



A study on elastic input energy based on earthquakes in Turkey

İbrahim Özgür Dedeoğlu^{1*}, Yusuf Calayır²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Architecture and Engineering, Batman University, 72100 Batman, Türkiye

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fırat University, 23119 Elazığ, Türkiye

Highlights:

- Evaluation of earthquakes occurred in Turkey in terms of energy-based assessment
- The effect of soil class and structure period on the amount of input energy to the structure system
- A new fundamental elastic input energy spectrum based on earthquakes occurred in Turkey

Keywords:

- SDOF system
- Elastic input energy spectrum
- Energy based assessment
- Earthquake ground motion
- Turkey earthquakes

Article Info:

Research Article
Received: 31.08.2022
Accepted: 09.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1168898

Correspondence:

Author: İbrahim Özgür Dedeoğlu
e-mail: iozgur.dedeoglu@batman.edu.tr
phone: +90 507 726 0511

Graphical/Tabular Abstract

Within the scope of the study, the fundamental elastic input energy spectrum, which can be used to estimate the maximum input energy for elastic structural systems with ZC and ZD soil classes according to TBEC (2018) due to earthquake effect, has been obtained and this spectrum is presented in Figure A. The spectrum is affected by the soil class and the structure period. The mathematical relation of the spectrum is expressed by Eq. 1

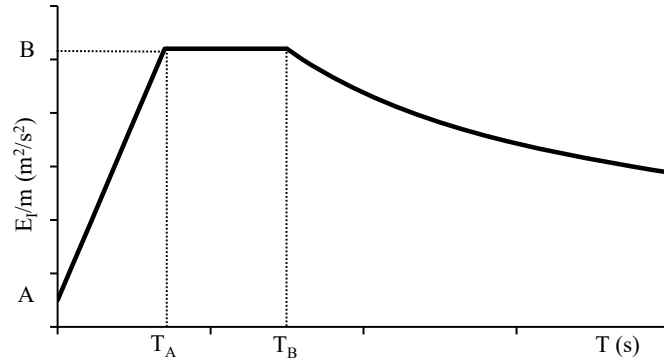


Figure A. Recommended fundamental input energy spectrum of 0.1 g

$$E_i^{0.1g} = \begin{cases} A + (B - A) * \left(\frac{T}{T_A}\right) & T < T_A \\ B & T_A \leq T \leq T_B \\ B * \left(\frac{T_B}{T}\right)^k & T_B < T \end{cases} \quad \text{Eq. (1)}$$

Purpose:

In study, it is aimed to obtain the fundamental elastic input energy spectrum that can be used to estimate the maximum input energy for elastic structure systems with ZC and ZD soil classes according to TBDY (2018) due to earthquake effect.

Theory and Methods:

A series of strong earthquake ground motions occurring in Turkey with data station soil classes ZC and ZD were selected. By using scaled acceleration records of each soil class, elastic input energy spectra normalized to the mass were found and the average input energy spectrum for the soil class in question was obtained by using these spectra.

Results:

According to TBEC (2018), the fundamental elastic input energy spectrum, which can be used to determine the amount of elastic input energy to the building systems with soil classes ZC and ZD, has been obtained.

Conclusion:

In study, the fundamental elastic input energy spectrum, which can be used to determine the amount of elastic input energy of the building systems with soil classes ZC and ZD according to TBDY (2018), is proposed. In general, it has been observed that the energy values obtained based on the proposed fundamental elastic input energy spectrum are close to the values obtained from the time history analysis solutions and are somewhat on the protective side. The proposed spectrum can be used to estimate the elastic input energy into the system in the energy-based preliminary evaluation phase.



Türkiye’de meydana gelmiş depremlere dayalı elastik giren enerji üzerine bir araştırma

İbrahim Özgür Dedeoğlu^{1*}, Yusuf Calayır²

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Türkiye’de meydana gelen depremlerin enerji esaslı değerlendirilmesi
- Zemin sınıfı ve yapı periyodunun yapı sistemine giren enerji miktarı üzerine etkisi
- Türkiye’de meydana gelen depremlere dayalı yeni bir temel elastik giren enerji spektrumu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.08.2022

Kabul: 09.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1168898

Anahtar Kelimeler:

TSD sistem,
elastik giren enerji
spektrumu,
enerji esaslı değerlendirme,
deprem yer hareketi,
Türkiye depremleri

ÖZ

Yapıların enerji esaslı değerlendirilmesinde, yer hareketlerinin etkisi sisteme giren enerji girişi vasıtasıyla göz önüne dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda, öncelikli hedef yapı sistemine giren enerjinin belirlenmesidir. Bu giren enerjinin pratik bir şekilde belirlenmesinde kullanılacak giren enerji spektrumlarının oluşturulması, enerji esaslı değerlendirme için büyük önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışmada, deprem etkisiyle TBDY (2018)’e göre ZC ve ZD zemin sınıfına sahip elastik yapı sistemleri için maksimum giren enerjinin belirlenmesinde kullanılacak temel elastik giren enerji spektrumunun elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, öncelikle Türkiye’de meydana gelen ve veri istasyon zemin sınıfı ZC ve ZD olan bir dizi kuvvetli deprem yer hareketi seçilmiştir. Ardından bu kuvvetli deprem yer hareketlerine ait ivme kayıtları, PGA değerleri 0,1 g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Her bir zemin sınıfına ait bu ölçekli ivme kayıtları kullanılarak kütleye göre normalize edilmiş elastik giren enerji spektrumları bulunmuş ve bu spektrumlardan faydalanılarak söz konusu zemin sınıfı için ortalama giren enerji spektrumu elde edilmiştir. Kütleye göre normalize edilmiş ortalama giren enerji spektrumu idealize edilerek, söz konusu zemin sınıfı için doğrusal elastik sistemlere giren maksimum enerjinin pratik olarak belirlenmesinde kullanılacak bir temel elastik giren enerji spektrumu önerilmiştir. Önerilen spektrumun etkinliği, her iki zemin sınıfı için zaman tanım alanı çözümlerine dayalı olarak elde edilen giren enerji spektrumları ile karşılaştırılarak irdelenmiştir.

A study on elastic input energy based on earthquakes in Turkey

H I G H L I G H T S

- Evaluation of earthquakes occurred in Turkey in terms of energy-based assessment
- The effect of soil class and structure period on the amount of input energy to the structure system
- A new fundamental elastic input energy spectrum based on earthquakes occurred in Turkey

Article Info

Research Article

Received: 31.08.2022

Accepted: 09.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1168898

Keywords:

SDOF system,
Elastic input energy
spectrum,
energy based assessment,
earthquake ground motion,
Turkey earthquake

ABSTRACT

In the energy-based evaluation of structures, the effect of ground movements is taken into account through the energy input into the system. In this approach, the primary goal is to determine the input energy to the structure system. Obtaining input energy spectra that can be used to determine this input energy in a practical way is of tremendous importance for energy-based evaluation. In this study, it is aimed to obtain the fundamental elastic input energy spectrum that can be used to determine the maximum input energy for elastic structure systems with ZC and ZD soil classes according to TBDY (2018) due to earthquake effect. For this reason, firstly, a series of strong earthquake ground motions occurring in Turkey and having data station ground classes of ZC and ZD were selected. Then, the acceleration records of these strong earthquake ground motions were scaled to have PGA values of 0,1 g. For these scaled acceleration records of each soil class, elastic input energy spectra normalized to the mass were found and the average input energy spectrum was obtained by using these spectra. By idealizing the average input energy spectrum normalized according to the mass, a fundamental elastic input energy spectrum is proposed that can be used to practically determine the maximum energy entering the linear elastic systems for the soil class in question. The effectiveness of the proposed spectrum is examined by comparing it with the input energy spectra obtained based on the time history solutions for both soil classes.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde FEMA, ACI, Eurocode ve Türk Deprem Yönetmeliği gibi modern yönetmeliklerde, depreme dayanıklı yapı tasarımı kuvvete ve yer değiştirmeye dayalı yöntemler kullanılmaktadır. Bu tasarım yöntemlerinde deprem kuvvetleri eşdeğer yanal kuvvetlere dönüştürülerek dikkate alınabilmekte ve yapısal elemanların dayanım ve yer değiştirme talepleri belirli limitlere göre değerlendirilmesi ilkesine göre yapılabilmektedir. Ancak sözü edilen tasarım yöntemlerinde yapı sisteminin tekrarlı yükler altındaki davranışı ve yapı elemanlarının doğrusal olmayan yer değiştirmedeki histeretik çevrimsel davranışı dolaylı olarak dikkate alınmaktadır. Depreme dayanıklı tasarımda, yapının deprem yükleri altında tasarlanmanın bir diğer yolu, yapı sisteminin enerji esaslı değerlendirilmesidir. Geleceğin tasarım yöntemlerinden biri olma potansiyeline sahip olan enerji esaslı değerlendirme kavramı, yapıların sismik etkiler altında tasarımı ve değerlendirilmesi için, geleneksel kuvvete dayalı ve yer değiştirmeye dayalı tasarımlara göre daha akılcı ve güvenilir olduğu düşünülmektedir.

Depreme dayanıklı yapı tasarımında enerji esaslı değerlendirme yöntemlerinin kullanılması, ilk defa Housner [1] tarafından yapılan çalışmada önerilmiştir. Çalışmasında, doğrusal elastik hız spektrumundan yararlanarak deprem etkisiyle sisteme giren enerjiyi tahmin etmiştir. Ayrıca, bir yapıya giren toplam enerji miktarının kütle ile yere göre rölatif hızının karesinin çarpımının yarısı olarak ifade etmiştir. Akiyama [2], çalışmasında yapı sistemleri için elastik enerjinin nasıl tanımlanacağı üzerine bir çalışma yapmıştır. Çok serbestlik dereceli yapı sisteminin eşdeğer tek serbestlik dereceli sisteme indirgeme kabulü ile yapılarda elastik giren enerjisini tanımlanmıştır. Kuwamura ve Galambos [3] yaptıkları çalışmada, deprem etkisiyle yapı sistemlerine giren enerjinin büyük ölçüde yer hareketi özelliklerine ve deprem riski potansiyeline göre bir maksimum enerji girişini dikkate alarak bir limit durum kriteri önermişlerdir. Uang ve Bertero [4], enerji parametreleri ve bu parametrelerin kullanımıyla ilgili oldukça önemli ve geniş kapsamlı bir çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada, temel enerji tanımlamaları açık bir şekilde belirtilmiş ve enerji bileşenlerinin elde edilmesindeki teorik denklemler hakkında geniş bilgiler sunulmuştur.

Vidic vd. [5] ile Fajfar ve Vidic [6] tarafından birbirinin tamamlayıcısı olan iki araştırma yapılmıştır. İlk çalışmada öngörülen bir süneklik düzeyine sahip elastik olmayan sistemlerin dayanım ve yer değiştirme değerlerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Dayanım azaltma faktörü olan R değerinin sistemin doğal periyoduna, öngörülen süneklik faktörüne, histeretik davranışa, sönümlenmeye ve yer hareketine bağlı olduğunu göstermişlerdir. İkinci çalışmada ise, sisteme giren enerji ve birikimli hasar ile ilgili olan plastik enerji üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Nurtuğ ve Sucuoğlu [7] doğrusal TSD bir sistemde tüketilen enerjiyi hesaplamak için yer hareketinin spektral hızına, etkili süresine ve yer hareketinin genliğine bağlı bir analitik denklem önermişlerdir. Deccanini ve Mollaioli [8, 9] çalışmalarında, depremin neden olduğu giren enerjinin hesaplanmasında elastik ve elastik olmayan sistemler için tasarım spektrumları önermişlerdir. Manfredi [10] histeretik ve giren enerji spektrumlarının basitleştirilmiş bir temsiliyi elde etmek için bir yöntem sunmuştur. Chai [11] yaptığı çalışmada yapının yapısal özelliklerinin yer hareketinin enerji talebini güçlü bir şekilde etkilediğini göstermiştir. Bu nedenle, yapının çeşitli özelliklerini ve deprem kayıtlarını dikkate alarak bir enerji talep spektrumu çıkarılması gerektiğini belirtmiştir. Leelataviwat vd. [12] enerji dengesi kavramına dayalı bir sismik değerlendirme yöntemi sunmuşlardır. Bu yöntem depremin enerji talebi ile yapının kapasite diyagramının karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. Benavent vd. [13, 14] düşük ve orta sismik bölgelerde bulunan yapıların sismik

tasarımına uygulanabilir giren enerji spektrumları önermişlerdir. Amiri vd. [15] İran deprem kayıtlarına dayalı yapıların sismik tasarımında kullanılabilir giren enerji spektrumu önermişlerdir. Lopez-Almansa [16] çalışmalarında tasarım tepe ivmesi 0,3 g veya daha yüksek olan bölgeler için tasarlanan eşdeğer hız dayalı giren enerji spektrumları önermişlerdir. Dindar vd. [17] PEER veri tabanından seçilmiş bir dizi yer hareketleri altında çeşitli yapısal davranışa sahip TSD sistemler kullanarak dinamik analizler yapmışlardır. Enerji dengesi denkleminin yararlanarak zemin sınıfını ve yapısal davranışı dikkate alan giren enerji ve plastik enerji spektrumlarını oluşturmuşlardır. Alıcı ve Sucuoğlu [18, 19], Quinde vd. [20], Güllü vd. [21, 22], Gharehbaghi vd. [23], Zhou vd. [24], Merter [25, 26], Karimzadeh vd. [27], Shargh ve Barati [28] ve Dedeoğlu ve Calayır [29] enerji spektrumlarının geliştirilmesi üzerine önemli çalışmalarda bulunmuşlardır. Cheng [30] spektral giriş enerjisi ve spektral ivmeler arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir ve bir korelasyon modeli geliştirmişlerdir. Değer vd. [31] çalışmalarına geniş kapsamlı bir perde duvar deney veri tabanı oluşturulmuş ve perde tasarım parametrelerinin (geometri, donatı oranları vb.) enerji sönümlenme davranışı üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. Zhang vd. [32], çalışmalarında, eşdeğer hız spektrumu ile sözde hız tepki spektrumu arasındaki ilişki için depremin magnitüd büyüklük, mesafe ve saha koşullarının etkilerini içeren pratik bir formülasyon önermişlerdir. Zhang vd. [33], tek serbestlik dereceli bir sistem için giriş enerji spektrumunun zemin büyütme oranı ile Fourier genlik spektrumu arasındaki teorik ilişkiyi sunmuşlardır. Güllü vd. [34], moment dayanımlı çerçeve tipi binalarda sismik giriş enerjisinin kat bazında dağılımını tahmin etmek için yeni bir pratik yöntem önerilmektedir. Önerilen metodolojiye dayalı olarak tahmin edilen doğrusal olmayan tepkiler ile doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Uçar [35] çalışmasında, toplam yapı sistemine giren enerjisinin kat seviyelerine dağıtılması için pratik bir formülasyon sunmuştur. Yapılan çalışmalardan yapı sistemlerinin enerji esaslı değerlendirilmesinde, sisteme giren maksimum enerjinin belirlenmesinde kullanılan giren enerji spektrumlarının oldukça önem arz ettiği görülmektedir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında, Türkiye’de özellikle Kuzey ve Doğu Anadolu fay hattı üzerinde meydana gelmiş orta ve şiddetli depremler dikkate alınarak, TBDY (2018)’e göre ZC ve ZD zemin sınıflarına sahip yapı sistemlerine giren maksimum elastik enerji miktarlarının belirlenmesinde kullanılacak temel elastik giren enerji spektrumunun elde edilmesi amaçlanmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda, sisteme giren enerji genellikle eşdeğer hız spektrumlarından elde edilmektedir. Lopez-Almansa vd. [16] tarafından Türkiye özelinde yapılan çalışmada da giren enerji için eşdeğer hız spektrumu dikkate alınmaktadır. Mevcut çalışmada ise, yapı sistemine giren enerjinin belirlenmesi için önerilen denklemde direkt yer hareketinin en büyük ivme değeri dikkate alınmakta ve denklem oldukça pratik ve tutarlı bir tahmin sunmaktadır. ZA ve ZB zeminleri için yeterli sayıda deprem ivme kayıtlarına ulaşılmadığı için çalışma kapsamına alınmamıştır.

2. Sismik Enerji Bileşenleri (Seismic Energy Components)

Yer hareketi etkisindeki viskoz sönümlü TSD bir sistemin hareket denklemi Eş. 1’de verildiği gibi ifade edilebilir [36];

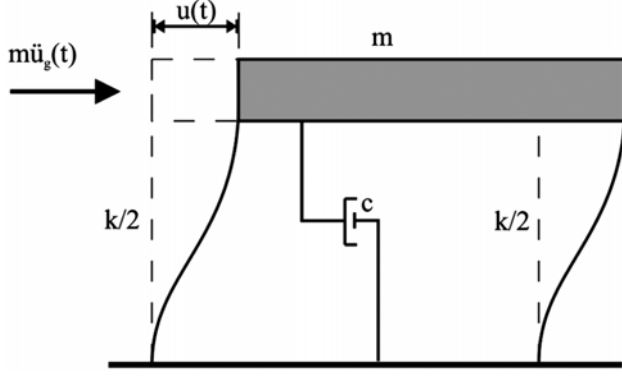
$$m\ddot{u}_t(t) + c\dot{u}_t(t) + f_s(t) = 0 \quad (1)$$

Burada m kütle, c sönüm katsayısı, f_s yay kuvveti (doğrusal bir sistem için $f_s = k * u$), u kütlelerin yere göre rölatif yer değiştirme, u_g yer hareketi etkisiyle zeminin yer değiştirmesi ve $u_t = u + u_g$ olmak üzere toplam yer değiştirmedir. Eğer yer hareketi etkisi Şekil 1’de gösterildiği gibi etkin bir deprem kuvveti olarak düşünülürse, Eş. 1 düzenlenerek Eş. 2 şeklinde yazılabilir.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + f_s(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

Şekil 1'de gösterilen TSD sistemin enerji denklemi, Eş. 2'de verilen hareket denkleminin bağıl yer değiştirmeye göre doğrudan integre edilmesiyle Eş. 3 şeklinde elde edilir.

$$\int_0^u m \ddot{u}(t) du + \int_0^u c \dot{u}(t) du + \int_0^u f_s(t) du = - \int_0^u m \ddot{u}_g(t) du \quad (3)$$



Şekil 1. TSD sistem [36] (SDOF system)

Eş. 3'ün sağ tarafı, yer hareketi ile sisteme giren toplam enerjiyi (E_I) ifade eder ve Eş. 4 ile belirtilir.

$$E_I = - \int_0^u m \ddot{u}_g(t) du \quad (4)$$

Bu enerji, kütlede bağımsız olarak (birim kütle başına) Eş. 5'te verildiği şekilde ifade edilir.

$$\frac{E_I}{m} = - \int_0^u \ddot{u}_g(t) du \quad (5)$$

Eş. 3'ün sol tarafında yer alan ilk terim; kütlede yere göre göreceli hareketiyle ilişkili olan kinetik enerjiyi (E_K) gösterir ve Eş. 6 şeklinde yazılır.

$$E_K = \int_0^u m \dot{u}(t) du = \int_0^u m \dot{u}(t) du = \frac{m\dot{u}^2}{2} \quad (6)$$

Eş. 3'ün sol tarafında yer alan ikinci terim; viskoz sönüm yoluyla tüketilen sönüm enerjisini (E_D) tanımlar ve Eş. 7'de verildiği gibi hesaplanır.

$$E_D = \int_0^u c \dot{u}(t) du \quad (7)$$

Eş. 3'ün sol tarafında yer alan üçüncü terim ise; sistemin elastik ve elastik ötesi davranışıyla tükettiği toplam enerjiyi göstermektedir. Elastik enerji (E_S), Eş. 8 ile tanımlanır.

$$E_S = \int_0^{u_y} f_s(t) du \quad (8)$$

Elastik ötesi davranışla tüketilen plastik enerji (E_P) ise Eş. 9 ile bulunur.

$$E_P = \int_{u_y}^u f_s(t) du \quad (9)$$

Bu enerji terimleri göz önüne alınarak TSD bir sistemin göreceli enerji denge denklemi olan Eş. 3 yeniden yazılmak istenirse Eş. 10'da veriliği şekilde ifade edilebilir.

$$E_K + E_D + E_S + E_P = E_I \quad (10)$$

Deprem süresi boyunca yapıya giren enerji; yapı sistemin kinetik, sönüm, elastik ve plastik enerjinin toplamına eşittir. Bu sismik enerji bileşenleri sistemde geçici olarak oluşan ve depremi uyarımı bitiminde sonlanan ve yapı tarafından sönüm ve elastik ötesi davranışla tüketilen enerjiler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Kinetik ve elastik enerji deprem yer hareketi uyarımı bittiğinde sonlanan enerjilerdir. Sönüm ve plastik enerji ise yapı tarafından tüketilen enerjidir. Özellikle doğrusal olmayan şekil değiştirme ile tüketilen plastik enerji, yapının deprem etkisi altındaki kalıcı hasarı ile doğrudan ilişkilendirilebilir.

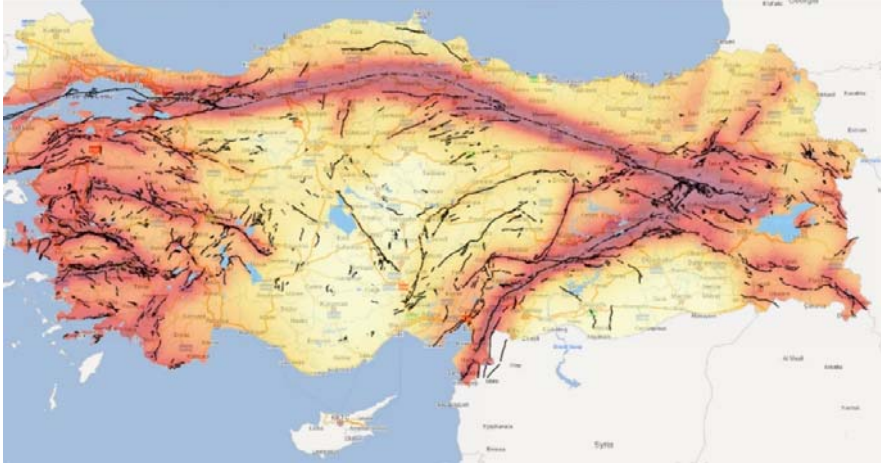
Çalışma kapsamında, enerji denklemlerinin elde edilmesinde tabanı sabit ve büyüklüğü $-m\ddot{u}_g(t)$ olan deprem kuvveti olan bir dış yüklemeye maruz TSD sistem modeli kabul edilmiştir. Ayrıca denklemlerdeki enerji terimleri toplam hareket sonucu oluşan değil, kütlede yere göre göreceli hareket enerjisini ifade etmektedir. Toplam enerji E_I , yer hareketi sonucu yapının temelinde oluşan toplam kesme kuvvetinin yaptığı işe göre de mutlak enerji şeklinde ifade edilebilir.[7]. Ancak bir yapıda iç kuvvetlere ve şekil değişimlerine yol açan etkilerin göreceli yer değiştirmeler ve hızlar olduğu göz önüne alındığında, göreceli yer harekete göre yazılan enerji terimlerinin mutlak hız ve yer değiştirmelere göre yazılan terimlerden daha anlamlı olduğu görülmektedir [37].

3. Kuvvetli Yer Hareketleri (Strong Ground Motions)

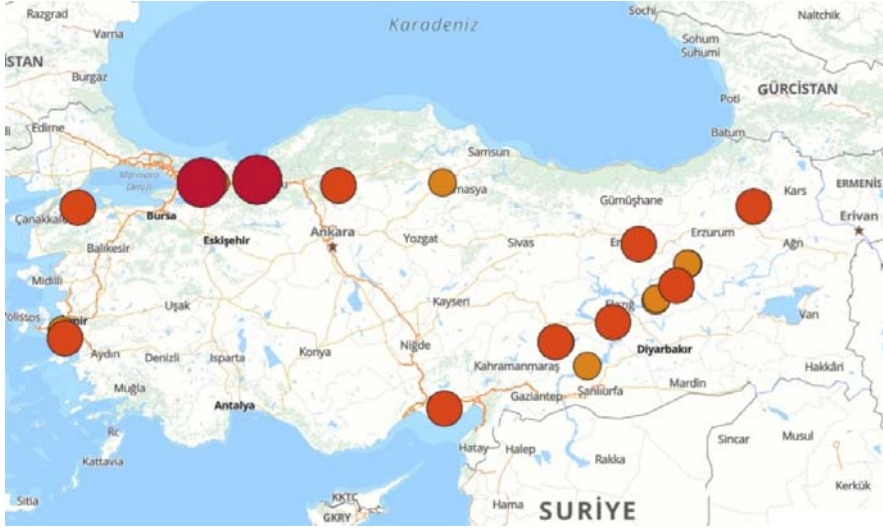
Doğrusal elastik TSD sistemlerin deprem etkileri altında giren enerjilerini araştırmak için Türkiye'de meydana gelen ve odak mekanizması doğrultu atımlı olan 21 farklı deprem ve toplam 72 adet gerçek deprem ivme kaydı seçilmiştir. Depremlerin seçiminde, Şekil 2'de Türkiye Deprem Tehlike Haritasında gösterilen diri fay hatları üzerine meydana gelmiş olması tercih edilmiş ve çalışmada ele alınan depremlerin büyük bir çoğunluğu Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Hat'larında meydana gelmiştir. Bu depremlerin konumları Türkiye haritası üzerinde Şekil 3'te gösterilmiştir.

Deprem ivme kayıtlarının tamamı Afet ve Acil Durum Yönetim Daire Başkanlığı'na bağlı Deprem Dairesi Başkanlığı veri tabanından temin edilmiştir [38]. Seçilen deprem ivme kayıtlarının moment büyüklüğü (M_w) 5,5 ile 7,6 aralığındadır. Kullanılan depremlerin kayıt sayısı moment büyüklüklerine (M_w) bağlı grafiksel olarak Şekil 4'te sunulmuştur. Deprem kayıtlarının en büyük yer ivmelerinin (PGA) en küçüğü 0,0275 g ve en büyüğü 0,823 g değerindedir. Ayrıca, depremlerin merkez üssü uzaklıkları 3,33 km ile 120,63 km aralığındadır. Depremlerin en büyük yer ivmeleri ve merkez üssü uzaklıkları Şekil 5'te bir arada gösterilmiştir

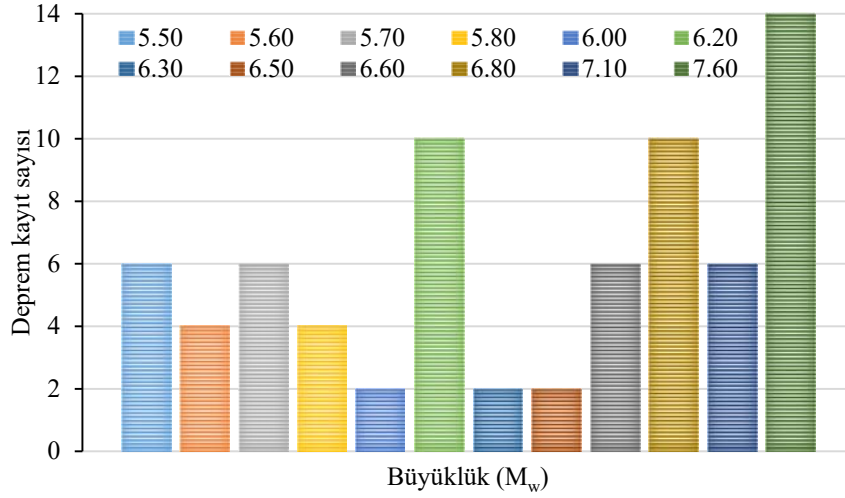
Deprem ivme kayıtlarının kaydedildiği istasyonların bulunduğu zeminlerin üst 30 m'deki kayma dalga hızları $V_s(30)$ dağılımı Şekil 6'da verilmiştir. En küçük $V_s(30)$ değeri 197 m/s ve en büyük $V_s(30)$ değeri 701 m/s'dir. Deprem ivme kayıtları, bu kayma dalga hızlarına göre ZC ve ZD zemin sınıfları olmak üzere 2 gruba ayrılmıştır. Gruplandırma aşamasında TBDY (2018)'de verilen zemin sınıflaması referans olarak alınmıştır [39]. Bu zemin sınıflarına ait TBDY (2018)'de verilen özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir. Deprem ivme kayıtlarının bazı temel karakteristik özellikleri Tablo 2-Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 2'de ZC Zemin sınıfında bulunan ve 1'den 42'e kadar numaralandırılan deprem ivme kayıtları ve Tablo 3'te ZD zemin sınıfında bulunan ve 43'ten 72'e kadar numaralandırılan deprem ivme kayıtları verilmiştir. Tablolarda verilen PGA, PGV ve PGD ifadeleri sırasıyla depremi ivme kaydının en büyük yer ivmesini, hızını ve yer değiştirmesini göstermektedir. Ayrıca R_{JB} , R_{rup} , R_{epi} ve R_{hyp} değerleri depremlerin sırasıyla Joyner-Boore, kırılma, merkez üssü ve odak noktası uzaklıklarını ifade etmektedir.



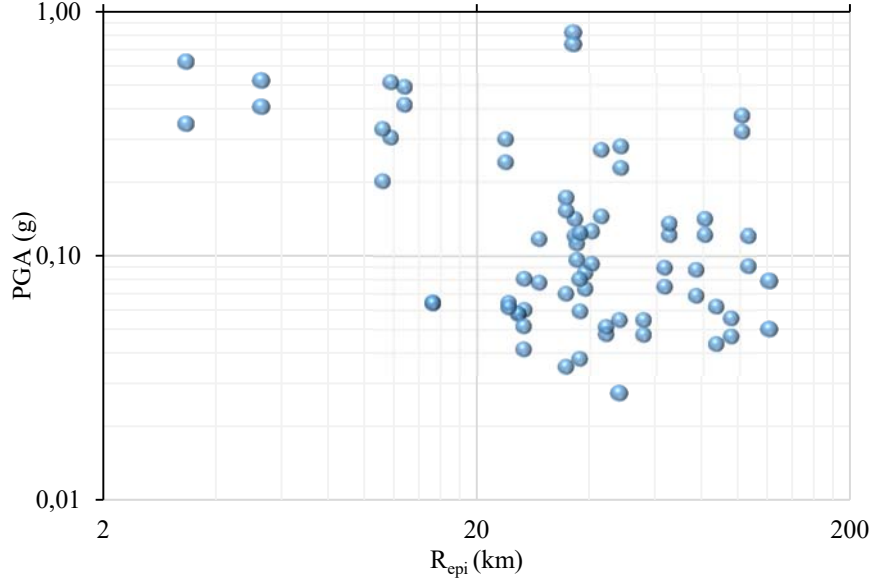
Şekil 2. Türkiye Deprem Tehlike Haritası ve diri fay hatları [38] (Turkey Earthquake Hazard Map and active fault lines)



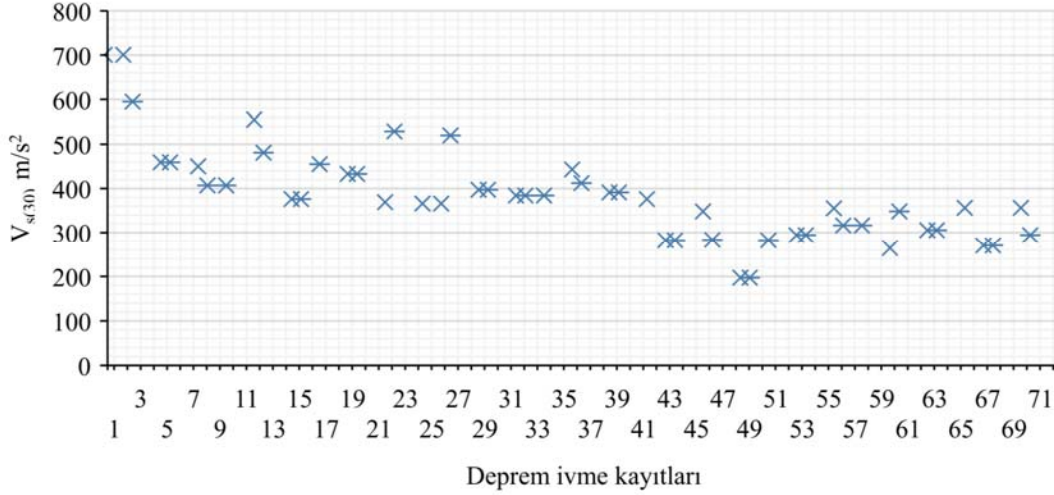
Şekil 3. Seçilen depremlerin konumları [38] (Locations of selected earthquakes)



Şekil 4. Deprem kayıt sayısının moment büyüklüğüne (M_w) göre değişimi (Variation of earthquake recording number according to moment magnitude (M_w))



Şekil 5. Deprem kayıtlarının en büyük yer ivmeleri ve merkez üssü uzaklıkları (Maximum ground accelerations and epicenter distances of earthquake records)



Şekil 6. Deprem kayıtlarının kayma dalgası hızları ($V_{s(30)}$) (Shear wave velocities of earthquake records ($V_{s(30)}$))

4. Sayısal Çalışma (Numerical Study)

Çalışma kapsamında, deprem etkisiyle yapı sistemlerine giren maksimum enerji miktarlarının belirlenmesinde kullanılacak temel elastik enerji spektrumlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma kapsamında ZC ve ZD zemin sınıfları için seçilen deprem ivme kayıtları, PGA değerleri 0,1 g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Elastik TSD sistemlerin ölçekli deprem ivme kayıtları altındaki zaman tanım alanını nümerik çözümleri için yazarlar tarafından Matlab [40] ortamında hazırlanan bir program kullanılmıştır. Yapılan çözümlemede TSD sistemlerin $\xi=0,05$ sönüm oranına sahip olduğu kabul edilmiştir. Her iki zemin sınıfı için, bu şekilde ölçeklendirilmiş ivme kaydına ait kütleye göre normalize edilmiş elastik giren enerji spektrumları ve ortalama enerji spektrumları elde edilmiştir. ZC ve ZD zemin sınıfları için ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtlarına ait normalize edilmiş elastik giren enerji spektrumları, ortalama enerji spektrumları ile birlikte Şekil 7 ve Şekil 8'de sırasıyla verilmiştir.

Ölçekli deprem ivme kayıtları için elde edilen elastik giren enerji spektrumları incelendiğinde; ZC zemin sınıfı için ortalama giren enerji spektrumunun kütleye göre normalize maksimum değeri $0,0558 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ve ZD zemin sınıfı için aynı değer $0,0866 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'dir. Bu durum ve elde edilen enerji spektrumları deprem etkisi altında sisteme giren enerji miktarının zemin sınıfından etkilendiğini işaret etmektedir. Ayrıca sisteme giren enerji miktarının yapı periyodu ile ilişkili olduğu grafiklerden görülmektedir.

ZC ve ZD zemin sınıfları için normalize edilmiş ortalama giren enerji spektrumları ve idealize edilmiş halleri birlikte Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla sunulmuştur.

Yapı sistemlere giren elastik enerjinin belirlenmesinde kullanılacak çeşitli enerji spektrumu grafikleri birçok araştırmacı tarafından önerilmiştir. Bu enerji spektrumlarının genel hatları incelendiğinde Şekil 11'de sunulan iki enerji spektrum biçimi öne çıkmaktadır. Şekil 11a'da üç bölgeyi giren enerji spektrumu şekilsel

Tablo 1. TBDY (2018) yerel zemin sınıfları (TBEC local soil classes)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Sınıfı	Üst 30 metrede ortalama		
		$V_S(30)$ [m/s]	$SPT(N_{60})_{30}$ [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.			

SPT (N60)30: Standard Penetrasyon Testi (SPT) ortalama standart penetrasyon darbe sayısı
VS (30): Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı
(cu)30: ortalama drenajsız kayma dayanımı

Tablo 2. Deprem yer hareketleri ve bazı temel özellikleri (ZC Zemin Sınıfı)
(Earthquake ground motions and some fundamental properties (ZC Soil Class))

No	Deprem & Yıl	İstasyon & Bileşen	M_w	$V_{s(30)}$ (m/s)	PGA (g)	PGV (m/s)	PGD (m)	R_{JB} (km)	R_{rup} (km)	R_{epi} (km)	R_{hvp} (km)
1	Gölcük-İzmit & 1999	4106&E-W	7,6	701	0,144	0,358	0,420	4,87	6,18	42,77	46,03
2	Gölcük-İzmit & 1999	4106&N-S	7,6	701	0,270	0,479	0,501	4,87	6,18	42,77	46,03
3	Gölcük-İzmit & 1999	3401&E-W	7,6	595	0,043	0,075	0,082	43,38	43,54	86,46	88,11
4	Gölcük-İzmit & 1999	3401&N-S	7,6	595	0,061	0,097	0,142	43,38	43,54	86,46	88,11
5	Gölcük-İzmit & 1999	1604&E-W	7,6	459	0,046	0,083	0,050	61,81	63,25	94,73	96,24
6	Gölcük-İzmit & 1999	1604&N-S	7,6	459	0,055	0,096	0,067	61,81	63,25	94,73	96,24
7	Sivrice-Elazığ & 2020	2308&E-W	6,8	450	0,298	0,45	0,109	17,86	17,89	23,81	25,14
8	Sivrice-Elazığ & 2020	2308&N-S	6,8	450	0,240	0,273	0,058	17,86	17,89	23,81	25,14
9	Sivrice-Elazığ & 2020	2301&E-W	6,8	407	0,140	0,124	0,028	30,43	30,46	36,39	37,27
10	Sivrice-Elazığ & 2020	2301&N-S	6,8	407	0,120	0,087	0,024	30,43	30,46	36,39	37,27
11	Sivrice-Elazığ & 2020	0204&E-W	6,8	555	0,112	0,165	0,074	30,86	30,88	36,81	37,69
12	Sivrice-Elazığ & 2020	0204&N-S	6,8	555	0,096	0,094	0,035	30,86	30,88	36,81	37,69
13	Sivrice-Elazığ & 2020	4401&E-W	6,8	481	0,089	0,077	0,040	57,08	57,09	63,04	63,55
14	Sivrice-Elazığ & 2020	4401&N-S	6,8	481	0,074	0,069	0,055	57,08	57,09	63,04	63,55
15	Sivrice-Elazığ & 2020	6304&E-W	6,8	376	0,079	0,036	0,013	114,67	114,68	120,63	120,90
16	Sivrice-Elazığ & 2020	6304&N-S	6,8	376	0,050	0,031	0,012	114,67	114,68	120,63	120,90
17	Otlukbeli-Erzincan & 1992	2403&E-W	6,6	455	0,489	0,772	0,289	3,32	16,82	12,83	25,99
18	Otlukbeli-Erzincan & 1992	2403&N-S	6,6	455	0,413	1,094	0,357	3,32	16,82	12,83	25,99
19	Otlukbeli-Erzincan & 1992	2403&E-W	6,6	433	0,087	0,041	0,024	63,05	65,47	76,45	79,72
20	Otlukbeli-Erzincan & 1992	2403&N-S	6,6	433	0,06854	0,088	0,066	63,05	65,47	76,45	79,72
21	Menderes-İzmir & 1992	0905&E-W	6,5	369	0,073	0,077	0,084	38,11	40,32	38,74	42,39
22	Menderes-İzmir & 1992	0905&N-S	6,5	369	0,085	0,072	0,055	38,11	40,32	38,74	42,39
23	Bingöl & 2020	1201&E-W	6,3	529	0,303	0,218	0,050	2,23	5,80	11,79	15,46
24	Bingöl & 2020	1201&N-S	6,3	529	0,511	0,372	0,157	2,23	5,80	11,79	15,46
25	Adana & 1998	3301&E-W	6,2	366	0,121	0,109	0,055	57,54	71,21	64,86	79,86
26	Adana & 1998	3301&N-S	6,2	366	0,134	0,191	0,174	57,54	71,21	64,86	79,86
27	Çanakkale & 1983	1012&E-W	6,2	520	0,047	0,045	0,049	47,64	47,78	55,39	55,82
28	Çanakkale & 1983	1012&N-S	6,2	520	0,055	0,053	0,022	47,64	47,78	55,39	55,82
29	Çanakkale & 1983	1014&E-W	6,2	397	0,047	0,083	0,086	37,79	37,96	44,05	44,59
30	Çanakkale & 1983	1014&N-S	6,2	397	0,051	0,088	0,088	37,79	37,96	44,05	44,59
31	Doğanşehir-Malatya & 1986	0203&E-W	6,0	384	0,077	0,077	0,043	23,93	23,96	29,24	29,57
32	Doğanşehir-Malatya & 1986	0203&N-S	6,0	384	0,117	0,154	0,074	23,93	23,96	29,24	29,57
33	Doğanşehir-Malatya & 1986	0203&E-W	5,8	384	0,035	0,135	0,074	30,31	31,13	34,44	36,03
34	Doğanşehir-Malatya & 1986	0203&N-S	5,8	384	0,069	0,087	0,030	30,31	31,13	34,44	36,03
35	Merzifon-Amasya & 1996	0502&E-W	5,7	443	0,054	0,022	0,003	43,47	44,36	47,80	49,26
36	Merzifon-Amasya & 1996	0502&N-S	5,7	443	0,027	0,013	0,009	43,47	44,36	47,80	49,26
37	Sapanca-Sakarya & 1999	5401&E-W	5,6	412	0,328	0,097	0,015	10,40	11,33	11,21	13,49
38	Sapanca-Sakarya & 1999	5401&E-W	5,6	412	0,200	0,156	0,025	10,40	11,33	11,21	13,49
39	Samsat-Adıyaman & 2017	0201&E-W	5,5	391	0,060	0,022	0,007	—	—	26,68	—
40	Samsat-Adıyaman & 2017	0201&N-S	5,5	391	0,080	0,027	0,007	—	—	26,68	—
41	Samsat-Adıyaman & 2017	6304&E-W	5,5	376	0,057	0,018	0,002	—	—	25,73	—
42	Samsat-Adıyaman & 2017	6304&N-S	5,50	376	0,057	0,02	0,004	—	—	25,73	—

olarak gösterilmektedir (Deccani ve Mollaioli [8], Benavent ve Climent [13] ve Amiri vd. [15]). Bu enerji spektrum grafiğinde belirli periyodlar arasında sabit bir plato sahanlığı mevcuttur. Şekil 11b'de iki bölge giren enerji spektrumu temsili olarak sunulmuştur (Dindar

vd. [17]). Önerilen bu spektrumda giren enerji belirli bir periyod değerinde maksimuma ulaşarak zirve yapmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan analizlerden elde edilen Şekil 9 ve Şekil 10 grafikleri incelendiğinde, sisteme giren enerjinin kısa periyodlardan

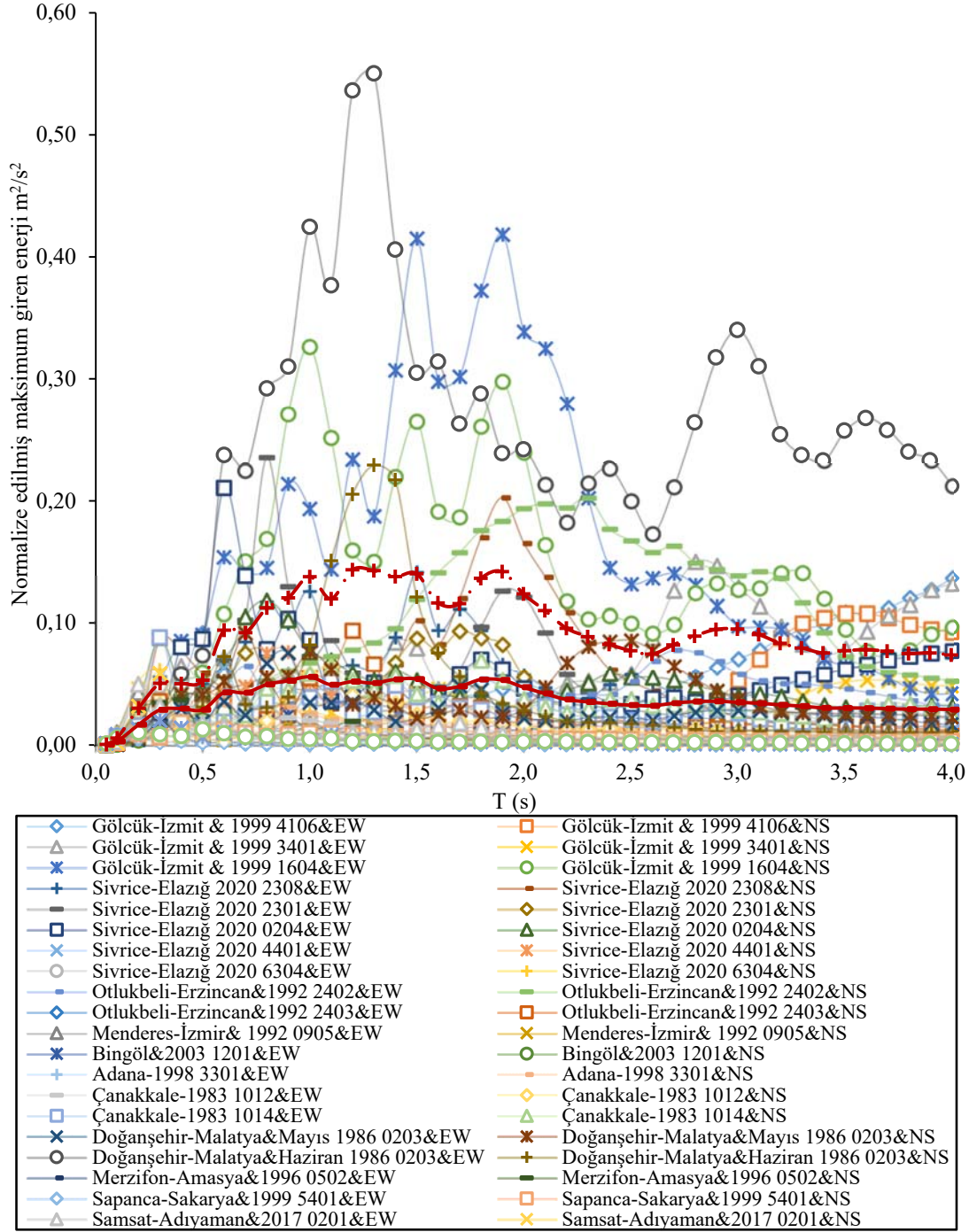
Tablo 3. Deprem yer hareketi ve bazı temel özellikleri (ZD Zemin Sınıfı)
(Earthquake ground motions and some fundamental properties (ZD Soil Class))

No	Deprem & Yıl	İstasyon & Bileşen	M _w	V _{s30} (m/s)	PGA (g)	PGV (m/s)	PGD (m)	R _{JB} (km)	R _{ruo} (km)	R _{epi} (km)	R _{hyp} (km)
43	Gölcük-İzmit & 1999	8101&E-W	7,6	282	0,373	0,563	0,231	46,00	46,16	101,23	102,65
44	Gölcük-İzmit & 1999	81016N-S	7,6	282	0,320	0,536	0,407	46,00	46,16	101,23	102,65
45	Gölcük-İzmit & 1999	1404&E-W	7,6	348	0,121	0,130	0,039	44,23	45,71	80,68	82,45
46	Gölcük-İzmit & 1999	1404&N-S	7,6	348	0,140	0,112	0,030	44,23	45,71	80,68	82,45
47	Gölcük-İzmit & 1999	3403&E-W	7,6	283	0,090	0,144	0,098	55,91	56,04	105,22	106,58
48	Gölcük-İzmit & 1999	3403&N-S	7,6	283	0,120	0,165	0,116	55,91	56,04	105,22	106,58
49	Gölcük-İzmit & 1999	1612&E-W	7,6	197	0,125	0,282	0,298	33,16	34,76	40,31	43,75
50	Gölcük-İzmit & 1999	1612&N-S	7,6	197	0,092	0,221	0,192	33,16	34,76	40,31	43,75
51	Düzce & 1999	8101&E-W	7,1	282	0,523	0,801	0,477	0,00	9,71	5,27	11,66
52	Düzce & 1999	8101&N-S	7,1	282	0,407	0,635	0,385	0,00	9,71	5,27	11,66
53	Düzce & 1999	1401&E-W	7,1	294	0,823	0,669	0,131	8,01	8,55	36,12	37,58
54	Düzce & 1999	1401&N-S	7,1	294	0,738	0,565	0,253	8,01	8,55	36,12	37,58
55	Düzce & 1999	1406&E-W	7,1	355	0,123	0,191	0,256	32,14	32,28	37,54	38,95
56	Düzce & 1999	1406&N-S	7,1	355	0,059	0,143	0,200	32,14	32,28	37,54	38,95
57	Erzurum & 1983	25036E-W	6,6	316	0,172	0,249	0,136	22,60	24,74	34,50	38,07
58	Erzurum & 1983	2503&N-S	6,6	316	0,152	0,491	0,389	22,60	24,74	34,50	38,07
59	Adana & 1998	0105&E-W	6,2	264	0,278	0,241	0,069	39,99	58,22	48,19	67,04
60	Adana & 1998	0105&N-S	6,2	264	0,227	0,299	0,076	39,99	58,22	48,19	67,04
61	Orta-Çankırı & 2000	1801&E-W	6,2	348	0,064	0,062	0,037	8,19	11,07	15,24	18,22
62	Orta-Çankırı & 2000	1801&N-S	6,2	348	0,063	0,080	0,028	8,19	11,07	15,24	18,22
63	İzmit & 1999	4107&E-W	5,8	305	0,623	0,627	0,200	1,51	7,55	3,33	10,92
64	İzmit & 1999	4107&N-S	5,8	305	0,347	0,323	0,062	1,51	7,55	3,33	10,92
65	Karlıova-Bingöl & 2020	1206&E-W	5,7	356	0,041	0,058	0,025	—	—	26,58	—
66	Karlıova-Bingöl & 2020	12066N-S	5,7	356	0,051	0,066	0,020	—	—	26,58	—
67	Urla-İzmir & 2003	3502&E-W	5,7	270	0,037	0,038	0,009	33,21	34,57	37,47	39,14
68	Urla-İzmir & 2003	3502&N-S	5,7	270	0,080	0,062	0,011	33,21	34,57	37,47	39,14
69	Karlıova-Bingöl & 2020	1206&E-W	5,6	356	0,064	0,072	0,012	—	—	24,27	—
70	Karlıova-Bingöl & 2020	1206&N-S	5,6	356	0,061	0,040	0,006	—	—	24,27	—
71	Gölyaka-Düzce & 1999	1401&E-W	5,5	294	0,049	0,037	0,007	44,21	—	44,21	52,22
72	Gölyaka-Düzce & 1999	1401&N-S	5,5	294	0,058	0,036	0,006	44,21	—	44,21	52,22

orta periyodlara doğru artarak ilerlediği, nispeten orta sayılabilecek periyodlarda belirli bir seviyede sabit kalarak plato oluşturduğu ve belirli bir periyottan sonra nispeten uzun periyotlarda azalarak devam ettiği gözlenmiştir. Bu durum referans alınarak, TBDY (2018)'e göre ZC ve ZD zemin sınıflarında bulunan ve $\xi=0,05$ sönüm oranına sahip yapılar için önerilen idealize edilmiş enerji spektrumlarının genelleştirilmiş hali Şekil 12'de verilmiştir. Bu genelleştirilmiş temel enerji spektrumu yerel zemin koşullarına ve yapı doğal periyodu T 'ye bağlı olarak Eş. 11 ile ilişkili ifade edilebilir. Söz konusu spektruma ait karakteristik parametreler Tablo 4'te sunulmuştur.

$$E_i^{0,1g} = \left\{ \begin{array}{l} A + (B - A) * \left(\frac{T}{T_A} \right) \quad T < T_A \\ B \quad T_A \leq T \leq T_B \\ B * \left(\frac{T_B}{T} \right)^k \quad T_B < T \end{array} \right\} \quad (11)$$

Temel elastik giren enerji spektrumundan faydalanarak, herhangi bir deprem ivme kaydı altında sisteme giren maksimum elastik enerji miktarını elde etmek için Dindar vd. [17] tarafından önerilen Eş. 12 kullanılabilir.

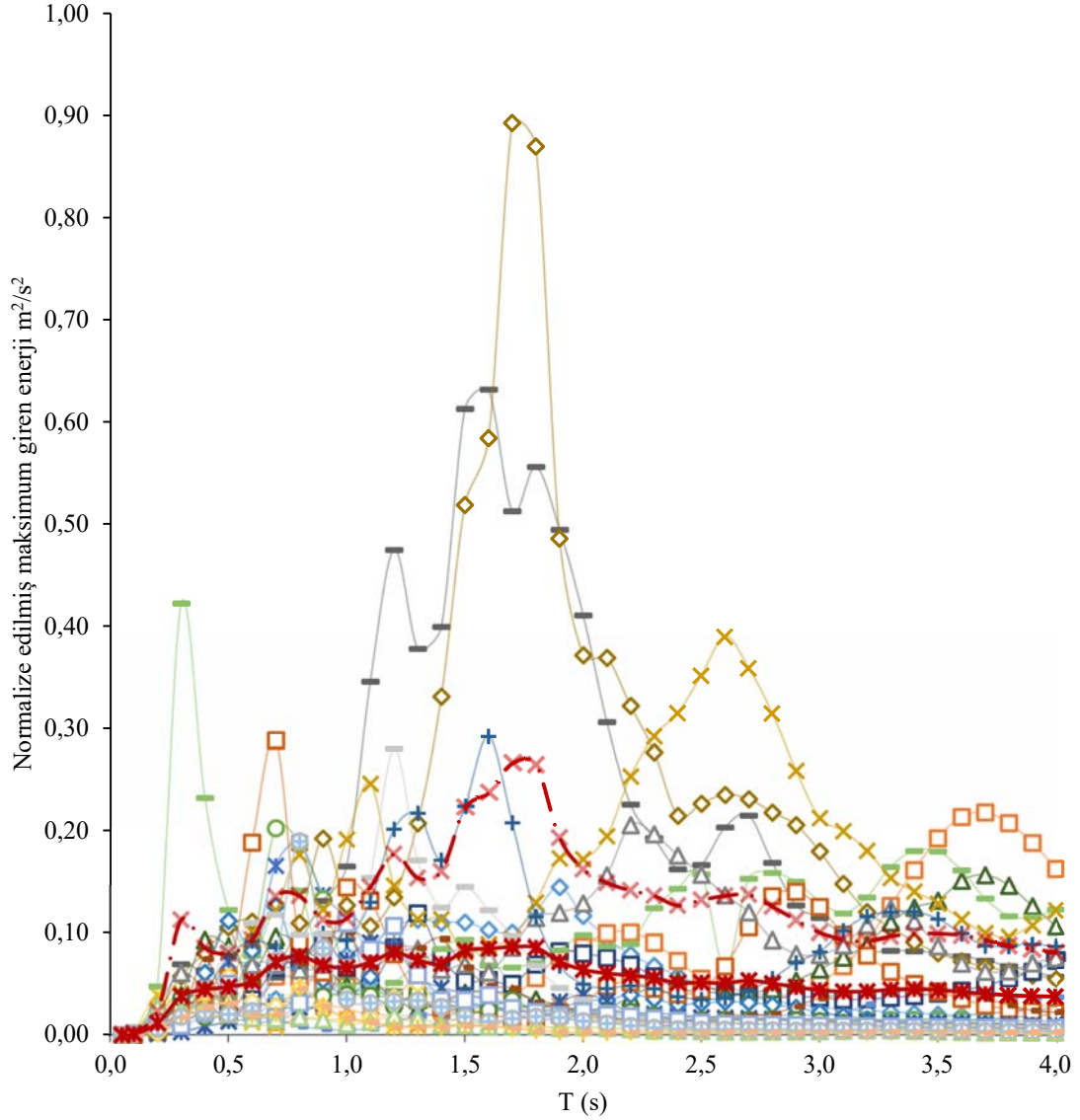


Şekil 7. ZC zemin sınıfı için ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtlarına ait normalize edilmiş elastik giren enerji spektrumları
(Normalized elastic input energy spectra of scaled earthquake acceleration records for ZC soil class)

$$E_I^{PGA} = \left(\frac{PGA}{0,1}\right)^2 * E_I^{0,1g} * m \quad (12)$$

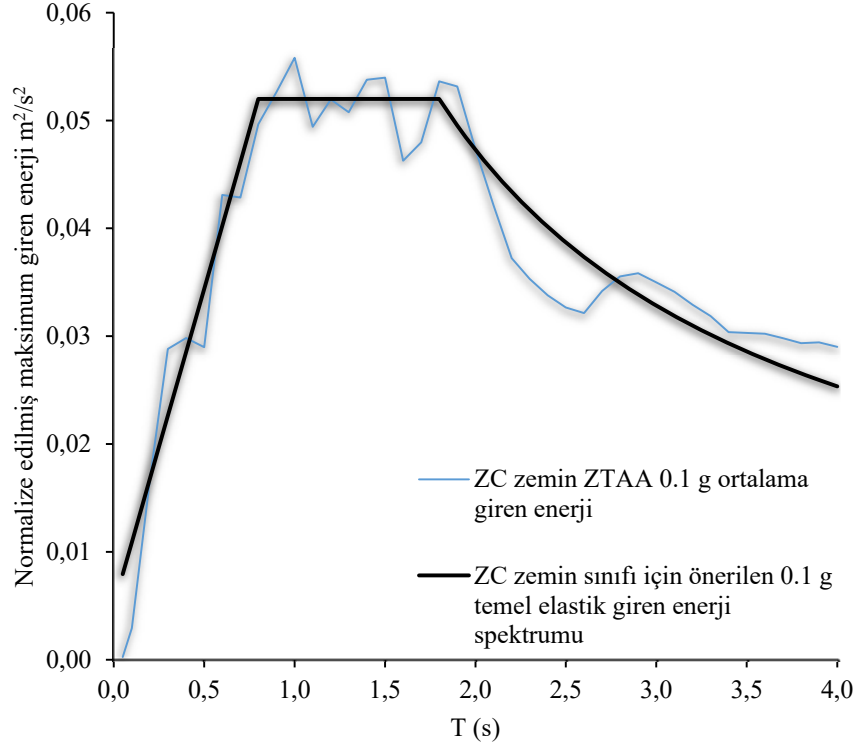
Burada E_I^{PGA} maksimum elastik giren enerjisi, $E_I^{0,1g}$ temel elastik giren spektral enerjisi, PGA seçilen deprem ivme kaydının en büyük ivmesini ve m 'de yapı kütlelerini temsil etmektedir. Çalışma kapsamında; önerilen temel elastik giren enerji spektrumuna dayalı enerji spektrumunun etkinliği, ölçeksiz gerçek deprem ivme kayıtlarının ZTA analizlerine dayalı giren enerji spektrumları, Dindar

vd. [17] ve Deccani ve Mollaioli [8] tarafından önerilen elastik giren enerji spektrumu çözümleri ile karşılaştırılarak irdelenmiştir. Karşılaştırılma aşamasında zemin sınıflarının $V_{s(30)}$ denkliği göz önünde tutulmuştur. Bu karşılaştırmaya ait 8 deprem yer hareketi için elde edilen enerji spektrumları Şekil 13-Şekil 20 arasında verilmiştir. Şekil 13-Şekil 16'da ZC zemin sınıfına ait dört farklı deprem ivme kaydının normalize edilmiş giren enerji spektrumları, Şekil 17-Şekil 20'de ise ZD zemin sınıfına ait dört farklı deprem ivme kaydının normalize edilmiş giren enerji spektrumları sunulmuştur.

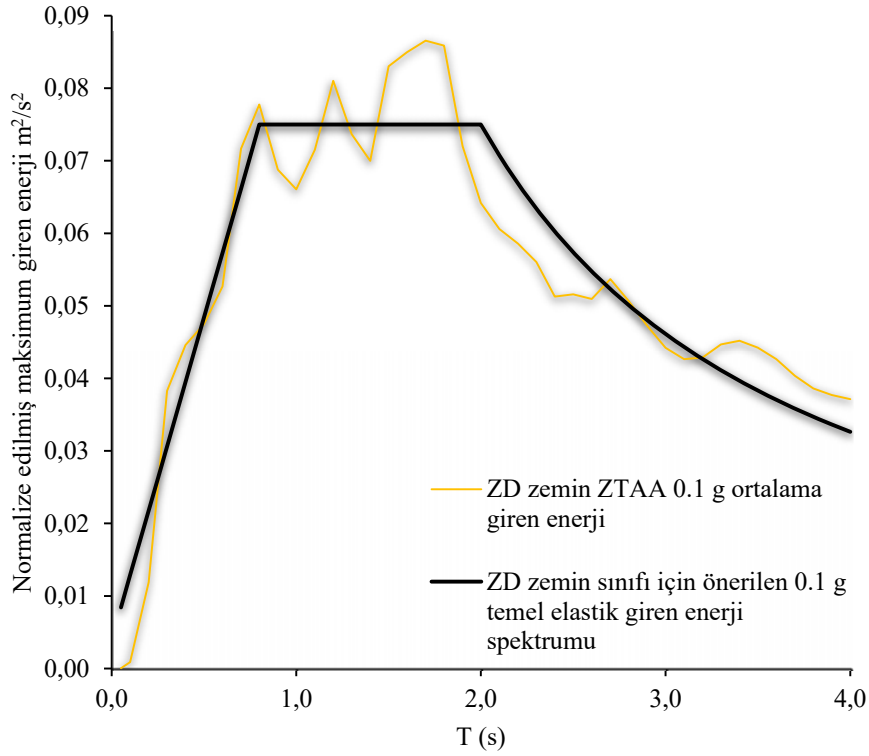


—◇— Gölçük-İzmit & 1999 8101&EW	—□— Gölçük-İzmit & 1999 8101&NS
—△— Gölçük-İzmit & 1999 1404&EW	—×— Gölçük-İzmit & 1999 1404&NS
—×— Gölçük-İzmit & 1999 3403&EW	—○— Gölçük-İzmit & 1999 3403&NS
—■— Gölçük-İzmit & 1999 1612&EW	—◇— Gölçük-İzmit & 1999 1612&NS
—□— Düzce&1999 8101&EW	—△— Düzce&1999 8101&NS
—×— Düzce&1999 1401&EW	—×— Düzce&1999 1401&NS
—■— Düzce&1999 1406&EW	—○— Düzce&1999 1406&NS
—◇— Erzurum&1983 2503&EW	—□— Erzurum&1983 2503&NS
—△— Adana&1998 0105&EW	—×— Adana&1998 0105&NS
—×— Orta-Çankırı&2000 1801&EW	—○— Orta-Çankırı&2000 1801&NS
—+— İzmit&1999 4107&EW	—■— İzmit&1999 4107&NS
—■— Karlıova-Bingöl&14 Haziran 2020 1206&EW	—◇— Karlıova-Bingöl&14 Haziran 2020 1206&NS
—□— Urla-İzmir&2003 3502&EW	—△— Urla-İzmir&2003 3502&NS
—○— Karlıova-Bingöl&15 Haziran 2020 1206&EW	—×— Karlıova-Bingöl&15 Haziran 2020 1206&NS
—+— Gölyaka-Düzce&1999 1401&EW	—□— Gölyaka-Düzce&1999 1401&NS
—×— ZD zemin ZTAA 0.1 g ortalama giren enerji	—×— Ortalama+S. Sapma

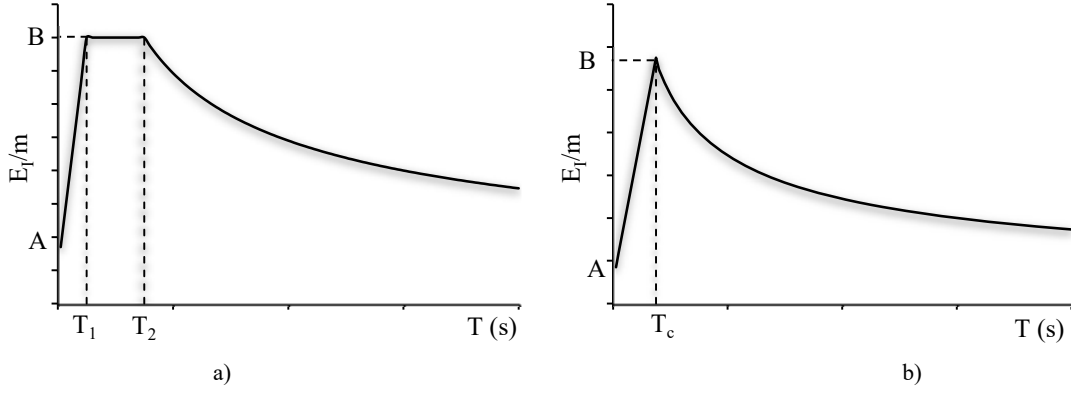
Şekil 8. ZD zemin sınıfı için ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtlarına ait normalize edilmiş elastik giren enerji spektrumları (Normalized elastic input energy spectra of scaled earthquake acceleration records for ZD soil class)



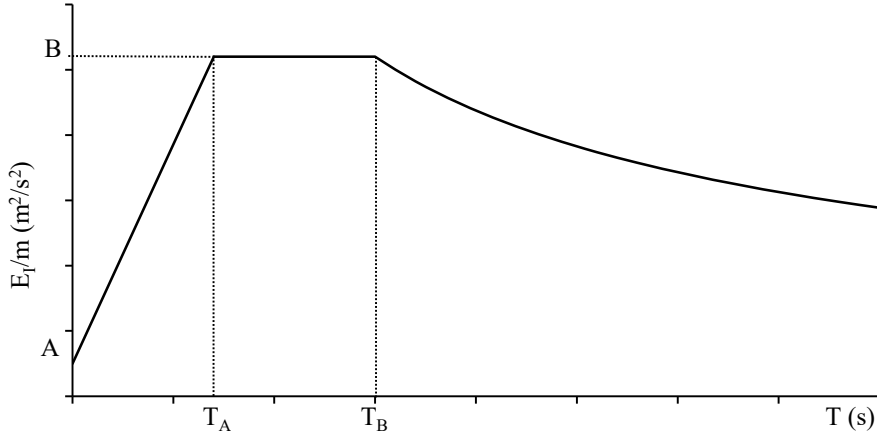
Şekil 9. ZC zemin sınıfı için 0,1 g ortalama elastik giren enerji ve önerilen 0,1 g temel elastik giren enerji spektrumu (Spectrum of 0.1 g average elastic input energy and recommended 0.1 g fundamental elastic input energy for ZC soil class)



Şekil 10. ZD zemin sınıfı için 0,1 g ortalama elastik giren enerji ve önerilen 0,1 g temel elastik giren enerji spektrumu (Spectrum of 0.1 g average elastic input energy and recommended 0.1 g fundamental elastic input energy for ZD soil class)



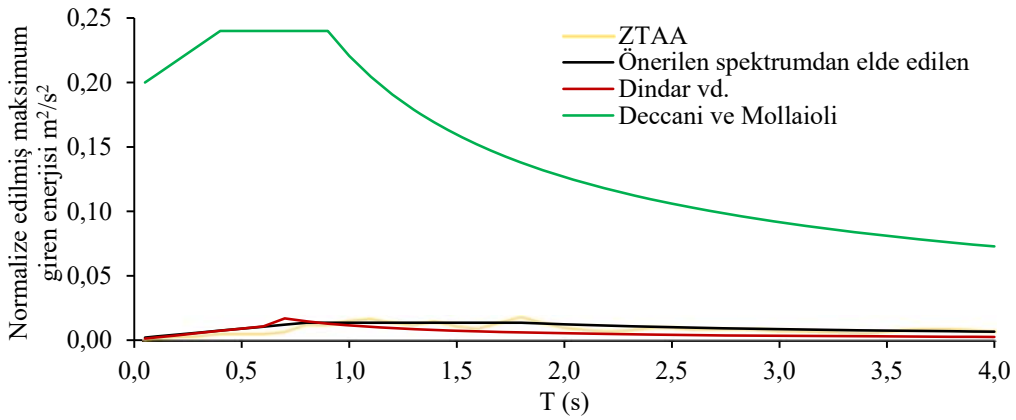
Şekil 11. Temel giren enerji spektrum örnekleri (Example of fundamental input energy spectrum)



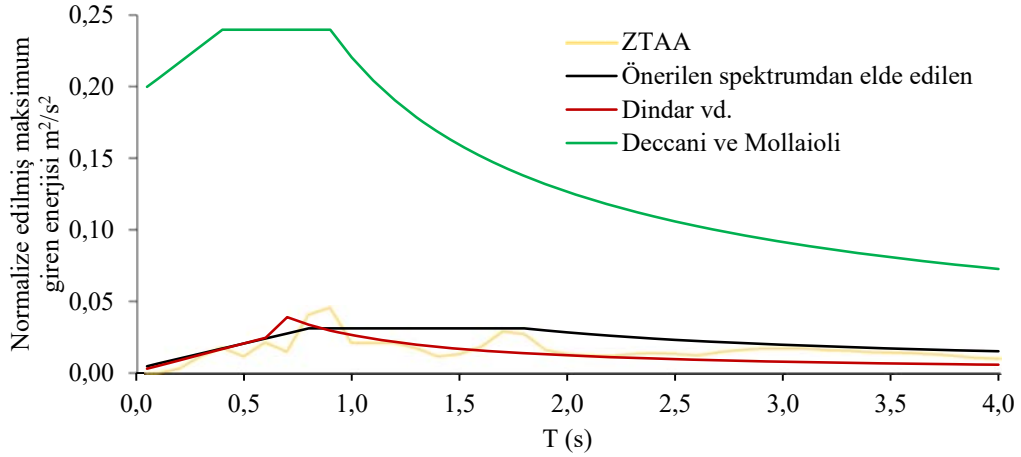
Şekil 12. 0,1 g'lik önerilen temel giren enerji spektrum (Recommended fundamental input energy spectrum of 0.1 g)

Tablo 4. Spektrum karakteristik parametreleri (Spectrum characteristic parameters)

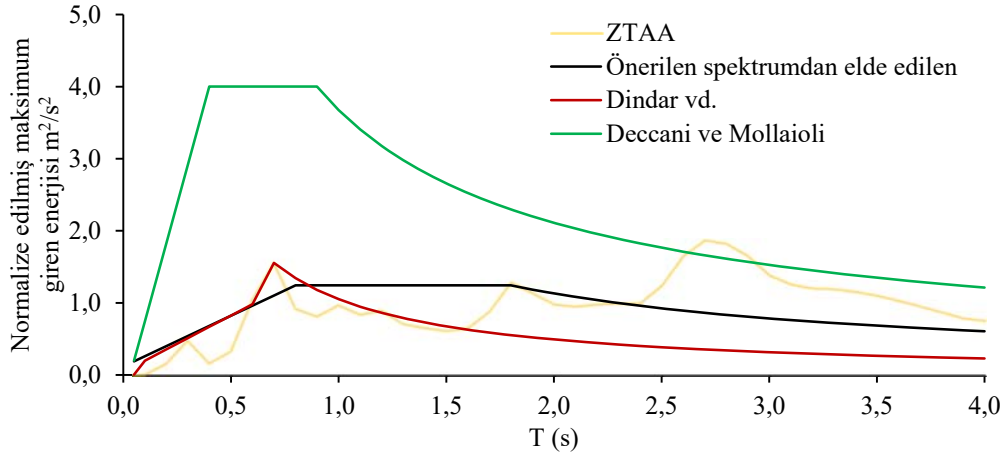
	ZC Zemin Sınıfı	ZD Zemin Sınıfı
A (m ² /s ²)	0,008	0,0085
B (m ² /s ²)	0,052	0,075
T _A (s)	0,8	0,8
T _B (s)	1,8	2,0
k	0,9	1,2



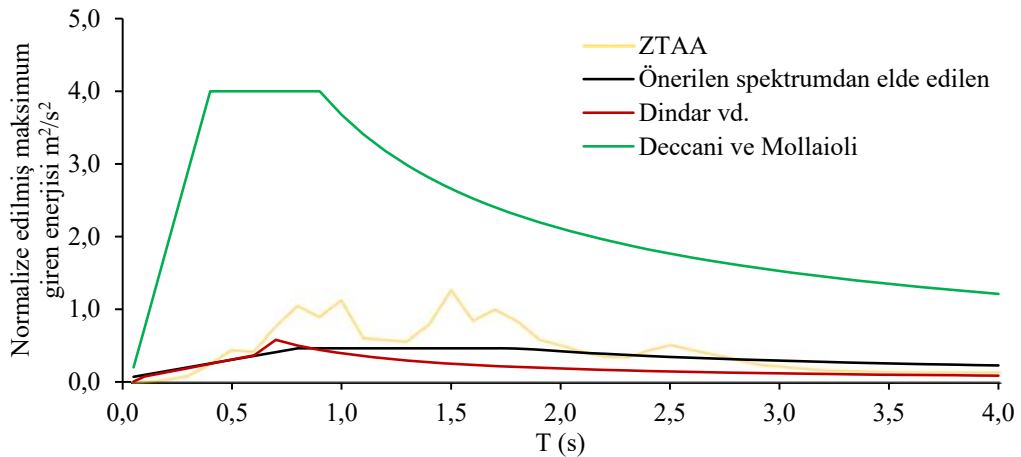
Şekil 13. Normalize edilmiş elastik maksimum giren enerji spektrum eğrileri (ZC zemin sınıfı Çanakkale-1983 1014&EW deprem ivme kaydı)
(Normalized elastic maximum incoming energy spectrum curves (ZC soil class Çanakkale-1983 1014&EW earthquake acceleration record))



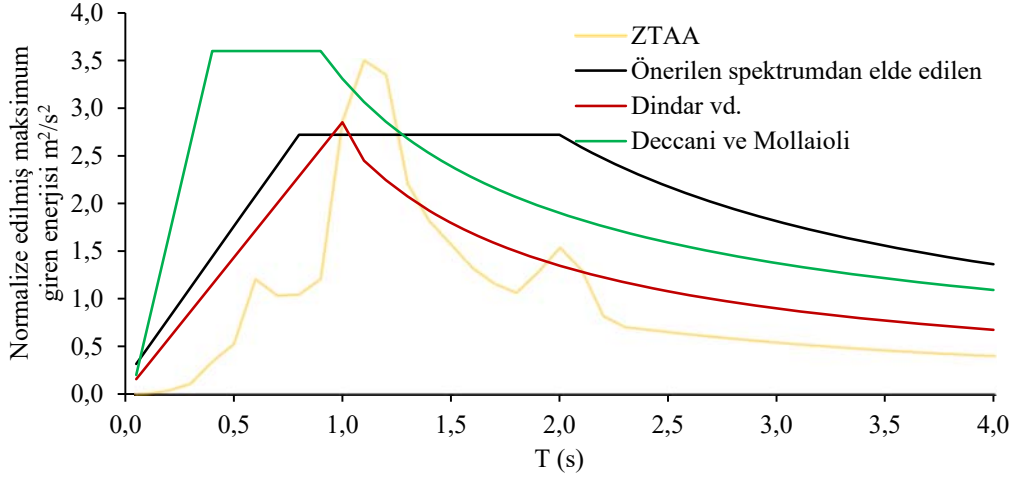
Şekil 14. Normalize edilmiş elastik maksimum giren enerji spektrum eğrileri (ZC zemin sınıfı Doğanşehir/Malatya&Mayıs 1986 0203&EW deprem ivme kaydı) (Normalized elastic maximum incoming energy spectrum curves (ZC soil class Doğanşehir/Malatya&Mayıs 1986 0203&EW earthquake acceleration record))



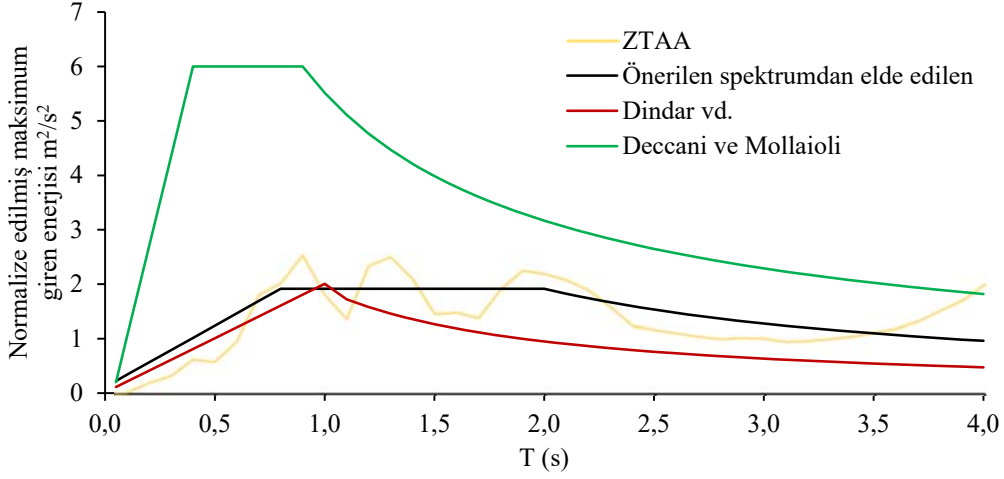
Şekil 15. Normalize edilmiş elastik maksimum giren enerji spektrum eğrileri (ZC zemin sınıfı Otlukbeli-Erzincan&1992 2402&EW deprem ivme kaydı) (Normalized elastic maximum incoming energy spectrum curves (ZC soil class Otlukbeli-Erzincan&1992 2402&EW earthquake acceleration record))



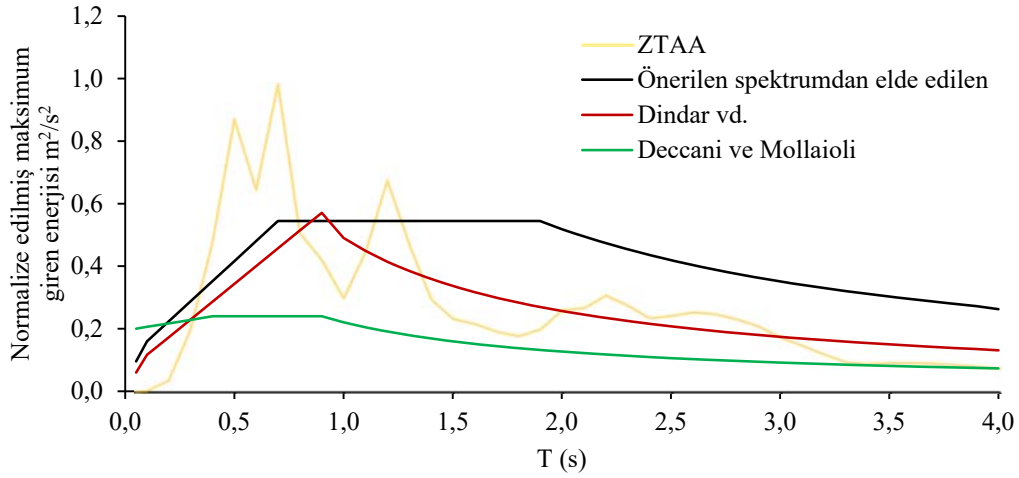
Şekil 16. Normalize edilmiş elastik maksimum giren enerji spektrum eğrileri (ZC zemin sınıfı Sivrice-Elazığ 2020 2308&EW deprem ivme kaydı) (Normalized elastic maximum incoming energy spectrum curves (ZC soil class Sivrice-Elazığ 2020 2308&EW acceleration record))



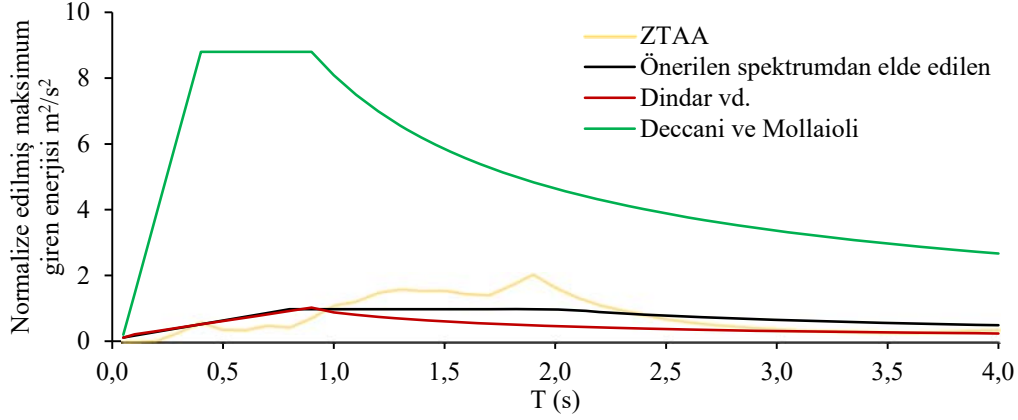
Şekil 17. Normalize edilmiş elastik maksimum giren enerji spektrum eğrileri (ZD zemin sınıfı Düzce&1999 8101&EW deprem ivme kaydı) (Normalized elastic maximum incoming energy spectrum curves (ZD soil class Düzce&1999 8101&EW earthquake acceleration record))



Şekil 18. Normalize edilmiş elastik maksimum giren enerji spektrum eğrileri (ZD zemin sınıfı İzmit&1999 4107&NS deprem ivme kaydı) (Normalized elastic maximum incoming energy spectrum curves (ZD soil class İzmit&1999 4107&NS earthquake acceleration record))



Şekil 19. Normalize edilmiş elastik maksimum giren enerji spektrum eğrileri (ZD zemin sınıfı Adana&1998 0105&EW deprem ivme kaydı) (Normalized elastic maximum incoming energy spectrum curves (ZD soil class Adana&1998 0105&EW earthquake acceleration record))



Şekil 20. Normalize edilmiş elastik maksimum giren enerji spektrum eğrileri (ZD zemin sınıfı Gölcük-İzmit & 1999 8101&EW deprem ivme kaydı)

(Normalized elastic maximum incoming energy spectrum curves (ZD soil class Gölcük-İzmit & 1999 8101&EW earthquake acceleration record))

Önerilen spektrumdan edilen sonuçlar ZTA çözümleri ile karşılaştırıldığında, genel olarak uyumlu sonuçlar vermektedir. Önerilen spektrumdan edilen sonuçlar, Dindar vd. [17] tarafından önerilen spektrumdan elde edilen çözümler ile karşılaştırıldığında, kısa periyotlarda birbirine oldukça yakın değerler verirken, uzun periyotlarda daha büyük enerji değerleri vermektedir. Deccani ve Mollaioli [8] tarafından önerilen spektrumdan elde edilen çözümler ile karşılaştırıldığında, bazı depremler için yakın sonuçlar elde edilirken çoğunlukla farklı sonuçlar çıkmaktadır. Bu farklılığın ana sebebi olarak önerilen denklemlerin dayandığı esasların farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada önerilen denklemde deprem yer hareketinin sadece en büyük ivme değeri dikkate alınırken ve Deccani ve Mollaioli [8] tarafından önerilen denklemde depremin magnitudü, deprem odak noktasına yakınlığı ve deprem tehlike faktörü dikkate alınmaktadır. Sözü geçen üç yöntemin ZTA çözümlerine uyumlulukları değerlendirildiğinde, deprem karakteristiklerine göre farklılık göstermektedir. Genel anlamda çalışma kapsamında önerilen temel elastik giren enerji spektrumunun uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, yapının servis ömrü boyunca meydana gelebilecek depremlerin taleplerini (giren enerjilerini) karşılayacak şekilde boyutlandırılmak oldukça önemlidir. Enerji esaslı değerlendirmede de, yapı sistemine giren enerjinin pratik olarak belirlenmesi üzerine birçok çalışmalar yapılmış ve birçok giren enerji spektrumları önerilmiş ve hâlâ geliştirilmektedir. Yapılan bu çalışmada, TBDY (2018)'e göre zemin sınıfı ZC ve ZD olan yapı sistemlerine giren elastik enerji miktarının hızlı bir şekilde belirlenmesinde kullanılabilecek temel elastik giren enerji spektrumu önerilmiştir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında, Türkiye'de özellikle Kuzey ve Doğu Anadolu fay hattı üzerinde meydana gelmiş ve orta ve şiddetli deprem ivme kayıtları seçilmiş ve ölçeklendirerek ZTA analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerden yola çıkılarak deprem ivme kayıtlarının enerji spektrumları elde edilmiş ve ortalama enerji spektrumdan yola çıkarak deprem etkisinde yapı sistemlerine giren enerjinin tahmininde kullanılabilecek temel enerji grafiği elde edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Deprem etkisi altında sisteme giren enerji miktarı zemin sınıfından etkilenmektedir. ZC zemin sınıfını için ortalama giren enerji spektrumunun kütle göre normalize değeri $0,0558 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ve ZD zemin sınıfını için aynı değer $0,0866 \text{ m}^2/\text{s}^2$ elde edilmiştir. ZD zemin sınıfında sisteme giren enerji değeri artmıştır.

- Yapılara giren enerjinin kısa periyotlardan orta periyotlara doğru artarak ilerlediği, orta periyotlarda belirli bir seviyede sabit enerjide kaldığı ve uzun periyotlarda azalarak devam ettiği gözlenmiştir.
- Yapı sistemi periyodunun deprem altında yapıya giren enerjiyi oldukça etkilemektedir.
- Önerilen temel elastik giren enerji spektrumuna dayalı elde edilen enerji değerlerinin ZTA çözümlerinden elde edilen değerlere yakın ve bir miktar koruyucu tarafta kaldığı görülmüştür.

Genel anlamda önerilen spektrum enerji esaslı ön değerlendirme aşamasında sisteme elastik giren enerjinin tahmin edilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca önerilen denklemde yapı sistemine giren enerjinin belirlenmesinde direkt yer hareketinin en büyük ivme değerini dikkate aldığından oldukça pratik bir tahmin sunmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Housner G. W., Limit design of structures to resist earthquakes, The First World Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, California, 12-15 June 1956.
2. Akiyama H., Earthquake-resistant limit-state design for buildings. University of Tokyo Press, 1985.
3. Kuwamura H., Galambos T.V., Earthquake load for structural reliability, Journal of Structural Engineering, 115 (6), 1446-1462, 1989.
4. Uang, C. M., Bertero, V.V., Evaluation of seismic energy in structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 77-90, 1990.
5. Fajfar, P., Vidic, T., Consistent inelastic design spectra: Strength and displacement, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23, 507-521, 1994.
6. Fajfar, P., Vidic, T., Consistent inelastic design spectra: Hysteretic and input energy, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23, 523-537, 1994.
7. Sucuoğlu H., Nurtuğ A., Earthquake ground motion characteristics and seismic energy dissipation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24 (9), 1195-1213, 1995.
8. Decanini, L.D., Mollaioli, F., Formulation of elastic earthquake input energy spectra, Earthq. Eng. Struct. Dyn., 27 (12), 1503-1522, 1998.
9. Decanini, L.D., Mollaioli, F., An energy-based methodology for the assessment of seismic demand, Soil Dyn. Earthq. Eng., 21 (2), 113-137, 2001.
10. Manfredi, G., Evaluation of seismic energy demand, Earthq. Eng. Struct. Dyn., 30 (4), 485-499, 2001.
11. Chai, Y. H., Incorporating low-cycle fatigue model into duration-dependent inelastic design spectra, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34, 83-96, 2004.
12. Leelataviwat, S., Goel, S.C., Stojadinovic, B., Energy-based seismic design of structures using yield mechanism and target drift, J. Struct. Eng. Eng., 128 (8), 1046-1054, 2002.

13. Benavent-Climent, A., Pujades, L.G., López-Almansa, F. Design energy input spectra for moderate-seismicity regions, *Earth. Eng. Struct. Dyn.*, 31 (5), 1151-1172, 2002.
14. Benavent-Climent, A., López-Almansa, F., Bravo-González, D.A., Design energy input spectra for moderate-to-high seismicity regions based on Colombian earthquakes, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 30 (11), 1129-1148, 2010.
15. Amiri, G.G., Abdollahzadeh, G. R., Amiri J. V., Design elastic input energy spectra based on Iranian earthquakes, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (6), 635-646, 2008.
16. López-Almansa, F., Yazgan, A.U., Benavent-Climent, A., Design energy input spectra for high seismicity regions based on Turkish registers, *Bull. Earthq. Eng. Eng.*, 11 (4), 885-912, 2013.
17. Dindar, A.A., Yalçın, C., Yüksel, E., Özkaynak H., Büyüköztürk, O., Development of earthquake energy demand spectra, *Earthq. Spectra*, 31 (3), 1667-1689, 2015.
18. Alıcı, F.S., Sucuoğlu, H., Prediction of input energy spectrum: attenuation models and velocity spectrum scaling, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 45 (13), 2137-2161, 2016.
19. Alıcı, F.S., Sucuoğlu, H., Elastic and inelastic near-fault input energy spectra, *Earthq. Spectra*, 34 (2), 611-637, 2018.
20. Quinde, P., Reinoso, E., Terán-Gilmore, A., Inelastic seismic energy spectra for soft soils: Application to Mexico City, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 89, 198-207, 2016.
21. Güllü, A., Yüksel, E., Yalçın, C., Anıl Dindar, A., Özkaynak, H., Experimental verification of the elastic input energy spectrum and a suggestion, *Proceedings of the Interdisciplinary Perspectives for Future Building Envelopes*, Istanbul, Turkey, May, 2017.
22. Güllü, A., Yüksel, E., Yalçın, C., Anıl Dindar, A., Özkaynak, H., Büyüköztürk, O., An improved input energy spectrum verified by the shake table tests, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 48 (1), 27-45, 2019.
23. Gharehbaghi, S., Gandomi, A.H., Achakpour, S. and Omidvar, M.N., A hybrid computational approach for seismic energy demand prediction, *Expert Syst. Appl.*, 110, 335-351, 2018.
24. Zhou, Y., Song, G., Huang, S. and Wu, H., Input energy spectra for self-centering SDOF systems, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 121, 293-305, 2019.
25. Merter, O., A study on elastic input energy spectra for actual earthquake ground motions at stiff soil sites, *COMPdyn 2019, 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.) Crete, Greece, 24-26 June 2019.*
26. Merter, O., An investigation on the maximum earthquake input energy for elastic SDOF systems, *Earthq. Struct.*, 16 (4), 487-499, 2019.
27. Karimzadeh, S., Ozsarac, V., Askan, A., Erberik, M.A., Use of simulated ground motions for the evaluation of energy response of simple structural systems, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 123, 525-542, 2019.
28. Shargh, G. S., Barati, R., Estimation of inelastic seismic input energy, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142, 106505, 2021.
29. Dedeoğlu İ. Ö., Calayır Y., Evaluation of structural response and input energies of SDOF systems subjected to earthquake records scaled according to different design spectra, *DUJE*, 12 (2), 411-430, 2021.
30. Cheng, Y., Wang, J., Zhang, Y., & Mollaioli, F., Empirical correlations between the spectral input energy and spectral acceleration, *Journal of Earthquake Engineering*, 1-20, 2022.
31. Değer Z., Taşkın Kaya G., Sütçü F., Investigation of the energy dissipation capacity of RC shear walls using meta-modeling methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (4), 2311-2324, 2023.
32. Zhang, H., Zhao, Y. G., Ochiai, T., Fang, Y., Relationship between SDOF-Input-Energy and Fourier Amplitude Spectral Amplification Ratios, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2023.
33. Zhang, H., Zhao, Y. G., Ge, F. W., Fang, Y., & Ochiai, T., Estimation of input energy spectrum from pseudo-velocity response spectrum incorporating the influences of magnitude, distance, and site conditions, *Engineering Structures*, 274, 115165, 2023.
34. Güllü, A., Çalım, F., & Yüksel, E., Estimation of the story response parameters through the seismic input energy for moment-resisting frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 107636, 2023.
35. Ucar, T. (2023). Distribution of near-fault input energy over the height of RC frame structures and its formulation. *Structural Engineering and Mechanics*, 85 (1), 55-64, 2023.
36. Chopra A. K., *Dynamics of structures = Theory and applications to earthquake engineering*. New York, NY: Prentice-Hall, 1995.
37. Uang, C. M., Bertero, V. V., Use of energy as a design criterion in earthquake resistant design, *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, UCB/EERC-88/18*, 1988.
38. AFAD. Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, <https://tadas.afad.gov.tr/>. Acces time; February, 2021.
39. TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Türk Standartları Enstitüsü, 2018.
40. MATLAB, (R2018a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2018