



Comparison of input energy and structure response in seismically isolated steel frames

Ali Erdem Çerçevik*^{ID}, Osman Sevindik^{ID}

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bilecik Şeyh Edebali University, 11100, Bilecik, Türkiye

Highlights:

- The effectiveness of using energy-based methods in building design
- Comparison of input energy and building responses and use of input energy in seismic design
- Development of a graphical method for optimum isolation parameters

Keywords:

- Input Energy
- Seismic Isolation
- Structure Response
- Steel Structures

Article Info:

Research Article
Received: 18.09.2024
Accepted: 12.10.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1551655

Correspondence:

Author: Ali Erdem Çerçevik
e-mail:
erdem.cercevik@bilecik.edu.tr
phone: +90 228 214 1419

Graphical/Tabular Abstract

Energy-based building design represents one of the most innovative approaches in structural engineering. The fundamental principle of this method is that the energy imparted to the structure during an earthquake is dissipated through the structural system itself. Properly designed energy dissipation ensures that the structure can withstand seismic events without damage. When the building design is appropriate, it is also possible to reduce the input energy; however, the initial step is to accurately determine the input energy. This study examines the variations in input energy of a seismically isolated steel frame. Lead-core rubber bearings were employed as the seismic isolation system and applied to the prepared superstructure models. The isolation devices were modeled using the isolation period (T_0) and the ratio of characteristic strength to the structural weight (Q/W). Different isolation combinations were generated for five distinct Q/W ratios, with 20 T_0 parameters calculated at equal intervals between 2 and 4 seconds for each Q/W ratio. A total of 3300 nonlinear time-history analyses were conducted using the generated isolation parameters together with 11 scaled ground motions. The seismic input energy and the corresponding structural responses under different isolation configurations were compared. Based on the results, optimum isolation parameters were identified through the generated graphs, and their comparison with the input energy is presented in Figure A. The findings demonstrate that the isolation parameters identified in Figure A(a), which yield the minimum floor accelerations, are consistent with those in Figure A(b) that minimize the input energy.

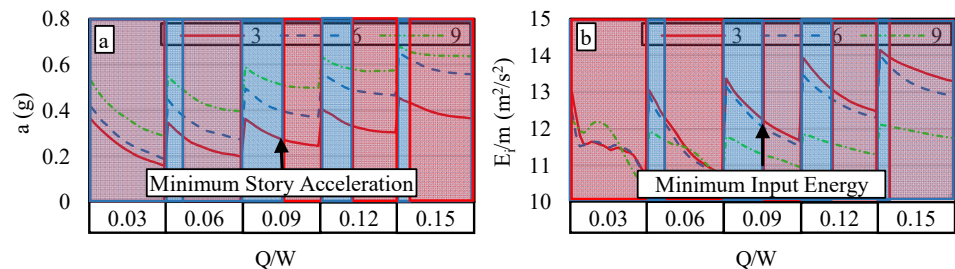


Figure A. Determination of optimum isolation parameters by graphical method (a) and comparison with input energy (b)

Purpose: Comparison of input energy and structural responses in a seismically isolated structure and investigation of the feasibility of input energy based design of a seismically isolated structure.

Theory and Methods: 3, 6 and 9 storey steel frames were prepared and lead core seismic isolation systems were installed at the ground story. The seismic isolation parameters (period and characteristic strength) were varied while keeping the structure properties constant. 11 scaled different ground motions were analyzed in time history. Sample frames were modelled in SAP2000 and iterative solutions were obtained with Matlab software. Optimum isolation parameters were determined using the graphs produced using the obtained results and compared with the input energy.

Results: In the results of the analyses, according to different models, it was determined that the input energy the 9-storey and 3-storey building was the highest and the lowest, respectively. In addition, it was found that the changes in the input energy and roof acceleration are in linear correlation with each other, and the input energy and isolator displacement are in inverse correlation.

Conclusion: The changes caused by the seismic isolation parameters on the input energy and structure responses were revealed. In this way, the feasibility of energy-based seismic isolation design was showed.



Sismik yalıtımlı çelik çerçevelerde giren enerji ve yapı tepkilerinin karşılaştırılması

Ali Erdem Çerçevik*^{ID}, Osman Sevindik^{ID}

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 11100, Bilecik, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bina tasarımında enerji tabanlı yöntemlerin etkinliği
- Giriş enerjisi ve bina tepkilerinin karşılaştırılması ve sismik tasarımda giriş enerjisinin kullanımı
- Optimum izolasyon parametreleri için grafiksel bir yöntemin geliştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 18.09.2024

Kabul: 12.10.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1551655

Anahtar Kelimeler:

Giren Enerji,
sismik yalıtım,
yapı tepkileri,
çelik yapılar

ÖZ

Deprem kaynağında oluşan büyük enerji, etki bölgesindeki yapılara ulaşarak hasara neden olmaktadır. Bu hasarların azaltılabilmesi için yapı elemanlarına ulaşan enerjinin en aza indirilmesi gerekmektedir. Yapıların taban katına yerleştirilen sismik yalıtım sistemleri ile zeminden ayırmak, yapı elemanlarına ulaşan enerjiyi büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışmada 3, 6 ve 9 katlı sismik yalıtımlı çelik çerçevelerin farklı sismik izolatör parametrelerine göre yapıya giren enerji değişimleri araştırılmıştır. Sismik yalıtım sistemi kurşun çekirdekli kauçuk izolatör seçilmiştir. Üst yapı modelleri doğrusal, yalıtım sistemleri ise doğrusal olmayan malzeme ile modellenmiştir. Sismik yalıtım tasarımında izolasyon periyodu ve karakteristik dayanım kullanılarak 100 farklı yalıtım sistemi üretilmiştir. Üretilen sismik yalıtım sistemleri farklı kat adetlerine sahip üst yapı modellerine uygulanarak TBDY 2018'e uygun ölçeklendirilmiş 11 farklı ivme kaydı ile 3300 zaman tanım alanında analiz yapılmıştır. Yapısal analizlerin yapıldığı SAP2000 programını tekrarlı çalıştırmak için Matlab yazılımında bir program geliştirilmiştir. Farklı yalıtım parametreleri ile yapılan analizler sonucu yapıya giren enerji ve yapı tepkileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar giren enerji ile çatı katı ivmeleri, taban kesme kuvvetleri ile doğru orantılı, yalıtım deplasmanı ve sönüm oranı ile ters orantılı değiştiğini göstermektedir. Ayrıca üretilen grafikler yardımı ile optimum yalıtım parametreleri belirlenmiştir. Sonuç olarak sismik yalıtım elemanlarının modellenmesinde giren enerjinin kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur.

Comparison of input energy and structure response in seismically isolated steel frames

H I G H L I G H T S

- The effectiveness of using energy-based methods in building design
- Comparison of input energy and building responses and use of input energy in seismic design
- Development of a graphical method for optimum isolation parameters

Article Info

Research Article

Received: 18.09.2024

Accepted: 12.10.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1551655

Keywords:

Input energy,
seismic isolation,
structure response,
steel structures

ABSTRACT

The huge energy generated in the earthquake source reaches the structures in the impact area and causes damage. In order to reduce the damage, the energy reaching the structural elements must be minimized. Separating the structures from the ground with seismic isolation systems placed on the ground floor greatly reduces the energy reaching the structural elements. In this study, the energy changes entering the structure according to different seismic isolator parameters of 3, 6 and 9-storey seismic isolated steel frames were investigated. Lead-core rubber isolator was selected as the seismic isolation system. The superstructure models are modeled with linear materials, while the isolation systems are modeled with non-linear materials. 100 different isolation systems were produced using the isolation period and characteristic strength in the seismic isolation design. The produced seismic isolation systems were applied to superstructure models with different stories and a total of 3300 time history analyses were performed with 11 different acceleration records scaled in accordance with TBEC 2018. A program was developed in Matlab software to repeatedly run the SAP2000 program in which structural analyzes were performed. As a result of the analyses performed with different isolation parameters, the energy entering the structure and the structural responses were compared. The results show that the input energy changes directly proportional to the roof floor accelerations and base shear forces, and inversely proportional to the isolation displacement and damping ratio. Additionally, optimum isolation parameters were determined with the help of the generated graphics. Consequently, it was demonstrated that the input energy can be used in the modeling seismic isolation elements in the future.

1. Giriş (Introduction)

Deprem kuvvetlerinin zeminden yapıya iletilmesi, yapılarda ciddi hasarlara veya yıkıma neden olabilmektedir. Yapının eylemsizliği gereği, deprem hareketi zeminden başlayarak yapıya etki eder. Deprem yüklerine bağlı olarak, yapının taşıma kapasitesi ve sönümleme özellikleri yeteriyse malzemelerin elastik sınırı aşılmaz. Ancak, yüklerin büyük olması veya yapı elemanlarının yetersiz kalması durumunda elastik kapasite aşılabılır. Elastik kapasitenin aşılması ile yapı elemanlarında plastik şekil değişimleri ortaya çıkarak yapı kullanılmaz duruma gelebilir. Bu problemin çözümü için yapısal tasarım ve malzeme konusunda her geçen gün gelişimler ortaya çıkmaktadır. Yaşanan deprem felaketleri sonrasında ortaya çıkan hasarın azaltılabilmesi için kullanılan yöntemlerden bir tanesi de sismik yalıtım sistemleri kullanmaktır [1-3]. Yapının zemin ile iletişimi kesilerek izolatör tarafından yatay yönde şekil değişikliği yapması ve bu sayede yapının elastik sınırlar içinde davranması olası hasarları önlemektedir (Şekil 1). Yatayda sağlanan uzun deplasman sonucu yapının periyodu artmakta, yapıya geçen deprem ivmeleri azalmaktadır [4].

Sismik izolasyon sistemleri sağladığı avantajlı yapı tepkileri sayesinde depreme dayanıklı yapı üretimi açısından önemini her geçen gün artırmaktadır. Deprem mühendisliği araştırmacıları da taban yalıtımlı yapıları deneysel ve sayısal modelleme açısından araştırmaktadırlar. Yapılan çalışmalarda farklı tipte sismik izolatörler tasarlanarak davranışları incelenmiştir [5, 6]. Bu araştırmalar ile taban yalıtımlı bir yapının sayısal modellemesinin gerçekliği ortaya konulmuştur. Karmaşık sismik izolasyon davranışını basitçe modellemek için farklı yaklaşımlar kullanılarak lineer kuvvet-deplasman eğrileri hazırlanmıştır [7, 8]. Ayrıca sismik izolasyonlu yapı tepkilerini inceleyen çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle sismik izolatör ve yapı tasarımını iyileştirmeyi amaçlayan klasik metotlara dayandığı görülmektedir. Sismik izolatörlerin stabilitesi, kat ivmeleri ve şekil değişimleri temel amaçlar olmuştur.

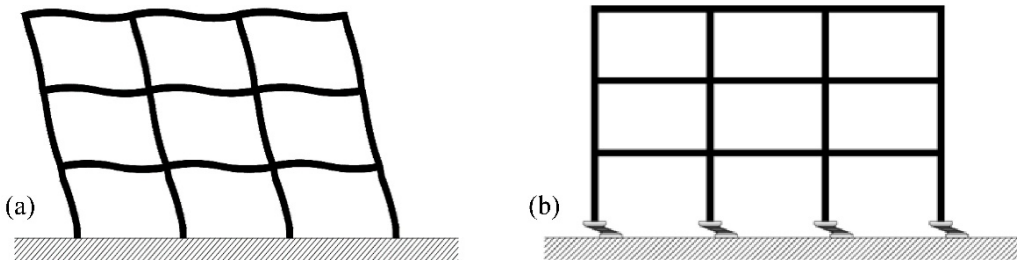
Yapılan çalışmalar taban yalıtımlı bir yapının üç özelliğe sahip olması gerektiği ortaya koymuştur. Bu özelliklerden ilki yalıtım sistemi, aşırı yumuşak kil alanlar dışında, yapısal periyodu ve deprem kuvvetlerine dayanımı artırmak için yeterli yanal esnekliğe sahip olmalıdır. İkincisi yalıtım sistemi, küçük yer hareketlerinde yanal deplasman yapmayacak kadar rijit ancak yüksek ivmeli deprem hareketlerinde büyük yatay deplasmanlar yapabilecek kapasitede olmalıdır. Sonuncusu ise sismik izolatörler yeterli enerji sönümleme kapasitesine sahip olmalı ve deplasmanı uygun bir sınırd tutabilmelidir [9].

Geleneksel yapı tasarımı taşıma gücü hesaplamaya dayanmaktadır. Yapı elemanlarına gelen yüklerin eleman bazında değerlendirilerek tasarım yapılmaktadır. Ancak bu yaklaşım, uygulaması kolay olsa da büyük depremlerin neden olduğu hasarlar büyük yer değiştirmelerden

kaynaklandığı tespit edildiğinden yetersiz görülmektedir. Yapının genelini göz önünde bulunduran yenilikçi yaklaşım ise şekil değişikliğine dayalı yapı tasarımıdır. Bu yöntemin esasına göre yapının deprem performansı, elemanlardaki birim şekil değiştirmelere veya eleman uçlarındaki plastik dönmelere bağlı hasar seviyelerinin tespitine dayanmaktadır. Ayrıca deprem etkisi altındaki yapı elemanlarında oluşan elastik ötesi şekil değiştirmeler hesaplanarak görel kat ötelemeler hesaplanır [10, 11]. Hesaplanan bu parametreler yapının gerçek bir depreme karşı performansının değerlendirilmesini ortaya koyar. Sağladığı avantajlar nedeni ile şekil değişikliğini esas alan tasarım yönetmeliklere de girerek kullanılmaya başlamıştır [12, 13]. Şekil değiştirmeye göre tasarım dayanıma göre yapı hasarlarını tespit etmede daha gerçekçi sonuçlar sunsa da birçok çalışma deprem boyunca oluşan çevrimsel plastik şekil değiştirmeler tarafından tüketilen histeretik enerjinin incelenmesinin avantajlarını ortaya koymuştur [14-16].

Yapılar, güçlü yer hareketleri sırasında zeminden elemanlarına geçen enerjiyi mevcut kapasitelerini kullanarak sönümlerler. Deprem kaynaklı enerji yapı elemanları üzerinden iletilerek yapının tüm bölgelerinde sönümlenir. Bu öngörüğü göz önün alarak giren enerjinin yapı elemanları üzerinde dengeli şekilde sönümlemesi amacına dayanan yöntem, enerji esaslı sismik tasarımın temelini oluşturmaktadır. Yapıya giren enerjinin tamamı esas alındığında yapı elemanlarına dağılımı hesaplandığı ve diğer yöntemlere göre yapılan kabullerin azlığı sebebiyle enerji esaslı yöntemler üstün görülmektedir. Ancak enerji esaslı sismik tasarım enerjinin dağılımı henüz tam olarak hesaplanamadığı için genel bir tasarım yöntemi haline gelmemiştir. Son dönemde birçok araştırmacı enerjinin yapı içinde dağılımı üzerine araştırmalar yapmaktadır [17-21].

Yapıların enerji esaslı sismik tasarımı için öncelikle yapıya deprem tarafından giren enerjinin belirlenmesi gerekmektedir. Giren enerjinin belirlenmesi; depremin büyüklüğü uzaklığı, derinliği, hızı ve yerel zemin değerleri gibi depremin kendi karakteristik özelliklerine bağlı birçok parametreye bağlı olması sebebi kolay bir işlem değildir [22]. Deprem kaynaklı giren enerjinin belirlenmesi için tek serbestlik dereceli sistemlerin enerji esaslı tasarım spektrumu belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır [23-26]. Bu çalışmalar sonrasında gelecekte enerji spektrumları kullanılarak yapı tasarımının yapılacağı değerlendirilmektedir. Ancak giren enerji sadece deprem karakteristiği ve zemin koşullarına bağlı değişen bir parametre olmayıp yapı özelliklerine göre de değişmektedir [27]. Yapısal tasarımın ön plana çıktığı giren enerjinin belirlenmesi ile ilgili yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Yapıların malzeme ve tasarımına bağlı, doğal titreşim periyotları [28], yüksek katlı-sönümleyicili [29], çelik [27], çelik çaprazlı [30] deneysel [31], betonarme perde [32] ve sismik izolasyonlu köprü [33] gibi farklı yönde, karşılaştırmalı giren enerji çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle yapı rijitliği ve deprem karakteristiği değişkenlerinin farklı tip yapılar için araştırıldığı görülmektedir. Ancak sismik izolasyonlu



Şekil 1. Tabana ankastre (a) ve izolasyonlu yapı davranışı (b) (Fixed (a) and isolated structure behavior (b))

yapıların giren enerji seviyelerinin araştırıldığı çalışmalara literatürde karşılaşılamamaktadır.

Giren enerji yapıda oluşan sönüme göre değişim göstermektedir. Yapıların viskoz sönümlerine ek olarak pasif sönümleyici elemanların kullanımı sonucu giren enerjinin azalacağı beklenmektedir. Benzer şekilde sismik izolasyonlu yapıların enerji sönümü üzerine çalışmalar yapılmıştır [33, 34]. Yapılan çalışmalar sismik izolasyonun depremin yapıya ilettiği enerjinin büyük kısmını sönümleyerek üst yapıya iletilecek enerji miktarını düşürdüğünü göstermiştir. Üst yapıya sismik izolasyonun sönümleyemeyerek ulaştırdığı enerjinin azalması ile üst yapıda plastik şekil değişimlerinin azaldığı ortaya konulmuştur. Sismik izolasyonlu yapılara giren enerjiyi etkileyen faktörler bu çalışmanın temel konusunu oluşturmaktadır.

Sismik izolasyon tasarımı genel olarak izolatör deplasmanı, eşdeğer sönüm oranı ve efektif periyot parametreleri kullanılarak iteratif bir metodoloji ile yapılmaktadır. Bu çalışmada tabanına kurşun çekirdek yerleştirilmiş moment aktaran çelik bir kayma çerçevesi kullanılarak yapıya giren enerji miktarları araştırılmıştır. Sismik izolasyon sistemi doğrusal olmayan tipte modellenmiş gerçek ivme kayıtları ile analizler yapılmıştır. Üst yapı 3, 6 ve 9 katlı seçilmiş, izolatör tipleri değiştirilerek izolatör ve yapı tepkileri giren enerji miktarları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca üretilen grafikler sayesinde optimum izolasyon parametreleri belirlenerek giren enerjinin de optimum izolasyon parametrelerini belirlemede kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

2. Yöntem (Methodology)

Farklı mekanik özelliklere sahip kurşun çekirdekli sismik izolasyon sistemlere sahip yapılara giren enerjinin araştırıldığı bu çalışmada, öncelikle çelik üst yapı modelleri hazırlanmıştır. İncelenen üst yapı modellerinin taban katına kurşun çekirdekli sismik izolasyon elemanlar eklenerek, belirlenen ivme kayıtları ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Matlab yazılımında hazırlanan program sayesinde kurşun çekirdekli izolatör parametreleri değiştirilerek fazla sayıda analizler yapılması sağlanmıştır. Analiz sonuçlarında yapı tepkileri ve giren enerji belirlenmiştir.

2.1. Üst Yapı Modelleri (Superstructure Models)

Üst yapı modeli için çelik kesitlere sahip moment aktaran modeller önceki bir çalışmadan alınarak kullanılmıştır [35]. Üst yapı modellerinin yapı malzemesi, EN 1993-1-1 ile EN 10025-2 standartlarına uygun olacak şekilde S235 yapı çeliği seçilmiş olup kat yükseklikleri 3 metre açıklıkları ise 5 metre olan 3 açıklıklı olacak şekilde hazırlanmıştır [36, 37]. Sismik izolasyonlu bir yapıda kat yüksekliklerine göre giren enerjinin değişimini incelemek amacıyla 3 farklı kat adedine sahip modeller seçilmiştir. Üst yapı modeli doğrusal olarak tanımlanmıştır. 3, 6 ve 9 katlı üst yapı modellerinin kat kiriş ve kolon kesitleri Tablo 1’de verilmiştir. Kolon ve kiriş kesitleri her üç katta Tablo 1’de verilen kesitler ile değişecek şekilde modellenmiştir. Üst yapı modellerinin 2 boyutlu sistem görüntüleri Şekil 2’de sunulmuştur.

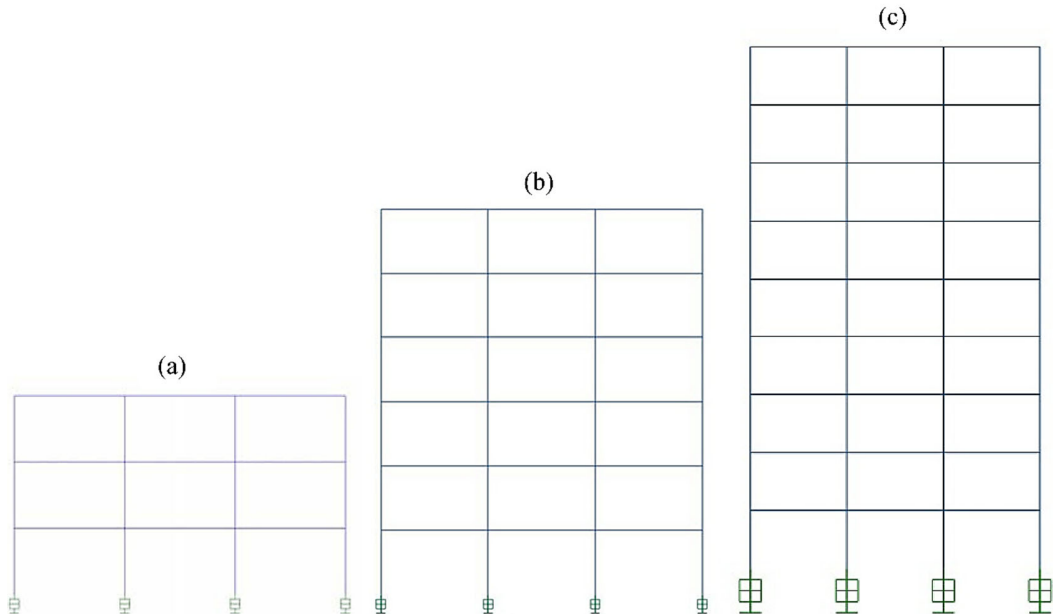
Üst yapı modellerinin kirişleri üzerine 27.5 kN/m olacak şekilde yük tanımlamaları yapılmıştır. Modellerin sismik izolasyonsuz tabana ankastre analizleri yapılarak birinci (T_1) ve ikinci (T_2) doğal titreşim periyotları belirlenmiştir. Bulunan doğal titreşim periyotları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Üst yapı modellerinin kiriş ve kolon kesit tipleri (Beam and column section types of superstructure models)

Kat Adedi	Kiriş Kesitleri	Kolon Kesitleri
3	IPE330	HE240B
6	IPE360-IPE330	HE260B-HE240B
9	IPE400-IPE360-IPE330	HE300B-HE260B-HE240B

Tablo 2. Üst yapı modellerinin doğal titreşim periyotları (The fundamental vibration periods of superstructure models)

Kat Adedi	T_1 (s)	T_2 (s)
3	0.73	0.23
6	1.31	0.44
9	1.75	0.62



Şekil 2. Üst yapı modellerinin iki boyutlu sistem görünümü: (a) 3 katlı, (b) 6 katlı, (c) 9 katlı (2D views of superstructure models: (a) 3-storey, (b) 6-storey, (c) 9-storey)

2.2. Enerji Esaslı Yöntem (Energy Based Method)

Doğada bulunan temel fizik kanunlarından biri her etkiye karşılık bir tepkinin oluşması iken bir diğeri ise her elemanın kararlılık durumunun korunması prensibidir. Yapılar da deprem etkileri sırasında bu prensiplere uyarlar. Deprem tarafından yapılara iletilen etkiye hareket ve şekil değişikliği olarak tepki verirler ve ilk konumlarına dönmeye çalışarak kararlı bir davranış yapmaya çalışırlar. Deprem kuvvetlerine yapının kapasitesi ile vereceği tepki, deprem etkileri ile dengede olursa yapı yıkılmadan ayakta kalır. Enerji esaslı tasarım da bu dengenin sağlanması felsefesine dayanır.

Yapılarda enerji esaslı tasarım ilk olarak 1956 yılında Housner tarafından önerilmiştir. Yapılara kuvvetli yer hareketleri tarafından iletilen enerjinin, farklı tiplere dönüşmesi esasına dayanan yöntemde, giren enerji ile dönüşen enerji dengesinin kurulması hedeflenir [38]. Yapıya deprem tarafından giren enerjinin (E_i) bir miktarı öncelikle sönüm enerjisine (E_ξ) dönüşür. Kalan enerji yapı içinde dağılarak yapıyı harekete geçirir ve kinetik enerjiye (E_k) dönüşür. Hareketin ortaya çıkması ile elastik şekil değiştirme (E_{se}) enerjisi de ortaya çıkmaktadır. Bu tüketim giren enerjiden az ise yapı, elastik ötesi davranış gösterir ve histeretik enerjiye (E_h) dönüşmesi ile enerji dengesi sağlanır. Bu denge $E_\xi = E_k + E_{se} + E_h$ 1’de görülmektedir [31].

$$E_i = E_\xi + E_k + E_{se} + E_h \quad (1)$$

2.3. Dinamik Analiz (Dynamic Analysis)

Sismik yalıtımlı yapılar genellikle hastane ve veri merkezi gibi deprem sonrası hemen kullanıma devam edilmesi gereken yapılarda kullanılması yaygınlık kazanmıştır. Sismik yalıtımlı yapıların en gerçekçi sonuçlarının belirlenmesi için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yönteminin (ZTADOA) kullanılması en uygun yaklaşımdır [39]. Bu sebeple, çalışmada ZTADOA yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. ZTADOA sürecinde kullanılmak için 11 ivme kaydı seçilerek TBDY 2018’e uygun şekilde ölçeklendirilmiştir.

Öncelikle örnek modellerin konumuna göre elastik tasarım spektrumu elde edilmiştir. Örnek modelin konumu, deprem etkilerinin yüksek olduğu Kocaeli ilinde 40.76522° enlem ve 29.90318° boylam koordinatları olarak seçilmiştir. Zemin sınıfı, çok sıkı kum, çakıl ve

sert kil tabakaları için uygun olan ZC sınıfıdır. Deprem yer hareketi seviyesi, 50 yılda spektral büyüklükleri aşma olasılığının %10 ve karşılık gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek bir deprem yer hareketi olan DD2 olarak seçilmiştir. Örnek modelin konumuna, zemin sınıfına ve deprem yer hareketi seviyesine uygun spektral katsayılar elde edilerek Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Üst yapı model konumu için zemin sınıfı (ZC) ve tasarım deprem seviyesi (DD2) spektral katsayıları (Spectral coefficients of soil class (ZC) and design earthquake level (DD2) for superstructure model location)

Spektral Parametreler	Değer
Kısa Periyot (SD_s)	1.986
1.0 s Periyot (SD_1)	0.675

Tablo 3’te verilen spektral parametreler kullanılarak elastik ivme spektrumu elde edilmiştir. Elde edilen elastik ivme spektrumuna göre ölçeklendirmek için 11 ivme kaydı PEER kuvvetli yer hareketi veritabanından seçilmiştir [40]. Seçilen ivme kayıtları ve özellikleri Tablo 4’e sunulmuştur.

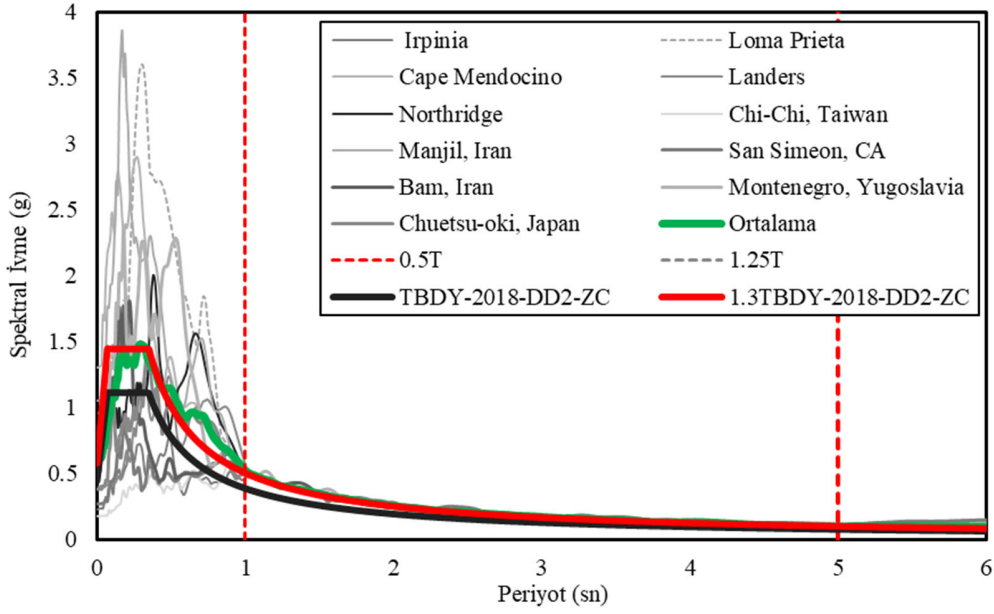
İvme kayıtları seçilirken 2 parametre göz önüne alınmıştır. Bunlar yakın yakın saha ($R_{rup} < 20\text{km}$) ve büyüklük ($M_w > 6.5$) parametreleridir. Ölçeklendirme işlemi SEISMOMATCH programı yardımı ile istatistikî metotla yapılmıştır [41]. Ölçeklendirme periyot aralığı TBDY 2018’e uygun şekilde izolasyonlu yapılar için izolasyonlu yapıların periyotlarının 0.5 ile 1.25 katı periyotları (T_M) için uygulanmıştır. Çalışma kapsamında izolasyonlu modellerin periyot aralıkları (T_0) 2 ile 4 saniye olarak alındığında ölçeklendirme periyot aralığı 1 (0.5x2) ve 5 (4x1.25) saniye aralığında yapılmıştır. Ayrıca TBDY 2018’e uygun olarak taban yalıtımlı yapılar için elastik ivme spektrumu 1.3 katı artırılarak kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan ölçeklendirilmiş %5 sönümlü ivme spektrumları Şekil 3’te sunulmuştur.

2.4. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolasyon Sistemi (Lead Core Rubber Isolation System)

Taban katına yerleştirilen kurşun çekirdekli kauçuk sismik izolasyon sistemleri, yatayda sağladıkları esneklik kapasitesi sayesinde deprem etkilerinin üst yapıya geçişini engellerler. Ancak yatayda oluşacak

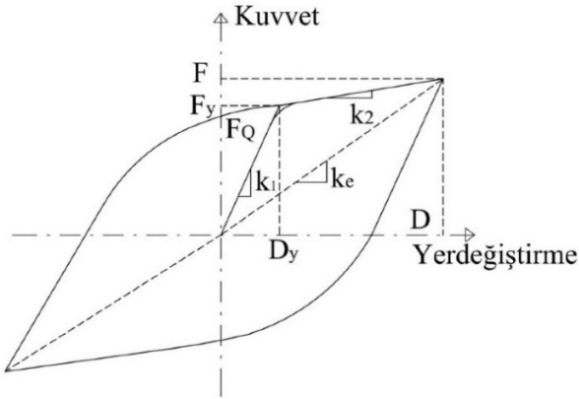
Tablo 4. İvme kaydı verileri [40] (Ground motions datas [40])

Deprem	Tarih	İstasyon	Kayıt Kodu	M_w	R_{rup} (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	$(V_s)_{30}$ (m/s)
Irpinia	1980	Calitri	CTR000	6.9	17.64	0.126	17.353	5.605	455.93
Loma Prieta	1989	Corralitos	CLS000	6.93	3.85	0.645	55.968	9.444	462.24
Cape Mendocino	1992	Cape Mendocino	CPM000	7.01	6.96	1.494	122.330	32.626	567.78
Landers	1992	Joshua Tree	JOS000	7.28	11.03	0.274	27.021	7.711	379.32
Northridge	1994	Simi Valley - Katherine Rd	KAT000	6.69	13.42	0.804	50.253	6.267	557.42
Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU136	TCU136-W	7.62	8.27	0.170	45.445	60.136	462.1
Manjil, Iran	1990	Abbar	ABBAR-L	7.37	12.55	0.515	42.458	14.872	723.95
San Simeon, CA	2003	San Antonio Dam - Toe	36258021	6.52	19.01	0.093	11.824	4.564	509.04
Bam, Iran	2003	Bam	BAM-L	6.6	1.7	0.808	124.124	33.944	487.4
Montenegro, Yugoslavia	1979	Ulcinj - Hotel Albatros	ULA000	7.1	4.35	0.183	19.178	5.933	410.35
Chuetsu-oki, Japan	2007	Yoitamachi Yoita Nagaoka	65037NS	6.8	16.1	0.284	30.780	7.051	655.45



Şekil 3. Ölçeklendirilmiş %5 sönümlü ivme spektrumları [40], [12] (The spectra of the scaled records for 5% damping)

hareket izolasyon sistemini oluşturan kauçuk-kurşunun malzeme sınırları ve yapının etrafında bulunan diğer yapılar sebebi ile sınırlıdır. Yapı, deprem hareketinin karakteristiğine ve yapıya geliş yönüne bağlı olarak yalıtım biriminin yapısına uygun şekilde hareket yapar. Deprem dalgalarının yapısı gereği yalıtım birimindeki bu hareket birbirini takip eden ters yönlü olarak gerçekleşir. Sismik izolasyon sistemlerinin bu hareketleri çift doğrulu çevrimsel hareket olarak tanımlanır. Bu hareketin modellenmesi için Şekil 4'teki idealleştirilmiş çift doğrulu zarf eğrisini ve buna uyumlu tersinir çevrimsel hareketi göstermektedir. [7].



Şekil 4. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin çift doğrulu zarf eğrisi ve buna uyumlu tersinir çevrimsel hareketi [7] (Bilinear envelope curve and corresponding reversible cyclic motion for lead-core rubber isolations [7])

Şekil 4'te belirtilen F maksimum izolatör yer değiştirmesine karşılık gelen yatay kuvveti, D maksimum izolatör deplasmanını, Fy akma dayanımını, Q karakteristik dayanımı, k1 izolatöre ait akma öncesi başlangıç (elastik) rijitliğini, k2 ise akma sonrası ikincil (elastik ötesi) rijitliğini, Dy akma deplasmanını, ve ke maksimum izolatör deplasmanına karşılık gelen etkin rijitliği ifade etmektedir.

Kurşun çekirdekli sismik izolatör tasarımında Şekil 4'te de görülebileceği gibi temel değişkenler k1, k2, Dy ve Q'dur. Bu

değişkenler izolasyon periyodunu ve yapı tepkilerini değiştiren izolatör parametreleridir. İzolasyon periyodu (T0) k2'ye bağlı olarak Eş. 2'deki gibi bulunur [42].

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_2 \cdot g}} \quad (2)$$

Burada W yapı ağırlığı ve g yer çekim ivmesidir. Akma dayanımı (Fy) Eş. 3 ve akma deplasmanı (Dy) Eş. 4'teki gibi bulunur.

$$F_y = Q + k_2 \cdot D_y \quad (3)$$

$$D_y = \frac{F_y}{k_1} \quad (4)$$

Çalışma kapsamında akma deplasmanı (Dy) daha önceki çalışmalara benzer şekilde 25 mm seçilmiştir [39, 43, 44]. Q/W 0.03, 0.06, 0.09, 0.12 ve 0.15 değerleri alınarak karakteristik dayanım değerleri seçilmiştir. İzolasyon periyodu (T0) ise 2 saniye ile 4 saniye arasında 0.1 saniye artacak oranlarla 20 adet alınarak izolasyonlu yapıların giren enerji miktarlarındaki değişim irdelenmiştir. Eş. 2 ile akma sonrası ikincil rijitlik, Eş. 3 ve Eş. 4 ile de akma dayanımı (Fy) ve akma öncesi rijitlik (k1) elde edilmiştir. Bu parametreler kullanılarak SAP2000 programında kurşun çekirdekli sismik izolatör tanımlaması yapılmış, analizler tamamlanmıştır. Analizler sonucunda izolatör deplasmanı (D) belirlenmiş, Eş. 5-7 yardımı ile sırasıyla etkin rijitlik (ke), efektif sönüm oranı (β) ve efektif periyot (Teff) bulunmuştur.

$$k_e = \frac{Q}{D} + k_2 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{4 \cdot Q \cdot (D - D_y)}{2\pi \cdot k_e \cdot D} \quad (6)$$

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_e \cdot g}} \quad (7)$$

Çalışma kapsamında her bir model ve ivme kaydı için Q/W ve periyot değişkenlerini kapsayan 100 farklı izolasyon sistemi için ZTADOA yapılmıştır. Yapı tepkileri ve giren enerji değişimleri her bir sabit

Q/W değeri için T_0 'a bağlı k_2 değerlerinin değişimi için hesaplanmıştır. Örneğin sabit 0.03 Q/W için 2.1, 2.2, 2.2,...4 sn T_0 değerlerinde izolasyon parametreleri üretilmiştir. Farklı Q/W değerleri için bu işlem tekrarlanarak Q/W ve T_0 'ın kombinasyonlarında yapı tepkileri ve giren enerji seviyeleri karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Analizlerin özeti Tablo 5'te verilmiştir. Toplam 3300 ZTADOA'yı tamamlamak amacı ile Matlab yazılımında bir program geliştirilerek SAP2000'de tekrarlı analizler yapılması sağlanmıştır [45, 46]. Bu program sayesinde iki programın beraber çalışması sağlanmış, bu sayede analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu sayede farklı kurşun çekirdekli izolasyon parametreleri ile çözümler elde edilmiş, giren enerji seviyeleri ve yapı tepkileri belirlenerek karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Tablo 5. Analiz değişkenlerinin dağılım özeti
(Summary of the distribution of the analysis variables)

İvme Kayıtları	Kat Adedi	Q/W	T_0
Irpinia Loma Prieta Cape Mendocino Landers Northridge Chi-Chi Manjil San Simeon Bam Montenegro Chuetsu-oki	3	0.03	2→4
		0.06	2→4
		0.09	2→4
		0.12	2→4
		0.15	2→4
		0.03	2→4
	6	0.06	2→4
		0.09	2→4
		0.12	2→4
		0.15	2→4
		0.03	2→4
		0.06	2→4
9	0.09	2→4	
	0.12	2→4	
	0.15	2→4	

Ayrıca Tablo 5'te verilen izolasyon parametreleri kullanılarak üretilen grafikler kullanılarak optimum izolasyon parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen optimum izolasyon parametrelerinin giren enerji açısından incelemesi yapılarak giren enerjinin tasarımda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Kurşun çekirdekli kauçuk izolasyonlu çelik bir çerçeveye giren enerjinin değişiminin araştırıldığı bu çalışmada; yalıtım parametreleri olarak T_0 ve Q/W kullanılmıştır. Giren enerjinin yakın saha ivme kayıtlarında değişiminin incelenmesi amacı ile Tablo 4'te verilen ölçeklendirilmiş ivme kayıtları ile ZTADOA yöntemi ile analizler yapılmıştır. Öncelikle örnek modellere uygulanan izolasyon sistemlerinin etkinliği incelenmiştir. Bu amaçla T_0 için 2, 3 ve 4 saniye ile Q/W için 0.03, 0.09 ve 0.15 kombinasyonu olan izolasyon sistemleri, tabanı ankastre modeller ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada ölçeklendirilmiş 11 ivme kaydı kullanılarak elde edilen sonuçların ortalaması incelenmiştir. 3, 6 ve 9 katlı modellerin tabanı ankastre ve izolasyonlu analizleri yapılarak en büyük deplasman ve ivme talepleri Şekil 5'te sunulmuştur.

Şekil 5 incelendiğinde tabanı yalıtımlı tüm üst yapı modellerinin tümünde, ankastre modellere göre üst yapı deplasman ve ivme taleplerinin azaldığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre taban yalıtımı uygulanan tüm üst yapı modellerinde yapı performansının arttığı yani yalıtım birimlerinin efektif şekilde çalıştığı ortaya konulmuştur. Yalıtımlı üst yapı modelleri arasında 3 ve 6 katlı modellerde, izolasyon katında en büyük deplasmanı T_0 4 sn ve Q/W 0.03 olduğu izolasyon parametrelerinde görülürken en düşük ivme de buna uyumlu olarak bu parametrelerde oluşmaktadır.

Çalışma kapsamında yapı tepkileri ve giren enerji değişimleri, önceki bölümde açıklandığı gibi çok sayıda izolasyon parametreleri için yapılmıştır. Çok sayıda izolasyon parametresinin sonuçlarını sunmak amacı ile Şekil 6'daki gösterildiği gibi izolasyon parametreleri aynı şekil içinde birleştirilerek verilmiştir. Ayrıca Şekil 6'da izolasyon parametrelerine göre izolasyon birimlerinin etkin rijitliğin değişimi farklı kat adetlerine göre sunulmuştur.

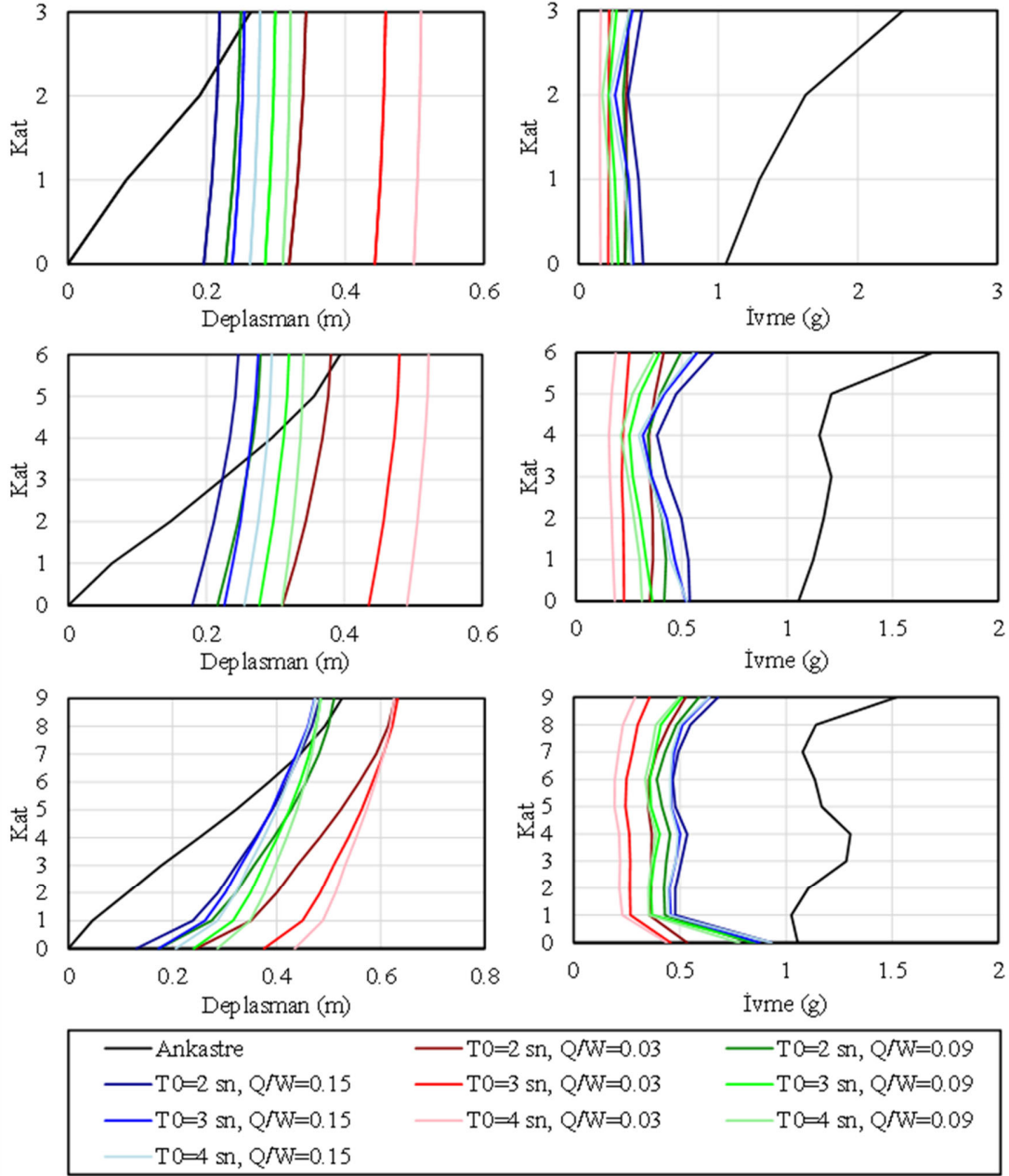
Çalışma kapsamında izolasyon değişkenleri T_0 ve Q/W tüm katlar için Tablo 5'te verildiği gibi aynı değerler alınmıştır. Farklı kat adetlerine sahip üst yapı modelleri için aynı T_0 ve Q/W değerleri elde etmek için etkin rijitlikler Şekil 6'da görüldüğü gibi hesaplanarak üst yapı modellerine uygulanmıştır. Bu sayede 3, 6 ve 9 katlı modellerin hepsinde aynı T_0 ve Q/W değerleri elde edilerek yapı tepkileri ve giren enerji değişimleri karşılaştırmaları incelenebilmiştir. Hesaplanan etkin rijitlikler yalıtım birimlerine uygulanarak ZTADOA süreçleri tamamlanmıştır.

3.1. Katlara Göre Giren Enerji ve Yapı Tepkileri Karşılaştırmaları (Comparisons of Input Energy and Structure Responses according to Storeys)

Öncelikle 3, 6 ve 9 katlı yapıların tepkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Katlara göre yapı tepkileri karşılaştırmaları tüm ölçeklemiş ivme kayıtları için yapılarak ortalamaları sunulmuştur. Kat adetleri değişken olan üç üst yapı modeli ile analizler tekrarlanarak en büyük yapı tepkileri ve giren enerjilerin karşılaştırılması incelenmiştir. Şekil 7'de düşey eksenler; giren enerjinin kütleyle oranı (a), izolasyon deplasmanı (b), çatı katı ivmesi (c), taban kesmenin kütleyle oranını (d), ve sönüm oranını (e) gösterirken yatay eksenler Şekil 6'da gösterildiği gibi kendi içinde T_0 'ın 2 saniyeden 4 saniyeye değişken olduğu Q/W parametrelerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Şekil 7a'ya göre giren enerji farklı katlı yapılar için değişen sismik izolasyon parametrelerine göre benzer değişimler göstermiştir. Giren enerjinin kütleyle oranı olarak verilen bu sonuçlara göre en yüksek giren enerji 3 katlı yapıda, en düşük enerji ise 9 katlı yapıda görülmüştür. Tüm katlar için giren enerjinin, sabit Q/W değerleri için azaldığı belirlenmiştir. 3 ve 6 katlı üst yapı modellerinde giren enerji oldukça yakın çıkarken 9 katlı modelde genellikle daha düşük giren enerji hesaplanmıştır. Q/W'nun 0.03 olduğu izolasyon parametrelerinde özellikle T_0 'ın 3 saniye civarı olduğu izolasyon parametreleri kombinasyonlarında 9 katlı yapıda daha yüksek giren enerji tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kat adedinin artışı ile giren enerjinin azaldığı belirlenmiştir. Bunun nedeninin üst yapının deprem sırasında oluşturduğu şekil değişikliklerinin sönümlenmesi olarak yorumlanmıştır.

Şekil 7b'ye göre Şekil 7a'daki giren enerji değerlerine benzer şekilde 3 ve 6 katlı üst yapı modellerinde benzer izolasyon deplasmanları belirlenirken 9 katlı yapıda daha düşük deplasman değerleri hesaplanmıştır. En büyük izolasyon deplasmanı en düşük Q/W değeri olan 0.03 ve en yüksek T_0 değeri olan 4 saniyede belirlenmiştir. Sabit Q/W değerlerinde T_0 'ın artışı ile izolasyon deplasmanı artmıştır. Bu



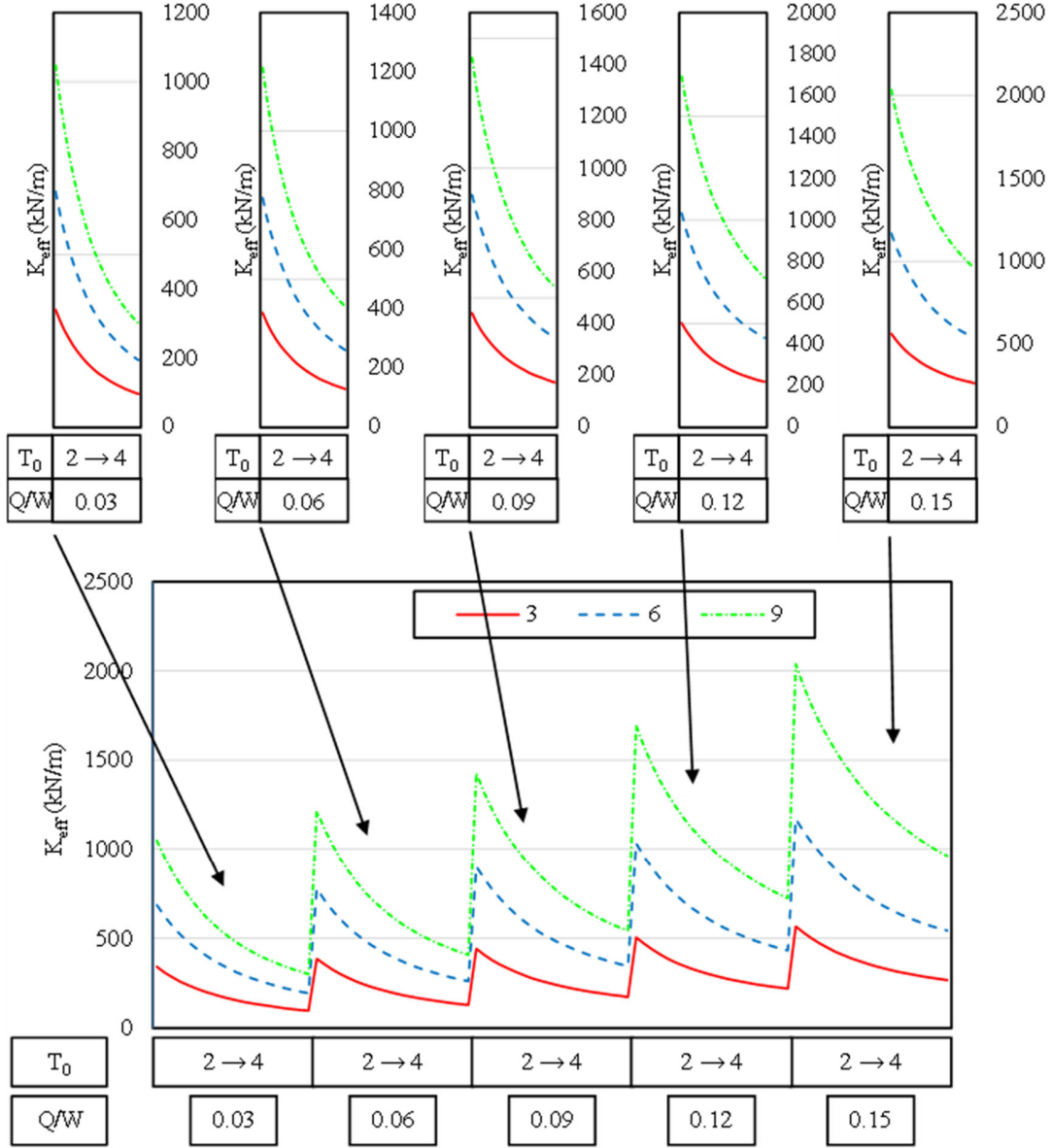
Şekil 5. Ankastre ve yalıtımlı üst yapı modellerinin ivme ve deplasman talepleri
(Acceleration and displacement demands of fixed and isolated superstructure models)

artış düşük Q/W değerlerinde daha hızlı olurken yüksek Q/W değerlerinde daha yavaş olmuştur. Ayrıca Sabit T_0 değerleri incelendiğinde Q/W artışı ile deplasman azalmıştır. İzolasyon rijitliğinin arttığı düşünüldüğünde artan Q/W değerleri ile deplasmanın azalmasının normal olduğunu kanaatine varılmıştır.

Katlara göre tepe katı ivmesinin verildiği Şekil 7c grafiğine göre en yüksek ivmeler 9 katlı yapıda ve düşük periyotlu sismik izolasyon korelasyonlarında görülmüştür. En düşük ivme ise beklendiği gibi 3 katlı yapıda hesaplanmıştır. T_0 'ın artışı ile tüm üst yapı modellerinde ivme azalırken Q/W artışı ile ivme değerleri izolatörün rijitliğinin artması ile artış göstermektedir. Şekil 7d ise taban kesme kuvvetinin kütleyle oranının farklı izolasyon sistemlerine göre değişimlerini

göstermektedir. Buna göre tüm katlar benzer değişimler gösterirken, özellikle sabit Q/W değerlerinde periyotun artışı ile taban kesme kuvvetleri azalmıştır. En düşük taban kesme kuvveti, giren enerji ve ivmelerin en az olduğu $T_0=4$ saniye ve $Q/W=0.03$ izolasyon kombinasyonunda hesaplanmıştır.

Elde edilen bu sonuçlar ile giren enerji ile çatı katı ivmesi ve taban kesme kuvvetleri arasında net bir bağlantı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7e ise verilen efektif sönüm oranları periyot ve Q/W oranlarının artışı ile artmıştır. Tüm katlar için benzer efektif sönüm değerleri belirlenirken tüm izolasyon korelasyonlarında %5'ten %40'a kadar artan efektif sönüm oranları bulunmuştur. Kat değişiminin efektif sönümde önemli bir değişim göstermediği belirlenmiştir.



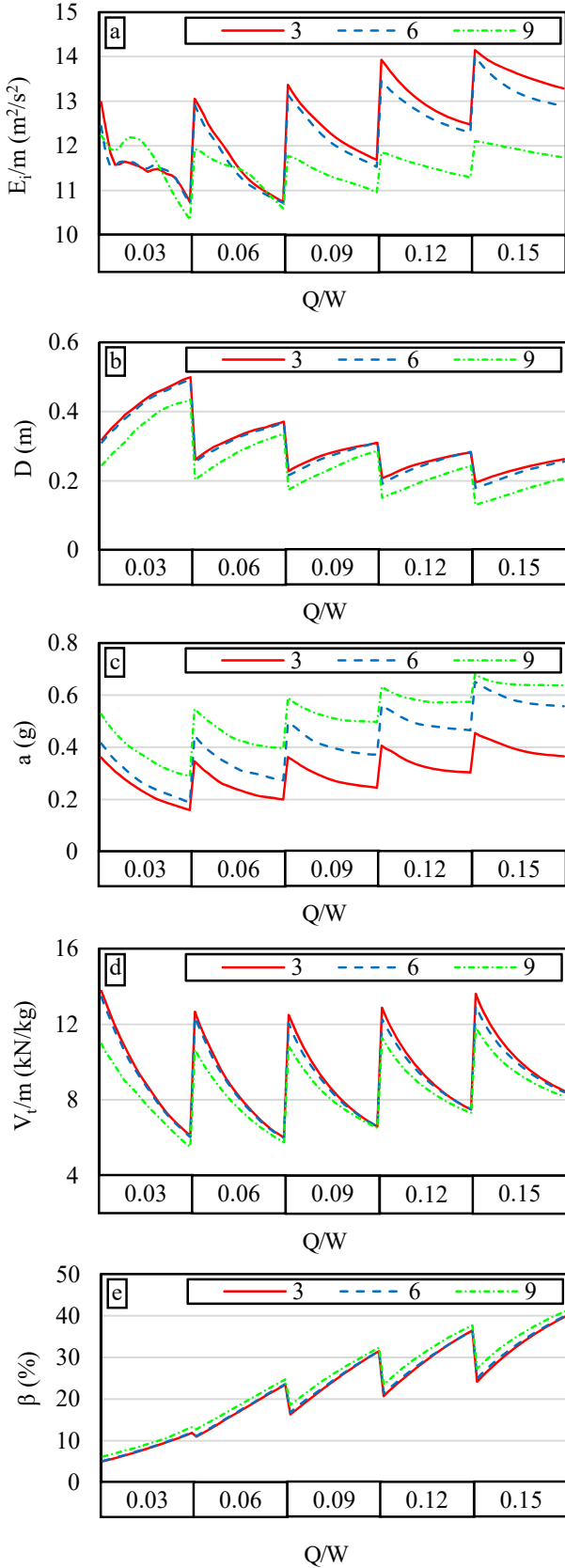
Şekil 6. Üst yapı modelleri için hesaplanan izolasyon etkin rijitlik değerleri
(Calculated isolation effective stiffness values for superstructure models)

3.2. Giren Enerji ile Yapı Tepkileri Karşılaştırmalı Sonuçları (Comparative Results of Input Energy and Structure Response)

Bu bölümde 3, 6 ve 9 katlı yapı sonuçları, maksimum izolatör deplasmanı, maksimum çatı katı ivmesi, taban kesme kuvvetleri ve efektif sönümün giren enerji seviyeleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapı tepkileri ile giren enerji karşılaştırmaları tüm ivme kayıtları için yapılarak ortalamaları sunulmuştur. Şekil 8, 9, 10'da yatay eksen izolasyon sistemi değişkenleri olan Şekil 6'da gösterildiği gibi kendi içinde T_0 'ın 2 saniyeden 4 saniyeye değişken olduğu Q/W parametrelerini gösterirken sol düşey eksen giren enerjinin kütleyle oranını (E_i/m) göstermektedir. Şekillerde sağ düşey eksenler ise sırası ile (a, b, c, d) izolatör deplasmanı (D), maksimum ivme (a), taban kesme kuvvetlerinin kütleyle oranlarını (V_i/m) ve efektif sönüm yüzdeleri (β_{eff}) göstermektedir.

Şekil 8, 9, 10'daki a şekillerine göre 3, 6 ve 9 katlı yapılarda giren enerji ve izolatör deplasman karşılaştırmaları tüm katlar için benzer değişimler göstermektedir. Genellikle izolatör deplasmanı artışı ile giren enerjinin azaldığı belirlenmiş, ters orantılı bir değişim görülmüştür. 3, 6 ve 9 katlı yapılar için sabit T_0 değerleri için Q/W artışı ile deplasman azalırken; 3 ve 6 katlı yapıda giren enerji artmış, 9 katlı yapıda ise yaklaşık sabit kalmıştır.

Şekil 8, 9, 10'daki b şekillerine göre ise giren enerji ve yapı tepe ivmesi kıyaslaması sunulmuştur. Giren enerji ile yapı tepe ivmesi tüm katlar için giren enerji ile doğru orantılı değişim gösterdiği belirlenmiştir. Yapı tepe ivmesi genellikle 0.03 Q/W ve 4 s T_0 değerleri için en düşük olarak bulunurken 0.15 Q/W ve 2 s T_0 değerlerinde en yüksek ivme değerleri gözlenmiştir. Giren enerji seviyeleri de bu sonuçlara paralel olarak en düşük ve yüksek değerleri benzer izolasyon parametrelerinde belirlenmiştir.



Şekil 7. Farklı katlara sahip üst yapı modellerinin yapı tepkilerinin karşılaştırılması
(Comparison of structural responses on superstructure models with different stories)

Şekil 8, 9, 10'daki c şekillerine göre göre taban kesme kuvvetleri ve giren enerji değişimleri tüm katlar için paralel değişim göstermektedir. Sabit Q/W değerleri için T_0 'ın artması ile taban kesme kuvvetleri ve giren enerji azalmaktadır. Sabit T_0 değerleri için ise taban kesme kuvvetlerinin genellikle arttığı belirlenmiştir.

Efektif sönüm ile giren enerjinin karşılaştırıldığı Şekil 8, 9, 10'daki d şekillerine göre, ters bir oran belirlenerek efektif sönümün arttığı izolasyon parametrelerinde giren enerji miktarının azaldığı tüm kat seviyeleri ve izolasyon parametrelerinde gözlemlenmiştir.

3.3. Yer Hareketlerine Göre Çatı Katı İvmeleri Karşılaştırmaları (Comparison of Roof Floor Accelerations According to Ground Motions)

Sismik yalıtımlı yapı tasarımında izolasyon deplasmanı uygunluğu belirlendikten sonra yapı tepkileri incelenmelidir. Yapı tepkileri arasında ise çatı katı ivme değerinin incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca çalışmanın temel amacı olan giren enerji değişiminin yapı tepkileri ile kıyaslanması amacıyla farklı yer hareketine göre ivme değişimleri incelenmiştir. Belirlenen izolator parametreleri ile ölçülen 11 ivme kaydı kullanılarak yapılan ZTADOA sonucu bulunan en büyük yapı çatı katı ivmeleri ve ortalamaları Şekil 11'de verilmiştir.

Şekil 11'e göre en büyük ivme değerleri genellikle Loma Prieta ivme kaydından elde edilmiştir. Sadece 3 katlı modelde Montenegro ivme kaydının Loma Prieta ivme kaydından daha büyük ivme değerleri verdiği görülmüştür. San Simeon ve Chi-Chi ivme kayıtları tüm modeller ve tüm izolasyon parametreleri için en düşük ivme değerleri vermiştir. Beklendiği üzere 9 katlı model en yüksek, 3 katlı model en düşük ivme değerleri vermektedir.

Tüm üst yapı modelleri için sabit Q/W değerlerinde periyodun artışı ile ivme değerleri genellikle azalmı göstermektedir. Sabit periyot değerleri için ise tüm üst yapı modellerinde Q/W artışı ile ivme değerlerinin arttığı görülmüştür. Periyot artışı ile yapının daha fazla salınım yapmasına bağlı olarak çatı katı ivmesi azalırken, Q/W artışı ile rijitleşen izolatörlerin ivmeyi artırdığı kanaatine varılmıştır.

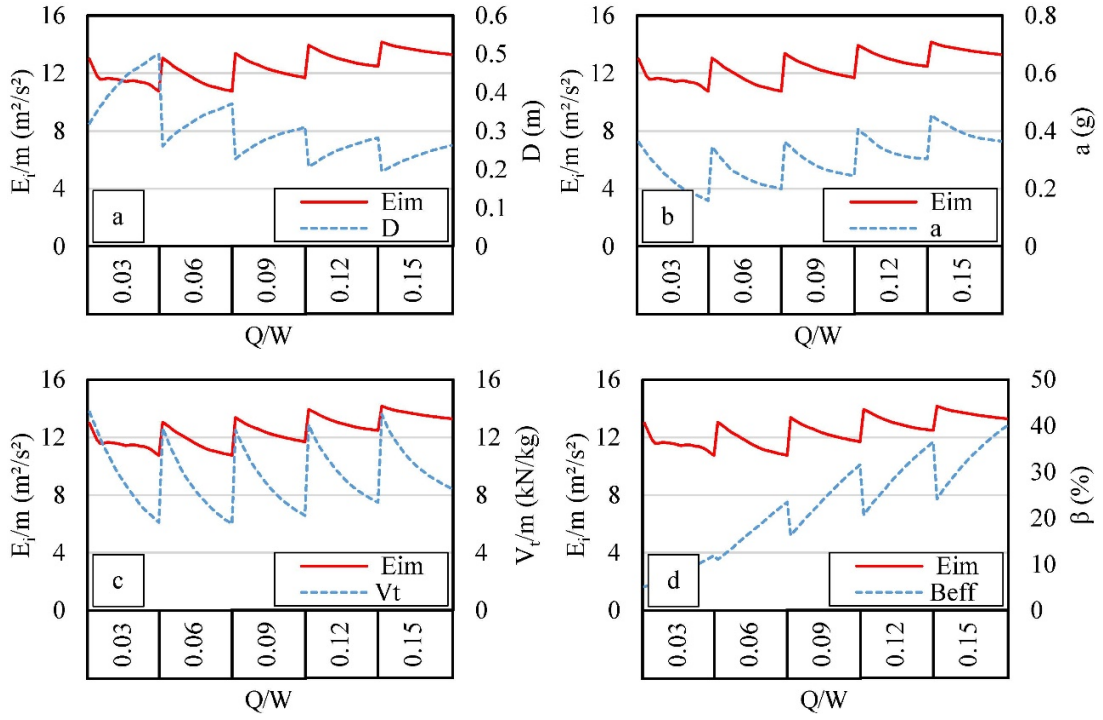
3.4. Yer Hareketlerine Göre Giren Enerji Karşılaştırmaları (Comparison of Input Energy According to Ground Motions)

Farklı ivme kayıtlarına göre yapıya giren enerjinin karşılaştırıldığı bu bölümde, depremin oluşturduğu hareket karakteristiğinin sismik izolasyonlu farklı katlı yapılar için giren enerji karşılaştırmaları incelenmiştir. Şekil 12'de giren enerjinin kütleye oranları farklı izolasyon kombinasyonları için verilmiştir.

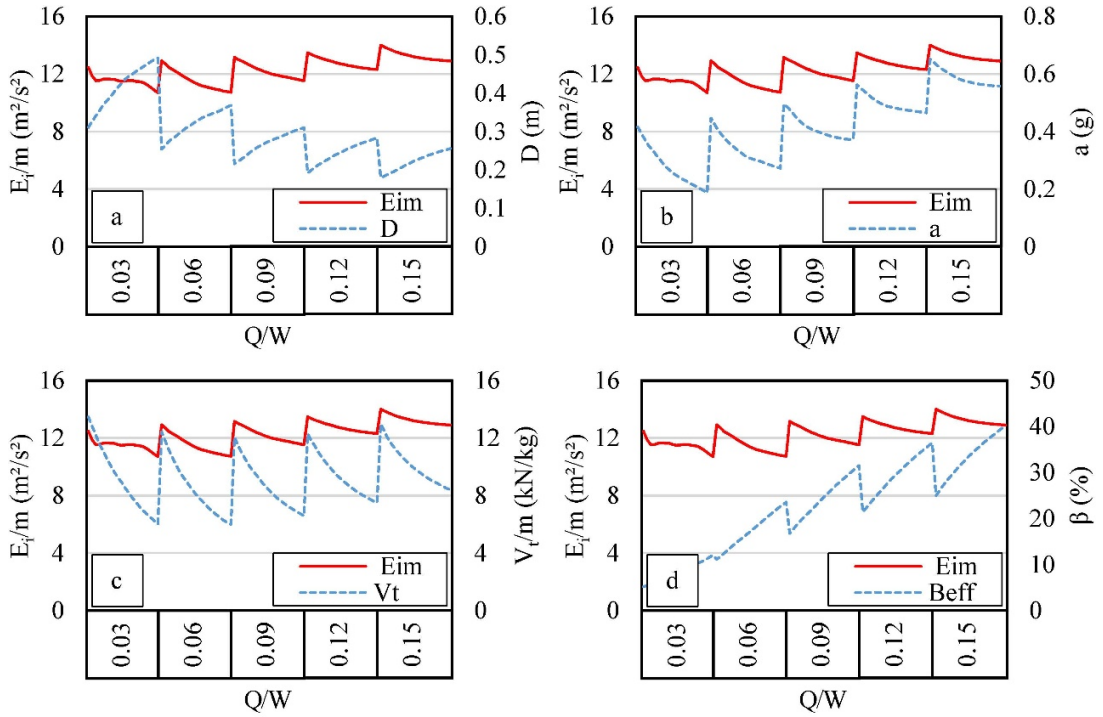
Şekil 12'deki giren enerji değerleri kıyaslandığında genellikle tüm katlar ve tüm izolasyon parametreleri kombinasyonlarında Landers ve Manjil ivme kayıtları en büyük giren enerji değerlerini oluşturmaktadır. Bam ve Cape Mendocino ivme kayıtları ise en düşük giren enerji değerleri verdiği görülmektedir. Tüm üst yapı modellerinde ortalama giren enerji T_0 ve Q/W artışı ile azalış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca farklı kat adedine sahip üst yapı modelleri için ortalama giren enerji $10 m^2/s^2$ civarında hesaplanmıştır. Bu sonuçla birlikte giren enerjinin yalıtımlı yapılar için periyoda bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

3.5. Optimum İzolasyon Parametrelerinin Belirlenmesi (Determination of Optimum Isolation Parameters)

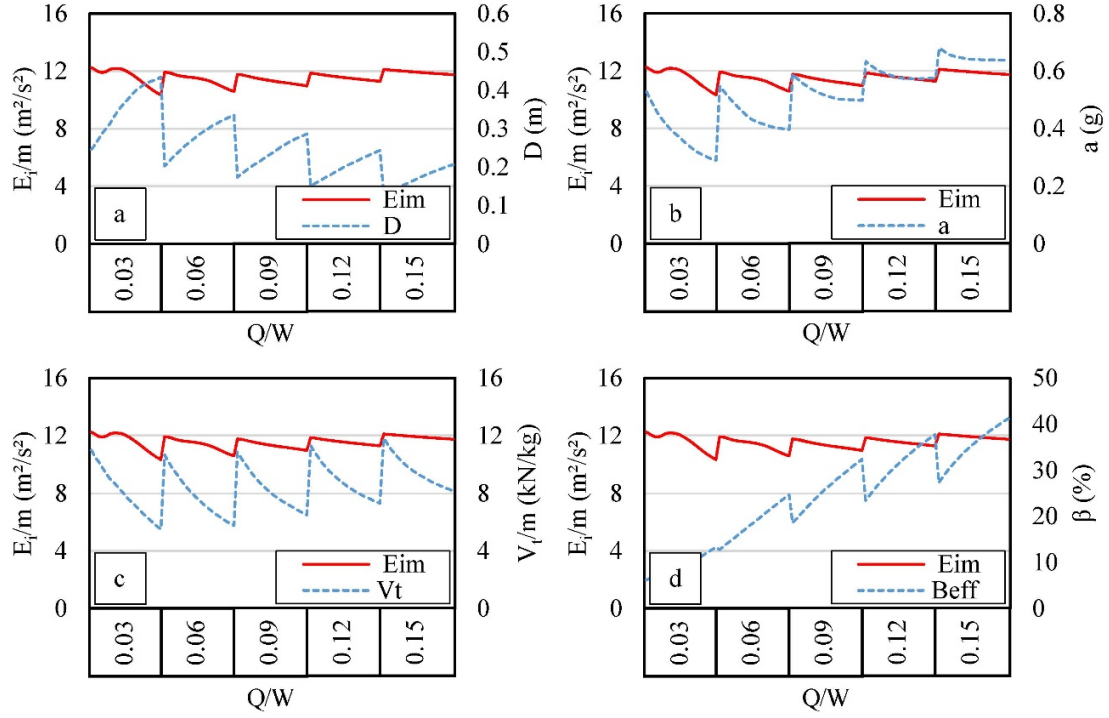
Bu bölümde elde edilen sonuçlar kullanılarak tasarımda kullanılacak sismik izolasyon kombinasyonunun belirlenmiştir. Sismik yalıtım birimlerinin optimum tasarımı daha önce birçok çalışmada araştırılmıştır [47, 48].



Şekil 8. 3 katlı model için giren enerji ile deplasman (a), ivme (b), taban kesme (c) ve sönüm oranı (d) karşılaştırmaları (Comparisons of input energy with displacement (a), acceleration (b), base shear (c), and damping ratio (d) for the 3-story model)



Şekil 9. 6 katlı model için giren enerji ile deplasman (a), ivme (b), taban kesme (c) ve sönüm oranı (d) karşılaştırmaları (Comparisons of input energy with displacement (a), acceleration (b), base shear (c), and damping ratio (d) for the 6-story model)



Şekil 10. 9 katlı model için giren enerji ile deplasman (a), ivme (b), taban kesme (c) ve sönüm oranı (d) karşılaştırmaları (Comparisons of input energy with displacement (a), acceleration (b), base shear (c), and damping ratio (d) for the 9-story model)

Bu çalışmaların çoğu karmaşık sezgisel algoritmaların kullanımına dayanmaktadır. Bu çalışmalarda amaç fonksiyonu çatı katının ivmesini en aza indirmektedir. İzolasyon değişkenleri ise bu çalışmada da kullanılan T_0 ve Q/W parametreleridir. Optimizasyon sürecini kısıtlayan ise izolasyon deplasmanı ve sönüm oranıdır. Çalışmada elde edilen sonuçlar kullanılarak optimum izolasyon parametreleri belirlenebilir.

Optimum izolasyon parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle izolasyon deplasmanı ve sönüm oranı grafikleri ele alınarak belirlenen kısıtlar için uygun sonuçlar işaretlenir. İşaretlenen alanlar çatı katı ivmesi grafiği üzerinde kesiştirilerek kısıtlara uygun çözüm alanları belirlenir. Belirlenen alanlar içinde en düşük ivmeyi veren izolasyon kombinasyonu optimum çözüm kabul edilerek tasarım tamamlanır. Şekil 13'de 3 katlı üst yapı modeli için izolatör deplasmanının 0.3m ve sönüm oranının %25 olduğu kısıtlar seçilerek optimum izolatör parametreleri belirlenmiştir.

Şekil 13 incelendiğinde izolasyon deplasmanı için a ve c grafikleri, b ve d grafikleri ise sönüm için kısıtlara uygun izolasyon parametrelerini göstermektedir. Grafiklerin limitleri içine kalan kısımları mavi, limitler dışında kalan kısım kırmızı olarak işaretlenmiştir. Şekil 13e'de ise izolasyon deplasmanı ve sönüm oranı grafiklerinden elde edilen kırmızı ve mavi taramalar kesiştirilmiştir. Şekil 13e'de mavi ile kesişen bölgeler kısıtlar içinde kalan uygun çözümleri göstermektedir. Mavi olan uygun parametrelere en düşük çatı katı ivmesini veren optimum izolasyon parametreleri kombinasyonu tespit edilmiştir. Bu kombinasyon 0.09 Q/W ve 3.2 saniye T_0 değeri olarak belirlenmiştir. Şekil 13f ise uygun parametrelerin giren enerji grafiği üzerinden gösterimidir. Şekil 13e'deki en düşük çatı katı ivmesi ile Şekil 13f'te en düşük giren enerji aynı izolasyon parametrelerini göstermektedir. Bu bulgular ile sismik izolasyon parametrelerinin optimizasyonunda giren enerjinin kullanılabileceği belirlenmiştir.

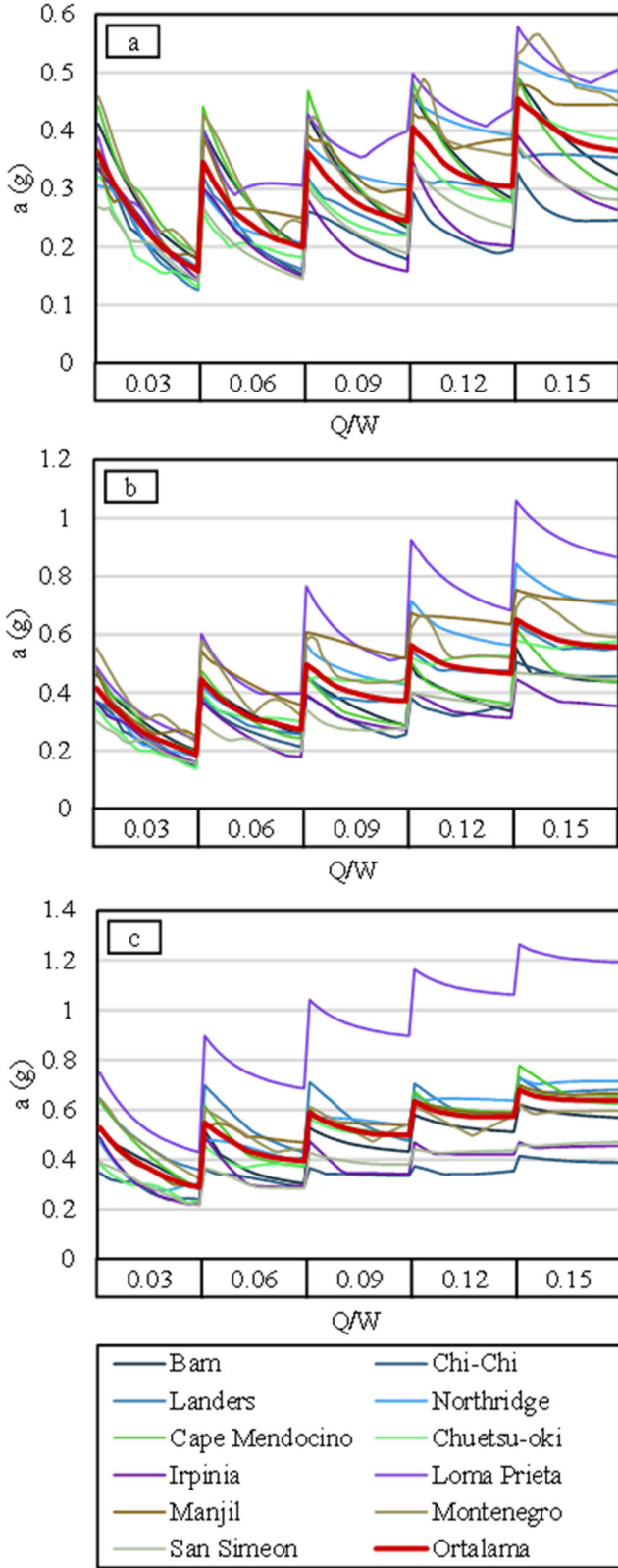
4. Sonuçlar (Conclusions)

Enerji esaslı tasarım için öncelikle belirlenmesi gereken yapıya giren enerji miktarının belirlenmesidir. Yapıya giren enerji, etkiyen ivme kaydı, yapı tipi ve yapı davranışı ile değişim göstermektedir. Sismik izolasyonlu yapılarda ise bu değişim göstermektedir. Sismik izolasyon parametrelerinin farklı kat adedine sahip yapılarda ve ivme kayıtlarında değişimini incelemektir. Hazırlanan 3 farklı sismik tabanı yalıtımlı üst yapı modelinde TBDY 2018'e uygun şekilde ölçeklendirilmiş 11 farklı ivme kaydı ile ZTADOA gerçekleştirilmiştir.

Sismik izolasyon parametreleri olarak periyot ve Q/W oranları seçilmiş, hazırlanan program sayesinde tekrarlı analizler yapılarak her bir model ve ivme kaydı için 100 ZTADOA yapılmıştır. Farklı katlara sahip üst yapı modelleri ve farklı ivme kayıtları için analizler tekrar edilerek toplam 3300 analiz sonucu elde edilerek ortalamaları sunulmuştur. Ayrıca elde edilen yapı tepkileri kullanılarak optimum izolasyon parametreleri grafik bir metotla tespit edilmiştir.

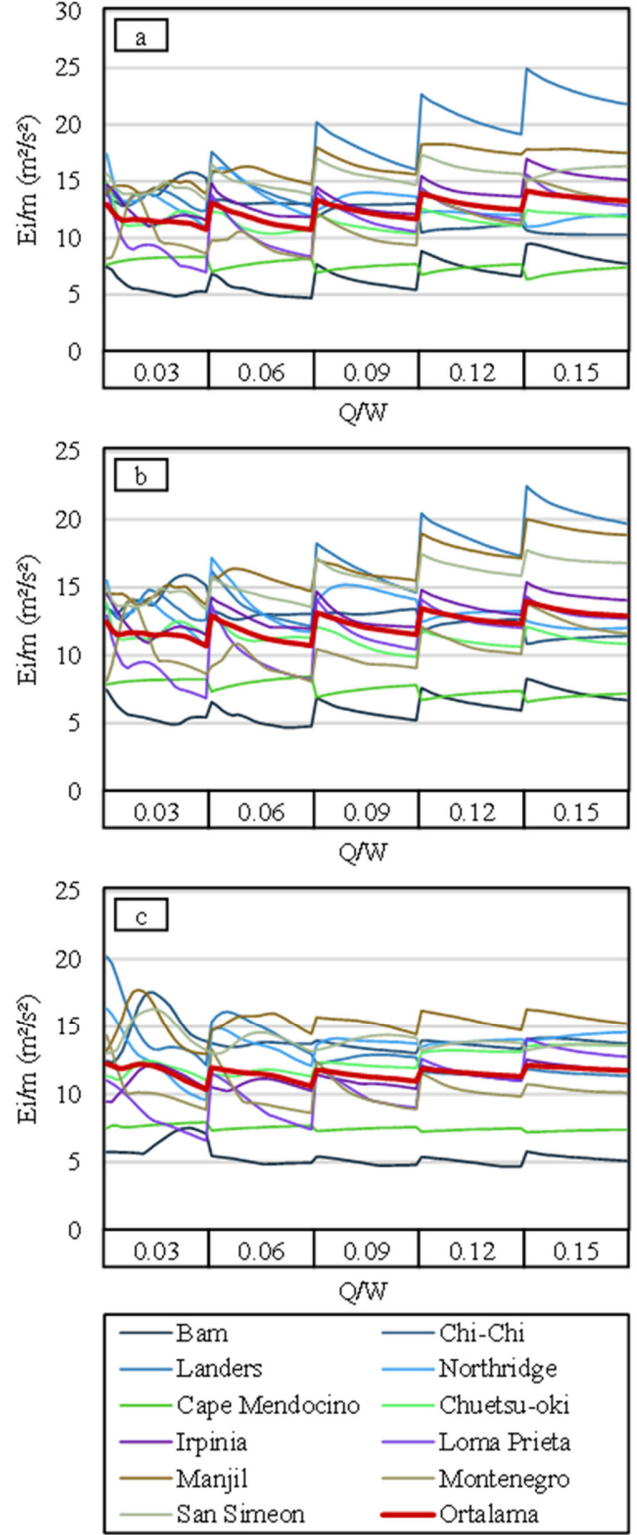
Analiz sonuçlarına göre farklı izolasyon parametrelerine, farklı katlara ve ivme kayıtlarına göre yapı tepkileri ve giren enerji değişimleri karşılaştırılmıştır. Bulunan yapı tepkileri ve giren enerji değerlerine göre aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- Üst yapı modellerinde kullanılan yalıtım birimleri kat ivmelerini ciddi oranda azaltmıştır. İzolasyon deplasmanı en çok artıran ve kat ivmelerini en çok azaltan izolasyon parametreleri 4 saniye T_0 ve 0.03 Q/W olduğu belirlenmiştir. Beklendiği gibi yüksek deplasman sağlayan izolasyon parametreleri düşük kat ivmeleri verirken düşük deplasman sağlayan izolasyon parametreleri yüksek kat ivmeleri oluşturmıştır.



Şekil 11. Farklı ivme kayıtlarının 3 katlı (a), 6 katlı (b) ve 9 (c) katlı yapılar için bulunan en büyük çatı katı ivme değerlerinin karşılaştırmaları

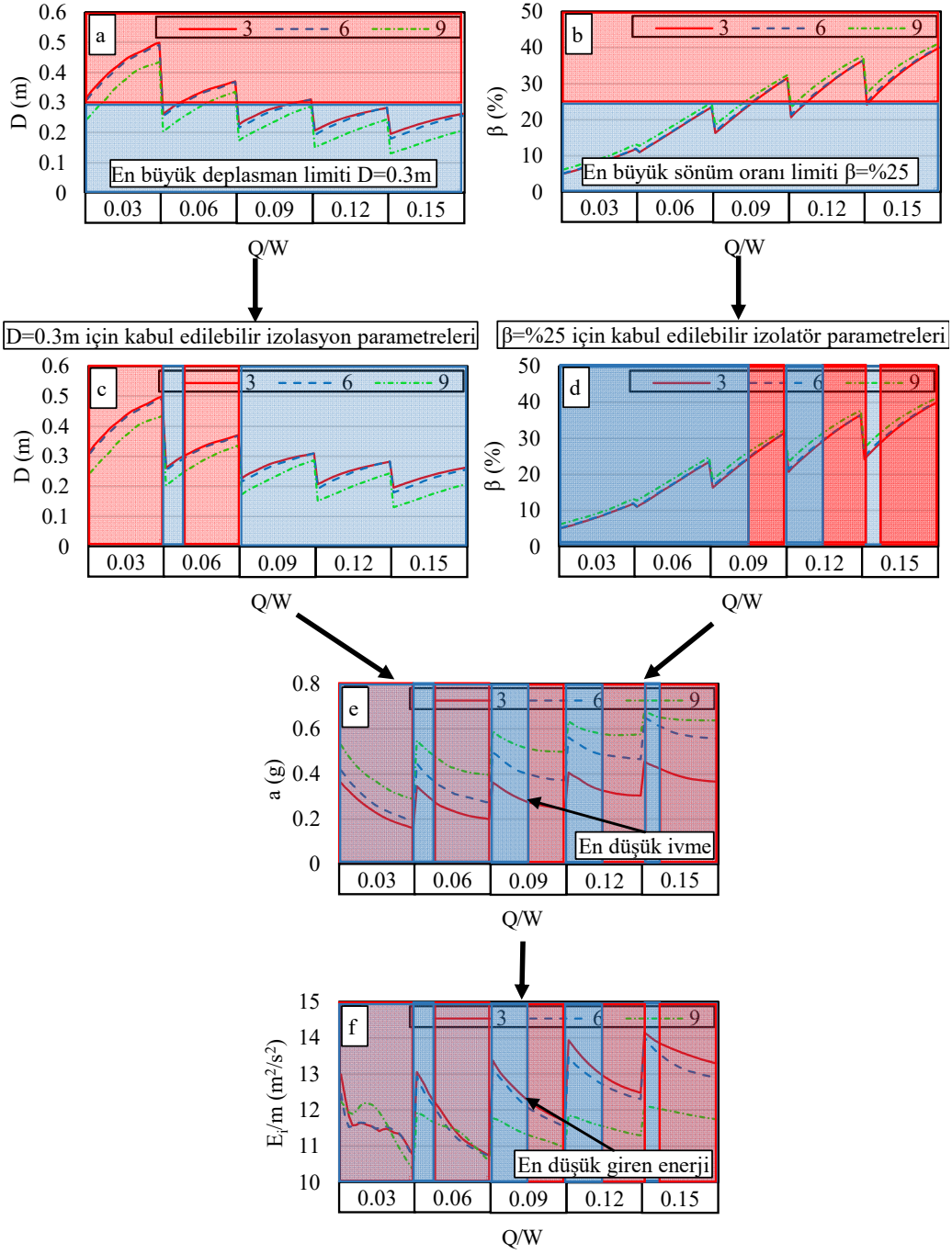
(Comparison of the maximum roof acceleration for different ground motion records for 3-storey (a), 6-storey (b) and 9-storey (c) buildings)



Şekil 12. Farklı ivme kayıtlarının 3 katlı (a), 6 katlı (b) ve 9 (c) katlı yapılar için bulunan giren enerji değerlerinin karşılaştırmaları

(Comparison of the input energy for different ground motion records for 3-storey, 6-storey and 9-storey buildings)

- Yapı tiplerine göre giren enerji/kütle oranının en düşük olduğu tip 9 katlı ve en yüksek olan tip ise 3 katlı yapı tipi olduğu



Şekil 13. Optimum izolasyon parametrelerinin grafik yöntemle belirlenmesi
(Determination of optimum isolation parameters by graphical method)

belirlenmiştir. Benzer periyotlara sahip farklı kat adeti olan tabanı yalıtımlı modellere giren enerji değerlerin birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca izolasyon deplasmanı taban kesme ve sönüm oranı da üç üst yapı modeli için de benzer değerler hesaplanmıştır. Ancak çatı katı ivme değerler incelendiğinde en yüksek ivmelerin 9 katlı modelde oluşurken en düşük ivmeler 3 katlı modelde belirlenmiştir.

- Tüm üst yapı modelleri için izolasyon katı deplasmanı ile giren enerjinin ters orantılı olduğu belirlenmiştir.
- Tüm üst yapı modellerinde yapı çatı katı ivmesi ve giren enerjinin doğru orantılı olduğu görülmüş, sismik izolasyonlu yapılar için

önemli bir performans kriteri olan yapı tepe ivmesinin düşürmek için giren enerji seviyesinin düşürülmesi gerektiği belirlenmiştir.

- Sismik izolasyonlu sistemler için önemli bir parametre olan etkin sönüm ile giren enerjinin ters orantılı olduğu belirlenmiştir.
- Farklı ivme kayıtlarının izolasyon parametrelerinin değişimi ile farklı çatı katı ivmesi ve giren enerji oluşturduğu ancak benzer değişimler gösterdiği belirlenmiştir. İvme kayıtlarının genlik frekans ve uzaklığı gibi karakteristiklerinin çatı katı ivmesi ve giren enerjinin değişiminde etkili olduğu değerlendirilmiştir.
- İzolasyon deplasmanı ve sönüm oranının kısıt olduğu bir tasarımda, üretilen grafiklerin optimum izolasyon tasarımı yapabildiği ortaya

konulmuştur. Yapı izolasyon parametrelerinin değişimi ile yapı tepkilerinin değişimini sunan grafik uygulama sayesinde kısıtlara uygun en düşük çatı katı ivmeleri tespit edilmiştir.

- Üretilen izolasyon parametreleri ve yapı tepkileri grafikleri sayesinde belirlenen optimum izolasyon parametrelerinin en düşük giren enerjiyi verdiği gösterilmiştir. Bu sayede giren enerjinin optimum izolasyon parametrelerini bulmakta kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

Yapılan çalışma ile bulunan sonuçlar giren enerjinin yapı değerlendirmede kullanılabilir bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Giren enerjinin temel olarak kat adedi, ivme kaydı karakteristiği ve izolasyon parametrelerine göre değişim gösterdiği belirlenmiştir. Genel olarak izolasyon parametrelerinin seçilip yapı tepkilerinin uygunluğuna bağlı olarak iteratif bir metoda dayanan sismik izolasyonlu yapıların tasarımında, giren enerjinin değerlendirilmesinin de izolasyon parametrelerinin seçiminde kullanılabilirliği gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda, sismik izolasyonlu yapıların giren enerji ile optimum tasarımı yapılabilir. Ayrıca giren enerjinin yapı içinde üst yapı ve sismik izolasyon sistemine dağılımı incelenerek daha uygun sismik izolasyon tasarımları yapmak mümkün olacaktır. Ortaya konulan sonuçlar ile giren enerjinin de çatı katı ivmesi gibi tasarımda kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma Dr. Ali Erdem Çerçevik danışmanlığında tamamlanan, Osman Sevindik'e ait "Sismik izolatör elemanlarının enerji bazlı optimizasyonu" isimli yüksek lisans tezi esas alınarak hazırlanmıştır.

Kaynaklar (References)

1. Buckle İ.G., Mayes R.L., Seismic isolation: history, application, and performance-a world view, *Earthquake Spectra*, 6 (2), 161–201, 1990.
2. Mayes R.L., Naeim F., Design of Structures with Seismic Isolation, The Seismic Design Handbook, Naeim F., Springer, Boston, 723–755, 2001.
3. Robinson W.H., Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10 (4), 593–604, 1982.
4. Kelly J.M., Aseismic base isolation: review and bibliography, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5 (4), 202–216, 1986.
5. Liu W., Xu H., He W., Yang W., Static test and seismic dynamic response of an innovative 3D seismic isolation system, *Journal of Structural Engineering*, 144 (12), 04018211, 2018.
6. Wu D., Xiong Y., Yang Z., Numerical and experimental study of mechanical behaviors of the steel-confined rubber bearing, *Construction and Building Materials*, 352, 128900, 2022.
7. Hwang J.S., Chiou J.M., An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings, *Engineering Structures*, 18 (7), 528–536, 1996.
8. Liu T., Zordan T., Briseghella B., Zhang Q., An improved equivalent linear model of seismic isolation system with bilinear behavior, *Engineering Structures*, 61, 113–126, 2014.
9. Zhang C., Ali A., The advancement of seismic isolation and energy dissipation mechanisms based on friction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146, 106746, 2021.
10. Choudhury S., Performance-Based Seismic Design of Structures, CRC Press, Boca Raton, FL, 2024.
11. Börekçi M., Günümüz tasarım yöntemlerinin betonarme binaların deprem performansına etkisinin park-ang hasar indeksi ile belirlenmesi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25 (1), 325–340, 2020.
12. TBEC, Turkish Building Earthquake Code, AFAD, Ankara, 2018.
13. FEMA P440A, Effects of strength and stiffness degradation on seismic response, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 2009.
14. Fajfar P., Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21 (10), 837–848, 1992.
15. Ghosh S., Collins K.R., Merging energy-based design criteria and reliability-based methods: Exploring a new concept, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35 (13), 1677–1698, 2006.
16. Ghosh S., Datta D., Katakhdond A.A., Estimation of the park-ang damage index for planar multi-storey frames using equivalent single-degree systems, *Engineering Structures*, 33 (9), 2509–2524, 2011.
17. Shen J., Akbas B., Seismic energy demand in steel moment frames, *Journal of Earthquake Engineering*, 3 (4), 519–559, 1999.
18. Enderami S.A., Beheshti-Aval, S.B., Saadeghvaziri M.A., New energy based approach to predict seismic demands of steel moment resisting frames subjected to near-fault ground motions, *Engineering Structures*, 72, 182–192, 2014.
19. Wang F., Zhang N., Huang Z., Estimation of earthquake induced story hysteretic energy of multi-story buildings, *Earthquake and Structures*, 11 (1), 165–182, 2016.
20. Doğru S., Akbaş B., Seismic energy demands of steel special moment frames, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1111–1128, 2020.
21. Mu Y., Qu J., Shu Y., Tan Y., Simplified estimation method of plastic energy dissipation for MDOF systems using force analogy method, *Buildings*, 13 (5), 1330, 2023.
22. 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.
23. Alıcı F.S., Sucuoğlu H., Elastic and inelastic near-fault input energy spectra, *Earthquake Spectra*, 34 (2), 611–637, 2018.
24. Güllü A., Yüksel E., Yalçın C., Dindar A.A., Özkaynak H., Büyükoztürk, O., An improved input energy spectrum verified by the shake table tests, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48 (1), 27–45, 2019.
25. Cheng Y., Wang J., Zhang Y., Mollaioli F., Empirical correlations between the spectral input energy and spectral acceleration, *Journal of Earthquake Engineering*, 27 (6), 1514–1533, 2023.
26. Dedeoğlu İ.Ö., Calayır Y., A study on elastic input energy based on earthquakes in Turkey, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (3), 1439–1454, 2024.
27. Akbas B., Shen J., Temiz H., Identifying the hysteretic energy demand and distribution in regular steel frames, *Steel and Composite Structures*, 6 (6), 479–493, 2006.
28. Akiyama H., *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*, University of Tokyo Press, Tokyo, 1985.
29. Nakashima M., Saburi H., Tsuji B., Energy input and dissipation behaviour of structures with hysteretic dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25 (5), 483–496, 1996.
30. Ye L., Cheng G., Qu Z., Study on energy-based seismic design method and application on steel braced frame structures, Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering Tokyo-Japan 417–428, 2009.
31. Uang C.M., Bertero V.V., Evaluation of seismic energy in structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19 (1), 77–90, 1990.
32. 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.
33. Guo W., Du Q., Huang Z., Gou H., Xie X., Li Y., An improved equivalent energy-based design procedure for seismic isolation system of simply supported bridge in China's high-speed railway, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 134, 106161, 2020.
34. Zhao Z., Wang Y., Chen Q., Qiang H., Hong, N., Enhanced seismic isolation and energy dissipation approach for the aboveground negative-stiffness-based isolated structure with an underground structure, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 134, 105019, 2023.
35. Deringöl A.H., Güneyisi E.M., Effect of friction pendulum bearing properties on behaviour of buildings subjected to seismic loads, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105746, 2019.
36. EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, 2015.
37. Standard B, Hot rolled products of structural steels, EN, 10025, 2004.
38. Housner G.W., Limit design of structures to resist earthquakes, *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley, CA, 1–5, 1956.

39. Çavdar E., Özdemir G., Change in maximum isolator displacements due to change in orientation of scaled near field ground motion records, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2), 585–698, 2018.
40. PEER, Ground motion database, shallow crustal earthquakes in active tectonic regimes, NGA-West2, <http://ngawest2.berkeley.edu/>. Yayın tarihi 2013. Erişim tarihi Nisan 7, 2024.
41. SeismoMatch, Earthquake software for response spectrum matching, Seismosoft, Italy, 2024.
42. Naeim F., Kelly J., Design of seismic isolated structures: from theory to practice, John Wiley & Sons, New York, 1999.
43. Ryan K.L., Chopra A.K., Estimation of seismic demands on isolators based on nonlinear analysis, *Journal of Structural Engineering*, 130 (3), 392–402, 2004.
44. Özdemir G., Constantinou M.C., Evaluation of equivalent lateral force procedure in estimating seismic isolator displacements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (10), 1036–1042, 2010.
45. SAP2000, Static and dynamic finite element analysis of structures, computers and structures inc., Berkeley, CA, 2019.
46. Matlab, The language of technical computing, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2024.
47. Niğdeli S.M., Bekdaş G., Alhan C., Optimization of seismic isolation systems via harmony search, *Engineering Optimization*, 46 (11), 1553–1569, 2014.
48. Çerçevik A.E., Avşar Ö., Optimization of linear seismic isolation parameters via crow search algorithm, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26 (3), 440–447, 2020.