



Zemin ve Deprem Parametrelerinden İvme Azalım İlişkisi

Attenuation Relationship for Peak Horizontal Acceleration from Ground and Earthquake Parameters

Osman Uyanık^{1*}, Nevbahar Ekin², Onur Çoşkun³

^{1,2} Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *:osmanuyanik@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 14.08.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 15.10.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2021236820

Atıf şekli/ How to cite: UYANIK O., EKİN N., ÇOSKUN O. (2021). Zemin ve Deprem Parametrelerinden İvme Azalım İlişkisi. DEÜFMD 23(68), 575-593.

Öz

Bu çalışmada, mühendislik yapıları için önemli bir parametre olan ve depremde meydana gelen pik yatay yer ivme değeri tahmin edilmiştir. Yatay yer ivme değeri konusunda çalışan araştırmacıların çoğunluğu sadece deprem parametrelerini, çok azı ise zemin parametrelerinden bazılarını deneysel ilişkilerinde kullanmışlardır. Bilindiği üzere pik yatay yer ivme değeri yerin özelliklerine bağlı değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada hem zeminin dinamik parametrelerini hem de deprem parametrelerini kullanarak çok parametrelili yeni bir ivme azalım ilişkisi elde edilmiştir. Bu ilişkide deprem parametreleri olarak depremin büyüklüğü, periyodu ve kaynak mesafesi ve zeminin dinamik parametreleri olarak da zeminin büyütmesi, hakim titreşim periyodu, 30m derinlik için P ve S dalga hızlarının ağırlıklı ortalamaları (V_{p30} ve V_{s30}) kullanılmıştır. Bu kapsamda, dünyadaki farklı istasyonlardan elde edilen $M_w=5.3-7.1$ aralığındaki büyüklüklerde 152 adet deprem kaydının sonuçları ve istasyon yerinin dinamik parametrelerinden elde edilen verilerle veri seti oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında geliştirilen deneysel azalım ilişkisi, literatürdeki diğer araştırmacıların deneysel ilişkileri ile karşılaştırılmış ve daha düşük RMSE hata elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yatay yer ivmesi, Depremin büyüklüğü, Uzaklık, Zemin büyütmesi, Sismik P ve S dalga hızları

Abstract

In this study, the value of the peak horizontal ground acceleration occurred in the earthquake and which is an important parameter for the engineering structures was estimated. Most of the researchers working on the peak horizontal ground acceleration value subject used only earthquake parameters and few used ground parameters in their empirical relationships. As known, the value of the peak horizontal ground acceleration varies depending on the properties of the ground. Therefore, a new multi-parameters attenuation relationship for peak horizontal acceleration was obtained by using both the dynamic parameters of the soil and the earthquake parameters. In this relationship, magnitude, period and source distance of the earthquake are used as earthquake parameters, and soil magnification, soil predominant period, weighted averages of P and S wave velocities for 30m depth (V_{p30} and V_{s30}) are used as dynamic parameters of the ground. In this context, the data obtained from dynamic parameters of station ground and from results of 152 earthquake records of $M_w=5.3-7.1$ magnitudes obtained from different stations in the world were formed as data set. The empirical attenuation relationship developed within the scope of the study was compared with that of other researchers in the literature and a lower RMSE error was obtained.

Keywords: Horizontal ground acceleration, Magnitude, Distance, Soil amplification, Seismic P and S wave velocities

1. Giriş

Önemli bir deprem kuşağında yer alan Türkiye’de, bir bölgede yer alan veya yerleşime açılacak yeni makro veya mikro ölçekli mühendislik projelendirmelerinde, özellikle deprem hasarlarının en aza indirgenmesi ve gerekli önlemlerin alınması açısından yapılaraya etki edecek deprem kuvvetinin doğru hesaplanması oldukça önemlidir. Bu önemine karşılık, Ülkemizde, birçok inşaat hesaplamalarında ivme değeri, “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”nde belirtilen tablolardan sabit alınmaktadır. Bilingiği gibi, ivme değeri sabit bir değer olmayıp yerin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden, literatürde 1950’li yıllardan beri birçok ivme azalım ilişkisi geliştirildiği literatürden bilinmektedir. Deprem dalgalarının yapıya uyguladığı yanal kuvvet olarak tanımlanan yatay deprem ivmesinin hesaplanması amacıyla dünyanın birçok noktasına kurulan deprem istasyonlarındaki deprem kayıtları kullanılmaktadır. Bu kayıtlar ivmeölçerler tarafından kaydedilmektedir. Ölçülen deprem kayıtları yırtılan fayın yüzeyinden kayıt cihazına aktarılan sismik enerjinin çok karmaşık işlemlerinin toplamını sunmaktadır.

Dünyanın her noktasından veri elde etmek mümkün olmadığı için birçok araştırmacı tarafından geliştirilen ampirik bağıntılar yardımı ile yatay ivme değerleri hesaplanabilmektedir. Ancak bu araştırmacıların bağıntılarında genellikle kaya etkisinin göz önünde bulundurulduğu ve deprem parametreleri kullanılarak zemin parametrelerinin ise göz ardı edildiği gözlenmiştir. Bunun en büyük sebeplerinden biri ivmeölçer cihazlarının kaya üzerine kurulmuş olmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşın, hem zemin hem de kaya birimlerde ivmeölçer cihazları olan araştırmacılar kaya etkisinin yanı sıra zemin etkisini içeren bazı parametreleri de ivme azalım ilişkilerinde kullanmışlardır. [1], oluşturduğu ivme azalım ilişkisinde depremin büyüklüğü, periyodu ve uzaklığına ek olarak zemin hakim titreşim periyodunu da kullanmıştır. Literatürdeki diğer ampirik bağıntılarda ise genellikle uzaklık (R) parametresi ile birlikte lokal büyüklük (M_L) [2-8], yüzey dalgası büyüklük (M_S) [9-16] veya moment büyüklük (M_w) parametrelerini [17-23] kullanılarak ivme azalım ilişkileri geliştirilmiştir. Diğer bazı araştırmacılar ise bu deprem parametrelerine

zemin türüne [24-25] veya S dalga hızına (V_S) bağlı olarak değişen bir zemin katsayısı [26-29] ilave ederek ya da V_{S30} (30m derinlik için S dalga hızının ağırlıklı ortalaması) veya buna bağlı bir katsayı kullanarak [30-36] ivme azalım ilişkileri geliştirmişlerdir.

Bilindiği gibi yerel zemin özellikleri yer ivmesini önemli derecede etkilemektedir. Örneğin, yumuşak zemin, çok katlı yapıların rezonansına yol açmakta ve yer yüzeyi salınım periyodunu arttırabilmektedir [37]. Dolayısıyla depreme karşı dayanıklı bir yapının tasarlanması için zemin hâkim titreşim periyodu ve zemin büyütmesi gibi dinamik davranış özelliklerinin nasıl değiştiği önceden belirlenmelidir [38]. Son yıllardaki depremler sonucunda meydana gelen hasarlar ve bu konuda yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, zemin özelliklerinin ve zemin tabakalarındaki oturmaların deprem üzerindeki etkisinin çok önemli olduğunu ortaya koymuştur [39-40]. Bu somut göstergeler ve bilgiler ışığında yapılan çalışmada yeni bir Zemin Etkisi (ZE) bağıntısı geliştirilmiştir. Bu bağıntıda zemin büyütmesi (b), zemin hakim titreşim periyodu (T_0), V_{S30} , (30 m’lik S dalga hızlarının ağırlıklı ortalaması) ve V_{P30} (30 m’lik P dalga hızlarının ağırlıklı ortalaması) gibi zeminin dinamik özelliklerini yansıtan parametreler kullanılmıştır. Buna göre, deprem özelliklerini gösteren parametreler olan depremin büyüklüğü (M), uzaklığı (R) ve periyodu (T_D)’nun yanı sıra zemin etkisini de içerecek şekilde yeni bir ivme azalım ilişkisi geliştirilmiştir. Böylece, hem kaya hem de yumuşak zemin göz önünde bulundurularak geliştirilen bu bağıntı, literatürdeki diğer araştırmacıların bağıntıları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu bağıntı ve diğer araştırmacıların bağıntılarından hesaplanan ivme değerleri ile ölçülen ivme değerleri karşılaştırılmış ve ölçülen ile hesaplanan ivme değerleri arasında en düşük hata, geliştirdiğimiz ve önerilen bağıntıdan elde edilmiştir.

2. Deprem ve Zemin Parametrelerinin İvme-Azalım İlişkilerine Etkisi

Zemine ait dinamik ya da statik parametrelerin (Zemin sıvılaşması, zemin büyütmesi, zemin hakim titreşim periyodu ve yapı periyodu, zeminin ivme değeri, alüvyon kalınlığının etkisi, zeminin taşıma gücü, zeminin V_{S30} değeri, zeminin türü ve bunun gibi) deprem hasarına etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir [41-42]. İvme değeri düşük ancak yüksek periyodlu bir deprem, süreye de bağlı olarak büyük hasarlara

neden olabilmektedir. Ayrıca zemin tabakalarının yapısı, mühendislik yapılarının deprem davranışını etkiler. Deprem dalgaları, depremin olduğu derinlikten yer yüzeyinde bulunan yapının temeline doğru zeminin büyütme etkisiyle iletilmektedir. Bu durum, az ya da çok büyütme etkisiyle depremin hissedilmesine neden olabilmektedir. Zemin büyütmesi, yeryüzüne yakın yumuşak zeminlerin içinden geçen sismik dalgaların genliklerini büyütmektedir. Bu durum, yüzeye yakın bu tür zeminlerin yoğunluk (ρ) ve V_s değerlerinden belirlenen empedansının ($Z=\rho V_s$) düşük olmasından kaynaklanmaktadır [43]. Buna karşın sismik dalgalar yumuşak zemin tabakaları içinde genliklerin büyütülmesine ek olarak aynı zamanda sönmülenebilir dolayısıyla da genlikleri azalabilmektedir [44]. Deprem ivmesi gibi özellikler bu durumdan etkilenmektedir. Deprem büyüklüğünün, faya dik uzaklığın ve zemin türünün aynı olması durumunda ters faylanmanın oluşturduğu kuvvetli yer hareketinin genliği diğer fay türlerine oranla özellikle faya yakın mesafelerde daha büyük olmaktadır [45].

Özellikle anakaya üzerinde yumuşak ve suya doygun birimler olması durumunda, bu tip alanlarda gerekli önlemler alınmazsa depreme gerek kalmaksızın yapılar eğim doğrultusunda kayabilmektedir. Yeraltı su seviyesinin 10-15 m'den derin olduğu yerlerin deprem hasarı üzerinde pek bir etkisi yok iken; 4-10 m arasında olduğu yerlerde deprem şiddetini 0.5 birim ve 0-4 m arasında ise 1 birim arttırmaktadır [46]. Alüvyon ve dolgu ortamların kalınlıkları arttıkça maksimum yer ivmesi ve zemin hakim titreşim periyodu artmaktadır [42]. Zemin hakim titreşim periyodu, bir deprem sırasında zeminin hangi periyotlarla salınacağı konusunda bilgi vermesi açısından önemlidir. Deprem periyodu ve zemin hakim titreşim periyodunun aynı olduğu rezonans durumunda, yatay yer ivmesi değeri en yüksek değerini almaktadır [1]. Bu nedenle, ivme azalım ilişkisinde bu parametrelerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Sismik P ve S dalga hızları doğrudan ortamın fiziksel, mukavemet ve elastik özelliklerine bağlı olduğundan, zemin hakkında önemli bilgiler vermekte dolayısıyla da zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde oldukça yararlı olmaktadır [47-48]. Yine zemin davranışıyla ilgili özellikler (makaslama modülü, sıvılaşma

potansiyeli vb.) sismik S dalga hızından elde edilmektedir [49]. Ayrıca sismik P ve S dalga hızlarının oranı (V_p/V_s), zeminin gözeneklerinin su ($V_p/V_s > 3.5$) ya da hava (V_p/V_s yaklaşık 1.5 civarı) doygunluğu hakkında bilgi vermektedir [50-52]. Ek olarak suya doygun gevşek kum zeminlerde meydana gelebilecek sıvılaşma durumu da sismik hızlardan analiz edilebilmektedir [53-58]. Sonuç olarak zemininin fiziksel ve mekaniksel özelliklerinden sismik hızlar etkilenmekte ve bu nedenle de, ivme azalım ilişkilerinde deprem parametrelerinin yanı sıra zemin etkilerini yansıtan sismik hızların da kullanılmasının daha doğru sonuçlar ortaya koyacağı düşünülmektedir.

3. Değerlendirmeler

Çalışma kapsamında, yeni bir ivme azalım ilişkisi ortaya koymak amacıyla dünyadaki farklı istasyonlardan elde edilen $M_w=5.3-7.1$ aralığındaki büyüklüklerde 152 adet deprem kaydının sonuçları kullanılmıştır. Bu veriler [59] tarafından AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), CESMD (Center for Engineering Strong Motion Data) ve ORFEUS (Observatories & Research Facilities for European Seismology) merkezlerinden oluşturulmuş ve bu çalışmada düzenlenerek Ek-1 de sunulmuştur. Burada web sitelerinden elde edilen farklı magnitüdler [60] tarafından geliştirilen magnitüd dönüşüm ilişkilerinden yararlanılarak moment magnitüdüne dönüştürülmüştür. Ayrıca depremin uzaklığı olarak hiposantr uzaklığı (R_{hipo}) kullanılmıştır. Bağının geliştirilmesi amacıyla deprem parametreleri olan depremin büyüklüğü, uzaklığı ve periyodunun yanı sıra zemin büyütmesi, zemin hakim titreşim periyodu, V_{s30} ve V_{p30} gibi zeminin dinamik özelliklerini yansıtan parametreler de kullanılmıştır (Ek-1). Böylece, zemin etkisine bağlı bir ivme azalım ilişkisi geliştirilmiştir. Gerçek deprem kayıtlarının analizlerinin yanında kuvvetli yer hareketi istasyonunun yer sınıfının belirlenmesi amacıyla Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi [61] (MASW) yöntemi uygulanmış ve derine doğru S dalga hızları AFAD, CESMD ve ORFEUS merkezleri tarafından belirlenmiştir {[1-3]}. V_{s30} değeri olmayan çok az deprem istasyonlarında bu değer USGS (United States Geological Survey) merkezindeki V_{s30} haritalarından belirlenmiştir {[4]}. Bu hız değerleri belirlenirken kaydedilen MASW verisine ilk olarak faz hızı-frekans

dönüşümü uygulanmaktadır. Bu işlem sonucu dalganın dispersiyon eğrisi hesaplanarak görüntülenmektedir. Ölçülen veri ile yeraltının kuramsal modelinin dispersiyon eğrileri birbiri ile çakışana kadar ters çözüm işlemleri yapılmaktadır. Ters çözümden sonra yeraltının derinliklerine göre değişen bir boyutlu S dalga hızı modeli elde edilmektedir (Şekil 1).

MASW çalışmasından derine doğru elde edilen S dalga hızları kullanılarak T_0 aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$T_0 = \frac{4h_1}{V_{S1}} + \frac{4h_2}{V_{S2}} + \frac{4(H-(h_1+h_2))}{V_{S3}} \quad (1a)$$

$$T_0 = \frac{4H}{V_{S30}} \quad H = 30m \quad (1b)$$

Eşitlik 1a' da, H derinliği S dalga hızına bağlı 30 ya da 50m seçilmektedir. Bu seçim ilk 30m içerisinde $V_s > 500$ m/s elde edilir ise $H=30m$, $V_s < 500$ m/s olması durumunda $H=50m$ kullanılmalıdır [42,62]. V_{S30} aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [42].

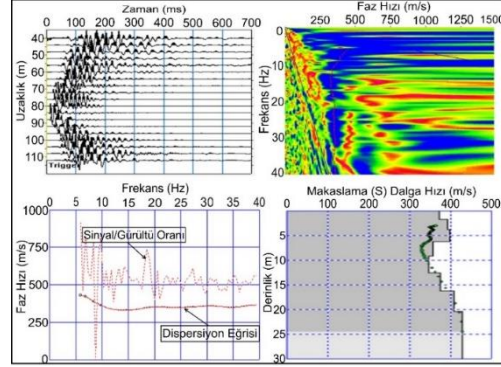
$$V_{S30} = \frac{30}{t_d + \frac{30-d}{V_{Sson}}} \quad (2)$$

Burada V_{Sson} : d derinliği ile 30m arasındaki tabakanın hızıdır, t_d : d derinliğine kadar olan tabakalarda dalganın yayılma zamanıdır. Ayrıca zeminin yoğunluğu, P ve S dalga hızlarının birlikte kullanılması ile hesaplanabilmektedir [63-64].

$$\rho = 0.7(V_p V_s)^{0.08} \quad (3)$$

Yapılan çalışmada P ve S dalga hızlarının, yerine V_{p30} ve V_{s30} kullanılarak 30m derinlik için yoğunluk (ρ_{30}) değeri belirlenmiştir. Ayrıca 30m derinlik için zemin büyütmesi (b) değerleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [65].

$$b = \left(\frac{V_{p30}}{V_{s30}} \frac{3.5}{\rho_{30}} \right)^{0.1} \left(\frac{750}{V_{s30}} \right)^{0.5} \quad (4)$$



Şekil 1. Çok kanallı yüzey dalgalarının analizi (MASW)

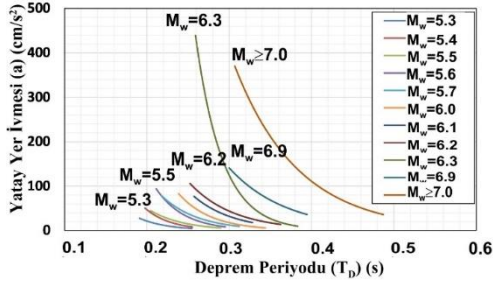
3.1. Deprem ve zemin etkisine bağlı ivme-azalım ilişkisinin geliştirilmesi

Yatay yer ivmesinin, depremin periyoduna, uzaklığına ve büyüklüğüne bağlı olarak etkin bir biçimde değiştiği bilinmektedir. Bu çalışmadaki veriler kullanılarak yatay yer ivmesinin moment büyüklüğüne bağlı olarak deprem periyodu ile değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Buradaki deprem periyodu değerlerini belirlemek için [66]'de verilen abağı [54] matematiksel olarak ifade etmiştir [59].

$$R \leq 40 \text{ km için; } T_D = 0.0681M_w - 0.17 \quad (5)$$

$$R > 40 \text{ km için; } T_D = (0.0008M_w - 0.0031)R + 0.0322M_w - 0.0175 \quad (6)$$

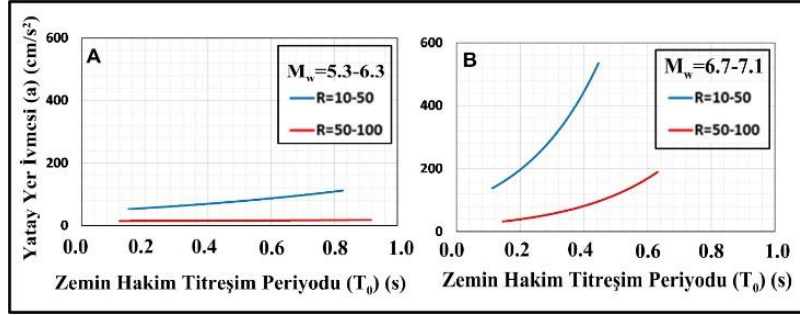
Buna göre depremin büyüklüğü arttıkça deprem periyodu da artmakta yatay yer ivmesi ise buna bağlı olarak üstel olarak azalmaktadır. Kullanılan veri sayılarının kısıtlı olmasından dolayı eğrilerin sınırları değişmektedir. Özellikle 6.3 ve 7.0 moment büyüklüğüne ait veri sayısının fazla olmasından kaynaklı veri sınırları diğerlerine göre farklıdır. Ancak Şekil 2'den anlaşılacağı üzere, moment büyüklüğü sabitlendiğinde yatay yer ivmesi ile deprem periyodu arasında üstel bir ilişki olduğu görülmektedir. Ek olarak Şekil 2'de uzaklık dikkate alınmamaktadır. Ancak bilinmelidir ki uzaklık arttıkça deprem dalgasının periyodu büyür buna karşın ivme değeri azalmaktadır.



Şekil 2. Moment büyüklüğüne bağlı sınıflandırılan verilerin deprem periyodu ile yatay yer ivmesi arasındaki ilişkileri

Zemin hakim titreşim periyodu ile yatay yer ivmesi arasında çalışılan verilerin sunduğu eğilim Şekil 3'de görülmektedir. Şekil 3A ve 3B'de, sırasıyla moment büyüklükleri 5.3-6.3 ve 6.7-

7.1 olarak seçilmiş ve uzaklığa bağlı (10-50 ve 50-100km) olarak sınıflandırılmıştır. Buna göre zeminin hakim titreşim periyodu arttıkça, ivme değeri genel itibariyle artış göstermektedir. Depremin büyüklüğü 5.3-6.3 arasında iken 50km uzaklığa kadar zemin hakim titreşim periyodu arttıkça çok az ivme artışı görülürken, 50km den daha büyük uzaklıklarda bu artış görülmemektedir. Buna karşılık Şekil 3B'de depremin büyüklüğünün 6.7-7.1 arasında olması durumunda ve 50km den daha az olan uzaklıklarda zemin hakim titreşim periyodunun artışı ile ivme değerinin çok arttığı ve 50km den daha fazla olan uzaklıklarda elde edilen verilerde bu artışın sürdüğü fakat daha az olduğu görülmektedir.



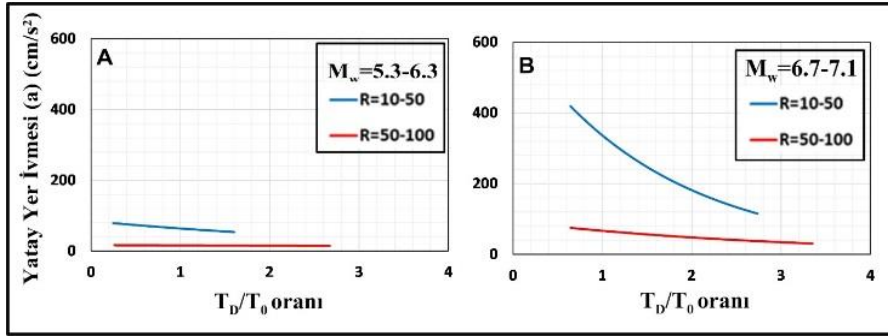
Şekil 3. Depremin büyüklüğü ve uzaklığına bağlı sınıflandırılmış verilerin yatay yer ivmesi ile zemin hakim titreşim periyodu (T_0) arasındaki ilişkileri

Şekil 3'e benzer olarak deprem dalgasının periyodu ile zemin hakim titreşim periyodunun oranı (T_D/T_0) ve yatay yer ivmesi arasında Moment büyüklüğü ve uzaklığa bağlı sınıflandırılmış verilerin ilişkileri Şekil 4'de sunulmuştur. Buna göre T_D/T_0 oranı arttıkça, ivme değerleri genel itibariyle logaritmik olarak azalmaktadır. Bu durum, Şekil 4B'de moment büyüklüğünün yüksek olduğu ve 50km den daha az uzaklıklarda olan depremlerden elde edilen verilerde net olarak görülmektedir.

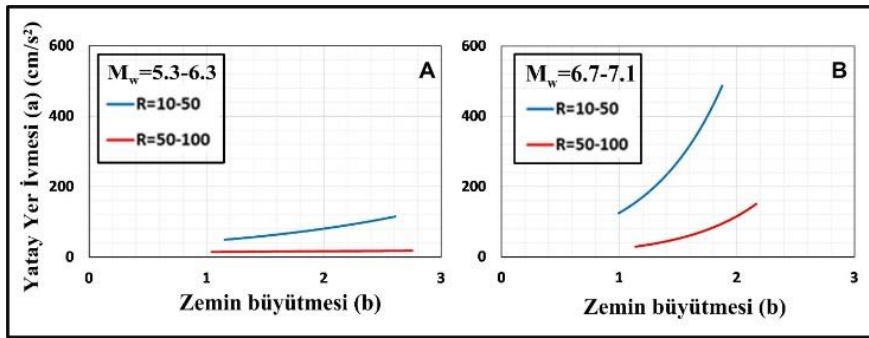
Şekil 5'te yatay yer ivmesi ile zemin büyütmesi arasında depremin büyüklüğü ve uzaklığına bağlı sınıflandırılmış verilerin ilişkileri gösterilmiştir. Şekil 5 genel olarak incelendiğinde, zemin büyütme değerinin artışı ile yer ivmesinin arttığı görülmektedir. Bu artış oranı depremin moment büyüklüğünün yüksek ve uzaklığın yakın olduğu yerlerde net olarak görülmektedir.

Şekil 6'da ise diğer şekillere benzer olarak yatay yer ivmesi ve zeminin V_{s30} değeri ile değişimi sunulmuştur. Bilindiği üzere V_{s30} zeminin sıklığı ya da katılığını yansıtan bir parametredir. Dolayısıyla, V_{s30} değeri arttıkça ivme değerinin azalması beklenen bir sonuçtur. Bu durum deprem büyüklüğünün yüksek ve uzaklığın yakın olduğu depremlerde daha net görülmektedir.

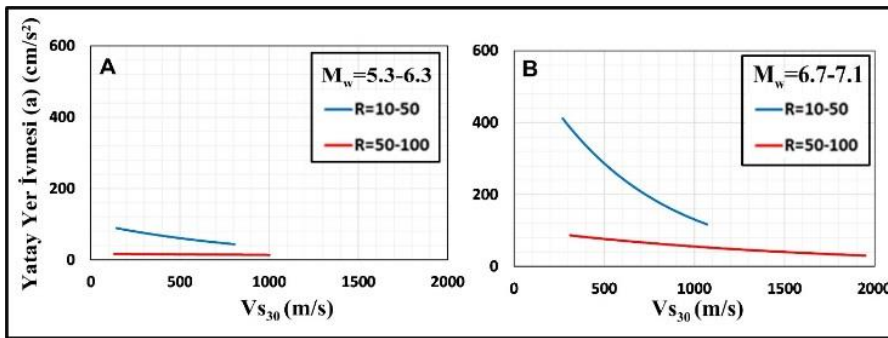
Şekil 7'de ise yatay yer ivmesi ile ivmeölçer cihazların kurulduğu ortamın 30m derinliğine kadar olan yoğunlukların ortalama değerleri arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, zeminin yoğunluğu genel itibariyle 1.6-2.5 gr/cm^3 aralığında değişmektedir. Genel olarak ortamın yoğunluğu arttıkça yatay yer ivme değeri azalmaktadır. Bu durum depremin büyüklüğünün yüksek ve uzaklığının yakın olduğu yerlerde daha net olarak görülmektedir.



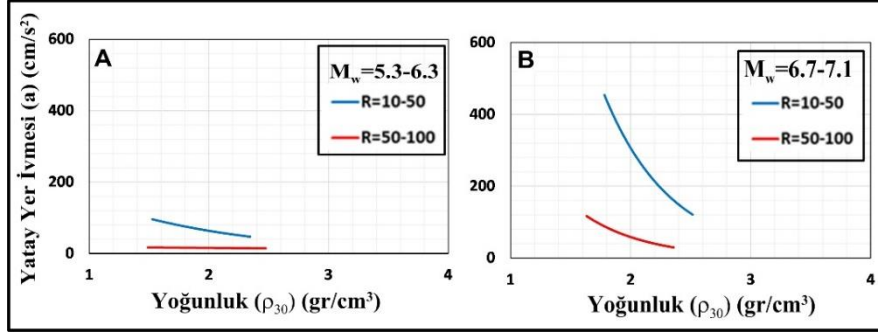
Şekil 4. Depremin büyüklüğü ve uzaklığına bağlı sınıflandırılmış verilerin yatay yer ivmesi ile T_D/T₀ oranı arasındaki ilişkiler



Şekil 5. Depremin büyüklüğü ve uzaklığına bağlı sınıflandırılmış verilerin yatay yer ivmesi ile zemin büyütmesi arasındaki ilişkiler



Şekil 6. Depremin büyüklüğüne ve uzaklığına bağlı sınıflandırılmış verilerin yatay yer ivmesi ile Vs₃₀ arasındaki ilişki



Şekil 7. Deprem büyüklüğüne ve uzaklığına bağlı sınıflandırılmış verilerin yatay yer ivmesi ile yoğunluk (ρ_{30}) arasındaki ilişki

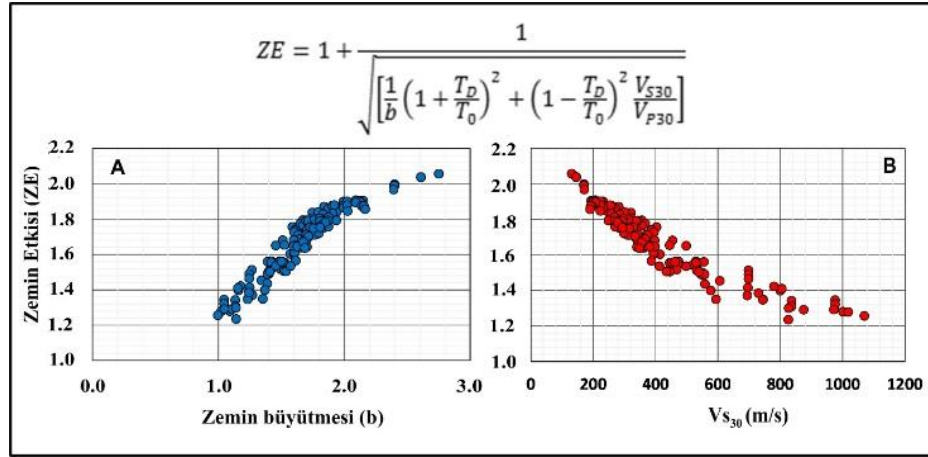
Literatürde, hesaplanan ivme değerleri ile ölçülen ivme değerleri arasındaki hata oranlarının yüksek çıkmasındaki nedenlerden birinin deprem büyüklük aralığının geniş olması ve diğer bir nedenin de zemin etkisinin bağıntılarda kullanılmaması olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada, deprem parametrelerinin yanı sıra deprem kaydının alındığı yere ait parametrelerin ivme değerine etkisi Şekil 3-7 arasında gösterilmiştir. Zeminden elde edilen bu parametrelerin ivme değeri üzerindeki etkilerinden dolayı zemin etkisi (ZE) parametresi geliştirilmiştir. Zemin etki parametresi; zemin büyütmesi, V_{S30} , V_{P30} , zemin hakim titreşim periyodu, V_{S30}/V_{P30} oranı,

T_D/T_0 oranını kapsamakta ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$ZE = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1}{b} \left(1 + \frac{T_D}{T_0}\right)^2 + \left(1 - \frac{T_D}{T_0}\right)^2 \frac{V_{S30}}{V_{P30}}\right]}} \quad (7)$$

Burada T_D ; deprem dalgasının periyodunu ifade etmektedir.

Belirlenen zemin etkisi parametresinin zemin büyütmesi ve V_{S30} ile değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre, zemin büyütmesinin artışı ile ZE logaritmik olarak artarken, V_{S30} artışı ile ZE logaritmik olarak azalmaktadır.



Şekil 8. Zemin Etkisi (ZE) ile A) Zemin Büyütmesi (b) ve B) V_{S30} arasındaki ilişki

Yapılan çalışmada, ZE parametresi özellikleri bir arada değerlendirilerek SPSS-20 tanımlandıktan sonra, deprem ve zemin istatistik veri analiz programı [67] ile zemin

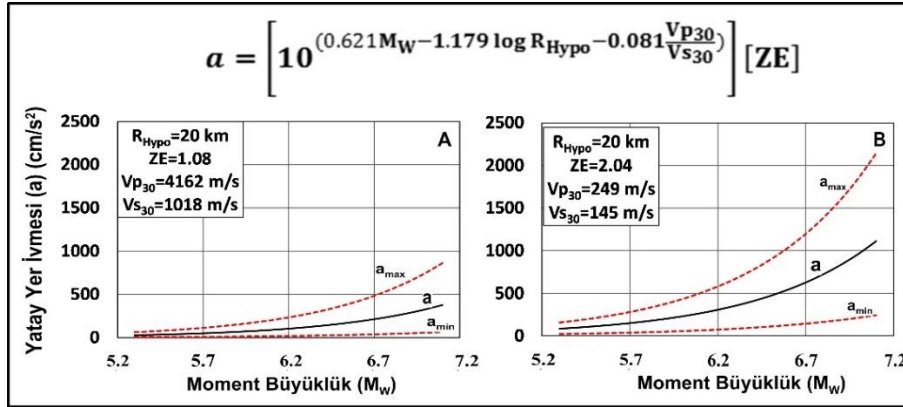
etkisine bağlı yeni bir ivme azalım bağıntısı geliştirilmiştir. Bu ilişkide kullanılan deprem büyüklüklerinin hepsi [60] tarafından geliştirilen magnitüd dönüşüm ilişkileri ile moment büyüklüğüne dönüştürülerek kullanılmıştır.

$$a = \left[10^{(A_1 M_W + A_2 \log R_{\text{Hypo}} + A_3 \frac{V_{P30}}{V_{S30}})} \right] [ZE] \quad (8)$$

Bağıntıdaki, M_W : depremin moment büyüklüğünü, R_{Hypo} : depremin hiposantr (odak-istasyon) uzaklığını göstermektedir. Azalım bağıntısı geliştirilirken belirlenen katsayılara ait en iyi sonuçlar % 95 güven aralığında alt ve üst sınır değerleri ve standart sapma miktarları ile birlikte Tablo 1'de verilmiştir. Yatay yer ivmesinin sabit uzaklık, V_{S30} ve V_{P30} değerleri için Moment büyüklük ile arasındaki ilişki yumuşak zemin ($ZE=2.04$) ve kaya ortam ($ZE=1.08$) için ayrı ayrı Şekil 9'da gösterilmiştir.

Tablo 1. SPSS paket programında regresyon analizi sonucu bu çalışmada belirlenen Eşitlik 8'e ait katsayı değerleri

Parametre Tahmini				
Parametre	Belirlenen Katsayı	Standart Sapma	95% Güven Aralığı	
			Alt Sınır	Üst Sınır
A_1	0.621	0.023	0.575	0.632
A_2	-1.179	0.100	-1.376	-1.053
A_3	-0.081	0.022	-0.125	-0.054

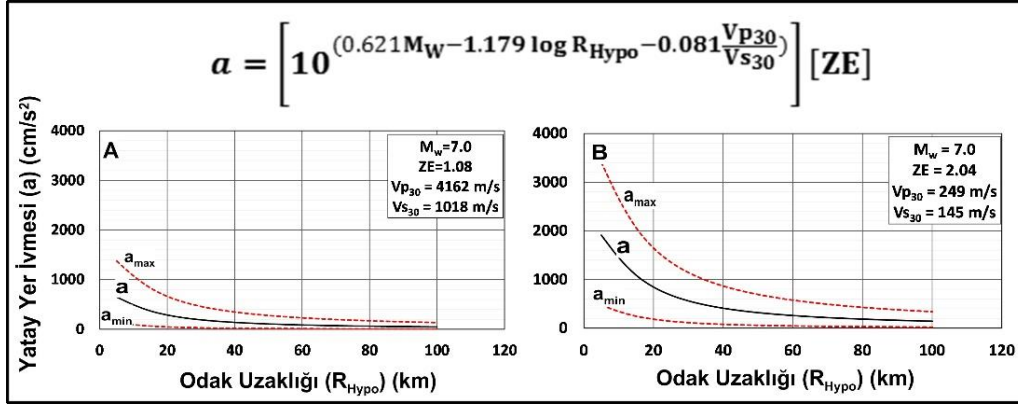


Şekil 9. Moment büyüklük ile Yatay Yer İvmesi arasındaki ilişki A) Kaya ortam için B) Zayıf zemin ortam için

Bu şekiller incelendiğinde, 5.3-7.1 aralığındaki depremlerde depremin büyüklüğü arttıkça, kaya ortamda yatay yer ivmesi 10-500 cm/s^2 aralığında, yumuşak zemin için ise 100-1100 cm/s^2 değerine kadar üstel olarak artış göstermektedir. Sonuç olarak depremin büyüklüğü arttıkça ivme değerinin de yumuşak zemin ya da kaya ortamlar için arttığı

görülmektedir. Bu artış, yumuşak zeminlerde daha fazladır.

Eşitlik 8 kullanılarak ivme değerinin uzaklığa bağlı değişimini göstermek için Moment büyüklük, V_{S30} ve V_{P30} değerleri sabit alınarak kaya ortam ($ZE=1.08$) ve yumuşak zemin ($ZE=2.04$) için Şekil 10 hazırlanmıştır.



Şekil 10. Odak Uzaklığı ile Yatay Yer İvmesi arasındaki ilişki A) Kaya ortam için B) Zayıf zemin ortam için

Bu şekiller incelendiğinde, 100km'ye kadar olan depremlerde depremin uzaklığı arttıkça, kaya ortamda yer ivmesi yaklaşık 50-800 cm/s² aralığında, yumuşak zeminde ise 100-1900 cm/s² değerleri arasında üstel olarak azalmaktadır. Yüksek değerler depremin çok yakınında olan yerlerde elde edilirken, depremden uzaklaştıkça ivme değerinin azaldığı görülmektedir. Depreme çok yakın olan ortamlar çok kötü zeminlere sahip ise ivme değeri daha da artmaktadır. Dolayısı ile depremin ivmesi zeminin özelliklerine bağlı artış sunmaktadır. Bu durum göstermektedir ki yapılaşma hesaplarında depremin ivmesinin tablolardan sabit bir değer olarak alınması hem ekonomik kayıplara hem de can kaybına yol açacaktır.

3.2 İvme-azalım ilişkileri ile karşılaştırma

Bazı araştırmacılara ait literatürdeki ivme-azalım ilişkileri Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu araştırmacılardan [1] dışındakiler hesaplamalarda genellikle sadece büyüklük ve uzaklık parametrelerini kullanmışlardır. [1]'de ise deprem ve hakim titreşim periyodları da kullanılarak bir ivme azalım ilişkisi geliştirilmiştir.

Söz konusu araştırmacıların Tablo 2'de verilen araştırmacılara ait ivme azalım ilişkileri ve bu çalışmada geliştirilen zemin etkisine bağlı ivme azalım bağıntısından hesaplanan ivme değerleri, ölçülen ivme değerleri (ivme değerleri 3.8-806 cm/s² aralığında) ile karşılaştırılarak RMSE hata

oranlarına bağlı olarak Şekil 11'de gösterilmiştir. Buna göre ölçülen ve hesaplanan ivme değerleri arasındaki farkın, [1-2, 68-69] tarafından verilen bağıntılarda diğer araştırmacıların bağıntılarına göre, daha az olduğu ve bu çalışmadan elde edilen hatanın ise çok daha az olduğu belirlenmiştir. Belirlenen RMSE değerleri diğer araştırmacılar da 81-198 cm/s² aralığında değişirken, çalışmamızda RMSE 78.1 cm/s² olarak belirlenmiştir.

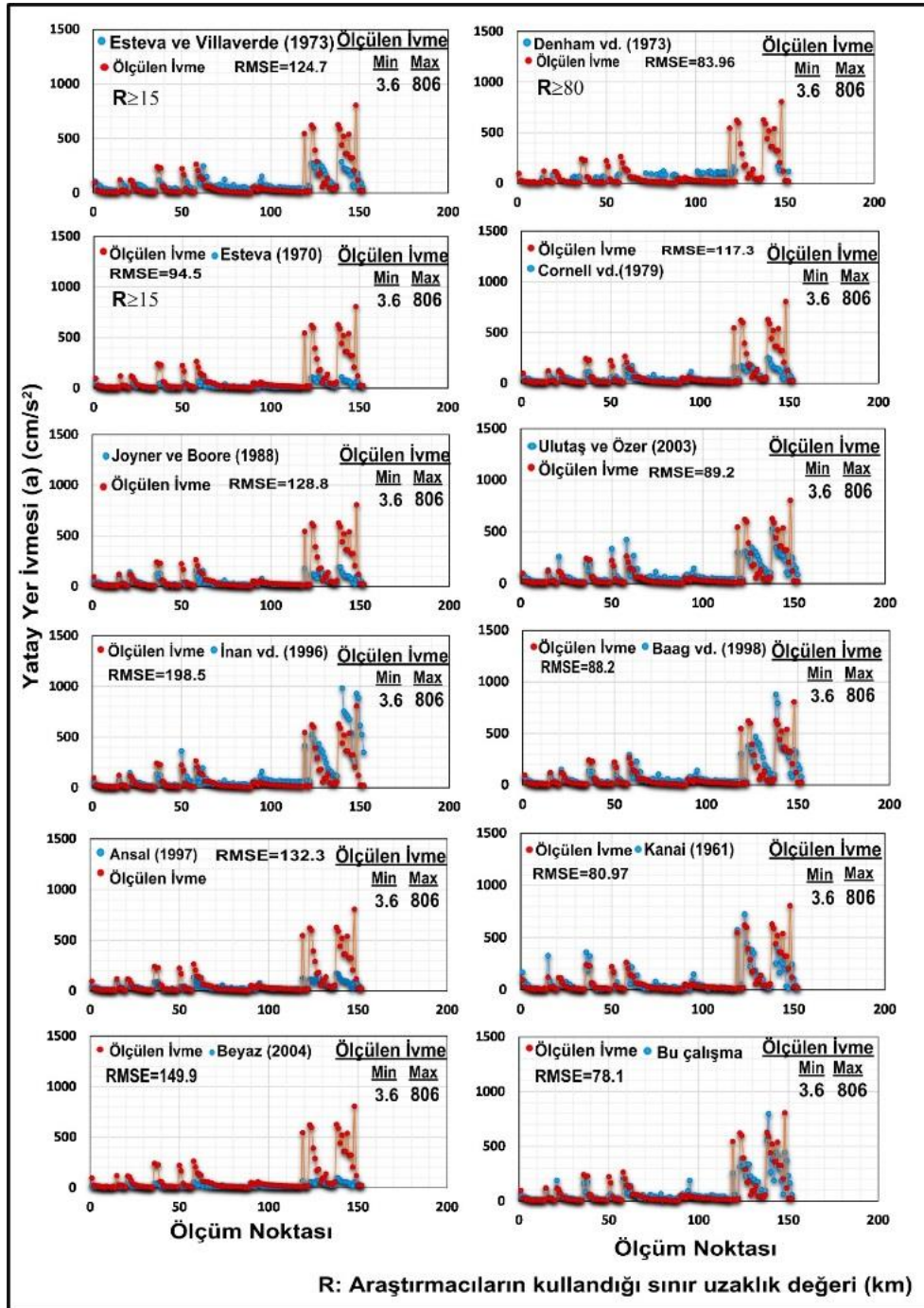
Geliştirilen ivme-azalım bağıntısının ve yukarıda verilen literatürdeki bazı ivme azalım ilişkileri arasındaki tutarlılığı ölçmek amacıyla Dünya'da gerçekleşmiş önemli ivme değerlerine sahip, çeşitli ivmeölçer istasyonları tarafından kaydedilmiş depremlerin kuvvetli yer hareketi (ivme) kayıtları ve kayıtçı istasyonları kullanılmıştır. Şekil 12'de 7.0 büyüklüğündeki ve 10km derinliğindeki (h) bir deprem için literatürdeki ve bu çalışmadan elde edilen ilişkiler karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen bağıntı kullanılarak hem yumuşak zemin (ZE=2.04) hem de kaya ortam (ZE=1.08) için ayrı ayrı ivme-azalım ilişki eğrileri gösterilmiştir. Zemin etkisi değerleri bu çalışmadaki veriler kullanılarak en yumuşak zemin ve en sağlam kaya verilerinden elde edilmiş ve diğer ivme azalım ilişkileri ile karşılaştırmak için bu değerlerin kullanılması uygun görülmüştür. Buna göre, genel olarak, kaya ortamlar için literatürde geliştirilen bağıntılardan hesaplanan ivme değerleri genel de daha dar bir aralıkta değişirken zemin etkisini

dikkate alan hesaplamalarda ivme değerleri daha geniş bir aralıkta değişmiş ve daha yüksek ivme değerleri elde edilmiştir. Deprem odağından uzaklaştıkça tüm ilişkilerin birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu yakın değerler genelde 40km den sonra daha net görülmektedir. Buna karşın depremin uzaklığı

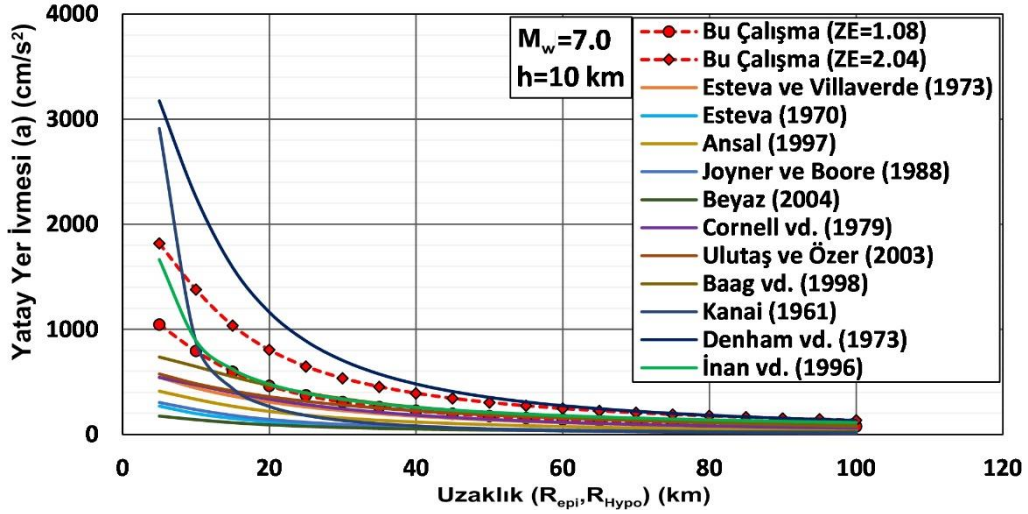
ilk 40km olarak dikkate alındığında araştırmacıların eşitliklerinden farklı ivme değerleri hesaplanmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen eşitliğin eğrisi kaya ortamlar için diğer eşitlikler ile uyumlu iken, özellikle ilk 40km de yumuşak zeminlerde daha büyük ivme değerleri elde edilmektedir.

Tablo 2. Literatürdeki bazı araştırmacılara ait ivme-azalım ilişkileri

Kaynaklar	Bağıntılar
[1]	$a = \frac{10^{(0.61M - 1.73 \log R_{epi} + 0.13)}}{T_D} [A]$ $A = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1 + \alpha_0}{1 - \alpha_0} \left\{ \left(1 - \left(\frac{T_D}{T_0} \right)^2 \right\} \right]^2 + \left\{ \frac{0.3}{\sqrt{T_0}} \left(\frac{T_D}{T_0} \right) \right\}^2}}$
[70]	$a = 1230e^{0.8M} (R + 25)^{-2}$
[71]	$a = 5600e^{0.8M} (R + 40)^{-2}$
[2]	$\log a = 2.91 + 0.32M_L - 1.43 \log R$
[5]	$\ln a = 6.74 + 0.859M_L - 1.8 \ln(R + 25)$
[72]	$\log a = 0.43 + 0.23(M - 6) - \log R - 0.0027R$
[73]	$\log a = 0.65M_s - 0.9 \log R - 0.44$
[74]	$\log a = 0.329M_w - 0.00327R - 0.792 \log R + 1.177$
[69]	$\log a = 0.4 + 1.2M - 0.76 \ln R - 0.0094R$
[68]	$\log a = 0.505 + 0.538 * M - \log(R + 0.00810^{0.5M}) - 0.002R$
[75]	$\log a = 2.08 - 1.001M_w^2 - 1.001(R + 1)$



Şekil 11. Ölçülen ve hesaplanan Yatay Yer İvmesi değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 12. Literatürden ve bu çalışmadan elde edilen bağıntılara göre hesaplanan yatay yer ivmesinin uzaklığa bağlı değişimi

4. Sonuçlar

Dünyanın birçok noktasına kurulmuş olan ivme istasyonlarına ait deprem kayıtları ve bu istasyonların kurulduğu zeminlere ait dinamik parametrelerden yararlanarak bir ivme azalım ilişkisi geliştirilmiştir. Zemin etkisine bağlı olarak geliştirilen bu bağıntı literatürdeki ivme azalım ilişkileri ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen bağıntı hem zemin parametrelerine hem de deprem parametrelerine bağlı olmasından dolayı daha az hata ile ivme sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, literatürdeki ivme bağıntılarının hatalı sonuçlar elde etmesinin diğer bir nedeninin, depremlerin meydana geldiği bölgelerdeki faylanma tipleri ve yerin kabuk yapısının olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmanın diğer çalışmalardan elde edilen ivme azalım ilişkilerinden farkı, hem kaya hem de farklı dayanımlara sahip zeminlerdeki kayıtları ve o zeminlere ait zeminin dinamik özelliklerini dikkate almasıdır. Ortaya konulan bağıntıda, zeminin sıklığını gösteren S dalga hızının 30 m derinlik için ağırlıklı ortalaması, P dalga hızının 30 m derinlik için ağırlıklı ortalaması, zemin büyütmesi, deprem dalgasının periyodu ve zemin hakim titreşim periyodu kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen eşitlik sınırları 5.3-7.1 moment büyüklük, 0-100 km uzaklık (R_{Hypo}) ve 4-800 cm/s^2 ivme değerleri arasındaki verileri kapsamaktadır. Dolayısı ile

bu verilerin dışında veriler kullanıldığında eşitliğin katsayılarının değişebileceği dikkate alınmalıdır.

Mühendislik yapılarının hesaplamalarında kullanılan ivme değerlerinin yerin türü ve özelliklerine bağlı değişkenlik göstermesinden dolayı "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği"nde belirtilen tablolardan sabit alınması hatalıdır. Bu yüzden zemin etkisini de dikkate alan ivme azalım ilişkilerinin kullanılması önerilmektedir.

Çalışmada geliştirilen bağıntı ve literatürdeki bağıntılar tarafından hesaplanan bazı yüksek ivme değerleri, depremin çok yakınındaki ivme istasyon kayıtlarından elde edilmektedir. Bu nedenle ivme azalım bağıntıları geliştirilirken, depreme çok yakın istasyon verilerinin kullanımına dikkat edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan verilerin birçoğu Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi'nden (AFAD) sağlanmıştır. Yazarlar; AFAD deprem dairesi yönetimine ve Yük. Jeofizik Müh. Erkan Ateş'e teşekkür ederler. Ayrıca Editör ve hakemlere makalemize koydukları katkılardan ötürü teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Kanai, K. 1961. An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions, *Bulletin of Earthquake Research Institute*, Cilt. 39, s. 85-95.
- [2] Denham, D., Small, G.R., Everingham, I.B. 1973. Some strong-motion results from Papua New Guinea 1967-1972, In *Proceedings of Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Cilt. 2, s. 2324-2327.
- [3] Ambraseys, N. 1975. Trends in engineering seismology in Europe, In *Proceedings of Fifth European Conference on Earthquake Engineering*, Cilt. 3, s. 39-52.
- [4] Blume, A. 1977. The SAM procedure for site-acceleration-magnitude relationships, In *Proceedings of Sixth World Conference on Earthquake Engineering*, Cilt. 1, s. 416-422.
- [5] Cornell, C.A., Banon, H., Shakal, A.F. 1979. Seismic motion and response prediction alternatives, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Cilt. 7(4), s. 295-315.
- [6] Gaull, B.A. 1988. Attenuation of strong ground motion in space and time in southwest western Australia, In *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Cilt. 2, s. 361-366.
- [7] Marin, S., Avouac, J.P., Nicolas, M., Schlupp, A. 2004. A probabilistic approach to seismic hazard in metropolitan France, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Cilt. 94(6), s. 2137-2163.
- [8] Zuccolo, E., Bozzoni, F., Lai, C.G. 2017. Regional low-magnitude GMPE to estimate spectral accelerations for earthquake early warning applications in southern Italy, *Seismological Research Letters*, Cilt. 88(1), s. 61-71.
- [9] Idriss, I.M. 1978. Characteristics of earthquake ground motions, In *Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Speciality Conference: Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Cilt. 3, s. 1151-1265.
- [10] Algermissen, T., Hansen, S.L., Thenhaus, P.C. 1988. Seismic hazard evaluation for El Salvador. Report for the US Agency for International Development, Technical report no: 2-17, 21.
- [11] Castillo, W.T., Lopez, P.S., Dahle, A., Bungum, H. 1992. Digitization of strong motion data and estimation of PGA attenuation. Technical report no: 2-4, NORSAR, Kjeller, Norway, Reduction of Natural Disasters in central America Earthquake Preparedness and Hazard Mitigation Seismic Zonation and Earthquake Hazard Assessment.
- [12] Wang, B.Q., Wu, F.T., Bian, Y.J. 1999. Attenuation characteristics of peak acceleration in north China and comparison with those in the eastern part of North America, *Acta Seismologica Sinica*, Cilt. 12(1), s. 26-34.
- [13] Aydan, Ö. 2001. İstanbul Boğazi denizaltı geçişi için tüp tünel ile kalkan tünelin uygunluğunun karşılaştırılması, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Cilt. 25(1), s. 1-17.
- [14] Sanchez, A.R., Jara, J.M. 2003. Estimación del peligro sísmico de Morelia, *Ciencia Nicolaita*, Cilt. 29, s. 63-76.
- [15] Shi, S., Shen, J. 2003. A study on attenuation relations of strong earth movements in Shanghai and its adjacent area, *Earthquake Research in China, Chinese*, Cilt. 19, s. 315-323.
- [16] Cui, J.W., Zhang, J.G., Gao, D., Duan, J.X., Wang, T. 2012. The ground motion attenuation relation for the mountainous area in Sichuan and Yunnan. In *Proceedings of Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering*, 149, Lisbon, Portugal.
- [17] Youngs, R., Day, S.M., Stevens, J.L. 1988. Near-eld ground motions on rock for large subduction earthquakes. In *Proceedings of Earthquake Engineering & Soil Dynamics II, Geotechnical Division, ASCE*, 445-462, Park City, Utah.
- [18] Lungu, D., Demetriu, S., Radu, C., Coman, O. 1994. Uniform hazard response spectra for Vrancea earthquakes in Romania. In *Proceedings of Tenth European Conference on Earthquake Engineering*, 1, 365-370, Vienna, Austria.
- [19] Iglesias, A., Singh, S.K., Pacheco, J.F., Ordaz, M. 2002. A source and wave propagation study of the Copalillo, Mexico, earthquake of 21 July 2000 ($M_w=5.9$): Implications for seismic hazard in Mexico City from inslab earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Cilt. 92(3), s. 1060-1071.
- [20] Popescu, E., Cioan, C.O., Radulian, M., Placinta, A.O., Moldovan, I. A. 2007. Attenuation relations for the seismic ground motion induced by Vrancea intermediate-depth earthquakes. In *International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation*, 4-6 October 2007, Bucharest, Romania.
- [21] García-Soto, A.D., Jaimes, M.A. 2017. Ground-motion prediction model for vertical response spectra from Mexican interplate earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Cilt. 107(2), s. 887-900.
- [22] Kononov, A.V., Manaychev, K.A., Stepanov, A.A., Gavrilov, A.V. 2019. Regional ground motion prediction equation for Sakhalin island, *Seismic Instruments*, Cilt. 55(1), s. 70-77.
- [23] Kumar, P., Chamoli, B.P., Kumar, A., Gairola, A. 2019. Attenuation relationship for peak horizontal acceleration of strong ground motion of Uttarakhand region of central Himalayas, *Journal of Earthquake Engineering*, Cilt. 23, 1634161.
- [24] Dahle, A., Climent, A., Taylor, W., Bungum, H., Santos, P., Ciudad Real, M., Linholm, C., Strauch, W., Segura, F. 1995. New spectral strong motion attenuation models for Central America, In *Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation*, Cilt. 2, s. 1005-1012.
- [25] Iervolino, I., Giorgio, M., Galasso, C., Manfredi, G. 2010. Conditional hazard maps for secondary intensity measures, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Cilt. 100(6), s. 3312-3319.
- [26] Kanai, K. 1966. Improved empirical formula for characteristics of stray [sic] earthquake motions. In *Proceedings of the Japan Earthquake Engineering Symposium*, 1-4, Tokyo-Japan.
- [27] Ambraseys, N., Simpson, K.A., Bommer, J.J. 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Cilt. 25(4), s. 371-400.
- [28] Field, E.H. 2000. A modified ground-motion attenuation relationship for southern California that accounts for detailed site classification and a basin-

- depth effect, Bulletin of the Seismological Society of America, Cilt. 90(6B), s. S209-S221.
- [29] Gençoğlu A, Sayıl N. 2019. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) Orta Kesim İçin Yeni Bir Kuvvetli Yer Hareketi Azalım İlişkisi, Turkish Journal of Earthquake Research, Cilt. 1(1), s. 1-14.
- [30] Boore, D.M., Joyner, W.B., Fumal, T.E. 1994. Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: An interim report. Geological Survey, Part 2, Open-File Report 94-127.
- [31] Chapman, M.C. 1999. On the use of elastic input energy for seismic hazard analysis, Earthquake Spectra, Cilt. 15(4), s. 607-635.
- [32] Zare, M., Ghafoory-Ashtiani, M., Bard, P.Y. 1999. Attenuation law for the strong-motions in Iran, In Proceedings of the Third International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Cilt. 1, s. 345-354.
- [33] Ambraseys, N., Douglas, J. 2003. Near field horizontal and vertical earthquake ground motions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Cilt. 23(1), s. 1-18.
- [34] Cauzzi, C., Faccioli, E. 2008. Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records, Journal of Seismology, Cilt. 12(4), s. 453-475, 2008.
- [35] Shoushtari, A.V., Adnan, A.Z., Zare, M. 2018. Ground motion prediction equations for distant subduction interface earthquakes based on empirical data in the Malay Peninsula and Japan, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Cilt. 109, s. 339-353.
- [36] Wen, R., Xu, P., Wang, H., Ren, Y. 2018. Single-station standard deviation using strong-motion data from Sichuan region, China, Bulletin of the Seismological Society of America, Cilt. 108(4), s. 2237-2247.
- [37] Seed, R.B., Dickenson, S.E., Reimer, M.F., Bray, J.D., Sitar, N., Mitchell, J.K., Idriss, I.M., Kayen, R.E., Kropp, A., Harder, L.F., Power, M.S. 1990. Preliminary report on the principal geotechnical aspect of the october 17, 1989 Loma prieta earthquake, Report UCB/EERC 90/05, Earthquake Engineering research Center, University of California, Berkeley, 137.
- [38] Ansal, A.M. 1994. Effect of geotechnical factors and behavior of soil layers during earthquakes. State of-the-Art Lecture, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema Publishers, 151-157, 28 August-2 September 1994, Vienna Austria.
- [39] Ansal, A.M., Lav, A.M. 1995. Geotechnical factors in 1992 Erzincan earthquake, 5 th Conference on Seismic Zonation, Nice, Cilt. 1, s. 667-674.
- [40] Ansal, A.M., Siyahi, B.G. 1995. Effects of coupling between source and site characteristics during earthquakes, European Seismic Design Practice, s. 83-89.
- [41] Uyanık, O., Türker, E., İsmailov, T. 2006. Sığ sismik mikro-bölgeleme ve Burdur/Türkiye örneği, Ekolojiya ve Su Teserrüfatı, Elmi-Texniki ve istehsalat Jurnalı, Su Teserrüfatı ve Mühendis Kommunikasiya Sistemleri Fakültesi, Azərbaycan, Cilt. 1, s. 9-15.
- [42] Uyanık, O. 2015. Deprem Ağır Hasar Alanlarının Önceden Belirlenmesi ve Şehir Planlaması için Makro ve Mikro Bölgelelendirmelerin Önemi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt. 19(2), s. 24-38.
- [43] Beliceli, A. 2006. Eskişehir Yerleşim Yeri Zeminin Büyütme Etkisinin Makaslama Dalga Hızına Bağlı Olarak Belirlenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 132s, Balıkesir.
- [44] Kramer, S.L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, ISBN 0-13-374943-6.
- [45] Arıoğlu, E., Arıoğlu, B., Girgin, C. 2001. Doğu Marmara Depreminin Yer İvmesi Değerleri Açısından Değerlendirilmesi, Beton Prefabrikasyon Dergisi, Cilt. 57-58, s. 5-15.
- [46] Bowles, J.E. 1997. Foundation Analysis and Design, 5th edition, McGraw-Hill Companies, s. 1207.
- [47] Keçeli, A. 1990. Sismik yöntemlerle müsaade edilebilir dinamik zemin taşıma kapasitesi ve oturmasının saptanması, Jeofizik, Cilt. 4(2), s. 83-92.
- [48] Keçeli, A. 2000. Sismik yöntemle kabul edilebilir veya güvenli taşıma kapasitesi saptanması, Jeofizik, Cilt. 14(1-2), s. 61-72.
- [49] Stokoe, K.H., Darendeli, M.B., Andrus, R.D., Brown, L.T. 1999. Dynamic soil properties: laboratory, field and correlation studies, Proceeding of the 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Cilt. 3, s. 811- 845.
- [50] Uyanık, O. 2010. Compressional and shear-wave velocity measurements in unconsolidated the top-soil and comparison of the results, International Journal of the Physical Sciences, Cilt. 5(7), s. 1034-1039.
- [51] Uyanık, O. 2011. The porosity of saturated shallow sediments from seismic compressional and shear wave velocities, Journal of Applied Geophysics, Cilt. 73(1), s. 16-24.
- [52] Uyanık, O. 2019. Estimation of the porosity of clay soils using seismic P and S wave velocities, Journal of Applied Geophysics, Cilt. 170, 103832.
- [53] Andrus, R.D., Stokoe, K.H. 2000. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, Cilt. 126(11), s. 1015-1025.
- [54] Uyanık, O. 2002. Kayma dalga hızına bağlı potansiyel sıvılaşma analiz yöntemi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 190s, İzmir.
- [55] Uyanık, O. 2006. Sıvılaşır yada sıvılaşmaz zeminlerin yinelemeli gerilme oranına bir seçenek, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt. 8(2), s. 79-91.
- [56] Uyanık, O. 2020. Soil liquefaction analysis based on soil and earthquake parameters, Journal of Applied Geophysics, Cilt. 176, 104004.
- [57] Uyanık, O., Taktak, A.G. 2009. Kayma dalga hızı ve etkin titreşim periyodundan sıvılaşma çözümlemesi için yeni bir yöntem, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt. 13(1), s. 74-81.
- [58] Uyanık, O., Ekinci, B., Uyanık, N.A. 2013. Liquefaction analysis from seismic velocities and determination of lagoon limits Kumluca/Antalya example, Journal of Applied Geophysics, Cilt. 95, s. 90-103.
- [59] Çoşkun, O. 2020. Deprem Ve Zemin Parametrelerinden En Büyük Yatay Yer İvmesinin Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Isparta.

- [60] Heaton, T.H., Tajima, F., Mori, A.W. 1986. Estimating ground motions using recorded accelerograms, Survey in Geophysics, Cilt. 8, s. 25-83.
- [61] Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, Geophysics, Cilt. 64 (3), s. 691-700.
- [62] Ateş, E., Uyanık, O. 2019. Jeofizik yöntemler ile yer ve yapı etkileşimi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt. 23, s. 46-60.
- [63] Uyanık, O., Çatlıoğlu, B. 2010. Determination of density from seismic velocities, The 19th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey, 23-26 November 2010, Ankara, Turkey.
- [64] Uyanık, O., Çatlıoğlu, B. 2015. Determination of density from seismic velocities. Jeofizik, Cilt. 17, s. 3-15.
- [65] Yeşil, Y. 2012. Zemin Büyütmesinin Sismik Hızlardan Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Isparta.
- [66] Seed, H.B., Idriss, I.M., Kiefer, F.W. 1969. Characteristics of rock motion during earthquakes. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Cilt. 95 (SM5), s. 1199-1218.
- [67] IBM Corp. Released, 2011. IBM SPSS Statistics for Windows. Version 20.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- [68] Ulutas, E., Ozer, M.F. 2010. Empirical attenuation relationship of peak ground acceleration for Eastern Marmara region in Turkey, Arabian Journal of Science and Engineering, Cilt. 35, s. 187-203.
- [69] Baag, C.E., Chang, S.J., Jo, N.D., Shin, J.S. 1998. Evaluation of seismic hazard in the southern part of Korea, In Proceedings of the Second International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Region of Moderate Seismicity, s. 31-50.
- [70] Esteva, L. 1970. Seismic risk and seismic design. In R.J. Hansen, editor, Seismic Design for Nuclear Power Plants, The M.I.T. Press, 142-182.
- [71] Esteva, L., Villaverde, R. 1973. Seismic risk, design spectra and structural reliability, In Proceedings of Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Cilt. 2, s. 2586-2596.
- [72] Joyner, W.B., Boore, D.M. 1988. Measurement, characterization and prediction of strong ground motion: Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Recent Advances in Ground Motion Evaluation, Cilt. 2, s. 43-102.
- [73] Inan, E., Colakoglu, Z., Koc, N., Bayülke, N., Coruh, E. 1996. Earthquake catalogs with acceleration records from 1976 to 1996. Technical report, 98s, General Directorate of Disaster Affairs, Earthquake Research Department, Ankara, Turkey.
- [74] Ansal, A.M. 1997. İstanbul için tasarım deprem özelliklerinin belirlenmesi, In Proceedings of Prof. Dr. Rifat Yarar Symposium, Cilt. 1, s. 233-244.
- [75] Beyaz, T. 2004. Zemin Etkisinden Arındırılmış Deprem Kayıtlarına göre Türkiye için Yeni Bir Deprem Enerjisi Azalım Bağıntısının Geliştirilmesi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 271s, Ankara.

Web-Kaynaklar

- {[1]} http://kyhdata.deprem.gov.tr/2K/kyhdata_v4.php
- {[2]} <https://www.orfeus-eu.org/data/strong/>
- {[3]} <https://wiki.anss-sis.scsn.org/SIstrac>
- {[4]} <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>

Ek-1. İvme azalım ilişkisi için kullanılan parametreler

Ölçü Nok.	Deprem Parametreleri					Zeminin Dinamik Parametreleri				
	Derinlik (km)	M _w	R _{hypo} (km)	T _D (s)	a _{max} (cm/s ²)	T ₀ (s)	Büyütme (b)	ρ ₃₀ (gr/cm ³)	V _{P30} (m/s)	V _{S30} (m/s)
1	27	5.3	31.9	0.19	96.7	0.38	1.75	1.86	635	320
2	27	5.3	36.1	0.19	26.5	0.58	2.09	1.67	252	207
3	9	5.3	34.2	0.19	23.3	0.43	1.84	1.80	486	282
4	9	5.3	34.2	0.19	16.4	0.30	1.59	1.97	1037	403
5	9	5.3	48.8	0.21	19.7	0.62	2.15	1.64	217	193
6	9	5.3	54.7	0.21	7.7	0.31	1.61	1.95	951	387
7	11	5.3	58.1	0.22	10.1	0.31	1.61	1.95	951	387
8	9	5.3	60.7	0.22	4.1	0.37	1.74	1.86	639	321
9	9	5.3	70.6	0.23	15.3	0.83	2.61	1.53	249	145
10	27	5.3	76.0	0.23	9.6	0.41	1.81	1.82	530	294
11	9	5.3	72.6	0.24	7.6	0.53	2.02	1.70	300	225
12	9	5.3	74.6	0.24	5.7	0.42	1.84	1.80	489	283
13	11	5.3	74.8	0.24	15.1	0.92	2.75	1.49	225	131

DEÜ FMD 23(68), 575-593, 2021

14	9	5.3	89.5	0.25	3.9	0.39	1.78	1.84	570	304
15	11	5.4	17.8	0.20	121.1	0.52	1.99	1.72	321	232
16	11	5.4	33.8	0.20	25.8	0.34	1.67	1.91	797	356
17	11	5.4	43.4	0.21	26.3	0.40	1.79	1.83	558	301
18	11	5.4	53.2	0.22	27.2	0.45	1.88	1.78	439	269
19	11	5.4	79.8	0.25	10.5	0.32	1.64	1.93	870	371
20	11	5.4	81.7	0.26	6.6	0.42	1.83	1.81	497	285
21	8	5.5	12.8	0.20	118.3	0.83	2.61	1.53	249	145
22	10	5.5	23.4	0.20	108.3	0.60	2.12	1.65	234	200
23	10	5.5	39.9	0.20	72.8	0.54	2.02	1.70	298	224
24	8	5.5	47.7	0.22	31.8	0.30	1.60	1.96	994	395
25	10	5.5	34.1	0.20	30.8	0.24	1.46	2.08	1626	498
26	11	5.5	35.7	0.20	26.4	0.33	1.65	1.93	850	367
27	10	5.5	37.7	0.20	18.3	0.17	1.27	2.26	3331	698
28	11	5.5	66.8	0.25	17.0	0.71	2.40	1.59	292	170
29	11	5.5	51.2	0.22	15.3	0.34	1.67	1.91	797	356
30	8	5.5	70.5	0.25	13.2	0.52	1.99	1.72	321	232
31	8	5.5	100.3	0.29	10.3	0.40	1.79	1.83	558	301
32	8	5.5	85.4	0.27	10.3	0.31	1.61	1.96	967	390
33	11	5.5	93.7	0.28	7.2	0.61	2.13	1.65	229	198
34	8	5.5	95.3	0.28	5.9	0.48	1.94	1.75	370	248
35	8	5.5	84.4	0.27	5.7	0.32	1.64	1.93	875	372
36	11	5.6	15.6	0.21	242.1	0.46	1.91	1.77	405	259
37	9	5.6	20.7	0.21	229.4	0.26	1.51	2.03	1336	454
38	9.1	5.6	14.8	0.21	229.0	0.47	1.92	1.76	389	254
39	11	5.6	32.0	0.21	65.2	0.35	1.70	1.89	736	343
40	11	5.6	42.5	0.22	58.3	0.36	1.71	1.88	705	336
41	46.6	5.6	80.0	0.25	20.2	0.32	1.64	1.94	890	375
42	11	5.6	96.6	0.30	19.7	0.40	1.79	1.83	558	301
43	11	5.6	58.1	0.24	15.9	0.42	1.83	1.81	497	285
44	7	5.6	91.3	0.29	15.2	0.61	2.14	1.65	224	196
45	7	5.6	95.3	0.29	15.1	0.34	1.67	1.91	806	358
46	9.1	5.6	53.9	0.24	13.6	0.12	1.04	2.46	3965	976
47	46.6	5.6	80.0	0.25	10.7	0.23	1.42	2.11	1848	529
48	9.1	5.6	84.6	0.28	10.6	0.42	1.84	1.80	489	283
49	7	5.6	87.3	0.28	8.0	0.38	1.76	1.85	614	315
50	46.6	5.7	47.7	0.22	223.4	0.83	2.61	1.53	249	145
51	34	5.7	40.7	0.22	168.8	0.60	2.12	1.65	234	200

DEÜ FMD 23(68), 575-593, 2021

52	16	5.7	80.1	0.28	44.6	0.47	1.91	1.76	402	258
53	16	5.7	40.1	0.22	21.5	0.17	1.25	2.26	2824	698
54	16	5.7	61.2	0.25	19.6	0.15	1.16	2.34	3246	800
55	16	5.7	68.7	0.26	18.4	0.71	2.40	1.59	292	170
56	16	5.7	101.3	0.31	15.0	0.36	1.71	1.88	700	335
57	16	5.7	84.3	0.29	6.9	0.17	1.25	2.26	2824	696
58	11.3	6.0	15.1	0.24	264.6	0.27	1.52	2.02	1280	445
59	9.5	6.0	22.8	0.24	205.9	0.38	1.76	1.85	602	312
60	9.5	6.0	46.6	0.25	147.1	0.40	1.80	1.83	542	297
61	19.5	6.0	30.5	0.24	138.8	0.22	1.39	2.14	2047	555
62	11.3	6.0	15.3	0.24	126.0	0.15	1.18	2.33	3191	780
63	16	6.0	57.3	0.27	64.1	0.61	2.13	1.65	229	198
64	22	6.0	32.8	0.24	62.1	0.17	1.25	2.26	2824	698
65	16	6.0	60.2	0.27	60.1	0.41	1.81	1.82	530	294
66	9.5	6.0	53.1	0.26	59.8	0.35	1.71	1.89	718	339
67	9.5	6.0	66.3	0.29	49.0	0.23	1.42	2.11	1878	533
68	9.5	6.0	78.2	0.31	49.0	0.22	1.40	2.13	1985	547
69	25	6.0	61.3	0.27	33.9	0.71	2.40	1.59	292	170
70	9.5	6.0	75.9	0.30	29.4	0.20	1.34	2.18	2467	606
71	11.3	6.0	50.9	0.26	25.1	0.12	1.04	2.46	3965	976
72	11.3	6.0	83.6	0.32	24.3	0.42	1.84	1.80	489	283
73	16	6.0	60.2	0.27	19.3	0.52	1.99	1.72	321	232
74	16	6.0	34.9	0.24	18.7	0.15	1.16	2.34	3246	805
75	16	6.0	88.5	0.32	17.9	0.34	1.67	1.91	801	357
76	16	6.0	64.0	0.28	17.5	0.33	1.65	1.93	850	367
77	23	6.0	73.8	0.29	16.3	0.25	1.49	2.05	1464	474
78	16	6.0	91.4	0.33	14.8	0.27	1.52	2.02	1280	445
79	23	6.0	55.9	0.26	14.4	0.54	2.02	1.70	298	224
80	11.3	6.0	85.8	0.32	12.2	0.12	1.09	2.47	7167	1001
81	27	6.0	98.8	0.34	12.1	0.33	1.66	1.92	825	362
82	23	6.0	73.7	0.29	11.4	0.22	1.40	2.13	2000	549
83	16	6.0	94.4	0.33	10.7	0.42	1.83	1.81	497	285
84	16	6.0	70.8	0.29	7.7	0.35	1.69	1.90	745	345
85	27	6.0	68.5	0.28	6.5	0.23	1.42	2.11	1856	530
86	19	6.0	72.9	0.30	4.9	0.14	1.13	2.37	3416	836
87	16	6.0	100.3	0.34	4.4	0.17	1.27	2.26	3291	694
88	16	6.0	90.4	0.33	4.0	0.35	1.70	1.89	741	344
89	16	6.0	99.3	0.34	3.6	0.40	1.79	1.83	558	301

DEÜ FMD 23(68), 575-593, 2021

90	19	6.1	58.2	0.28	53.4	0.23	1.43	2.10	1782	520
91	19	6.1	47.9	0.26	50.1	0.30	1.60	1.96	1004	397
92	10.4	6.1	74.7	0.31	34.9	0.25	1.49	2.05	1451	472
93	10.4	6.1	84.6	0.33	27.4	0.54	2.03	1.70	295	223
94	10.5	6.2	45.2	0.26	59.1	0.37	1.73	1.87	669	328
95	10	6.2	30.7	0.25	50.1	0.58	2.09	1.67	252	207
96	10	6.2	61.8	0.30	39.0	0.31	1.61	1.95	951	387
97	21	6.2	64.5	0.30	38.8	0.23	1.42	2.11	1871	532
98	10.5	6.2	61.9	0.30	35.5	0.31	1.61	1.95	951	387
99	21	6.2	73.1	0.31	30.9	0.29	1.57	1.98	1098	414
100	10	6.2	68.7	0.31	29.7	0.32	1.64	1.93	875	372
101	21	6.2	82.7	0.33	29.2	0.38	1.76	1.85	606	313
102	10.4	6.2	80.7	0.33	27.1	0.30	1.60	1.96	994	395
103	10	6.2	95.5	0.36	25.9	0.22	1.39	2.14	2070	558
104	10	6.2	90.6	0.35	25.5	0.48	1.94	1.75	373	249
105	21	6.2	76.0	0.32	25.0	0.26	1.50	2.04	1373	460
106	21	6.2	81.7	0.33	25.0	0.26	1.51	2.04	1367	459
107	10	6.2	86.6	0.34	24.9	0.61	2.14	1.65	224	196
108	21	6.2	82.7	0.33	20.3	0.70	2.39	1.59	294	171
109	10	6.2	91.6	0.35	20.2	0.44	1.87	1.78	443	270
110	10.5	6.2	78.7	0.33	19.2	0.31	1.60	1.96	983	393
111	10	6.2	97.5	0.36	18.6	0.35	1.70	1.89	722	340
112	10	6.2	86.6	0.34	18.4	0.40	1.80	1.83	546	298
113	10	6.2	87.6	0.34	17.7	0.16	1.23	2.30	3826	745
114	10	6.2	90.6	0.35	17.2	0.48	1.94	1.75	373	249
115	10	6.2	88.6	0.35	14.4	0.26	1.49	2.05	1425	468
116	10	6.2	84.6	0.34	13.5	0.14	1.13	2.37	3416	836
117	10	6.2	88.6	0.35	11.1	0.14	1.11	2.39	3533	875
118	10	6.2	95.5	0.36	10.4	0.15	1.14	2.36	3358	827
119	10	6.3	15.6	0.26	545.5	0.23	1.42	2.11	1848	529
120	10	6.3	87.6	0.35	21.3	0.63	2.16	1.64	215	192
121	10	6.3	87.6	0.35	10.3	0.34	1.68	1.90	768	350
122	10	6.3	102.5	0.38	19.4	0.31	1.61	1.95	951	387
123	19	6.7	26.2	0.29	621.7	0.30	1.60	1.97	1010	398
124	19	6.7	27.4	0.29	598.2	0.45	1.88	1.78	439	269
125	19	6.7	29.8	0.29	393.3	0.38	1.76	1.86	618	316
126	19	6.7	38.1	0.29	291.3	0.35	1.70	1.89	732	342
127	15	6.9	24.1	0.30	171.5	0.22	1.39	2.14	2062	557

DEÜ FMD 23(68), 575-593, 2021

128	15	6.9	26.5	0.30	183.6	0.24	1.46	2.08	1626	498
129	15	6.9	27.8	0.30	56.3	0.12	1.02	2.49	4162	1018
130	15	6.9	32.0	0.30	94.5	0.12	1.05	2.46	3965	972
131	15	6.9	38.5	0.30	97.3	0.22	1.41	2.12	1923	539
132	15	6.9	49.4	0.32	138.2	0.27	1.51	2.03	1323	452
133	15	6.9	56.4	0.34	47.0	0.34	1.67	1.91	797	356
134	15	6.9	60.6	0.35	43.5	0.16	1.23	2.30	3815	744
135	15	6.9	74.7	0.38	45.5	0.27	1.52	2.02	1286	446
136	15	6.9	78.3	0.39	33.9	0.21	1.37	2.16	2223	577
137	15	6.9	79.8	0.39	58.7	0.28	1.54	2.01	1220	435
138	18	7.0	20.6	0.31	627.6	0.26	1.50	2.04	1386	462
139	18	7.0	20.6	0.31	588.4	0.42	1.82	1.81	511	289
140	18	7.0	27.4	0.31	441.3	0.11	1.00	2.52	4366	1070
141	18	7.0	33.0	0.31	519.8	0.31	1.63	1.94	920	381
142	18	7.0	34.0	0.31	362.9	0.16	1.24	2.29	3664	730
143	18	7.0	34.7	0.31	362.9	0.44	1.87	1.79	446	271
144	18	7.0	36.1	0.31	539.4	0.43	1.85	1.80	471	278
145	18	7.0	43.8	0.31	323.6	0.36	1.72	1.88	696	334
146	18	7.0	81.5	0.41	323.6	0.63	2.17	1.63	210	190
147	18	7.0	99.7	0.45	205.9	0.20	1.35	2.17	2364	594
148	10.4	7.1	37.5	0.31	805.9	0.41	1.81	1.82	530	294
149	10.4	7.1	39.4	0.31	121.0	0.34	1.67	1.91	792	355
150	10.4	7.1	57.9	0.36	27.9	0.34	1.69	1.90	759	348
151	10.4	7.1	68.8	0.39	24.7	0.29	1.57	1.98	1087	412
152	10.4	7.1	107.5	0.49	23.9	0.15	1.14	2.36	3358	826