Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi

Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering

AKÜ FEMÜBİD **18** (2018) **015803** (1089-1101) AKU J. Sci. Eng.**18** (2018) **015803** (1089-1101)

DOI: 10.5578/fmbd.67650

Araştırma Makalesi / Research Article

Fay Parametreleri ve Deprem Büyüklüğü Arasındaki İlişkiler İçin Yeni Bir Program: FaultStat

Ökmen Sümer[1], Oğuzcan Karagöz[2], Akın Alak[1]

[1]Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Kampüsü, Buca-İzmir/Türkiye
[2] Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Geo und Umweltnaturwissenschaften, Freiburg-Almanya

e-posta: okmen.sumer@deu.edu.tr

Geliş Tarihi:28.06.2018 ; Kabul Tarihi: 15.11.2018

Öz

Günümüzde bir bölgenin sismik risk analizlerinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için, öncelikle o bölgenin sismik deformasyon deseninin hangi yapısal elemanlar tarafından kontrol edildiğinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Belirlenen yapısal elemanların, kinematik anlamda türleri, geometrileri ve segment yapılarının ortaya çıkartılması ise sismik risk analizlerinin temelini oluşturur. Bu bağlamda, belirlenmiş yapısal elemanların üretebilecekleri maksimum deprem potansiyelleri ile yaratabilecekleri yüzey kırığı uzunluğu ve maksimum yer değiştirme miktarlarının hesaplanabilmesi için, gerek deterministik gerekse olasılıklar üzerinden belirli yaklaşımlarla bir değerlendirme yapılmaktadır. Bu yaklaşımlar ana hatlarıyla (1) jeofiziksel olarak sismik veriler yardımıyla ve/veya jeodezik veriler ışığında (2) tarihsel ve/veya aletsel dönemde meydana gelmiş depremlerin yarattığı yüzey deformasyonlarının jeolojik gözlemlerine dayanır.Bu çalışma kapsamında, Dünyada meydana gelmiş tarihsel ve aletsel döneme ait depremlerin jeolojik gözlemlerinin sunulduğu 500'ün üzerinde çalışma derlenerek toplamda 224 adet depreme ait bir veri seti oluşturulmuş ve değerlendirilmiştir. Bu veriler üzerinde, jeolojik gözlemlerin yapıldığı zaman, ölçüm tekniği ve verinin kendi içinde farklı çalışmalardaki uyumluluğu dikkate alınarak belirli bir kalite sınıflaması yapılmıştır. Depremleri üreten faylar kinematik özelliklerine göre gruplandırılmış ve daha sonra büyüklük (M_w)-yüzey kırığı uzunluğu, büyüklük (M_w) -maksimum atım miktarı gibi parametreler hesaba katılarak lineer ya da logaritmik modelleri oluşturularak FaultStat isimli yeni bir bilgisayar programı üretilmiştir. Program hafızasındaki veri setinden hesaplama yapmasının yanında, girilen yeni deprem verilerinden yola çıkarak formüller için yeni katsayılar da hesaplayabilmektedir.

Anahtar kelimeler
Sismik risk analizi; Fay türü; Yüzey kırığı uzunluğu; Maksimum atım miktarı; Yazılım; FaultStat.

A New Software For Relationships Between Fault Parameters and Earthquake Size: FaultStat

Abstract

Currently, in order to perform a well seismic risk analysis for a region, firstly it is necessary to know which structural elements have been shaping the seismic deformation pattern in the region. Segmentation of these structures and identification of their geometric and kinematic characteristics also underpin for seismic risk analysis. In this context, in order to calculate maximum earthquake potential, the surface rupture lengths and maximum displacement amounts of these verifying structures, an assessment with specific approaches both deterministic and probabilistic are progressed. These approaches are outlined (1) through the instrument of seismic data in geophysical and/or in the light of geodetic data (2) based on the geological observations of the surface deformations which created by historical and/or instrumental earthquakes. In the scope of this study, over 500 previous studies that presented on the geological observations are compiled and worldwide data set of 224 historical and instrumental earthquakes are composed and interpreted. On this data, a quality ranking

Keywords
Seismic risk analysis; Fault type; Surface rupture length; Maximum displacement amount; Software; FaultStat.

classification has been performed in accordance with geological observations date, measurement technique and the compatibility of the data with the different studies. First earthquakes faults are grouped according to their kinematic characteristics, and then a new computer software (FaultStat) has been advanced using parameters such as magnitude-surface rupture length, magnitude-maximum displacement amount are added to the calculations in linear or logarithmic models. Beside, the software calculates from the data set in its memory, it can also calculate new coefficients for the formulas based upon the new earthquake data entered.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Günümüzde bir bölgenin sismik risk analizlerinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için, öncelikli olarak o bölgenin sismik deformasyon deseninin hangi yapısal elemanlar tarafından sağlandığının iyi bilinmesi gerekir. Belirlenen yapısal elemanların, kinematik anlamda türleri, geometrileri ve segment yapılarının ortaya çıkartılması ise sismik risk analizlerinin temelini oluşturur. Bu analizlerde gerekli olan bütün jeolojik parametreleri eksiksiz çıkartılmış yapısal elemanların üretebilecekleri maksimum deprem potansiyelleri ile, depremlerde yaratabilecekleri yüzey kırığı uzunluğu ve maksimum yer değiştirme miktarlarının hesaplanabilmesi için, gerek deterministik gerekse olasılıklar üzerinden belirli yaklaşımlarla bir değerlendirme yapılmaktadır. Bu yaklaşımlar ana hatlarıyla (1) jeofiziksel olarak sismik veriler yardımıyla ve jeodezik veriler ışığında (2) tarihsel ve/veya aletsel dönemde meydana gelmiş depremlerin yarattığı yüzey deformasyonlarının jeolojik gözlemlerine dayanır.

Dünyada meydana gelen deprem kaynaklı enerji boşalımının % 90'nı plakalar arasındaki sınırlarda %10'u ise plakalar içinde ya da mikro plaka sınırlarında gerçekleşmektedir (Bolt, 2005, Arya *et al.* 2016). Bu oran farkı, büyük depremlerin yarattığı yüzey deformasyonlarının jeolojik olarak ölçülebilmesine de doğrudan etki yapar. Doğal olarak, depremin yarattığı yüzey deformasyonunun özellikle okyanus ya da her hangi bir su kütlesi altında meydana gelmesi, gerek ulaşılabilirliği gerekse sağlıklı bir gözlemin yapılması yönünde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu bağlamda, günümüze değin yapılan deprem kaynaklı yüzey deformasyonlarının ölçümlerinde, veri azlığının temel sebebi de büyük depremlerin genelde okyanus su kütlesinin altındaki levha sınırlarında meydana gelmesinden kaynaklanır.

Tarihsel süreçte, deprem kaynaklı yüzey deformasyonlarının gözlemleri ~ MÖ 500'lere kadar dayanır. Günümüzde elimizde hiçbir eseri bulunmayan fakat diğer antik ve Roma dönemi filozof ve şairlerinin sıklıkla bahsettiği Samos'lu Pythagoras, depremlerin yarattığı yüzey deformasyonlarını gözlemleyerek aktardığı bilinen ilk kişidir. Romalı şair *Publius Ovidius Naso*'nun *Metamorphoses* isimli kitabının 15. Bölümü Pythagoras'ın öğretilerini şiirsel olarak ifade eder Dryden *et al.* (1826) ve Kline (2000)'nin çevirilerinde, depremin yeri yardığı, bazı su kaynaklarını kurutup yeni kaynaklar oluşturduğu, akarsuların yataklarını değiştirdiği gibi gözlemler sıralanmaktadır. Bu öğretilerin üzerinden geçen yaklaşık 2250 yıl sonra, ilk kez John Michell düzlemsel bir kırığın/süreksizliğin jeolojik birimler arasında bir ötelenme yarattığı ve bu atımın depremlerle ilişkili olduğunu belirtir (Michell 1759). Bu gelişmeler ışığında, "fay (fault)" terimi bugün bildiğimiz anlamda *Lazzoro Moro*'nun işaret ettiği şekilde Lyell (1830) tarafından kullanılır. Burada fay terimi, benzer şekilde jeolojik formasyonları öteleyen ve kıtaların yeraltı hareketleri sayesinde yükselmesini sağlayan bir süreksizlik olarak tanımlanır. Sonrasında, Haughton (1858), fayları atım türüne göre yanal, düşey veya her iki doğrultuda da atım yaratarak kayaları öteleyen süreksizlik şeklinde basit olarak ilk kez sınıflar. Ardından Reid *et al.* (1913) faylar üzerine terminolojik bir birliğe gitmek adına bir terminoloji yayımlar. Rapor niteliğindeki bu yayında, faylar düzlemleri üzerindeki atım yönüne göre, eğim atımlı, doğrultu atımlı ve oblik atımlı şeklinde

bugün bizimde kullandığımız şekliyle sınıflandırma yapılmıştır. Yeryüzünde yerbilimcilerin haritaladığı ve kayalar içinde gözlemlediği her fayın deprem üretmediği ise 20. yy başlarında fark edilir. Branner (1911), bazı fayların geçmişte deprem ürettiği fakat günümüzde aktivitesini yitirdiğini belirtirken, Wood (1916) deprem üreten süreksizlikleri "canlı fay (living faults)" olarak tanımlar. Willis (1923) Kaliforniya Fay haritasında, fayları birbirlerinden ayırarak ilk kez aktif ve ölü "active and dead faults" olarak ayırır. Aynı yıl Taber (1923), aktif fayların tanımlanmasıyla ilgili ölçütlere açıklık getirir. 1950'lerin başlarından itibaren özellikle deprem büyüklüğü ile yüzey deformasyonunun ilişkili olduğunun anlaşılmasıyla birlikte, önce jeofiziksel parametrelerle sismolojik veriler ile ilişkili matematiksel denklemler geliştirilirken, Tocher (1958) ilk kez Kaliforniya ve Nevada'daki depremlerin jeolojik gözlemlerine dayanan veri setleri üzerinden, deprem büyüklüğü, yüzey yırtılma uzunluğu ve atım miktarları arasındaki ilişkiyi ele alan bir çalışma yapar. Böylelikle Lyell (1868)'de dikkat çekilen deprem, etki alanı ve yüzey deformasyonu ilişkisi ilk kez sayısal olarak değerlendirilme fırsatı bulur. Hemen arkasından Iida (1959), Japonya ve yakın çevresinde meydana gelmiş depremlerin verilerinden büyüklük - yüzey yırtılma uzunluğu ile ilgili yeni bir çalışma yayınlar. Fay türüne göre yüzey yırtılma uzunluğu ve atım miktarının da değişiklik gösterdiği ilk kez Bonila and Buchanan (1970) tarafından ele alınır. Kelleher *et al.* (1973)'ün Dünya üzerinde farklı lokasyonlarda gerçekleşen depremlerin farklı deformasyon desenlerine sahip olduğunu vurgulamasının ardından Acharya (1979), Türkiye, Japonya, Alaska, Güney Amerika ve Birleşik Devletlerde meydana gelmiş olan depremlerin sismik verilerini değerlendirerek yüzey yırtılması deprem büyüklüğü ilişkilerinin de bölgesel olarak değiştiğini vurgular. Bonilla *et al.* (1984) gerek fay türü, gerek deprem lokasyonlarına göre bir istatistiksel değerlendirme yaparak, formüllerin oluşturulmasındaki veri seçimindeki önemi vurgular. 1980'li yıllardan başlayarak, deprem büyüklüğü ile yüzey yırtılması ve atım miktarı ile ilgili çalışmalar hız kazanır. Gerek yerel gerek küresel ölçekte birçok çalışmadan elde edilen verilerin bir araya getirilmesiyle yeni formüllerin önerilmesinin önü açılır. Wells and Coppersmith (1994), kendinden önce sunulan verileri bir araya getirerek günümüzde de fay türüne bağlı en çok kullanılan formüllerin oluşturulmasını sağlar. 1990'lardan sonra oluşturulan formüllerde kullanılan verilerin kalitesi sorgulanmaya başlanarak, veriler yüzey deformasyonun haritalanması, fay segmentlerin belirlenmesi ve bu fay parçalarının paleosismolojik kayıtların bilinmesi gibi kalite standartlarına göre filtrelerden geçirilerek kullanılmaya başlamıştır (örn., Pavlides and Caputo, 2004). Çalışmalar bu noktadan sonra daha karakteristik hale gelerek, daha çok fay türü odaklı veri setleri ve tek bir fay türü ile ilgili formüllerin oluşturulmasına doğru yoğunlaşmıştır (örn.,normal faylarda Youngs *et al.* (2003); doğrultu atımlı faylarda Petersen *et al.* (2011); ters faylarda Lettis *et al.* (1997). Bu arada hali hazırda yenilenen veri setleri ile bütün fay türleri için formül oluşturma çalışmalarına da devam edilmiştir (örn., Wesnousky 2008). Hatta, sadece fay türü değil tektonik ortam sınıflamaları da içeren ve sadece deprem büyüklüğü-yüzey kırığı uzunluğu veya en büyük atım ilişkisi dışında, yırtılma alanı ve kayma hızı gibi parametrelere bağlı da sismik risk analizlerinde kullanılabilecek yaklaşımlar ve yazılımlar geliştirilmiştir (örn., Stirling and Goded 2012).

Doğal olarak günümüzde de yüzey kırığı gerçekleştiren depremler meydana gelmekte ve veri seti bu bağlamda hem gelişen teknoloji ve jeolojik gözlem yeteneğinin bilimsel olarak artması hem de çalışmaların belirli bir seviyenin üstünde nitelik kazanması ve yoğunlaşmasıyla daha verimli hale gelmektedir. Elde edilen yeni veriler ışığında, formüllerin geliştirilmesi ve daha kaliteli, doğruya daha yakın hale getirilmesi çalışmaları da hali hazırda devam etmektedir. Fakat günümüzde, aktif tektonik çalışmalarda bulunan yerbilimcilerin kullanabileceği, deprem büyüklüğü ve yüzey kırığı bağıntılarına dayanan ve bütün fay türlerini kapsayan, basit kullanımlı ve kendini yeni veriler ile güncelleye bilecek bir yazılım hali hazırda bulunmamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, literatürdeki veri setlerine ek olarak 2016 yılı da dâhil olmak üzere birçok yeni deprem verisi de eklenerek oluşturulan bir katalog kapsamında, fay türüne göre deprem büyüklüğü ile yüzey kırığı uzunluğu ve atım ilişkileri arasındaki parametrelerin hesaplanabildiği yerbilimciler için kullanımı basit bir program hazırlanmıştır. Bu programın diğer bir farklı özelliği de, yeni elde edilecek veriler ışığında kendisini güncelleyebilmesidir.

2. Çalışmada Kullanılan Veri Seti

Yapılan çalışma kapsamında programın yazılımı ve değerlendirmesi için M.S. 1653 ile 2016 yılları arasında kayıt altına alınmış 25 adet tarihsel, 199 adet ise aletsel döneme ait olmak üzere toplamda 224 adet deprem verisi kullanılmıştır. Kullanılan bu veriler 500'den fazla yazılı kaynağın taranması sonucunda elde edilen en tutarlı 50 adet makale/katalog ve Harvard Global CMT Catalog (HRV) ve Euro-Med Seismological Centre (EMSC) olmak üzere 2 adet sismoloji merkezinden alınan veriler derlenerek düzenlenmiştir.

Kullanılan bu kaynaklardan Wells and Coppersmith (1994)'e ait 127 adet, Ambraseys and Jackson (1998)'e ait 60 adet, Lettis et al. (1997)'e ait 52 adet, Wesnousky (2008)'e ait 28 adet ve Pavlides and Caputo (2004)'den 19 deprem bunların dışında birbirinden farklı 48 kaynaktan olmak üzere toplamda 104 adet deprem verisi değerlendirilmiştir. Farklı kaynaklarda bulunan aynı depremler kontrol edilerek, veri kalitesi en yüksek ve kronolojik olarak daha yeni olanları ile sadece belli bir fay türüne yoğunlaşmış çalışmaların verileri tercih edilmiş ve veriler birbirleriyle mukayese edilerek derlenmiştir. Ayrıca bu veri seti içinde 17 çalışmadan 54 adet normal faylanma verisi, 22 kaynaktan 45 adet ters faylanma verisi, 11 adet çalışmadan 36 adet verev atımlı fay verisi ve 18 farklı kaynaktan 89 adet doğrultu atımlı faylanmaya ait deprem verisi kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen veriler; depremin konumu, depremin adı, depremin tarihi, fay türü, büyüklüğü (M), yüzey kırığı uzunluğu (km) ve maksimum yer değiştirme (m) olarak sınıflandırılmıştır. Bu verilere daha kolay ulaşımın sağlanması adına makalenin ekinde 3 sekmeden oluşan bir Excel tablosu sunulmuştur.

3. Fay Tanımı ve Deprem Büyüklüğü Seçimi

Bu çalışma kapsamında kullanılan fay türleri, Haughton (1858)'den itibaren başlayan ve Reid *et al.* (1913)'ün verdiği terminolojik temele dayanır. Sonrasında yapılan Hills (1940), Bott (1959), Bonnila and Bunchanan (1970) gibi çalışmalar bugün kullandığımız fay terminolojisinin temellerinin atılmasına katkı sağlamıştır. Temelde faylar atım mekanizma türlerine bakılarak eğim atımlı, oblik (verev) atımlı ve yanal atımlı olarak değerlendirilir. Fay bloklarının yerçekimi vektörüne göre hareketi ise normal ve ters faylanmayı ifade eder. Çizelge 1'de bu sınıflamalar birleştirilerek faylar atım mekanizmalarına göre sadeleştirilerek sunulmuştur.Atım şekli temel alınarak ayrılan faylanma türleri, kayma açılarına göre değişiklik göstermektedir. Bonnila and Bunchanan (1970) bu açıyı 30°'lik bölümlere ayırarak verirken, Woodcook (1987) 22.5°'lik bir sınırı tercih eder. Sismolojik çalışmalarda ise daha çok deprem odak mekanizma çözümünden elde edilen veriler kayma açısı anlamında iki adet yarım daire olarak ele alınırken, negatif (-) değerler normal, pozitif (+) değerler ise ters faylanma mekanizmasını ifade eder. Bu bağlamda Cronin (2004), eğim ve verev atımlı faylanma ile yanal ve verev atımlı faylanma sınırını 20°'lik bölümlere ayırarak verir. Bu çalışmada, ana hatlarıyla önceki deprem - yüzey faylanması ile ilgili hazırlanmış kataloglarda verilmiş fay türü ayrımı basitleştirilerek kullanılmış. Eğer yüzey yırtılması ile ilgili verilmiş bir odak mekanizma çözümü bulunmaktaysa, fay türü ayrımına Cronin (2004)'de verilen kayma açısı değerleri temel alınarak bir yaklaşım gösterilmiştir. Bu bağlamda, faylar bu çalışmada kullanılan fay türleri şeklinde 6 ana tip fay olarak (sağ/sol yanal, normal/ters verev ve normal/ters eğim atımlı şeklinde) Çizelge 1'de sunulmuştur. Yerbilimsel çalışmalarda bir depremin büyüklüğünün belirlenmesinde farklı veriler değerlendirilerek saptanan büyüklük çeşitleri

kullanılmaktadır (Båth 1981). Richter (1935)'in tipik bir Wood-Anderson sismografı ile tanımladığı ilk yerel büyüklüğü (M_L) tanımlamasından bu yana, kronolojik olarak yüzey-dalgası büyüklüğü (M_s), cisim dalgası büyüklüğü (m_b ve m_B) ve moment büyüklüğü (M_w) terimleri ortaya atılmıştır. Bu büyüklüklerin hesaplanmaları genelde farklı sismik dalgaların verileri kullanılarak yapılsa da, birbirleri arasında ampirik ilişkiler kurarak çevirim yapanbilimsel çalışmalarda oldukça yoğundur (Kanamori 1983).

Çizelge 1. Atım mekanizmalarına göre fay sınıflaması ve bu çalışmada kullanılan fay türleri. Sınıflamanın oluşturulmasında Lyell (1830), Haughton (1858), Reid *et al.* (1913), Hills (1940), Bott (1959), Bonnila and Bunchanan (1970) ve Woodcook (1987)'deki veriler birleştirilmiştir.

ATIM MEKANİZMALARINA GÖRE FAY SINIFLAMASI							
DOĞRULTU ATIMLI		OBLİK (VEREV) ATIMLI				EĞİM ATIMLI		DÜŞEY FAY
SOL YANAL	SAĞ YANAL	SOL YANAL BİLEŞENLİ		SAĞ YANAL BİLEŞENLİ		NORMAL FAY	TERS FAY	
		NORMAL	TERS	NORMAL	TERS			
BU ÇALIŞMADA KULLANILAN FAY TÜRLERİ								
DOĞRULTU ATIMLI		OBLİK (VEREV) ATIMLI				EĞİM ATIMLI		–
SOL YANAL	SAĞ YANAL	VEREV ATIMLI NORMAL		VEREV ATIMLI TERS		NORMAL FAY	TERS FAY	
LL	RL	N-L		R-L		N	R	

Bu çalışmada kullanılan veri setindeki deprem büyüklükleri ise, şayet mevcutsa depremlerin moment büyüklükleri (M_w) temel alınarak değerlendirilmiştir. Diğer yandan moment büyüklükleri (M_w) bulunmayan verilerdeki yüzey-dalgası büyüklükleri (M_s) ise Scordilis (2006)'da önerilen önce M_s - M_{SK} (Karnik magnitüdü), ve sonrasında M_{SK} - M_w dönüşüm formülleri yardımı ile yeniden hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan formüller Çizelge 2'de sunulmuştur. Önce her deprem verisinin M_s ve M_{SK} büyüklüklerine bağlı aralığı belirlenmiş ve önerilen formüllere göre dönüşüm yapılmıştır. Dönüşüm yapılmış olan büyüklükler makalenin ekinde verilen Excel dosyasının veri bölümünde (*) işareti ile gösterilmiştir.

Çizelge 2. Bu çalışmada kullanılan M_s - M_{SK} - M_w dönüşüm formülleri (M_w: moment büyüklüğü, M_s: yüzey-dalgası büyüklüğü, M_{SK}: Karnik magnitüdü). Belirleme Katsayısı (R^2) ve Standart sapma değerleri (σ) dağılımdaki bileşenler arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü ölçmektedir. Değerlerin 1'e yakın olması formüllerin güvenilirliği ile orantılıdır. Dönüşüm formülleri Scordilis (2006)'dan alınmıştır.

DEPREM BÜYÜKLÜK M_s - M_{SK} ve M_{SK} - M_W DÖNÜŞÜM FORMÜLLERİ			
M_{SK} aralık değerleri	Denklem Formülü	Belirleme Katsayısı (R^2)	Standart sapma değeri (σ)
$4.0 \le M_{SK} \le 5.3$	$M_s = 1.19\ (\pm 0.06) M_{SK} - 1.14\ (\pm 0.26)$	0.53	0.37
$5.4 \le M_{SK} \le 8.1$	$M_s = 1.05\ (\pm 0.05) M_{SK} - 0.41\ (\pm 0.31)$	0.82	0.27
M_{SK} aralık değerleri	Ampirik Formül	Standart sapma değeri (σ)	
$4.0 \le M_{SK} \le 5.3$	$M_W = 0.80 \times M_{SK} + 1.31$	0.41	
$5.4 \le M_{SK} \le 6.2$	$M_W = 0.70 \times M_{SK} + 1.80$	0.29	
$6.3 \le M_{SK} \le 8.1$	$M_W = 1.04 \times M_{SK} - 0.33$	0.31	

4. Programın Tanıtımı

Bu çalışmada geliştirilen FaultStat programının 2 ana işlevi bulunmaktadır. Bunlardan ilki bu çalışma kapsamında derlenen 224 adet deprem verisinden yola çıkarak, deprem büyüklüğü (Mw: moment büyüklüğü) - yüzey faylanması uzunluğu ve maksimum yer değiştirme miktarları arasındaki

ilişkilerin hesaplanması için hali hazırda üretilmiş formülleri, kullanıcılar için basit kullanımlı bir ara yüz haline getirmektedir. Mevcut veri seti içinden hesaplanan formüller Çizelge 3'te özetlenmiştir. Program ürettiği formülleri veri bulutu içinde bulunan çok ayrımlaşmış örnekleri değerlendirme dışına atarak hesaplamaları yapmaktadır.Fay türüne göre ayrılan veri seti içinde N (toplam veri sayısı) ve FN (denklemler için seçilen uyumlu veri sayısı) yine Çizelge 3'te verilmiştir. Programın ikinci fonksiyonu ise yeni veri seti girişine imkân sağlamasıdır. Program, girilen yeni veri setleri için yeni formüller hesaplayarak daha etkili ve güvenilir sonuçlara ulaşılmasına katkı sağlayan algoritmalar yaratmaktadır. Gelecekte oluşacak depremlerin verileri programa eklenerek, hem veri tabanı güncellenebilecek, hem de yeni formüller için değişken katsayılar üretilebilecektir.

Çizelge 3. M_w – YKU/FU – MAM arasındaki ilişkilerden elde edilen denklem formülleri ve istatistiksel verileri (M_w: moment büyüklüğü, YKU: Yüzey kırılması uzunluğu, FU: Fay uzunluğu, MAM: Maksimum atım miktarı, N: toplam veri sayısı, FN: denklemler için seçilen uyumlu veri sayısı, c ve m: bağıntı kat sayıları, R^2: Belirleme Katsayısı ve σ : Standart sapma değeri).

Denklem Formülü	Fay Türü	N	FN	Katsayılar / hata oranları		σ	R^2
				c	m		
$M_W = m * Log (YKU/FU) + c$	RL	61	47	4.597 / ±0.284	0.5912 / ±0.0713	0.78	0.8613
	LL	28	27	5.133 / ±0.393	0.4865 / ±0.0908	0.59	0.899
	N	54	43	5.344 / ±0.14	0.424 / ±0.0476	0.43	0.888
	R	45	12	5.062 / ±0.632	0.5662 / ±0.2162	0.53	0.773
	N-L	17	12	4.988 / ±0.394	0.5172 / ±0.123	0.49	0.920
	R-L	19	12	5.062 / ±0.0878	0.5662 / ±0.2162	0.53	0.773
Log (MAM) = m * Log (YKU) + c	RL	56	56	-1.616 / ±0.044	1.22 / ±0.116	0.44	0.843
	LL	24	24	-1.678 / ±0.686	1.07 / ±0.051	0.64	0.829
	N	50	42	-1.976 / ±1.3537	1.37 / ±0.215	0.48	0.817
	R	44	44	-0.412 / ±0.241	1.274 / ±0.524	0.45	0.781
	N-L	16	16	-1.961 / ±0.265	1.42 / ±0.789	0.58	0.726
	R-L	18	18	-0.308 / ±0.022	1.148 / ±0.721	0.40	0.760

4.1. Yazılım altyapısı ve gelişimi

Bu çalışma kapsamında çeşitli deprem verilerinin büyüklük, maksimum atım ve yüzey kırığı uzunluğu kayıtlarından geliştirilen FaultStat yazılımı, daha önce önerilen birçok hesaplamadan daha tutarlı bir sonuç vermektedir. Yapılan bu çalışmada fay tiplerine göre sınıflandırılan deprem verileri, güç ile sayının ters orantılı olduğu kabul edilen güç yasası fonksiyonu ve doğal logaritmik fonksiyon dağılımı ile test edilmiştir. Deprem verilerinin dağılımı ve fonksiyon değişkenleri logaritmik fonksiyonun deprem verileri için daha tutarlı ve temsili bir sonuç verdiğini göstermektedir. Buna ek olarak doğal logaritmik fonksiyon, genelleştirilmiş temsili parametreler dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Her fay tipi için elde edilen değişken logaritmik fonksiyonlar, kullanıcı tarafından geri çağrılma yöntemiyle girilen deprem büyüklüğü ve yüzey kırığı parametrelerini ayrı ayrı hesaplayacak şekilde programlanmıştır. Bu aşamada çok girdili (paradigmalı) sayısal hesaplama yazılımı ile matris olarak çevrilen deprem veri bulutu, FaultStat kullanıcılarına ayrıca her bir fay türü için kişisel veri setini ekleme ve kalibre etme özelliğini sunmaktadır. Kalibre edilmiş parametreler, yazılımın temelini oluşturan ve bu çalışma kapsamında derlenmiş veritabanıyla karşılaştırılır ve işlevin sabit dinamik değişkenleri sağlar. Sonrasında ise kalibrasyon fonksiyonunun ve istatistiksel parametrelerin doğruluğu ekrana otomatik olarak yazdırılır.

FaultStat yazılımının temelinde kullanılan doğal logaritmik fonksiyon aşağıda verilen formül ile ifade edilmektedir;

$$y = m.\ln(x) + c$$

Formülde kullanılan (m) değeri fay tipine göre ayrılan deprem büyüklüğü ve yüzey kırığı verilerinden elde edilen grafikte bulunan logaritmik tahmini eğimi temsil etmektedir. Formülde kullanılan (c) değeri dinamik yanılma sabitini temsil etmektedir. Bu doğrultuda *ln(x)* fonksiyonu kullanılacak deprem parametlerinden yüzey kırığını temsil etmekte ve yüzey kırığının doğal logaritmik fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Bu işlem sonucunda elde edilen (y) değeri ise hesaplanan depreme ait tahmini deprem büyüklüğünü temsil etmektedir. Formülde kullanılan (m) ve (c) değerleri girilen verilerin filtrelenmesi sonucu elde edilen değişkenler olup her yeni eklenen deprem verisi sonucu dinamik olarak değişmektedir. Algoritma içerisinde yer alan dinamik değişkenlerin veri setini doğru bir şekilde yansıtması ve değerlendirmesiamacıyla, programın geliştirilmesi için MATLAB® yazılımı ve matematiksel yazılım paketleri ile bağımlı fonksiyonlar yöntemi kullanılmıştır. Yazılımın tamamlanması için toplamda 4 farklı aşamada yazılan fonksiyonlar veriyi alma, geçmiş deprem verilerini içiren veri setini çağırma, hesaplama ve test etme olarak değerlendirilmiştir. Çok girdili(paradigmalı) sayısal hesaplama yazılım dili ile geliştirilen algoritma, fonksiyonlara dökülerek veri bulutu içerisinden tanımlanmış logaritmik fonksiyon modülü ile çağrılır ve kullanıcı arayüzünde oluşturulan ikincil fonksiyon değişkeni için ara bellekte toplanan veriyi kalibre eder. Bu işlem sonucunda veri setine en uygun fonksiyon elde edilir. Girilen deprem büyüklüğü ve/veya yüzey kırığı verisi algoritmik sınıflar içinde geri çağrılarak, bilinmeyen değişken için tekrardan hesaplanır. Elde edilen sonuç önceki ham veri üzerinden kontrol edilip, ara bellekte saklanan veri temizlenir ve değişkenle birlikte sınıflanan bütün veri seti için tanımlayıcı istatistiksel hesaplamalar yapılır. Özelikle R^2 (doğruluk payını sınayan belirleme katsayısı) ve standart sapma *(σ)* verileri, doğrudan fonksiyon tarafından geliştirilen doğal logaritmik algoritmanın girilen veri seti için ne kadar tutarlı ve kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Toplamda 1204 satır kod yazılarak tamamlanan programın son olarak kullanıcı arayüzü oluşturulmuş ve kullanıma hazır hale getirilmiştir. Temel olarak değişken hesaplamaları veri seti analiz ve filtreleme işlemleri için MATLAB® yazılımın matematiksel kütüphanesi kullanıldığı için, bu ek paketler FaultStat yazılımının kurulum dosyalarına eklenerek veri setleri yerel kullanıcı bilgisayarında işlenerek saklanacak hale getirilmiştir.

5. Programın Kullanımı ve Uygulamalı Örnekler

FaultStat yazılımı Windows XP ve sonrasında geliştirilen işletim sistemlerinde çalıştırılabilen bir yazılımdır. FaultStat yazılımının çalıştırılacağı bilgisayarda sorunsuz olarak kurulup kullanılabilmesi için gerekli asgari donanımözellikleri; Intel veya AMD x86-64 işlemci, 2 GB HDD alanı ve 4 GB Ram şeklinde olmalıdır. Bu yazılımın kurulumu için herhangi bir özel grafik kartı özelliği aranmamaktadır. Belirtilen donanımsal özelliklerin sağlanması durumunda programın kurulum işlemine geçilebilir.

FaultStat yazılımının kurulum dosyasına “www.faultstat.com”adresinden erişilebilmektedir. Belirtilen web adresinden kullanıcının karşısına çıkan ilk ana sayfada “Download alpha version” yazılı butona tıklanarak kurulum dosyasının indirme işlemi başlatılır. İndirilen kurulum dosyası açıldıktan sonra gerekli adımlar izlenerek kurulum tamamlanır ve masaüstünde oluşan FaultStat uygulamasına ait masa üstü simgesi tıklanarak yazılım açılmaktadır (Şekil 1).Program açıldıktan sonra kullanıcıları FaultStat kullanıcı ara yüzü karşılamaktadır. Açılan bu ekranın sol üst tarafında 6 farklı fay tipinin bulunduğu “Type of Fault (Fay Tipleri)” penceresi yer almaktadır (Şekil 2). Bu fay tipleri sırasıyla “left lateral (sol yanal)”, “right lateral (sağ yanal)”, “normal”, “normal lateral (verev atımlı normal)”, “reverse (ters)” ve “reverse lateral (verev atımlı ters)” olarak sınıflandırılmışıdır. Fay tipleri penceresinin yanında ise “Analyses (Analiz)” penceresi yer almaktadır. Bu pencere her bir fay türü için yüzey kırığı uzunluğu verileri ile deprem büyüklük verilerinin oluşturduğu doğal logaritmikfonksiyona ait grafiklerin ekrana yansıtıldığı penceredir. Ekranın en sağ köşesinde ise “User Guide (Kullanıcı Kılavuzu)” penceresi yer almaktadır. Bu pencere programın kullanımı

hakkında bilgi vererek kullanıcıyı yönlendirmeyi ve programın kullanımından elde edilecek verilerin bilimsel bir çalışmada kullanılması durumunda kullanıcıların atıf vermesi gereken kaynak bilgilerini içerir.

Programın alt kısmını oluşturan bölümde ise iki farklı pencere yer almaktadır. Bu pencerelerden sol tarafta bulunan "Measurements" penceresi temelde 3 farklı fonksiyon içermektedir. Bu fonksiyonlar sırası ile veri girişi kutuları, "Result (Sonuç)" penceresi ve "Output (Çıktı)" penceresidir. Veri girişi kutuları ise iki farklı bölümden oluşmaktadır; bu bölümler "Magnitude (M_w)" ve "Surface Rupture (Yüzey kırığı uzunlu)" bölümleridir. Kullanıcının "Magnitude" kutucuğuna herhangi bir büyüklük değeri girmesi ve aynı hizada "Result" bölümünde bulunan "Calculate (Hesapla)" butonuna basması durumunda hesaplanan maksimum yüzey kırığı uzunluğu "Result" penceresinde yer alan "Max. Surface Rupture" bölümüne yazdırılacaktır. Aynı şekilde bu işlem "Surface Rupture" girişi yapılarak da gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda "Result" penceresinin en altında yer alan "Maximum Disp." bölümü maksimum atım (kayma) miktarını temsil etmektedir ve her bir fay türü için yapılan hesaplama işlemi sonucunda hesaplanan maksimum atım miktarı metre (m) cinsinden ekrana yazdırılacaktır. En alt sol köşede bulunan "Output" penceresi ise tüm işlemler esnasında programın durumu hakkında kullanıcıya bilgi veren bir alanı temsil etmektedir (Şekil 2). Programın son penceresi ise, en alt sağ köşede yer alan "Statistics (istatistik)" penceresidir. Bu alan, kullanıcıların yaptığı hesaplamaların istatistiksel analizini ve o hesaplamanın yapılabilmesi için programın kullanmış olduğu doğal logaritmik denklemi ekrana yansıtmaktadır. Yansıtılan bu istatistiksel analiz değerlerinin bazıları; "general model (genel model)", "coefficients (katsayılar)", "R^2 (R-square)", "skewness (çarpıklık)", "standard deviation (standart sapma)", "kurtosis (tepelenme/basıklık)" şeklindedir. Yapılan hesaplama işlemi sonrasında farklı bir fay türü ile yapılacak hesaplamalar için kullanıcılar "Reset (sıfırla)" butonuna tıklayarak ekrandaki tüm bilgileri sıfırlayabilmektedir (Şekil 3). Bu hesaplama işlemi esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli husus girilen değerlerin birimleridir, keza girilen deprem büyüklüğünün M_w (Moment Büyüklüğü), yüzey kırığı uzunluğunun ise kilometre (km) cinsinden olmasına dikkat edilmelidir. Dikkat edilmesi gereken bir başka önemli husus ise girilen değerlerin ondalık sayı olması durumunda virgül (,) yerine nokta (.) kullanılması gerekliliğidir.

Bu noktada, programın güvenilirliğinin test edilmesi amacıyla, hali hazırdaki veri setinden oluşturulmuş formüllerin (Çizelge 3), literatürdeki benzer değişkenlerle oluşturulmuş bağıntılardaki formüllerle karşılaştırması da gerçekleştirilmiştir. Örneğin bütün fay türleri için bağlantı veren Wells and Coppersmith (1994)'de sunulmuş formüllerin R^2 (doğruluk payını sınayan belirleme katsayısı) değerleri, MAM için 0.80 – 0.36 arasında değişirken, yazılımdan oluşturulan formüllerde aynı değer 0.843 – 0.726 arasında kalmaktadır. Diğer yandan YKU/FU için hesaplanan bağıntıların R^2değerleri aynı çalışmada 0.86 – 0.38 arasında değişim gösterirken, yeni üretilen yazılımda bu değer 0.92 – 0.77 içinde kalmaktadır. Bu sonuçlar yazılımın doğruluk payı sınırı anlamında literatürde verilen ve yerbilimcilerinin sıklıkla kullanılan bağıntılardan çok daha verimli ve tutarlı olduğunu da göstermektedir.

FaultStat yazılımının bir diğer benzersiz ve önemli özelliği ise kullanıcı tarafından veri girişine izin verilmesi ve girilen verilerin program tarafından işlenerek yeni bir formül oluşturulup yapılacak deprem yaklaşımında hatayı en aza indirmeyi amaçlamasıdır. Bir başka deyişle, gelecekte eklenebilecek her bir deprem verisinin ardından program oluşturduğu her formül için yeni bir katsayı hesaplamaktadır. Programa veri ekleme işleminin yapılabilmesi için kullanıcının elinde bulunan verilerin programın algılayabileceği formata getirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için verilerin Excel tabanlı bir formatta oluşturulması gerekmektedir. Excel programında ilk üç satıra sırası ile M_w cinsinden "deprem büyüklüğünün", kilometre (km) cinsinden "yüzey kırığı uzunluğunun (YKU)" veya "fay uzunluğunu (FU)" ve eğer

kullanıcının elinde bulunuyorsa isteğe bağlı olarak "maksimum atım miktarının (MAM)" metre (m) cinsinden girilerek virgülle ayrılmış değerler dosyası (.csv) formatında kaydedilmesi gerekmektedir (Şekil 4).

Kaydedilen yeni veri dosyasının programa eklenmesi için program ekranında bulunan "Type of Fault" penceresinin sağ alt köşesinde yer alan "Import Data .csv" butonu tıklanması ve sonrasında kullanıcı tarafından hazırlanıp kaydedilmiş olan yeni veri dosyasının seçilerek programa eklenmesi gerekmektedir (Şekil 5). Bu dosyanın eklenmesinin ardından, program kendi veri tabanındaki bilgilere, yeni yüklenen veri setlerini ekleyerek hesaplamaları güncellemektedir.

6. Sonuç ve Öneriler

- Bu çalışma kapsamında, M.S. 1653 ile 2016 yılları arasında kayıt altına alınmış 25 adet tarihsel, 200 adet ise aletsel döneme ait olmak üzere toplamda 225 adet deprem verisi kullanılmış ve bu verilerin deprem büyüklüğü (Mw: moment büyüklüğü) - yüzey kırığı uzunluğu ve maksimum yer değiştirme miktarları arasındaki ilişkilerin hesaplanması için FaultStat isimli bir program geliştirilmiştir.
- Program, bu çalışmada seçilen sağ yanal doğrultu atımlı (RL), sol yanal doğrultu atımlı (LL), verev atımlı normal (N-L), verev atımlı ters (R-L), eğim atımlı normal (N) ve eğim atımlı ters (R) şeklindeki 6 ana fay tipi için ayrı ayrı hesaplama yapabilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca bu veri seti içinde 54 adet normal faylanma (N), 45 adet ters faylanma (R), 36 adet verev atımlı (R-L ve N-L birlikte) ve 89 adet doğrultu atımlı (RL ve LL birlikte) faylanmaya ait deprem verisi kullanılmıştır.
- Program, arayüzünde hali hazırda bulunan veri tabanından ürettiği fonksiyonlar ve bu fonksiyonlar üzerinden gerçekleştirdiği formüller ve hesaplamalar dışında, gelecekte oluşacak deprem verilerinin de programa yükleneceği bir ek bölüm içermektedir. Bu ek yazılım sayesinde, program dinamik hale getirilerek, parametreler arasındaki ilişkilerin yeni veriler ışığında değişkenlik gösterdiği yeni formüller de hesaplanabilmektedir.
- Programın hali hazırdaki verilerden üretilmiş fonksiyonlarının değerlendirildiği ve sunulduğu bir istatistik penceresi de bulunmaktadır. Programın oluşturduğu formüllerin, literatürdeki birçok çalışmada önerilmiş formüllere göre özelikle R^2 (doğruluk payını sınayan belirleme katsayısı) ve standart sapma *(σ)* değerleri açısından daha nitelikli olduğu görülmektedir.
- Gelecekte programa özel üretilecek ek yazılımlarla, farklı fay türlerinde yapay uyumlu deprem değişkenleri ve dinamik fay modelleri üretme yeteneği eklenerek, FaultStat yazılımının ilerleyen süreçte geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu değişikliklerin tamamı ile ilgili gelişmeler, yazılımın kullanımının ve temininin yaygınlaştırılması ve gelecekte oluşacak deprem verilerinin zenginleştirilmesi ve paylaşılması amacıyla kurulan http:/www.faultstat.com/ internet adresinin, dinamik olarak hayatına devam etmesi de yerbilimleri açısından önem arz etmektedir.

7. Kaynaklar

Acharya, H. K., 1979. Regional variations in the rupture-length magnitude relationships and their dynamical significance. *Bulletin of the Seismological Society of America,* **69(6)**, 2063-2084.

Ambraseys, N. N. and Jackson, J. A., 1998. Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, **133(2)**, 390-406.

Anderson, J. G., Wesnousky, S. G. and Stirling, M. W., 1996. Earthquake size as a function of fault slip rate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86(3)**, 683-690.

Arrowsmith, J. R., Crosby, C. J., Korzhenkov, A. M., Mamyrov, E., Povolotskaya, I., Guralnik, B. and Landgraf, A. (2017). Surface rupture of the 1911 Kebin (Chon–Kemin) earthquake, Northern Tien Shan, Kyrgyzstan. *Geological Society, London, Special Publications*, **432(1)**, 233-253.

Arya, A.K., Pandey, V.K., Gupta, A., Mishra, A. (2016). Seismological Trends in Indian Subcontinent. *International Research Journal of Earth Sciences*, **4(5)**, 11-17.

Baize, S. and Scotti, O., 2015. The Napa Earthquake, California (M= 6, 24/08/2014). Post-seismic survey report, with special focus on surface faulting. *IRSN Technical Report*, 28.

Barka, A. and Eyidoğan, H., 1993. The Erzincan earthquake of 13 March 1992 in eastern Turkey. *Terra Nova*, **5(2)**, 190-194.

Båth, M. (1981). Earthquake magnitude—recent research and current trends. *Earth-Science Reviews*, **17(4)**, 315-398.

Bent, A. L., 1994. The 1989 (Ms 6.3) Ungava, Quebec, earthquake: A complex intraplate event. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84(4)**, 1075-1088.

Bolt, B. (2005). Earthquakes: 2006 centennial update-the 1906 big one. Fifth Edition. 320 p., W. H. Freeman & Company: New York.

Bonilla, M. G.,and Buchanan, J. M. (1970). Interim report on worldwide historic surface faulting. U.S. Geological Survey open-file report 1611, 32 p., US Department of the Interior, Geological Survey.

Bonilla, M. G., Mark, R. K., and Lienkaemper, J. J., 1984. Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74(6)**, 2379-2411.

Branner, J.C. (1911). Suggested organization for seismologic work on the Pacific Coast Suggestions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **1(1)**, 5-8.

Cabrera, J. and Sébrier, M., 1998. Surface rupture associated with a 5.3-mb earthquake: The 5 April 1986 Cuzco earthquake and kinematics of the Chincheros-Quoricocha faults of the High Andes, Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88(1)**, 242-255.

Chen, L., Wang, H., Ran, Y., Sun, X., Su, G., Wang, J., Tan, X., Li, Z. and Zhang, X., 2010. The Ms7. 1 Yushu earthquake surface rupture and large historical earthquakes on the Garzê-Yushu Fault. *Chinese Science Bulletin*, **55(31)**, 3504-3509.

Chouhan, R. K. S., Gaur, V. K. and Singh, J., 1974. Investigations on the aftershock sequence of the great Assam earthquake of August 15, 1950. *Annals of Geophysics*, **27(1-2)**, 245-266.

Clark, D., McPherson, A., Allen, T., and De Kool, M., 2013. Coseismic surface deformation caused by the 23 March 2012 M w 5.4 Ernabella (Pukatja) earthquake, central Australia: Implications for fault scaling relations in cratonic settings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104(1)**, 24-39.

Coudurier Curveur, A., Kali, E., Tapponnier, P., Karakas, Ç., Ildefonso, S., van der Woerd, J., Baruah S., Choudhury, S., Okal, E. and Banerjee, P., 2016. Surface rupture of the 1950 Assam earthquake: active faults and recurrence interval along the Eastern Himalayan Syntaxis. *In EGU General Assembly Conference Abstracts*, **18**, 15794.

Cowan, H. A., 1991. The north Canterbury earthquake of September 1, 1888. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, **21(1)**, 1-12.

Crone, A. J., Machette, M. N., Bonilla, M. G., Lienkaemper, J. J., Pierce, K. L., Scott, W. E. and Bucknam, R. C., 1987. Surface faulting accompanying the Borah Peak earthquake and segmentation of the Lost River fault, central Idaho. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77(3)**, 739-770.

Cronin, V. S. (2004). A Draft Primer on Focal Mechanism Solutions for Geologists. In "On the Cutting Edge" Workshop on Teaching Structural Geology in the 21st Century. Science Education Resource Center, Carleton College, Northfield, USA.

Doğan, B. and Karakaş, A., 2013. Geometry of co-seismic surface ruptures and tectonic meaning of the 23 October 2011 Mw 7.1 Van earthquake (East Anatolian Region, Turkey). *Journal of Structural Geology*, **46**, 99-114.

Dryden, J., Addison, J., Eusden, L., Maynwaring, A., Croxall, S., and Gaeth, S. (1926). Ovid's Metamorphoses: Translated by various authors. Book XV: The Pythagorean philosophy. pp. 377-407, Sir Samuel Garth: London.

EMERGEO Working Group, 2010. Evidence for surface rupture associated with the Mw 6.3 L'Aquila earthquake sequence of April 2009 (central Italy). *Terra Nova*, **22(1)**, 43-51.

Emre, O., Duman, T. Y., Doğan, A., Özalp, S., Tokay, F. and Kuşçu, I., 2003. Surface faulting associated with the Sultandagı earthquake (Mw 6.5) of 3 February 2002, Southwestern Turkey. *Seismological Research Letters*, **74(4)**, 382-392.

Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H. and Çan, T., 2016. Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-47, doi: 10.1007/s10518-016-0041-2.

Eyidoğan, H. and Jackson, J. (1985). A seismological study of normal faulting in the Demirci, Alaşehir and Gediz earthquakes of 1969–70 in western Turkey: Implications for the nature and geometry of deformation in the continental crust. *Geophysical Journal International*, **81(3)**, 569-607.

Falcucci, E., Gori, S., Peronace, E., Fubelli, G., Moro, M., Saroli, M., Giaccio, B., Messina, P., Naso, G., Scardia,

G., Sposato, A., Voltaggio, M.,Galli, P. and Galadini, F., 2009. The Paganica fault and surface coseismic ruptures caused by the 6 April 2009 earthquake (L'Aquila, central Italy). *Seismological Research Letters*, **80(6)**, 940-950.

Fletcher, J. M., Teran, O. J., Rockwell, T. K., Oskin, M. E., Hudnut, K. W., Mueller, K. J., Spelz, R.M., Akciz, S.O., Eulalia Masana, E., Faneros, G., Fielding, E.J., Leprince, S., Morelan, A.E., Stock, J., Lynch, D.K., Elliott, A.J., Gold, P., Liu-Zeng, J., González-Ortega, A., Hinojosa-Corona, A. and González-García, J., 2014. Assembly of a large earthquake from a complex fault system: Surface rupture kinematics of the 4 April 2010 El Mayor–Cucapah (Mexico) Mw 7.2 earthquake. *Geosphere*, **10(4)**, 797-827.

Goto, H., Tsutsumi, H., Toda, S. and Kumahara, Y., 2017. Geomorphic features of surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake in and around the downtown of Kumamoto City, and implications on triggered slip along active faults. *Earth, Planets and Space*, **69(1)**, 26.

Gruppo di Lavoro, I. N. G. V., 2017. Summary report on the 30 october, 2016 earthquake in central Italy Mw 6.5, Rome, 49.

Haeussler, P. J., Schwartz, D. P., Dawson, T. E., Stenner, H. D., Lienkaemper, J. J., Sherrod, B., Cinti, F.R., Montone, P., Craw, P.A., Crone, A.J. and Personius, S. F., 2004. Surface rupture and slip distribution of the Denali and Totschunda faults in the 3 November 2002 M 7.9 earthquake, Alaska. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94(6B)**, S23-S52.

Haughton, S. (1858). On the Physical Structure of the Old Red Sandstone of the County of Waterford, Considered with Relation to Cleavage, Joint Surfaces, and Faults. *Philosophical Transactions*, **148**, 333-348.

Hauksson, E., Stock, J., Hutton, K., Yang, W., Vidal-Villegas, J. A. and Kanamori, H., 2011. The 2010 M w 7.2 El Mayor-Cucapah Earthquake Sequence, Baja California, Mexico and Southernmost California, USA: Active Seismotectonics along the Mexican Pacific Margin. *Pure and Applied Geophysics*, **168(8-9)**, 1255-1277.

Herece, E., 1990. The fault trace of the 1953 Yenice-Gonen earthquake and the westernmost known extension of the NAF system in the Biga peninsula. *Mineral Research and Exploration Bulletin of Turkey*, **111**, 31-42.

Hills, E. S. (1940). Outlines of structural geology. 182 p. Methuen & Co: London.

Iida, K. (1959). Earthquake energy and earthquake fault. *The Journal of earth sciences, Nagoya University*, **7**, 98-107.

Jackson, J. and McKenzie, D., 1984. Active tectonics of the Alpine–Himalayan belt between western Turkey and Pakistan. *GeophysicalJournal International*,**77(1),** 185-264.

Kanamori, H. (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, **93(3-4)**, 185-199.

Kanamori, H., 1995. The Kobe (Hyogo-ken Nanbu), Japan, earthquake of January 16, 1995. *Seismological Research Letters*, **66(2)**, 6-10.

Kaneda, H., Nakata, T., Tsutsumi, H., Kondo, H., Sugito, N., Awata, Y., Akhtar, S.S., Majid, A., Khattak,W.,Awan, A.A, Yeats, R.S., Hussain, A., Ashraf, M.,Wesnousky, S.G. and Kausar, A.B. (2008). Surface rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, earthquake and its active tectonic implications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98(2)**, 521-557.

Katsube, A., Hisao Kondo, H., Taniguchi, K. and Kase, F., 2017. Surface rupture and slip associated with the 2014 Nagano-ken Hokubu earthquake (Mw6.2), Jour. Geol. Soc. Japan, Vol. 123(1), 1-21.

Kelleher, J., Sykes, L., and Oliver, J. (1973). Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean. *Journal of Geophysical Research*, **78(14)**, 2547-2585.

Kline, A. S. (2000). Ovid's Metamorphoses. A translation into English. 1363 p., Poetry in Translation: Luxembourg.

Kulikova, G. and Krüger, F., 2015. Source process of the 1911 M 8.0 Chon-Kemin earthquake: Investigation results by analogue seismic records. *Geophysical Journal International*, **201(3)**, 1891-1911.

Lee, J. C., Chu, H. T., Angelier, J., Chan, Y. C., Hu, J. C., Lu, C. Y. and Rau, R. J., 2002. Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw= 7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures. *Journal of Structural Geology*, **24(1)**, 173-192.

Lettis, W. R., Wells, D. L. and Baldwin, J. N., 1997. Empirical observations regarding reverse earthquakes, blind thrust faults, and quaternary deformation: Are blind thrust faults truly blind?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87(5)**, 1171-1198.

Lin, A., Ren, Z., Jia, D. and Wu, X., 2009. Co-seismic thrusting rupture and slip distribution produced by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*, **471(3-4)**, 203-215.

Livio, F., Michetti, A. M., Vittori, E., Gregory, L., Wedmore, L., Piccardi, L., Tondi E., Roberts G., Blumetti A.M., Bonadeo L., Brunamonte F., Comerci

V., Di Manna P., Ferrario M.F., Faure Walker J., Frigerio C., Fumanti F., Guerrieri L., Iezzi F., Leoni G., Mccaffrey K., Mildon Z., Phillips R., Rhodes E., Walters R.J. and Wilkinson M., 2016. Surface faulting during the August 24, 2016, central Italy earthquake (Mw 6.0): preliminary results. *Annals of geophysics*, **59(Fast Track 5)**, 1-8.

Lomnitz, C. and Hashizume, M., 1985. The Popayan, Colombia, earthquake of 31 march 1983. *Bulletin of the Seismological Society of America,* **75(5)**, 1315-1326.

Lyell, C. (1868). Principles of Geology or the modern changes of the earth and its inhabitants considered as illustrative of geology (Vol. II). 649 p., John Murray: London.

Lyell, C., (1830). Principles of Geology, Being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation (Vol. 1). 511 p., John Murray: London.

McCalpin, J. P. and Thakkar, M. G., 2003. 2001 Bhuj-Kachchh earthquake: Surface faulting and its relation with neotectonics and regional structures, Gujarat, western India. *Annals of Geophysics*, **46(5)**, 937-956.

McKenzie, D., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, **30(2)**, 109-185.

Michell, J. (1759). Conjectures concerning the Cause, and Observations upon the Phaenomena of Earthquakes; Particularly of That Great Earthquake of the First of November, 1755, Which Proved So Fatal to the City of Lisbon, and Whose Effects Were Felt As Far As Africa, and More or Less throughout Almost All Europe. *Philosophical Transactions*, **51**, 566-634.

Nakata, T., Yomogida, K., Odaka, J. I., Sakamoto, T., Asahi, K. and Chida, N., 1995. Surface fault ruptures associated with the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **104(1)**, 127-142.

Pavlides, S. and Caputo, R., 2004. Magnitude versus faults' surface parameters: quantitative relationships from the Aegean Region. *Tectonophysics*, **380(3-4)**, 159-188.

Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., Cao, T., Wills, C. J., Schwartz, D. P., & Frankel, A. D. (2011). Fault displacement hazard for strike-slip faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101(2)**, 805-825.

Pucci, S., De Martini, P. M., Civico, R., Villani, F., Nappi, R., Ricci, T., R. Azzaro, R., Brunori, C.A., Caciagli, M., Cinti, F.R., Sapia, V., De Ritis, R., Mazzarini, F., Tarquini, S., Gaudiosi, G., Nave, R., Alessio, G., Smedile, A., Alfonsi, L., Cucci, L. and Pantosti, D., 2017. Coseismic ruptures of the 24 August 2016, Mw 6.0 Amatrice earthquake (central Italy), *Geophysical Research Letters*, **44**, 2138–2147.

Quigley, M., Dissen, R.V., Villamor, P., Litchfield, N., Barrell, D., Furlong K.,, Stahl, T., Duffy, B.,, Bilderback, E., Noble, D., Townsend, D., Begg, J., Jongens, R., Ries, W., Claridge, R., Klahn, A., Mackenzie, H., Smith, A., Hornblow, S., Nicol, R., Cox, S., Langridge, R. and Pedley, K., 2010. Surface rupture of the Greendale fault during the Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake, New Zealand: Initial findings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **43(4)**, 236-242.

Reid, H. F., Davis, W. M., Lawson, A. C., & Ransome, F. L. (1913). Report of the committee on the nomenclature of faults. *Bulletin of the Geological Society of America*, **24(1)**, 163-186.

Richter, C. F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **25(1)**, 1-32.

Scordilis, E. M. (2006). Empirical global relations converting M_S and m_b to moment magnitude. *Journal of Seismology*, **10(2)**, 225-236.

Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D. and Miyakawa, A., 2016. Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan. *Earth, Planets and Space*, **68(1)**, 191-203.

Sözbilir, H., Sümer, Ö., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Güler, T. and Eski, S. (2016). Kinematic analysis and palaeoseismology of the Edremit Fault Zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Biga Peninsula, NW Turkey. *Geodinamica Acta*, **28(4)**, 273-294.

Stirling, M.,& Goded, T. (2012). Magnitude scaling relationships. Report Produced for the GEM Faulted Earth & Regionalisation Global Componets, GNS Science Miscellaneous Series, 42, 35.

Taber, S. (1923). Some Criteria Used in Recognizing Active Faults. *Bulletin of the Geological Society of America*, **34**, 661-667.

Talebian, M., Biggs, J., Bolourchi, M., Copley, A., Ghassemi, A., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nissen, E., Oveisi, B., Parsons, B., Priestley, K. and Saiidi, A., 2006. The Dahuiyeh (Zarand) earthquake of 2005 February 22 in central Iran: reactivation of an intramountain reverse

fault. *Geophysical Journal International*, **164(1)**, 137-148.

Tocher, D. (1958). Earthquake energy and ground breakage. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **48 (2)**, 147-153.

Vakov, A. V., 1996. Relationships between earthquake magnitude, source geometry and slip mechanism. *Tectonophysics*, **261(1-3)**, 97-113.

Walker, R. T., Bergman, E., Jackson, J., Ghorashi, M. and Talebian, M., 2005. The 2002 June 22 Changureh (Avaj) earthquake in Qazvin province, northwest Iran: epicentral relocation, source parameters, surface deformation and geomorphology. *Geophysical Journal International*, **160(2)**, 707-720.

Wells, D. L. and 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(4)**, 974-1002.

Wesnousky, S. G., 2008. Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98(4)**, 1609-1632.

Willis, B. (1923). A fault map of California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **13(1)**, 1-12.

Wood, H. O. (1916). The earthquake problem in the western United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **6(4)**, 197-217.

Woodcock, N. H. (1987). Kinematics of strike-slip faulting, Builth inlier, Mid-Wales. *Journal of Structural Geology*, **9(3)**, 353-363.

Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., Ramelli, A. R., Ake, J. P., Slemmons, D. B., McCalpin, J. P., Doser, D. I., Fridrich, C. J., Swan, F. H., Rogers, M. A., Yount, J. Anderson, L. W., Smith, K. D., Bruhn, R,. L.., Knuepfer, P. K., Smith, R. B., dePolo, M. C., O'Leary, D. W., Coppersmith, K. J. Pezzopane, K. S., Schwartz, P. D., Whitney, W. J., Olig, S. S. & Toro, R. G. (2003). A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra*, **19(1)**, 191-219.

Zhu-jun, H., Litchfield, N., Hong-liu, R., Ren-mao, Y., Peng, G.,Langridge, R.M. and Van Dissen, R.J., 2017. Primarily study on features of surface ruptures induced by the 2016 Mw 7.8 Karkoura earthquake, New Zealand, *Seismology and geology*, **39(4)**, 675-678.