

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ YAPILARIN YER ALDIĞI BURSA İLİ HANLAR BÖLGESİ İÇİN BİR
SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İREM BALOTA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ YAPILARIN YER ALDIĞI BURSA İLİ HANLAR BÖLGESİ İÇİN BİR
SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İrem BALOTA
(501191306)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

ŞUBAT 2022

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501191306 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi İrem BALOTA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TARİHİ YAPILARIN YER ALDIĞI BURSA İLİ HANLAR BÖLGESİ İÇİN BİR SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Recep İYİSAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hadi KHANBABAZADEH
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 14 Ocak 2022
Savunma Tarihi : 10 Şubat 2022





Biricik Aileme,



ÖNSÖZ

Deprem bölgesinde yer alan ülkemizde geçmişten bu yana önemli hasarlar yaşanmıştır. Deprem kaynaklı hasarları azaltabilmek için tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği de deprem etkisi altında binaların daha güvenli tasarımı için güncellenmiştir. Sahaya özgü sismik tehlike analizi ile bir bölgedeki depremlerin olma olasılığı, deprem büyüklükleri gibi fonksiyonlar değerlendirilerek deprem etkilerinden kaynaklanan yapısal hasarlar minimize edilebilmektedir. Bu amaçla yaptığım bu çalışmanın bu alanda katkı sağlayacağını düşünmekteyim.

Çalışma sürecinde sahip olduğu engin bilgilerini sunan, paylaştan ve yol gösteren; aynı zamanda bir hocadan çok bir arkadaş gibi davranan Sayın Prof. Dr. Recep İYİSAN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmaya katkılarından ve sağladığı verilerden dolayı Bursa Büyükşehir Belediyesi ve Dr. M. Emre HAŞAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her koşulda yanımda olan ve olacağını bildiğim, beni maddi ve manevi her zaman destekleyen çok değerli aileme minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda bana yardımcı olan Sayın Dr. Mustafa KOÇ'a, Lisans dönemi bitirme projesi arkadaşım ve meslektaşım olan Aslı ÇARK'a tez sürecim boyunca bana katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2022

İrem BALOTA
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	2
1.2 Çalışmanın Kapsamı	2
2. SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ.....	3
2.1 Deterministik Sismik Tehlike Analizi.....	4
2.2 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi.....	6
2.2.1 Olasılıksal sismik tehlike analizi hesaplama adımları	7
2.2.1.1 Deprem kaynaklarının tanımlanması	8
2.2.1.2 Deprem büyüklüğünün (magnitüd) tanımlanması	10
2.2.1.3 Deprem uzaklığının tanımlanması	12
2.2.1.4 Yer hareketi azalım ilişkileri ve olasıksal bağıntılar.....	14
2.2.1.5 Belirsizliklerin değerlendirilmesi ve sismik tehlike analizi	22
3. DEPREM ETKİSİNİN TANIMLANMASI.....	25
3.1 Mevcut Yönetmelikler.....	25
3.1.1 ASCE 7-16	25
3.1.2 Eurocode 8 (EC8, 2004).....	26
3.1.3 Uniform Building Code (UBC-1997)	28
3.1.4 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)	30
3.2 TBDY 2018'e Göre Sahaya Özel Deprem Yer Hareketi Spektrumu.....	33
3.2.1 Deprem kayıtlarının seçimi	34
3.2.2 Deprem kayıtlarının basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesi ..	34
3.2.3 Spektral Uyuşum.....	34
4. SAHAYA ÖZEL DEPREM TEHLİKESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	35
4.1 Çalışma Alanının Tanıtılması.....	35
4.2 Bölgesel Jeoloji	38
4.2.1 Sondaj çalışmaları	39
4.2.2 Jeofizik çalışmalar.....	43
4.3 Sismisite ve Aktif Tektonik.....	45
4.4 TBDY 2018'e Göre Elastik Tasarım Spektrumları.....	47
4.5 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi.....	51

4.5.1 Deprem kaynaklarının tanımlanması	51
4.5.2 Deprem büyüklüğünün tanımlanması	54
4.5.3 Deprem uzaklığının tanımlanması	67
4.5.4 Yer hareketi azalım ilişkileri ve olasılıksal bağıntılar.....	67
4.5.5 Olasılıksal sismik tehlike analizi sonuçları	72
4.6 Sahaya Özel Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi	87
4.6.1 Deprem kayıtlarının seçimi	87
4.6.2 Deprem kayıtlarının basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesi ..	94
4.7 Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi	95
5. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA	103
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	111
KAYNAKLAR.....	113
EKLER	117
ÖZGEÇMİŞ.....	161



KISALTMALAR

DSTA	: Deterministik sismik tehlike analizi
CB2008	: Campbell and Bozorgnia 2008 NGA yer hareketi azalım ilişkisi
MASW	: Çok kanallı yüzey dalgası analizi
NGA	: Yeni nesil azalım ilişkileri (New generation attenuations relationships)
OSTA	: Olasılıksal Sismik tehlike analizi
PGA	: En büyük yer ivmesi (Peak ground acceleration)
SA	: Spektral ivme
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği



SEMBOLLER

a	: İvme değeri
A_g	: Zemin büyütme değeri
F_s	: Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı [boyutsuz]
F₁	: 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı [boyutsuz]
F_M(m)	: Belirli bir “M” büyüklüğü için kümülatif dağılım fonksiyonu
F_R(r)	: Kaynaktan belirli bir uzaklıktaki depreme ait kümülatif dağılım fonksiyonu
f_M(m)	: Belirli bir “M” büyüklüğü için olasılıksal yoğunluk fonksiyonu
f_R(r)	: Kaynaktan belirli bir uzaklıktaki depreme ait olasılıksal yoğunluk fonksiyonu
F_{RV}	: Ters faylanmayı temsil eden değişken
F_{NM}	: Normal faylanmayı temsil eden değişken
F_{AS} (veya AS)	: Artçı dalgaları temsil eden değişken
F_{HW}	: Tavan bloğu (hanging wall) etkisini temsil eden değişken
I₀	: Deprem şiddeti
K_g	: Nakamura hasar görülebilirlik indisi
M	: Deprem büyüklüğü
M_w	: Moment magnitüdü
PGA	: En büyük yer ivmesi değeri [g]
PGA₁₁₀₀	: (V _s) ₃₀ = 1100 m/s için medyan en büyük ivme (g)
P(M=m_j)	: “m _j ” büyüklüğünde deprem olma olasılığı
R_{jb}	: Joyner- Boore uzaklığı (deprem kayıt istasyonu ile merkez üssü (epicenter) arasındaki en kısa mesafe uzaklığı) [km]
R_{rup}	: Fay kırığı uzaklığı (deprem kayıtları ile fay kırığı uzaklığı) [km]
R_x	: Kırığın üst kenarından yatay uzaklığı [km]
S_s	: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
S₁	: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
S_{DS}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

$S_{ae}(T)$	: Yatay elastik tasarım spektral ivmesi [g]
$S_{aeD}(T)$	: Düşey elastik tasarım spektral ivmesi [g]
T	: Doğal titreşim periyodu
T_0	: Hakim periyot değeri
T_A, T_B	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]
T_{AD}, T_{BD}	: Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]
T_L	: Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu [s]
T_{LD}	: Düşey elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu [s]
$(V_s)_{30}$	: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı [m/s]
$Z_{1.0}$	: $V_s = 1.0$ km/s olan derinlik [m]
Z_{tor}	: Fay kırığının en üstünün derinliği [km]
W	: Aşağı yönelimli kırık genişliği [km]
λ_M	: “M”den daha büyük magnitüdlü deprem oluşma olasılığı
σ	: Standart sapma değeri
$\phi(z)$	: Standart normal kümülatif dağılım fonksiyonu
ε	: Normal dağılım fonksiyonundaki standart normal değeri
γ_e	: Kayma şekil değıştirmesi
δ	: Fay eğimi [derece]

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Wells ve Coppersmith'in farklı fay tipleri için geliştirdiği ilişkiler (Seyrek, 2009).....	12
Çizelge 2.2 : Standard normal kümülatif dağılım fonksiyonu (Z) tablosu (Baker, 2013).	16
Çizelge 2.3 : Olasılıksal sismik tehlike hesaplarında kullanılan bazı yer hareketi azalım ilişkileri ve özellikleri, Bıçak (2018) ile Cambazoğlu ve diğ. (2013)'ten uyarlanmıştır.	17
Çizelge 3.1 : Kısa periyot ve 1.0 s periyot için zemin katsayıları, Adamu (2019)'dan uyarlanmıştır.	26
Çizelge 3.3 : UBC-1997'de tanımlanan zemin profil tipleri (Mert ve diğ, 2019).....	29
Çizelge 3.4 : UBC-1997'de tanımlanan sismik katsayılar (Mert ve diğ, 2019)	30
Çizelge 4.1 : Bursa ilinde önceden yapılmış olan sondajlara ait litoloji bilgileri.....	40
Çizelge 4.2 : SPT düzeltme katsayıları, TBDY(2018)'den uyarlanmıştır.....	41
Çizelge 4.3 : SPT düzeltilmiş veriler.....	42
Çizelge 4.4 : Zemin davranışının kayma deformasyonu seviyesine bağlı değişimi (Subaşı ve diğ, 2017).	45
Çizelge 4.5 : Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018).	48
Çizelge 4.6 : Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018). ...	49
Çizelge 4.7 : 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018).	49
Çizelge 4.8 : ZC zemin sınıfı için spektral ivme katsayıları, yerel zemin etki katsayıları ve en büyük yer ivmesi değerleri (TBDY, 2018).	49
Çizelge 4.9 : İnceleme alanında bulunan faylar ve bu fayların özellikleri, AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı (2014)'ndan derlenmiştir.....	52
Çizelge 4.10 : Bursa şehrinde gerçekleşen bazı tarihsel depremler (BDTİM).	54
Çizelge 4.11 : Tarihsel dönemde meydana gelen depremler ve aletsel gözleme dayalı zamandan bu yana kayıt altına alınan depremler.....	57
Çizelge 4.12 : Farklı büyüklük türleri (M_s , M_b , M_l , M_d) için homojenleştirme bağıntıları, AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı (2014)'ndan derlenmiştir.	58
Çizelge 4.13 : Belirlenen inceleme alanında aletsel dönemden bu yana meydana gelen depremler ve özellikleri (AFAD).....	58
Çizelge 4.14 : İnceleme alanında oluşan depremlerin büyüklük ve oluşma sıklığı...	65
Çizelge 4.15 : Değişken deprem büyüklüğü ve merkez üstü uzaklığına göre maksimum yer ivmesi (PGA) değerlerinin aşılma olasılıkları.	70
Çizelge 4.16 : R-CRISIS'da tanımlanan çizgisel kaynakların sismik parametreleri.	77
Çizelge 4.17 : R-CRISIS yazılımında tanımlanan bölgesel kaynakların sismik özellikleri ve parametreleri.	79
Çizelge 4.18 : Kullanılan azalım ilişkilerine göre R-CRISIS yazılımı ile elde edilen spektral ivme değerleri.....	81

Çizelge 4.19 : R-CRISIS yazılımı sonucu elde edilen spektral ivme katsayıları ve en büyük yer ivmesi değerleri ile tasarım spektrumu değerlerinin karşılaştırılması.	82
Çizelge 4.20 : R-CRISIS yazılımında tanımlanan bölgesel kaynakların sismik parametreleri, Deniz (2006)'den derlenmiştir.	84
Çizelge 4.21 : Kullanılan azalım ilişkilerine göre R-CRISIS yazılımı ile elde edilen spektral ivme değerleri.	86
Çizelge 4.22 : R-CRISIS yazılımı sonucu elde edilen spektral ivme katsayıları ve en büyük yer ivmesi değerleri ile tasarım spektrumu değerlerinin karşılaştırılması.	86
Çizelge 4.23 : Bursa ili ve çevresi için seçilen deprem kayıtları bilgileri, https://ngawest2.berkeley.edu/ 'den derlenmiştir.	88
Çizelge 4.24 : Bursa ili Hanlar Bölgesi için belirlenen zemin profili ve parametreleri.	96
Çizelge 4.25 : DeepSoil yazılımında kullanılan deprem kayıtları.	97
Çizelge 4.26 : DeepSoil yazılımında kullanılan tüm deprem kayıtları için belirli spektral periyot değerlerindeki zemin büyütme katsayısı değerleri....	100
Çizelge 4.27 : DeepSoil yazılımından tüm deprem kayıtları için elde edilen en büyük yer ivmesi değeri ile TBDY'de sunulan değerin karşılaştırılması.	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Deterministik sismik tehlike analizi basamakları (Kızılbuğa, 2016).	5
Şekil 2.2 : a) Bir alan içerisinde tanımlanan faylar haritası. b) Bu alandaki iki farklı faya ait ivme spektrumları, Baker (2013)'ten uyarlanmıştır.....	7
Şekil 2.3 : Sismik tehlike analizinde tanımlanan sismik kaynak tipi örneği (Seyrek, 2009).	9
Şekil 2.4 : Bir inceleme alanı ve fay hattının gösterildiği örnek plan, Baker (2013)'ten uyarlanmıştır.	13
Şekil 2.5 : Tavan blok (Hanging-wall) ve taban blok (Foot-wall) (Li ve Xie, 2007).	19
Şekil 3.1 : Tasarım tepki spektrumu, Adamu (2019)'dan uyarlanmıştır.	26
Şekil 3.2 : Eurocode-8 tasarım yatay tepki spektrumu (EN 1998-1:2004).....	27
Şekil 3.3 : UBC-1997 tasarım tepki spektrumu (Mert ve diğ, 2019).	29
Şekil 4.1 : Türkiye haritasında Bursa ili konumu (http://cografyaharita.com).....	36
Şekil 4.2 : Bursa ili ve ilçeleri (https://bursa.ktb.gov.tr).	36
Şekil 4.3 : Bursa ilinde meydana gelen depremler nedeniyle tarihi yapılarda oluşan hasarlar, Baştürk (2013)'ten uyarlanmıştır.	37
Şekil 4.4 : Bursa ili ve çevresinde yapılan zemin etüt çalışmalarını gösteren yer bulduru haritası, Bursa Büyükşehir Belediyesi'nden temin edilmiştir.	39
Şekil 4.5 : Bursa ili için yıllara göre sismik etkinlik durumu (Gök ve Polat, 2011).	46
Şekil 4.6 : Bursa ili ve çevresindeki faylar (Ünal ve Askan, 2015).....	47
Şekil 4.7 : Kuzey Anadolu Fayı güney koluna ait faylar (Selim, H.H. ve diğ, 2005).	47
Şekil 4.8 : Yatay elastik tasarım spektrumu.	50
Şekil 4.9 : Yatay elastik tasarım spektral yerdeğiştirmeleri.	50
Şekil 4.10 : Düşey elastik tasarım spektrumu.....	50
Şekil 4.11 : Bursa inceleme alanı merkezi etrafındaki diri faylar ve gerçekleşen bazı depremler, http://yerbilimleri.mta.gov.tr 'den uyarlanmıştır.	51
Şekil 4.12 : Bursa ili Ulu Cami merkezli sismik etkinlik durumu (AFAD).	55
Şekil 4.13 : Deprem büyüklüğü ve tekrarlanma sayıları arasındaki ilişki (AFAD). .	56
Şekil 4.14 : Bursa ili Ulu Cami merkezli inceleme alanı için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi.	65
Şekil 4.15 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin büyüklük ve oluşma sıklığını gösteren histogram.	66
Şekil 4.16 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve oluşma sıklığını gösteren histogram.	67
Şekil 4.17 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve PGA>0.1g olma olasılığı ilişkisini gösteren grafik.	68
Şekil 4.18 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve PGA>0.2g olma olasılığı ilişkisini gösteren grafik.	68

Şekil 4.19 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve PGA>0.3g olma olasılığı ilişkisini gösteren grafik.....	69
Şekil 4.20 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve PGA>0.4g olma olasılığı ilişkisini gösteren grafik.....	69
Şekil 4.21 : R-CRISIS yazılımında tanımlanmış olan bölgede hakim olan çizgisel ve bölgesel kaynaklar.	73
Şekil 4.22 : Bölgede hakim olan çizgisel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-I.	74
Şekil 4.23 : Bölgede hakim olan çizgisel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-II.	75
Şekil 4.24 : Bölgede hakim olan çizgisel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-III.....	76
Şekil 4.25 : Bölgede hakim olan çizgisel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-IV.	77
Şekil 4.26 : Bölgesel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-I...	78
Şekil 4.27 : Bölgesel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-II.	79
Şekil 4.28 : Farklı spektral periyot değerleri için CB2008 azalım ilişkisi kullanılarak R-CRISIS yazılımı ile elde edilen sismik tehlike eğrisi.	80
Şekil 4.29 : Farklı spektral periyot değerleri için CY2008 azalım ilişkisi kullanılarak R-CRISIS yazılımı ile elde edilen sismik tehlike eğrisi.	80
Şekil 4.30 : R-CRISIS yazılımı ile elde edilen elastik tepki spektrumu ile TBDY 2018’de tanımlanan tasarım spektrumu.	82
Şekil 4.31 : Türkiye bölgesel kaynak zonları (Deniz, 2006).	83
Şekil 4.32 : Farklı spektral periyot değerleri için CB2008 azalım ilişkisi kullanılarak R-CRISIS yazılımı ile elde edilen sismik tehlike eğrisi.	85
Şekil 4.33 : Farklı spektral periyot değerleri için CY2008 azalım ilişkisi kullanılarak R-CRISIS yazılımı ile elde edilen sismik tehlike eğrisi.	85
Şekil 4.34 : R-CRISIS yazılımı ile elde edilen elastik tepki spektrumu ile TBDY 2018’de tanımlanan tasarım spektrumu.	87
Şekil 4.35 : Cape Mendocino 1992 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.	89
Şekil 4.36 : Chuetsuoki, Japan 2007 (Joetsu Ogataku) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.	90
Şekil 4.37 : Chuetsuoki, Japan 2007 (NIGH01) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.	90
Şekil 4.38 : Chuetsuoki, Japan 2007 (Kawaguchi) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.	90
Şekil 4.39 : Düzce, Turkey 1999 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları. ..	91
Şekil 4.40 : Imperial Valley-06 1979 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.	91
Şekil 4.41 : Iwate, Japan 2008 (IWT015) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.	91
Şekil 4.42 : Landers 1992 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.	92
Şekil 4.43 : Iwate, Japan 2008 (Yuzawa Town) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.	92
Şekil 4.44 : Manjil, Iran 1990 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.....	92
Şekil 4.45 : Northridge-01 1994 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları. ...	93
Şekil 4.46 : Seçilen deprem kayıtlarının yatay tepki spektrumlarının karşılaştırılması.	93

Şekil 4.47 : Sahaya özgü yatay tepki spektrumu ile yatay elastik tasarım spektrumunun karşılaştırılması.	94
Şekil 4.48 : DeepSoil yazılımında kullanılan zemin profili ve zemin parametreleri.	97
Şekil 4.49 : DeepSoil yazılımı ile yapılan sahaya özgü dinamik analiz sonucu elde edilen yüzey ve outcrop tepki spektrumları – I.	98
Şekil 4.50 : DeepSoil yazılımı ile yapılan sahaya özgü dinamik analiz sonucu elde edilen yüzey ve outcrop tepki spektrumları - II.	99
Şekil 4.51 : DeepSoil yazılımı ile yapılan analiz sonucu elde edilen zemin büyütme oranlarının karşılaştırılması.	101
Şekil 4.52 : DeepSoil yazılımı ile elde edilen sahaya özel tepki spektrumu.	102
Şekil 4.53 : Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Tarihi Camiler Bölgesinin yerel jeolojisi ve zemin koşulları (İyisan ve diğ., 2021).	103
Şekil 4.54 : Bursa merkez ilçelerine ait $(V_s)_{30}$ haritasında tarihi camilerin yer aldığı bölgenin konumu (Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi, 2013).	104
Şekil 4.55 : Bursa merkez ilçelerine ait hakim periyot haritasında tarihi camilerin yer aldığı bölgenin konumu (Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi, 2013).	105
Şekil 4.56 : Bursa merkez ilçelerine ait K_g indeksi haritasında tarihi camilerin yer aldığı bölgenin konumu (Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi, 2013).	105



TARİHİ YAPILARIN YER ALDIĞI BURSA İLİ HANLAR BÖLGESİ İÇİN BİR SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ

ÖZET

Bursa ilinde geçmişten günümüze kadar pek çok deprem meydana gelmiştir. Bölgede tarih boyu yaşanan depremler nedeniyle pek çok yapının zarar görmesi bölgenin sismik aktivitesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi'nin sismik tehlikesi değerlendirilmiş, bölgeye ait elastik ivme spektrumları ile deprem yüklerinin hesaplanılarak depremden kaynaklanan yapı hasarlarının azaltılması amaçlanmıştır.

Yapılan bu çalışma Bursa ili Hanlar Bölgesi için olasılıksal sismik tehlike analizi ve sahaya özel zemin davranış analizlerini kapsamaktadır. Yapılan analizlerde 50 yılda aşılma olasılığının %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan DD-2 deprem yer hareketi ve %5 sönüm oranına göre analiz yapılmıştır.

Bursa ilinde yer alan Ulu Camii merkez (40.18° kuzey enlemi ve 29.06° doğu boylamı) kabul edilerek 100 km yarıçaplı dairesel bir alanda meydana gelmiş deprem kayıtları ($4.0 \leq M$) dikkate alınmıştır. Meydana gelen depremlerin büyüklüğü ile sıklığı arasındaki ilişki Gutenberg – Richter Tekrarlanma Kanunu ile belirlenmiş, a ve b depremsellik katsayıları sırasıyla 4.64 ve 0.56 olarak elde edilmiştir.

İnceleme bölgesi için yapılan olasılıksal sismik tehlike analizleri R-CRISIS v18.4.2 yazılımı kullanılmıştır. Bölgeye uygun olan Campbell-Bozorgnia 2008 NGA (CB2008) ve Chiou and Youngs 2008 NGA (CY2008) yer hareketi azalım ilişkileri kullanılmıştır. Yapılan analizlerde çizgisel kaynak ve bölgesel kaynaklar tanımlanmıştır. ZC zemin koşulları için yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucu elde edilen elastik ivme spektrumunda PGA değerleri Campbell and Bozorgnia 2008 NGA ve Chiou and Youngs 2008 NGA yer hareketi azalım ilişkilerine göre sırasıyla 0.342g ve 0.273g olarak elde edilmiştir. Maksimum spektral ivme değeri 0.2 s spektral periyot için CB2008 azalım ilişkisine göre 0.85g, CY2008 azalım ilişkisine göre ise 0.68g olarak elde edilmiştir.

TBDY 2018'e göre inceleme alanıyla benzer özelliklerde ve tasarım spektrumuna yakın değerlerde 11 adet deprem kaydı PEER NGA Veri Bankası web sayfası aracılığıyla yapılmıştır. Zaman tanım alanında basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiş olan deprem kayıtlarına göre maksimum spektral ivme değeri 0.18 s periyot için yaklaşık 1.27g olarak elde edilmektedir.

Sahaya özel zemin davranış analizi 11 adet deprem kaydı kullanılarak DeepSoil v7 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisi incelenmiş olup her bir spektral periyot değeri için zemin büyütmesi oranları belirlenmiştir. Kayma modülü oranı ve sönüm oranı eğrileri için Darendeli (2001) materyal modeli kullanılmıştır. Yapılan tek boyutlu eşdeğer lineer zemin davranış analizine göre elde edilen tepki spektrumunda maksimum spektral ivme değeri 1.25g, en büyük yer ivmesi değeri (PGA) ise 0.474g olarak elde edilmiştir.

A SEISMIC HAZARD ANALYSIS FOR BURSA HANLAR REGION WHERE HISTORICAL STRUCTURES LOCATED

SUMMARY

Many earthquakes have occurred in Bursa from past to present. The damage to buildings due to earthquakes shows that the seismic activity of the Bursa region is quite high. In this study, the seismic hazard of the Hanlar Region of Bursa, where historical buildings and mosques are located, was evaluated, and it was aimed to calculate the elastic acceleration spectrum and earthquake loads of the region. Thus, it is aimed to reduce the structural damage caused by the earthquake.

This study includes probabilistic seismic hazard analysis and site-specific response analysis for the Hanlar Region of Bursa. This study was analyzed according to the DD-2 ground motion level (return period of 475 years) and 5% damping ratio.

The earthquake records ($4.0 \leq M$) that occurred in a circular area with a radius of 100 km were taken into account, assuming that the Ulu Mosque in Bursa was the center (40.18° latitude and 29.06° longitude). The relationship between the magnitude and frequency of the earthquakes was determined by the Gutenberg – Richter Repetition Law, and the seismicity coefficients a and b were obtained as 4.64 and 0.56, respectively.

The R-CRISIS v18.4.2 software was used for probabilistic seismic hazard analyzes. Ground motion attenuation relationships of Campbell-Bozorgnia 2008 NGA (CB2008) and Chiou and Youngs 2008 NGA (CY2008) appropriate to the region were used in analysis. Fault lines and regional seismic sources were defined in the analysis. In the elastic acceleration spectrum obtained as a result of the probabilistic seismic hazard analysis for ZC ground conditions, the PGA values were obtained as 0.342g and 0.273g, respectively, according to the Campbell and Bozorgnia 2008 NGA and Chiou and Youngs 2008 NGA ground motion attenuation relationships. The maximum spectral acceleration value for the 0.2 s spectral period was obtained as 0.85g according to the CB2008 attenuation relationship and 0.68g according to the CY2008 attenuation relationship.

According to TBDY 2018, 11 earthquake records with similar characteristics to the study area and values close to the design spectrum were made via the PEER NGA Data Bank web page. According to the earthquake records scaled with the simple scaling method in the time history, the maximum spectral acceleration value is obtained as approximately 1.27g for the 0.18 s period.

Site-specific response analysis was performed with DeepSoil v7 software with using 11 earthquake records. The effect of local soil conditions on soil amplification was investigated and soil amplification ratios were determined for each spectral period value with this analysis. Darendeli (2001) material model was used for shear modulus ratio and damping ratio curves. According to the response spectrum obtained from the one-dimensional equivalent linear response analysis, the maximum spectral acceleration value was 1.25g, and the maximum ground acceleration value (PGA) was 0.474g.

1. GİRİŞ

Levhalarından oluşan yer kabuğunun içerisinde birtakım levha hareketleri gerçekleşmektedir. Levha kütleleri birbirlerine yaklaşıp dalma-batma hareketi (birbirlerinin üzerine çıkma ya da altına geçme), uzaklaşma hareketi ve yanıl kayma hareketi ile birbirlerine sürtünme halinde bulunmaktadır. Levha hareketlerinden dolayı meydana gelen yer kabuğundaki kırılmalara bağılı ortaya çıkan titreşim dalgalarının yeryüzünde oluşurduğu sarsıntı deprem olarak tanımlanmaktadır (AFAD <https://www.afad.gov.tr/>). Kırılma hareketi nedeniyle odak noktasında ortaya çıkan deprem enerjisi yeryüzündeki en yakın konum olan merkez üssü ve çevresinde kuvvetli bir şekilde hissedilmektedir. Fay hareketlerinden dolayı meydana gelen enerjinin ortaya çıktığı alanlar olan deprem bölgelerinde depremden kaynaklanan birçok hasar oluşabilmektedir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'na göre dünyanın oluşumundan beri, sismik yönden aktif bulunan bölgelerde depremlerin ardışıklı olarak oluştuğu ve sonucunda da milyonlarca insanın ve barınakların yok olduğu bilinmektedir. Dünya üzerinde aktif olarak etkinliğini sürdüren Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizde tarihsel döneme ait kayıtlar ve aletsel dönemde kaydedilen depremler dikkate alınırsa geçmişten bu yana pek çok kuvvetli depremin meydana geldiği bilinmektedir. Ülkemizde geçmişte depremlerin sıklıkla meydana geldiği ve gelecekte de heran doğal bir afet olan depremlerin oluşabileceği gerçeği bilinmelidir.

Sismik olarak yer sarsıntıları sonucu oluşan depremler pek çok zararın ve kayıpların oluşmasına neden olmaktadır. Depremlerin meydana gelmesiyle yapılar zarar görmekte ve pek kişinin hayatını kaybetmesine sebep olacak enkazlar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca fay bölgelerindeki çöküntü ve büyük ani değişiklikler, pek çok zarara neden olabileceği gibi okyanus ve nehir sularının da harekete geçmesine neden olarak kıyı bölgelerde meydana gelebilecek tsunami ile su basmalarına neden olup pek çok maddi hasara neden olabilmektedir. Depremden kaynaklanacak hasarları, büyük can ve mal kayıplarını azaltabilmek amacıyla yapı tasarımında deprem etkilerinin

hesaba katılıp dikkate alınması gerekmektedir. Böylelikle depremden kaynaklanan yapı hasarlarının azaltılabilmesi sağlanmaktadır.

1.1 Çalışmanın Amacı

Gelecekte meydana gelmesi muhtemel olan sismik yer hareketlerinin neden olduğu zararların ve kayıpların minimize edilebilmesi için sismik tehlike analizi yapılması gerekmektedir. Yapılan bu analizler ile gelecekte olması muhtemel yer hareketlerinin büyüklük, yıllık aşılma oranı gibi parametrelerinin belirlenebilmektedir. Bu tez çalışması; Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için sismik tehlike analizi yapılmasını ve sahaya özel zemin davranış analizlerini kapsamaktadır. Çalışma kapsamında belirlenen inceleme alanında deprem etkisinin tanımlanarak bölgenin sismik tehlikesi değerlendirilmiş ve bölgeye ait tasarım spektrumları belirlenmiştir.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Bursa ilinde tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için R-CRISIS v18.4.2 yazılımı kullanılarak bölgede gerçekleşen deprem büyüklükleri, fay mekanizması ve fay parametreleri, sismik kaynak uzaklıkları ile tanımlanan sismik kaynaklar ve bölgeye uygun yer hareketi azalım ilişkileri dikkate alınarak olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmıştır. Yapılan tehlike analizi sonucu elastik ivme spektrumu elde edilmiştir.

Sahaya özel yapılan analizlerde TBDY 2018'e uygun olarak 11 adet deprem kaydı seçimi PEER NGA Veri Bankası aracılığıyla yapılmıştır. Seçilen deprem kayıtları deprem büyüklüğü, fay tipleri, faya olan mesafe, $(V_s)_{30}$ değerleri ve kaynak mekanizmasına göre sınırlandırılmaktadır. Tasarım spektrumuna yakın değerlerde elde edilen deprem kayıtları TBDY 2018'e uygun olarak basit ölçeklendirme metodu ile ölçeklendirilmiştir.

Yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılan sahaya özgü zemin davranış analizleri DeepSoil v7 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Taban kayasında oluşan depremlerin yüzeye aktarılması için yapılan tek boyutlu eşdeğer lineer zemin tepki analizi sonucunda zemin büyütmesi değerleri belirlenerek tepki spektumu oluşturulmuştur.

Yapılan bu analizlerde TBDY 2018'e göre 50 yılda aşılma olasılığının %10 olan yani tekrarlanma periyodu (return period) 475 yıl olan DD-2 deprem yer hareketi düzeyi dikkate alınmıştır. DD-2 deprem yer hareketi seviyesi için %5 sönüm oranı kullanılmıştır.

2. SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ

Bir bölgedeki sismik aktivitenin ve sismik tehlike durumunun değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Sismik tehlike analizi ile bir bölgedeki olası tüm depremler göz önünde bulundurularak farklı yer hareketi seviyeleri için o alanda oluşabilecek yer hareketi parametrelerinin aşılma olasılıkları belirlenebilmektedir. Böylelikle belirlenen bölge için deprem yükleri hesaplanılarak depremden kaynaklanan yapı hasarlarının azaltılabilmesi sağlanmaktadır.

Gelecekteki depremlerin tahmin edilebilmesi amacıyla yapılan sismik tehlike analizinde, tahminlerin en doğru şekilde yapılabilmesi için depremlerin ve tektonik hareketlerle ilgili bilgilerin kullanılması gerekmektedir. Sismik tehlike analizlerinin yapılabilmesi için depremin kaynaklandığı yerin konumu, ortaya çıkan depremin karakteristik özellikleri (deprem büyüklüğü, kaynak özellikleri vb.) belirlenmelidir. Geçmişte gerçekleşmiş olan depremlerin özellikleri belirlenmeli ve eski deprem kayıtları da dikkate alınmalıdır. Kıray'a (2005) göre gelecekte beklenen depremleri oluşturacak sismik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Böylece depremden kaynaklanacak hasarların etkilerini azaltmak mümkün olabilmektedir.

Sismik tehlikenin azaltılması için gelecekte meydana gelmesi muhtemel olan deprem etkilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple sismik tehlike analizinin yapılması gerekmektedir. Yapılan bu analiz ile ortaya çıkması muhtemel olan yer hareketinin aşılma sıklıkları belirlenir. Böylece depremden dolayı meydana gelebilecek olan zararlar tahmin edilebilmektedir.

Sismik tehlike ve sismik risk ifadeleri birbirinden farklılık göstermektedir. TBDY 2018'e göre sismik tehlike, herhangi bir yerde veya coğrafi bölgede gözönüne alınan belirli bir zaman diliminde, depremi tanımlayan herhangi bir tipik yer hareketi parametresinin (örneğin en büyük yer ivmesi veya herhangi bir periyoda karşılık gelen spektral ivme) belirli bir değere ulaşması veya onu aşması olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Buna göre sismik tehlike analizinin amacı sismik güvenliğin sağlanmasıdır. Sismik tehlike analizi değerlendirmesi yapılırken yer hareketinin

karakteristiği ve belirsizlikleri dikkate alınırken; sismik risk analizi için depremlerin insan ve yapılar üzerindeki etkileri, sismik güvenliğin sağlanma maliyeti ve potansiyel kayıpların maliyeti de dikkate alınmalıdır. Sismik risk analizi ile ileride meydana gelecek olan depremlerin oluşturabileceği zararlar, insanlar ve yapılar üzerindeki etkileri tahmin edilerek hasar grebilirliği belirlenmelidir. Sismik risk ile sismik tehlike analizi arasındaki temel fark, bu hasar görebilirlik tahmininin sismik risk analizlerinde dikkate alınıyor olmasıdır.

Sismik tehlike analizi deterministik ve olasılıksal sismik tehlike analizi olmak üzere iki yöntem ile yapılabilmektedir. Sismik tehlike analizi yöntemlerinden biri olan deterministik sismik tehlike analizi ile depremin oluşum periyodu, oluşabileceği konum ve yer hareketi düzeyi hakkında yorum yapılamamaktadır. Olasılıksal sismik tehlike analizinde ise bir bölgeyi etkileyebilecek tüm sismik kaynakların çeşitli deprem büyüklüğü ve uzaklıklarına göre belirlenebilecek yer hareketi seviyesinin yıllık aşılma olasılığı tahmin edilebilmektedir.

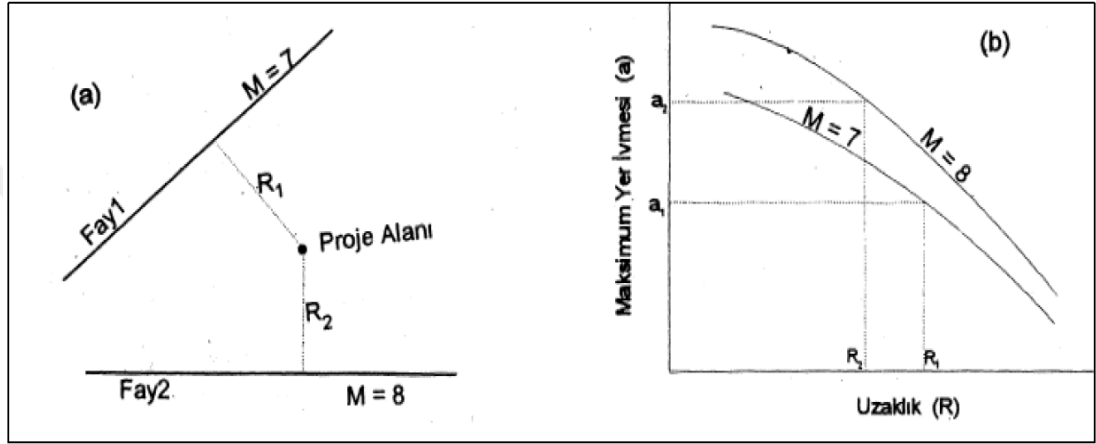
2.1 Deterministik Sismik Tehlike Analizi

Deterministik sismik tehlike analizi ile bir bölgedeki gelecekte oluşması muhtemel deprem özellikleri (konum, yer hareketi seviyesi, periyot) tahmin edilememektedir. Bu analiz için öncelikle bölgeyi etkisi altına almış tüm deprem kaynakları incelenmeli ve geçmişten bu yana gerçekleşmiş maksimum deprem büyüklükleri ve konumları belirlenmelidir. İnceleme alanının karakteristiklerine en uygun yer hareketi azalım ilişkisinin belirlenmesinin ardından en büyük magnitüde sahip depremin maksimum yer ivmesi hesaplanabilmektedir. Deterministik sismik tehlike analizi (DSTA) genel olarak dört adımdan oluşmaktadır:

1. Bölgede yer hareketine neden olabilecek tüm deprem kaynaklarının tanımlanması.
2. Belirlenen her bir deprem kaynağı ile sismik tehlike analizi yapılacak olan bölge arasındaki uzaklığın belirlenmesi. Kullanılacak azalım ilişkisi ifadesine göre depremlerin merkez üssü veya odak uzaklıklarına göre kategorize edilmesi.
3. İnceleme alanında gerçekleşmiş olan en kuvvetli yer hareketi seviyesinin belirlenmesi. Belirlenen bu deprem genelde deprem büyüklük değerı ve seçilen bölgeye uzaklığına göre tanımlanmaktadır.

4. Yer hareketi özellikleri belirlenerek inceleme alanının sismik tehlikesi yorumlanır. Sismik tehlikenin irdelenebilmesi için genellikle maksimum ivme, hız veya hesap edilen tepki spektrumu değerleri kullanılır.

Şekil 2.1’de deterministik sismik tehlike analizi için yapılan adımlar şematize edilmiştir. Bu basamaklardan ilkinde bir bölgeyi etkisi altına alan sismik kaynakların inceleme alanına olan uzaklığının belirlenmesi, ikincisinde ise yer hareketi azalım ilişkilerinin kullanılarak uzaklığa bağlı maksimum yer ivmesinin belirlenmesi ifade edilmektedir.



Şekil 2.1 : Deterministik sismik tehlike analizi basamakları (Kızılbıça, 2016).

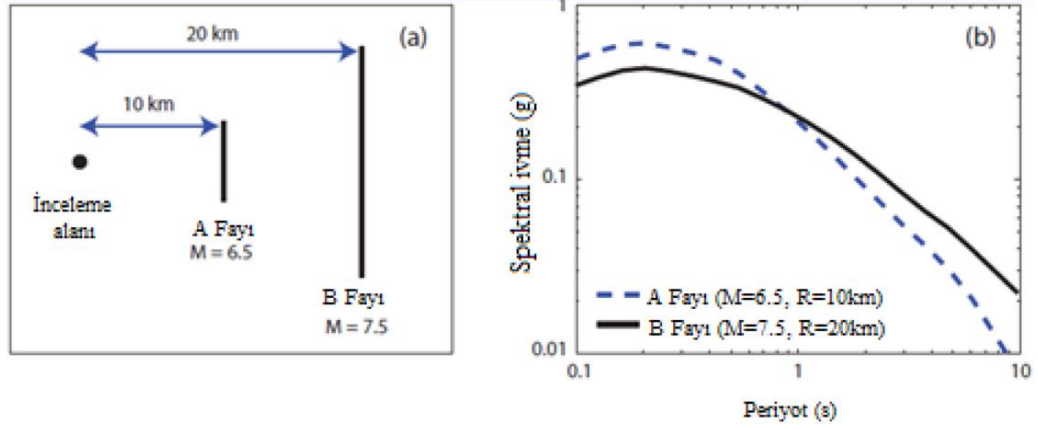
Deterministik analizde en büyük magnitüde sahip depremin kullanılmasıyla en kötü durum seçilemeyeceği gibi en yakın yerde gerçekleşen büyük magnitüdlü deprem kayıtlarının da dikkate alınması da doğru bir bakış açısı değildir (Baker, 2013). Çünkü elde edilecek sonuçlar, seçilen depremin magnitüdü ve şiddetine karşı oldukça duyarlıdır ve değişkenlik gösterebilir. Bu tutumla deprem kaydı seçilmesine “Maksimum Güvenilir Deprem (Maximum Credible Earthquake)” adı verilmektedir. Ancak son yıllarda kullanılan bu ifadenin yerini “Maksimum Dikkate Alınan Deprem (Maximum Considered Earthquake)” ifadesi almıştır. Ancak tüm bu yaklaşımlar olasılıksal sismik tehlike analizi yaklaşımında kullanılmamaktadır. Ayrıca deterministik sismik tehlike analizi yönteminde inceleme alanında meydana gelmesi muhtemel depreme ait en büyük yer ivmesi değeri ortaya konulurken kaynak özellikleri, fay mekanizması gibi belirsizlikler dikkate alınmamaktadır.

2.2 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi

Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi (OSTA) bir arazide gelecekte olabilecek depremlerin dağılımının açık bir şekilde tanımlanabilmesi amacıyla yapılmaktadır. Gelecekte meydana gelecek olan depremlerin lokasyonu, büyüklüğü ve şiddeti hakkında belirsizlikler bulunmaktadır. Belirtilen bu zorluklar nedeniyle gelecekte gerçekleşecek olan depremlerden kaynaklanacak potansiyel yer ivmesinin tahmin edilmesi, bu depremin büyüklüğü ve lokasyonunu belirlemek için yapılan bazı matematiksel hesaplamalar Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi olarak bilinmektedir. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi yapılmasıyla bir inceleme alanının çevresindeki sismik kaynaklar değerlendirilip oluşabilecek yer hareketlerinin riski belirlenebilmektedir. Yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda tüm yer hareketi ivme değerlerine bağlı olarak depremin oluşma sıklıkları her bir kaynağa göre tanımlanabilmektedir.

Sismik tehlike analizlerindeki en kötü sismik durumu tanımlayan (worst-case event) yer hareketini belirlemek mümkün olabilseydi olasılıksal sismik tehlikenin değerlendirilmesinden kaçınılabilirdi. Bölgede gerçekleşebilecek en kötü sismik durum, en yakın olası faydaki maksimum magnitüdlü yer hareketinin belirlenmesini ifade etmektedir. Bu durumun belirlenmesi teoride kolaydır, ancak uygulamada çok çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Tüm periyotlar için maksimum spektral ivme değerlerini gösteren tek bir “en kötü sismik durum (worst-case)” yoktur.

Bir araziye farklı uzaklıklarda bulunan ve deprem kaynağı olan iki fay hattında gerçekleşen farklı büyüklüklerdeki depremler Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Yakın olan fayda düşük magnitüdlü gerçekleşen yer hareketinde daha kısa periyotta büyük ivme değerine ulaştığı görülmektedir. Ancak uzak olan fay hattında gerçekleşen yüksek magnitüdlü depremin daha uzun periyotta gerçekleştiği görülmektedir. Bu iki durum da göz önüne alındığında tek bir en kötü sismik durum (worst-case) olmadığı görülmektedir. Bu sebeple olasılıksal sismik tehlike analizi yapılırken bir inceleme alanı ve çevresinde bulunan tüm sismik kaynaklar mevcut konumları ve özellikleri dikkate alınarak bir arada değerlendirilmelidir.



Şekil 2.2 : a) Bir alan içerisinde tanımlanan faylar haritası. b) Bu alandaki iki farklı faya ait ivme spektrumları, Baker (2013)’ten uyarlanmıştır.

2.2.1 Olasılıksal sismik tehlike analizi hesaplama adımları

Depremlerden kaynaklanacak yapılardaki hasar riskinin değerlendirilebilmesi için depremlerin yıllık aşılma olasılığı ve yer hareketinin şiddeti belirlenmelidir. Bunun için meydana gelmiş deprem kayıtları incelenerek farklı yer ivmesi aralıklarına göre bir alandaki yer hareketlerindeki seviyenin yıllık aşılma olasılığı veya oranını gösteren olası eğri olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda elde edilmektedir. Haşal ve İyisan (2005)’e göre olasılıksal kavramlar son yıllarda oldukça geliştirildiği için sismik tehlike analizlerinde meydana gelebilecek depremlerin konumu, büyüklüğü, oluşma sıklığı gibi belirsizliklerin de hesaba katılabilmesine imkan sağlamaktadır.

Olasılıksal sismik tehlike analizlerinde ilk olarak bir bölgeyi etkisi altına alan sismik kaynaklar belirlenmelidir. Bölgede etkinliğini sürdüren fay hatları gibi sismik kaynakların belirlenmesinin ardından depremlerin büyüklük ve sismik kaynaklara uzaklığı bakımından değerlendirilmesi gerekmektedir. Daha sonra belirlenen sismik kaynaklar üzerinde oluşması muhtemel yer hareketi özellikleri bölgeye uygun seçilen yer hareketi azalım ilişkileri ile belirlenmelidir. Sismik kaynak özellikleri, deprem büyüklüğü ve konumu gibi tüm belirsizlikler birarada değerlendirilerek yer hareketlerindeki seviyenin yıllık aşılma olasılığı hesaplanabilmektedir. Olasılıksal sismik tehlike analizi genel olarak beş adımdan oluşmaktadır:

1. Yer hareketine neden olabilecek tüm deprem kaynaklarının tanımlanması.
2. Belirlenen depremleri büyüklüklerine göre kategorize edilmesi.
3. Yer hareketine neden olabilecek olan sismik kaynağın inceleme alanına uzaklığına göre kategorize edilmesi.

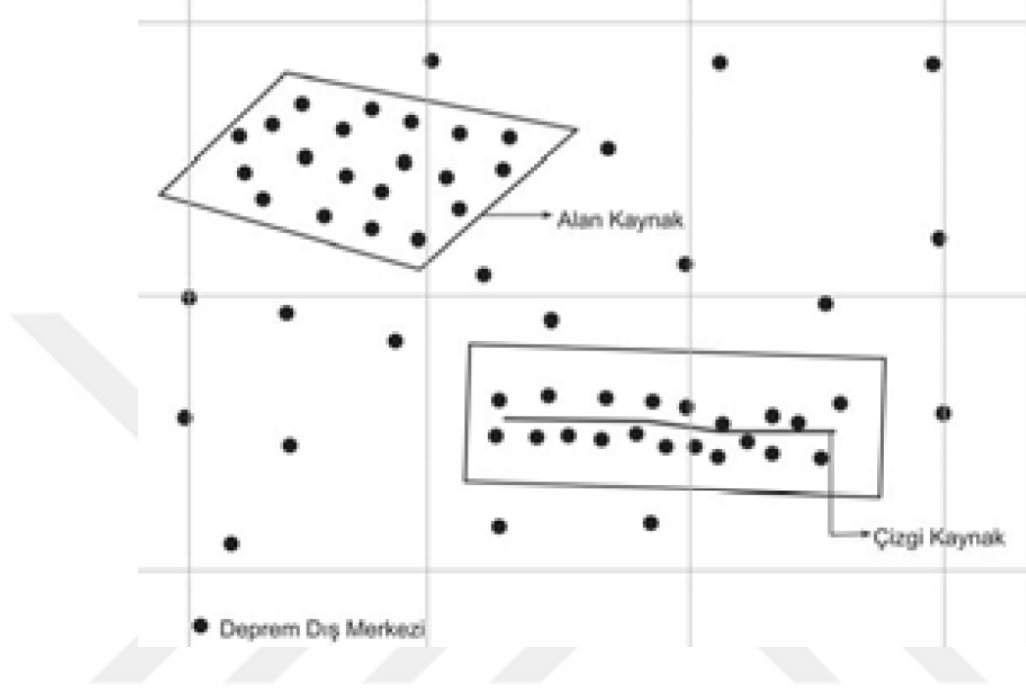
4. Yer hareketinin şiddet dağılımının çeşitli fonksiyonlara deprem büyüklüğü, uzaklık vb. bağlı olarak yer hareketi azalım ilişkileri ile tahmin edilmesi.
5. Deprem büyüklüğü, konumu ve yer hareketi parametrelerindeki belirsizliklerin birarada değerlendirilerek inceleme alanı için yer hareketi ivmesine ve yıllık aşılma olasılığının elde edilmesi.

2.2.1.1 Deprem kaynaklarının tanımlanması

Baker (2013)'e göre OSTA yapılabilmesi için inceleme alanının geçmiş sismisite durumu, bölgesel jeolojisi ve tektonik hareket durumu dikkate alınarak bir plan üzerinde tüm kaynakları gösterecek şekilde bir çalışma yapılması gerekmektedir. Ancak farklı sismik kaynakların yorumlanabilmesi için niceliksel bir irdeleme yapıp yapılamayacağı konusunda pek çok sorunlarla karşılaşmaktadır.

Gelecekte meydana gelmesi muhtemel olan depremlerin sismik tehlike analizi ile irdelenmesinde öncelikli olarak yer hareketine neden olan sismik kaynakların belirlenmesi gerekmektedir. Sismik kaynaklar noktasal, bölgesel ve çizgisel kaynak olarak üçe ayrılmaktadır. Seyrek 2009'a göre küçük bir alan içerisinde meydana gelen depremler, bir fay hattı veya sismik aktivitesi yüksek olan bir alan ile bağlantısı kurulamıyorsa noktasal kaynak olarak dikkate alınabilmektedir. Bölgesel kaynak, gelecekteki sismisite durumu değerlendirilirken, enerji salınımının yeri ve kaynak özellikleri dağılımının zaman içerisinde değişkenlik göstermediği kabul edilen alanlara denilmektedir. Meydana gelen depremlerin bir fay hattı ile bağlantısı olmadığı durumlarda bölgesel kaynak tanımlanabilmektedir. Bu tip kaynak modelinde oluşan depremlerin merkez üssü lokasyonları açık bir şekilde bir alanda kümelenme oluşturmaktadır. Bölgesel kaynaklar değerlendirilirken depremin gerçekleştiği her bir alanın özelliklerinin farklı olduğuna dikkat edilmelidir. Sismolojik olarak en iyi yorumun yapılabilmesi için seçilen tüm bölgesel kaynaklar, ileride meydana gelecek olan depremlerin ve deprem karakteristiğinin daha günümüzdeyken anlaşılabilmesini sağlamaktadır. Birbirine yakın iki bölge benzer jeofizik özelliklere sahip ancak, gerilme dağılımları birbirinden farklılık gösteriyorsa, bu durumda bu iki alan birbirinden ayrı olarak birer bölgesel kaynak olarak değerlendirilmelidir. Diğer kaynak tipi olan çizgisel kaynaklar ise depremlerin meydana gelmesine neden olan tektonik özellikteki alanlar ve fay hatlarıdır. Çizgisel kaynak diğer bir söyleyişle fay hatlarını tanımlamak amacıyla kullanılan bir modeldir. Geçmiş deprem lokasyonları gibi

düzlemsel yüzeyde tanımlanan faylar bu kaynaklardan biridir. İnceleme alanı kapsamında tek bir özgün fay hattı tanımlanamıyor ise depremin gerçekleştiği herhangi bir yerdeki bölgesel alanlar da yer hareketine neden olan sismik kaynak olarak nitelendirilebilir. Sismik tehlike analizi uygulamalarında en çok çizgisel ve bölgesel kaynak kullanılmaktadır.



Şekil 2.3 : Sismik tehlike analizinde tanımlanan sismik kaynak tipi örneği (Seyrek, 2009).

Geçmişteki sismisite değerlendirilirken yer kabuğundaki gerilme durumuna bağlı olarak kayma hareketinin gerçekleştiği zayıf bölgeler ve kayma gerilmesinin kayma hareketini tetikleyecek kadar yüksek olması durumları dikkate alınır. Böylece geçmişte gerçekleşen depremlere bağlı olarak gelecekte meydana gelebilecek olan depremler irdelenebilmektedir.

Baker (2013)'e göre sismik kaynak belirlenirken genel olarak iki adım takip edilir. İlk olarak, gelecekte meydana gelecek olan depremin geçmişteki lokasyonunda gerçekleştiği kabul edilir ve bir alan içerisindeki sismik kaynaklar tanımlanır. Basit bir mantıkla, kabuktaki enerjinin deprem oluşturabilecek kadar fazla olduğu bölgeler ve hala enerji salınımı gerçekleştiren fayların olduğu alanların eski deprem bölgesi olduğu kabul edilmektedir. İkinci olarak kabuktaki gerilmelerin neden olduğu tektonik hareketlere göre sismik kaynak belirlenebilmektedir.

2.2.1.2 Deprem büyüklüğünün (magnitüd) tanımlanması

Tektonik faylar tarafından farklı büyüklüklere sahip depremler üretilebilmektedir. Deprem büyüklüğü ile ilgili çalışmalar ilk olarak Gutenberg ve Richter tarafından 1944 yılında yapılmıştır. Ulutaş (2012)'ye göre Gutenberg ve Richter'in geliştirdiği olasılıksal ilişki ile gelecekte oluşabilecek depremlerin büyüklükleri, geçmiş deprem bilgilerine bakılarak belirlenebilmektedir. Bir inceleme alanında veya fay üzerinde, belirlenen magnitüdden daha büyük bir magnitüde sahip oluşabilecek depremlerin sayısı "Gutenberg-Richter Tekrarlanma Kanunu" yardımıyla belirlenebilmektedir. Aşağıda denklem 2.1'de belirtilen λ_m ifadesi m 'den daha büyük magnitüdlü deprem oluşma olasılığıdır. Denklemde belirtilen a ve b değerleri ise geçmişte meydana gelen deprem ve jeolojik kanıtların dikkate alınmasıyla yapılan istatistiksel analiz sonucu tahmin edilebilen birer sabit katsayıdır. a katsayısı kabuğun deprem üretkenliği, b katsayısı ise kabuktaki gerilme ile ters orantılı olup deprem oluşumun fiziki ile ilişkilidir (Yalçın ve diğ., 2013).

$$\log \lambda_m = a - bm \quad (2.1)$$

Yukarıda belirtilen Gutenberg-Richter tekrarlanma kanunu geliştirilerek kümülatif dağılım fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Aşağıda denklem 2.2'de gösterilen kümülatif dağılım fonksiyonunda belirtilen $m_{\min}$ minimum magnitüdlü depremi ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} F_M(m) &= P(M \leq m | M > m_{\min}) \\ &= \frac{\lambda_{m_{\min}} - \lambda_m}{\lambda_{m_{\min}}} \\ &= \frac{10^{a-bm_{\min}} - 10^{a-bm}}{10^{a-bm_{\min}}} \\ &= 1 - 10^{-b(m-m_{\min})}, \quad m > m_{\min} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Burada belirtilen $F_M(m)$ belli bir " M " büyüklüğü için kümülatif dağılım fonksiyonunu belirtmektedir. Bu fonksiyon geliştirilerek olasılıksal yoğunluk fonksiyonu, $f_M(m)$, olarak denklem 2.3'te tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} f_M(m) &= \frac{d}{dm} F_M(m) \\ &= \frac{d}{dm} [1 - 10^{-b(m-m_{\min})}] \\ &= b \ln(10) 10^{-b(m-m_{\min})}, \quad m > m_{\min} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Bir inceleme bölgesindeki deprem büyüklüklerinin genel olarak bir üst limiti bulunmaktadır. Eğer maksimum magnitüd belirlenebilirse, yukarıdaki denklemler denklem 2.4 ve denklem 2.5'te gösterildiği gibi tanımlanabilir. Bu limitlerin dikkate alındığı büyüklük dağılımı “Sınırlandırılmış Gutenberg-Richter Tekrarlanma Kanunu” olarak ifade edilmektedir.

$$F_M(m) = \frac{1 - 10^{-b(m-m_{\min})}}{1 - 10^{-b(m_{\max}-m_{\min})}}, \quad m_{\min} < m < m_{\max} \quad (2.4)$$

$$f_M(m) = \frac{b \ln(2.10) 10^{-b(m-m_{\min})}}{1 - 10^{-b(m_{\max}-m_{\min})}}, \quad m_{\min} < m < m_{\max} \quad (2.5)$$

Belirli bir inceleme alanı içerisindeki minimum ve maksimum büyüklükteki depremler dikkate alınır. Olasılıksal sismik tehlike analizi için genelde 0.1 veya daha küçük magnitüd aralıkları seçilerek her bir büyüklük değeri için kümülatif dağılım fonksiyonları hesaplanır. Belirlenen aralıktaki her bir magnitüd değeri için ayrı ayrı oluşma olasılıkları ise ardı ardına gelen kümülatif fonksiyon değerleri arasındaki fark $[F_M(m_{j+1}) - F_M(m_j)]$ olarak hesaplanabilir. Her bir büyüklükteki depremin oluşma olasılığının hesaplanmasına ilişkin ifade denklem 2.6'da verilmiştir. Bu bölümde verilen tüm denklemler Baker (2013)'den alıntılanmıştır.

$$P(M = m_j) = F_M(m_{j+1}) - F_M(m_j) \quad (2.6)$$

Sismik kaynaklar için beklenen maksimum deprem büyüklüğünün önceden öngörülebilmesi için yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda oluşabilecek deprem büyüklüğü; fayın yüzey kırığı uzunluğu, fay yırtılma alanı veya maksimum yerdeğiştirme fonksiyonlarına bağlı olarak tanımlanmıştır. 1994 yılında Wells ve Coppersmith dünya genelinde meydana gelen büyüklükleri 4.8 ile 8.1 arasında değişen depremler için bir çalışma yapmıştır (Seyrek, 2009). Bu çalışmada odak derinliği 40km'den daha az olan 244 adet deprem kaydını kullanarak farklı fay tipleri için ampirik ifadeler belirlemiştir. Wells ve Coppersmith'in farklı fay tipleri için moment magnitüdü (M_w), yüzey kırığı uzunluğu (L), yırtılma alanı (A) ve maksimum yüzey yer değiştirme (D) parametrelerine bağlı olarak geliştirdiği denklemler Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu çizelgede gösterilen σ_{Mw} , standart sapma değerini ifade etmektedir. L ifadesi km, A ifadesi km^2 ve D ifadesi m cinsinden ifade edilmiştir.

Çizelge 2.1 : Wells ve Coppersmith’in farklı fay tipleri için geliştirdiği ilişkiler,
Seyrek (2009)’dan düzenlenmiştir.

Fay Tipi	Denklem	σ_{M_w}
Doğrultu atımlı	$M_w = 5.16 + 1.12 \log L$	0.28
Ters	$M_w = 5.00 + 1.22 \log L$	0.28
Normal	$M_w = 4.86 + 1.32 \log L$	0.34
Hepsi	$M_w = 5.08 + 1.16 \log L$	0.28
Doğrultu atımlı	$M_w = 3.98 + 1.02 \log A$	0.23
Ters	$M_w = 4.33 + 1.09 \log A$	0.25
Normal	$M_w = 3.93 + 1.02 \log A$	0.25
Hepsi	$M_w = 4.07 + 0.98 \log A$	0.24
Doğrultu atımlı	$M_w = 6.81 + 0.78 \log D$	0.29
Ters	$M_w = 6.52 + 0.44 \log D$	0.52
Normal	$M_w = 6.61 + 0.71 \log D$	0.34
Hepsi	$M_w = 6.69 + 0.74 \log D$	0.40

2.2.1.3 Deprem uzaklığının tanımlanması

İnceleme alanındaki yer hareketlerini tahmin edebilmek için deprem uzaklıklarının dağılımı belirlenmelidir. Belirli bir fayın üzerindeki her bir noktada depremin gerçekleşme olasılığı eşit olarak kabul edilmektedir. Deprem kaynaklarının belirlenen inceleme alanına uzaklıklarının dağılımının belirlenmesi için sadece kaynağın geometrisi kullanılır.

▪ Bölgesel Kaynak

İnceleme alanında bölgesel bir kaynak için 100 km uzaklık içerisinde kalan her bir noktada kaynağın eşit olasılıkla deprem üreteceği kabul edilmektedir. Sismik kaynağın inceleme alanına uzaklık değeri “r” ile ifade edilmektedir. Kaynaktan belli bir uzaklıktaki depreme ait kümülatif dağılım fonksiyonu denklem 2.7’deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned}
 F_R(r) &= P(R \leq r) \\
 &= \frac{r \text{ yarıçaplı dairenin alanı}}{100 \text{ km yarıçaplı dairenin alanı}} \\
 &= \frac{\pi r^2}{\pi (100)^2} \\
 &= \frac{r^2}{10,000}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Burada belirtilen $F_R(r)$ belli bir “r” uzaklığı için kümülatif dağılım fonksiyonunu belirtmektedir. Yukarıda verilen fonksiyon ifadesi uzaklık değerlerine göre kategorize edildiğinde denklem 2.8’de gösterildiği gibi geliştirilmiştir.

$$F_R(r) = \begin{cases} 0 & r < 0 \\ \frac{r^2}{10,000} & 0 \leq r < 100 \\ 1 & r \geq 100 \end{cases} \quad (2.8)$$

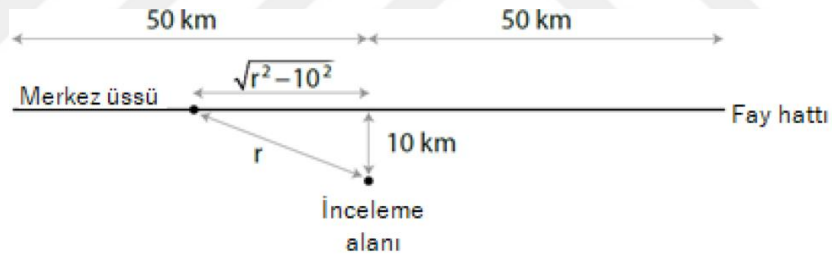
Yukarıda verilen kümülatif dağılım fonksiyonunun türevi alınarak, $f_R(r)$ olasılıksal dağılım fonksiyonu her bir uzaklık değeri için aşağıda denklem 2.9’da ifade edilmiştir.

$$f_R(r) = \frac{d}{dr} F_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{5000} & 0 \leq r < 100 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.9)$$

Gelecekte gerçekleşmesi muhtemel bir depremin kaynaktan uzaklığına bağlı olarak oluşma olasılığı, kümülatif dağılım fonksiyonu ve olasılıksal dağılım fonksiyonları hesaplanarak grafiksel olarak gösterilebilmektedir.

▪ *Çizgisel Kaynak*

Şekil 2.4’te örnek verilen modelde çizgisel bir kaynak olarak 100 km’lik bir fay hattı dikkate alınmıştır. Verilen örnek modeldeki inceleme alanı, fayın merkezinden 10 km uzaklıkta bulunmaktadır. Depremin merkez üstü (epicenter) ile inceleme alanı arasındaki mesafe “r” ile gösterilmiştir. Pisagor teoremi yardımıyla depremin merkez üstü ile fayın merkezi arasındaki uzaklık hesaplanmıştır.



Şekil 2.4 : Bir inceleme alanı ve fay hattının gösterildiği örnek plan,
Baker (2013)’ten uyarlanmıştır.

Bu bilgiler kullanılarak R’ye bağlı olarak kümülatif dağılım fonksiyonu aşağıdaki denklem 2.10’da belirtildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} F_R(r) &= P(R \leq r) \\ &= \frac{\text{Merkez üssü } r \text{ uzaklığında kalan fay kısmının uzunluğu}}{\text{Toplam fay uzunluğu}} \\ &= \frac{2\sqrt{r^2 - 10^2}}{100} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Yukarıda verilen fonksiyon ifadesi uzaklık değerlerine göre kategorize edildiğinde denklem 2.11’deki gibi geliştirilmiştir.

$$F_R(r) = \begin{cases} 0 & r < 10 \\ \frac{2\sqrt{r^2-10^2}}{100} & 10 \leq r < 51 \\ 1 & r \geq 51 \end{cases} \quad (2.11)$$

Yukarıda verilen kümülatif dağılım fonksiyonunun türevi alınarak, olasılıksal dağılım fonksiyonu her bir uzaklık değeri için aşağıda denklem 2.12’de ifade edilmiştir. Bu bölümde verilen tüm denklemler Baker (2013)’den alıntılanmıştır.

$$f_R(r) = \frac{d}{dr}F_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{50\sqrt{r^2-100}} & 10 \leq r < 51 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.12)$$

İleride gerçekleşebilecek olası bir depremin kaynaktan uzaklığına göre meydana gelme olasılığı, kümülatif dağılım fonksiyonu ve olasılıksal dağılım fonksiyonlarına göre grafiksel olarak gösterilebilmektedir.

2.2.1.4 Yer hareketi azalım ilişkileri ve olasılıksal bağıntılar

Depreme dayanıklı yapı tasarımı yapılırken tasarım deprem hareketi kullanılmaktadır. Yer hareketi azalım ilişkileri ile maksimum yüzey ivmesi, maksimum anakaya ivmesi veya herhangi bir periyottaki ivme değeri gibi karakteristik yer hareketi parametreleri gerçekleşen depremlerin büyüklük ve uzaklığına bağlı olarak değişimi hesaplanmaktadır. Özellikle son yıllarda sıklıkla kullanılan olasılıksal sismik tehlike analizlerinde depremlerin tekrar meydana gelme sıklığı, büyüklük, konum ve yer hareketi özelliklerinin belirlenebilmesi için azalım ilişkileri önemli derecede rol oynamaktadır.

Azalım ilişkileri, bir bölgede gerçekleşen kuvvetli yer hareketleri incelenerek regresyon analizi yoluyla geliştirilmektedir. Zaman içerisinde meydana gelen daha kuvvetli deprem hareketleri de dikkate alınarak güncelleştirilmektedir. Son yıllarda geliştirilen azalım ilişkileri; depremin büyüklük, uzaklık ve yerel zemin koşullarına bağlı olarak verilmektedir. Sismik tehlike analizlerinde kullanılacak yer hareketi azalım ilişkisi, bölgedeki fay tipine de uygun olarak belirlenmelidir.

Gelecekte gerçekleşmesi olası depremlerin büyüklük ve lokasyon dağılımının belirlenmesinin ardından, yer hareketinin şiddetinin muhtemel dağılımının tahmin edilmesi amacıyla yer hareketi tahmin modeli kullanılmaktadır. Bu modelden elde edilecek olan yer hareketi şiddetinin dağılım olasılığı depremin büyüklüğü, uzaklığı, fay mekanizması ve arazi koşulları gibi pek çok faktöre bağlıdır. Bu tahmin modeli ile tek bir yer hareketi şiddeti için değil, birçok yer hareketi şiddetleri için dağılım olasılığı

belirlenebilmektedir. Cornell'in 1979 yılında geliştirdiği modelde $\ln PGA$ 'nın (peak ground acceleration) ortalama değeri denklem 2.13'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\overline{\ln PGA} = -0.152 + 0.859M - 1.803 \ln(R + 25) \quad (2.13)$$

Yukarıda verilen bu denklemde “M” deprem büyüklüğünü, “R” ise uzaklığı ifade etmektedir. Bu denklemde verilen en büyük yer ivmesinin (PGA) birimi g olarak tanımlanmaktadır.

Gelecekte olması muhtemel bir depreme ait herhangi bir PGA (en büyük yer ivmesi) değerini aşma olasılığı aşağıda denklem 2.14'te belirtilen ifade kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu ifadede belirtilen “ $\phi(z)$ ”, standart normal kümülatif dağılım fonksiyonudur. Normal dağılım metotunun kullanılmasında öncelikle “z” sayısı hesaplanmalıdır. “z” sayısının belirlenmesinden ardından Çizelge 2.2'de verilen normal dağılım tablosu kullanılarak, gelecekte gerçekleşmesi beklenen bir deprem için belirlenen PGA değerinin altında oluşma olasılığı bulunabilmektedir. Ancak bu değer aşılma olasılığını sorguladığımız için “ $1 - \phi(z)$ ” ifadesi hesaplanarak belirlenmelidir. Elde edilen bu değer ile ileride gerçekleşmesi olası bir depremin, belirli bir PGA değerini aşma olasılığı belirlenebilmektedir.

$$P(PGA > x|m, r) = 1 - \Phi \left(\frac{\ln x - \overline{\ln PGA}}{\sigma_{\ln PGA}} \right)$$

“z” sayısı

$$= 1 - \phi(z) \quad (2.14)$$

Yukarıda verilen kümülatif dağılım fonksiyonu, olasılıksal dağılım fonksiyonun integralinin alınmasıyla denklem 2.15 elde edilmektedir.

$$P(PGA > x|m, r) = \int_x^{\infty} f_{PGA}(u) du \quad (2.15)$$

Yukarıda verilen her iki denklem geliştirilerek denklem 2.16'deki gibi tanımlanabilmektedir. Bu bölümde verilen tüm denklemler Baker (2013)'ten alıntılanmıştır.

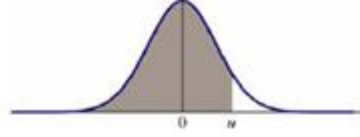
$$P(PGA > x|m, r) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sigma_{\ln PGA} \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln u - \overline{\ln PGA}}{\sigma_{\ln PGA}} \right)^2 \right) du \quad (2.16)$$

Standart normal dağılım tablosu aşağıda verilmektedir.

Çizelge 2.2 : Standard normal kümülatif dağılım fonksiyonu (Z) tablosu,
Baker, (2013)'ten uyarlanmıştır.

$$\Phi(u) = F_V(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx$$

$$\Phi(-u) = 1 - \Phi(u)$$



u	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1	0.84134	0.84375	0.84614	0.84849	0.85083	0.85314	0.85543	0.85769	0.85993	0.86214
1.1	0.86433	0.86650	0.86864	0.87076	0.87286	0.87493	0.87698	0.87900	0.88100	0.88298
1.2	0.88493	0.88686	0.88877	0.89065	0.89251	0.89435	0.89617	0.89796	0.89973	0.90147
1.3	0.90320	0.90490	0.90658	0.90824	0.90988	0.91149	0.91309	0.91466	0.91621	0.91774
1.4	0.91924	0.92073	0.92220	0.92364	0.92507	0.92647	0.92785	0.92922	0.93056	0.93189
1.5	0.93319	0.93448	0.93574	0.93699	0.93822	0.93943	0.94062	0.94179	0.94295	0.94408
1.6	0.94520	0.94630	0.94738	0.94845	0.94950	0.95053	0.95154	0.95254	0.95352	0.95449
1.7	0.95543	0.95637	0.95728	0.95818	0.95907	0.95994	0.96080	0.96164	0.96246	0.96327
1.8	0.96407	0.96485	0.96562	0.96638	0.96712	0.96784	0.96856	0.96926	0.96995	0.97062
1.9	0.97128	0.97193	0.97257	0.97320	0.97381	0.97441	0.97500	0.97558	0.97615	0.97670
2	0.97725	0.97778	0.97831	0.97882	0.97932	0.97982	0.98030	0.98077	0.98124	0.98169
2.1	0.98214	0.98257	0.98300	0.98341	0.98382	0.98422	0.98461	0.98500	0.98537	0.98574
2.2	0.98610	0.98645	0.98679	0.98713	0.98745	0.98778	0.98809	0.98840	0.98870	0.98899
2.3	0.98928	0.98956	0.98983	0.99010	0.99036	0.99061	0.99086	0.99111	0.99134	0.99158
2.4	0.99180	0.99202	0.99224	0.99245	0.99266	0.99286	0.99305	0.99324	0.99343	0.99361
2.5	0.99379	0.99396	0.99413	0.99430	0.99446	0.99461	0.99477	0.99492	0.99506	0.99520
2.6	0.99534	0.99547	0.99560	0.99573	0.99585	0.99598	0.99609	0.99621	0.99632	0.99643
2.7	0.99653	0.99664	0.99674	0.99683	0.99693	0.99702	0.99711	0.99720	0.99728	0.99736
2.8	0.99744	0.99752	0.99760	0.99767	0.99774	0.99781	0.99788	0.99795	0.99801	0.99807
2.9	0.99813	0.99819	0.99825	0.99831	0.99836	0.99841	0.99846	0.99851	0.99856	0.99861
3	0.998650									
3.5	0.999767									
4	0.999968									
4.5	0.9999966									
5	0.9999997									

İnceleme bölgesi için en uygun azalım ilişkisinin belirlenebilmesi dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır. Analizde kullanılacak yer hareketi tahmin denklemlerinin seçimi, olasılıksal sismik tehlike analizlerinde sismik tehlikenin fiziksel parametrelerinin oluşturulabilmesi için temel adımı oluşturmaktadır. Ulutaş (2012), inceleme alanında faylara yakın bulunan yerlerde azalım ilişkileri kullanılırken bu bölgelerde fay uzaklığı ve deprem büyüklüğüne bağımlılıkları azaldığını, standart sapma değerlerinin arttığını belirtmektedir.

Bıçak (2018) ile Cambazoğlu ve diğ. (2013) yaptığı çalışmalar incelenerek geliştirilmiş farklı yer hareketi azalım ilişkileri ve özellikleri aşağıdaki Çizelge 2.3'te derlenerek listelenmiştir. Abrahamson ve Silva 2008 NGA Modeli, Boore ve Atkinson 2008 NGA Modeli, Kalkan ve Gülkan 2005 Modeli, Chiou ve Youngs 2008 Modeli, Sadigh ve diğ. 1997 Modeli ile Zhao ve diğ. 2006 Modeli yer hareketi azalım ilişkileri kabul edilen bazı sismik parametreler ile beraber aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Çizelgede NGA olarak belirtilen ifade yeni nesil azalım ilişkilerini [(New Generation Attenuation Relationships (NGA))] ifade etmektedir.

Çizelge 2.3 : Olasılıksal sismik tehlike hesaplarında kullanılan bazı yer hareketi azalım ilişkileri ve özellikleri, Bıçak (2018) ile Cambazoğlu ve diğ. (2013)'ten uyarlanmıştır.

Azalım İlişkisi	Bölge	M _{min}	M _{max}	r _{max} (km)	M _{scale}
Abrahamson and Silva 2008 NGA	Dünya geneli	4.27	7.90	200	M _w
Boore ve Atkinson 2008 NGA	Dünya geneli	4.27	8.00	280	M _w
Kalkan ve Gülkan 2005	Türkiye	4.00	7.40	250	M _w
Chiou ve Youngs 2008	Batı Amerika ve Tayvan	4.00	8.50	200	M _w
Sadigh ve diğ. 1997	Kaliforniya	3.80	7.40	305	M _w
Zhao ve diğ. 2006	Japonya, İran ve Amerika	5.00	8.30	300	M _w

Abrahamson ve Silva (2008) dünya genelinde gerçekleşmiş olan 135 adet depremi ve 2754 adet deprem kaydını inceleyerek yeni nesil yer hareketi azalım ilişkisi modeli geliştirmişlerdir. “Abrahamson and Silva 2008 NGA” modeli olarak bilinen yer hareketi azalım ilişkisi denklem 2.17’de verilmektedir. Bu model maksimum 200km’ye kadar minimum 5.0 büyüklüğündeki sismik tehlike analizlerinde

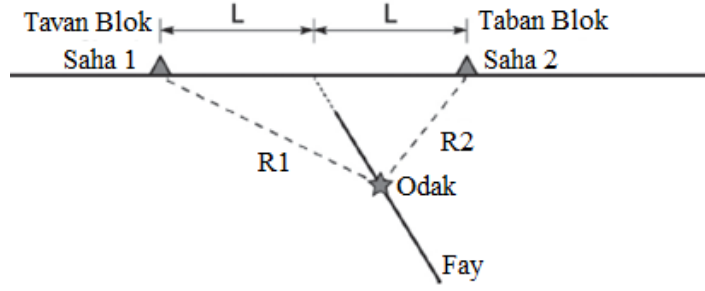
kullanılabilmektedir. Spektral periyot değeri maksimum 10s olan analizler için geçerli olmaktadır. Bu model geliştirilirken ülkemiz sınırları dahilinde meydana gelmiş olan 1976 Çaldıran, 1979 Dursunbey, 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1999 Kocaeli ve 1999 Düzce depremleri de dikkate alınmıştır (Abrahamson ve Silva, 2008).

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + a_{12}F_{RV} + a_{13}F_{NM} + a_{15}F_{AS} + f_5(PGA_{1100}, V_{S30}) + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, \delta, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_8(R_{rup}, M) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) \quad (2.17)$$

Bu ifadede geçen parametreler ve anlamları şu şekildedir:

M	: Deprem büyüklüğü (moment)
R _{rup}	: Fay kırığı uzaklığı (km) [deprem kayıtları ile fay kırığı uzaklığı]
R _{jb}	: Joyner- Boore uzaklığı (km) [deprem kayıt istasyonu ile merkez üssü (epicenter) arasındaki en kısa mesafe uzaklığı]
R _x	: Kırığın üst kenarından yatay uzaklığı (km)
Z _{tor}	: Kırığın en üstünün derinliği (km)
F _{RV}	: Ters faylanmayı temsil eden değişken
F _{NM}	: Normal faylanmayı temsil eden değişken
F _{AS} (veya AS)	: Artçı dalgaları temsil eden değişken
F _{HW}	: Tavan bloğu (hanging wall) etkisini temsil eden değişken
Z _{1.0}	: V _s =1.0 km/s olan derinlik (m)
W	: Aşağı yönelimli kırık genişliği (km)
δ	: Fay eğimi (derece)
PGA ₁₁₀₀	: (V _s) ₃₀ = 1100 m/s için medyan en büyük ivme (g)
f ₁ , f ₄ ,..., f ₁₀	: Deprem büyüklüğü ve R _{rup} 'a bağlı fonksiyonlar
a ₁₂ , a ₁₃ , a ₁₅	: Regresyon analizi ile elde edilen katsayılar

Tavan blok (hanging wall) etkisi doğrudan fay mekanizması ile ilgilidir ve doğrultu atımlı faylar için değerlendirilemez. Şekil 2.5'te gösterilen tavan bloktaki (hanging-wall) yer hareketleri, taban blok (foot-wall) yer hareketinden sistematik olarak daha yüksek değerler göstermektedir. Ayrıca bu etki aynı mesafedeki taban blok kısmına kıyasla, tavan blokta daha büyük kısa periyot yer hareketlerine neden olmaktadır.



Şekil 2.5 : Tavan blok (Hanging-wall) ve taban blok (Foot-wall)
(Li ve Xie, 2007).

Campbell ve Bozorgnia (2008) aralarında 1976 Çaldıran, 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1999 Düzce ve 1999 Kocaeli depremlerinin de olduğu toplam 64 adet deprem ve bu depremlere ait 1561 adet deprem kaydını irdeleyerek çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu model %5 sönüm oranı için 0.01s ve 10s periyotları için geçerli olmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda yeni nesil yer hareketi azalım ilişkisi modeli geliştirmişlerdir. “Campbell and Bozorgnia 2008 NGA” modeli olarak bilinen yer hareketi azalım ilişkisi denklem 2.18’de verilmektedir. Bu azalım ilişkisi maksimum 200 km’ye kadar sismik tehlike analizlerinde kullanılabilmektedir (Campbell ve Bozorgnia, 2008).

$$\ln \hat{Y} = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} \quad (2.18)$$

Bu ifadede geçen ilk terim büyüklük ile ilişkilidir ve denklem 2.19’daki gibi belirlenebilmektedir:

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1 M; & M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 5.5); & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 5.5) + c_3 (M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases} \quad (2.19)$$

Cambell and Bozorgnia 2008 NGA yer hareketi azalım ilişkisinde geçen ikinci terim denklem 2.20’deki gibi hesaplanabilmektedir. Bu ifadede geçen R_{rup} , deprem kayıtları ile fay kırığı uzaklığı km cinsinden verilmelidir.

$$f_{dis} = (c_4 + c_5 M) \ln(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_6^2}) \quad (2.20)$$

Fay mekanizmasını tanımlayan 3. terim ise denklem 2.21’deki gibi belirlenebilmektedir.

$$f_{flt} = c_7 F_{RV} f_{flt,Z} + c_8 F_{NM}$$

$$f_{flt,Z} = \begin{cases} Z_{TOR}; & Z_{TOR} < 1 \\ 1; & Z_{TOR} \geq 1 \end{cases} \quad (2.21)$$

Tavan bloğu (hanging wall) etkisinin dikkate alındığı 4.terim ise denklem 2.22'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$f_{hng} = c_9 f_{hng,R} f_{hng,M} f_{hng,Z} f_{hng,\delta}$$

$$f_{hng,R} = \begin{cases} 1; & R_{JB} = 0 \\ [\max(R_{RUP}, \sqrt{R_{JB}^2 + 1}) - R_{JB}] / \max(R_{RUP}, \sqrt{R_{JB}^2 + 1}); & R_{JB} > 0, Z_{TOR} < 1 \\ (R_{RUP} - R_{JB}) / R_{RUP}; & R_{JB} > 0, Z_{TOR} \geq 1 \end{cases}$$

$$f_{hng,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 6.0 \\ 2(M - 6.0); & 6.0 < M < 6.5 \\ 1; & M \geq 6.5 \end{cases}$$

$$f_{hng,Z} = \begin{cases} 0; & Z_{TOR} \geq 20 \\ (20 - Z_{TOR}) / 20; & 0 \leq Z_{TOR} < 20 \end{cases}$$

$$f_{hng,\delta} = \begin{cases} 1; & \delta \leq 70 \\ (90 - \delta) / 20; & \delta > 70 \end{cases} \quad (2.22)$$

Campbell and Bozorgnia 2008 NGA modelindeki sığ alanlardaki tepkiyi ifade eden terim ise denklem 2.23'te gösterilmektedir.

$$f_{site} = \begin{cases} c_{10} \ln\left(\frac{V_{S30}}{k_1}\right) + k_2 \left\{ \ln\left[A_{1100} + c\left(\frac{V_{S30}}{k_1}\right)^n\right] - \ln[A_{1100} + c] \right\}; & V_{S30} < k_1 \\ (c_{10} + k_2 n) \ln\left(\frac{V_{S30}}{k_1}\right); & k_1 \leq V_{S30} < 1100 \\ (c_{10} + k_2 n) \ln\left(\frac{1100}{k_1}\right); & V_{S30} \geq 1100 \end{cases} \quad (2.23)$$

Son yıllarda yaygın olarak kullanılan Campbell ve Bozorgnia'nın yeni nesil yer hareketi azalım ilişkisinde geçen son terim ise inceleme alanı ile ilişkili olup denklem 2.24'teki gibi hesaplanabilmektedir.

$$f_{sed} = \begin{cases} c_{11}(Z_{2.5} - 1); & Z_{2.5} < 1 \\ 0; & 1 \leq Z_{2.5} \leq 3 \\ c_{12} k_3 e^{-0.75[1 - e^{-0.25(Z_{2.5}-3)}]}; & Z_{2.5} > 3 \end{cases} \quad (2.24)$$

Campbell and Bozorgnia 2008 NGA modelinde geçen c, n ve k birer teorik katsayı ike c_i ise amplitik bir katsayıdır. Denklem 2.22'de geçen A₁₁₀₀ terimi ortalama medyan PGA (g) değeridir. Z_{2.5} terimi Vs =2.5 km/s olan derinliği (m) ifade etmektedir.

Yaygın olarak kullanılan bir diğer yer hareketi azalım ilişkisi 2008 yılında Chiou ve Youngs tarafından geliştirilmiştir. 125 adet deprem ve bu depremlere ait 1950 adet deprem kaydını irdeleyerek çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu model %5 sönüm oranı için 0.01s ve 10s periyotları için geçerli olmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda yeni nesil yer hareketi azalım ilişkisi modeli geliştirmişlerdir. “Chiou and Young 2008 NGA” modeli olarak bilinen yer hareketi azalım ilişkisi denklem 2.25’te verilmektedir. Denklemde verilen son iki terim birer rastgele değişkenlerdir. Bu model maksimum 200km’ye kadar minimum 4.0 büyüklüğündeki sismik tehlike analizlerinde kullanılabilmektedir (Chiou ve Youngs, 2008).

$$\begin{aligned}
\ln(y_{ij}) = & \ln(y_{ref_{ij}}) + \phi_1 \cdot \min\left(\ln\left(\frac{V_{S30j}}{1130}\right), 0\right) \\
& + \phi_2 \{e^{\phi_3(\min(V_{S30j}, 1130) - 360)} - e^{\phi_3(1130 - 360)}\} \ln\left(\frac{y_{ref_{ij}} e^{\eta_i} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\
& + \phi_5 \left(1 - \frac{1}{\cosh[\phi_6 \cdot \max(0, Z_{1.0} - \phi_7)]}\right) + \frac{\phi_8}{\cosh[0.15 \cdot \max(0, Z_{1.0} - 15)]} \\
& + \eta_i + \varepsilon_{ij}
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Denklem 2.25’te verilen $\ln(y_{ref_{ij}})$ ifadesi Chiou ve Young (2008) tarafından aşağıda denklem 2.26’da tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned}
\ln(y_{ref_{ij}}) = & c_1 + [c_{1a} F_{RVi} + c_{1b} F_{NMi} + c_7 (Z_{TORi} - 4)] (1 - AS_i) + [c_{10} + c_{7a} (Z_{TORi} - 4)] AS_i \\
& + c_2 (\mathbf{M}_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - \mathbf{M}_i)}) \\
& + c_4 \ln[R_{RUPij} + c_5 \cosh\{c_6 \max(\mathbf{M}_i - c_{HM}, 0)\}] \\
& + (c_{4a} - c_4) \ln(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}) \\
& + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh[\max(\mathbf{M}_i - c_{\gamma 3}, 0)]} \right\} R_{RUPij} \\
& + c_9 F_{HWij} \tanh\left(\frac{R_{Xij} \cos^2 \delta_i}{c_{9a}}\right) \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{JBij}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 0.001} \right\}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

En büyük yer ivmesi değerinin tahmin edilebilmesi için kullanılabilecek Türkiye için yerel azalım ilişkisi modeli olan Akkar ve Bommer'in 2007'de geliştirmiş olduğu ifade denklem 2.27'de verilmektedir. Bu çalışma 532 adet deprem kaydı kullanılarak yapılmıştır. Akkar ve Bommer (2007) yer hareketi azalım ilişkisi modeli $5 \leq M_W < 7.6$ deprem büyüklük aralığının geçerli olması durumunda kullanılabilmektedir. Bu çalışma aynı zamanda deprem kayıt istasyonu ile merkez üssü (epicenter) arasındaki en kısa mesafe uzaklığı olan R_{jb} 'nin maksimum 100 km olduğu durumlar ile sınırlandırılmıştır. (Güllü ve İyisan, 2015).

$$\log(PGA) = 1.647 + 0.767M - 0.074M^2 + (-3.162 + 0.321M)\log(R_{jb}^2 + 7.682^2)^{0.5} + 0.105S_S + 0.020S_A - 0.045F_N + 0.085F_R \quad (2.27)$$

Bu ifadede verilen PGA en büyük yer ivmesi değeri gals birimindedir. M, deprem büyüklüğü (moment magnitude), R_{jb} Joyner- Boore uzaklığı (km) temsil etmektedir. Denklem 2.26'da verilen diğer terimler şu şekilde belirlenebilmektedir:

Yumuşak zemin koşulları $\rightarrow S_S = 1, S_A = 0$

Sert zemin koşulları $\rightarrow S_S = 0, S_A = 1$

Normal fay $\rightarrow F_N = 1, F_R = 0$

Ters fay $\rightarrow F_N = 0, F_R = 1$

Diğer tüm durumlar için bu katsayılar 0 olarak kabul edilmektedir.

Kalkan ve Gülkan (2004) yer hareketi azalım ilişkisi modeli bağıntısı denklem 2.28'de verilmektedir. Bu çalışmada bir inceleme alanı için belirlenebilecek en büyük yer ivmesi (PGA) değeri, kaya ve sert zemin koşulları için tanımlanmaktadır. Bu ifadede $\ln Y$ 'nin standart sapma değeri 0.5126 olarak belirlenmiştir. (Kızılbüğe, 2016).

$$\ln Y = b_1 + b_2 (M_W - 6) + b_3 (M_W - 6)^2 + b_5 \ln(r) + b_v \ln(V_s / V_A) \\ r = (r_{cl}^2 + h^2)^{1/2} \quad (2.28)$$

Bu bağıntıdaki Y en büyük yer ivmesinin yatay bileşeni (g), M moment magnitudünü ifade etmektedir. Bağıntıdaki r_{cl} (km), yırtılma yüzeyinin yeryüzüne olan izdüşümü ile inceleme alanı arasındaki uzaklık, h(km) ise regresyonla bulunan sanal derinliktir.

2.2.1.5 Belirsizliklerin değerlendirilmesi ve sismik tehlike analizi

Gelecekte oluşması muhtemel bir depremin belirli bir PGA değerini aşma olasılığı, o depremin büyüklüğü ve kaynaktan uzaklığının olasılıksal olarak hesaplanabileceği önceki sayfalarda sunulmuştur. "Toplam Olasılık Teoremi (Total Probability

Theorem)” ile tüm bu datalar tek bir denklemde değerlendirilip birleştirilmiştir. Bu teoreme göre aşağıda verilen denklem 2.29 kullanılarak 2 katlı integral hesabı yapılmalıdır.

$$P(IM > x) = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_0^{r_{\max}} P(IM > x|m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (2.29)$$

Yukarıdaki denklem gelecekteki bir depremin aşılma olasılığı, depremin magnitudü ve tek bir kaynaktan uzaklığı ile ilgili bilgileri kapsamaktadır. Ancak o depremin hangi sıklıkta meydana geleceği hakkında yorum yapılamamaktadır.

Yukarıda verilen denklem geliştirilerek tüm bu dataların olasılığının hesaplanmasının yerine minimum magnitüden daha büyük bir depremin oluşma oranı denklem 2.30’da gösterildiği gibi belirlenebilmektedir.

$$\lambda(IM > x) = \lambda(M > m_{\min}) \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_0^{r_{\max}} P(IM > x|m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (2.30)$$

Yer hareketine sebebiyet verecek kaynağın birden fazla olması durumunda aşağıdaki denklem 2.31 kullanılmaktadır. Böylelikle her bir kaynak için yapılan hesaplamalar toplanarak minimum magnitüden daha büyük bir depremin oluşma oranı hesaplanabilmektedir.

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{sources}} \lambda(M_i > m_{\min}) \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_0^{r_{\max}} P(IM > x|m, r) f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dr dm \quad (2.31)$$

Yukarıdaki ifade geliştirilerek denklem 2.32 elde edilmiştir. Bu bölümde verilen tüm denklemler Baker (2013)’ten alıntılanmıştır.

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{sources}} \lambda(M_i > m_{\min}) \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P(IM > x|m_j, r_k) P(M_i = m_j) P(R_i = r_k) \quad (2.32)$$

Verilen son iki denklem olasılıksal sismik tehlike analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu integrasyonlar ile gelecekteki bir depremin meydana gelme oranı, olası büyüklüğü ile bu depremlerin uzaklığı ve bu depremlere bağlı yer hareketi şiddetinin dağılımı hakkında yorum yapılabilmektedir. Tüm bu yaklaşımlar yapılan birçok bilimsel çalışmalar sonucu belirlenmiştir. Belirlenen bir inceleme alanı için yapılacak olasılıksal sismik tehlike analizinde bölgeyi etkisi altına alan sismik kaynaklar, deprem büyüklüğü ve uzaklıklarına göre belirlenebilecek yer hareketi seviyesinin yıllık aşılma olasılığı böylelikle tahmin edilebilmektedir.



3. DEPREM ETKİSİNİN TANIMLANMASI

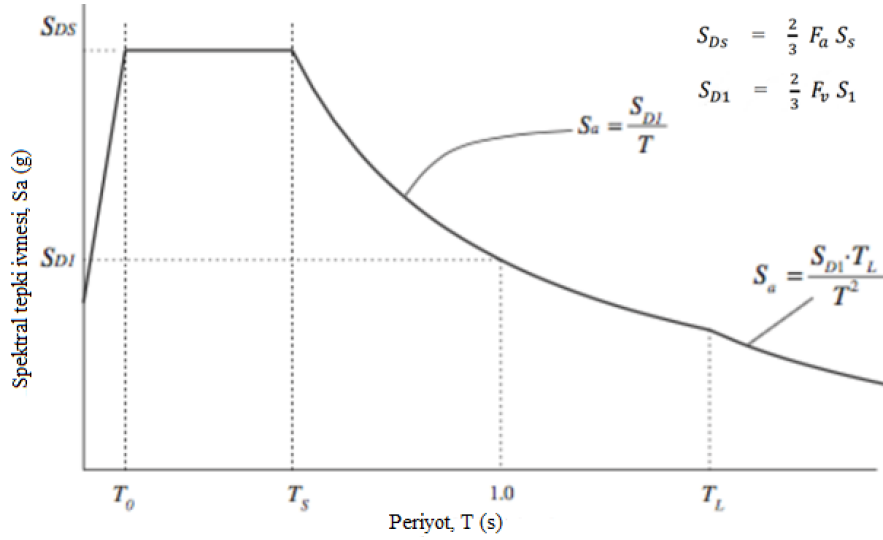
Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için sismik tehlike analizi yapılması amaçlanmaktadır. Sismik tehlike analizi kapsamında ele alınan inceleme alanı için deprem etkilerinin tanımlanması gerekmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin belirli bir sönüm oranı dikkate alınarak gerçekleşen yer hareketi etkisinde görülen tepkinin zamana bağlı değişiminde ivme cinsinden belirlenen maksimum değere spektral ivme adı verilmektedir. Sistemin farklı periyot değerleri için belirlenen spektral ivme değişimine ivme spektrumu denilmektedir (İyisan ve Haşal, 2011). Depreme dayanıklı yapı tasarımında sıklıkla kullanılan bazı yönetmelikler (ASCE 7-16, Eurocode 8 ve Uniform Building Code) ve 2019 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) bu bölümde açıklanmaktadır.

3.1 Mevcut Yönetmelikler

Mühendislik yapılarının depreme dayanıklı tasarımları için tasarım yer hareketinin elde edilmesi ile ilgili ilkeler mevcut deprem yönetmeliklerine dahil edilmiştir. Ülkemizde en yaygın kullanılan ve bilinen yönetmelikler şunlardır; Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018), ASCE 7-16, Eurocode8 (EC8, 2004), UBC-2017.

3.1.1 ASCE 7-16

ABD'de kullanılan ASCE 7-16, yeni binalarda tek seviyeli sismik etkiyi tanımlamaktadır. ASCE 7-16'da, 50 yılda %2'lik aşılma olasılığı (dönüş periyodu 2475 yıl) ile Maksimum dikkate alınan deprem (MCE) etkisi tanımlanmaktadır. Yeni binalardaki performans hedefi "Can Güvenliği (Life Safety)" olarak belirlenmiştir. Ayrıca Maksimum deprem etkisinde, B zemin sınıfı referans alınarak kısa periyot için (0.2 sn) spektral ivme (S_s) ve 1,0 saniye periyot için spektral ivme (S_1) tanımlanmıştır. Yeni yapılan binalarda bu deprem etkisinin 2/3'ünün alınmasını önerilmektedir. Temel tasarım depremi (design basic earthquake, DBE) 50 yılda %10'luk aşılma olasılığı (dönüş periyodu 475 yıl) olarak tanımlanmaktadır. Servis seviyesi depremi (Service level earthquake, SLE) 30 yılda %50'lik aşılma olasılığı (dönüş periyodu 43 yıl) olan yer hareketi tanımlanmıştır.



Şekil 3.1 : Tasarım tepki spektrumu, Adamu (2019)’dan uyarlanmıştır.

ASCE 7-16’da belirlenen tasarım tepki spektrumu çizilmesi için gerekli olan F_a ve F_v zemin katsayıları Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1: Kısa periyot ve 1.0 s periyot için zemin katsayıları, Adamu (2019)’dan uyarlanmıştır.

Kısa Periyot için Zemin Katsayıları					
Zemin Sınıfı	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9

1.0 saniye Periyot için Zemin Katsayıları					
Zemin Sınıfı	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

3.1.2 Eurocode 8 (EC8, 2004)

EC8’de (2004), yeni yapılacak binalar için iki farklı deprem etkisi tanımlanmıştır. 10 senede aşılması olasılığı %10 (dönüş periyodu 95 yıl) olan birinci deprem etkisi için performans hedefi “Hasarın Sınırlandırılması – Damage Limitation” olarak belirtilmiştir. 50 senede aşılması olasılığı %10 (dönüş periyodu 475 yıl) olan ikinci

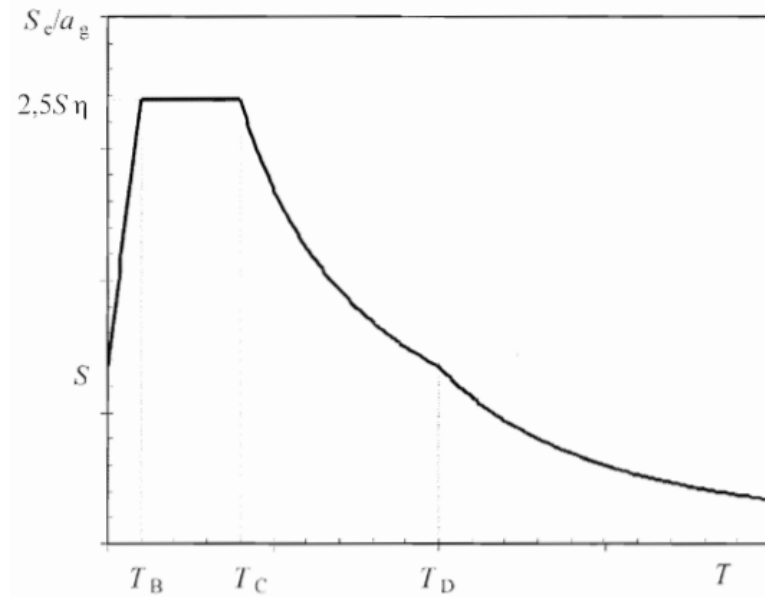
deprem etkisi için ise performans hedefi “Göçmenin Önlenmesi – Collapse Prevention” olarak tanımlanmıştır. Eurocode-8’de bina kullanım amacı ve türüne göre 4 farklı önem sınıfı tanımlanmaktadır. Önem sınıfı II, III ve IV olan yapılarda ve fay hatlarına yakın alanlarda yapılaşma olmaması gerektiği belirtilmektedir. Faya yakın bulunan alanlardaki yapılar için ilave güvenlik durumları hesaba katılmaktadır. Bölgede yer alan fay hatlarının minimum $M_w = 6.5$ büyüklüğünde deprem meydana getirme durumu dikkate alınmalıdır. Önem sınıfı IV olan yapı türleri için fayların yakınlık durumuna göre özel spektrumlar kullanılmaktadır. Yakın saha deprem etkileri ile ilgili yaptırımlar bulunduran diğer yönetmeliklerle kıyaslandığında Eurocode 8 yakın fay etkisini dikkate alma konusunda biraz daha eksik düzeyde kalmaktadır (Mert ve diğ., 2019). Eurocode-8’de verilen tasarım yatay tepki spektrumu Şekil 3.2’de verilmektedir.

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$



Şekil 3.2 : Eurocode-8 tasarım yatay tepki spektrumu (EN 1998-1:2004).

Tasarım spektrumunda geçen S zemin katsayısı, η sönümlenme düzeltme katsayısıdır (viskoz sönüm oranı %5 için $\eta=1$). Sönümlenme düzeltme katsayısı olan, η , denklem 3.1’de verilen ifade ile belirlenebilmektedir (EN 1998-1:2004).

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (3.1)$$

ξ : yapılar için viskoz sönümlenme oranı (%)

Eurocode-8’de 2 tip spektrum tanımlanmaktadır: Tip 1 ve Tip 2. Sismik tehlike analizinde belirlenen bölgeyi en çok etkileyen depremlerin yüzey dalgası yönünden büyüklüğünün (M_s) maksimum 5.5 olması durumunda Tip 2 spektrumu kullanılması önerilmektedir.

Eurocode 8 (EN 1998-1:2004)’ tanımlanan elastik tepki spektrumunka kullanılan parametre değerleri 2 tip spektrum için ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Çizelge 3.2’de Tip-1 ve Tip-2 yatay tasarım spektrumları için tanımlanan parametre değerleri verilmektedir.

Çizelge 3.2: Tip-1 ve Tip-2 için elastik tepki spektrumu parametrelerin değerleri, Eurocode 8 (EN 1998-1:2004)’den uyarlanmıştır.

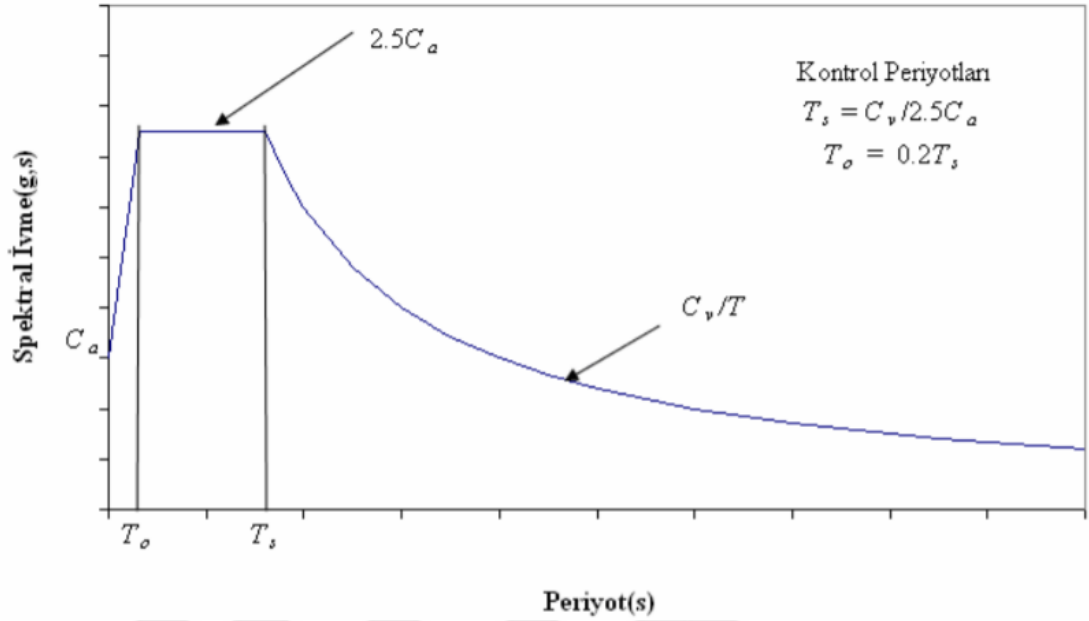
TİP 1				
Zemin Sınıfı	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1.00	0.15	0.4	2.0
B	1.20	0.15	0.5	2.0
C	1.15	0.20	0.6	2.0
D	1.35	0.20	0.8	2.0
E	1.40	0.15	0.5	2.0

TİP 2				
Zemin Sınıfı	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1.00	0.05	0.25	1.2
B	1.35	0.05	0.25	1.2
C	1.50	0.10	0.25	1.2
D	1.80	0.10	0.30	1.2
E	1.60	0.05	0.25	1.2

3.1.3 Uniform Building Code (UBC-1997)

UBC-1997 Şartnamesi'nde tanımlanan tasarım spektrumu Şekil 3.3’te verilmektedir. Minimum $M_w = 7.0$ büyüklüğünde deprem meydana getirebilecek faylarda kayma hızı yılda 5 mm'den büyük ($>5\text{mm/yıl}$) ve maksimum 2 km uzaklıktaki alanlar için tasarım spektrumu kısa periyot (0.2-0.3 s) aralığında 1.5, orta periyot aralığında ise 2 katsayısı

ile büyütülmektedir. Faya olan uzaklığı minimum 15 km olması durumunda ise herhangi bir katsayıyla artırım yapılamamakta olup tasarım spektrumu değiştirilmemektedir.



Şekil 3.3 : UBC-1997 tasarım tepki spektrumu (Mert ve diğ., 2019).

UBC-1997 Yönetmeliği'nde 5 farklı zemin tipi tanımlanmaktadır. Bu yönetmelikte zemin profili tipleri kayma dalgası hızı değerlerine göre belirlenmektedir. Aşağıda Çizelge 3.3'te bu yönetmelikte tanımlanan zemin profil tipleri verilmektedir.

Çizelge 3.3: UBC-1997'de tanımlanan zemin profil tipleri, Mert ve diğ. (2019)'dan uyarlanmıştır.

Zemin Profil Tipi	Zemin Profil İsmi	Kayma Dalgası Hızı, V_s (m/s)
S _A	Sert Kaya	1500
S _B	Kaya	760-1500
S _C	Çok Yoğun Zemin ve Yumuşak Kaya	360-760
S _D	Sert Zemin Profili	180-130
S _E	Yumuşak Zemin Profili	180

Tasarım tepki spektrumu sismik bölge faktörüne (Z) bağlı belirlenen C_a ve C_v katsayıları dikkate alınarak oluşturulabilmektedir. Faya olan uzaklığa bağlı sismik katsayılar olan C_a ve C_v sabitleri Çizelge 3.4'te verilmektedir.

Çizelge 3.4: UBC-1997'de tanımlanan sismik katsayılar, Mert ve diğ. (2019)'dan uyarlanmıştır.

Sismik Bölge Faktörü, Z					
Bölge	1	2A	2B	3	4
Z	0.075	0.15	0.20	0.30	0.40

Sismik Katsayı, C_v					
Zemin Profil Tipi	$Z=0.075$	$Z=0.15$	$Z=0.20$	$Z=0.30$	$Z=0.40$
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.32N_v$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$0.40N_v$
S_C	0.13	0.25	0.32	0.45	$0.56N_v$
S_D	0.18	0.32	0.40	0.54	$0.64N_v$
S_E	0.26	0.50	0.64	0.84	$0.96N_v$

3.1.4 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) kapsamında, deprem yer hareketi spektrumları, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi için referans zemin koşulları $[(V_s)_{30} = 760 \text{ m/s}]$ esas alınarak %5 sönüm oranı için hesaplanmaktadır.

Bu hesaplamalar, boyutsuz spektral ivme katsayılarına ve yerel saha etki katsayılarına veya tanımlı sahaya özel sismik tehlike analizlerine bağlı olarak standart bir form olarak tanımlanmaktadır (Bölüm 2.3.1). Taşıyıcı sistem elemanlarının zaman alanında bir, iki veya üç boyutlu deprem hesaplaması için gerekli deprem yer hareketlerinin seçimi ve ölçeklendirilmesi için uygulanması gereken kurallar; yönetmeliğin ilgili bölümlerinde tanımlanmıştır (Bölüm 2.4). Farklı deprem yer hareketi düzeyleri için deprem verileri Türkiye Deprem Tehlikesi Haritaları ile tanımlanmış olup bu haritalara www.tdth.afad.gov.tr sitesinden erişilebilmektedir.

Bu yönetmelik kapsamında, dört farklı deprem yer hareketi düzeyi tanımlanmıştır (Bölüm 2.2). Bu tanımlamalarda verilen yıllık aşılma olasılığı, yer hareketinin yıllık aşılma sıklığı ve meydana gelme zamanına bağlı olarak Poisson korelasyonundan türeyen denklem 3.1 kullanılarak belirlenebilmektedir (McGuire, 2004).

$$P = 1 - \exp(-\gamma t) \quad (3.1)$$

γ , yer hareketinin yıllık aşılma sıklığını; t , ortaya çıkma süresi ve P ise olma olasılığını ifade etmektedir. Örneğin DD-2 deprem yer hareketi düzeyi tanımlaması yapılırken; $P=0.1$, ortaya çıkma zamanı $t:50$ yıldır. Buna göre yukarıda verilen denklem çözülürse bir yıl için $\gamma=0.0021072$ olarak hesaplanır. Bu ifade 1kez/475yıl olarak ifade edilmektedir. Aşağıda TBDY 2018’de tanımlanan 4 farklı deprem hareket düzeyleri açıklanmıştır.

(DD-1) Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1

DD-1 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyotunun 2475 yıl olduğu çok seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, göz önüne alınan en büyük deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.

(DD-2) Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2

DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyotunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.

(DD-3) Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3

DD-3 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %50 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyotunun 72 yıl olduğu sık deprem yer hareketini nitelemektedir.

(DD-4) Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4

DD-4 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %68 (30 yılda aşılma olasılığı %50) ve buna karşı gelen tekrarlanma periyotunun 43 yıl olduğu çok sık deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, servis deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.

TBDY 2018’de verilen yatay elastik tasarım spektrumu, yatay elastik tasarım spektral yerdeğiştirmeleri ve düşey elastik tasarım spektrumu sırasıyla Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da verilmiştir.

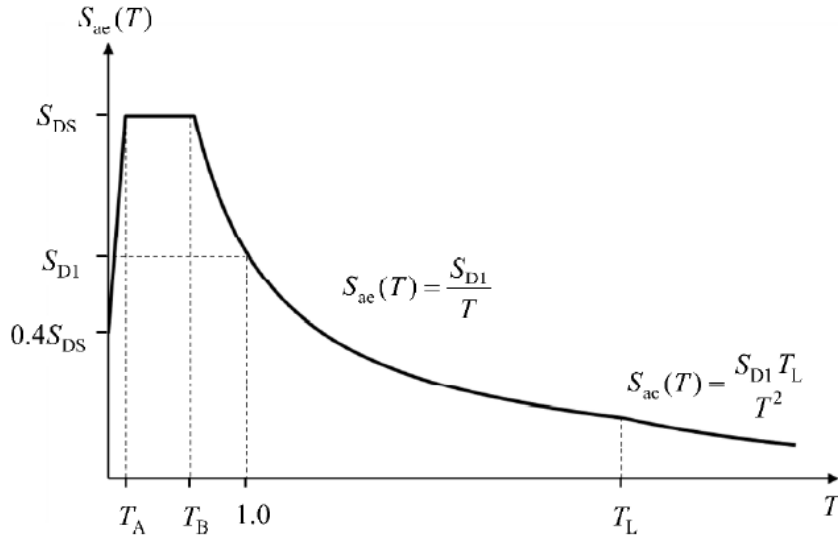
$$S_{ae}(T) = \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A} \right) S_{DS} \quad (0 \leq T \leq T_A)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \quad (T_A \leq T \leq T_B)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \quad (T_B \leq T \leq T_L)$$

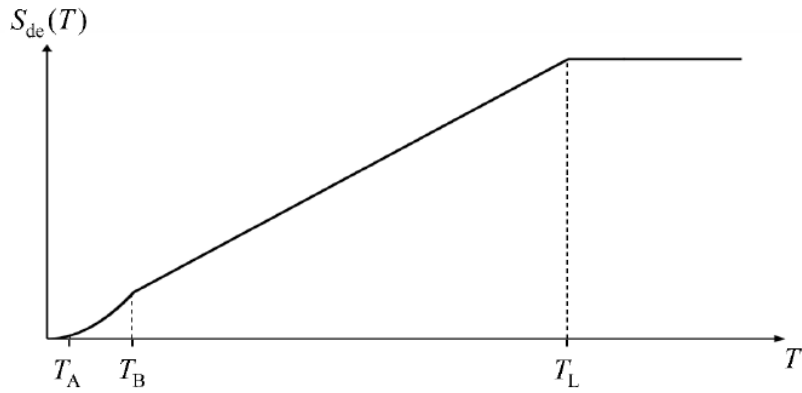
$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (T_L \leq T)$$

$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$



Şekil 3.4 : Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY 2018).

$$S_{de}(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} g S_{ae}(T)$$



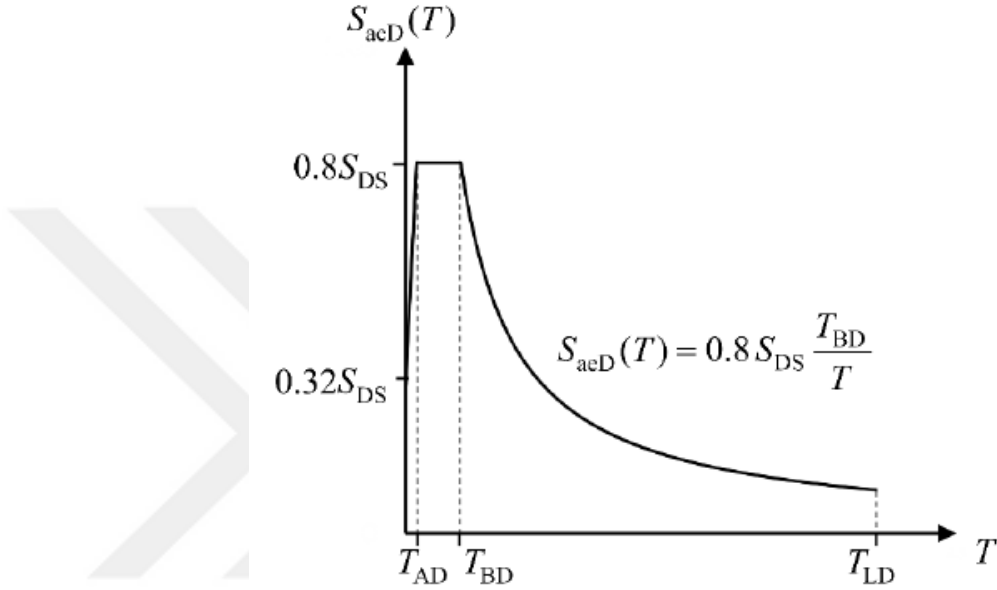
Şekil 3.5 : Yatay elastik tasarım spektral yerdeğiştirmeleri (TBDY 2018).

$$S_{aeD}(T) = \left(0.32 + 0.48 \frac{T}{T_{AD}} \right) S_{DS} \quad (0 \leq T \leq T_{AD})$$

$$S_{aeD}(T) = 0.8 S_{DS} \quad (T_{AD} \leq T \leq T_{BD})$$

$$S_{aeD}(T) = 0.8 S_{DS} \frac{T_{BD}}{T} \quad (T_{BD} \leq T \leq T_{LD})$$

$$T_{AD} = \frac{T_A}{3} \quad ; \quad T_{BD} = \frac{T_B}{3} \quad ; \quad T_{LD} = \frac{T_L}{2}$$



Şekil 3.6 : Düşey elastik tasarım spektrumu (TBDY 2018).

3.2 TBDY 2018'e Göre Sahaya Özel Deprem Yer Hareketi Spektrumu

Bu bölümde, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (2018) göre deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi veya spektral uyum sağlayacak şekilde dönüştürülmesi kapsamında yönetmelik gereklilikleri değerlendirilmiştir.

Sahaya özel deprem yer hareketi spektrumları zemin sınıfı ZF olarak tanımlanan zeminlerde yapılması zorunlu tutulmaktadır. TBDY 2018'e göre proje mühendisinin tercihinin göre zemin sınıfından bağımsız olarak her durumda da yapılabilir.

Sahaya özel deprem yer hareketi spektrumları tanımlanırken; belirlenen ordinat değerleri, Şekil 3.4 ve Şekil 3.6'da tanımlanmış olan elastik ivme spektrumu değerlerinin %90'ından küçük olmamalıdır.

3.2.1 Deprem kayıtlarının seçimi

TBDY 2018’de Madde 2.5.1 deprem kayıtlarının seçimi ile ilgilidir. Bu maddede, uygulanması gereken adımlar hakkında genel bilgiler verilmektedir. Madde 2.5.1.1’de, bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılması gerektiği belirtilmektedir.

Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtların kullanılması gerekmektedir. Yeterli sayı veya nitelikte deprem kaydı seçiminin yapılamadığı durumlarda, zaman tanım alanında benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bu tür kayıtların kullanılması durumunda, binanın bulunduğu sahanın sismik kaynak, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri göz önüne alınacaktır. Benzeştirme için kullanılacak model parametrelerinin, söz konusu bölgede meydana gelmiş deprem kayıtları ile uyumlu olduğu gösterilecektir.

TBDY 2018’e göre bir veya iki boyutlu hesap için seçilecek deprem kayıtlarının sayısı en az 11 olacaktır. Aynı depremden seçilecek kayıt sayısı üçü geçmeyecektir.

3.2.2 Deprem kayıtlarının basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesi

TBDY 2018 Madde 2.5.2 zaman tanım alanında kullanılacak deprem yer hareketlerinin ölçeklendirilmesi ile ilgilidir. Madde 16.5.2’ye veya Madde 16.10’a göre yapılacak zemin davranış analizleri dışında, zaman tanım alanında hesapta kullanılacak deprem yer hareketleri, seçilen deprem kayıtlarından basit ölçeklendirme yöntemi ile şu şekilde elde edilebilir: Bir veya iki boyutlu hesap için seçilen tüm kayıtlara ait spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, Madde 2.3.4 veya Madde 2.4.1’e göre tanımlanan tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması kuralına göre, deprem yer hareketlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir.

3.2.3 Spektral Uyuşum

Deprem yer hareketleri; seçilen deprem kayıtlarının, tanımlanan tasarım spektrumuna spektral uyum sağlanacak şekilde dönüştürülmesi ile de elde edilebilir. Dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarının üzerinde olmalıdır.

4. SAHAYA ÖZEL DEPREM TEHLİKESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bursa ili ve çevresi, doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fayı ve uzantılarının bulunduğu aktif bir fay kuşağında yer almakta olup sismik etkinlik oranı oldukça yüksektir. İnceleme alanında yapılan deprem tehlikesi değerlendirme analizlerinde, bölgenin konumu, bölgenin jeolojik ve sismoteknik yapısı, bölgede geçmişte meydana gelen deprem kayıtları ile zemin koşulları dikkate alınmıştır.

4.1 Çalışma Alanının Tanıtılması

Bursa ili 40° boylam ve 28° – 30° enlem daireleri arasında yer almaktadır. Ülkemizde Marmara Bölgesi'nde yer alan Bursa şehri doğuda Bilecik, Adapazarı, kuzeyde Kocaeli, Yalova, İstanbul ve Marmara Denizi, güneyde Kütahya, batıda Balıkesir illeriyle çevrilidir. Marmara Denizi'nin güneydoğusunda yer alan şehrin denizden yüksekliği yaklaşık 155 metredir (<https://www.bursa.com.tr>).

Tarih boyu Britanya, Roma, Selçuklu, Bizans ve Osmanlı'nın sayısız izlerini taşıyan antik çağdaki ismi "Prusa" olan Bursa, Osmanlı İmparatorluğu sınırlarına dahil edilir edilmez Orhan Gazi döneminde başkent olarak ilan edilmiştir. Osmanlı hakimiyetinde iken Bursa ilinde pek çok tarihi medrese, kervansaray, cami vb. yapılar inşa edilmiştir. Günümüzde de şehrin simgelerinden biri olan Ulu Camii inşaatı 1399 yılında gerçekleşmiştir. Birinci Dünya Savaşı sonrasında Yunanlılar tarafından 2 yıl işgal altında kalan Bursa şehri 1922 yılında yeniden Türkiye sınırlarına dahil edilmiştir.

Kaplanoglu (t.y.)'na göre Bursa tarihinde en kara günü 9 Şubat 1854 tarihinde yaşamıştır. Meydana gelen deprem ve ardından çıkan yangınla Bursa'daki hemen hemen tüm tarihsel anıtların hasar gördüğü belirtilmiştir. "Küçük Kıyamet" olarak adlandırılan bu depremde Bursa'nın otuz saniyede yerle bir olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca 1520 yılında gerçekleşmiş olan deprem ve yangın sonucu da kentin yarısının yok olduğu belirtilmektedir. Baştürk (2013)'e göre merkez üssü Bursa ili olan 1674 ve 8 Ağustos 1705 yıllarında meydana gelen depremler sonucu birçok hasar oluştuğu, hatta 1855 yılında meydana gelen iki kuvvetli depremin şehirde yer alan tarihi yapılara büyük ölçüde zarar verdiği belirtilmektedir.

Türkiye sınırlarında dahilinde Marmara Bölgesi'nde yer alan Bursa ilinin konumu Şekil 4.1'de verilmektedir. Bursa şehri içerisinde bulunan ilçeler Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında Osmangazi ilçesinde bulunan tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için sismik tehlike analizi yapılmaktadır.



Şekil 4.1 : Türkiye haritasında Bursa ili konumu (<http://cografyaharita.com>).



Şekil 4.2 : Bursa ili ve ilçeleri (<https://bursa.ktb.gov.tr>).

Bursa ilinde geçmişten günümüze kadar pek çok deprem meydana gelmiştir. Bölgede gerçekleşen depremler nedeniyle birçok yapıların zarar gördüğü hatta yıkıldığı bilinmektedir. Bursa ilinde zarar görmüş veya yıkılmış olan minarelerden bazıları Şekil 4.3'te verilmektedir. 2006 yılında Doğangün ve diğ. tarafından yapılan çalışmada sunulmuş olan bu şekilde (a)1999 Düzce depremi, (b) 1999 Kocaeli depremi ve (c) Çankırı, Orta depreminde hasar görmüş veya yıkılmış olan cami minareleri gösterilmektedir (Baştürk, 2013).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3 : Bursa ilinde meydana gelen depremler nedeniyle tarihi yapılarda oluşan hasarlar, Baştürk (2013)'ten uyarlanmıştır.

Tarih boyu yaşanan depremler ile Bursa'da yer alan tarihi yapılarının büyük zararlar gördüğü anlaşılmaktadır. Geçmişte yaşanmış olan depremler ve bölgenin sismik durumu dikkate alındığında Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için sismik tehlikenin değerlendirilmesi önem kazanmaktadır.

4.2 Bölgesel Jeoloji

Bursa Büyükşehir Belediyesi aracılığıyla elde edilen zemin etüt raporlarından yararlanılarak bölgenin jeolojisi bu bölümde değerlendirilmektedir. Bölgenin genel jeolojisi Uludağ Masifi olarak nitelendirilmektedir. En alt kademede birincil jeolojik zamana ait yaşlı kayaçlar bulunmaktadır. Bu masif kayaçlar, birtakım metamorfik seriler ve granadiyorit plütonlardan oluşmaktadır. Metamorfik kısım; amfibolit, şistleşmiş mermerler, gnayslar, şistler, fillit ve krsitalize kiraçtaşlarından meydana gelmektedir. Granadiyorit plütonlar ise yüksek derecede başkalaşım geçirmiş olan metamorfik kısmın içerisinde girişim yapmış durumdadır. Bu kademe üzerinde bulunan Bursa şehrini çoğunlukla kapsayan ve doğu batı doğrultusu boyunca uzanan neojen çökeller ile kuvaterner olukları arasında diskordans bulunmaktadır.

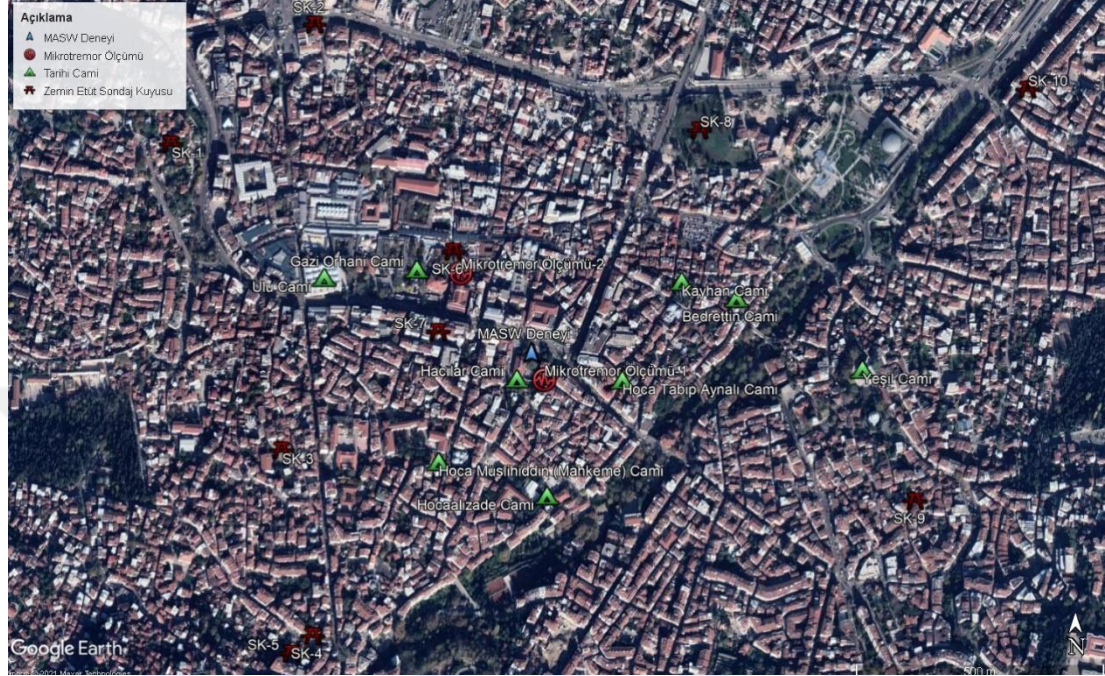
Masif kayaçlar üzerine uyumlu olarak gelmeyen neojen detritikleri, Bursa ilinin çoğunlukla batı kesiminde bulunmakta olup Miyosen yaşındadır. Üst Miyosen çökel olarak adlandırılan jeolojik birim, İnegöl formasyonu olarak bilinmektedir. Bu formasyon genel olarak; kumtaşı, kilitaşı, marn, konglomera, kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Bazı kısımlarda ince şeritler halinde çakıl, kum, silt ve kil birimlerle de karşılaşılabilir.

Kuvaterner oluşuklar; kil, kum, silt ve çakıl dane boylarına sahip malzemelerin çeşitli kombinasyonlarda bir araya gelerek heterojen ve kısmen homojen yapıda farklı litolojik birimlerden meydana gelmektedir. Bursa Ovası ile Uludağ'ın yamaçları arasında alüvyal yelpaze çökeli (birikinti konisi) oluşumları ve yamaç molozu gözlemlenmektedir. Meydana gelen bu jeolojik birimler Kuvaterner döneminde oluşmuştur.

Pek çok tarihi yapının bulunduğu ve şehrin merkezi özelliğinde bulunan Hanlar Bölgesi, Bursa ilinin Osmangazi ilçesinde yer almaktadır. İnceleme alanı ve çevresindeki ana birim, kuvaterner dönemine ait birikinti konisidir. Bursa ili Hanlar bölgesindeki hakim litolojik birimlerin sahada yapılacak zemin etüt çalışmaları üzerindeki olumsuz etkisi ve bölgede daha önceleri zemin koşullarının belirlenebilmesi için muayene çukuru açılmasının tercih edilmiş olması sebebiyle yapılan sondaj çalışmaları oldukça azdır.

Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nce 17/01/2001 tarihinde onaylanmış bulunan Bursa Büyükşehir Belediyesi'nce hazırlatılan "Nilüfer, Osmangazi ve Yıldırım İlçeleri İmar Planı'na Esas 1/25000'lik Zemin Etüt Raporu" ve günümüze kadar yapılan parsel bazlı

Çalışmaların esas alındığı raporlar dikkate alınarak Hanlar bölgesinin zemin etüt çalışmaları incelenmiştir. Bursa Büyükşehir Belediye tarafından hazırlatılan raporlara göre Bursa ili ve çevresinde yapılan zemin etüt çalışmalarını gösteren yer bulduru haritası Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.4 : Bursa ili ve çevresinde yapılan zemin etüt çalışmalarını gösteren yer bulduru haritası, Bursa Büyükşehir Belediyesi'nden temin edilmiştir.

4.2.1 Sondaj alışmaları

Bursa ili ve çevresinde yapılmış olan arazi çalışmaları kapsamında Bursa Belediyesi'nden alınan on adet sondaj kuyusu verisine ulaşılabılmıştır. Yapılan sondajlardan SK-1'de, üst seviyelerde yer yer tarihi dolgu, yamaç molozu ile altında rezidüel zemin ve ana formasyon olarak zayıf traverten bulunmaktadır. SK-2, SK-3, SK-7 ve SK-8 sondajlarında blok içerikli çok sıkı siltli akıldan oluşan birikinti konisi ile karşılaşılmıştır. Bursa ilinde yapılan SK-4 sondajında yamaç molozu olarak isimlendirilen araları kil, kum, çakıl dolgulu bloklar bulunmaktadır. SK-5 sondaj çalışmasında üst taraflarda kristalize kireçtaşı olarak isimlendirilen rezidüel zemin (killi çakıl) bulunan az ayrırmış orta sağlam metamorfik kaya birim ile karşılaşılmıştır. SK-6 sondajında blok içerikli çok sıkı siltli çakıl birimlerinde oluşan birikinti konileri; SK-9'da ise üst seviyelerde sert kıvamda siltli kilden oluşan rezidüel zemin, altında neojen döneme ait kilaşı birimler ile karşılaşılmıştır. SK-10 sondaj çalışmasında ise

üstte blok içerikli çok sıkı siltli çakıl (birikinti konisi), altında neojen döneme ait ayrıışmış zayıf kumtaşı birimlerine rastlanılmıştır.

Zemin etüt çalışmaları kapsamında yapılan sondajlara ait litoloji bilgileri aşağıda Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bursa ilinde daha önceden yapılmış olan sondajlara ait litolojik bilgiler Bursa Büyükşehir Belediyesi’ne sunulan raporlar yardımıyla verilebilmektedir.

Çizelge 4.1 : Bursa ilinde önceden yapılmış olan sondajlara ait litoloji bilgileri.

Sondaj No	Tabaka Başlangıç - Bitiş (m)	Litoloji
SK-1	0.00-2.60	Dolgu
	2.60-20.00	Altere Traverten
SK-2	0.00-4.50	Dolgu
	4.50-12.50	Bloklu Çakıllı Kum
SK-3	0.00-0.70	Dolgu
	0.70-10.00	Siltli Kumlu Çakıllı Blok
SK-4	0.00-0.50	Bitkisel Toprak
	0.50-20.00	Yamaç Molozu
SK-5	0.00-0.50	Bitkisel Toprak
	0.50-2.50	Dolgu Zemin
	2.50-4.00	Killi Çakıl
	4.00-15.00	Kristalize Kireçtaşı
SK-6	0.00-0.30	Dolgu Malzeme
	0.30-9.00	Yamaç Molozu
SK-7	0.00-0.50	Dolgu
	0.50-10.50	Çakıllı Kumlu Blok
SK-8	0.00-2.00	Dolgu
	2.00-10.50	Kumlu Siltli Bloklu Çakıl
SK-9	0.00-0.35	Yapay Dolgu
	0.35-5.50	Kumlu Siltli Kil
	5.50-15.24	Kumlu Siltli Kil (Neojen)
SK-10	0.00-13.80	Yamaç Molozu
	13.80-14.00	Ayrıışmış Kumtaşı

İnceleme alanı çevresinde gerçekleştirilen sondaj kuyularında belirli derinliklerde 1,5 m aralıklarla SPT yapılmıştır. Araziden alınan ham SPT verileri (N) TBDY 2018'e göre çeşitli düzeltme katsayıları ile $N_{1,60}$ değerlerine düzeltilmiştir.

Burada kullanılan düzeltme katsayıları denklem 4.1'de verilmiştir. C_N , kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme (derinlik) düzeltme katsayısıdır. C_R , tij boyu düzeltme katsayısı; C_S , numune alıcı tipi düzeltme katsayısıdır. Denklem 4.1'de verilen ifadede C_B , sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı; C_E ise enerji oranı düzeltme katsayısıdır.

$$N_{1,60} = N \times C_N \times C_R \times C_S \times C_B \times C_E \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de geçen düzeltme katsayıları Çizelge 4.2'de verilmiştir. SPT düzeltmeleri derinliğe bağlı olarak yapılmıştır. Düzeltme sonucu bulunan $N_{1,60}$ değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Burada ifade edilen "R" refü anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.2 : SPT düzeltme katsayıları, TBDY(2018)'den uyarlanmıştır.

Düzeltilme Katsayısı	Değişken	Değer
C_R	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
C_S	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
C_B	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
C_E	Güvenli tokmak	0.60 – 1.17
	Halkalı tokmak	0.45 – 1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90 – 1.60

Çizelge 4.3 : SPT düzeltilmiş veriler.

Sondaj No	Derinlik	SPT-N	C _N	(N ₁) ₆₀
SK-1	1.50	R	1.70	R
	3.00	R	1.30	R
	4.50	22	1.06	15
	6.00	R	0.92	R
	7.50	R	0.82	R
	9.00	R	0.75	R
	10.50	R	0.69	R
	12.00	32	0.65	16
	13.50	32	0.61	15
	15.00	R	0.58	R
	16.50	R	0.55	R
SK-2	1.50	38	1.70	36
	3.00	R	1.30	R
	4.50	28	1.06	19
	6.00	R	0.92	R
	7.50	R	0.82	R
	9.00	R	0.75	R
	10.50	R	0.69	R
	12.00	R	0.65	R
SK-3	1.50	R	1.70	R
	3.00	R	1.30	R
	4.50	R	1.06	R
SK-4	1.50	R	1.70	R
	3.00	R	1.30	R
SK-5	1.50	22	1.70	21
	3.00	50	1.30	36
SK-7	3.00	R	1.30	R
	4.50	R	1.06	R
	6.00	R	0.92	R
SK-8	1.50	50	1.70	48
	3.00	R	1.30	R
	4.50	R	1.06	R
	7.50	R	0.82	R
	9.00	R	0.75	R

Çizelge 4.3 (devam) : SPT düzeltilmiş veriler.

Sondaj No	Derinlik	SPT-N	C _N	(N ₁) ₆₀
SK-9	1.50	R	1.70	R
	3.00	48	1.30	35
	4.50	39	1.06	26
	6.00	46	0.92	27
	7.50	45	0.82	26
	9.00	R	0.75	R
	10.50	R	0.69	R
	12.00	R	0.65	R
	13.50	R	0.61	R
	15.00	R	0.58	R
SK-10	1.50	50	1.70	48
	3.00	50	1.30	36
	4.50	R	1.06	R
	6.00	R	0.92	R
	7.50	50	0.82	29
	9.00	50	0.75	27
	10.50	50	0.69	26

4.2.2 Jeofizik çalışmalar

Bursa ili Hanlar Bölgesi ve çevresinde yapılmış olan etüt çalışmaları kapsamında, zeminlerin dinamik-elastik mühendislik parametrelerini, tabaka kalınlıklarını, deprem yönetmeliklerine göre zemin sınıflarını belirlemek amacıyla yapılan Yüzey Dalgası Analizi (MASW) ve Mikrotremor çalışmaları yapılmıştır. Jeofizik çalışmalar kapsamında sahanın dinamik zemin parametrelerinin tespiti amacıyla yapılmış olan 1 adet Çok Kanallı Yüzey Analizi çalışması (MASW) ve 2 adet mikrotremor çalışması Bursa Büyükşehir Belediyesi aracılığıyla yaptırılmıştır.

Yapılan MASW (Multi Channel Analysis of Surface Waves) ölçümü sonucu sahadaki sondaj verileri ve jeolojik formasyon özellikleri (blok içerikli siltli çakıl) birlikte dikkate alındığında, kayma dalgası hızı olan (V_s)₃₀ değerinin 400-450 m/s arasında kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir.

İnceleme alanında yapılan Mikrotremor ölçümleri ile inceleme alanını oluşturan birimlerin zemin hakim titreşim periyodu (T) ile zemin büyütme değeri (H/V, A_g) ortaya çıkartılmıştır.

Hacılar Cami civarında daha önce yürütülen “Osmangazi İlçesi Defterdarlık Binası” parsel bazında zemin etüt işi kapsamında düzenlenen mikrotremor ölçümü ile bu çalışma kapsamında Gazi Orhan Cami yakınında yapılan mikrotremor ölçümünün her ikisinde de zemin büyütmesi değeri, A_g , 1.7 ve hakim periyot değeri, T_0 , 0.19 s olarak elde edilmiştir.

Zemin hakim titreşim periyodu (T) ile zemin büyütme değeri (A_g) birlikte kullanılarak “Nakamura Hasar Görebilirlik İndeksi (K_g)” hesaplanabilir. Nakamura hasar görebilirlik indisi (seismic vulnerability indice) denklem 4.2’deki gibi hesaplanmaktadır (Subaşı ve diğ, 2017).

$$K_g = A_g^2 T \quad (4.2)$$

Hesaplanan bu indis değeri aşağıdaki gibi yorumlanmaktadır:

- $K_g < 5 \rightarrow$ hasar gözlenmemiş
- $K_g > 10 \rightarrow$ hasar meydana gelmiş
- $K_g > 20 \rightarrow$ sıvılaşma ve taşıma gücü problemleri oluşmuş

Bursa ili Hanlar Bölgesi ve çevresi için Nakamura Hasar Görebilirlik İndeksi (K_g) hesaplandığında bu değer yaklaşık 0.55 olduğu belirlenmiştir.

Deprem zemin yüzeyinde üreteceği kayma şekil değiştirmesi (γ_e), anakaya ivmesi (a_b) ve hasar görebilirlik indisi (K_g) değerleri ile denklem 4.3 ve denklem 4.4 kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Bu denklemdeki “ V_b ” kayma dalgası hızını ifade etmektedir. Kayma şekil değiştirmelerinin artması, depremler sırasında oluşabilecek hasarı da etkilemektedir (Subaşı ve diğ, 2017).

$$\gamma_e \cong [0.60 (K_g) / (\pi^2 V_b)] a_b$$

a_b : anakaya ivmesi [gal]
 V_b : kayma dalgası hızı [cm/s]

$$(4.3)$$

$$\gamma_e = K_g C a_b \quad (4.4)$$

Tarihi camilerin içinde yer aldığı Hanlar Bölgesi için tekrarlanma periyodu 475 yıl olan standart tasarım yer hareketi altında yukarıda verilen denklemlerin kullanılmasıyla hesaplanan zemin yüzeyi deformasyon seviyesi değeri, γ_e , % 0.007 olarak bulunmuştur. Subaşı ve diğ. (2017)’ye göre belirlenen kayma deformasyonuna bağlı zemin davranışları Çizelge 4.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Zemin davranışının kayma deformasyonu seviyesine bağlı değişimi
Subaşı ve diğ. (2017)’den uyarlanmıştır.

Deformasyon Seviyesi, γ (%)	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
Olgu	Dalga yayılımı, titreşim		Çatlaklar, farklı oturma		Şev kayması, sıkışma, sıvılaşma	
Mekanik Davranış	Elastik		Elasto-plastik		Göçme	

Tarihi camilerin içinde yer aldığı Hanlar Bölgesi için tekrarlanma periyodu 475 yıl olan standart tasarım yer hareketi (DD-2) altında Nakamura Hasar Görebilirlik İndeksi değerinin kullanılmasıyla hesaplanan zemin yüzeyi deformasyon seviyesi değeri, γ_e , % 0.007 olarak bulunmuştur. Buna göre tasarım yer hareketi karşısında hesaplanan bu değer in yüzeydeki zemin tabakalarının elastik davranışına karşılık geleceği öngörülmektedir. Tarihi camilerin içinde yer aldığı Hanlar Bölgesi ve çevresinde yapılan zemin etüt çalışmaları birlikte değerlendirildiğinde yerel zemin sınıfının ZC ($400 \text{ m/s} < (V_s)_{30} < 450 \text{ m/s}$) alınabileceği belirlenmiştir.

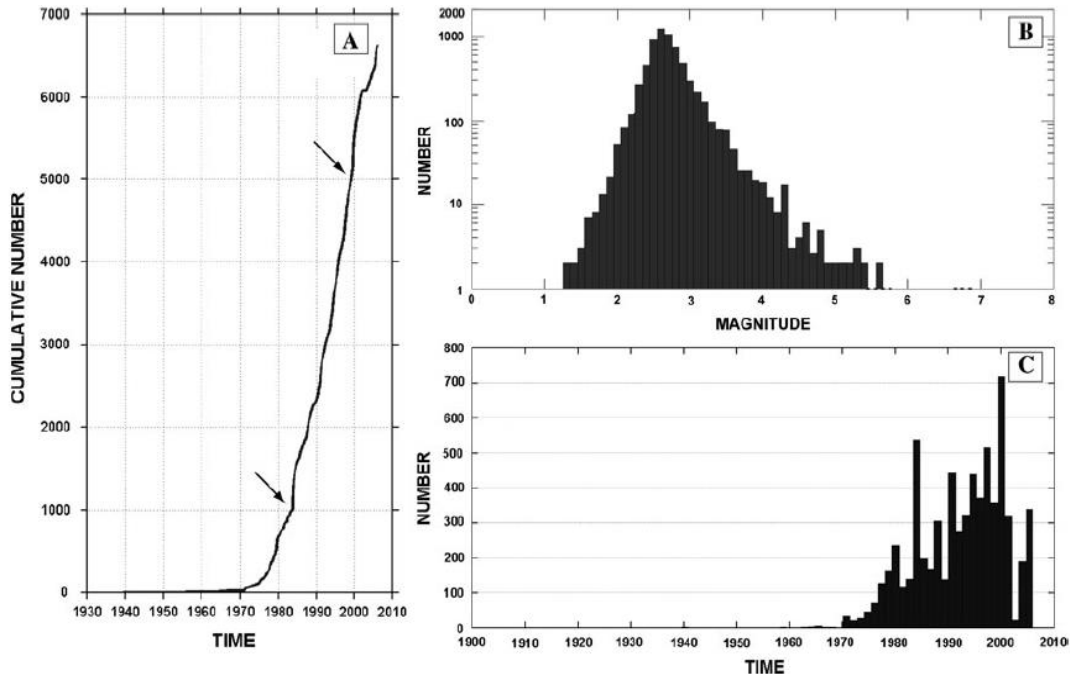
İnceleme alanı ve çevresinde yapılan mikrotremor ölçümlerinden elde edilen H/V spektral oran eğrilerine bakılarak sahanın düşük periyot ve zemin büyütmesi değerlerine sahip olduğu yorumlanmaktadır.

4.3 Sismisite ve Aktif Tektonik

Ülkemizin kuzeybatısında yer alan Bursa şehri, Kuzey Anadolu Fay hattının etkisi altında olan bir bölgede yer almaktadır. Kuzey Anadolu Fayı Marmara bölgesinde üç kola ayrılmıştır. Bunlardan ilki Sapanca-Gölcük-Çınarcık-Marmara Denizi altından geçerek Saroz Körfezi’ne uzanan Kuzey koludur. Orta Kolu ise Geyve-Mekece-İznik Gölü-Gemlik Körfezi’ne uzanmaktadır. Geyve-Yenişehir-Bursa-Biga Yarımadası hattı boyunca yer alan Güney kolu ise Edremit Körfezi’ne kadar etkisini sürdürmektedir. (Yalçın ve diğ, 2013). Bölgeyi tehdit eden diri faylar ve sismik kaynaklar değerlendirildiğinde Bursa ili, Kuzey Anadolu Fay hattının orta ve güney kolunun etkisi altında yer almaktadır.

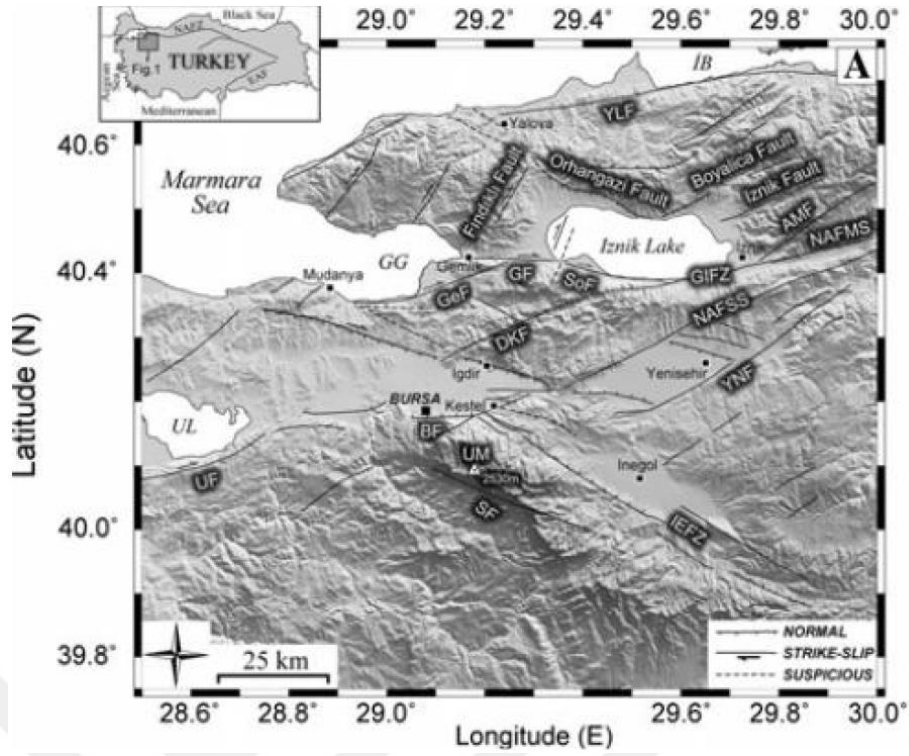
Aletsel dönemden bu yana kayıt altına alınan depremler ve tarihsel döneme ait depremler dikkate alındığında Bursa ilinin yüksek sismisiteye sahip olduğu görülmektedir. Gök ve Polat (2011)’e göre bölgede kayıt altına alınabilen

depremlerden biri olan ve 28 Şubat 1855 tarihinde gerçekleşen depremin şiddeti $I_0=IX$ olarak belirlenmiştir. Bu depremin pek çok geniş çaplı hasar meydana getirdiği ve can kayıplarına yol açtığı belirtilmektedir. Şekil 4.5'te verilen grafiklere göre Bursa ilinde zamana bağlı gerçekleşen depremlerin çoğunluğunun $M=3$ büyüklüğü civarında gerçekleştiği görülmektedir. 1970'lerden bu yana gerçekleşen depremlerin artmasına bağlı olarak bölgenin sismik aktivitesi de yükselmektedir.



Şekil 4.5 : Bursa ili için yıllara göre sismik etkinlik durumu (Gök ve Polat, 2011).

Bursa şehrini etkileyen ve sismik tehlike oluşturabilecek bölgeyi etkisi altına alan çizgisel kaynak olarak tanımlanan pek çok fay hatları bulunmaktadır. Aşağıda Bursa ili ve bölgesindeki önemli fay hatları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şekil 4.6'da verilen faylar şunlardır: Adliye Meşruriye Fayı (AMF), Bursa Fayı (BF), Demirtaş-Kıblepınar Fayı (DKF), Gençali Fayı (GeF), Gemlik Fayı (GF), Gemlik Körfezi (GG), Geyve-İznik Fay Hattı (GIFH), İnönü-Eskişehir Fay Hattı (IEFH), Kuzey Anadolu Fay Hattı Orta Kolu (NAFMS), Kuzey Anadolu Fay Hattı Güney Kolu (NAFSS), Soğukpınar Fayı (SF), Soloza Fayı (SoF), Uluabat Fayı (UF), Uluabat Gölü (UL), Uludağ (UM), Yalova Fayı (YLF), Yenişehir Fayıdır (YNF).



Şekil 4.6 : Bursa ili ve çevresindeki faylar (Ünal ve Askan, 2015).



Şekil 4.7 : Kuzey Anadolu Fayı güney koluna ait faylar (Selim, H.H. ve diğ., 2005).

4.4 TBDY 2018'e Göre Elastik Tasarım Spektrumları

Bursa ili ve çevresinde yapılan zemin etüt çalışmaları ve arazi testleri incelendiğinde Çizelge 4.5'te verilen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'e göre yerel zemin sınıfları tablosu dikkate alındığında inceleme alanındaki zemin sınıfı ZC olarak belirlenmiştir. Yapılan MASW (Multi Channel Analysis of Surface Waves) ölçümü sonucu sahadaki sondaj verileri ve jeolojik formasyon özellikleri (blok içerikli siltli çakıl) birlikte dikkate alındığında, kayma dalgası hızı (V_s)₃₀ 400-450 m/s arasında olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.5 : Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$	$(N_{60})_{30}$	$(C_u)_{30}$
ZA	Sağlam, sert kayalar	>1500	-	-
ZB	Az ayrıışmış, orta sağlam kayalar	760-1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrıışmış, 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 çökm 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 (>35m) yumuşak veya orta katı killer.			

Yerel zemin sınıfına bağlı kısa periyot bölgesi ve 1 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları F_s ve F_1 sırası Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de verilmiştir. Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de geçen ifadelerin anlamları şu şekildedir:

- S_s : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)
 S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)
 F_s : Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (boyutsuz)
 F_1 : 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı (boyutsuz)

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

PGA: En büyük yer ivmesi değeri (g)

Çizelge 4.6 : Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı, F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır (Bkz.16.5).					

Çizelge 4.7 : 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018).

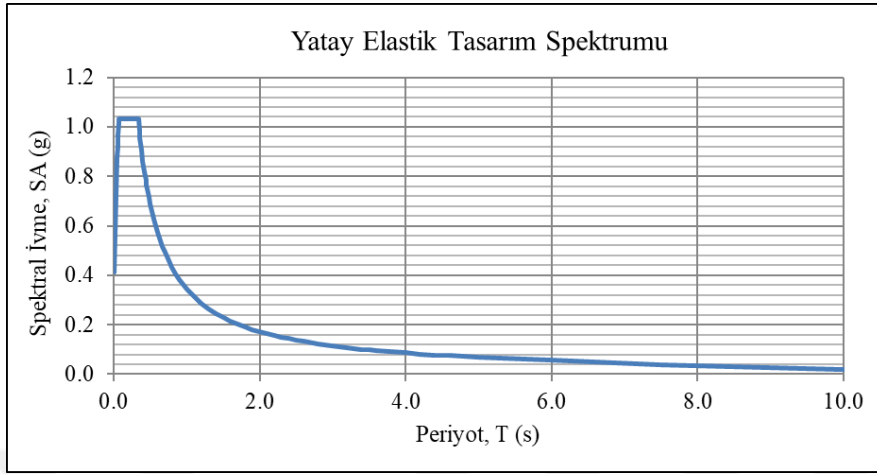
Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı, F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır (Bkz.16.5).					

TBDY 2018'e uygun olarak farklı deprem yer hareketi düzeyleri için yerel zemin sınıfı ZC olarak kabul edilerek harita spektral ivme katsayıları (S_s ve S_1), yerel zemin etki katsayıları (F_s ve F_1) ve tasarım spektral ivme katsayıları (S_{DS} ve S_{D1}) Çizelge 4.8'de verilmektedir.

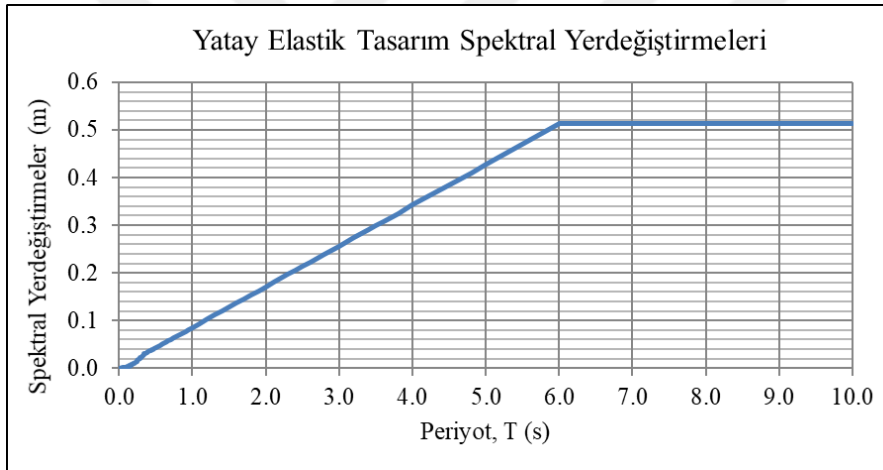
Çizelge 4.8 : ZC zemin sınıfı için spektral ivme katsayıları, yerel zemin etki katsayıları ve en büyük yer ivmesi değerleri (TBDY, 2018).

Deprem Yer Hareketi Düzeyi	S_s	S_1	F_s	F_1	S_{DS}	S_{D1}	PGA (g)
DD-1	1.653	0.431	1.2	1.5	1.984	0.647	0.666
DD-2	0.859	0.229	1.2	1.5	1.031	0.344	0.358
DD-3	0.322	0.093	1.3	1.5	0.419	0.140	0.140
DD-4	0.227	0.066	1.3	1.5	0.295	0.099	0.099

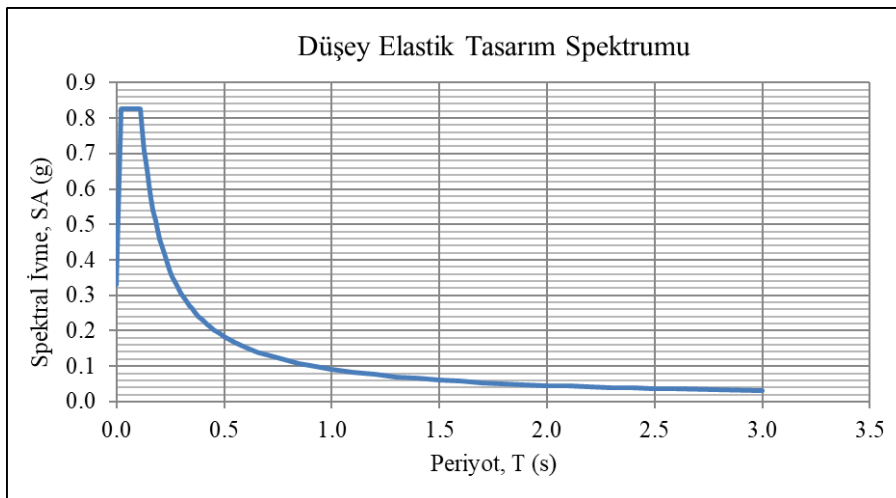
AFAD'dan alınan rapora göre DD-2 deprem yer hareketi için elde edilen yatay elastik tasarım spektrumu, yatay elastik tasarım spektral yerdeğiştirmeleri ve dűşey elastik tasarım spektrumu şekil 4.8, şekil 4.9 ve şekil 4.10'da verilmektedir.



şekil 4.8 : Yatay elastik tasarım spektrumu.



şekil 4.9 : Yatay elastik tasarım spektral yerdeğiştirmeleri.



řekil 4.10 : Dűşey elastik tasarım spektrumu.

4.5 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi

Bu çalışma kapsamında Bursa ili tarihi yapıları içerisine alan Hanlar Bölgesi için olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmıştır.

4.5.1 Deprem kaynaklarının tanımlanması

MTA'nın Türkiye'deki diri faylar haritası kullanılarak Bursa ili ve çevresindeki diri faylar Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Ayrıca bu bölgede gerçekleşen bazı depremler, büyüklük ve gerçekleştiği tarihleriyle birlikte belirtilmiştir.



Şekil 4.11 : Bursa inceleme alanı merkezi etrafındaki diri faylar ve gerçekleşen bazı depremler, <http://yerbilimleri.mta.gov.tr>'den uyarlanmıştır.

Bursa'da bulunan Ulu Camii merkez olarak dikkate alınarak merkezden R=100 km yarıçaplı dairesel alan içerisinde bulunan faylar ve bu faylara ait fay parametreleri aşağıda Çizelge 4.9'da özetlenmiştir. Faylarla ilgili bilgiler için AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında yayımlanan "Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi (2014)" adlı çalışmadan yararlanılmıştır.

Çizelge 4.9 : İnceleme alanında bulunan faylar ve bu fayların özellikleri, AFAD

Ulusal Deprem Araştırma Programı (2014)’ndan derlenmiştir.

Fay Adı	Fay Tipi	Uzunluk (m)	Eğim		Derinlik (km)		Kayma Hızı (mm/yıl)		Maksimum Magnitüd, M _w
			min	max	min	max	min	max	
Bandırma Fayı	Doğrultu Atımlı	32	85	90	0	13	0.7	1.0	6.8
Ulubat Fayı	Doğrultu Atımlı	44	85	90	0	18	3.0	4.0	7.0
Mustafa Kemal Paşa Fayı	Doğrultu Atımlı	38	85	90	0	18	3.0	4.0	6.9
Yenice Gönen Fayı	Doğrultu Atımlı	70	85	90	0	13	1.5	2.0	7.2
Manyas Fay Zonu	Doğrultu Atımlı	16	87	90	0	13	1.0	2.0	6.5
Edincik Fayı	Doğrultu Atımlı	45	87	90	0	18	0.7	1.0	7.0
Zeytinbağı Fayı	Doğrultu Atımlı	36	87	90	0	13	0.7	1.0	6.9
Şahmelek Fayı	Normal Fay	15	70	80	0	18	2.5	3.0	6.4
Tavşanlı Fayı	Normal Fay	15	70	80	0	18	2.5	3.0	6.4
Orhaneli Fayı	Doğrultu Atımlı	29	87	90	0	18	4.0	4.0	6.8
Soğukpınar Fayı	Normal Fay	22	75	80	0	18	0.7	1.0	6.6
Bursa Fayı	Normal Fay	35	55	70	0	18	0.5	1.0	6.9
İnegöl Fayı	Normal Fay	21	55	65	0	18	0.5	1.0	6.6

Çizelge 4.9 (devam) : İnceleme alanında bulunan faylar ve bu fayların özellikleri,
AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı (2014)’ndan derlenmiştir.

Fay Adı	Fay Tipi	Uzunluk (m)	Eğim		Derinlik (km)		Kayma Hızı (mm/yıl)		Maksimum Magnitüd, M _w
			min	max	min	max	min	max	
Oylat Fayı	Normal Fay	17	70	75	0	18	0.7	1.0	6.6
Dodurga Fayı	Doğrultu Atımlı	56	85	90	0	18	0.4	0.7	7.1
Eskişehir Fayı	Doğrultu Atımlı	42	85	90	0	18	1.0	1.3	7.0
Barakfakı Fayı	Normal Fay	10	65	70	0	18	0.3	0.5	6.2
Gençali Fayı	Doğrultu Atımlı	23	85	90	0	18	0.5	1.0	6.7
İznik Mekece Fayı	Doğrultu Atımlı	44	85	90	0	18	1.0	2.0	7.0
Geyve Fayı	Doğrultu Atımlı	62	85	90	0	18	1.0	2.0	7.2
Gemlik Fayı	Doğrultu Atımlı	25	85	90	0	18	2.5	3.5	6.7
Yalova Fayı	Normal Fay	20	65	75	0	13	0.7	1.0	6.6
Altınova Fayı	Ters Fay	9	55	65	0	13	0.3	0.5	6.2
Yalakdere Fayı	Doğrultu Atımlı	25	87	90	0	13	0.7	1.0	6.7
KAF(Avcılar ve Kumburgaz Segmenti)	Doğrultu Atımlı	70	65	85	0	18	17.0	20.0	7.2
KAF(Çınarcık Segmenti)	Normal Fay	35	55	85	0	13	2.0	4.0	6.9
KAF(Adalar Segmenti)	Doğrultu Atımlı	44	55	85	0	18	14.0	17.0	7.0

Çizelge 4.9 (devam) : İnceleme alanında bulunan faylar ve bu fayların özellikleri,
AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı (2014)’ndan derlenmiştir.

Fay Adı	Fay Tipi	Uzunluk (m)	Eğim		Derinlik (km)		Kayma Hızı (mm/yıl)		Maksimum Magnitüd, M_w
			min	max	min	max	min	max	
Balıkesir Fayı (Kepsut Segmenti)	Doğrultu Atımlı	25	87	90	0	18	0.5	0.7	6.7
Orhangazi Fayı	Doğrultu Atımlı	29	87	90	0	13	0.7	1.0	6.8

4.5.2 Deprem büyüklüğünün tanımlanması

Bölgenin sismolojik olarak irdelenebilmesi için tarihsel depremler ve aletsel gözleme dayalı zamandan bu yana kayıt altına alınan depremler tahkik edilmiştir. Tarihsel döneme ait deprem kayıtları meydana geldiği lokasyona bağlı olarak deprem şiddeti cinsinden verilmektedir. Aşağıda Çizelge 4.10’da Bursa şehrinde gerçekleşen tarihsel döneme (Milat ve 1900 yılı arası) ait deprem kayıtları verilmiştir.

Tarihsel depremler irdelenirken “Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM)” internet sitesinden yararlanılmıştır.

Çizelge 4.10 : Bursa şehrinde gerçekleşen bazı tarihsel depremler, BDTİM’den derlenmiştir.

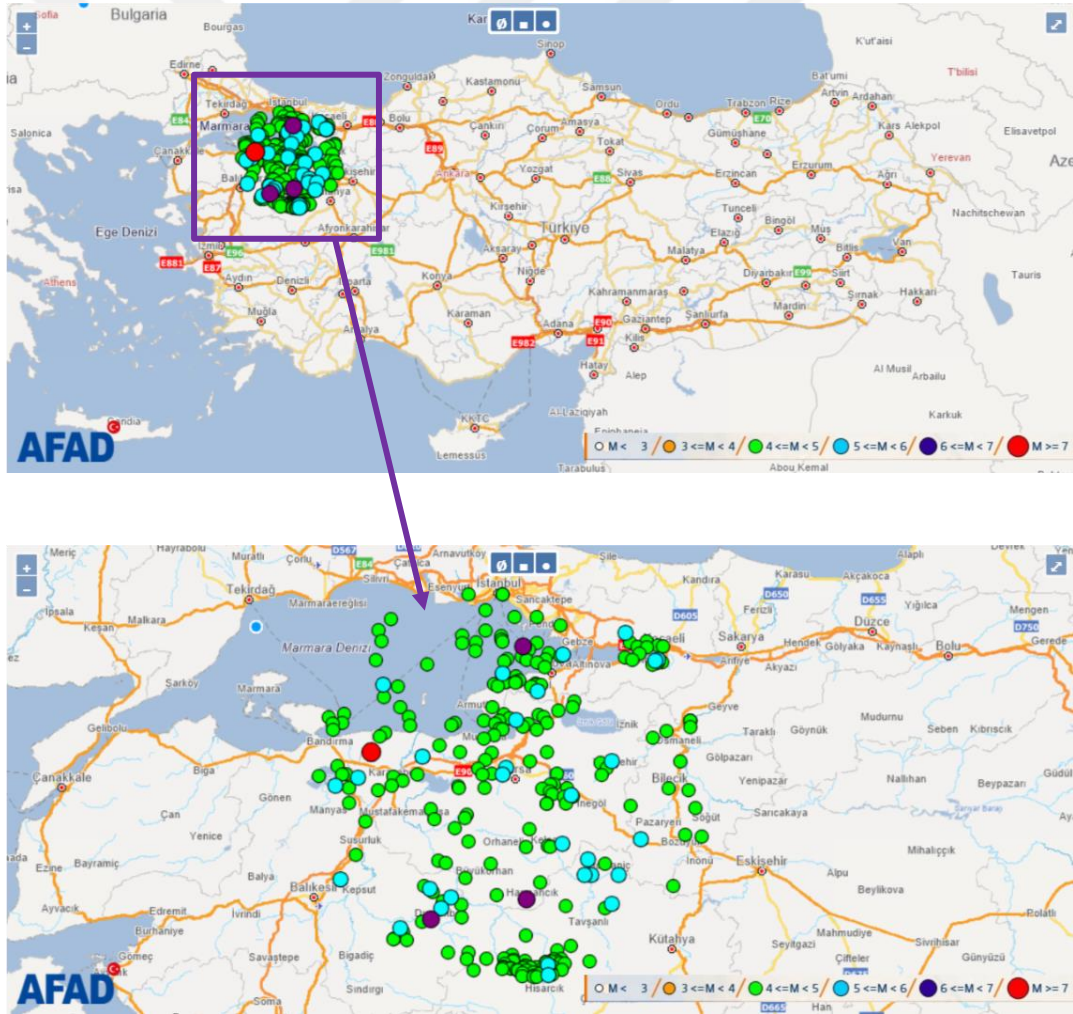
Tarih	Saat	Enlem	Boylam	Şiddet	Yer
28.02.1855	-	40.2	29.0	IX	Bursa, Kemalpaşa (300 Ölü)
11.04.1855	-	40.2	29.1	X	Bursa (1300 Ölü)

Türkiye için deprem şiddetinin büyüklük olarak ifade edilebilmesi için aşağıda denklem 4.5’te verilen bağıntı kullanılabilmektedir (Haşal ve İyisan, 2005). Aşağıda verilen denklem 4.5’te I_0 deprem şiddetini, M ise depremin büyüklüğünü ifade etmektedir.

$$M=0.593 \times I_0 + 1.63 \quad (4.5)$$

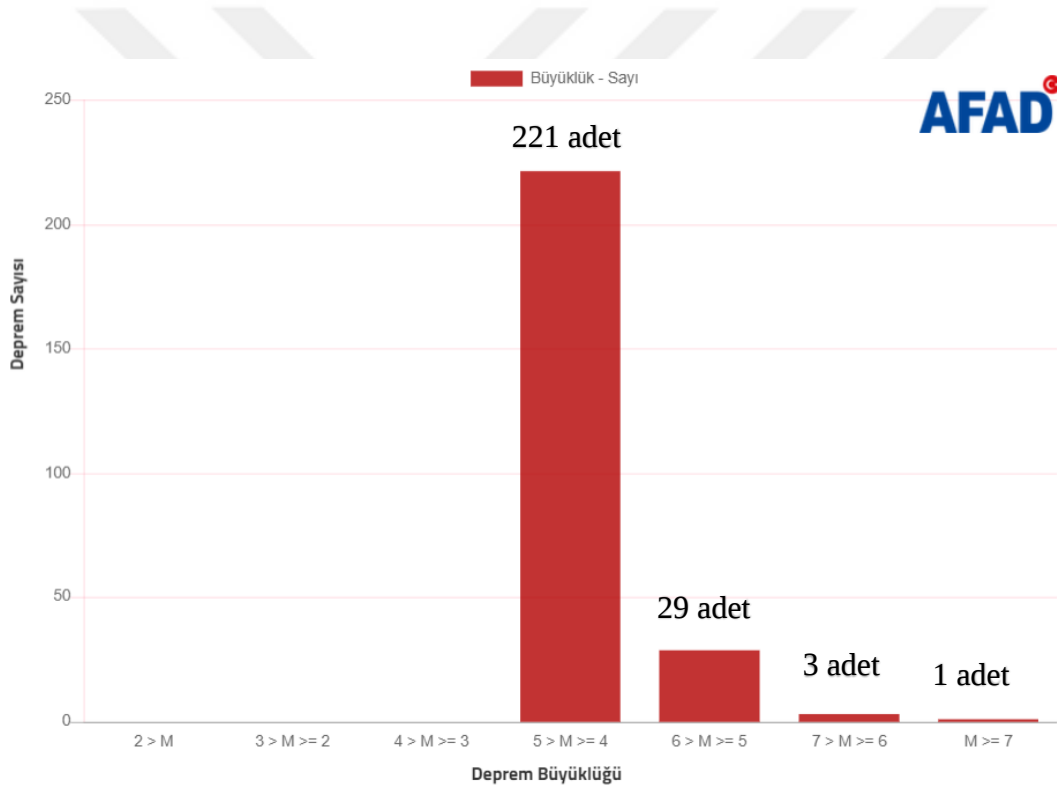
Bu çalışma kapsamında 01/01/1900 ve 10/11/2021 yılları arasındaki deprem kayıtları kullanılmıştır. Bursa ilinde yer alan Ulu Camii merkez kabul edilerek 100 km yarıçaplı dairesel bir alanda meydana gelmiş depremler belirlenmiştir. Bursa ilinin depremselliğini irdeleyebilmek için 40.18° kuzey enlemi ve 29.06° doğu boylamı koordinatları merkez kabul edilerek R:100 km yarıçaplı bir alan oluşturulmuş ve bu alanda meydana gelen depremler dikkate alınmıştır. Merkez üstü belirlenen sismik tehlike alanının dışında kalan yerlerde meydana gelecek olan depremlerin yaratacağı hasarın oldukça sınırlı olacağı düşünülmektedir.

Aşağıda belirlenen sismik bölge ve bu alanda 1900 yılından beri gerçekleşen $4.0 \leq M$ magnitüde sahip olan deprem kayıtları Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : Bursa ili Ulu Cami merkezli sismik etkinlik durumu (AFAD).

Aletsel gözleme dayalı dönem için “AFAD Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı” tarafından kayıt altına alınan deprem kayıtları ilgili internet sitesinden temin edilmiştir. Şekil 4.12’ye göre bölgenin sismik aktivitesinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca bu alan içerisinde meydana gelen 294 adet deprem kaydının büyüklük ve tekrarlanma sayıları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.13’te verilmiştir. Gerçekleşen depremler ve bölgedeki sismik kaynaklar dikkate alındığında bölgenin yüksek sismik aktiviteye sahip olduğu görülmektedir. Belirlenen alan içerisinde gerçekleşmiş olan depremlerin büyük çoğunluğunun $4.0 \leq M < 5$ aralığında olduğu görülmektedir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te verilen harita ve grafik AFAD Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı web sitesi aracılığıyla temin edilebilmiştir.



Şekil 4.13 : Deprem büyüklüğü ve tekrarlanma sayıları arasındaki ilişki (AFAD).

Çizelge 4.11’de inceleme alanı kapsamında dikkate alınan tarihsel döneme ait depremler ve aletsel gözleme dayalı zamandan bu yana kayıt altına alınan depremler gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 : Tarihsel dönemde meydana gelen depremler ve aletsel gözleme dayalı zamandan bu yana kayıt altına alınan depremler.

Tarihsel Döneme ait Depremler						
Deprem Şiddeti (I ₀)	IX			X		
Hesaplanmış Magnitüd, M	7.0			7.6		
Meydana Gelen Deprem Sayısı	7			3		
Aletsel Gözleme Dayalı Deprem Kayıtları						
Büyüklik Aralığı	4≤M≤4.4	4.5≤M≤4.9	5≤M≤5.4	5.5≤M≤5.9	6≤M≤6.4	7≤M≤7.4
Meydana Gelen Deprem Sayısı	160	61	23	6	3	1

Tarihsel döneme (Milat ve 1900 yılları arasını kapsayan dönem) ait deprem verileri, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Deprem Araştırma Enstitüsü internet sitesi aracılığıyla elde edilebilmiştir. Tarihsel döneme ait deprem kayıtları bilgi yetersizliği sebebiyle kullanılamamış olup yapılan analizlerde aletsel gözleme dayalı kayıt altına alınan depremler dikkate alınmıştır.

Depremlere ait büyüklük bilgilerinde kullanılan ölçüm cihazı, bazı dönüşüm bağıntıları gibi sebeplerden ötürü birçok belirsizlik bulunmaktadır. Aralarında ilişki kurulacak olan deprem büyüklükleri değerlendirilirken benzer bağımlı ve bağımsız değişkenlerle ilişkili olması gerekmektedir. Bu nedenle belirlenen deprem büyüklüklerinin hatalı olduğu ve tam doğru yansıtılamadığı da dikkate alındığında farklı büyüklük türlerinin (M_s , M_b , M_l , M_d) homojenleştirme analizi ile tek bir tür olarak belirlenmesi gerekmektedir. Farklı büyüklük türlerini (M_s , M_b , M_l , M_d) içeren aletsel dönem deprem kataloğunu tek büyüklük türüne (M_w) dönüştürmek için AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında yayımlanan “Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi (2014)” adlı çalışmadan yararlanılmıştır. Bu çalışmada yer alan bağıntılar ile Kadirioğlu ve diğ. (2013) kataloğu dikkate alınarak farklı deprem büyüklüklerinin homojenleştirilebilmesi için bazı ampirik bağıntılar Çizelge 4.12’de verilmektedir.

Çizelge 4.12 : Farklı büyüklük türleri (M_s , M_b , M_l , M_d) için homojenleştirme bağıntıları, AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı (2014)’ndan derlenmiştir.

Kullanılacak Dönüşüm Bağıntısı	Kullanım Aralığı
$M_w=1.0319(\pm 0.025)M_b+0.0223(\pm 0.130)$	$3.9 \leq M_b \leq 5.8$
$M_w=0.5716(\pm 0.024927)M_s+2.4980(\pm 0.117197)$	$3.4 \leq M_s \leq 5.4$
$M_w=0.8126(\pm 0.034602)M_s+1.1723(\pm 0.208173)$	$M_s \geq 5.5$
$M_w=0.7947(\pm 0.033)M_d+1.3420(\pm 0.163)$	$3.5 \leq M_d \leq 5.0$
$M_w=0.8095(\pm 0.031)M_l+1.3003(\pm 0.154)$	$3.3 \leq M_l \leq 5.3$

Bursa ili Ulu Camii merkezli $R=100$ km yarıçaplı alan içerisinde 01/01/1900 ve 10/11/2021 tarihleri arasında gerçekleşen depremler bölgede meydana geliş sırası ile Çizelge 4.13’te özetlenmiştir. Ayrıca bu çizelgede farklı deprem büyüklük türleri moment magnitüdü (M_w) olarak homojenleştirilmiştir.

Çizelge 4.13 : Belirlenen inceleme alanında aletsel dönemden bu yana meydana gelen depremler ve özellikleri (AFAD).

Yıl	Ay	Gün	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklük	Magnitüd Türü	Homojen M_w
2020	12	11	39.990	28.196	7.00	4.1	M_w	4.1
2019	10	10	40.678	29.247	13.86	4.0	M_w	4.0
2019	9	26	40.842	28.273	4.58	4.1	M_w	4.1
2019	3	4	40.457	28.451	13.72	4.0	M_w	4.0
2018	12	20	40.594	28.972	12.47	4.5	M_w	4.5
2018	11	30	40.603	28.949	14.28	4.1	M_w	4.1
2016	6	25	40.699	29.202	9.73	4.2	M_w	4.2
2016	6	7	40.259	29.161	13.92	4.3	M_w	4.3
2016	11	16	40.818	28.761	13.23	4.0	M_w	4.0
2016	1	23	40.046	28.579	13.02	4.3	M_w	4.3
2014	11	30	39.349	29.012	8.37	4.0	M_w	4.0
2014	11	28	39.332	29.006	10.78	4.3	M_w	4.3
2014	11	26	39.335	29.004	8.72	4.0	M_w	4.0
2014	11	15	39.326	28.998	12.19	4.0	M_w	4.0
2014	10	22	40.411	30.100	7.68	4.5	M_w	4.5
2014	8	3	40.592	29.168	10.17	4.0	M_w	4.0
2014	7	3	40.193	27.923	11.75	4.5	M_w	4.5
2013	8	17	40.413	29.119	14.34	4.5	M_l	4.9
2011	8	16	40.440	28.890	5.00	4.0	M_l	4.5
2011	7	11	40.138	29.973	26.14	4.7	M_l	5.1
2011	3	9	40.430	28.060	9.00	4.0	M_l	4.5
2011	1	20	40.710	29.760	10.00	4.1	M_l	4.6
2010	6	11	40.426	28.957	12.90	4.2	m_b	4.4
2009	8	1	40.370	28.280	10.00	4.3	M_l	4.8
2008	10	5	40.610	29.014	23.68	4.2	M_l	4.7
2008	3	12	40.638	28.998	12.00	4.2	m_b	4.4

Çizelge 4.13 (devam) : Belirlenen inceleme alanında aletsel dönemden bu yana meydana gelen depremler ve özellikleri (AFAD).

Yıl	Ay	Gün	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklik	Magnitüd Türü	Homojen M _w
2007	1	28	40.592	28.386	10.00	4.0	Ml	4.5
2006	12	19	40.386	28.311	10.00	4.0	Md	4.5
2006	10	25	40.469	29.008	9.50	4.0	mb	4.1
2006	10	24	40.443	29.079	15.50	5.0	Mw	5.0
2006	10	20	40.238	28.032	1.70	4.8	mb	5.0
2005	6	20	39.716	29.220	3.80	4.2	mb	4.4
2004	9	29	40.791	28.999	13.90	4.3	Ml	4.8
2004	5	16	40.727	29.338	8.80	4.4	mb	4.6
2003	12	23	39.876	29.279	9.00	4.1	mb	4.3
2003	12	23	39.880	29.265	8.80	4.6	mb	4.8
2003	6	9	40.201	28.083	8.30	4.5	mb	4.7
2003	3	20	40.005	28.779	13.60	4.2	mb	4.4
2002	5	5	40.545	28.304	8.00	4.0	mb	4.1
2001	1	16	40.900	29.070	13.00	4.1	mb	4.3
2000	7	7	40.863	29.339	8.90	4.5	mb	4.7
2000	2	9	40.770	29.940	11.00	4.1	mb	4.3
2000	1	31	40.712	29.252	9.70	4.1	mb	4.3
1999	10	20	40.816	28.992	10.00	4.7	mb	4.9
1999	9	29	40.734	29.354	7.90	5.2	Mw	5.2
1999	9	18	40.599	29.225	9.30	4.6	mb	4.8
1999	9	9	40.710	29.140	11.00	4.0	mb	4.1
1999	9	6	40.788	29.746	17.20	4.0	mb	4.1
1999	9	4	40.700	29.935	10.40	4.0	mb	4.1
1999	8	31	40.613	29.077	4.50	4.4	mb	4.6
1999	8	31	40.697	29.908	10.00	4.6	mb	4.8
1999	8	31	40.706	29.894	20.00	5.1	Mw	5.1
1999	8	22	40.609	29.075	23.90	4.1	mb	4.3
1999	8	20	40.738	29.802	12.50	4.0	mb	4.1
1999	8	20	40.605	29.193	8.80	4.5	mb	4.7
1999	8	20	40.766	29.846	9.50	4.3	mb	4.5
1999	8	19	40.619	29.098	4.00	4.1	mb	4.3
1999	8	19	40.571	29.205	14.00	5.1	Mw	5.1
1999	8	19	40.611	29.021	0.10	4.1	mb	4.3
1999	8	19	40.600	29.194	8.80	4.5	mb	4.7
1999	8	17	40.740	29.270	15.00	4.1	mb	4.3
1999	8	17	40.430	28.720	7.00	4.1	mb	4.3
1999	8	17	40.768	29.790	11.90	4.1	mb	4.3
1999	8	17	40.420	28.700	8.00	4.0	mb	4.1
1999	8	17	40.774	29.910	11.40	4.1	mb	4.3
1999	8	17	40.755	29.154	10.00	4.3	mb	4.5
1999	8	17	40.526	29.420	19.60	4.3	mb	4.5
1999	8	17	40.785	29.201	10.00	4.7	mb	4.9
1999	8	17	40.714	29.027	1.20	4.3	mb	4.5

Çizelge 4.13 (devam) : Belirlenen inceleme alanında aletsel dönemden bu yana meydana gelen depremler ve özellikleri (AFAD).

Yıl	Ay	Gün	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklik	Magnitüd Türü	Homojen M _w
1999	8	17	40.721	29.717	20.00	4.1	mb	4.3
1999	8	17	40.711	29.911	10.00	5.0	mb	5.2
1998	9	25	40.200	28.882	10.00	4.0	mb	4.1
1997	10	18	39.814	28.623	6.50	4.0	Ml	4.5
1997	10	18	39.803	28.667	4.70	4.4	Ml	4.9
1997	5	2	39.673	28.590	7.00	4.0	mb	4.1
1996	3	21	40.252	29.574	15.00	4.0	mb	4.1
1995	8	19	40.229	29.611	16.10	4.2	mb	4.4
1995	7	7	40.485	29.326	8.70	4.1	mb	4.3
1994	7	15	39.333	29.198	1.00	4.0	mb	4.1
1994	7	8	39.319	29.140	10.00	4.0	mb	4.1
1994	6	25	39.295	29.178	6.00	4.0	Md	4.5
1994	5	28	40.689	29.878	9.80	4.0	mb	4.1
1994	4	6	40.073	28.100	6.90	4.0	Ml	4.5
1994	3	28	40.395	29.961	17.30	4.0	mb	4.1
1994	2	21	40.204	29.319	2.40	4.0	mb	4.1
1993	5	30	39.293	29.115	4.00	4.1	mb	4.3
1993	5	25	40.470	28.071	11.50	4.1	Ml	4.6
1993	5	21	39.800	28.930	3.00	4.0	mb	4.1
1993	3	18	40.427	28.004	8.50	4.4	mb	4.6
1993	3	18	40.455	27.981	9.50	4.4	mb	4.6
1993	3	18	40.400	28.006	9.80	4.1	mb	4.3
1993	1	23	40.784	28.764	6.30	4.1	Ml	4.6
1992	4	1	39.400	28.680	12.00	4.0	mb	4.1
1992	3	22	40.172	28.414	16.80	4.9	mb	5.1
1991	3	3	40.637	29.078	9.10	4.6	mb	4.8
1991	2	12	40.788	28.844	14.50	4.8	mb	5.0
1991	1	7	40.690	28.558	8.30	4.0	Md	4.5
1991	1	4	39.922	30.167	7.50	4.0	Md	4.5
1990	9	13	39.539	28.528	10.00	4.3	mb	4.5
1989	1	27	40.426	29.149	11.00	4.1	mb	4.3
1988	1	14	39.955	29.157	7.80	4.2	mb	4.4
1988	1	1	40.137	29.232	6.40	4.5	mb	4.7
1987	10	27	40.418	28.458	17.70	4.4	mb	4.6
1987	9	3	40.457	29.240	7.50	4.0	mb	4.1
1986	11	15	39.372	28.905	10.00	4.5	mb	4.7
1986	11	14	39.361	29.062	10.00	4.5	mb	4.7
1986	10	30	39.736	28.782	7.80	4.0	mb	4.1
1986	10	26	40.801	28.993	10.00	4.6	Ml	5.0
1986	10	12	39.659	28.965	11.30	4.4	mb	4.6
1986	6	27	40.891	28.346	5.00	4.1	mb	4.3
1986	6	25	39.463	28.363	5.00	4.2	Ml	4.7
1986	6	3	39.460	28.360	9.40	4.3	mb	4.5

Çizelge 4.13 (devam) : Belirlenen inceleme alanında aletsel dönemden bu yana meydana gelen depremler ve özellikleri (AFAD).

Yıl	Ay	Gün	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklik	Magnitüd Türü	Homojen M _w
1986	5	27	39.456	28.439	11.10	4.4	mb	4.6
1986	5	14	39.492	28.417	7.70	4.5	mb	4.7
1985	9	14	40.725	29.112	7.60	4.7	mb	4.9
1985	4	11	40.704	29.009	6.00	4.2	mb	4.4
1984	10	28	40.069	29.258	9.00	4.8	mb	5.0
1984	4	1	39.559	28.760	6.80	4.1	mb	4.3
1984	3	31	39.616	28.758	4.40	4.0	mb	4.1
1983	12	30	40.101	29.412	7.00	4.1	mb	4.3
1983	12	7	40.070	29.371	8.00	4.0	mb	4.1
1983	11	23	40.112	29.292	2.10	4.1	mb	4.3
1983	11	15	40.124	29.277	7.20	4.4	mb	4.6
1983	11	6	39.322	29.347	5.70	4.6	mb	4.8
1983	11	3	40.155	29.279	14.50	4.0	mb	4.1
1983	11	2	40.100	29.359	3.60	4.6	mb	4.8
1983	10	30	40.139	29.378	10.00	4.7	Ml	5.1
1983	10	27	40.156	29.301	17.60	4.3	mb	4.5
1983	10	21	40.108	29.402	4.70	5.4	Mw	5.4
1983	2	1	40.204	28.937	3.10	4.8	mb	5.0
1982	7	27	40.375	28.950	11.00	4.3	mb	4.5
1982	6	9	40.140	28.894	10.00	4.4	mb	4.6
1982	5	23	40.451	29.039	4.40	4.2	Ml	4.7
1982	5	20	40.404	28.983	10.00	4.0	mb	4.1
1982	4	16	40.793	29.844	10.00	4.0	mb	4.1
1982	2	8	39.328	29.047	13.00	4.0	mb	4.1
1981	12	28	39.389	29.056	10.00	4.5	mb	4.7
1981	12	28	39.331	29.120	16.50	4.3	mb	4.5
1981	12	26	40.148	28.740	10.00	4.9	mb	5.1
1981	8	28	40.466	29.211	10.00	4.1	mb	4.3
1981	8	8	40.709	28.257	3.30	4.0	Ml	4.5
1981	7	23	40.297	28.936	6.80	4.5	mb	4.7
1981	7	22	40.265	28.898	2.10	4.0	mb	4.1
1981	7	21	40.226	28.857	1.20	4.1	mb	4.3
1980	7	29	39.875	29.137	20.60	4.1	mb	4.3
1979	9	9	39.320	28.830	8.00	4.0	mb	4.1
1979	8	23	39.688	28.573	10.00	5.0	mb	5.2
1979	7	18	39.649	28.697	4.40	5.3	Mw	5.3
1979	1	11	40.300	29.260	10.00	4.3	mb	4.5
1978	5	11	40.198	29.580	10.00	4.3	mb	4.5
1978	2	13	40.140	28.744	10.00	4.2	Ml	4.7
1977	12	9	39.362	29.131	10.00	4.3	mb	4.5
1977	3	23	39.631	28.650	22.80	4.2	mb	4.4
1976	8	24	39.339	29.136	10.00	4.9	mb	5.1
1976	8	22	39.329	29.047	10.90	4.8	mb	5.0

Çizelge 4.13 (devam) : Belirlenen inceleme alanında aletsel dönemden bu yana meydana gelen depremler ve özellikleri (AFAD).

Yıl	Ay	Gün	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklik	Magnitüd Türü	Homojen M _w
1976	7	15	39.367	29.064	11.00	4.1	mb	4.3
1976	6	14	39.360	29.285	18.80	4.7	mb	4.9
1976	6	11	39.322	29.225	2.00	4.2	mb	4.4
1976	5	31	39.477	29.136	39.50	4.9	mb	5.1
1976	5	29	40.360	28.890	6.00	4.0	mb	4.1
1976	5	29	39.371	29.343	3.00	4.2	mb	4.4
1976	5	28	39.350	29.364	5.00	4.2	mb	4.4
1976	5	25	39.304	29.217	15.00	4.6	mb	4.8
1976	5	12	39.333	29.162	21.00	4.3	mb	4.5
1976	5	9	39.308	29.117	19.90	4.2	mb	4.4
1976	5	8	39.321	29.082	32.60	4.8	mb	5.0
1974	9	13	40.793	28.291	7.60	4.6	MI	5.0
1974	1	18	40.500	28.940	18.00	4.0	mb	4.1
1973	11	22	40.364	29.880	8.10	4.2	mb	4.4
1972	6	21	40.258	30.042	33.00	4.1	mb	4.3
1972	2	28	40.401	28.999	6.00	4.1	mb	4.3
1971	5	23	39.960	28.720	3.00	4.1	MS	4.8
1970	12	20	39.355	29.255	33.10	4.8	MS	5.2
1970	11	15	39.320	29.280	10.00	4.0	MS	4.8
1970	9	15	39.700	28.540	10.00	4.0	MS	4.8
1970	9	6	40.200	28.500	10.00	4.0	MS	4.8
1970	7	4	39.900	28.800	62.00	4.0	mb	4.1
1970	5	30	39.400	28.800	10.00	4.3	mb	4.5
1970	5	11	39.360	29.320	10.00	4.5	mb	4.7
1970	5	11	39.610	29.370	56.00	4.1	mb	4.3
1970	5	8	39.930	30.070	35.00	4.1	mb	4.3
1970	4	30	39.315	29.234	34.10	4.7	mb	4.9
1970	4	30	39.308	29.283	17.00	4.6	mb	4.8
1970	4	26	39.370	28.790	46.00	4.1	mb	4.3
1970	4	24	39.600	29.600	33.00	4.4	mb	4.6
1970	4	18	39.370	29.300	10.00	4.4	mb	4.6
1970	4	15	39.338	29.290	24.90	4.6	mb	4.8
1970	4	13	39.373	29.008	20.70	4.4	mb	4.6
1970	4	7	39.344	29.266	35.20	5.1	MS	5.4
1970	4	7	39.320	29.090	33.00	4.4	mb	4.6
1970	4	5	39.310	29.180	10.00	4.3	mb	4.5
1970	4	4	39.700	30.000	10.00	4.3	MS	5.0
1970	4	1	39.358	29.253	36.30	4.8	mb	5.0
1970	3	31	39.410	29.320	25.00	4.0	mb	4.1
1970	3	31	39.352	29.337	19.30	4.6	mb	4.8
1970	3	30	39.300	29.290	33.00	4.6	mb	4.8
1970	3	30	39.400	29.130	21.00	4.3	mb	4.5
1970	3	30	39.298	29.268	7.80	5.0	MS	5.4

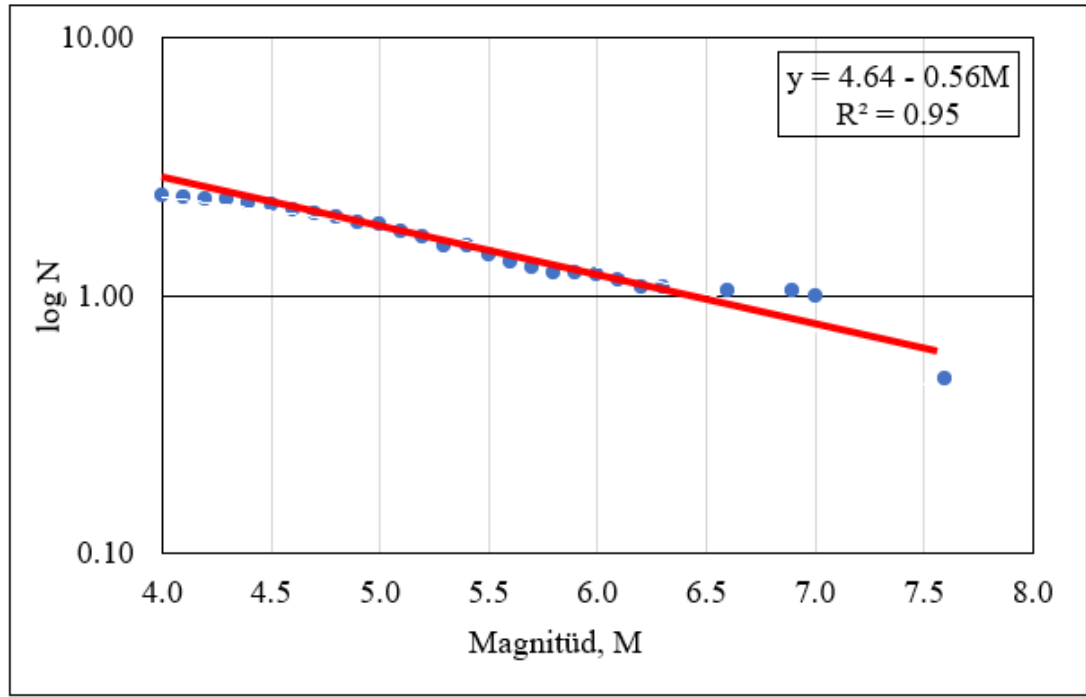
Çizelge 4.13 (devam) : Belirlenen inceleme alanında aletsel dönemden bu yana meydana gelen depremler ve özellikleri (AFAD).

Yıl	Ay	Gün	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklik	Magnitüd Türü	Homojen M _w
1970	3	30	39.298	29.268	7.80	5.0	MS	5.4
1970	3	30	39.430	29.400	33.00	4.6	mb	4.8
1970	3	29	39.290	29.200	2.00	4.3	mb	4.5
1970	3	29	39.360	29.510	38.00	4.4	mb	4.6
1970	3	29	39.290	29.180	38.00	4.5	mb	4.7
1969	12	24	40.500	28.400	10.00	4.3	MS	5.0
1968	11	9	40.150	28.350	24.00	4.2	mb	4.4
1968	5	9	40.070	29.260	10.00	4.2	mb	4.4
1968	5	6	40.330	28.630	4.00	4.3	mb	4.5
1967	8	6	41.000	28.800	10.00	4.3	mb	4.5
1967	6	1	40.930	28.900	10.00	4.0	MS	4.8
1967	2	12	40.140	28.100	36.00	4.2	mb	4.4
1964	12	15	40.020	28.790	26.00	4.7	mb	4.9
1964	11	20	40.200	28.060	56.00	4.4	mb	4.6
1964	10	20	40.000	28.600	10.00	4.8	MS	5.2
1964	10	7	40.180	28.360	31.00	4.4	mb	4.6
1964	10	6	40.300	28.230	34.00	7.0	MS	6.9
1964	10	6	40.186	28.153	28.10	5.4	mb	5.6
1963	9	24	40.840	28.900	10.00	4.8	MS	5.2
1963	9	18	40.770	29.120	40.00	6.3	MS	6.3
1962	4	19	40.750	28.840	10.00	4.3	MS	5.0
1959	8	6	40.400	29.200	10.00	4.1	MS	4.8
1959	4	2	40.500	29.410	20.00	4.6	MS	5.1
1957	12	26	40.830	29.720	10.00	5.2	MS	5.5
1957	10	24	40.060	29.750	10.00	4.7	MS	5.2
1953	6	3	40.280	28.530	20.00	5.3	MS	5.5
1952	3	19	39.600	28.640	40.00	5.4	MS	5.6
1951	9	15	40.150	28.020	40.00	5.0	MS	5.4
1950	11	28	39.730	28.050	40.00	5.1	MS	5.4
1949	2	5	39.890	29.350	40.00	5.0	MS	5.4
1948	11	13	40.230	29.020	60.00	5.6	MS	5.7
1943	4	14	39.620	29.640	40.00	5.0	MS	5.4
1942	11	15	39.550	28.580	10.00	6.1	MS	6.1
1941	2	9	40.130	28.270	30.00	4.6	MS	5.1
1940	8	19	40.130	30.090	40.00	4.5	MS	5.1
1939	10	19	39.820	29.500	10.00	5.3	MS	5.5
1939	8	9	39.910	29.810	60.00	5.1	MS	5.4
1939	8	3	39.750	29.680	50.00	5.5	MS	5.6
1939	8	2	39.750	29.480	50.00	5.3	MS	5.5
1939	7	31	39.800	29.600	10.00	4.8	MS	5.2
1939	7	25	39.750	29.520	50.00	5.2	MS	5.5
1928	5	2	39.640	29.140	10.00	6.1	MS	6.1
1925	6	10	41.000	29.000	8.00	4.4	MS	5.0

Çizelge 4.13 (devam) : Belirlenen inceleme alanında aletsel dönemden bu yana meydana gelen depremler ve özellikleri (AFAD).

Yıl	Ay	Gün	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklik	Magnitüd Türü	Homojen M _w
1924	9	1	40.900	29.200	15.00	4.3	MS	5.0
1924	1	22	39.510	28.400	80.00	5.3	MS	5.5
1913	5	8	40.050	30.130	10.00	4.8	MS	5.2
1909	10	29	40.260	29.640	10.00	5.8	MS	5.9
1907	1	22	41.000	29.000	12.00	4.5	MS	5.1
1905	10	22	40.600	28.300	10.00	5.9	MS	6.0
1905	4	15	40.200	29.000	6.00	5.6	MS	5.7
1903	5	26	40.650	29.000	10.00	5.9	MS	6.0
1902	7	13	40.300	28.750	10.00	4.0	MS	4.8
1901	9	7	39.840	28.140	10.00	4.1	MS	4.8
1900	12	2	40.440	28.980	10.00	4.2	MS	4.9
1900	8	9	40.440	30.100	10.00	4.2	MS	4.9
1900	8	1	40.440	30.100	10.00	4.7	MS	5.2
1900	6	18	40.430	29.260	10.00	4.8	MS	5.2

Gutenberg – Richter, meydana gelen depremlerin büyüklüğü ile sıklığı arasındaki ilişkiyi tanımlayarak bir bölgenin sismik tehlike analizinin yapılabilmesine yardımcı olmaktadır. Öncelikle deprem büyüklükleri sırasıyla küçükten büyüğe doğru sıralanır. Ardından her bir büyüklük değeri için bu magnitüd ve üstündeki deprem adeti (N) yazılır. Burada N, belirli bir magnitüd ve üzerindeki büyüklüklerde gerçekleşen deprem sayısını ifade etmektedir. Bir başka deyişle “N” sayısı kümülatif deprem sayısını ifade etmektedir. Yatay eksen depremlerin büyüklük değerleri, düşey eksen ise logaritmik olarak “N” deprem sayıları belirtilir. Böylelikle yapılan regresyon analizi sonucunda a ve b depremsellik parametreleri belirlenmiş olmaktadır. Aşağıda Bursa ili için yapılan deprem magnitüdü ve meydana gelme sıklığı arasındaki ilişki grafik olarak Şekil 4.14’te gösterilmiştir. Bu ilişkiye bağlı olarak regresyon analizi yapılan Gutenberg-Richter Tekrarlanma Kanunu’ndaki a ve b depremsellik katsayıları belirlenmiştir. Yapılan regresyon analizinde aletsel döneme ait deprem kayıtları ve tarihsel dönemde gerçekleşmiş olan depremler dikkate alınmıştır. Gutenberg-Richter Tekrarlanma Kanunu dikkate alınarak yapılan regresyon analizi yapılmıştır. Bu ilişkiye bağlı olarak yapılan analiz sonucu Gutenberg-Richter Tekrarlanma Kanunu’ndaki a ve b depremsellik katsayıları sırasıyla 4.64 ve 0.56 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14 : Bursa ili Ulu Camii merkezli inceleme alanı için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi.

Bursa ili Ulu Camii merkezli R=100 km yarıçaplı bir alan içerisinde gerçekleşen minimum deprem büyüklüğü (M_w) 4.0; maksimum deprem büyüklüğü (M_w) 6.9 olarak belirlenmiştir. Yapılan olasılıksal sismik tehlike analizinde, magnitüd aralıkları 0.1 seçilerek her bir büyüklük değeri için kümülatif dağılım fonksiyonları ($F_M(m_i)$) hesaplanmıştır. Belirli bir büyüklük değerindeki depremin oluşma olasılıkları ise ard arda gelen iki kümülatif fonksiyon değeri arasındaki fark olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşımla yapılan hesaplar sonucu inceleme alanında belirli bir “m” magnitüdüne sahip depremin oluşma olasılığı belirlenip aşağıda Çizelge 4.14’te verilmiştir.

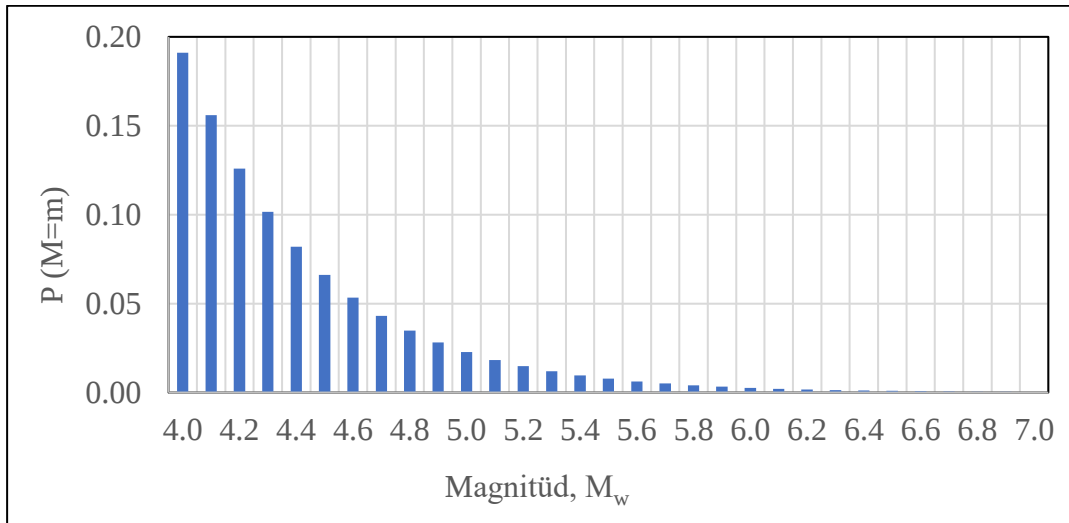
Çizelge 4.14 : İnceleme alanında oluşan depremlerin büyüklük ve oluşma sıklığı.

Deprem Magnitüdü, m_i	"m"den Büyük Magnitüdlü Deprem Meydana Gelme Sıklığı, $F_M(m_i)$	Belirtilen "m" Büyüklüğünde Deprem Oluşma Sıklığı, $P(M=m_i)$
4.0	0.000	0.191
4.1	0.191	0.156
4.2	0.347	0.126
4.3	0.473	0.102
4.4	0.575	0.082
4.5	0.657	0.066
4.6	0.723	0.053
4.7	0.776	0.043

Çizelge 4.14 (devam) : İnceleme alanında oluşan depremlerin büyüklük ve oluşma sıklığı.

Deprem Magnitüdü, m_i	"m"den Büyük Magnitütlü Deprem Meydana Gelme Sıklığı, $F_M(m_i)$	Belirtilen "m" Büyüklüğünde Deprem Oluşma Sıklığı, $P(M=m_i)$
4.8	0.819	0.035
4.9	0.854	0.028
5.0	0.882	0.023
5.1	0.905	0.018
5.2	0.923	0.015
5.3	0.938	0.012
5.4	0.950	0.010
5.5	0.960	0.008
5.6	0.967	0.006
5.7	0.974	0.005
5.8	0.979	0.004
5.9	0.983	0.003
6.0	0.986	0.003
6.1	0.989	0.002
6.2	0.991	0.002
6.3	0.993	0.001
6.4	0.994	0.001
6.5	0.995	0.001
6.6	0.996	0.001
6.7	0.997	0.001
6.8	0.998	0.000
6.9	0.998	0.000
7.0	0.998	0.000

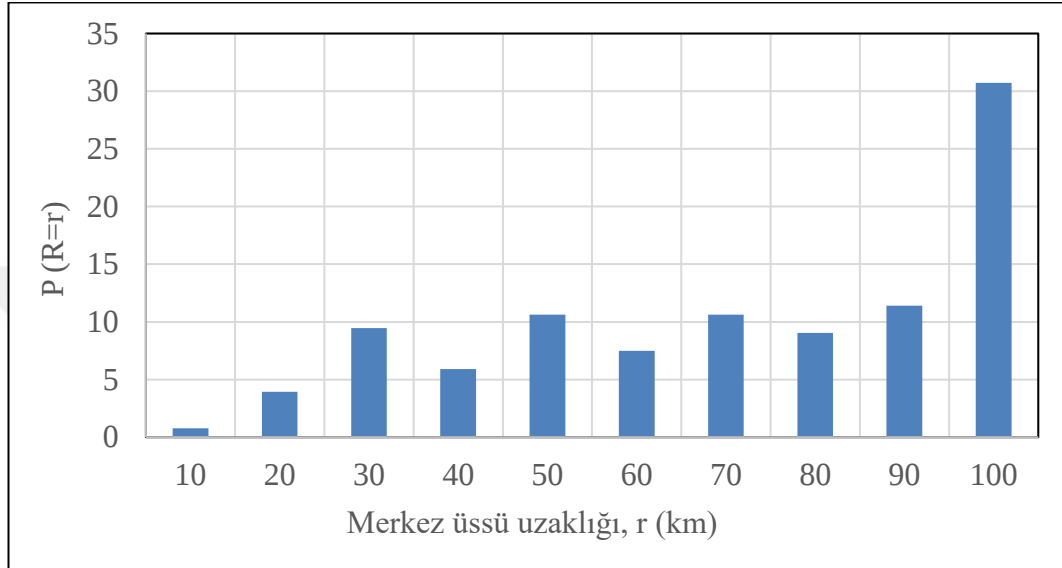
Çizelge 4.14'te gösterilen hesaplara göre inceleme alanında oluşan depremlerin büyüklüğü ve oluşma sıklığını gösteren histogram Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Örneğin $M_w = 4.6$ büyüklüğünde deprem meydana gelme olasılığı %5 olarak belirlenmektedir.



Şekil 4.15 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin büyüklük ve oluşma sıklığını gösteren histogram.

4.5.3 Deprem uzaklığının tanımlanması

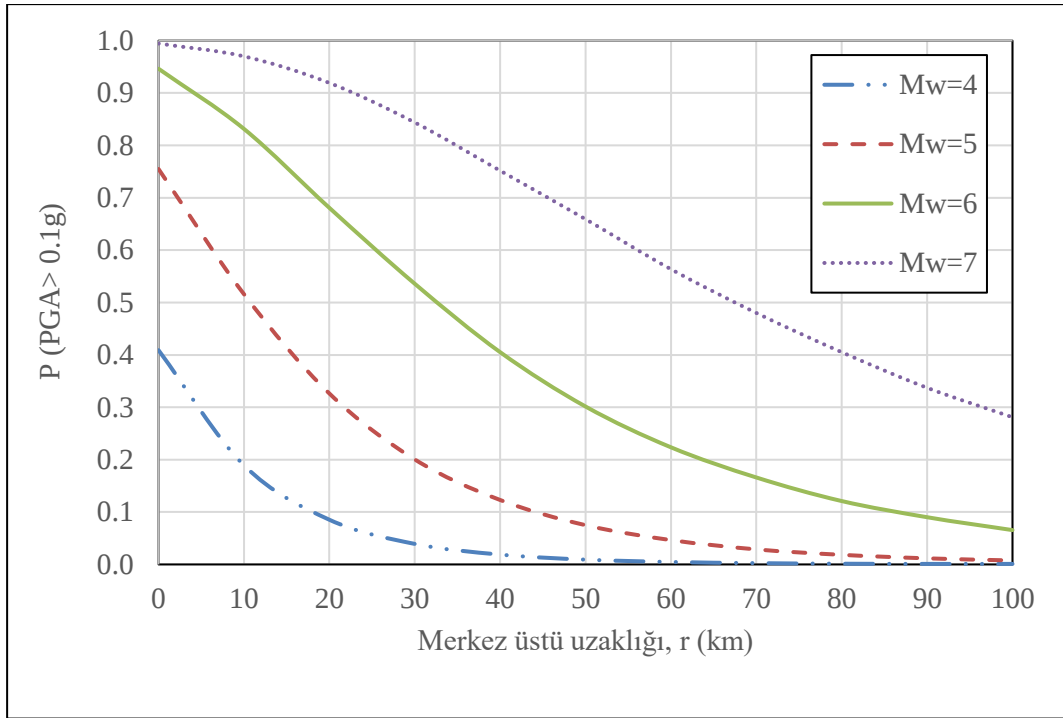
Depremi merkez üstü (epicenter) ile Bursa ili Ulu Camii merkezi arasındaki mesafe “ r ” olarak ifade edilmiştir. Buna göre inceleme alanında kabul edilen merkez ve uzaklığa göre gerçekleşen deprem sayıları arasındaki ilişki Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Örneğin $r = 70$ km uzaklıkta deprem meydana gelme olasılığı yaklaşık %10 olarak belirlenmektedir.



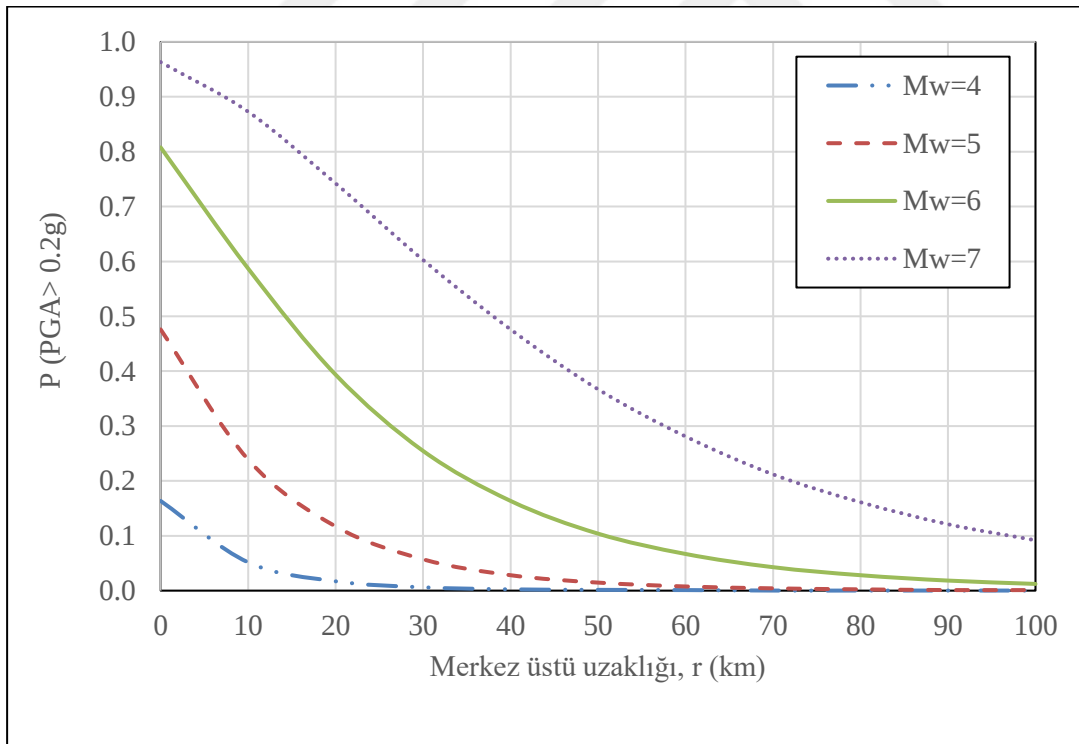
Şekil 4.16 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve oluşma sıklığını gösteren histogram.

4.5.4 Yer hareketi azalım ilişkileri ve olasılıksal bağıntılar

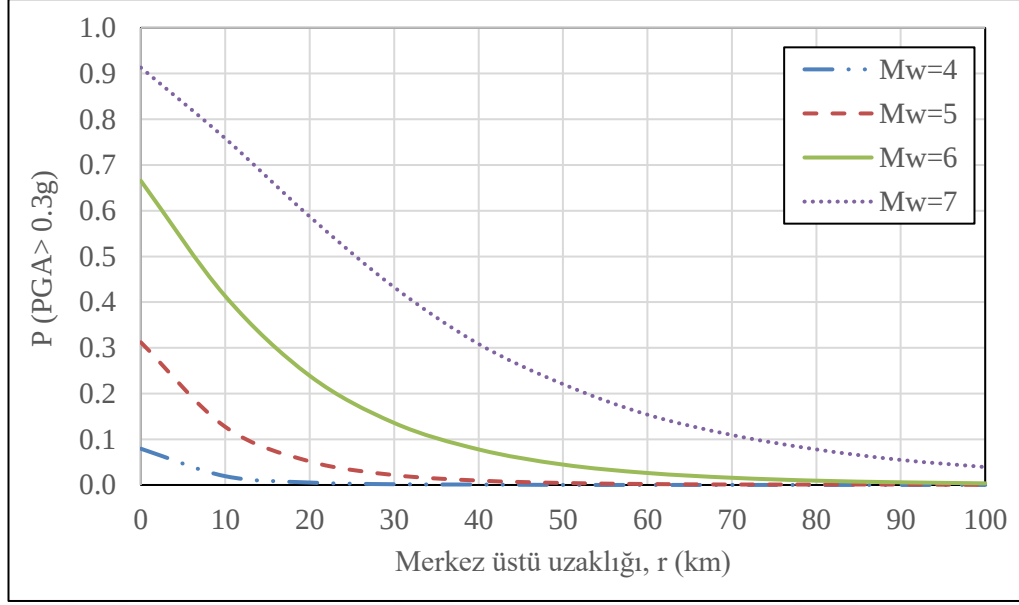
Bursa ili ve çevresinde yer alan sismik kaynaklar, bölgenin jeolojisi, fay mekanizmaları, fay parametreleri, deprem büyüklük değerleri vb. özellikler dikkate alınarak uygun yer hareketi azalım ilişkileri seçilmiştir. Bu çalışma kapsamında sismik tehlike analizlerinde kullanılan azalım ilişkileri Campbell-Bozorgnia 2008 NGA (CB2008) ve Chiou and Youngs 2008 NGA (CY2008)’dır. Değişken deprem büyüklükleri ve merkez üstü uzaklıklarına göre belirlenen maksimum yer ivmesi değerinin aşılma olasılıkları normal dağılım metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar Çizelge 4.15’te ve her ivme değerinin aşılma olasılığını gösteren grafikler Şekil 4.17 ile Şekil 4.20 arasında gösterilmektedir.



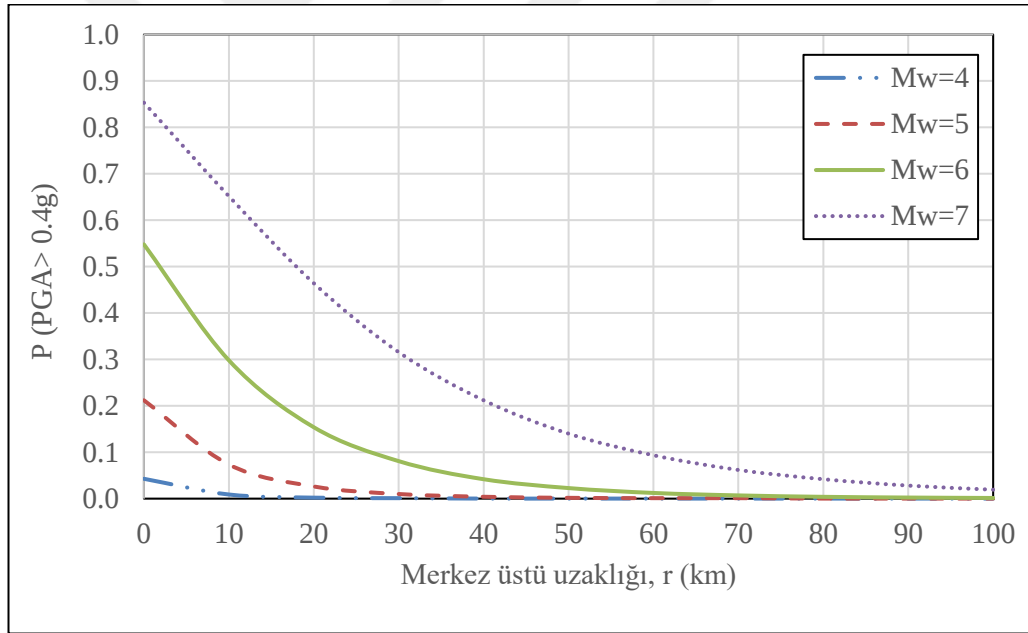
Şekil 4.17 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve $PGA > 0.1g$ olma olasılığı ilişkisini gösteren grafik.



Şekil 4.18 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve $PGA > 0.2g$ olma olasılığı ilişkisini gösteren grafik.



Şekil 4.19 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve PGA>0.3g olma olasılığı ilişkisini gösteren grafik.



Şekil 4.20 : Bursa ili ve çevresinde oluşan depremlerin merkez üstü uzaklığı ve PGA>0.4g olma olasılığı ilişkisini gösteren grafik.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.20 arasında sunulan grafikler dikkate alındığında örneğin $M_w = 7$ büyüklüğünde merkez üssü uzaklığı $r=30$ km olan bölge için en büyük yer ivmesi değerinin (PGA) 0.1g'den büyük olma olasılığı %85, 0.2g'den büyük olma olasılığı %60, 0.3g'den büyük olma olasılığı %43 ve 0.4g'den büyük olma olasılığı yaklaşık %31 olarak belirlenebilmektedir.

Çizelge 4.15 : Değişken deprem büyüklüğü ve merkez üstü uzaklığına göre maksimum yer ivmesi (PGA) değerlerinin aşılma olasılıkları.

	r (km)	ln PGA	z	P(PGA≤0.1g)	P(PGA>0.1g)	z	P(PGA≤0.2g)	P(PGA>0.2g)	z	P(PGA≤0.3g)	P(PGA>0.3g)	z	P(PGA≤0.4g)	P(PGA>0.4g)
$M_W = 4$	0	-2.52	0.23	0.59	0.41	0.98	0.84	0.16	1.41	0.92	0.08	1.72	0.96	0.04
	10	-3.13	0.88	0.81	0.19	1.63	0.95	0.05	2.07	0.98	0.02	2.37	0.99	0.01
	20	-3.58	1.37	0.91	0.09	2.12	0.98	0.02	2.55	0.99	0.01	2.86	1.00	0.00
	30	-3.94	1.76	0.96	0.04	2.51	0.99	0.01	2.94	1.00	0.00	3.25	1.00	0.00
	40	-4.24	2.08	0.98	0.02	2.83	1.00	0.00	3.26	1.00	0.00	3.57	1.00	0.00
	50	-4.50	2.36	0.99	0.01	3.11	1.00	0.00	3.54	1.00	0.00	3.85	1.00	0.00
	60	-4.73	2.60	1.00	0.00	3.35	1.00	0.00	3.78	1.00	0.00	4.09	1.00	0.00
	70	-4.93	2.82	1.00	0.00	3.56	1.00	0.00	4.00	1.00	0.00	4.31	1.00	0.00
	80	-5.11	3.01	1.00	0.00	3.76	1.00	0.00	4.19	1.00	0.00	4.50	1.00	0.00
	90	-5.27	3.19	1.00	0.00	3.93	1.00	0.00	4.37	1.00	0.00	4.68	1.00	0.00
	100	-5.42	3.35	1.00	0.00	4.10	1.00	0.00	4.53	1.00	0.00	4.84	1.00	0.00
$M_W = 5$	0	-1.66	-0.7	-	0.75	0.06	0.52	0.48	0.49	0.69	0.31	0.80	0.79	0.21
	10	-2.27	-0.1	-	0.52	0.71	0.76	0.24	1.14	0.87	0.13	1.45	0.93	0.07
	20	-2.72	0.45	0.67	0.33	1.19	0.88	0.12	1.63	0.95	0.05	1.94	0.97	0.03
	30	-3.08	0.84	0.80	0.20	1.58	0.94	0.06	2.02	0.98	0.02	2.33	0.99	0.01
	40	-3.38	1.16	0.88	0.12	1.91	0.97	0.03	2.34	0.99	0.01	2.65	1.00	0.00
	50	-3.64	1.44	0.93	0.07	2.18	0.99	0.01	2.62	1.00	0.00	2.93	1.00	0.00
	60	-3.87	1.68	0.95	0.05	2.43	0.99	0.01	2.86	1.00	0.00	3.17	1.00	0.00
	70	-4.07	1.90	0.97	0.03	2.64	1.00	0.00	3.08	1.00	0.00	3.39	1.00	0.00
	80	-4.25	2.09	0.98	0.02	2.83	1.00	0.00	3.27	1.00	0.00	3.58	1.00	0.00
	90	-4.41	2.27	0.99	0.01	3.01	1.00	0.00	3.45	1.00	0.00	3.76	1.00	0.00
	100	-4.56	2.43	0.99	0.01	3.17	1.00	0.00	3.61	1.00	0.00	3.92	1.00	0.00

Çizelge 4.15 (devam) : Değişken deprem büyüklüğü ve merkez üstü uzaklığına göre maksimum yer ivmesi (PGA) değerlerinin aşılma olasılıkları.

	r (km)	ln PGA	z	P(PGA≤0.1g)	P(PGA>0.1g)	z	P(PGA≤0.2g)	P(PGA>0.2g)	z	P(PGA≤0.3g)	P(PGA>0.3g)	z	P(PGA≤0.4g)	P(PGA>0.4g)
$M_W = 6$	0	-0.80	-1.6	-	0.95	-0.9	-	0.81	-0.4	-	0.67	-0.1	-	0.55
	10	-1.41	-1.0	-	0.83	-0.2	-	0.59	0.22	0.59	0.41	0.53	0.70	0.30
	20	-1.86	-0.5	-	0.68	0.27	0.61	0.39	0.71	0.76	0.24	1.02	0.85	0.15
	30	-2.22	-0.1	-	0.54	0.66	0.75	0.25	1.10	0.86	0.14	1.40	0.92	0.08
	40	-2.52	0.24	0.59	0.41	0.98	0.84	0.16	1.42	0.92	0.08	1.73	0.96	0.04
	50	-2.78	0.52	0.70	0.30	1.26	0.90	0.10	1.70	0.96	0.04	2.00	0.98	0.02
	60	-3.01	0.76	0.78	0.22	1.50	0.93	0.07	1.94	0.97	0.03	2.25	0.99	0.01
	70	-3.21	0.97	0.83	0.17	1.72	0.96	0.04	2.15	0.98	0.02	2.46	0.99	0.01
	80	-3.39	1.17	0.88	0.12	1.91	0.97	0.03	2.35	0.99	0.01	2.66	1.00	0.00
	90	-3.55	1.34	0.91	0.09	2.09	0.98	0.02	2.52	0.99	0.01	2.83	1.00	0.00
	100	-3.70	1.51	0.93	0.07	2.25	0.99	0.01	2.69	1.00	0.00	2.99	1.00	0.00
$M_W = 7$	0	0.06	-2.5	-	0.99	-1.8	-	0.96	-1.4	-	0.91	-1.1	-	0.85
	10	-0.55	-1.9	-	0.97	-1.1	-	0.87	-0.7	-	0.76	-0.4	-	0.65
	20	-1.00	-1.4	-	0.92	-0.7	-	0.74	-0.2	-	0.59	0.09	0.54	0.46
	30	-1.36	-1.0	-	0.84	-0.3	-	0.60	0.17	0.57	0.43	0.48	0.68	0.32
	40	-1.67	-0.7	-	0.75	0.06	0.52	0.48	0.50	0.69	0.31	0.80	0.79	0.21
	50	-1.92	-0.4	-	0.66	0.34	0.63	0.37	0.77	0.78	0.22	1.08	0.86	0.14
	60	-2.15	-0.2	-	0.56	0.58	0.72	0.28	1.02	0.85	0.15	1.32	0.91	0.09
	70	-2.35	0.05	0.52	0.48	0.80	0.79	0.21	1.23	0.89	0.11	1.54	0.94	0.06
	80	-2.53	0.24	0.59	0.41	0.99	0.84	0.16	1.42	0.92	0.08	1.73	0.96	0.04
	90	-2.69	0.42	0.66	0.34	1.17	0.88	0.12	1.60	0.95	0.05	1.91	0.97	0.03
	100	-2.84	0.58	0.72	0.28	1.33	0.91	0.09	1.76	0.96	0.04	2.07	0.98	0.02

4.5.5 Olasılıksal sismik tehlike analizi sonuçları

Haşal ve İyisan (2005)'e göre bir bölge için belirlenebilecek maksimum yer ivmesi, belli bir spektral periyottaki spektral ivme değeri gibi spektrum değerleri iki yolla elde edilebilmektedir. Birinci method, pek çok deprem kayıtlarının irdelenerek ortaya çıkarılan yer hareketi azalım ilişkilerinin kullanılmasıdır. İkinci method ise yer hareketi azalım ilişkilerinin kullanılarak anakaya ivmesinin belirlenmesinin ardından bölgedeki tabakalanma ve zeminin dinamik özelliklerinin de dikkate alınarak yüzeyde oluşan ivme değerleri hesaplanabilmektedir.

Bursa şehri tarihi camilerin yer aldığı Hanlar Bölgesi için olasılıksal sismik tehlike analizleri R-CRISIS v18.4.2 yazılımı yardımıyla yapılmıştır. TBDY 2018'e göre 50 yılda aşılma olasılığının %10 olduğu DD-2 deprem yer hareketine göre analiz yapılmıştır. Olasılıksal sismik tehlike sonuçları tekrarlanma periyodu (return period) 475 yıl olan deprem yer hareketi seviyeleri için verilmiştir.

Bu yazılımda ilk olarak shapefile formatında Türkiye bir haritası yazılıma eklenmiştir. Ardından sismik tehlike yapılacak olan bölge koordinatlarına göre 0.1°'lik artırımla bir grid sistemi tanımlanarak eklenen harita üzerinden çizilerek seçilmiştir. Bölgeyi etkisi altına alan sismik kaynakların enlem-boylam sınır bilgileri tek tek R-CRISIS yazılımına girilerek çizdirilmiş ve derinlik değerleri programda tanımlanmıştır.

Sismik kaynak parametreleri her bir kaynak için ayrı ayrı Gutenberg-Richter Tekrarlanma Kanunu'nda belirlenen a ve b katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır. Sismik parametrelerden biri olan λ meydana gelme oranını (activity rate) ifade etmektedir. Aynı zamanda " β " değeri Khodaverdian ve diğ. (2016)'da verilen denklem 4.6'daki ifade kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\beta = b \ln(10) \quad (4.6)$$

Bölgede yer hareketi meydana getirebilecek tüm kaynaklar için minimum deprem büyüklüğü (M_0) 4.0 olarak kabul edilmiştir.

DD-2 deprem yer hareketi seviyeleri için %5 sönüm oranı ile 0.01 saniye ile 5 saniye spektral periyot değerleri arasında 760 m/s kayma dalgası hızı için Yeni Nesil Azalım İlişkileri [(New Generation Attenuation Relationships (NGA))] kullanılmıştır.

Tüm bu adımlar tamamlandıktan sonra yazılıma tanıtılan her bir kaynak için uygun özellikte yer hareketi azalım ilişkisi seçilmiştir.

Bu çalışma kapsamında sismik tehlike analizlerinde kullanılan azalım ilişkileri şunlardır:

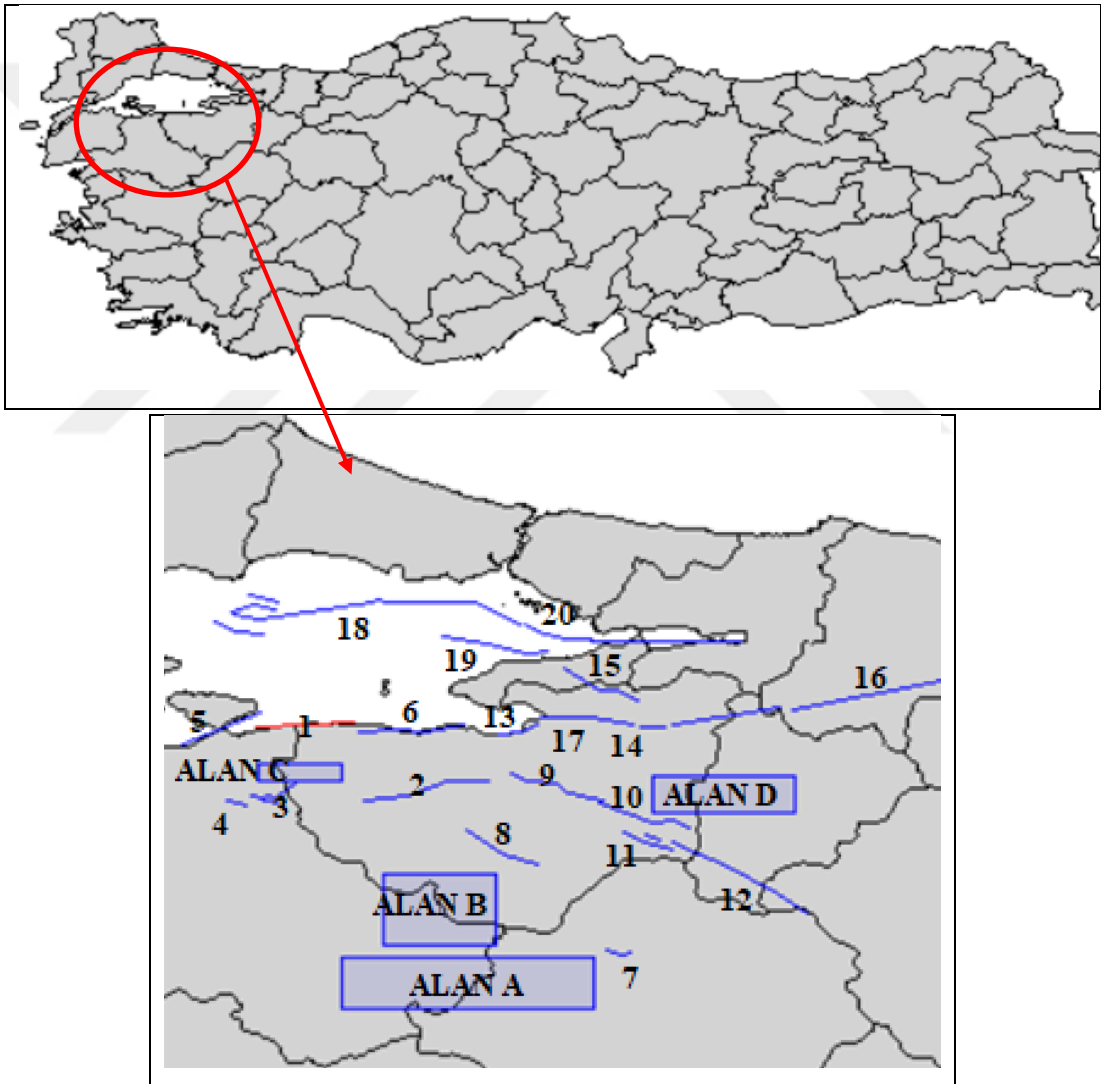
-Campbell-Bozorgnia 2008 NGA (CB2008)

-Chiou and Youngs 2008 NGA (CY2008).

R-CRISIS yazılımı ile iki farklı analiz yapılmıştır. İlk analizde inceleme alanındaki sismik etkinliği oluşturan hakim fay hatları ve bölgesel kaynaklar dikkate alınmıştır. İkinci analizde ise sadece bölgesel kaynak modeli programa tanımlanmaktadır.

Analiz -1: Çizgisel ve bölgesel kaynakların birlikte modellenmesi

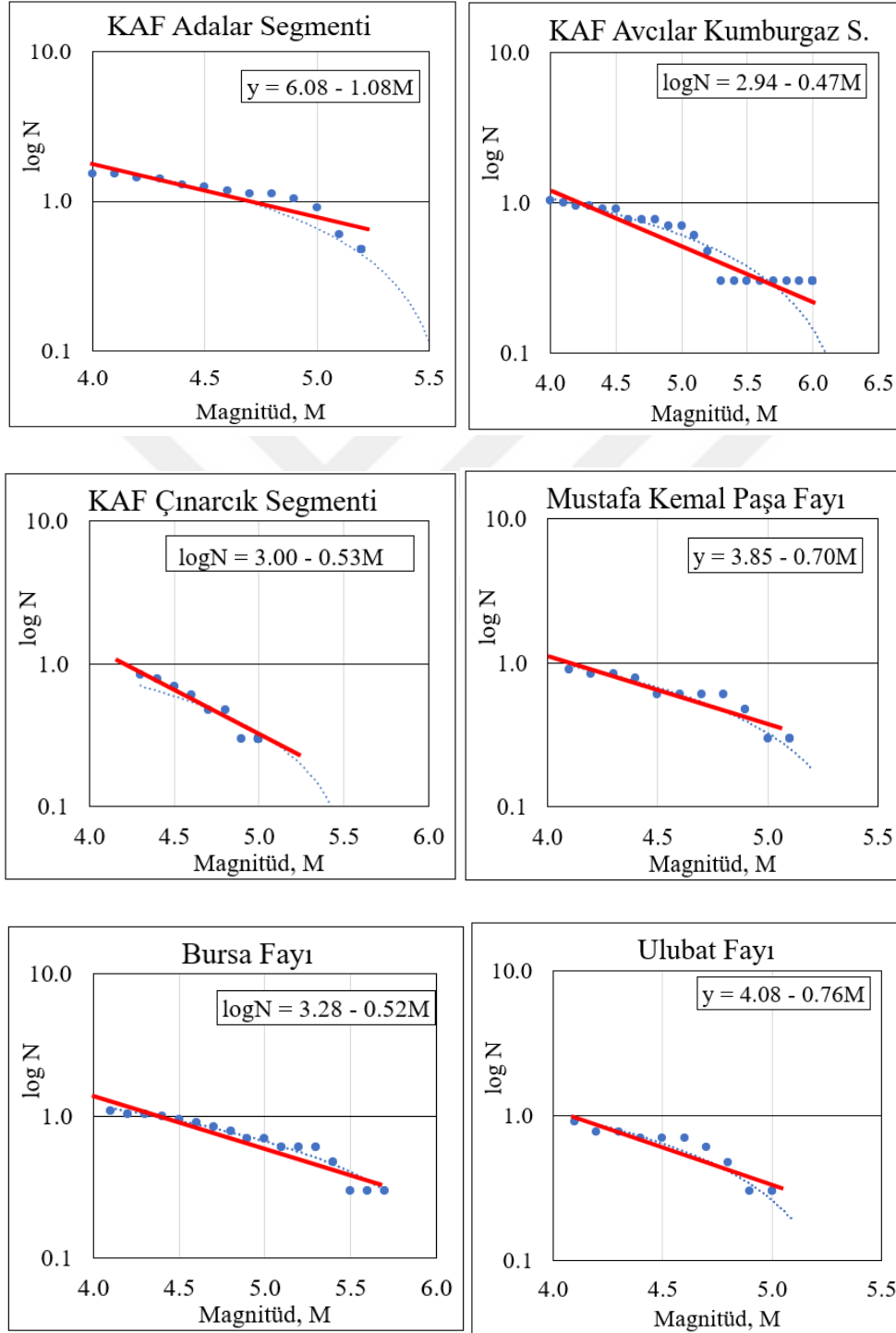
Bölgeyi etkisi altına alan fay hatları ve bölgesel nitelikli kaynaklar programa çizdirilmiştir. Tanımlanan sismik kaynaklar Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



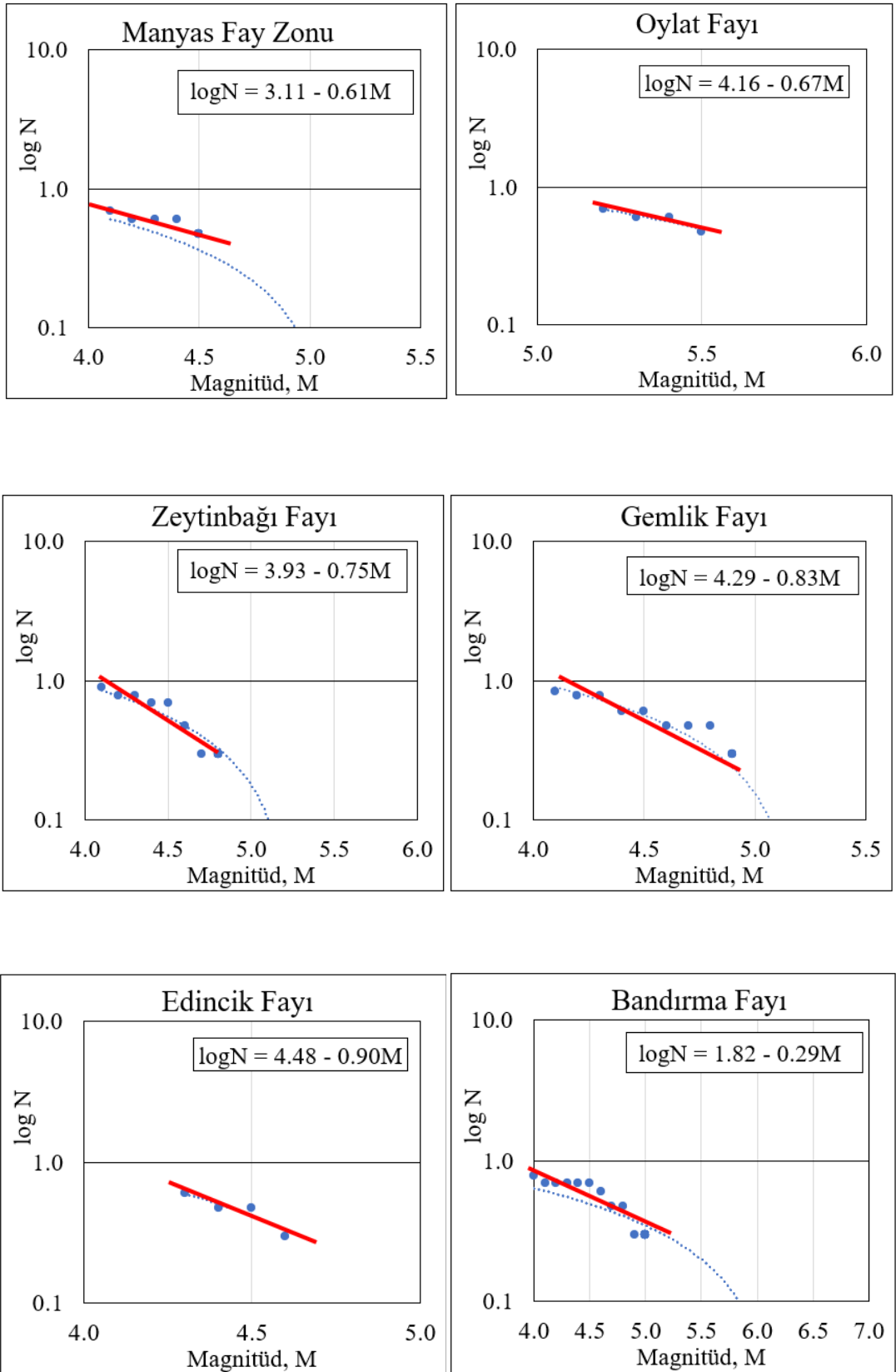
Şekil 4.21 : R-CRISIS yazılımında tanımlanmış olan bölgede hakim olan çizgisel ve bölgesel kaynaklar.

Ardından çizgisel kaynaklar için programda tanımlanan Wells and Coppersmith’in farklı fay tipleri için geliştirdiği fay kırığı parametreleri her bir fay için seçilmiştir.

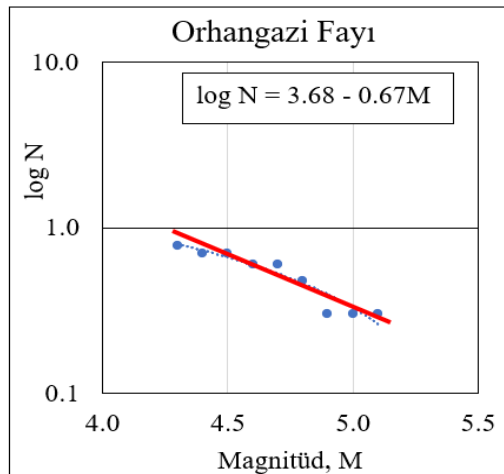
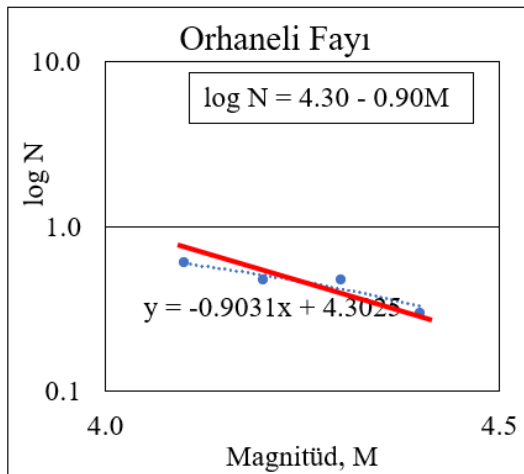
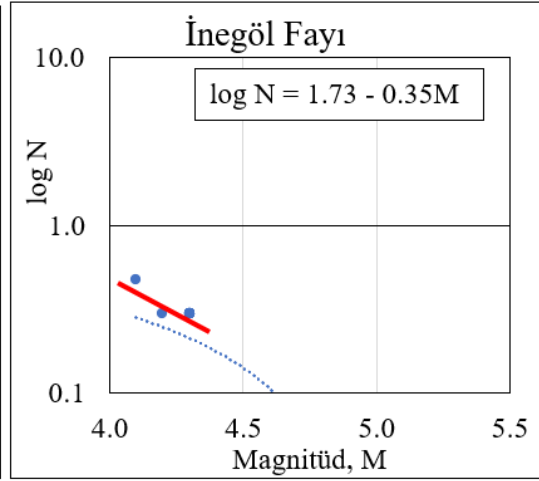
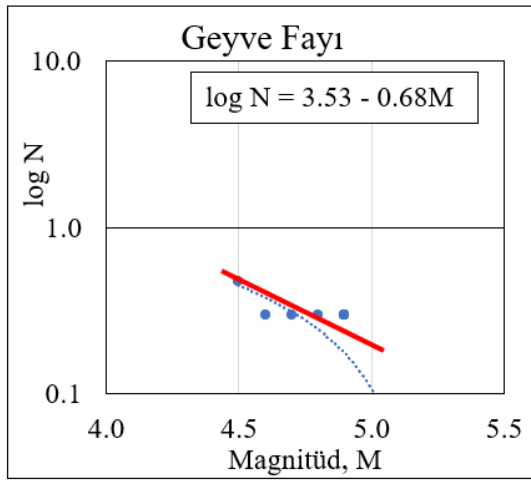
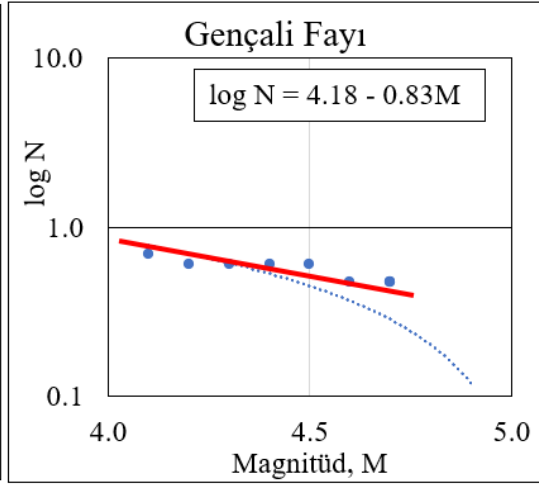
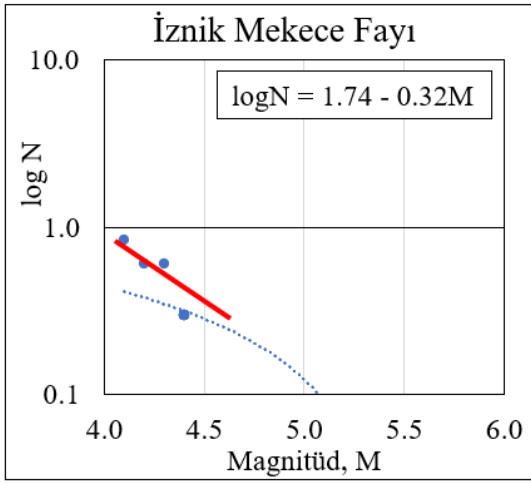
Bölgesel kaynaklar için de Wells and Coppersmith'in genel ifadesi kullanılmıştır. Yazılıma tanıtılan her bir çizgisel kaynak için sismik parametreleri Şekil 4.22 ile Şekil 4.25 aralığında gösterilen Gutenberg-Richter büyüklük sıklık ilişkileri dikkate alınarak regresyon analiziyle belirlenmiştir.



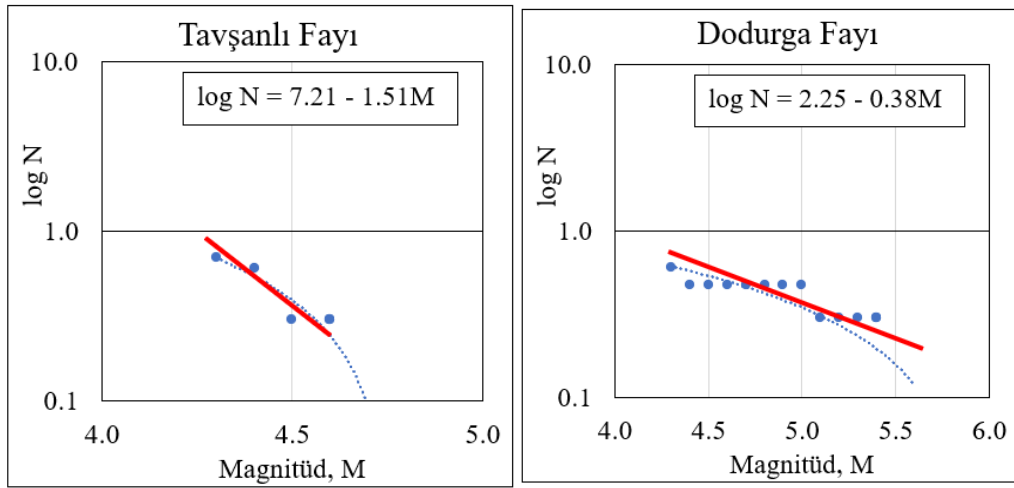
Şekil 4.22 : Bölgede hakim olan çizgisel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-I.



Şekil 4.23 : Bölgede hakim olan çizgisel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-II.



Şekil 4.24 : Bölgede hakim olan çizgisel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-III.



Şekil 4.25 : Bölgede hakim olan çizgisel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-IV.

Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için olasılıksal sismik tehlike analizinde kullanılan çizgisel sismik kaynaklar için belirlenen sismik parametreler Çizelge 4.16’da verilmektedir.

Çizelge 4.16 : R-CRISIS’da tanımlanan çizgisel kaynakların sismik parametreleri.

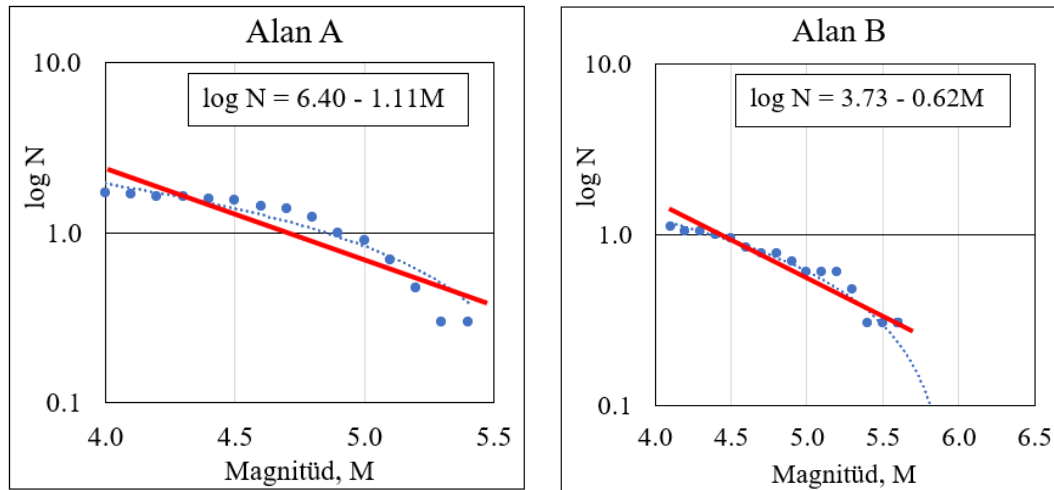
Fay No	Fay Adı	a	b	β	λ	Maksimum Magnitüd, M_w
1	Bandırma Fayı	1.82	0.29	0.668	0.109	6.8
2	Ulubat Fayı	4.08	0.76	1.750	0.286	7.0
3	Mustafa Kemal Paşa Fayı	3.85	0.70	1.612	0.107	6.9
4	Manyas Fay Zonu	3.11	0.61	1.405	0.073	6.5
5	Edincik Fayı	4.48	0.90	2.072	0.222	7.0
6	Zeytinbağı Fayı	3.93	0.75	1.727	0.073	6.9
7	Tavşanlı Fayı	7.21	1.51	3.477	0.833	6.4
8	Orhaneli Fayı	4.30	0.90	2.072	0.160	6.8
9	Bursa Fayı	3.28	0.52	1.197	0.145	6.9
10	İnegöl Fayı	1.73	0.35	0.806	0.115	6.6
11	Oylat Fayı	4.16	0.67	1.543	1.543	6.6
12	Dodurga Fayı	2.25	0.38	0.875	0.129	7.1
13	Gençali Fayı	4.18	0.83	1.911	0.061	6.7
14	İznik Mekece Fayı	1.74	0.32	0.737	0.080	7.0
15	Orhangazi Fayı	3.68	0.67	1.543	0.150	6.8

Çizelge 4.16 (devam) : R-CRISIS’da tanımlanan çizgisel kaynakların sismik parametreleri.

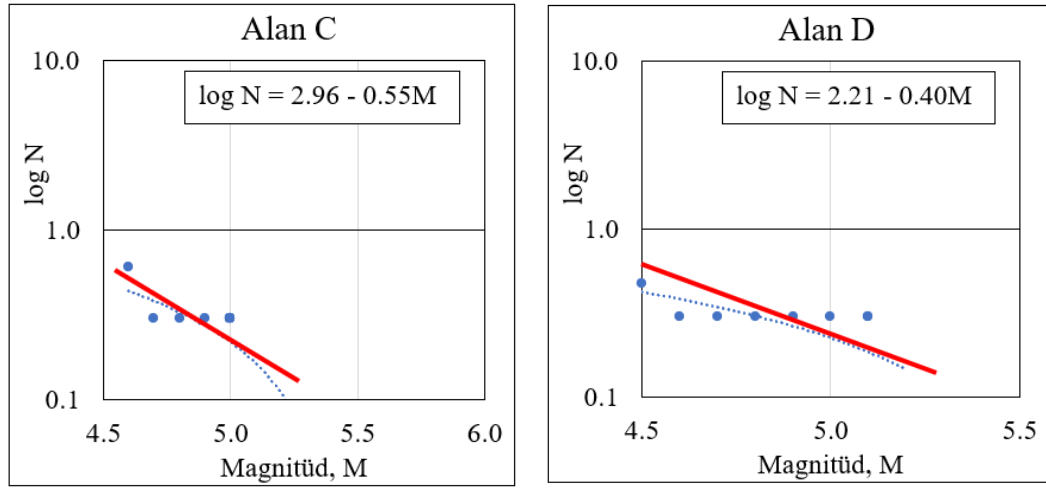
Fay No	Fay Adı	a	b	β	λ	Maksimum Magnitüd, M_w
16	Geyve Fayı	3.53	0.68	1.566	0.026	7.2
17	Gemlik Fayı	4.29	0.83	1.911	0.062	6.7
18	KAF(Avcılar ve Kumburgaz Segmenti)	2.94	0.47	1.082	0.096	7.2
19	KAF(Çınarcık Segmenti)	3.00	0.53	1.220	0.073	6.9
20	KAF(Adalar Segmenti)	6.08	1.08	2.487	0.358	7.0

Jarraya ve diğ. (2021)’e göre her bir fayın üretebileceği maksimum deprem büyüklüğü (M_u), o fayda gerçekleşen maksimum büyüklük değerine 0.2 birim eklenerek standart sapma değeri ile belirlenebilmektedir. Bhatti ve diğ. (2011)’e göre β için değişkenlik katsayısı (coefficient of variation for β) 0.4 olarak alınması uygundur.

Yazılıma tanıtılan her bir bölgesel kaynak için sismik parametreleri Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de gösterilen Gutenberg-Richter büyüklük sıklık ilişkileri dikkate alınarak regresyon analiziyle belirlenmiştir.



Şekil 4.26 : Bölgesel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-I.



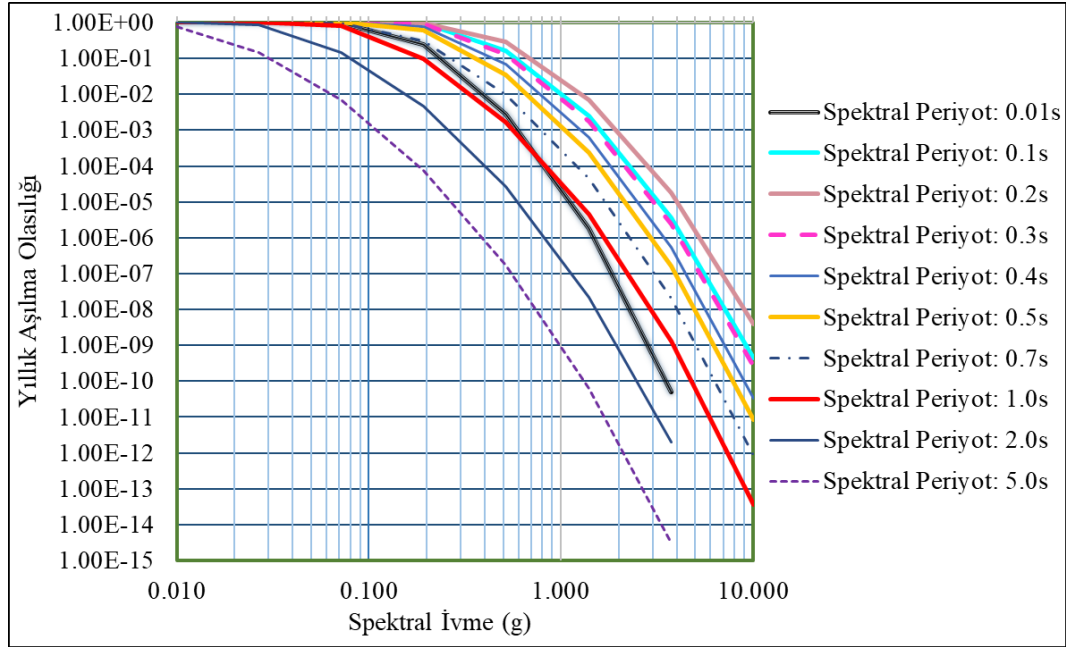
Şekil 4.27 : Bölgesel kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi-II.

Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için R-CRISIS yazılımı ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizinde kullanılan diğer sismik kaynak bölgesel nitelikli olarak tanımlanmıştır. Bölgesel sismik kaynaklar için belirlenen sismik parametreler ve kaynak özellikleri Çizelge 4.17’de verilmektedir.

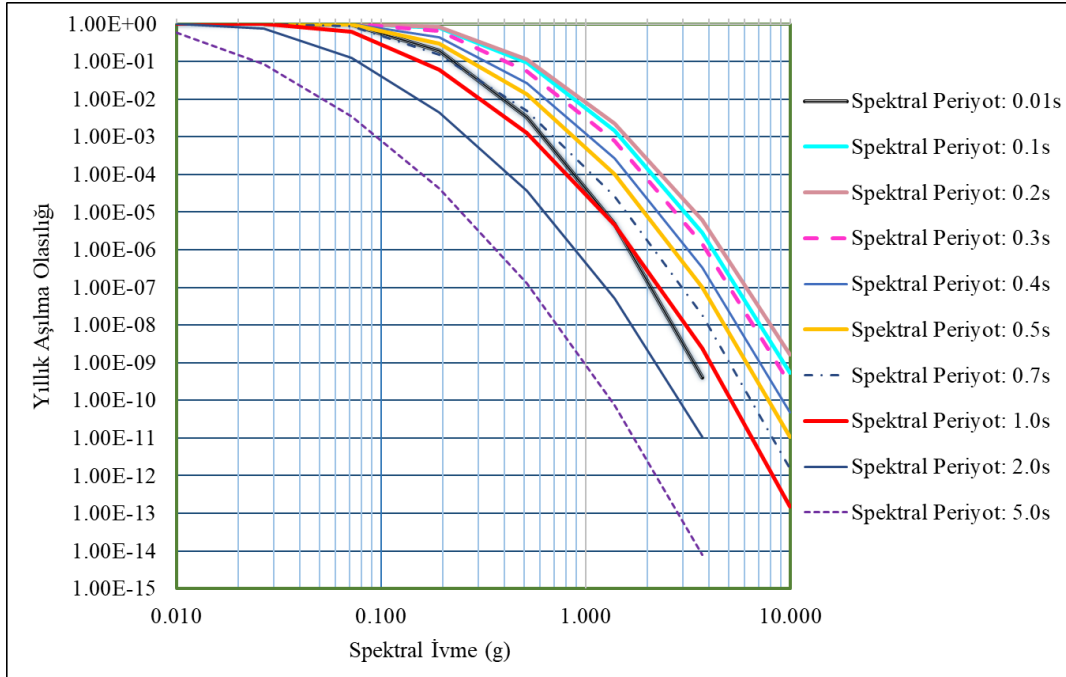
Çizelge 4.17 : R-CRISIS yazılımında tanımlanan bölgesel kaynakların sismik özellikleri ve parametreleri.

Bölgesel Kaynak Adı	Enlem-Boylam Sınır Bilgileri	a	b	β	λ	Derinlik (km)	Maksimum Magnitüd, M_w
Alan A	39.492 - 29.347	6.40	1.11	2.556	1.182	16.28	5.4
	39.492 - 28.360						
	39.290 - 28.360						
	39.290 - 29.347						
Alan B	39.814 - 28.965	3.73	0.62	1.428	0.236	11.44	6.1
	39.814 - 28.528						
	39.539 - 28.528						
	39.539 - 28.965						
Alan C	40.238 - 28.360	2.96	0.55	1.266	0.095	29.20	5.6
	40.238 - 28.032						
	40.180 - 28.032						
	40.180 - 28.360						
Alan D	40.198 - 30.130	2.21	0.40	0.921	0.046	20.00	5.2
	40.198 - 29.580						
	40.050 - 29.580						
	40.050 - 30.130						

R-CRISIS v18.4.2 yazılımı ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucu CB2008 azalım ilişkisi kullanılarak her bir spektral periyot değeri için yıllık aşılma olasılığını gösteren eğriler Şekil 4.28’de, Chiou ve Youngs tarafından geliştirilen yer hareketi azalım ilişkisi kullanılarak elde edilen eğri ise Şekil 4.29’da gösterilmektedir.



Şekil 4.28 : Farklı spektral periyot değerleri için CB2008 azalım ilişkisi kullanılarak R-CRISIS yazılımı ile elde edilen sismik tehlike eğrisi.



Şekil 4.29 : Farklı spektral periyot değerleri için CY2008 azalım ilişkisi kullanılarak R-CRISIS yazılımı ile elde edilen sismik tehlike eğrisi.

R-CRISIS yazılımında Campbell and Bozorgnia 2008 NGA ve Chiou and Youngs 2008 NGA yer hareketi azalım ilişkileri kullanılarak elde edilen sismik tehlike eğrilerinden DD-2 deprem hareket düzeyi için yıllık aşılma olasılığı 1.00E-01 yani 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan ve belirli spektral periyot değerlerine karşılık gelen spektral ivme değerleri belirlenmiştir. Çizelge 4.18’de bu değerler sunulmaktadır.

Çizelge 4.18 : Kullanılan azalım ilişkilerine göre R-CRISIS yazılımı ile elde edilen spektral ivme değerleri.

Campbell and Bozorgnia 2008 NGA		Chiou and Youngs 2008 NGA		Azalım İlişkileri Ortalaması	
T (s)	SA (g)	T (s)	SA (g)	T (s)	SA (g)
0.01	0.23	0.01	0.23	0.01	0.23
0.10	0.58	0.10	0.50	0.10	0.54
0.20	0.70	0.20	0.53	0.20	0.62
0.30	0.56	0.30	0.40	0.30	0.48
0.40	0.43	0.40	0.33	0.40	0.38
0.50	0.35	0.50	0.28	0.50	0.32
0.70	0.28	0.70	0.23	0.70	0.26
1.00	0.19	1.00	0.16	1.00	0.18
2.00	0.08	2.00	0.08	2.00	0.08
5.00	0.03	5.00	0.02	5.00	0.03

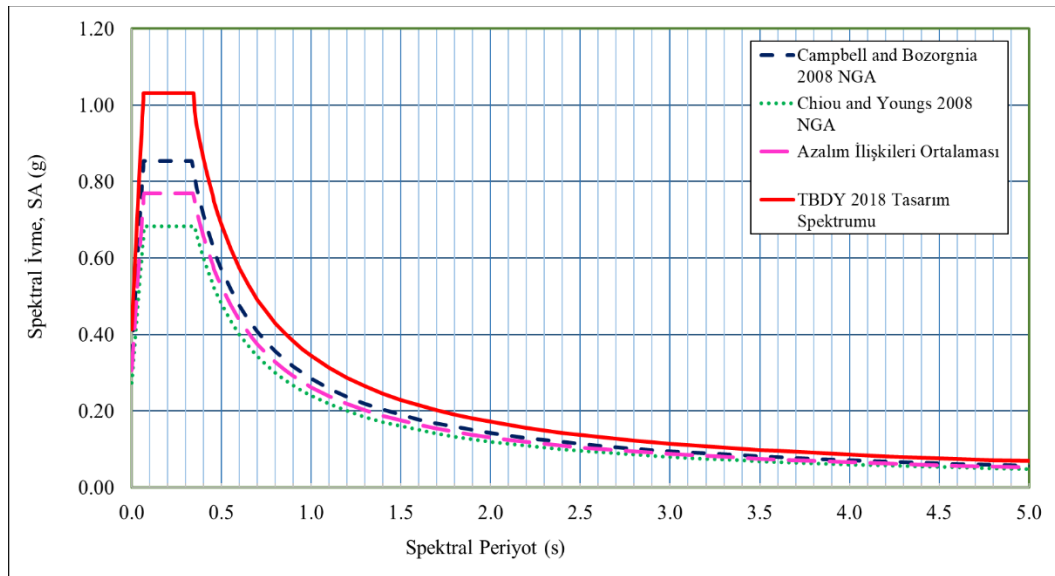
R-CRISIS ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda Campbell and Bozorgnia 2008 NGA ve Chiou ang Youngs 2008 NGA yer hareketi azalım ilişkileri kullanılarak spektral ivme (SA) değerleri belirlenmiştir. Dönüş periyodu 475 yıl olan %5 sönüm oranına sahip elastik ivme spektrumlarına göre 0.2 saniye spektral periyoda karşılık gelen ivme değeri dikkate alınarak S_s , 1.0 saniye spektral periyoda karşılık gelen ivme değeri dikkate alınarak S_1 belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alınarak ZC zemin koşulları için geçerli olan yerel zemin etki katsayıları TBDY 2018’den belirlenmiştir. Elde edilen bu katsayı değerleri kullanılarak tasarım spektral ivme katsayıları hesaplanmıştır. 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren Türkiye deprem tehlike haritası interaktif web uygulamasından yararlanılarak, Bursa ili Hanlar Bölgesi için (enlem: 40.18, boylam: 29.06) maksimum yatay tasarım spektral ivme değeri 1.03g, en büyük yer ivmesi değeri (PGA) 0.358g (as recorded) olarak verilmektedir. AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından güncellenen Türkiye Sismik Tehlike Haritası, zemin koşulu $(V_s)_{30}$ değeri 760 m/s olarak esas almaktadır. DD-2 deprem yer hareketi düzeyi ZC zemin sınıfı için yönetmeliğe uygun tanımlanan tasarım spektrumu

ile R-CRISIS ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucu elde edilen spektral ivme katsayıları ve PGA değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.19’da verilmektedir.

Çizelge 4.19 : R-CRISIS yazılımı sonucu elde edilen spektral ivme katsayıları ve en büyük yer ivmesi değerleri ile tasarım spektrumu değerlerinin karşılaştırılması.

Azalım İlişkileri	Geometrik Ortalama			Zemin Etki Katsayıları		Tasarım Spektral İvme Katsayıları	
	PGA(g)	S_s (T=0.2s)	S_1 (T=1.0s)	F_s	F_1	S_{DS}	S_{D1}
Campbell and Bozorgnia 2008	0.342	0.70	0.19	1.22	1.50	0.85	0.29
Chiou and Young 2008	0.273	0.53	0.16	1.29	1.50	0.68	0.24
TBDY 2018 Tasarım Spektrumu	0.412	0.86	0.23	1.20	1.50	1.03	0.35

Buna göre her iki azalım ilişkisi için elastik tepki spektrumları oluşturulmuştur. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018’e göre DD-2 deprem yer hareketi düzeyi ve ZC zemin sınıfı için belirlenen yatay tasarım spektrumu ile R-CRISIS yazılımı ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizin de kullanılan yer hareketi azalım ilişkileri ile elde edilen elastik ivme spektrumu Şekil 4.30’da karşılaştırılmaktadır.

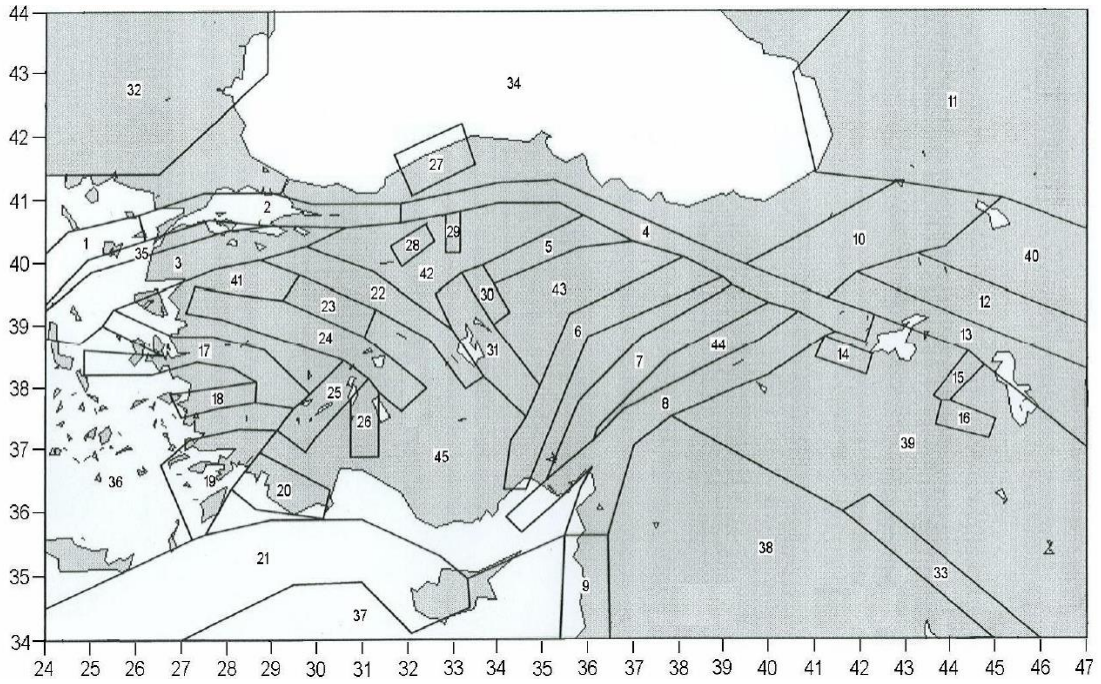


Şekil 4.30 : R-CRISIS yazılımı ile elde edilen elastik tepki spektrumu ile TBDY 2018’de tanımlanan tasarım spektrumu.

Maksimum spektral ivme değeri CB2008 azalım ilişkisine göre 0.85g, CY2008 yer hareketi azalım ilişkisine göre ise 0.68g olarak elde edilmiştir. TBDY 2018’de tanımlanan tasarım spektrumunda ise bu değer maksimum 1.03g olarak belirlenmiştir.

Analiz -2: Bölgesel kaynak modeli kullanılması

İkinci analiz modelinde inceleme alanı ve çevresindeki sismik kaynaklar bölgesel kaynaklar ile sınırlandırılmıştır. Şekil 4.31’de Deniz (2006)’in yaptığı koordinatlı çalışma ile belirlenen Türkiye için bölgesel kaynak zonları dikkate alınmıştır.



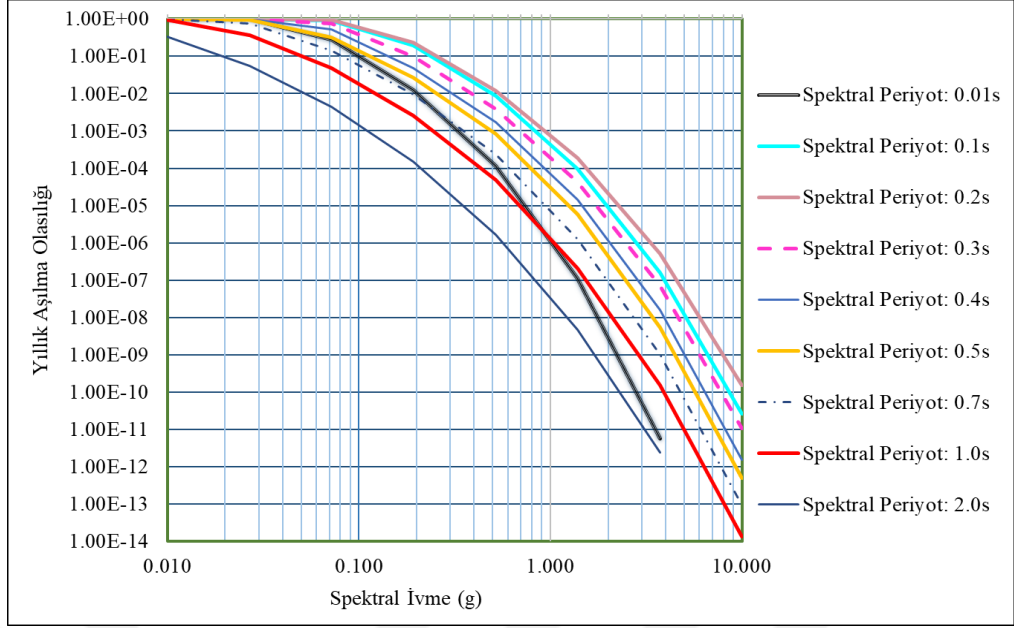
Şekil 4.31 : Türkiye bölgesel kaynak zonları (Deniz, 2006).

İnceleme alanını etkisi altına alan bölgesel kaynaklar programa çizdirildikten sonra yazılıma tanıtılan her bir bölgesel kaynak için sismik parametreler tanımlanmıştır. İlk analiz modelinde kullanılan yer hareketi azalım ilişkileri (Campbell and Bozorgnia 2008 NGA ile Chiou and Youngs 2008 NGA) bu modelde de kullanılmıştır. DD-2 deprem yer hareketi düzeyi (50 yılda aşılma olasılığı %10, dönüş periyodu 475 yıl) için R-CRISIS yazılımı ile olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmıştır. Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için olasılıksal sismik tehlike analizinde kullanılan her bir bölgesel kaynak için sismik parametre değerleri Deniz (2006)’in yaptığı çalışma esas alınarak belirlenmiş olup Çizelge 4.20’de bu değerler sunulmaktadır.

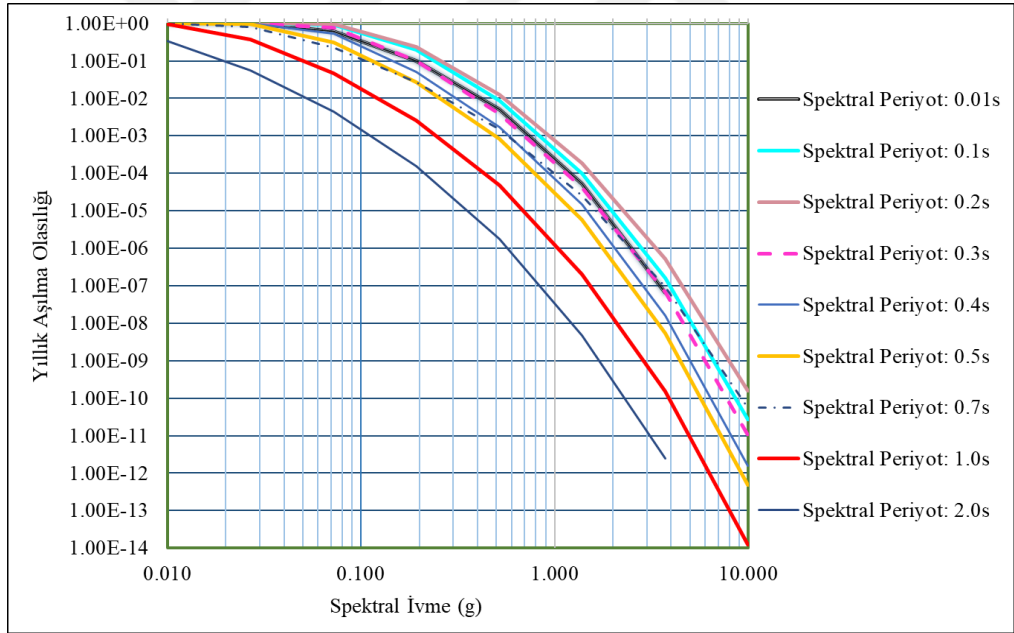
Çizelge 4.20 : R-CRISIS yazılımında tanımlanan bölgesel kaynakların sismik parametreleri, Deniz (2006)’den derlenmiştir.

Zon Numarası	Sismik Kaynak Bölgesi	Derinlik (km)	Beklenen Maksimum Deprem Büyüklüğü, M_w	β	λ
2	Kuzey Anadolu Fay Zonu Segment B	13.4	8.0	2.970	3.284
3	Kuzey Anadolu Fay Zonu Segment C	16.88	7.4	3.062	2.400
22	İnönü Eskişehir Fay Zonu	25.21	7.1	1.669	0.343
23	Kütahya Fay Zonu	14.61	6.9	2.993	0.288
24	Simav Akşehir Fay Zonu	22.15	7.2	2.809	2.762
27	Bartın Fay Zonu	21.59	6.8	2.556	0.202
28	Beypazarı Uruş Fay Zonu	5.65	5.4	3.182	0.100
34	Sınır Dışı Bölge Kuzey	19.55	5.8	3.362	0.713
35	Sınır Dışı Bölge Batı A	9.24	5.3	3.129	0.228
41	Sınır İçi Bölge 1	13.72	5.4	2.025	1.204
42	Sınır İçi Bölge 2	14.85	5.4	3.182	1.036

R-CRISIS v18.4.2 yazılımı ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucu elastik ivme spektrumu elde edilmiştir. CB2008 azalım ilişkisi kullanılarak her bir spektral periyot değeri için yıllık aşılma olasılığını gösteren eğriler Şekil 4.32’de verilmiştir. Benzer şekilde Chiou ve Youngs tarafından geliştirilen yer hareketi azalım ilişkisi kullanılarak elde edilen yıllık aşılma olasılığı ve spektral ivme grafiği Şekil 4.33’te gösterilmektedir. Her iki azalım ilişkisi modeline göre belirlenen spektral periyot değerlerine karşılık gelen spektral ivme değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.32 : Farklı spektral periyot değerleri için CB2008 azalım ilişkisi kullanılarak R-CRISIS yazılımı ile elde edilen sismik tehlike eğrisi.



Şekil 4.33 : Farklı spektral periyot değerleri için CY2008 azalım ilişkisi kullanılarak R-CRISIS yazılımı ile elde edilen sismik tehlike eğrisi.

R-CRISIS yazılımında Campbell and Bozorgnia 2008 NGA ve Chiou and Youngs 2008 NGA yer hareketi azalım ilişkileri kullanılarak elde edilen sismik tehlike eğrilerinden DD-2 deprem hareket düzeyi için yıllık aşılma olasılığı $1.00E-01$ yani 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan ve belirli spektral periyot değerlerine karşılık gelen spektral ivme değerleri belirlenmiştir. Çizelge 4.21’de bu değerler sunulmaktadır.

Çizelge 4.21 : Kullanılan azalım ilişkilerine göre R-CRISIS yazılımı ile elde edilen spektral ivme değerleri.

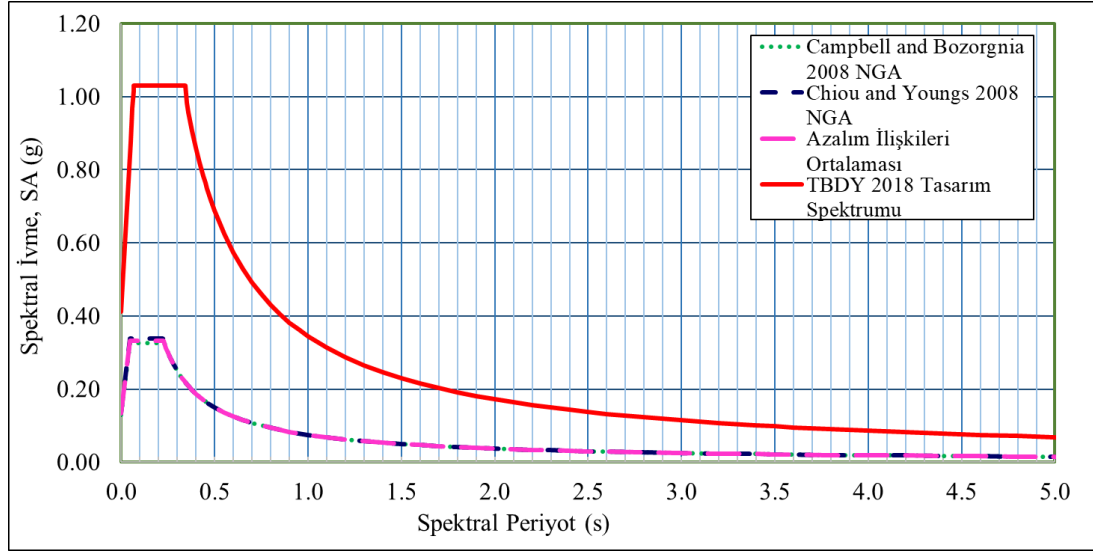
Campbell and Bozorgnia 2008 NGA		Chiou and Youngs 2008 NGA		Azalım İlişkileri Ortalaması	
T (s)	SA (g)	T (s)	SA (g)	T (s)	SA (g)
0.01	0.10	0.01	0.19	0.01	0.15
0.10	0.24	0.10	0.23	0.10	0.24
0.20	0.25	0.20	0.26	0.20	0.26
0.30	0.19	0.30	0.18	0.30	0.19
0.40	0.14	0.40	0.14	0.40	0.14
0.50	0.12	0.50	0.12	0.50	0.12
0.70	0.08	0.70	0.11	0.70	0.10
1.00	0.05	1.00	0.05	1.00	0.05
2.00	0.02	2.00	0.02	2.00	0.02

Bursa ili Hanlar Bölgesi için R-CRISIS yazılımı ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda elde edilen spektral ivme katsayıları ve en büyük yer ivmesi değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.22’de verilmektedir. DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için dönüş periyodu 475 yıl (50 yılda aşılma olasılığı %10) olan %5 sönüm oranına sahip elastik ivme spektrumlarına göre 0.2 saniye spektral periyoda karşılık gelen spektral ivme değeri dikkate alınarak S_s , 1.0 saniye spektral periyoda karşılık gelen spektral ivme değeri dikkate alınarak S_1 belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alınarak ZC zemin koşulları için geçerli olan yerel zemin etki katsayıları TBDY 2018’den belirlenmiştir. Elde edilen bu katsayı değerleri kullanılarak tasarım spektral ivme katsayıları hesaplanmıştır.

Çizelge 4.22 : R-CRISIS yazılımı sonucu elde edilen spektral ivme katsayıları ve en büyük yer ivmesi değerleri ile tasarım spektrumu değerlerinin karşılaştırılması.

Azalım İlişkileri	Geometrik Ortalama			Zemin Etki Katsayıları		Tasarım Spektral İvme Katsayıları	
	PGA(g)	S_s (T=0.2s)	S_1 (T=1.0s)	F_s	F_1	S_{DS}	S_{D1}
Campbell and Bozorgnia 2008	0.130	0.25	0.05	1.30	1.50	0.33	0.08
Chiou and Young 2008	0.135	0.26	0.05	1.30	1.50	0.34	0.08
TBDY 2018 Tasarım Spektrumu	0.412	0.86	0.23	1.20	1.50	1.03	0.35

Buna göre her iki azalım ilişkisi için elastik tepki spektrumları oluşturulmuştur. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre DD-2 deprem yer hareketi düzeyi ve ZC zemin sınıfı için belirlenen yatay tasarım spektrumu ile R-CRISIS yazılımı ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizin de kullanılan yer hareketi azalım ilişkileri ile elde edilen elastik ivme spektrumu Şekil 4.34'te karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.34 : R-CRISIS yazılımı ile elde edilen elastik tepki spektrumu ile TBDY 2018'de tanımlanan tasarım spektrumu.

CB2008 azalım ilişkisine göre maksimum spektral ivme değeri 0.33g, CY2008 yer hareketi azalım ilişkisine göre ise maksimum spektral ivme değeri 0.34g olarak elde edilmiştir. TBDY 2018'e göre tanımlanan tasarım spektrumunda spektral ivme değeri maksimum 1.03g olarak belirlenmiştir.

4.6 Sahaya Özel Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Bu bölümde TBDY 2018'e uygun olarak sahaya özel deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesine ilişkin detaylar verilmektedir.

4.6.1 Deprem kayıtlarının seçimi

Bursa ili Hanlar Bölgesi ve çevresi yapılan sahaya özel analizlerde TBDY 2018'e uygun olarak deprem kaydı seçimi yapılmıştır. Sahaya özel seçilen 11 adet deprem kaydının dataları, PEER NGA Veri Bankası web sayfası (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) aracılığıyla elde edilmiştir.

DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre oluşturulan tasarım elastik spektrumu, hedef spektrum olarak PEER NGA Veri Bankası web sayfasına (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) Excel formatında yüklenmektedir. Böylelikle tasarım spektrumu, hedef spektruma benzeyen deprem kayıtları elde edilmeye çalışılmaktadır. Daha sonra sahaya özgü seçilecek olan deprem kayıtları; deprem büyüklüğü, fay tipleri, faya olan mesafe, $(V_s)_{30}$ değerleri ve kaynak mekanizmasına göre sınırlandırılmaktadır. Böylelikle tasarım spektrumuna yakın değerlerde ve inceleme alanı ile benzer özelliklerde deprem kayıtları elde edilebilmektedir.

Sahaya özgü deprem kayıtları seçilirken; deprem büyüklükleri, fay tipleri, faya olan mesafe, $(V_s)_{30}$ değerleri, kaynak mekanizması ve ölçek faktörleri dikkate alınmıştır. R_{rup} , deprem kayıtlarının fay kırığına olan uzaklığını ifade etmektedir. R_{JB} , deprem kayıt istasyonu ile merkez üssü (epicenter) arasındaki en kısa mesafe uzaklığını ifade etmektedir.

TBDY 2018'e uygun olarak seçilen ve bir boyutlu dinamik analizlerde kullanılan depremlerin kayıt bilgileri Çizelge 4.23'te gösterilmiştir. Deprem yer hareketlerinin seçimi amacıyla saha verileriyle uyumlu girdiler aşağıdaki gibidir:

- Fay tipi: Tüm Faylar
- Büyüklük: 6.5-7.5
- $R_{JB}(\text{km})$: 10-30
- $R_{rup}(\text{km})$: 10-30
- $V_{s30} (\text{m/s})$: 400-760
- Sönüm Oranı: %5

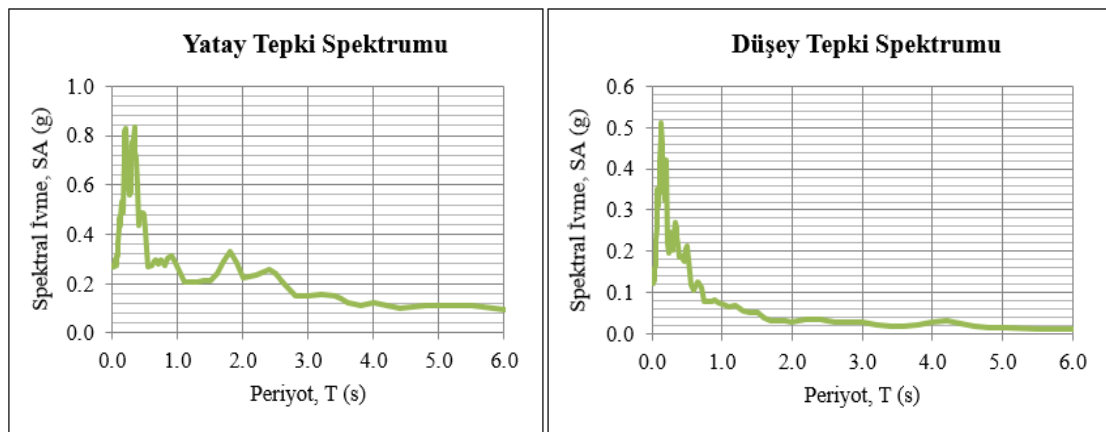
Çizelge 4.23 : Bursa ili ve çevresi için seçilen deprem kayıtları bilgileri,
<https://ngawest2.berkeley.edu/>'den derlenmiştir.

İstasyon Adı	Deprem	Deprem Kayıt Sırası	Deprem Tarihi	Büyüklük (M)	$(V_s)_{30}$ (m/s)	R_{rup} (km)
Loleta Fire Station	Cape Mendocino	827	1992	7.01	457.06	19.95
Joetsu Ogataku	Chuetsuoki Japan	4848	2007	6.80	414.23	17.93
NIGH01	Chuetsuoki Japan	5275	2007	6.80	480.40	23.36
Kawaguchi	Chuetsuoki Japan	4869	2007	6.80	640.14	23.63

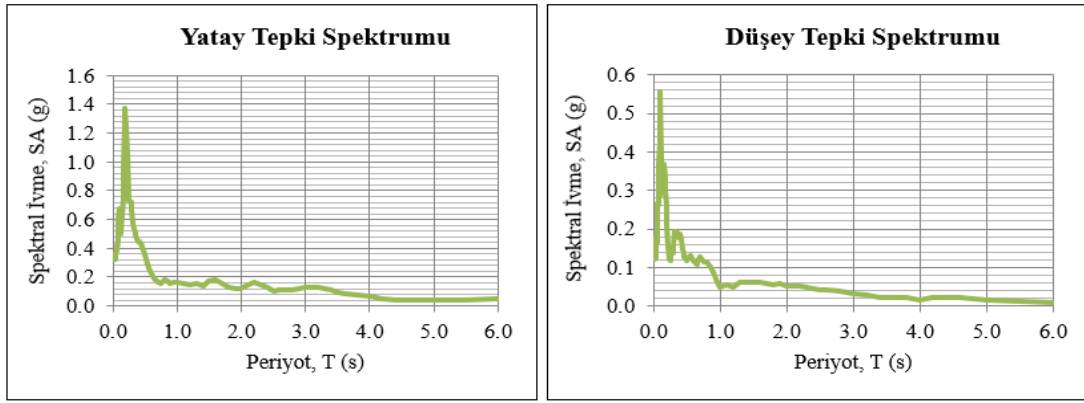
Çizelge 4.23 (devam) : Bursa ili ve çevresi için seçilen deprem kayıtları bilgileri,
<https://ngawest2.berkeley.edu/>’den derlenmiştir.

İstasyon Adı	Deprem	Deprem Kayıt Sırası	Deprem Tarihi	Büyüklik (M)	(V _s) ₃₀ (m/s)	R _{rup} (km)
Lamont 1061	Düzce, Turkey	1614	1999	7.14	481.00	11.46
Cerro Prieto	Imperial Valley-06	164	1979	6.53	471.53	15.19
IWT015	Iwate, Japan	5623	2008	6.90	567.45	21.02
Whitewater Trout Farm	Landers	3759	1992	7.28	425.02	27.05
Yuzawa Town	Iwate, Japan	5806	2008	6.90	655.45	25.56
Abbar	Manjil, Iran	1633	1990	7.37	723.95	12.55
Sunland- MT Gleason Ave	Northridge-01	1083	1994	6.69	402.16	13.35

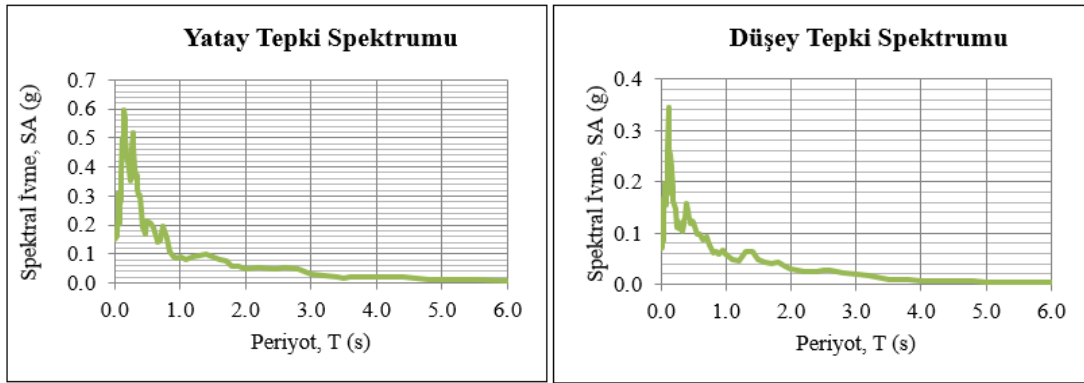
Sahaya özgü seçilen deprem kayıtlarının her biri için PEER NGA Veri Bankası’ndan verilerle oluşturulan yatay ve düşey tepki spektrumları Şekil 4.35 ile Şekil 4.45 arasında verilmiştir. PEER NGA Veri Bankası’ndan elde edilen ölçeklendirilmemiş periyot ve spektral ivme (SA) değerleri ile Excelde grafik oluşturulmuştur.



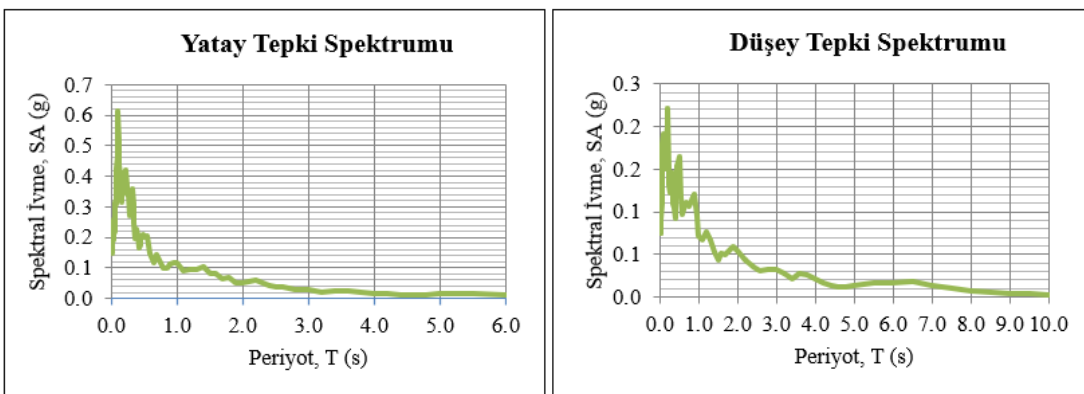
Şekil 4.35 : Cape Mendocino 1992 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



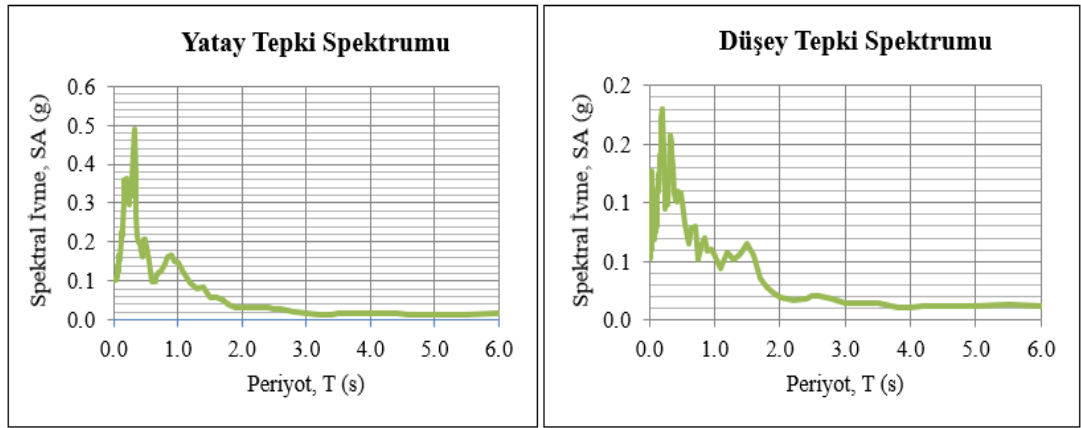
Şekil 4.36 : Chuetsuoki, Japan 2007 (Joetsu Ogataku) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



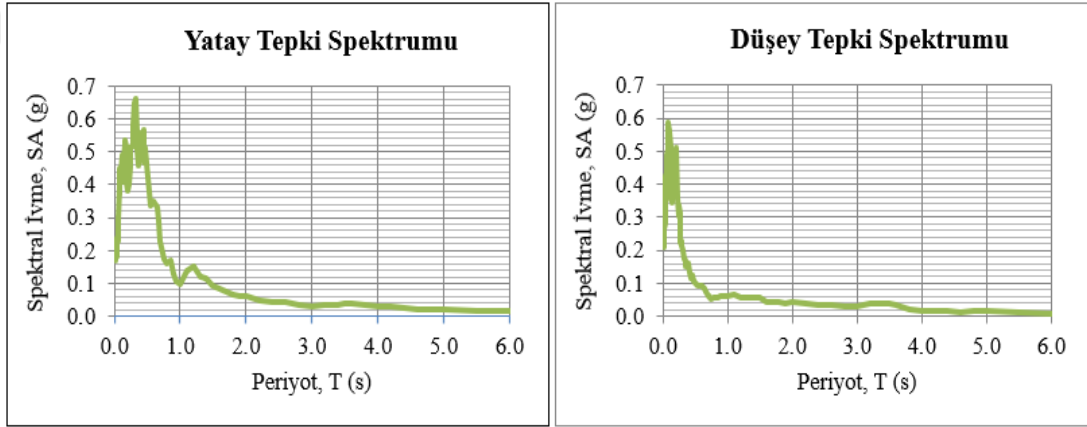
Şekil 4.37 : Chuetsuoki, Japan 2007 (NIGH01) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



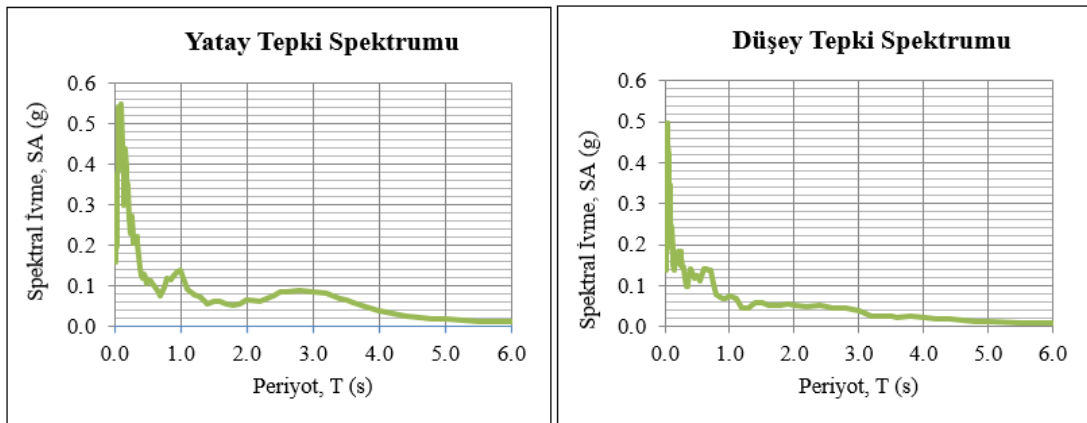
Şekil 4.38 : Chuetsuoki, Japan 2007 (Kawaguchi) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



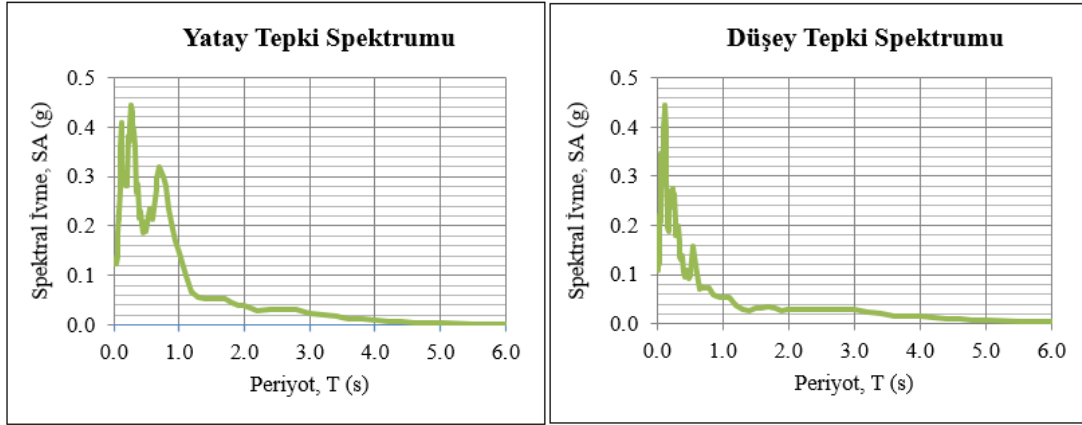
Şekil 4.39 : Düzce, Turkey 1999 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



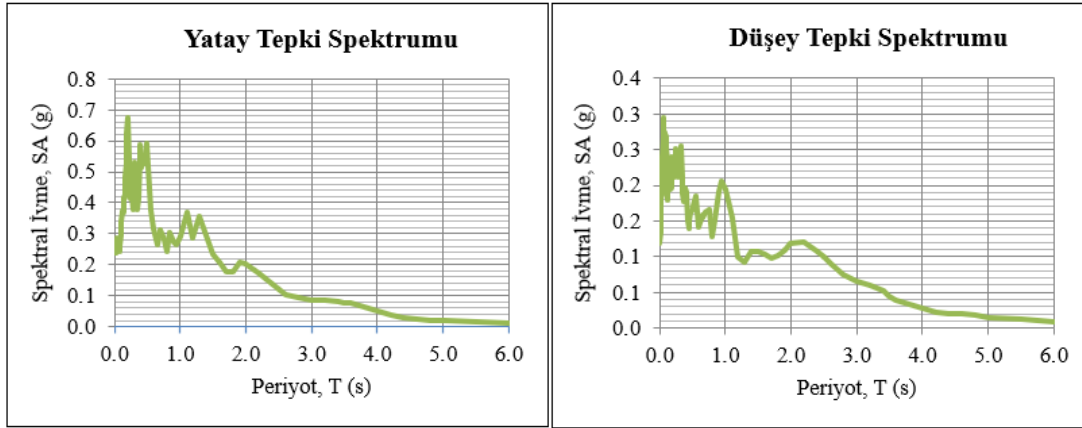
Şekil 4.40 : Imperial Valley-06 1979 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



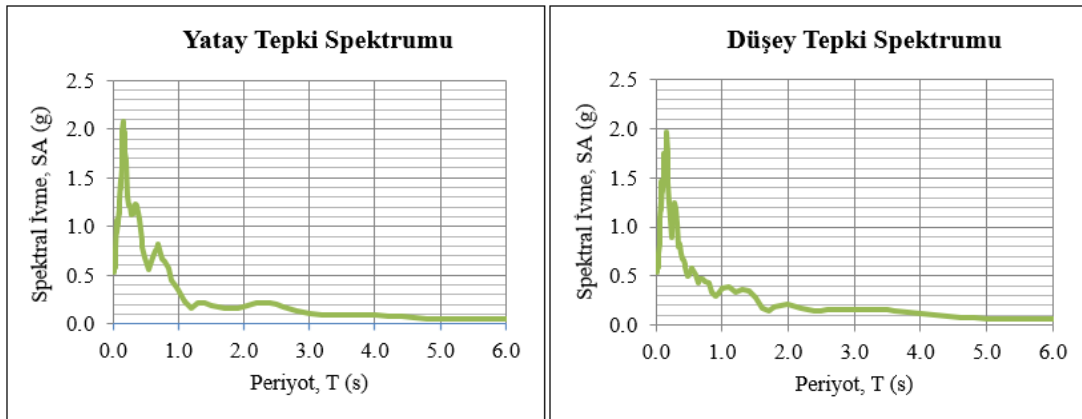
Şekil 4.41 : Iwate, Japan 2008 (IWT015) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



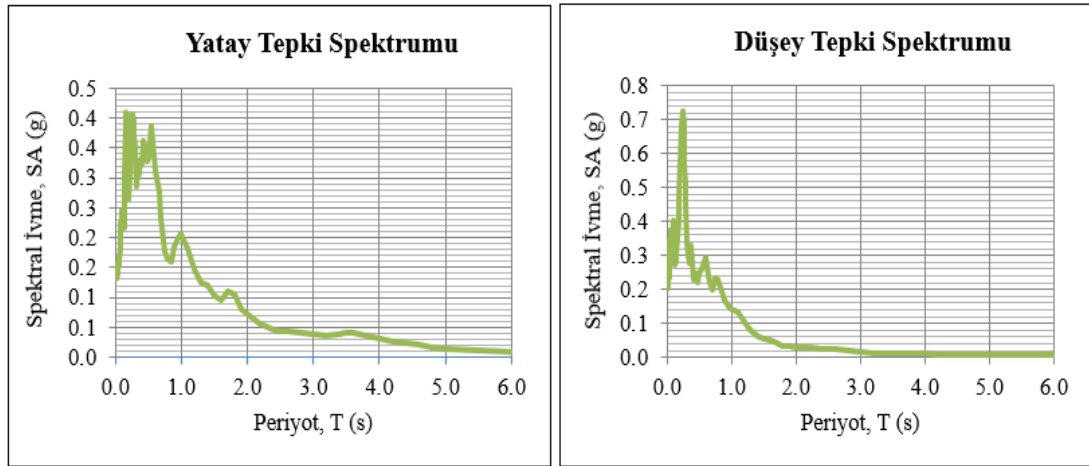
Şekil 4.42 : Landers 1992 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



Şekil 4.43 : Iwate, Japan 2008 (Yuzawa Town) depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.

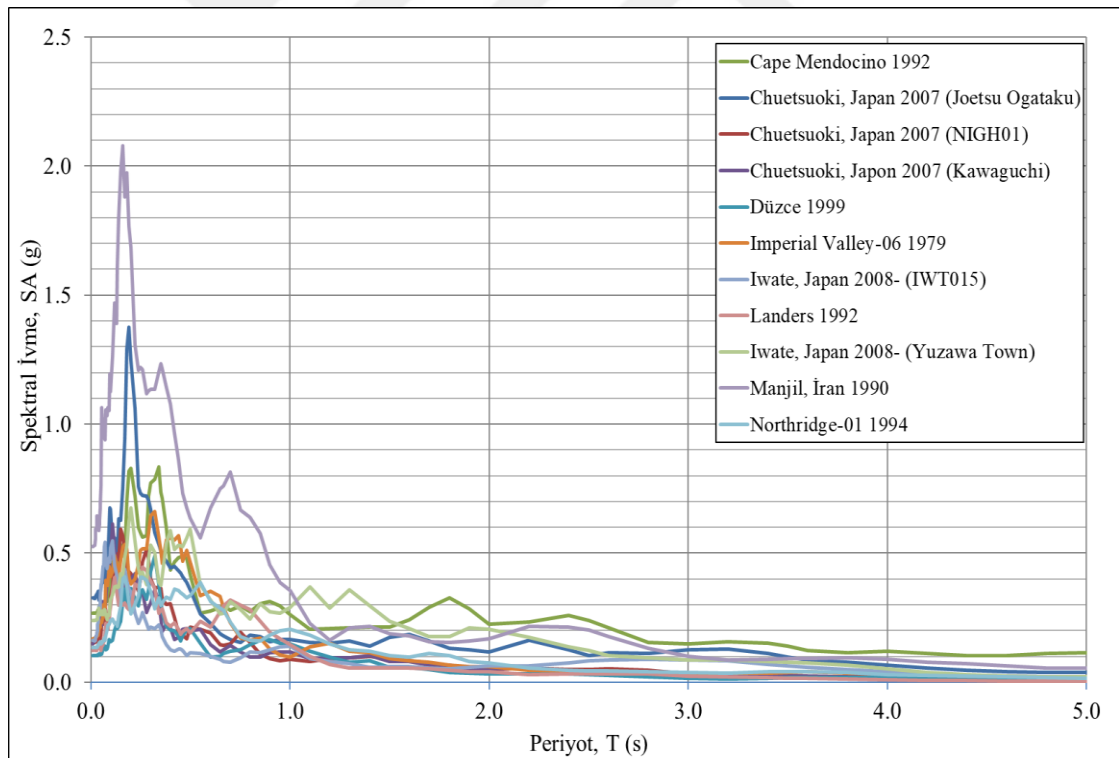


Şekil 4.44 : Manjil, İran 1990 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.



Şekil 4.45 : Northridge-01 1994 depremi için yatay ve düşey tepki spektrumları.

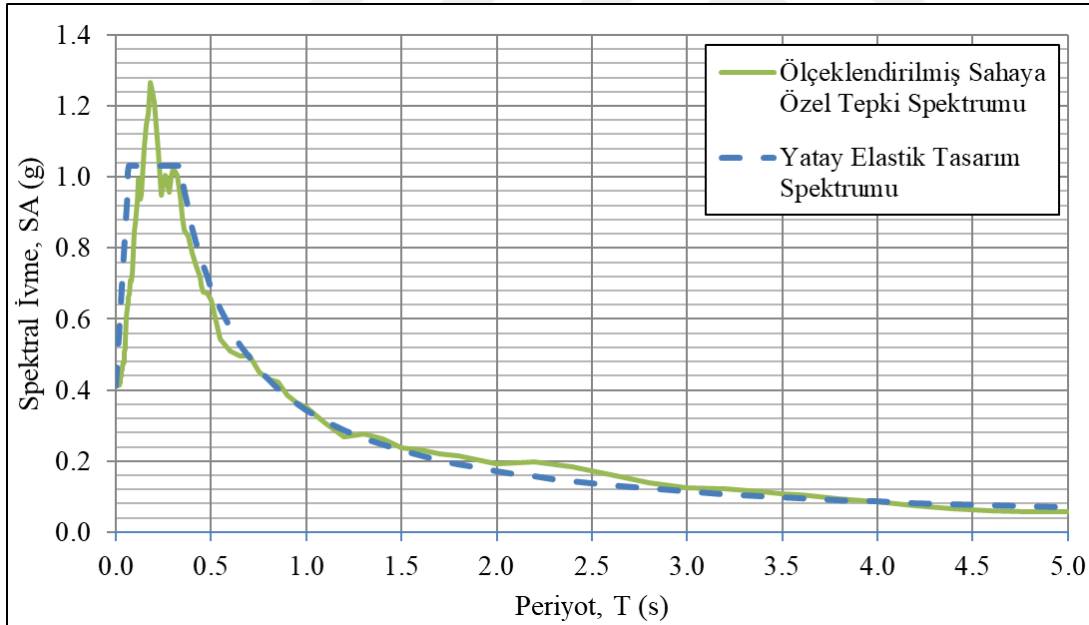
Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için TBDY 2018'e göre tanımlanan tasarım spektrumuna uygun seçilen 11 adet deprem kaydına ait yatay tepki spektrumları Şekil 4.46'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.46 : Seçilen deprem kayıtlarının yatay tepki spektrumlarının karşılaştırılması.

4.6.2 Deprem kayıtlarının basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesi

Sahaya özel seçilen deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi Excel yazılımı kullanılarak yapılmıştır. İvme kayıtları ayrı ayrı incelenerek tüm kayıtların aynı periyot değerleri için aritmetik ortalamaları alınmıştır. Yatay tasarım elastik spektrumundaki PGA değeri ile sahaya özel seçilen deprem kayıtlarının ortalama tepki spektrumlarına ait PGA değerleri oranlanarak bir katsayı elde edilmiştir. Seçilen 11 adet deprem kaydının hesaplanan ortalama spektral ivme değerleri, her bir periyot değeri için belirlenen katsayı ile çarpılarak ölçeklendirme uygulanmıştır. TBDY 2018'e uygun olarak sahaya özgü seçilen deprem kayıtları zaman tanım alanında ölçeklendirilmiştir. Tasarım spektrumunda elde edilen en büyük yer ivmesi değeri (PGA), seçilen 11 adet deprem kaydı için hesaplanan ortalama tepki spektrumundaki PGA değerine bölünerek ölçek faktörü hesaplanmıştır. Basit ölçeklendirme ile ölçeklendirilen kayıtların ölçek faktörü değeri 1.928 olarak belirlenmiştir. Ölçeklendirilmesi yapılan deprem kayıtlarına ait yatay tepki spektrumu ile yatay tasarım spektrumunun karşılaştırılmasını gösteren grafik aşağıda Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.47 : Sahaya özgü yatay tepki spektrumu ile yatay elastik tasarım spektrumunun karşılaştırılması.

Basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiş olan deprem kayıtlarına göre maksimum spektral ivme değeri 0.18 s periyot için yaklaşık 1.27g olarak elde edilmektedir. TBDY 2018'e göre elde edilen tasarım spektrumunda maksimum spektral ivme değeri 0.067 s ve 0.344 s periyot aralığı için 1.03g'dir.

4.7 Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi

TBDY-2018'e göre ZF yerel zemin sınıfı kapsamına giren zeminlerin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere sahaya özel zemin davranış analizinin yapılması zorunludur. Ancak bu çalışmada Bursa ili Hanlar Bölgesi için zemin sınıfı ZC zemin tanımlanmış olup, bölgenin zemin koşulları dikkate alınarak dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Sahaya özel zemin davranış analizi yapmanın amacı yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisini irdelemektir.

Deprem dalgaları tabanda yer alan kayadan yüzeye doğru hareket ettikçe değişikliğe uğramaktadır. Anakaya seviyesinde sismik bir kaynaktan yayılan dalgaların süre, frekans ve genlikleri geçtikleri zeminin özelliklerine göre değişebilmektedir. Taban kayası seviyesinden zemin yüzeyine doğru hareket eden deprem dalgalarının zemin tabakaları içerisinde geçerken ivme genliklerinin artması durumu zemin büyütmesi olarak tanımlanmaktadır. Zemin büyütmesi değeri sahaya özgü bir değer olup zemin koşullarına bağlı yapılan dinamik analizler veya arazi deneyleriyle (mikrotremor gibi) belirlenebilmektedir. Sismik kaynaktan ortaya çıkan enerjinin korunduğu ilkesine göre genlikleri artan dalgaların hızları azalmaktadır. Zemin büyütmesi anakaya derinliği, zemin tabakalarının kalınlığı, zemin türü, dinamik zemin özellikleri, inceleme alanının jeolojisi ve deprem karakteristiklerinden (tektonik yapı, kırılma mekanizması, merkez üstü uzaklığı gibi) etkilenmektedir. Zemin büyütmesi oranı ise yüzeydeki genlik değerinin (veya ivme) gelen dalga genlik (veya ivme) değerine bölünmesiyle elde edilmektedir. İyisan ve Haşal (2011) yaptıkları çalışmada üst tabakada kum ve kil olması durumlarında anakaya ivmesini karşılaştırmış ve üstte kum olması durumunda zemin yüzeyinde ortalama iki kat, üst tabakanın kil olması durumunda ise daha fazla arttığını belirtmişlerdir. Yapısal hasarlara neden olabilen ve neredeyse gerçekleşen her depremde oluşan zemin büyütmesi, anakaya üstünde bulunan zeminlerin farklı öz direnç (empedans) değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle yerel zemin koşullarının yüzeyde oluşan ivme genlik değerlerini etkilediği empedans oranı ile açıklanabilmektedir. Zemin tabakasının empedans oranı denklem 4.7'deki gibi hesaplanabilmektedir (İyisan ve Haşal, 2011).

$$\text{Zemin tabakasının özgül direnci (empedans oranı)} = \rho V_s \quad (4.7)$$

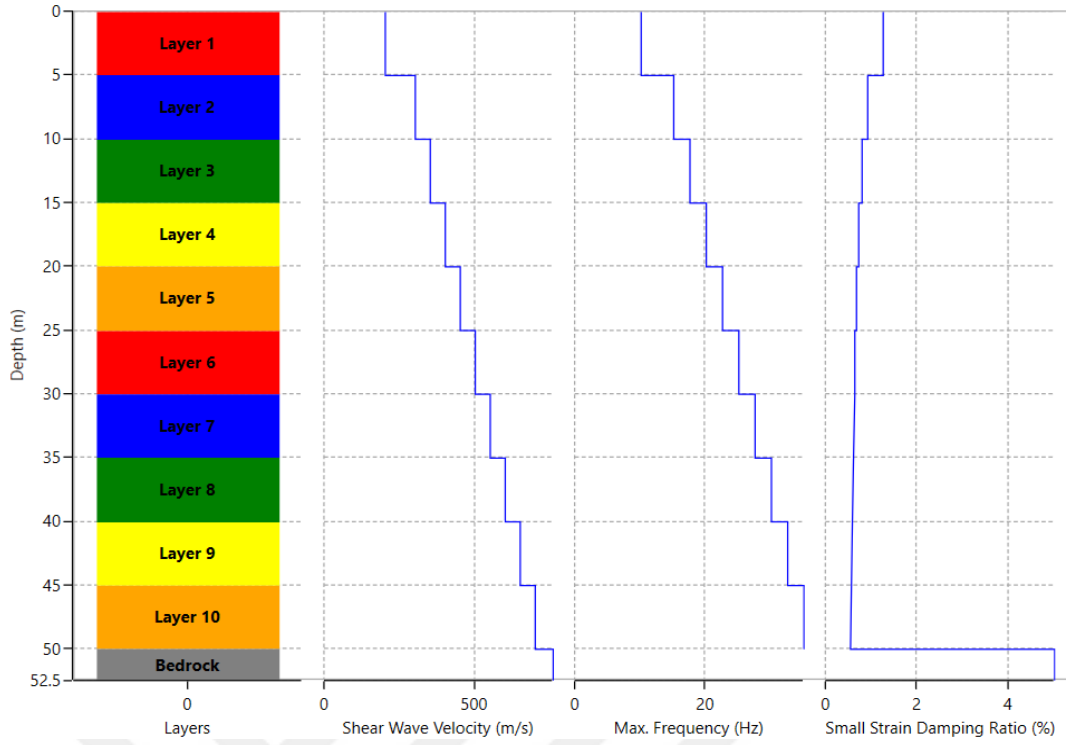
Yukarıdaki ifadede geçen ρ ortamın yoğunluğunu ($\rho = \gamma / g$), V_s kayma dalgası hızını ifade etmektedir. Empedans oranı (özgül direnç) genellikle zemin tabakalarında derinlere doğru artmaktadır.

TÜBİTAK MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü ile Bursa Büyükşehir Belediyesi tarafından 2011-2013 yılları arasında yürütülmüş "Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi" kapsamında düzenlenen gravite deneylerinde Bursa Merkez Havzası için yapılan ölçüm sonuçlarına göre, “Tarihi Hanlar” Bölgesi civarında anakaya derinliğinin yaklaşık 50 m olduğu öngörülmektedir. İnceleme alanı için yerel zemin sınıfı kayma dalgası hızı $(V_s)_{30}$ değerleri 400-450 m/s olarak belirlendiğinden ZC olarak tanımlanmıştır. Bursa ili Hanlar Bölgesi için kabul edilen zemin profili ve zemin parametreleri Çizelge 4.24’te verilmektedir.

Çizelge 4.24 : Bursa ili Hanlar Bölgesi için belirlenen zemin profili ve parametreleri.

Derinlik (m)	DeepSoil Tabaka Adı	Zemin Türü	γ (kN/m ³)	$(V_s)_{30}$ [m/s]
0.00-5.00	Layer 1	Birikinti Konisi (Siltli Kum)	20.0	200.0
5.00-10.00	Layer 2			300.0
10.00-15.00	Layer 3			350.0
15.00-20.00	Layer 4			400.0
20.00-25.00	Layer 5			450.0
25.00-30.00	Layer 6			500.0
30.00-35.00	Layer 7			550.0
35.00-40.00	Layer 8	Sıkı Zemin (Çakıl)	21.0	600.0
40.00-45.00	Layer 9	Ayrışmış Kaya	22.0	650.0
45.00-50.00	Layer 10			700.0
50.00-...	Bedrock	Ana kaya	25.0	760.0

Tabanda yer alan kayada oluşan depremlerin yüzeye aktarılması için DeepSoil v7 yazılımı ile yapılan tek boyutlu eşdeğer lineer zemin tepki analizinde frekans tanım alanı kullanılarak analiz yapılmıştır. Eşdeğer doğrusal analizin yapılmasının amacı zemin büyütmesi değerini belirlemektir. Oluşturulan modelde zemin tabakaları için “discrete points” modeli, kaya için “elastic half-space” modeli kullanılmıştır. Kayma modülü oranı ve sönüm oranı eğrileri için Darendeli (2001) materyal modeli kullanılmıştır. DeepSoil yazılımında kullanılan zemin profili ve ilgili zemin parametreleri Şekil 4.48’de gösterilmektedir.

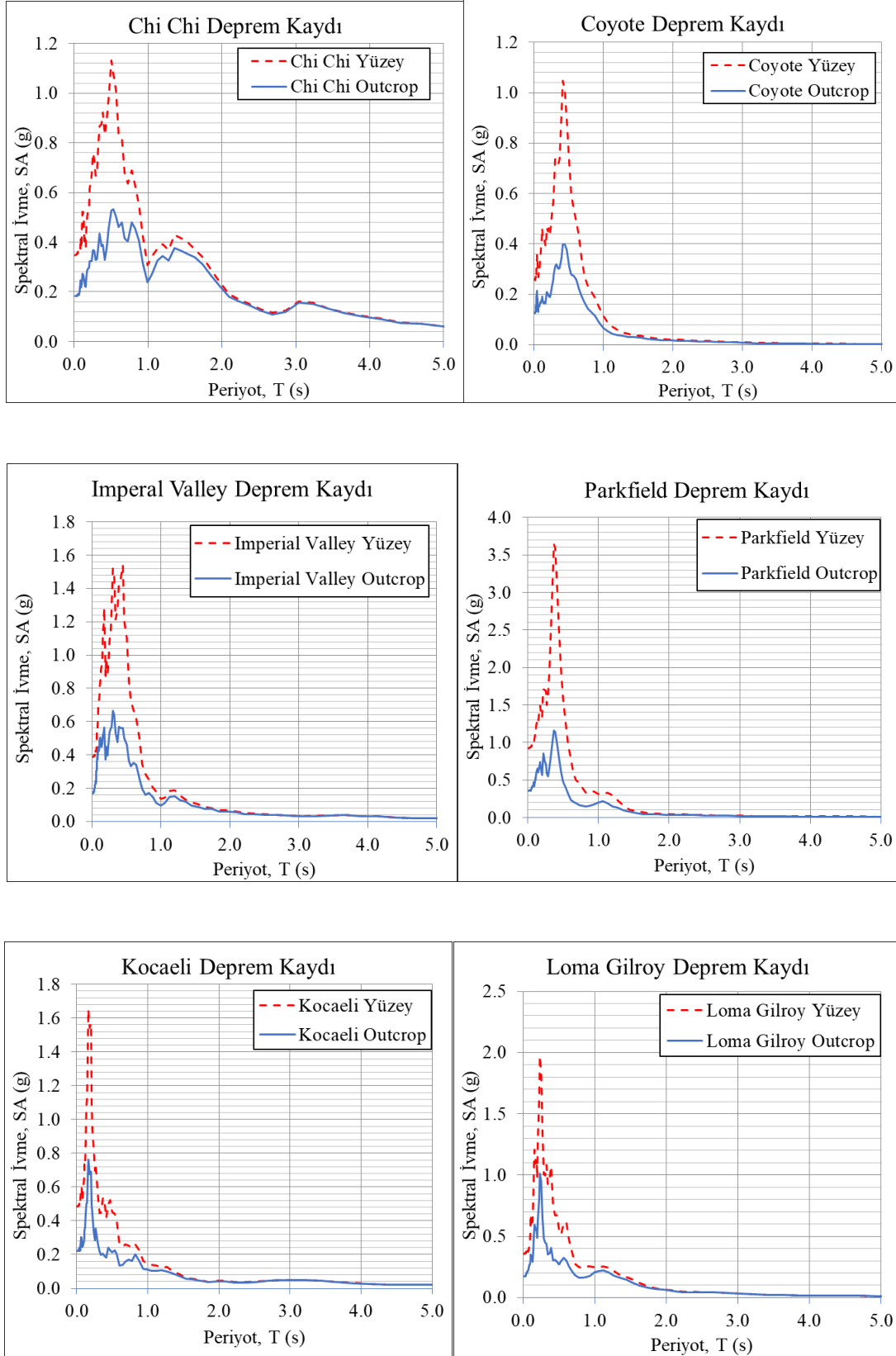


Şekil 4.48 : DeepSoil yazılımında kullanılan zemin profili ve zemin parametreleri.

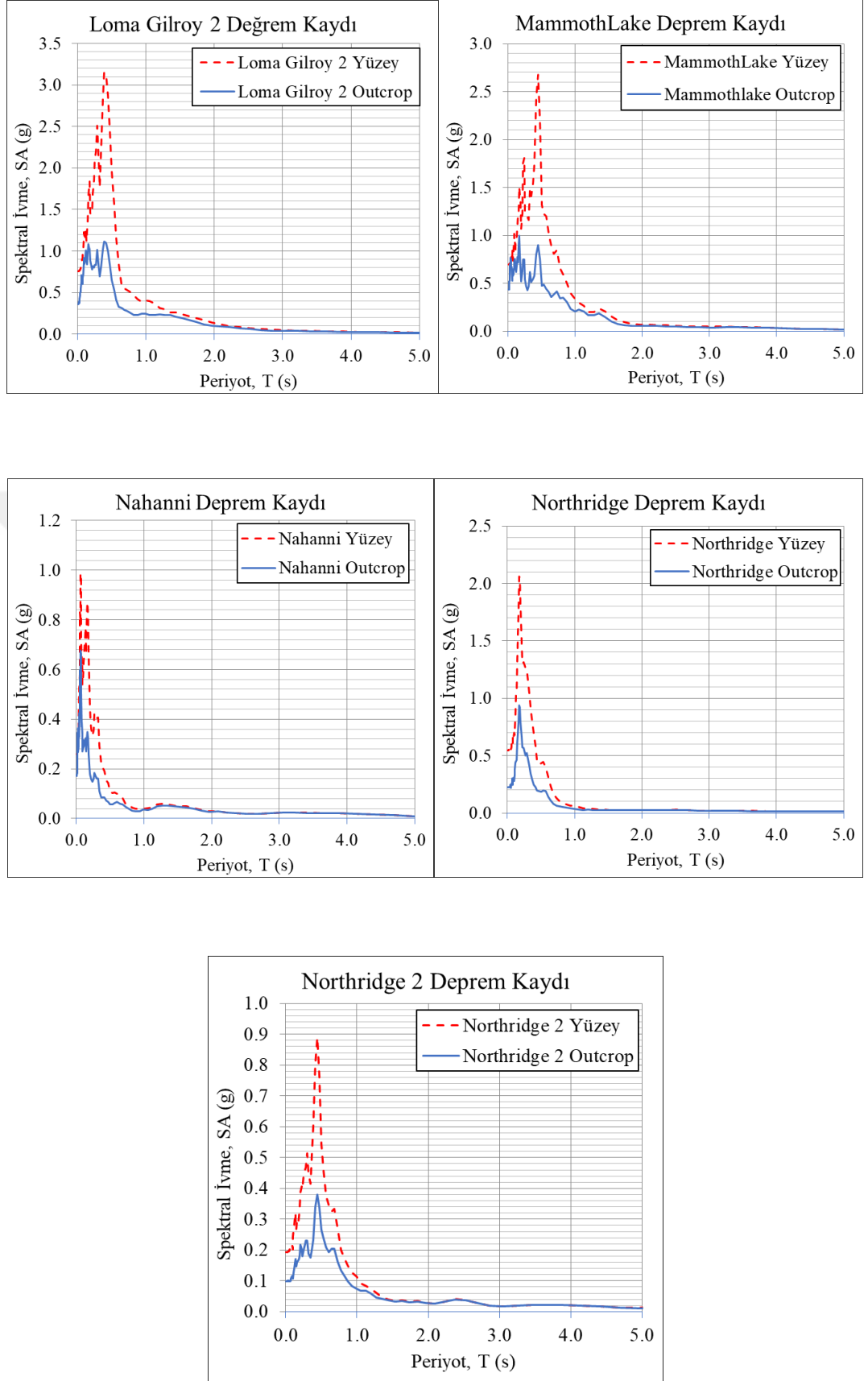
Analizlerde 11 adet deprem kaydı model olarak kullanılmıştır. Elde edilen spektrumlardan zemin yüzeyi spektral ivmesi ile taban kayası spektral ivmesi oranı (büyütme faktörü) her bir kayıt için hesaplanmıştır. Daha sonra bu oranların Çizelge 4.25’te sunulan 11 adet deprem kaydı için ortalaması alınmış ve ilgili periyot değeri için yerel zemin etki katsayıları tanımlanmıştır. Bu katsayılar ilgili taban kayası spektrumu ile çarpılarak zemin yüzeyindeki sahaya özel deprem spektrumu belirlenmiştir. DeepSoil v7 yazılımı ile yapılan sahaya özgü analiz sonucu 11 deprem kaydı için elde edilen tepki spektrumları Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de verilmektedir.

Çizelge 4.25 : DeepSoil yazılımında kullanılan deprem kayıtları.

Deprem Kayıt No	Deprem Adı
1	Chi Chi
2	Coyote
3	Imperial Valley
4	Parkfield
5	Kocaeli
6	Loma Gilroy
7	Loma Gilroy 2
8	MammothLake
9	Nahanni
10	Northridge
11	Northridge 2



Şekil 4.49 : DeepSoil yazılımı ile yapılan sahaya özgü dinamik analiz sonucu elde edilen yüzey ve outcrop tepki spektrumları – I.



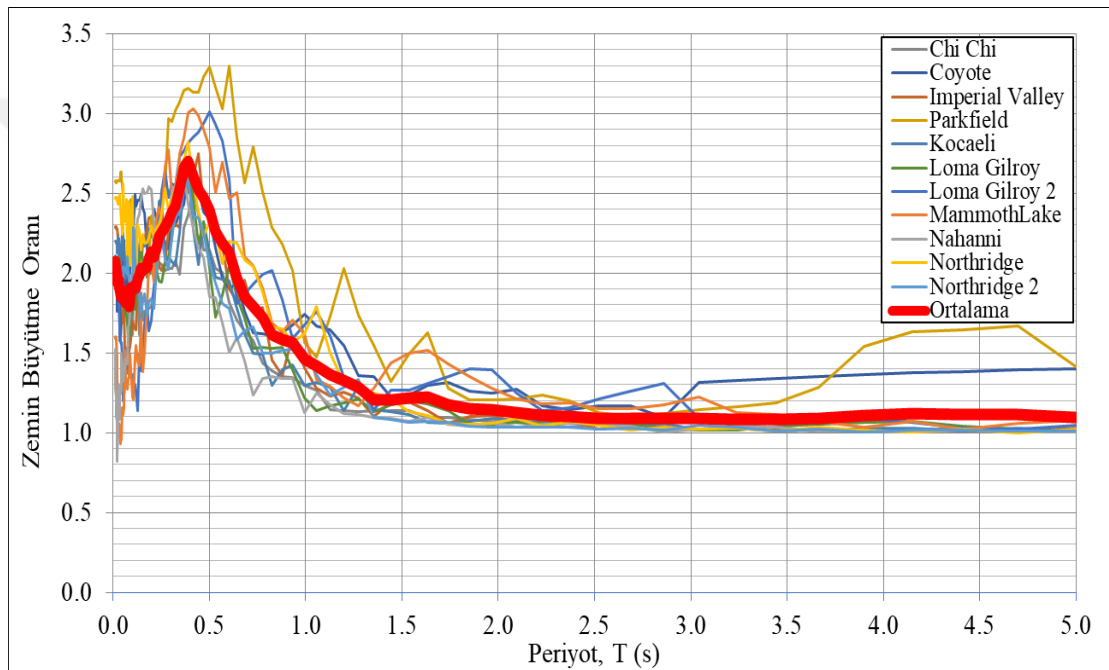
Şekil 4.50 : DeepSoil yazılımı ile yapılan sahaya özgü dinamik analiz sonucu elde edilen yüzey ve outcrop tepki spektrumları - II.

Çizelge 4.26 : DeepSoil yazılımında kullanılan tüm deprem kayıtları için belirli spektral periyot değerlerindeki zemin büyütme katsayısı değerleri.

Periyot (s)	Zemin Büyütme Katsayıları											
	Chi Chi	Coyote	Imperial Valley	Parkfield	Kocaeli	Loma Gilroy	Loma Gilroy2	MammothLake	Nahanni	Northridge	Northridge 2	Ortalama
0.01	1.90	2.05	2.29	2.58	2.20	2.09	2.11	1.60	1.52	2.47	1.96	2.07
0.10	1.61	2.31	1.70	2.27	2.31	1.75	1.37	1.22	1.99	2.48	1.80	1.89
0.20	1.79	2.23	2.35	2.36	2.27	2.00	1.70	2.05	2.52	2.30	1.84	2.13
0.31	2.03	2.39	2.29	2.95	2.07	2.23	2.56	2.49	2.52	2.47	2.23	2.38
0.39	2.36	2.67	2.51	3.16	2.70	2.66	2.82	3.01	2.43	2.82	2.57	2.70
0.50	2.14	2.34	2.39	3.29	2.12	2.03	3.01	2.78	1.85	2.32	2.06	2.39
0.60	1.81	1.90	1.90	3.30	1.95	2.05	2.59	2.47	1.50	2.20	1.78	2.13
0.99	1.29	1.74	1.41	1.56	1.30	1.22	1.67	1.62	1.12	1.62	1.52	1.46
1.20	1.14	1.54	1.25	2.03	1.14	1.19	1.34	1.22	1.12	1.32	1.28	1.33
1.54	1.14	1.23	1.19	1.49	1.11	1.20	1.27	1.50	1.07	1.13	1.07	1.22
2.09	1.07	1.27	1.06	1.21	1.07	1.06	1.25	1.21	1.04	1.09	1.03	1.12
3.04	1.02	1.32	1.08	1.14	1.02	1.02	1.09	1.22	1.02	1.02	1.04	1.09
4.15	1.02	1.37	1.02	1.63	1.03	1.07	1.07	1.07	1.00	1.01	1.01	1.12
5.00	1.02	1.40	1.03	1.41	1.00	1.01	1.05	1.08	1.00	1.02	1.01	1.09
6.02	1.01	1.42	1.02	1.05	1.01	1.01	1.10	1.14	1.01	1.02	1.01	1.07
10.00	1.01	1.43	1.09	1.08	1.00	1.04	1.03	1.11	1.02	1.03	1.01	1.08

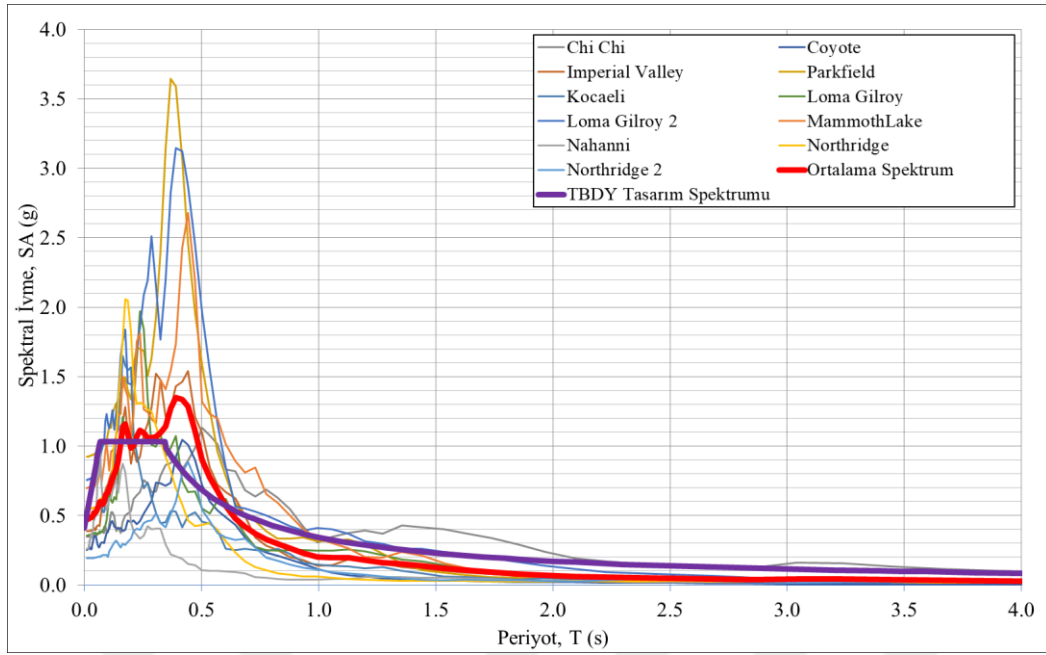
DeepSoil v7 yazılımı ile yapılan sahaya özgü analiz sonucu seçilen 11 adet deprem kaydı için hesaplanan zemin büyütme değerleri her bir spektral periyot değeri için Çizelge 4.26’da sunulmaktadır. Tüm kayıtlar için hesaplanan zemin büyütme oranlarının her bir periyot değeri için aritmetik ortalama değerleri de hesaplanıp belirtilmiştir.

Her bir spektral periyot değeri için elde edilen zemin büyütme değerleri ve tüm deprem kayıtlarından elde edilen büyütme değerlerinin ortalaması karşılaştırmalı olarak Şekil 4.51’de sunulmaktadır.



Şekil 4.51 : DeepSoil yazılımı ile yapılan analiz sonucu elde edilen zemin büyütme oranlarının karşılaştırılması.

DeepSoil yazılımı ile yapılan sahaya özgü zemin davranış analizinde seçilen 11 adet deprem kaydı tepki spektrumları ve her bir periyot değeri için tüm deprem kayıtlarının ortalama spektral ivme değerleri Şekil 4.52’de gösterilmektedir.



Şekil 4.52 : DeepSoil yazılımı ile elde edilen sahaya özel tepki spektrumu.

Bursa ili Hanlar Bölgesi için yapılan sahaya özgü zemin davranış analizine göre elde edilen tepki spektrumunda maksimum spektral ivme değeri 1.25g olarak hesaplanırken TBDY 2018'e göre bu değer 1.031g olarak tanımlanmaktadır. Yapılan bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonucunda seçilen 11 adet deprem kaydı için en büyük zemin yüzeyi ivme değerleri ile TBDY 2018'de DD-2 deprem yer hareketi için tanımlanmış en büyük yer ivmesi değerleri Çizelge 4.27'de karşılaştırılmaktadır.

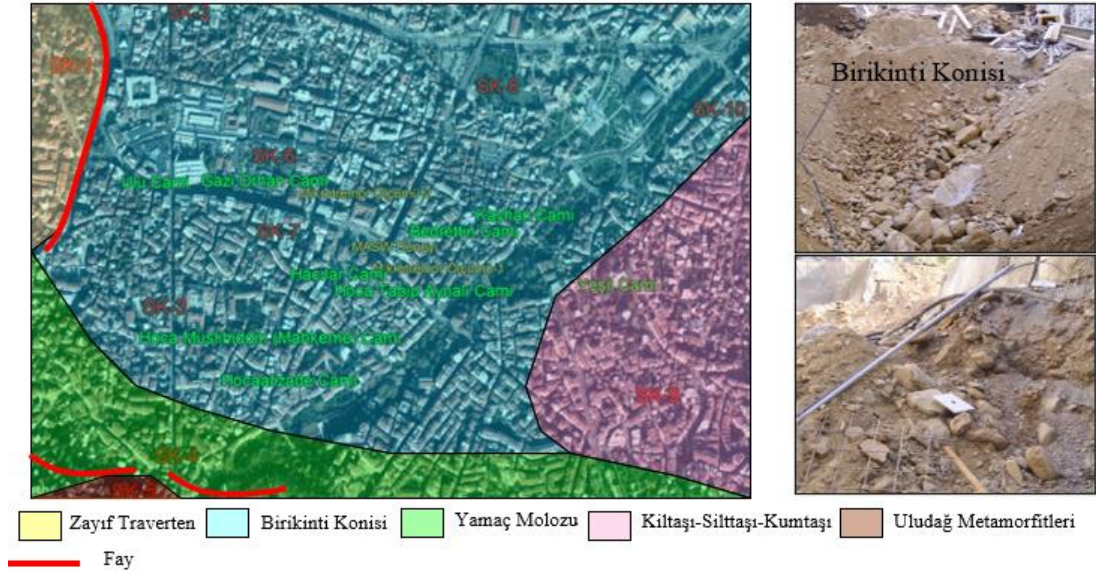
Çizelge 4.27 : DeepSoil yazılımından tüm deprem kayıtları için elde edilen en büyük yer ivmesi değeri ile TBDY'de sunulan değer karşılaştırılması.

Deprem Kayıt No	Deprem Adı	En Büyük Yer İvmesi, PGA (g)
1	Chi Chi	0.348
2	Coyote	0.254
3	Imperial Valley	0.388
4	Parkfield	0.924
5	Kocaeli	0.483
6	Loma Gilroy	0.357
7	Loma Gilroy 2	0.756
8	MammothLake	0.698
9	Nahanni	0.261
10	Northridge	0.548
11	Northridge 2	0.193
Ortalama		0.474
TBDY 2018		0.358

5. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Ülkemizde Marmara Bölgesi'nde yer alan Bursa ilinde geçmişten günümüze kadar pek çok deprem meydana gelmiştir. Bölgede tarih boyu yaşanan depremler nedeniyle pek çok yerleşim yerinin yanı sıra tarihi yapıların da büyük zararlar görmüş olması bölgedeki sismik etkinliğin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sebeple Bursa ili Osmangazi ilçesinde bulunan pek çok tarihi yapının yer aldığı Hanlar Bölgesi için bölgenin sismik aktifliği gözönüne alındığında sahaya özel sismik tehlikenin değerlendirmesinin önemi ortaya çıkmaktadır.

Bölgenin jeolojik birimleri alüvyal yelpaze çökeli (birikinti konisi) oluşumları ve yamaç molozu oluşumlarıdır. Bursa ilinin Hanlar Bölgesi çevresindeki ana birim, kuvaterner dönemine ait birikinti konisidir. Bursa ili ve çevresinde yapılmış olan arazi çalışmaları kapsamında Bursa Belediyesi aracılığıyla ulaşılan on adet sondaj kuyusu verisinde de bu ana birimlerle karşılaşmıştır. Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Tarihi Camiler Bölgesinin yerel jeolojisi ve zemin koşulları Şekil 4.53'te verilmektedir.



Şekil 4.53 : Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Tarihi Camiler Bölgesinin yerel jeolojisi ve zemin koşulları (İyisan ve diğ., 2021).

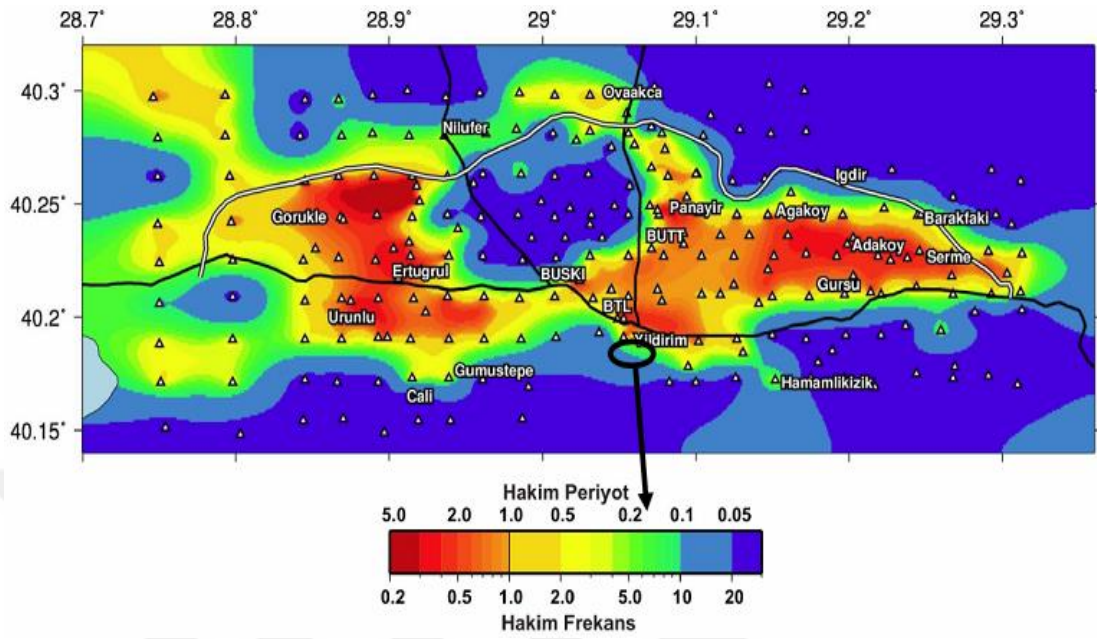
İnceleme alanı ve çevresinde yapılmış olan sondaj kuyularında bölgede üst tabakalarda dolgu birimle, alt tabakalarda ise siltli kumlu çakıllı bloklar ile karşılaşmıştır. Bölgede yapılan etüt çalışmaları kapsamında, zeminlerin dinamik-elastik mühendislik parametrelerini, tabaka kalınlıklarını, deprem yönetmeliklerine göre zemin sınıflarını belirlemek amacıyla yapılan Yüzey Dalgası Analizi (MASW) ve Mikrotremor çalışmaları yapılmıştır. Jeofizik çalışmalar kapsamında yapılmış olan 1 adet Çok Kanallı Yüzey Analizi çalışması (MASW) sonucu kayma dalgası hızının (V_s)₃₀ 400-450 m/s olduğu belirlenmiştir. TÜBİTAK MAM Projesi kapsamında yapılan çalışma sonucunda kayma dalgası hızının 360-760 m/s aralığında değiştiği belirtilmiş olup Şekil 4.54’te gösterilmiştir.



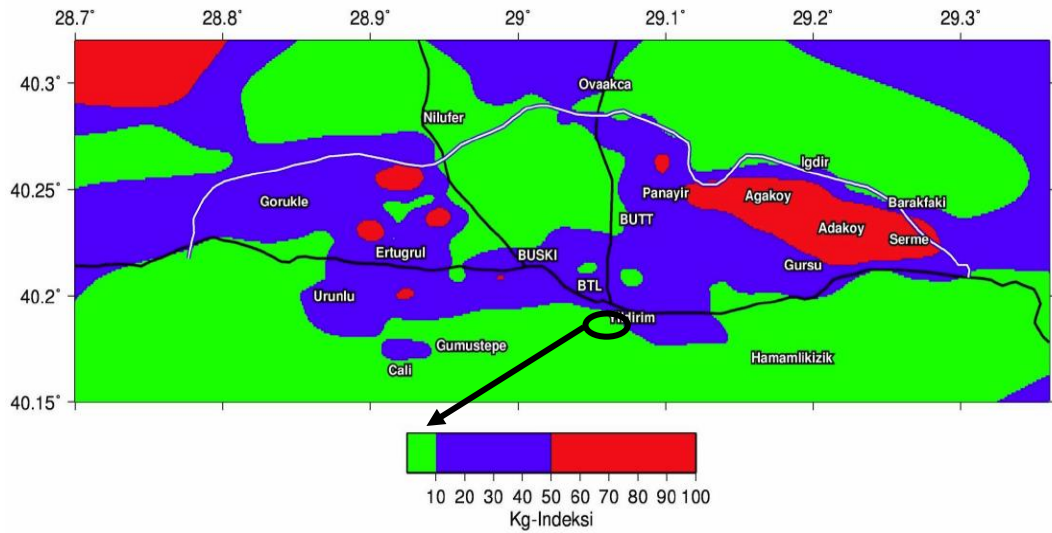
Şekil 4.54 : Bursa merkez ilçelerine ait (V_s)₃₀ haritasında tarihi camilerin yer aldığı bölgenin konumu (Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi, 2013).

Bursa Büyükşehir Belediyesi aracılığıyla inceleme alanı ve çevresinde yaptırılan 2 adet mikrotremor çalışması ile inceleme alanını oluşturan birimlerin zemin hakim titreşim periyodu (T_0) 0.19 s, zemin büyütme değeri (H/V , A_g) 1.7 olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu sahanın düşük periyot ve zemin büyütmesi değerlerine sahip olduğu yorumlanmaktadır. Jeofizik çalışmalar sonucu elde edilen parametreler ile Bursa ili Hanlar Bölgesi ve çevresi için belirlenen Nakamura Hasar Görebilirlik İndeksi (K_g) 0.55 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen hasar görebilirlik indeksi dikkate alınarak tekrarlanma periyodu 475 yıl olan standart tasarım yer hareketi altında zemin yüzeyinde oluşacak kayma şekil değiştirmesini ifade eden zemin yüzeyi deformasyon seviyesi değeri, γ_e , % 0.007 olarak bulunmuştur. Tasarım yer hareketi karşısında hesaplanan bu değer Çizelge 4.4’e göre yüzeydeki zemin tabakalarının elastik davranışına karşılık geleceği öngörülmektedir. TÜBİTAK MAM Projesi kapsamında Bursa şehri için yapılan sismik tehlike değerlendirmesi raporuna göre Bursa ili Hanlar Bölgesi için hakim titreşim periyodu değerinin 0.1-0.2 s aralığında değiştiği belirtilmiştir. Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da TÜBİTAK MAM Projesi

kapsamında yapılan çalışma sonucu elde edilen veriler ile bu çalışma kapsamında yapılan jeofizik çalışmalarının tutarlılık gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.55 : Bursa merkez ilçelerine ait hakim periyot haritasında tarihi camilerin yer aldığı bölgenin konumu (Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi, 2013).



Şekil 4.56 : Bursa merkez ilçelerine ait Kg indeksi haritasında tarihi camilerin yer aldığı bölgenin konumu (Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi, 2013)

Bursa ili ve çevresinde etkinlik gösteren ve bölgede sismik tehlike oluşturabilecek pek çok fay hattı bulunmaktadır. Ülkemizin kuzeybatısında yer alan Bursa şehri, Kuzey Anadolu Fay hattının etkisi altında olan bir bölgede yer almaktadır. Aletsel dönemden bu yana kayıt altına alınan depremler ve tarihsel döneme ait depremler dikkate alındığında Bursa ilinin yüksek sismisiteye sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple bölgenin sismik aktivitesinin ve sismik tehlike durumunun değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bir bölge için belirlenebilecek belli bir spektral periyot değeri için spektral ivme değeri veya maksimum yer ivmesi gibi değerler iki yolla elde edilebilmektedir. Birinci method, yer hareketi azalım ilişkilerinin kullanılmasıdır. İkinci method ise yer hareketi azalım ilişkilerinin kullanılarak anakaya ivmesinin belirlenmesinin ardından bölgedeki tabakalanma ve zeminin dinamik özelliklerinin de dikkate alınarak yüzeyde oluşan ivme değerlerinin hesaplanmasıdır.

Olasılıksal sismik tehlike analizinde bölgeyi etkisi altına alan sismik kaynaklar, deprem büyüklüğü ve uzaklıklarına göre belirlenebilecek yer hareketi seviyesinin yıllık aşılma olasılığı böylelikle tahmin edilebilmektedir. Yapılan sismik tehlike analizi ile belirlenen bölge için deprem yükleri hesaplanarak depremden kaynaklanan yapı hasarlarının azaltılabilmesi sağlanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında Bursa ilinde yer alan Ulu Camii merkez kabul edilerek 100 km yarıçaplı dairesel bir alanda 01/01/1900 ve 10/11/2021 yılları arasında meydana gelmiş deprem kayıtları AFAD web sitesi aracılığıyla elde edilmiştir. Bursa ilinin depremselliğini irdeleyebilmek için 40.18° kuzey enlemi ve 29.06° doğu boylamı koordinatları merkez kabul edilmiştir. Belirlenen sismik bölgede aletsel dönemden (1900) bu yana gerçekleşen $4.0 \leq M$ magnitüde sahip olan deprem kayıtları dikkate alınmıştır. Gutenberg – Richter, meydana gelen depremlerin büyüklüğü ile sıklığı arasındaki ilişkiyi tanımlayarak bir bölgenin sismik tehlike analizinin yapılabilmesine yardımcı olmaktadır. Bu ilişkiye bağlı olarak inceleme alanı için yapılan regresyon analizi sonucu Gutenberg-Richter Tekrarlanma Kanunu'ndaki kabuğun deprem üretkenliğiyle ilişkili olan a katsayısı ve kabuktaki gerilmeyle ters orantılı olan deprem oluşumunun fiziki ile ilişkili olan b depremsellik katsayıları sırasıyla 4.64 ve 0.56 olarak elde edilmiştir.

Bursa şehri tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için olasılıksal sismik tehlike analizleri R-CRISIS v18.4.2 yazılımı yardımıyla yapılmıştır. TBDY 2018'e göre 50 yılda aşılma olasılığının %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan DD-2 deprem yer

hareketi ve %5 sönüm oranına göre analiz yapılmıştır. Bursa ili ve çevresinde yer alan sismik kaynaklar, bölgenin jeolojisi, fay mekanizmaları, fay parametreleri, deprem büyüklük değerleri vb. özellikler dikkate alınarak bu çalışma kapsamında sismik tehlike analizlerinde kullanılan yer hareketi azalım ilişkileri Campbell-Bozorgnia 2008 NGA (CB2008) ve Chiou and Youngs 2008 NGA (CY2008)'dır. R-CRISIS yazılımı ile iki farklı analiz yapılmıştır. İlk analizde inceleme alanındaki tüm deprem kayıtları dikkate alınarak bölgede sismik etkinliği oluşturan diri fay hatları ile bölgesel nitelikli sismik etkinlik gösteren alansal kaynaklar birlikte dikkate alınmıştır. İkinci analizde ise Deniz (2006)'ın yaptığı koordinatlı çalışma ile belirlenen Türkiye için bölgesel kaynak zonları dikkate alınmış olup sadece alansal kaynaklar kullanılmıştır. İlk analiz modelinde bölgede hakim olan sismik kaynaklar için Gutenberg-Richter büyüklük-sıklık ilişkisi kullanılarak fay hatları ve belirlenmiş alansal kaynaklar için sismik parametreler hesaplanmıştır. R-CRISIS yazılımı ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda kullanılan yer hareketi azalım ilişkileri ile yer hareketi parametrelerinin aşılma olasılıkları belirlenmiştir. Böylece her bir spektral periyot değeri için spektral ivme (SA) değerleri belirlenebilmiştir. DD-2 yer hareketi seviyesi için alanda oluşabilecek DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için %5 sönüm oranına sahip elastik ivme spektrumlarına göre 0.2 saniye spektral periyoda karşılık gelen ivme değeriyle S_5 ve 1.0 saniye spektral periyoda karşılık gelen ivme değeri dikkate alınarak S_1 katsayıları belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alınarak ZC zemin koşulları için geçerli olan yerel zemin etki katsayıları TBDY 2018'den belirlenmiştir. Elde edilen bu katsayı değerleri kullanarak tasarım spektral ivme katsayıları hesaplanıp her bir yer hareketi azalım ilişkisine göre elastik tepki spektrumları oluşturulmuştur.

Bursa ili Hanlar Bölgesi için TBDY 2018'e göre belirlenen maksimum yatay tasarım spektral ivme değeri 1.03g, en büyük yer ivmesi değeri (PGA) 0.412g olarak verilmektedir. İlk analiz modeline göre R-CRISIS ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucu elde edilen PGA değerleri Campbell and Bozorgnia 2008 NGA ve Chiou and Youngs 2008 NGA yer hareketi azalım ilişkilerine göre sırasıyla 0.342g ve 0.273g'dir. Maksimum spektral ivme değeri CB2008 azalım ilişkisine göre 0.85g, CY2008 yer hareketi azalım ilişkisine göre ise 0.68g olarak elde edilmiştir. İkinci analiz modeline göre yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucu elde edilen PGA değerleri Campbell and Bozorgnia 2008 NGA ve Chiou and Youngs 2008 NGA yer hareketi azalım ilişkilerine göre sırasıyla 0.130g ve 0.135g'dir. CB2008 azalım

ilişkinine göre maksimum spektral ivme değeri 0.33g, CY2008 yer hareketi azalım ilişkisine göre ise maksimum spektral ivme değeri 0.34g olarak elde edilmiştir.

Yalçın ve diğ. (2013) tarafından Bursa ili için EZ-FRISK yazılımı kullanılarak yapılan olasılıksal sismik tehlike analizinde de ikinci modele benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yalçın ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada DD-2 yer hareketi %5 sönüm oranı için Campbell ve Bozorgnia 2008 NGA azalım ilişkisi kullanılarak yapılan sismik tehlike analizi sonucunda maksimum spektral ivme 0.355g olarak belirlenmiştir. Eyidoğan tarafından 2003 yılında Bursa şehri için yapılan olasılıksal sismik tehlike analizinde 1976 ve 1995 yılları arasındaki deprem kayıtları kullanılmış olup DD-2 yer hareketi için maksimum yatay ivme değeri 0.36g olarak edilmiştir (Eyidoğan, 2003). Tübitak MAM ile BBB'nin ortak çalışması olan "Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Değerlendirme Projesi"nde deterministik sismik tehlike analizi yapılmıştır. Yapılan sismik tehlike analizinde bu çalışmada da kullanılmış olan Campbell ve Bozorgnia (2008) azalım ilişkisi kullanılmış olup bölge için en büyük yer ivmesi (PGA) ve farklı periyot değerleri için spektral ivmeler (SA) hesaplanmıştır. Ancak olasılıksal yaklaşıma dayanan TBDY 2018'e göre TÜBİTAK MAM Projesi sonucunda daha küçük değerlerin elde edildiği görülmüştür. Örneğin, Bursa Atatürk Anıtı ve çevresi için yapılan analiz sonucunda en büyük yer ivmesi (PGA) değeri 0.36 g olarak elde edilmişken, TBDY 2018'de DD-2 deprem yer hareketi için tanımlanan PGA değeri 0.372 g olarak verilmektedir. Benzer şekilde yapılan çalışma sonucu elde edilen S_s değeri 0.80 g iken TBDY (2018)'de DD-2 yer hareketi için verilen S_s değeri 0.89 g'dir.

İyisan ve Haşal (2005) tarafından yapılan çalışmada 29.07° doğu boylamı ve 40.18° kuzey enlemi (Bursa Atatürk Anıtı civarı) merkez alınarak $R=75$ km yarıçaplı bir daire içerisinde kalan bölgenin tarihsel ve aletsel (1900 ile 2003 arası) dönemlerde oluşmuş depremleri belirlenip birlikte değerlendirilerek, aşılma olasılıkları cinsinden sismik tehlike parametreleri hesaplanmıştır. DD-2 deprem yer hareketi düzeyine karşılık gelen en büyük yer ivmesi değeri Boore ve diğ. (1993) ve Ambraseys (1995) tarafından önerilen iki ayrı azalım ilişkisi yardımıyla hesaplanmıştır. Tekrarlanma periyodu 475 yıl olan yer hareketi için Bursa Atatürk Anıtı civarı için hesaplanan en büyük yatay kaya ivmesi değeri 0.1 g'dir.

Bursa ili Hanlar Bölgesi ve çevresi için yapılan sahaya özel analizlerde TBDY 2018'e uygun olarak deprem büyüklüğü, fay tipleri, faya olan mesafe, $(V_s)_{30}$ değerleri ve

kaynak mekanizmasına göre deprem kaydı seçimi yapılmıştır. Böylelikle TBDY 2018'e göre belirlenen tasarım spektrumuna yakın değerlerde ve inceleme alanı ile benzer özelliklerde deprem kayıtları elde edilebilmiştir. Sahaya özel seçilen 11 adet deprem kaydının dataları, PEER NGA Veri Bankası web sayfası (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) aracılığıyla elde edilmiştir. Seçilen depremlere ait spektral ivme kayıtları ayrı ayrı incelenerek tüm kayıtların aynı periyot değerleri için aritmetik ortalamaları alınmıştır. Yatay tasarım elastik spektrumundaki PGA değeri ile sahaya özel seçilen deprem kayıtlarının ortalama tepki spektrumlarına ait PGA değerleri oranlanarak bir katsayı elde edilmiştir. Zaman tanım alanında ölçeklendirmesi yapılan deprem kayıtlarının ölçek faktörü değeri 1.928 olarak belirlenmiştir. Seçilen 11 adet deprem kaydının hesaplanan ortalama spektral ivme değerleri, her bir periyot değeri için belirlenen katsayı ile çarpılarak ölçeklendirme uygulanmıştır. Basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiş olan deprem kayıtlarına göre maksimum spektral ivme değeri 0.18 s periyot için yaklaşık 1.27g olarak elde edilmektedir. TBDY 2018'e göre elde edilen tasarım spektrumunda maksimum spektral ivme değeri 0.067 s ve 0.344 s periyot aralığı için 1.03g'dir.

Bursa ili Hanlar Bölgesi için zemin sınıfı ZC zemin tanımlanmış olup, bölgenin zemin koşulları dikkate alınarak sahaya özel zemin davranış analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analiz sonucunda yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisi incelenmiştir. Tabanda yer alan kaya seviyesinden zemin yüzeyine doğru hareket eden deprem dalgalarının ivme genliklerinin artması zemin büyütmesi olarak tanımlanır. Sismik kaynaktan ortaya çıkan enerjinin korunduğu ilkesine göre genlikleri artan dalgaların hızları azalmaktadır. Bursa Tarihi Hanlar Bölgesi civarında anakaya derinliğinin yaklaşık 50 m olduğu öngörülmektedir. DeepSoil v7 yazılımı ile sahaya özgü zemin tepki analizi yapılmış olup 11 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Yapılan tek boyutlu eşdeğer lineer zemin tepki analizi sonucu zemin büyütmesi oranları belirlenmiştir. Zemin büyütmesi oranı yüzeydeki genlik değerinin (veya ivme) gelen dalgaının genlik (veya ivme) değerine bölünmesiyle elde edilmektedir. Kayma modülü oranı ve sönüm oranı eğrileri için Darendeli (2001) malzeme modeli kullanılmıştır. Tüm kayıtlar için her bir periyot değerine karşılık gelen zemin büyütme oranları hesaplanmıştır. Bursa ili Hanlar Bölgesi için yapılan sahaya özgü zemin davranış analizine göre elde edilen tepki spektrumunda maksimum spektral ivme değeri 1.25g, en büyük yer ivmesi değeri ise 0.474g olarak elde edilmiştir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için sahaya özel sismik tehlikenin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 40.18° kuzey enlemi ve 29.06° doğu boylamı koordinatları merkez kabul edilmiş olup 100 km yarıçaplı dairesel bir alanda gerçekleşen deprem kayıtları dikkate alınarak bölgenin depremselliği DD-2 yer hareketi seviyesi için değerlendirilmiştir. Yapılan analizlere ait değerlendirme ve öneriler ana hatlarıyla aşağıda özetlenmektedir.

- Tarihsel ve aletsel deprem kayıtları birlikte değerlendirildiğinde Bursa ilinde 1855 yılında yaşanan ve “Küçük Kıyamet” olarak adlandırılan depremin en çok hasara yol açtığı anlaşılmaktadır.
- Bursa ili Hanlar Bölgesi için bölgenin zemin koşulları ve bu çalışma için yapılan mikrotremor ile MASW çalışmaları dikkate alınarak zemin sınıfı ZC ve kayma dalgası hızı 400-450 m/s olarak belirlenmiştir. İnceleme alanı için anakaya derinliğinin yaklaşık 50 m olduğu öngörülmüştür. Bölgede yapılacak zemin etüt ve jeofizik çalışmaları ile bu tanımlamaların değişebileceği ve geliştirilebileceği göz önüne alınmalıdır.
- R-CRISIS v18.4.2 yazılımı ile yapılan olasılıksal sismik tehlike analizinde %5 sönüm oranı için çizgisel ve bölgesel kaynaklar birarada değerlendirilmiş ve Campbell and Bozorgnia 2008 NGA ve Chiou and Youngs 2008 NGA azalım ilişkilerine göre elde edilen PGA ve maksimum spektral ivme değerlerinin, TBDY 2018’de tanımlanan tasarım spektrumunun altında kaldığı görülmüştür.
- Bu çalışma kapsamında seçilen yer hareketi azalım ilişkilerinin değişmesi durumunda olasılıksal sismik tehlike analizi sonuçlarının da değişebileceği dikkate alınmalıdır.
- TBDY 2018’de tanımlanan DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için tasarım spektrumunda verilen PGA ve spektral ivme değerlerinin bu çalışma kapsamında yapılan analizler sonucu yüksek olduğu düşünülmektedir.
- Farklı deprem yer hareketi seçilmesi durumunda sahaya özel yapılan sismik tehlike analizlerinden elde edilen değerlerin değişeceği dikkate alınmalıdır.

- Yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonuçlarının seçilen sismik kaynak türüne göre değişebileceği göz önüne alınmalıdır.
- TÜBİTAK MAM Projesi (2013) kapsamında yapılan deterministik sismik tehlike analizi sonucunda, Bursa ili tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi için en büyük ivme değerleri Ulubat ve Bursa-İnegöl faylarının kırılması sonrasında ortaya çıkacağı ancak Bursa-İnegöl fay hattında tarihsel dönem kayıtları ve aletsel döneme ait depremler dikkate alındığında magnitudü 6'dan büyük deprem üretmediği belirlenmiştir. Bölgede gerçekleşen magnitudü 4'ten büyük olan depremlerin merkez üssü yerleri incelendiğinde ise yüksek sismik aktiviteye sahip olmadığı gözlemlenmiştir.
- Bursa ili Hanlar Bölgesi ve çevresi için yapılan sahaya özel analizlerde TBDY 2018'e uygun olarak 11 adet deprem kaydı seçilmiştir. Basit ölçeklendirme yöntemi ile zaman tanım alanında ölçeklendirilmiş olan deprem kayıtlarına göre maksimum spektral ivme değerinin TBDY 2018'de tanımlanan değere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Deprem büyüklüğü, fay tipleri, faya olan mesafe, $(V_s)_{30}$ değerleri ve kaynak mekanizması dikkate alınarak seçilen deprem kayıtlarının değişmesi halinde sonuçların da değişeceği göz önüne alınmalıdır.
- Çalışma kapsamında seçilen bölgenin değişmesi durumunda TBDY 2018'e göre belirlenen tasarım spektrumunun da değişeceği gözönüne alınırsa seçilecek deprem kayıtlarının da değişebileceği bilinmelidir.
- TBDY 2018'e uygun olarak seçilen depremlerin frekans içeriği, süresi ve genliği değiştikçe elde edilen sonuçların da değişkenlik gösterebilecektir. Dolayısıyla deprem seçiminin oldukça önemli olduğu değerlendirilmiştir.
- Bursa Tarihi Hanlar Bölgesi civarında anakaya derinliğinin yaklaşık 50 m olduğu öngörülmüş olup DeepSoil v7 yazılımı ile sahaya özgü zemin tepki analizi yapılmıştır. 11 adet deprem kaydı kullanılan tek boyutlu eşdeğer lineer zemin tepki analizi sonucu zemin büyütmesi oranları belirlenmiştir. Bu değerlerin seçilen deprem kayıtlarına göre değişebileceği dikkate alınmalıdır.
- Yapılan zemin davranış analizine göre elde edilen maksimum spektral ivme ve PGA, TBDY 2018'de tanımlanan tasarım spektrumunun altında çıkmıştır.
- Yapılan analizler sonucu elde edilen spektrumun TBDY 2018 tasarım spektrumunun altında çıkması durumunda, tasarım spektrumu kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abrahamson, N., & Silva, W.** (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground - Motion Relations. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 67-97.
- Adamu, I. I.** (2019). *Seismic Response of Seismically Isolated Structures with Triple Friction Pendulum Bearings*. (Yüksek Lisans tezi). T.C. İstanbul Kültür Üniversitesi, Institute of Graduate Studies, İstanbul.
- Akkar, S., Azak, T. E., Çan, T., Çeken, U., Demircioğlu, M. B., Duman, T., Zülfikar, Ö.** (2014). Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi. AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı. Ankara.
- ASCE 7-16** (2016). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, *ASCE/SEI 7- 16 American Society of Civil Engineers*. Reston, Virginia.
- Baker, J. W.** (2013). *Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. White Paper Version 2.0.1.
- Baştürk, M. H.** (2013). *Bursa Tarihi Yığma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Bhatti, A. Q., Hassan, S. Z. U., Rafi, Z., Khatoon, Z., ve Ali, Q.** (2011). Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Islamabad, Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42 (2011), 468-478.
- Bıçak, Ö.** (2018). *Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi ve Sahaya Özel Deprem Spektrumu Geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Cambazoğlu, S., Eker, A. M., Koçkar, M. K., ve Akgün, H.** (2013). Kilis ve Civarı için Sismik Kaynak Modeli Oluşturulması ve Şahinbey İlçesi için Örnek Bir Sismik Tehlike Analizi, 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*. Hatay : Eylül 25-27.
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y.** (2008). NGA Grund Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linerar Elastik Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 139-171.
- Chiou, B. S. J., & Youngs, R. R.** (2008). An NGA Model fot the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 173-215.
- Cornell, C. A.** (1968). Engineering Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58 (5), 1583–1606.

- Deniz, A.** (2006). *Estimation of Earthquake Insurance Premium Rates Based on Stochastic Method*. (Yüksek Lisans tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- EN 1998** (2004). Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, *European Committee For Standardization*. Brussels.
- Gök, E., & Polat, O.** (2011). An Assessment of the Seismicity of the Bursa Region from Temporary Seismic Network. *Pure and Applied Geophysics*, 169 (2012), 659-675.
- Güllü, H., & İyisan, R.** (2015). A Seismic Hazard Study Throuh the Comparison of Ground Motion Prediction Equations Using the Weighting Factor of Logic Tree. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-24.
- Jarraya, E., Montassar, S., Mekki, O. B., ve Hamdi, H.** (2021). Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Two Potential Nuclear Power Plant Sites in Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14 (167).
- Haşal, M. E., & İyisan, R.** (2005). Bursa Şehri için Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi Uygulaması. *TMMOB İMO Bursa Şubesi Aylık Yayın Organı, Bursa Bülteni*, 38(16-22).
- İyisan, R., & Haşal, M. E.** (2011). Zemin Büyütmesi ve Yerel Koşulların Spektral İvmeye Etkisi. *İTÜ Dergisi/d*, 10 (4), 47-56.
- İyisan, R., Haşal, M. E. & Akbaş, M.** (2021). Bursa İlinde Tarihi Camilerin Yer Aldığı Hanlar Bölgesi Yerel Zemin Koşulları. *Bursa Tarihi Cami Minarelerinin Deprem Davranışı Sempozyum Notları*, İstanbul.
- Kaplanoğlu, R.** (t.y.). *Bursa'nın Kentsel Gelişmesi ve Şehir Haritaları*. Academia. www.academia.edu/5413102/Bursa_nın_Kentsel_Gelişmesi_ve_Şehir_Haritaları wed sayfasından alıntılanmıştır.
- Khodaverdian, A., Zafarani, H., Rahimian, M., ve Dehnamaki, V.** (2016). Seismicity Parameters and Spatially Smoothed Seismicity Model for İran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (3).
- Kıray, B.** (2005). *Sismik Risk Analizi Yöntemlerinin Bilgisayar Tabanlı Çözümü ve Uygulanması*. (Yüksek Lisans tezi). Orhangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kızılbuğa, S.** (2016). *Isparta İlının Olasılıksal Yöntem ile Sismik Tehlikesinin Tahmini*. (Yüksek Lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Li, S., & Xie, L. L.** (2007). Progress and trend on near-field problems in civil engineering. *Acta Seismologica Sinica English edition*, 20, 105-114.
- McGuire, R. K.** (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Boulder, Colorado. Earthquake Engineering Research Institute.
- Mert, A., Pınar, A., Fahjan, Y., ve Hutchings, Y.** (2019). *Yakın Saha Deprem Yer Hareketinin Deprem Simülasyonları Kullanarak Modellenmesi: Deprem Kaynak Parametrelerindeki Değişimin Yakın Saha Yer Hareketine Etkileri* (Program Kodu: 3501, Proje No: 116Y091). İstanbul: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)

Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu (ÇAYDAG).

- Selim, H. H., Eyidoğan, H., & Tüysüz, O.** (2005). Güney Marmara Bölgesi'nde Tarihsel ve Aletsel Dönemlerde Oluşan Depremlerin Sismolojik ve Jeolojik İncelemesi, *Deprem Sempozyumu*. Kocaeli : Mart 23-25.
- Seyrek, E.** (2009). *Baraj Yeri Sismik Tehlike Analizlerinde Sayısal Çözümleme Modelleri ve Bir Uygulama*. (Doktora tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Subaşı, O., Haşal, M. E., Özaslan, B., İyisan, R., Yamanaka, H., ve Chimoto, K.** (2017). Bir Boyutlu Dinamik Analiz ve Mikrotremor Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması. *7.Geoteknik Sempozyumu*. İstanbul :Kasım 22-24.
- TBDY** (2018). Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Ankara.
- TÜBİTAK MAM.** (2013). *Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Değerlendirme Projesi*. Bursa Büyükşehir Belediyesi.
- Ulutaş, H.** (2012). *Van İli Sismik Tehlike Analizi*. (Yüksek Lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Ünal, B. & Askan, A.** (2015). Bursa Bölgesi için Yerel Sismik İstasyon Ağından Elde Edilen Parametreler İle Yer Hareketi Simülasyonu, *3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*. İzmir : Dokuz Eylül Üniversitesi, Ekim 14-16.
- Yalçın, H., Kutanis, M., & Özbayraktar, G.** (2013). Bursa Şehri Yerel Tasarım Spektrumunun Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi ile Elde Edilmesi, *2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*. Hatay : Eylül 25-27.

Url-1<<http://yerbilimleri.mta.gov.tr>>, erişim tarihi 20.11.2021.

Url-2<<https://tdth.afad.gov.tr>>, erişim tarihi 29.12.2021.

Url-3<<https://tadas.afad.gov.tr>>, erişim tarihi 03.01.2022.

Url-4<<https://ngawest2.berkeley.edu>>, erişim tarihi 05.01.2022.

Url-5<<https://www.afad.gov.tr>>, erişim tarihi 10.01.2022.

Url-6< <https://www.bursa.com.tr>>, erişim tarihi 10.01.2022.

Url-7<<https://bursa.ktb.gov.tr>>, erişim tarihi 12.01.2022.

Url-8<<http://cografyaharita.com>>, erişim tarihi 12.01.2022.



EKLER

EK A: AFAD Sismik Tehlike Haritası Detay Raporu

EK B: Bölgede Yapılan Arazi Çalışmaları





Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı:	Bursa DD-1	
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-1	50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
Enlem:	40,18°	
Boylam	29,06°	

Çıktılar

$S_g = 1.653$ $S_1 = 0.431$ $PGA = 0.666$ $PGV = 41.435$

S_g : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

S_1 : 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

PGA : En büyük yer ivmesi [g]

PGV : En büyük yer hızı [cm/sn]

Şekil A.1 : AFAD DD-1 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-1.

Yerel Zemin Sınıfları

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 $P_I > 20$ 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 ($P_I > 50$) killer , 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Şekil A.2 : AFAD DD-1 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-2.

Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S = 0,50$	$S_S = 0,75$	$S_S = 1,00$	$S_S = 1,25$	$S_S \geq 1,50$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
ZC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
ZD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
ZE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_S = 1.653$ için $F_S = 1.200$

Yerel Zemin Sınıfı	1,0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0,10$	$S_1 = 0,20$	$S_1 = 0,30$	$S_1 = 0,40$	$S_1 = 0,50$	$S_1 \geq 0,60$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
ZD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
ZE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Şekil A.3 : AFAD DD-1 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-3.

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_1=0.431$ için $F_1=1.500$

Tasarım Spektral İvme Katsayıları

$$S_{DS} = S_S F_S = 1.653 \times 1.200 = 1.984$$

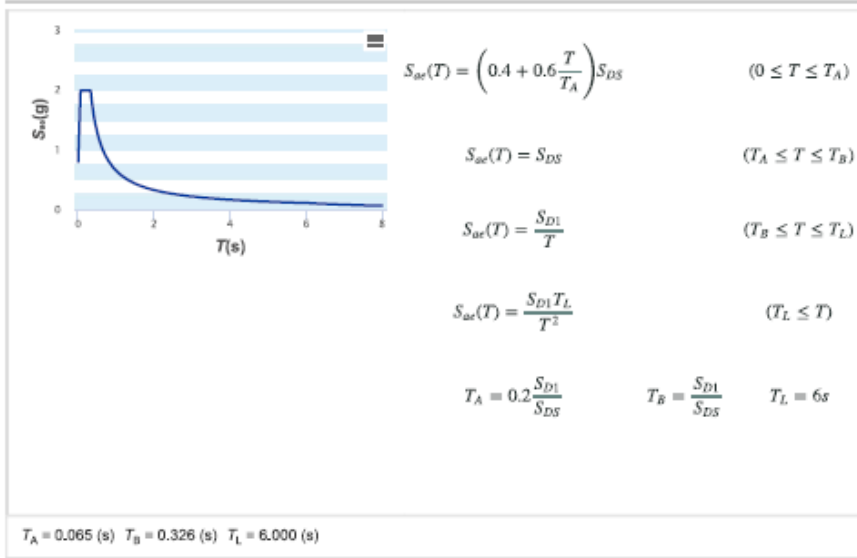
$$S_{D1} = S_1 F_1 = 0.431 \times 1.500 = 0.646$$

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

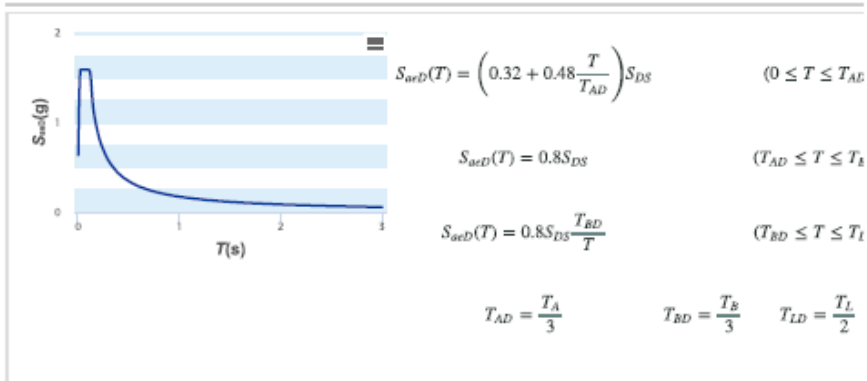
S_{D1} : 1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

Şekil A.4 : AFAD DD-1 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-4.

Yatay Elastik Tasarım Spektrumu



Düşey Elastik Tasarım Spektrumu



Şekil A.5 : AFAD DD-1 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-5.



Şekil A.6 : AFAD DD-1 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-6.



Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı:	AFAD Bursa	
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2	50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
Enlem:	40,18°	
Boylam	29,06°	

Çıktılar

$S_S = 0.859$	$S_1 = 0.229$	$PGA = 0.358$	$PGV = 21.939$
S_S : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]			
S_1 : 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]			
PGA : En büyük yer ivmesi [g]			
PGV : En büyük yer hızı [cm/sn]			

Şekil A.7 : AFAD DD-2 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-1.

Yerel Zemin Sınıfları

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 $P_I > 20$ 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 killeri, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killeri, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($P_I > 50$) killeri , 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killeri.			

Şekil A.8 : AFAD DD-2 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-2.

Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S = 0,50$	$S_S = 0,75$	$S_S = 1,00$	$S_S = 1,25$	$S_S \geq 1,50$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
ZC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
ZD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
ZE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_S=0.859$ için $F_S=1.200$

Yerel Zemin Sınıfı	1,0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0,10$	$S_1 = 0,20$	$S_1 = 0,30$	$S_1 = 0,40$	$S_1 = 0,50$	$S_1 \geq 0,60$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
ZD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
ZE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Şekil A.9 : AFAD DD-2 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-3.

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_1=0.229$ için $F_1=1.500$

Tasarım Spektral İvme Katsayıları

$$S_{DS} = S_S F_S = 0.859 \times 1.200 = 1.031$$

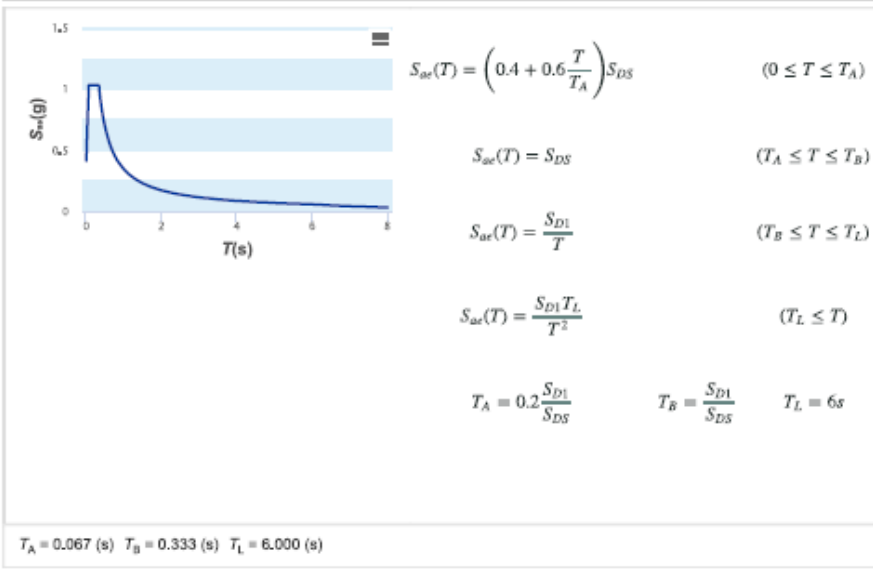
$$S_{D1} = S_1 F_1 = 0.229 \times 1.500 = 0.344$$

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

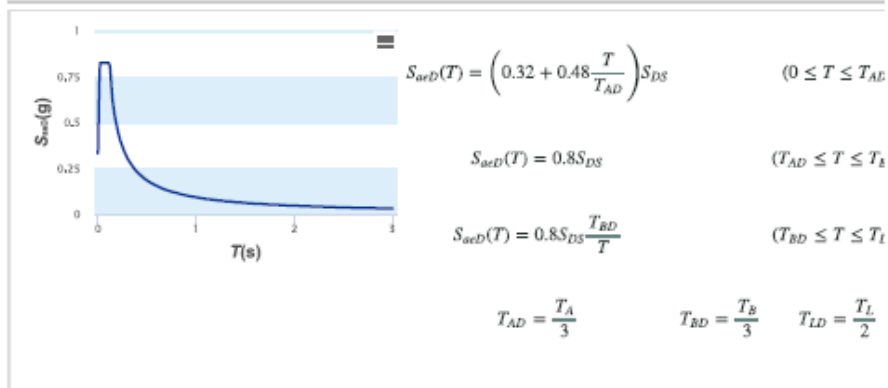
S_{D1} : 1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

Şekil A.10 : AFAD DD-2 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-4.

Yatay Elastik Tasarım Spektrumu



Düsey Elastik Tasarım Spektrumu



Şekil A.11 : AFAD DD-2 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-5.

$T_{AD} = 0.022$ (s) $T_{BB} = 0.111$ (s) $T_{LD} = 3.000$ (s)
--

Şekil A.12 : AFAD DD-2 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-6.



Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı:	Bursa DD-3	
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-3	50 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
Enlem:	40,18°	
Boylam	29,06°	

Çıktılar

$S_g = 0.322$ $S_1 = 0.093$ $PGA = 0.140$ $PGV = 8.632$

S_g : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

PGA : En büyük yer ivmesi [g]

PGV : En büyük yer hızı [cm/sn]

Şekil A.13 : AFAD DD-3 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-1.

Yerel Zemin Sınıfları

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 ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 - 1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, 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 $P_f > 20$ 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 kiler, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek kiler, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($P_f > 50$) kiler , 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı kiler.			

Şekil A.14 : AFAD DD-3 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-2.

Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S = 0,50$	$S_S = 0,75$	$S_S = 1,00$	$S_S = 1,25$	$S_S \geq 1,50$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
ZC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
ZD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
ZE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_S = 0,322$ için $F_S = 1,300$

Yerel Zemin Sınıfı	1,0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0,10$	$S_1 = 0,20$	$S_1 = 0,30$	$S_1 = 0,40$	$S_1 = 0,50$	$S_1 \geq 0,60$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
ZD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
ZE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Şekil A.15 : AFAD DD-3 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-3.

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_1=0.093$ için $F_1=1.500$

Tasarım Spektral İvme Katsayıları

$$S_{DS} = S_S F_S = 0.322 \times 1.300 = 0.419$$

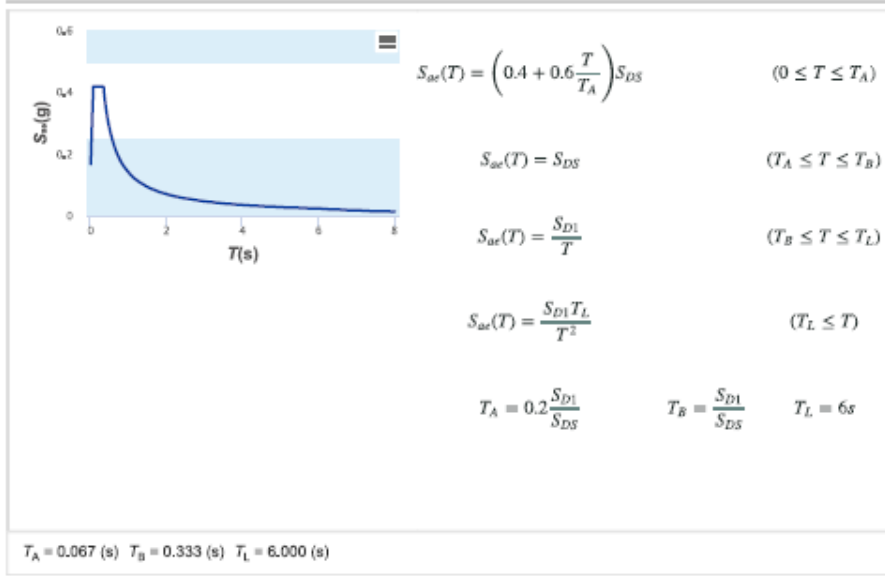
$$S_{D1} = S_1 F_1 = 0.093 \times 1.500 = 0.140$$

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

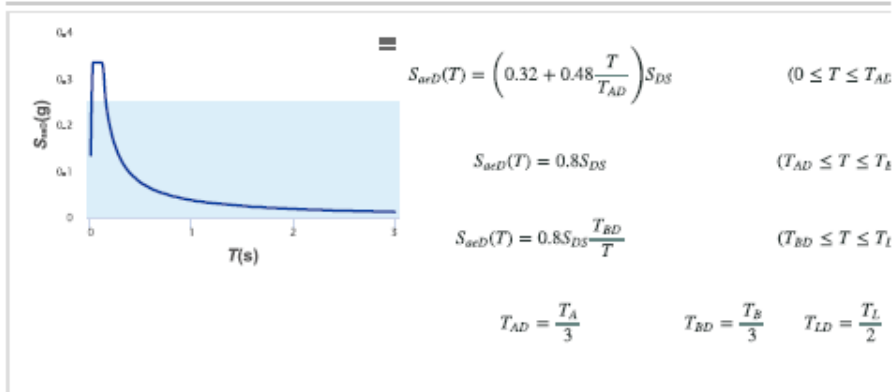
S_{D1} : 1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

Şekil A.16 : AFAD DD-3 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-4.

Yatay Elastik Tasarım Spektrumu



Düsey Elastik Tasarım Spektrumu



Şekil A.17 : AFAD DD-3 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-5.



Şekil A.18 : AFAD DD-3 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-6.



Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı:	Bursa DD-4	
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-4	50 yılda açılma olasılığı %68 (tekrarlanma periyodu 43 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
Enlem:	40,18°	
Boylam	29,06°	

Çıktılar

$S_g = 0.227$ $S_1 = 0.066$ $PGA = 0.099$ $PGV = 6.167$

S_g : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

S_1 : 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

PGA : En büyük yer ivmesi [g]

PGV : En büyük yer hızı [cm/sn]

Şekil A.19 : AFAD DD-4 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-1.

Yerel Zemin Sınıfları

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.			

Şekil A.20 : AFAD DD-4 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-2.

Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S = 0,50$	$S_S = 0,75$	$S_S = 1,00$	$S_S = 1,25$	$S_S \geq 1,50$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
ZC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
ZD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
ZE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_S = 0.227$ için $F_S = 1.300$

Yerel Zemin Sınıfı	1,0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0,10$	$S_1 = 0,20$	$S_1 = 0,30$	$S_1 = 0,40$	$S_1 = 0,50$	$S_1 \geq 0,60$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
ZD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
ZE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Şekil A.21 : AFAD DD-4 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-3.

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_1=0.066$ için $F_1=1.500$

Tasarım Spektral İvme Katsayıları

$$S_{DS} = S_S F_S = 0.227 \times 1.300 = 0.295$$

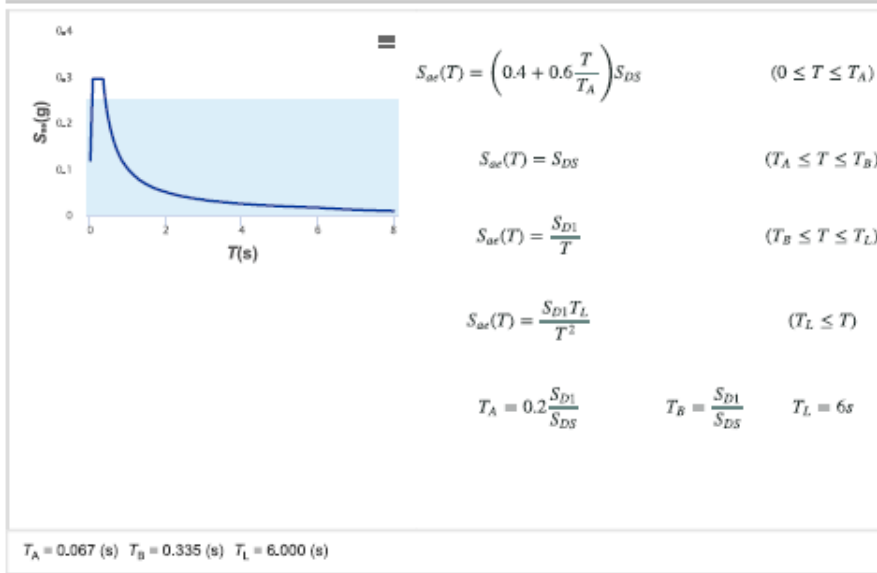
$$S_{D1} = S_1 F_1 = 0.066 \times 1.500 = 0.099$$

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

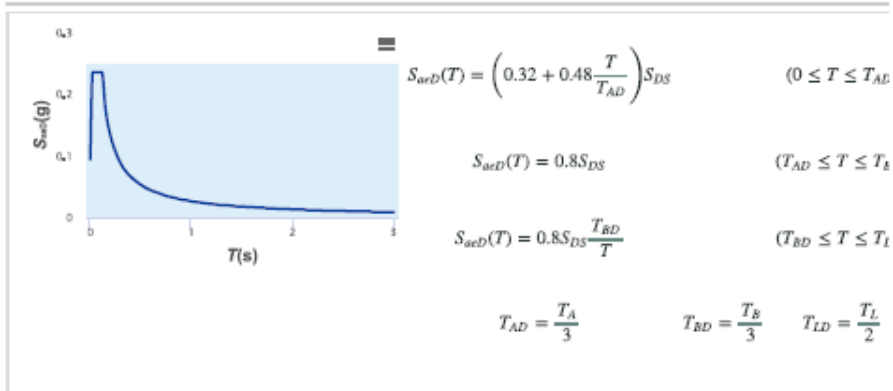
S_{D1} : 1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

Şekil A.22 : AFAD DD-4 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-4.

Yatay Elastik Tasarım Spektrumu



Düsey Elastik Tasarım Spektrumu



Şekil A.23 : AFAD DD-4 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-5.



Şekil A.24 : AFAD DD-4 yer hareketi düzeyi için sismik tehlike haritası raporu-6.

EK B

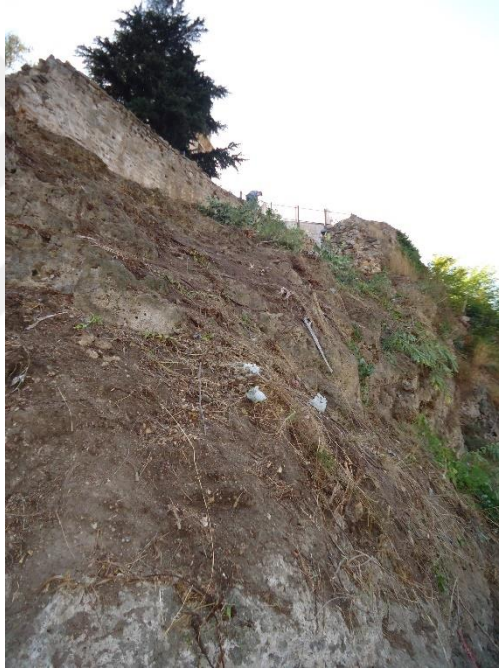


Foto B.1 : SK-1 sondaj çalışmalarına ait fotoğraflar.

Zemin Deneyleri										Kaya Özellikleri				Jenlojik Kesiti	Zemin Tanımlaması
SPT		Darbe Sayısı	Presiyonlu Deney Sonuçları	Vane Deney Sonuçları	Kaya Yüzeyi %	RQD %	Ayrışma Derecesi	Çatlak Sıklığı (m)							
Sondaj Derinliği (m.)	Tabaka Derinliği (m.)								Numune No	Numune Derinliği (m.)	Numune Türü	Min. Borusu	1	2	3
1	1	1.50	KAROT	50/2	24						<u>DOLGULU MALZEMESİ</u> İnşaat temelaltı dolgu malzemesi den meydana gelir. 2.60m <u>ALTERE TRAVERTEN</u> Sarımsı - Bej renkteki tamamen ayrışmış, altıne olmuştur, çok zayıf kırılgan kati halinde, yer yer erime ve kırılgan boşluklar içermektedir. Yerel aşın ayrışmadan dolayı zemin çökmesi →				
2	2	3.00	KAROT	10 19 59/10	34										
3	3	3.40	KAROT	8 10 12 22	45	0	W ₅	>50							
4	4	4.95	KAROT	13 21 50/2	48	0	W ₅	>50							
5	5	6.32	KAROT	50/11	43	0	W ₅	>50							
6	6	9.00	KAROT	50/5	45	0	W ₅	>50							
7	7	9.05	KAROT		0	W ₅	>50								
ZEMİN DEĞERLENDİRMESİ - SPT										KAYA DİREKLİLİĞİ (ROD) (%)		AYRIŞMA DEREJESİ (W)		ÇATLAK DERİNLİĞİ (H (m))	
İnce taneli (Kolezyonlu)		İli taneli (Kolezyonlu)		Çuk Çukçuk		Çuk Çukçuk		Çuk Çukçuk		Çuk Çukçuk		Çuk Çukçuk			
H: 0-7	Çuk Çukçuk	H: 0-4	Çuk Çukçuk	0-25	Çuk Çukçuk	W ₁	Taze (Ayrışmamış)	<1	Masif						
H: 3-4	Çuk Çukçuk	H: 5-10	Çuk Çukçuk	25-50	Çuk Çukçuk	W ₂	Az Ayrışmış	1-1	Az çatlaklı kırılgan						
H: 5-6	Çuk Çukçuk	H: 11-20	Çuk Çukçuk	50-75	Çuk Çukçuk	W ₃	Orta Derecede Ayrışmış	3-10	Kırılgan						
H: 8-13	Çuk Çukçuk	H: 21-50	Çuk Çukçuk	75-100	Çuk Çukçuk	W ₄	Az Ayrışmış	10-50	Çuk çatlaklı kırılgan						
H: 14-30	Çuk Çukçuk	H: >50	Çuk Çukçuk	90-100	Çuk Çukçuk	W ₅	Tamamen Ayrışmış	>50	parçalanmış						

Sondaj Derinliği (m.)		Tabaka Derinliği (m.)		Numune No		Numune Derinliği (m.)		Numune Türü		Zemin Deneyleri			Kayın Özellikleri			Jenlojik Kesil	Zemin Tanımlaması
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT			Kayın Özellikleri				
										SPT							

Şekil B.2 : SK-1 Sondaj logu-II.

Ornek Cinsi	Type of sample	Yeraltisuyu Durumu Ground Water Data			
SPT Ornegi Sample	Orselenmemis - Undisturbed	Derin. Depth	Tarih Date	Saat Hour	Aciklama Remarks
SAHME Huel : 0.00 S.Mes. HFall : 0	PISTON SHELBY	DENSIYON			

D R N E K S A M P L E			STANDART STANDARD			PENETRASYON PENETRATION					ARAZİ GOZLEMİ		KAROT - CORE			
			DARBE STROKE			N30 GRAFİĞİ			ZEMİN		FIELD					
No	Derinlik Depth		0.15	15.30	20.45	N	GRAFİK	PROFİLİ	IDENTIFICATION		%	ROD	%	CR		
SPT 1	2.00	2.50	14	18	20	38		DOLGU								
SPT 2	3.00	3.50	50	50	50	50										
SPT 3	4.50	5.00	8	10	18	28										
SPT 4	6.00	6.50	50	50	50	50										
SPT 5	7.50	8.00	50	50	50	50		BLOKLU ÇAKILLI KUM								
SPT 6	9.00	9.50	50	50	50	50										
SPT 7	10.50	11.00	50	50	50	50										
SPT 8	12.00	12.50	50	50	50	50										
Kuyu Sonu : 12.50 m																

Şekil B.3 : SK-2 Sondaj logu.

SONDAJ LOGU																				
Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza borusu Derinliği	Kuyu içi deneyler	Örnek Derinliği (m)	Örnek Türü ve No	Standart Penetrasyon Testi (SPT)				Presiyo metre Deneyi	Kaya Özellikleri						Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Sondaj Derinliği (m)		
					Darbe Sayısı					Elastisite Modülü (kg/cm ²)	Limit Basınç (kg/cm ²)	TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi				Çatlak Sıklığı	Dayanım
					0-15	15-30	30-45	N												
0,0																		0,0		
0,5																		0,5		
1,0																		1,0		
1,5																		1,5		
2,0			1,5	SPT-1	50/5		>50					38						2,0		
2,5			1,53	Karot								23						2,5		
3,0																		3,0		
3,5			3,0	SPT-2	50/2		>50											3,5		
4,0			3,02	Karot								32						4,0		
4,5																		4,5		
5,0			4,5	SPT-3	50/2		>50											5,0		
5,5			4,52	Karot								25						5,5		
6,0																		6,0		
6,5												22						6,5		
7,0				Karot														7,0		
7,5																		7,5		
8,0				Karot								20						8,0		
8,5																		8,5		
9,0																		9,0		
9,5				Karot														9,5		
10,0												37						10,0		
10,5																		10,5		
11,0																		11,0		
11,5																		11,5		
12,0																		12,0		
12,5																		12,5		
13,0																		13,0		
13,5																		13,5		
14,0																		14,0		
14,5																		14,5		
15,0																		15,0		
15,5																		15,5		

Şekil B.4 : SK-3 Sondaj logu.

SONDAJ LOGU															
Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza bonusu Derinliği	Kuyu içi deneyler	Örnek Derinliği (m)	Örnek Türü ve No	Standart Penetrasyon Testi (SPT)				Presiyometre Deneyi		Kaya Özellikleri				
					Darbe Sayısı				Elastisite Modülü (kg/cm ²)	Limit Basıncı (kg/cm ²)	TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi	Çatlak Sıklığı
					0-15	15-30	30-45	N30							
0.0															
0.5															
1.0															
1.5															
2.0			1.5	SPT-1	50/12			R							
2.5				Karot											
3.0									288.09	23.79					
3.5			3.0	SPT-2	50/5			R							
4.0				Karot											
4.5															
5.0															
5.5				Karot											
6.0									525.08	26.72					
6.5															
7.0				Karot											
7.5															
8.0															
8.5				Karot											
9.0									601.52	30.01					
9.5															
10.0				Karot											
10.5															
11.0															
11.5				Karot											
12.0									881.50	33.00					
12.5															
13.0				Karot											
13.5															
14.0															
14.5				Karot											
15.0									582.96	31.19					
15.5															
16.0				Karot											
16.5															
17.0															
17.5				Karot											
18.0															
18.5															
19.0				Karot											
19.5															
20.0															
20.5															

Şekil B.5 : SK-4 Sondaj logu.

SONDAJ LOGU																				
Sondaj Derinliği (m)	Muhafaza borusu Derinliği	Kuyu içi deneyler	Örnek Derinliği (m)	Örnek Türü ve No	Standart Penetrasyon Testi (SPT)				Presiyometre Deneyi	Kaya Özellikleri						Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Sondaj Derinliği (m)		
					Darbe Sayısı					Elastisite Modülü	Limit Basınç (kg/cm2)	TCR %	SCR %	RQD %	Ayrışma Derecesi				Çatlak Sıklığı	Dayanım
					0-15	15-30	30-45	N30												
0.0																		0.0		
0.5																		0.5		
1.0																		1.0		
1.5																		1.5		
2.0			1.5	SPT-1	8	9	13	22										2.0		
2.5																		2.5		
3.0			2.5	UD	ALINDI													3.0		
3.5			3	SPT-2	9	27	35	62										3.5		
4.0																		4.0		
4.5																		4.5		
5.0																		5.0		
5.5				Karot														5.5		
6.0																		6.0		
6.5				Karot														6.5		
7.0																		7.0		
7.5																		7.5		
8.0				Karot														8.0		
8.5																		8.5		
9.0																		9.0		
9.5																		9.5		
10.0				Karot														10.0		
10.5																		10.5		
11.0				Karot														11.0		
11.5																		11.5		
12.0																		12.0		
12.5				Karot														12.5		
13.0																		13.0		
13.5				Karot														13.5		
14.0																		14.0		
14.5				Karot														14.5		
15.0	15.0																	15.0		
15.5																		15.5		

Şekil B.6 : SK-5 Sondaj logu.

SONDAJ DERİNLİĞİ BORING DEPTH (m)	TABAKA DERİNLİĞİ LAYER DEPTH (m)	NUMUNE NO SAMPLE NUMBER	NUMUNE DERİNLİĞİ SAMPLE DEPTH (m)	NUMUNE TÜRÜ SAMPLE TYPE	MÜHÜRLEME KUTUSU CASING	STANDART PENETRASYON DENEYİ STANDARD PENETRATION TEST										KAROT % CORE RECOVERY	ROD %	AYRIŞMA WEATHERING	DAYANIMLILIK STRENGTH	KIRIK FRACTURE (30cm)	D O C	PROFİL PROFILE	ZEMİN TANIMLAMASI SOIL DESCRIPTION																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
						DARBE SAYISI NUMBER OF BLOWS			N ₆₀	GRAFIK / GRAPH																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
						0-15	15-30	30-45		10	20	30	40	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
0.30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										</

Şekil B.7 : SK-6 Sondaj logu.



Foto B.2 : SK-7 Sondajina ait fotoğraflar.

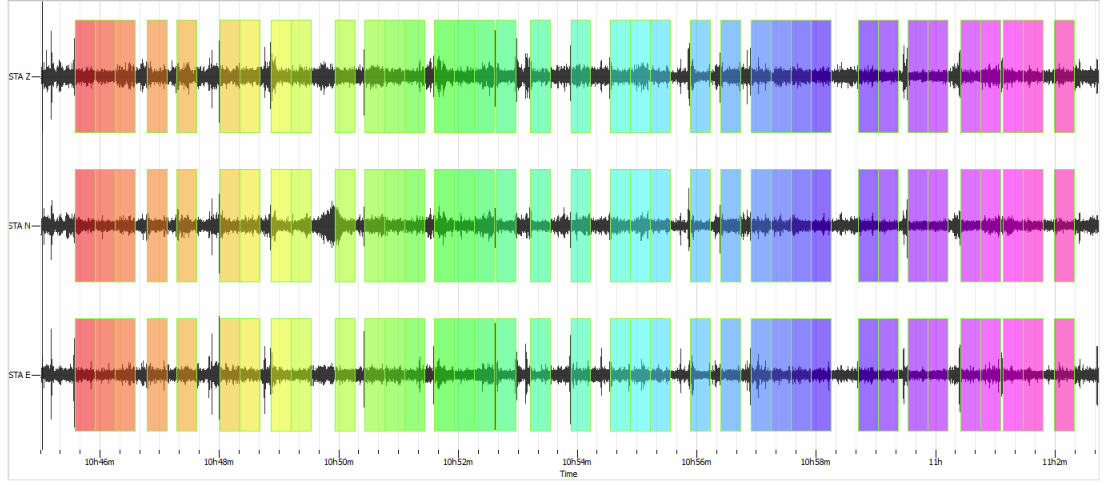
Şekil B.8 : SK-7 Sondaj logu.

										SONDAJ LOGU										Sayfa : 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
PROJE ADI :																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
SONDAJ YERİ :																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
KUYU NO :																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
SONDAJ DER. :																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
SONDAJ KOTU :																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
YER ALTI SUYU :																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Sonda Derin. (m)	Manevra boyu	Numune Cinsi	STANDART PENETRASYON TESTİ					GRAFİK					YAS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
			DARBE SAYISI				N ₃₀																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
			0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm					0	10	20						30	40	50	60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1.00	1.50	SPT	17	19	37	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

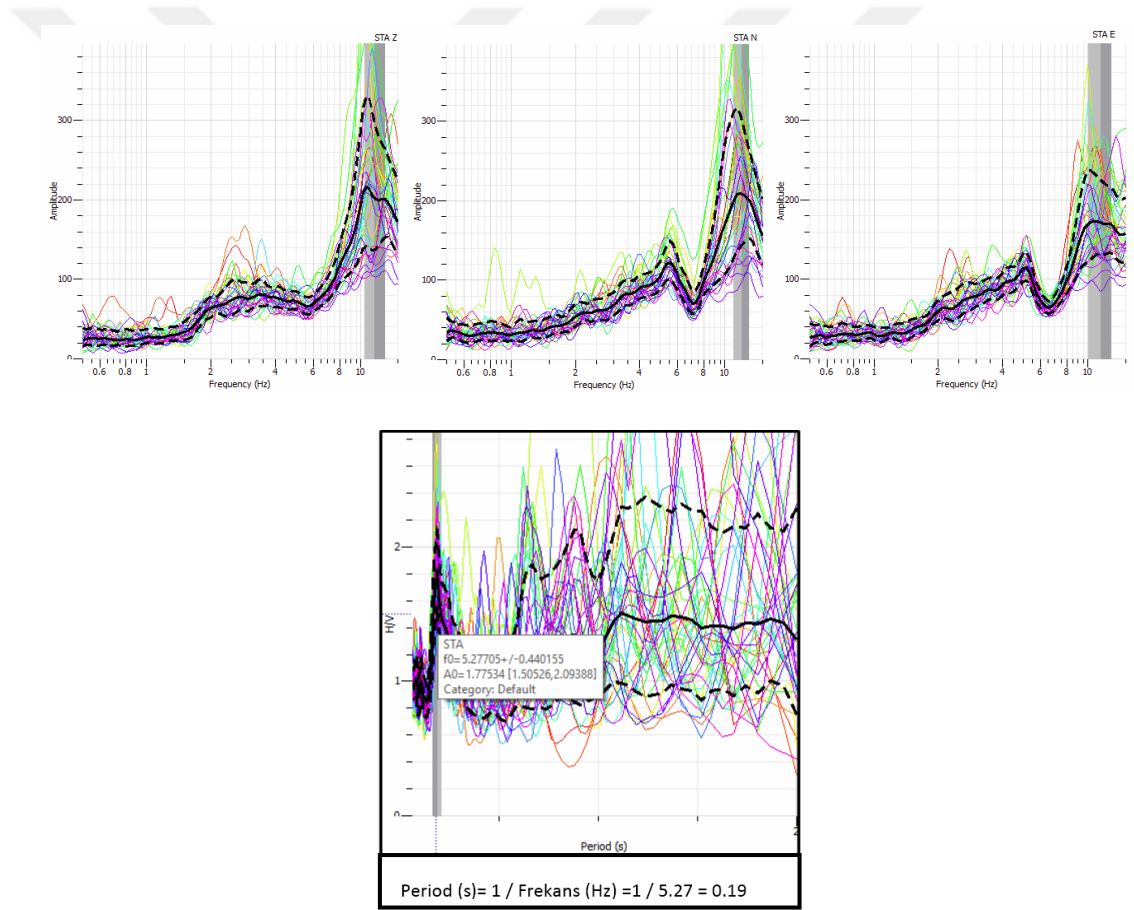
Şekil B.9 : SK-8 Sondaj logu.

SONDAJ KOTU/ELEVATION :				Koordinat/Coordinate(N-S) X : 4450053									
YERALTI SUYU/GRANDWATER: Yoktur				Koordinat/Coordinate(E-W) Y :421327									
Derinlik (m) Depth (m)			Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test				Jeoteknik Tanımlama Geotechnical Description	Profil Profile	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Kırık/30 cm. Fracture/30 cm.	Korot % Core Recovery %	RQD %
	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Run	Darbe Sayısı Number Of Blows			Grafik Graph							
			0-15 cm	15-30 cm	30-40 cm								
							10 20 30 40 50 60						
1		1.50						Yapay Dolgu 0.35m					
2	SPT-1		20	28	29	>50							
3		1.95						Kumlu Siltli Kil Sarı renkli, çok katı-sert kıvamlıdır. Yersel kum ve çok az çakıl içerikli, kum orta-ince taneli olup, düşük plastisiteli yağımı özelliğindedir.					
4		3.00											
5	SPT-2		17	21	27	48		5.50m					
6		3.45											
7		4.50											
8	SPT-3		14	14	25	39							
9		4.95						Kumlu Siltli Kil (Neojen) Griimsi açık yeşil renkli, sert kıvamlıdır. Yersel kum ve çok az çakıl içerikli, kum orta-ince taneli olup, orta-yüksek plastisiteli yağımı özelliğindedir.					
10		6.00											
11	SPT-4		19	20	26	46							
12		6.45											
13		7.50											
14	SPT-5		20	20	25	45							
15		7.95											
16		9.00											
17	SPT-6		17	27	43	>50							
18		9.45											
19		10.50											
20	SPT-7		17	27	44	>50							
21		10.95											
22		12.00											
23	SPT-8		29	36	50/4	>50							
24		12.34											
25		13.50											
26	SPT-9		30	33	50/7	>50							
27		13.87											
28		15.00											
29	SPT-10	15.24	36	50/9	>50			Kuyu Sonu:15.24m					

Şekil B.10 : SK-9 Sondaj logu.



Şekil B.12 : Düşey, K-G ve D-B doğrultularında alınmış üç bileşenli kayıt ve analizde kullanılmak üzere seçilen pencereler (Mikrotremor 1).



Şekil B.13 : 1 nolu mikrotremor ölçümü için Nakamura Yöntemine göre belirlenmiş H/V genlik spektrumu.

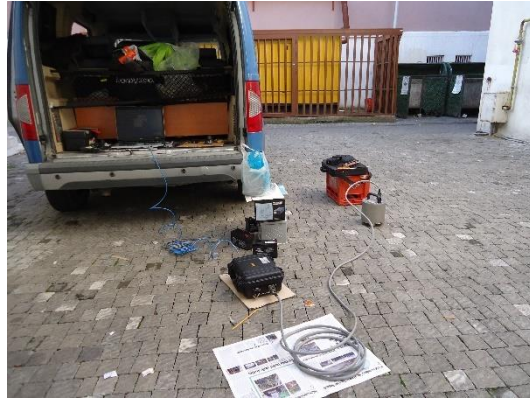
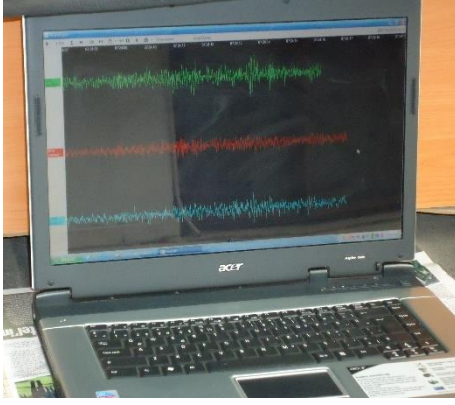
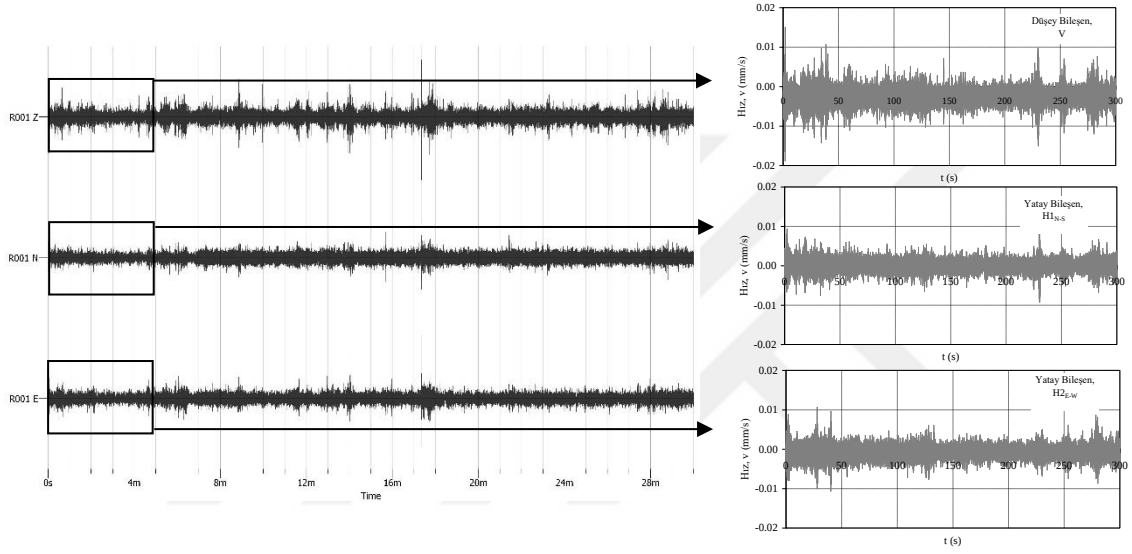
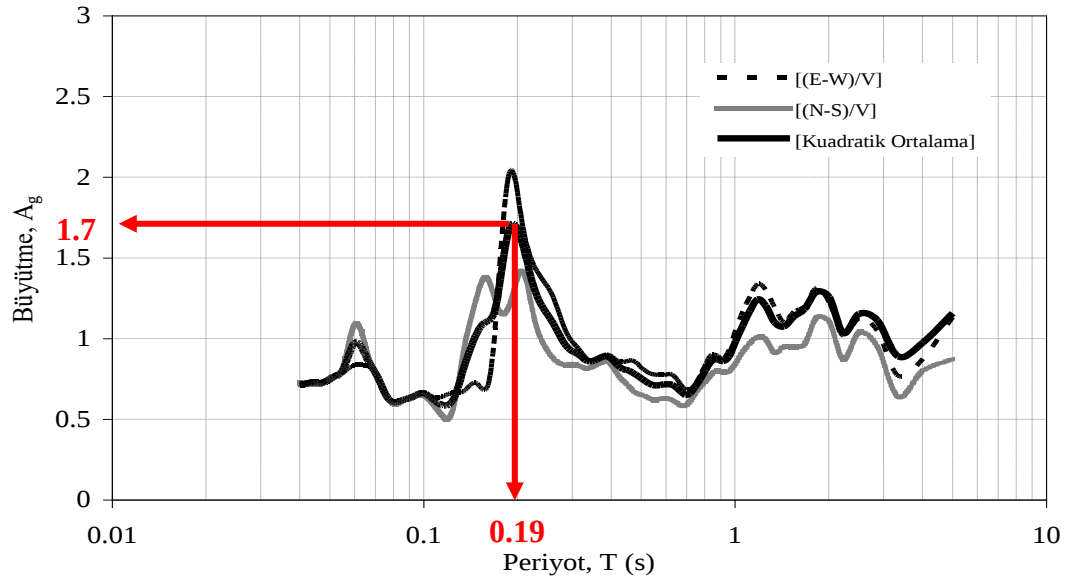


Foto B.4 : 2 nolu mikrotremor ölçümünün düzenlenmesi.



Şekil B.14 : Düşey, K-G ve D-B doğrultularında alınmış 30 dakika uzunluğunda üç bileşenli kayıt ve her bir bileşen için 5 dakika uzunluğunda hız kaydı örnekleri.



Şekil B.15: 2 nolu mikrotremor ölçümü için Nakamura Yöntemine göre belirlenmiş H/V genlik spektrumu.

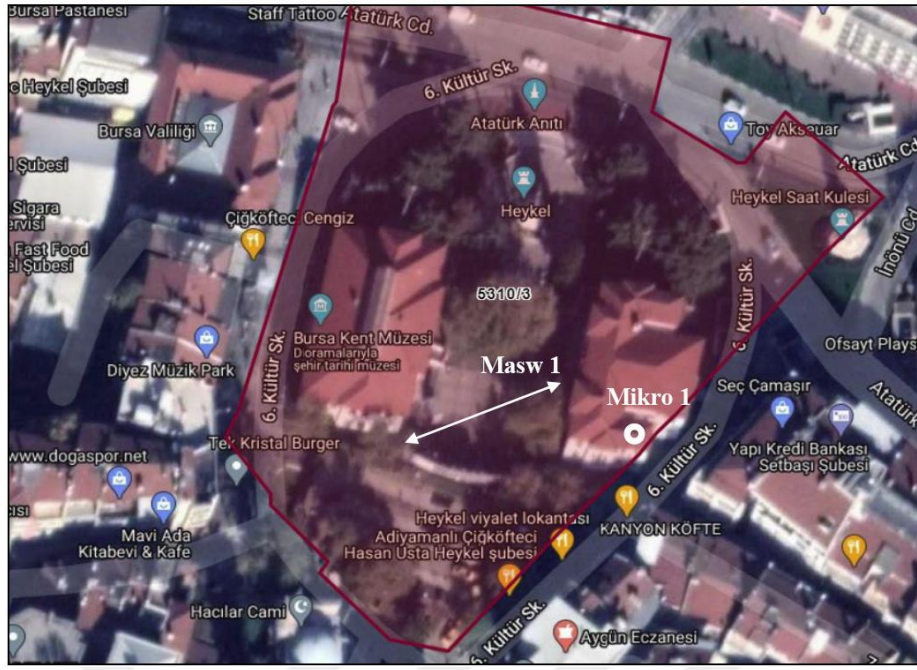
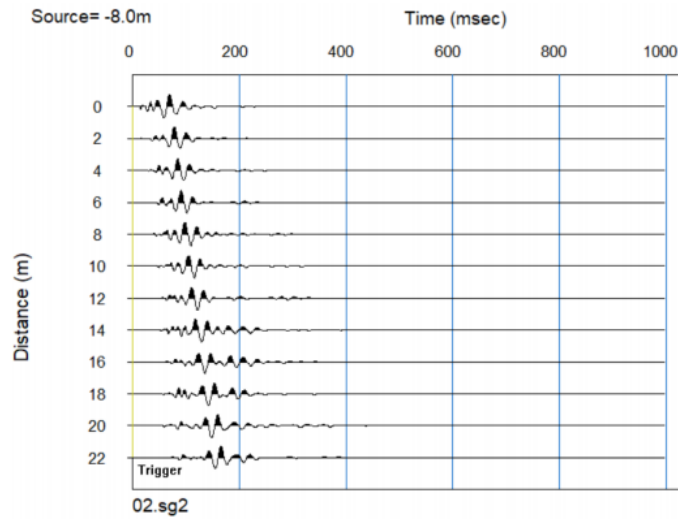
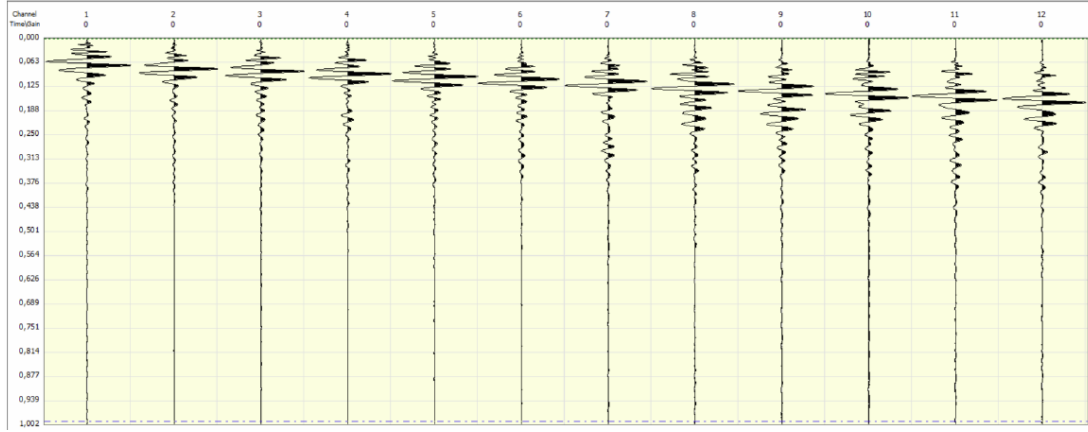
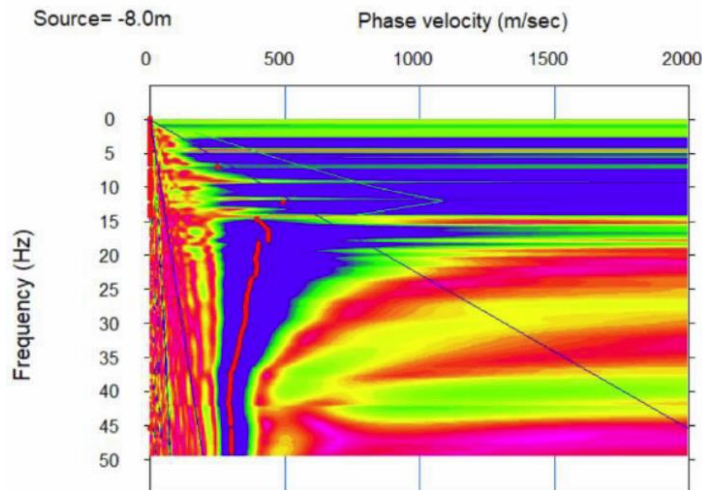


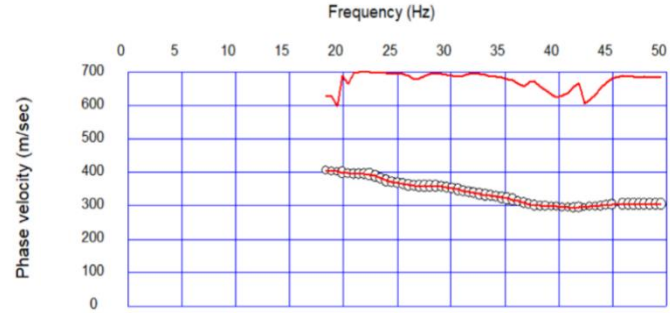
Foto B.5 : MASW deneyinin düzenlendiği Hacılar Cami ile Atatürk Anıtı arasındaki kısım ve MASW deneyinde uygulanmış sismik serim.



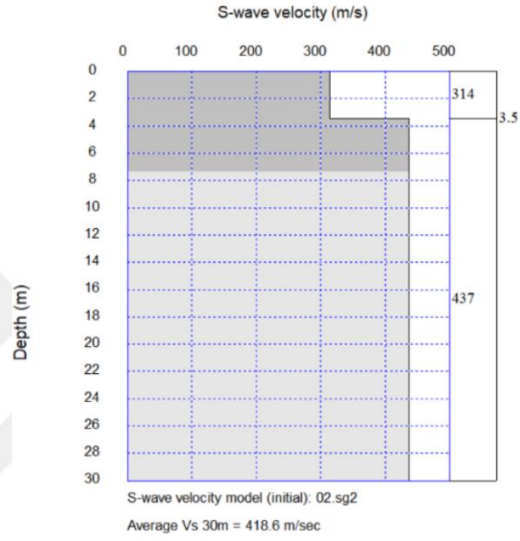
Şekil B.16 : Aktif yönteme dayalı sismik serimde alınmış çok kanallı titreşim kaydı (MASW).



Şekil B.17 : Aktif yönteme dayalı sismik serimde alınmış çok kanallı titreşim kaydına ait gözlemsel dispersiyon eğrisi (MASW).



Şekil B.18 : Aktif yöntemle dayalı sismik serimde alınmış çok kanallı titreşim kaydına ait gözlemsel ve teorik dispersiyon eğrileri (MASW).



Şekil B.19 : Geri analiz sonucu edilen sahaya ait kayma dalgası hızı profili (MASW).



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İrem BALOTA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği (3.57/4.00 Yüksek Onur Listesi)

MESLEKİ DENEYİM

- **Destech Müşavirlik Mühendislik ve Proje A.Ş. :**
İnşaat Mühendisi /Geoteknik Tasarım Mühendisi, Temmuz 2019-...
- **Zetaş Zemin Teknolojisi A.Ş. (Yarı zamanlı):**
İnşaat Mühendisi/ Geoteknik Tasarım Mühendisi, Ocak 2019- Nisan 2019
- **ENKA Holding (Merkez Ofis):**
İnşaat Mühendisliği Ofis Stajyeri, Haziran 2018- Temmuz 2018
- **ENKA Holding (Kosova)**
İnşaat Mühendisliği Saha Stajyeri, Haziran 2017- Temmuz 2017