

Kayseri ilinde deprem tehlikesinin, sezgisel ve istatistiksel modellerle karşılaştırmalı analizi

Comparative analysis of earthquake hazard in Kayseri province using intuitive and statistical models

Fethi Ahmet Canpolat^{a*}  Yusuf Bulucu^b 

^a Fırat Üniversitesi, İnsani ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya, Elazığ, Türkiye.

^b Fırat Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya, Elazığ, Türkiye.

ORCID: F.A.C. 0000-0002-6084-7735; Y.B. 0009-0008-0466-9787

BİLGİ/INFO

Geliş/Received: 30.09.2024

Kabul/Accepted: 13.11.2024

Anahtar Kelimeler:

Deprem

Tehlike

Kayseri

AHP

Fuzzy AHP

Rastgele Orman

Keywords:

Earthquake

Hazard

Kayseri

AHP

Fuzzy AHP

Random Forest

*Sorumlu yazar/Corresponding author:

(F. A. Canpolat) facanpolat@firat.edu.tr.

DOI: 10.17211/tcd.1556195



Atf/Citation:

Canpolat, F. A., & Bulucu, F. (2024). Kayseri ilinde deprem tehlikesinin, sezgisel ve istatistiksel modellerle karşılaştırmalı analizi *Türk Coğrafya Dergisi* (86), 143-159.

<https://doi.org/10.17211/tcd.1556195>

ÖZ/ABSTRACT

Türkiye genelinde, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri ile birlikte, depremin yıkıcılığı karşısında hem toplumsal hem de idari anlamda hassasiyet önemli ölçüde artmıştır. Olası afet tehlikeleri ve bunlara karşı kırılabilirlik-esneklik, zarar görme potansiyeli-dayanıklılık, yıkıcı etki-iyileşme, dönüşüm ve dirençlilik gibi kavramlar artık daha sık gündeme gelmektedir. Ancak bu konularda esas olarak dikkat edilmesi gereken, inşaa, imar, kontrol ve değişim süreçlerinde söz sahibi olan kişi ve kuruluşlardır. Sağlıklı ve sürdürülebilir bir yapılaşma süreci için farkındalığın artırılması gerekmektedir. Bu çalışma, Kayseri ilindeki depremselliği ve olası etkilerini mekânsal boyutuyla ortaya koymakta ve analiz etmektedir. İldeki deprem tehlikesini belirlemek için bağımlı değişken olmaması nedeniyle, 10 bağımsız değişken kullanılarak sezgisel modellerden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Fuzzy AHP (Bulanık AHP) uygulanmıştır. Bu iki modelden elde edilen sonuç haritalarında, %90 ve üzeri tehlikeye sahip alanlar bağımlı değişken olarak kullanılarak aynı bağımsız değişkenlerle (Episantr Yoğunluk, Fay Uzaklık, VS30, Litoloji, Yerleşme Gelişim, Bina Kat Sayısı, Zemin Sıvılaşma Duyarlılığı, Episantr Uzaklık, Eğim ve Yükselti) Rastgele Orman algoritması ile alternatif bir tehlike haritası üretilmiştir. Üç harita da birbirine yakın sonuçlar vermiş olmasına rağmen, Rastgele Orman modelinin mekânsal dağılım ve uyum açısından daha ayırt edici bir harita ürettiği tespit edilmiştir. İl genelinde Sarioğlan-Incesu hattı boyunca uzanan depresyonlar en tehlikeli alanları oluşturmaktadır. Bu saha, aynı zamanda il genelindeki en yoğun nüfuslu kuşağa denk gelmektedir. Türkiye'de ortalama kat sayısının en fazla olduğu il olan Kayseri'de, özellikle il merkezindeki yüksek katlı binalar deprem tehlikesinin olası etkilerini artırma potansiyeline sahiptir.

Following the Kahramanmaraş earthquakes of 6 February 2023, sensitivity to the destructive effects of earthquakes has increased significantly throughout Turkey, both socially and administratively. Concepts such as potential disaster risk, vulnerability - resilience, damage potential - durability, destructive impact - recovery, transformation and sustainability are now being discussed more frequently. However, the primary focus should be on the individuals and organisations responsible for construction, planning, control and change processes. Raising awareness is essential for a healthy and sustainable building process. This study identifies and analyses the seismic activity and its potential impacts in Kayseri province from a spatial perspective. Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy AHP were applied to determine the seismic hazard of the province using 10 independent variables, as no dependent variable was available. In the hazard maps derived from these two models, areas with a risk of 90% or more were used as the dependent variable, and an alternative hazard map was generated using the same independent variables with the Random Forest algorithm. Although all three maps produced similar results, the Random Forest model was found to produce a more distinctive map in terms of spatial distribution and orientation. The depressions along the Sarioğlan-Incesu fault line were identified as the most vulnerable areas in the province. This area is also the most densely populated belt in the province. In Kayseri, which has the highest average number of storeys in buildings in Turkey, the high-rise buildings in the city centre are considered to have the potential to amplify the effects of earthquake hazards.

Extended Abstract

Introduction

Earthquake hazard analysis is a critical research area aimed at reducing the adverse effects of earthquakes on human life, infrastructure, and settlements (Morell et al., 2020; Sianko et al., 2020). In Turkey, earthquakes are the most devastating type of disaster, accounting for approximately 60% of disaster-related fatalities (AFAD, 2018). Türkiye is under significant earthquake risk (1939 Erzincan, 1942 Tokat-Erbaa, 1943 Tosya-Ladik, 1944 Bolu-Gerede, 1999 Gölcük, 2023 Kahramanmaraş earthquakes) and historical earthquakes have exposed the inadequacies of building structures and infrastructure. Factors such as rapid urbanization, weak infrastructure, and a lack of earthquake awareness amplify post-earthquake losses (Taş, 2003). Given that a significant portion of built-up areas in Turkey is located within earthquake zones, conducting studies on hazard, risk, and vulnerability has become imperative, especially with the increasing urban population.

Kayseri province, located in central Turkey, is particularly susceptible to earthquake risk due to its proximity to surrounding fault lines. Although Kayseri is classified as a region with moderate earthquake hazard according to Turkey's earthquake hazard map, the geological structure, ground conditions, and characteristics of the building stock indicate that the potential impacts of an earthquake could be severe (AFAD, 2021). Unlike other disasters such as drought and air pollution, which lack dependent variable structures, direct regression or classification algorithms are not suitable for earthquake hazard analyses. Consequently, multi-criteria decision-making (MCDM) models are preferred (Kant et al., 2012; Nyimbili et al., 2018).

The Analytic Hierarchy Process (AHP), developed by Saaty (1980), is a technique that allows systematic evaluation of various criteria in complex decision-making problems. Fuzzy AHP, which incorporates fuzzy logic as defined by Zadeh (1965), extends beyond classical binary logic by considering intermediate values and uncertain situations, making it useful for managing uncertainty and complexity. The integration of AHP and fuzzy logic methods has been explored for environmental risk assessments, demonstrating the reliability of the results (Hu et al., 2018; Mokarram et al., 2021; Yariyan et al., 2020). Additionally, the Random Forest algorithm, proposed by Breiman (2001), has proven highly effective as a general-purpose classification and regression method, especially in environments where the number of variables exceeds the number of observations.

Data and Method

Kayseri province is located in the Central Anatolia Region of Turkey. Although Kayseri is relatively distant from the North Anatolian Fault Line, it is closer to the East Anatolian Fault Line and is situated in an area where active fault lines pass through (Figure 1).

The study has two main objectives. The first is to determine the spatial distribution of earthquake hazards in Kayseri, a city with a population of 1.5 million, and to assess the extent of risk in terms of population and building stock. The second objective is to understand which methods produce more qualified

results in identifying earthquake hazards in a region.

For this purpose, a Random Forest model was created using the dependent variable obtained from the result maps of multi-criteria decision-making methods produced with 10 independent variables (Figure 2). These variables include epicenter density, distance to fault lines, VS30 (average shear wave velocity of the top 30 meters of soil), lithology, settlement development, number of building floors, ground liquefaction susceptibility, distance to epicenter, slope, and elevation. Spatial datasets were used to determine the distribution of the total and vulnerable populations according to hazard areas (WorldPop, 2020a; WorldPop, 2020b). Since these datasets are from 2020, they were recalculated according to population growth rates. Global building footprint data were used to determine the number of buildings according to hazard classes (Microsoft, 2023).

The Analytic Hierarchy Process (AHP) was first used to evaluate earthquake susceptibility by determining ten parameters based on literature, expert opinions, field observations, and local government databases. Spatial distributions of the parameters were analyzed using Geographic Information Systems (GIS). Pairwise comparison matrices were created with weights determined from expert opinions and literature, and a sensitivity analysis was conducted. Then, Fuzzy AHP was applied to address uncertainties and provide a more flexible and realistic version of AHP by using fuzzy numbers to reduce subjectivity in comparisons.

Finally, the Random Forest algorithm, an ensemble learning method effective in handling nonlinear patterns and working with numerical and categorical data without additional processing, was employed. Parameters with high and positive correlations with the dependent variable (grid_code) included lithology, settlement development, number of building floors, and ground liquefaction susceptibility. Negative correlations were found with VS30, slope, and elevation. The model's performance was evaluated using training and test datasets.

Conclusion

The AHP hazard map indicated that "very high" hazard areas cover 366 km², accounting for 2% of the province's area, with a significant portion being built-up, increasing disaster risk. The urban areas of Kocasinan and Melikgazi districts fall into this category, where urban density is highest. Agricultural lands surrounding these settlements are also within "very high" or "high" hazard classes, emphasizing the need for careful and controlled development if these areas are to be urbanized (Figure 4).

The Fuzzy AHP hazard map showed notable differences compared to the AHP map, particularly in hazard classifications and risk analysis. While areas like the Yeşilhisar and Develi plains were considered "very high" hazard in AHP, they were not in the Fuzzy AHP model, highlighting the latter's capacity to manage uncertainty and provide more specific analysis. The Random Forest model, built using randomly sampled points from areas classified as "very high" hazard in previous models, lar-

gely overlapped with the Fuzzy AHP map but classified a larger area (13% of the province) as "very high" and "high" hazard, indicating a more aggressive classification.

When comparing all three methods, it was observed that as the hazard level increases, the total and vulnerable populations also significantly increase. Specifically, "high" and "very high" hazard areas, although constituting a small portion of the land, encompass a large percentage of the population and built environment, intensifying the earthquake risk in these zones. The study underscores the critical importance of prioritizing infrastructure improvements and building quality enhancements, particularly in high-risk areas with dense populations and high construction pressures.

The analyses for Kayseri province revealed its vulnerability to earthquake risks and demonstrated the crucial role of integrating different methods for developing effective risk management strategies. The findings provide valuable information for decision-makers in earthquake risk management and disaster preparedness planning in Kayseri. Future studies may include more parameters, conduct different scenario analyses, and utilize new technologies to further enhance earthquake hazard and risk assessments, thereby contributing to reducing earthquake risk and increasing societal resilience.

1. Giriş

Deprem tehlike analizi, depremlerin insan hayatı, altyapı ve yerleşim alanları üzerindeki olumsuz etkilerini azaltma amacıyla kritik bir araştırma konusudur (Morell vd. 2020; Sianko vd. 2020). Can ve mal açısından Türkiye'de en fazla kayba yol açan afet türü olan depremler, afet kaynaklı toplam can kayıplarının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır (AFAD, 2018). Türkiye, ciddi deprem riski altında olan bir ülkedir ve tarihsel süreçte yaşanan büyük depremler (1939 Erzincan, 1942 Tokat-Erbaa, 1943 Tosya-Ladik, 1944 Bolu-Gerede, 1999 Gölcük, 2023 Kahramanmaraş depremleri) yapıların ve altyapının yetersizliğini göstermiştir. Özellikle hızlı kentleşme, zayıf altyapı ve deprem bilincinin eksikliği gibi faktörler, deprem sonrası kayıpların boyutunu arttırmaktadır (Taş, 2003). Türkiye'de yapılaşmış alanların önemli bir bölümü deprem kuşağında bulunduğundan, artan kentsel nüfusla birlikte tehlike, risk ve kırılganlık çalışmalarının yapılması zorunlu hale gelmektedir.

Risk, doğal veya insan kaynaklı tehlikeler ile kırılganlık koşulları arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan zararlı sonuçların olasılığı veya beklenen can kaybı, yaralı insan, mal, geçim kaynakları, ekonomik faaliyetin bozulması anlamına gelir (Lee ve Schaaf, 2006). Risk değerlendirmesinin temel amacı, 'tehlikeli olay' olarak tanımlanan bir olayın meydana gelmesi nedeniyle ortaya çıkabilecek insani ve ekonomik kayıpların olasılığını ölçmektir (UNISDR, 2009). Bu kapsamda karar alma sürecinde değerli bilgiler sağlayan tutarlı sonuçlar elde edebilmek için tehlikelerin ve kırılganlığın ortak analizine ihtiyaç duyulmaktadır (Koks vd., 2015).

Kayseri ili, Türkiye'nin iç kesimlerinde yer almakla birlikte, deprem riski açısından özellikle çevresindeki fay hatlarının etkisinde kalabilecek bir bölgededir. Türkiye deprem tehlike haritasına göre, Kayseri, orta dereceli deprem tehlikesi olan bir

bölgede bulunmasına rağmen, il genelindeki jeolojik yapı, zemin koşulları ve yapı stokunun özellikleri, olası bir depremin etkilerinin ciddi boyutlara ulaşabileceğini göstermektedir (AFAD, 2021). Kayseri'nin bu risklerle karşı karşıya olması, deprem tehlikesinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve etkili afet risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Deprem, kuraklık ve hava kirliliğine yönelik tehlike analizleri diğer afetlerden farklı olarak bağımlı değişken yapısına sahip olmadığından, doğrudan regresyon veya sınıflandırma algoritmaları kullanılamamaktadır. Bu nedenle çok kriterli karar verme modelleri öncelikli olarak tercih edilmektedir (Kant vd., 2012; Nyimbili vd. 2018).

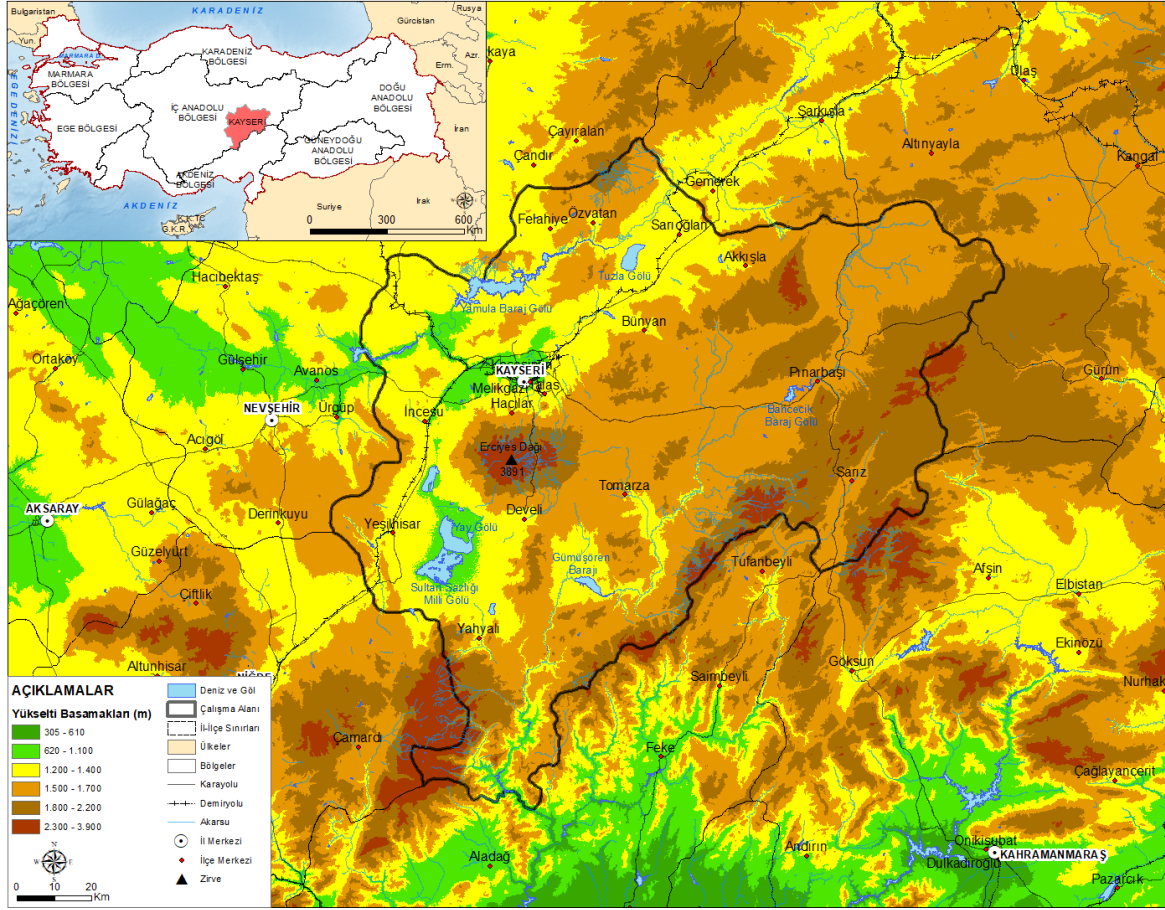
Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), karmaşık karar verme problemlerinde çeşitli kriterlerin sistematik bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan bir tekniktir. Saaty'nin (1980) geliştirdiği bu yöntem, karar verme sürecinde karşılaşılan çok sayıda kriterin göreceli önem derecelerini belirlemede etkili bir araç olarak kabul edilmektedir (Saaty, 1980). Bulanık mantıkla çalışan Fuzzy AHP ise belirsizlik ve karmaşıklığın yönetilmesinde kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, klasik ikili mantığın ötesine geçerek, ara değerleri ve belirsiz durumları dikkate alır (Zadeh, 1965). AHP ve bulanık mantık yöntemlerinin entegrasyonunun çevresel risk değerlendirmelerinde kullanımı ve elde edilen sonuçların güvenilirliği araştırılmıştır (Hu vd. 2018; Mokarram vd. 2021; Yariyan vd., 2020). Breiman tarafından önerilen Rastgele Orman algoritması ise genel amaçlı bir sınıflandırma ve regresyon yöntemi olarak son derece başarılı olmuştur. Birkaç rastgele karar ağacını birleştiren ve tahminlerini ortalama alarak toplayan bu yaklaşım, değişken sayısının gözlem sayısından çok daha fazla olduğu ortamlarda yüksek performans göstermiştir (Breiman, 2001).

Çalışma, deprem tehlikesi üzerinde etkili olan temel parametreleri kullanarak Kayseri ili için tehlike ve risk analizi yapmayı amaçlamaktadır. Bu analiz AHP, Fuzzy AHP ve Rastgele Orman yöntemlerinin entegre edilmesi ve il genelindeki toplam nüfus, yaş gruplarına göre kırılgan nüfus ve yapı stoğu bilgilerinin kullanılmış olması yönüyle önemlidir.

2. Çalışma Sahası

Kayseri ili, İç Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup, doğusunda Sivas, güneydoğusunda Kahramanmaraş, güneyinde Adana ve Niğde, batısında Nevşehir ve kuzeybatısında Yozgat illeriyle sınırlanmaktadır. İl sınırları dahilinde kuzeyde Kayseri Ovası ve Melikgazi ilçesi; doğuda Sarız ve Pınarbaşı ilçeleri, güneyde ise Yahyalı, Develi ve Tomarza ilçeleri yer almakta ve bu alanlar sırasıyla Sivas, Kahramanmaraş ve Niğde illeri ile sınır oluşturmaktadır. Güneybatısında, 3.891 metre yüksekliğe sahip Erciyes Dağı bulunurken, ilin güney kesiminde Sultansazlığı Milli Parkı ve Yay Gölü; kuzeyinde ise Tuzla Gölü ve Yamula Baraj Gölü yer almaktadır. Kayseri ili, Kuzey Anadolu Fay Hattı'na nispeten uzak olsa da, Doğu Anadolu Fay Hattı'na görece daha yakın ve aktif fay hatlarının geçtiği bir konumdadır (Şekil 1).

İlde kırsal ve kentsel nüfustaki değişimi anlayabilmek için 2 bin nüfus kriteri kullanıldığında 2007 yılında bu kriterin altında olan yerleşmelerin nüfusu 318 bin iken; 2023 yılında %-22'lik azalmayla 248 bin'e gerilemiştir. Nüfusu 2 bin'in üzerinde olan yerleşmelerde ise 2007 yılında toplam nüfus 846 bin iken, 2023



Şekil 1. Kayseri ilinin lokasyon haritası.

Figure 1. Location map of the Kayseri Province.

yılında %41'lik bir artışla 1 milyon 197 bin'e yükselmiştir (TÜİK, 2024). Mevcut veri kaynaklarından yapılan analizle, Kayseri ilinde yerleşme alanları 2000 yılında yaklaşık 236 km² iken, 2024 yılında yaklaşık 3 katlık bir artışla yaklaşık 303 bin yapının yer aldığı 698 km²'ye yükseldiği tespit edilmiştir (MICROSOFT, 2023; ESRI, 2023). Arazi kullanım verilerine göre ise 2023 yılı itibarıyla il arazilerinin yaklaşık 5433 km²'si tarımsal arazilerden, 246 km²'si ormanlık sahalardan 148 km²'si hidrografik yüzeylerden oluşurken geriye kalan alanlar düşük yoğunluklu bitki örtüsü alanlarından oluşmaktadır (ESRI, 2023).

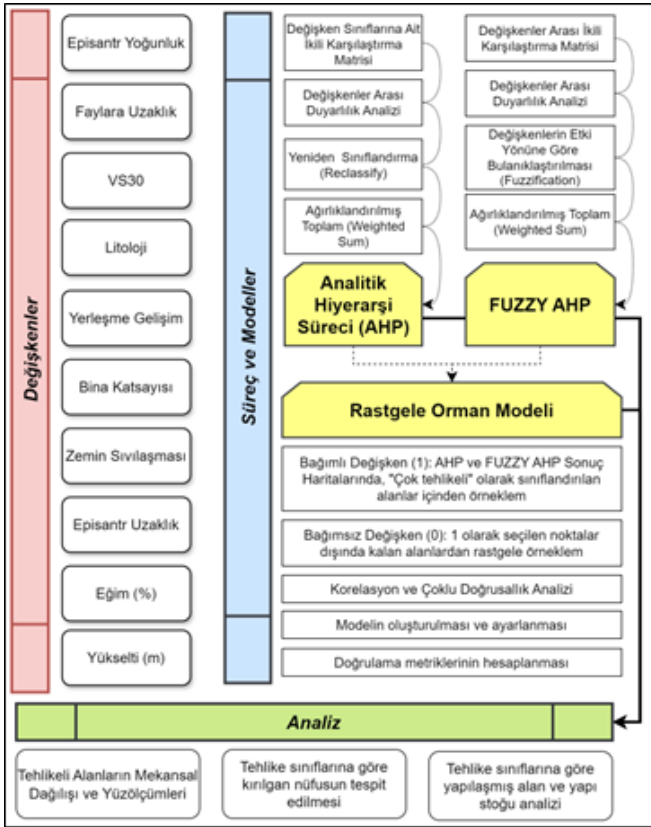
3. Veri ve Metodoloji

Mekânsal planlama ve düzenlemeler açısından en iyi kararlar, afet tehlike haritalarının tehlikeyi ne fazla ne de az tahmin ettiği durumlarda alınabilir. Çünkü bu haritaların doğruluğu, karar verme süreçlerinde kritik öneme sahiptir. Tehlike haritalarında her zaman bir belirsizlik olacaktır, ancak bu belirsizlik dikkatlice analiz edilebilir. Bu nedenle, tehlike haritalarının performansını, belirsizliklerini ve bu haritaların nasıl daha iyi hale getirilebileceğini anlamak çok önemlidir (Stein vd., 2012). Günümüzde, deprem tehlike haritalarının ve bunun bir sonraki aşaması olan deprem risk haritalarının oluşturulmasına yönelik ilgi ve çalışmalar, yeni yöntemler veya hibrit modellerin uygulanmasıyla devam etmektedir.

Çalışmanın iki ana hedefi bulunmaktadır. Bunlardan ilki, 1.5 milyon nüfusa sahip Kayseri ilinde deprem tehlikesinin mekânsal dağılımını tespit ederek, nüfus ve yapı stoğu açısından riskin boyutunu belirlemektir. İkinci hedef ise, bir bölgede deprem teh-

likesini tespit edebilmek için farklı metotlardan hangisinin daha nitelikli sonuçlar üretebileceğini anlamaktır. Depremin, diğer afetlere göre çok daha karmaşık bir yapıya sahip olması nedeniyle, tek bir yöntem kullanmak yerine, farklı yöntemlerin güçlü yönlerini birleştiren entegre bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu amaçla, 10 bağımsız değişken kullanılarak üretilen çok kriterli karar verme yöntemlerine ait sonuç haritalarından elde edilen bağımlı değişkenle, makine öğrenmesi algoritmalarından rastgele orman modeli oluşturulmuştur. Sonuç haritalarından elde edilen verilerle, tehlike altındaki toplam nüfus, kırılğan nüfus ve yapı stoğu bilgileri çapraz sorgulama ile üretilmiş ve dağılımları analiz edilerek risk değerlendirmesi yapılmıştır (Şekil 2).

Toplam nüfus ve kırılğan nüfusun tehlike alanlarına göre dağılımının tespiti için mekânsal veri setleri kullanılmıştır (WorldPop, 2020 a; WorldPop, 2020 b). Ancak bu veri setleri 2020 yılına ait olduğu için nüfus artış oranlarına göre yeniden hesaplanarak analizlere dahil edilmiştir. Türkiye İstatistik Kurumunun (TÜİK) her yıl açıkladığı güncel nüfus verileri bulunmasına rağmen, farklı bir veri setinin kullanılması, nüfusun yaş gruplarına dağılımının ilçe düzeyinden daha küçük yerleşim birimleri için doğrudan paylaşılmamasından kaynaklanmaktadır. Toplam nüfus ile kırılğan nüfus verilerinin entegre olması için aynı veri setleri kullanılmıştır. Binaların/yapıların tehlike sınıflarına göre sayılarının tespiti için ise öncelikli veri kaynaklarındaki (hali hazır plan) eksik veriler nedeniyle, il genelini kapsayan ve derin öğrenme algoritmaları ile üretilen %90 ve üzeri doğruluğa sahip bir veri seti olan küresel bina ayak izi verileri kullanılmıştır (MICROSOFT, 2023).



Şekil 2. İş akış şeması.

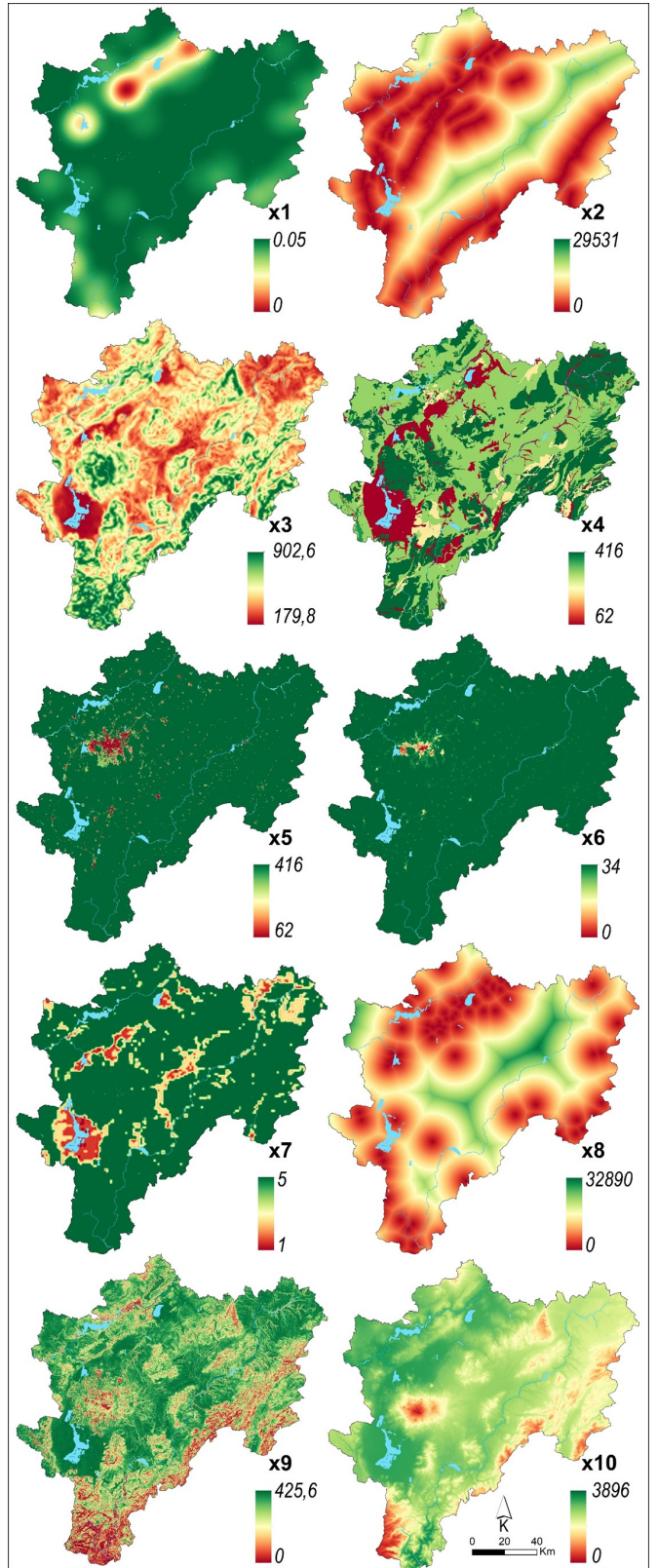
Figure 2. Workflow diagram.

3.1. Kullanılan Değişkenler

x1. Episantr yoğunluk: Depremlerin yoğunlaştığı bölgeleri gösterir. Depremlerin sıklığı ve büyüklüğü, bir bölgedeki deprem tehlikesini anlamak için kritik öneme sahiptir. Episantr, faylar boyunca depolanan enerjinin ilk serbest bırakıldığı yeryüzündeki konumdur (Harff vd., 2016). Deprem merkez üsleri ve büyüklükleri Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve Kandilli Rasathanesi çevrimiçi deprem kataloglarından elde edilmiştir (AFAD, 2024; Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2024). Deprem tehlikesi değerlendirmesinde 1900'den günümüze 4 Mw veya daha büyük depremlere ait merkez üslerinin yoğunluğu ve il genelinde bu merkez üslerine olan mesafe kullanılmıştır (Şekil 3).

x2. Fay hatlarına olan uzaklık: Fay hatlarına olan mesafe, bir bölgenin depremlerden ne kadar etkileneceğini belirleyen önemli bir faktördür. Fay hatlarına yakın bölgeler, deprem sırasında daha yüksek sarsıntı seviyelerine maruz kalırlar (Field, 2000). Kayseri ilinde etkili olabilecek 24 adet fay ve 16 adet fay segmenti olmak üzere toplam 40 adet tekil aktif yapı yer almaktadır (AFAD, 2021). Bu veri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA)'nın güncelleştirilmiş fay haritalarından il geneli ve yakın çevresindeki fayların sayısallaştırılması ile elde edilmiştir (Emre vd., 2011).

x3. VS30: Yüzeyden 30 metre derinliğe kadar olan zemin tabakalarının ortalama makaslama sismik dalga hızını ifade eder (Borcherdt, 2012). VS30 değeri yerel zemin koşullarının sarsıntı üzerindeki etkisini ölçer ve yüksek VS30 değeri sert zeminleri ifade eder ve kayma dalgası hızının yüksek olduğunu gösterir (Heath vd., 2020). Sert zeminler, sismik dalgaların daha hızlı ya-



Şekil 3. Deprem tehlike haritalarının üretiminde kullanılan bağımsız değişkenler (x1. Episantr yoğunluk, x2. Fay uzaklığı, x3. VS30, x4. Litoloji, x5. Yerleşme gelişim, x6. Bina kat sayısı, x7. Zemin sıvılaşma duyarlılığı, x8. Episantr uzaklık, x9. Eğim, x10. Yükselti)

Figure 3. Independent variables used in the production of earthquake hazard maps (x1. Epicenter density, x2. Fault distance, x3. VS30, x4. Lithology, x5. Settlement development, x6. Number of building floors, x7. Ground liquefaction susceptibility, x8. Epicenter distance, x9. Slope, x10. Elevation)

yılmasına ve genellikle daha az hasara neden olurken, yumuşak zeminler ikincil sismik dalgaların hızını azaltır ve genellikle daha fazla hasara neden olur (Rusydi, Effendi ve Rahmawati, 2017). VS30 değeri üzerinde faylara olan uzaklık, rölyef ve litoloji belirleyici faktörlerdir. Bu veriler USGS tarafından yayınlanan ve 827,5 metre çözünürlükte küresel ölçekte üretilen Vs30 haritasından elde edilmiştir. Enterpolasyon aracıyla 28 metre çözünürlüğe yükseltilmiştir.

x4. Litoloji: Kaya ve zemin türlerini ifade eder. Sismik dalgaların yayılmasını, litoloji ve ortam kontrol ettiğinden deprem tehlikesini belirlemede önemli bir parametredir (Yanis ve Furumoto, 2019). Farklı litolojik birimler, sismik dalgaların yayılma hızını ve amplifikasyonunu etkileyebilir. Örneğin, gevşek sedimanter kayalar, sismik dalgaları daha fazla yükseltebilir (Kramer, 1996). MTA'nın 1/500.000 ölçekli sayısal jeoloji haritasına göre, il genelinde 37 farklı jeoloji ve litoloji kombinasyonu bulunmaktadır ve bunlar literatüre dayalı olarak 5 hiyerarşik sınıfta değerlendirilmiştir (MTA, 2024).

x5. Yerleşim alanlarının gelişimi: Bir hadisenin afet olarak değerlendirilmesi can veya mal kaybı ile belirlendiğinden deprem olayının afet olarak kabul edileceği yerler öncelikle yerleşim yerleridir. Yerleşim yerleri içinde ise konutların yapım yılı hem yapının zamana bağlı olarak dayanıklılığını yitirmesi hem de yeni yapıların deprem yönetmeliğine bağlı olarak süreç, malzeme ve kontrol açısından daha güçlü olabileceği varsayımına bağlı olarak gelişim süreci açısından 5 kategoride tehlike sınıfına ayrılarak modellere dahil edilmiştir. Mevcut binalar, mevcut tasarım kurallarına uyulmaması nedeniyle daha büyük bir sismik risk altında olabilir ve bina performansını iyileştirmek için yapısal güçlendirme gerektirebilir (Anwar ve Dong, 2020). Bu durum, özellikle eski binaların deprem riskini artırarak güçlendirme ihtiyacını ön plana çıkarmaktadır. Bu değişken 2015 yılına kadar hazırlanan bir veri setinin, Esri 2023 arazi kullanım verileriyle entegre edilip güncellenmesiyle oluşturulmuştur (Marconcini vd. 2020; ESRI, 2023).

x6. Bina kat sayısı: Günümüzde birçok bina hem plan hem yükseklik açısından düzensiz yapılandırmalara sahiptir. Bu durum, gelecekte yıkıcı depremlere maruz kalmalarına yol açabilir. Afetlerin sıklığının ve yoğunluğunun artması hem yeni hem de mevcut yapıların dayanıklılığının değerlendirilmesine odaklanılmasını gerektirmektedir (Gilbert, 2016) Bina kat sayısı, yapıların deprem karşısındaki dayanıklılık ve esneklik performansını belirleyen önemli bir faktördür. Düşük katlı binalar genellikle depreme neden olan fayın yakınında yüksek frekanslı uyarımlara duyarlıyken, yüksek katlı binalar geniş alanlarda var olabilen uzun periyotlu hareketlere duyarlıdır (Jennings, 2003). İl genelinde başta merkez ilçeler olmak üzere, taşra ilçe merkezlerinde de kısmen yer alan yüksek katlı yapılar depreme karşı duyarlılığı arttırması bakımından önem taşımaktadır. Küresel ölçekte bina yüksekliklerinin hazırlandığı veri tabanından, 2018 yılına ait raster veri, düzenlenerek modellere dahil edilmiştir (Pesaresi ve Politis, 2023).

x7. Zemin sıvılaşma duyarlılığı: Depremlerin güçlü etkisine bağlı olarak topraktaki gözenek suyu basıncı artarak topraktaki granüler malzemelerin katıdan sıvıya dönüşmesine ve yapıların dengesini önemli ölçüde bozarak depremin şiddetinin artmasına neden olmaktadır (Zhou vd. 2022). Yani sıvılaşma, deprem sırasında su doygun toprakların katlaşılarak sıvı gibi davranma-

sıdır. Deprem tehlikesini arttıran bu faktörün etkisini tehlike analizine dahil etmek için Koks ve arkadaşları (2019) tarafından hazırlanan 250 metre çözünürlüklü küresel zemin sıvılaşma risk haritası noktasal veriye dönüştürülmüş daha sonra enterpolasyonla modele uygun 28 metre çözünürlüğe yükseltilmiştir.

x8. Deprem merkezine (episantr) olan uzaklık: Deprem merkez üssü ile sismoloji istasyonu arasındaki mesafeyi temsil eder. Merkez üssü, depremin odak noktasının dikey olarak üzerinde bulunan yüzey alanıdır (Ochoa, Niño ve Vargas, 2017). Episantr'a yakın bölgeler, daha yüksek şiddette sarsıntılara maruz kalır. Deprem merkezlerine olan uzaklık, episantr yoğunluk ile birlikte üretilen noktasal veriler kullanılarak öklid mesafe aracıyla türetilmiştir.

x9. Eğim: Arazinin eğimi, deprem tehlikesi üzerinde dolaylı olarak etkili olan bir parametredir. Bu durum eğimin arttığı dağlık arazilerde kayma dalgası hızında değişime neden olmasıyla ortaya çıkan ve depremin etkisini azaltan yapı ile ilgilidir. Diğer taraftan "aktif sismik bölgelerdeki yüksek eğimli yamaçların aşınmaya uğraması nedeniyle daha yüksek Vs30 değerlerine sahip olma eğiliminde" olduğu tespit edilmiştir (Allen ve Wald, 2007).

x10. Yükselti: Rakım bir bölgedeki zemin özelliklerini ve yapıların deprem direncini etkileyebilir. Yüksek yerler, arazi stabilitesine bağlı olarak genellikle daha az etkilenir. Yani litolojik olarak daha emniyetli alanlar aynı zamanda depremlerin büyüklüğüne rağmen şiddetlerinin yani etkilerinin azaldığı yerlerdir. Dolayısıyla yükselti ile deprem tehlikesi arasında negatif yönde bir korelasyon söz konusudur. Veri SRTM DEM görüntülerinden elde edilmiştir (SRTM, 2014).

3.2. Modeller

3.2.1. Analitik hiyerarşi prosesi (AHP)

AHP, karmaşık dünyamızda karar vermemize yardımcı olan bir karar verme modelidir. Bu model, karar hedeflerine ulaşmak için kriterleri, kısıtlamaları ve alternatifleri bir hiyerarşi içinde tanımlamayı ve düzenlemeyi içeren üç aşamalı bir süreç sunar. Süreç, unsurlar arasındaki ikili karşılaştırmaların değerlendirilmesini ve tüm düzeylerde ikili karşılaştırmaların sonuçlarının çözüm algoritması kullanılarak sentezlenmesini içerir (Saaty, 1980:110).

Deprem duyarlılığını değerlendirmek için literatüre, uzman görüşlerine, saha gözlemlerine ve yerel yönetim veri tabanlarına dayanarak on parametre belirlenmiştir. İlk adım olarak, analizde kullanılacak parametrelerin mekânsal dağılımı incelenmiştir. Bu aşamada, parametrelerin coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak mekânsal analizi yapılmıştır. Daha sonra, uzman görüşleri ve literatüre dayalı olarak belirlenen ağırlıklarla ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. İkili karşılaştırma sürecinde, her bir parametrenin diğerlerine göre ne kadar önemli olduğu değerlendirilmiş ve duyarlılık analizi yapılmıştır.

İkili karşılaştırma matrisi, her bir kriterin göreceli önem düzeyini belirtmektedir. Kriterler arasındaki üstünlük dereceleri, belirli sayısal değerler aracılığıyla ifade edilmiştir; bu bağlamda, "1" değeri eşit önemi simgelerken, "3" bir miktar üstünlüğü, "5"

belirgin bir üstünlüğü, "7" güçlü bir önemi ve "9" ise yüksek derecede üstünlüğü temsil etmektedir. Ayrıca, ara değerler (2, 4, 6, 8) belirgin farkların olmadığı durumlarda kullanılmak üzere tanımlanmıştır. Tablonun son sütununda verilen ağırlık katsayıları, kriterlerin karar verme sürecindeki genel ağırlıklarını yansıtarak, hangi kriterin daha öncelikli olduğunu belirlemede rehberlik etmektedir. Örneğin, episantr yoğunluğuna ait 0.241'lik ağırlık katsayısı, yükselti'nin 0.020'lik katsayısına göre daha yüksek bir öneme sahip olduğunu ve bu nedenle karar sürecinde daha fazla dikkate alındığını ifade etmektedir. Ağırlık derecelerine göre sınıflandırılmış olan kriterler toplamı 1'i geçmemek üzere 0.416 ile 0.062 arasında değişen beş farklı kategoriye ayrılmıştır. Toplam katsayınının 1 olması %100'lük etkiyi göstermektedir. Dolayısıyla 0.416 katsayısı bu değişkenin modelde yaklaşık olarak %41,6 oranında etkiye sahip olduğunu ifade etmektedir. Bunun yanı sıra, ikili karşılaştırma matrisinin %2'lik bir tutarlılık oranına sahip olması hiyerarşik mantığın yüksek tutarlılıkla sağlandığını göstermektedir. Kriterlerin bu sıralaması, her bir parametrenin hassasiyet açısından önemini ve karar sürecindeki rolünü analitik bir çerçevede sunmaktadır (Tablo 1).

Episantr yoğunluğu, fay hattına yakınlık, VS30 (zemin sismik hızı) ve zemin yapısı (litoloji) gibi değişkenler, en yüksek ağırlık katsayılarıyla en kritik risk faktörleri olarak öne çıkmaktadır. Fay hattına yakın, zayıf zemine sahip ve eski yapıların bulunduğu alanlar en yüksek risk grubuna dahil edilirken, uzak mesafede yer alan, sert zeminli ve yeni yapıların bulunduğu alanlar daha az riskli kabul edilmiştir. Bu değişkenlerin tamamının ağırlıklandırma katsayıları 0.416 ile 0.062 arasında değişen 5 sınıfa ayrılmıştır. İkili karşılaştırma matrislerinin tutarlılık oranı %2 olarak hesaplanmış olup, bu oran yüksek bir tutarlılık seviyesini göstermektedir. Parametrelerin hassasiyet açısından önemi, hazırlanan tabloda gösterildiği sıralamayla aynıdır.

İkili karşılaştırma ve duyarlılık analizi sonrasında, değişkenlere yeniden sınıflandırma yöntemi ile katsayılar atanmıştır. Bu süreçte, her bir değişkenin deprem tehlikesine katkısını yansıtabilecek şekilde yeniden sınıflandırılması yapılmıştır. Son olarak, nihai haritayı elde etmek için, değişkenlere ait ağırlıklandırma katsayıları kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 1. Analitik hiyerarşi süreci ikili karşılaştırma matrisi.

Table 1. Analytic hierarchy process pairwise comparison matrix

İkili Karşılaştırma	Episantr Yoğunluk	Fay Uzaklık	VS30	Litoloji	Yerleşme Gelişim	Bina Kat Sayısı	Zemin Sıvılaşma Duyarlılığı	Episantr Uzaklık	Eğim	Yükselti	Ağırlık Katsayısı
Episantr Yoğunluk	1	1/2	2	3	4	5	6	7	8	9	0.241
Fay Uzaklık		1	1	2	3	4	5	6	7	8	0.223
VS30			1	1	2	3	4	5	6	7	0.156
Litoloji				1	1	2	3	4	5	6	0.115
Yerleşme Gelişim					1	1	2	3	4	5	0.084
Bina Kat Sayısı						1	1	2	3	4	0.061
Zemin Sıvılaşma Duyarlılığı							1	1	2	3	0.044
Episantr Uzaklık								1	1	2	0.032
Eğim									1	1	0.025
Yükselti										1	0.02
Tutarlılık Oranı %2											

Tablo 2. Analitik hiyerarşi prosesinde değişkenler arası ikili karşılaştırma duyarlılık analizi.

Table 2. Pairwise comparison sensitivity analysis between variables in the analytical hierarchy process.

Episantr Yoğunluk	Fay Uzaklık	VS30	Litoloji	Yerleşme Gelişim	Bina Kat Sayısı	Zemin Sıvılaşma Duyarlılığı	Episantr Uzaklık	Eğim	Yükselti	Ağırlık Katsayısı
0.101-0.485	1-5000	180-350	Alüvyon, Çört, Yamaç Molozu vb.	1985-1995	13-34	4.51-5	1-5000	0-10	1000-1100	0.416
0.011-0.1	5001-10000	351-475	Aglomera, Evaporit, Melanj vb.	1996-2005	9-12	3.91-4.5	5001-10000	10.01.2020	1101-1200	0.262
0.003-0.01	10001-20000	476-600	Çakıltaş, Dasit, Kumtaşı, Şist vb.	2006-2015	6-8	2.51-3.9	10001-15000	20.01.1930	1201-1400	0.161
0.001-0.002	20001-30000	601-755	Diyorit, Gabro, Granit vb.	2016-2023	1-5	1.51-2.5	15001-25000	30.01.1940	1401-1600	0.099
0-0.001	30001+	755-905	Andezit, Bazalt, Kal-ker vb.	Yerleşme Dışı	Yerleşme Dışı	1.0-1.5	25001+	40.1 +	1600+	0.062

3.2.2. Fuzzy AHP modeli

Fuzzy AHP belirsizliği hesaba kattığı için AHP'nin daha esnek ve gerçekçi bir versiyonudur. Bu yöntem, üçlü bulanık sayılar kullanılarak faktörler arasındaki karşılaştırmalarda belirsizlik ve subjektiviteyi azaltır (Chang, 1996). Fuzzy AHP'de, ikili karşılaştırma matrisi oluşturmak için olasılıklar üzerinden daha esnek bir puanlama sistemi uygulanır. Bu esneklik, her bir değişkenin modele olan katkısında büyük bir değişiklik yaratmaz. Asıl etki, değişkenlerin AHP'den farklı olarak hiyerarşik sınıflara bölünmesi yerine, bulanıklaştırma (fuzzification) işlemiyle pozitif veya negatif etki yönünde sürekli/sayısal bir değişken olarak modele eklenmesiyle ortaya çıkar. Bu durum, AHP'nin en önemli dezavantajı olan sınıflandırma yaparak bağımsız değişkenlerin genelleştirilmesi ve buna bağlı olarak daha az ayırt edilebilir bir sonuç haritası üretmesi eksikliğini telafi eder. Böylece, sonuç haritasının daha spesifik olarak analiz edilmesine olanak sağlar.

Fuzzy AHP'de ikili karşılaştırma matrisi oluştururken kullanılan üçlü bulanık sayılar AHP ile oluşturulan tabloyla uyum gösterecek şekilde ayarlanmıştır. Geometrik ortalama ile ağırlık katsayısı netleştirme (defuzzification) işlemi yapılmıştır. Dolayısıyla ağırlık katsayıları ve tutarlılık oranı da aynıdır. Böylece AHP ve Fuzzy AHP ile oluşturulan tehlike haritalarının mekânsal olarak farklılıklarını karşılaştırmak mümkün hale gelmiştir.

3.2.3. Rastgele orman modeli

Sezgisel yöntemlerden sonra istatistiksel yöntemlerden rastgele orman algoritması kullanılmıştır. Bu seçimin sebebi sınıflandırma probleminde sıkça karşılaşılan doğrusal olmayan örüntüleri bulmada etkili olması ve ek işlemler gerektirmeden sayısal ve kategorik verilerle çalışmayı kolaylaştırmasıdır (Brei-

man, 2001).

Modelde, parametreler seçildikten sonra her ağaç için torbalama tekniği kullanılarak önyüklemeli örneklem oluşturulur. Ardından, her bir örneklem için ağaç gelişimi başlar. Her düğümde, tüm değişkenler arasından 'm' sayıda rastgele seçilen değişkenler kullanılarak en iyi dallanma belirlenir (Erdem vd., 2018). Belirlenen ağaçlar ve dallanmaları arasında oylama yapılarak, en yüksek oyu alan ağaç bir sınıfa atanır.

Bağımlı değişkeni temsil eden grid_code ile litoloji (0.83), yerleşme gelişim (0.72), bina katsayısı (0.67) ve zemin sıvılaşması (0.79) değişkenleri arasında yüksek ve pozitif korelasyon vardır. Bu, bu değişkenlerdeki artışın deprem tehlikesinde de artışa neden olduğunu gösterir. Öte yandan, VS30 (-0.70), eğim (-0.43) ve yükselti (-0.69) ile negatif yöndeki yüksek korelasyon, ters orantılı bir ilişkiyi temsil etmektedir. Bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkilerinde de rasyonel bir bağıntı söz konusudur. Korelasyon değerlerine göre, istatistiksel regresyon modeli (Rastgele Orman) ilgili ve gerekli parametrelerin seçilmesiyle oluşturulmuştur (Tablo 3).

VS30, yüzey dalga hızını temsil eder ve zemin sertliğini ölçer. Deprem tehlikesi açısından %36 ile en önemli değişken olarak öne çıkmaktadır. Depremlerin odağı olarak fay hatları, modele katkısı açısından %21 ile ikinci sırada yer almaktadır. Kaya türü ve özellikleri, deprem dalgalarının yayılmasını etkiler ve bu kapsamda modele olan katkısı %18'dir. Episantr yoğunluk, depremlerin yoğunlaştığı ve tekrar etme olasılığı yüksek olan yerleri göstermesi açısından önemlidir ve modele katkısı yaklaşık %10'dur. Eşdoğrusallık açısından, değişkenlerin değerlerinin 8'in altında olması, birbiriyle aynı niteliğe sahip parametrelerin modelde kullanılmadığını ifade etmektedir (Tablo 4).

Tablo 3. Rastgele orman modelinde kullanılan değişkenlerin korelasyon matrisi.

Table 3. Correlation matrix of variables used in random forest model.

Değişkenler	grid_code	Episantr Yoğunluk	Faylara Uzaklık	VS30	Litoloji	Yerleşme Gelişim	Bina Katsayısı	Zemin Sıvılaşması	Episantr Uzaklık	Eğim	Yükselti
grid_code	1	0.53	-0.57	-0.7	0.83	0.72	0.67	0.79	-0.47	-0.43	-0.69
Episantr Yoğunluk	0.53	1	-0.45	-0.32	0.46	-0.03	-0.05	0.38	-0.73	-0.26	-0.39
Faylara Uzaklık	-0.57	-0.45	1	0.27	-0.52	-0.39	-0.36	-0.44	0.55	0.13	0.45
VS30	-0.7	-0.32	0.27	1	-0.72	-0.49	-0.48	-0.78	0.26	0.69	0.73
Litoloji	0.83	0.46	-0.52	-0.72	1	0.6	0.57	0.77	-0.43	-0.5	-0.73
Yerleşme Gelişim	0.72	-0.03	-0.39	-0.49	0.6	1	0.81	0.5	-0.14	-0.28	-0.52
Bina Katsayısı	0.67	-0.05	-0.36	-0.48	0.57	0.81	1	0.51	-0.11	-0.23	-0.49
Zemin Sıvılaşması	0.79	0.38	-0.44	-0.78	0.77	0.5	0.51	1	-0.33	-0.47	-0.65
Episantr Uzaklık	-0.47	-0.73	0.55	0.26	-0.43	-0.14	-0.11	-0.33	1	0.14	0.37
Eğim (%)	-0.43	-0.26	0.13	0.69	-0.5	-0.28	-0.23	-0.47	0.14	1	0.55
Yükselti (m)	-0.69	-0.39	0.45	0.73	-0.73	-0.52	-0.49	-0.65	0.37	0.55	1

Tablo 4. Rastgele orman modelinde değişkenlerin önem katsayıları ve eşdoğrusallık değerleri.

Table 4. Significance coefficients and multicollinearity values of variables used in the random forest model.

Değişkenler	Önem Derecesi	%	Eşdoğrusallık (VIF)
VS30	0.363	36.27	4.6
Faylara Uzaklık	0.214	21.37	1.9
Litoloji	0.183	18.32	4.1
Episantr Yoğunluk	0.096	9.6	3
Rakım	0.054	5.36	2.8
Zemin Sıvılaşma Kapasitesi	0.026	2.6	3.5
Bina Yükseklik	0.022	2.22	3.3
Eğim	0.013	1.33	2
Episantr Uzaklık	0.017	1.7	2.5
Yerleşme Gelişim	0.012	1.23	3.4

Ağaç Sayısı: 15, Derinlik: 30, Örneklem Sayısı: 100.000, Test Örneklem Oranı: %20, Eğitim Seti r^2 : 0.988, Test Seti r^2 : 0.974

4. Bulgular

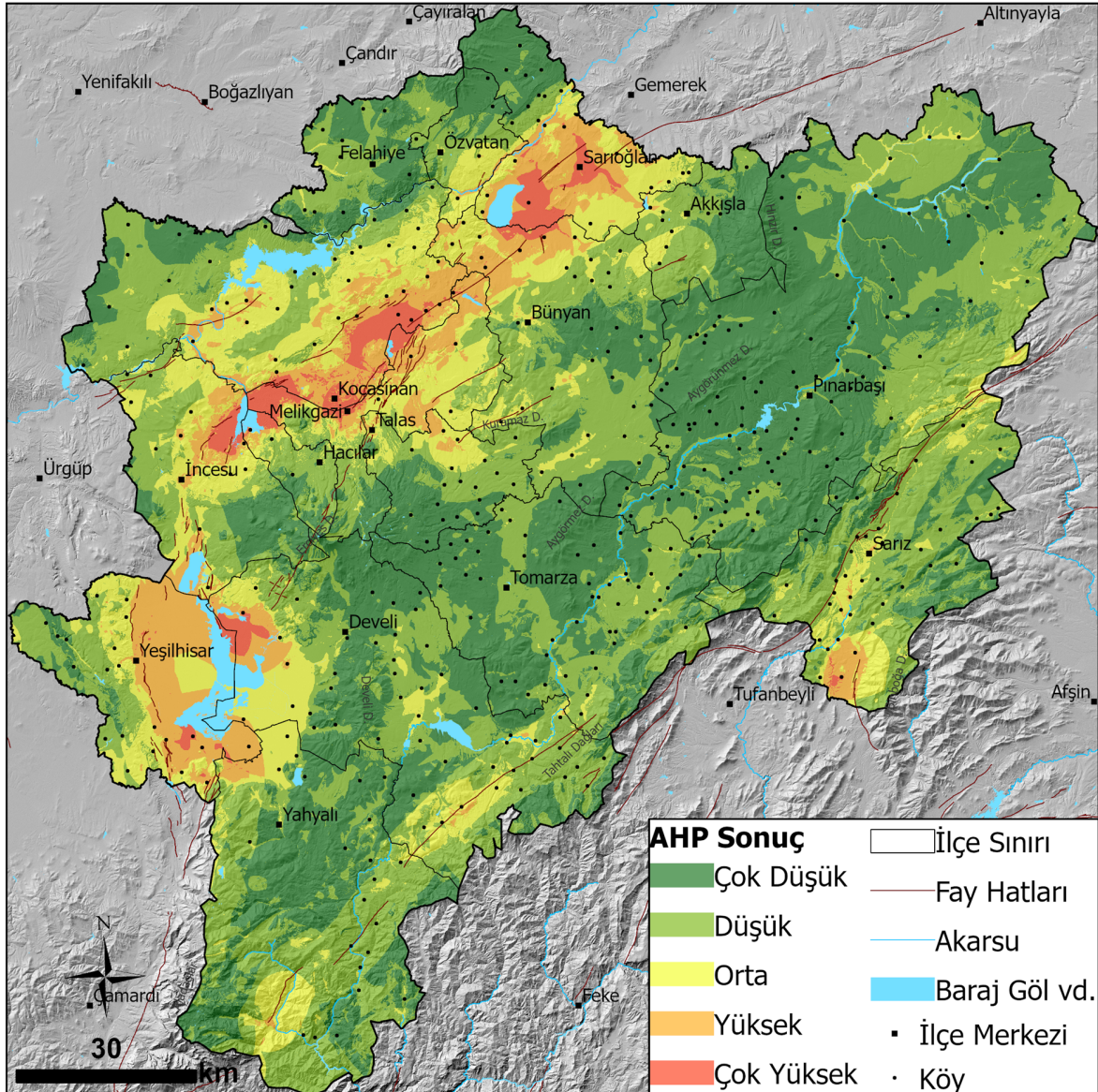
4.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi Tehlike Haritasının Analizi

AHP sonuç haritasında, "çok yüksek" tehlikeli alanlar 366 km² ile il yüzölçümünün %2'sine karşılık gelmektedir. Bu alanların önemli bir bölümünün yapılaşmış olması, afet riskini artırmaktadır. Özellikle, Kocasinan ve Melikgazi ilçelerinin kentsel yerleşim alanlarının büyük bir kısmı bu kategoride yer almaktadır. Bu bölgeler, kentsel yapı yoğunluğunun en fazla olduğu yerlerdir. Kocasinan ilçesinin kuzeydoğusunda kalan çok yüksek tehlikeli alanlar, büyük ölçüde tarımsal arazilerden oluşurken, çevresindeki yerleşik alanlar da bu sınıfa dahil olmaktadır. Melikgazi ilçesinin batısında, organize sanayi bölgesinin etkisiyle kentsel yapı yoğunluğu nispeten düşüktür. Daha batıda, İncesu'ya doğru, bu alanlar bataklık ve tarımsal arazilere dönüşmektedir. Sarioğlan ilçesi, çok yüksek tehlikeli alanların yoğunlaştığı bir diğer bölgedir. Burada, Palas ve Sarioğlan ovalarının alçak kesimlerinde yer alan ilçe merkezi ve kasabalar, tehlikenin boyutunu artırmaktadır (Şekil 4, Tablo 5).

Yerleşim alanlarının çevresindeki tarımsal arazilerin bir bölümü

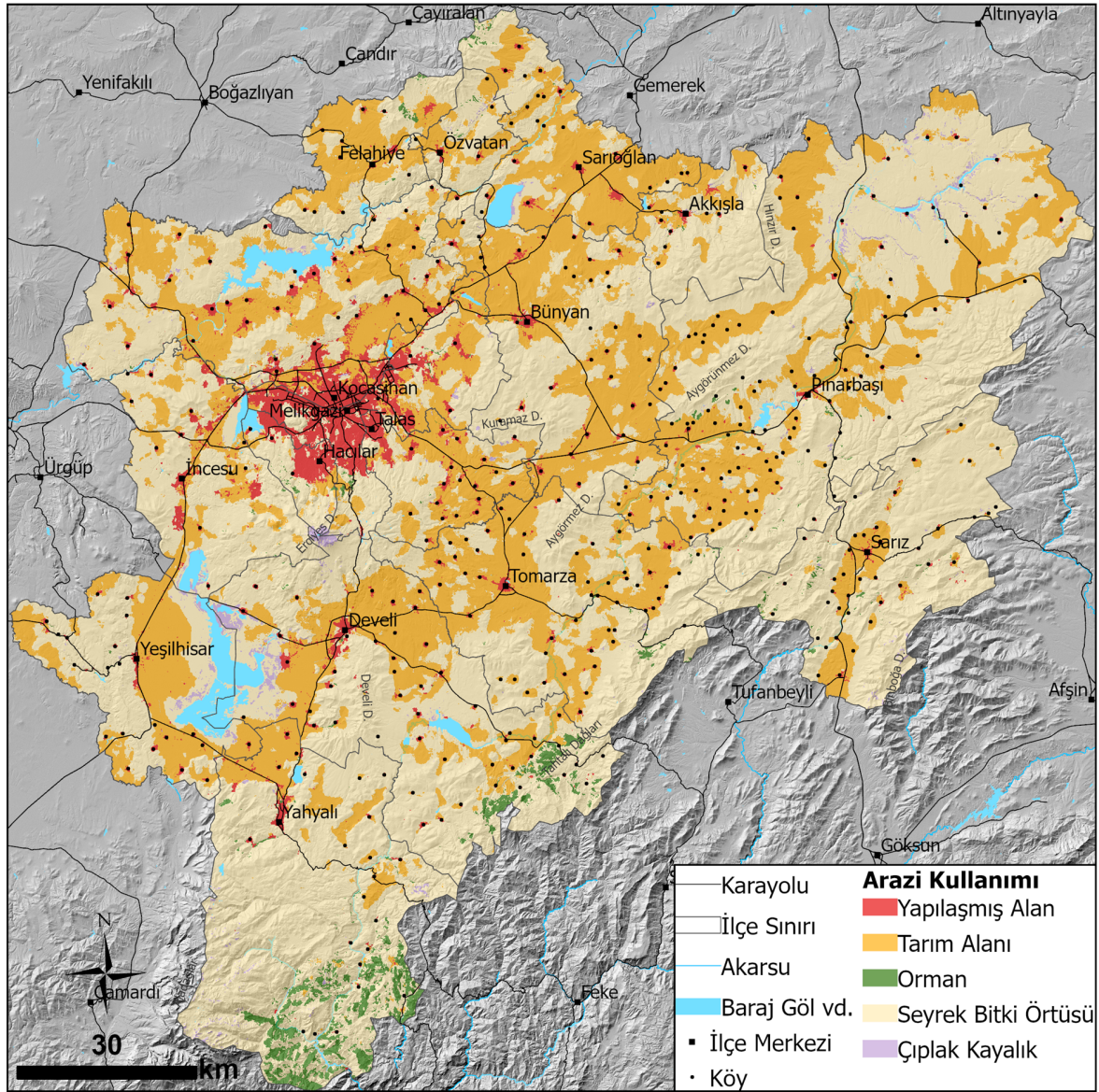
"çok yüksek", geri kalan kesimleri ise "yüksek" tehlikeli sınıfta yer almaktadır. Bu tarımsal araziler yapılaşmaya açılacaksa, kontrollü ve hassas bir sürecin takip edilmesi zorunludur. "Yüksek" tehlike sınıfındaki alanlar, 1380 km² ile il genelinin %8'ini kapsamakta ve genellikle "çok yüksek" tehlike sınıfındaki bölgelerin çevresinde konumlanmaktadır. Yeşilhisar ve Develi ovalarının büyük bölümü, Kocasinan ilçesinin kuzey ve batısındaki düzlükler, Melikgazi ilçesinin doğusundaki ve Sarız ilçesinin güneyindeki tarımsal araziler bu tehlike sınıfındadır (Şekil 5, Şekil 6).

İl genelinin %15'ini (2567 km²) oluşturan "orta" derecede tehlikeli alanlar arasında, Sarioğlan-İncesu hattı boyunca uzanan ovalar ve çevresindeki aşınım düzlükleri ile İncesu-Yeşilhisar hattı boyunca yer alan alçak düzlükler ve bataklıklar dikkat çekmektedir. Ayrıca, Talas ve Bünyan ilçelerinde tarım arazilerine karşılık gelen alçak düzlük kesimleri geniş yer kaplamaktadır. Doğu Anadolu fay kuşağına yakın olan Sarız ilçesinde, Sarız çayı havzasının alçak kesimleri orta derecede tehlikeli alanlar içinde önemlidir. Tehlike haritasında orta tehlikeli sınıfta yer almasına rağmen, düşük veya çok düşük sınıfta yer alması beklenen alanlar arasında Yahyalı-Pınarbaşı hattı boyunca uzanan Tahtalı dağ-



Şekil 4. Analitik hiyerarşi prosesiyle üretilen deprem tehlike haritası.

Figure 4. Earthquake hazard map produced by analytical hierarchy process



Şekil 5. Kayseri ilinde genel arazi kullanımı (ESRI, 2023).

Figure 5. Land use in Kayseri province (ESRI, 2023).

ları güzergahında yer alan bazı bölgeler buradan geçen fay dik-kat çekmektedir.

Düşük ve çok düşük tehlike sınıfındaki alanlar, il genelinin %75'ini oluşturmalarına rağmen toplam nüfusun yalnızca %19'unu barındırmaktadır. Engembeli topografyaya sahip bu iki tehlike sınıfı içerisinde, Adana il sınırı boyunca uzanan Tahtalı Dağları, Kahramanmaraş il sınırında yer alan Binboğa Dağları, Pınarbaşı ilçesinde bulunan Aygörmez ve Hınzır Dağları, Yozgat sınırındaki Akdağ ile il merkezinin güneyindeki Erciyes Dağı ve Develi Dağı ile çevresindeki engembeli araziler bulunmaktadır. Söz konusu alanlarda kırsal nüfus baskındır. Buradaki kırsal yerleşmelerde yapılara ait kat sayılarının az olması ve inşaat malzemesi olarak ağırlıklı olarak taşın kullanılması, afetlere karşı dirençliliği artıran önemli faktörlerdir. Nitekim Kayseri ili köy envanter raporunda kırsal meskenlerin %75'inin taş, %16'sının betonarme, %9'unun kerpiç olduğu belirtilmiştir (TÜİK, 1997). Günümüzde kerpiç evlerin çoğunluğu terk edilmiş veya yeniden inşa edilmiştir. Dolayısıyla ilde kırsal kesimin deprem dirençliliği, yapılar açısından yüksektir.

Kırılmalık, afetlerin etkilerine karşı sosyoekonomik sistemlerin

ve fiziksel varlıkların ne kadar duyarlı olduğunu ifade etmekte ve tespit edilmesinin birçok faktörü içeren karmaşık bir sorun olduğu için bütünlük bir yaklaşım gerektirdiği belirtilmektedir (Rashed ve Weeks, 2003). Bu kapsamda çalışma bütüncül bir kırılmalık tespiti yapmak yerine kırılmalığın önemli parametrelerinden toplam nüfus, kırılmalık nüfus, yapı sayısı ve yapılaşmış alan üzerinden olası riskleri açıklamaktadır.

"Çok yüksek" ve "Yüksek" tehlike sınıflarındaki alanlarda, toplam nüfusun %59'u, yapılaşmış alanın %36'sı ve yapı sayısının %37'si bulunmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu iki tehlike sınıfı, birim alan başına düşen 3 bin kişi ve üzeri nüfusla, yapılaşmış alan ve yapı sayısı açısından risk yoğunluğunun en fazla olduğu alanlara karşılık gelmektedir. İlgili alanlarda yapı sayısının %37 oranında olması, mevcut altyapının da kapasitesinin üzerinde bir yoğunluğa sahip olduğunu işaret etmektedir. Ayrıca, bu alanlarda nüfusun yaklaşık yarısının 0-14 yaş aralığı ve 65 yaş üzeri nüfustan oluşan kırılmalık kesimde yer alması, deprem riskini artıran önemli bir parametredir (Tablo 5).

"Çok düşük", "Düşük" ve "Orta" tehlike sınıflarındaki alanlarda toplam nüfusun %41'i, kırılmalık nüfusun %17'si, yapılaşmış ala-

Tablo 5. AHP modeline göre tehlike sınıfları ve risk analizi.**Table 5.** Hazard classes and risk analysis according to AHP model

Tehlike Sınıfları	Analitik Hiyerarşi Prosesi									
	Alan km ²	Alan %	Toplam Nüfus	Toplam Nüfus %	Kırılğan Nüfus	Kırılğan Nüfus %	Yapılaşmış Alan km ²	Yapılaşmış Alan %	Yapı Sayısı	Yapı Sayısı %
Çok Düşük	6156	36	65476	5	26569	2	50	7	18972	6
Düşük	6733	39	206057	14	83532	6	207	30	85246	28
Orta	2567	15	329145	23	133305	9	190	27	87506	29
Yüksek	1380	8	470302	33	190387	13	157	22	70113	23
Çok Yüksek	366	2	374702	26	151727	10	95	14	41684	14
Toplam	17202	100	1445683	100	585520	41	698	100	303521	100

nın %64'ü ve yapı sayısının %63'ü bulunmaktadır. Bu bağlamda, bu üç tehlike sınıfı, birim alan başına düşen 1500 kişi ve altında bir nüfus yoğunluğuna sahip olup, yapılaşmış alan ve yapı sayısı açısından risk yoğunluğunun görece daha düşük olduğu alanları temsil etmektedir. Özellikle "çok düşük" tehlike sınıfındaki alanlar, yapı sayısının %6 oranında olması ile, mevcut altyapının güvenli ve yeterli olduğunu göstermektedir. "Düşük" tehlike sınıfında, yapılaşmış alanın %30'u ve nüfusun %14'ü bulunmakta; bu durum, bu bölgelerdeki yapılaşmanın daha dengeli bir şekilde gerçekleştiğini işaret etmektedir. Ancak, "Orta" tehlike sınıfındaki alanlarda nüfus yoğunluğunun artması, potansiyel tehlikelere karşı daha fazla dikkat gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Kayseri ilinde bulunan binaların %58'i 6 veya daha fazla katlıdır. Bu oranla Kayseri, yüksek katlı bina ortalamasında 8,2 ile ülke genelinde ilk sırada yer almaktadır (TÜİK, 2022). Yüksek katlı binaların dağılımında, merkez ilçeler ve yüksek kentleşme oranına sahip diğer ilçelerin merkez bölgeleri ön plana çıkmaktadır. Bu durum, il genelinde yoğun nüfuslu alanlardaki kırılğanlığın etkisini artırmaktadır. AFAD-RED (Risk, Etki ve Değerlendirme) tarafından yapılan bir deprem senaryosuna göre, Erciyes fay hattında gerçekleşebilecek olası 6.8 Mw büyüklüğündeki bir depremde en çok hasar görebilecek ilçeler ve tahmini zarar görecek bina sayıları şu şekildedir: Melikgazi (42.000), Kocasinan (33.000), Talas (9.000), Hacılar (6.000), Develi (5.000), İncesu (4.000), Bünyan (4.000) ve Tomarza (2.000). Geri kalan ilçelerde ise her birinde 1.000'den az olmak üzere toplamda yaklaşık 107.000 yapının hasar alabileceği öngörülmüştür (AFAD, 2021). Ayrıca il genelinde ilçe bazında 67 kriterle gerçekleştirilen kırılğanlık analizi çalışmasında en yüksekten en düşüğe doğru Kocasinan, Melikgazi, Talas, İncesu, Hacılar, Develi, Yahyalı, Bünyan, Pınarbaşı, Sarıoğlan, Tomarza, Yeşilhisar, Felahiye ve Özvatan ilçeleri sıralanmaktadır (Özmen, 2023). Dolayısıyla elde edilen bulgular AHP ve diğer modellerle üretilen deprem tehlike haritalarındaki mekânsal dağılışı uyum göstermektedir.

4.2. Fuzzy AHP Tehlike Haritasının Analizi

Fuzzy AHP, belirsizlik ve bulanıklığı daha iyi yönetme kapasitesine sahipken, AHP daha kesin ve belirgin kriterlerle çalışır. Bu nedenle, tehlike sınıflarında ve risk analizinde önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Örneğin, Yeşilhisar ve Develi ovalarının AHP'de "çok yüksek" tehlikeli alanlar içinde gösterilen kısımları, Fuzzy AHP modelinde yer almamaktadır. Bunun yerine, yapılaşma yoğunluğunun fazla olduğu yerel alanlar bu sınıfa dahil edilmiştir. Bu yerler arasında Yeşilhisar ilçe merkezi, Musahacılı,

Sindelhöyük, Çayırözü ve Karacaören gibi yerleşmeler bulunmaktadır. Ayrıca, Sarız çayının aşağı çığırındaki alanlar Fuzzy AHP'de hem alansal olarak küçülmüş hem de daha spesifik olarak ayırt edilmiştir. Burada Yeşilkent ve Kemer yerleşmeleri bu sınıfa dahil edilirken, çevresindeki alanlar "yüksek" tehlikeli alanlar sınıfında yer almaktadır. Bu nedenle, çok yüksek tehlikeli alanların yüzölçümü AHP'ye göre 73 km² azalmıştır (Şekil 6, Tablo 6).

Yüksek tehlikeli alanların yüzölçümü, AHP ile neredeyse aynı olmakla birlikte, dağılımda bazı farklılıklar görülmektedir. Bu farklar arasında ilk dikkati çeken, Yeşilhisar ve Develi ovalarının neredeyse tamamının yer almasıdır. Bu bölgelerde, yerleşim alanları lokal olarak "çok yüksek" sınıfındadır. AHP'de orta düzeyde tehlikeli gösterilen Bünyan ilçe merkezi ve ilçenin güneyindeki Akmesic-Elbaşı arası (Kayseri-Bünyan karayolu), Fuzzy AHP'de yüksek tehlikeli olarak sınıflandırılmıştır (Tablo 6).

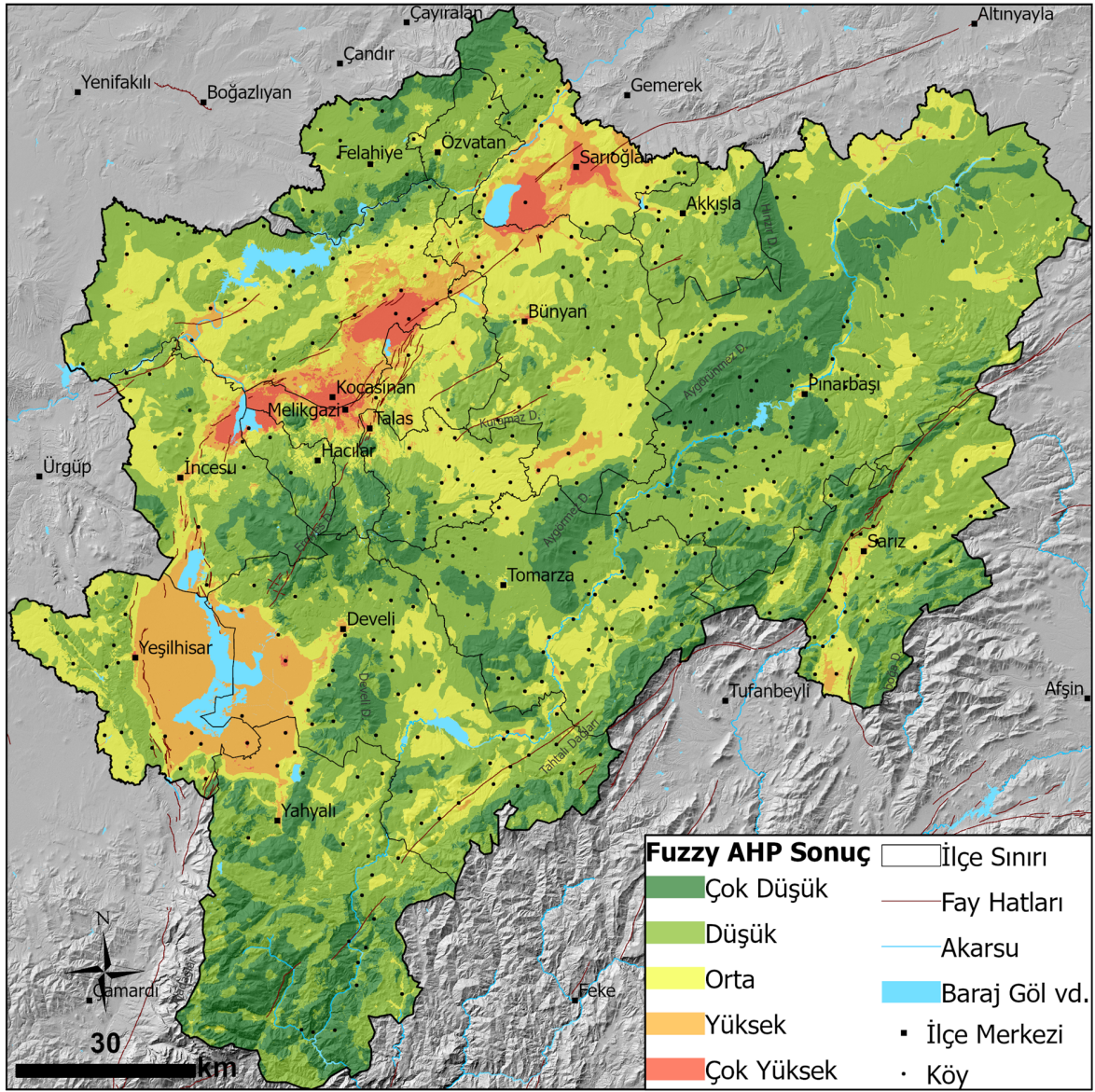
Orta düzeyde tehlikeli olarak sınıflandırılan araziler, AHP'ye göre yaklaşık 1000 km² artmıştır. Bu artışta, özellikle ilin Adana-Kahramanmaraş sınırı boyunca uzanan Tahtalı dağlarının kuzeyinde yer alan birikinti düzlükleri ile Yeşilhisar ovasının doğusundaki plato yüzeyi dikkat çekmektedir.

Düşük ve çok düşük tehlike sınıfındaki araziler, AHP'ye göre azalmış ve il genelinin %70'ini oluşturmuştur. Bu alanlar, AHP ile aynı kalmakla birlikte, orta tehlikeli alanlar bu modelde AHP'ye göre düşük tehlikeli alanlara doğru genişlemiş; çok düşük tehlikeli alanlar ise yükseltinin arttığı dağlık alanlara doğru daralmıştır. Bu daralma, ilgili sınıflarda nüfus miktarında da azalmaya neden olmuştur.

Fuzzy AHP ile elde edilen tehlike haritası, AHP ile oluşturulan haritaya göre dikkate değer farklılıklar içermektedir. Bu farklılıklar hem tehlike sınıflarının dağılımında hem de yüz ölçümlerinde ortaya çıkmakta, dolayısıyla riskin mekânsal dağılımında da değiştirmektedir. Öncelikle, benzer hususlar açısından karşılaştırıldığında, AHP'de olduğu gibi en yüksek risk taşıyan bölgeler, alan açısından küçük olmasına rağmen, önemli bir nüfus ve yapılaşma yoğunluğuna sahiptir. Bu tehlike alanları, toplam il alanının %10'unu, toplam nüfusun %31'ini, kırılğan nüfusun %26'sını ve yapıların yaklaşık beşte birini (%19) oluşturmaktadır.

4.3. Rastgele Orman Modeli Tehlike Haritasının Analizi

AHP ve Fuzzy AHP'den elde edilen sonuç haritalarındaki çok



Şekil 6. Fuzzy AHP ile üretilen deprem tehlike haritası.

Figure 6. Earthquake hazard map produced with Fuzzy AHP.

Tablo 6. Fuzzy AHP modeline göre tehlike sınıfları ve risk analizi.

Table 6. Hazard classes and risk analysis according to Fuzzy AHP model.

Tehlike Sınıfları	Fuzzy AHP									
	Alan km ²	Alan %	Toplam Nüfus	Toplam Nüfus %	Kırılğan Nüfus	Kırılğan Nüfus %	Yapılaşmış Alan km ²	Yapılaşmış Alan %	Yapı Sayısı	Yapı Sayısı %
Çok Düşük	3529	21	31958	2	13013	1	6	1	2066	1
Düşük	8450	49	165643	11	67188	5	141	20	40322	13
Orta	3572	21	335188	23	135749	9	253	36	103596	34
Yüksek	1358	8	463102	32	187476	13	191	27	101200	33
Çok Yüksek	293	2	449792	31	182094	13	107	15	56337	19
<i>Toplam</i>	<i>17202</i>	<i>100</i>	<i>1445683</i>	<i>100</i>	<i>585520</i>	<i>41</i>	<i>698</i>	<i>100</i>	<i>303521</i>	<i>100</i>

yüksek tehlikeli olarak sınıflandırılan yerlerden rastgele örnek-leme ile alınmış noktalar, bağımlı değişken olarak kullanılmış ve aynı bağımsız değişkenlerle Rastgele Orman modeli oluşturulmuştur. Elde edilen harita, özellikle Fuzzy AHP ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Önemli farklar arasında, Rastgele Orman modeli “çok yüksek” ve “yüksek” olarak sınıflandırdığı alanlar, diğer iki modele göre ilin %13’ünü oluşturarak daha geniş bir yüzölçümüne sahiptir. Bu durum, modelin daha agresif bir sınıflandırma yapısına sahip olması ile ilgilidir. Nitekim, orta düzeyde tehlikeli alanlar açısından diğer iki modele göre daha küçük bir alanla temsil edilmektedir. Düşük ve çok düşük sınıftaki arazilerin büyüklüğü ise diğer iki modele yakındır (Şekil 7, Tablo 7).

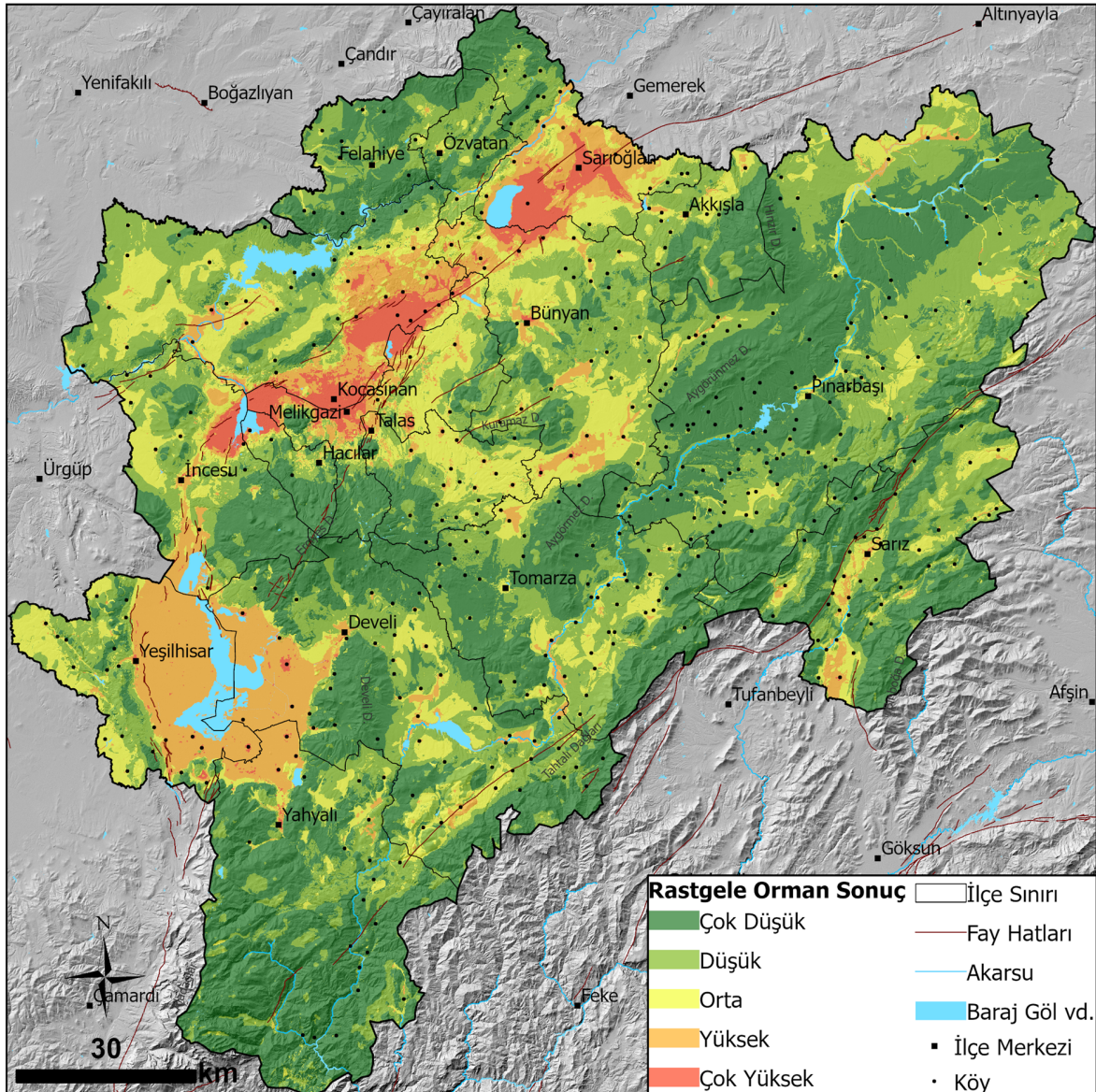
Rastgele Orman modelinde “çok yüksek” olarak sınıflandırılan yerlerde, yapılaşmış alanların özellikle alüvyal depolar üzerinde kalan kesimleri dikkati çekmektedir. Ayrıca, yapılaşmış alanların çevresindeki karayolları ve yakınındaki yapı kümeleri de bu sınıfta yer almaktadır.

“Yüksek” tehlikeli alanlar içinde yer alan çok yüksek tehlikeli alanlar da dahil edildiğinde, ilde KD-GB istikametinde uzanan

önemli ovaların sınırları ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Bünyan ilçesindeki Zamantı Ovası, Tomarza ilçesindeki Çukuryavşan Ovası, Kocasinan ilçesindeki Yamula Ovası ve Sarız Ovası bu kuşak dışında yüksek tehlikeli olarak sınıflandırılan alanlar arasındadır.

“Orta” tehlikeli sınıfta, ovalar ve çevresindeki aşınım düzlükleri ve alçak platolar, vadi tabanları öne çıkmaktadır. Bunlar arasında Erciyes, Aygörmüş ve Kuramaz dağları arasında kalan düzlükler, Kocasinan ilçesindeki Elmalı Ovası öne çıkmaktadır. Ayrıca, Tahtalı Dağlarının kuzeyinde yer alan birikinti yelpazeleri dikkati çekmektedir.

Rastgele Orman modelinde “çok yüksek” ve “yüksek” tehlike sınıfları birlikte değerlendirildiğinde, Kayseri ilinin toplam alanının sadece %13’ünü oluşturmalarına rağmen, toplam nüfusun %70’ini kapsamaktadır. Kırılğan nüfusun %28’i bu sınıflarda yer almakta olup, yapılaşmış alanın %52’si ve yapıların %60’ı bu bölgelerde bulunmaktadır. Bu durum, yüksek tehlike potansiyeli taşıyan bölgelerde yoğun bir nüfus ve yapılaşma baskısının olduğunu gösterir. Nüfusun ve yapılaşmanın bu kadar yoğun olduğu alanlarda, tehlike derecesinin yüksekliği göz önüne alın-



Şekil 7. Rastgele orman modeli ile üretilen deprem tehlike haritası.

Figure 7. Earthquake hazard map produced with random forest model.

Tablo 7. Rastgele orman modeline göre tehlike sınıfları ve risk analizi.**Table 7.** Hazard classes and risk analysis based on random forest model.

Tehlike Sınıfları	Rastgele Orman									
	Alan km ²	Alan %	Toplam Nüfus	Toplam Nüfus %	Kırılğan Nüfus	Kırılğan Nüfus %	Yapılaşmış Alan km ²	Yapılaşmış Alan %	Yapı Sayısı	Yapı Sayısı %
Çok Düşük	7031	41	87216	6	35357	2	53	8	15921	5
Düşük	5464	32	147979	10	60048	4	120	17	38820	13
Orta	2507	15	205902	14	83469	6	157	22	65835	22
Yüksek	1743	10	429783	30	174001	12	213	30	105990	35
Çok Yüksek	457	3	574803	40	232646	16	155	22	76955	25
<i>Toplam</i>	<i>17202</i>	<i>100</i>	<i>1445683</i>	<i>100</i>	<i>585520</i>	<i>41</i>	<i>698</i>	<i>100</i>	<i>303521</i>	<i>100</i>

diğında, risk yönetiminin kritik önemde olduğu ve bu bölgelerde altyapı ve yapı kalitesine yönelik dirençliliği artırma çabalarına öncelik verilmesi gerekmektedir (Tablo 7).

Diğer taraftan, "çok düşük, düşük ve orta" tehlike sınıfları Kayseri ilinin %88'ini kaplamakta ve toplam nüfusun %30'unu barındırmaktadır. Kırılğan nüfusun %12'si bu bölgelerde yer alırken, yapılaşmış alanın %47'si ve yapıların %40'ı bu alanlarda bulunmaktadır. Bu grupta tehlikenin düşük olmasının yanında, yapılaşma yoğunluğu ve nüfus oranları da görece daha düşüktür.

Her üç yöntemi risk açısından karşılaştırdığımızda, tehlike düzeyi arttıkça hem toplam hem de kırılğan nüfusun önemli ölçüde yükseldiği gözlemlenmiştir. Özellikle, yüksek ve çok yüksek tehlike sınıflarında toplam nüfusun yaklaşık %60'ı yer alırken, kırılğan nüfusun %40'ının bu sınıflarda yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Random Forest modeli, özellikle çok yüksek tehlike sınıfında diğer modellere kıyasla daha yüksek kırılğan nüfus öngörüsü sunarak daha temkinli bir risk/tehlike tahmini vermektedir. Bu bulgular ışığında, yüksek ve çok yüksek tehlike sınıflarında yer alan nüfusun korunmasına yönelik risk azaltma stratejilerinin bu alanlarda yoğunlaştırılması gerektiği söylenebilir.

5. Tartışma

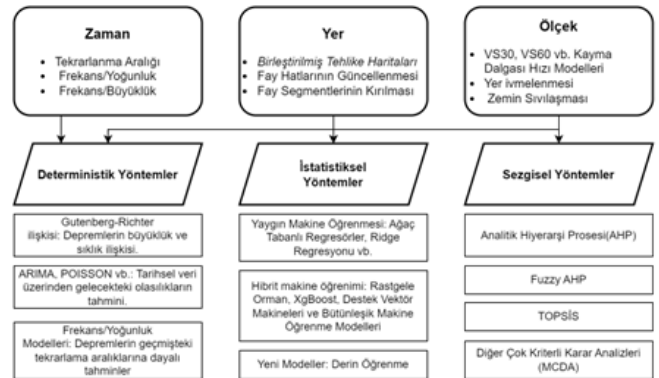
Kayseri ilinde deprem tehlikesinin mekânsal dağılımında "çok yüksek" ve "yüksek" tehlike sınıfında yer alan alanlar, alsal olarak küçük bir yüzdeye sahip olmasına rağmen, en yoğun yapılaşmanın bulunduğu il merkezi ve yakın çevresi ile kuzeydoğu kesimi boyunca uzanan aktif fay hatlarının yakınındaki Kuvaterner dolgu yüzeyleridir. Kayseri ili odaklı deprem tehlikesi ve riski konusundaki çalışmaların bulguları, bu nedenle il merkezi ve yakın çevresine yöneliktir. (AFAD, 2021; Özmen, 2023; Akgül, 2023). Bu çalışma diğerlerinden farklı olarak ilin tamamını deprem tehlikesi açısından önemli parametreler aracılığıyla ve alternatif modellerle mekânsal boyutunu değerlendirmesi açısından önemlidir. Çünkü deprem riskinin değerlendirilmesi için öncelikli olarak deprem tehlike haritaları üretilmelidir (Sagara ve Saito, 2013).

Çalışmanın sınırlılığı açısından bir değerlendirme yapmak gerekirse yalnızca tehlike haritalarının üretimi afet yönetimi açısından yeterli değildir. Öncelikli amaç maruziyet ve kırılğanlığa bağlı olarak muhtemel zarar görülebilirliği yani riski tespit edip buna yönelik önlemler ve düzenlemeler yapmak olduğundan, bu haritalar aracılığıyla risk değerlendirmesi yapılması gerek-

mektedir. Bu çalışma risk analizinde öncelikli olarak ele alınan yapı, arazi kullanımı, yaş gruplarına göre kırılğan nüfus özelliklerine göre kısa bir değerlendirme yapmıştır. Ancak ilgili yazında risk analizleri çok daha fazla parametre ayrı ayrı veya entegre olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada "yer" odaklı deprem tehlike analizi yapılmıştır. Ancak deprem tehlikesi ile ilgili analizlerde "zaman", "yer" ve "ölçek" temaları bulunmakta ve bunları açıklamaya yönelik çeşitli metodolojiler kullanılmaktadır (Kramer, 1996; Mcguire, 2004). Söz konusu metodlar deterministik, istatistiksel ve sezgisel olmak üzere üç ana yaklaşım üzerinden sınıflandırılabilir (Şekil 8).

Deterministik yöntemler özellikle depremlerin tekrarlanma sıklığını ve büyüklüğünü tahmin etmeye yönelik olsa da depremlerin doğasındaki belirsizlikler bu modellerin pratikte sınırlı kalmasına neden olmaktadır. İstatistiksel yöntemler, fay hatlarının kırılması ve güncellenmesinin yanında deprem tehlike haritalarının üretilmesinde önemlidir. Yaygın makine öğrenmesi algoritmaları (örneğin Ağaç Tabanlı Regresyon, Ridge Regresyon) ile birlikte daha yeni hibrit yaklaşımlar (XGBoost, Destek Vektör Makineleri vb.) da bu süreçte kullanılmaktadır. Ancak, istatistiksel yöntemlerin doğruluğu, modelin eğitim verisinin kalitesine bağlıdır ve farklı modellerin karşılaştırılmasını gerekir. Sezgisel yöntemler ise büyüklük, ivmelenme, sıvılaşma ve tehlike haritalarının üretiminde kullanılmaktadır. Bunlar Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), Fuzzy AHP ve TOPSIS yöntemler olmak üzere, belirsizliklerin fazla olduğu ve uzman görüşüne dayanan alanlarda etkili olan çok kriterli karar verme teknikleridir. Sezgisel yöntemler, özellikle subjektif veri ağırlığına dayanması nedeniyle sınırlamalar içerdiğinden deprem tehlike haritalarının üretilmesinde artık istatistiksel yöntemlerle birlikte hibrit olarak kullanılmaktadır.



Şekil 8. Deprem tehlikesinin analizinde hedefler ve kullanılan yöntemler.
Figure 8. Goals and methods used in earthquake hazard analysis.

Bu yöntemlerin entegrasyonu, deprem tehlikelerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması için kritik öneme sahiptir. Her bir yaklaşımın güçlü yönlerini birleştirerek, sismik riskin karmaşık doğasını daha iyi ele almak mümkündür. Bu nedenle, etkili deprem tehlike haritalarının oluşturulması için bu metodolojilerin bir kombinasyonunun kullanılması gerekmektedir.

6. Sonuç

Bu çalışma, Kayseri ili için deprem tehlikesi ve risk değerlendirmesini AHP, Fuzzy AHP ve Rastgele Orman yöntemlerini entegre ederek incelemiştir. Her bir yöntem, kendine özgü yapısı ve analiz kapasitesi ile Kayseri'deki deprem tehlikesinin mekânsal dağılımını farklı açılardan ele alarak ayrıntılı bir şekilde ortaya koymuştur. AHP ve Fuzzy AHP modelleri, karar kriterlerinin önem ağırlıklarını dikkate alarak Kayseri'nin yerel coğrafi ve yapısal özelliklerine göre hassas bölgelerin sınıflandırılmasını sağlamıştır. Fuzzy AHP'nin belirsizliği yönetme yeteneği, özellikle yüksek yapı yoğunluğuna sahip yerlerde riskin daha ayrıntılı olarak analiz edilmesine olanak tanımış ve risk analizinde kesinlik kazandırmıştır. Diğer yandan, Random Forest algoritması ile oluşturulan risk haritası, mekânsal risk dağılımında daha geniş alanların yüksek tehlike kategorisinde sınıflandırılmasıyla öne çıkmış, deprem riskinin nüfus yoğunluğu, yerleşim yapısı ve arazi kullanım değişkenleriyle ilişkisini istatistiksel olarak güçlü bir model sunarak göstermiştir. Sonuçlar, Fuzzy AHP'nin, geleneksel AHP'ye göre daha detaylı ve belirsizliği daha iyi yöneten bir yaklaşım sunduğunu; Rastgele Orman modelinin ise diğer iki modele göre daha agresif bir sınıflandırma yapısı sergilediğini göstermektedir.

Tehlike sonuç haritalarında özellikle Sarioğlan-İncesu hattı boyunca uzanan depresyonlar, il genelindeki en tehlikeli alanları oluşturmakta ve bu bölgeler aynı zamanda en yoğun nüfuslu kuşaklara denk gelmektedir. Kayseri'nin Türkiye'de ortalama kat sayısının en fazla olduğu il olması, özellikle il merkezindeki yüksek katlı binaların deprem tehlikesinin olası etkilerini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, yüksek tehlike sınıfında yer alan alanlarda toplam nüfusun yaklaşık %60'ının bulunması nedeniyle altyapı iyileştirme ve kentsel yapılaşma süreçlerinde deprem risk azaltma stratejilerine öncelik verilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu durum ilin, deprem tehlikesi ile birlikte kırılganlık ve maruziyete bağlı olarak deprem riskini arttırmaktadır. Kayseri ili özelinde yapılan analizler, bölgenin deprem riskine karşı kırılganlığını ortaya koymuş ve farklı yöntemlerin birlikte kullanılmasının, risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde kritik rol oynadığını göstermektedir. Yüksek ve çok yüksek tehlike sınıflarında yer alan alanlarda nüfus yoğunluğu ve yapılaşma baskısının artması, bu bölgelerde altyapı ve yapı kalitesine yönelik iyileştirme çalışmalarının öncelikli hale getirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, modellemelere daha fazla parametrenin dahil edilmesi, farklı senaryo analizleri yapılması ve yeni teknolojilerin kullanılmasıyla deprem tehlikesi ve risk değerlendirmesinin daha da geliştirilmesi mümkündür. Bu sayede, deprem riskinin azaltılması ve toplumsal dirençliliğin artırılması yönünde daha etkili adımlar atılabilir. Çalışma bulguları, il genelinde en yüksek tehlike potansiyeline sahip alanların doğru şekilde sınıflandırılarak kritik risk alanlarının belirlenmesi ve afet öncesi hazırlık, afet sırasında müdahale ve afet sonrası iyileşme süreçlerine yönelik kapsamlı bir strateji oluşturulmasında katkı sunabilir.

Çıkar Çatışması/Conflict of Interest: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder. *The authors declare that there is no conflict of interest.*

Yazar katkısı/Author contribution: Çalışmanın konsepti ve tasarımı F. A. C. ve Y. B. tarafından yapılmıştır. F. A. C. ve Y. B. tarafından veriler toplanmış ve yorumlanması yapılmıştır. İlk yazım kısmı F. A. C. tarafından yapılmış ve daha sonradan Y. B. tarafından da okunmuş, en son gerekli düzeltmeler F. A. C. ve Y. B. tarafından yapılmıştır. *The study was conceived and designed by F. A. C. and Y. B.. The data were collected and interpreted by F. A. C. and Y. B.. The first writing part was done by F.A.C. and later read by Y. B., the last necessary corrections were made by F. A. C. and Y. B..*

Etik Kurulu Onayı/Ethics Committee Approval: Bu çalışma için Etik Kurul Onay Belgesi gerekmemektedir. *Ethics Committee Approval is not required for this study.*

Veri Erişebilirliği/Data: Çalışma içindeki kullanılan bütün veriler açık erişimli veri tabanlarından elde edilerek amaca uygun olarak yeniden düzenlenmiştir. İlgili verilerin erişim adresleri, kaynakçada belirtilmiştir. *All data used in the study have been obtained from open access databases and have been organised according to their purpose. The access addresses of the relevant data are given in the bibliography.*

Kaynakça

- AFAD. (2024). Deprem Kataloğu. <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>
- AFAD. (2018). Türkiye'de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/turkiye_de_afetler.pdf
- AFAD. (2021). İl Risk Azaltma Planı, Kayseri (İRAP). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Kayseri. https://kayseri.afad.gov.tr/kurumlar/kayseri.afad/Egitim/Kayseri_IRAP_Baski.pdf
- Akgül, A. (2023). Kayseri il merkezi için Vs30 kayma dalgası hızı haritalarının hazırlanması (Tez Yayın No: 801843) [Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Allen, T. I., Wald, D. J. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site-conditions (VS30) and amplification around the globe. *Geological Survey (US)*, No. 2007-1357, <https://pubs.usgs.gov/of/2007/1357/>
- Anwar, G. A., Dong, Y. (2020). Seismic resilience of retrofitted RC buildings. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 19(3), 561-571. <https://doi.org/10.1007/s11803-020-0580-z>
- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. (2023). Regional Earthquake-Tsunami Monitoring and Evaluation Center - Earthquake Catalog. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>

- Borcherdt, R. D. (2012, September 24-28). VS30—A site-characterization parameter for use in building Codes, simplified earthquake resistant design, GMPEs and ShakeMaps [Conference presentation]. In the 15th world conference on earthquake engineering. Lisbon, Portugal. <https://pubs.usgs.gov/publication/70041709>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32. <https://link.springer.com/article/10.1023/a:1010933404324>
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı H., Olgun, Ş. (2011). 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi. Seri No: 32, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, <https://mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/diri-fay-haritalari>
- Erdem, F., Derinpınar, M. A., Nasırzadehdızajı, R. , Oy, S. , Şeker, D. Z. Bayram, B. (2018). Rastgele orman yöntemi kullanılarak kıyı çizgisi çıkarımı İstanbul örneği. *Geomatik*, 3(2), 100-107. <https://doi.org/10.29128/geomatik.362179>
- ESRI, Environmental Systems Research Institute. (2023). *Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series*. ESRI. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d3da5dd386d140cf93fc9ecbf8da5e31>
- Field, E. H. (2000). Accounting for site effects in probabilistic seismic hazard analyses of Southern California: overview of the SCEC Phase III report. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6B), 1-31. <https://doi.org/10.1785/0120000512>
- Gilbert, S. W. (2016). *Disaster resilience: A guide to the literature*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Gutenberg, B., Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological society of America*, 34(4), 185-188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- Harff, J., Meschede, M., Petersen, S., Thiede, J. (Eds.). (2016). *Encyclopedia of marine geosciences*. Springer Science Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6644-0>
- Heath, D. C., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., Smoczyk, G. M. (2020). A global hybrid VS30 map with a topographic slope-based default and regional map insets. *Earthquake Spectra*, 36(3), 1570–1584. <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>
- Hu, J., Chen, J., Chen, Z., Cao, J., Wang, Q., Zhao, L., Zhang, H., Xu, B., Chen, G. (2018). Risk assessment of seismic hazards in hydraulic fracturing areas based on fuzzy comprehensive evaluation and AHP method (FAHP): A case analysis of Shangluo area in Yibin City, Sichuan Province, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170, 797-812. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.066>
- Jennings, P. C. (2003). An introduction to the earthquake response of structures. *International Geophysics*, 81, 1097-1125. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(03\)80181-X](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(03)80181-X)
- Kant Sharma, L., Kanga, S., Singh Nathawat, M., Sinha, S. and Chandra Pandey, P. (2012), Fuzzy AHP for forest fire risk modeling. *Disaster Prevention and Management*, 21(2), 160-171. <https://doi.org/10.1108/09653561211219964>
- Koks, E. E., Jongman, B., Husby, T. G., Botzen, W. J. (2015). Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environmental Science Policy*, 47, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.10.013>
- Koks, E. E., Rozenberg, J., Zorn, C., Tariverdi, M., Voudoukas, M., Fraser, S. A. (2019). A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. *Nature Communications*, 10(1), 1-11. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2583746>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Lee, C.; Schaaf, T. (2006, 19-21 June). *The Future of Drylands* [Conference presentation]. International Scientific Conference on Desertification and Drylands Research. Tunisia. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6970-3>
- Marconcini, M., Metz-Marconcini, A., Üreyen, S., Palacios-Lopez, D., Hanke, W., Bachofer, F. (2020). *World Settlement Footprint (WSF) 2015*. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.10048412.v1>
- McGuire R (2004). *Seismic hazard and risk analysis: earthquake engineering research institute*. Monograph. https://faeng.ufms.br/files/2019/06/PGA_Seismic-Hazard-And-Risk-Analysis_McGuire_2004.pdf
- MICROSOFT. (2023). *Microsoft Building Footprints, Türkiye*. MICROSOFT, <https://github.com/Microsoft/USBuildingFootprints>
- Mokarram, M., Negahban, S. Abdeldjalil, B. (2021). GIS-based fuzzy-analytic network process (FAHP), fuzzy-analytic hierarchy process (FANP) methods and feature selection algorithm (FSA) to determine earthquake-prone areas in Kermanshah Province. *Environ Earth Sci*, 80(633), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09934-7>
- Morell, K. D., Styron, R., Stirling, M., Griffin, J., Archuleta, R., Onur, T. (2020). Seismic hazard analyses from geologic and geomorphic data: Current and future challenges. *Tectonics*, 39(10), 1-47. <https://doi.org/10.1029/2018TC005365>
- MTA (2024). *Kayseri Jeoloji Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/productpath=2_46product_id=36727
- Nyimbili, P.H., Erden, T. & Karaman, H. (2018). Integration of

- https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/product&path=2_46product_id=36727
- Nyimbili, P.H., Erden, T. & Karaman, H. (2018). Integration of GIS, AHP and TOPSIS for earthquake hazard analysis. *Nat Hazards*, 92, 1523-1546. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3262-7>
- Ochoa, L. H., Niño, L. F., Vargas, C. A. (2018). Fast estimation of earthquake epicenter distance using a single seismological station with machine learning techniques. *Dyna*, 85(204), 161-168. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.68408>
- Öncü, S. (2021). *CBS yöntemiyle Bursa'nın bütünlüklük doğal tehlike analizi* (Tez Yayın No: 696829) [Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Özmen, M. (2023). Evaluating earthquake vulnerability of 2023 Kayseri, Türkiye via BWM-ABAC method. *Sādhānā*, 48(3), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02216-x>
- Pesaresi, M., Politis, P. (2023). *GHS-BUILT-H R2023A - GHS building height, derived from AW3D30, SRTM30, and Sentinel2 composite*. European Commission, Joint Research Centre. <http://data.europa.eu/89h/85005901-3a49-48dd-9d19-6261354f56fe>
- Rashed, T., & Weeks, J. (2003). Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(6), 547-576. <https://doi.org/10.1080/1365881031000114071>
- Rusydi, H., Effendi, R., Rahmawati, R. (2017). Vulnerability zoning of earthquake disaster of Palu. Universitas Sebelas Maret, *International Journal of GEOMATE*, 1(2), 137-143. <https://doi.org/10.20961/ijscs.v1i2.5138>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill International.
- Sagara, J., Saito, K. (2013). *Risk assessment and hazard mapping*. World Bank, <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16146>
- Sianko, I., Ozdemir, Z., Khoshkholghi, S., Garcia, R., Hajirasouliha, I., Yazgan, U., & Pilakoutas, K. (2020). A practical probabilistic earthquake hazard analysis tool: case study Marmara region. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(6), 2523-2555. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00793-4>
- SRTM, The Shuttle Radar Topography Mission. (2014). *USGS SRTM DEM*. NASA. <https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>
- Stein, S., Geller, R. J., Liu, M. (2012). Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it. *Tectonophysics*, 562, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.047>
- Taş, N. (2003). Yerleşim alanlarında olası deprem zararlarının azaltılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fa*
- kültesi Dergisi*, 8(1), 225-231. <https://acikerisim.uludag.edu.tr/items/bfd7c3ae-aa12-4511-a538-af9bc97985ce>
- TÜİK. (1997). *1997 Köy Envanter Etüdü Kayseri*. T.C. Başbakanlık Devlet İstatistik Enstitüsü. <https://kutuphane.tuik.gov.tr/pdf/0014605.pdf>
- TÜİK. (2022). *Bina İstatistikleri*. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Survey-on-Building-and-Dwelling-Characteristics-2021-45870>
- TÜİK. (2024). *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları*. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://biruni.tuik.gov.tr>
- UNISDR, UN Office for Disaster Risk Reduction. (2009). *2009 UNISDR terminology on disaster risk reduction*. UNISDR, Geneva. <http://www.unisdr.org/we/inform/publicaitons/7817>
- WorldPop, (2020)a. *Global Population Density*. University of Southampton. <https://dx.doi.org/10.5258/SOTON/WP00674>
- WorldPop, (2020)b. *Global 100m Age/Sex Structures*. University of Southampton. <https://dx.doi.org/10.5258/SOTON/WP00646>
- Yanis, M., Furumoto, Y. (2019). Lithological identification of devastated area by Pidie Jaya earthquake through Poisson's ratio analysis. *GEOMATE*, 17(63), 210-216. <https://doi.org/10.21660/2019.63.77489>
- Yariyan, P., Zabihi, H., Wolf, I. D., Karami, M., Amiriyan, S. (2020). Earthquake risk assessment using an integrated Fuzzy Analytic Hierarchy Process with Artificial Neural Networks based on GIS: A case study of Sanandaj in Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101705>
- Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353. <https://pdf.sciencedirectassets.com/273276/1-s2.0-S0019995800X00952/1-s2.0-S001999586590241X/main.pdf?X->
- Zhou, J., Huang, S., Wang, M., Qiu, Y. (2022). Performance evaluation of hybrid GA-SVM and GWO-SVM models to predict earthquake-induced liquefaction potential of soil: a multi-dataset investigation. *Engineering with Computers*, 38, 4197-4215. <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01418-3>
- Zhu, Z., Zhang, Y. (2022). Flood disaster risk assessment based on random forest algorithm. *Neural Computing and Applications*, 34, 3443-3455. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05757-6>