

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

Mehmet ALPYÜRÜR 

Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur

Geliş Tarihi (Received): 26.10.2022, Kabul Tarihi (Accepted): 26.12.2022

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author*): malpyurur@mehmetakif.edu.tr

☎ +90 248 2132747 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Bu araştırmada Kayseri kentinin güncel bir sismik tehlike analizi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, 1900'den 2022'e kadar olan sığ kabuk depremlerini içeren ve moment büyüklük ölçeğine dayalı bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Sismik kaynaklar, aktif fay zonları dikkate alınarak homojen alansal kaynak zonları olarak tanımlanmıştır. Her bir sismik kaynak için deprem tehlike parametreleri olarak Gutenberg-Richter parametreleri, Kijko-Smit maksimum olasılıksal tahmini yöntemi ile belirlenmiştir. Kayseri kenti için uygun yer hareketi tahmin denklemlerini bulmak için 17 aday denklem, ortalama log-olasılıksal değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Her bir sismik kaynağın maksimum deprem büyüklüğü, bölgesel kırılma karakteristiğine ve Kijko-Sellevoll yöntemlerine göre hesaplanmıştır. Kayseri kenti için Coğrafi Bilgi Sistemi kullanılarak anakaya seviyesinde Deprem Düzeyi 1 ve Deprem Düzeyi 2 için pik yer ivmesi, 0.2 s ve 1 s periyotlu spektral ivme değerleri hesaplanarak sismik tehlike haritaları geliştirilmiştir. Ayrıca bu araştırma kapsamında, Kayseri kent merkezi için sismik tehlike eğrileri ve üniform tehlike spektrumları oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kayseri, maksimum deprem büyüklüğü, pik yer ivmesi, sismik tehlike analizi, yer hareketi tahmin denklemi

Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Kayseri City

ABSTRACT

In this research, a current seismic hazard analysis for the city of Kayseri was carried out. Accordingly, an earthquake catalog based on the moment magnitude scale was created, which includes shallow crustal earthquakes from 1900 to 2022. Seismic sources are defined as homogeneous areal source zones, taking into account active fault zones. Gutenberg-Richter parameters as earthquake hazard parameters for each seismic source were evaluated using the Kijko-Smit maximum likelihood estimation method. To find the appropriate ground motion prediction equations for the city of Kayseri, 17 candidate equations were evaluated using mean log-likelihood values. The maximum earthquake magnitude of each seismic source was calculated according to regional rupture characteristics and Kijko-Sellevoll methods. Seismic hazard maps for Kayseri city were developed for peak ground acceleration, spectral acceleration with periods of 0.2 and 1 sec and for bedrock with hazard levels of 2% and 10% probability of exceedance in 50 years by using Geographical Information System software. In addition, within the scope of this research, seismic hazard curves and uniform hazard spectrum were created for the city center of Kayseri.

Keywords: Kayseri, maximum earthquake magnitude, peak ground acceleration, seismic hazard analysis, ground motion prediction equation

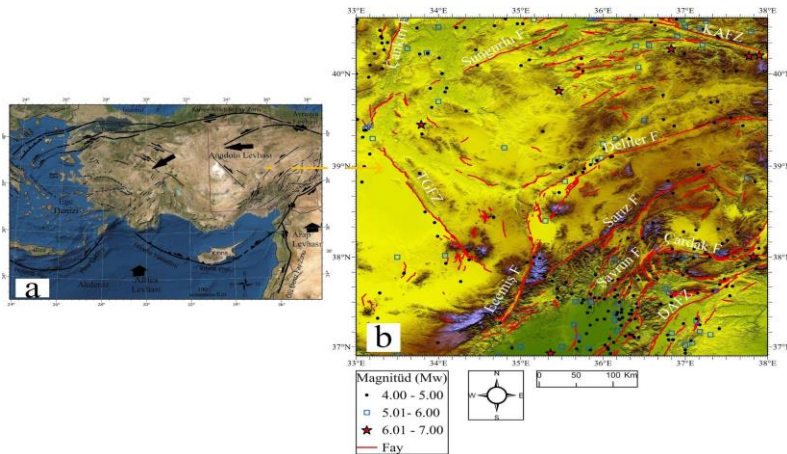
GİRİŞ

Dünyanın birçok bölgesinde meydana gelen yıkıcı depremlerin insanlığa yönelik gerçek tehdidi, yapı ve tesislerin yapımında depremlerin sismik risklerini dikkatle değerlendirmek için yeterli bir nedendir. Gelecekteki deprem etkileri tam olarak belirlenemez, ancak sismik tehlike değerlendirmesinin bir parçası olarak tahmin edilebilirler. Bir depremin olumsuz etkisini azaltmak için önlem almak mümkündür. Sismik tehlike analizi (STA), uygulanacak önlemleri tanımlamada kritik bir rol oynayan belirli bir konumdaki sismik tehlikenin nicel bir değerlendirmesidir. STA ve pik yer ivmesinin (PGA) belirlenmesi, yeni bir yapı için depreme dayanıklı bir tasarım oluşturmak, mevcut önemli bir yapının (örneğin barajlar, köprüler ve nükleer santraller) güvenliğini değerlendirmek ve kentsel mikrobölgelemeyi planlamak için çok önemli ve gereklidir (Gupta, 2002; Kutanis ve ark., 2018; Alpyürür ve Lav, 2021).

Kayseri kenti, Türkiye'nin toplam nüfus bakımından en büyük 14. ve yüzölçümü olarak ise en büyük 8. kentidir. İç Anadolu Bölgesi'nin önemli ticaret ve sanayi kentlerinden biridir. Adrese dayalı nüfus kayıt sistemine göre kentin nüfusu 1.434.357'dir (URL-1, 2022). Kayseri kentinin de bulunduğu Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nin, diğer bölgelere kıyasla büyük veya yıkıcı depremlerin meydana gelmesi açısından önemli bir sismik tehlikeye sahip olmadığı bilinmektedir. Ancak, son yıllarda Kayseri kenti ve çevresinde güçlü depremler meydana gelmiştir. Bunlardan sonuncusu 17.01.2022 tarihinde Sarioğlan'da meydana gelen 4.9 (Mw) büyüklüğündeki deprem olmuştur. Bu nedenle, son zamanlarda meydana gelen büyük depremler nedeniyle, bu bölge için sismik tehlike çalışmaları daha önemli hale gelmiştir.

BÖLGENİN TEKTONİK YAPISI VE DEPREMSELLİĞİ

Türkiye, dünyanın sismik olarak en aktif bölgelerinden biridir. Alp-Himalaya orojenik kuşağında yer alan Türkiye'de çok sayıda can ve mal kaybına neden olan yıkıcı depremler meydana gelmektedir. Türkiye ve komşu bölgelerinin neotektonik gelişimi, Avrasya ve Arap levhaları arasındaki kıtasal yakınlaşma sonucunda kıtasal çarpışma ve takip eden jeolojik süreçlerle yakından ilişkilidir (Şengör ve ark., 1985). Türkiye ve çevresinin jeodinamik düzeninde önemli rol oynayan ana tektonik yapılar, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ), Ölü Deniz Fay Zonu (ÖDFZ) ve Helenik-Kıbrıs yitim zonudur (Bozkurt, 2001). Şekil 1a Türkiye'nin ana tektonik yapılarını göstermektedir (Över ve ark., 2013). Türkiye, depremselliğin yüksek olduğu bir ülke olmasına rağmen, Kayseri kentinin de içinde bulunduğu İç Anadolu Bölgesi, depremsellik açısından nispeten sakin bir bölge olarak kabul edilmektedir. Ancak, Kayseri kenti ve yakın çevresinde hasar yapıcı büyüklükte deprem üretme kapasitesine sahip önemli faylar bulunmaktadır. Bu bölgede Anadolu plakasını daha küçük bloklara bölen ve tüm plakanın tektonik gelişimine katkıda bulunan ikincil fay sistemleri ve fay zonları bulunmaktadır. Bu ikincil fay sistemlerine ve zonlarına örnek olarak sol yanal İç Anadolu fay zonu, sağ yanal doğrultu atımlı bileşenli normal fay zonu olan Tuz Gölü Fay Zonu (TGFZ), İnönü-Eskişehir fay sistemi ve Akşehir fay zonu gösterilebilir. Morfotektonik özellikleri ve mevcut mikro deprem aktivitesi nedeniyle, yaklaşık 220 km uzunluğundaki KB-GD doğrultulu Tuz Gölü Fay Zonu (TGFZ), Orta Anadolu'daki en önemli aktif tektonik unsurlardan biridir ve birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Gezgin ve ark., 2022). Bölgede bulunan faylar Şekil 1b'de gösterilmektedir.



Şekil 1. a. Türkiye'nin ana tektonik yapıları, b. Kayseri ili ve çevresindeki bölgede bulunan faylar

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

MS 240'tan günümüze Erciyes depresyonu ve komşu alanlarda birçok deprem meydana gelmiştir. Bunlardan dördü tarihi olaylardır. Bunlar 240, 1205, 1717 ve 1835 depremleridir ve şiddetleri VIII ve IX olarak bildirilmektedir. MS 240 depreminin kesin yeri ve etkileri hakkında bilgi bulunmamaktadır. Ancak Kayseri'den sırasıyla 190 km ve 280 km uzaklıktaki Sivas ve Malatya illerinde şiddetli hissedildiği bildirilmiştir. 1205 ve 1717 depremlerinin merkez üssü Kayseri'nin hemen güneyinde, 1835 depreminin ise Develi'nin güneyinde yer almaktadır. Hem 1717 hem de 1835 tarihi olayları

orta büyüklükte depremlerdir. 1717'de meydana gelen olayda Güneşli'de 9, Kayseri'de 5300-9000, Erkilet'te 1861 ve Molu'da 170 kişi hayatını kaybetmiştir. Aynı depremde Erkilet'te iki cami ve Kayseri'de bir cami (Ulu Cami) ağır hasar görmüştür. 1717 depreminin artçı sarsıntıları yaklaşık on beş gün devam etmiştir (Koçyiğit ve Erol, 2001). Kayseri kenti ve yakın çevresinde meydana gelen bazı önemli depremler ve detayları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kayseri kenti ve yakın çevresinde meydana gelen önemli depremler

Tarih	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Şiddet	Büyükük	Bölge	Kaynak
240				IX		Kayseri	
1205	38.70K	35.50D		VIII		Kayseri	Koçyiğit
1717	38.70K	35.50D		VIII		Kayseri	ve Erol
1835	38.38K	35.50D		VIII		Develi	(2001)
21.02.1940	38.40K	35.30D	10		5.2 (Ms)	Develi	
31.08.1960	39.09K	35.98D	70		4.7 (Ms)	Sarioğlan	
14.12.1998	39.06K	35.84D	4.3		4.5 (Md)	Sarioğlan	AFAD
14.12.1998	39.04K	35.84D	3.2		4.7 (Md)	Sarioğlan	(URL-2,
12.11.2008	38.86K	35.54D	9.49		4.8 (Ml)	Kocasinan	2022)
02.02.2021	39.12K	36.05D	18.22		4.6 (Mw)	Sarioğlan	
17.01.2022	39.04K	35.90D	20.44		4.9 (Mw)	Sarioğlan	

OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ (OSTA)

Bu çalışmada, Cornell (1968) tarafından önerilen standart olasılık yaklaşımı kullanılmıştır. Cornell (1968)'e göre, depremlerin zaman içindeki oluşumlarının, hafızasız Poisson sürecini izleyen bağımsız olaylar olduğu varsayılmaktadır. Bazı yazılım programları (R-CRISIS, EZ-FRISK, SEISRISK, OpenSHA vb.) sismik tehlikeyi hesaplamak için teknolojik ve metodolojik gelişmelerle üretilmiş ve zaman içinde güncellenmiştir. Bu çalışmada Ordaz ve ark. (2017) tarafından oluşturulan R-CRISIS (v20.0) programı kullanılmıştır.

Sismisite Modeli

Kayseri kenti için gerçekleştirilen OSTA hesaplamalarında Poisson oluşumları ile ilişkilendirilen Modifiye Gutenberg-Richter sismisite modeli uygulanmıştır. Poisson süreci, önümüzdeki t yıllarında yoğunluğun bir eşiği aşma olasılığını şu şekilde tahmin eder:

$$Pr(t) = 1 - \exp[-v(a)t] \quad (1)$$

burada $v(a)$, a yoğunluğunun aşılma frekansdır. Modifiye Gutenberg-Richter sismisite modeline göre, seçilen konumdan bir r hiposantr mesafesinde M büyüklüğünde bir olayın meydana geldiği varsayıldığında, gelecekteki t yılda tehlike yoğunluğunun bir eşiği aşma olasılığı aşağıdaki denklemle tahmin edilir:

$$P_E(M, r) = 1 - \exp[-\Delta\lambda(M)t.p_1(M, r)] \quad (2)$$

burada, $p_1(M, r)$ ilgili noktadan r hiposantr mesafesinde M büyüklüğünde bir deprem meydana geldiğini varsayarak, a tehlike yoğunluğunun aşılma olasılığıdır. $\Delta\lambda(M)$, M büyüklüğü tarafından tanımlanan ve aşağıdaki gibi hesaplanan büyüklük aralığı ile ilgili Poissonian büyüklük aşım frekansdır:

$$\Delta\lambda(M) = \lambda\left(\frac{M-\Delta M}{2}\right) - \lambda\left(\frac{M+\Delta M}{2}\right) \quad (3)$$

Modifiye Gutenberg-Richter modeline göre (Cornell ve Vanmarcke, 1969), M deprem büyüklüğünün aşılma frekansı aşağıdaki denklem ile verilmektedir:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{\exp(-\beta M) - \exp(-\beta M_{maks})}{\exp(-\beta M_{min}) - \exp(-\beta M_{maks})}, M_{min} \leq M \leq M_{maks} \quad (4)$$

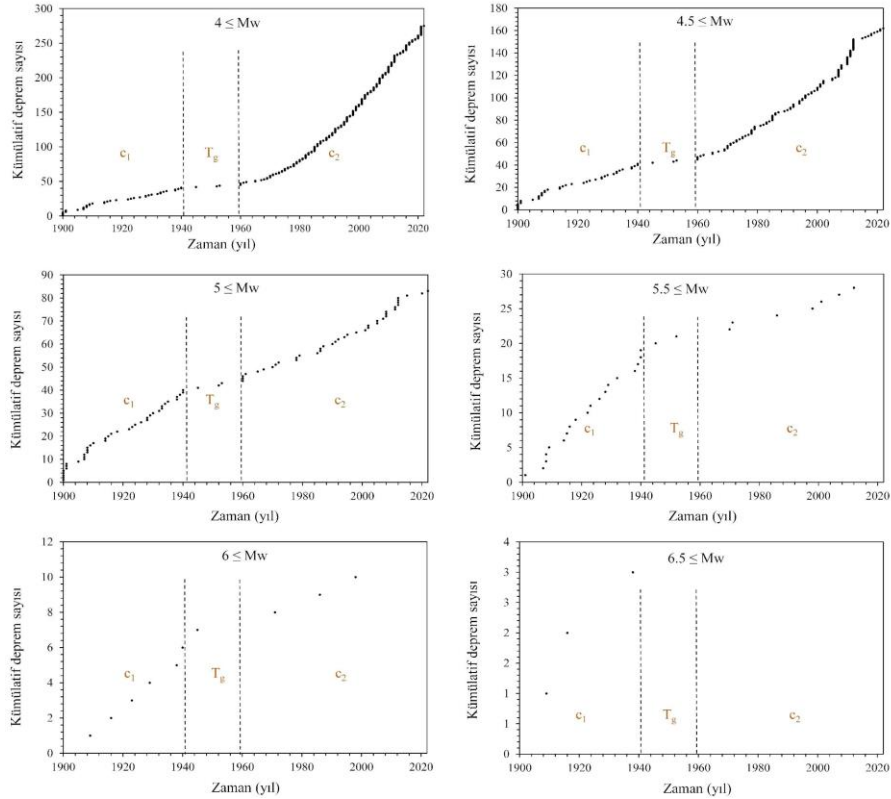
Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

λ_0 eşik deprem büyüklüğü M_{min} 'in aşılma frekansı, β ise 'b' değerinin doğal logaritmasına eşit bir sismisite parametresidir ve M_{maks} sismik kaynak için beklenen maksimum deprem büyüklüğüdür.

Deprem Verileri, Alt Kataloglar ve Tamlık Büyüklükleri

Bu OSTA'yı tamamlamaya yönelik ilk adım olarak aletsel dönem depremlerini içeren İç Anadolu Bölgesi için yeni, güncellenmiş, homojenleştirilmiş ve ayrıştırılmış bir deprem kataloğu geliştirilmiştir. 1900'den 2012 yılına kadar moment büyüklüğü 4'e eşit veya büyük 232 depremi içeren aletsel dönem kayıtları, Kadıroğlu ve ark. (2018) tarafından hazırlanan homojen ve ayrıştırılmış katalogdan derlenmiştir. 2013-2022 deprem verileri Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) veri tabanından elde edilmiştir. 36.9°K ile 40.6°K enlemleri ve 33°D ile 38°D boylamları arasındaki bölgeyi kapsayan sığ ($h \leq 70$ km) depremlerin bir kataloğu derlenmiştir. KRDAE orijinal deprem veri tabanında uzay ve zamanda bağımsız bir dağılım (belleksiz süreç) izleyen Poisson süreci ile çelişen birçok bağımlı oluşum (ön ve artçı depremler) vardır. Bu depremler Deniz (2006)'nın

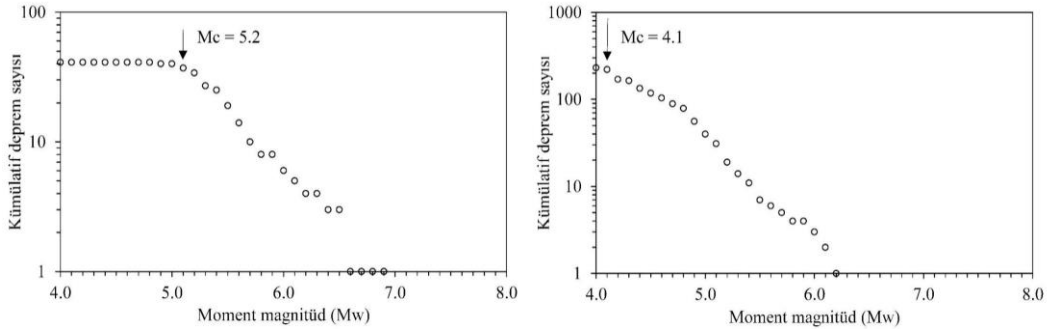
geliştirdiği ayrıştırma yöntemi kullanılarak katalogdan çıkarılmıştır. Sonuç olarak bu dönem için 43 deprem verisi elde edilmiştir. Büyüklük ölçeği homojenliğini sağlamak için çeşitli büyüklük ölçekleri, Akkar ve ark. (2010) tarafından geliştirilen ve Türkiye ulusal kuvvetli yer hareketi ağı tarafından kaydedilen kuvvetli hareket verilerinden elde edilen korelasyonlar kullanılarak moment büyüklüğüne (M_w) dönüştürülmüştür. OSTA'nın temel bir parçası, önemli bir zaman dilimini kapsayan tam bir deprem kataloğu derlenmesidir. Bir deprem kataloğu tam olmadığında, sismik kaynakların sismisite parametreleri yanlış tahmin edilir. Homojenleştirilmiş ve ayrıştırılmış katalogun tam olup olmadığı kontrol edilir ve katalogların tam parçaları belirlenir. Her bir sismik kaynağın sismisite parametrelerini değerlendirmek için verilerin tam bölümleri incelenir. Katalogun tam kısımlarını belirlemek için bu çalışmada Tinti ve Mulargia (1985) tarafından geliştirilen "Kümülatif Görsel İnceleme" (Cumulative Visual Inspection-CUVI) yöntemi kullanılmıştır. Bu teknikle, yıllık kümülatif deprem sayıları, her bir büyüklük aralığı için yıl cinsinden meydana gelme zamanına karşı çizilir ve her bir büyüklük aralığının tamlık periyodu, Şekil 2'de gösterildiği gibi grafiğin keskin bir tırmanış gösterdiği yıl dik-kate alınarak hesaplanır.



Şekil 2. Tüm katalogun CUVI yöntemi ile incelenmesi

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

Tüm kataloğun ayrıntılı bir incelemesinin ardından, katalog iki alt kataloğa ayrılmıştır (c1 ve c2). 1941 ve 1959 yılları arasında deprem kayıtlarının eksik olduğu görülmüş ve bundan dolayı bu 18 yıllık dönem bir 'zaman aralığı' (time gap, Tg) olarak kabul edilmiştir (Şekil 2). Tamlık büyüklükleri ise c1 ve c2 alt katalogları için sırasıyla 5.2 ve 4.1 olarak Şekil 3'teki gibi hesaplanmıştır.



Şekil 3. Alt kataloglar için tamlık büyüklüklerinin belirlenmesi

6 sismik alan kaynağının sismisite parametreleri, deprem büyüklüğü ile oluşma sıklığı arasında üstel bir dağılım öngören Gutenberg-Richter (1944) tekrarlanma kuralına göre belirlenmiştir. Ortalama yıllık aşım sıklığı açısından standart Gutenberg-Richter kuralı aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\text{Log}(\lambda_M) = a - bM_0 \quad (5)$$

burada λ_M , kaynak için seçilen M_0 eşik büyüklüğüne eşit veya daha yüksek olan yıllık ortalama deprem sayısıdır (birimler 1/yıldır). Kaynağın sismik aktivitesi ile ilişkili 'a' değeri ve sismik kaynaktaki deprem büyüklük dağılımı ile ilgili olan 'b' değeri sismisite katsayılarıdır. λ_M alternatif olarak Denklem 6'daki gibi ifade edilebilir:

$$\lambda_M = \exp(\alpha - \beta M_0) \quad (6)$$

burada $\alpha = 2.303 a$ ve $\beta = 2.303 b$ 'dir. b değerini hesaplamak için başka yöntemler de vardır, ancak deprem büyüklüğünü sürekli bir rastgele değişken olarak kabul eden Aki-Utsu yöntemi (Aki 1965; Utsu 1965) sıklıkla tercih edilmektedir. Araştırmacılar b değerinin maksimum olabilirlik tahminini aşağıdaki denklem ile elde etmiştir:

$$\beta = \frac{1}{\bar{m} - m_c} \quad (7)$$

Sismik Kaynak Bölgelerinin Modellenmesi ve Sismik Tehlike Parametrelerinin Hesaplanması

Türkiye'nin tektonik yapılarının karmaşık doğası nedeniyle, sismik kaynakları farklı fay hatları olarak belirlemek zordur. Bu nedenle, sismik kaynaklar bu araştırma bağlamında alan kaynakları olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, bölgenin sismisitesini değerlendirmek için 6 sismik alan kaynak, faylar ve deprem oluşumları dikkate alınarak oluşturulmuştur. İç Anadolu Bölgesi için OSTA'da kullanılan sismik alan kaynak bölgelerinin konfigürasyonu Şekil 4'te gösterilmiştir.

burada \bar{m} deprem büyüklüklerinin ortalamasıdır. Kijko ve Smit (2012) deprem kataloğunu değişen tamlık büyüklüklerine (m_c) sahip alt kataloglara bölerek ve klasik Aki-Utsu denklemini değiştirerek hem eksik hem de tam deprem verilerinden Gutenberg-Richter b değerinin yeni bir maksimum olabilirlik denklemini Denklem 8'deki gibi geliştirmiştir.

$$\hat{\beta} = \left(\frac{r_1}{\beta_1} + \frac{r_2}{\beta_2} + \dots + \frac{r_s}{\beta_s} \right)^{-1} \quad (8)$$

burada $r_i = n_i/n$; $n = \sum_i n_i$ büyüklükleri ilgili tamlık büyüklüklerine (m_c) eşit veya daha büyük olan olayların toplam sayısıdır ve $\hat{\beta}_i$ değerleri, her bir alt katalog i ($i = 1, \dots, s$) için hesaplanan klasik Aki-Utsu β değerleridir. Denklem 7'deki klasik Aki-Utsu formülünü kullanarak β değeri belirlendikten sonra, büyüklükleri m_c veya daha büyük olan olaylar için ortalama sismik aktivite oranını (λ) hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılabilir:

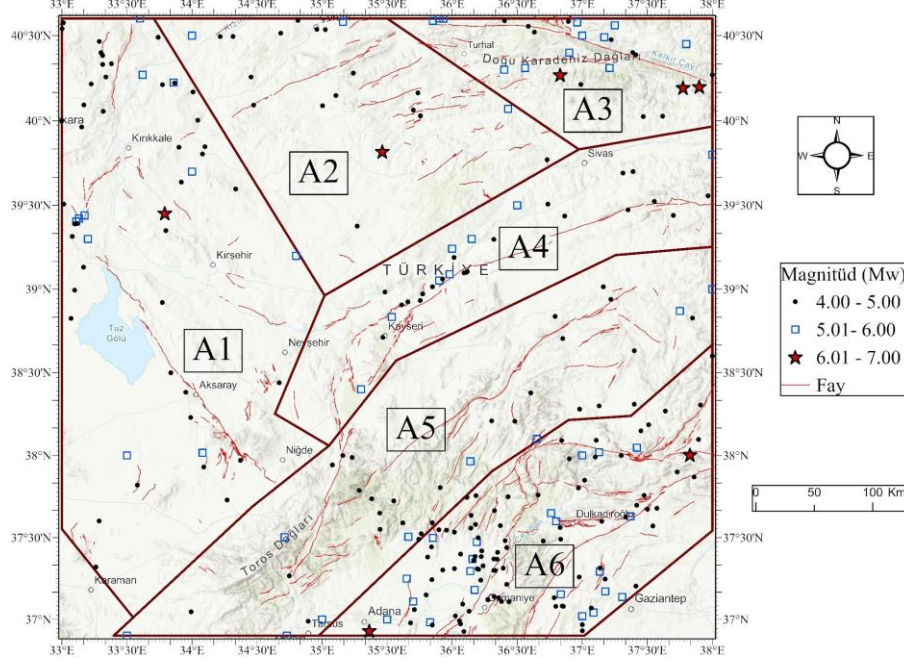
$$\hat{\lambda}(m_c) = \frac{n}{\sum_{i=1}^s t_i \exp[-\hat{\beta}(m_c - m_c)]} \quad (9)$$

Tam bir katalog için, genelleştirilmiş Aki-Utsu $\hat{\beta}$ değeri tahmincisi (Denklem 8) klasik Aki-Utsu β değeri tahmincisine (Denklem 7) karşılık gelir ve $\lambda(m_c)$ değeri

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

standart n/t biçimine sahip olur (Kijko ve Smit, 2012) 6 sismik alan kaynağının Gutenberg – Richter b değeri ve ortalama sismik aktivite hızının (λ) hesaplanması için Prof. Kijko tarafından oluşturulan MATLAB kodu

(Kijko 2016) kullanılmıştır. OSTA için tanımlanan sismik kaynak bölgeleri ve bunların sismisite parametreleri Tablo 2’de listelenmiştir.



Şekil 4. OSTA için oluşturulan sismik alan kaynakları

Tablo 2. Sismik kaynaklar ve sismisite parametreleri

Kaynak	Tektonik	m_c	Lambda (λ)	Beta (β)
A1	Tuzgölü FZ, Karakeçili FZ, Çankırı F, Bala F, Akpınar F	4.1	0.837±0.222	2.26±0.27
A2	Merzifon- Esençay FZ, Sungurlu F, Kazankaya F, Çekerek F, Akmağdeni F	4.1	0.265±0.088	2.04±0.21
A3	KAFZ'nun Suşehri, Reşadiye ve Ezinepazar segmentleri, Almus F, Gökçe F	4.1	0.403±0.126	1.52±0.19
A4	Deliler F, Erciyes F, Ertiket FZ, Yuvalı F, Divriği F	4.1	0.383±0.116	1.35±0.21
A5	Ecemiş F, Sarız F, Aladağ F, Saimbeyli F, Beyyurdu F	4.1	0.563±0.154	1.35±0.20
A6	Ölüdeniz FZ'nun Narlı, Sakçagöz, ve Yesemek segmentleri, DAFZ'nun Erkenek ve Pazarlık segmentleri, Düziçi-İskenderun FZ, Karataş F, Yumurtalık F, Toprakkale F, Savrun F, Çardak F,	4.1	1.402±0.322	2.15±0.17

Maksimum Olası Deprem Büyüklüğünün Belirlenmesi (M_{maks})

M_{maks} , herhangi bir sismik tehlike hesaplamasında dikkate alınması gereken önemli bir parametredir ve bir sismik kaynak için frekans-büyükölük dağılımının üst

kesme büyüklüğü olarak tanımlanır (Mueller, 2010). Maksimum büyüklükte, M_{maks} 'ta keskin bir kesme büyüklüğü olduğu varsayılır, böylece büyüklükleri M_{maks} 'tan büyük olan hiçbir deprem beklenmez. Bir sismik kaynağın maksimum depremi, fay uzunluğu, fay alanı veya fay kayma hızı gibi fiziksel parametrelerle

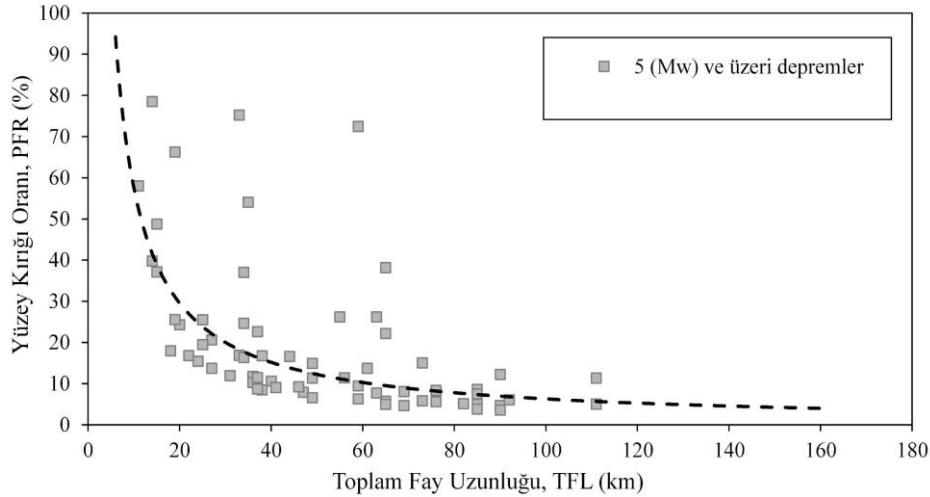
Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

ampirik korelasyonların yanı sıra sismik geçmişe dayalı istatistiksel yöntemler kullanılarak hesaplanabilir. Ancak M_{maks} değerini hesaplamak için evrensel olarak kabul edilmiş bir yöntem yoktur (Kijko ve Singh, 2011). Anbazhagan ve ark. (2015), bölgesel kırılma karakteristiğini dikkate alarak maksimum deprem büyüklüğünü (M_{maks}) tahmin etmek için bir yöntem geliştirmiştir. Moment büyüklükleri (M_w) 5 ve üzeri olan geçmiş hasarlı depremler ve bunlarla ilişkili sismik kaynağın kırılma uzunlukları arasında parametrik çalışmalar yaparak bir bölgenin kırılma karakteristiğini değerlendirmiştir. Bölgesel kırılma karakteristiğini, kırılma uzunluğunun (RLD) toplam fay uzunluğuna (TFL) oranı olan fay kırılma yüzdesini (PFR) dikkate alarak tanımlamıştır. PFR'yi TFL'ye karşı çizdiklerinde, PFR'nin TFL ile benzersiz bir trend izlediğini ve bölgede farklı sismik kaynaklar için benzer olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yayınlarında önerilen yöntemin ayrıntılı bir açıklamasını vermiştir. Bu yöntem farklı bölgeler için sismik tehlikenin değerlendirildiği çalışmalarda başarıyla kullanil-

miştir (Alpyürür ve Lav, 2022). Bu çalışmada, Anbazhagan et al. (2015) metodolojisi izlenerek İç Anadolu Bölgesi'nin kırılma karakteristiği incelenmiştir. Her bir deprem ve ilişkili kaynağı belirlenmiş ve geçmiş depremlerden kaynaklanan kırılma uzunluğu, Denklem 10'da verilen Wells ve Coppersmith (1994) bağıntısı kullanılarak tahmin edilmiştir.

$$\text{Log}(RLD) = 0.59M_w - 2.44 \quad (10)$$

Bölgedeki toplam fay uzunlukları Emre ve ark. (2018) tarafından hazırlanan Türkiye aktif fay veritabanından alınmıştır. Araştırmacılar, her bir faya ait fay mekanizması, aktivite, uzunluk, trend, eğim ve derinlik gibi temel parametrelerin bulunduğu kapsamlı bir fay veritabanı oluşturmuştur. İç Anadolu Bölgesi'nin kırılma karakteristiği, Şekil 5'te verilen PFR'ye karşı TFL grafiği dikkate alınarak incelenmiştir.



Şekil 5. PFR vs. TFL bağlamında bölgenin kırılma karakteristik eğrisi

Her bir sismik kaynak için, en kötü senaryo depremi için PFR, ortalama PFR'nin beş katı olarak alınmış ve ilgili kaynağın maksimum büyüklüğü tahmin edilmiştir. Sismik kaynaklar için M_{maks} değerlerinin 6.6 ila 6.9 M_w aralığında değiştiği bölgesel kırılma karakteristiği yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, sismik kaynakların maksimum deprem büyüklükleri istatistiksel bir yöntem olan Kijko ve Sellevoll (1989) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar, Denklem 11'de verilen iki taraftan kesilmiş Gutenberg-Richter denklemini kullanarak bir M_{maks} tahmincisi önermiştir:

$$M_{maks} = M_{maks}^{obs} + \frac{E_1(n_2) - E_1(n_1)}{\beta \exp(-n_2)} + M_{min} \exp(-n) \quad (11)$$

Burada M_{maks}^{obs} sismik kaynakta gözlemlenen en büyük deprem büyüklüğünü ifade etmektedir. $n_1 = n / \{1 - \exp[-\beta(M_{maks} - M_{min})]\}$, $n_2 = n_1 \{ \exp[-\beta(M_{maks} - M_{min})] \}$, n değeri M_{min} e eşit veya daha büyük depremlerin toplam sayısı ve $E_1(.)$ ise $E_1(z) = \frac{z^2 + a_1 z + a_2}{z(z^2 + b_1 z + b_2)} \exp(-z)$ olarak hesaplanabilen bir üstel integral fonksiyonunu belirtir. Bu denklemde $a_1 = 2.334733$, $a_2 = 0.250621$, $b_1 = 3.330657$ ve $b_2 = 1.681534$ 'dir (Abramowitz ve Stegun, 1970). Türkiye'de olduğu gibi dünya çapında da yapılan olasılıksal sismik tehlike çalışmasında, maksimum olası deprem büyüklüğünü tahmin etmek için Kijko ve Sellevoll (1989) yöntemini kullanmıştır. Bu çalışmada, her bir sismik kaynak için M_{maks} değerleri Denklem 11'in

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

iteratif çözümünden elde edilmiştir. Kijko ve Sellevoll (1989) istatistiksel yöntemi kullanılarak sismik kaynakların maksimum deprem büyüklüğünün 5.7 ile 7.0 M_w aralığında değiştiği hesaplanmıştır. Ayrıca Prof. Kijko tarafından hazırlanan MATLAB kodu kullanılarak Kijko-Sellevoll-Bayes (2004) yöntemi ile M_{maks} değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntem ile hesaplanan M_{maks} değerlerinin ise 5.8 ile 7.8 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Farklı yöntemler kullanılarak hesaplanan M_{maks} değerleri, belirli bir yöntem ile değerlerin doğru tahminindeki belirsizlik nedeniyle, sismik tehlikenin değerlendirilmesi için bir mantık ağacı yapısı ile kullanılmıştır. Üç farklı yöntemden elde edilen M_{maks} değerleri, her üç yöntemin de yaklaşık olarak eşit ağırlıkta olduğu bir mantık ağacı yapısı benimsenerek sismik tehlike analizinde kullanılmıştır. Kullanılan farklı yöntemlerle hesaplanan sismik alan kaynak bölgelerinin maksimum deprem büyüklükleri Tablo 3'te verilmiştir.

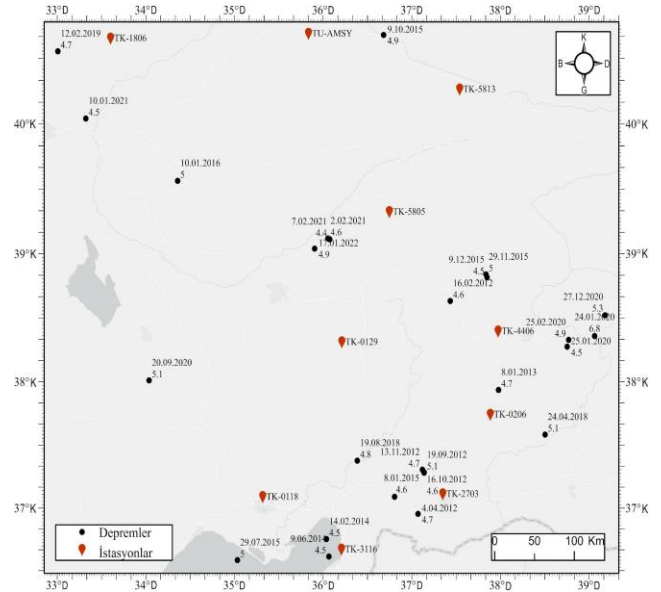
Tablo 3. Farklı yöntemler ile hesaplanan maksimum deprem büyüklükleri (M_{maks})

Sismik kaynak	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Gözlemlenen maksimum büyüklük	6.5	6.3	6.9	5.7	5.7	6.2
Kijko-Sellevoll (1989)	6.6	6.5	7.0	5.7	5.7	6.2
Kijko-Sellevoll-Bayes (2004)	7.2	7.8	7.7	5.8	5.8	6.4
Bölgesel kırılma karakteristiğine dayalı	6.8	6.7	6.9	6.6	6.7	6.7

Bu çalışmada, İç Anadolu Bölgesi için en iyi YHTD'leri belirlemek amacıyla ortalama log-olabilirlik değeri (LLH) kullanılarak bir "etkinlik testi" yapılmıştır. Bölge için en iyi performans gösteren YHTD'leri belirlemek amacıyla PGA değerlerine dayalı ortalama LLH değeri yöntemi kullanılmıştır. Farklı zaman ve lokasyonlarda meydana gelen, moment büyüklüğü 4.4'ten büyük 26 deprem dikkate alınmıştır. Bu 26 depreme ait 10 farklı istasyondan elde edilen toplam 73 sismometre kaydı için hiposantr uzaklığı-PGA değeri verileri doğrudan AFAD veritabanındaki (URL-3, 2022) sismometre ölçümlerinden elde edilmiştir. Sismik tehlike analizinde anakaya seviyesi dikkate alındığı için YHTD'lerin anakaya koşullarındaki davranışı dikkate alınarak bir uygun YHTD seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sadece anakaya koşullarını ifade eden EuroCode A zemin sınıfı (Yüzeydeki en fazla 5 m kalınlıktaki zayıf malzemeler de dahil olmak üzere, kayaç veya kayaç benzeri jeolojik formasyonlar, $V_{s30} > 800$ m/s) üzerinde kurulu istasyonların ölçümlerinden elde edilen 73 adet sismometre kaydı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan depremlerin episantr dağılımı ve ölçüm alınan AFAD ivmeölçer istasyonlarının konumları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Bölge İçin Uygun Yer Hareketi Tahmin Denklemlerinin (YHTD) Seçilmesi

Geçtiğimiz elli yılda PGA ve lineer elastik tepki spektral koordinatlarının tahmini için çok sayıda YHTD geliştirilmiştir. Sismik tehlike analizlerinde, belirli bir bölge için hangi YHTD kullanılacağını belirlemek dikkat gerektiren zor bir konudur. Uygun YHTD'lerin seçilmesi, herhangi bir sismik tehlike değerlendirmesinde önemli bir adımdır, çünkü elde edilen sonuçlar seçilen YHTD'lere oldukça bağlıdır (Stewart ve ark., 2015). Belirli bir bölgenin sismik riskinin değerlendirilmesi için geliştirilen YHTD modellerinin artan miktarı ve karmaşıklığı nedeniyle bu modelleri seçmek ve sıralamak için etkin, nicel ve sağlam bir tekniğe açıkça ihtiyaç duyulmaktadır (Delavaud ve ark., 2009). Bu amaçla Scherbaum ve ark. (2009), incelenen modeller için gözlemlenen log-olabilirlik (log-likelihood, LLH) istatistiksel beklentisinden hesaplanan Kullback-Leibler sapsamasına dayalı olarak YHTD seçimi için bir bilgi-teorik perspektif oluşturmuştur.



Şekil 6. YHTD seçiminde kullanılan depremlerin episantr dağılımı ve ölçüm alınan AFAD ivmeölçer istasyonlarının konumları

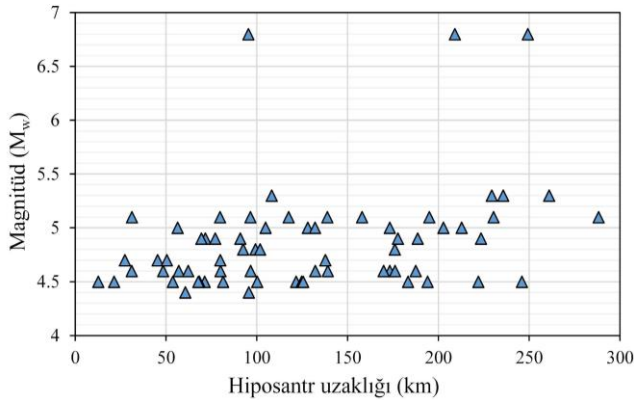
Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

Şekil 7, İç Anadolu Bölgesi'nde YHTD seçimi için kullanılan gözlemlenmiş deprem verilerin büyüklük-hiposantr uzaklık dağılımını göstermektedir. Şekilde verilen her büyüklük ve hiposantr uzaklığı verisi için, gözlemlenen ile tahmin edilen verileri değerlendirebilmek amacıyla her aday YHTD'den PGA değerleri hesaplanmıştır. Bu tahmin edilen PGA verileri ile istasyon ölçümlerinden elde edilen gözlemlenmiş PGA verileri birlikte değerlendirilerek her aday YHTD için veri destek indeksi (data support index, DSI), sıra (rank) ve ağırlıkları (w) belirlemek için kullanılan LLH değerleri hesaplanmıştır.

Kullback-Leibler (KL) sapması, bir referans modeli f 'ye yaklaşmak için bir model g kullanıldığında meydana gelen bilgi kaybını ifade eden bir terimdir. İki model arasındaki KL sapması, aşağıdaki denklem gibi olasılık yoğunluk fonksiyonları f ve g arasındaki fark olarak tanımlanabilir:

$$D(f, g) = E_f[\log_2(f)] - E_f[\log_2(g)] \quad (12)$$

burada E_f , f ile ilgili istatistiksel beklentiyi belirtir. YHTD seçimi durumunda f , veri oluşturma sürecini (doğa) temsil eder ve yalnızca gözlemlerle bilinir. Sonuç olarak, f 'nin öz bilgisi olarak da bilinen $E_f[\log_2(f)]$ terimi hesaplanamaz (model karşılaştırmasından çıkar). Bununla birlikte, diğer terim $-E_f[\log_2(g)]$ gözlemler yoluyla yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Sonuç olarak, aday modelleri karşılaştırmak amacıyla, g modelinin Log-Olabilirliği (LLH), Delavaud ve ark. (2012) tarafından verilen Denklem 13 kullanılarak belirlenebilir.



Şekil 7. YHTD seçiminde kullanılan depremlere ait büyüklük ve hiposantr uzaklığı verileri

$$LLH(g, x) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(g(x_i)) \quad (13)$$

burada x_i , $i = 1, 2, \dots, N$ gözlemlenen verilerdir ve $g(x_i)$, model g 'nin x_i gözlemini üretme olasılığıdır. Düşük bir LLH değeri, aday modelin verileri üreten modele yakın olduğunu gösterirken, yüksek bir LLH değeri, aday modelin verileri oluşturma olasılığının daha düşük olduğunu gösterir (Delavaud ve ark., 2012). Bu çalışmada, Türkiye'de meydana gelen depremler de dahil olmak üzere Avrupa ve küresel veri setleri ile geliştirilen 17 aday YHTD seçilmiş ve LLH yaklaşımı kullanılarak İç Anadolu Bölgesi için en uygun olanları belirlenmiştir. LLH yönteminin uygulanmasında, moment büyüklüğü 4.4'ten büyük depremlerden elde edilen PGA verileri kullanılmıştır. Her bir YHTD modeli için, bir modelin ne kadar veri desteklediğini (pozitif DSI) veya reddettiğini (negatif DSI) gösteren Veri Destek Endeksi (DSI) belirlenmiştir. Modelin (g_i) ağırlığı (w_i), Denklem 14'teki gibi ortalama LLH değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

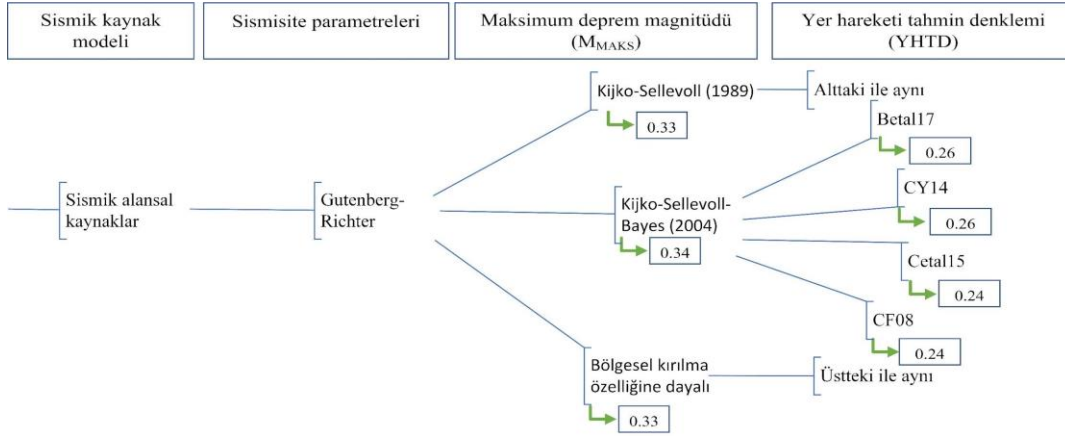
$$w_i = \frac{2^{-LLH(g_i, x)}}{\sum_{k=1}^n 2^{-LLH(g_k, x)}} \quad (14)$$

n , uygulanabilir YHTD'lerin sayısıdır. Bir YHTD modelinin ağırlığı hesaplandıktan sonra, YHTD'nin DSI değeri Denklem 15 ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$DSI_i = 100 \frac{w_i - w_{unif}}{w_{unif}} \quad (15)$$

burada $w_{unif} = 1/n$, her YHTD'nin üniform ağırlığıdır. Tablo 4, İç Anadolu Bölgesi için LLH, DSI ve YHTD'lerin sıralamalarını göstermektedir. Tabloda gösterildiği gibi, Beta17, CY14, Cetal15, CF08, CB14, BSSA14, Detal16 ve I14 modelleri sırasıyla artan LLH değerlerine ve azalan pozitif DSI değerlerine sahiptir. Kalan modeller negatif DSI değerlerine sahiptir ve bu noktada elenmiştir. YHTD'lerin DSI değerleri, sıralamada ilk dörde giren Beta17, CY14, Cetal15 ve CF08 modellerinden sonra önemli ölçüde düşmektedir. Belirli bir sismik kaynak için kuvvetli yer hareketi tahmini ile ilgili epistemik belirsizliklerle başa çıkmak için, dal ağırlıkları ile uygun sayıda YHTD içeren bir mantık ağacı modeli kullanmak, sismik tehlike değerlendirmelerinde sıklıkla kullanılan bir yaklaşımdır. Bu nedenle, Delavaud ve ark. (2012) yöntemi ile hesaplanan ağırlıklarına (w_i) dayalı olarak, Beta17, CY14, Cetal15 ve CF08 modelleri için sırasıyla 0.26, 0.26, 0.24 ve 0.24 dal ağırlıkları ile İç Anadolu Bölgesi için Şekil 8'deki mantık ağacı yapısı oluşturulmuştur.

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi



Şekil 8. Olasılıksal sismik tehlike analizinde kullanılan mantık ağacı yapısı

Tablo 4. YHTD seçiminde kullanılan depremler

YHTD	Kısaltması	LLH	DSI	w	Rank
Bindi ve ark. (2017)	Betal17	1.626	45.341	0.085	1
Chiou ve Youngs (2014)	CY14	1.637	44.237	0.085	2
Cauzzi ve ark. (2015)	Cetal15	1.721	36.078	0.080	3
Cauzzi ve Faccioli (2008)	CF08	1.728	35.420	0.080	4
Campbell ve Bozorgnia (2014)	CB14	1.813	27.672	0.075	5
Boore ve ark. (2014)	BSSA14	1.946	16.428	0.068	6
Derras ve ark. (2016)	Detal16	2.040	9.084	0.064	7
Idriss (2014)	I14	2.124	2.914	0.061	8
Bindi ve ark. (2011)	Betal11	2.169	-0.247	0.059	9
Abrahamson ve ark. (2014)	ASK14	2.211	-3.109	0.057	10
Chiou ve Youngs (2008)	CY08	2.274	-7.249	0.055	11
Boore ve Atkinson (2008)	BA08	2.391	-14.474	0.050	12
Idriss (2008)	I08	2.546	-23.186	0.045	13
Akkar ve Bommer (2007)	AB07	2.548	-23.293	0.045	14
Akkar ve Bommer (2010)	AB10	2.695	-30.724	0.041	15
Campbell ve Bozorgnia (2008)	CB08	3.335	-55.544	0.026	16
Yenier ve Atkinson (2015)	YA15	3.464	-59.347	0.024	17

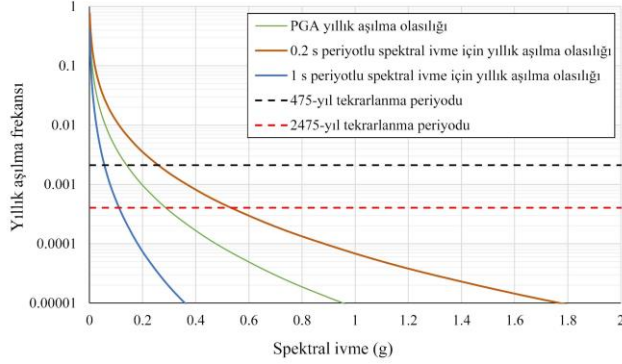
BULGULAR

Ordaz ve ark. (2017) tarafından geliştirilen R-CRISIS (v20.0) bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilen Kayseri kenti olasılıksal sismik tehlike analizleri sonucunda 50 yılda aşılma olasılığı %2 ve %10, tekrarlanma periyodu sırasıyla 2475 yıl ve 475 yıl, olan deprem tehlikesini ifade eden Deprem Düzeyi 1 ve Deprem Düzeyi 2 için çeşitli tehlike eğrileri ve haritaları hazırlanmıştır. Bu amaçla, Kayseri kentinin sismik tehlike haritalarının hazırlanması için $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ boyutlarında grid yapısı oluşturulmuştur. Etrafındaki tüm sismik kaynak bölgeleri dikkate alınarak her bir grid için sismik tehlike parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen tehlike parametrelerinin konumsal analizleri için bir coğrafi bilgi sistemi (CBS) yazılımı olan ArcGIS Pro (v2.9.0)

kullanılmıştır. Tehlike parametrelerinin enterpolasyonu için, yazılımın yerleşik bir aracı olan ve geçerli kriging modellerinin oluşturulmasını sağlayan bir jeostatistiksel enterpolasyon yöntemi kullanan Ampirik Bayesian Kriging (EBK) aracı uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, Kayseri kenti için genel sismik tehlike haritalarının hazırlanmasına ek olarak Kayseri kent merkezi için sismik tehlike eğrileri ve üniform tehlike spektrumları elde edilmiştir. Kayseri kent merkezi anakaya seviyesi için PGA ve $T=0.2$ s ve $T=1.0$ s periyotlu spektral ivmeler ile ilişkili yıllık aşılma frekansı olarak tanımlanan sismik tehlike eğrileri İç Anadolu Bölgesi'ndeki tüm sismik kaynakların katkıları dikkate alınarak Şekil 9'da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Kayseri kent merkezi için PGA, $T=0.2$ s ve $T=1$ s periyotlu spektral ivmeler DD1 için sırasıyla 0.287 g, 0.537 g ve 0.111 g olarak

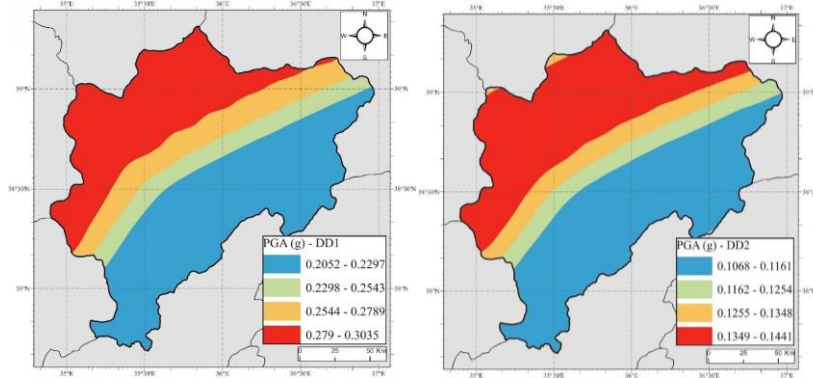
Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

hesaplanırken DD2 için sırasıyla 0.141 g, 0.259 g ve 0.057 g olarak elde edilmiştir.

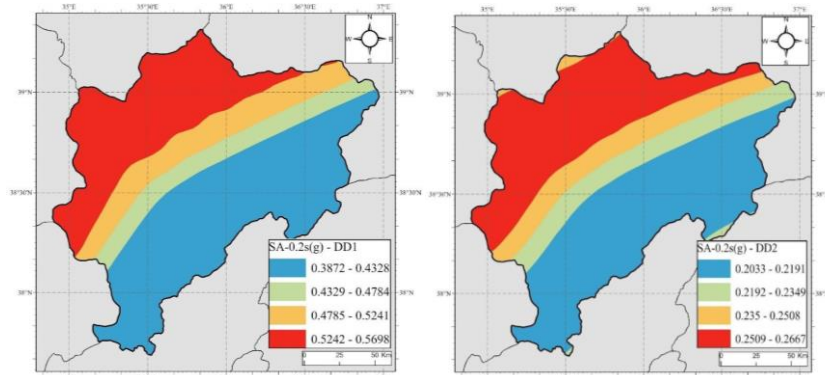


Şekil 9. Kayseri kent merkezi ana kaya seviyesi PGA, T=0.2s ve T=1s spektral periyotları için sismik tehlike eğrileri

50 yılda aşılma olasılığı %2 ve %10 olan deprem tehlikesini dikkate alarak anakaya seviyesi için geliştirilen PGA, T=0.2 s ve T=1 s periyotlu spektral ivmeler ile ilişkili sismik tehlike haritaları Şekil 10'da gösterilmektedir.



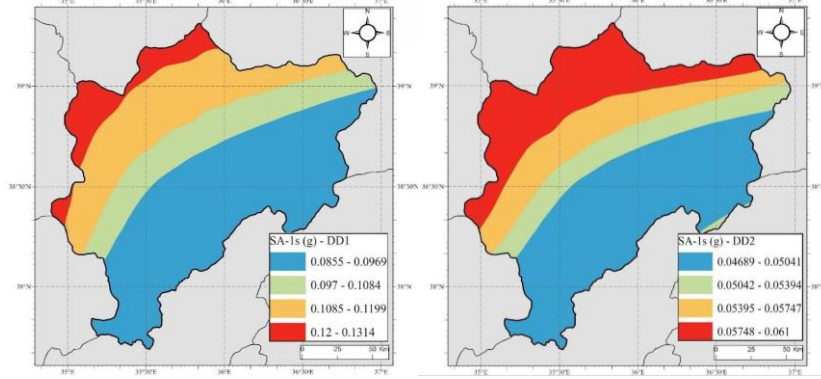
Şekil 10. Kayseri kenti DD1 ve DD2 için anakaya seviyesinde PGA için oluşturulan sismik tehlike haritaları



Şekil 11. Kayseri kenti DD1 ve DD2 için anakaya seviyesinde kısa periyot (T = 0.2 s) tepki spektral ivmeleri için oluşturulan sismik tehlike haritaları

2475 ve 475 yıllık tekrarlanma periyodu için hazırlanan sismik tehlike haritalarına göre Kayseri kenti anakaya sahaları için PGA değerlerinin DD1 için 0.2052 g - 0.3035 g, DD2 için ise 0.1068 g - 0.1441 g aralığında değiştiği belirlenmiştir. PGA değerlerinin hesaplanmasına ek olarak, sismik tehlikenin azaltılmasında ve depreme dayanıklı yapıların tasarlanmasında spektral tepki ivmelerinin belirlenmesi de önemlidir. Özellikle deprem mühendisliği uygulamaları için hazırlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) de dahil olmak üzere birçok tasarım kodunda kısa periyotlu (T = 0.2 s) ve uzun periyotlu (T=1 s) tepki spektral ivme değerleri önemlidir. Bu nedenlerle, kısa periyot (T = 0.2s) ve uzun periyot (T=1s) tepki spektral ivme değerlerinin dağılımını göstermek için Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilen tehlike haritaları oluşturulmuştur. DD1 ve DD2 için hazırlanan sismik tehlike haritalarına göre Kayseri kenti anakaya sahaları için kısa periyot spektral ivme değerlerinin DD1 için 0.3872 g - 0.5698 g, DD2 için ise 0.2033 g - 0.2667 g aralığında değiştiği belirlenmiştir. Uzun periyot spektral ivme değerlerinin ise DD1 için 0.0855 g - 0.1314 g, DD2 için 0.04689 g - 0.061 g aralığında değiştiği belirlenmiştir.

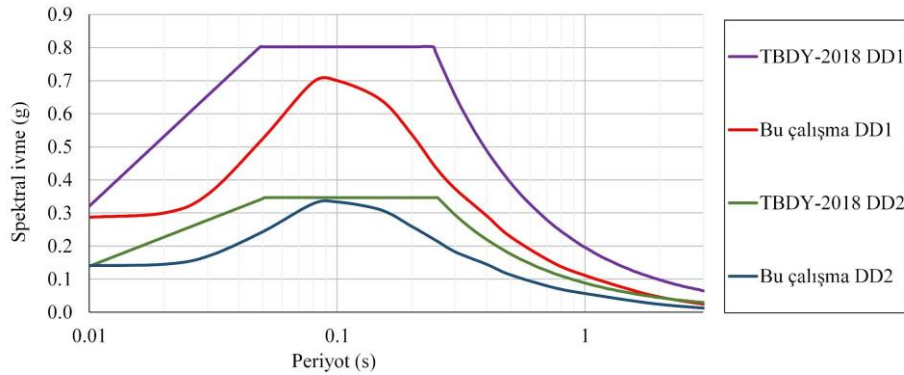
Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi



Şekil 12. Kayseri kenti DD1 ve DD2 için anakaya seviyesinde uzun periyot ($T = 1$ s) tepki spektral ivmeleri için oluşturulan sismik tehlike haritaları

Mevcut OSTA sonuçları ile TBDY (2018) yönetmeliği arasındaki tutarlılığı incelemek için Kayseri kent merkezi anakaya seviyesi dikkate alınarak Şekil 13'te gösterilen bir karşılaştırma yapılmıştır. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları Etkileşimli Web Uygulamasından

(<https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>, en son 25.08.2022 tarihinde erişildi) ZB zemin tipi ($V_{s30} = 760 - 1500$ m/s) için TBDY (2018) tasarım spektrumları elde edilmiştir.

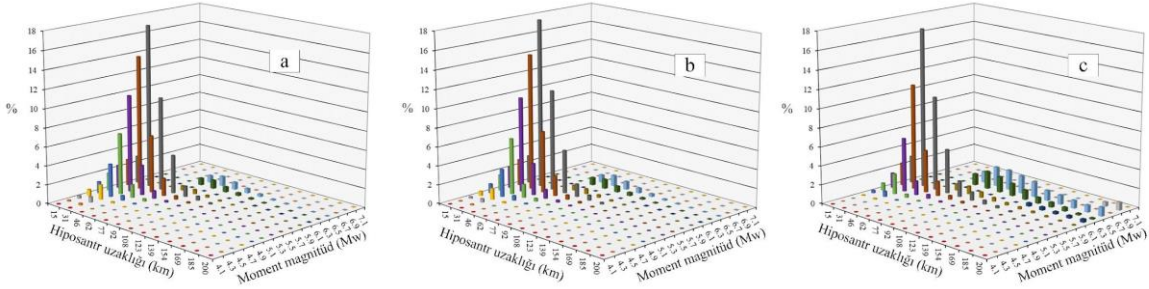


Şekil 13. Kayseri kent merkezi DD1 ve DD2 için mevcut OSTA ile elde edilen üniform tehlike spektrumu ile TBDY (2018) yönetmeliği tasarım spektrumunun karşılaştırması

Bazzurro ve Cornell (1999), sismik kaynakların bir bölgenin genel sismik tehlikesine katkısını daha iyi değerlendirebilmek için "ayrıştırma" adlı bir yöntem geliştirmiştir. Bu yaklaşım, bölge için hangi kaynakların en tehlikeli olduğu konusunda daha derin bir yoruma izin verir. Belirli bir deprem seviyesi dikkate alınarak toplam sismik tehlikenin ayrıştırma bulguları, belirli bir yapısal periyot için en tehlikeli büyüklük-mesafe kombinasyonlarını ortaya çıkarır. Bu çalışmada, Kayseri kent

merkezi için PGA, kısa periyot ($T = 0.2$ s) ve uzun periyot ($T = 1$ s) spektral ivme değerleri ile ilişkili toplam sismik tehlikenin ayrıştırılması moment büyüklüğü ve hiposantr uzaklığını dikkate alarak R-CRISIS (v20.0) programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 14, 475 yıl tekrarlanma periyotlu deprem için Kayseri kent merkezi toplam sismik tehlikenin ayrıştırılmasını göstermektedir.

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi



Şekil 14. Kayseri kent merkezi DD2 için a) PGA, b) kısa periyot ($T = 0.2$ s), c) uzun periyot ($T = 1$ s) spektral ivme değerleri ile ilişkili toplam sismik tehlikenin ayrıştırılması

SONUÇ

Hazırlanan sismik tehlike haritalarından, çalışma alanının kuzeybatı kısmının nispeten daha yüksek sismik aktiviteye sahip olması nedeniyle güneydoğu kısmına göre daha yüksek PGA ve spektral ivme değerlerine sahip olduğu, sonucu elde edilmiştir.

Ayrıştırma analizi sonucunda, Kayseri kent merkezi için sismik tehlikeye en büyük katkının yakındaki sismik faaliyetlerden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Kayseri kent merkezi için sismik tehlikenin yaklaşık yüzde 94'ünü yerleşim alanına 77 kilometre mesafede meydana gelen 5.9'dan küçük depremler oluşturmaktadır. Bu tehlikeye öncelikle moment büyüklüğü (M_w) aralığı 5.1–5.7 ve hiposantr uzaklığı (R_{hyp}) 0–46 km (A4 sismik kaynağına karşılık gelir) aralığında olan depremlerin neden olacağı sonucuna varılmıştır.

Genel olarak, DD1 ve DD2 için bu çalışma kapsamında geliştirilen sahaya özgü üniform tehlike tepki spektrumları, TBDY (2018) tasarım spektrumlarından daha düşük spektral ivme değerlerine sahiptir.

TEŞEKKÜR

Deprem tehlike parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan MATLAB kodlarını paylaştığı için Prof. Andrzej KIJKO'ya teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abrahamson, N.A., Silva, W.J., Kamai R (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30:1025–1055.
- Abramowitz, M., Stegun, I.A. (1970). *Handbook of mathematical functions, 9th edn.* Dover Publication, New York.
- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the Gutenberg-Richter formula and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 43:237–239.

- Akkar, S., Bommer, J.J. (2007). Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97:511–530.
- Akkar, S., Bommer, J.J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81:195–206.
- Akkar, S., Çağnan, Z., Yenier, E., Erdoğan, Ö., Sandıkçaya, M.A., Gülkan, P. (2010). The recently compiled Turkish strong motion database: preliminary investigation for seismological parameters. *Journal of Seismology*, 14:457–479.
- Alpyürür, M., Lav, M.A. (2021). Burdur kent merkezinin deterministik sismik tehlike analizi, 9. Türkiye Deprem Mühendisliği Konferansı, İTÜ, İstanbul, 2-3 Haziran 2021.
- Alpyürür, M., Lav, M. A. (2022). An assessment of probabilistic seismic hazard for the cities in Southwest Turkey using historical and instrumental earthquake catalogs. *Natural Hazards*, 1-31.
- Anbazzhagan, P., Bajaj, K., Moustafa, S.S.R., Al-Arifi, N.S.N. (2015). Maximum magnitude estimation considering the regional rupture character. *Journal of Seismology* 19:695–719.
- Bazzurro, P., Cornell A.C. (1999). Disaggregation of seismic hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89:501–520.
- Bindi, D., Pacor, F., Luzi, L., Puglia, R., Massa, M., Ameri, G., Paolucci, R. (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9:1899–1920.
- Bindi, D., Cotton, F., Kotha S.R., Bosse, C., Stromeyer, D., Grünthal, G. (2017). Application-driven ground motion prediction equation for seismic hazard assessments in non-cratonic moderate-seismicity areas. *Journal of Seismology*, 21:1201–1218.
- Boore, D.M., Atkinson, G.M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24:99–138.
- Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E., Atkinson, G.M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30:1057–1085.

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey—a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14:3–30.
- Campbell, K.W., Bozorgnia, Y., (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24:139–171.
- Campbell, K.W., Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30:1087–1115.
- Cauzzi, C., Faccioli, E. (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, 12:453–475.
- Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., Bianchini, A. (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13:1587–1612.
- Chiou, B.S.J.J., Youngs, R.R. (2008). An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 24:173–215.
- Chiou, B.S.J., Youngs, R.R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30:1117–1153.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the seismological society of America*, 58:1583–1606.
- Cornell, C.A., Vanmarcke, E.H. (1969). The major influences on seismic risk. Fourth World Conference On Earthquake Engineering, Book of Proceedings, 69–83.
- Delavaud, E., Scherbaum, F., Kuehn, N., Riggelsen, C. (2009). Information-theoretic selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis: An applicability study using californian data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99:3248–3263.
- Delavaud, E., Scherbaum, F., Kuehn, N., Allen, T. (2012). Testing the global applicability of ground-motion prediction equations for active shallow crustal regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102:707–721.
- Deniz, A. (2006). Estimation of Earthquake Insurance Premium Rates Based On Stochastic Methods, Thesis (Master), Department of Civil Engineering, Middle East Technical University (METU). Ankara.
- Derras, B., Bard, P.Y., Cotton, F. (2016). Site-condition proxies, ground motion variability, and data-driven GMPEs: Insights from the NGA-West2 and RESORCE data sets. *Earthquake Spectra*, 32:2027–2056.
- Emre, O., Duman, T.Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16:3229–3275.
- Gezgin, C., Ekercin, S., Tiryakioğlu, İ., Aktuğ, B., Erdoğan, H., Gürbüz, E., Orhan, O., Bilgilioğlu, S.S., Torun, A.H. T., Gündüz, H.İ., Oktar, O., Türkmen, C., Kaya, E. (2022). Determination of recent tectonic deformations along the Tuz Gölü Fault Zone in Central Anatolia (Turkey) with GNSS observations. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31(1): 20-33.
- Gupta, I.D. (2002). The state of the art in seismic hazard analysis. *ISET Journal of Earthquake Technology* 39:311–346.
- Gutenberg, B., Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34:185–188.
- Idriss, I.M. (2008). An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 24:217–242.
- Idriss, I.M. (2014). An NGA-West2 Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30:1155–1177.
- Kadirioğlu, F.T., Kartal, R.F., Kılıç, T., Kalafat, D., Duman, T.Y., Azak, T.E., Özalp, S., Emre, Ö. (2018). An improved earthquake catalogue ($M \geq 4.0$) for Turkey and its near vicinity (1900–2012). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16:3317–3338.
- Kijko, A., Sellevoll, M.A. (1989). Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79:645–654.
- Kijko, A. (2004). Estimation of the maximum earthquake magnitude, m_{max} . *Pure and Applied Geophysics*, 161:1655–1681.
- Kijko, A., Singh, M. (2011). Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation. *Acta Geophysica*, 59:674–700.
- Kijko, A., Smit, A. (2012). Extension of the Aki-Utsu b-Value estimator for incomplete catalogs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102:1283–1287.
- Kijko, A. (2016). Ha3 Matlab code, released 3.01. Seismic hazard assessment for selected area, University of Pretoria, South Africa.
- Koçyiğit, A., Erol, O. (2001). A tectonic escape structure: Erciyes pull-apart basin, Kayseri, central Anatolia, Turkey. *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 133-145.
- Kutanis, M., Ulutaş, H., Işık, E. (2018). PSHA of Van province for performance assessment using spectrally matched strong ground motion records. *Journal of Earth System Science*, 127(7), 1-14.
- Mueller, C.S. (2010). The influence of maximum magnitude on seismic-hazard estimates in the Central and Eastern United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100:699–711.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., D'Amico, V. (2017). R-CRISIS. Program and platform for computing seismic hazard.
- Över, S., Yılmaz, H., Pinar, A., Özden, S., Ünlügenç, U.C., Kamacı, Z. (2013). Plio-Quaternary stress state in the Burdur Basin, SW-Turkey. *Tectonophysics*, 588:56–68.
- Scherbaum, F., Delavaud, E., Riggelsen, C. (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99:3234–3247.
- Stewart, J.P., Douglas, J., Javanbarg, M., Abrahamson, N.A., Bozorgnia, Y., Boore, D.M., Campbell, K., Delavaud, E., Erdik, M., Stafford, P. (2015). Selection of ground motion prediction equations for the global earthquake model. *Earthquake Spectra*, 31:19–45.

Kayseri Kenti için Olasılıksal Sismik Tehlikenin Değerlendirilmesi

- Şengör, A.M.C., Görür, N., Şaroğlu, F. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, 37: 227-264.
- TBDY (2018). Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, Ankara.
- Tinti, S., Mulargia, F. (1985). Completeness analysis of a seismic catalog. *Annales geophysicae*, 407-414.
- URL-1 (2022). <https://kayseri.gov.tr> (Erişim Tarihi: 22.09.2022)
- URL-2 (2022). <https://deprem.gov.tr> (Erişim Tarihi: 21.08.2022)
- URL-3 (2020). <https://tadas.afad.gov.tr> (Erişim Tarihi: 23.08.2022)
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of "b" in a formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes. *Geophys Bull Hokkaido Univ*, 13:99-103.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84:974-1002.
- Yenier, E., Atkinson, G.M. (2015). Regionally adjustable generic ground-motion prediction equation based on equivalent point-source simulations: Application to central and eastern North America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105:1989-2009.