

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORTAK YALITIM DÜZLEMİNDE BULUNAN
SİSMİK YALITIMLI İKİ BAĞIMSIZ YAPININ
KAPSAMLI PARAMETRİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mücahit BEKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2018

**ORTAK YALITIM DÜZLEMİNDE BULUNAN
SİSMİK YALITIMLI İKİ BAĞIMSIZ YAPININ
KAPSAMLI PARAMETRİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mücahit BEKİN
(501151035)**

İnşaat Mühendisliği Anailim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501151035 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mücahit BEKİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ORTAK YALITIM DÜZLEMİNDE BULUNAN SİSMİK YALITIMLI İKİ BAĞIMSIZ YAPININ KAPSAMLI PARAMETRİK İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Barlas Özden ÇAĞLAYAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Canan GİRGIN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2018**
Savunma Tarihi : **07 Haziran 2018**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın tüm süreçlerinde bana kıymetli vakıtnı ayıran, çalışmam boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisinin ilgi, özveri ve desteği sayesinde çalışmam nihayetlenmiştir.

Yüksek lisans hayatım boyunca her zaman yanındı olan ve her türlü desteğini esirgemeyerek beni yalnız bırakmayan kıymetli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Barlas Özden ÇAĞLAYAN ve Dr. Öğr. Üyesi Pınar Özdemir ÇAĞLAYAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Tez jürimde olmayı kabul ederek değerli vakıtnı ayıran Prof. Dr. Canan GİRGIN'e çok teşekkür ederim.

Profesyonel mühendislik hayatımda kıymetli bilgilerini benimle paylaşan ve yüksek lisans çalışmam boyunca beni her zaman destekleyen Dr. Mehmet Burak YILMAZ'a minnettarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca kendilerinden ders aldığım tüm hocalarına bana kattığı değerler için teşekkürlerimi sunarım.

Desteğini ve ilgisini benden esirgemeyen, her sıkıntımıda yanındı olan ablam Ceyda ERDOĞAN ile eniștem İlke Can ERDOĞAN'a ve varlığıyla her daim mutluluk kaynağım olan yeğenim Çınar ERDOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca kahrimı çeken, bana gösterdiği ilgi ve alaka sayesinde çalışma motivasyonu bulabildiğim kıymetli meslektaşım Büşra ÇAYIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2018

Mücahit BEKİN
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Sismik Yalıtımlı Yapılar	1
1.2 Sismik Yalıtımlı Yapıların Tasarımı	4
1.2.1 Sismik yalıtımlı yapıların tasarım yöntemlerinin irdelenmesi	5
1.2.2 Eşdeğer doğrusal analiz	6
2. TEORİK ALTYAPI	9
2.1 Giriş	9
2.2 Sismik Yalıtımlı Tek Yapılı Sistemlere Ait Hareket Denklemleri.....	9
2.3 Sismik Yalıtımlı Çok Yapılı Sistemlere Ait Hareket Denklemleri	12
3. SİSMİK YALITIMLI YAPILARIN İNCELENMESİ	13
3.1 Giriş	13
3.2 İncelenen Yapıların Özellikleri.....	13
3.3 Deprem Kayıtlarının Seçilmesi	15
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	17
KAYNAKLAR.....	21
ÖZGEÇMİŞ	24

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASCE	: American Society of Civil Engineers
CALTRANS	: California Department of Transportation
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
SEI	: Structural Engineering Institute
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
New	: New Explanation

SEMBOLLER

- | | |
|----------|---|
| a | : Denklem ASCE'da belirtilen istatistiksel parametre |
| a_0 | : Rayleigh sönüüm matrisi için kütle matrisi çarpanı |
| a_1 | : Rayleigh sönüüm matrisi için rijitlik matrisi çarpanı |
| C | : Sismik yalıtım sistemi sönüüm matrisi |
| δ | : Yalıtım birimi sönüüm matrisi δ |

- : Üst yapı taban kesme kuvvetinin yalıtm düzleminde oluşturduğu tepki kuvveti
- : i zaman adımı için kuvvet fonksiyonu vektörü
- : Bağımsız yalıtm düzlemindeki 1. yapının taban kesme kuvveti
- : Bağımsız yalıtm düzlemindeki 2. yapının taban kesme kuvveti
- : Ortak yalıtm düzlemindeki i. yapının taban kesme kuvvetinin yalıtm düzleminde oluşturduğu tepki kuvveti
- : Ortak yalıtm düzlemindeki 1. yapının taban kesme kuvveti
- : Ortak yalıtm düzlemindeki 2. yapının taban kesme kuvveti

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Çalışma kapsamında incelenen sistemlerin tabanı ankastre olması durumu için hesaplanan yapısal özellikleri.....	14
Çizelge 3.2: Zaman tanım analizlerinde kullanılan deprem kayıtları.....	15

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 : Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör.....	2
Şekil 1.2 : Sürtünmeli sarkaç tipi izolatör.....	3
Şekil 1.3 : Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanına ait sismik izolatör kolon kiriş birleşimi ve çelik üst yapı [1].	4
Şekil 1.4 : Eşdeğer Tek Serbestlik Dereceli Sistem.....	4
Şekil 2.1 : Sismik yalıtımlı tek yapının şekil değiştirmiş hali ve serbest cisim diyagramı.....	10
Şekil 2.2 : Sismik yalıtımlı çoklu yapıların şekil değiştirmiş hali.....	12
Şekil 3.1 : 3 nolu yapıya ait analitik model ve yapının şekil değiştirmiş hali.	14

ORTAK YALITIM DÜZLEMİNDE BULUNAN SİSMİK YALITIMLI İKİ BAĞIMSIZ YAPININ KAPSAMLI PARAMETRİK İNCELENMESİ

ÖZET

Depremselliğin yüksek olduğu bölgelerde bulunan yapıların kuvvetli yer hareketleri sebebiyle hasar almalarını engellemek amacıyla sismik yalıtım sistemleri sıkılıkla kullanılmaktadır. Sismik yalıtımlı yapılar üst yapı, yalıtım düzlemi ve yalıtım birimlerinden oluşmaktadır. Bu sistemler çoğunlukla izolatörlerin üzerinde görelî olarak rijit hareket ettiği kabul edilen konut, veri merkezi binası, hastane yapıları, sıvı tankı ve açık deniz petrol platformu gibi tek yapılardır. Birbirinden bağımsız sismik yalıtımlı yapıların birlikte kullanılması durumunda çözülmesi gereken mimari detaylar karmaşık ve pahalı olmaktadır. Bu sebeple pratikte birbirinden bağımsız bina tipi yapılar ortak yalıtım düzleminde tasaranmaktadır. Özellikle Türkiye'de son yıllarda yapılan hastane yapıları bu tanıma uymaktadır.

Geçmişte yapılan çalışmalar neticesinde belirlenen doğrusal tasarım yöntemleri, sismik yalıtımlı yapıları tek veya çok serbestlik dereceli bir yapıdan oluşan sistemler olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle yönetmeliklerde yer alan tasarım prosedürleri bağımsız yalıtım düzleminde bulunan sismik yapılar hazırlanmıştır. Ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı yapılar için ise yönetmeliklerde tasarım kriteri bulunmamaktadır. Pratikte ortak yalıtım düzleminde tasaranmış yapıların her biri bağımsız yalıtım düzleminde analiz edilerek boyutlandırılmaktadır. Bu sebeple izolatörlerin histeretik davranışlarından kaynaklanan yüksek mod etkileri dolayısıyla yapıların dinamik etkileşimi değerlendirilememektedir.

Bu çalışmanın amacı ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapı için kapsamlı parametrik inceleme yapılarak üst yapıların dinamik etkileşimi sebebiyle oluşan taban kesme kuvvetlerindeki amplifikasyonun irdelenmesidir.

Çalışma kapsamında ortak yalıtım düzlemine sahip iki yapının dinamik etkileşimi, parametrik olarak değişen sistemler üzerinden incelenmiştir. Ayrıca ortak yalıtım düzleminde bulunan üç ve dört yapılı sistemler için örnek çözümler yapılmıştır. Burada üst yapı kat sayısı, yalıtım birimleri eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüüm değerleri birer parametre olarak ele alınmıştır. Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapı kat sayısının birden ona değiştiği durumlar için analizler yapılmıştır. Tüm analizler yalıtım birimlerinin 1.5, 2.5 ve 4.0sn eşdeğer periyot ve %10, %20 ve %30 eşdeğer sönüüm değerleri için tekrarlanmıştır. Yalıtım birimlerinin histeretik özellikleri, değişen üst yapı kütlesine karşılık doğrusal olmayan analizler sonucunda sabit eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüüm değerlerini elde edebilmek amacıyla normalize edilmiştir. Bu işlem istenilen eşdeğer periyot değerine karşılık gelen rijitlik ve eşdeğer sönüüm değerleri ile yapılan doğrusal zaman tanım analizlerinden elde edilen yalıtım birimi yer değiştirmelerine karşılık akma sonrası rijitlik ve karakteristik dayanımın belirlenmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Analizler yalnızca yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunduğu doğrultu için yapılmıştır. Diğer yönde etkiler ve yalıtım birimlerinin iki yönlü etkileşimi göz ardı edilmiştir. Üst yapıların kat kütle ve kat rijitlikleri tüm analizler için sabit alınmıştır. Yalıtım düzlemi kütlesi ise her yapı için sabit olup ortak yalıtım düzleminde bulunan yapı sayısı çarpılarak hesaplanmıştır. Yalnızca kesme yaylarının dikkate alındığı modellerde üst yapılar çok serbestlik dereceli ve doğrusal elastik olarak tanımlanmıştır. Yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan davranışları ise çift doğrulu eleman ile temsil edilmektedir. Yalıtım birimlerinde yalnızca doğrusal olmayan davranıştan kaynaklanan histeretik sönümlü kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem yer hareketi düzeyine göre oluşturulan tasarım spektrumuna uygun olarak eşleştirilmiştir.

Tüm analizler tez kapsamında geliştirilen, bağımsız ve ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı yapıların doğrusal olmayan analizlerinin parametrik olarak çözülebilmesine imkan sağlayan MSBIS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen programın doğruluğu, genel kabul görmüş yapısal analiz programı olan SAP2000 ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Yer ivmeleri etkisinde doğrusal olmayan dinamik analizler yapılarak birinci yapıda meydana gelen kat kesme kuvvetleri, kat ivmeleri ve göreli kat ötelemeleri ikinci yapının değişen açısal frekansına ve yalıtım birimlerinin farklı eşdeğer periyot ve eşdeğer sönümlü değerlerine göre değişimi incelenmiştir. Ayrıca birinci yapının on katlı olması durumunda ikinci yapının değişen kat sayıları için kat kesme kuvveti katsayıları değişimi irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, incelenen yapıların bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumunda elde edilecek büyüklüklerde göre normalize edilmiştir. Böylece yapıların taban kesme kuvvetlerindeki amplifikasyon üst yapı açısal frekanslarına, yalıtım birimi eşdeğer periyot ve eşdeğer sönümlüne bağlı olarak tespit edilebilmektedir. Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayıları elde edilerek sonuçlar yapıların dinamik analizde vektörel olarak toplanarak elde edilen toplam kesme kuvveti katsayısına göre kıyaslanmıştır. Tespit edilen bu hata oranı yapıların dinamik etkileşiminin mertebesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Buna ek olarak ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının gerekli deprem derz mesafeleri, yönetmeliklerde belirtilen yöntemler ile hesaplanarak doğrusal olmayan dinamik analizlerden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

Çalışma sonucunda, yalıtım birimlerinin histeretik sönümlerinin artması nedeniyle oluşan yüksek mod etkilerinin ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarını, göreli kat ötelemelerini ve en büyük kat ivmelerini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Bu artışın, iki yapının açısal frekansların ayrılıklaması ile arttığı görülmüştür. Dolayısıyla iki yapının da aynı açısal frekansa sahip olması durumunda elde edilen iç kuvvet ve yer değiştirmeler, yalıtım birimlerinin aynı eşdeğer periyot ve sönümlü değerleri için eşit bulunmaktadır. Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapıdan incelenen bir katlı yapının taban kesme kuvvetleri ikinci yapının değişen kat sayılarına karşılık bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre artmaktadır. On katlı yapının incelendiği durumda ise kat kesme kuvvetleri alt katlarda artarken üst katlar için azaldığı belirlenmiştir. Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç ve dört yapılı sistemler için yapılan analizler sonucunda ise incelenen yapıdan farklı açısal frekansa sahip yapı sayısının artmasıyla taban kesme kuvveti katsayılarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca histeretik sönümlü artması ile taban kesme kuvvetinin üst yapıya dağılımında ters üçgen formunun oluştuğu belirlenmiştir.

COMPREHENSIVE PARAMETRIC INVESTIGATION OF TWO BASE ISOLATED STRUCTURES WITH COMMON ISOLATION PLANE

SUMMARY

Rubber bearings are used to prevent vibrations in the buildings and to allow the bearings to be displaced due to thermal expansion in the bridges. The first use of rubber bearings in order to protect constructions against earthquake effects, occurred in Pestalozzi primary school in Skopje, Yugoslavia in 1969. The same horizontal and vertical stiffness of the rubber supports applied as a single block caused the bulge to occur due to the weight of the building on the side surfaces. The French engineer Eugène Freyssinet, who discovered that the axial loading capacities of the rubber layers were inversely proportional to their height, suggested strengthening the rubber layers by adding thin steel plates in the vertical direction. Here the bond between the layers is provided due to the friction force. Thanks to the vulcanization method used to ensure that the thin steel plates and rubber layers adhere to each other, studies and applications of modern seismic isolators have begun to increase.

Seismic isolation systems are frequently used to prevent damage to structures in areas with high seismicity due to strong ground motions. Base isolated structures consist of superstructure, isolation plane and base isolators. These systems are single structures such as residential, data center building, hospital, liquid tank and offshore oil platform which are assumed to displace relatively rigid over the base isolators. The architectural details to be solved in the case of using separate base isolated structures together, are complex and expensive. For this reason independent superstructures are designed in common isolation plane. More particularly, constructed hospital buildings in recent years in Turkey, meets this definition.

Linear design methods, which are determined in consequence of carried out studies in the past, are consider the base isolated systems as consist of single or multi degree of freedom systems. Therefore design procedures in standards are prepared for base isolated structures with independent isolation plane. There is no design criteria in standards for dynamic interaction of base isolated structures with common isolation plane. Each of the base isolated structures which are designed in common isolation plane are considered in practice as if structures with independent isolation plane. As a consequence of this assumption causes the higher mode effect due to the hysteretic behavior of the isolators and therefore the dynamic interaction of superstructures to be unevaluated.

Purpose of this study is to determine amplification of the base shear coefficient due to interaction of superstructures by performing comprehensive parametric investigation for the two base isolated structures with common isolation plane.

Within the scope of this study, dynamic interaction of two base isolated structures with common isolation plane is investigated through the systems changes parametrically. In addition to this sample analyses are carried out for three and four base

isolated structures with common isolation plane. In this case, number of story of superstructures, equivalent period and equivalent damping ratio of base isolators are considered as parameter. Analyses are carried out for the cases where the number of story of two base isolated structures with common isolation plane changes from one to ten. All analyses are repeated for 1.5, 2.5, 4.0s equivalent period and %10, %20, %30 equivalent damping ratio of base isolators. The hysteretic properties of the base isolators are normalized to obtain constant equivalent period and equivalent damping ratios as a result of nonlinear analysis versus varying superstructure mass. This process is performed by determining the yielded stiffness and characteristic strength by determining the isolator displacements obtained from the linear time-history analysis with the stiffness corresponding intended equivalent period and the equivalent damping values.

Analyses are carried out only for the direction in which the structures are located in the common insulation plane. The effects that occur other directions and the bi-directional interactions of the isolators are out of scope of this study. Story mass and story stiffnesses of superstructures are fixed for all analyses. Mass of the isolation plane is fixed for each structure and is calculated by multiplying the number of structures in the common isolation plane. Only linear elastic shear springs are considered in superstructure models which are defined as multi degree of freedom system. Hysteretic behavior of isolators are represented by a bilinear element. Only hysteretic damping which is caused by nonlinear behavior is considered in base isolators. The ground motion records used in the analyses are matched in accordance with the design spectrum generated according to earthquake ground motion level with probability of exceeding %2 in 50 years.

All analyzes were carried out by means of the MSBIS program, which was developed within the scope of this study, which allows nonlinear analysis of base isolated structures with independent and common isolation plane to be solved parametrically. Numerical solution of equation of motions is carried out with Newmark- β method. Dynamical balance is provided by Newton-Raphson method doing iteration in every time step. The accuracy of the developed program is demonstrated by comparison with SAP2000, the generally accepted structural analysis program.

Resultant shear forces, story accelerations and story drifts of the first structure is determined by means of nonlinear time history analyses according to changing angular frequency of the second structure and effective period and damping values of base isolators. In addition, for the case of first structure have ten stories, the variation of story shear force coefficients for the changing number of story of the second structure is examined. Results are normalized according to values which obtain from the inspected base isolated structures with independent isolation plane. Thus, amplification in base shear forces of the structures can be determined depending on the angular frequency of the superstructures, equivalent period and equivalent damping of base isolator. Base shear force coefficients of the structures with common isolation plane are obtained and the results are compared according to the total shear force coefficient obtained by vector summation in the dynamic analysis. This rate of error is increasing in direct proportion to the order of the dynamic interaction of the structures. Additionally necessary joint spacing of two base isolated structures with common isolation plane is calculated as per related standard and compared to results obtained from the nonlinear dynamic analysis.

As a result of this study, it is determined that dynamic interaction of two base isolated structures with common isolation plane due to increasing damping ratio of base isolators, causes to increase shear coefficients, story drifts and maximum story accelerations significantly. This increment is determined to increase with the separation of the angular frequencies of the two structures. Therefore, if two structures have the same angular frequency, the resulting internal forces and displacements are equal for the same equivalent period and equivalent damping ratios base isolators. Base shear force of one story structure inspected from two base isolated structures with common isolation plane, increase with respect to vary other structure number of story according to situation that inspected structure with independent isolation plane. When the ten-story structure is examined, it is determined that the story shear forces increase in the lower stories and decrease in the upper stories. As a result of the analyses carried out for the three and four base isolated structure with common isolation plane, it is determined that the base shear force coefficients increase with the increase of the number of buildings having different angular frequency from the examined structure. Moreover, increasing in hysteretic damping causes to change lateral distribution of base shear forces to superstructure. Base shear force of structure is evenly distributed to every story for an equivalent damping value of %1, which is assumed to be linear of the isolators. Nevertheless, base shear force of structure is distributed in the form of an inverted triangle for increasing damping ratios.

1. GİRİŞ

1.1 Sismik Yalıtımlı Yapılar

Deprem bölgelerinde yapılacak binalarda yaygın olarak kullanılan kuvvet esası tasarıma göre, yapının karşılaşması beklenen en büyük deprem kuvveti altında görelî olarak büyük yer değiştirmeler yapması, yapısal taşıyıcı elemanlarda hasar oluşması ve dolayısıyla deprem enerjisinin büyük bir kısmının kalıcı şekil değiştirmeler ile sökümlenmesi beklenir. Yapının önem derecesine bağlı olarak depremde daha az hasar almasını sağlamak amacıyla görelî kat ötelemelerinin sınırlanması gerekmektedir. Bu durum, yapının rıjitliğini artırarak katlarda daha büyük ivmelerin oluşmasına ve buna bağlı olarak yapısal olmayan elemanlarda daha büyük kuvvetlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Kat ivmelerinin azaltılması ise yapı rıjitliğinin düşürülmesi ile mümkün değildir. Ancak bu durumda görelî kat ötelemeleri ve yapısal hasarlar artmaktadır. Yapıların depremden korunmasının bir yolu, zemin ile yapı temeli arasında, yatay rıjitliği yapıya oranla düşük bir katman oluşturmaktır.

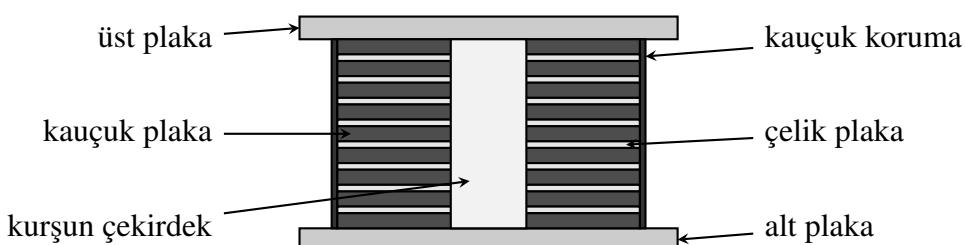
Yapılarda kuvvetli yer hareketleri sebebiyle oluşan hasarları engellemek amacıyla birçok yöntem üzerine çalışmalar yapılmıştır. Touaillon 1870 yılında, ABD patent ofisine yaptığı başvuruda, temel ve binaya sabitlenen konkav metal plakaların arasında bulunan küreler sayesinde deprem sebebiyle yapıların yıkılmasının önleneceğini söylemektedir [2]. Benzer bir yalıtım sistemi ise Bechtold tarafından 1907 yılında patent başvurusu yapılan, binaların altına yerleştirilen rıjit taban plakasının bazalt, gnays veya granitten yapılacak küreler üzerinde kayan bir sistem önerisidir [3]. Dr. Calantarines ise yapı temelinin ince kum, mika veya talk üzerinde kayabildiği bir “serbest mesnet” fikri ile 1909 yılında İngiltere patent ofisine başvurmuştur [4].

Yeni yöntemlerin araştırılmasının yanında üst katlarda önemli hasarların olmasını engellemek amacıyla yumuşak ilk kata sahip yapılar da depreme etkileri altında incelenmiştir. Chopra ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ilk katı yumuşak kata

sahip sekiz katlı bir binanın, deprem etkileri altında üst katlarında hasar oluşmasını engellemek amacıyla ilk katın akma koşulları incelenmiştir [5].

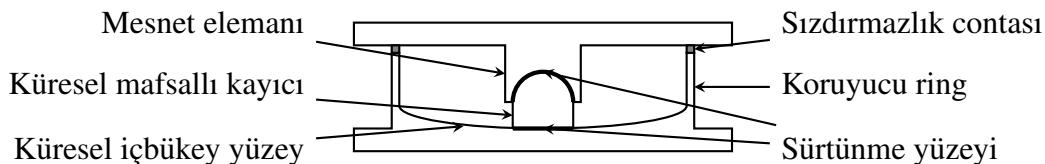
Kauçuk mesnetler, binalarda titreşimleri engellemek ve köprülerde ise ıslı genleşmeler sebebiyle mesnetlerin yer değiştirebilmelerini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Yapıların deprem etkilerinden korunmaları amacıyla ilk kullanımı 1969 yılında Yugoslavya'nın Skopje ilinde bulunan Pestalozzi ilkokulunda gerçekleşmiştir. Tek bir blok olarak uygulanan kauçuk mesnetlerin yatay ve düşey rijitliklerinin aynı olması, yan yüzeylerde binanın ağırlığından dolayı şişkinlik oluşmasına neden olmuştur. Kauçuk katmanların eksenel taşıma kapasitelerinin yükseklikleri ile ters orantılı olduğunu tespit eden Fransız mühendis Eugène Freyssinet, kauçuk katmanların aralarına eksenel kuvvete dik doğrultuda ince çelik plakalar ilave ederek güçlendirmeyi önermiştir. Burada katmanlar arasındaki bağ sürtünme kuvveti sebebiyle sağlanmaktadır. İnce çelik plakalar ile kauçuk katmanların birbirlerine yapışmalarını sağlamak amacıyla kullanılan vulkanizasyon yöntemi sayesinde modern haline kavuşan sismik izolatörler ile ilgili yapılan çalışmalar ve uygulama örnekleri artmaya başlamıştır. Kelly tarafından yapılan çalışmada 1900-1984 yılları arasında sismik yalıtım çalışmaları özetlenerek alfabetik ve kronolojik bibliyografya sunulmuştur [6].

Robinson ve Tucker tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Şekil 1.1'de gösterilen çelik plakalar ile güçlendirilmiş kauçuk izolatörün merkezine kurşun silindir yerleştirilerek tekrarlı yatay yükler etkisindeki davranışını incelenmiştir [7]. Çelik ve kauçuk ile sargılı olan kurşun silindirde tamamen kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Çalışmada, günümüzde yaygın olarak kullanılan bu sistemin sahip olduğu histeretik sönmüş kapasitesi, kurşun çekirdeğin eksenel dayanımı ve geri çağırım kuvveti gibi faydaları belirtilerek büyük deprem etkileri ve küçük rüzgar yüklerinde yeterli performans sergileyeceği vurgulanmıştır. Yapıların mesnetleri üzerinde sarkaç gibi



Şekil 1.1 : Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör.

hareket etmelerini sağlayan sismik yalıtım yöntemi Zayas ve diğerleri tarafından 1990 yılında yapılan çalışmalar neticesinde önerilmiştir [8]. Şekil 1.2'de kesiti verilen sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerin yalıtım periyotları konkav yüzeyin yarıçapı ile belirlenmektedir. Deprem enerjisinin sökümlendiği histeretik davranış, yüzeylerde oluşan sürtünme kuvvetleri nedeniyle oluşmaktadır. Sistemin sarkaç hareketine başlaması, sürtünme kuvvetlerinin aşılmasıyla mümkün olmaktadır. Bu nedenle yapının rüzgar yükleri altında yalıtım birimlerinden beklenen rijitlik elde edilmiş olmaktadır. Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerin malzeme belirsizliklerinden en az düzeyde etkilenmesi, sismik yalıtımlı yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarının öngörlülebilir olmasını sağlamaktadır. Ayrıca yapılan testlere göre büyük deplasmanlarda eksenel taşıma kapasitesinde düşme veya stabilité kaybı olmadığı ve histeretik çevrimler ile dayanım azalmasının olmadığı görülmüştür. Sismik izolasyon, dünyada depremselliği yüksek olan bölgelerde yoğun olarak



Şekil 1.2 : Sürtünmeli sarkaç tipi izolatör.

kullanılmaktadır. Japonya, Çin, Rusya, İtalya ve ABD başta olmak üzere 30 dan fazla ülkede 23.000'i aşkın bina, sismik izolasyon ve sökümlerile korunmaktadır [9]. Aktif fay hatları üzerinde bulunan ülkemizde ise sismik izolasyon kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ağırlıklı olarak depremden hemen sonra kesintisiz kullanımın hedeflendiği hastaneler ve veri merkezleri gibi önemli binalarda uygulanmaktadır. İstanbul'da bulunan Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanında üç sürtünme yüzeyle sarkaç tipi izolatörler kullanılarak sismik yalıtım uygulanmıştır. Toplamda 160.000 m²'den fazla alana kurulu havalimanında 252 sismik izolatör bulunmaktadır. Üç sürtünme yüzeyle sismik izolatörler ve çelik üst yapının montajı 2008'de tamamlanmıştır (Şekil 1.3).

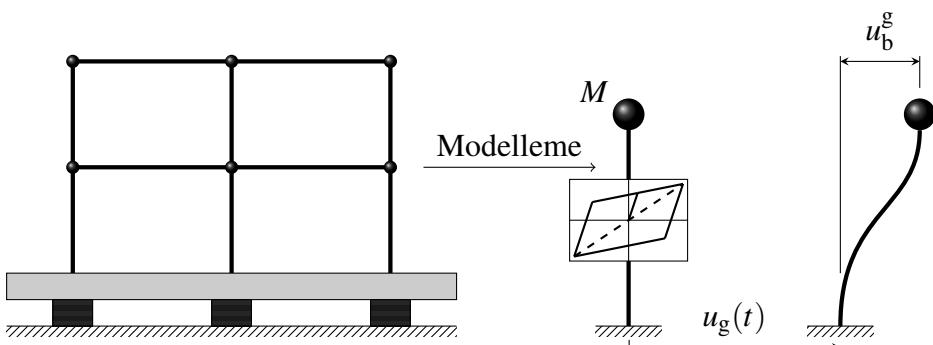


Şekil 1.3 : Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanına ait sismik izolatör kolon kiriş birleşimi ve çelik üst yapı [1].

1.2 Sismik Yalıtımlı Yapıların Tasarımı

Sismik yalıtımlı yapıların tasarımını, doğrusal yöntemlerle ön boyutlandırma aşaması ve doğrusal olmayan dinamik analizlerle tasarımının doğrulanması olmak üzere iki aşamalıdır. Ön tasarım aşamasında eşdeğer doğrusal analiz ve mod birleştirme yöntemleri kullanılmaktadır.

Sismik yalıtımlı yapılarda izolatörlerin hakim frekansları ile tabanı ankastre kabul edilen üst yapı frekansları belirgin biçimde ayrıklasır. Görelî olarak düşük yatay rıjîtliğe sahip yalıtm birimleri, üst yapının yapacağı deformasyonları azaltmaktadır. Bu nedenlerle elastik sınırlar içerisinde davranışması beklenen yapının, yapısal düzensizliklerinin bulunmaması halinde gerekli idealleştirmeler yapılarak sistem basitleştirilebilir. Ayrıca yapının sahip olduğu doğrusal olmayan dinamik özellikler, idealleştirilmiş sisteme karşılık gelen parametrelerle ifade edilebilir. Eşdeğer doğrusal analiz yönteminde tüm yapı, Şekil 1.4'de belirtildiği gibi tek serbestlik dereceli bir sistem olarak temsil edilmektedir. Sismik yalıtımlı yapı sisteminin, tasarılanacağı



Şekil 1.4 : Eşdeğer Tek Serbestlik Dereceli Sistem.

yönetmelikte eşdeğer doğrusal analiz için belirtilen uygulama sınırları dışında kalması durumunda veya üst yapı taşıyıcı sisteminin sahip olduğu serbestlik dereceleri de dikkate alınarak daha detaylı bir çözüm yapılmak istendiğinde mod birleştirme yöntemi tercih edilmektedir. Üst yapının çok serbestlik dereceli sistem olarak modellendiği bu yöntemde, izolatörlerin temsil edildiği doğrusal kesme yaylarında eşdeğer rijitlik değerleri kullanılmaktadır. Böylece kütlesi ve rijitliği belli olan sistemin doğrusal mod şekilleri ve bu modlara karşılık gelen periyot ve frekans değerleri hesaplanır. Tüm modlardan elde edilen iç kuvvet ve yer değiştirmeler birleştirilerek sistemin deprem etkileri hesaplanır.

Doğrusal yöntemlerle tasarımlı tamamlanan sismik yalıtımlı yapıların kontrolü, geçmiş depremlerden elde edilen veya bölgenin depremsellik özelliklerine uygun biçimde yapay olarak üretilen yer ivmeleri etkisinde, yapıların doğrusal olmayan davranışlarının modellendiği, zaman tanım alanında yapılan analizler ile sağlanır. İzolatör birimleri için kullanılan kesme yaylarında doğrusal olmayan davranışların çeşitli malzeme modelleri ile ifade edilebileceği gibi, eksenel yaylar, eğilme ve burulma yayları da tanımlanabilmektedir. Ayrıca bu yayların birbirleri ile bağlı olarak çalışması gerçeğe daha yakın analiz sonuçlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu analizde yapısal davranışlar, kütle ve rijitliklerin yanında yer hareketlerinin içeriğine de bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yapının doğrusal olmayan dinamik analizinde, tasarımda uyulan yönetmelik koşullarında belirtilen sayıda ve tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiş veya eşlenmiş yer ivmesi kullanılarak bulunan sonuçların ortalaması değerlendirilmektedir.

1.2.1 Sismik yalıtımlı yapıların tasarım yöntemlerinin irdelenmesi

Sismik yalıtımlı yapıların tasarım metotları 1970'lerden günümüze kadar fiziksel deneyler veya analitik modellerden elde edilen bilgiler ışığında pek çok kez irdelenmiştir. Yapılan araştırmalar içinde doğrusal tasarım metodlarının geçerliliği, kullanım sınırları ve doğruluk mertebeleri incelenen konular arasında bulunmaktadır. Sismik yalıtımlı yapıların tasarımında kullanılan doğrusal yöntemler, konvansiyonel yapılardan farklı olarak yalnızca ön tasarım aşamasında kullanılmaktadır. Öngörülen en büyük depremden sonra dahi yapının kesintisiz olarak kullanılma gerekliliği, yapısal tasarımında gerçeğe en yakın sonuçların elde edilmesini sağlayacak analizlerin

uygulanma zorunluluğunu da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla ana hatları doğrusal analizler ile belirlenen sismik yalıtımlı sistem tasarımlarının, bölgenin depremselliğine uygun olarak seçilecek deprem kayıtları kullanılarak yapılacak doğrusal olmayan dinamik analizler sayesinde kontrol edilerek son hale getirilmesi önemlidir. Fakat bu ileri seviye analizler, karmaşık olabilmekte ve uzun zaman almaktadır. Bu nedenle, son aşamaya kadar doğrusal yöntemler ile ilerletilen sismik yalıtımlı yapı projelerinde bu analizlerin doğruluğu önem arz etmektedir. İlerleyen başlıklarda doğrusal analiz yöntemleri irdelenmiştir.

1.2.2 Eşdeğer doğrusal analiz

Eşdeğer doğrusal analiz yönteminde kullanılan sistemde izolatörlerin üzerinde bulunan yalıtım düzlemi ve üst yapı, tek bir kütle olarak değerlendirilmektedir. İzolatör eşdeğer rijitliği, her bir izolatör biriminin tasarım deplasmanı için elde edilecek sekant rijitlikleri toplamını belirtmektedir. Buna bağlı olarak izolatör periyodu, tek serbestlik dereceli sistem için hesaplanmaktadır. Sistemin sönümleneceği enerji ise izolatörlerin doğrusal olmayan histeretik davranışlarından elde edilecek eşdeğer viskoz sönüüm oranı cinsinden ifade edilir. Eşdeğer doğrusal analiz yöntemi, içerdeği kabul ve idealleştirilmeler sebebi ile kullanılan yönetmeliklerde belirtilen kriterlerin sağlanması durumunda uygulanabilmektedir.

Ön tasarım aşamasında izolatörlerde meydana gelecek en büyük yatay yer değiştirmeye değerinin tespit edilmesi izolatör boyutlarının belirlenmesinde önemli bir kriterdir. En büyük yer değiştirmeye değeri, en büyük izolatör kuvvetinin eşdeğer rijitliğe bölümü ile bulunmaktadır. Fakat eşdeğer rijitlik değerinin belirlenebilmesi, izolatörün en büyük yer değiştirmeye değerinin bilinmesi ile mümkün olmaktadır. Ön tasarımın ilk adımında oluşan bu belirsizlik, detayları Bölüm 2'de sunulan iterasyonlar ile ortadan kaldırılmaktadır.

Üst yapının ön tasarımını için gerekli taban kesme kuvveti, bu yöntemde yalıtım düzleminde oluşan kesme kuvvetine göre hesaplanmaktadır. Tasarımda takip edilen yönetmeliğe bağlı olarak taban kesme kuvvetinin belirlenmesi ve bu kuvvetin üst yapı katlarına dağıılma biçimini farklılık göstermektedir. EN 1998-1:2004'e göre, katlara etkiyen yatay kuvvetler eşdeğer periyot ve sönüme göre hesaplanacak spektral ivmenin, ilgili kat kütlesi ile çarpımından elde edilmektedir [10]. Burada kat

kütelerinin eşit olduğu kabulü yapılrsa kesme kuvvetlerinin katlara eşit miktarda dağıtıldığı görülmektedir. Ayrıca yalıtm birimi seviyesinde meydana gelen kesme kuvvetinin yapı kütlesine oranı ile üst yapı taban kesme kuvvetinin üst yapı toplam kütlesine oranı eşit olmaktadır.

ASCE/SEI-7-10 (2010) ve TBDY (2018) yönetmeliklerinde yer alan formüle göre taban kesme kuvveti, yalıtm seviyesinde oluşan kesme kuvvetine eşit alınarak üst yapı katlarına üçgen formunda dağıtılmaktadır [11, 12].

ASCE/SEI-41-13 (2014) ve ASCE/SEI-7-16 (2016) yönetmeliklerinde ise yalıtm düzleminde oluşacak kesme kuvveti, yapı taban kesme kuvvetine eşit olarak alınmamaktadır [13, 14]. York ve Ryan tarafından yapılan çalışma, eşdeğer viskoz sönümlü oranının artması halinde, yapı taban kesme kuvvetinin yalıtm düzleminde oluşan kesme kuvvetine oranının da artacağını göstermektedir [15]. Buna bağlı olarak önerilen formül, istatistiksel parametreyi temsil eden katsayıda bulunan değişiklik ile birlikte bu güncel yönetmeliklerde yer almaktadır. Elde edilen artırılmış taban kesme kuvveti ise katlara çalışmada önerilen formülün güncel haline göre paylaştırılmaktadır.

TBDY (2018) yönetmeliğine göre hesaplanacak taban kesme kuvvetinde belirlenecek deprem yükü azaltma katsayısı R , hedeflenecek kesintisiz kullanım ve sınırlı hasar performans düzeyleri için dayanım fazlalığı katsayısı D ile eşit verilmektedir [12]. Benzer olarak ASCE/SEI-7-10 (2010) yönetmeliğinde belirtilen formülde yer alan R_1 katsayısı, üst yapı yatay taşıyıcı sistemine bağlı olarak belirlenecek R katsayısının $3/8$ 'i alınarak hesaplanmakta ve en fazla 2 olarak belirlenebilmektedir [11]. Dolayısıyla R_1 katsayısı, hiçbir taşıyıcı sistem için dayanım fazlalığı katsayısı Ω_0 'dan büyük olmamaktadır. Böylece yapının karşılaşması beklenen en büyük deprem etkisi altında elastik sınırlar içinde kalması, yalnızca eşdeğer doğrusal analiz yönteminin belirlediği kabuller çerçevesinde, yalıtm düzlemi kesme kuvvetinin üst yapı taban kesme kuvvetine eşit olması durumunda mümkün olmaktadır.

2. TEORİK ALTYAPI

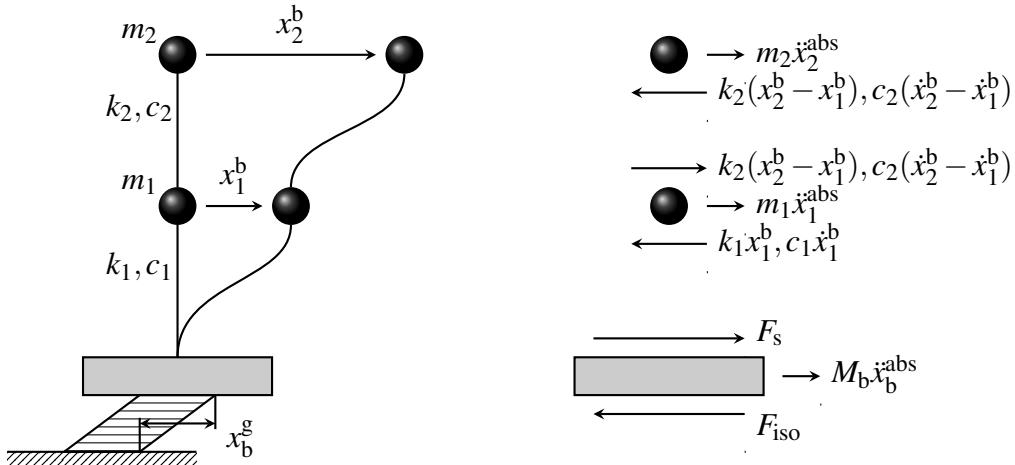
2.1 Giriş

Bu bölümde, ortak yalıtılmış düzleminde bulunan sismik yalıtımlı tekli ve çoklu yapılara ait hareket denklemleri, çalışmada kullanılacak hali ile yeniden türetilmiş ve ardından hareket denklemlerinin çalışma kapsamında kullanılan doğrusal olmayan çözüm yöntemine ait detaylar verilmiştir. Bununla birlikte sismik yalıtımlı yapıların analizinde kullanılan sönum modellerine ait detaylar paylaşılmıştır. Ayrıca sismik yalıtımlı yapıların eşdeğer doğrusal analizine ilişkin tasarım metodolojileri ilgili yöntem ve yönetmelikler dahilinde açıklanmıştır.

2.2 Sismik Yalıtımlı Tek Yapılı Sistemlere Ait Hareket Denklemleri

Nagarajaiah ve diğerleri tarafından sunulan sismik yalıtımlı tek yapılara ait hareket denklemlerinde, her bir kat 3 serbestlik derecesi ile ifade edilmektedir [16]. Bu çalışma kapsamında, tek doğrultuda yatay ötelenme serbestlik dereceleri dikkate alınacaktır. Bu sebeple hareket denklemleri, çalışma kapsamında kullanılacak sınırlar çerçevesinde detaylı olarak açıklanmıştır. Denklemler, kütleleri kat hizalarında toplanmış olan ve yalnızca yatay kesme yaylarının yapı rıjitiğini temsil ettiği örnek sismik yalıtımlı sistem üzerinden türetilmiştir. Şekil 2.1'de yapının temsili şekil değiştirmiş hali ile dinamik yükleme altında katlara ve yalıtılmış düzleme etkiyen kuvvetler sunulmuştur. Burada, x^b katların yalıtılmış düzleme göre bağıl yer değiştirmelerini, x_b^g yalıtılmış düzleminin zemine göre bağıl yer değiştirmesini, m kat kütlelerini, m_b yalıtılmış düzleme kütlesini, k kat rıjiliklerini, c ilgili kata ait sönum değerini, F_s yapının taban kesme kuvvetini, F_{iso} izolatör seviyesinde oluşan kesme kuvvetini ve noktalar ise zamana bağlı türevi belirtmektedir. Terimlerde alt indis şeklinde bulunan numaralar, ilgili büyülügün hangi kata ait olduğunu göstermektedir. Buna göre, yapının ilk katına ait hareket denklemi 2.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$-k_2 \left[x_2^b - x_1^b \right] + k_1 x_1^b - c_2 \left[\dot{x}_2^b - \dot{x}_1^b \right] + c_1 \dot{x}_1^b = -m_1 \ddot{x}_1^{\text{abs}} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1 : Sismik yalıtımlı tek yapının şekil değiştirilmiş hali ve serbest cisim diyagramı.

Dinamik denge, D'Alembert prensibine göre yazılmıştır. Bu prensibe göre, sisteme etkiyen kuvvetlerin yanı sıra, fiktif atalet kuvvetlerinin ivme yönüne ters olarak eklenmesi halinde sistem her zaman anı için denge durumunda bulunmaktadır. Dolayısıyla eşitliğin sağ tarafında yer alan \ddot{x}_1^{abs} terimi, aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi yalıtılm düzleminde oluşan ve \ddot{x}_b^{abs} ile ifade edilen ivmeler ile, dinamik dengenin sağlanabilmesi için denkleme eklenen fiktif \ddot{x}_1^b ivmesinin toplamını ifade etmektedir.

$$\ddot{x}_1^{\text{abs}} = \ddot{x}_1^b + \ddot{x}_b^{\text{abs}} \quad (2.2)$$

Benzer şekilde yapının ikinci katına ait hareket denklemi ve \ddot{x}_2^{abs} teriminin açılımı aşağıda sunulmuştur.

$$k_2 [x_2^b - x_1^b] + c_2 [\dot{x}_2^b - \dot{x}_1^b] = -m_2 \ddot{x}_2^{\text{abs}} \quad (2.3)$$

$$\ddot{x}_2^{\text{abs}} = \ddot{x}_2^b + \ddot{x}_b^{\text{abs}} \quad (2.4)$$

Yukarıda verilen denklemler düzenlenerek matris formunda yazılırsa aşağıda sunulan denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1^b \\ \ddot{x}_2^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1^b \\ \dot{x}_2^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_b^{\text{abs}} \quad (2.5)$$

Aşağıdaki denklemde açıklandığı üzere \ddot{x}_b^{abs} terimi, \ddot{x}_b^g ile ifade edilen yalıtılm düzleminin zemine göre bağıl ivmesi ile \ddot{x}_g^{abs} ifadesine karşılık gelen yer ivmesinin toplamını belirtmektedir.

$$\ddot{x}_b^{\text{abs}} = \ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{\text{abs}} \quad (2.6)$$

Yalıtım düzlemine göre bağıl olarak ifade edilmiş olan yapının hareket denklemi kapalı formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{K}_s^b \mathbf{x}_s^b = -\mathbf{M}_s \mathbf{R} \ddot{\mathbf{x}}_b^g - \mathbf{M}_s \mathbf{R} \ddot{\mathbf{x}}_g^{\text{abs}} \quad (2.7)$$

Burada, \mathbf{M}_s kütle, \mathbf{C}_s sönüüm, \mathbf{K}_s rijitlik matrisini, \mathbf{x}_s katların yalıtım düzlemine göre bağıl yer değiştirmeye vektörünü, $\dot{\mathbf{x}}_b^g$ yalıtım düzleminin zemine göre bağıl ivmesini, $\dot{\mathbf{x}}_g^{\text{abs}}$ yer ivmesini, \mathbf{R} deprem etki vektörünü ve noktalar ise zamana bağlı türevleri ifade etmektedir. Elde edilen üst yapı bağıl hareket denkleminde deprem kuvvetlerini oluşturacak ivmeler, yalnızca yalıtım düzleminin mutlak ivmesine eşittir. Dolayısıyla üst yapıya etkiyen deprem kuvvetlerinde yer ivmelerinin doğrudan etkisi bulunmamaktadır.

Burada, \mathbf{M} , \mathbf{C} ve \mathbf{K} tüm yapıya ait sırasıyla kütle, sönüüm ve rijitlik matrislerini, \mathbf{x} yapı yer değiştirmeye vektörünü ve \mathbf{S}_1 ise etki vektörünü ifade etmektedir. Denklemde belirtilen terimlerin açık hali aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} + M_b \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_b \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}$$

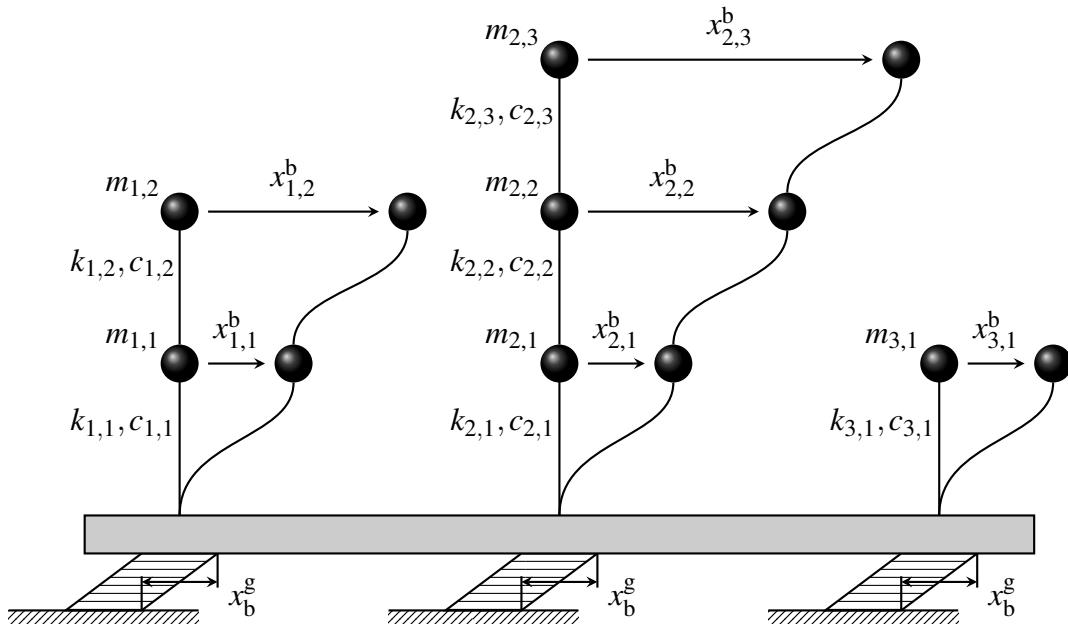
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_b \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_s^b \\ \ddot{\mathbf{x}}_b^g \end{Bmatrix} \quad \dot{\mathbf{x}}_s^b = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1^b \\ \dot{x}_2^b \end{Bmatrix} \quad \dot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s^b \\ \dot{\mathbf{x}}_b^g \end{Bmatrix} \quad \dot{\mathbf{x}}_s^b = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1^b \\ \dot{x}_2^b \end{Bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s^b \\ \mathbf{x}_b^g \end{Bmatrix} \quad \mathbf{x}_s^b = \begin{Bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{S}_1 = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

2.3 Sismik Yalıtımlı Çok Yapılı Sistemlere Ait Hareket Denklemleri

Sismik yalıtımlı çoklu yapılara ait hareket denklemleri Tsopelas ve diğerleri tarafından açıklanmıştır [17]. Yapılan çalışmada, düzlem içi rıjilikleri sonsuz yapı katlarını temsil eden toplu kütelerin iki yatay ötelenme ve bir dönme olmak üzere toplam üç adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Kütle merkezlerinde konumlanan bu serbestlik dereceleri, yalıtım düzlemini kütte merkezinden geçen düşey referans aksa göre eksantrik olarak tanımlanabilmektedir. Tez çalışması kapsamında ortak yalıtım düzleminde bulunan çoklu yapıların parametrik değişkenler altında yapı davranışları, yalnızca tek doğrultuda yatay ötelenme serbestlik dereceleri dikkate alınarak incelenmiştir. Bu sebeple hareket denklemleri, Şekil 2.2'de sunulan örnek yapı üzerinden türetilicektir. Burada, m kat kütelerini, c kat sönüümünü, k rıjilik



Şekil 2.2 : Sismik yalıtımlı çoklu yapıların şekil değiştirmiş hali.

değerini ve x ise yer değiştirmeleri belirtmektedir. Üst indiste büyülüğün göreli olarak yazıldığı konum belirtilmiştir. Yapı kat yer değiştirmelerinde alt indislerde verilen ilk rakam yapı numarasını, ikinci rakam ise büyülüğün hangi kata ait olduğunu işaret etmektedir. Yalıtım düzlemini yer değiştirmesi veya izolatör deplasmanları ise x_b^g ile verilmiştir.

3. SİSMİK YALITIMLI YAPILARIN İNCELENMESİ

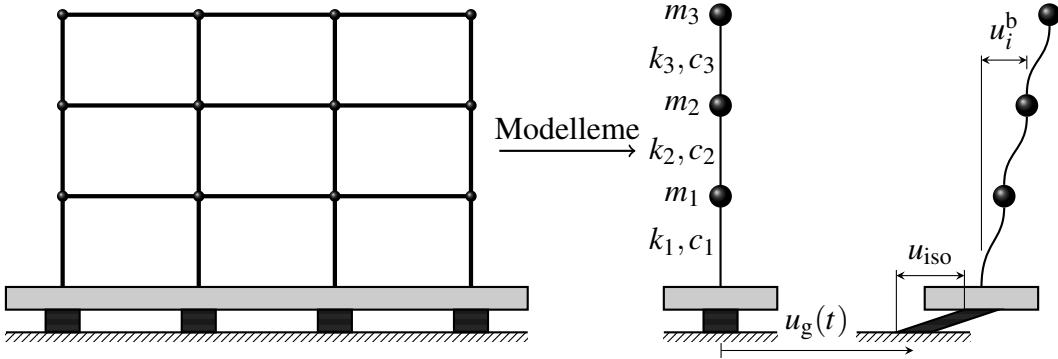
3.1 Giriş

Tez çalışması kapsamında sismik yalıtımlı yapıların doğrusal olmayan hareket denklemlerinin yer ivmeleri etkisinde daha önce belirtilen kapsam ve yöntemler dahilinde çözülebildiği MSBIS programı hazırlanmıştır. Bu bölümde, oluşturulan algoritmanın doğrulaması yapılarak, yapısal özellikleri açıklanmış ve ortak yalıtım düzleminde bulunan ikili yapıların, parametrik incelenmesine dair prosedürler gösterilecektir. Daha sonra hazırlanan çalışmaya ait sonuçlar paylaşılmıştır. Son olarak ikiden fazla yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumu için hazırlanan örnek sistemler incelenecektir.

3.2 İncelenen Yapıların Özellikleri

Tez çalışması kapsamında incelenen ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı iki yapının değerlendirilmesi, bu bölümde açıklanan yapı parametreleri kullanılarak gerçekleştirılmıştır. Yapılar yalnızca yatay doğrusal kesme yollarına sahip çok serbestlik dereceli sistemlerden oluşmaktadır. Yapı elemanları, doğrusal elastik olarak modellenmiştir. Dolayısıyla, üst yapı taşıyıcılarında deprem yükleri altında oluşan kuvvet-yer değiştirmeye ilişkisinin doğrusal elastik olduğu kabul edilmiştir. Şekil 3.1'de belirtildiği gibi yalıtım düzlemi ve yapı kat döşemeleri düzlem içinde rijit kabul edilerek tek bir kütle ile ifade edilmiştir. Yapının kat rijitlikleri, tüm kolonların yatay rijitliklerinin denklem 3.1'de verilen formüle göre belirlenerek toplanması ile elde edilmiştir. Her bir kat için yatay rijitlik değeri, toplam 16 adet 60x60 cm boyutlarında betonarme kolonların yatay rijitlikleri toplamına eşit olarak alınmıştır. Tüm yapı ve katlar için kat yüksekliği $h=4m$ olarak belirlenmiştir. Betonarme elastisite modülü $E_c=32000$ MPa olarak kabul edilmiştir.

$$\sum_{i=1}^n k_i = \frac{12E_c I}{h^3} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 : 3 nolu yapıya ait analitik model ve yapının şekil değiştirilmiş hali.

Burada, k her bir kolona ait yatay rijitliği, E_c betonarme elastisite modulünü, I atalet momentini, h kat yüksekliğini ve n bir katta bulunan kolon adedini ifade etmektedir. Sismik yalıtılmış sistemi ise tüm izolatörlerin yapısal özelliklerinin toplamı ile ifade edilen doğrusal olmayan yatay kesme yayı ile tanımlanmıştır. Ayrıca sismik yalıtımlı yapının sahip olduğu sönüüm, izolatörlerin doğrusal olmayan kesme yaylarında sönüümlendiği enerji ve üst yapının sahip olduğu Rayleigh sönüümü olmak üzere ayrıklarılmıştır. Yapısal sönüüm modellerine ait detaylar Bölüm ??’de detaylı olarak açıklanmıştır. Tez çalışması kapsamında ortak yalıtılmış düzleminde bulunan

Çizelge 3.1 : Çalışma kapsamında incelenen sistemlerin tabanı ankastre olması durumu için hesaplanan yapısal özelliklerini.

Yapı #	Kat Adedi	T_1	ω_1	ω_n
1	1	0.1573	39.94	-
2	2	0.2546	24.68	64.62
3	3	0.3535	17.77	71.97
4	4	0.4530	13.87	75.06
5	5	0.5527	11.37	76.64
6	6	0.6526	9.63	77.56
7	7	0.7525	8.35	78.13
8	8	0.8525	7.37	78.52
9	9	0.9525	6.60	78.79
10	10	1.0526	5.97	78.98

yapıların, dinamik özelliklerinin taban kesme kuvvetlerine olan etkisini incelemek üzere on adet yapı seçilmiştir. Kat sayıları birden ona kadar değişen yapıların kat rijitlikleri $k_i = 0.0108m^4$, kat kütleleri $m_i = 650t$ ve üst yapıya ait sönüüm oranları $\xi = 0.05$ olmak üzere tümünde aynıdır. Kat adedine bağlı olarak değişen yapı doğal periyotları ile birinci ve sonuncu açısal frekans değerleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Ayrıca, yalıtılmış düzleme kütlesi her bir yapı için $m_b = 981 t$ olarak alınmıştır. Yalıtılmış

birimlerine ait dinamik özellikler parametrik olarak belirlenmiş olup Bölüm ??’de detaylı olarak açıklanmıştır.

3.3 Deprem Kayıtlarının Seçilmesi

Sismik yalıtımlı yapıların çalışma kapsamında yapılan nümerik analizlerinde Çizelge 3.2’de verilen ve Fahjan tarafından DBYBHY (2007) yönetmeliğinde yer alan Z2 zemin sınıfı için önerilen deprem kayıtları kullanılmıştır [18, 19]. Çizelgedeki ilk sütun PEER veri bankasındaki kayıt numarasını belirtmektedir [20]. Ayrıca seçilen kayıtlara ait fay kırığına en yakın mesafe, kayıt süresi ve faylanma mekanizmaları da verilmiştir. Kayıtların seçilmesi ile ilgili daha ayrıntılı bilgi Fahjan tarafından yapılan çalışmada bulunabilir [18].

Çizelge 3.2 : Zaman tanım analizlerinde kullanılan deprem kayıtları.

Kayıt No	Deprem	Faya mesafe [km]	Kayıt süresi [s]	Faylanma mek.
P0017	Imperial Valley	18.2	39.0	SS
P0012	Imperial Valley	18.2	39.0	SS
P0730	Superstition Hills(B)	13.30	40.0	SS
P0898	Northridge	47.4	35.0	RN
P0856	Landers	69.2	50.0	SS
P0967	Northridge	32.7	40.0	RN
P0003	Imperial Valley	1.0	39.3	SS
P0020	Imperial Valley	8.5	37.8	SS
P0856	Landers	88.5	50.0	SS
P0051	Imperial Valley	23.8	39.5	SS

Kayıtların tasarım spektrumuna uygun hale getirilmesi aşamasında Atik ve Abrahamson tarafından önerilen durağan olmayan spektral eşleştirme metodu kullanılmıştır [21].

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı iki yapı için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Analizler bağımsız veya ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı yapıların doğrusal olmayan dinamik analizlerinin parametrik olarak yapılabildiği MSBIS programı yardımıyla gerçekleştirılmıştır. Üst yapı yapısal özelliklerinin parametrik olarak değiştiği analizlerin tamamı, yalıtım birimlerinin farklı eşdeğer periyot ve sönümlü değerleri için tekrarlanmıştır. Burada ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı birinci yapının yapısal özellikleri değişen ikinci yapı ve izolatör parametreleri değişimi ile meydana gelen etkileşimlerini incelemek amaçlanmıştır. Buna göre birinci yapıda oluşan kat kesme kuvvetlerinde, görelî kat ötelemelerinde ve kat ivmelerinde oluşan değişim irdelenmiştir. Taban kesme kuvvetinin üst yapıya dağılımı ise yalıtım birimlerinin değişen dinamik özelliklerine göre belirlenmiştir. Ayrıca ortak yalıtım düzlemindeki iki yapı için gerekli deprem derz mesafeleri doğrusal yöntemler ile bulunan sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre yalıtım birimlerinin artan eşdeğer sönümlü oranına karşılık gelen büyük doğrusalsızlık sebebi ile ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların yüksek mod etkilerinin görelî yer değiştirmeye ve iç kuvvetlerinde önemli artışlara sebep olduğu görülmüştür. Bu artışların iki yapının açısal frekanslarının ayırtlaşması ile arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla iki yapının aynı açısal frekansa sahip olması durumunda elde edilen iç kuvvet ve yer değiştirmeler, yalıtım birimlerinin aynı eşdeğer periyot ve sönümlü değerleri için eşit bulunmaktadır. Bununla birlikte yalıtım birimlerinin artan eşdeğer sönümlü değerleri için sismik yalıtımlı yapı taban kesme kuvvetlerinin üst katlara dağılımında meydana gelen dikdörtgen form yerini üst katlarda daha büyük kuvvetlerin olduğu ters üçgen formuna bıraktığı görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

1. Yalıtım birimlerinin sahip olduğu histeretik sönümlü nedeniyle meydana gelen yüksek mod etkisi doğrusal analizler ile bulunan sonuçların değişmesine neden olmaktadır.

2. Ortak yalıtım düzleminde bulunan ve farklı açısal frekanslara sahip yapıların şekil değiştirme ve iç kuvvetleri, bağımsız yalıtım düzleminde bulunan aynı yapılara kıyasla artış göstermektedir.
3. Yapı taban kesme kuvvetlerinin üst katlara dağılımının eşdeğer sönümlü oranının artışı ile dikdörtgen formdan ters üçgen formuna doğru değiştiği görülmüştür. Ayrıca iki yapının açısal frekanslarına bağlı olarak bu değişimin artış veya azalısta olduğu tespit edilmiştir.
4. Deprem derz mesafelerinde doğrusal yöntemler ile bulunan değerlerin yeterli olduğu tespit edilmiştir.
5. Ortak yalıtım düzleminde bulunan 1. yapı taban kesme kuvveti katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının en büyük değeri, 1 ve 10 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda ve $T_{eff} = 2.5\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için 2.20 olarak hesaplanmıştır.
6. Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının en büyük değeri, 2 ve 10 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda ve $T_{eff} = 2.5\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için 1.20 olarak hesaplanmıştır.
7. Yalıtım birimi kesme kuvveti katsayısının ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının en büyük değeri, 1 ve 5 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda ve $T_{eff} = 2.5\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için -0.218 olarak hesaplanmıştır.
8. 1 ve 10 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda $T_{eff} = 4\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için, 1 katlı yapının kesme kuvveti kat ivmesi ve görelî kat ötelemesinin, bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre 3.27 katına çıktıığı belirlenmiştir.
9. 1 ve 10 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda 10 katlı yapının kat kesme kuvvetleri, bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre alt katlarda en büyük azalma $T_{eff} = 1.5\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için %21.6 ve üst katta ise en büyük azalma $T_{eff} = 4\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.2$ değerleri için %18.9 olarak tespit edilmiştir.

10. 10 katlı yapının ortak yalıtılm düzleminde bulunması durumunda kat kesme kuvvetleri, bağımsız yalıtılm düzleminde bulunması durumuna göre alt katlarda en fazla %53.1 artış $T_{eff} = 1.5sn$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için 6 katlı yapı ile birlikte bulunması durumu için gerçekleşmiştir. Ayrıca üst katta en büyük azalma $T_{eff} = 4sn$ ve $\xi_{eff}=0.2$ değerleri için 2 katlı yapı ile birlikte bulunmaları durumu için %26.1 olarak saptanmıştır.
11. 10 katlı yapının ortak yalıtılm düzleminde bulunması durumunda göreli kat ötelemeleri, bağımsız yalıtılm düzleminde bulunması durumuna göre alt katlarda en fazla %53.9 artış $T_{eff} = 1.5sn$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için 6 katlı yapı ile birlikte bulunması durumu için gerçekleşmiştir. Ayrıca üst katta en büyük azalma $T_{eff} = 4sn$ ve $\xi_{eff}=0.2$ değerleri için 2 katlı yapı ile birlikte bulunmaları durumu için %26.4 olarak saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Zekioğlu, A., Darama, H. ve Erkuş, B.** (2009). Performance-based seismic design of a large structure seismically isolated structure: Istanbul Sabiha Gokcen International Airport terminal building, *Proc. of the SEAOC 2009 Convention*, http://web.itu.edu.tr/bariserkus/Zekioğlu2009_SGIA.pdf.
- [2] **Touaillon, J.**, (1870), Improvement in Buildings, <https://patents.google.com/patent/US845046A/>, united States Patent Office 99,973.
- [3] **Bechtold, J.**, (1907), Earthquake-Proof Building, <https://patents.google.com/patent/US845046A/>, united States Patent Office 845,046.
- [4] **Calantarians, J.** (1909). *Improvements in and Connected with Building and Other Works, Construction and Appurtenances to Resist the Action of Earthquakes and the Like*, <https://books.google.com.tr/books?id=Q\UkNgAACAAJ>.
- [5] **Chopra, A.K., Clough, D.P. ve Clough, R.W.** (1972). Earthquake resistance of buildings with a ‘soft’ first storey, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1(4), 347–355, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.4290010405>.
- [6] **Kelly, J.M.** (1986). Aseismic base isolation: review and bibliography, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(4), 202 – 216, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0267726186900060>.
- [7] **Robinson, W.H. ve Tucker, A.G.** (1977). A Lead-Rubber Shear Damper, *New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 10(3), 151 – 153, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0267726186900060>.
- [8] **Zayas, V.A., Low, S.S. ve Mahin, S.A.** (1990). A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, *Earthquake Spectra*, 6(2), 317–333, <https://doi.org/10.1193/1.1585573>.
- [9] **Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M. ve Salvatori, A.**, (2014). Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use, Springer International Publishing, Cham, s.449–488, https://doi.org/10.1007/978-3-319-07118-3_14.

- [10] **Eurocode** (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European Committee For Standardization, Brussels.
- [11] **ASCE** (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE Standard ASCE/SEI 7-10*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [12] **TBDY** (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [13] **ASCE** (2014). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers, asce/sei 41-13 sürüm, <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412855>.
- [14] **ASCE** (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, ASCE Standard ASCE/SEI 7-16*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, www.asce.org/bookstore/ascelibrary.org.
- [15] **York, K. ve Ryan, K.L.** (2008). Distribution of Lateral Forces in Base-Isolated Buildings Considering Isolation System Nonlinearity, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(7), 1185–1204, <https://doi.org/10.1080/13632460802003751>.
- [16] **Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. ve Constantinou, M.C.** (1991). Nonlinear Dynamic Analysis of 3-D-Base-Isolated Structures, *Journal of Structural Engineering*, 117(7), 2035–2054, [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(%28ASCE\)%290733-9445\(%281991\)%29117%3A7\(%282035\)%29](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(%28ASCE)%290733-9445(%281991)%29117%3A7(%282035)%29).
- [17] **Tsopelas, P., Nagarajaiah, S., Constantinou, M. ve Reinhorn, A.** (1994). Non-linear dynamic analysis of multiple building base isolated structures, *Computers & Structures*, 50(1), 47 – 57, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045794994904367>.
- [18] **Fahjan, Y.M.** (2008). Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi, *İMO Teknik Dergi*, 292, 4423–4444, <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/136649>.
- [19] **DBYBHY** (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [20] **PEER**, (2017), Pasific Earthquake Engineering Research Center Strong Ground Motion Database, <https://ngawest2.berkeley.edu/>.
- [21] **Atik, L.A. ve Abrahamson, N.** (2010). An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching, *Earthquake Spectra*, 26(3), 601–617, <https://doi.org/10.1193/1.3459159>.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mücahit Bekin

Doğum Tarihi ve Yeri: 1991, Ankara

E-Posta: mucahitbekin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise:** 2009, Ankara Atatürk Lisesi
- **Lisans:** 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Y. Lisans:** Mezuniyet yılı, Üniversite, Anabilim Dalı, Program.
- **Doktora:** Mezuniyet yılı, Üniversite, Anabilim Dalı, Program.

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- ABC Mühendislik 2014-2015
- CDE Teknik Proje 2015-2016
- EFG Mühendislik 2016-

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Ganapuram S., Hamidov A., Demirel, M. C., Bozkurt E., Kındap U., Newton A., 2007. Erasmus Mundus Scholar's Perspective On Water And Coastal Management Education In Europe. *International Congress - River Basin Management*, March 22-24, 2007 Antalya, Turkey. (Sunum örneği)
- Satoğlu, Ş.I., Durmuşoğlu, M. B., Ertay, T. A., 2010. A Mathematical Model And A Heuristic Approach For Design Of The Hybrid Manufacturing Systems To Facilitate One-Piece Flow, *International Journal of Production Research*, 48(17), 5195-5220. (Makale örneği)
- Chen, Z., 2013. Intelligent Digital Teaching And Learning All-In-One Machine, Has Projection Mechanism Whose Front End Is Connected With Supporting Arm, And Base Shell Provided With Panoramic Camera That Is Connected With Projector. Patent Numarası: CN203102627-U (Patent örneği)

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Erkuş, B., 2010, Makale İsmi, *Journal of Structural Control* , 50(10), 1000-1020.
- Diğerleri