

# Taban yalıtımlı bir binanın deprem davranışının zaman-frekans ortamında dalgacık dönüşümü yöntemiyle araştırılması

## Seismic performance of a base isolated structure in time-frequency domain with wavelet transform

Ahmet ÖZENİR<sup>1\*</sup> , Kemal BEYEN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.

ozenir.ahmet@gmail.com, kbeyen@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 05.10.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 22.03.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.68705

Kabul Tarihi/Accepted: 05.04.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Bu çalışmada sismik taban yalıtımlı bir yapıda katlara yerleştirilmiş ivmeölçerler tarafından 1994 Northridge depreminde elde edilen ivme kayıtları kullanılarak yapı davranışı Zaman-Frekans analizi yaklaşımıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada zaman-frekans ortamında sürekli dalgacık dönüşümü yöntemi kullanılarak yapı dinamik özelliklerinin zaman içerisindeki değişimleri gözlenmiştir. Buna göre, sismik taban yalıtımının etkisi ile kuvvetli yer hareketinin önemli miktarda enerji içeriğine sahip yüksek frekanslı bileşenlerinin üst yapıya aktarımının belirgin bir şekilde azaldığı anlık olarak izlenmiştir. Taban yalıtımlı yapıda deprem etkisinin ve üst yapıdaki davranış kinematiğinin ve tasarım kuvvetlerinin değişimlerini zaman ve frekans ortamlarında vermesi yapı davranışının frekans muhteviyatının zamanla nasıl değiştiğini göstermesi açısından etkin bir yöntem olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Zaman-Frekans analizi, Taban yalıtımı, Dalgacık dönüşümü, Yapı sağlığı ve izleme.

### Abstract

In this study, structural characteristics and response characteristics of a base isolated building are evaluated in Time-Frequency domain. Structure story responses and earthquake data set were recorded by the accelerometer network during the 1994 Northridge earthquake. Time-frequency domain continuous wavelet transform is used to monitor the variations of structural frequencies in time. In accordance with the efficiency of the base isolation, reduction of significant energy transmission to upper structure in the higher frequency range is traced instantaneously. The seismic base isolation performance of the observed structure can be identified and understood clearly in the time-frequency domain also. It has been observed that the time-frequency analysis is a very efficient method in terms of showing the variations of the earthquake effect and the behavior kinematics and design forces in the superstructure in time and frequency domain.

**Keywords:** Time-Frequency domain analysis, Base isolation, Wavelet transform, Structural health monitoring.

## 1 Giriş

Sinyaller birbirinden farklı kaynaklar tarafından oluşturulan bilgi taşıyıcılar olarak tanımlanabilir [1]. Sinyaller gerek doğadan direkt olarak elde edilmiş gerekse insan eliyle yapıy olarak üretilmiş olsun bir alıcı aracılığıyla zamana bağlı ölçülmesinden dolayı çoğunlukla zaman ortamında tanımlanmaktadır.

Sinyaller genel olarak farklı alt sinyal bileşenlerinden oluşmaktadır. Bunlar periyodik ve periyodik olmayan kısım, gürültü, anlık sıçrama ve anomaliler olarak tanımlanabilir. Bu nedenle incelenen sinyalde bu bileşenler ayrıştırılarak problemin tipine bağlı olarak ilgili yapısal kısım ve buna ait özellikler belirlenmeye çalışılmaktadır. Bunun için çalışma yapılan ortamın sinyal içeriğini ne ölçüde yansıttığı ve bu ortamın anlaşılabilirliği önemli olmaktadır. Bu nedenle, sinyaller kayıt altına alındığı ortam yerine ihtiyaca en uygun ortama dönüştürülerek bu ortamda işlenmektedirler. Sonuç olarak, aynı sinyale farklı bir açıdan bakılarak sinyal içeriğinden aranan bilgiye daha net bir şekilde ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Zaman ortamında kaydedilen sinyallerden genlik, faz, enerji, süre gibi bazı temel bilgiler elde edilebilirken, uygulanan Fourier dönüşümü ile frekans ortamında kompleks sinyal farklı genlik ve farklı frekans yapılarında harmonik dalga formlarının bileşenlerinden oluşturulabilir. Ayrıştırılmış harmonik

sinyallerin frekans içeriğine bağlı olarak farklı ortamlardaki yayılım ve azalım özellikleri belirlenebilir. Ancak, gözlenen gerçek fizik yasalarına uymayan ayrıştırılmış-sonsuz enerjiye sahip basit harmonik zaman fonksiyonlarının bir süre sonra sönümlenmesi bu dönüşüm içinde gerçekleşmemektedir. Dahası, sinyale ait Fourier spektrumu incelendiğinde ayrıştırılmış harmonik sinyallerin frekans, genlik ve faz bilgileri elde edilirken, bu bilgilerin kayıt zamanı süresince anlık durumuna ait değişim bilgileri de elde edilememektedir.

Fourier analizi basit algoritması ve uyarlanabilir yazılım kolaylığı gibi birçok avantajından dolayı lineer-durağan (stasyoner-stationary)-ergodik (ergodic) fizik şartlarında izlenen kayıtların analizi ve işlenmesi için oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Yukarıda belirtilen özellikle matematiksel avantajlarına rağmen bazı fiziksel uygulamalarda sınırlamaları bulunmaktadır [2]. Yöntemin matematiksel yönü belirli durumlarda sinyal özelliklerini doğru olarak sağlasa da fiziksel gerçekliği bozabilmektedir.

Gerçek sinyallerin çok büyük bir kısmı durağan olmayan özelliktedir. Zaman-Frekans analizi yöntemleri, özellikle mekanik titreşim sonucu elde edilen durağan olmayan sinyallerin dinamik karakteristiklerini zamana bağlı olarak dikkate almaktadırlar. Zaman-Frekans spektrumları durağan olmayan sinyallerin analizi için yaygın olarak kullanılan adaptif

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

yöntemlere göre de daha fazla ve doğru bilgi sağlamaktadır [2]-[7].

Bu çalışma kapsamında, kuvvetli yer hareketi altında taban yalıtımlı bir binadan elde edilen ivme kayıtları kullanarak zaman-frekans ortamında yapı ve yer hareketinin karakteristik özellikleri incelenmekte ve yapı dinamik özellikleri belirlenmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan Sürekli Dalgacık Dönüşümü yöntemi ile sinyal geçmişlerine modal ayrıştırma uygulanarak modal tepki geçmişleri, anlık yapısal frekanslar ve etkin sönüm oranları elde edilmiştir. Önerilen yöntem ile uygulamada standart olarak kullanılan Fourier tabanlı yöntemlere alternatif olarak durağan olmayan özellikteki problemler için basit ve davranışın doğrudan ve bütüncül olarak anlaşılmasına imkân sağlamaktadır.

## 2 Analitik (Kompleks) sinyal

Sinyaller doğada gerçek formda bulunmasına rağmen, matematiksel olarak kompleks formda tanımlamak sinyalin özellikle faz içeriğini ve bununla beraber frekans içeriğini elde etmek açısından avantajlı bir yaklaşım olmaktadır [8]. Buna göre gerçek bileşeni  $s_r(t)$ , sanal bileşeni  $s_i(t)$  olan bir kompleks sinyal,  $x(t)$  aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$x(t) = s_r + js_i = A(t) e^{j\psi(t)} \quad (1)$$

Bu ifadeden anlık genlik,

$$A(t) = \pm |X(t)| = \pm \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} = e^{Re[ln X(t)]} \quad (2)$$

ve anlık faz,

$$\psi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} = Im[ln X(t)] \quad (3)$$

Anlık fazın zamanda birinci türevi anlık açısal frekans olarak ifade edilmektedir.

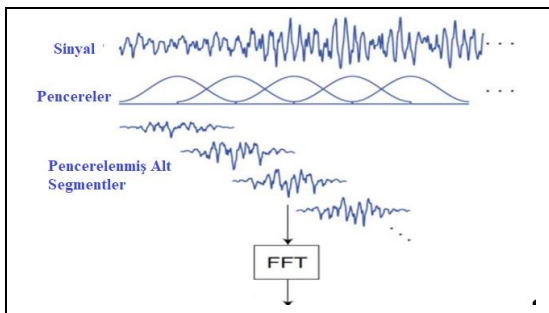
$$\omega(t) = \dot{\psi}(t) \quad (4)$$

Bir sinyalin her bir zaman anında bir anlık faz değeri bulunmaktadır.

## 3 Zaman-frekans analiz yöntemleri

### 3.1. Kısa zaman pencereli fourier dönüşümü

Kısa zaman pencereli Fourier dönüşümü ile bir sinyal pencereleme tekniği kullanılarak alt parçalara ayrılmakta, her parçaya Fourier dönüşümü uygulanmasıyla spektral özellikleri belirlenmektedir. Uygulanan teknik temsili olarak Şekil 1'de özet olarak gösterilmektedir. Her bir zaman aralığı için hesaplanan spektrum ile sinyalin frekans içeriğinin zaman içerisindeki değişimi gözlemlenebilir.



Şekil 1. Kısa zaman pencereli Fourier dönüşümü [9].

Figure 1. Short time Fourier Transform [9].

Bu yöntem ile bir sinyalin t anındaki özelliklerini belirlemek için, sinyalin belirli t merkezli kısa bir zaman penceresine Fourier Dönüşümü uygulanmakta ve zaman penceresi çalışılan serinin sonuna kadar kaydırılarak her t anı için frekans bilgileri hesaplanarak zamanla değişen frekans içeriği spektrumu elde edilmektedir. Bu pencereleme işleminde sinyalin t merkezli bir pencere fonksiyonu  $h(t)$  ile çarpılması ile dönüştürülmüş sinyal elde edilir.

$$s_t = s(\tau) + h(\tau - t) \quad (5)$$

Buna göre Fourier dönüşümü,

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S_t(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau) h(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (7)$$

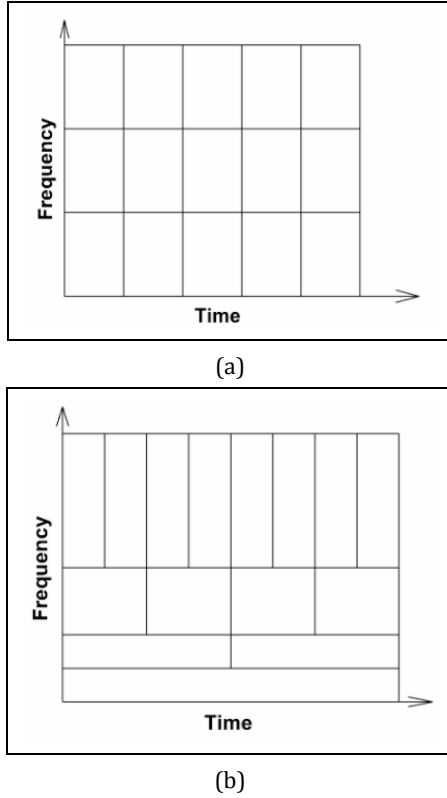
Sinyalin t anı için enerji yoğunluk spektrumu ise,

$$P_{sp}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau) h(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \right|^2 \quad (8)$$

İfadesi ile elde edilebilir. Bu ifade ile her bir zaman anı için farklı bir spektrum elde edilerek, tüm bu spektrumların birleştirilmesi ile zaman-frekans dağılımı,  $P_{sp}$  bulunur. Söz konusu dağılıma "Spektrogram" adı verilmektedir.

Kısa Zaman Pencereli Fourier Dönüşümü yönteminde dar zaman bantlı pencere hassaslığı ve temsili ortalama değer hesaplaması gibi problemler zaman-frekans kazancının yüksek zengin içerikte izlenmesini sınırlamaktadır [6]. Bu yöntemde farklı frekans içerikleri için sabit zaman ve frekans çözünürlüğü kullanılmaktadır. Bu durum zaman ya da frekans ortamında çözünürlüğün kaybedilmesine sebep olmaktadır. Kullanılan pencere fonksiyonundan dolayı elde edilen enerji içeriği salt orijinal sinyale ait olmayıp, pencere fonksiyonundan dolayı yapay bir içeriği de bünyesinde barındırmaktadır. Bir diğer durum ise sızıntı oluşumudur. Pencere fonksiyonu uygulanmış bir sinyalin spektrumu tek bir frekansı baskın olarak ortaya çıkarmayıp, pencere fonksiyonun frekans genişliği boyunca yayılı bir frekans spektrumu elde edilmesine neden olmaktadır. Kısa Zaman Pencereli Fourier dönüşümünde, pencere fonksiyonunun genişliği önemli bir parametre olup, analiz sonucunda hangi frekansların tespit edileceğini kontrol etmektedir. Bu nedenle, pencere fonksiyonun zaman ortamındaki genişliğinin sinyal içeriğindeki en büyük baskın periyodun süresinden daha fazla olması önerilen bir yaklaşımdır [9]. Bu durumun sağlanamaması durumunda, elde edilen sinyalin frekans içeriği gerçek durumu temsil etmeyebilir.

Heisenberg Belirsizlik İlkesi 'ne [10] göre sabit zaman ve frekans çözünürlüğüne sahip Kısa Zaman Pencereli Fourier Dönüşümünde taban yalıtımlı sistemler gibi uzun periyotlu titreşim özelliklerine sahip sistemlerde iyi frekans çözünürlüğü elde edilmesi güçtür. Büyük periyotlu yapısal tepkilerin kısa zaman pencerelerinde çözünürlüğü kaybolmaktadır. Dalgacık dönüşümünde ise zaman ve frekans çözünürlüğü değişken özellikte olduğu için uzun periyotlu sistemler için iyi zaman çözünürlüğü de elde edilebilmektedir. Bu durum Şekil 2 üzerinde karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. Zaman-Frekans çözünürlükleri. (a): Kısa zaman pencere Fourier dönüşümü. (b): Sürekli dalgacık dönüşümü [9].

Figure 2. Time-Frequency resolution. (a): Short time Fourier transform. (b): Continuous wavelet transform [9].

### 3.2. Sürekli dalgacık dönüşümü

Sürekli dalgacık dönüşümü zaman ortamında aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır [10].

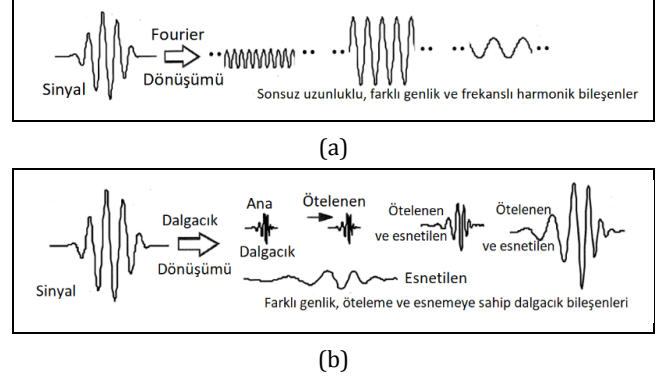
$$W_g(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) g^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (9)$$

Bu ifade sinyal ile dalgacık fonksiyonunun konvolüsyonu (evrişim) işlemidir. Buna göre, sinyal ile dalgacık fonksiyonu genliği her bir ölçek parametresi "a" için, her bir zaman adımında terim terime skaler olarak çarpılarak toplanır ve ilgili zaman adımı için sonuç değeri elde edilir. Bu işlem sinyal uzunluğu boyunca her bir zaman adımı için yapılarak ilgili ölçek parametresi için her bir zaman adımına karşı gelen dalgacık katsayıları elde edilir. Ölçek parametresi yenilenecek sinyalin tüm frekans spektrumu için yukarıdaki işlem yapılarak dalgacık katsayılarından oluşan matris elde edilir. Zaman ortamında tanımlanan bu işlem frekans ortamında da yapılabilmektedir.

$$W_g(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) G^*(a\omega) e^{i\omega b} d\omega \quad (10)$$

Dalgacık dönüşümü yöntemini Haar ilk olarak 1909'da yayınlanan tez çalışmasında kullanmıştır [11]. Dalgacık dönüşümü yöntemini daha pratik bir şekilde anlatmak gerekirse Şekil 3'te gösterildiği gibi Fourier dönüşümü ile bir benzeşim yapılabilir. Fourier dönüşümü ile periyodik bir sinyal sonsuz uzunluğa sahip farklı genlik ve frekans özelliklerine

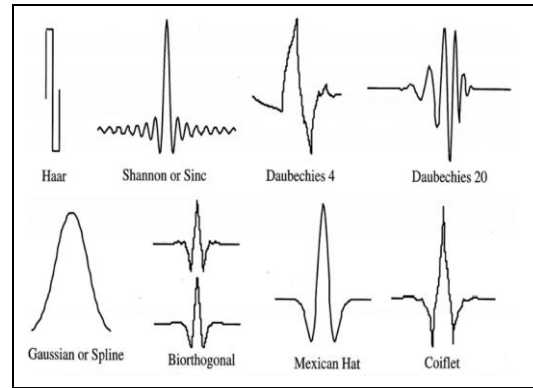
sahip harmonik bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Dalgacık dönüşümünde ise, periyodik veya periyodik olmayan bir sinyalin sınırlı uzunluktaki ana dalgacık ile bu dalgacığın zaman içerisinde ötelenen ve ölçeklenerek esnetilen bileşenlerinin toplamı olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Dalgacık ve Fourier dönüşümü benzeşimi. (a): Fourier dönüşümü. (b): Dalgacık dönüşümü [12].

Figure 3. Analogy of wavelet and Fourier transforms. (a): Fourier transform. (b): Wavelet transform [12].

Dalgacık dönüşümü yöntemindeki en önemli adımlardan biri uygun dalgacık fonksiyonunun belirlenmesidir. Sinyal özellikleri, yapılacak çalışmanın amacına bağlı olarak farklı dalgacık fonksiyonları kullanılabilir. Analitik (kompleks) dalgacıklar sinyallerin anlık frekans ve faz özelliklerinin belirlenmesinde en uygun dalgacık fonksiyonlarıdır [9]. Bu yapıdaki dalgacık fonksiyonlarının Fourier dönüşümü sonrasında negatif frekans bileşenlerinin genliği sıfır olmaktadır. Bu tip dalgacık fonksiyonlarına örnek olarak Analitik Morlet, Bump ve Morse dalgacık fonksiyonları verilebilir. Örnek dalgacık fonksiyonları Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Örnek dalgacık fonksiyonları [10].

Figure 4. Example wavelet functions [10].

### 3.3. Hilbert ve Hilbert-Huang dönüşümü

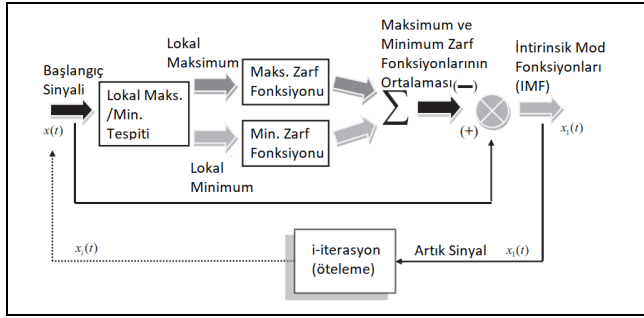
Hilbert dönüşümü, Fourier ve Laplace dönüşümleri gibi bir integral dönüşümü olup, adını matematiksel fizik alanında ilk defa tanımlayan David Hilbert den almakta olan özel bir integral denklemdir [13].

$$H[x(t)] = \tilde{x}(t) = \pi^{-1} \int \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (11)$$

Hilbert Dönüşümünün anlaşılması ve uygulanması hakkında fiziksel tanımı yukarıda verilen integral dönüşümünden daha

basit bir anlatım sunmaktadır. Fiziksel olarak Hilbert dönüşümü, spektral bileşenlerin genlikleri sabit kalırken, fazların  $\frac{\pi}{2}$  kadar ötelendiği özel bir lineer filtreye eşdeğer olarak görülebilir. Hilbert dönüşümü ile tek bileşenli sinyallerin analizi gerçekleştirilmektedir.

Hilbert-Huang Dönüşümü (HHT), Huang ve diğ.[14] tarafından geliştirilen ampirik bir zaman-frekans analizi yöntemi olup, özellikle durağan olmayan ve doğrusal olmayan sinyallerin çözümlenmesinde kullanılmaktadır. Yöntem esas itibari ile Ampirik Mod Ayırıştırma (EMD) ve Hilbert Spektral Analizi (HSA) olarak iki temel kısımdan oluşmaktadır. Ampirik Mod Ayırıştırma ile harmonik veya periyodik olmayan alt sinyallerden oluşan bir sinyalin, özgün alt fonksiyonlarının (IMF) toplamından meydana geldiği kabul edilmektedir. Ampirik Mod Ayırıştırma (EMD) ile çok bileşenli bir sinyal tek bileşenli özgün alt fonksiyonlarına ayrılmaktadır. Her bir özgün alt fonksiyonuna Hilbert dönüşümü uygulanarak, bu tek bileşenli alt sinyallerin anlık faz, frekans bilgileri elde edilmektedir. Yöntemin işlem adımları Şekil 5'te sunulmaktadır.



Şekil 5. Ampirik mod ayırıştırma yöntemi (EMD) akış diyagramı [13].

Figure 5. Flow diagram of Empirical Mode Decomposition Method [13].

Ampirik Mod Ayırıştırma yöntemi için ilk olarak ana sinyalin ortalaması,  $m_1$  hesaplanarak tüm sinyalden  $X(t)$  çıkartılır ve aday IMF fonksiyonu için gerekli kabul şartlarının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir.

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t) \quad (12)$$

Bu aşamadan sonra,  $h_1(t)$  fonksiyonun maksimum ve minimum zarf fonksiyonları belirlenerek bunların ortalaması  $m_{11}$  elde edilerek,  $h_1$  fonksiyonundan çıkartılır.

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t) \quad (13)$$

Bu adıma öteleme işlemi adı verilir ve kalan artık fonksiyon sabit (monotonik) bir fonksiyon olana veya fonksiyon sıfır temel eksenine ile en az iki defa kesişinceye kadar k defa devam edilir.

$$h_{1k}(t) = h_{k-1}(t) - m_{1k}(t) \quad (14)$$

$$c_1(t) = h_{1k} \quad (15)$$

Elde edilen  $h_{1k}(t)$  fonksiyonu birinci IMF fonksiyonu  $c_1$ , olarak adlandırılır ve sinyal muhteviyatındaki yüksek frekans içeriğini barındırmaktadır. Sinyal içeriği  $X(t)$  den  $c_1$  fonksiyonu çıkartılarak daha düşük frekans içeriğine sahip kalan artık kısım  $r_1$  fonksiyonu oluşturulur. Bu prosedüre tüm  $r_1$  fonksiyonları elde edilinceye kadar devam edilir.

$$r_1(t) = X(t) - c_1(t) \quad (16)$$

$$r_i(t) = r_{i-1}(t) - c_i(t), i=1,2,3,\dots,n \quad (17)$$

Ayırıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, orijinal sinyal n adet IMF fonksiyonu ile kalan son artık fonksiyonun toplamından meydana gelmektedir.

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) - r_n(t) \quad (18)$$

Elde edilen her bir IMF fonksiyonuna Hilbert Spektral Analizi uygulanarak sinyalin zamana bağlı anlık frekans, genlik ve faz özellikleri belirlenir. Hilbert Spektral Analizi ile  $c_i(t)$  sinyali ve bu sinyalin Hilbert dönüşümü  $H[c_i(t)]$  ile kompleks yapıdaki analitik sinyal,  $Z_i(t)$  elde edilir.

$$Z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] = \alpha_i(t) e^{j\psi_i(t)} \quad (19)$$

Buradan zamana bağlı genlik  $a(t)$ , faz  $\psi(t)$  ve anlık frekans  $\omega(t)$  aşağıdaki ifadeler ile belirlenebilir.

$$\alpha_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H[c_i^2(t)]} \quad (20)$$

$$\psi_i(t) = \arctan \frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)} \quad (21)$$

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (22)$$

Hilbert dönüşümünün n sayıdaki IMF fonksiyonuna uygulanması ile orijinal sinyal  $X(t)$ , genlik ve anlık frekansın fonksiyonu olarak aşağıdaki formda yazılabilir,

$$X(t) = \Re \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (23)$$

Verilen bu ifadenin Fourier dönüşümünden elde edilen zamandan bağımsız sabit genlik ve faz durumundan farklı olduğu görülmektedir. Bu yaklaşım zaman-frekans ortamında Hilbert Spektrumu ile temsil edilmektedir.

$$H(\omega, t) = \sum_{i=1}^n \widetilde{H}_i(\omega, t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) \quad (24)$$

Bu ifade de yer alan  $\widetilde{H}_i(\omega, t)$ , Hilbert Spektrumunun i'inci bileşenini göstermektedir. Hilbert Spektrumunun karesi enerji yoğunluğunu vermektedir.

#### 4 Sürekli dalgacık dönüşümü yöntemiyle yapı özelliklerinin belirlenmesi

Dalgacık Dönüşümü Yöntemi özellikle 90'lı yılların son on yılından itibaren farklı araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır. Özellikle Carmona ve diğ. [15],[16] tarafından önerilen yaklaşıma göre bir sinyale ait dalgacık katsayıları, her bir zaman adımında o sinyal içeriğinde bulunan yüksek enerjili baskın frekanslarda en büyük değere sahip olmaktadır. Söz konusu dalgacık katsayıları sinyal uzunluğu boyunca zaman-frekans düzleminde o sinyale ait sırt (ridgetop) eğrisini oluşturmaktadır. Sırt Eğrisini oluşturan dalgacık katsayılarının zaman eksenine boyunca oluşturduğu eğri ise İskelet Eğrisi olarak tanımlanmaktadır. Bu eğriyi oluşturan dalgacık katsayıları kompleks yapıda olup, gerçel ve sanal bileşenler ilgili mod

frekansına ait analitik sinyalin gerçek bileşeni ile onun Hilbert dönüşümüdür. Elde edilen bu alt sinyaller kullanılarak zaman ya da frekans analizi yöntemleri ile sinyale ait modal genlik, faz, anlık frekans, sönüm gibi özellikler belirlenebilmektedir. Aynı zamanda, bu alt sinyallerden tersine dönüşüm yapılarak esas sinyale ulaşılması da mümkündür. Bu yöntem kullanılarak yapılmış çalışmalar [17]-[19] referans olarak belirtilebilmektedir. Yöntemin en önemli avantajı, yapısal tepkiye ait baskın alt sinyal bileşenleri tespit edildikten sonra hem zaman hem de frekans esaslı temel yöntemlerin kullanılabilmesine imkân sağlamasıdır.

Sırt eğrisi, Analitik sinyal tanımını üzerinden aşağıdaki ifade ile açıklanabilir [15].

$$\alpha(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = A(t)e^{j\psi(t)} \quad (25)$$

Sinyal ve dalgacık fonksiyonlarının genliğindeki değişimin faz değişiminden daha yavaş olduğu asimptotik sinyaller olduğu kabul edilirse,

$$\bar{\psi}_{a,b}(t) = \psi_x(t) - \psi_g(t - b)/a \quad (26)$$

Bu ifade de yer alan  $\psi_x$  ve  $\psi_g$  sinyal ve dalgacık fonksiyonunun anlık fazını göstermektedir. Sırt eğrisi fonksiyonu  $a=r(b)$  eğrisine eşit olup  $t_s(a,b)=b$  şartını sağlayan noktalardan meydana gelmektedir. Buna göre sırt eğrisi fonksiyonu aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır.

$$r(b) = \frac{\psi_g(0)}{\psi_x(b)} \quad (27)$$

Dalgacık dönüşümünde sırt eğrisi değerleri ile sınırlı değerler olarak tanımlanan iskelet eğrisi ise,

$$(W_g x)_{(r(b),t)} = C(t)a(t) \quad (28)$$

$C(t)$  fonksiyonu dalgacık fonksiyonu ve sinyale bağlı olarak oluşturulan düzeltme fonksiyonudur. Sırt eğrisi fonksiyonunun elde edilmesi için en temel yaklaşım dalgacık katsayılarının lokal maksimumlarının bulunmasıdır. Bunun dışında farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş yöntemlerde bulunmaktadır [20].

Sırt eğrisi fonksiyonu ve iskelet eğrisi her bir mod için elde edilebilir. Elde edilen iskelet eğrileri, her bir mod için toplam tepki fonksiyonu ile Hilbert dönüşümünü oluşturmaktadır. Buradan her bir mod için modal frekans ve sönüm özellikleri elde edilebilmektedir.

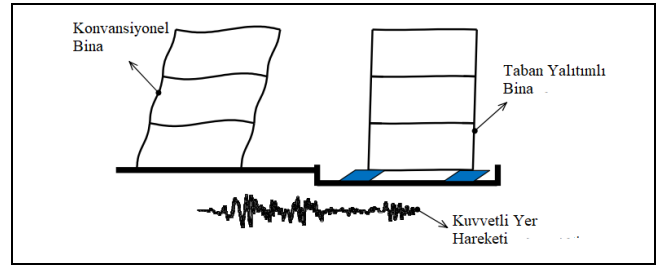
Bu çalışmada dalgacık dönüşümünde Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı kullanılmıştır. Morse dalgacığı analitik bir dalgacık olup, yapısında bulunan zaman-bant genişliğini belirleyen " $\beta$ " ve zamanda dalgacık simetri özelliğini belirleyen " $\gamma$ " katsayıları değiştirilerek farklı analitik dalgacıklar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada  $(\gamma, \beta)$  katsayıları sırasıyla (3,60) olarak kullanılmıştır.  $\gamma=3$  ile zaman ortamında simetrik ve yüksek çözünürlük sağlayan minimum Heisenberg alanı elde edilirken,  $\beta=60$  ile en büyük dalgacık frekansı için zamanda dalgacık zarf fonksiyonu içerisinde daha fazla salınım katılması sağlanmaya çalışılmıştır. Frekans ortamında Morse dalgacığı aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır [21].

$$\psi_{p,\gamma}(\omega) = U(\omega)\alpha_{p,\gamma}\omega^\beta e^{-\omega^\gamma} \quad (29)$$

$$\text{En Büyük Dalgacık Frekansı} = \beta^{\frac{1}{\gamma}} \quad (30)$$

## 5 Taban yalıtımlı binaların deprem etkisi altındaki davranışları

Depremselliğin yüksek olduğu ülkemizde taban yalıtımlı bina sayısında son yıllarda belirgin bir artış olduğu görülmektedir [22], [23]. Taban yalıtımı, deprem etkisi altında yapı taşıyıcı sistemi, yapısal olmayan elamanlar ve bina muhteviyatında oluşacak hasar ve kayıpların azaltılmasında etkin bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde temel yaklaşım Şekil 6'da gösterildiği gibi yapının yalıtım birimi olarak adlandırılan esnek elemanlar ile zeminden yalıtılarak yüksek frekans içerikli sismik dalgalar tarafından yapıya aktarılacak mekanik enerjinin azaltılmasına dayanmaktadır. Yapıya aktarılan enerjinin azaltılması, yapıda oluşacak ivme, hız ve deplasman tepkisi ile yapıda oluşacak hasarın azalmasını sağlamaktadır.



Şekil 6. Konvansiyonel ve taban yalıtımlı binada oluşan deformasyonların karşılaştırılması [24].

Figure 6. Comparison of Deformed shapes of conventional and base isolated buildings [24].

Pratik uygulamalarda yalıtımlı yapıların analitik olarak modellenmesinde iki temel yaklaşım kullanılmaktadır [25]. Doğrusal davranışa sahip modellerde yalıtım birimleri doğrusal bir yay ile viskoz sönümden meydana gelmektedir. Yalıtım biriminin kuvvet-deplasman ilişkisinde eğrinin eğimi etkin rijitlik olarak tanımlanmaktadır. Doğrusal olmayan modelde ise sistemde akma öncesi ve sonrası davranışı temsil eden iki adet doğrusal yay bulunmakta olup, plastik deformasyon bölgesinde sönüm "Coulomb sönüm" yaklaşımı ile dikkate alınmaktadır. İki doğru kuvvet-deformasyon ilişkisinde ilk eğri yalıtım biriminin elastik deformasyonu ile ilişkili başlangıç rijitliği, akma sonrasında plastik deformasyonlarının elde edilmesinde ise akma sonrası rijitliği kullanılmaktadır.

Doğrusal yalıtım sistemlerinde, sönüm oranının sınırlı bir düzeyde olduğu veya sönüm oranının yüksek olmasına rağmen yüksek mod etkilerinin azaltılması amacıyla ilave viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı durumlarda yüksek mod ivmelerinin oluşumu sınırlı düzeyde kalmaktadır. Bu nedenle, sistemin toplam tepkisi büyük oranda ilk mod davranışından oluşmaktadır. Yüksek sönüm oranlarına ulaşıldığı durumlarda ise modal katılımlar ve mod şekilleri değişim göstererek sistemin çözümlenmesinde kullanılan basitleştirmeler geçersiz olmaya başlamaktadır. Doğrusal olmayan yalıtım sistemlerinde, yalıtım birimlerinde akma sonrası davranış arttıkça sistemde yüksek mod tepkisinin katılımı artmaktadır. Yüksek mod etkinliğinin artmasıyla, sistemin ilk moduna kıyasla üst yapı atalet kuvvetleri artış göstermektedir. Sistemin izolasyon seviyesindeki toplam taban kesme kuvvetleri değeri büyük oranda ilk moda yakın bir değerde sabit kalırken sistemin farklı katlarındaki kat ivmeleri ve kesme kuvvetleri artmaktadır. Doğrusal elastik bir yapının doğrusal olmayan yalıtım birimleri ile toplam tepkisi modal tepkilerin toplamı olarak elde edilebilir. Ancak bu durumda modal tepkiler klasik sönüm modeline sahip doğrusal sistemlerden farklı olarak

birbirlerine bağlı olmaktadır. Modların birbirlerinden ayrıştırılması ve sistem çözümünün pratik olarak basitleştirilebilmesi amacıyla sistemin eşdeğer doğrusal özelliklere sahip etkin rijitlik, etkin periyot ve etkin sönüm ile temsil edildiği yaklaşım uygulamada basit sistemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda yalıtım birimlerinin akma sonrası etkin rijitliğine karşı gelen etkin modlar, sınırlı sönüm oranına sahip doğrusal yalıtım birimlerinde olduğu gibi klasik sönüm modeline uyan ve diklik koşulunu sağlayan özelliktedirler [25]. Bu modlar, kuvvet-deplasman çevriminde en büyük tepki durumunda olduğundan yalıtım biriminin akma sonrası maksimum tepki durumunu yansıtmaktadır.

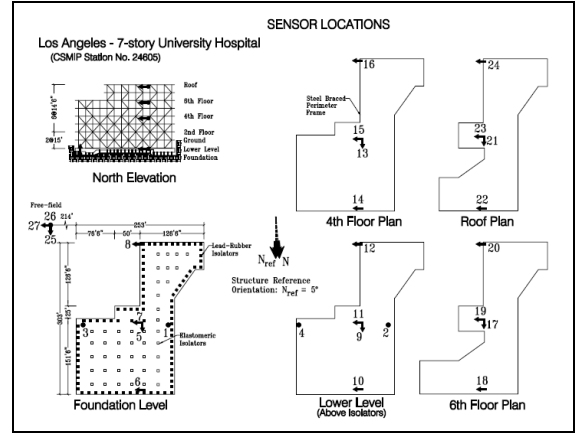
Yalıtım birimlerinin eşdeğer doğrusal özellikler ile temsil edildiği tek veya çok modlu doğrusal analiz yöntemleri, yapı plan boyutları ve yüksekliğinin sınırlı olduğu, üst yapının planda ve düşey düzlemde simetrik, düzenli ve yeterli rijitliğe sahip bir taşıyıcı sistemden oluştuğu, üst yapı doğrusal olmayan davranışının sınırlı olduğu, yalıtım birimlerinde çekme/kalkma oluşmadığı, sistemde tek bir kotta yalıtım düzlemi bulunduğu, yalıtım birimlerinde oluşan doğrusal olmayan davranışın sınırlı düzeyde olduğu veya bir başka ifade ile etkin sönüm oranının sınırlı seviyede olduğu, yalıtım birimlerinin yeterli merkezleme kuvveti kapasitesi ve akma sonrası rijitliğe sahip olduğu, üst yapı-temel sistemi-zemin arasında etkileşimin baskın olmadığı, çalışma alanında yakın fay etkisinin bulunmadığı vb. durumlarda basit ve pratik bir yöntem olarak kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar vermesi nedeniyle uygulamada tercih edilmektedir. Ancak, sistem davranışının yukarıda belirtilen durumları içerdiği kompleks problemlerde üst yapı ve yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan davranışını doğrudan temsil eden doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin temel yaklaşım olarak kullanılması gerekliliği hem uygulama yönetmeliklerinde [26]-[28] hem de doğrusal-doğrusal olmayan analiz sonuçlarının karşılaştırmalı olarak sunulduğu çalışmalarda ifade edilmektedir [29]-[31].

## 6 Zaman-Frekans analizi yöntemleri ile taban yalıtımlı örnek bir yapının değerlendirilmesi

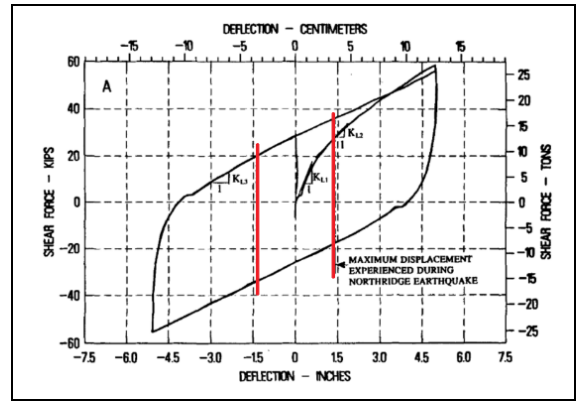
Bu çalışma kapsamının konusu olan yapı Los Angeles da bulunan yedi katlı Üniversite Hastanesi binasıdır. Yapı dünyadaki ilk taban yalıtımlı hastane yapısı olup toplam 275 yatak kapasitesine sahiptir. Yapı 1991 yılında kullanıma açılmıştır. Yapıya ait temel bilgiler ve 1994 Northridge depremi kayıtları CSMIP [32] veri bankasından elde edilmiştir.

Yapı bir adet bodrum kat olmak üzere toplam sekiz kattan oluşmaktadır. Yapı taşıyıcı sistemi moment aktaran çerçeveler ile yapı kenar akslarında bulunan merkezi çaprazlı çerçevelerden meydana gelmektedir. Yapı kat döşemeleri kompozit döşeme sistemidir. Yapının temel sistemi tekil ve sürekli temel girişlerinden oluşmaktadır. Yapı hem plan hem de düşey düzlemde düzensiz bir yapıya sahiptir. Yapının plan boyutları 92.4m ve 77.1 m olup inşaat alanı 35000 m<sup>2</sup>'dir.

Yapının merkezi çaprazlı çerçevelerin bulunduğu kenar akslarında toplam 68 adet kurşun çekirdekli kauçuk, düşey yük taşıyan iç aks kolonlarında ise 81 adet elastomer yalıtım birimi bulunmaktadır. Yapıya 1991 yılında toplam 24 adet, açık alanda ise 3 adet ivme ölçer sensör yerleştirilmiştir. Cihazların yerleşimi ve kat planları ile yapıda kullanılan kurşun çekirdekli bir yalıtım biriminin prototip testine ait yatay kuvvet-yer değiştirme ilişkisi Şekil 7' de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7. Yapı ve yalıtım birimi özellikleri. (a): Kat planları ve ivme ölçer yerleşimleri [33]. (b): Kurşun çekirdekli yalıtım birimi prototip testi yatay yük- yer değiştirme geçmişi [34].

Figure 7. Building and isolator properties. (a): Floor plans and sensor placements [33]. (b): Hysteresis loops for prototype lead-rubber isolator [34].

Üst yapı ve yalıtım birimlerinin tasarımında ATC-6 deprem yer hareketi spektrumu kullanılmıştır [34]. Çalışma alanı yerel zemin sınıfı S1 (sağlam, sert kaya) olup, Newport-Inglewood fay hattına 15km mesafede yer almaktadır. Yakın fay hattı etkisi çalışma alanı için tanımlanan en büyük yer ivmesi olan 0.4 g'nin, 1.2 ile çarpılarak artırılması ile dikkate alınmıştır. Yalıtım birimleri için tasarım depremi düzeyi en büyük yer değiştirmesi 26cm olup, etkin periyot 2.2 sn. etkin kütle oranı %99.5, yapı çevresinde bırakılan sismik boşluk 33-35cm'dir [34]. Yapıda kullanılan kurşun çekirdekli ve elastomer yalıtım birimleri için hem tasarım depremi hem de bu çalışmada incelenen 1994 Northridge depremi düzeyi yalıtım birimi temel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Yapıya ait periyot/(frekans), etkin sönüm oranları ve kütle katılım oranları ankastre mesnetli durum için Tablo 2, taban yalıtımlı 1994 Northridge depremi düzeyi için ise Tablo 3'te sunulmaktadır. Söz konusu bina dinamik özellikleri analitik modelden elde edilen değerler olup, bu çalışma kapsamında 1994 Northridge depreminde yapı da kaydedilen ivme kayıtları kullanılarak elde edilen periyot/frekans ve etkin sönüm oranlarının karşılaştırılması için referans olarak sunulmaktadır.

Tablo 1. Yalıtım birimi özellikleri [33].

Table 1. Isolator properties [33].

Özellik	Kurşun çekirdekli yalıtım birimleri		Elastomer yalıtım birimleri	
	1994 Northridge Depremi	Tasarım Seviyesi	1994 Northridge Depremi	Tasarım Seviyesi
Adet	68		81	
Yalıtım Seviyesi				
Yer değiştirilmesi (cm)	2.8	26.04	2.8	10.25
Akma Kuvveti $F_y$ (kN)	80.06	169.02	-	-
Akma Deplasmanı $D_y$ (cm)	0.86	4.83	-	-
Akma Sonrası Rijitliği (MN/m)	2.101	0.718	-	-
Etkin Rijitlik (MN/m)	4.325	1.247	2.977	1.576

Tablo 2. Ankastre mesnetli bina periyot/(frekans), sönüm ve kütle katılım oranları [33].

Table 2. Fixed-Base case building period/(frequency), damping and mass participating ratios [33].

Mod	DB T(sn)/f (Hz)	KG T(sn)/f(Hz)	DB $\xi$ (%)	KG $\xi$ (%)	DB $\Upsilon$ (%)	KG $\Upsilon$ (%)
1	0.92/(1.09)	0.82/(1.22)	0.02	0.03	0.69	0.69
2	0.37/(2.70)	0.35(2.86)	0.02	0.03	0.24	0.24

Tablo 3. Taban yalıtımlı bina periyot/(frekans), Sönüm ve Kütle Katılım Oranları [33]

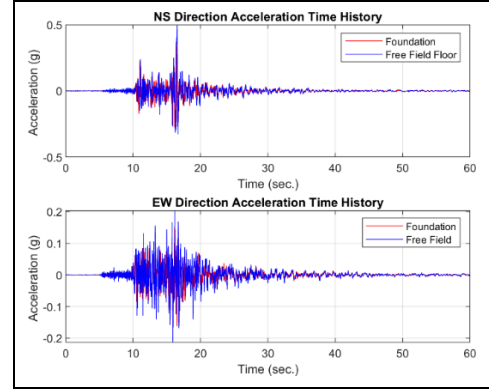
Table 3. Base-Isolated Case Building Period/(frequency), damping and mass participating ratios [33].

Mod	DB T(sn.) / f(Hz)	KG T(sn.) / f(Hz)	DB $\xi$ (%)	KG $\xi$ (%)	DB $\Upsilon$ (%)	KG $\Upsilon$ (%)
1	1.25/(0.80)	1.37/(0.73)	0.15	0.13	0.93	0.93
2	0.55/(1.82)	0.51/(1.96)	0.17	0.14	0.06	0.06

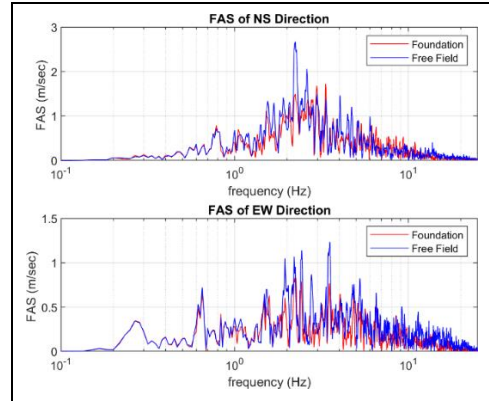
Yapıya ait yer hareketleri incelendiğinde bu yapının temel seviyesinde ve serbest sahada bulunan istasyonların kullanılmasında ile tepki geçmişleri ve spektrumları elde edilerek Şekil 8'de sunulmuştur. Kuzey-güney (NS) doğrultusunda en büyük yer ivmesinin yaklaşık 0.5 g, ivme spektrumunun hız duyarlı bölgesinde spektral ivme değerleri 1.5 g mertebesine ulaşmaktadır. Şekil 8 incelendiğinde yer hareketinin yüksek enerjili frekans bileşenleri 0.6-3.5 Hz. aralığında bulunduğu görülmektedir. Bu durum yer hareketinin orta katlı konvansiyonel yapıların doğal frekansları ile aynı aralıkta bulunmasından dolayı yıkıcı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Yapının Şekil 9'da gösterilen çatı ve izolasyon katına ait ivme tepki geçmişlerinin, Şekil 10'da verilen Fourier spektrumları incelendiğinde yapının doğu-batı (EW) yönlü istasyonlarında baskın frekansların 0.65-1.8 Hz. aralığında, kuzey-güney (NS) doğrultusunda ise 0.75-2Hz aralığında olduğu görülmektedir. Her iki doğrultu içinde Fourier Spektrumunda baskın pik noktaların belirgin olmadığı bunun yerine yer hareketi ve

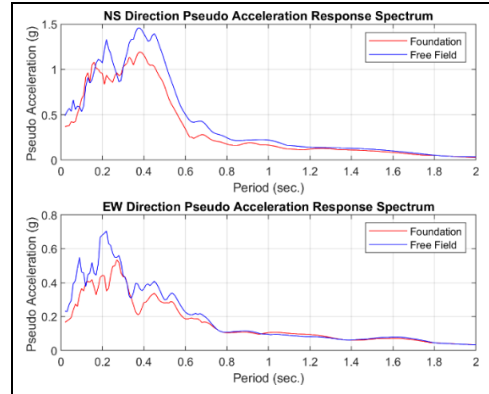
yalıtımlı sistemin durağan olmayan karakteristiğine bağlı olarak frekans eksenini boyunca yayılı bir dağılım olduğu görülmektedir. Bu nedenle yapının hâkim frekanslarının belirgin bir şekilde tespit edilmesi zorlaşmaktadır. Diğer taraftan yapının izolasyon ve çatı katına ait kayıtlar ile temel seviyesindeki kayıtlar frekans ortamında karşılaştırılarak transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Bu grafiklerden de görüleceği üzere çok sayıda pik tepki noktası bulunmakta ve buna göre yüksek dereceli, düşük doğrulama oranlı ve sistem özelliklerinin yeterli tutarlılıkta temsil edilemediği bir sistem modeli elde edilmesine neden olmaktadır.



(a)



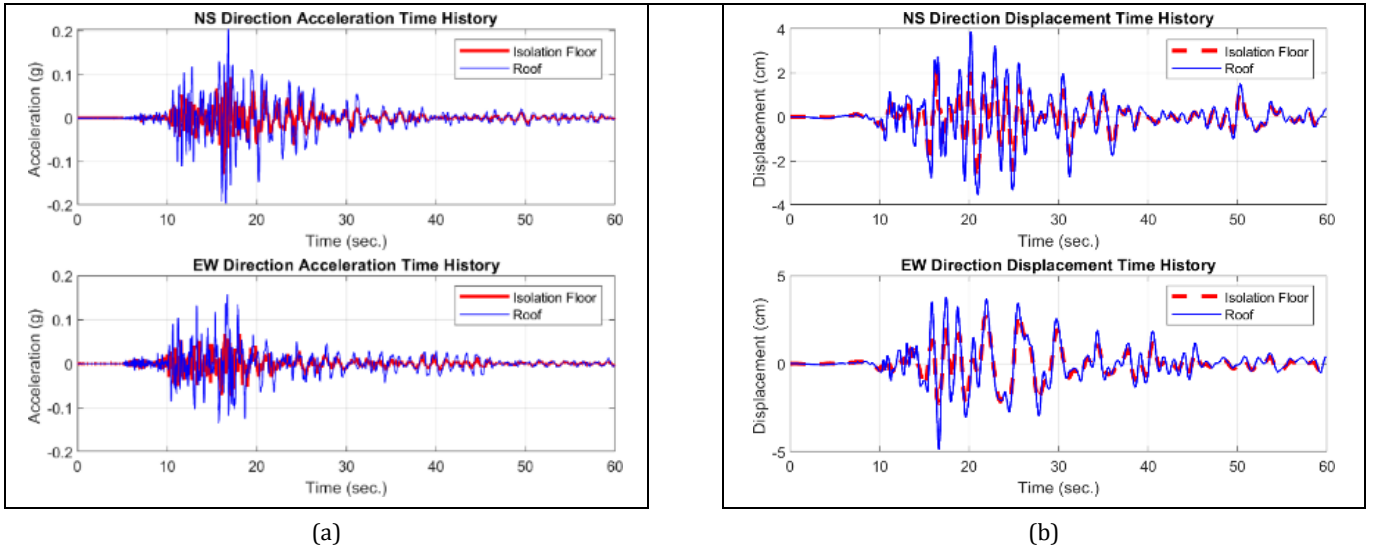
(b)



(c)

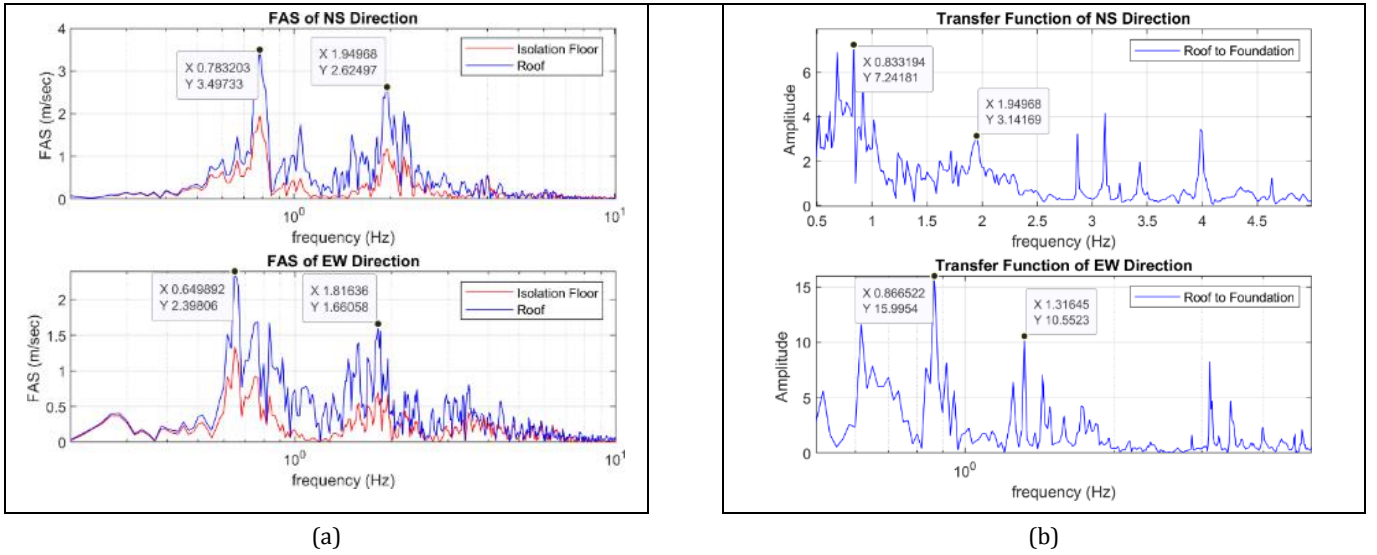
Şekil 8. Yer hareketi özellikleri. (a): İvme-zaman geçmişi. (b): Fourier spektrumu. (c): İvme tepki spektrumu.

Figure 8. Ground motion characteristics. (a): Acceleration-time record. (b): Fourier spectrum. (c): Acceleration response spectrum.



Şekil 9. Üst Yapı ivme ve deplasman tepki geçmişi. (a): İvme-zaman geçmişi. (b): Deplasman-zaman geçmişi.

Figure 9. Superstructure acceleration and displacement responses. (a): Acceleration response record. (b): Displacement response record.



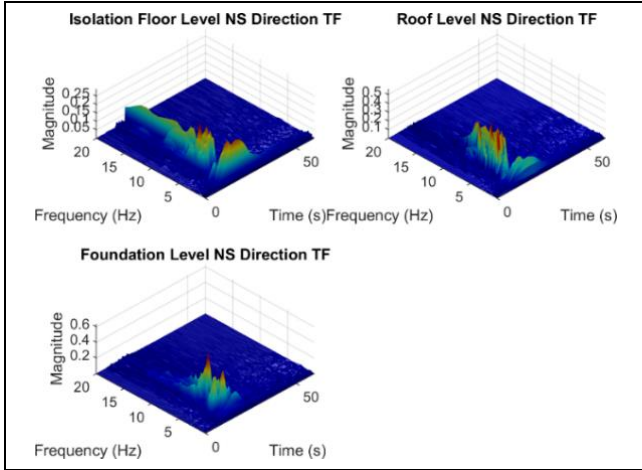
Şekil 10. Farklı istasyonlar için tepki spektrumları. (a): Yapı Fourier spektrumları. (b): Çatı ve temel Seviyesi için transfer fonksiyonları

Figure 10. Response spectra for different floors. (a): Fourier spectrum of structural response. (b): Transfer function of roof and foundation level responses.

Yapının serbest alan, temel, izolasyon ve çatı seviyesindeki kayıtları için sürekli dalgacık dönüşümü uygulanarak dalgacık enerji yoğunluğu grafikleri Şekil 11'de sunulmuştur. Yer hareketinin yüksek enerjili bölümü kaydın 10-20 sn. arasında ve 0.5-10 Hz. frekans aralığında bulunmaktadır. İzolasyon katına ait sonuçlar incelendiğinde yapıya ait baskın modların zaman içerisinde oldukça iyi bir şekilde farklı frekans aralıklarına ayrıştırıldığı görülmektedir. Bu durum taban yalıtımlı yapının dar bir zaman aralığında ve oldukça geniş bir frekans içeriğine sahip yüksek enerjili yer hareketi girdisini başarılı bir şekilde filtreleyerek yüksek frekanslı muhteviyatın bastırıldığı söylenebilir. Yapının çatı seviyesine ulaşıldığında ise yüksek frekans etkisinin daha da azaldığı, buna rağmen yapısal modlara ait olduğu görülen frekans bantlarında

girişimler olduğu görülmektedir ve bu durum ilk mod davranışının dışındaki üst yapı özelliklerine bağlı modlardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, yapıda elde edilen bu olumlu davranışın izolasyon döşemesi seviyesindeki 2.5 cm gibi oldukça sınırlı bir deplasman istemi altında sistemin neredeyse başlangıç rijitliği altında oluşması ise bir diğer olumlu durumu oluşturmaktadır. Yapıya ait bazı özellikler [33] çalışmasında bulunmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçların [33]'te paylaşılanlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yapının ilk iki modu için tespit edilen en yüksek genliğe sahip kompleks özellikteki dalgacık katsayıları ile sırt eğrisi elde edilmiştir.



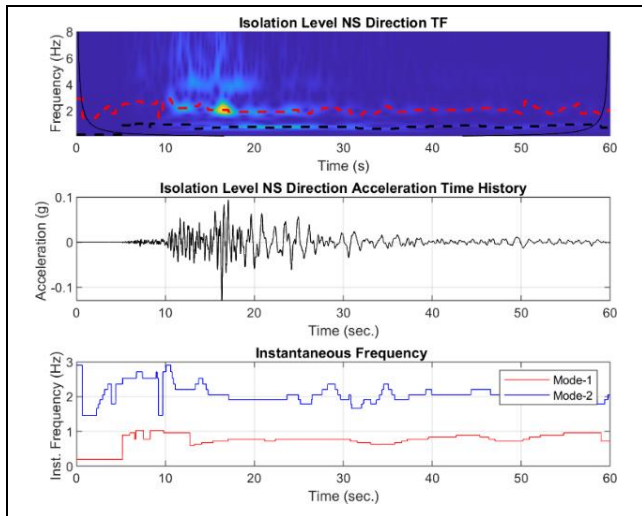


Şekil 11. Farklı istasyonlar için sürekli dalgacık dönüşümü ile zaman-frekans görünümü.

Figure 11. Time-Frequency domain representation of different record stations with continuous wavelet transform.

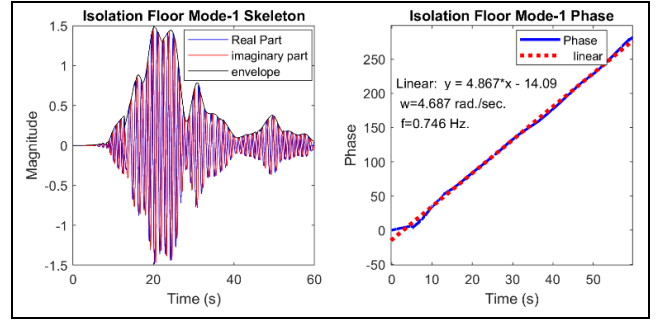
Söz konusu sırt eğrisini oluşturan kompleks dalgacık katsayıları gerçek ve sanal bileşenlerine ayrılarak iskelet eğrisi elde edilmiştir. Ayrıca, sanal kısım ile gerçek kısım zamana bağlı olarak oranlanarak faz fonksiyonu elde edilmiştir. Faz fonksiyonunun eğiminden anlık frekanslar hesaplanarak, Şekil 12'de hesaplanan anlık frekanslar ile karşılaştırılmış ve anlık sıçramaların dışında genel trendin uyumlu olduğu görülmüştür. Anlık sıçramaların temel olarak sinyal içeriğinde bulunan gürültü ve buna bağlı olarak nümerik işlemlerden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. İskelet eğrisi ve faz fonksiyonu Şekil 13'te gösterilmektedir.

Her iki mod için tespit edilen en yüksek genlikli dalgacık katsayılarına ters dönüşüm uygulanarak esas sinyalin içerisinde bu iki moda ait toplam tepki geçmişi elde edilmiştir. Anlık genlik ve faz özellikleri zamanla yavaş olarak değişen bu iki modun zaman geçmişleri süperpoze edilerek esas sinyal ile Şekil 14'te karşılaştırılmış ve esas sinyali oldukça iyi bir şekilde temsil ettiği görülmüştür.

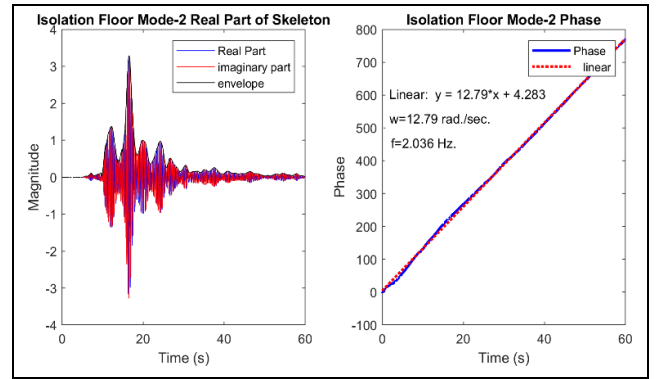


Şekil 12. İzolasyon katı için sırt eğrisi ve anlık frekans geçmişi.

Figure 12. Instantaneous frequency and ridge history for isolation floor level.



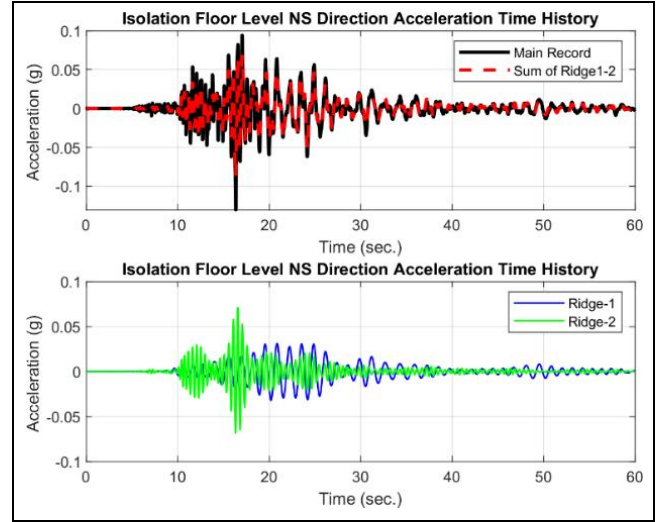
(a)



(b)

Şekil 13. İzolasyon katı için dalgacık iskelet eğrisi ve anlık faz geçmişi. (a): 1. Mod. (b): 2. Mod.

Figure 13. Wavelet skeletons and unwrapped instantaneous phase history for Isolation Floor Level. (a): 1. Mode. (b): 2. Mode.

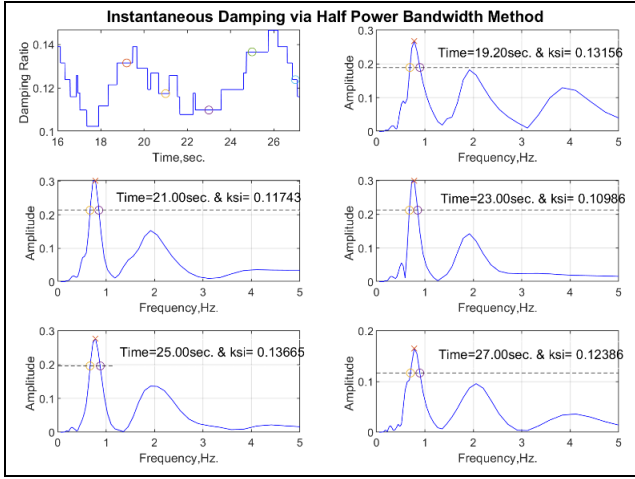


Şekil 14. İzolasyon katı için girdi sinyalinin yeniden oluşturulması. (a): orijinal girdi sinyali ile iki mod için yeniden oluşturulan sinyalin karşılaştırılması. (b): ilk iki mod için tepki fonksiyonları

Figure 14. Reconstruction of input signal for isolation level. (a): Comparison of original input signal and reconstructed signal with sum of first two mode responses. (b): First and second mode response history.

Çalışma konusu kayıtların hem kuvvetli yer hareketi altında toplam yapı tepkisini içermesi hem de zaman-frekans analizi yaklaşımında anlık spektrumlar elde edilebilmesi sayesinde eşdeğer sönüm oranının belirlenmesinde yarı-güç spektrum

bant genişliği metodu kullanılmıştır. Yapı tepkisine ait kayıtların dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen matris her bir zaman adımı için frekans tepki fonksiyonunu oluşturmaktadır. Buna göre izolasyon döşemesine ait kaydın yapının en büyük tepki geçmişine sahip 16-27 sn aralığı için %10-14 aralığında değişen eşdeğer sönüm oranı hesaplanmış olup farklı araştırmacılar tarafından aynı olay için elde edilen değerler [33],[34] ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yapının yalıtım modunu temsil eden ilk modun sönüm oranını elde edebilmek amacıyla yalıtım seviyesindeki kayıtlar kullanılmıştır. Elde edilen sönüm oranları Şekil 15'te gösterilmektedir.



Şekil 15. Yarı-güç spektrum bant genişliği metodu ile birinci mod için anlık sönüm oranı geçmişi.

Figure 15. First mode instantaneous equivalent viscous damping ratio history with half-power band width method.

## 7 Sonuçlar

Deprem yapılar üzerindeki olumsuz etkisinin azaltılmasında etkin bir yöntem olan taban yalıtımlı sistemlerin kullanımı ülkemizde son yıllarda artmaktadır. Kuvvetli yer hareketi etkisinde durağan olmayan özelliğe sahip taban yalıtımlı sistemlerin davranışı dalgacık dönüşümü yöntemi ile incelenmiştir. Söz konusu yöntem ile yapıdan alınan gerçek kayıtlar altında toplam yapı tepkisinden hâkim modlara ait tepki geçmişleri ayrıştırılmış ve buradan sisteme ait anlık frekans ve eşdeğer viskoz sönüm oranları tespit edilmiştir.

Aynı zamanda, kuvvetli yer hareketinin içeriği de değerlendirilmiş olup, taban yalıtımı ve üst yapı özellikleri ile girdi özelliklerinin değişimi anlık olarak yapının farklı konumlarına bağlı olarak incelenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada olduğu gibi özellikleri zaman ile değişen durağan olmayan tipteki sinyallere zaman-frekans penceresinden bakılması, oldukça karmaşık olan sistem davranışını daha basit bir formda sunduğu ve yapı davranışını daha iyi anlattığı görülmüştür.

Bununla birlikte bu örnekte olduğu gibi, taban yalıtımının yıkıcı büyüklükteki deprem etkilerinden dolayı oluşacak zararların azaltılması noktasında etkin bir yöntem olduğu kaydedilmiş gerçek veriler üzerinden görülmüştür.

Yalıtımlı sistemlerin tasarımında ve değerlendirilmesinde standart yöntem olarak kullanılan zaman tanım veya frekans tanım esaslı analiz yöntemlerine ek olarak durağan olmayan nitelikteki bu sistemlerin tepki geçmişlerine zaman-frekans

penceresinden bakarak sistem davranışının anlaşılması, doğrulanması ve iyileştirilmesi için gerekli bir yöntem olması yazarlar tarafından önerilmektedir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan Sürekli Dalgacık Dönüşümü yöntemine ek olarak Zaman-Frekans Tepki Fonksiyonu ve Hilbert-Huang Dönüşümü gibi diğer popüler Zaman-Frekans analiz yöntemlerinin farklı yer hareketi ve yalıtım sistemleri için değerlendirilmesi ve elde edilecek sonuçların sunulmasının bu alandaki gelişmelere büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 8 Conclusions

The use of base isolation systems which is an effective method in reducing the destructive effects of earthquakes on structures, has been increasing in Turkey in recent years. The behavior of base isolated systems with non-stationary properties under the effects of strong ground motion has been investigated by wavelet transform method. With the aforementioned method, the response histories of the isolation and structural mode responses were decomposed from the total structure response under the recorded real event and the instantaneous frequency and equivalent viscous damping ratios of the system were determined. Besides, as the characteristics of ground motion were evaluated, changes of the base isolation and superstructure properties were examined instantaneously depending on isolation floor and roof level response data of building. As a result, it has been seen that the time-frequency domain representation of the non-stationary type signals whose characteristics change with time presents simpler point of view for the rather complex systems and better structural behavior understanding as in this study. Moreover, it has been seen through the recorded real system response data that base isolation is an effective method for reducing the damages that may occur due to destructive earthquake effects.

Authors suggest that in addition to time or frequency domain analysis methods as reference methods for design and evaluation of base-isolated structures, Time-Frequency domain point of view can be a necessity for understanding, verification and upgrading of nonstationary system response. Besides, it is thought that research and findings on different strong ground motions and isolation systems via another popular Time-Frequency analysis methods such as Time-Frequency Response Functions and Hilbert-Huang Transformation can make a major contribution to advances of this area in addition to Continuous Wavelet Transform used in this work.

## 9 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Ahmet ÖZENİR literatür araştırmasının yapılması, analizler için ham verilerin temin edilmesi ve bunların işlenmesinden, gerekli kodların oluşturulmasından ve sonuçların incelenmesinden sorumludur. Kemal BEYEN ise temel fikrin oluşturulması ile içerik açısından makalenin kontrol edilmesinden sorumludur.

## 10 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

## 11 Semboller

- |     |           |   |                                    |
|-----|-----------|---|------------------------------------|
| [1] | X(t)      | : | Zaman ortamında tanımlanan sinyal, |
| [2] | A(t)      | : | Anlık genlik,                      |
| [3] | $\psi(t)$ | : | Anlık faz,                         |
| [4] | z(t)      | : | Anolitik sinyal,                   |

- [5]  $\omega(t)$  : Anlık açılma frekansı,  
[6]  $f(t)$  : Anlık frekans,  
[7]  $P_{SP}$  : Sinyalin güç yoğunluk fonksiyonu,  
[8]  $W_g(a, b)$  : Dalgacık katsayıları matrisi,  
[9]  $a$  : Ana dalgacığın esnetilmesini sağlayan ölçek parametresi,  
[10]  $b$  : Ana dalgacığın zamanda kaydırılmasını sağlayan zaman parametresi,  
[11]  $a(t)$  : Analitik sinyal,  
[12]  $g(t)$  : Zamana Bağlı Dalgacık Fonksiyonu,  
[13]  $h(t)$  : Pencere fonksiyonu,  
[14]  $s_t$  : Pencereleme Dönüştürülmüş Sinyal,  
[15]  $H[x(t)]$  : Gerçek bir sinyalin Hilbert Dönüşümü  
[16]  $\psi_{p,\gamma}(\omega)$  : Morse dalgacığı,  
[17]  $U(\omega)$  : Morse dalgacığı birim step fonksiyonu  
[18]  $\alpha_{p,\gamma}$  : Morse dalgacığı normalizasyon katsayısı,  
[19]  $\beta$  : Morse dalgacığı zaman-bant genişliği kontrol değişkeni,  
[20]  $\gamma$  : Morse dalgacığı simetri kontrol değişkeni.

## 12 Kaynaklar

- [1] Flandrin P. *Explorations in Time-Frequency Analysis*. 1st Ed. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2018.  
[2] Beyen K. "Damage identification of a historical masonry structure in T-F domain". *Teknik Dergi*, 32(2), 10577-10610, 2021.  
[3] Beyen K. "Hasar tanılama analizlerinde frekans-zaman çözümlemesi". 5. *International Earthquake Symposium*, Kocaeli, Türkiye, 10-12 Haziran 2015.  
[4] Beyen K., "Fatih Camii'nin zaman ve frekans ortamında çevresel ve deprem tepki analizleri". 6. *Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, Trabzon, Türkiye, 02-04 Kasım 2017.  
[5] Beyen K. "Yapı tanılama çalışmalarında fourier dönüşümü ve yeni nesil dönüşümler". 6. *International Earthquake Symposium*, Kocaeli, Türkiye, 25-27 Eylül 2019.  
[6] Sak FÖ, Beyen K. "Hasar tanılmasında istatistiksel değerlendirme yönlendirme yöntemlerinin zaman-frekans ortamında irdelenmesi". 5. *International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ankara, Türkiye, 8-11 Ekim 2019.  
[7] Sak FÖ, Beyen K. "Yapıların zaman-frekans ortamında dalgacık dönüşümü metoduyla hasar analizleri". *Teknik Dergi*, 30(4), 8835-8860, 2019.  
[8] Kijewski T, Kareem A. "Efficacy of hilbert and wavelet transforms for time-frequency analysis". *Journal of Engineering Mechanics*, 132(10), 1037-1049, 2006.  
[9] Misiti M, Misiti Y, Oppenheim G, Poggi JM. *Wavelet Toolbox R2020a*. 1st ed. Natick, USA, Mathworks, 2020.  
[10] Cohen L. *Time-Frequency Analysis*. 1st ed. New Jersey, USA, Prentice-Hall PTR, 1995.  
[11] Alp H, Akıncı TÇ, Albora M. "Jeofizik uygulamalarda fourier ve dalgacık dönüşümlerinin karşılaştırılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(1), 67-76, 2008.  
[12] Fugal DL. *Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing an in-depth Practical Approach for the Non-Mathematician*. 1st ed. California, USA, Space and Signals Technical Publishing, 2009.  
[13] Feldman M. "Hilbert transform in vibration analysis". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(1), 735-802, 2011.  
[14] Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih HH, Zheng Q, Yen NC, Tung CC, Liu HH. "The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time analysis". *The Royal Society Press*, 454(1971), 903-995, 1998.  
[15] Carmona RA, Hwang WL, Torresani B. "Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms". *IEEE Transactions of Signal Processing*, 45(10), 2586-2590, 1997.  
[16] Carmona RA, Hwang WL, Torresani B. "Multiridge detection and time-frequency reconstruction". *IEEE Transactions of Signal Processing*, 47(2), 480-491, 1999.  
[17] Ruzzene M, Fasana A, Garibaldi L, Piombo B. "Natural frequencies and damping identification using wavelet transform: Application to real data". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(2), 207-218, 1997.  
[18] Staszewski WJ. "Identification of non-linear systems using multi-scale ridges and skeletons of the wavelet transform". *Journal of Sound and Vibration*, 214(4), 639-658, 1998.  
[19] Kijewski T, Kareem A. "Wavelet transforms for system identification in civil engineering". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2003(18), 339-355, 2003.  
[20] Staszewski WJ. "Identification of damping in mdof systems using time-scale decomposition". *Journal of Sound and Vibration*, 203 (2), 283-305, 1997.  
[21] Lily JM, Olhede, SC. "Generalized morse wavelets as a superfamily of analytic wavelets". *IEEE Transactions of Signal Processing*, 60(11), 6036-6041, 2012.  
[22] Erdik M, Ülker Ö, Şadan B, Tüzün C. "Seismic isolation code developments and significant applications in Turkey". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115(32), 413-437, 2018.  
[23] Özer E, İnel M. "Sismik izolatörlerin betonarme konut binasının performansı üzerindeki etkileri". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 303-311, 2021.  
[24] Dao ND. Seismic response of a full-scale 5-story steel frame building isolated by triple pendulum bearings under 3D excitations. Phd Thesis, University of Nevada, Reno, USA, 2012.  
[25] Skinner RI, Kelly TE, Robinson BWH. "Seismic isolation for designers and structural engineers". Robinson Seismic Ltd & Holmes Consulting Group, Wellington, New Zealand, Technical Report, 387, 2011.  
[26] Afet ve Acil Durum Başkanlığı. "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, Yönetmelik, 2019.  
[27] American Society of Civil Engineers. "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures". Reston Virginia, USA, ASCE/SEI 7-16, 2016.  
[28] New Zealand Society for Earthquake Engineering. "Guideline for the Design of Seismic Isolation Systems for Buildings". Christchurch, New Zealand, Technical Report, 2019.  
[29] Meral E. "Determination of seismic isolation effects on irregular RC building using friction pendulums". *Structures*, 34(239), 3436-3452, 2021.  
[30] Özer E, İnel M, Çaycı BT. "Seismic behaviour of LRB and FPS type isolators considering torsional effects". *Structures*, 37(20), 267-283, 2022.  
[31] Alhan C, Ozgur M. "Seismic responses of base-isolated buildings: efficacy of equivalent linear modeling under near-fault earthquakes". *Smart Structures and Systems*, 15(6), 1439-1461, 2015.

- [32] US Geological Survey, California Geological Survey. "Center for Engineering Strong Motion Data". <https://www.strongmotioncenter.org/index.html> (05.03.2022).
- [33] Nagarajaiah S, Xiaohong S. "Response of base-isolated USC hospital building in northridge earthquake". *Journal of Structural Engineering*, 126(10), 1177-1186, 2000.
- [34] Mehmet Ç, "Successful performance of a base-isolated hospital building during the 17 January 1994 Northridge Earthquake". *The Structural Design of Tall Buildings*, 5(2), 95-109, 1996.