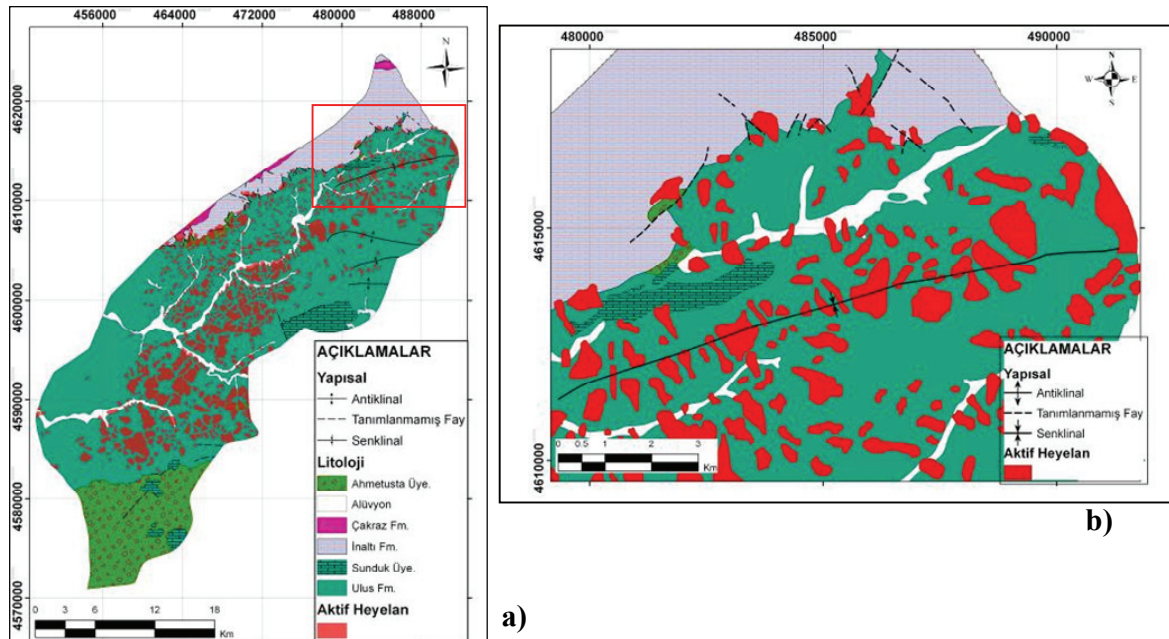
vatandaşımızın hayatını kaybettiği ve birçok alt ve üst yapının zarar görebileceği 500 milyon dolar değerinde maddi hasarın oluştuğu bilinmektedir [18]. Ancak mevcut verilere göre [1] çalışma alanı dahilinde sadece bir yağış istasyonu bulunmakta ve bu tek istasyon çalışma alanında bir yağış miktarı karakterizasyonu için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle yağış, heyelan değerlendirilmesinde önemli bir kriter olmasına karşın bu çalışmada açıklayıcı değişkenlerin arasına dahil edilememiştir.

3. BÖLGESEL VE YAPISAL JEOLojİ (REGIONAL AND STRUCTURAL GEOLOGY)

Bu çalışmada kullanılan 1/100.000 ölçekli jeoloji haritasına (Şekil 2) göre [19,20] çalışma alanında beş farklı jeolojik birim bulunmaktadır. Sayısallaştırılan envanter haritasına göre [18], çalışma alanındaki birimlerden en önemlisi, mevcut heyelanların yoğun olarak görüldüğü Ulus formasyonudur (Alan = %71,99, Heyelan = %92,02). Ulus formasyonu sadece Alt Kratese kırıntıları ve karbonatlarından oluşmaktadır. Gri-yeşil, gri ve bazen siyah ince-orta kalın tabakalı turbiditik kumtaşı ve şeyl ardalanmaları içermektedir. Bölgede, Ulus formasyonuna ait olan iki alt üye ayıklanmış ve haritalanmıştır [19]. Bunlardan Ahmetusta üyesi gri, sarı, kahverengimsi-sarı renkte, orta ila kalın tabakalı konglomeralardan oluşmaktadır (Alan = %11,10, Heyelan = %1,69). Ulus formasyonunun diğer bir üyesi olan Sunduk üyesi ise formasyon içinde kireçtaşı lensleri olarak bulunmaktadır (Alan = %2,96, Heyelan = %0,17). Beş birimden biri olan İnaltı formasyonu (Alan = %9,13, Heyelan = %2,26), beyaz, bej ve gri renkli ince-orta kalın tabakalı platform karbonatları ile kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve

dolomit veya dolomitleşmiş kireçtaşlarını içermektedir [21]. Diğer yandan, Çakraz formasyonu çalışma alanında en az alan kaplayan formasyondur (Alan = %0,57, Heyelan = %0,31) ve kırmızı renkli karasal çamur taşı, şeyl, kumtaşı ve konglomeralardan oluşmaktadır [19,20]. Alüvyon çökeller genellikle kuzeydoğu-güneybatı yönelime sahiptir (Alan = %4,25, Heyelan = %3,56) ve bu birim eski nehir yataklarındaki çakıl, kum ve çamur çökelleri olarak bulunmaktadır [19,20]). İki alt üyesi ile birlikte Ulus formasyonu çalışma alanındaki aktif heyelanların toplam %93,0'unu kapsamakta ve en önemli jeolojik birim olarak öne çıkmaktadır.

Çalışma alanı Kuzey Anadolu Fay Sistemi ve Güney Karadeniz Bindirme Fayı tektonik yapıları arasında ve tektonik olarak 'sessiz' olarak kabul edilen [22,23] Kuzey Türkiye Bölgesinde (North Turkish Province) [24] yer almaktadır. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsünün kayıtlarına göre çalışma alanı yakınında 1944 Bolu-Gerede (M = 7,2) ve 1968 Bartın depremi (M = 6,8) olmak üzere sadece iki adet yıkıcı deprem mevcuttur. Bu depremlerden ilki Kuzey Anadolu Fay Sistemi üzerinde ve ikincisi Amasra'nın 10 km açığında Karadeniz içerisinde gerçekleşmiştir [22]. Bu verilere dayanarak depremlerin çalışma alanında heyelanları tetikleyen önemli bir etmen olmadığı söylenebilir. Bölgenin jeoloji haritasına göre [19,20], çalışma alanında antiklinal ve senklinaler mevcuttur. Şekil 2'de görülebileceği üzere çalışma alanındaki heyelanlar ile jeolojik yapısal unsurlar arasında sadece kuzeyde yer alan senklinal (Şekil 2b) boyunca kümelenme dışında heyelanlar ile jeolojik yapılar arasında herhangi bir ilişki bulunmamaktadır.



Şekil 2. a)Çalışma alanının jeoloji haritası [19,20] ve bölgedeki heyelanların dağılımı [18]; b)Kuzey senklinalinin yakından görünümü. (a)Geological map of the study area [19], [20] and landslide distribution in the area [18]; b)Close-up view of the northern syncline.)

4. VERİ SETİNİN HAZIRLANMASI (PREPARATION OF THE DATA SET)

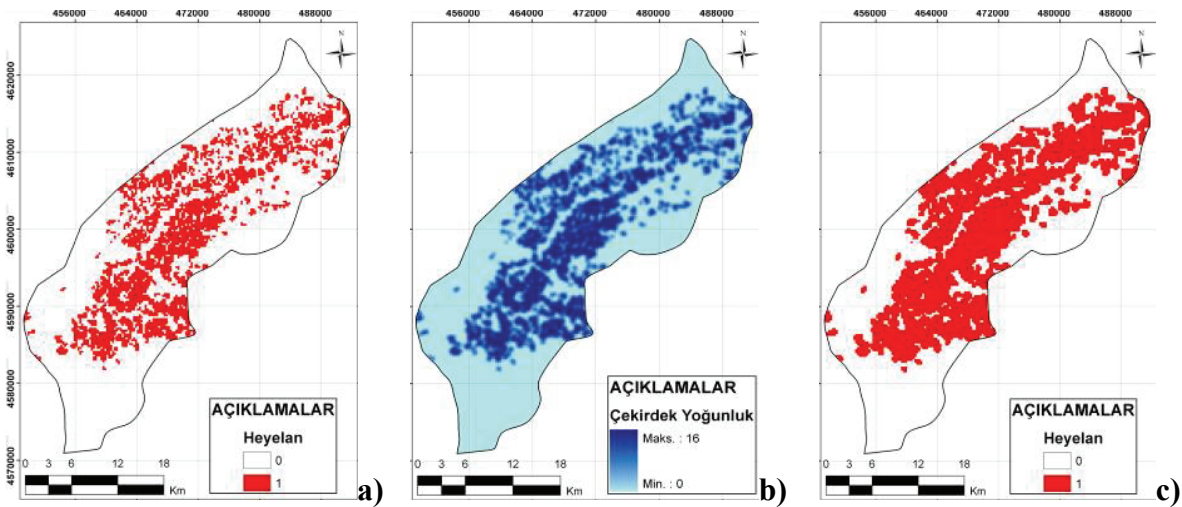
Bağımlı değişken ve on dört açıklayıcı değişken (katman) için dört farklı kaynak kullanılmıştır. Bunlardan ilki MTA tarafından hazırlanan 1:500.000 ölçekli Türkiye Heyelan Haritası, Zonguldak Paftasıdır [18] ve bu çalışmada kullanılan heyelan envanteri verisini oluşturmaktadır.

Heyelan envanter haritaları tetikleme mekanizmaları göz önünde bulundurulmadan hazırlanmaktadır ve bu çalışmada kullanılan kaynak harita heyelanları kütle hareketi tipine [25] ve derinlik ile aktifliğine göre ayırmaktadır [26]. Bu çalışmada sadece 5 m'den daha derin aktif heyelanlar kullanılmış ve çalışma alanının %18,6'sını kapsayan toplam 778 adet heyelan poligonu sayısallaştırılarak CBS ortamına aktarılmıştır (Şekil 2). Sayısallaştırılmış olan poligon türündeki bu alanlara 0 ve 1 değerleri atanmıştır. Bu işlem esnasında, heyelan (1) alanının 250 m x 250 m boyutlarındaki hücre alanına göre oranı %5'den %50'ye %5'lik artışlarla denenmiş ve heyelan alanı/grid alanı oranı %15 veya daha fazlasına sahip olan hücreler bağımlı değişkende 'heyelan'(1) olarak tanımlanmıştır. Bu işlemden sonra toplam 10059 hücre '0 (heyelan-yok) ve 4212 hücre 1 (heyelan-var) olarak elde edilmiştir (Şekil 3a). Yapılan bu oran analizinde amaç; envanter haritasının ölçeğinden kaynaklanması olası ve/veya hazırlanması sırasında yapılabilecek muhtemel hataların en düşük seviyede tutulmasıdır [7,16]. Hazırlanan bu envanter haritası üzerinde, ortalama en yakın komşuluk analizinden çıkan 517,16 m değeriyle çapı belirlenen çekirdek yoğunluk analizi gerçekleştirilmiş ve eşik değeri olarak 3 kullanılmıştır (Şekil 3b). Bunun sonucunda heyelan var (1) olarak atanmış bazı hücrelerin 250 m komşuluğundaki hücrelere de heyelan değeri atanmış ve analizlerin devamında elde edilen bu heyelan envanter haritası kullanılmıştır (Şekil 3a).

Bu işlem sayesinde asıl heyelan envanter haritasının ölçeğinden kaynaklanması muhtemel veya heyelan alanı/ hücre alanı oranı %15'den düşük olan heyelan alanlarının dahil edilmemesinden dolayı kaynaklanabilecek hatalar ve istatistik analizleri esnasında oluşabilecek yanlışlık 7515 hücre '0' ve 6756 hücre '1' dağılımının elde edilmesiyle ortadan kaldırılmıştır. Bu yaklaşım [11] tarafından kullanılan hücre besleme yöntemine benzer bir mantık taşımaktadır. Ancak, bu çalışmada, heyelan poligonunun taç ve yan kısımlarına komşu olan hücrelerin dışında heyelan poligonunun toplanma alanına komşu olan hücreler de bu analize dahil edilmiştir. Bunun nedeni; çalışma kapsamında ilgilenilen bütün heyelan poligonlarının aktif heyelan poligonu [18] olarak seçilmesidir.

İkinci kaynak olarak litoloji haritası sayısallaştırılmış, her litoloji ayrı bir katman olacak şekilde, hücrelere düşen yüzdelere göre veri tabanına eklenmiş, böylece kategorik veri sürekli veriye dönüştürülmüştür. Litoloji haritasının ayrı katmanlar olarak alınmasının sebebi litolojilerin heyelanların dağılımı üzerinde etkisi olmadığı hipotezi ile yapılan Ki-Kare testine göre sonucun hipotezi reddetmesidir.

Üçüncü veri kaynağı olan Mekik RADAR Topografya Görevi (SRTM) Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) 90 m x 90 m çözünürlüklü verisinden yükseklik, eğim, bakı, eğrilik, plan eğrilik, profil eğrilik ve topografik nemlilik endeksi katmanları elde edilmiştir. Bakı verisi, 45°'lik aralıklarla içerdiği heyelan alanı incelenmiş ve düzenli bir dağılım göstermesinden dolayı sürekli bir değişken olan bu katman tek değişken olarak veritabanına dahil edilmiştir (bkz. Tablo 1). Eğim verisinden oluşturulan eğrilik verisinin negatif değerleri konveks, pozitif değerleri konkav ve sıfır değerleri düz morfolojiyi belirtmektedir. Plan ve profil eğrilik verisinde ise eğimin eşyükselti eğrisine sırasıyla paralel ve dik



Şekil 3. Heyelan envanter haritasının oluşturulma adımları: a)%15 heyelan alanına göre atanmış hücre haritası; b)Çekirdek yoğunluk haritası; c) Nihai heyelan envanter haritası. (Generation steps of the landslide inventory map: a)grid map assigned according to 15% landslide area; b)Kernel density map; c) Final landslide inventory map.)

Tablo 1. Frekans oranı değerleri. (Frequency ratio values.)

Faktör	Sınıf	Heyelan Etki Alanındaki Hücre				%15 Heyelan Haritası Nihai Heyelan Haritası İçin FR değeri		1. Eğitim Setindeki hücre sayısı (D)	D/C oranı
		A değeri	PLO (%)	C değeri	PIF (%)	Heyelan Haritası için FR değeri	Nihai Heyelan Haritası için FR değeri		
Eğim	0 - 5	617	9,13	1739	12,19	0,63	0,75	1414	81,31%
	5 - 10	1614	23,89	3531	24,74	0,92	0,97	2846	80,60%
	10 - 15	2541	37,61	4548	31,87	1,24	1,18	3608	79,33%
	15 - 20	1544	22,85	3037	21,28	1,14	1,07	2416	79,55%
	20 - 25	298	4,41	937	6,57	0,63	0,67	756	80,68%
	> 25	142	2,10	479	3,36	0,46	0,63	377	78,71%
NDVI	>=0,4	669	9,90	3166	22,18	0,39	0,45	2541	80,26%
	<0,4	6087	90,10	11105	77,82	1,17	1,16	8876	79,93%
Eğrilik	Konkav	3649	54,01	7351	51,51	1,07	1,05	5886	80,07%
	Düz	29	0,43	58	0,41	1,11	1,06	46	79,31%
	Konveks	3078	45,56	6862	48,08	0,93	0,95	5485	79,93%
Plan E.	< 0	3342	49,47	6908	48,41	1,07	1,02	5522	79,94%
	0	4	0,06	9	0,06	1,13	0,94	7	77,78%
	> 0	3410	50,47	7354	51,53	0,94	0,98	5888	80,07%
Profile E.	< 0	2934	43,43	6608	46,30	0,94	0,94	5261	79,62%
	0	4	0,06	6	0,04	1,13	1,41	5	83,33%
	> 0	3818	56,51	7657	53,65	1,06	1,05	6151	80,33%
Yükselti	<= 300	1176	17,41	2013	14,11	1,12	1,23	1622	80,58%
	300 - 600	3718	55,03	5527	38,73	1,54	1,42	4407	79,74%
	600 - 900	1549	22,93	2968	20,80	1,04	1,10	2392	80,59%
	900 - 1200	313	4,63	2737	19,18	0,15	0,24	2179	79,61%
	> 1200	0	0,00	1026	7,19	0,00	0,00	817	79,63%
Litolojik Birimler	Ahmetusta üye,	93	1,38	1584	11,10	0,15	0,12	1257	79,36%
	Alüvyon	306	4,53	606	4,25	0,84	1,07	487	80,36%
	Çakraz fm,	23	0,34	82	0,57	0,54	0,59	65	79,27%
	İnalti fm,	191	2,83	1303	9,13	0,25	0,31	1053	80,81%
	Sunduk üye,	18	0,27	423	2,96	0,06	0,09	341	80,61%
	Ulus fm,	6125	90,66	10273	71,99	1,28	1,26	8214	79,96%
Bakı	K	899	13,31	1952	13,68	0,98	0,97	1544	79,10%
	KD	645	9,55	1257	8,81	1,12	1,08	1002	79,71%
	D	696	10,30	1446	10,13	1,04	1,02	1181	81,67%
	GD	823	12,18	1859	13,03	0,86	0,94	1467	78,91%
	G	829	12,27	1887	13,22	0,83	0,93	1507	79,86%
	GB	677	10,02	1516	10,62	0,93	0,94	1227	80,94%
	B	963	14,25	1925	13,49	1,14	1,06	1520	78,96%
	KB	1224	18,12	2429	17,02	1,10	1,06	1969	81,06%
TNE	6 - 7,5	126	1,87	439	3,08	0,49	0,61	349	79,50%
	7,5 - 9	4073	60,29	8299	58,15	1,04	1,04	6676	80,44%
	9 - 10,5	1404	20,78	2976	20,85	1,06	1,00	2349	78,93%
	10,5 - 12	452	6,69	1006	7,05	0,99	0,95	804	79,92%
	12 - 13,5	241	3,57	614	4,30	0,77	0,83	492	80,13%
	13,5 - 15	209	3,09	450	3,15	0,81	0,98	358	79,56%
	15 - 16,5	132	1,95	247	1,73	0,99	1,13	198	80,16%
	> 16,5	119	1,76	240	1,68	0,78	1,05	191	79,58%

olduğu bilgisi edinilmektedir. SRTM verisinden son olarak Topografik Nemlilik Endeksi (TNE) katmanı elde edilmiştir. TNE, kararlı durum koşulları ve tekdüze zemin özellikleri varsayımında bulunmaktadır [27] ve $\ln(A_s / \tan\beta)$ eşitliğinden hesaplanır. Bu denklemde; A_s spesifik su tutma havzası ve β eğim gradyanıdır. SRTM verisinden elde edilen katmanların tamamı bilinear yeniden örnekleme yöntemi ile 250 m x 250 m hücre formatına dönüştürülmüştür.

Son olarak, Landsat ETM+ İz:178 - Satır:031 30 m x 30 m çözünürlüklü uydu görüntüsünün kırmızı (KIR) ve yakın kızıl ötesi (YKÖ) bantlarından; (YKÖ-KIR) / (YKÖ+KIR) formülü ile Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü Farklılık Endeksi (NDVI) oluşturulmuştur. Bu veri yeşil biyo-kütlenin yoğunluğunu vermekte ve -1 ile +1 arasında değişmektedir. Artan değer bitki örtüsü sağlamlığını göstermektedir [9]. Yukarıda bahsedilen katmanların tamamı tek bir veri tabanına aktarılmış ve değişkenler frekans oranı (Frequency

Ratio-FR) modeline göre; $FR = PLO / PIF$ denklemi kullanılarak analiz edilmiştir [28] (Tablo 1).

Bu denklemde belirli bir sınıf için olan PIF (Percent Influencing Factor-Etki Yüzdesi) değeri belirli bir sınıfın hücre sayısının (C) çalışma alanındaki toplam hücre sayısına (14271) bölümünden elde edilmiştir. PLO (Percent Landslide Occurrence-Heyelan Yüzdesi) değeri ise belirli bir sınıftaki heyelan içeren hücrelerin sayısının (A) heyelan içeren toplam hücre sayısına bölümünden elde edilmiştir [9]. Frekans oranları hem heyelan alanı/hücre alanı oranı baz alınarak hazırlanan hem de çekirdek yoğunluk analizinden sonra elde edilen envanter harita için ayrı değerlendirilmiş ve değerlerin kayda değer değişiklik göstermediği gözlemlenerek çekirdek yoğunluk analizi sonucunda elde edilen heyelan envanter haritasının istatistik analizlerinde kullanılmasının analizlerde yanlılığa neden olmayacağı görülmüştür (Tablo 1).

Tablo 2. YSA ve LR modelleri için rastgele seçilen farklı veri setlerinin sonuçları (HY=heyelan yok; HV=Heyelan var). (Results of the randomly selected datasets for ANN and LR models (HY=no landslide absent; HV=landslide present))

	Veri Seti #	Gözlem: HY Tahmin: HY	Gözlem: HV Tahmin: HV	Gözlem: HV Tahmin: HY	Gözlem: HV Tahmin: HV	Genel Doğruluk
Yöntem	LR1	66,88%	33,12%	22,90%	77,10%	71,72%
	LR2	66,50%	33,50%	23,05%	76,95%	71,45%
	LR3	66,48%	33,52%	23,29%	76,71%	71,32%
	LR4	66,62%	33,38%	22,57%	77,43%	71,74%
	LR5	67,18%	32,82%	23,31%	76,69%	71,68%
	YSA1	74,38%	25,62%	17,91%	82,09%	78,03%
	YSA2	72,67%	27,33%	16,48%	83,52%	77,81%
	YSA3	72,21%	27,79%	17,00%	83,00%	77,31%
	YSA4	71,76%	28,24%	16,58%	83,42%	77,28%
	YSA5	73,27%	26,73%	16,95%	83,05%	77,90%

7. ANALİZ YÖNTEMLERİ (ANALYSES METHODS)

LR ve ANN uygulanmadan önce, yukarıda belirtilen 14 açıklayıcı değişkenin aralarında eş-doğrusallık (multi-collinearity) olup olmadığını belirlemek için çoklu-eş-doğrusallık analizi yapılmış ve bu analiz sonucunda 3 değişken (Ahmetusta üyesi, eğrilik ve profil eğrilik) ileri analizlerden çıkarılmıştır. Ayrıca ana verinin %80'i (11.417 örnek) rastgele seçilerek model parametrelerini kalibre etmek üzere eğitim (training) verisi, kalan %20 (2.854 örnek) ise doğrulama için kullanılmıştır. Eğitim verisinin seçiminde tabakalı örnekleme (stratified sampling) kullanılmıştır. Bu örnekleme, 11 parametrenin her sınıfından eşit oranda (Tablo 1) dağılım gösterecek şekilde yapıldığından, modelin belli bir parametrenin belli bir sınıfını ezberlemesinin önüne geçilmiştir. Bu iki alt set için 5 farklı eğitim seti oluşturulmuştur ve bu veri setlerinin sonuçları arasında ciddi bir farklılık olmadığını gözlenmiştir (Tablo 2). Bu çalışmada, her iki model için ilk veri seti, üzerinde herhangi bir normalizasyon işlemi uygulanmadan kullanılmıştır.

7.1. Lojistik Regresyon Analizi (LR) (Logistic Regression Analysis)

Lojistik regresyon (LR) analizi bir bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız (açıklayıcı) değişken arasında doğrusal olmayan bir ilişki kurarak çok-değişkenli bir regresyon oluşturulmasını sağlar [2], [11]. Bir olayın gerçekleşmesi (heyelan) ve bunun birden fazla bağımsız değişkene olan bağımlılığının ilişkisi sayısal olarak en basit hali; $P = 1/(1+e^{-Z})$ şeklinde tanımlanabilir. Bu denklemde, P bir olayın gerçekleşme olasılığıdır. P, mevcut durumdaki tahmin edilen (hesaplanan) olayın gerçekleşme olasılığıdır. Z değeri $-\infty$ ile $+\infty$ arasında değiştiğinden, olasılık 0 ile 1 arasında S-şeklinde bir eğri şeklinde değişim göstermektedir (Denklem 1).

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

Bu denklemde β_0 modelin Y-eksenini kestiği noktadır, β_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) lojistik regresyon modelinin eğim

katsayılarıdır ve x_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) bağımsız değişkenlerdir.

Bu çalışmada, ileri aşamalı (forward stepwise) LR analizi kullanılmıştır. Model adımlarının çok amaçlı (omnibus) test sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Model değişkenlerinin Omnibus testi ve LR analizinin model özeti. (Omnibus test of the Model variables and model summary of the LR analysis.)

Adım	-2 Log olabil.	Cox & Snell R ²	Nagelkerke R ²	Ki- Kare	P değeri
1	13355,1	0,192	0,257	2439,9	0,00
2	12696,5	0,238	0,317	658,6	0,00
3	12304,6	0,263	0,352	391,9	0,00
4	12254,4	0,267	0,356	50,2	0,00
5	12234,6	0,268	0,358	19,8	0,00
6	12214,1	0,269	0,359	20,5	0,00
7	12198,5	0,270	0,361	15,6	0,00
8	12186,0	0,271	0,362	12,5	0,00
9	12181,8	0,271	0,362	4,2	0,04
10	12176,2	0,272	0,363	5,6	0,02
11	12171,7	0,272	0,363	4,6	0,03

-2 Log olabilirliği değerleri her adımda azalırken bununla birlikte Nagelkerke R² değerleri (adım 11'de, modelin heyelanlardaki değişimin yaklaşık %36'sını açıkladığını göstermektedir) de artmaktadır. Ki-kare sonuçlarına bakıldığında her bir parametrenin eklenmesi istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0,05$). Değişkenlerin lojistik regresyon analizine göre olan katsayıları ve bunların tanısal (diagnostic) değerleri ile birlikte Tablo 4'te de görüleceği gibi 11 açıklayıcı değişken ile oluşturulan adım 11 LR analizinin sonucu olarak seçilmiştir. Çakraz, İnathlı ve Ulus formasyonları heyelan oluşumlarını pozitif yönde, NDVI ve Sunduk üyesi negatif yönde etkilemektedir.

7.2. Yapay Sinir Ağı Analizi (YSA) (Artificial Neural Network Analysis (ANN))

Yapay Sinir Ağları bir girdi seti ve tek bir çıktı içeren birbirleri ile bağlı yapay sinir olarak adlandırılan birincil elemanlardan oluşan doğrusal olmayan bir modeldir. Bu çalışmada çok-katmanlı ileri-beslemeli

bir yapay sinir ağı yapısı kullanılmıştır. Girdi katmanında 11, ara katmanında 20, çıktı katmanında ise 1 sinir kullanılmıştır. Bu çalışmada, ara katmandaki nöron sayısının seçimi için 5 ile 30 arasındaki her değer test edilerek incelenmiş ve her bir artış %-0,13 ile %0,43 arasında tahmin doğruluğunu etkilemiştir. 20 nörondan fazla sayıda nöron kullanılması (30 nöron kullanılması) tahmin doğruluğunu %0,20'den az arttırdığından, 20 değeri ara katmandaki nöron sayısı olarak seçilmiştir. Bu sayede aşırı uyumun da (overfitting) önüne geçilmiştir.

Tablo 4. LR analizinden sonra değişkenlerin katsayıları ve bunların tanısal değerleri. (Coefficients of the variables following LR analysis and their diagnostic values.)

Değişkenler	β	S.H.	Wald	Olasılık
TNE	-0,096	0,016	36,277	0,000
EĞİM	-0,010	0,005	4,882	0,027
YÜKSEKLİK	-0,002	0,000	329,206	0,000
BAKI	0,001	0,000	12,681	0,000
NDVI	-3,311	0,170	379,902	0,000
PLAN EĞ.	-0,719	0,255	7,982	0,005
ALÜV.	0,429	0,203	4,482	0,034
ÇAKRAZ	1,558	0,351	19,686	0,000
İNALTI	0,979	0,164	35,686	0,000
SUNDUK	-0,965	0,349	7,657	0,006
ULUS	2,039	0,142	206,711	0,000
Sabit	1,169	0,268	18,957	0,000

Çalışmada, çıktı katmanındakiler hariç diğer tüm yapay sinirlerin çıktıları, sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılarak $O_j = 1/(1 + \exp(-net_j / \theta_0))$ denklemi ile belirlenmiştir. Denklemde, θ_0 sigmoid şekil sabiti, net_j yapay sinire gelen girdilerin ağırlıklı toplamı ve O_j ise yapay sinirin ürettiği çıktıdır.

Tablo 5. Yapay sinir ağı modellerinde kullanılan parametrelerin seçilen değerleri. (Values of the parameters used in Artificial neural network model.)

PARAMETRE	DEĞER	PARAMETRE	DEĞER
aşamalar	100	Mu	0,001
goal	0	mu_dec	0,1
max_fail	5	mu_inc	10
mem_reduc	1	mu_max	1,00E+10
min_grad	1,00E-10	Zaman (sn.)	sonsuz

YSA'da Levenberg-Marquardt algoritmasının bu çalışmada kullanılan eğitme parametrelerinin değerleri Tablo 5'te verilmiştir. mem_reduc: Algoritma tarafından kullanılan belleği kontrol eder; aşama: Maksimum eğitim aşaması sayısını; zaman: Saniye cinsinden maksimum eğitim zamanını; hedef: Performans hedefini; min_grad: Performans minimum gradyanını ve max_fail: Maksimum doğrulama başarısızlığını belirtmektedir. 'mu' parametresi ağırlık güncellemesinin adım boyutunu tanımlayan sönümlenme katsayısının başlangıç değeridir. Performans fonksiyonu, bir iterasyon adımı tarafından

azaltıldığında bu değer 'mu_dec' değeri ile çarpılır; arttırıldığında ise bu değer 'mu_inc' değeri ile çarpılır. Eğer 'mu' değeri 'mu_max' değerinden daha büyük bir değer alırsa algoritma durur. Bu yapay sinir ağı analizi 0,146 ortalama kare hatası ile gerçekleştirilmiştir.

YSA yöntemi kara kutu bir model olduğundan açıklayıcı değişkenlerin heyelan oluşumuna ne yönde (pozitif ya da negatif) etki ettiğini belirleyecek bir parametre içermemektedir. Bu nedenle ve çıktı katmanındaki ağırlık değerlerinin doğrudan bu 11 değişkenle ilişkili olmamasından, kullanılan parametrelerin YSA modelinin sonuçlara etkisinin incelenmesi mümkün olamamaktadır. Bu da bu yöntemin dezavantajıdır.

8. TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND RESULTS)

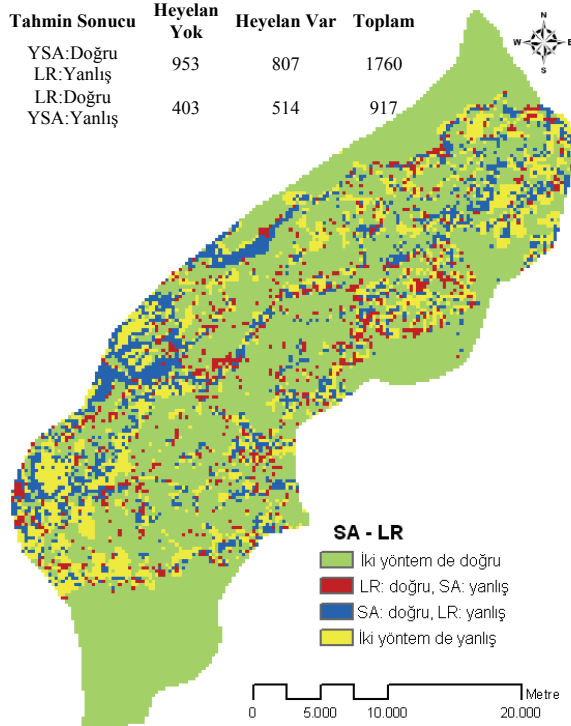
Haritalama birimlerinin sınıflandırmasında, hangi modelin daha iyi çalıştığının belirlenmesi için iki model performansı istatistiksel ve mekansal olarak ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Bunun için ilk olarak modeli test etmek için haritalama biriminin doğruluk yüzdesi incelenmiştir (Tablo 6). Tablodan görüleceği üzere yapay sinir ağı analizi lojistik regresyona göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Tablo 6. Modellerin tahmin doğruluğunun özeti (HY=heyelan yok; HV=Heyelan var). (Summary of the prediction accuracy of the models (HY=no; HV=yes).)

YÖN.	Gözlem: HY		Gözlem: HV		Genel Doğ.
	Tahmin : HY	Tahmin: HV	Tahmin: HY	Tahmin: HV	
LR	0,67	0,33	0,23	0,77	0,72
YSA	0,74	0,26	0,18	0,82	0,78

Bu iki yöntemin tahmin performansları alıcı operatörü karakteristikleri (ROC) eğrisi kullanılarak da karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. ROC eğrisinin altında kalan alan, bir modelin global doğruluk istatistiğini gösterir. Eğer 0,5 ile 1 arasında değişen ROC eğrisinin altında kalan alan artarsa modelin tahmin performansı artar [9]. ROC eğrilerinin altındaki alanlar göz önünde bulundurulduğunda, tahmin yeteneği hususunda yapay sinir ağı yöntemi 0,835 değeri ile 0,791 değerine sahip lojistik regresyon yönteminden üstündür.

Yöntemlerin tahminlerinin mekansal dağılımını daha iyi anlamak için modellerin sonuçları bir araya getirilmiştir. Şekil 4'te görülebileceği üzere, LR yönteminin başarısız olduğu yerlerde YSA yöntemi 1,760 (%12,33) hücrede başarılı olmuştur. Yapay sinir ağı yönteminin başarısız olduğu yerlerde lojistik regresyonun başarılı olduğu alanlar toplam 917 hücredir (%6,43). Bu değerlendirmenin mekansal dağılımı Şekil 4'te gösterilmiştir.



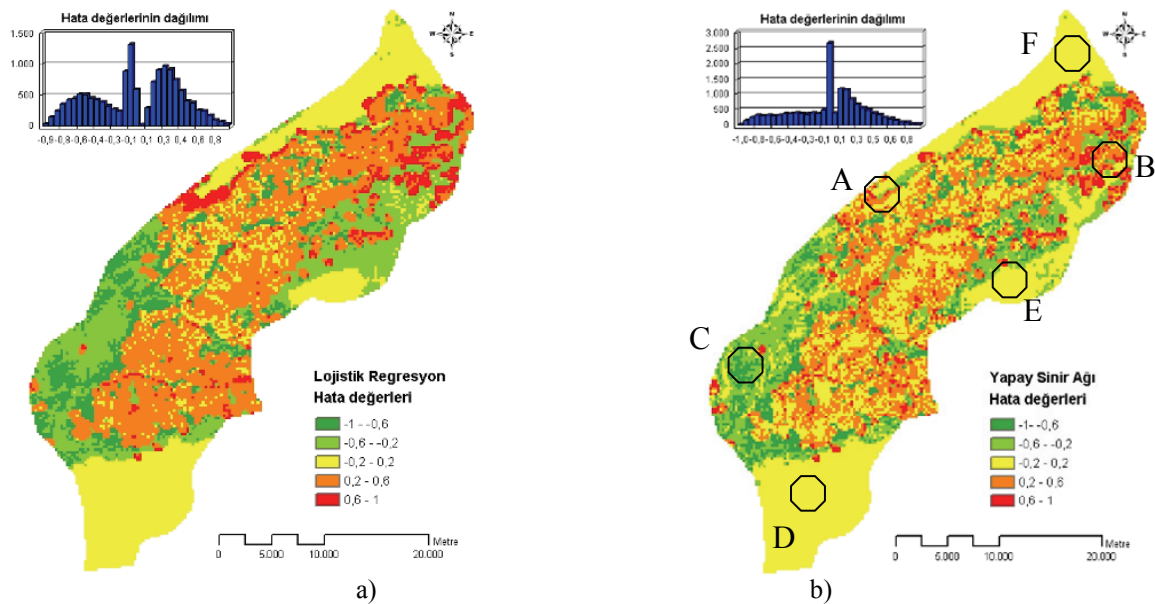
Şekil 4. Birleştirilmiş tahmin sonuçları. (Combined prediction results.)

Her iki modele ait olan tahmin kalanlarının (residual) dağılımı haritalanmış, kalan haritaları ve bu kalanların histogramları Şekil 5'te verilmiştir. Kalan haritaları, tahmin sonuçlarının eksik ya da fazla olduğu bölgeleri belirleyebilmek için "-1" ile "1" aralığında 0,4 artışla 5 ayrı bölgeye sınıflandırılmıştır. Haritada eksi değere sahip olan alanlar fazla tahmin edilen bölgeleri, artı değerler ise eksik tahmin edilen alanları göstermektedir. Sıfır değerine yakınlık eksik ya da fazla tahmin derecesini belirtmektedir. Tahmin doğruluk sonuçları (Şekil 4) ile birlikte bu haritalar göz önüne alındığında, hata değerleri lojistik

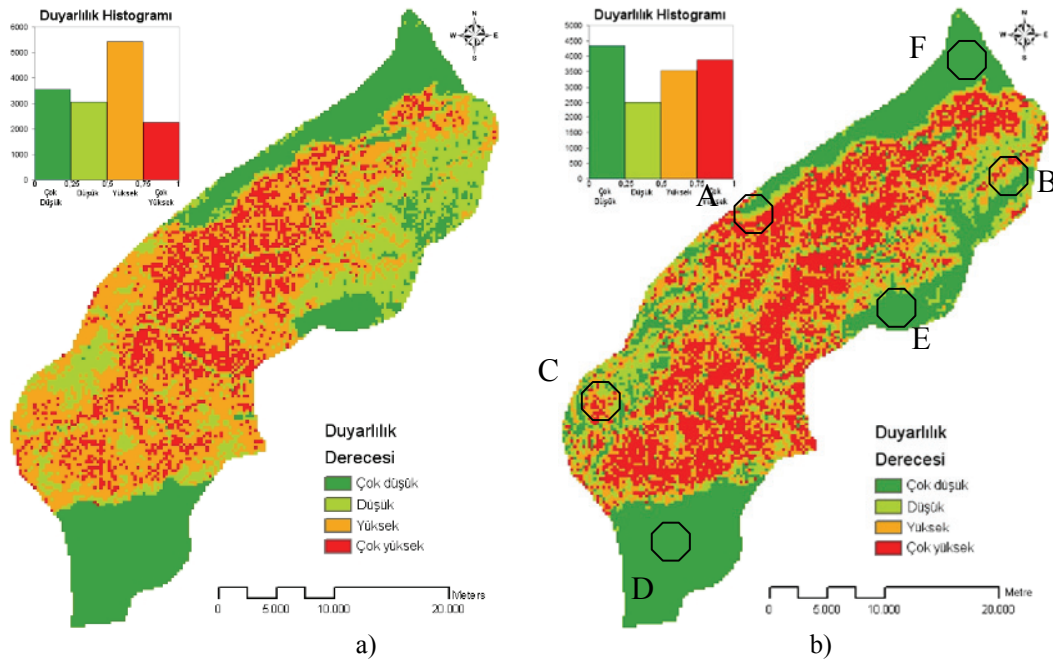
regresyona göre daha az olduğundan, çalışma alanındaki heyelanları daha iyi temsil eden yöntem yapay sinir ağı yöntemidir.

LR yönteminden elde edilen kalan değerleri ve bunların dağılımı (Şekil 5a) incelendiğinde, alanın orta-kuzeybatısı ve kuzeydoğusundaki kavşikli bölgelerde (Alan A ve B, Şekil 5b) artı değerlerde yoğunluk olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, normalde heyelan gözlemlenmeyen bir bölgenin yakınlarında kalan göreceli olarak az sayıda heyelan içeren alanları modelin tahmin edememesidir. Aynı şekilde, alanın batı kısmında ve orta-doğu kısmında (Alan D ve E, Şekil 5b) görülen eksi kalan değerler de yakın alanlardaki heyelan yoğunluğunun yakınındaki heyelansız bölgeleri etkileyerek yöntem tarafından heyelan var olarak yorumlanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca kalan değerlerin dağılımı heyelan içermeyen bölgelerde yöntemin çok iyi tahminde bulunduğunu ve heyelanların yoğun olduğu orta kısımda da nispeten iyi tahminlerde bulunduğunu göstermektedir. Alanın orta kısmında, alüvyon sınırını takip edecek şekilde, envanter haritasında heyelan olmadığı görülen alanlarda fazla tahminlerin (eksi değer) görülüyor olması, muhtemelen yöntemin alanın orta kısmındaki heyelan yoğunluğunu genelleştirerek bu alanlara da taşımış olmasından kaynaklanmaktadır. Alanın batı kısmında görünen eksi değerler de aynı sebepten dolayıdır. Kalan değerlerin histogramı yüksek doğru tahminde yoğunluk göstermektedir, ancak eksi kalan değerlerde normal dağılım görülmemekte ve artı değerlerde sağa çarpık (skewed) normal dağılım görülmektedir. Sağa çarpık normal dağılım en yüksek eksik tahmin (0,6-1) derecesinin yoğunluğunun daha düşük olduğunu göstermektedir.

YSA analizinde, kalan değerlerinin mekansal dağılımı (Şekil 5b) incelendiğinde, yöntemin heyelan olan ve



Şekil 5. Yöntemlerin kalanlarının mekansal dağılımları a) lojistik regresyon; b) yapay sinir ağı. (Spatial distribution of the residuals a) logistic regression; b) artificial neural network.)



Şekil 6. Duyarlılık haritaları: a) LR, b) YSA. (Susceptibility maps; a) LR, b) ANN.)

Tablo 7. Yöntemlerin duyarlılık değerlerinin dağılımı. (Distribution of the susceptibility values of the methods.)

Heyelan Duyarlılığı	Çok Düşük		Düşük		Yüksek		Çok Yüksek	
	LR	YSA	LR	YSA	LR	YSA	LR	YSA
Duyarlılık Değerlerinin Dağılımı (Hücre Sayısı-Oran-%)	3545	4346	3051	2507	5428	3531	2247	3887
	%25	%30	%21	%18	%38	%25	%16	%27

olmayan alanları daha başarılı tahmin etmiş olduğu görülmektedir. Ancak çalışma alanının batı kısmındaki alanda (Alan C, Şekil 5b) fazla tahmin değerleri görülmektedir. Diğer yandan, bu bölgedeki hata aralığı ve bunun mekansal dağılımı, bu yöntemde çok daha düşüktür. LR yönteminde açıkça belirgin olan kavis biçimli kümelenme alanı (Alan A, Şekil 5a-5b), YSA yönteminde sadece bir kaç düşük tahmin dışında neredeyse mevcut değildir. Ayrıca LR yönteminde mevcut olan B alanı (Şekil 5b) civarındaki kümelenme YSA yönteminde de mevcuttur ancak mekansal dağılımı daha düşüktür. YSA yönteminin sonuçlarının yorumlanmasında en önemli etken, kalan değerlerinin histogramıdır. Histogramda, LR yöntemine nazaran çok daha az artı ve eksi değer olması YSA yönteminin açık üstünlüğünü göstermektedir. Bu yöntemin başarısı düşük hataya (0) yakın değerlerin pik yapmasıyla çok belirgindir.

Her iki yöntemden de elde edilen duyarlılık haritaları çok düşük (0-0,25), düşük (0,25-0,5), yüksek (0,5-0,75) ve çok yüksek (0,75-1) olarak dört adet duyarlılık bölgesine ayrılmıştır. Her iki yöntem için duyarlılık haritaları ve histogramları Şekil 6'da verilmiştir. Yöntem tahminlerinin bu 4 duyarlılık

bölgesine göre olan dağılımı Tablo 7'de gösterilmiştir.

LR yönteminin elde edilen heyelan duyarlılık haritasındaki sınıflandırılan bölgelerin dağılımı (Şekil 6a), çalışma alanında heyelan konumlarını en etkin biçimde kontrol ettiği düşünülen jeolojik formasyonların güney ve kuzey-kuzeybatı sınırlarındaki gerçekteki heyelan dağılımıyla kolaylıkla takip edilebilir. Şekil 6a, yüksek duyarlılık alanlarının egemen olduğunu ve çok yüksek duyarlılık alanlarının en düşük alan kapsamına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca duyarlılık haritasındaki heyelan çok düşük ve çok yüksek duyarlılık alanları arasında görülen düşük ve özellikle yüksek duyarlılık bölgeleri, yöntemin gerçekte jeolojiden kaynaklı keskin heyelan var veya yok alanlarını tam manasıyla tahmin edememesinden dolayı nispeten geniş bir alan kaplayarak bir geçiş tampon bölgesi oluşturmuştur. Bu durum gerçekte jeolojik birimlerin değişiminden ve bunların sınırlarından kaynaklı heyelan yoğunluğu değişiminin olduğu güney kısımda (Alan D, Şekil 6B), kuzey-kuzeybatı kısımda (Alan F, Şekil 6B) ve özellikle orta doğu kısımda (Alan E, Şekil 6B) net olarak görülmektedir.

YSA yöntemi ile oluşturulan duyarlılık haritası LR yönteminde bahsedilmiş olan geçiş bölgesini çok ince tanımlayarak çok yüksek ve çok düşük duyarlılık alanları arasında gerçek durumu çok iyi yansıtan keskin bir geçiş ile bu alanların sınırlarını net bir biçimde belirlemektedir. Bu geçişteki davranış YSA yönteminin LR yönteminden daha üstün olduğunun gösteren kanıtlardan biridir.

9. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında heyelan duyarlılığı yönünden incelenen Bartın ilinin Ulus ilçesinde dolaylı ve nicel bir yöntem olan istatistiki model yaklaşımı uygulanmıştır. Coğrafi Bilgi Sistemlerine dayalı olarak ileri aşamalı lojistik regresyon ve çok-katmanlı ileri-beslemeli yapay sinir ağı analizleri kullanılarak bölge için bir heyelan duyarlılık haritası hazırlanmıştır.

Bu araştırma kapsamında, Maden Tetkik ve Araştırma Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan heyelan envanter haritası, kullanılan bağımlı değişkene temel teşkil etmiştir. Çalışma alanındaki analizlerin tamamı aktif heyelanlara istinaden gerçekleştirilmiştir. Çalışma çözünürlüğü 250 m x 250 m olarak seçilmiş ve heyelan envanter bilgisinin, alan üzerindeki yayılımının daha anlamlı bir popülasyon dağılımı göstermesini sağlamak için çekirdek (Kernel) yoğunluğu yöntemi uygulanmıştır.

Heyelana eğilimli alanların belirlenmesinde kullanılmak üzere 14 açıklayıcı değişken (başka bir deyişle: yükseklik, eğim, baki, eğrilik, plan eğrilik, profil eğrilik, normalize edilmiş vejetasyon farklılık endeksi (NDVI), topografik nemlilik endeksi (TNE), Ulus, İnalı ve Çakraz formasyonları, Sunduk ve Ahmetusta üyeleri ve alüvyon çökelleri) seçilmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin aralarında eş-doğrusallık (multi-collinearity) olup olmadığını belirlemek için çoklu-eş-doğrusallık analizi yapılmış ve bu analiz sonucunda 3 değişken (Ahmetusta üyesi, eğrilik ve profil eğrilik) ileriki analizlerden çıkarılmıştır.

Bağımlı değişken olan heyelan verisi, kullanılan on dört açıklayıcı değişken ile birlikte tabakalı örnekleme yöntemiyle kalibrasyon ve doğrulama olarak iki veri setine ayrılmıştır.

Uygulanan yapay sinir ağı analizi ve lojistik regresyon yöntemlerinin performansları istatistiksel ve mekansal olarak ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Yapay sinir ağı analizinin lojistik regresyona yöntemine göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak, YSA yöntemi kara kutu bir model olduğundan açıklayıcı değişkenlerin heyelan oluşumuna ne yönde (pozitif ya da negatif) etki ettiğini belirleyecek bir sonuç vermemektedir. Öte yandan, LR yöntemiyle, Çakraz, İnatlı ve Ulus formasyonlarının heyelan oluşumlarını pozitif yönde,

NDVI ve Sunduk üyesi değişkenlerinin ise negatif yönde etkiledikleri ortaya konmuştur.

Bu çalışma sonucunda daha iyi yöntem olarak belirlenen yapay sinir ağı yöntemine göre çalışma alanının heyelanlara duyarlılığı %27 çok yüksek, %25 yüksek, %30 düşük ve %18 çok düşük olarak bulunmuş ve haritalanmıştır. Yapay sinir ağı analizinden elde edilen duyarlılık haritası bu alanda daha sonra yapılabilecek olan heyelan tehlike çalışmalarına temel teşkil edecek ve mühendisler, şehir plancıları ve arazi sahipleri gibi kullanıcılara uygun eylemleri gerçekleştirmek üzere heyelan tehlike seviyelerini değerlendirme imkanı tanıyacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Gökçe, O., Özden, Ş. ve Demir, A., **Türkiye’de Afetlerin Mekansal ve İstatistiksel Dağılımı Afet Bilgi Envanteri**, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Afet Etüt ve Hasar Tespit Daire Başkanlığı. Ankara, s 117, 2008.
2. Akgün, A. ve Bulut, F., “GIS-based Landslide Susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) Region”, **Environmental Geology**, Cilt 51, 1377-1387, 2007.
3. Terlien, M.T.J., Van Westen, C.J. ve Van Asch, T.W.J., “Deterministic Modelling in GIS-based Landslide Hazard Assessment”, **Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards**, Editorler: Carrara, A., Guzzetti, F., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 57– 77, 1995.
4. Kanevski, M., “Advanced Mapping of Environmental Data: Introduction”, Editör: Kanevski, M., **Advanced Mapping of Environmental Data**, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 1-17, 2008.
5. Ohlmacher, G.C. ve Davis, J.C., “Using Multiple Logistic Regression and GIS Technology to Predict Landslide Hazard in Northeast Kansas, USA”, **Engineering Geology** Cilt 69, 331-343, 2003.
6. Brabb, E.E., “Innovative Approaches to Landslide Hazard Mapping”, **Proceedings 4th International Symposium on Landslides**, Toronto, Cilt 1, 307–324, 1984.
7. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. ve Reichenbach, P., “Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy”, **Geomorphology**, Cilt 31, 181-216, 1999.
8. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M. ve Ardizzone, F., “Probabilistic Landslide Hazard Assessment at The Basin Scale”, **Geomorphology**, Cilt 72, 272–299, 2005.

9. Erener, A. ve Düzgün, H.S.B., "Improvement of Statistical Landslide Susceptibility Mapping by Using Spatial and Global Regression Methods in The Case of More and Romsdal (Norway)", **Landslides**, Cilt 7, No 1, 55-68, 2010.
10. Lee, S., Chwae, U. ve Min, K., "Landslide Susceptibility Mapping by Correlation Between Topography and Geological Structure: The Janghung Area, Korea", **Geomorphology**, Cilt 46, 149-162, 2002.
11. Süzen, M.L., "**Data Driven Landslide Hazard Assessment Using Geographical Information Systems and Remote Sensing**", Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
12. Ercanoğlu, M. ve Gökçeoğlu, C., "Use of Fuzzy Relations to Produce Landslide Susceptibility Map of a Landslide Prone Area (West Black Sea Region, Turkey)", **Engineering Geology**, Cilt 75, No 3/4, 229-250, 2004.
13. Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Nefeslioğlu, H., Duman, T.Y. ve Çan, T., "The 17 March 2005 Kuzulu Landslide (Sivas, Turkey) and Landslide-Susceptibility Map of Its Near Vicinity", **Engineering Geology**, Cilt 81, No 1, 65-83, 2005.
14. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. ve Galli, M., "Estimating The Quality of Landslide Susceptibility Models", **Geomorphology**, Cilt 81, 166-184, 2006.
15. Gökçeoğlu C. ve Sezer E., "A Statistical Assessment on International Landslide Literature (1945-2008)", **Landslides**, Cilt 6, 345-351, 2009.
16. Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cesare, M.A. ve Silvia, P., "Optimal Landslide Susceptibility Zonation Based on Multiple Forecasts", **Geomorphology**, Cilt 114, 129-142, 2010.
17. DMİGM, **Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Web Sayfası** (<http://www.meteor.gov.tr>). Erişim tarihi: 21.06.2010.
18. Duman, T.Y., Çan, T., Emre, O., Keçer, M., Doğan, A., Ateş, S. ve Durmaz, S., "Landslide Inventory of Northwestern Anatolia". **Engineering Geology**, Cilt 77, 99-114, 2005.
19. Timur, E. ve Aksay A., **1/100.000 scaled Geological Maps of Turkey, Zonguldak F29 Quadrangle**, MTA Institution Publication, 2002.
20. Gedik, İ. ve Aksay A., **1/100.000 scaled Geological Maps of Turkey, Zonguldak E29 Quadrangle**, MTA Institution Publication, 2002.
21. Sayılı, A., Derman, A.S. ve Kırıcı, S., "Sedimentology and Diagenesis of the İnaltı Formation of Age Upper Jurassic in Western Black Sea Region", **9th Petroleum Congress and Exhibition of Turkey**, 151-160, Ankara, 1992.
22. Kuşçu, İ., Parke, J.R., White, R.S., McKenzie, D., Anderson, G.A., Minshull, T.A., Görür, N. ve Şengör, A.M.C., "Amasra Açıklarında Aktif Kutle Kayması ve Bunun Bolgesel Tektonik Hareketlerle İlişkisi", **MTA Dergisi**, Cilt 128, 27-47, 2004.
23. Yiğitbaş, E., Elmas A, Sefunç. A ve Özer, N., "Major Neotectonic Features of Eastern Marmara Region, Turkey: Development of the Adapazarı-Karasu Corridor and Its Tectonic Significance", **Geological Journal**, Cilt 39, 179-198, 2004.
24. Şengör, A.M.C, Görür, N. ve Şaroğlu, F., "Strike-Slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study", **Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation da. Economical Paleontology and Mineralogy Special Publication**, Editörler: Biddle, K.T., Blick, N.C., Cilt 37, 227-264, 1985.
25. Varnes, D.J., "Slope Movements, Type and Processes", **Landslide Analysis and Control**, Transportation Research Board, National Academy Sciences Special report 176, Editörler: Schuster, R.L., Krizek, R.J., Washington, DC, 11-33, 1978.
26. WP/WLI, International Geotechnical societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory: "A Suggested Method for Describing the Activity of a Landslide", **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, Cilt 47, 53-57, 1993.
27. Moore, I.D., Grayson, R.B. ve Ladson, A.R., "Digital Terrain Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications", **Hydrological Processes**, Cilt 13, No 4, 305- 320, 1991.
28. Lee, S. ve Min, K., "Statistical Analysis of Landslide Susceptibility at Yongin, Korea", **Environmental Geology**, Cilt 40, 1095-1113, 2001.

