

Muş İli ve Çevresinin Depremsellik Parametrelerinin Uzaysal Dağılımı ve Maksimum Magnitüd Değeri

Nazlı Ceyla ANADOLU KILIÇ^{1*}

Öz

Yapılan çalışmada Muş il merkezli (38.73°K Enlem ve 41.49°D Boylam) 200 km yarıçapındaki dairesel alanın depremsellik parametreleri, depremsellik parametrelerinin uzaysal dağılımı ve maksimum magnitüd değeri belirlenmiştir. Bu amaçla 1900-2020 yılları arasında meydana gelen $M \geq 3.0$ olan deprem verileri Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü deprem kataloğundan alınmıştır. Depremsellik parametrelerinin belirlenebilmesi ve haritalanabilmesi için çalışma alanı $0.25^\circ K \times 0.25^\circ D$ $r=0.25$ olacak şekilde 285 alt bölgeye ayrılmıştır. Hesaplama yapılabilen her bir alt alanda Gutenberg-Richter bağıntısındaki “b” katsayısı En Büyük Olasılık Yöntemi kullanılarak, depremsellik parametreleri ise Poisson Modeline göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda çalışma alanının $0.60 \leq b \leq 0.97$ aralığında değişim gösteren nispeten küçük “b” değerleri ile karakterize olduğu görülmüştür. $M_w=5.5$ ve $M_w=6.0$ magnitüd değerlerindeki depremlerin tekrarlanma periyotlarının sırası ile $10 \leq T_r \leq 290$ ve $25 \leq T_r \leq 775$ aralıklarında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Aynı magnitüd değerlerinin 50 ve 100 yıllık zaman dilimleri içerisinde yaratacağı ortalama tehlike oranı değerleri ise yine sırası ile 0.80 ve 0.74 olarak hesaplanmıştır. Çalışma alanının tamamını kapsayacak “ m_{max} ” değerinin belirlenebilmesi için yapılan değerlendirmeler sonucunda $7.2 \leq m_{max} \leq 7.3$ aralığının olası-güvenilir olduğu bunun için de Kijko-Sellevol-Bayes teorisinin daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Depremsellik, “b” değeri, Depremsellik parametreleri, Maksimum magnitüd değeri, Muş.

Spatial Distribution of the Seismicity Parameters and Maximum Magnitude Value of Muş Province and its Vicinity

Abstract

In the study, the seismicity parameters, spatial distribution of seismicity parameters and maximum magnitude value were determined in a circular area with a 200 km radius, which is centered in Mus (38.73°N Latitude ve 41.49°E Longitude). For this purpose, the earthquakes of magnitude $M \geq 3.0$ were used, which were taken from Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute’s earthquake catalog, in the period time between 1900-2020. The study area was divided into 285 subregions as $0.25^\circ N \times 0.25^\circ E$ $r=0.25$ for the determination of seismicity parameters and mapping. For each subregion, which could be calculated, the coefficient “b” in the Gutenberg-Richter was calculated using the maximum likelihood method, seismicity parameters were calculated according to Poisson Method rules. As a result of the calculation, a relatively low value of “b” changing in the range of $0.60 \leq b \leq 0.97$, was seen. It was determined that the recurrence periods of earthquakes with magnitude values of $M_w=5.5$ ve $M_w=6.0$ changing in the range of $10 \leq T_r \leq 290$ and $25 \leq T_r \leq 775$, respectively. For the same magnitude values, the average hazard ratio values were calculated as 0,80 and 0.74, respectively in 50 and 100 year time periods. It was determined that the range of $7.2 \leq m_{max} \leq 7.3$ was possible-reliable and Kijko-Sellevol-Bayes theory was more suitable, as a result of the evaluations in order to determine the “ m_{max} ” value for the whole study region.

Keywords: Seismicity, “b” value, Seismicity parameters, Maximum magnitude value, Mus.

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Bilim Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nevşehir, Türkiye, nazlianadolu@nevsehir.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-8769-3510>

1. Giriş

Deprem oluşumunun uzay ve zaman içerisindeki dağılımı ile ilgilenen depremsellik çalışmaları belirlenen coğrafi bir bölgede, belirli bir zaman dilimi içerisinde geçmişte meydana gelen deprem verilerinden hareketle gelecekte oluşma olasılığı bulunan depremin; jeolojik, tektonik ve istatistiksel veriler ve yaklaşımlar kullanılarak tanımlanması ve yorumlanması aşamalarından oluşmaktadır. Bu bağlamda depremselliği en genel ifade ile herhangi bir bölgedeki deprem oluşma potansiyeli olarak ifade etmek mümkündür.

Herhangi bir bölgenin deprem potansiyelini belirlemek için ise öncelikle deprem istatistiğinin temel bağıntısı olarak kabul edilen $\log N = a - bM$ (Gutenberg ve Richter, 1954) eşitliğindeki “a” ve “b” regresyon katsayılarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. “a” katsayısı ortalama yıllık sismisite indeksi olarak tanımlanmaktadır. İnceleme yapılan bölgenin genişliğine ve gözlem süresine bağlı olarak değişim gösteren “a” katsayısı, deprem faaliyet düzeyi ile ilişkili bir parametredir. Sismotektonik parametre olarak adlandırılan “b” katsayısı ise en önemli depremsellik parametrelerinden biri olarak kabul edilmekte ve bu nedenle de çok fazla sayıda çalışmaya konu olmaktadır (Miyamura, 1962; Mogi, 1967; Scholz, 1968; Wyss, 1973; Abercrombie, 1996; Amelung ve King, 1997; Wiemer ve Wyss, 1997; Wiemer ve Katsumata, 1999; Sobiesiak, 2000; Enescu ve Ito, 2002; Westerhaus ve ark., 2002). Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre “b” katsayısının deprem oluşumunun fiziği ile doğrusal ilişkisi ve kabuktaki gerilme ile olan ters ilişkisi göz önüne alınarak deprem tahmini çalışmaları için öncü bir parametre olarak kullanılabilirliği kabul edilmiştir. Ve en genel ifade ile büyük bir “b” değeri düşük bir gerilme düşümünü buna karşılık küçük bir “b” değerinin ise yüksek bir gerilme düşümünü ifade ettiği belirtilmiştir (Lomnitz ve Singh, 1976). “b” katsayısı ile ilgili yapılan bir diğer çalışma türü ise bölgeler arasında gösterdiği değer farklılığı üzerine olmuştur (Gutenberg ve Richter, 1954; Everden, 1970; Shi ve Bolt, 1982; Bath, 1983; Turcotte, 1986; McNally ve James 1989; Udias ve Mezcuca, 1997). Genel olarak “b” katsayısının dünyanın değişik bölgeleri için farklı değer aralıklarında ($0.3 \leq b \leq 2.6$) olduğu buna karşılık Gutenberg-Richter bağıntısındaki ortalama “b” katsayısının sismik olarak aktif bölgelerin çoğu için yaklaşık olarak 1.0 olduğu kabul edilmektedir (Frohlich ve Davis, 1993).

“a” ve “b” katsayılarının elde edilmesiyle birlikte herhangi bir bölge için seçilecek bir magnitüd değerinin tekrarlanma periyodu, ileriye dönük olarak belirlenecek bir zaman dilimi içerisinde yaratacağı tehlike oranı ve oluşma olasılığını hesaplamak da mümkün olabilmektedir.

Herhangi bir bölgenin depremselliğini yansıtmak için gerekli olan bir diğer önemli parametre ise en büyük bölgesel magnitüd (m_{max}) değeridir. “ m_{max} ” değerinin hesaplanabilmesi için ise “b” katsayısı dışında deprem aktivite oranı (λ)’nın belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. “ λ ” katsayısı;

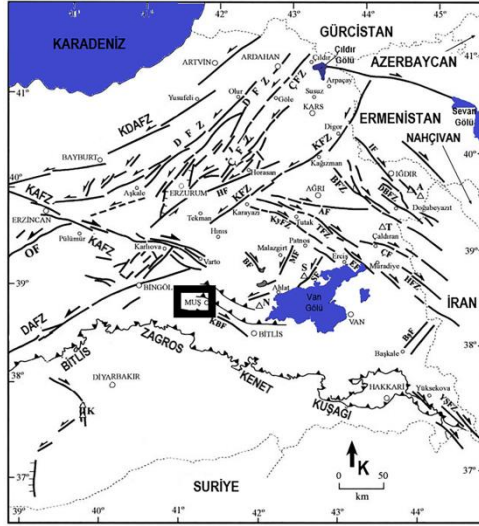
çalışma alanı içerisinde inceleme yapılan zaman aralığı ve bu süre içerisinde meydana gelen deprem sayısı ile ilişkili olarak tanımlanmaktadır (Kijko ve Sellevol 1989, Kijko ve Graham, 1998). Ancak “ λ ” katsayısı “a” ve “b” katsayıları gibi herhangi bir bölgenin deprem etkinliğini değerlendirmek için tek başına kullanılabilir veya farklı bölgelerin deprem etkinliklerini değerlendirmek için karşılaştırma yapmaya imkan verebilecek yeterlikte değildir. Bu nedenle “ λ ” katsayısının “ m_{max} ” değerinin elde edilmesi için gerekli yardımcı bir parametre olarak kullanılması daha uygun olacaktır.

Sonuç olarak elde edilen bütün depremsellik parametrelerinin bir arada değerlendirilmesi ile birlikte herhangi bir bölgenin deprem potansiyelini dolayısı ile deprem tehlikesini tanımlamak ve deprem risk analizi çalışmalarına altlık oluşturmak mümkün olabilmektedir.

Yapılan çalışmada ise; özellikle son yıllarda önemli tektonik hareketliliklerin yaşandığı Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ile Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ)’nin etkisi altında karmaşık bir deformasyon alanı içerisinde yer alan Muş ili ve çevresi çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Türkiye’de neotektonik dönemde oluşan ve Dünya’da da tektonik açıdan özel bölgelerden biri olarak kabul edilen Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi içerisinde yer alan çalışma alanı önemli tektonik yapılar ile komşu olması nedeniyle güncel sismoloji çalışmaları için oldukça elverişlidir. Bu nedenle öncelikle çalışma alanı içerisinde meydana gelen depremlerin zaman ve uzaya bağlı değişimleri incelenmiştir. Birbirinden farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen çeşitli istatistiksel yöntemler ve yaklaşımlar kullanılarak depremsellik parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen depremsellik parametrelerinin uzaya bağlı değişimleri haritalanmış ve çalışma alanı içerisinde alt alanların birbiri ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Muş ili ve çevresi, tektonik özellikleri Arap ve Avrasya plakalarının kıta-kıta çarpışması sonucunda gelişen Doğu Anadolu Bölgesi sınırları içerisinde, Türkiye’nin en önemli iki transform fayı olan KAFZ ile DAFZ’nin kesiştiği Karlıova Kesişim Bölgesinin güneydoğusunda yer almaktadır. Karmaşık bir deformasyon alanı içerisinde yer alan çalışma alanının depremselliği ve deprem tehlikesi üzerinde KAFZ, DAFZ ve Karlıova Kesişim Bölgesi dışında başta Bulanık Fayı, Malazgirt Fayı ve Kavakbaşı Fayı olmak üzere çok sayıda irili ufaklı fay sistemi oldukça etkilidir (Şekil 1).



A-Ağrı Dağı, K-Karacadağ, N- Nemrut Dağı, S-Süphan Dağı, T-Tendürek Dağı, AF-Ağrı Fayı, BF-Bulanık Fayı, ÇF-Çaldıran Fayı, EF-Erciş Fayı, HF-Horasan Fayı, IF-Iğdır Fayı, MF-Malazgirt Fayı, OF-Ovacık Fayı, SF-Süphan Fayı, BFZ-Balklıgölü Fay Zonu, BŞF-Başkale Fayı, ÇFZ-Çobandede Fay Zonu, DFZ-Dumlu Fay Zonu, HFZ-Hasan Timur Fay Zonu, KBF-Kavakbaşı Fayı, KFZ-Kağızman Fay Zonu, DBFZ-Doğubayazıt Fay Zonu, DAFZ-Doğu Anadolu Fay Zonu, KyFZ-Karayazı Fay Zonu, KAFZ-Kuzey Anadolu Fay Zonu, TFZ-Tutak Fay Zonu, YŞF-Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu, KDAFZ-Kuzey Doğu Anadolu Fay Zonu

Şekil 1. Çalışma alanı ve yakın çevresine ait önemli tektonik yapılar (Bozkurt, 2001'den düzenlenmiştir)

Şekil 1'de görüldüğü gibi Muş ili depremselliği ve deprem tehlikesi üzerinde fay sistemleri dışında Ağrı, Bingöl, Bitlis ve Erzurum illerinin de etkisi bulunmaktadır. Hem tarihsel hem de aletsel dönemde tektonik açıdan oldukça aktif olan çalışma alanı içerisinde meydana gelen depremler incelendiğinde volkanik faaliyetlerin de bölge için göz ardı edilmemesi gereken bir olgu olduğu görülmektedir (Dölek, 2014). En genel ifade ile Doğu Anadolu Bölgesi'nde K-G sıkışmalı tektonik rejim altında deformasyona uğrayan ve KAFZ ile DAFZ'nun etkisi altında karmaşık bir deformasyon alanı içerisinde yer alan çalışma alanında meydana gelen depremler genel olarak doğrultu atımlı faylar ile karakterize edilirler (Ketin, 1977; Şaroğlu ve ark., 1987; Paerce ve ark., 1990; Örgülü ve ark., 2003; Dhont ve Chorowicz, 2006; Işık ve ark., 2012; Akyüz ve ark., 2010; Kadirioğlu ve ark., 2011).

Muş ili ve çevresinin güncel depremsellik parametrelerinin belirlenebilmesi için Muş il merkezli (38.73°K Enlem ve 41.49° D Boylam) 200 km yarıçapındaki dairesel alan içerisinde 1900-2020 yılları arasında meydana gelen $M \geq 3.0$ olan depremlere ait veriler Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) deprem kataloğundan elde edilmiştir. Ancak bu deprem verilerinin yapılan çalışmada kullanılabilmesi için bir takım işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Bu işlemler sırası ile:

Katalogun Homojen Hale Getirilmesi: Belirli bir bölgede belirli bir zaman aralığında meydana gelen depremlerin kaydedildiği deprem kataloglarında deprem verileri farklı magnitüd ölçeklerinde (M_b , M_s , M_L , M_d) yer almaktadır. Ancak yapılan depremsellik çalışmalarından anlamlı sonuçlar elde edebilmek için kullanılacak deprem verilerinin birbiri ile uyumlu olması gerekmektedir. Kataloglarda farklı magnitüd ölçeklerinde yer alan deprem verilerinin tercih edilen magnitüd ölçeğine dönüştürülmesi depremsellik çalışmaları için oldukça önemli olmakla birlikte özellikle incelenmek istenen bir durum söz konusu değil ise bütün deprem verilerinin üst limitte

doyma uğramaması nedeni ile moment magnitüd ölçeğine (M_w) dönüştürülmesi kabul gören bir mühendislik yaklaşımıdır. M_w doygunluk problemi olmayan tek magnitüd ölçeği olup özellikle büyük magnitüdü depremleri tanımlamak için tercih edilen bir ölçektir. Magnitüd ölçeklerinin dönüştürülmesi işlemi sırasında öncelikle farklı nedenlere bağlı olarak deprem magnitüd değerlerinin belirlenip kataloglara işlenmesinin sıfır hata payı ile yapılmasının mümkün olmadığı kabul edilmesi gerekmektedir. Bu duruma bağlı olarak da regresyon tekniği seçiminde sadece tek bir değişkenin değil hem bağımlı değişkenin hem de bağımsız değişkenin hata içerebileceği göz önüne alınmalıdır (Yücemen, 2011). Yapılan çalışmada da farklı magnitüd ölçekleri arasındaki ilişkileri belirleyebilmek ve deprem verilerini belirlenen magnitüd ölçeğine dönüştürebilmek için ortogonal regresyon yöntemi tercih edilmiştir. Böylelikle KRDAE kataloğundan alınan deprem verilerinin tamamının Moment Magnitüd (M_w) ölçeğine dönüştürülmesi için gerekli bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki ve ilişki katsayısına ait bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

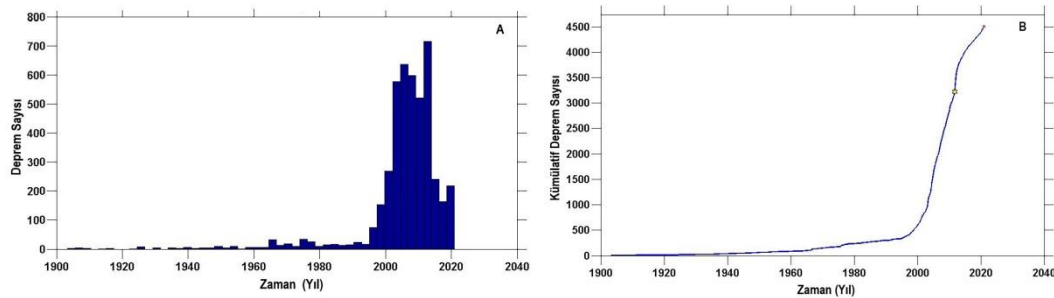
Tablo 1. Farklı Magnitüd Ölçekleri Arasındaki İlişkiler

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken	Belirlenen İlişki	İlişki Katsayısı
M_w	M_b	$M_w = -0.499512 + 1.14462 * M_b$	0,97
	M_d	$M_w = 0.143588 + 1.01002 * M_d$	0,96
	M_L	$M_w = -0.171097 + 1.0694 * M_L$	0,98
	M_s	$M_w = 1.16389 + 0.8008 * M_s$	0,96

Katalogdaki bağımlı ve bağımsız olayların birbirinden ayrılması: Depremsellik çalışmalarına başlamadan önce, çalışma alanı için oluşturulan homojen deprem kataloğunda yer alan bağımlı ve bağımsız olayların birbirinden ayrıştırılması gerekmektedir. Deprem sayısını arttırarak deprem sayısı-zaman ilişkisini etkileyen artçı şok, deprem yığılımları, deprem çiftleri ve öncü şok gibi bağımlı olayların homojen deprem kataloğundan ayrıştırılmasıyla istatistiksel olarak güvenilir depremsellik parametrelerinin ve deprem oluşma olasılıklarının belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Yapılan çalışmada bu işlemi gerçekleştirebilmek için MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 (Wiemer, 2001) paket programında Reasenber algoritması (Reasenber, 1985) tercih edilmiştir. Yapılan işlem sonucunda 4506 deprem verisinden oluşan tek bir magnitüd ölçeğinde homojen ve bağımlı olaylardan arındırılmış bir katalog elde edilmiştir.

Katalogun belirlenen bir alt magnitüd değerine göre tamamlanması: Tamamlılık; katalogda yer alan depremlerin tamamının ideal ve arzu edilen şekilde büyükten küçüğe doğru tamam olması olarak tanımlanmaktadır. Ancak teoride kabul edilen bu durum pratikte her zaman yakalanamayabilir. Bu nedenle deprem katalogları için tamamlılık sınırının yani tamamlılık magnitüd değerinin belirlenmesi gerekmektedir. “ M_c ” olarak sembolize edilen bu değer; belirli bir alanda, belirli bir zaman aralığı içerisinde kaydedilmiş deprem verilerinden oluşan deprem kataloğu

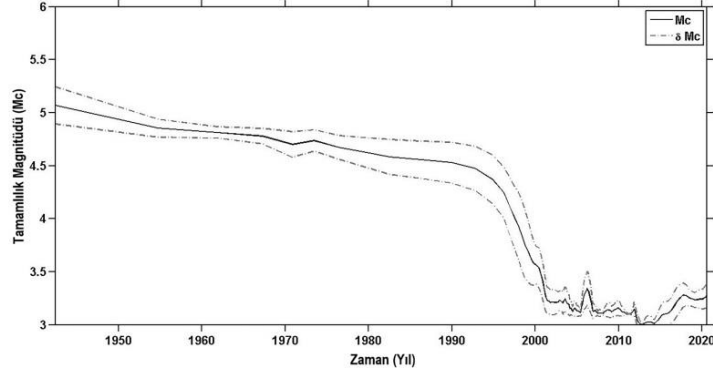
içerisinde güvenilirliği yüksek en küçük magnitüd değeri olarak kabul edilmektedir. Depremsellik parametrelerinin güvenilir olarak elde edilmesinde hem uzaya ve zamana bağlı olarak değişim gösteren “ M_c ” değeri hem de hazırlanan katalogda yer alan deprem verilerinin sayısı oldukça etkilidir. Bu nedenle katalogun tamamı ya da büyük bir çoğunluğu için geçerli bir “ M_c ” değeri belirlenirken, bu değer olabildiğince az sayıda deprem verisinin katalogdan uzaklaştıran bir değer olmasına özen gösterilmelidir. Genel olarak yapılan depremsellik çalışmaları incelendiğinde “ M_c ” değerinin 1900’lü yıllar özellikle de 1900-1990 yılları arasındaki dönem için görece olarak büyük değerlere karşılık geldiği görülür. Buna karşılık 2000’li yılların başlaması ile birlikte ise “ M_c ” değeri daha küçük değerler ile karakterize olmaya başlamaktadır. “ M_c ” değerinin yıllar içerisindeki bu değişimi; artan teknoloji ile deprem kayıt istasyon sayılarının artması ve bunun bir doğal sonucu olarak da daha küçük magnitüdü depremlerin kataloglara girmeye başlaması ile ilişkili bir durumdur. Aslında deprem kayıt istasyon sayısının artması “ M_c ” değerinin doğru belirlenmesini önemli ölçüde iyileştirdiği gibi yeni kayıt istasyonlarının sisteme düzenli olarak dahil edilmesi ile birlikte “ M_c ” değerinin doğru belirlenmesi giderek zorlaşan karmaşık bir hal almaktadır. Yapılan çalışmada öncelikle 1900-2020 yılları arasında çalışma alanının sismik aktivitesindeki değişimleri gözlemleyebilmek için depremlerin normal ve kümülatif dağılımları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. ZMAP programı ile hesaplanan 1900-2020 yılları arasında meydana gelen depremlerin yıllara göre dağılımı (A: Normal dağılım, B: Kümülatif dağılım)

Çalışma alanı içerisinde 1900-2020 yılları arasında meydana gelen depremlerin normal ve kümülatif dağılımları incelendiğinde “ M_c ” değerinin yaklaşık olarak 1900-2000 yılları arasındaki dönem için nispeten büyük magnitüd değerleri ile temsil edileceğini tahmin etmek oldukça kolaydır. Ancak bu değişimin yıllar içerisindeki gelişimini daha detaylı inceleyebilmek için yapılan çalışmada “ M_c ” değerinin zamana bağlı değişimi MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 (Wiemer, 2001) paket programı kullanılarak değerlendirilmiştir. “ M_c ” değerinin belirlenmesi için literatürde birbirinden farklı yöntemler bulunmaktadır. Yapılan çalışmada ise homojenize hale getirilen deprem katalogu kullanılarak pencere başına en az 10 olay olmak üzere 100 olay tanımlanarak Maximum Curvature (MAXC; Wiemer ve Wyss, 2000) yöntemi tercih edilmiştir (Şekil 3). Daha önce de belirtildiği gibi deprem magnitüd değerlerinin belirlenip kataloglara işlenmesinin sıfır hata

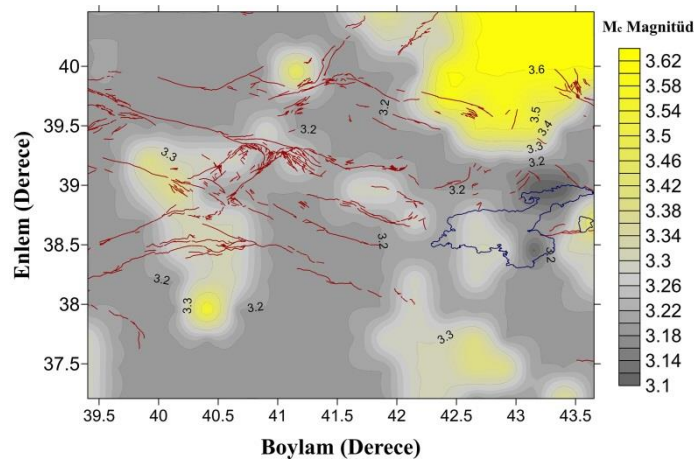
payı ile yapılması mümkün olamamaktadır. Bu nedenle “ M_c ” değerinin zamana bağlı değişiminin gözlenmesi esnasında olası hata payı 0.1 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3. ZMAP programı ile hesaplanan 1900-2020 yılları arasında “ M_c ” magnitüd değerinin zamana bağlı değişimi

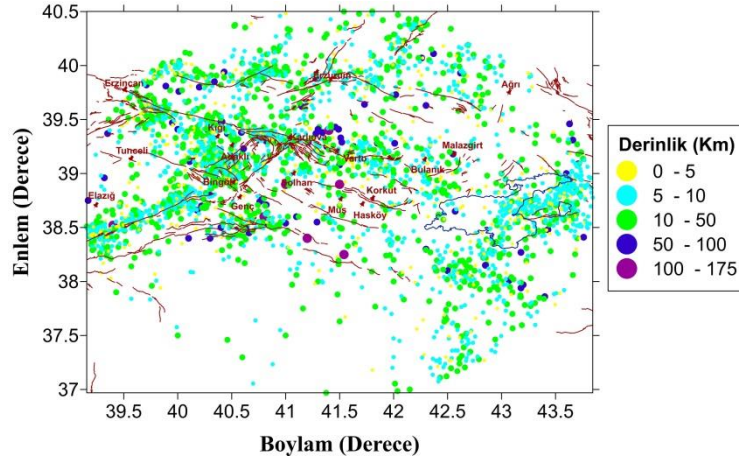
Şekil 3 incelendiğinde 1900-1998 yılları arasında “ M_c ” değerinin yaklaşık olarak 5.2’den 4.0’a kadar düştüğü görülmektedir. Bu durum ilk yıllarda özellikle de 1900-1965 yılları arasında kataloğun sınırlı sayıda deprem verisi içermesi, içerdiği deprem verilerinin de büyük magnitüdü olması ile ilişkilidir. Artan deprem kayıt istasyonu sayısı ve küçük magnitüdü depremlerin kataloğa girme oranının artması ile birlikte düşme eğilimine başlayan “ M_c ” değeri 2005 yılında artış göstermektedir. 2005 yılında “ M_c ” değerinde gözlenen bu artış bölgede artan sismik faaliyetler özellikle de 23.03.2005 ve 06.06.2005 tarihlerinde meydana gelen ($M_w=5.7$) depremler ile ilişkilidir. 2005-2015 yılları arasında 3.1 seviyelerine kadar inen “ M_c ” değeri 2015 yılından sonra bölgenin artan sismik faaliyetlerine bağlı olarak artmaya başlamış ve 3.3 ile 3.4 arasında değişim göstermiştir.

Zamana bağlı değişimi incelenen “ M_c ” değerinin uzaya bağlı değişiminin incelenmesi için çalışma alanı $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ’lik aralıklarla gridlenmiştir. Ancak “ M_c ” değerinin uzaya bağlı değişimi incelenirken zamana bağlı değişimin incelendiği yöntem ve kriterlerin aynı şekilde uygulanmasına dikkat edilmelidir (Şekil 4).



Şekil 4. ZMAP programı ile hesaplanan çalışma alanı M_c magnitüd değeri dağılım haritası

arasında değişim gösteren orta büyüklükte depremler ve %1'nin ise $7 < M_w < 8$ arasında değişim gösteren büyük depremlerden oluştuğu görülmektedir.



Şekil 7. 1900-2020 yılları arasında meydana gelen depremlerin derinlik dağılım haritası

Şekil 7 incelendiğinde çalışma alanı içerisinde meydana gelen depremlerin %98.6'sının 0-60 km derinliğinde değişim gösteren sığ depremlerden oluştuğu geriye kalan %1.4'lük kısmının ise 60-175 km aralığında değişim gösteren orta derinlikte depremlerden oluştuğu görülmektedir.

Katalogun hazır hale getirilmesi ile birlikte çalışma alanının depremsellik parametrelerinin ve “ m_{max} ” değerinin belirlenmesi için kullanılacak yöntemler ve teoriler belirlenmiştir. Bu kapsamda öncelikle $\log N = a - bM$ bağıntısındaki “a” ve “b” katsayılarının belirlenmesi için verdiği güvenilir sonuçlar nedeniyle Aki (1965) tarafından geliştirilen En Büyük Olasılık (EBO) Yöntemi tercih edilmiştir. $\log N = a - bM$ bağıntısındaki “b” katsayısının en önemli istatistik giriş parametresi olarak kabul edildiği yöntemde “a” katsayısı çalışma alanının aktivite seviyesini ifade etmektedir. EBO yönteminde rasgele değişken $N_i (i = 1, 2, \dots, n)$ bir Poisson dağılımı gösterir, yani olasılık dağılım fonksiyonu;

$$P(a, b; N_i) = \exp(-\langle N_i \rangle) * \langle N_i \rangle^{N_i} * \langle N_i! \rangle^{-1} \quad (1)$$

ile verilir. Burada $\langle N_i \rangle = 10^{a-bM}$ 'dir. Gözlemlerin bağımsız olduğu kabul edilirse;

$$a = \log \sum_{i=1}^n N_i - \log \sum_{i=1}^n 10^{-bM} \quad (2)$$

$$b = \frac{0.4343}{\frac{\sum_{i=1}^n M_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} - M_{min}} \quad (3)$$

olarak elde edilir.

“a” ve “b” katsayılarının elde edilmesi ile birlikte depremlerin hem mekan hem de zaman açısından birbirinden bağımsız bir şekilde meydana geldikleri varsayımına dayalı olan Poisson

Modeli esasına göre bir yıldaki M ve M'den büyük deprem sayısı $n(M)$, incelenen zaman periyodu T, tekrarlanma periyodu T_r ve t yıl için deprem tehlike oranı R_t olmak üzere;

$$T_r = 1/n(M) \quad (4)$$

$$R_t = 1 - e^{-n(M)*t} \quad (5)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

En büyük bölgesel magnitüd “ m_{max} ” değerinin belirlenebilmesi için; inceleme alanı içerisinde belirli zaman aralığında (T) meydana gelen en küçük magnitüdü depreme (m_{min}) eşit ya da daha büyük magnitüdü depremlerin hepsinin (n) kaydedildiği varsayılmaktadır. Bu durumda “ m_{min} ” değerinin bilindiği ve tamamlılık magnitüdü olarak ifade edildiği görülmektedir. Magnitüd değerlerinin bağımsız, özdeş dağılmış olduğu ve bilinmeyen parametre olan “ m_{max} ” değerinin magnitüd aralığının üst sınırı olduğu varsayılır. Literatürde “ m_{max} ” değerini belirlemek için farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş farklı teoriler yer almaktadır. Genel olarak kabul edilmiş bir teori bulunmadığı için yapılan çalışmada “ m_{max} ” değerinin belirlenmesi için Kijko-Sellevoll (K-S) ve Kijko-Sellevoll-Bayes (K-S-B) teorileri tercih edilmiştir.

Kijko-Sellevoll (K-S) Teorisi: m_n gözlenen en büyük magnitüd değeri olmak üzere (m_{max}^{obs});

$$F_{M_n}(m) = \begin{cases} 0 & \rightarrow m < m_{min} \\ [F_M(m)]^n & \rightarrow m_{min} \leq m \leq m_{max} \\ 1 & \rightarrow m > m_{max} \end{cases} \quad (6)$$

Beklenen değer $M_n E(M_n)$,

$$E(M_n) = \int_{m_{min}}^{m_{max}} m dF_{M_n}(m) = m_{max} - \int_{m_{min}}^{m_{max}} F_{M_n}(m) dm \quad (7)$$

$$m_{max} = E(M_n) + \int_{m_{min}}^{m_{max}} [F_M(m)]^n dm \quad (8)$$

$$m_{max} = m_{max}^{obs} + \int_{m_{min}}^{m_{max}} [F_M(m)]^n dm \quad (9)$$

(9) no'lu bağıntıda eşitliğin her iki tarafında “ m_{max} ” değeri yer aldığı için muhtemel “ m_{max} ” değerini elde etmek için iterasyon işlemi yapılmalıdır. $\Delta = \int_{m_{min}}^{m_{max}} [F_M(m)]^n dm$ kadar “ m_{max} ” değerinde bir artma görülür.

$$F_M(m) = \begin{cases} 0 & \rightarrow m < m_{min} \\ \frac{1 - \exp[-\beta(m - m_{min})]}{1 - \exp[-\beta(m_{max} - m_{min})]} & \rightarrow m_{min} \leq m \leq m_{max} \\ 1 & \rightarrow m > m_{max} \end{cases} \quad (10)$$

(10) no'lu bağıntıyı takiben gerekli olan integral hesaplamalarıyla birlikte;

$$\Delta = \int_{m_{min}}^{m_{max}} \left[\frac{1 - \exp[-\beta(m_{max}^{obs} - m_{min})]}{1 - \exp[-\beta(m_{max} - m_{min})]} \right]^n dm \quad (11)$$

(11) no'lu bağıntının daha basit bir şekilde çözümünü yapabilmek için Cramer yaklaşımı uygulanabilir. Cramer (1961)'e göre $[F_M(m)]^n$ değeri yaklaşık olarak $\exp\{-n[1 - F_M(m)]\}$ değerine eşittir. Gerekli olan yer değiştirmeler yapıldıktan sonra;

$$\Delta = \frac{E_1(n_2) - E_1(n_1)}{\beta \exp(-n_2)} + m_{min} \exp(-n) \quad (12)$$

bağıntısı elde edilir.

Burada; $n_1 = n / \{1 - \exp[-\beta(m_{max} - m_{min})]\}$; $n_2 = n_1 \exp[-\beta(m_{max} - m_{min})]$, $E_1(\cdot)$ integral üstel fonksiyon olarak belirtilmiştir. $E_1(z) = \int_z^\infty \exp(-\zeta) / \zeta d\zeta$ ve yaklaşık olarak $E_1(z) = \frac{z^2 + a_1 z + a_2}{z(z^2 + b_1 z + b_2)} \exp(-z)$ olarak yazılabilir. Bu bağıntıda yer alan katsayılar; $a_1 = 2.334733$; $a_2 = 0.250621$; $b_1 = 3.330657$; $b_2 = 1.681534$ olarak ifade edilmiştir (Abramowitz ve Stegun, 1970).

$$m_{max} = m_{max}^{obs} + \frac{E_1(n_2) - E_1(n_1)}{\beta \exp(-n_2)} + m_{min} \exp(-n) \quad (13)$$

(13) no'lu bağıntı mevcut hali ile eşitliğin sağ tarafında bulunan ve aynı zamanda “ m_{max} ” içeren n_1 ve n_2 ifadeleri nedeniyle “ m_{max} ” için değerlendirici değildir. Genel bir ifade ile “ m_{max} ” için bir değerlendirme elde etmek için (13) no'lu bağıntıya iterasyon uygulanmalıdır. Sonuç olarak Kijko-Sellevoll yöntemi (K-S) yapılan düzeltmeler sonucunda (14) no'lu bağıntıda gösterildiği şekilde elde edilir:

$$VAR(\hat{m}_{max}) = \sigma_M^2 \left[\frac{E_1(n_2) - E_1(n_1)}{\beta \exp(-n_2)} + m_{min} \exp(-n) \right]^2 \quad (14)$$

Kijko-Sellevoll-Bayes (K-S-B) Teorisi:

$$\Delta = (C_\beta)^n \int_{m_{min}}^{m_{max}} \left[1 - \left(\frac{p}{p + m - m_{min}} \right)^q \right]^n dm \quad (15)$$

Cramer yaklaşımı uygulandıktan sonra ise (16) no'lu bağıntı elde edilir;

$$\Delta = \frac{\delta^{1/q+2} \exp [nr^q/(1-r^q)]}{\beta} [\Gamma(-1/q, \delta r^q) - \Gamma(-1/q, \delta)] \quad (16)$$

Burada; $r = p/(p + m_{max} - m_{min})$, $c_1 = \exp[-n(1 - C_\beta)]$, $\delta = nC_\beta$ ve $\Gamma(\dots)$ eksik gama fonksiyonu olarak tanımlanmakta ve (17) no'lu bağıntı elde edilir.

$$\hat{m}_{max} = m_{max}^{obs} + \frac{\delta^{1/q+2} \exp [nr^q/(1-r^q)]}{\beta} [\Gamma(-1/q, \delta r^q) - \Gamma(-1/q, \delta)] \quad (17)$$

(16) no'lu bağıntıda eşitliğin her iki tarafında “ m_{max} ” değeri yer aldığı için muhtemel “ m_{max} ” değerini elde etmek için iterasyon işlemi yapılmalıdır. Sonuç olarak Kijko-Sellevoll-Bayes (K-S-B) teorisi yapılan düzeltmeler sonucunda (18) no'lu bağıntıda gösterildiği şekilde elde edilir:

$$VAR(\hat{m}_{max}) = \sigma_M^2 + \left[\frac{\delta^{1/q+2} \exp [nr^q/(1-r^q)]}{\beta} [\Gamma(-1/q, \delta r^q) - \Gamma(-1/q, \delta)] \right]^2 \quad (18)$$

σ_M standart sapma olarak belirtilmiştir.

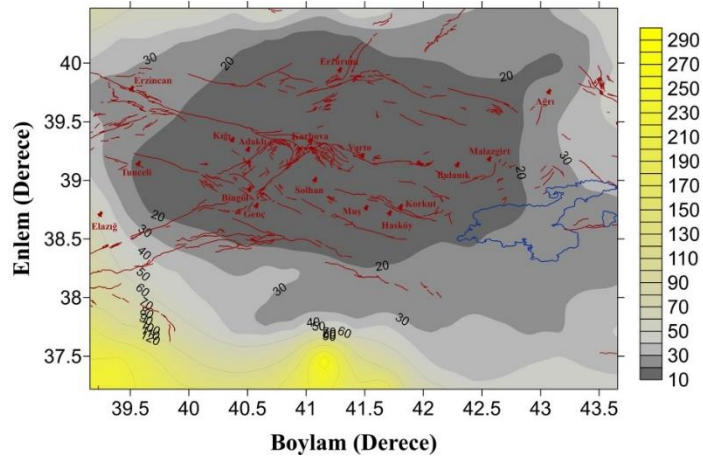
3. Araştırma Bulguları

Yapılan çalışmada deprensellik parametrelerinin belirlenebilmesi için çalışma alanı $0.25^\circ K \times 0.25^\circ D$ $r=0.25^\circ$ olacak şekilde 285 alt alana ayrılmıştır. Oluşturulan alt alanlarda 10 depremden az deprem olması halinde o alt alan değerlendirme dışı bırakılmış ve toplamda 253 alt alan için deprensellik parametreleri hesaplanabilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda oluşturulan ve sırası ile Şekil 8, 9, 10, 11 ve 12'de verilen deprensellik parametreleri dağılım haritalarında ortalama değerden küçük değere sahip alanlar gittikçe koyulaşan gri renk ile ortalama değerden büyük değere sahip alanlar ise gittikçe koyulaşan sarı renk ile karakterize edilmiştir.

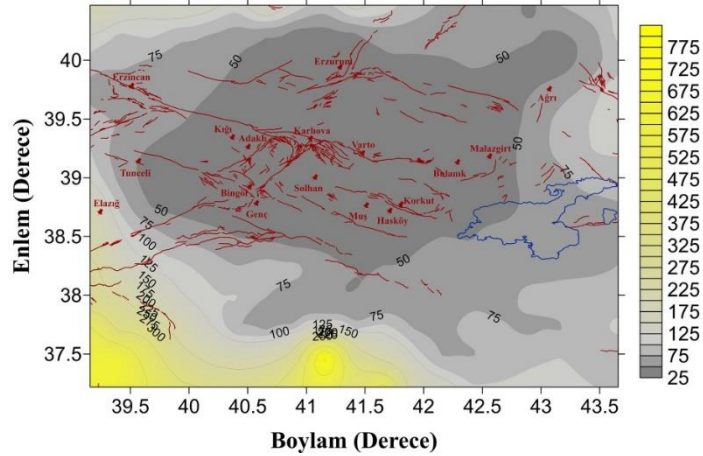
Çalışma alanının deprenselliğinin ortaya konabilmesi amacıyla ilk olarak EBO yöntemi kullanılarak “b” değeri hesaplanmış ve özetle en küçük “b” değeri, ortalama “b” değeri ve en büyük “b” değeri sırası ile $b_{min}=0.60$, $b_{ort}=0.80$ ve $b_{mak}=0.97$ olarak belirlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi Gutenberg-Richter bağıntısındaki ortalama “b” katsayısı sismik olarak aktif bölgelerde yaklaşık olarak 1.0 olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda çalışma alanı için $0.60 \leq b \leq 0.97$ aralığında değişim gösteren “b” değerinin Gutenberg-Richter yasası ile iyi temsil edildiğini ve çalışma alanının sismolojik açıdan önemli bir tektonik bölge olduğunu söylemek mümkündür.

Bölgeden bölgeye değişim gösteren “b” değerleri sahip oldukları matematiksel değerler dışında oluşturdukları dağılımlar ile de herhangi bir bölgenin deprem potansiyelinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadırlar. Çalışma alanı içerisinde “b” değerinin göstermiş olduğu değişimin incelenmesi ve bu değişime neden olan faktörlerin çalışma alanının bilinen deprem

“b” değerinin ve “b” değeri dağılım haritasının değerlendirilmesinden sonra her bir alt alan için “a” değeri ve Poisson modeline göre deprem tehlike parametreleri (“a”, “a₁”, “a₁’”) hesaplanmıştır. Ancak güvenilir ve multidisipliner çalışmalarda kullanılabilirliği yüksek “T_r” ve “R_i” değerleri elde edebilmek için seçilecek magnitüd değeri oldukça önemlidir. Çalışma alanı episantr dağılım haritası (Şekil 6) incelendiğinde %4 oranında $5 < M_w < 7$ aralığında değişim gösteren orta büyüklükte depremlerin olması nedeniyle $M_w=5.5$ ve $M_w=6.0$ magnitüd değerleri için yapılacak hesaplamaların çalışma alanının yapısına uygun olacağı düşünülmüştür. Bu kapsamda ilk olarak $M_w=5.5$ ve $M_w=6.0$ magnitüd değerindeki depremlerin tekrarlanma periyodları belirlenmiş ve dağılımları sırası ile Şekil 9 ve Şekil 10’da haritalanmıştır.



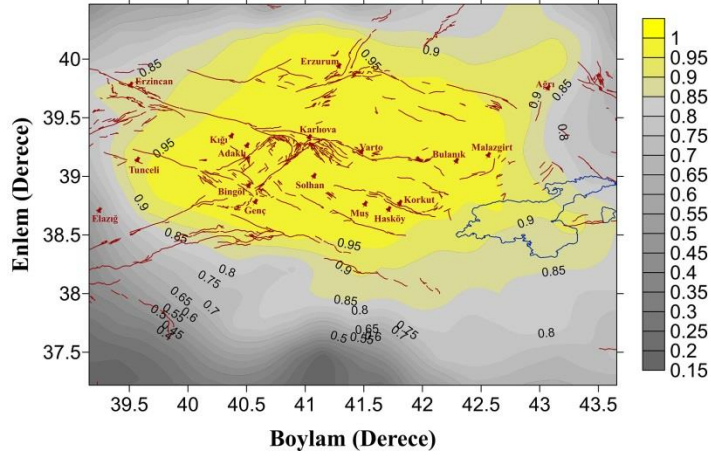
Şekil 9. Çalışma alanı içerisinde $M_w=5.5$ için tekrarlanma periyodu dağılım haritası



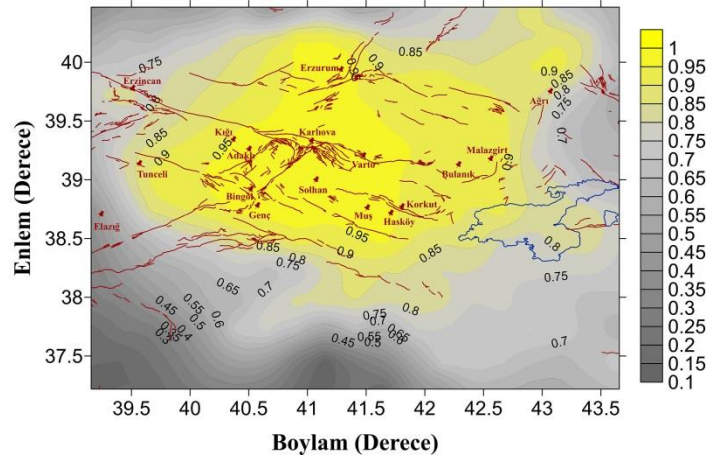
Şekil 10. Çalışma alanı içerisinde $M_w=6.0$ için tekrarlanma periyodu dağılım haritası

Şekil 9’da $M_w=5.5$ magnitüd değerindeki bir depremin tekrarlanma periyodunun $10 \leq T_r \leq 290$; Şekil 10’da ise $M_w=6.0$ magnitüd değerindeki bir depremin tekrarlanma periyodunun $25 \leq T_r \leq 775$ aralığında değişim gösterdiği görülmektedir. Çalışma alanı için seçilen magnitüd değerlerinin “T_r” değerlerinden elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu ve çalışma alanının merkez noktası için ortalama değerden oldukça küçük değerler ile karakterize olduğu görülmektedir.

Tekrarlanma periyodlarının hesaplanmasından sonra $M_w=5.5$ magnitüd değerindeki bir depremin $t=50$ yıl için, $M_w=6.0$ büyüklüğündeki depremin $t=100$ yıl için çalışma alanında yaratacağı tehlike oranları ayrı ayrı hesaplanmış olup, dağılımları ise sırası ile Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 11. Çalışma alanı için $t=50$ yıl için $M_w=5.5$ için tehlike oranı dağılım haritası



Şekil 12. Çalışma alanı için $t=100$ yıl için $M_w=6.0$ için tehlike oranı dağılım haritası

Şekil 11’e göre çalışma alanı için 50 yıllık bir süreçte $M_w=5.5$ magnitüd değerindeki bir depremin yaratacağı tehlike oranı 0.15 ile 0.99 arasında değişim gösterirken ortalama değer 0.80’dir. Şekil 12’ye göre ise çalışma alanı için 100 yıllık bir süreçte $M_w=6.0$ magnitüd değerindeki bir depreme ait tehlike oranı 0.11 ile 0.97 arasında dağılım gösterirken ortalama değer 0.74 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma alanı için belirlenecek son depremsellik parametresi olarak kabul edilen “ m_{max} ” değeri ise Kijko ve Singh (2011) tarafından geliştirilen MATLAB tabanlı kodlar kullanılarak K-S ve K-S-B olarak adlandırılan teorilere göre hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. “b” değerlerine göre hesaplanan “ m_{max} ” değerleri

“b” değeri	K-S “ m_{max} ” değeri	K-S-B “ m_{max} ” değeri
0.60	7.25	7.23
0.80	7.40	7.30
0.97	7.66	7.41

“ b_{min} ”, “ b_{ort} ” ve “ b_{mak} ” değerlerine göre hesaplanan çalışma alanı “ m_{max} ” değerleri Tablo 2’de görüldüğü üzere $7.2 \leq m_{max} \leq 7.6$ aralığında değişim göstermektedir. Ancak çalışma alanı için meydana gelme olasılığı daha yüksek olan “ m_{max} ” değerinin belirlenmesi için hesaplanan “ m_{max} ” değerlerinin olasılık-güvenirlilik sınırlarının da belirlenmesi gerekmektedir. Elde edilen “ m_{max} ” değerlerinin $1-\alpha_0$ (olasılık-güvenirlilik sınırları) değerleri ise Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. “b” değerlerine göre çalışma alanı “ m_{max} ” değerlerinin olasılık-güvenirlilik sınırları ($1-\alpha_0$)

“b” değeri	K-S ($1-\alpha_0$)	K-S-B ($1-\alpha_0$)
0.60	1	1
0.80	0.77	0.98
0.97	0.27	0.82

“ $1-\alpha_0$ ” değerinin 0.90 ve daha yüksek olması “ m_{max} ” değerinin güvenilirliğini ifade etmektedir (Pisarenko, 1991). Buna göre yapılan çalışmada farklı “b” değerlerine göre hesaplanan “ m_{max} ” değerlerinden çalışma alanı için $m_{max}=7.2$ değerinin oldukça güvenilir/olası olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada Muş il merkezli ($38.73^\circ K$ Enlem ve $41.49^\circ D$ Boylam) 200 km yarıçapındaki dairesel alan içerisinde 1900-2020 yılları arasında meydana gelen deprem verileri kullanılarak hem yerbilimleri çalışmaları hem de deprem mühendisliği çalışmaları için güncel ve güvenilir depremsellik parametreleri ve maksimum magnitüd değeri elde edilmiştir. Bunun için öncelikle KRDAE kataloğundan seçilen $M \geq 3.0$ deprem verilerine uygulanan belirli standardizasyon işlemlerinden sonra M_w magnitüd ölçeğinde homojen, bağımlı olaylardan arındırılmış ve $M_w=3.2$ 'ye göre tamamlanmış depremsellik çalışmaları için uygun bir katalog oluşturulmuştur. Kataloğun uygun hale getirilmesiyle depremlerin zamana ve uzaya göre dağılımları incelenmiş ve depremsellik parametrelerinin belirlenebilmesi için çalışma alanı $0.25^\circ K \times 0.25^\circ D$ $r=0.25^\circ$ olacak şekilde 285 alt alana ayrılmıştır. Oluşturulan alt alanlarda 10 depremden az deprem olması halinde o alt alan değerlendirme dışı bırakılmış ve toplamda 253 alt alan için gerekli depremsellik parametreleri hesaplanmış ve dağılım haritaları oluşturulmuştur. Çalışma alanının tamamı için “ m_{max} ” değerinin hesaplanması ile de çalışma alanının deprem potansiyeli net bir şekilde ortaya konulmuştur.

Genellikle küçük ve sığ depremler ile karakterize olan çalışma alanı içerisinde EBO yöntemi kullanılarak hesaplanan “a” ve “b” değerlerinin sırası ile $3.97 \leq a \leq 5.95$ ve $0.60 \leq b \leq 0.97$ aralıklarında değişim gösterdiği gözlenmiştir. Çalışma alanının tamamı için ortalama değerler ise “a” değeri için $a_{ort}=5.34$ ve “b” değeri için $b_{ort}=0.80$ olarak hesaplanmıştır. Muş il merkezi ve ilçeleri, Erzurum ve Ağrı “ b_{ort} ” değerinden küçük “b” değerine sahip alanlar olarak ön plana çıkarken Bingöl ve çevresi ile Van Gölü ve çevresi de yaklaşık olarak $b=0.82$ değeri ile çalışma alanının tamamı ile kıyaslandığında küçük “b” değerine sahip alanlar olarak dikkat çekmektedir. Çalışma alanı “b” değeri dağılım haritası incelendiğinde depremlerin episantr dağılımları ile uyumlu sonuç verdiği ancak buna karşılık aktif tektonik birimler boyunca beklenen çizgisel deprensellik yerine alansal deprensellik gösterdiği görülmektedir. Bu durum bölgenin deprenselliğini yansıtmada EBO yönteminin yetersiz kalmasından ziyade çalışma alanının çok sayıda küçük magnitüdü deprem verisi içermesinden kaynaklanmaktadır. Her ne kadar “b” değeri net bir şekilde sadece küçük magnitüdü veya büyük magnitüdü depremlerle ilişkilendirilmiyor olsa bile büyük “b” değeri küçük depremlerin baskın olduğu anlamına gelebilmektedir. Çalışma alanı deprem verilerinin büyük bir çoğunluğunun yaklaşık olarak da %95’inin magnitüd değerinin $3 < M_w < 5$ arasında değişim gösteren küçük depremler olması “b” değerinin baskın karakteri üzerinde oldukça etkili olmakta ve sonuç olarak da deprem yoğunluğuna bağlı olarak bazı farklı dağılımlar oluşturabilmektedir. Sonuç olarak küçük “b” değerlerinin yüksek gerilme düşümü ile ilişkisi göz önüne alındığında Muş il merkezi ve ilçeleri ile çalışma alanı içerisinde Ağrı ve Erzurum olarak tanımlanan alt alanları yüksek deprem tehlikesi ile ifade etmek mümkündür.

Çalışma alanı için Poisson Modeli’ne uygun olarak $M_w=5.5$ ve $M_w=6.0$ magnitüd değerindeki depremlere ait deprensellik parametreleri yine her alt alan için ayrı ayrı hesaplanmış ve dağılımları haritalanmıştır. Çalışma alanının tamamı için ortalama tekrarlanma periyodu “ T_{ort} ” değeri $M_w=5.5$ ve $M_w=6.0$ magnitüd değerindeki depremler için sırası ile 35 yıl ve 92 yıl olarak hesaplanmıştır. Çalışma alanının merkez noktasını oluşturan Muş ili ve çevresine ait değerler ise yine aynı şekilde sırası ile 20 yıl ve 50 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değerler hem $M_w=5.5$ hem de $M_w=6.0$ için hesaplanan “ T_{ort} ” değerinden küçük olması nedeniyle çalışma alanının ileriye yönelik deprem potansiyeli açısından oldukça önemli kabul edilmektedir. Bu nedenle tekrarlanma periyotlarının hesaplanmasından sonra yine aynı magnitüd değerindeki depremlerin yaratacağı tehlike oranları ve meydana gelme olasılıkları hesaplanmıştır. Buna göre 50 yıllık süreçte $M_w=5.5$ magnitüd değerindeki bir depremin meydana gelme olasılığı ortalama %80 iken 100 yıllık süreçte $M_w=6.0$ magnitüd değerindeki bir depremin meydana gelme olasılığı ortalama %74 olarak hesaplanmıştır. Muş il merkezi ve çevresi ise hem $M_w=5.5$ hem de $M_w=6.0$ magnitüd değerindeki depremler için yaklaşık ortalama %90 ve %95 üzerinde olasılık ile karakterize olmaktadır.

Çalışma alanı için “ b_{min} ”, “ b_{ort} ” ve “ b_{mak} ” değerleri kullanılarak ve K-S ve K-S-B teorileri esaslarına uygun olarak hesaplanan “ m_{max} ” değerleri $7.2 \leq m_{max} \leq 7.6$ aralığında değişim göstermektedir. Ancak olasılık-güvenirlilik sınırları dahilinde yapılan değerlendirmeler sonucunda çalışma alanı için K-S-B teorisinin K-S teorisine göre daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir. Buradan hareketle “ m_{max} ” ile ilgili yapılacak multidisipliner çalışmalarda $7.2 \leq m_{max} \leq 7.3$ aralığının göz önüne alınmasının daha gerçekçi olacağını söylemek mümkündür. Ayrıca elde edilen olası-güvenirlilik sınırları dahilindeki “ m_{max} ” değeri çalışma alanının deprenselliğini ve deprensellik parametrelerini belirlemek amacı ile kullanılan veri setinin ve seçilen yöntemlerin de doğruluğuna işaret etmektedir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abercrombie, R.E. (1996). The Magnitude-Frequency Distribution of Earthquakes Recorded with Deep Seismometers at Cajon Pass, Southern California. *Tectonophysics*, 261, 1-7.
- Abramowitz, M., and Stegun, I.A. (1970). *Handbook of Mathematical Functions* (9th ed.), New York, Dover Publications.
- Aki, K. (1965). Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 43, 237-239.
- Akyüz, S., Sancar, T., Zabcı, C. (2010). Karlıova Üçlü Eklemi Civarında Göynük Fayı (Bingöl) ve Varto Fayının (Muş) Morfotektoniği Fay Geometrisi ve Kayma Hızı. TÜBİTAK Proje No: 109Y/160, İstanbul.
- Amelung, F. and King, G. (1997). Earthquake Scaling Laws for Creeping and Non-Creeping Faults, *Geophysical Research Letters*, 24, 507-510.
- Bath, M. (1983). Earthquake Magnitude-Recent Research and Current Trends, *Earth-Science Reviews*, 17, 315-398.
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey-a Synthesis, *Geodinamica Acta*, 14, 3-30.
- Chouliaras, G. (2009). Seismicity Anomalies Prior to 8 June 2008, $M_w=6.4$ Earthquake in Western Greece, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 327-335.
- Cramer, H. (1961). *Mathematical Methods of Statistics*, Princeton, Princeton University Press.
- Demirci, A. & Ekinci, Y.L. (2014). *Muş İli ve Civarının Deprenselliği, Kalkınma Yolunda Doğal Afetler Raporu*, Van, Doğu Anadolu Kalkınma Ajansı.
- Dhout, D., Chorowicz, J. 2006. Review of the Neotectonics of the Eastern Turkish-Armenian Plateau By Geomorphic Analysis of Digital Elevation Model Imagery, *International Journal of Earth Science*, 95, 34-9.
- Dölek, İ. (2014). *Muş Depremleri (Eylül 2013) ve Muş İlinin Deprenselliği, Makalelerle Muş*. Muş, Muş Alparaslan Üniversitesi Yayınları.
- Enescu, B. & Ito, K. (2002). Spatial Analysis of the Frequency Distribution and Decay Rate of Aftershock Activity of the 2000 Western Tottori Earthquake, *Earth, Planets and Space*, 54, 847-859.
- Everden, J.F. (1970). Study of Regional Seismicity and Associated Problems. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60, 393-446.
- Frohlick, C. & Davis, S. (1993). Telesismic b -Values: or, Much About 1.0. *Journal of Geophysical Research*, 98, 631-644.

- Gutenberg, B. & Richter, C.F. (1954). *Seismicity of the Earth and Related Phenomena* (Second Printed), Princeton, Princeton University Press.
- Gutenberg, B. & Richter, C.F. (1956). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. *Bulletin of Seismology Society of America*, 46, 105-145.
- Işık, E. (2012, December). Seismicity of Mus Province, *3rd International Science Technology and Engineering Conference (ISTE-C 2012)*, Dubai.
- Işık, E., Aydın, M.C., Bakış, A., Özlük, H.M. (2012). Bitlis ve Civarındaki Faylar ve Bölgenin Depremselliği, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(2): 153-169.
- Kadirioglu, F.T., Kartal, R.F., Albayrak, H. Ve Çeken, U. (2011, Nisan). 22 Şubat 2011 Muş-Bulanık Deprem Etkinliği, *64. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara.
- Ketin, İ. (1977). Van Gölü ile İran Sınırı Arasındaki Bölgede Yapılan Jeoloji Gözlemlerinin Sonuçları Hakkında Kısa Bir Açıklama, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, Ankara, 20:79-85.
- Kijko, A. and Graham, G. (1998). Parametric-historic Procedure for Probabilistic Seismic Hazard Analysis Part I: Estimation of Maximum Regional Magnitude m_{max} , *Pure and Applied Geophysics*, 152, 413-442.
- Kijko, A. and Sellevol, M.A. (1989). Estimation of Earthquakes 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, 3, 645-654.
- Kijko, A. and Sellevol, M.A. (1992). Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files, Part II. Incorporation of Magnitude Heterogeneity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, 120-134.
- Kijko, A. and Singh, M. (2011). Statistical Tools for Maximum Possible Earthquake Magnitude Estimation, *Acta Geophysica*, 59, 4, 674-700.
- Lomnitz, C. and Sing, S.L. (1976). Earthquake and Earthquake Prediction in Seismic Risk and Engineering Decisions, *Elsevier Scientific Publishing Company*, Amsterdam: 3-30.
- McNally, K.C. and James, D.E. (1989). Earthquakes and Seismicity, *The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 308-315.
- Miyamura, S. (1962). Magnitude-Frequency Relations and its Bearing to Geotectonics, *Proceedings of the Japan Academy*, 38, 27-30.
- Mogi, K. (1967). Earthquakes and Fractures. *Tectonophysics*, 5, 35-55.
- Örgülü, G., Aktar, M., Türkelli, N., Sandvol, E., Barazangi, M. (2003). Contribution to the seismotectonics of the Eastern Anatolian Plateau from Moderate and Small Size Events, *Geophysical Research Letters*, 30 (24) :1-12.
- Papazachos, B.C. & Papazachou, C.B. (1997). The Earthquakes of Greece, Ziti Oublication Thessaloniki, 340 p, Greece.
- Papazachos, B.C. (1999). An Alternative Method for a Reliable Estimation of Seismicity with an Application in Greece and The Surrounding Area, *Bulletin of Seismology Society of America*, 89, 111-119.
- Pearce, J.A., Bender, J.F., De Long, S.E., Kidd, W.S.F., Low, P.J., Güner, Y., Şaroğlu, F., Yılmaz, Y., Moorbath, S., Mitchell J.G. (1990). Genesis of Collision Volcanism in Eastern Anatolia, Turkey, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 20 December 1990, 44(1-2): 189-229.
- Pisarenko, V.F. (1991). Statistical Evaluation of Maximum Possible Magnitude, *Izvestiya, Earth Physics*, 27, 757-763.
- Poisson, S.D. (1838). *Recherches Sur la Probabilite Des Jugements en Matieres Criminelles et Matire Civile*, Paris, France, Elibron Classic Series.
- Reasenberg, P.A. (1985). Second-order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982, *Journal of Geophysical Research*, 90 (B7), 5479-5495.
- Scholz, C.H. (1968). The Frequency-Magnitude Relation of Microfracturing in Rocks and its Relation to Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 399-415.
- Shi, Y. & Bolt, B.A. (1982). The Standart Error of the Magnitude-Frequency b-value, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72, 1677-1687.
- Sobiesiak, M. (2000). Fault Plane Structure of the Antofagasta, Chile, Earthquake of 1995, *Geophysical Research Letters*, 27, 577-600.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Boray, A. (1987). *Türkiye'nin Diri Fayları ve Depremsellikleri*, Ankara, MTA,
- Turcotte, D.L. (1986). A Fractal Model of Crustal Deformation, *Tectonophysics*, 132, 261-269.
- Udias, A. & Mezcuca, J. (1997). *Fundamentos De Geofisica, Qe 501*, Madrid, Alianza Editorial.

- Westerhaus, M., Wyss, M., Yılmaz, R. & Zschau, J. (2002). Correlating Variations of b values and crustal deformations during the 1990s may have Pinpointed the Rupture Initiation of the Mw=7.4 Izmit Earthquake of 1999 August 17, *Geophysical Journal International*, 148, 139-152.
- Wiemer, S. & Katsumata, K. (1999). Spatial Variability of Seismicity Parameters in Aftershock Zones, *Journal of Geophysical Research*, 104, 13135-13151.
- Wiemer, S. & Wyss, M. (1997). Mapping the Frequency-Magnitude Distribution in Asperities: An improved Technique to calculate recurrence times. *Journal of Geophysical Research*, 102, 15115-15128.
- Wiemer, S. & Wyss, M. (2000). Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples From Alaska, the Western United States, and Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 4, 859-869.
- Wiemer, S. (2001). A Software Package to Analyze Seismicity: Zmap, *Seismological Research Letters*, 72, 2, 374-383.
- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the Earthquake Frequency Distribution, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31, 341-359.
- Yüçemen, M. S. (2011, Ekim). Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi: Genel Bakış ve İstatistiksel Modellemede Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar, *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Ankara, ODTÜ.