

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**EGE BÖLGESİ İÇİN GEN İFADELİ PROGRAMLAMAYA
DAYALI YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Danışman:
Dr. Öğr. Üyesi Evren SEYREK

Hazırlayan:
Şule Sena GÜNGÖR

Kütahya-2023

Kabul ve Onay

İnşaat Mühendisliği Ana bilim dalında, 801922110101 öğrenci numaralı, Şule Sena GÜNGÖR'ün hazırlamış olduğu "EGE BÖLGESİ İÇİN GEN İFADELİ PROGRAMLAMAYA DAYALI YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı yüksek lisans tez çalışması ile ilgili tez savunma sınavı jüri tarafından yapılmış ve adayın tezinin OY BİRLİĞİ ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

16/02/2023

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Red
Dr. Öğr. Üyesi Evren SEYREK (Danışman)		
Doç. Dr. Hasan SAVAŞ		
Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ŞENGÜL		

Onay

Doç.Dr.Arif KOLAY

Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım “*Ege Bölgesi için Genetik İfadeli Programlamaya Dayalı Yer Hareketi Tahmin Denklemine Geliştirilmesi*” adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

16/02/2023

İmza

Şule Sena Güngör

Özgeçmiş

Lise eğitimini Kütahya Ali Güral Lisesi'nde tamamladıktan sonra 2013 yılında Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü lisans eğitimine başladı. 2017 yılında lisans mezuniyeti sonrası başladığı Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Dalı'nda lisansüstü eğitimini 2018 yılında tamamlamıştır. Ardından 2019 yılında Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda lisansüstü eğitime başlamıştır.

Lisans mezuniyeti sonrası inşaat mühendisi olarak Kütahya'da iş hayatına başlamış olup farklı projelerde saha / teknik ofis inşaat mühendisi pozisyonlarında görev almaktadır.



ÖZET

EGE BÖLGESİ İÇİN GEN İFADELİ PROGRAMLAMAYA DAYALI YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

GÜNGÖR, Şule Sena
Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Evren SEYREK
Şubat, 2023, 76 sayfa

Sahaya özel sismik tehlike analizleri, depreme dayanıklı yapı tasarımı için gerekli yer hareketi parametrelerinin belirlenmesinde önemli süreçlerden biridir. Sismik tehlike analizi çalışmalarında kullanılacak yer hareketi tahmin denklemlerinin seçimi, analizlerin başarısı üzerindeki en etkili faktörlerden biridir. Bu çalışma kapsamında Ege Bölgesi kaydedilmiş kuvvetli yer hareketi veri tabanına dayalı yer hareketi tahmin denklem modelleri oluşturulmuştur. AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) sistemi üzerinden elde edilmiş veri tabanı 148 depreme ait 463 ivme kaydından oluşmaktadır. Yer hareketi tahmin modeli oluşturmak için kullanılan veri tabanı, $4.5 \leq M_w \leq 6.5$ magnitüd aralığına ve $0 \leq R_{epi} \leq 212$ km kaynak-saha mesafesinde sahiptir.

Son yıllarda geoteknik mühendisliği alanında özellikle zeminlerin kompleks davranışını modellemek için yapay zekâ tabanlı makine öğrenimi araçları kullanımı artmıştır. Bu çalışma kapsamında da yapay zekâ kullanılarak Gen İfadeli Programlama (GEP) tabanlı dört ayrı yer hareketi tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu modellerden ikisinde, yatay ivme bileşenlerinden en büyük değere (PGA_{maks}) sahip olanı dikkate alınmış, diğer ikisinde ise yatay ivme bileşenlerinin geometrik ortalaması (PGA_{geo}) kullanılmıştır. Oluşturulan dört tahmin modelinin ikisinde yerel zemin koşullarının etkisi üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızı parametresi ($V_{s,30}$) ile modele dahil edilmiştir. Bu modellerin uygulanabilirliğini değerlendirmek için farklı istatistikî performans parametreleri incelenmiştir. Ayrıca GEP tabanlı bu modellerin performansı Türkiye ve çevresi için regresyona dayalı olarak geliştirilmiş dört ayrı tahmin denklemi ile de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ve analizler, Ege Bölgesi için oluşturulan GEP tabanlı modellerin maksimum yer ivmesini tahmin etmek için başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Gen İfadeli Programlama (GEP), Deprem, En Büyük Yer İvmesi, Yer Hareketi Tahmin Denklemi, Ege Bölgesi.

ABSTRACT**DEVELOPMENT OF GROUND MOTION PREDICTION EQUATION FOR
AEGEAN REGION IN TURKEY BASED ON GENE EXPRESSION
PROGRAMMING****GÜNGÖR, Şule Sena****Master Thesis, Department of Civil Engineering****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Evren SEYREK****February, 2023, 76 pages**

Site-specific seismic hazard analysis is one of the important processes in determining the ground motion parameters required for earthquake-resistant structure design. The selection of ground motion prediction equations to be used in seismic hazard analysis studies is one of the most influential factors on analyses success. Within the scope of this study, ground motion prediction equation models were created based on strong ground motion database recorded in the Aegean Region, Turkey. The database obtained through the AFAD (Disaster and Emergency Management Presidency) system consists of 463 acceleration records of 148 earthquakes. The database used to create the ground motion prediction model has a magnitude range of $4.5 \leq M_w \leq 6.5$ and a source-site distance of $0 \leq R_{epi} \leq 212$ km.

In recent years, the use of artificial intelligence-based machine learning tools has increased in the field of geotechnical engineering, especially to model the complex behaviour of soils. In this thesis, four different ground motion prediction models based on Gene Expression Programming (GEP) were created using artificial intelligence. In two of these models, largest value of the horizontal acceleration components (PGA_{max}) has been considered, and in the other models, the geometric mean of the horizontal acceleration components (PGA_{geo}) has been used. In two of the four prediction models the effect of local soil conditions has been included with the average shear wave velocity parameter in the upper 30 m ($V_{s,30}$). Different statistical performance parameters were examined to evaluate the applicability of these models. In addition, the performance of these GEP-based models was compared with four different estimation equations developed based on regression for Turkey and its surroundings. These comparisons and analyses show that the GEP-based models created for the Aegean Region can be successfully used to predict the maximum ground acceleration.

Keywords: Gene Expression Programming (GEP), Earthquake, Peak Ground Acceleration, Ground Motion Prediction Equation, Aegean Region.

Önsöz

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bana yol gösteren, yardımlarını ve desteğini esirgemeyen, çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Evren SEYREK'e, GEP alanında destekte bulunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sadettin TOPÇU'ya ve eğitim hayatım boyunca eğitim aldığım ya da alamadığım Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm'ü tüm hocalarıma teşekkür ediyor ve saygılarımı sunuyorum.

Bu uzun süreçte sürekli desteklerini hissettiğim her zaman yanımda olan Saygıdeğer babam Sebahattin GÜNGÖR, abim Ahmet Orhan GÜNGÖR'e ve Sevgili annem Gülsüm GÜNGÖR'e verdikleri maddi manevi destek ve gösterdikleri sabırdan dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca bu eğitimim ve Tez yazım sürecinde benden desteklerini hiç eksik etmeyen çok kıymetli arkadaşlarım Kezban Elif YİĞİT, Cemre KAL ve Muhammet KOÇYİĞİT'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR	xiii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİ

1.1	TAHMİN DENKLEMLERİNİN GENEL FORMU	6
1.2	TAHMİN DENKLEMİ PARAMETRELERİ	8
1.2.1	Yer Hareketi Parametresi	8
1.2.2	Deprem Magnitüdü	12
1.2.3	Uzaklık	13
1.2.4	Zemin Koşulları	14
1.2.5	Faylanma Tipi	16

İKİNCİ BÖLÜM

TÜRKİYE VE ÇEVRESİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİ

2.1	TÜRKİYE'DEKİ YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİNİN GELİŞİMİ.....	19
2.1.1	Aydan vd. (1996)	19
2.1.2	İnan vd. (1996).....	20
2.1.3	Ansal (1997).....	20
2.1.4	Gülkan ve Kalkan (2002).....	21
2.1.5	Ulutaş ve Özer (2003)	21
2.1.6	Beyaz (2004)	22
2.1.7	Ulusay vd. (2004).....	22
2.1.8	Özbey vd. (2004).....	22
2.1.9	Kalkan ve Gülkan (2004).....	23
2.1.10	Bindi vd. (2007)	24
2.1.11	Güllü vd. (2008).....	24

2.1.12	Akyol ve Karagöz (2009).....	25
2.1.13	Ulutaş ve Özer (2010).....	25
2.1.14	Akkar ve Çağnan (2010).....	25
2.1.15	Kale vd. (2015).....	27
2.1.16	Erken vd. (2018).....	28

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

GEN İFADELİ PROGRAMLAMA (GEP)

3.1	GEP MODELİNİN GELİŞİMİ VE BİLEŞENLERİ.....	31
3.2	GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE GEP KULLANIMI	35

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ÇALIŞMA ALANININ İNCELENMESİ

4.1	İNCELEME ALANININ SİSMO-TEKTONİK ÖZELLİKLERİ	39
4.2	ÇALIŞMA ALANI İÇİN YER HAREKETİ VERİ TABANININ OLUŞTURULMASI	41

BEŞİNCİ BÖLÜM

GEN İFADELİ MODELLERİN OLUŞTURULMASI

5.1	GEP MODELLERİNDE KULLANILACAK PARAMETRELERİN SEÇİMİ.....	49
5.2	OLUŞTURULAN GEP MODELLERİ.....	51
5.2.1	Model-1	51
5.2.2	Model-2.....	52
5.2.3	Model-3	54
5.2.4	Model-4	55

ALTINCI BÖLÜM

GELİŞTİRİLEN YER HAREKETİ TAHMİN MODELLERİNİN

PERFORMANSI

5.1	KULLANILAN PERFORMANS TESTLERİ	58
5.2	GEP TABANLI MODELLERİN BAŞARI DEĞERLENDİRMESİ	59
	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
	KAYNAKÇA	68
	DİZİN	76

TABLolar LİSTESİ**Sayfa**

Tablo 1. 1: Yerel zemin sınıflarının değişimi	15
Tablo 4. 1: Yer hareketi veri tabanının genel bilgileri	41
Tablo 5. 1: GEP modelleri için girdi ve çıktı parametreleri	49
Tablo 5. 2: Modellerde kullanılan GEP parametreleri	50
Tablo 5. 3: Eğitim ve test setlerindeki girdi ve çıktı parametrelerinin sınır değerleri .	50
Tablo 5. 4: Tüm veri setindeki girdi ve çıktı parametrelerinin sınır değerleri	51
Tablo 5. 5: Model-1 için sabitler	52
Tablo 5. 6: Model-2 için sabitler	53
Tablo 5. 7: Model-3 için sabitler	55
Tablo 5. 8: Model-4 için sabitler	56
Tablo 6. 1: Karşılaştırma için kullanılacak yer hareketi tahmin denklemlerinin genel özellikleri.....	59
Tablo 6. 2: GEP modelleri ve karşılaştırma için seçilen yer hareketi tahmin denklemlerinin performansı	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1: 1999 Gölcük depremine ($M_w=7.6$) ait a) ivme b) hız c) yer değiştirme kaydı.....	9
Şekil 1. 2: V/H (Düşey / Yatay) spektral ivme oranının değişimi.....	10
Şekil 1. 3: Farklı magnitüd ölçekleri arasındaki ilişki ve doygunluk değerleri.....	13
Şekil 1. 4: Yer hareketi tahmin denklemlerinde kullanılan uzaklık ölçütlerinin fay geometrisi ve projeksiyonu üzerindeki görünümü.....	14
Şekil 1. 5: Faylanma faktörünün karşılaştırılması a) Ters faylanmanın doğrultu atımlı faylanmaya oranı ($F_{R:SS}$) b) Normal faylanmanın doğrultu atımlı faylanmaya oranı ($F_{N:SS}$)	17
Şekil 3. 1: Bir genden oluşan bir kromozomun temsili açıklama ağacı (ET).....	32
Şekil 3. 2: Genin Karva ifadesi ile gösterimi.....	32
Şekil 3. 3: Bir genin baş ve kuyruğuyla şematik bir gösterimi.....	33
Şekil 3. 4: GEP Akış Şeması	35
Şekil 4. 1: Batı Anadolu grabenlerinin basitleştirilmiş haritası.....	39
Şekil 4. 2 : Batı Anadolu grabenleri kayma hızlar için elastik modelleri.....	40
Şekil 4. 3: Veri tabanındaki deprem ve ivme kayıt sayısının yıl bazında değişimi.....	42
Şekil 4. 4: İlk veri tabanındaki PGA_{maks} değerlerinin deprem büyüklüğü ile ilişkisi...	43
Şekil 4. 5: Nihai veri tabanındaki PGA_{maks} değerlerinin deprem büyüklüğü ile ilişkisi	44
Şekil 4. 6: Depremlerin dış merkez dağılımları ve istasyonların konumu	44
Şekil 4. 7: Veri setindeki kayıtların dağılımı a) Deprem büyüklüğüne göre b) Dış merkez uzaklığına göre c) Odak derinliğine göre d) Zemin sınıfına göre	45
Şekil 4. 8: Farklı parametreler esasında veri tabanının dağılımı	46
Şekil 4. 9: Nihai veri tabanı yer hareketi ivme kayıtlarının deprem dış merkezlik mesafesi (R_{epi}) ve deprem büyüklüğüne (M_w) göre dağılımı.....	47
Şekil 5. 1: Model-1 için elde edilen ifade ağaçları	51

Şekil 5. 2: Model-2 için elde edilen ifade ağaçları	53
Şekil 5. 3: Model-3 için elde edilen ifade ağaçları	54
Şekil 5. 4: Model-4 için elde edilen ifade ağaçları	55
Şekil 6. 1: Model-1 ve Model-2 eğitim verisi ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi.....	60
Şekil 6. 2: Model-1 ve Model-2 test verisi ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi.....	60
Şekil 6. 3: Model-1 ve Model-2 tüm veriler için ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi.....	61
Şekil 6. 4: Model-3 ve Model-4 eğitim verisi ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi.....	61
Şekil 6. 5: Model-3 ve Model-4 test verisi ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi.....	62
Şekil 6. 6: Model-3 ve Model-4 tüm veriler için ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi.....	62
Şekil 6. 7: Kaynak-saha mesafesine göre hata değerlerinin değişimi (Model-4).....	64
Şekil 6. 8: $V_{s,30}$ parametresine göre hata değerlerinin değişimi (Model-4).....	64

KISALTMALAR

AFAD	Afet ve Acil Durum Başkanlığı
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
PHA	Pik Yatay İvme
PGA_{maks}	Pik Yer İvmesi
PGA_{geo}	Pik Yer İvmesinin İki Bileşeninin Geometrik Ortalaması
M_L	Richter yerel magnitüdü
M_s	Yüzey dalgası magnitüdü
m_b	Cisim dalgası magnitüdü
M_w	Moment magnitüdü
R_{epi}	Depremin dış merkezine olan uzaklık
R_{rup}	Fayın yüzey kırığına olan en yakın mesafe
V_{s,30}	Üst 30 metredeki kayma-dalgası hızı
σ	Standart sapma
GEP	Gen İfadeli Programlama
AI	Yapay Zekâ
ET	İfade Ağacı



TEZ METNİ

GİRİŞ

Depremler, milyonlarca yıldır yeryüzü oluşumuyla birlikte meydana gelmektedir. Dünyanın depremsellik yönünden en aktif bölgelerinden biri olan Türkiye’de de çok sayıda hasar yapıcı deprem meydana gelmiştir. 1939 Erzincan depremi (M=7.9), 1970 Gediz depremi (M=7.2), 1976 Çaldıran depremi (M=7.5), 1999 Gölcük depremi (M=7.4), 1999 Düzce depremi (M=7.2), 2011 Van depremi (M=7.2), 2020 İzmir depremi (M=6.6) bunlar içerisinde yıkıcılık açısından en önemlilerindedir. Deprem esnasında gerçekleşen yer hareketleri sebebi ile can kayıpları ve yapılarda ağır maddi hasar oluşmaktadır.

Bu can kayıplarını azaltmanın en önemli yolu depreme dayanıklı yapı tasarımını başarıyla uygulamakla mümkün olmaktadır. Depremin neden olduğu hasarlarda, yerel zemin şartlarının, tasarım ve inşaat kusurlarının etkisi söz konusudur (Kayabalı, 1997). Depreme dayanıklı yapı tasarımında öncelikli olarak yapıya etki eden taban kesme kuvveti bilinmelidir. Taban kesme kuvvetinin iki etkeninden biri, yatay yer ivmesi değeridir. Bu sebeple, depreme dayanıklı yapı tasarımı için en büyük yer ivmesi değerinin gerçekçi olarak tahmin edilmesi çok önemlidir. Kuvvetli yer hareketi üreten diri fay hatlarının uzağındaki yerlerde, mesafeye bağlı olarak yapılara etki edecek deprem yükü, dolayısıyla hasara neden olan kesme kuvvetinin etkisi, sönüm denklemi yardımıyla gerçek değerine yakın olarak elde edilebilir (Beyaz, 2004).

Bir bölge için en büyük yer ivmesi değerini etkileyen parametreler, önem sırasına göre, depremin magnitüdü, sismik kaynak tipi, kaynak-saha mesafesi ve yerel zemin koşullarıdır. Depremler sırasında ortaya çıkan yer ivmesinin etkisi, zemin koşullarına bağlı olarak odaktan uzaklaştıkça azalarak yayılmaktadır. Yer hareketi parametrelerinin teşhisi ve değerlendirilmesi, gerçek depremler sırasında ölçülmüş kuvvetli yer hareketi ölçümlerinin incelenmesini gerektirir (Haroun ve Housner, 1982).

Tepeuğur vd. (2013)’e göre deprem aktivitesi yüksek ve yoğun yapılaşmanın olduğu yerleşim yerlerinde depreme dayanıklı yapı tasarımının geliştirilmesi için kuvvetli yer hareketi kayıtlarına ihtiyaç vardır. Yer hareketinin zemin üzerindeki etkisi ve sarsıntı sırasında yapıların performans değerlendirmesi açısından, kuvvetli yer hareketinin kaydedilmesi son derece önemlidir. Ancak proje sahası ve çevresinde kuvvetli yer hareketi kayıtlarının mevcut olmaması durumunda deterministik ve/veya olasılıksal sahaya özel sismik tehlike analizlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Literatürde Türkiye ve

çevresi için yapılan çok sayıda sismik tehlike analizi çalışmaları yer almaktadır. Bunların bir kısmı global bir kısmı ise bölgesel ölçekte (Erdik vd., 1985; Gülkan vd., 1993; Erdik vd., 1999; TEFER 2001; Kayabalı 2002; Orhan vd., 2007; Kalkan vd., 2008). Bu çalışmaların her birinde tahmin denklemi olarak ithal yer hareketi tahmin denklemlerinin kullanıldığı görülmektedir.

1985 yılında Erdik ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma Türkiye için olasılıksal analiz ile gerçekleştirilen ilk kapsamlı çalışma olup Campbell (1981) tarafından geliştirilen azalım ilişkisi kullanılmıştır (Erdik vd., 1985). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından 1996 yılında yürürlüğe konan, 2018 yılına kadar aktif olarak kullanılan Deprem Bölgeleri Haritasının temelini oluşturan projede de Joyner ve Boore (1981) tahmin denkleminin kullanıldığı anlaşılmaktadır.

Daha sonraki yıllarda Türkiye ve çevresi için gerçekleştirilen sismik tehlike analizi çalışmalarında da ithal azalım denklemlerinin kullanılmaya devam ettiği görülmektedir. Her ne kadar bu tarz bir yaklaşımın benimsenmesinde, seçilen azalım denklemlerinin Kuzey Amerika depremlerine bağlı olarak geliştirilmesi ve San-Andreas Fayı ile Kuzey Anadolu Fayı arasındaki tektonik benzerliğin etkin olduğu belirtilse de Türkiye için lokal yer hareketi tahmin denkleminin oluşturulmamış olması da önemli bir etki olarak göze çarpmaktadır. Yer hareketi tahmin denklemleri çalışmaları sayısının ülkemizde 2000’li yıllardan sonra artmış olduğu görülmektedir. Ülkemizdeki kuvvetli yer hareketi kayıt sayısının da aynı yıllarda artması bu sonucun ortaya çıkmasında etkili olmuştur. 1990’lı yılların sonlarından itibaren Türkiye ve çevresi için geliştirilmiş yer hareketi tahmin denklemi çalışmaları dikkati çekmektedir (Aydan vd., 1996; İnan vd., 1996). Özellikle 1999 depremi sonrası artan veri ile birlikte Türkiye’de yer hareketi tahmin çalışmaları hız kazanmıştır. Seyrek (2009); bu çalışmalarda kullanılan veri setinin sınırlılığı ve veri setinin çoğunun 1999 Marmara depremine ait olmasının önemli bir eksiklik olduğunu ifade etmiştir.

Özellikle Türkiye’de Kuvvetli Yer Hareketi Ölçer Ağının genişlemesine paralel olarak yer hareketi veri sayısının artması ile birlikte Türkiye ve çevresi için yer hareketi tahmin denklemlerinin geliştirilmesine dair çalışmaların da sayısının arttığı görülmektedir (Kalkan ve Gülkan, 2004; Ulusay vd., 2004; Özbey vd., 2004; Güllü vd., 2008; Akyol ve Karagöz, 2009; Akkar ve Çağnan (2010); Kale vd., (2015); Erken vd., 2018).

Dünyanın farklı bölgelerinde, farklı zemin koşulları, farklı deprem kaynakları ve kaydedilen depremlere ait yer hareketi parametrelerine bağlı olarak bir bölge için yer hareketi tahmin denklemleri regresyon analizlerine dayalı olarak geleneksel yöntemlerle oluşturulmaktadır. Günümüzde, dijital imkanların gelişmesi ile, her iş alanında büyük miktarlarda veriler kayıt altına alınmaktadır. Verileri kayıt altına almak kadar bu kayıtları analiz ederek değerlendirmek de önemlidir. Bir olayı etkileyen bağımlı ve bağımsız değişkenlerin artması ile bu analiz matematiksel olarak zor veya imkânsız olabilir. Davranışsal modellerin, bağımlı değişkenlerin çıktılarla bağıntılı ilişkisini (altta yatan fiziksel teorileri göz önünde bulundurmadan) deneysel veriler aracılığıyla yaklaşımda bulunmasıyla etkili bir çözüm olduğu anlaşılmıştır (Gandomi, 2016). Doğrusal veya doğrusal olmayan regresyon analizi, davranışsal bir model geliştirmek için geniş ölçüde uygulanabilir bir metodolojidir. Diğer taraftan, regresyon analizi, birkaç aykırı değere sahip yüksek sayıda verilerin analizini gerektiren, çok sayıda parametreden etkilenen ve doğrusal bir davranışa sahip olmayan zemin davranışı gibi karmaşık durumları modellemede yetersiz kalabilmektedir. Buna karşılık, yapay zekâ (AI) tabanlı makine öğrenimi araçları, çıktıları daha doğru tahmin etmede geleneksel yöntemlere göre üstünlüğü nedeniyle çoğu geoteknik mühendislik alanında malzemelerin karmaşık davranışını modellemek için daha popüler ve özellikle uygun hale gelmektedir (Gandomi ve Alavi, 2012).

Bu tez kapsamında AFAD Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanından alınan ve Ege Bölgesi içerisinde meydana gelmiş depremlere ait kayıtlardan oluşan veri tabanı kullanılarak yer hareketi tahmin modelleri geliştirilmiştir. Kullanılan veri tabanı 1976 ile 2017 yılları arasını kapsamakta olup, 148 depreme ait 463 ivme kaydı kullanılmıştır. Veri tabanındaki magnitüd (M_w) aralığı 4.5 ve 6.5 arasında değişirken, dışmerkez uzaklığı (R_{epi}) 0 ile 212 km arasındadır. Kullanılan kayıtlardaki ivme alt sınır değeri 5 gal'dir. Çalışma kapsamında Genetik İfadeli Programlama (GEP) yaklaşımı kullanılarak dört ayrı tahmin modeli oluşturulmuştur (Model 1-4). Bağımsız değişken olarak moment deprem M_w , R_{epi} ve üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızı ($V_{s,30}$) dikkate alınırken bağımlı değişken olarak ise en büyük yer ivmesi değeri (PGA) dikkate alınmıştır. Bu modellerden ikisinde, yatay ivme bileşenlerinden en büyük değere (PGA_{maks}) sahip olanı dikkate alınmış, diğer ikisinde ise yatay ivme bileşenlerinin geometrik ortalaması (PGA_{geo}) dikkate alınmıştır. Yerel zemin koşullarının etkisini görebilmek için dört modelin ikisinde $V_{s,30}$ değeri girdi olarak dahil edilmiş diğer ikisinde ise hariç tutulmuştur. Bu modellerin

performansı farklı istatistiki başarı ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. GEP tabanlı üretilen bu dört tahmin denklemi Türkiye ve çevresi için geleneksel regresyona dayalı olarak geliştirilmiş dört ayrı tahmin denklemi ile de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ve analizler, Ege Bölgesi için oluşturulan GEP tabanlı modellerin maksimum yer ivmesini tahmin etmek için başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.





BİRİNCİ BÖLÜM
YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİ

1.1 TAHMİN DENKLEMLERİNİN GENEL FORMU

Bir mühendislik yapısının tasarımı, binanın kullanım sebebi, çok büyük olması veya kritik bir yapı olması sebebiyle sahaya özgü tasarımı yer hareketinin tahminine dayanır. Tasarım depreminde beklenen yer hareketleri ile ilgili saha civarında nadiren yeterli sayıda yer hareketi kaydı bulunur. Bu nedenle, yer hareketlerini büyüklük, mesafe, saha koşulları ve diğer değişkenler açısından tahmin etmek için denklemler veya grafik eğriler şeklinde ifade edilen ilişkilerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır (Boore, vd., 1997). Yer hareketi tahmin denklemi, azalım denklemi veya azalım ilişkisi olarak da isimlendirilen bu denklemler M büyüklüğündeki bir depremin, R mesafesindeki sahada meydana getireceği maksimum zemin hareketi parametresini veren bir fonksiyondur.

Bu denklemler, deprem büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi, fay tipi gibi birkaç bağımsız parametre ile maksimum yer ivmesi veya spektral ivme gibi bağımlı bir parametreye sahiptir. Denklemlerde bulunan katsayılar ise genellikle regresyon analizi kullanılarak bulunur (Douglas, 2003). Esteva ve Rosenblueth (1964) tarafından önerilen ilk azalım ilişkisinin yıllar içerisinde formunun ve içerdiği bağımsız değişken sayısının arttığı görülmektedir (Douglas, 2021).

Douglas (2021), maksimum yer ivmesi ve spektral ivme tahmini için dünyanın farklı bölgeleri için geliştirilmiş yer hareketi tahmin denklemlerini özetlemiştir. Bu çalışmada özetlenen çalışmaların, 485 adedi maksimum yer ivmesini, 316 adedi ise spektral ivmeyi belirlemeye yöneliktir. İlgili çalışmada yer alan tahmin denklemi sayılarının artan yer hareketi veri kaydına bağlı olarak her yıl artması, konunun güncelliğini koruduğunu ve araştırmacıların ilgisinin son yıllarda da devam ettiğini göstermesi açısından önemlidir.

Azalım ilişkilerinin genel yapısı göre aşağıda verilen eşitlik ile tanımlanmaktadır (aktaran Kramer, 1996).

$$Y = N_y f (M, R, SPi) \quad (1.1)$$

Burada; Y: tahmin edilecek olan kuvvetli yer hareketi parametresi (bağımlı değişken), N_y : azalım ilişkisindeki (ortalama tahmin eğrisi), R: depremden inceleme bölgesine olan “tanımlanmış” uzaklık ölçüsü, M: deprem büyüklüğünü gösteren herhangi bir ölçekteki magnitüd değeri, SPi: deprem kaynağı, dalga yayılma hattı, yerel zemin koşulları ile ilgili parametrelerdir.

Azalım ilişkilerinin fonksiyonel şekli, çoğunlukla yer hareketi sürecinin mekaniğini mümkün olan en iyi şekilde yansıtacak biçimde seçilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde ampirik katsayıların sayısı azaltılmakta ve azalım ilişkilerinin veri tabanında kötü bir şekilde temsil edilmiş magnitüd ve mesafe gibi şartlara uygulanması daha büyük bir güvenle yapılmaktadır (Kramer, 1996).

Yer hareketi tahmin denklemlerinin genel yapısı içerisinde yer alan değişkenlerin denklemlere dahil edilme şekli kuvvetli yer hareketi veri tabanındaki kayıtlarda gözlemlenen durum ile paraleldir. Bunlardan ilki kuvvetli yer hareketi parametrelerinin logaritmasının yaklaşık olarak normal dağılım ifade etmesidir. Yani, regresyon analizi yer hareketinin kendisinde değil logaritması üzerinden yapılmaktadır. İkincisi maksimum yer hareketi parametresinin logaritması olarak ifade edilmesidir. Yani kuvvetli yer hareketi parametresi ile magnitüd değeri arasında pozitif yönlü doğru orantılı bir ilişki vardır.

Bir diğer gözlem ise deprem dalgalarının deprem odağından dışarı doğru uzaklaşırken yayılımları P ve S dalgaları genliklerinin $1/R$ 'ye göre azalmasına sebep olmaktadır. Yüzey dalgası (başlıca Rayleigh dalgası) genliklerinin ise $1/\sqrt{R}$ 'ye göre azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca fay yırtılmasının büyüklüğü deprem büyüklüğü ile artış göstermektedir. Bir proje sahasında kuvvetli hareket üreten dalgaların bir kısmı R mesafesinden gelirken bir kısmının da daha uzak mesafelerden gelmesi sebebiyle etkin uzaklık R mesafesinden büyük olmaktadır. Literatürde farklı kaynak-saha mesafesi ölçütleri kullanılmakta olup bunlar ile ilgili detay bilgilere alt bölümlerde yer verilecektir.

İlk geliştirilen yer hareketi tahmin denklemlerinde sadece deprem büyüklüğü ve kaynak-saha mesafesi girdi parametresi olarak dikkate alınmış, zamanla artan veri sayısına bağlı gözlem ve değerlendirmeler, yer hareketi üzerinde, fay tipi, zemin koşulu gibi faktörlerin de son derece etkili olduğunu göstermiştir.

Bahsedilen tüm faktörlerin dahil edilmesiyle tipik bir yer hareketi tahmin denklemi formunun genel hali aşağıda verilmektedir (Kramer, 1996).

$$\ln Y = \underbrace{C_1 + C_2 M + C_3 M^{C_4}}_2 + \underbrace{C_5 \ln(R + C_6 + \exp(C_7 M))}_4 + \underbrace{C_8 R}_5 + \underbrace{f(\text{source}) + f(\text{site})}_6 \quad (1.2)$$

$$\sigma_{\ln Y} = C_9$$

Eşitlik (1.2)'de, 1 no'lu ifade maksimum yer hareketi ifadesinin logaritmasının yaklaşık olarak normal dağılım göstermesini, 2 no'lu ifade deprem büyüklüğünün pik yer

ivmesinin logaritması ile doğru orantılı oluşunu, 3 no'lu ifade dalga genliklerinin R mesafesi ile azalışını, 4 no'lu ifade fay yırtılma alanının R mesafesi ve deprem büyüklüğüne bağımlı oluşunu, 5 no'lu ifade deprem enerjisinin R mesafesine bağlı olarak sönümlendiğini ve son olarak 6 no'lu ifade kaynak ve yer özelliklerinin fonksiyonlarını ifade etmektedir. İlgili denklemdeki σ_{lnY} ise yer hareketi parametresindeki belirsizliği ifade eden parametredir.

Yer hareketi tahmin denklemleri çoğunlukla kuvvetli yer hareketi kayıtlarından regresyon analizi kullanılarak oluşturulmaktadır. Yeni kayıtlarla birlikte kuvvetli yer hareketi veri tabanı genişledikçe bu denklemler, literatürdeki çalışmalardan da görüleceği üzere belirli aralıklarla güncellenmektedir. Bunlara örnek olarak; Campbell (1981), Campbell (1988), Campbell (1990), Campbell (1997), Campbell (2000), Campbell (2001), Campbell ve Bozorgnia (2003), Campbell ve Bozorgnia (2006), Campbell ve Bozorgnia (2013), Bozorgnia ve Campbell (2016) verilebilir.

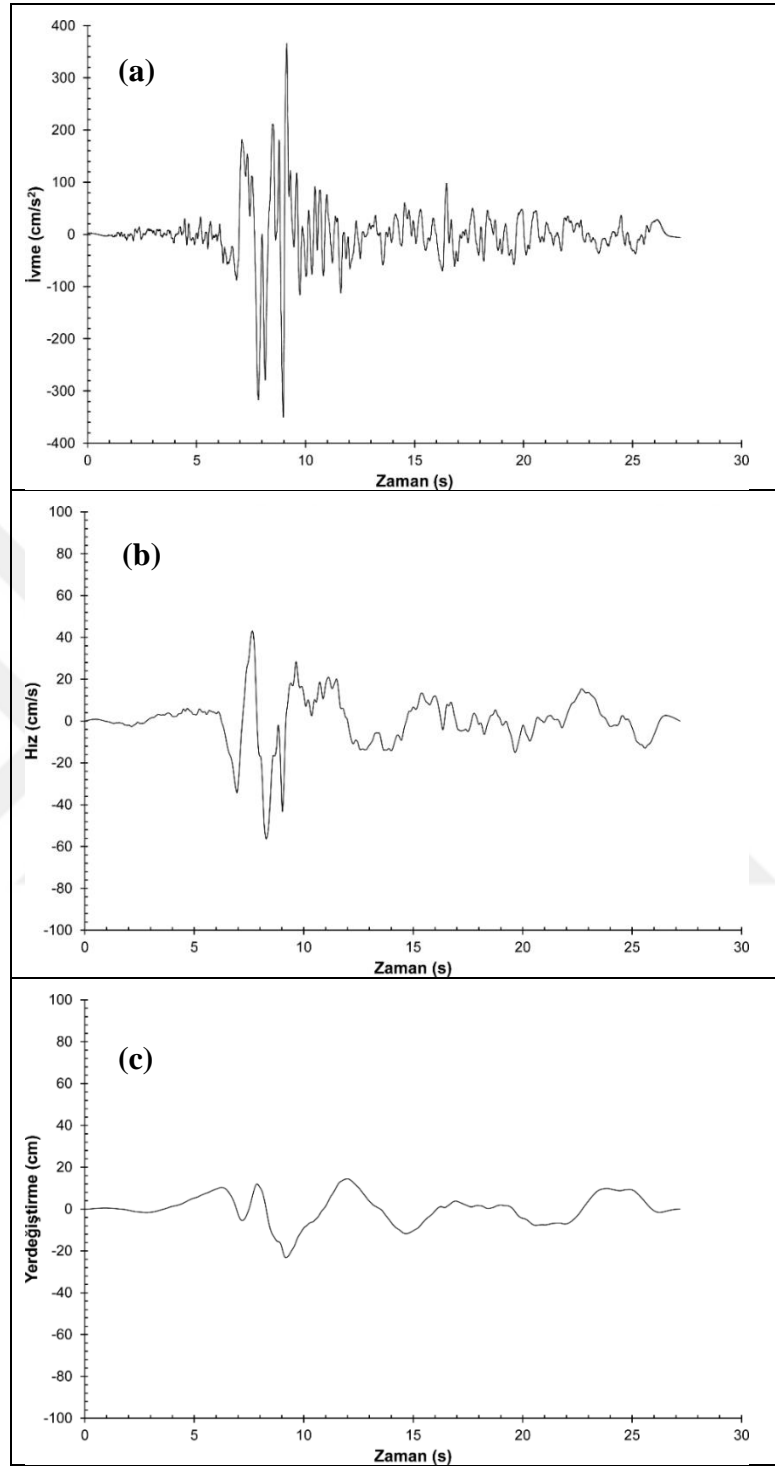
1.2 TAHMİN DENKLEMİ PARAMETRELERİ

1.2.1 Yer Hareketi Parametresi

Bir yer hareketinin tanımlanması, zamana bağlı olarak alınan yer hareketi kayıtları ile yapılabilmektedir. Bu hareket; ivme, hız veya yer değiştirme ile tanımlanabilir. Bu parametrelerden sadece biri ölçüldüğünde diğer parametreler türev veya integral yardımı ile hesaplanmaktadır (Kramer, 1996). Aşağıda, 1999 Gölcük depremine ait ($M_w=7.6$) ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri verilmiştir (Şekil 1.1).

Yer hareketini belirlemeye yönelik denklemler yukarıda ifade edilen parametrelerin pik değerlerini (pik hız, pik yer değiştirme ve pik ivme) ve elastik spektral ordinat değerlerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu parametreler pik veya efektif değerler ile karakterize edilebilmektedir. Ancak geçmişte yapılan konu ile ilgili çalışmalarda pik yatay yer ivmesini ve yatay spektral ivmeleri belirlemeye yönelik modellerin sayıca baskın olduğu görülmektedir (Douglas, 2021).

Şekil 1.1: 1999 Gölcük depremine ($M_w=7.6$) ait a) ivme b) hız c) yer değiştirme kaydı (Gürel (2021)'den değiştirilerek alınmıştır)



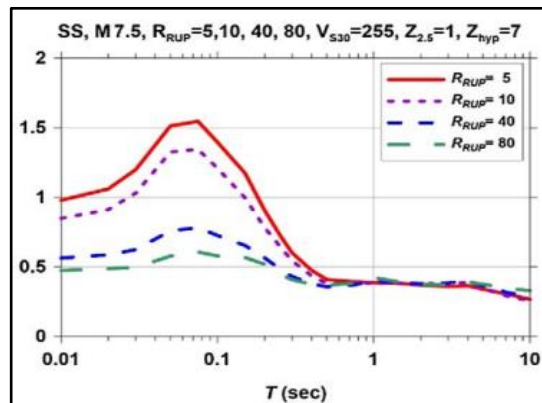
Deprem mühendisliği çalışmalarında yatay yer ivmesinin birbirine dik iki adet bileşeni vardır. Yer hareketi tahmin denklemi çalışmalarında, bileşenlerden büyük olanını (PGA_{maks}) seğme, iki bileşenin geometrik ortalamasını (PGA_{geo}) seğme veya daha nadir olmakla birlikte rastgele birini seğme şeklinde yaklaşımların tercih edildiği görölmektedir. Türkiye'de yapılan çalışmalar içerisinde iki bileşenin geometrik

ortalamasının kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bunlara örnek olarak; Özbey, vd., (2004), Akkar ve Çağnan (2010) ve Kale, vd., (2015) verilebilir. Kalkan ve Gülkan (2004) ile Ulusay, vd., (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda ise PGA_{maks} değerinin kullanıldığı görülmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin (TBDY, 2018) yürürlüğe girmesi ile birlikte kullanılan Türkiye Deprem Tehlike Haritalarında tarif edilen spektral veriler de geometrik ortalama üzerinden verilmektedir.

Deprem sırasında ortaya çıkan yer hareketinin binalar üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde yatay bileşenin düşey bileşene göre daha etkili olduğu bilinmektedir. Kramer'e (1996) göre, deprem mühendisliği çalışmalarında düşey ivmelerin yatay ivmelere göre daha az ilgi çekmesinin en önemli nedeni yerçekiminin sebep olduğu düşey kuvvetlerin, dinamik düşey kuvvetlere kıyasla emniyet payının yüksek olmasıdır. Bununla birlikte, uzun açıklıklı köprüler, nükleer enerji santralleri ve barajlar gibi bazı mühendislik yapıları için düşey yer hareketlerini tahmin etme ihtiyacı bulunmaktadır (Stewart, vd., 2016).

Uygulamada, sıkça kullanılan kabul pik düşey ivmenin pik yatay ivmeye oranının 2/3 olduğudur (Newmark ve Hall, 1982). Son yıllarda yapılan çalışmalarda bu oranın oldukça değişken olduğu gösterilmiştir (Bozorgnia ve Campbell, 2004; Bozorgnia ve Campbell, 2016; Stewart, vd., 2016). 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerine ait yakın-fay ivme kayıtları, düşey yer hareketlerinin aslında yatay yer hareketlerini aşabileceğini göstermiştir (Çağnan, vd., 2017). Özellikle yakın kaynak etkisinin olduğu depremlerde kısa periyot bölgesinde düşey bileşenin yatay bileşenden daha büyük olabileceği ve bu davranışın özellikle yumuşak zemin saha koşullarında daha baskın olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 1.2).

Şekil 1. 2: V/H (Düşey / Yatay) spektral ivme oranının değişimi



Kaynak: Bozorgnia ve Campbell, 2016

Her ne kadar, yer hareketi tahmin denklemleri genellikle eş zamanlı olarak aynı araştırmanın içerisinde hem PGA hem de elastik tepki spektrumu ordinatları için üretilse de PGA tahmini için mevcut olan yer hareketi tahmin denklemi sayısı elastik tepki spektral ivme tahmin denklemlerinden sayıca fazladır (Douglas ve Jousset, 2011). Tepki spektrumu ordinatlarını belirlemeye yönelik Avrupa ve Ortadoğu için ilk çalışma Ambraseys ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Akkar, vd., 2014). Daha sonra farklı revizyon ve iyileştirmeler yapılarak aynı bölge için benzer çalışmalar da yapılmıştır (Akkar ve Bommer, 2010; Akkar vd., 2014).

Global olarak dünyadaki spektral ordinat tahmin denklemleri çalışmalarına ilginin artması, Türkiye’de de benzer çalışmaların yapılmasında etkili olmuştur (Kalkan ve Gülkan, 2004; Özbey, vd., 2004; Akkar ve Cagnan, 2010).

Yer hareketi tahmin denklemlerinde ivme dışında pik hız parametresi de kullanılmaktadır (Akkar ve Bommer, 2007; Cagnan, vd., 2017). Özellikle pik hız (PGV) parametresi mühendislik sismolojisi ve deprem mühendisliği alanındaki pek çok uygulama için kullanılmaktadır. PGV, bir hız izinde tek bir pik genlik olmasına rağmen yapısal hasara sebep olan yer hareketi potansiyelinin güçlü bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. PGV değerinin gömülü boru hatlarındaki deprem hasarı ile iyi bir korelasyon gösterdiği belirlenmiştir (Bommer ve Alarcon, 2006; Akkar ve Bommer, 2007). Ayrıca hız parametresi, yer hareketinin yüksek frekans içeriğine daha duyarlı olduğundan orta frekanslardaki yer hareketi genliğinin pik ivmeye kıyasla daha doğru bir şekilde tanımlanabilmesi de önemli bir avantaj olarak kabul edilmektedir (Kramer, 1996).

Bir diğer yer hareketi parametresi ise pik yer değiştirmedir (PGD). (Akkar ve Bommer, 2007), tasarım elastik tepki spektrumunu oluşturmak için PGV değerini PGA ve PGD ile birlikte kullanmıştır. Özellikle, çok katlı yapıların deprem sırasındaki davranışı ile su ve kanalizasyon boruları, elektrik hatları gömülü yapıların performansı ve ömrü PGD gibi uzun-periyot parametrelerle yakından ilişkilidir (Faccioli, vd., 2004; Singh, vd., 2020). Literatürde PGD’nin moment büyüklüğü (M_w) ve mesafeye bağımlılığı ile ilgili çalışmalar dikkati çekmektedir. Bu çalışmalar büyük depremlerin magnitudünün hızlı tahmini ve erken tsunami uyarısı üzerine yoğunlaşmıştır (Crowell, vd., 2013; Singh vd., 2020).

1.2.2 Deprem Magnitüdü

Depremin magnitüdü, depremin boyutunu ifade eden nicel bir ölçüdür. İlk olarak 1935 yılında Charles Richter tarafından Güney California’da meydana gelen yüzeysel depremlerden bir magnitüd ölçeği geliştirilmiştir (Richter, 1935). Richter yerel magnitüdü (M_L) deprem dış merkezinden 100 km uzaktaki sismometrede kaydedilen en büyük genliğin 10 tabanından logaritması şeklinde tanımlanmıştır. Ancak yöntemin doğası gereği uzak mesafelerde uygun bir deprem ölçeği olmaması sebebi ile farklı magnitüd ölçekleri geliştirilmiştir.

Bunlardan biri olan yüzey dalgası magnitüdü (M_s), 20 sn periyotlu Rayleigh yüzey dalgalarının genliğine dayalı bir ölçektir. Yüzey dalgası magnitüdünün deprem boyutunu tanımlamada en uygun olduğu durumlar depremlerin sığ ve uzakta olduğu durumlardır (Gutenberg ve Richter, 1936). Bu magnitüd ölçeği derin odaklı depremleri ölçmede eksik kalmaktadır. 1945 yılında Gutenberg tarafından P dalgası genliğine bağlı olarak belirlenen cisim dalgası magnitüdü (m_b) geliştirilmiştir (Gutenberg, 1945).

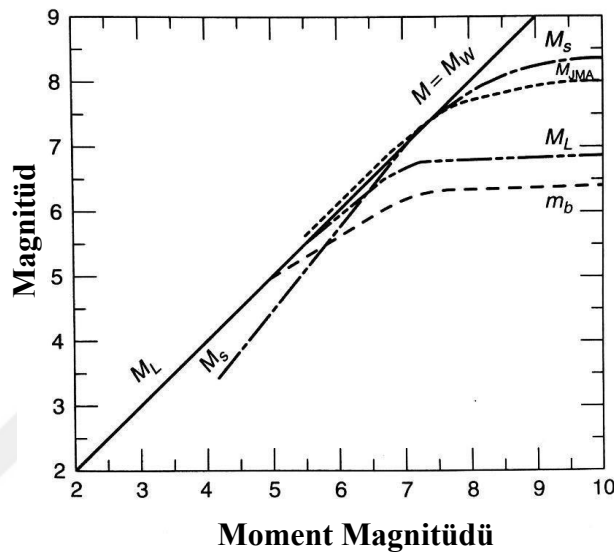
Özellikle küçük ve yakın depremler için kullanılan bir diğer magnitüd türü süreye bağlı magnitüddür (M_d). Bu magnitüd ölçeğinde depremin sebep olduğu salınımın sismometre üzerindeki süresinin depremin büyüklüğü ile orantılı olduğu yaklaşımı ile belirlenmektedir (Lee, vd., 1972).

Magnitüd ölçekleri yer sarsıntısı özelliklerini kaydeden farklı özellikte kayıt cihazlarının ölçümlerine dayalı olan büyüklüklerdir. Ancak depremlerle açığa çıkan enerji, yer sarsıntısını enerji artışı ile aynı oranda yansıtmayabilir. Kuvvetli depremlerde ölçülen yer sarsıntısı karakteristikleri küçük depremlerinkine kıyasla deprem büyüklüğüne daha az duyarlı olup bu durum doygunluk olarak tanımlanmıştır. Bu eksiklik sebebiyle moment magnitüdü (M_w) olarak tanımlanan magnitüd ölçeği geliştirilmiştir. Depremin açığa çıkardığı enerjinin ölçüsü olarak hesaplanan moment magnitüdünde (M_w) doygunluk problemi yoktur (Kramer, 1996). Bu magnitüd türü deprem sırasında fayın yırtılmasına bağlı olarak açığa çıkan enerjinin doğrudan bir ölçüsü olarak geliştirilmiştir (Hanks ve Kanamori, 1979).

Şekil 1.3’te farklı magnitüd türlerinin birbiri ile ilişkisi ve doygunluk sınırları görülmektedir. Richter yerel magnitüdü (M_L) ile cisim dalgası magnitüdü (m_b) 6-7 arasında doygunluğa ulaşırken; yüzey dalgası magnitüdünde (M_s) bu değer 8 civarındadır. Moment magnitüdünde (M_w) ise doygunluk problemi gözükmemektedir.

Yer hareketi tahmin denklemlerinde son yıllarda sıklıkla moment magnitüdünün kullanıldığı göze çarpsa da bu magnitüd ölçeği dünyanın farklı lokasyonlarında meydana gelen tüm depremler için belirlenememekte ve bu sebeple lokal veya global kuvvetli yer hareketi veri tabanlarında farklı magnitüd ölçekleri de listelenmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi moment magnitüdünde doygunluk probleminin olmaması magnitüd dönüşüm denklemleri konusunda farklı araştırmaların yapılmasına sebep olmuştur (Zare ve Bard, 2002; Akkar, vd., 2010; Kadirioğlu ve Kartal, 2016).

Şekil 1. 3: Farklı magnitüd ölçekleri arasındaki ilişki ve doygunluk değerleri



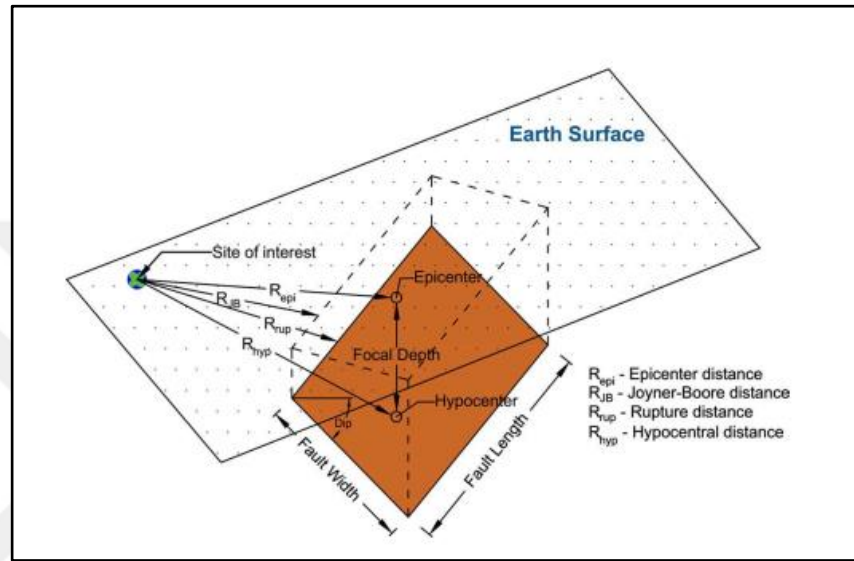
1.2.3 Uzaklık

Depremler, fay boyunca kayaların yenilmesi ile meydana gelmektedir. Fay düzleminde yırtılmanın başlangıç noktasına deprem odağı veya deprem iç merkezi denir. Odak noktasının yer yüzüne izdüşüm noktası ise dış merkez olarak isimlendirilir. Saha ile iç merkez arası uzaklığa iç merkez mesafesi R_{hyp} , saha ile dışmerkez arası uzaklığa dışmerkez mesafesi R_{epi} denir. Yırtılma alanına olan en kısa mesafe R_{rup} olarak ifade edilir. Sahadan fay yırtılmasının yeryüzündeki izdüşümüne en yakın yatay mesafesi ise Joyner-Boore mesafesi R_{JB} olarak tanımlanmış olup, tüm bu uzaklık tanımları Şekil 1.4'te fay geometrisi ve projeksiyonu ile birlikte verilmiştir.

Literatürde yer hareketi tahmin denklemlerinin günümüze kadar gelişimi incelendiğinde ilk çalışmalarda uzaklık terimi olarak R_{epi} ve R_{hyp} parametrelerinin kullanıldığı güncel çalışmalarda ise R_{rup} ve R_{JB} parametrelerinin kullanılmaya başlandığı

görülmektedir (Douglas, 2021). Campbell (2003), fay çözümlerinin yapılamadığı ve sahada yüzey kırığının görülemediği küçük magnitudlü depremlerde bu iki uzaklık parametresinin belirlenemediğini ifade etmiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla, literatürde farklı uzaklık ölçümleri için elde edilen dönüşüm denklemleri kullanılabilir (Scherbaum, vd., 2004).

Şekil 1. 4: Yer hareketi tahmin denklemlerinde kullanılan uzaklık ölçütlerinin fay geometrisi ve projeksiyonu üzerindeki görünümü



Kaynak: Sianko vd., 2020

1.2.4 Zemin Koşulları

Sismik dalgaların yeryüzüne kadar aldığı yolun büyük kısmı kayadadır. Ancak yolun büyük kısmı kayada olsa da zeminin karakteristik özellikleri de yer hareketinin niteliğini etkilemektedir. Zemin ortamı, bazı frekanslardaki sismik dalgaları sönmleme (atenasyon) hareketi ile filtrelerken bazı frekanslardaki genlik üzerinde ise büyütme etkisi yapmaktadır (Kramer,1996). Türkiye’de 1999 yılında yaşanan Marmara depremi, yerel zemin koşullarının yapısal hasar üzerindeki etkisinin anlaşılması açısından önemli bir dönüm olması olmuştur (Kalkan, 2001; Bakır, 2005).

Araştırmalar, üst 30 m’deki zemin tabakasının karakteristik özelliklerinin zemin yüzeyindeki yer hareketi davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu konuda çalışan araştırmacılar bu etkinin üst 30 m’deki ortalama kayma dalga hızı ($V_{s,30}$) ile yansıtılabileceğini göstermiştir (Borcherdt, 1994; Boore, 2004a; Boore, 2004b). Bu

etkinin, özellikle zemin dinamiği çalışmalarında sıklıkla kullanılmaya başlanması ile, yer hareketi tahmin denklemleri içerisinde de farklı şekillerde kullanılmaya başlandığı görülmüştür.

Türkiye ve çevresi için, Kalkan ve Gülkan (2004), Özbey vd. (2004), Ulusay vd. (2004), Akyol ve Karagöz (2009) ve Akkar ve Çagnan (2010) tarafından gerçekleştirilen tahmin denklemi çalışmalarında zemin koşulu etkisinin dahil edildiği görülmektedir. Bu çalışmaların bir kısmında bu etki, regresyon katsayısı olarak denkleme dahil edilirken, bir kısmında ise $V_{s,30}$ parametresi doğrudan denklem içerisinde kullanılmış ve lineer saha etkisi olarak modele dahil edilmiştir. Akkar ve Çagnan (2010) tarafından üretilmiş tahmin denkleminde ise $V_{s,30}$ parametresi üzerinden nonlinear saha etkisi dikkate alınmıştır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), zemin bağımlı tasarım spektrumlarının tanımlanmasında esas alınacak yerel zemin sınıflarını $V_{s,30}$ parametresine bağlı olarak Tablo 1.1'deki gibi tarif etmiştir. $V_{s,30}$ değeri 180 m/s'den küçük ise gevşek zemin sınıfını, 760 m/s üzerindeki hız değerleri ise orta sağlam/sağlam kaya sınıfını ifade etmektedir.

Tablo 1. 1: Yerel zemin sınıflarının değişimi

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe/30 cm]	$(C_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	>1500	-	-
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760-1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360-760	>50	>250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360	15-50	70-250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($C_u < 25$ kPa) içeren profiller	<180	<15	<70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Kaynak: TBDY, 2018.

1.2.5 Faylanma Tipi

Douglas (2003) son on yılda, ortak parametre olarak deprem büyüklüğü ve kaynak-saha mesafesi ölçüsü içeren 50 kadar spektral ivme tahmin denklemi yayınlandığını bildirmiştir. Bu tahmin denklemlerin büyük bir kısmı, iki ile dört farklı zemin sınıflandırmasının spektral koordinatlar üzerindeki etkisini temsil eden terimleri de içermektedir. Mesafe, deprem büyüklüğü ve zemin sınıflandırmasından sonra, tahmin denklemlerine en sık dahil edilen diğer bir değişken, faylanma tipidir.

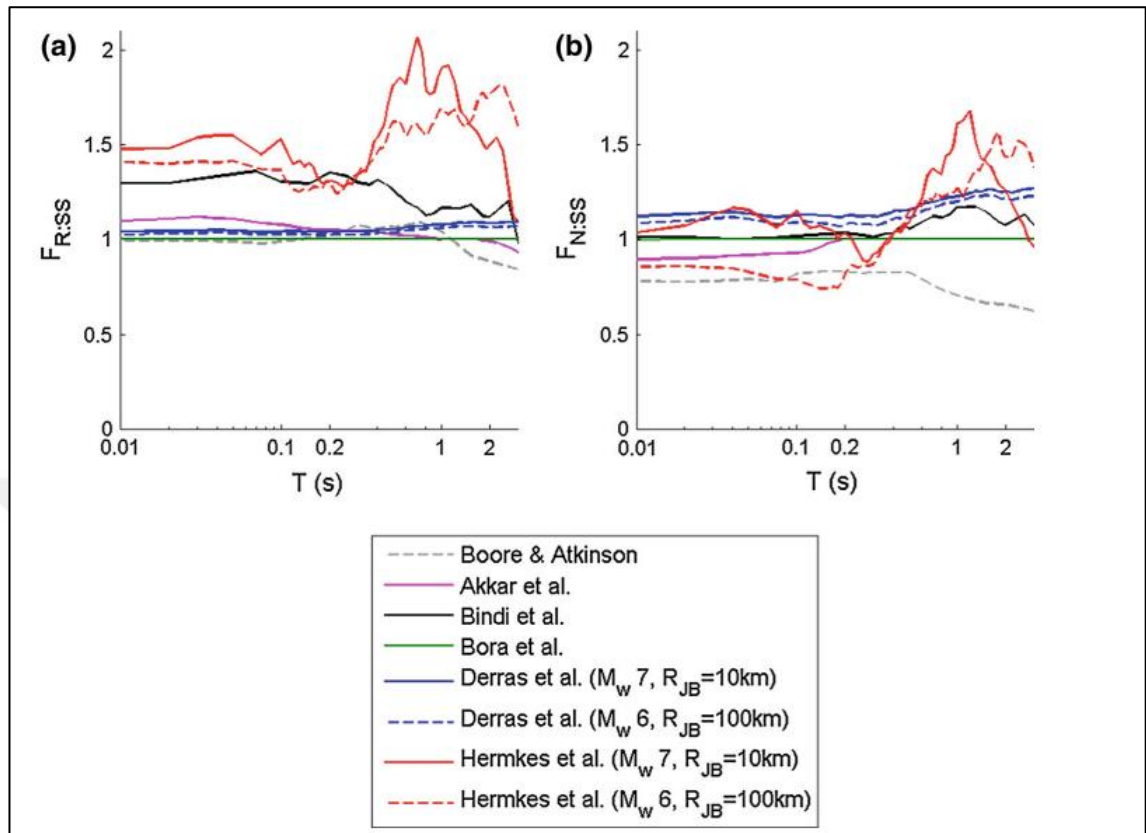
Abrahamson ve Silva (1997), Boore vd. (1997), Sadigh vd. (1997) ve Campbell ve Bozorgnia (2003) faylanma tipi etkisini denklemlerinde barındırmaktadır. Ancak denklemlerin oluşturulduğu bölge olan Kıyı Kaliforniya'da pratikte normal faylanma bulunmadığı için faylanma tipleri ters ve doğrultu atımlı şeklinde yer almaktadır. (Bommer, Douglas ve Strasser, 2003)

Faylanma tipinin sınıflandırılması, denklemlerin tümünde aynı şekilde ele alınmamaktadır. Denklemlerin içerdiği faylanma tipi sınıflandırması ters ve doğrultu atımlı faylar gibi basit bir ayırımdan, eğik ve bindirme fayları gibi ek kategorilerin dahil edilmesine kadar her açıdan farklılık göstermektedir. Ek olarak fay kırılmalarını sınıflandırmada kullanılan kayma açıları da her bir denklemde ayrı olabilmektedir.

Bommer, Douglas ve Strasser (2003) çalışmasından sonra NGA (Yeni Nesil Azalım İlişkileri) modelleri de dahil olmak üzere, yer hareketi tahmin denklemlerinin bir parçası olarak faylanma faktörü kullanılmıştır. Douglas vd. (2014) çalışmasından alıntılanan Şekil 1.6'da gösterildiği gibi, ters faylanma olaylarının doğrultu atımlıya göre oranının genliği; doğrultu atımlı faylanmanın normal faylanmayı geçtiği durumlarda meydana gelen genlikten yüksektir. Şekil 1.6'da beş adet RESORCE modeli ve Boore ve Atkinson (2008) modeli olmak üzere 6 adet modelin $F_{R,SS}$ ve $F_{N,SS}$ modeli karşılaştırılmaktadır. Benzer bulguların Akkar ve Çağnan (2010) tarafından yapılan çalışmada da elde edildiği görülmektedir.

Türkiye ve çevresi için geliştirilen yer hareketi tahmin denklemlerinde fay tipi etkisi son yıllarda çalışmalarda yer almaktadır. Buna örnek olarak; Akkar ve Çağnan (2010), Kale, vd., (2015), Çağnan vd. (2017) ve Gülerce (2017) verilebilir. Gülerce (2017) faylanmaya ek olarak çalışmasında tabakanın tavan bloğu veya taban bloğu olmasını da değerlendirmiştir.

Şekil 1. 5: Faylanma faktörünün karşılaştırılması **a)** Ters faylanmanın doğrultu atımlı faylanmaya oranı ($F_{R:SS}$) **b)** Normal faylanmanın doğrultu atımlı faylanmaya oranı ($F_{N:SS}$)





İKİNCİ BÖLÜM
TÜRKİYE VE ÇEVRESİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ YER HAREKETİ TAHMİN
DENKLEMLERİ

2.1 TÜRKİYE'DEKİ YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİNİN GELİŞİMİ

Bir proje sahası için yapılacak sahaya özel sismik tehlike analizi çalışmalarındaki en önemli aşama kullanılacak yer hareketi tahmin denkleminin seçimidir. Seçilecek tahmin denkleminin, magnitüd aralığı, sismik kaynak-saha mesafe aralığı, zemin koşulları ve faylanma tipi gibi faktörler açısından proje sahasının sismo-tektonik ve bölgesel jeoloji özellikleri ile uyumlu olması istenir.

Ülkemizde San Andreas Fayı ile Kuzey Anadolu Fayı'nın sismoteknik benzerliği sebebiyle Joyner ve Boore (1981;1988), Campbell (1988), Boore vd. 1997 ile Sadigh vd. (1997) tarafından önerilen yer hareketi tahmin denklemlerinin 2000'li yıllardan önce sıklıkla kullanıldığını görmekteyiz. 2018 yılında Resmî Gazetede yayınlanan ve 2019 yılında yürürlüğe giren TBDY (2018) ile kullanımı sona eren Deprem Bölgeleri Haritasının temelini oluşturan projede Joyner ve Boore (1981) tahmin denkleminin kullanıldığı bilinmektedir.

Ülkemizde ilk defa 1976 yılında alınmaya başlanan yer hareketi kayıtlarının sayısı Kuvvetli Yer Hareketi Ölçer Ağının genişlemesi ile birlikte artmış ve bu veri artışına bağlı olarak yerel yer hareketi tahmin denklemlerinin sayısı da artmaya başlamıştır (Aydan vd., 1996; İnan vd., 1996; Kalkan ve Gülkan, 2004; Ulusay vd., 2004; Özbey vd., 2004; Güllü vd., 2008; Akyol ve Karagöz, 2009; Akkar ve Çağnan, 2010; Kale vd., 2015; Erken vd., 2018).

Bu bölümde Türkiye ve civarı için geliştirilmiş olan yerel yer hareketi tahmin denklemlerine yer verilmiştir.

2.1.1 Aydan vd. (1996)

Çalışmada maksimum yer ivmesi Eşitlik (2.1) yanı sıra dikey PGA'nın yatay PGA'ya oranını tahmin etmek üzere de Eşitlik (2.2)'ye yer verilmiştir. Eşitlik (2.1)'in oluşturulmasında 1969-1995 yılları arasında kaydedilen 19 depreme ait 27 deprem kaydı verisi kullanılmıştır. Deprem kayıtlarının magnitüd aralıklarının $3.5 \leq M \leq 7.6$ ve mesafe (R_{hyp}) aralıklarının 10 ile 350 km arasında olduğu belirtilmiştir.

$$a_{maks} = 2.8 \left[\left(e^{0.9M_s} \right) x \left(e^{-0.025R} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

$$a_v / a_h = 0.217 + 0.046M_s \quad (2.2)$$

a_{\max} : Maksimum yer ivmesi (gal)

a_v : Maksimum dikey yer ivmesi (gal)

a_h : Maksimum yatay yer ivmesi (gal)

M : Deprem yüzey dalgası büyüklüğü, M_s

R : İç merkez uzaklığı, R_{hyp} (km)

2.1.2 İnan vd. (1996)

İnan vd. (1996) tarafından oluşturulan bu denklemde kullanılan ivme kayıtları 1976-1996 yılları arasını içermektedir. Uzaklık ölçütü olarak R_{epi} dış merkez mesafesi kullanılmıştır. Genel form Eşitlik (2.3)'te verilmiştir.

$$\log PGA = 0.65M - 0.9 \log R - 0.44 \quad (2.3)$$

PGA : Maksimum yer ivmesi (gal)

R : Dış merkezlik mesafe birimi, R_{epi} (km)

M : Deprem büyüklüğü (büyüklük tipi belirtilmemiştir.)

2.1.3 Ansal (1997)

Ansal (1997) tarafından geliştirilen bu denklemde moment büyüklüğü M_w ve iç merkez mesafe birimi olan R_{hyp} kullanılmıştır.

$$\log A_p = 0.329M - 0.00327R - 0.792 \log R + 1.177 \quad (2.4)$$

A_p : Maksimum yer ivmesi (gal)

R : İç merkezlik mesafe birimi, R_{hyp} (km)

M : Deprem moment büyüklüğü, M_w

2.1.4 Gülkan ve Kalkan (2002)

Söz konusu çalışmada Türkiye’de kaydedilmiş olan 19 depreme ait 47 güçlü yer hareketi kaydından doğrusal olmayan regresyon analizi ile ampirik bir denklem elde edilmiştir. Bu denklemin türetilmesi aşamasında Boore vd. (1997) denkleminin genel yapısı dikkate alınmış ve yerel zemin koşulları da denklemde yer almıştır. 1976-1999 yılları arasında meydana gelen depremleri kapsayan veri tabanında kayıtların moment büyüklüğü aralığı $4.5 \leq M \leq 7.4$, uzaklık aralığı ise 1.2 km ile 150 km arasındadır. Zemin tipi ise kaya zemin, zemin ve yumuşak zemin olmak üzere 3 koşulda değerlendirilmiştir.

$$\ln Y = 0.682 + 0.253(M - 6) + 0.036(M - 6)^2 - 0.562 \ln r - 0.297 \ln \left(\frac{V_s}{1381} \right) \quad (2.5)$$

Y: En büyük yatay yer ivmesi (g)

$r = (r_{cl}^2 + h^2)^{1/2}$ (km) ve $h=4.48$ km

r_{cl} : Fay kırığının yüzeydeki projeksiyonu ile kuvvetli yer hareketi istasyonu arasındaki en yakın yatay mesafeyi tarif eden mesafe birimi (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

V_s : Üst 30 m’deki ortalama kayma dalga hızı (m/sn)

2.1.5 Ulutaş ve Özer (2003)

Ulutaş ve Özer’in çalışmasında kullanılan veri tabanı 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ve 12 Kasım 1999 Düzce depremi dahil 22 deprem kaydı, 221 pik yatay ivme bileşeni içermektedir. Moment magnitüd değerleri 5.0 ve 7.4 arasındadır. Önerilen denklem Eşitlik (2.6)’da verilmektedir.

$$\log A = 0.505171 + 0.537579M - \log(R + 0.008347 \cdot 10^{0.5M}) - 0.00242R \quad (2.6)$$

A: En büyük yatay yer ivmesi (gal)

R: Dış merkezlik mesafe birimi, R_{epi} (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

2.1.6 Beyaz (2004)

Bu çalışmada, tahmin denklemi oluşturmak için 1976-2004 arasında meydana gelen deprem kayıtları derlenmiştir. Elde edilen veri tabanındaki kayıtlar $M_w \geq 4$ olan depremleri içermektedir. Deprem dış merkez mesafesi maksimum değeri 200 km olarak değerlendirilmiştir. Önerilen denklem Eşitlik (2.7)'de verilmektedir.

$$\log A = 2.08 + 0.0254M^2 - 1.001 \log(R+1) \quad (2.7)$$

A: En büyük yatay yer ivmesi (cm/sn^2)

R: Dış merkezlik mesafe birimi, R_{epi} (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

2.1.7 Ulusay vd. (2004)

Ulusay tarafından önerilen yer hareketi tahmin denklemi Türkiye'de 1976 ile 2003 yılları aralığında olan 122 depreme ait 221 kayıt derlenerek oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan depremlerin magnitüd değer aralıkları $4.1 \leq M \leq 7.5$ olup moment magnitüdü (M_w) kullanılmıştır. Pik yatay ivme aralığı ise 20-806 gal arasındadır. Kuvvetli yer hareketi istasyonu ile deprem merkezi arası mesafenin 5 ile 100 km arasında olduğu kayıtlar tercih edilmiştir.

$$PGA = 2.18 e^{0.0218(33.3M - R + 7.8427S_A + 18.9282S_B)} \quad (2.8)$$

PGA: Maksimum yer ivmesi (gal)

R: Dış merkezlik mesafe birimi, R_{epi} (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

Eşitlik (2.8)'de yer alan S_A ve S_B katsayıları zemin tipine göre değişmektedir. Kaya için $S_A = S_B = 0$, zemin için $S_A = 1$ ve $S_B = 0$, yumuşak zeminde ise $S_A = 0$ ve $S_B = 1$ şeklinde kullanılmaktadır.

2.1.8 Özbey vd. (2004)

Özbey vd. (2004) tarafından önerilen yer hareketi tahmin denklemi çalışmasında genel olarak Marmara Denizi ve Bolu arasında kalan bölgede 17 Ağustos 1999 ve 23

Ağustos 2000 tarihleri arasında meydana gelmiş, magnitüd değeri 5'e eşit veya büyük olan 17 depreme ait 195 kayıt kullanılarak derlenmiştir. Eşitlik (2.9)'da verilmiştir.

$$\log Y = 3.287 + 0.503(M-6) - 0.079(M-6)^2 - 1.1177 \log \sqrt{R^2 + 14.82^2} + 0.141G_1 + 0.331G_2 \quad (2.9)$$

Y: Pik yatay yer ivmesinin iki bileşenin geometrik ortalaması (cm/sn²)

R: Kırığın düşey projeksiyonuna olan en yakın yatay mesafe, R_{jb} (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

Denklemden zemin tipinin etkisi kayma dalga hızı (V_{s,30}) değeri üzerinden dikkate alınmıştır. V_{s,30} değerini denkleme yansıtmakta kullanılan "G₁" ve "G₂" terimleri aşağıdaki koşullara göre belirlenmektedir.

V_{s,30} > 360 m/s ise G₁=0, G₂=0

180 ≤ V_{s,30} < 360 m/s ise G₁=1, G₂=0

V_{s,30} < 180 m/s ise G₁=0, G₂=1

2.1.9 Kalkan ve Gülkan (2004)

Kalkan ve Gülkan (2004) tarafından önerilen yer hareketi tahmin denklemi Türkiye'de 1976-2003 yılları arasında kaydedilmiş olan 57 depreme ait 112 ivme kaydından derlenmiştir. Veri tabanında kayıtların moment büyüklüğü aralığı 4.0 ≤ M ≤ 7.4, uzaklık ise 1.2 km ile 150 km arasında değişmektedir. Zemin tipi ise kaya zemin, zemin ve yumuşak zemin olmak üzere 3 farklı şekilde dikkate alınmıştır. (Eşitlik 2.10)

$$\ln Y = 0.393 + 0.576(M - 6) - 0.107(M - 6)^2 - 0.899 \ln r - 0.200 \ln \left(\frac{V_s}{1112} \right) \quad (2.10)$$

Y: En büyük yatay yer ivmesi (g)

r = (r_{cl}² + h²)^{1/2} (km) ve h=6.91 km

r_{cl}: Fay kırığının yüzeydeki projeksiyonu ile kuvvetli yer hareketi istasyonu arasındaki en yakın yatay mesafeyi tarif eden mesafe birimi (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

V_s: Üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızı (m/sn)

2.1.10 Bindi vd. (2007)

Bindi vd. (2007) tarafından önerilen yer hareketi tahmin denklemi Türkiye’de 1999 senesinde meydana gelen Kocaeli depreminin artçıları kullanılarak oluşturulmuştur. 528 Artçı deprem ve 4047 kayıt dikkate alınmıştır. Veri tabanında kayıtların lokal büyüklüğü (M_L) 0.5 ile 5.9 arasında iken, iç merkezlik mesafesi (R_{hyp}) 5 ile 200 km arasındadır. (Eşitlik 2.11)

$$\log(y)=-1.4580+0.4982M+(-2.3639+0.1901M)\log(R_{hyp})+S_{1,2} \quad (2.11)$$

Y: En büyük yatay yer ivmesi (m/s^2)

R: İç merkezlik mesafe birimi, R_{hyp} (km)

M: Deprem lokal büyüklüğü, M_L

Denklemden yer alan $S_{1,2}$ zemin tipine göre değişmektedir. Zemin tipi kaya ise S_1 , değilse S_2 kullanılacaktır.

2.1.11 Güllü vd. (2008)

Güllü vd. (2008) tarafından önerilen yer hareketi tahmin denklemi Zare ve Bard (2002)’in verilerine dayanarak Eşitlik (2.12) geliştirilmiştir. Türkiye’nin Güney Anadolu Bölgesi’ndeki Gaziantep şehri için ayrıntılı çalışma eksikliği bulunması sebebiyle özellikle bu bölgede depreme dayanıklı tasarım konusunda bölgeye katkıda bulunması amaçlanmıştır. Veri tabanı 1976-2000 yılları arasında meydana gelen depremlerden 210 kayıt içermektedir. En büyük yer ivmesi değeri için alt sınır olarak $0.05 m/sn^2$ değeri dikkate alınmıştır. Çoklu regresyon analizi kullanılan bu çalışmada magnitüd değerleri aralığı $3.2 \leq M_w \leq 7.4$ ’tür.

$$\ln PGA=0.192+0.867M_w-0.294\ln R_e-0.008R_e+0.113S \quad (2.12)$$

PGA: En büyük yatay yer ivmesi (cm/s^2)

R: Dış merkezlik mesafe birimi, R_e (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

Denklemden yer alan “S” terimi zemin sınıflandırılmasını ifade etmektedir. Kaya ortam için $S=0$, zemin ortamı için $S=1$ ’dir.

2.1.12 Akyol ve Karagöz (2009)

Akyol ve Karagöz (2009) tarafından önerilen yer hareketi tahmin denklemi 1985-2006 seneleri arasında Batı Anadolu Bölgesi'nde meydana gelen 49 depremden elde edilen 168 pik ivme kaydı ile Eşitlik (2.13) geliştirilmiştir. Çalışmada iki aşamalı regresyon analizi uygulanmıştır. Veri setinde yer alan depremlerin moment büyüklükleri $4.0 \leq M_w \leq 6.4$ aralığındadır. İç merkez mesafe birimi ise 15-200 km arasındadır. Odak derinliği 4.3 ile 31.8 km arasında değişmektedir.

$$\log Y = 1.330095 + 0.640047(M - 6) + 1.65663 \log r + 0.14963S \quad (2.13)$$

Y: Pik yatay yer ivmesi (g)

r: İç merkez mesafe birimi, R_{hyp} (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

Denklemden yer alan "S" terimi zemin sınıflandırılmasını ifade etmektedir. Kaya ve sıkı zemin için "A", zemin ve yumuşak zemin ortam için "B" zemin sınıfı kullanılmaktadır. A zemin tipinde $S=0$, B zemin tipinde ise 1 değerini almaktadır.

2.1.13 Ulutaş ve Özer (2010)

Ulutaş ve Özer (2010) tarafından önerilen yer hareketi tahmin denklemi 1999 Kocaeli ve 1999 Düzce depremlerini ve artçıları içeren veri tabanından hareketle geliştirilmiştir. 78 adet depreme ait 751 yatay yer hareketi kaydı kullanılmıştır. (Eşitlik 2.14) Veri setinde yer alan depremlerin magnitüdüleri (M_w) 4.0 ile 7.4 arasındadır.

$$\log A = -2.7809 + 0.5344M \log(r_{rup} + 0.0183 \times 10^{0.4537M}) - 0.0015r_{rup} \quad (2.14)$$

A: Pik yatay yer ivmesi (g)

r_{rup} : Yırtılma alanına olan en kısa mesafe, R_{rup} (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

2.1.14 Akkar ve Çağnan (2010)

2010 yılında araştırmacılar tarafından oluşturulan bu tahmin denklemi 137 depreme ait (102'si deprem 346 yer hareketi kaydı, 35'i artçı 88 yer hareketi kaydı olmak

üzere) 434 ivme kaydı kullanılarak Eşitlik (2.15) elde edilmiştir. Veri tabanındaki kayıtlara ait deprem moment büyüklükleri $5.0 \leq M_w \leq 7.4$ aralığında değişmektedir. Diğer denklemlerden farklı olarak bu çalışmada lineer olmayan zemin davranışı ile faylanma tipi de dikkate alınmıştır. Faylanma mekanizmalarına göre kayıtların %28'i normal fay, %70'i doğrultu atımlı fay ve %2'si ters faylanma şeklindedir. Tahmin denklemi M_w değerine göre değişmektedir. (Eşitlik 2.15 ve Eşitlik 2.16)

$$\ln Y = 8.92418 - 0.513(M - 6.5) - 0.18555(8.5 - M)^2 + [-1.25594 + 0.18105(M - 6.5)] \ln \sqrt{R_{jb}^2 + 7.33617^2} - 0.02125F_N + 0.01851F_R + F_S \quad (2.15)$$

$$\ln Y = 8.92418 - 0.695(M - 6.5) - 0.18555(8.5 - M)^2 + [-1.25594 + 0.18105(M - 6.5)] \ln \sqrt{R_{jb}^2 + 7.33617^2} - 0.02125F_N + 0.01851F_R + F_S \quad (2.16)$$

Y: Pik yatay yer ivmesi (cm/sn²)

R: Kırığın düşey projeksiyonuna olan en yakın yatay mesafe, R_{jb} (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

$$F_S = F_{LIN} + F_{NL} \quad (2.17)$$

$$F_{LIN} = b_{lin} \ln \left(\frac{V_{S,30}}{V_{ref}} \right) \quad (2.18)$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{pga_{low}}{0,1} \right) \triangleright pga_{4nl} \leq 0,03g \quad (2.19)$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{pga_{low}}{0,1} \right) + c \left[\ln \left(\frac{pga_{4nl}}{0,03} \right) \right]^2 + d \left[\left(\frac{pga_{4nl}}{0,03} \right) \right]^3 \triangleright 0,03 \leq pga_{4nl} \leq 0,09g \quad (2.20)$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{pga_{low}}{0,1} \right) \triangleright pga_{4nl} \geq 0,09g \quad (2.21)$$

$M \leq 6.5$ değeri için Eşitlik (2.15) $M > 6.5$ değeri için ise Eşitlik (2.16) kullanılmalıdır. Denklemden yer alan “ F_N ” ve “ F_R ” faylanmayı ifade eden terimler olup normal faylanma için $F_N=1$ ve $F_R=0$ değeri, ters faylanma için $F_N=0$ ve $F_R=1$ değeri diğer durumlarda ise her iki terimde 0 değeri almaktadır. “ F_S ” terimi ise lineer ve non-lineer zemin davranışına göre hesaplanmaktadır.

F_{NL} ifadesi “pga4nl” nin 3 durumuna göre değerlendirilmektedir. Bunlar Eşitlik (2.19), (2.20), (2.21)’de verilmektedir. Eşitliklerde yer alan ifadelerin detaylı hesabı ve açıklaması için Boore ve Atkinson (2008) çalışmasına başvurulabilir.

2.1.15 Kale vd. (2015)

Kale vd. (2015) tarafından önerilen yer hareketi tahmin denkleminde EMM (Earthquake Model of the Middle East Region) Projesi kapsamında oluşturulan veri seti kullanılmıştır. Türkiye, İran, Gürcistan, Ermenistan, Pakistan ve Ürdün’de meydana gelen 1721 depreme ait 4500’den ivme kaydı verisi içeren bu veri setinden bu çalışma kapsamında derinlikleri 35 km’ye kadar olan 670 Türkiye’ye ait ve 528 İran’a ait ivme kaydı verisi kullanılmıştır. Modelin moment aralığı $4.0 < M_w \leq 8.0$ ve maksimum Joyner-Boore mesafesi (R_{jb}) ise 200 km’dir. Denklemin genel formu Eşitlik (2.22)’de verilmektedir.

$$\ln \bar{Y} = f_{mag} + f_{dis} + f_{sof} + f_{aat} + f_{site} \quad (2.22)$$

$$f_{mag} = \begin{cases} (b_1 + \Delta b_1) + (b_2 + \Delta b_2)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] + (b_3 + \Delta b_3)(8.5 - M_w)^2 \\ (b_1 + \Delta b_1) + (b_7 + \Delta b_7)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] + (b_3 + \Delta b_3)(8.5 - M_w)^2 \end{cases} \quad (2.23)$$

$$f_{dis} = (b_4 + \Delta b_4) + (b_5 + \Delta b_5)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] \ln \sqrt{R_{JB}^2 + (b_6 + \Delta b_6)^2} \quad (2.24)$$

Fay mekanizmasının dikkate alındığı (2.24) denkleminde; fay mekanizmasına göre aşağıdaki değerler dikkate alınacaktır.

Ters faylanma ise $F_{RV} = 1$ ve $F_{NM} = 0$,

Doğrultu atımlı faylanma ise $F_{RV} = F_{NM} = 0$,

Normal faylanma ise $F_{RV} = 0$ $F_{NM} = 1$.

$$f_{sof} = (b_8 + \Delta b_8)F_{NM} + (b_9 + \Delta b_9)F_{RV} \quad (2.25)$$

$$f_{aat} = \begin{cases} 0; & R_{JB} \leq 80 \text{ km} \\ (b_{10} + \Delta b_{10})(R_{JB} - 80); & R_{JB} > 80 \text{ km} \end{cases} \quad (2.26)$$

f_{site} denklemini zemin koşullarını denkleme dahil etmek için kullanılmaktadır. Bu denklemden $V_{REF} = 750$ m/s ise $V_{CON} = 1000$ m/s olarak dikkate alınmaktadır. $c = 2.5$, $n = 3.2$, $sb_1 = -0.41997$, $sb_2 = -0.28846$ ’dir.

$$f_{site} = \begin{cases} sb_1 \ln \left(\frac{V_{S,30}}{V_{REF}} \right) + sb_2 \ln \left(\frac{PGA_{REF} + c(V_{S,30}/V_{REF})^n}{(PGA_{REF} + c)(V_{S,30}/V_{REF})^n} \right) & ; V_{S,30} < V_{REF} \\ sb_1 \ln \left(\frac{\min(V_{S,30}, V_{CON})}{V_{REF}} \right) & ; V_{S,30} \geq V_{REF} \end{cases} \quad (2.27)$$

Y: Pik yatay yer ivmesi (g)

R: Kırığın düşey projeksiyonuna olan en yakın yatay mesafe, R_{jb} (km)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

PGA_{REF} : Referans kayma dalga hızı yer ivme değeri

“ Δ ” terimleri denklemden kullanıldığında, denklem İran için kullanılabilir bir denkleme dönüşmektedir. Denklemden katsayılar aşağıdaki gibidir.

$c_1= 6.75$, $\Delta c_1= 0.25$, $b_1= 1.74221$, $\Delta b_1= 0.21234$, $b_2= 0.193$, $\Delta b_2= 0.146$, $b_3= 0.07049$, $\Delta b_3= 0.03826$, $b_4= -1.18164$, $\Delta b_4= 0.17210$, $b_5= 0.170$, $\Delta b_5= -0.120$, $b_6= 8.00$, $\Delta b_6= 0.00$, $b_7= -0.354$, $\Delta b_7= 0.396$, $b_8= -0.01329$, $\Delta b_8= -0.11697$, $b_9= -0.09158$, $\Delta b_9= 0.0$, $b_{10}= -0.00156$, $\Delta b_{10}= 0.00156$.

2.1.16 Erken vd. (2018)

Erken vd. (2018) tarafından yapılan bu çalışmada kullanılan istasyonların özellikleri ve kuvvetli yer hareketi verileri, Türkiye Kuvvetli Yer Hareketi Veri tabanından (2017) (TR-NSMN) ve Pacific Earthquake Engineering Research Center-Enhancement of Next Generation Attenuation Relationships for Western US'den (PEER-NGA-) alınmıştır. Çalışma kapsamında derlenen veri tabanında 1999 ve 2006 yılları arasında Kuzeybatı Anadolu Bölgesi'nde meydana gelmiş olan 369 ana ve artçı deprem kaydı ve dünya çapında meydana gelmiş olan 33 ana deprem kaydı olmak üzere toplamda 402 kayıt yer almaktadır. Veri tabanında yer alan bu kayıtların pik yer ivmesi 1 gal'den büyük ve moment büyüklüğü (M_w) 4.0'dan büyüktür. Joyner-Boore mesafesi (R_{JB}) 0.1 ile 344 km arasında değişmektedir. Bu çalışmada doğrusal olmayan regresyon analizi kullanılmıştır.

“ F_{NL} ” Boore ve Atkinson (2008) tarafından tanımlanan bir terimdir. Bu terim Akkar ve Çağnan (2010) çalışmasında da yer almaktadır. “ F_S ” terimi lineer ve non-lineer zemin davranışına göre hesaplanmaktadır.

$$\ln \text{PGA} = 1.835 + 1.034 (M-6) - 0.252 (M-6)^2 - 1.397 \ln r - 0.069 \ln \frac{V_{S,30}}{V_{\text{REF}}} + F_{\text{NL}} \quad (2.28)$$

$$\ln \text{PGA} = 2.135 + 1.008 (M-6) - 0.163 (M-6)^2 - 1.380 \ln r - 0.133 \ln \frac{V_{S,30}}{V_{\text{REF}}} + F_{\text{NL}} \quad (2.29)$$

PGA: Pik yatay yer ivmesi (g)

R: Kırığın düşey projeksiyonuna olan en yakın yatay mesafe, R_{jb} (km)

$r = (R_{JB}^2 + h^2)^{1/2}$ (km) ve (kaya ortam için $h=9.718$ km; kum için $h=10.510$)

M: Deprem moment büyüklüğü, M_w

V_{REF} : Referans kayma dalga hızı (750m/s)

$V_{S,30}$: Üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızı (m/sn)



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
GEN İFADELİ PROGRAMLAMA (GEP)

3.1 GEP MODELİNİN GELİŞİMİ VE BİLEŞENLERİ

Genetik algoritmalar, canlıdaki gen yapılarını ve biyolojik evrim sürecindeki yöntemleri dikkate alan sezgisel bir yaklaşımdır (Goldberg 1989). Bireyler kromozomlardır, genler kromozomların içerdiği girdilerdir ve popülasyon bu algoritmalarda kromozomlardan oluşan bir toplumdur. Genetik programlama (GP), genetik algoritmaların alt kümesi olarak; sorunları Darwin teorisi uyarlayarak çözen, evrim temelinden gelen bir tekniktir (Koza ve Poli, 2005) İlk olarak Koza (1992) tarafından önerilmiştir.

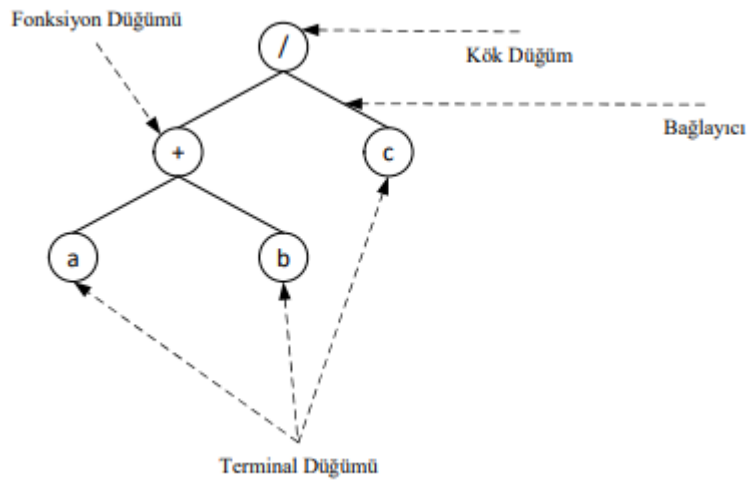
Gen İfadeli Programlama (GEP), genetik algoritmalar (GA) ve genetik programlama (GP) gibi, öğelerin veri kümesini kullanan, uygunluğa göre onları seçen ve bir veya daha fazla genetik operatör kullanarak genetik varyasyonu ortaya koyan bir genetik algoritmadır (Mitchell, 1998). Bu üç algoritma arasındaki temel fark, öğelerin doğasındadır: genetik algoritmalarda öğeler, sabit uzunlukta doğrusal dizilerdir (kromozom); genetik programlamada öğeler, farklı boyut ve şekillerde (açıklama ağacı) doğrusal olmayan varlıklardır ve gen ifadeli programlamada ise öğeler, farklı boyut ve şekillerde (basit diyagram temsilleri veya ifade ağaçları) doğrusal olmayan varlıklar olarak ifade edilen sabit uzunlukta doğrusal diziler (genom veya kromozomlar) olarak kodlanır. (Ferreira, 2001) Yani özetle GEP iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; kromozomlar ve ifade ağaçlarıdır. İfade ağaçları kromozomlarda kodlanmış genetik bilginin ifadesidir. GEP modellemede amaç veri kümesi kullanılarak aralarındaki ilişkiyi matematiksel fonksiyon ile açıklamaktır.

Aşağıdaki örnek ifade için Eşitlik 3.1'deki cebirsel ifade ele alınacaktır.

$$\frac{a+b}{c} \quad (3.1)$$

Burada a, b ve c modeldeki değişkenlerin oluşturduğu terminallerdir. “+,” ise terminallerin organizasyonunu belirleyen fonksiyonlardır. Düğümler ve bağlantılar, bu fonksiyon ve terminalin birbiriyle etkileşimini sağlar. Gen organizasyonunun temel işlevi kök düğümdür. Şekil 3.1'de temsili ifade (açıklama) ağacı (ET) gösterilmektedir.

Şekil 3. 1: Bir genden oluşan bir kromozomun temsili açıklama ağacı (ET)



Problemin karmaşıklığına bağlı olarak tek bir genle ifade edilemeyen durumlarda bu ET, alt açıklama ağaçları (Sub-Et) ile ifade edilebilir.

Değişken genetik operatör ve işlemciler arasındaki ilişkiler, Karva notasyonları şeklinde ifade edilir. Karva notasyonları ise ifade ağaçları ile gösterilir (Ferreira, 2001). ET'lerdeki fenotipik gen bilgisi Karva dilinde sırasıyla yukarıdan aşağıya ve soldan sağa genotip gen bilgisi olarak görüntülenebilir ve Şekil 3.2'deki gibi ifade edilir. Bu genotip gen bilgisi aynı zamanda “Açık Okuma Çerçevesi” olarak da bilinmektedir.

Şekil 3. 2: Genin Karva ifadesi ile gösterimi

0	1	2	3	4
÷	+	a	b	c

GEP'te genetik operatörler tarafından işlenen genler baş ve kuyruk olmak üzere iki bölümden oluşur. Baş, örnekteki gende olduğu gibi, fonksiyon ve terminalleri içerir. Kuyruk ise terminaller ve sabitlerden oluşur. Kuyrukta yer alan terminaller ve sabitler sırasıyla baş bölümündeki fonksiyonlar ve terminallerle işleme girerek hedef fonksiyon ve değerleri oluşturur (Lopes ve Weinert, 2004). Kuyruğun uzunluğu “t” ile, baş uzunluğu ise “h” ile ifade edilmektedir. Kuyruk uzunluğu Eşitlik 3.2'ye göre hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte n; değişken numarasıdır. Baş ve kuyruk bölümlerinin şematik olarak gösterimi Şekil 3.3'te verilmektedir.

$$t = h \times (n - 1) + 1 \quad (3. 2)$$

Şekil 3. 3: Bir genin baş ve kuyruğuyla şematik bir gösterimi

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5
 ÷ + a b c **b c b c c a b a a b a**

GEP'te model oluşturma çalışmalarında öncelikle kromozom sayısı ve yapısı belirlenmelidir. Daha sonra problemin zorluk ve karmaşıklık durumuna göre kromozomların yapısını oluşturan gen sayısı ve baş uzunluğu belirlenmelidir. Değişkenlerin sayısı ve çözüme katkıları, yüksek performanslı bir model oluşturmak için esastır. Genel olarak değişken sayısı arttıkça, gen sayısı ve genin baş uzunluğu da artma eğilimindedir. Sonraki aşamada problemde sonra genin başını oluşturan fonksiyonlar ve birden fazla gen kullanılması durumunda bağlayıcı fonksiyonlar tanımlanmalıdır. Oluşturulan modellerde genleri birbirine bağlayan bağlantı fonksiyonları aynı olmayabilir. Sorunun niteliğine ve tartışılan sonuca bağlı olarak bağlantı fonksiyonları değişkenlik gösterebilir. Basit ve anlaşılır modeller oluşturmak için temel matematiksel operatörlerin (+, -, x, /) kullanılması önerilir (Sattar, 2014).

GEP, kromozom yapısının hazır olduğu fonksiyon ve terminallerden rastgele bireyler oluşturarak popülasyonu oluşturur. Popülasyonda yaratılan ilk birey ebeveyn kromozomudur. Bu ebeveyn kromozoma genetik operatörler uygulanarak oluşturulan en iyi yavru kromozomlar gelecek nesillere aktarılır. Uygunluk kriterine göre, hedef modele bağlı olarak amaç fonksiyonlarının kullanıldığı en iyi yavru kromozomlar seçilir.

Uygunluk kriteri f_i , Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemde regresyon fonksiyonunun elde edilmesinde dikkate alınan RMSE (Root Mean Square Error) kullanılır. Uygunluk kriterleri 0 ile 1000 arasında değişir. $RMSE=0$ ise $f_i=1000$ olması ile mükemmel uyum sağlanmaktadır. Böylece en uygun bireylerin (kromozomların) yaşamlarını sürdürmeleri sağlanarak yeni bir popülasyon oluşturulur.

$$f_i = 1000 \cdot \frac{1}{1 + RMSE} \quad (3.3)$$

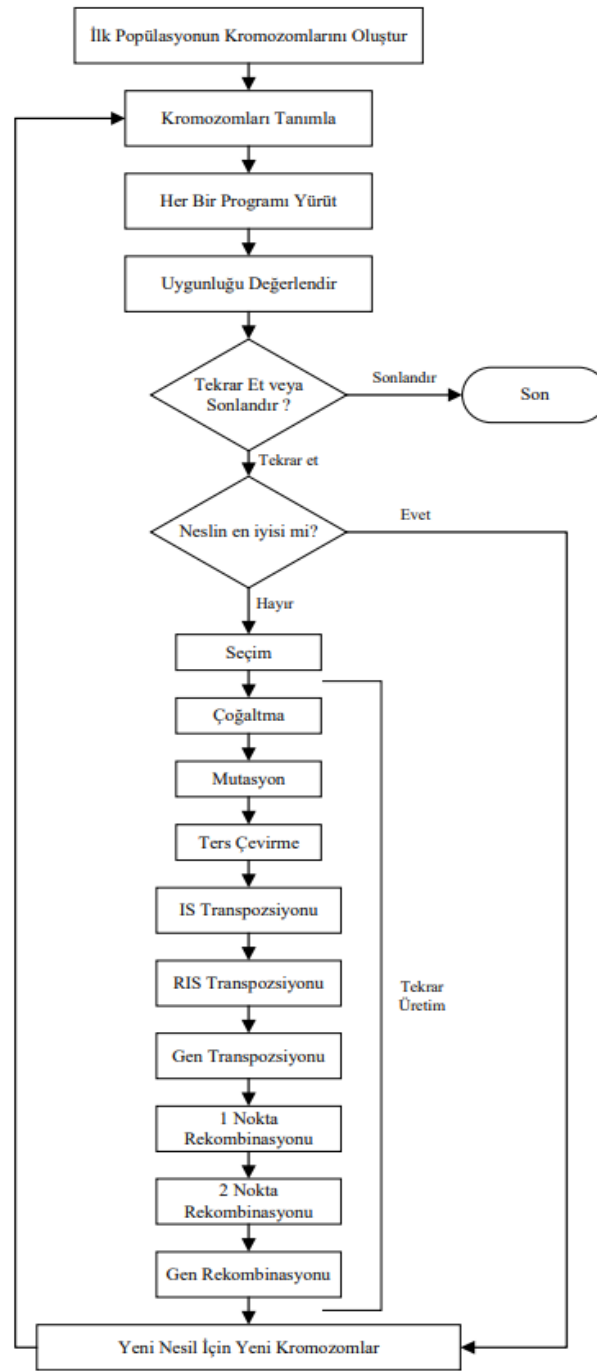
Süreç iyi bir çözüm bulunana kadar tekrarlanır (Ferreira, 2006). Maksimum nesil sayısı tanımlanır veya en iyi uygunluk değeri değiştirilmeden birden fazla nesil oluşturulduğunda süreç tamamlanabilir.

GEP tekniğinde birçok genetik operatör mevcuttur (Ferreira, 2001). Çoğaltma, Mutasyon, Transpozisyon, Rekombinasyon, Inversiyon olarak bilinen bu genetik operatörler, tekrar üretim aşamasında kromozomları değiştirirler. GEP'te bir kromozom,

popülasyonda varyasyon sağlayan bir veya daha fazla genetik operatör tarafından seçilebilir. Bu özellik GEP'i, bir varlığın aynı anda birden fazla operatör tarafından asla değiştirilmediği genetik programlamadan ayırır (Koza,1992). Bu nedenle, GEP'te, birkaç genetik operatörün modifikasyonları, üreme sırasında birikir ve ebeveynlerden çok farklı yavrular üretir.

Genetik operatörlerin çalışma yöntemleri aşağıdaki açıklamalarda verilmiştir. Çoğaltma operatörü, tek başına genetik çeşitliliğe bir katkısı olmaz. Sonraki Nesiller için sonucu etkileyen iyi genleri kromozom üzerinde depolamak için kullanılır. Mutasyon operatörünün sağladığı mutasyon kromozomun herhangi bir yerinde meydana gelebilir. Kromozomun baş bölümünde bir sembol bir diğerine dönüşebilir ancak kuyruk kısmındaki değişiklik sadece terminallerle sınırlıdır. Kuyruktaki bu durumla kromozomların yapısal organizasyonu korunur. Transpozisyon operatörü ise kromozomlardaki belirli sayıda gen bilgisini değiştirir ya da bunun yerine başka gen bilgisini kopyalar. Ekleme sıralı genlerin yer değiştirmesi (IS Transpozisyonu), kök yerleştirme dizisinin transpozisyonu (RIS Transpozisyonu) ve gen transferi (Gen Transpozisyonu) olmak üzere 3 şekilde gerçekleşebilir. IS Transpozisyonu, kromozomun başındaki belirli sayıda rastgele seçilmiş gen bilgisini, aynı kromozomun başka bir bölümündeki aynı sayıda gen bilgisi ile değiştirir. RIS Transpozisyonu, belirli sayıda rastgele gen bilgisi, kromozomun başındaki farklı yerlere yerleştirilir. Gen transpozisyonu, bir grup genin kromozom üzerinde kopyalanması ve bunların yer değiştirmesi ile gerçekleştirilir. Rekombinasyon (yeniden birleştirme) operatörü, tek bir nokta (1-noktalı Rekombinasyon), iki noktalı (2-noktalı Rekombinasyon) ve belirli sayıda genin (Gen Rekombinasyonu) yeniden düzenlenmesiyle kromozomların çoğaltılmasında kullanılır. Çaprazlama sırasında genler, iki kromozom arasında rastgele seçilen bir noktada değiştirilir ve 1 Noktalı Rekombinasyon ile yeni nesiller oluşturulur. 2 noktalı Rekombinasyon ile, çaprazlama sırasında iki kromozom arasında rastgele seçilen iki noktada genler değiştirilir ve yeni nesiller oluşturulur. Gen Rekombinasyonu ile rastgele seçilen genler, yeni nesiller oluşturmak için yeniden birleştirilir. (Ferreira, 2001) GEP uygulamasına ait akış şeması Şekil 3.4'te özetlenmiştir.

Şekil 3. 4: GEP Akış Şeması



Kaynak: Ferreira, 2001

3.2 GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE GEP KULLANIMI

Esnek hesaplama yöntemlerinin kullanımı İnşaat Mühendisliği alanında farklı hantal matematik problemlerini saniyeler içinde çözmeye yardımcı olmasıyla 21. yüzyılda alternatif yöntemlerden biri olmuştur (Kontoni, vd., 2022).

Son yıllarda, Bulanık Mantık, Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritma gibi esnek hesap metodları, özellikle kompleks ve doğrusal olmayan zemin elemanının davranışı ile ilgilenen Geoteknik Mühendisliği alanında akılcı bir çözüm aracı olarak benimsenmiştir. Gen İfadeli Programlama (GEP) tekniği, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi, yüzeysel temellerin taşıma gücü, kazık oturma hesapları, şişme basıncının tahmini, ince taneli zeminlerin sıkışma indisi değerinin belirlenmesi, dolgu barajların deprem kaynaklı kret oturmalarının tahmini gibi konularda kullanılmaktadır.

Kayadelen (2011); $(N_1)_{60}$, ince yüzdesi, efektif gerilme, tekrarlı gerilme oranı (CSR) ve içsel sürtünme açısı parametrelerinin girdi olarak kullanıldığı GEP tabanlı alternatif iki ayrı model önermiştir. Modellerde çıktı parametresi sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS_L) olarak belirlenmiştir.

Poor vd. (2015); granüler zeminler üzerine oturan yüzeysel temellerin nihai taşıma gücünü belirlemek için deneysel sonuçlara dayalı olarak GEP yöntemini kullanmış ve Meyerhof ile Vesic formülasyonuna dayalı iki ayrı model önermiştir.

Armaghani vd. (2018); Malezya'da bir proje kapsamındaki 96 adet kayaya soketli kazık için oturma tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında hem Gen İfadeli Programlama hem de Lineer Çoklu Regresyon tekniği kullanılmıştır. Kazık boyu, kazık çapı, tek eksenli basınç dayanımı, SPT-N darbe sayısı ve kazık nihai taşıma gücü değerlerinin girdi parametresi olarak belirlendiği GEP modele dayalı denklemlerin oturma tahminlerinde güvenli olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Mohammadzadeh vd., (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada likit limit, plastik limit ve başlangıç boşluk oranının girdi parametresi, sıkışma indisi değerinin çıktı parametresi olarak seçildiği GEP modelleme çalışmalarının 108 adet veri seti üzerinde yapıldığı anlaşılmaktadır. Oluşturulan model sonrasında elde edilen kapalı form denkleminin literatür ile uyumlu bir performans gösterdiği ve pratik uygulamalar için kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Seyrek ve Topçu (2022); dünyanın farklı yerlerinde meydana gelmiş 88 vakayı detaylı olarak değerlendirmiş ve dolgu barajlarda oluşan deprem kaynaklı kret oturmaları için GEP tekniği kullanarak iki ayrı modele dayalı tahmin denklemi önermiştir. Baraj yüksekliği, alüvyon kalınlığı ve deprem-ivme faktörü olarak tanımlanan girdi

parametreleri yardımıyla elde edilen tahmin denklemlerinin deprem sonrası hızlı değerlendirme için kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Şişen zeminlerin şişme basıncının dolaylı yoldan belirlenmesi için Jalal vd. (2023) tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Toplam 200 deneysel veri üzerinde gerçekleştirilen modelde on farklı girdi parametresi seçilmiş ve genetik ifadeli programlama ile şişme basıncının tahmininde anlamlı sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir.



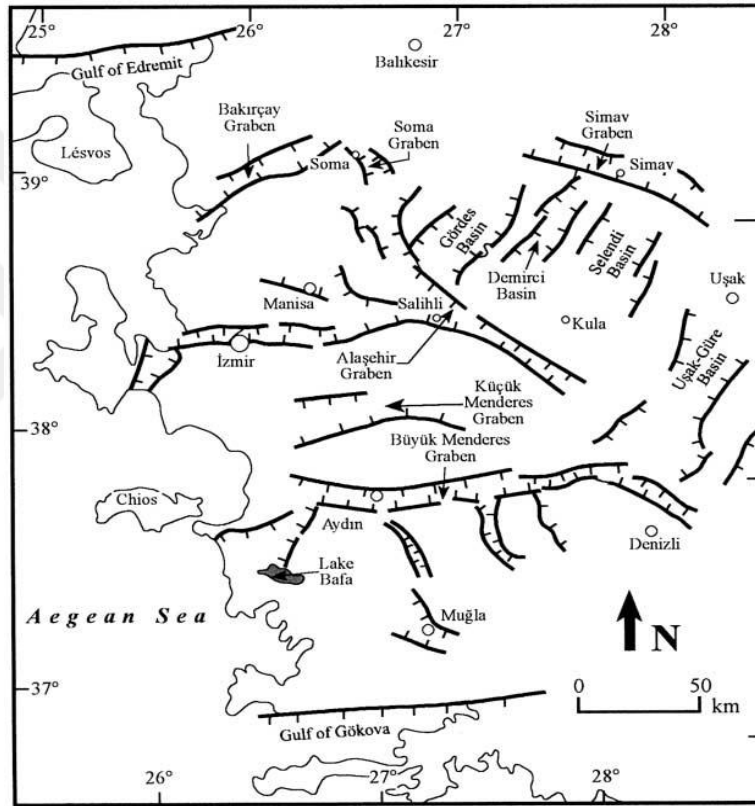


DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ÇALIŞMA ALANININ İNCELENMESİ

4.1 İNCELEME ALANININ SİSMO-TEKTONİK ÖZELLİKLERİ

Oluşturulacak yer hareketi tahmin modeli için inceleme alanı olarak Ege Bölgesi seçilmiştir. Çalışma sahasının Ege Graben Sistemi içerisinde yer alan fay zonlarının ve bunlara ait alt segmentlerin etkisi altında olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.1). Ege Graben Sistemi, dünyadaki en hızlı genişleyen ve sismik aktivitenin en fazla olduğu bölgelerden biridir. Genel olarak K-G yönlü kıtasal açılma oranı 3-4 cm/yıl'dır (Bozkurt, 2001).

Şekil 4. 1: Batı Anadolu grabenlerinin basitleştirilmiş haritası



Kaynak: Bozkurt, 2001

Ege Bölgesindeki kıtasal genişlemenin sebebi ile ilgili en çok kabul gören yaklaşım, Anadolu kıtasal bloğunun Kuzey Anadolu fayı ve Doğu Anadolu Faylarının sıkıştırması sonucu batıya doğru kaymasıdır (Şengör vd. 1985). Literatürde çalışma alanı için farklı GPS kayma hız ölçümleri mevcuttur. Bunlar arasında Aktuğ vd. (2009) tarafından hazırlanan elastik blok modelinde graben üzerinde kayma hızlarının 3.7-5.6 mm/yıl arasında değiştiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.2). İlgili şekle göre Büyük Menderes Grabeni'nde en büyük kayma hızı 5.6 mm/yıl iken, Gediz Grabeni için en büyük kayma hızı 4.5 mm/yıldır.

depremi ($M=7.2$) ve 2005 Seferihisar depremi ($M=5.9$) bu depremlerden bazılarıdır (Kahraman, vd., 2008).

Gürel (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 1900-2020 yılları arasında Ege Bölgesinde meydana gelen $M_w \geq 4.0$ olan deprem sayısının 1220 olduğu, bu depremlerin yaklaşık %88.4'ünün $4.0 \leq M_w < 5.0$ şartını sağladığı ifade edilmiştir. Aynı çalışmada büyüklükleri 5.0 ile 6.0 arasında değişen depremlerin ise toplam deprem sayısının %10.7'sine karşılık geldiği belirtilmiştir. Deprem büyüklükleri ve sayıları ile ilgili elde edilen bu tespitler, küçük ve orta büyüklükteki depremlerin çalışma sahasında sık tekrarlandığı bilgisini desteklemektedir.

4.2 ÇALIŞMA ALANI İÇİN YER HAREKETİ VERİ TABANININ OLUŞTURULMASI

GEP ile Ege Bölgesi için oluşturulacak yer hareketi tahmin modellerine girdi sağlayacak yer hareketi kayıtları 1976 ile 2017 yılları için Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı'ndaki veri tabanından elde edilmiştir (<https://tadas.afad.gov.tr>). Dikkate alınan depremlerin Ege Bölgesi kara sınırları içerisinde meydana geldiği belirtilmelidir.

AFAD veri tabanından elde edilen yer hareketi setindeki deprem büyüklükleri farklı magnitüd ölçekleri ile verilmektedir. Homojen bir deprem veri tabanı oluşturabilmek için Kadirioğlu ve Kartal (2016) tarafından sunulan magnitüd dönüşüm ifadeleri kullanılarak tüm depremlerin moment magnitüdü (M_w) ölçeğine sahip olması sağlanmıştır. Öncelikle, $M_w \geq 4.0$ ve $PGA \geq 1$ gal alt sınır koşulunu üzerinden bir değerlendirme yapılmış, elde edilen veri setinin 740 deprem ve bu depremlere ait toplam 2579 adet ivme kaydından oluştuğu belirlenmiştir. Veri tabanına ait bir örnek gösterim Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4. 1: Yer hareketi veri tabanının genel bilgileri

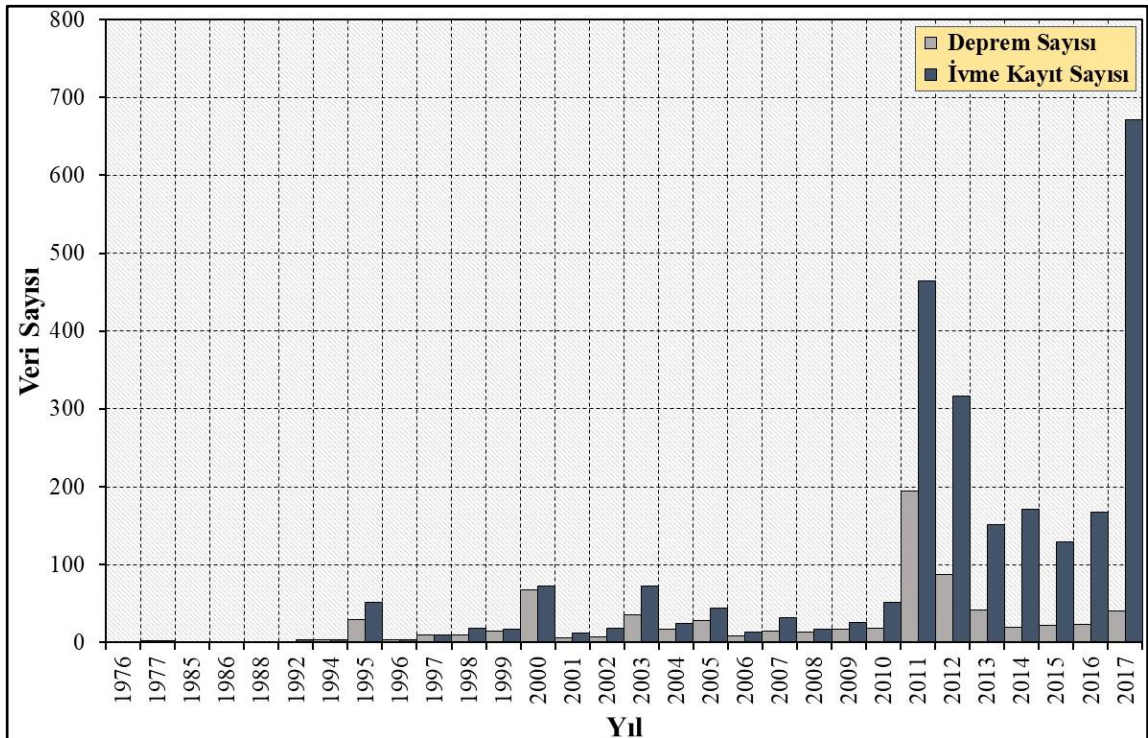
İvme ID	PGA_{geo}	PGA_{maks}	$V_{s,30}$	R_{jb}	R_{rup}	R_{epi}	R_{hyp}	Depth	M_w
19921106190809-3507	25.09	37.81	1030	57.53	59.64	61	63.19	17.2	6
19921106190809-3501	34.19	38.34	196	37.34	39.94	43	46.34	17.2	6

Dikkate alınan bu yer hareketi kayıtları içerisinde ilk kayıt 1976 Denizli depremine aittir. Denizli depreminde 4 can kaybı ve 7607 binada da ağır hasar meydana

gelmiştir (Bikçe, 2015). Veri setindeki en büyük ivme değeri 391.41 gal ile 16.12.1977 tarihli $M_w=5.6$ büyüklüğündeki İzmir depremine aittir. Ayrıca Şubat 2002 Afyon Çay-Sultandağı ($M_w=6.5$) ve Ekim 1995 Afyon Dinar ($M_w=6.4$) depremleri de veri tabanında yer alan önemli depremler arasındadır. 2002 Afyon Çay-Sultandağı depremi 42 can kaybına ve 4.400 yapının ağır hasar görmesine neden olmuş, 1995 Afyon Dinar depremi ise 90 can kaybı ve 14156 hasarlı bina oluşmasına sebep olmuştur (Koçyiğit, vd., 2002; Eyidoğan, vd., 1996).

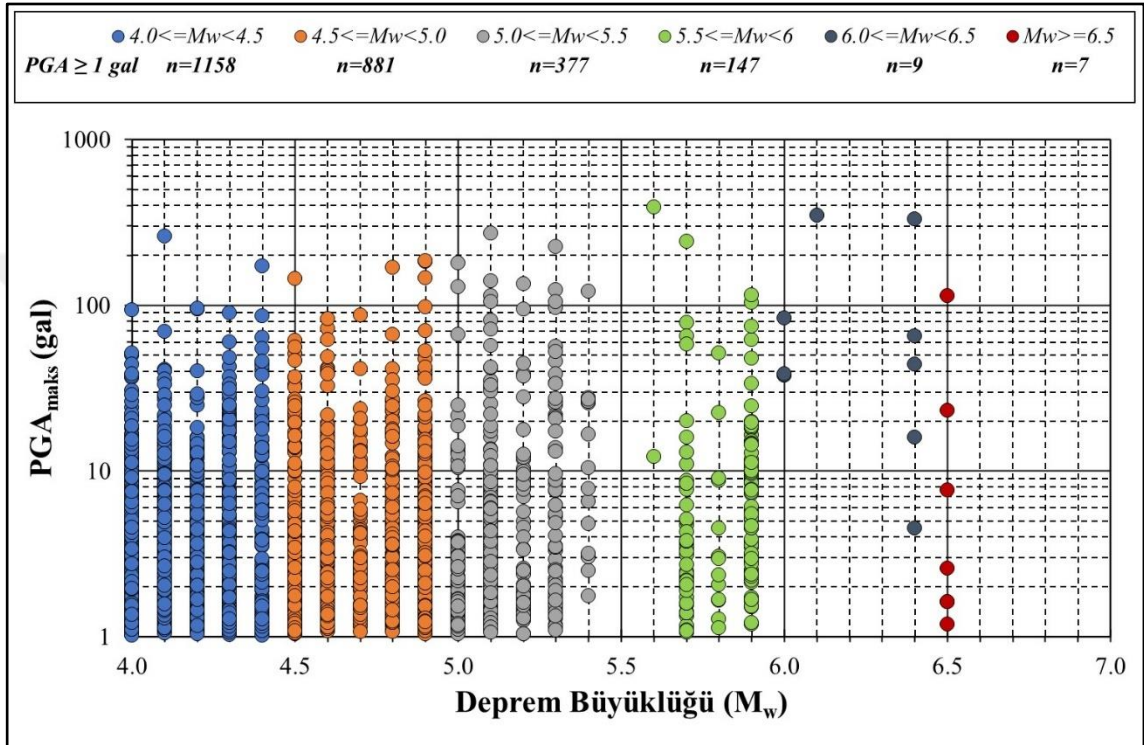
Yukarıda detayları verilen 740 deprem ve bunlara ait 2579 ivme kaydının yıllara göre dağılımı Şekil 4.3'te verilmektedir. İlgili şekil detaylı olarak incelendiğinde, 1976-2010 yılları arasındaki deprem sayısı 740 depremin %40'ına karşılık gelmekte, ivme kaydı sayısı ise toplam kayıt sayısının %17.4'üne karşılık gelmektedir. 2010 yılı sonrasındaki ivme kayıt sayısındaki artışı, sadece inceleme alanındaki sismisitenin artması ile açıklamak mümkün değildir. 2010 yılı sonrası Yer Hareketi Gözlem Ağı sayısındaki artış ve kayıt cihazlarındaki teknolojik gelişmelerin de bu sonuç üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Deprem ve ivme kayıt sayısının en yoğun olduğu yıllar sırasıyla 2011 ve 2017 yılıdır. Sadece 2011 yılındaki 194 adet deprem sayısı toplam deprem sayısının yaklaşık %26'sını, 2017 yılına ait 672 adet kaydı sayısı ise toplam kayıt sayısının yaklaşık %26'sını oluşturmaktadır.

Şekil 4. 3: Veri tabanındaki deprem ve ivme kayıt sayısının yıl bazında değişimi



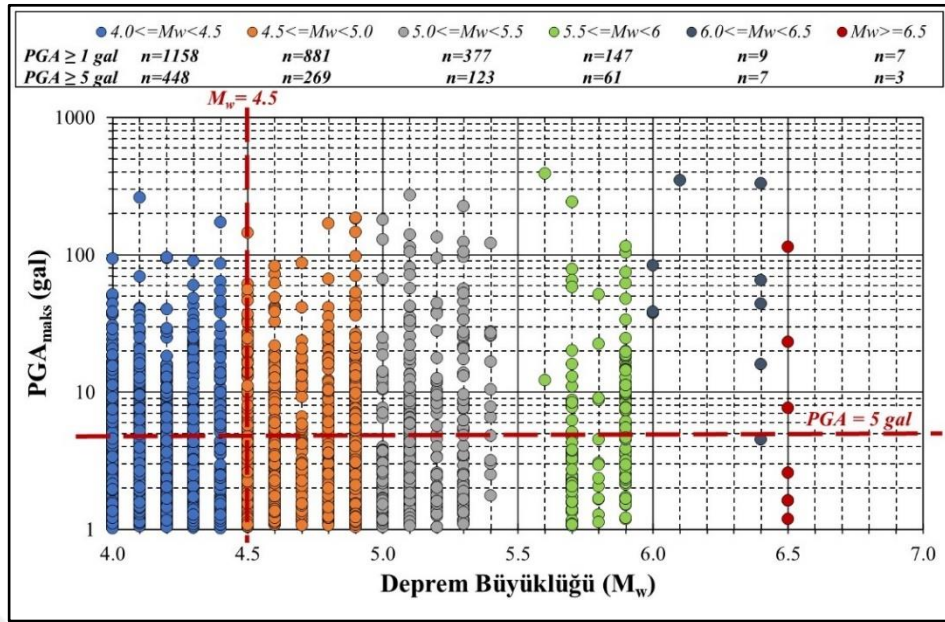
Dikkate alınan veri tabanına ait yer hareketi kayıtlarındaki en büyük yer ivmesi (PGA_{maks}) değerlerinin deprem büyüklüğü ile değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. İlgili şekil incelendiğinde, $4.0 \leq M_w < 4.5$ aralığındaki yer hareketi kayıt sayısının toplam kayıt sayısının yaklaşık %45'ine karşılık geldiği anlaşılmaktadır. Bu veri tabanının kullanılması halinde, bu magnitüd aralığındaki verilerin baskın olacağı açıktır.

Şekil 4. 4: İlk veri tabanındaki PGA_{maks} değerlerinin deprem büyüklüğü ile ilişkisi



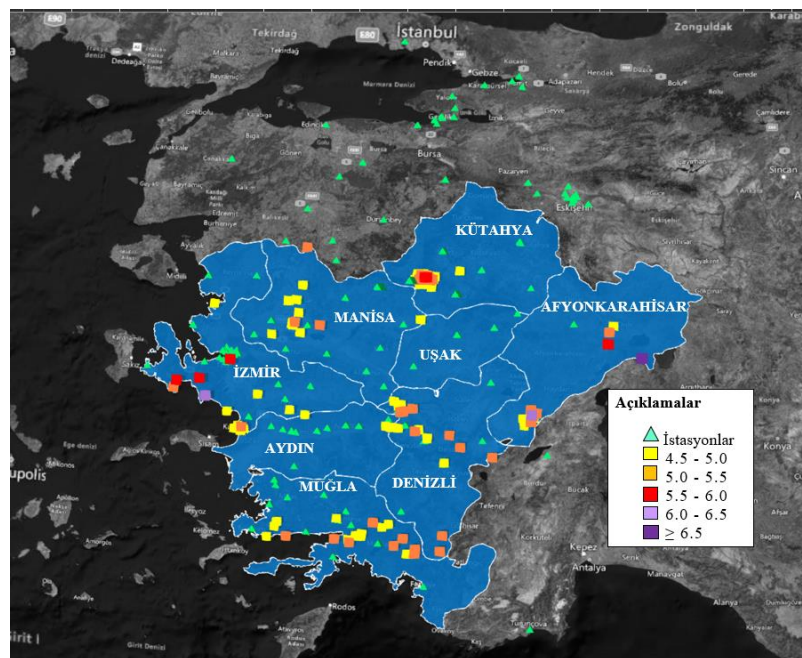
Şekil 4.4'te verilen veri tabanının bu hali ile bir sonraki bölümde anlatılacak olan GEP modellerinde girdi parametresi olarak kullanılması, sonuçlar üzerinde belirsizliklere neden olacağından veri tabanı üzerinde ikinci bir sınırlamanın getirilmesinin daha uygun olacağına karar verilmiştir. Bu amaçla PGA alt sınır değeri olarak 5 gal alınmış ve magnitüd alt sınırı olarak da $M_w \geq 4.5$ seçilmiştir. GEP modellerinde kullanılacak olan çıktı parametresi hem PGA_{maks} hem de PGA_{geo} olarak dikkate alınacağından 5 gal'lik alt sınır iki parametre üzerinde de uygulanmıştır. Bu filtreleme sonucunda nihai veri tabanı elde edilmiştir. Bu nihai veri tabanı, 148 deprem ve bu depremlere ait 463 adet ivme kaydı içermektedir. Nihai veri tabanına ait PGA_{maks} -deprem büyüklüğü ilişkisini gösteren ve filtreleme sınırlarını da gösterir grafik Şekil 4.5'de sunulmuştur.

Şekil 4. 5: Nihai veri tabanındaki PGA_{maks} değerlerinin deprem büyüklüğü ile ilişkisi



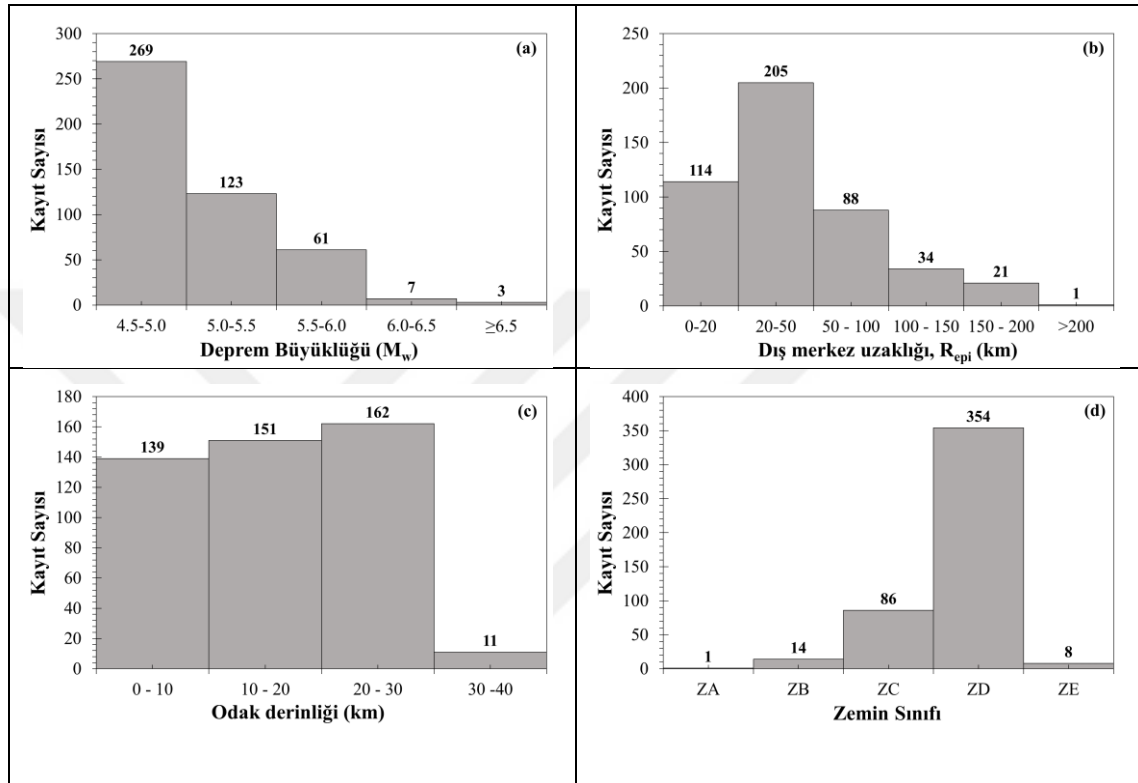
Nihai veri tabanındaki depremlerin dış merkez dağılımları ile kayıtların alındığı istasyonların konumu Şekil 4.6'de verilmektedir. İlgili şekil incelendiğinde Uşak il sınırları içerisinde deprem dış merkezinin olmadığı görülmektedir. Afyonkarahisar il sınırı içerisinde meydana gelen Sultandağı depremi ($M=6.5$), inceleme alanı içerisindeki en büyük depremdir. Şekil 4.6'da gösterilen istasyon lokasyonları değerlendirildiğinde, İzmir ili istasyon sayısı açısından diğer illere göre daha yoğundur. İzmir ilini, Muğla ve Manisa illeri takip etmektedir.

Şekil 4. 6: Depremlerin dış merkez dağılımları ve istasyonların konumu



Güncellenen veri tabanında dikkate alınan kayıt sayılarının deprem büyüklüğü, dış merkez uzaklığı, odak derinliği ve zemin sınıfı esasında sınıflandırması Şekil 4.7’de verilmiştir. Zemin sınıfı kriterinde, (TBDY, 2018)’de önerilen ortalama kayma dalga hızına dayalı yaklaşım benimsenmiştir.

Şekil 4. 7: Veri setindeki kayıtların dağılımı a) Deprem büyüklüğüne göre b) Dış merkez uzaklığına göre c) Odak derinliğine göre d) Zemin sınıfına göre

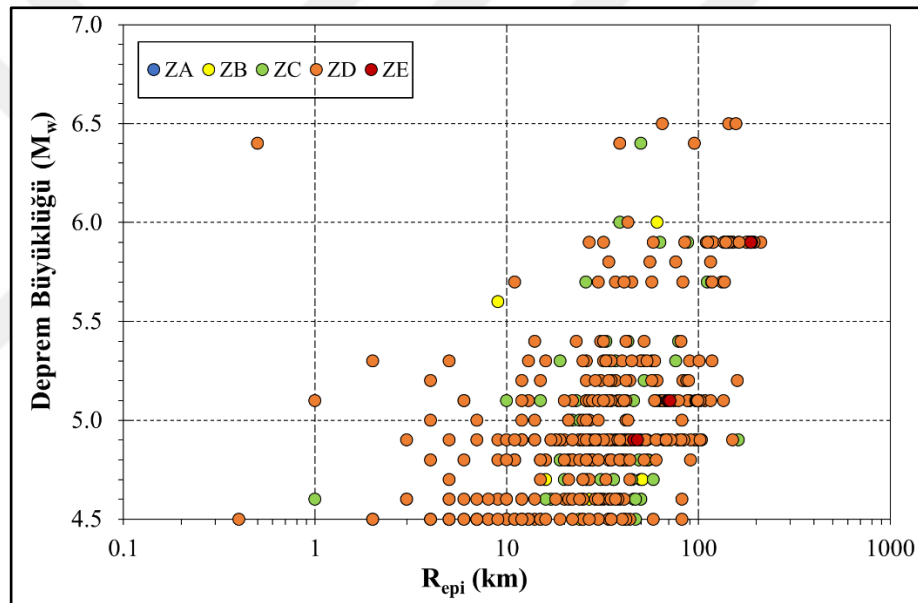


Verilerin büyük bir kısmının 4.5 ile 5.5 arasındaki deprem büyüklüklerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. 6.0’dan büyük depremlere ait kayıtlar ise toplam kayıtların yaklaşık %2.2’sine karşılık gelmektedir. Şekil 4.7b’de sunulan depremin dış merkez uzaklıkları incelendiğinde, en çok kayıt sayısının 20-50 km arasındaki uzaklıklar için gerçekleştiği dikkati çekmektedir. Veri tabanında yakın kaynak olarak sınıflandırılacak $R_{epi} \leq 20$ km uzaklık değerine sahip kayıt sayısı ise toplam kaydın %24.6’sına karşılık gelmektedir. Meydana gelmiş depremlerin odak derinlikleri incelendiğinde ise kayıt sayısının %30’unun 10 km’den daha küçük derinliğe sahip olduğu ve tüm depremlerin sığ deprem sınıfına girdikleri anlaşılmaktadır (Şekil 4.7c). İnceleme alanı içerisindeki ivme kayıtlarının çok büyük bir kısmının ZD zemin sınıfında yer alan istasyonlara ait olduğu görülmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) bu zemin sınıfı için üst 30 m’deki ortalama kayma dalga hızını ($V_{s,30}$) 180-360 m/s olarak tarif etmiştir.

Yönetmelikte çok yumuşak zemin olarak sınıflandırılan ZE sınıfında yer alan istasyon sınıfı ise toplam kaydın %1.7'sini oluşturmaktadır (Şekil 4.7d).

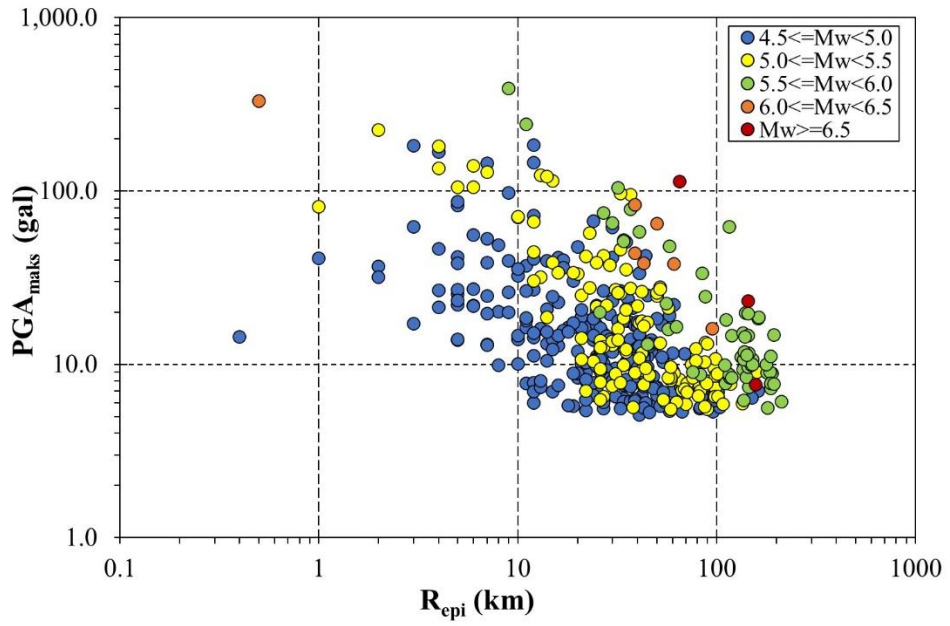
Şekil 4.7'de verilen ve veri tabanındaki kayıt sayısının farklı parametrelere göre dağılımını gösteren grafiklere alternatif olarak Şekil 4.8 hazırlanmıştır. Bu şekilde tüm parametrelerin kayıt sayısı üzerindeki dağılımının daha kolay anlaşılacağı düşünülmüştür. İlgili şekilden de görüldüğü gibi, 4.5 ile 5.5 arasındaki deprem büyüklüğüne sahip, kaynak-saha mesafesi 10-100 km arasında olan ve ZD yerel zemin sınıfındaki istasyonlarda kaydedilmiş veriler baskındır. Bu tespit bir sonraki bölümde açıklanacak GEP modellerinin güvenli kullanılabilir aralığını da görmek açısından da önemli bir sonuç olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4. 8: Farklı parametreler esasında veri tabanının dağılımı



GEP modellerinde kullanılacak olan PGA_{maks} ve PGA_{geo} değerlerinin dış merkez uzaklığına göre dağılımı Şekil 4.9'da sunulmuştur. PGA_{maks} değerleri 5.11 gal ile 391.41 gal arasında değişmektedir. En büyük yer ivmesi değerine sahip kayıt 16 Aralık 1977 İzmir depremine aittir.

Şekil 4. 9: Nihai veri tabanı yer hareketi ivme kayıtlarının deprem dış merkezlik mesafesi (R_{epi}) ve deprem büyüklüğüne (M_w) göre dağılımı



148 deprem ve bu depremlere ait 463 adet ivme kaydından oluşan bu nihai veri setinin bir sonraki bölümde Ege Bölgesi için oluşturulacak yer hareketi tahmin denklemlerinde kullanılmasının uygun olduğu kanaatine varılmıştır.



BEŞİNCİ BÖLÜM
GEN İFADELİ MODELLERİN OLUŞTURULMASI

5.1 GEP MODELLERİNDE KULLANILACAK PARAMETRELERİN SEÇİMİ

Ege Bölgesi'nde Gen İfadeli Programlamaya dayalı yer hareketi tahmin denklemleri için bir önceki bölümde detaylı olarak açıklanan 148 adet deprem ve bu depremlere ait 463 ivme kaydı kullanılmıştır. Oluşturulacak GEP modellerinin başarısı maksimum yer ivmesi değerini etkileyen bağımsız değişkenlerin seçimiyle son derece ilgilidir. Bu kompleks ivme değeri üzerinde etkili olan çok sayıda parametre literatürde ifade edilmiştir. Ancak bu çalışma kapsamında ortaya konacak yer hareketi tahmin modellerinin konu ile ilgili profesyoneller tarafından çok hızlı ve basit bir şekilde kullanılabilir olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Bu sebeple, bir deprem sonrası kolayca erişebilen deprem büyüklüğü (M_w), deprem dış merkez uzaklığı (R_{epi}) ve üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızı ($V_{s,30}$) değerlerinin girdi parametresi olarak kullanımına karar verilmiştir. Ancak özellikle kullanılan veri tabanındaki istasyonların çok büyük bir kısmında $V_{s,30}$ değerleri 180-360 m/s arasında değiştiğinden, bu baskın zemin durumunun etkisini daha iyi görebilmek için bu parametrenin dahil edildiği ve hariç tutulduğu modeller oluşturulmuştur. Çıktı parametresi olarak ise, yatay ivme bileşenlerinden büyük olan (PGA_{maks}) ve yatay iki bileşenin geometrik ortalaması (PGA_{geo}) değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Tüm bunlar dikkate alınarak, GeneXproTools yazılımı kullanılarak dört ayrı GEP tabanlı yer hareketi tahmin modeli geliştirilmiştir (Tablo 5.1).

Tablo 5. 1: GEP modelleri için girdi ve çıktı parametreleri

Model No	Girdi Parametresi	Çıktı Parametresi
Model-1	M_w, R_{epi}	PGA_{maks}
Model-2	$M_w, R_{epi}, V_{s,30}$	PGA_{maks}
Model-3	M_w, R_{epi}	PGA_{geo}
Model-4	$M_w, R_{epi}, V_{s,30}$	PGA_{geo}

GEP modeli oluşturulurken Sarıdemir ve Severcan (2016) tarafından belirtilen beş temel adımdan faydalanılmıştır. Bu çalışmada ilk adım olarak uygunluk fonksiyonu belirlenmiştir. Uygunluk fonksiyonu olarak tahmin hatalarının karelerinin ortalamasının karekökü (Root Mean Square Error) yani RMSE seçilmiştir. İkinci adım olarak fonksiyon seti, baş büyüklüğü, kromozom ve gen sayıları ve bağlantı fonksiyonu belirlenmiştir. Bağlantı fonksiyonu olarak tüm modellerde aynı fonksiyon kullanılmıştır. En iyi sonuç alınan GEP modellerine erişmek için tekrarlı denemeler yapılmıştır. Sonrasında bulunan modeller eğitilmiş ve test edilmiştir. Geliştirilen bu modellerin baş boyutu ve kromozom

sayısı gibi model parametreleri birçok denemeden sonra elde edilmiş ve Tablo 5.2'de sunulmuştur. Ayrıca çeşitli operatörler ve matematiksel fonksiyonlarda bu tabloda yer almaktadır. Mutasyon, fonksiyon ekleme, geri çevirme, gen yer değiştirme ve gen yeniden birleştirme gibi genetik operatörlerin oranları otomatik olarak seçilmiştir. Model-1'de gen sayısı 3 iken diğer modellerde ise gen sayısı 4'tür. Ancak kromozom sayısı ve baş büyüklüğü tüm modellerde sırasıyla 40 ve 8'dir. Bağlama fonksiyonu olarak çarpma fonksiyonu kullanılmıştır. Modellerde kullanılan parametreler değişkenlik göstermektedir.

Tablo 5. 2: Modellerde kullanılan GEP parametreleri

Parametre Tanımlama	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4
Fonksiyon Seti	+, -, *, /, Sqrt, Ln, Exp, Inv, Cos	+, -, *, /, Sqrt, Ln, Exp, Inv, Cos	+, -, *, /, Sqrt, Ln, Exp, Inv, Cos	+, -, *, /, Sqrt, Ln, Exp, Inv, Cos, Tan, Cot
Uygunluk Fonksiyonu	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
Gen Sayısı	3	4	4	4
Kromozom Sayısı	40	40	40	40
Baş Büyüklüğü	8	8	8	8
Bağlantı Fonksiyonu	Çarpma	Çarpma	Çarpma	Çarpma
Mutasyon	0.00138	0.00138	0.00138	0.00138
Fonksiyon Ekleme	0.00206	0.00206	0.00206	0.00206
Geri Çevirme	0.00546	0.00546	0.00546	0.00546
Bir Noktada Birleştirme	0.00277	0.00277	0.00277	0.00277
İki Noktada Birleştirme	0.00277	0.00277	0.00277	0.00277
Gen Yeniden Birleştirme	0.00277	0.00277	0.00277	0.00277
Gen Yer Değiştirme	0.00277	0.00277	0.00277	0.00277
Kromozom Rastgeleliği	0.00260	0.00260	0.00260	0.00260

Veri sayısı eğitim ve test setleri için sırasıyla 347 ve 116'dır. Eğitim ve test verileri ile tüm veriler için girdi ve çıktı değişkenlerinin maksimum, minimum, ortalama ve standart sapma değerleri sırasıyla Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5. 3: Eğitim ve test setlerindeki girdi ve çıktı parametrelerinin sınır değerleri

Değişken Tipi	EĞİTİM SETİ				TEST SETİ				
	Maks.	Min.	Std. Sap.	Ortalama	Maks.	Min.	Std. Sap.	Ortalama	
R_{epi} (km)	195.00	1.00	42.29	46.52	212.00	0.50	44.52	52.23	
GİRDİ $V_{s,30}$ (m/s)	1602.00	131.00	193.65	354.37	948.00	131.00	120.13	329.59	
M_w	6.50	4.50	0.44	5.00	6.50	4.50	0.47	5.12	
ÇIKTI	PGA_{maks} (gal)	0.40	0.01	0.04	0.02	0.34	0.01	0.04	0.03
	PGA_{geo} (gal)	0.23	0.01	0.03	0.02	0.31	0.01	0.04	0.02

Tablo 5. 4: Tüm veri setindeki girdi ve çıktı parametrelerinin sınır değerleri

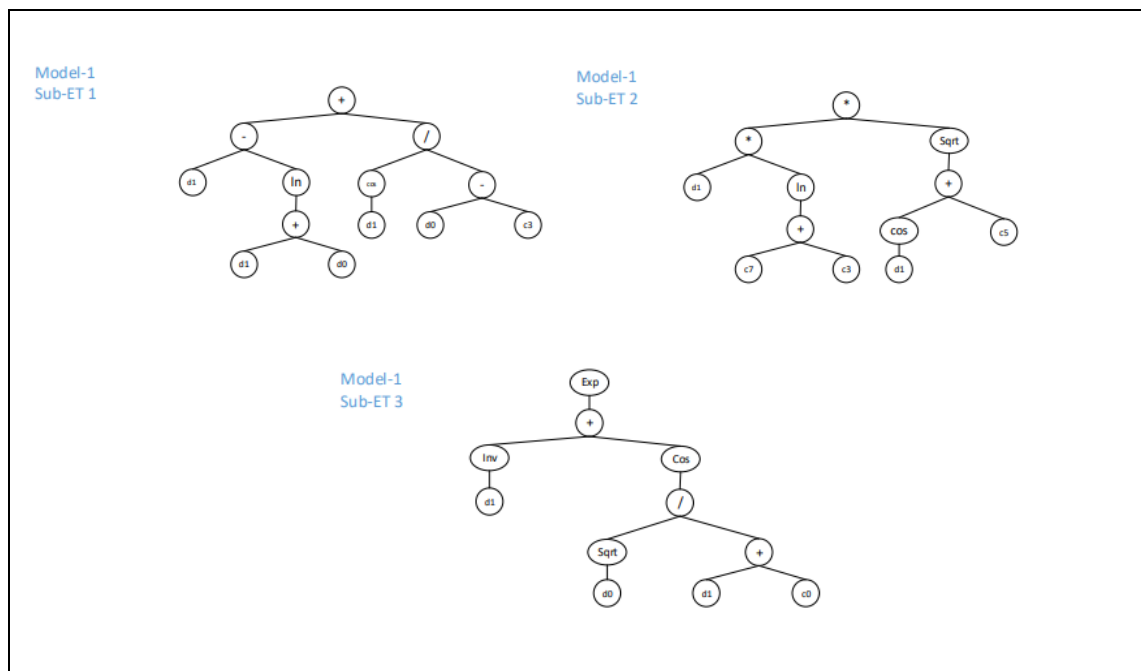
TÜM VERİ SETİ					
Değişken Tipi	Maks.	Min.	Std. Sap.	Ortalama	
GİRĐİ	R_{epi} (km)	212.00	0.50	42.92	48.05
	$V_{s,30}$ (m/s)	1602.00	131.00	178.51	348.50
	M_w	6.50	4.50	0.45	5.03
ÇIKTI	$PGA_{maks.}$ (gal)	0.40	0.01	0.04	0.02
	PGA_{geo} (gal)	0.31	0.01	0.03	0.02

5.2 OLUŞTURULAN GEP MODELLERİ

5.2.1 Model-1

Model-1’de tahmin denklemini geliştirmek üzere dış merkez uzaklığı (R_{epi}), moment magnitüdü (M_w) değerleri ile en büyük yer ivmesi (PGA_{maks}) arasındaki ilişki incelenmiştir. Modelin ifade ağacı Şekil 5.1’de sunulmakta olup üç alt ağaçtan (ET) oluşmaktadır. Çarpma işlemi alt ET’ler için bağlantı işlevi olarak kullanılmıştır. Burada d_0 ile R_{epi} değeri; d_1 ile M_w değeri ifade edilmektedir. Modelde kullanılan alt ağaçlardaki sabitler Tablo 5.5’te verilmiş olup, elde edilen açık tahmin denklemi ise Eşitlik 5.1’de verilmiştir. İlgili eşitlikte y değeri; gal cinsinden PGA_{maks} değerini göstermektedir.

Şekil 5. 1: Model-1 için elde edilen ifade ağaçları



Tablo 5. 5: Model-1 için sabitler

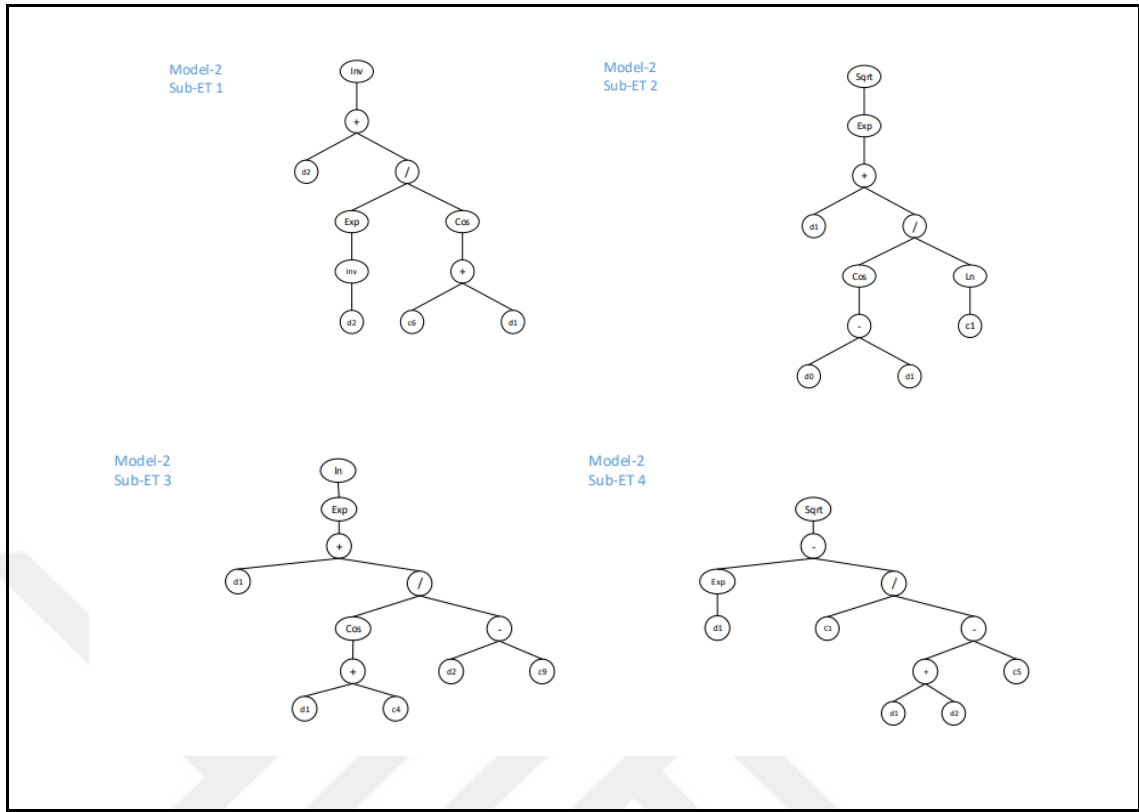
Sabitler	Model-1		
	ET-1	ET-2	ET-3
C0			-2.057
C1			
C3	8.841	17.582	
C4			
C5		0.330	
C6			
C7		21.098	
C8			
C9			

$$y = \left[(d1 - \ln(d1) + d0) + \left(\frac{\cos(d1)}{d0 - G1C3} \right) \right] \times \left[(d1 \times \ln(G2C7 + G2C3)) \times \sqrt{\cos(d1) + G2C5} \right] \times \left[e^{\left(\frac{1}{d1} \right) + \cos\left(\frac{\sqrt{d0}}{d1 + G3C0} \right)} \right] \quad (5.1)$$

5.2.2 Model-2

Oluşturulan bu modelde Model-1'den farklı olarak ayrıca üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızı ($V_{s,30}$) değeri de girdi parametresi olarak dikkate alınmıştır. Modelin ifade ağacı Şekil 5.2'de sunulmaktadır. Modelde dört alt ifade ağacı (ET) bulunmaktadır. Burada $d0$; üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızını ($V_{s,30}$), $d1$ moment deprem büyüklüğünü (M_w); $d2$ ise deprem dış merkez uzaklığını (R_{epi}) ifade etmektedir. Modelde kullanılan alt ağaçlardaki sabitler Tablo 5.6'da gösterilmiş olup, elde edilen açık tahmin denklemi ise Eşitlik 5.2'de verilmiştir. İlgili eşitlikte y değeri; PGA_{maks} (gal) değerini göstermektedir.

Şekil 5. 2: Model-2 için elde edilen ifade ağaçları



Tablo 5. 6: Model-2 için sabitler

Sabitler	Model-2			
	ET-1	ET-2	ET-3	ET-4
C0				
C1		6.711		4.167
C3				
C4			0.032	
C5				16.906
C6	-5.907			
C7				
C8				
C9			8.894	

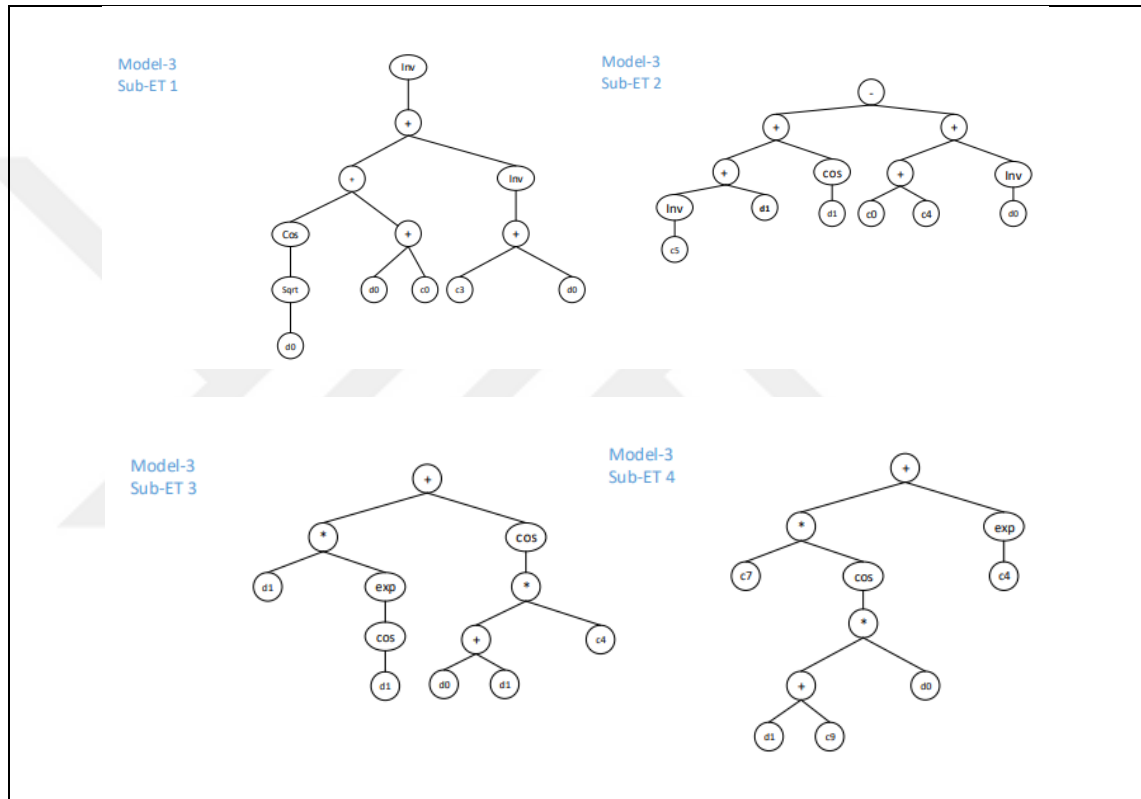
$$y = \left(d2 + \left(\frac{1}{e^{d2}} \right) \right)^{-1} \times \left[\sqrt{e^{\left(d1 + \left(\frac{\text{Cos}(d0 - d1)}{\text{Ln}(G2C1)} \right) \right)}} \right] \quad (5.2)$$

$$\times \left[d1 + \left(\frac{\text{Cos}(d1 + G3C4)}{d2 - G3C9} \right) \right] \times \left[\sqrt{e^{d1 - \left(\frac{G4C1}{d1 + d2 - G4C5} \right)}} \right]$$

5.2.3 Model-3

Girdi parametresi olarak moment magnitudü (M_w) ile dış merkez uzaklığı (R_{epi}) parametrelerinin alındığı bu modelde Model-1'den farklı olarak çıktı parametresi olarak PGA_{geo} dikkate alınmıştır. 4 alt ağaçtan (ET)'den oluşan modelin alt ifade ağacı Şekil 5.3'te verilmiştir. Bu modelde, d_0 ; R_{epi} parametresini, d_1 ise M_w parametresini ifade etmektedir.

Şekil 5. 3: Model-3 için elde edilen ifade ağaçları



Model-3'e ait açık tahmin denklemi Eşitlik 5.3'de, eşitlikte adı geçen diğer sabitler ise Tablo 5.7'de verilmiştir. Eşitlikteki y , gal cinsinden PGA_{geo} değerini göstermektedir.

$$\left[\frac{1}{\left(\cos(\sqrt{d_0}) + d_0 + G1C0 + \frac{1}{G1C3 + d_0} \right)} \right] \times \left[\left(\frac{1}{G2C5} + d_1 + \cos(d_1) \right) - \left((G2C0 + G2C4) + \frac{1}{d_0} \right) \right] \quad (5.3)$$

$$\times \left[(d_1 \times e^{\cos(d_1)}) + \cos((d_0 + d_1) \times G3C4) \right] \times \left[(G4C7 \times \cos((d_1 + G4C9) \times d_0)) + e^{G4C4} \right]$$

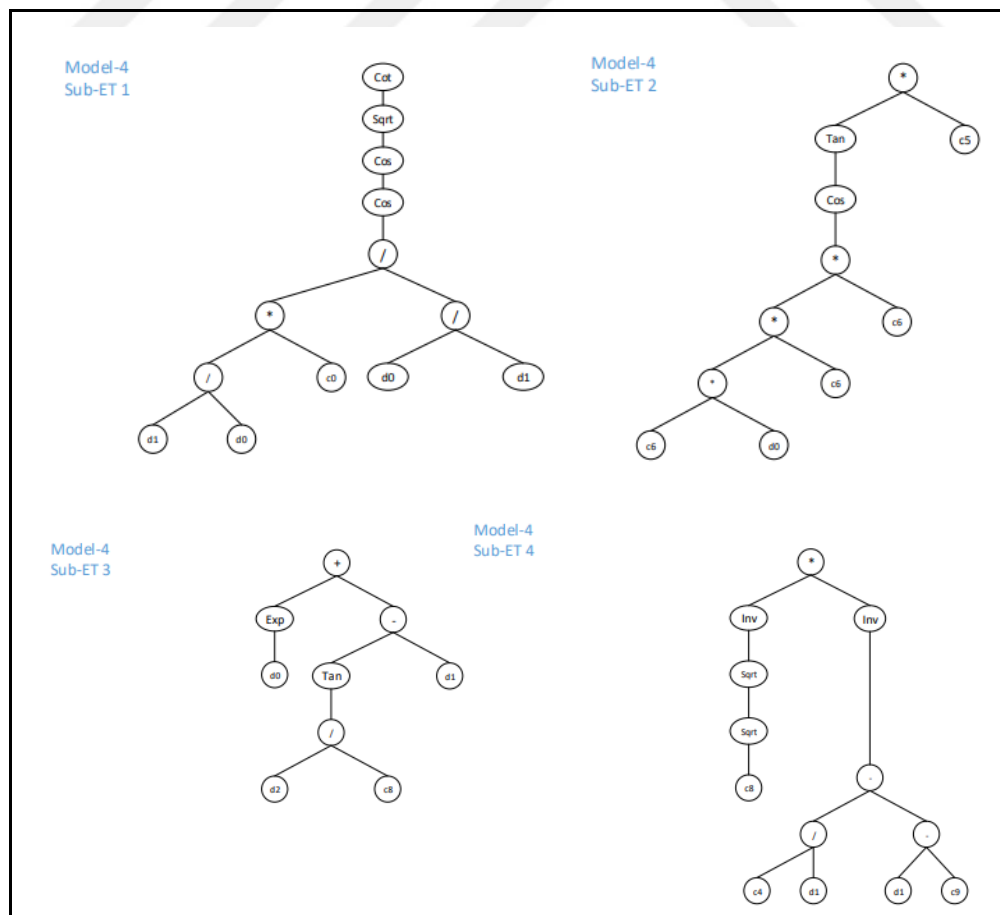
Tablo 5. 7: Model-3 için sabitler

Sabitler	Model-3			
	ET-1	ET-2	ET-3	ET-4
C0	1.179	-1.758		
C1				
C3	-0.113			
C4		4.260	7.821	3.506
C5		-4.329		
C6				
C7				8.532
C8				
C9				-3.403

5.2.4 Model-4

Son modelde ise Model-2'deki aynı girdi parametreleri kullanılmış, çıktı parametresi olarak ise pik yer ivmesinin her iki bileşeninin geometrik ortalaması (PGA_{geo}) dikkate alınmıştır. Modelin ifade ağacı Şekil 5.4'te verilmiş olup dört alt ifade ağacından (ET) oluşmaktadır.

Şekil 5. 4: Model-4 için elde edilen ifade ağaçları



Burada, d_0 ile M_w , d_1 ile R_{epi} ve d_2 ile $V_{s,30}$ değişkenleri ifade edilmektedir. Modelde kullanılan alt ağaçlardaki sabitler Tablo 5.8’de verilmiş olup, elde edilen açık tahmin denklemi ise Eşitlik 5.4’te sunulmuştur. İlgili eşitlikte y değeri; gal cinsinden PGA_{geo} değerini göstermektedir.

Tablo 5. 8: Model-4 için sabitler

Sabitler	Model-4			
	ET-1	ET-2	ET-3	ET-4
C0	8.420			
C1				
C3				
C4				-10.212
C5		9.385		
C6		-0.766		
C7				
C8			4.226	7.779
C9				2.676

$$\begin{aligned}
 y = & \text{Cot} \left(\sqrt{\text{Cos} \left(\text{Cos} \left(\frac{d_1 \times G1C0}{d_0} \right) \right)} \right) \times [\text{Tan}(\text{Cos}(G2C6 \times d_0 \times G2C6 \times G2C6) \times G2C5)] \\
 & \times \left[e^{d_0} + \text{Tan} \left(\frac{d_2}{G3C8} \right) - d_1 \right] \times \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\sqrt{G4C8}}} \right) \times \left(\frac{1}{\frac{G4C4}{d_1} - d_1 - G4C9} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{5.4}$$



ALTINCI BÖLÜM
GELİŞTİRİLEN YER HAREKETİ TAHMİN MODELLERİNİN
PERFORMANSI

5.1 KULLANILAN PERFORMANS TESTLERİ

Çalışma kapsamında hazırlanmış olan GEP modellerinin performansının değerlendirilmesinin tek bir parametre üzerinden değil farklı istatistiksel ölçütler üzerinden yapılması tercih edilmiştir. Bu amaçla, belirlilik katsayısı (R^2), karesel ortalamanın karekökü (RMSE) ve hatanın mutlak ortalaması (MAE) kullanılmıştır. Bu üç performans başarı ölçütü birlikte değerlendirildiğinde yüksek R^2 , düşük RMSE ve MAE değeri veren modelin göreceli olarak diğer modellerden iyi olduğu söylenebilir.

Belirlilik Katsayısı (R^2); bağımsız değişkenler kullanılarak bağımlı bir değişkenin davranışını açıklamadaki uygunluğunu veren istatistiki bir ölçüdür. R^2 değerinin büyük olduğu model tercih sebebidir. Ancak R^2 değeri modele eklenen her ilave bağımsız değişkenle de artış göstereceğinden farklı değişken sayılarına sahip modellerle karşılaştırmada tek başına kullanılması uygun olmamaktadır. Bu ölçütün hesabına ilişkin yaklaşım Eşitlik 6.1’de verilmiştir. Eşitlikte yer alan “ y_i ” ve “ \hat{y}_i ” ifadesi sırasıyla gerçek değer ile tahmin değerini gösterirken, \bar{y}_i ifadesi ise gerçek değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6.1)$$

Karesel Ortalamanın Karekökü (RMSE) ise Eşitlik 6.2 yardımı ile hesaplanmaktadır. İlgili eşitlikteki “ y_i ” ve “ \hat{y}_i ” ifadesi sırasıyla gerçek değer ile tahmin değerini ifade etmektedir. Hem Eşitlik 6.1 hem de Eşitlik 6.2’de yer alan “ n ” ifadesi veri sayısını göstermektedir. Modeller arası karşılaştırmada RMSE değeri küçük olan model tercih sebebidir. Modele eklenen değişken sayısının artması ile RMSE değeri de düşecektir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6.2)$$

Hatanın Mutlak Ortalaması (MAE); modelin tahmin ettiği değer (y_i) ile gerçek değer (\hat{y}_i) arasındaki farkı ifade etmekte olup Eşitlik 6.3’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6.3)$$

5.2 GEP TABANLI MODELLERİN BAŞARI DEĞERLENDİRMESİ

Bu üç istatistiksel başarı ölçütü ile sadece GEP modelleri içerisindeki en iyi modeller saptanmamıştır. Ayrıca GEP tabanlı bu modellerin başarısı literatürde yer alan bazı yer hareketi tahmin denklemleri ile de karşılaştırılarak test edilmiştir. Bu amaçla karşılaştırmalar için Kalkan ve Gülkan (2004), Ulusay vd. (2004), Özbey vd. (2004) ve Akkar ve Çağnan (2010) denklemlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu dört denklemin genel özellikleri Tablo 6.1'e sunulmuştur.

Tablo 6. 1: Karşılaştırma için kullanılacak yer hareketi tahmin denklemlerinin genel özellikleri

Tahmin Denklemi*	Deprem Sayısı	Kayıt Sayısı	Magnitüd Türü	M_{min}	M_{maks}	Uzaklık ölçütü	R_{min}	R_{maks}	İvme Bileşeni
KG04	54	112	M_w	4.0	7.4	R_{JB}/R_{epi}	1.2	250.0	PGA_{maks}
U04	122	221	M_w	4.1	7.5	R_{epi}	5.1	99.7	PGA_{maks}
O04	17	195	M_w	5.0	7.4	R_{JB}	5.0	300.0	PGA_{geo}
AC10	137	433	M_w	5.0	7.6	R_{JB}	0.0	200.0	PGA_{geo}

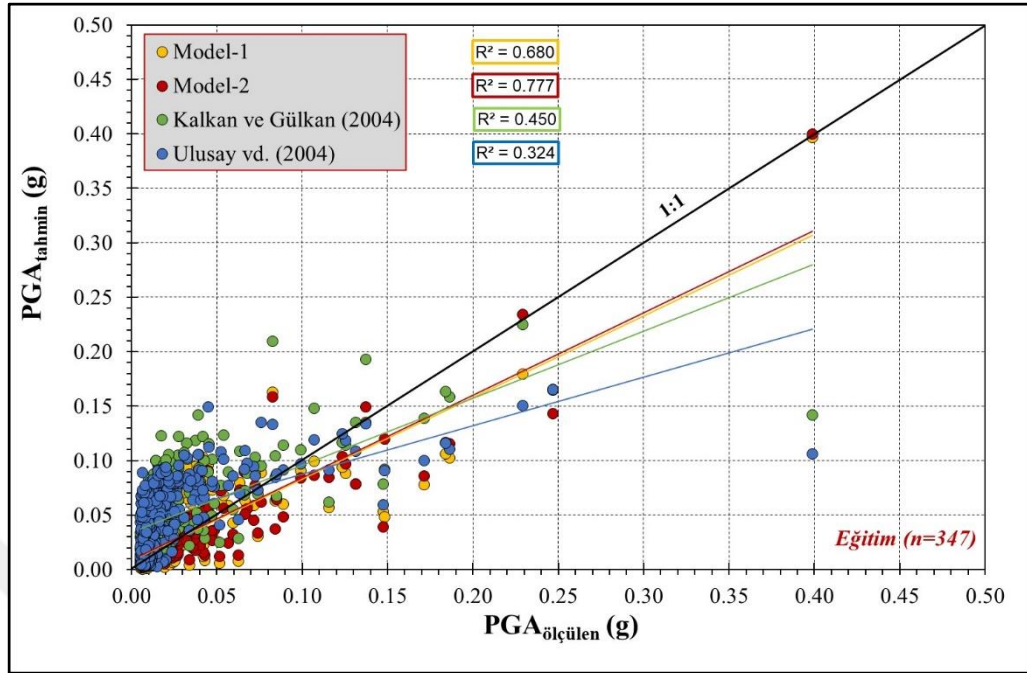
* KG04: Kalkan ve Gülkan (2004)
O04: Özbey vd. (2004)

U04: Ulusay vd. (2004)
AC10: Akkar ve Çağnan (2010)

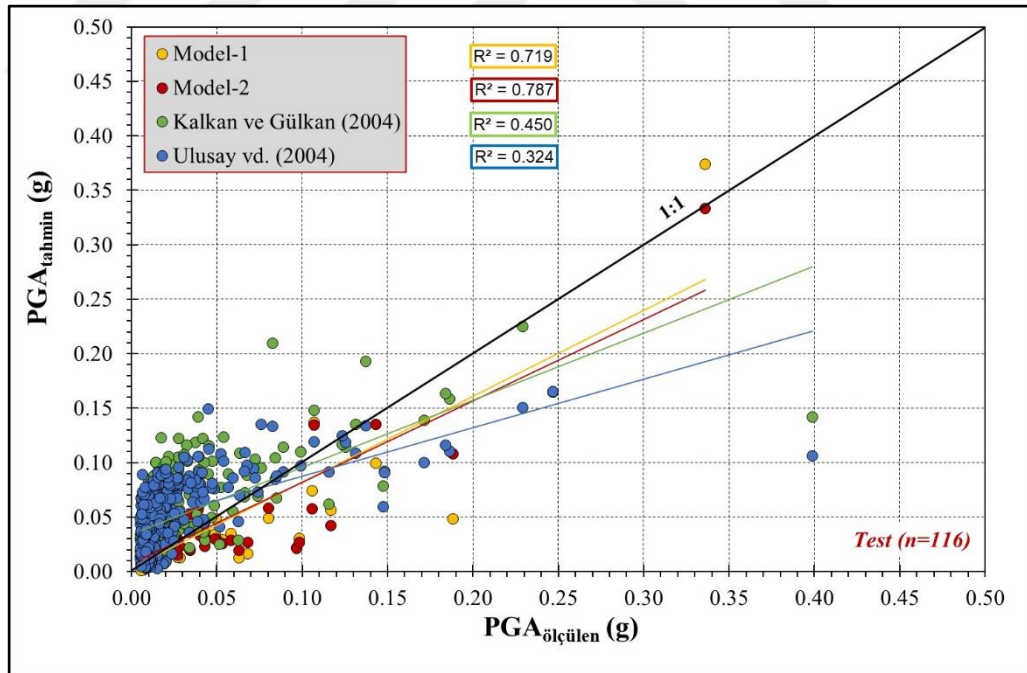
GEP tabanlı Model-1 ve Model-2'ye ait eğitim verisi, test verisi ve tüm veriler üzerinde yapılan değerlendirme sonrasında ölçülen ve tahmin edilen PGA_{maks} değerleri arasındaki ilişkiler sırasıyla aşağıdaki şekillerde sunulmuştur (Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3). Bu şekiller üzerinde KG04 ve U04 yer hareketi tahmin denklemlerinin performansları da R^2 ölçütü üzerinden değerlendirilmiştir. Benzer şekilde Model-3 ve Model-4 için ölçülen ve tahmin edilen PGA_{geo} değerlerinin değişimi eğitim, test ve tüm veri setleri üzerinde değerlendirilmiştir. Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da verilen bu değişimlere ait grafikler üzerinde O04 ve AC10 yer hareketi tahmin denklemlerinin performansları da gösterilmiştir. Grafikler üzerinde R^2 değerleri de gösterilmiştir.

Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilen gerçek ve tahmin değerlerinin değişimi R^2 ölçütü üzerinden birlikte değerlendirildiğinde, Model-2 ile elde edilen tahmin denklemleri Model-1'e göre daha başarılı bulunmuştur. İki model arasındaki en önemli fark Model-2'de ayrıca üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızının ($V_{s,30}$) da dikkate alınmış olmasıdır. Bunun dışında hem Model-1 hem de Model-2'ye ait R^2 değerleri KG04 ve U04 tahmin denklemlerine ait R^2 değerlerinden daha yüksektir.

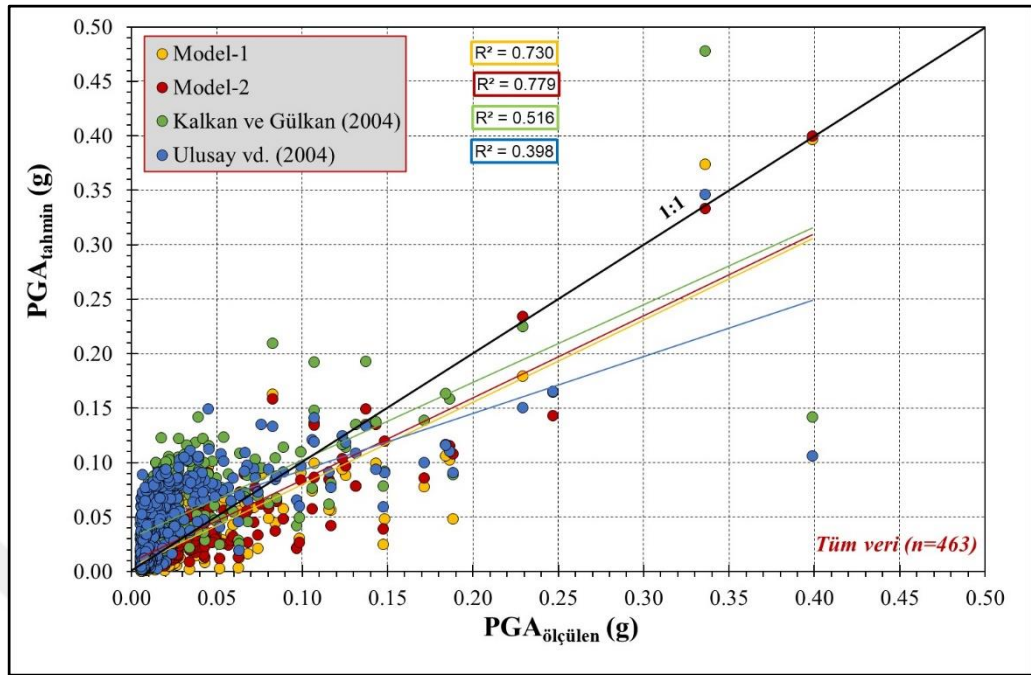
Şekil 6. 1: Model-1 ve Model-2 eğitim verisi ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi



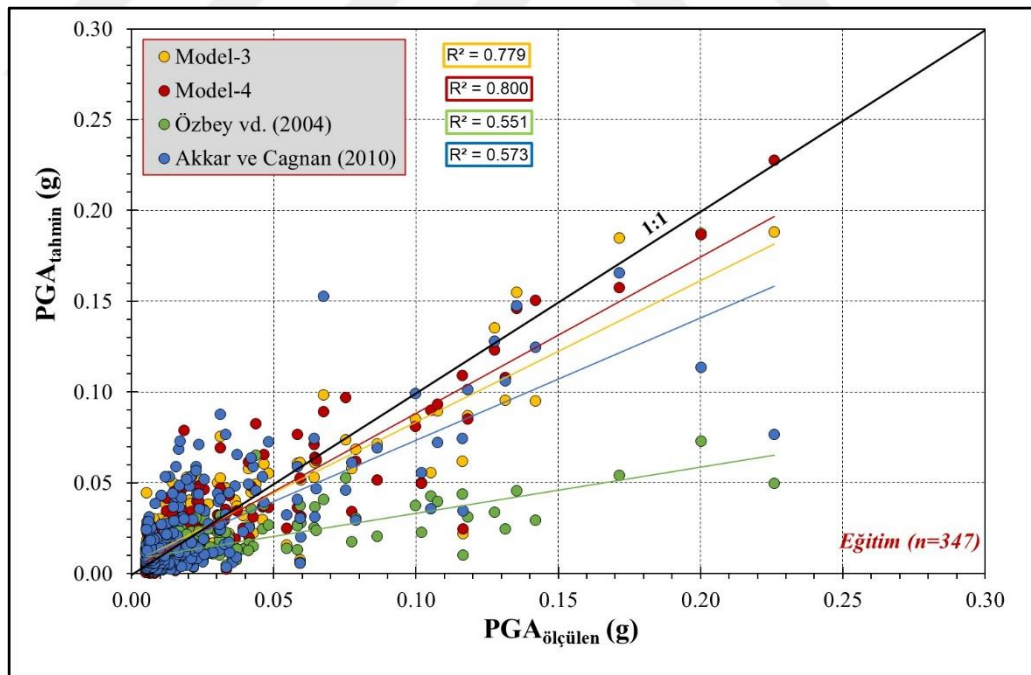
Şekil 6. 2: Model-1 ve Model-2 test verisi ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi



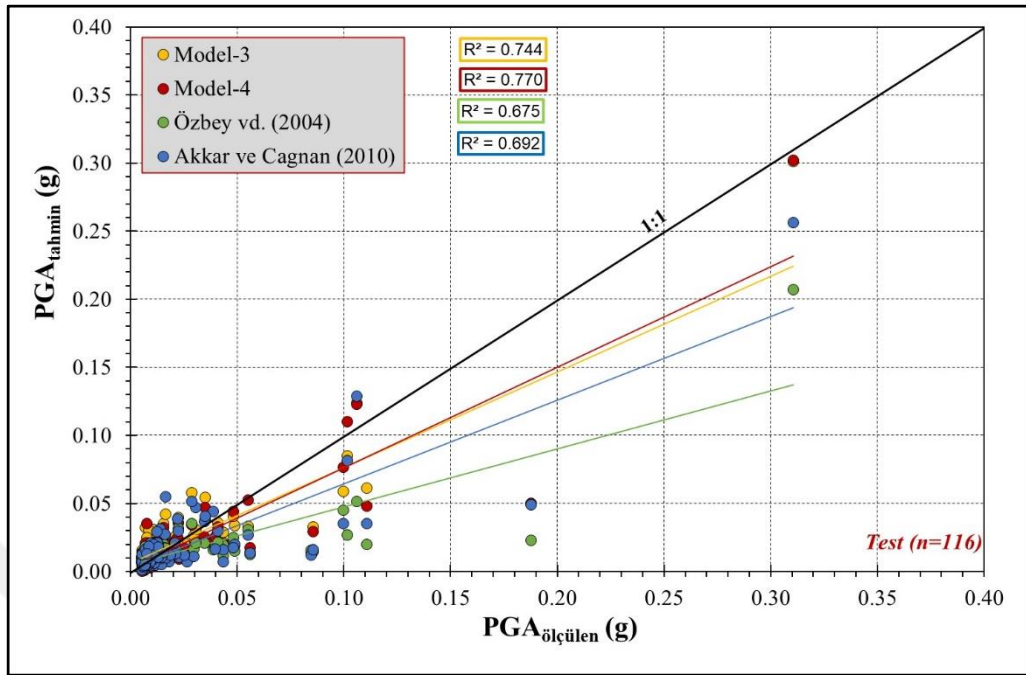
Şekil 6. 3: Model-1 ve Model-2 tüm veriler için ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi



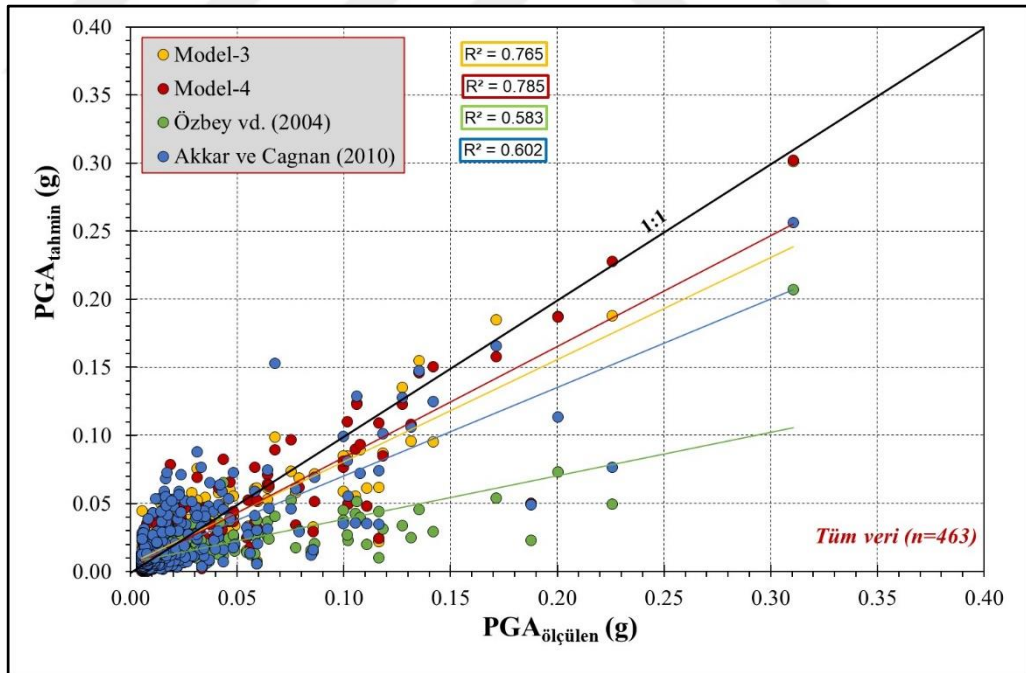
Şekil 6. 4: Model-3 ve Model-4 eğitim verisi ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi



Şekil 6. 5: Model-3 ve Model-4 test verisi ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi



Şekil 6. 6: Model-3 ve Model-4 tüm veriler için ölçülen ve tahmin edilen ivme değerlerinin değişimi



Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 incelendiğinde, en başarılı tahminin Model-4 ile elde edildiği anlaşılmaktadır. R² değerlerine göre, Model-3, AC10 ve O04 tahmin denklemleri Model-4'ü izlemektedir. Tüm bu gözlemler, eğitim, test ve tüm veri seti üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilmiştir.

GEP tabanlı modellerin en büyük yer ivmesi değerlerini tahminindeki başarısını ölçmek için sadece R^2 ölçütü değil RMSE ve MAE ölçütleri de kullanılmıştır. Tüm modellerin ve karşılaştırma için kullanılan yer hareketi tahmin denklemlerinin performansını gösteren sonuçlar Tablo 6.2’de sunulmuştur.

Tablo 6. 2: GEP modelleri ve karşılaştırma için seçilen yer hareketi tahmin denklemlerinin performansı

	Eğitim Seti			Test Seti			Tüm Veri Seti		
	R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE
Model-1	0.730	0.020	0.012	0.734	0.022	0.012	0.730	0.020	0.012
Model-2	0.777	0.018	0.011	0.787	0.019	0.012	0.779	0.018	0.011
Model-3	0.779	0.013	0.008	0.744	0.019	0.010	0.765	0.015	0.009
Model-4	0.800	0.013	0.008	0.770	0.019	0.009	0.785	0.015	0.008
KG04	0.450	0.039	0.029	0.685	0.034	0.027	0.516	0.038	0.029
U04	0.324	0.043	0.035	0.588	0.039	0.033	0.398	0.042	0.035
O04	0.551	0.023	0.011	0.675	0.026	0.011	0.583	0.024	0.011
AC10	0.573	0.019	0.011	0.692	0.022	0.011	0.602	0.020	0.011

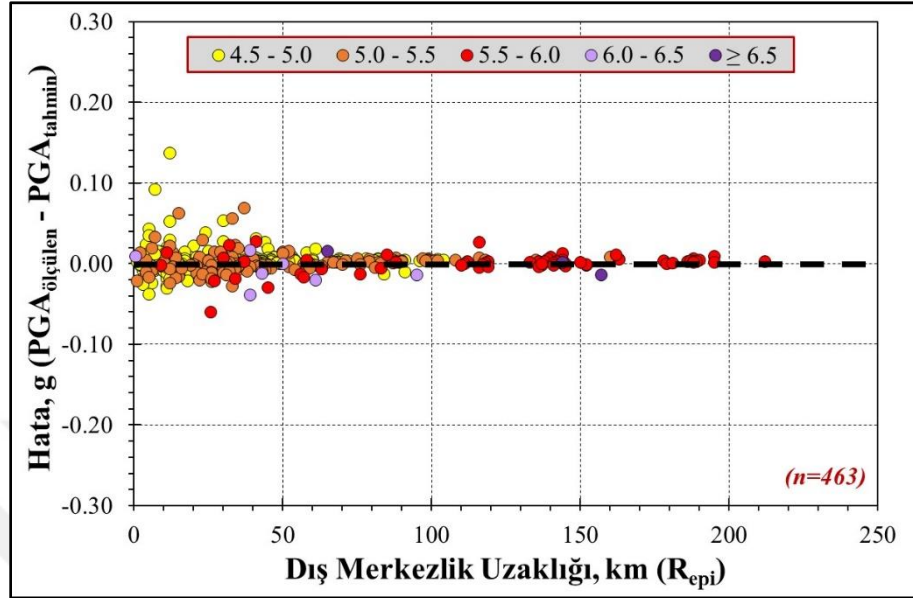
Tablo 6.2’de verilen üç farklı başarı ölçütü birlikte değerlendirildiğinde, 347 adet veriye sahip eğitim seti içerisinde en başarılı modelin Model-4 olduğu ve bu modeli Model-3’ün takip ettiği anlaşılmaktadır. 116 veriden oluşan test seti kullanılarak yapılan analizlerde ise tüm başarı ölçütleri açısından tek bir en iyi tahmin modelinin söylenemeyeceği gözükmemektedir. R^2 açısından en başarılı model Model-2 iken hem RMSE hem MAE açısından en başarılı modelin Model-4 olduğu açıktır. Aynı tabloda tüm veri seti için performans değerlendirmesi yapıldığında en başarılı modelin Model-4 olduğu anlaşılmaktadır.

Regresyona dayalı olarak üretilen ve bu tez kapsamında performansı incelenen dört yer hareketi tahmin denklemi için de bazı önemli sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 6.2’deki üç farklı istatistikî başarı ölçütü incelendiğinde, en iyi tahmini yapandan en kötüye doğru yapılacak sıralamanın AC10, O04, KG04 ve U04 olduğu anlaşılmaktadır. Ege Bölgesi için üretilen GEP tabanlı tüm modeller bu dört yer hareketi tahmin denkleminin göre daha iyi performans göstermektedir.

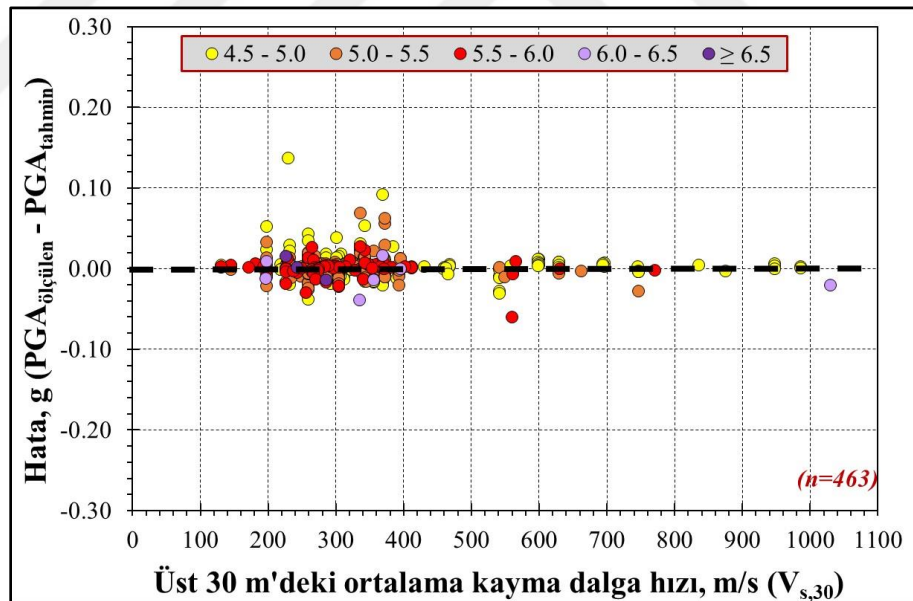
Modeller üzerinde yapılan genel değerlendirmelerde Model-4’e ait tahmin denkleminin daha başarılı sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Bu model kullanılarak hesaplanan tahmin ivme değerleri ile ölçülen ivme değerleri arasındaki fark değerlerinin,

deprem magnitüdü, dış merkez uzaklığı ve üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızına olan bağımlılığını görebilmek için aşağıda verilen Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 hazırlanmıştır.

Şekil 6. 7: Kaynak-saha mesafesine göre hata değerlerinin değişimi (Model-4)



Şekil 6. 8: $V_{s,30}$ parametresine göre hata değerlerinin değişimi (Model-4)



Model-4 için elde edilen yukarıda verilen hata değerlerinin değişimi grafikleri incelendiğinde, dış merkez uzaklıklarının 0-50 km arasında olduğu durum için, modele dayalı ivme değerleri ile ölçülen ivme değerleri arasında negatif ve pozitif yönde farklılıklar olduğu gözükmemektedir. $M=5.5-6.0$ ve $R_{epi}>100$ km ile $M=5.0-5.5$ ve $R_{epi}>50$ km durumları için hata değerlerinin göreceli olarak küçük çıktığı gözlenmektedir. Benzer değerlendirmeler kayma dalga hızları üzerinden yapıldığında, deprem magnitüdünden

bağımsız olarak $V_{s,30} > 400$ m/s için hata değerleri diğer kayma dalga hızına sahip kayıtlar için göreceli olarak daha küçük olup hatanın 0 olduğu çizginin etrafında yoğunlaşmaktadır. Hatanın nispeten pozitif ve negatif yönde saçılım gösterdiği verilere ait ortalama kayma dalga hızı aralığı ise 200 ile 400 m/s arasındadır. Özellikle bu saçılımın görüldüğü hız aralığında 4.5 ile 5.0 arasındaki magnitüde değerlerine sahip verilerin baskın olduğu gözükmemektedir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında Ege Bölgesi kara sınırları içerisinde yer alan 1976 ile 2017 yılları arasını kapsayan 148 depreme ait 463 ivme kaydı ($PGA \geq 5$ gal) Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı'ndaki veri tabanından elde edilmiştir (<https://tadas.afad.gov.tr>). Dikkate alınan kayıtlardaki minimum ve maksimum deprem büyüklüğü sırasıyla 4.0 ve 6.5 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu veri seti kullanılarak dört ayrı GEP tabanlı yer hareketi tahmin modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerde M_w , R_{epi} ve $V_{s,30}$ değerleri girdi parametreleri olarak dikkate alınmıştır. Çıktı parametresi olarak ise, yatay ivme bileşenlerinden büyük olan (PGA_{maks}) ve yatay iki bileşenin geometrik ortalaması (PGA_{geo}) değerlerinin ayrı ayrı kullanılmasına karar verilmiştir. Model-1 ve Model-3 üst 30 metredeki ortalama kayma dalga hızını ($V_{s,30}$) girdi parametresi olarak kullanmayan iki modeldir. Model-1 ve Model-2 denklemleri PGA_{maks} değerini, Model-3 ve Model-4 ise PGA_{geo} değerini tahmin etmektedir.

Oluşturulan bu modellerin performansı R^2 , RMSE ve MAE başarı ölçütleri açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca oluşturulan bu modellerin tahmin başarısı literatürde yer alan dört ayrı yer hareketi tahmin denklemi ile de karşılaştırılmıştır (Kalkan ve Gülkan (2004); Ulusay vd. (2004), Özbey vd. (2004) ve Akkar ve Çagnan (2010)).

Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir. Ulaşılan sonuçların, çalışma alanı olarak seçilen Ege Bölgesinde meydana gelen $PGA \geq 5$ gal'lik ivmelere neden olan depremler ($M \geq 4.5$) için elde edildiği özellikle belirtilmelidir.

- Uygulamanın aksine modellerin performansının sadece R^2 üzerinden değerlendirmenin yeterli olamayacağını göstermesi açısından elde edilen sonuçlar son derece önemlidir. Örneğin test veri setinde R^2 açısından en başarılı model Model-2 iken MAE açısından en başarılı olan model Model-4 olarak elde edilmiştir.
- Bu açıdan değerlendirildiğinde her üç başarı ölçütü açısından en başarılı olan model Model-4'tür. Bu modeli sırası ile Model-2 ve Model-3 izlemektedir.

- Yerel zemin koşullarının etkisini $V_{s,30}$ girdi parametresi ile oluşturan Model-4 ve Model-2'nin göreceli başarısı, bu etkinin yer hareketi tahmin denklemlerinde kullanımının ne kadar isabetli olduğunu göstermesi açısından önemlidir.
- Ege bölgesi için oluşturulan GEP tabanlı dört modelin tamamı, regresyona dayalı olarak elde edilmiş KG04, U04, O04 ile AC10 tahmin denklemlerine göre daha yüksek tahmin başarısına sahiptir.
- Kıyaslama için seçilen ve regresyona dayalı olarak elde edilmiş dört yer hareketi tahmin denklemi arasında AC10 tahmin denklemi üç başarı ölçütü açısından da diğerlerine oranla daha başarılıdır.
- Elde edilen GEP tabanlı yer hareketi tahmin modellerinin başarısı, Model-4 ve Model-2'nin Ege Bölgesi sınırları içerisinde gerçekleştirilecek deprem tehlike analizlerinde başarıyla kullanılabilceğini göstermektedir.
- Oluşturulan bu dört tahmin modeline ait denklemlerin genel formu son derece basit olup, girdi parametresi olarak kullandıkları parametrelerin deprem sonrası hızlı ve kolayca elde edilebilecek olması en önemli avantajları arasındadır.

KAYNAKÇA

- Akkar, S., & Bommer, J. J. (2007). Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(2), 511-530.
- Akkar, S., & Çağnan, Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models, *Bulletin Of the Seismological Society of America*, 100(6), 2978-2995.
- Akkar, S., & Bommer, J. J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81(2), 195-206.
- Akkar, S., Sandikkaya, M. A. ve Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 359-387.
- Aktuğ, B., vd. (2009). Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: Limits to block-like behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B10), 1-22.
- Armaghani, D. J., vd. (2018). Settlement prediction of the rock-socketed piles through a new technique based on gene expression programming. *Neural Computing and Applications*, 29(11), 1115-1125.
- Aydan, Ö., Sezaki, M. ve Yarar, R. (1996, 23-28 June). *The seismic characteristics of Turkish earthquakes* [Conference presentation]. 11th World Conference on Earthquake Engineering, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Mexico, https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_1270.PDF
- Bakır, S. B. (2005, 26-27 Ekim). *Zeminlerin sismik yapı hasarı üzerindeki etkileri: Adapazarı'ndan öğrenilenler* [Sempozyum sunumu]. 1. Geoteknik Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, <https://www.imo.org.tr/Eklenti/1057,10884cagbpdf.pdf>
- Beyaz, T. (2004). *Zemin etkisinden arındırılmış deprem kayıtlarına göre Türkiye için yeni bir deprem enerjisi azalım bağıntısının geliştirilmesi*. (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Bikçe, M. (2015, 14-16 Ekim). *Türkiye’de hasara ve can kaybına neden olan deprem listesi (1900-2014)* [Konferans sunumu]. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Türkiye Deprem Mühendisliği Derneği, İzmir. https://www.tdmd.org.tr/pdf/pdf2015/TDMSK_084.pdf
- Bindi, D., vd. (2007). Empirical ground-motion prediction equations for northwestern Turkey using the aftershocks of the 1999 Kocaeli earthquake. *Geophysical Research Letters*, 34(8), 1-5.
- Bommer, J. J., Douglas, J. ve Strasser, F. O. (2003). Style-of-faulting in ground-motion prediction equations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1(2), 171-203.
- Bommer, J. J., & Alarcon, J. E. (2006). The prediction and use of peak ground velocity. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(01), 1-31.
- Boore, D.M., Joyner, W.B. ve Fumal, T.E., (1997). Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American earthquakes: A Summary of Recent Work, *Seismological Research Letters*, 68(1), 128-153.
- Boore, D. M. (2004a). Can site response be predicted?. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(spec01), 1-41.
- Boore, D. M. (2004b). Estimating $V_{S(30)}$ (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths<30 m). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(2), 591-597.
- Borcherdt, R. D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, 10(4), 617-653.
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey—a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 3-30.
- Bozorgnia, Y., & Campbell, K. W. (2004). The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(02), 175-207.
- Bozorgnia, Y., & Campbell, K. W. (2016). Vertical ground motion model for PGA, PGV, and linear response spectra using the NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, 32(2), 979-1004.

- Campbell, K. W. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2039-2070.
- Campbell, K. W. (2003). Strong-motion attenuation relations. *International Geophysics Series*, 81(B), 1003-1012.
- Crowell, B. W., vd. (2013). Earthquake magnitude scaling using seismogeodetic data. *Geophysical Research Letters*, 40(23), 6089-6094.
- Çağnan, Z., vd. (2017). A model for predicting vertical component peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), and 5% damped pseudospectral acceleration (PSA) for Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(7), 2617-2643.
- Demirtaş, R., & Yılmaz, R. (1996). *Türkiye'nin sismotektoniği sismisitedeki uzun süreli değişim ve güncel sismisiteyi esas alarak deprem tahminine bir yaklaşım*. Ankara: T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi Yayını.
- Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1-2), 43-104.
- Douglas, J., & Jousset, P. (2011). Modeling the difference in ground-motion magnitude-scaling in small and large earthquakes. *Seismological Research Letters*, 82(4), 504-508.
- Douglas, J., vd. (2014). Comparisons among the five ground-motion models developed using RESORCE for the prediction of response spectral accelerations due to earthquakes in Europe and the Middle East. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1), 341-358.
- Douglas, J. (2021). *Ground motion prediction equations 1964–2021*. University of Strathclyde. Retrived from <http://www.gmpe.org.uk>.
- Erken, A., Şengül Nomaler, G. ve Gündüz, Z. (2018). The development of attenuation relationship for Northwest Anatolia region. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(2), 1-15.
- Eyidoğan, H. (1988). Rates of crustal deformation in western Turkey as deduced from major earthquakes. *Tectonophysics*, 148(1-2), 83-92.

- Eyidoğan, H., & Barka, A. (1996). The 1 October 1995 Dinar earthquake, SW Turkey. *Terra Nova*, 8(5), 479-485.
- Faccioli, E., Paolucci, R. ve Rey, J. (2004). Displacement spectra for long periods. *Earthquake Spectra*, 20(2), 347-376.
- Ferreira, C. (2001), Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems, *Complex Systems*, 13(2), 87-129.
- Ferreira, C. (2006). *Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence* (2nd ed.), Berlin: Springer.
- Gandomi A.H., & Alavi A.H. (2012). A New Multi-Gene Genetic Programming Approach to Nonlinear System Modeling. Part II: Geotechnical and Earthquake Engineering Problems. *Neural Computing and Applications* 21(1), 189-201
- Gandomi, A. H., vd. (2016). Genetic programming for experimental big data mining: A case study on concrete creep formulation. *Automation in Construction*, 70, 89-97.
- Gutenberg, B., & Richter, C.F. (1936). On seismic waves. *Gerlands Beitr Geophys*, 47(3), 73-131.
- Gutenberg, B. (1945). Magnitude determination for deep-focus earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 35(3), 117-130
- Gülkan, P., & Kalkan, E. (2002). Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey. *Journal of Seismology*, 6(3), 397-409.
- Güllü, H., Ansal, A. M. ve Özbay, A. (2008). Seismic hazard studies for Gaziantep city in South Anatolia of Turkey. *Natural Hazards*, 44(1), 19-50.
- Gürel, E. (2021). *Yerel yer hareketi tahmin denklemlerinin performansının Ege Bölgesi için incelenmesi*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Hanks, T.C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348-2350.
- Haroun, M. A., & Housner, G. W. (1982). Dynamic characteristics of liquid storage tanks. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 108(5), 783-800.

- İnan, E., vd. (1996). *1976-1996 yılları arası ivme kayıtları olan deprem kataloğu*. Ankara: T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi Yayını.
- Jalal, F. E., vd. (2023). Indirect Estimation of Swelling Pressure of Expansive Soil: GEP versus MEP Modelling. *Advances in Materials Science and Engineering, 2023*, 1-25.
- Joyner, W. B., & Boore, D. M. (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the seismological Society of America, 71*(6), 2011-2038.
- Joyner, W. B., & Boore, D. M. (1988, 27-30 June). *Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion* [Conference presentation]. Geotechnical Division Specialty Conference, American Society of Civil Engineers, Utah, USA. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70014404>
- Kadirioğlu, F. T., & Kartal, R. F. (2016). The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900-2012). *Turkish Journal of Earth Sciences, 25*(4), 300-310.
- Kahraman, S., vd. (2008). The effect of regional borders when using the Gutenberg-Richter model, case study: Western Anatolia. *Pure and Applied Geophysics, 165*(2), 331-347.
- Kale, Ö., vd. (2015). A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: investigation of possible regional effects, *Bulletin of the Seismological Society of America, 105*(2A), 963-980.
- Kalkan, E. (2001). *Attenuation relationship based on strong motion data recorded in Turkey*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Ankara.
- Kartal, R. F., vd. (2016, 13-15 Ekim). *Akhisar-Manisa Depremleri (M_w= 4.6, M_w= 4.5)*. Aktif Tektonik Araştırma Grubu Çalıştay, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Kayabali, K. (1997). The role of soil behavior on damage caused by the Dinar Earthquake (Southwestern Turkey) of October 1, 1995. *Environmental & Engineering Geoscience, 3*(1), 111-121.

- Kayadelen, C. (2011). Soil liquefaction modeling by genetic expression programming and neuro-fuzzy. *Expert Systems with Applications*, 38(4), 4080-4087.
- Koçyiğit, A., vd. (2002). 3 Şubat 2002 Çay Afyon depreminin kaynağı ve ağır hasarın nedenleri: Akşehir fay zone. (Jeolojik Ön Rapor). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Kontoni, D. P. N., vd. (2022). Gene expression programming (GEP) modelling of sustainable building materials including mineral admixtures for novel solutions. *Mining*, 2(4), 629-653.
- Koza, J. R., & Poli, R. (2005). Genetic programming. In Burke, E.K. & Kendall, G. (Eds.), *Search Methodologies* (pp. 127-164). Boston: Springer.
- Koza, J.R. (1992), *Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection* (1st ed.). Cambridge: The MIT Press,
- Kramer, S. L. (1996). *Geoteknik deprem mühendisliği* (K. Kayabalı, Çev.) (1st ed.). Ankara: Gazi Kitabevi.
- Lee, W. H. K., Bennett, R. E. ve Meagher K. L. (1972). *A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration*, Open-File Report. U.S. Geological Survey. California.
- Lopes, H. S., & Weinert, W. R. (2004, 10-12 November). *A gene expression programming system for time series modeling* [Conference presentation]. XXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILANCE, Recife, Brazil, <http://silverio.net.br/heitor/publicacoes/2004/cilamce2004.pdf>
- McKenzie, D. (1978). Active tectonics of the Alpine—Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal International*, 55(1), 217-254.
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms* (1st ed.). London: MIT Press
- Mohammadzadeh S. D., vd. (2019). Prediction of compression index of fine-grained soils using a gene expression programming model. *Infrastructures*, 4(2), 1-12.
- Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). *Earthquake spectra and design*. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, C.A.

- Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake scale, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(1), 1-32.
- Sadigh, K., vd. (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismological Research Letters*, 68(1), 180-189.
- Sarıdemir, M., & Severcan, M. H. (2016). The use of genetic programming and regression analysis for modeling the modulus of elasticity of NSC and HSC. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(10), 3959-3967.
- Sattar, A. M. (2014). Gene expression models for prediction of dam breach parameters. *Journal of Hydroinformatics*, 16(3), 550-571.
- Scherbaum, F., Schmedes, J. ve Cotton, F. (2004). On the conversion of source-to-site distance measures for extended earthquake source models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(3), 1053-1069.
- Seyrek, E., & Topçu, S., (2022). Prediction of earthquake-induced crest settlement of embankment dams using gene expression programming, *Geomechanics and Engineering*, 31(6), 637-651.
- Sianko, I., vd. (2020). A practical probabilistic earthquake hazard analysis tool: case study Marmara region. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(6), 2523-2555.
- Singh, S. K., vd. (2020). Scaling of peak ground displacement with seismic moment above the Mexican subduction thrust. *Seismological Research Letters*, 91(2A), 956-966.
- Stewart, J. P., vd. (2016). NGA-West2 equations for predicting vertical-component PGA, PGV, and 5%-damped PSA from shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(2), 1005-1031.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. ve Şaroğlu, F. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In Biddle, K. and Christie-Blick, N. (Eds.), *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation*, (pp. 227-264). Oklahoma: SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018, 18 Mart). *T.C. Resmî Gazete* (Sayı 30364).
- Ulutas, E., & Ozer, M. F. (2003, 6-11 April). *Attenuation relationship for estimation of peak ground horizontal acceleration in eastern Marmara region of Turkey*

[Konferans sunumu]. Meeting of EGS-AGU-EUG Joint Assembly, European Geophysical Society, Nice, France.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003EAEJA.....175U>

Zaré, M., & Bard, P. Y. (2002). Strong motion dataset of Turkey: data processing and site classification. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(8), 703-718.



DİZİN

-A-

AFAD, v, 54, 79

Azalım İlişkisi, 15,19

-D-Dış Merkezlik Mesafesi, 33, 34, 35, 37,
60**-F-**Fay, 14, 15, 19, 20, 21, 23, 25, 26, 27, 29,
32, 34, 36, 39, 40, 52, 53**-G-**

Gen İfadeli Programlama, v, 44, 49, 62

Genetik Algoritma, 44, 49

Genetik Programlama, 44, 47

Geoteknik, v, 16, 49

-İ-

İfade Ağacı, 64, 65, 66, 67, 68

-K-

Kromozom, 44, 45, 46, 47, 62, 63

-M-

MAE, 71, 79

Moment Magnitudü, 25, 26, 35, 54, 64,
67**-P-**PGA, v, 16, 22, 23, 24, 32, 33, 35, 37, 42,
54, 55, 56, 57, 62, 63, 64, 65, 66,
67, 68, 69, 72, 79**-R-**Regresyon, v, 16, 17, 19, 20, 21, 28, 34,
37, 38, 41, 46, 49, 76, 80

RMSE, 46, 62, 63, 71, 76, 79

 R^2 , 71, 72, 75, 76, 79 R_{epi} , v, 16, 26, 27, 33, 34, 35, 58, 60, 62,
63, 64, 65, 67, 69, 72, 77, 79**-S-**

Sismik Tehlike Analizi, v, 15, 32

Sismo-tektonik, 52

-T-

TBDY, 23, 28, 32, 58

-Y-Yer Hareketi Tahmin Denklemi, v, 15,
19, 20, 22, 24, 32, 35, 36, 38, 39,
60, 76, 79, 80**-Z-**

Zemin Sınıfı, 28, 29, 37, 38, 58, 59