



**BİNADA YATAY SALINIMI AZALTAN DEPREM İZOLATÖRLERİNİN
RİJİTLİĞİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Hasan GÜNEŞ

Danışman

Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Binada Yatay Salınımı Azaltan Deprem İzolatörlerinin Rijitliğinin
İncelenmesi**

Hasan GÜNEŞ

Danışman

Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Hasan GÜNEŞ tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 25.11.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Faruk AYSAL
Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İmza

Üye : Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmza

.....

.....

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

09.10.2024

Hasan GÜNEŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Binada Yatay Salınımı Azaltan Deprem İzolatörlerinin Rijitliğinin İncelenmesi

Hasan GÜNEŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

Binaların depreme karşı korunması amacıyla kullanılan sismik izolasyon olarak adlandırılan aynı zamanda titreşim yalıtımını sağlayan izolatör üzerinde inceleme yapılmıştır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin sismik izolasyon performansını, özellikle düşük, orta ve yüksek frekans aralıklarında yapısal etkileri belirlenmiştir. Çalışmada izolatörlerin farklı frekanslardaki dinamik tepkilerini analiz ederek, yapısal güvenlik ve dayanıklılık üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Bu tez, özellikle yüksek sismik aktiviteye sahip bölgelerde yapıların korunmasını artırmak amacıyla kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin kullanımının önemini vurgulamakta ve mühendislik uygulamalarına adaptasyonu konusunda öneriler sunmaktadır. İzolatörlerin yapısal performansı nasıl iyileştirebileceğini ve bu sistemlerin daha geniş bir kullanım alanına nasıl entegre edilebileceğini göstermektedir. Araştırmanın temel bulguları, düşük frekansta büyük yer değişimlerini ve temel salınımlarını etkili bir şekilde kontrol ederek yapısal bütünlüğü koruduğunu; çalışmada gerçekleştirilen analizler, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin sismik yalıtım performansı açısından oldukça verimli bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Kurşun çekirdeğin plastik deformasyon kabiliyeti, çelik plakaların elastik dayanımı ve kauçuğun esnekliği ile birleşerek, izolatörün sahip olduğu gözlenmiştir. Kütlenin yer değiştirme sırasında izolatörün yüksek performans gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sismik izolasyon, Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, Frekans analizi, Enerji Sönümleme

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Investigation of the Stiffness of Earthquake Isolators Reducing Horizontal Oscillation in
Buildings

Hasan GÜNEŞ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Abdurrahman KARABULUT

The study was conducted on the seismic isolation used to protect buildings against earthquakes and also provides vibration isolation. The seismic isolation performance of lead-core rubber isolators, especially the structural effects in low, medium and high frequency ranges, was determined. The study analyzed the dynamic responses of the isolators at different frequencies and addressed their effects on structural safety and durability. This thesis emphasizes the importance of using lead-core rubber isolators in order to increase the protection of structures, especially in regions with high seismic activity, and offers suggestions on their adaptation to engineering applications. It shows how isolators can improve structural performance and how these systems can be integrated into a wider range of use. The main findings of the research are that they effectively control large displacements and foundation oscillations at low frequencies, preserving structural integrity; The analyzes carried out in the study showed that lead-core rubber isolators provide a highly efficient solution in terms of seismic isolation performance. It was observed that the isolator has the plastic deformation ability of the lead core, the elastic strength of the steel plates and the flexibility of the rubber. It was observed that the isolator showed high performance during the mass displacement.

Keywords: Seismic isolation, Lead-core rubber isolators, Frequency analysis, Energy damping

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında, teorik ve analitik düşünce sürecime rehberlik ederek bilgi birikimi ve deneyimleriyle yol gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT'a içtenlikle teşekkür ederim.

Ayrıca, bu zorlu akademik süreç boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, sabrı ve anlayışıyla her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Onların varlığı, bu yolculuğun çok daha katlanılır ve öğretici olmasını sağlamıştır.

Üniversite hayatım boyunca bana ilham veren ve destek olan hocalarıma, derslerinde kazandığım bilgilerle donanımımı artıran akademisyenlere ve bu süreçte her daim yanımda olan arkadaşlarıma da minnettarlığımı belirtmek isterim. Her birinin bu tez sürecine katkısı, benim için büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur.

Bu teşekkürlerimi, bana destek olan herkese duyduğum derin saygı ve minnettarlıkla sunuyorum. Her birinizin desteği, bu akademik başarıda önemli bir yer tutmaktadır.

Hasan GÜNEŞ
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Sismik İzolasyon Yönteminin Temel İlkeleri.....	6
1.2 Sismik Yalıtım Uygulamalarındaki Sınırlamalar	12
1.3 Sismik İzolatör.....	12
1.4 Sismik İzolasyonun Avantajları.....	14
1.4.1 Yapısal Avantajları ve Dezavantajları	15
1.5 Sismik İzolatör Türleri.....	19
1.5.1 Elastomerik İzolatörler.....	19
1.5.2 Kayıcı İzolatörler	23
1.5.3 Mekanik İzolatörler.....	25
1.6 Sismik İzolasyonların Deprem Davranışına Etkileri	27
1.7 Titreşim.....	27
1.7.1 Kütle Yay Sistemi	29
1.8 İzolatörlerin Genel Özellikleri Ve Teknik Detayları	31
1.8.1 Kauçuk İzolatörlerin Mekanik Özellikleri	31
1.9 Sürtünmeli Sarkaç Tip Mesnetlerin Mekanik Özellikleri.....	33
1.10 Sismik İzolatör Sistemlerinin Uygulamaları.....	35
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	39
3. MATERYAL VE METOD	46
3.1 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör.....	46
3.1.1 Model Geometrisi	47
3.1.2 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	48
3.1.3 Mesh Yapısı	51
3.1.4 Sınır Şartları	54
4. BULGULAR	58
4.1 Analitik İnceleme.....	58
4.1.1 Logaritmik Gerinim Dağılımı ve Deformasyon Analizi.....	58
4.1.2 Gerilme Dağılımı	60

4.1.3 Mises Gerilmesi Dağılımı	61
4.1.4 X ve Y Yönlerinde Yer Değiştirme	62
4.2 Enerji Sönümleme Kapasitesi ve Histerezis Davranışı.....	63
4.3 Malzeme ve Geometrinin Etkisi	65
4.4 İç Gerilme	65
4.5 İzolatörün Karakteristik Özelliği ve Mekanik Performansı.....	66
5. MEKANİK ANALİZ	68
5.1 Logaritmik ve Plastik Gerilim Dağılımı	68
5.2 Yer Değiştirme Davranışı	70
5.3 Enerji Sönümleme Kapasitesi ve Histerezis Davranışı.....	70
6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	72
7. KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Bina geometrik yapısı	4
Şekil 1.2 Farklı sönüm oranlarında ivme periyot değişimi	5
Şekil 1.3 Basit sarkaç	28
Şekil 1.4 Lineer yay modeli	29
Şekil 1.5 Kütle-yay modeli.....	30
Şekil 3.1 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin bölüm ayrıntıları.....	47
Şekil 3.2 Model geometrisi	47
Şekil 3.3 Çelik malzeme özellikleri	48
Şekil 3.4 Kurşun malzeme özellikleri	49
Şekil 3.5 Kauçuk malzeme özellikleri.....	50
Şekil 3.6 Sismik izolatörde kullanılan mesh yapıları	52
Şekil 3.7 İzolatörün mesh görünümü	54
Şekil 3.8 İzolatör modeli için ABAQUS sınır şartları.....	57
Şekil 4.1 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün logaritmik deformasyonu.....	59
Şekil 4.2 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün plastik deformasyonu.....	60
Şekil 4.3 Mises gerilmesi	62
Şekil 4.4 X Yönünde yer değiştirme zaman grafiği	63
Şekil 4.5 Y yönünde yer değiştirme zaman grafiği	63
Şekil 4.6 Tasarlanan kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün histerezis diyagramı	64
Şekil 4.7 Ghrewati ve arkadaşlarının yaptığı çalışma	67

RESİMLER DİZİNİ

Resim 2.1 İzolatör içyapısı.....	20
Resim 1.2 Kayıcı izolatör.....	24



1. GİRİŞ

Günümüzde dünya nüfusu sekiz milyarın üstüne doğru çıkmaktadır. Bu nüfus artışı ile insanların temel yaşam alanlarına duyduğu ihtiyaçta artmaktadır. İnsanların konforlu bir yaşam sürdürebilmeleri için konutlar, hastaneler, iş yerleri, okul, üniversite binaları gibi pek çok yapıya ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda, bu yapıları birbirine bağlayan ve ulaşımın kesintisiz bir şekilde sürdürülebilmesini sağlayan köprüler, otoyollar ve diğer altyapı çalışmaları da hayati öneme sahiptir.

Bilim ve teknoloji bu büyüyen ihtiyaçları karşılamak için sürekli çözümler üretmektedir. Ancak, sadece bu ihtiyaçları karşılamak yeterli olmamaktadır. Doğal afetler gibi beklenmedik olaylara karşı bu yapıları korumak ve bu tür felaketler sırasında can ve mal güvenliğini en üst seviyede tutmak da büyük önem taşımaktadır. Özellikle deprem gibi doğal afetlere maruz kalan bölgelerde önlemler alınması gereklidir. Bu kısımda, deprem direncini artırmak için iki yaklaşım vardır. Yapıların taşıyıcı sistemlerini deprem etkilerini emebilir hale getirerek güçlendirmek ve depremin zararlı etkilerini azaltmak için deprem izolatörleri gibi teknolojileri kullanarak yapıların esnekliğini ve dayanıklılığını artırmak, deprem izolatörleri aynı zamanda yapıların esnekliğini artırarak deprem sırasında daha az hasar görmesini sağlamaktadır. Bu cihazlar, deprem riski olan ülkelerde hayati bir öneme sahiptir. Türkiye gibi deprem bölgesi olan ülkelerde kullanımı hızla artmaktadır.

Sismik izolasyon, inşaatın deprem direncini artırmak yerine, deprem etkilerini azaltmayı amaçlayan bir yenilikçi tasarım yaklaşımıdır. Bu metot, yapı-zemin ilişkisini kesmek için yerleştirilen dikey olarak sert ancak yatayda esnek donanımları içerir. Bu donanımlar, yapıya gelen deprem yüklerini absorbe ederek, binanın dayanıklılığını arttırmaktan ziyade deprem etkilerini azaltır. Bu teknik, genellikle yapı temelinin altına yerleştirilmesine rağmen, farklı seviyelerde de uygulanabilir, örneğin katlar arası, kolon ortası veya çatı seviyelerinde. Sıklıkla "taban izolasyonu" olarak adlandırılan bu yöntem, depreme karşı daha etkili bir koruma sağlamayı hedefler (Naeim ve Kelly 1999).

Sismik izolatörler, üst yapıyı zeminden ayırarak yer hareketlerinden gelebilecek tepkileri azaltacak şekilde yapıyı izole edip, yapının doğal titreşim periyodunu ve sönümlleme oranını artıran sistemlerdir. Sismik hareketlerin vereceği hasarları minimize etmenin en etkili yöntemlerindendir. Aynı zamanda kat ötelenmelerini ve kat ivmelerini birlikte azaltmada önemli rol oynamaktadır. Yapı tasarımında çoğunlukla kullanılan geleneksel yanal yük taşıma yöntemine göre tasarlanan yapılarda, hemen hemen yer hareketlerinden doğan yükler üst yapıya iletilir ve bu yüklerin taşıyıcı elemanlara hasar vermesi oldukça yüksektir. Sismik taban izolatörlü yapılarda ise enerji yutulması yüksek olduğundan, yer hareketlerinden doğan dış yüklerin üst yapıdaki etkisi oldukça azalmaktadır. Yapı tasarımında tabanda sismik izolatörler kullanıldığında, ilk başta yapı neredeyse rijit bir davranış gösterir ve yalnızca tabanda kullanılan izolatörlerde yer değiştirme olacaktır. Yapının doğal titreşim periyodunun artmasıyla depremden kaynaklı spektral ivme ve depremin yapıya vereceği deformasyon etkisi önemli oranda azaltılmış olacaktır. Yer hareketlerinden kaynaklı yapıya gelen sismik kuvvetlerin şiddetini kontrol edemeyebilir, fakat zeminden gelen yüklerin yapıya iletim şiddetini azaltarak yapının daha güvenli hale gelmesi sağlanmaktadır. Normal geleneksel yöntemlerle tasarlanan çelik yapılarda %5 olarak kabul edilen sönüm oranı, sismik izolatör uygulanan yapılarda ise %25'lere kadar çıkmaktadır (Özdemir 2010).

Dünya çapında meydana gelen çok sayıda büyük yer hareketi, insan ve mal kaybına neden olmaktadır. Bu da yapıların sismik performansının geliştirilmesinin önemini artırmıştır. Bu amaca ulaşmak için, yapıların depremlere karşı direncini artırmak ve hasarsızlığını artırmak için bir dizi teknoloji geliştirilmiştir. Sismik izolatörler, bu teknolojilerin en iyi seçeneklerinden biridir.

Taban izolatörlü sistemler genellikle bir izolatör yatağı üzerine yerleştirilmiş sağlam bir taban matı ve üst yapıdan oluşmaktadır. İhtiyaç duyulduğunda sisteme ek sönümleyiciler de dâhil edilebilir. Yapıları izole etmek için tercih edilen ek sönümleyicilerin kullanımında bir dizi olası sakıncaya dikkat edilmelidir. Bu dezavantajlardan bazıları şunlardır: Tüm sönümleyiciler (dâhili kurşun dolgusu dışında) mekanik bağlantılara ve düzenli bakıma ihtiyaç duyar; metalik sönümleyiciler akma durumuna gelme veya esneme potansiyeline sahiptir; İzole edilmiş bir binanın dinamik

davranışını karmaşıktırtmak için doğrusal olmayan bir durumu göz önüne alınmaktadır. Bu durum, binanın izolatörlerinin sertliğinde veya sürtünmesinde doğrusal olmayan özelliklere sahip olduğunu düşünmek anlamına gelmektedir. Ayrıca, yüksek modlardaki tepkileri artırmak için ilave sönümleyiciler eklenmektedir.

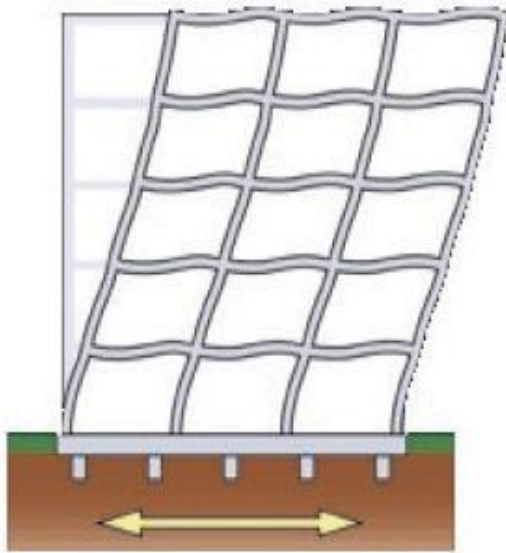
Taban izolatörlü sistemler genellikle bir izolatör yatağı üzerine yerleştirilmiş sağlam bir taban matı ve üst yapıdan oluşmaktadır. İhtiyaç duyulduğunda sisteme ek sönümleyiciler de dâhil edilebilir. Yapıları izole etmek için tercih edilen ek sönümleyicilerin kullanımında bir dizi olası sakıncaya dikkat edilmelidir. Bu dezavantajlardan bazıları şunlardır: Tüm sönümleyiciler (dâhili kurşun dolgusu dışında) mekanik bağlantılara ve düzenli bakıma ihtiyaç duyar; metalik sönümleyiciler akma durumuna gelme veya esneme potansiyeline sahiptir; izole edilmiş bir binanın dinamik davranışını karmaşıktırtmak için doğrusal olmayan bir durumu göz önüne alınmaktadır. Bu durum, binanın izolatörlerinin sertliğinde veya sürtünmesinde doğrusal olmayan özelliklere sahip olduğunu düşünmek anlamına gelmektedir. Ayrıca, yüksek modlardaki tepkileri artırmak için ilave sönümleyiciler eklenmektedir (Karakurt 2015).

Özellikle stratejik öneme sahip alanlarda, örneğin okullar, hastaneler, itfaiye, polis ve emniyet merkezleri, nükleer tesisler, enerji üretim tesisleri ve tarihi ve anıtsal değeri yüksek binalarda, sismik izolatörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu izolatörler, insanlara yüksek deprem güvenliği sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yapıların taşıyıcı sistemleri ve mimari parçalarında korumaktadır. Şiddetli depremlerin ardından bile hemen kullanılmaya hazır olmaları, iş kaybını önler ve pazar payını korumaktadır. Bu sistemler, köprü, viyadük gibi yapıların hasar görmeden kullanılmasını sağlamaktadır. Önemli eşyaları ve cihazları etkin bir şekilde korumaktadır. Yıkılma veya hasar olmaması, yeniden inşaat veya onarım maliyetlerini azaltırken, minimum bakım gereksinimi ile uzun ömürlü bir çözüm sağlamaktadır. Bu faydalar, iş merkezleri, lüks konutlar ve çok katlı ofis projeleri gibi alanlarda sismik izolatör kullanımının artmasına yol açmaktadır (Karakurt 2015).

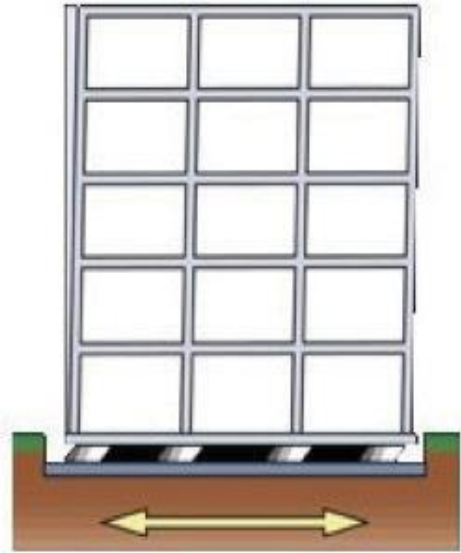
Deprem etkilerine karşı dirençli yapı dizaynında, yapısal direnç, stabilite ve esneklik kritik öneme sahip unsurlardır. Yapıların elastik sınır içerisinde gerçekleştirebileceği

maksimum yer değiştirmesi dayanıklılığın bir göstergesidir, bu da yapı içerisindeki yer değiştirmenin genel oranıyla esneklik kavramını tanımlamaktadır. Esnek yapılar, deprem yüklerine tepki olarak hasar alma potansiyeli yüksek olsa da kolay kolay çökmeyen yapı tipleridir. Yapısal elemanların genel stabilitesi, rijitlikle sağlanırken, bu elemanların birleşim bölgeleri esneklik potansiyeli barındırmalıdır. Bu esneklik kapasitesi, yapının deprem anında çökmesini ya da hasar görmesini minimuma indirir. Yapının depreme karşı dayanımının optimize edilmesi, rijitlik ile esneklik arasındaki dengenin ustaca kurgulanmasıyla elde edilmektedir (Karakurt 2015).

Sismik izolasyonun temel ilkesi yapının titreşim süresini uzatarak deprem kaynaklı enerjinin ana yapının bütünlüğüne geçişini minimize ederek bu enerjiyi izolasyon elemanında hapsedilmesidir. Sonuç olarak yapıyı destekleyen ana bileşenler olan kolon, kiriş ve perde yapıları hasardan korunmuş olacaktır. Ek olarak, yapıya entegre olmayan bileşenler ile i meknın diğer unsurları da bu sarsıntıdan korunmuş olacaktır. Böylece, potansiyel yaralanma, ölüm ve maddi kayıpların riski önemli ölçüde azalır.

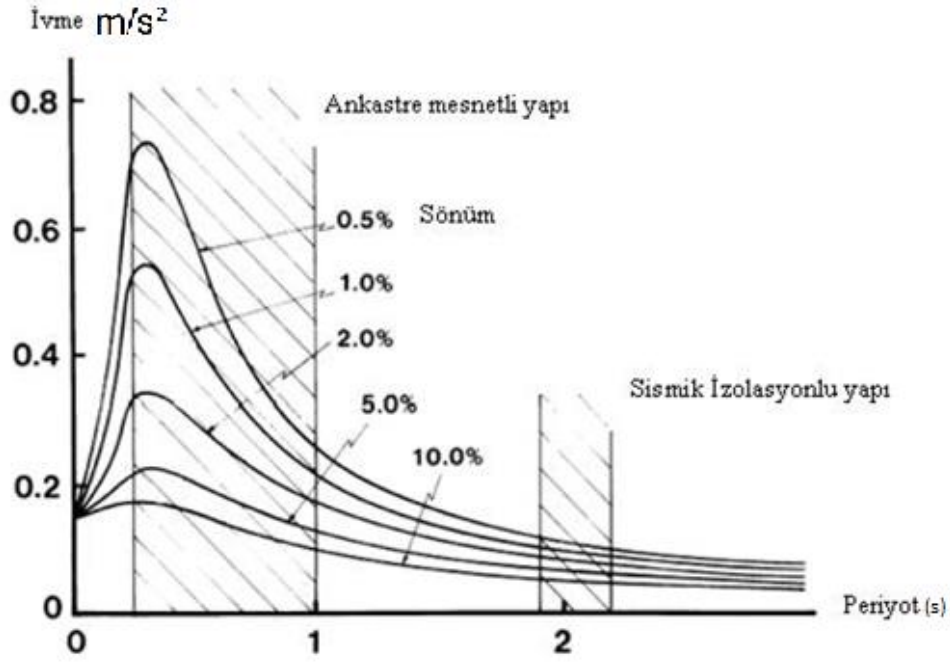


a) Ankastre mesnetli yapı



b) Sismik izolasyonlu yapı

şekil 1.1 Bina geometrik yapısı



Şekil 1.2 Farklı sönüm oranlarında ivme periyot değişimi

Sismik izolatörler, binaların ve diğer yapıların deprem anında maruz kalabileceği hasarı minimize etmek için kritik öneme sahiptir. Depremler, yapılar üzerinde büyük yanal kuvvetler yaratır ve bu kuvvetler, ciddi yapısal hasarlara, can kayıplarına ve büyük ekonomik zararlara yol açabilir. Sismik izolatörler, bu kuvvetleri absorbe ederek ve dağıtarak yapıların temel hareketlerini kontrol eder, böylece titreşimleri ve yapısal gerilmeleri önemli ölçüde azaltılacaktır. Şekil 1.2' de ankastre mesnetli yapılarda sönüm oranı düşük olduğunda ivme değerleri oldukça yüksek olup, özellikle kısa periyotlarda (1 saniyeden küçük) hızlı bir artış gösterir. Ancak periyot arttıkça bu ivme değerleri hızla azalmaktadır. Öte yandan, sismik izolasyonlu yapılarda ise izolasyonun etkisiyle periyotlar daha uzun olur ve ivme değerleri, sönüm oranına bağlı olarak belirgin şekilde daha düşük seviyelere iner. Bu durum, sismik izolasyonun yapının depreme karşı dayanıklılığını artırdığına işaret etmektedir. Sönüm oranının sıfıra yaklaştıkça ivme değerini yükseldiği görmekteyiz (Naeim ve Kelly 1999).

Bu sistemler, yapının doğal titreşim periyodunu uzatarak, rezonans riskini minimize eder ve deprem enerjisinin büyük bir kısmını sönmölemektedir. Ayrıca, sismik izolatörler, yapının esnekliğini artırarak, deprem sonrası hızlı bir şekilde kullanıma devam edilmesini sağlamaktadır. Bu, özellikle hastaneler, köprüler, enerji santralleri ve

diğer kritik altyapılar için hayati önem taşımaktadır. Sismik izolatörlerin kullanımı, can ve mal kaybını en aza indirirken, deprem sonrası onarım maliyetlerini de önemli ölçüde azaltır ve toplumsal dayanıklılığı artırmaktadır (Skinner vd. 1993, Kelly 1997).

Çizelge 1.1 Sismik izolatör olmayan binanın deprem zamanı hasar tablosu (Naeim ve Kelly 1999).

Deprem şiddeti (Richter ölçeği)	Yapısal hasar seviyesi
4.0 - 4.9	Hafif çatlaklar
5.0 - 5.9	Orta derecede hasar
6.0 - 6.9	Ağır hasar
7.0 - 7.9	Ciddi hasar ve kısmi yıkım
8.0 ve üzeri	Tam yıkım

1.1. Sismik İzolasyon Yönteminin Temel İlkeleri

Deprem izolatörlerinin temel hedefi, bir yapıya yatay yönde etki edecek deprem kuvvetlerini azaltmaktır. Bu amaçla, yapı üzerinde oluşabilecek titreşimleri kontrol etmek için bir dizi seçenek kullanılmaktadır. Bu seçenekler arasında, yapıların titreşim periyodunu arttırmak veya deprem sönüm oranını arttırmak gibi yöntemler bulunur. Deprem izolatörleri, genellikle bu seçeneklerden birini kullanarak, deprem kaynaklı kuvvetleri absorbe etmek veya yönlendirmek suretiyle yapıya daha fazla direnç sağlamaktadır. Bu sayede, yapıların deprem etkilerine karşı dayanıklılığı artar ve hasar riski minimize edilecektir. Binalarda sismik izolatörler genellikle aşağıdaki özellikleri içermektedir:

Esneklik ve Süneklik: Sismik izolatörler, yapıya esneklik ve süneklik kazandırarak deprem etkilerini absorbe edebilme kapasitesine sahiptir.

Deformasyon Kapasitesi: Yüksek deformasyon kapasitesi, izolatörlerin deprem sırasında büyük ölçüde deforme olabilme yeteneğini ifade eder ve bu da yapıya dayanıklılık sağlar.

Yatay Yönde İzolasyon: Temel amacı yapının yatay yönde etkilenen deprem kuvvetlerini azaltmak olan sismik izolatörler, bu yönde hareket yeteneği ile dikkat çeker.

Hızlı Kullanıma Geçiş: Depremın hemen ardından kullanıma hazır olma yeteneği, sismik izolatörlerin avantajlarından biridir ve iş kaybını en aza indirir.

Minimum Bakım Gereksinimi: Uzun ömürlü ve düşük bakım gereksinimine sahip olmaları, sismik izolatörlerin sürdürülebilir bir çözüm olmalarını sağlar.

Uygulama Esnekliği: Sismik izolatörler, çeşitli yapı tiplerine ve farklı seviyelerdeki yapı elemanlarına uygulanabilirler, bu da geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır.

Yüksek Performans: Sismik izolatörler, yapıya gelen deprem yüklerini etkin bir şekilde absorbe ederek, bina performansını artırır ve hasarın önlenmesine katkıda bulunurlar.

Sismik izolatörler, sağladıkları avantajların yanı sıra maksimum yük ve yer değiştirme durumlarında kararlılıklarını korumak zorundadır. Bu, izolatörlerin, yoğun yük altında dahi dayanıklılıklarını sürdürme yeteneği anlamına gelmektedir. Ayrıca, izolatörler yer değiştirmelere karşı direnç göstermeli ve tekrarlı titreşim yükleri altında fiziksel özelliklerinde meydana gelebilecek deformasyonları sınırlı tutmalıdır (Smith ve Doe 2020).

Etkili bir izolatör sistemi için yapı periyodunun uzun olması gerekmektedir. Yapı rijitliği ve yapı ağırlığı genellikle doğru orantılıdır. Ancak yapı periyodu ile olan ilişki genellikle ters orantılıdır. Hafif yapılar genellikle düşük yatay rijitlikle inşa edilmelidir. Örneğin, kauçuk izolatörlerin stabil kalabilmesi için belirli bir minimum çap değeri vardır. Bu minimum rijitlik seviyesi, kauçuk izolatörlerin stabil kalabilmesi için gerekli olan değerdir. Bununla birlikte, kayıcı izolatörlü sistemlerde bu tür kısıtlamalar yoktur. Az katlı hafif binalarda kayıcı sistemlerin kullanılması, yapıların deprem etkilerine karşı daha dayanıklı hale getirilmesine imkan tanımaktadır. Ancak, bu sistemlerin maliyeti, genellikle kayıcı plakaların kendisi gibi önemli bileşenler tarafından belirlenir. Bu durumda, az ve çok katlı binalar için kayıcı plakaların yaklaşık olarak aynı maliyetle olduğunu belirtilmektedir (Skinner vd. 1993; Kelly 1997).

Zemin koşulları açısından değerlendirildiğinde, izolasyon sistemleri özellikle ZA ve ZB tipi sert kaya zeminlerinde en etkili şekilde uygulanır. Bu tür zeminlerde, izolasyon sistemi optimum performans gösterir ve yapıyı deprem etkilerine karşı daha etkin bir şekilde koruyacaktır. Ancak, yumuşak zeminlerde bu sistem, deprem büyütme etkileri ve rezonans etkileri nedeniyle potansiyel zorluklarla karşılaşabilir. Yine de, gerekli önlemler alındığında, sismik izolatörler ZF tipi zemin haricindeki zemin koşullarında da başarılı bir şekilde kullanılacaktır.

Sismik izolatörlerin uygulanması sırasında en çok tartışılan konulardan biri yakın fay etkisidir. Yapıya 5 km'den daha yakın fay hatları, deprem dalgalarında girişim olarak bilinen olaya neden olmaktadır. Girişim, çeşitli deprem dalgalarının bir araya gelmesi durumudur. Bu durum, izolatörün maliyetini ve tasarımını artırmaktadır.

Yapılacak olan sismik izolatörün konumu, zemin ve dinamik koşulların uygunluğu dikkate alındığında, dikkat edilmesi gereken en kritik konulardan biridir. Taban izolatörlü yapılar için, st ve alt yapıyı ayıran bir düzlemin varlığı ve yatay salınımı mümkün kılacak bir sismik boşluğun bulunması önemlidir. Taban izolatörlü yapıların tasarımında bırakılması gereken salınım boşluğu, bulundukları bölgenin depremselliği ve izolatörlerin deplasman değerlerine bağlı olarak 10-100 cm aralığında olmalıdır. Yetersiz salınım boşluğu, izolatörlerin istenilen şekilde çalışmamasına veya yapılan binanın çok yakınında başka bir yapı olması durumunda izolatörün etkili olmamasına neden olacaktır.

Sismik izolatörlerin yerleştirilmesi, yapılara uygulanacak sistem üzerinde burulmayı önleyecek bir düzenleme yapılması gerektiğini vurgulanmaktadır. Bu düzenlemeden önce, izolatörlerin yapının uygulama seviyesine nasıl yerleştirileceğine karar verilmesi önemlidir. İzolatörün konumu belirlenirken, zeminin yapının üzerindeki potansiyel etkileri, izolatörün muhtemel bakım ihtiyacı, yangın, sıcaklık gibi faktörler göz önüne alınmalıdır. Aynı zamanda, yapı içinde asansör, merdiven ve iç tesisat gibi sistemler de düşünülerek tasarım titizlikle gerçekleştirilmelidir.

Sismik izolatörler yapıda genel olarak kolon alt bölgelerine yerleştirilir. Bu durumda,

yapının içindeki merdivenler gibi sistemler, izolatörün uygulandığı bölgeden etkilenmeden işlevlerini sürdürebilir. İzolatörler, genellikle deprem sırasında binanın yer hareketinden kaynaklanan titreşimleri absorbe eden veya sönümleyen özel tasarlanmış yapı elemanlarıdır. İzolatörlerin kolon ortasına veya kolon üstüne yerleştirilmesi, bina içi ulaşım sistemlerinde ek önlemler alınması gerektiren bazı etkileri beraberinde getirebilir. Aynı şekilde, izolatör seviyesinde bulunan sistemler (örneğin kapılar ve duvarlar) alt yapı ile üst yapı arasındaki kayma hareketini karşılayacak şekilde tasarlanmalıdır. İzolatörlerin bodrum katlarda veya görünmeyen alanlarda konumlandırılması da başka bir seçenektir. Bu seçenek, izolatörlerin bakımının ve olası değişiminin kolaylaştırılmasını sağlayarak önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, bu avantajlarla birlikte ek kat, istinat duvarı ve kazı masrafları gibi bazı unsurlar bu durumdan etkilenmektedir.

Sismik izolatörlerin kullanıldığı binalarda, beklenen maksimum yer değiştirmeye karşı bir tolerans sağlamak amacıyla sismik boşluk bırakılması önemli bir tasarım unsuru olabilir. Toprak altında yer alacak bir sismik boşluk, istinat duvarları ile çevrelenmeli ve bu alana su, toprak gibi yabancı maddelerin dolmasını önlemek amacıyla gerekli önlemler alınmalıdır. Ayrıca, yapıya dışarıdan bağlanacak su, doğalgaz, elektrik ve kanalizasyon sistemleri gibi unsurların ek yerleri, esnek bir tasarım ile olmalıdır. Bu önlemler, sismik izolasyon sistemlerinin etkinliğini korumak ve yapıya uzun ömürlü bir hizmet sağlamak adına oldukça önemlidir.

Destek sistemleri, sismik izolatörlü binalarda deplasmanları kontrol etmek için kullanılabilir. İzolatörlerin öngörülen deplasman değerlerini aştığında, binanın komşu yapılara veya sismik boşluktaki istinat duvarına çarpmasını önlemek için bu destek elemanları önemlidir. Potansiyel çarpışmalar, kat ivmelerinin artmasına, çevresel hasarlara veya bina içindeki ekipmanlara zarar verebilir. Bu tür hasarları en aza indirmek için kullanılan iki tip sistem vardır: Bunlar tamponlar ve durdurucular olarak isimlendirilmektedir (Smith ve Doe 2020).

Sismik izolatörlerin uygulanacağı binaların ömrü kısa olmalıdır. İvme spektrumu köşe periyotları (TA ve TB) arasında veya bunlara yakın olan kısa periyotlu yapılar, 1,5 ila 3,5 saniye arasında periyotlarını değiştirerek etkili bir izolatör sağlanmaktadır. Bununla

birlikte, sismik izolatörlerin uzun süreli yapılar üzerinde herhangi bir etkisi olmamaktadır.

Sismik izolatör, son otuz yıl içinde yapıların sismik tasarımında yaygın ve etkili bir teknik olarak benimsenmiş olsa da, izolatörün ilkel uygulamaları tarih boyunca uzanmaktadır. Örneğin, M.Ö. 440 yılında Pantheon'da, izolatör sistemlerinin çalışma prensiplerine benzeyen ve enerjiyi dağıtmaya yönelik düzeneklere rastlanmaktadır. Bu eski örnekte, mermer bloklar, mermerlerin nispi hareketine izin veren kurşun ve demir plakalar aracılığıyla birleştirilmiş ve enerji kaybı bu hareketle sağlanmıştır. Mermer blokların yer değiştirmesi, bağlantı malzemelerinin akmasını sağlayarak direnç kuvvetini oluşturmuştur.

Günümüzde, yük taşımak amacıyla izole edilmiş binalarda çelik takviye katmanlarına sahip çok katmanlı lamine kauçuk yataklar kullanım bulmaktadır. Bu gelişmiş yalıtım sistemleri, binaların deprem etkilerine karşı direncini artırmak ve titreşimleri absorbe etmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu yataklar, takviye edici çelik plakalar sayesinde düşey yönde oldukça rijit olsalar da yatay yönde esneklik gösterirler, bu da izolatör etkisi oluşturmaktadır. Bu rulmanlar, üretimleri kolay, hareketli parçalara sahip olmayan, zamanla deformasyona uğramayan ve çevresel bozulmalara karşı dirençli yapıya sahiptirler.

Sürtünme katsayısı arttıkça iletilen kesme kuvveti azalır. Bu tip sistemler, önerilen tüm sistemlerin en yeni ve basit olanı olmasına rağmen bazı dezavantajlara sahiptir. Yeterli direnci sağlamak ve küçük depremler veya diğer uyarılar sırasında istenmeyen hareketi önlemek amacıyla, rüzgar yüküne karşı çok yüksek bir sürtünme katsayısı değeri gereklidir. Bu bağlamda, bir dizi sürtünme yüzeyi, basınca ve kayma hızına duyarlı bir şekilde kayabilen özelliklere sahiptir. Kayma süreci doğası gereği doğrusal olmayan bir karaktere sahiptir. Ayrıca, kayma veya yapışma meydana geldiğinde, yapıda yüksek frekanslı titreşimler ortaya çıkmaktadır. Bu frekanslar, yer hareketinde bulunmayabilecek frekanslı titreşimlere işaret etmektedir (Skinner vd. 1993, Kelly 1997).

İzolatör sistemlerinde düz kaydırıcı (FS) kullanmanın bir başka sorunu, etkili bir geri

yükleme kuvvetinin olmamasıdır. Bu durum, sistemdeki elemanların doğrusal olmayan davranışını göz önüne alarak, kaydırıcı kullanıldığında geri dönen bir kuvvetin olmaması anlamına gelir. Bu durumda, yer değişimi için daha fazla düzenleme gereklidir. Yatak plakaları ve destek sistemi, yatay bir yer değiştirme olasılığı nedeniyle çok büyük olmalıdır. Ek olarak, izolatörler üzerindeki üst yapı parçaları, bu önemli yer değiştirmelerden kaynaklanan önemli momentlere dayanacak şekilde tasarlanmalıdır.

İzolatörlere geri yükleme gücü sağlamanın birçok yolu vardır. Kelly (1986), düz kaydırıcı ve elastomerik yatakların kombinasyonunu önererek her iki tip izolatörün en iyi özelliklerini kullanmayı amaçlamıştır. Kauçuk yataklar, yer değiştirmeyi kontrol etmek, burulmayı kontrol etmek ve tasarım düzeyini aşan yer değiştirmelerde rijitleştirme hareketi üretmek için bir merkezleme hareketi sağlayan uzun periyotlu bir sistem oluşturur. 1992 yılında tamamlanan Mackay Maden Okulu'nun güçlendirilmesinde ve Watts, California'daki Martin Luther King, Jr./Drew Hastanesi'nde kurşun-bronz kaydırıcıların ve yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerin kullanıldığı bu düz kaydırıcı-elastomer kombinasyonu kullanılmıştır (Skinner vd. 1993).

Yüzeyin bükülmesi, kayıcı bir izolatörde (FS) geri yükleme kuvveti oluşturmanın alternatif bir yöntemidir. Sürtünme sarkaç sistemi (FPS), yapının ağırlığının küresel kayan yüzeyler üzerinde birbirine göre yer değiştirdiği bir kayıcı izolatör sistemidir. Bu sistem, belirli bir eşik seviyesinin üzerine çıkıldığında devreye girmektedir. Binanın yükseltilmesi durumunda, küresel yüzeyde kayma oluştuğunda, yapı yeniden merkezleme hareketi gerçekleştirir. 1986'da geliştirilen bu sistem, 1989'daki Loma Prieta depreminde büyük hasar gören dört katlı bir apartmanın güçlendirilmesinde kullanılmıştır (Zayas ve Mahin 1987). Zemin seviyesinde bir çelik çerçeve, ahşap çerçeveli bir yapının üst üç katını desteklemek üzere inşa edilerek çelik çerçeve kolonlarının altına izolatörler yerleştirilmiştir.

İzolatör sistemleri, geçmişten günümüze bir dizi tasarımlarla, özellikle tarihi yapıların sismik performansını artırmak ve önemli tesislerin tasarımında kullanılmak üzere günümüz teknolojiyle birleşmiştir. Türkiye'de özellikle havalimanları, veri merkezleri güçlendirme projeleri ve yeni inşa edilen şehir hastanelerinin tasarımlarında izolatör

sistemlerinden büyük ölçüde faydalanılmaktadır. Ülkemizin önemli bir deprem kuşağında yer alması ve izolatörlerin deprem anında hasarsızlığı garanti etmesi, bu teknolojinin gelecekte daha geniş bir kullanıma ve daha uygun maliyetlerle konutlar ve okullar gibi yapı projelerinde de tercih edilmesi beklentisini ortaya çıkmaktadır.

1.2 Sismik Yalıtım Uygulamalarındaki Sınırlamalar

Rezonans olgusunu engellemek, sismik izolasyonun kullanılmasının önemli bir avantajıdır. Bununla birlikte, bazı yapı sistemleri için bu avantaj dezavantaj haline gelebilmektedir. Yapıların periyodunu, özellikle yumuşak zeminin artırdığı bilinmektedir. Sismik izolasyon sistemlerinin amaçlarından biri yapı periyodunu uzatmaktır. Bu nedenle, yumuşak zemin grupları bu sistemleri kullanmak için uygun değildir. Sonuç olarak, sismik izolasyonlu bir yapı tasarımına geçilmeden önce zemin özelliklerinin belirlenmesi önemlidir (Sevim 2016).

Sismik izolasyon, özellikle kısa periyotlu yapılar için daha uygun bir çözümdür. On kat veya daha az katlı betonarme binalar, beş kat veya daha az katlı çelik yapılar ve düşük rijitliğe sahip diğer yapı tipleri, sismik izolasyon için ideal adaylardır. Ayrıca, yapı formu ve karakteristiği, sismik izolasyon tasarımında önemli bir etkiye sahiptir.

Sismik izolasyon tasarımında rüzgar gibi yanal ikincil yüklerin dikkate alınması gerekir. Bu yükler kontrollü bir şekilde sınırlandırılmalıdır. İkincil yüklerin etkisini incelerken yapının etkin fay hatlarına olan uzaklığı da dikkate alınmalıdır.

Sismik izolasyona tabi tutulan binalar, deprem etkisinde önemli yanal yer değiştirmeler yaşayabilir. Bu yer değiştirme tipik olarak izolatör katında gerçekleşir. Rijit kütle hareketini güvenli bir şekilde gerçekleştirmek için yapı, komşu yapılarla uygun bir salınım mesafesine sahip olmalıdır. Komşu yapılar arasındaki salınım mesafesini hesaplarken, çevrenin depremselliği de hesaba katılmalıdır (Jangid ve Kelly 2001).

1.3 Sismik İzolatör

Sismik izolatörler, binanın depreme dayanma kapasitesini artırmak yerine, depremin binadan talebini azaltma ilkesine dayanan bir depreme dayanıklı yapı tasarımı

yaklaşımını benimser. Bu sistem, deprem etkilerini absorbe ederek binanın daha esnek ve adaptif bir şekilde tepki vermesini sağlar, bu da yapısal zararı en aza indirmeye yönelik bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Taşıyıcı sistemin doğal periyodu, yapı kütlesi, yanal rijitlik ve sönümlenme gibi faktörlere bağlıdır. Bu, yapının depreme karşı tepkilerini belirlemede önemli bir özelliktir. Bu parametreler, yüklerden bağımsız olarak yapının doğal özelliklerini oluşturur. Bu özelliklere dayalı olarak hesaplanan periyota "doğal periyot" ismi verilmektedir (Atımtay 2001).

Sismik izolatör kullanıldığında, yapı daha esnek davranır ve periyodu arttıkça daha fazla yer değiştirme talebi oluşur. Bununla birlikte, sismik izolatörlerin temel işlevi, yapıya iletmeksizin kendi içlerinde önemli deformasyonlar oluşturarak bu talebi karşılayacaktır (Symans, Cofer ve Fridley 2002).

Sismik izolatörler genellikle yapı ile temel arasına konumlandırıldığı için "taban izolasyonu" olarak adlandırılır. Ancak, bu izolatörler sadece temel alanında değil, aynı zamanda binaların diğer bölgelerinde, özellikle katlar ve çatılar gibi temellerin dışındaki bölgelerde de kullanılır. Bu nedenle, genel olarak "sismik izolasyon" terimi, bu teknolojinin yapı içindeki çeşitli bölgelerde kullanımını daha kapsamlı bir şekilde ifade etmektedir.

Sismik izolatörlerin enerjiyi sönümleyici bir cihaz olarak kullanarak deprem enerjisini absorbe etmesi, onların önemli bir diğer işlevidir. İzolatör sistemlerinde tipik olarak iki tür sönüm bulunmaktadır.

- Histeretik sönüm (yer değiştirmeye bağlı sönüm)
- Viskoz sönüm (hıza bağlı sönüm)

Yapının doğal periyodunun artması, yer değiştirmede artışa ve ivmede azalmaya neden olurken, sönümün artması hem yer değiştirmede hem de ivmede azalmaya neden olmaktadır (Symans, Cofer ve Fridley 2002).

Sismik izolatör sisteminin rijitliği, rötre, sünme, yerçekimi, rüzgâr ve sıcaklık etkileri gibi kullanım yükleri altında yapı stabilitesini sağlamak için gereklidir.

İdeal bir sismik izolatör sisteminin üç temel görevi vardır:

- Yatayda düşük rijitlik
- Düşeyde yüksek rijitlik
- Esneklik

Zemin izolasyonu, binaların ve deprem kaynaklı yer hareketlerinin özelliklerini göz önünde bulundurarak, yapıların rijitliğini düşürerek periyotlarını uzatmayı, sönümlemeyi artırarak daha küçük deprem yüklerinin etkisini azaltmayı ve orta ila yüksek şiddetli depremlerde meydana gelebilecek hasarı en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Sismik taban izolatörleri, yapıyı iki parçaya ayırarak, üst yapıya daha düşük dinamik yük iletilmesini sağlayarak bu izolatörlerde kullanılan malzeme, yatay yönde esneklik gösterirken aynı zamanda düşey yönde rijitlik ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, doğal titreşim birinci moda ait deformasyonları izolatörler üzerinde tutar. Bu izolatörlerin birinci moda ve yer hareketine dik olmaları, diğer titreşim modlarının üst yapıya sismik enerji iletilmesini engeller ve bu sayede üst yapı neredeyse rijit bir davranış sergilemektedir (Mishra ve Singh 2022).

1.4 Sismik İzolasyonun Avantajları

Sismik izolatörler, yapıların deprem sırasında daha güvenli olmasını sağlayan ve yapıya esneklik kazandıran önemli bir teknolojidir. Uygulama kolaylığı açısından, sismik izolatörlerin kullanımı çeşitli avantajlar sunarak ilk olarak, bu sistemler genellikle mevcut yapıların altına kolayca yerleştirilebilir. Yani, mevcut bir binanın altına veya üzerine eklenerek uygulanabilirler, bu da büyük ölçüde yeniden yapılandırma veya yıkım gerektirmeden deprem güvenliği sağlamayı mümkün kılmaktadır.

Sismik izolatörlerin montajı ve entegrasyonu, mühendislik hesaplamaları ve planlaması yapıldıktan sonra nispeten hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu durum, yapı sahipleri ve inşaat ekipleri için zaman ve maliyet tasarrufu sağlayarak ayrıca, sismik izolatörler

genellikle düşük bakım gerektirirler ve uzun ömürlü malzemelerden yapıldıkları için uzun vadeli kullanım sağlamaktadır.

Uygulama sırasında dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, izolatörlerin doğru şekilde seçilmesi ve yerleştirilmesidir. Her yapının deprem riski ve yapısal özellikleri farklı olduğundan, sismik izolatörlerin uygulama sürecinde bu faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Uzman mühendislik değerlendirmeleri ve detaylı planlama, izolatörlerin etkin ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, sismik izolatörlerin uygulama kolaylığı, yapıların deprem güvenliğini artırmak için esnek, ekonomik ve etkili bir çözüm sunarak doğru şekilde planlandığında ve kurulduğunda, bu teknoloji binaların ve altyapıların deprem riskine karşı daha dirençli olmasını sağlar ve yaşam alanlarının güvenliğini önemli ölçüde artıracaktır.

1.4.1 Yapısal Avantajları ve Dezavantajları

Sismik izolatörün belirgin avantajlarından biri, yapıya doğal periyodu artırarak, rezonans etkilerinden kaçınmaya yönelik bir koruma sağlamasıdır. Daha önce bahsedilen esnek yapıların deprem etkilerinde küçük ivmelerle büyük yer değiştirmelere maruz kalması ve rijit yapıların ise küçük yer değiştirmelerle büyük ivmelere maruz kalması durumu, sismik izolatörün sunduğu çözümle optimize edilebilir. Bu izolatör sayesinde, yapıda ivmeler önemli ölçüde azalırken, aynı zamanda kat göreceli ötelemelerin de azalması sağlanır. Rijitliğin izolatöre göre daha büyük olması, yapıda daha esnek bir davranış sergilenmesine imkân tanımaktadır. Bu durum, kat göreceli ötelemelerin azalmasına ve dolayısıyla yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda hasarın minimum seviyeye indirilmesine, hatta engellenmesine olanak sağlamaktadır. İvmelerdeki azalma özellikle hassas veya değerli içeriğe sahip yapılar için büyük önem taşır. Bu sayede, deprem etkisi altındaki yapıda oluşabilecek potansiyel hasar önemli ölçüde azaltılır, yapısal bütünlük korunur ve içerideki değerli içeriklere zarar gelme riski en aza indirilmiş olacaktır. Sismik izolatörler, yapıların depreme karşı dayanıklılığını artırarak, güvenliğini maksimum düzeye çıkaran etkili bir çözüm sunacaktır (Symans, Cofer ve Fridley 2002).

Sismik izolatörlerin uygun şekilde yerleştirilmesi, yatayda düzensiz yapıların maruz kalabileceği burulma etkilerini azaltabilir. Bu nedenle, tesisin rijitlik merkezi, tesisin kütle merkezine daha yakın bir yere yerleştirilebilir. Bu durum, mimarlar için tasarım aşamasında çok daha esnek ve kolay olmaktadır. Sismik izolatörlerin avantajlarından biri de yapıların sönüm yeteneğini artırmasıdır. Geleneksel tasarım yöntemlerinde enerji sönümlenme genellikle yapı taşıyıcı elemanlarının elastik olmayan deformasyonlarına dayanmaktadır. Ancak, sismik izolatörlerin kullanıldığı yapılar, sönümlenme işlevini tamamen izolatörlerin bulunduğu seviyede toplar. Bu durum, tasarım aşamasında ve performans izlemede büyük kolaylık sağlar. Enerji sönümlenme görevi, doğrudan yapıların esnek davranışına bağlı olmadığı için yapıların esneklik ihtiyacı azalır. Sismik izolatörler, enerji sönümlenme mekanizmasını etkili bir şekilde yönetir ve bu, yapıların deprem etkilerine karşı direncini artırır. Sismik izolatörler aynı zamanda güçlendirme işlemleri sırasında da avantajlar sunar. Güçlendirme sürecinde yapıda büyük değişiklikler yapma zorunluluğu olmadığı gibi, yapıdaki işlev kayıpları da minimize edilecektir. Bu özellikle tarihi yapıların güçlendirilmesinde önemli bir avantajdır, çünkü orijinal niteliklerin korunmasına izin verir ve yapıyı modern standartlara uyarlamak için etkili bir seçenek sunmaktadır (Komodromos 2000).

Bir projede sismik izolatörleri alternatif olarak düşünmek, genellikle ilk akla gelen konulardan biri maliyettir. Ancak, bu sorunun yanıtı her zaman basit değildir. Maliyet değerlendirmesi yapılırken, sadece doğrudan maliyetler değil, aynı zamanda dolaylı maliyetler ve doğrudan-dolaylı ekonomik getiriler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Her projenin benzersiz özelliklere sahip olması nedeniyle genelleme yapmak zordur. Sismik izolatörlerin kullanımının fizibil olup olmadığı, projenin spesifik gereksinimleri ve koşullarıyla yakından ilişkilidir. İzolatörlerin entegrasyonu her zaman ek maliyet getirecek olup, ancak sismik izolatörlerin uygulandığı yapılar, deprem etkilerine karşı direnç gösterirken taşıyıcı sistem maliyetlerini azaltabilir. Karar aşamasında, bu artan ve azalan maliyetler dikkatlice incelenmelidir. İzolatör kullanımının doğrudan maliyet artışlarına rağmen, yapıdaki deprem kuvvetlerinin büyük ölçüde azalması, taşıyıcı sistem maliyetlerinde bir azalmaya yol açacaktır (Symans, Cofer ve Fridley 2002).

Dolaylı maliyetlerin en kritik olanı, potansiyel hasarın maliyetidir. Finans uzmanları tarafından "Olası Maksimum Kayıp" (PML – Probable Maximum Loss) olarak adlandırılan bu maliyet, depremin düşük olasılıklı ancak büyük zarar potansiyeli taşıyan bir olay olasılığına göre hesaplanmaktadır. Bu hesaplama sürecinde olasılık parametreleri dikkate alınır. Özellikle tarihi veya yüksek kullanım değerine sahip yapılar ile depremde zarar görebilecek değerli materyaller içeren yapılar, hasar maliyetlerindeki potansiyel azalmadan önemli ölçüde fayda sağlayabilir. Sismik izolatörlerin kullanımı, bu tür yapıların olası hasar maliyetlerindeki azalma ile birlikte ekonomik açıdan daha avantajlı hale gelmesine katkıda bulunmaktadır (Cimilli ve Tezcan 2002, Çağlar 2002).

Geleneksel tasarım perspektifine göre tüm inşaat standartlarına ve sismik gerekliliklere uyulsa bile, yapısal olmayan elemanlarda genellikle önlenemeyen büyük hasarlar ortaya çıkabilir ve diğer elemanlarda çatlaklar ile önemli yer değiştirmeler meydana gelebilir. Ancak, sismik izolatörlerin kullanıldığı bir tasarım anlayışında, eğilme deformasyonları, görelî kat ötelemeleri, çatlaklar ve plastik deformasyonlar önceden engellenir. Bu yaklaşım, hem yapısal hem de yapısal olmayan elemanlardaki hasarı önemli ölçüde azaltabilir. Bu yöntem, büyük ölçekli bir depremin ardından bile yapının hemen çalışmasını sağlamaktadır (Symans, Cofer ve Fridley 2002).

Geleneksel tasarım anlayışına göre inşa edilmiş bir yapı, detayların karmaşıklığından dolayı inşa süresinin uzamasına ve beraberinde artan maliyetlere neden olabilir. Dahası, bu yaklaşımın getirebileceği en önemli sorunlardan biri, işlevsellik üzerinde ciddi kısıtlamalara yol açma ihtimalidir. Bu durumda, projenin amaçlarına uygun olarak gerekli esnekliği sağlamak zor olabilir. Sismik izolatörlerin kullanıldığı bir yapı, rijit bir kütle gibi davrandığı için proje ve detaylandırmada büyük kolaylık sağlar. Bu sayede, karmaşık detayların ortaya çıkardığı zorluklar minimize edilir ve basit matematik modelleri bile yapının davranışını anlamak ve optimize etmek için yeterli olmaktadır (Cimilli ve Tezcan 2002).

Yapının beklenen davranışından sapması, çeşitli etmenlere bağlı olabilir. Yer hareketi özellikleri, zemin koşulları, malzeme özellikleri, işçilik ve matematik modellerin tutarlılığı gibi birçok faktör, yapı davranışındaki değişikliklere neden olabilir. Ancak

sismik izolatörlerin kullanımı, yapının sismik davranışını önemli ölçüde iyileştirerek, bu faktörlerden kaynaklanan olası sapsmalara karşı direncini artırır. Bu sayede, yapı daha yüksek güvenlik seviyelerine erişir ve ideal tasarım özelliklerinden sapsmalara karşı daha az duyarlı hale gelmektedir (Symans, Cofer ve Fridley 2002).

Sismik izolatörlerin kullanılması, yapıdaki titreşim doğal periyodunu genellikle uzun periyot bölgesine yönlendirir. Genellikle kısa periyot bölgesinde bulunan yapısal olmayan unsurların, bu durumda yükseltilmiş bir etkiyle karşılaşmamaları sağlanır, bu da bu unsurların güvenliğini artırmaktadır. Aynı zamanda, değerli eşyalar, cihazlar ve depremde tehlike oluşturabilecek parçaların güvenliğini artırmaktadır (Symans, Cofer ve Fridley 2002).

Sismik izolatörlerin çoğu zaman büyük avantajları olmasına rağmen, bazı durumlarda beklenen veya beklenmeyen negatif etkiler de gözlemlenebilmektedir. Özellikle yakın merkezli depremlerle ilgili çalışmalar, sismik izolatörlü binaların bu tür durumlarda negatif etkiler gösterebileceğini göstermektedir. Yakın saha depremlerine karşı sismik izolatörlü binaların tepkileri incelendiğinde, kabul edilen hız spektrumlarının gerçekleşen olaylarla önemli farklılıklar gösterdiği ortaya konmuştur. Bu çalışmalar sırasında, yakın merkezli depremlere karşı en üstün performansı sergileyen sistem olarak Elektrik Sistemi öne çıkmıştır. Yakın merkezli faylardan kaynaklanan depremlerde hakim periyotlar son derece yüksek olabilir. Ayrıca, zemin özellikleri ve topografya depremlerin niteliğini etkileyebilir. Sismik izolatörlü bir yapının uzun periyotlu olmasının, rezonans durumuna yaklaşan hareketleri gösterme olasılığını artırabileceğini gösteren araştırmalar bulunmaktadır. Cenk Alkan ve Seda Öncü Davas (2016) tarafından yürütülen çalışmada, taban izolatörü ve çeşitli izolatör türlerinin kullanıldığı yapılar, farklı derinliklerdeki merkezlerden incelenmiştir.

Diğer taraftan, son araştırmalarda, deprem sırasında ek mekanizmalar kullanılmadan deprem izolatörlerin benzeri bir davranış sergileyebilen, daha teorik aşamada olan yeni bir düzen üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar, esin kaynağı olarak eski Japon pagodalarını kullanmaktadır. Pagodalar, uzun yıllar boyunca birçok deprem ve tayfun gibi doğal afetlere karşı direnç göstermeyi başaran, son derece yüksek hareket kabiliyetine sahip yapılar olarak bilinirler. Bu nedenle, pagodaların mimarisinden

esinlenerek tasarlanan yapılar, deprem izolatörlü sistemler gibi ek mekanizmalar kullanmaksızın benzer bir dayanıklılık sergileme potansiyeline sahip olmaktadır (Freddi, vd).

Bu inovatif yöntemde, bina düşük deprem yüklerine karşı direnç gösterirken, daha büyük depremlerde salınma hareketi gerçekleştirir ve ardından kendi ağırlığı ve bir yay yardımıyla merkezi konumuna geri dönmektedir. Bununla birlikte, yapı doğrusal bir hareket sergilemediği için, büyük periyotlu depremlerde bile rezonans benzeri durumlara girmeyi engellemektedir (Cheng ve Chao 2017).

1.5 Sismik İzolatör Türleri

Günümüzde, birçok farklı yapının sismik izolatörlerle donatıldığı ve bu uygulamaların devam ettiği gözlemlenmektedir. Bu yapıların izolatör sistemleri genellikle iki temel kategoride yer alır: elastomerik izolatörler ve kayıcı izolatörler. Her iki izolatör sistemi türünden beklenen özellikler, uygulama alanlarına göre değişebilse de, genel olarak aşağıda sıralanan özellikleri içermektedir;

- Yumuşak zeminler hariç, yapısal periyodu ve spektral talepleri artırmak için yeterli yatay süneklik,
- Yer değiştirmeleri izolatör elemanları tarafından uygulanabilir bir seviyede tutmak için yeterli enerji dağıtma kapasitesi,
- Deformasyon sonrasında kendi kendine merkezleme kapasitesi, ve
- Genel hizmet yükü altında yeterli düşey rijitlik, gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir.

1.5.1 Elastomerik İzolatörler

Elastomer esaslı izolatörlerin elastomer kısımları doğal kauçuktan üretilir. Tercih edilme sebeplerinin başında ise istenilen şekle girebilmeleri gelir. Metallerle uyumlulukları iyidir ve bu özellikleri sayesinde uygulamada temele montajları kolaylaşır. Kauçuk tabakaların yüksekliğinin dört katına kadar deformasyon yapabilen elastomer izolatörler düşeyde yüksek rijitliğe sahipken yatayda ise çok düşük rijitliğe sahiptirler (Özdemir 2010).

Çelik ve kauçuk plakalar birbirini izleyen katmanlara yerleştirilir ve elastomerik lamine kauçuk izolatör yatakları oluşturur. Bu iç takviye çelik plakaların adı "şim"dir. Çelik şimler, özellikle eksenel yükler karşısında kauçuğun yanal şişkinliğini azaltır ve düşey rijitliğini artırmaktadır (Calvi ve Calvi 2018). Kauçuk, bu tür sismik izolatörlerde yatayda süneklik sağlayarak. Bu izolatörlerde kullanılan elastomerler genellikle doğal kauçuktan üretilmektedir.

Uygulamada en yaygın olarak kullanılan elastomerik izolatörler genellikle üç ana türde sınıflandırılır. Bunlar;

- Düşük Sönümlü Kauçuk Yatak (LDRB)
- Yüksek Sönümlü Kauçuk Yatak (HDRB) ve
- Kurşun Dolgulu Kauçuk Yatak (Düşük Sönümlü Kauçuk Yatak + Kurşun Dolgu) (LRB) olarak ifade edilmektedir.



a) Kurşun kauçuk rulman

b) Yüksek sönümlü kauçuk rulman

Resim 1.1 İzolatör içyapısı.

Yatay yönde doğrusal bir davranış sergileyen kurşun çekirdekli izolatörler, %100 ve üzeri kesme gerilmeleri için uygundur. Bu izolatörlerin sönümlleme oranı tipik olarak %2-3 arasındadır. Bu tür izolatörler, basit üretim ve kolay modelleme avantajlarına ek olarak, yükleme hızına, yükleme geçmişine, sıcaklığa ve yaşlanmaya karşı son derece duyarlıdır. Bununla birlikte, ek bir sönümlleme sistemi gerektirirler.

Kurşun kauçuk yatak, kurşun çekirdekli kauçuk yatak veya LNR olarak bilinir ve yüksek sönümlü kauçuk yataklara benzer bir yapıya sahiptir. Bu yatak, sismik izolasyonun önemli bir parçasıdır ve lamine kauçuk ile kurşun çekirdekten oluşur.

Kurşun çekirdek, sadece ağır yükleri ve yatay kuvvetleri taşımakla kalmaz, aynı zamanda histerezis sönümlemesiyle enerjiyi emer.

Yüksek sönümlmeli kauçuk yatak, herhangi bir kurşun tapa olmadan çelik katmanlarıyla bir araya getirilmiş, iyi bir sönümleme özelliğine sahip özel kauçuktan oluşur. Yüksek sönümlmeli kauçuk izolatörlerinde doğrusal maksimum kayma gerilimi %200 ila 350 arasındadır. Ekstra ince karbon siyahı, yağlar, reçineler ve diğer dolgu maddeleri, sönümleme özelliklerini geliştirmiştir. %100 kayma gerilimlerinde, bu izolatörlerin sönüm oranı 10–20 bant genişliğindedir ve kayma modülü 0.35-1.38 MPa arasında değişmektedir.

Temas basıncı, yükleme hızı, kullanım geçmişi ve sıcaklık, yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerin etkili rijitlik ve sönüm özelliklerini etkiler. Yüksek sönümlü kauçuk yatakların dinamik özellikleri, yükleme koşullarından önemli ölçüde etkilenir. Örneğin, yüksek sönümlü kauçuk yatakların yüksek yük/boşaltma döngülerine maruz kalması durumunda, başlangıçta kararlı olan davranış, döngü sayısı arttıkça rijitlik ve sönümde bir azalmaya neden olabilir. Bu durum, başlangıçtaki davranışların zaman içinde nasıl değiştiğini ve ilk döngüler ile son döngüler arasındaki farklılıklar bu durumda vurgulanır. Ancak zaman içinde (saatler veya günler içinde), eski yatak özelliklerinin kısmen veya tamamen yeniden kazanılması mümkündür (Calvi ve Calvi 2018).

Düşük sönümlü kauçuğun merkezi bir kurşun çekirdeği, LRB tipi izolatörlerin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Bu izolatörlerin kayma modülü, tam kayma gerilmesinde 0,55 ila 0.69 MPa arasında değişebilir. Maksimum kayma gerilimi %125 ile 200 arasında değişir; HDRB ile arasındaki fark tipik olarak %200'den az olduğu için önemli değildir.

Katı bir kurşun silindir, elastomerik bir malzemenin merkezine preslenir. Kurşun akma dayanımı 1500 MPa'dır. Kurşun dolgusu, sisteme daha yüksek başlangıç rijitliği sağlar, bu da rüzgar yükünü azaltır ve enerji dağıtımını artırır. Kurşun eridikten sonra, sistem döngüsel olarak enerjiyi dağıtmaya ve hareket etmeye başlar. Yine de, sürekli döngüler nedeniyle artan sıcaklıklar izolatörün işlevselliğini azaltabilir. Bu durumda, kurşun

normal sıcaklıklarda yeniden kristalleşmesi nedeniyle yorulması sorun değildir. Yer değiştirme, histerik çevrimin önemli bir bileşenidir (Calvi ve Calvi 2018).

Bu özelliklere ek olarak, kauçuk izolatörler genellikle "tek kombinasyon" ve "ayrı kombinasyon" olarak adlandırılan iki kategoriye ayrılabilir: elastomerik yataklar ve sönümleyiciler. Tek bir izolatör ünitesi, yatay süneklik ve enerji dağıtımı gibi iki görevi aynı anda gerçekleştirebilir. Kurşun-kauçuk yataklar (LRB'ler), doğal kauçuk yatağını merkezi bir kurşun dolguyla birleştirir ve bu kategorinin tipik bir örneğidir. Kurşun dolgu, LRB izolatörlerin sistemde %20-30 arasında etkili sönüm sağlamaktadır.

Elastomerik yataklar, farklı bölümlerde farklı sönümleyicilerle desteklenir. Bu durumda kullanılan sönümleyiciler, sünek veya histeretik sönümleyiciler veya viskoz malzemelerden (viskoz sıvılar, silikon vb.) yapılmış sönümleyiciler olabilir (Iwan ve Gates 1979). Yüksek sönümlü kauçuk yatak (HDRB), tipik olarak %10 ila 20 arasında etkili sönümleme gösteren özel bir bileşik kauçuktan yapılır. HDRB'lerin dinamik özellikleri, her tasarım firmasının kullandığı bileşenler nedeniyle çok farklı olabilir. Bununla birlikte, bu sönümleyicilerin ortak bir özelliği, istenen yüksek sönümleme kapasiteleridir. Kurşun dolgusu olmadan, LRB ve HDRB izolatörleri oldukça benzerdir. Düşük sönümlü kauçuk izolatörler (LDRB'ler) genellikle ilave sönüm cihazlarıyla birleştirilir ve bu, ayrı bir kombinasyonun örneğidir. Histeretik çevrimler, bu üç elastomerik izolatörün en belirgin özelliklerinden birisi olacaktır (Calvi ve Calvi 2018).

Elastomerik yatakların histeretik davranışını belirlemek için sabit eksenel yük ve sinüzoidal yanal yük üzerinde deneysel testler yapılabilir. Kauçuk yatakların düşük sönümleme özelliği, önemli miktarda enerjiyi dağıtamadıkları için dar histerezis döngüsü oluşturacaktır.

Yüksek sönümlü ve kurşun dolgulu kauçuk yatakların enerji dağıtma yetenekleri, geniş histerezis döngüleri oluşturduğu için dikkat çekicidir. Bu özellik, mekanik enerjinin emilip dağıtılmasına katkı sağlayacaktır. Özellikle yüksek sönümlü kauçuk yataklar, titreşim ve şoklara karşı etkili bir şekilde tepki verme kabiliyetine sahiptir (Calvi ve Calvi 2018).

Elastomer esaslı izolatörlerin tasarım ve projelendirme aşamalarında özellikle kayma modülleri, enerji sönümleme kapasiteleri ve zamana bağlı mekanik özelliklerinin olabildiğince az değişmesi beklenir. Uygulama da kolon tabanına, kolon ortasına veya kat aralarına yerleştirilebilmektedir. Güçlendirme projelerinde ise kolon ve temel arasına rijit bir platform oluşturulup kullanılabilirler (Losanno vd. 2020).

1.5.2 Kayıcı İzolatörler

Kesme kuvvetinin izole edilmiş yapıya aktarımını azaltmak için düşük sürtünmeli ara yüzler kullanan popüler sürtünme veya kayma sistemleri şunlardır:

- Teflon ve cilalı paslanmaz çelikten şekillendirilmiş düz kayıcı sistemler (FS),
- Electricite de France Sistemi (EDF),
- Esnek Sürtünme Taban İzolatörü (R-FBI) ve
- Sürtünme Sarkaç Sistemleri (FPS).

EDF sistemi, neopren yataklarla bağlanır. İzolatör sisteminin homojen olmayan yerleşimi nedeniyle izolatör yapısı aşağı doğru kayabilir. R-FBI'lar, merkezinde bir kauçuk çekirdek bulunan sistemlerdir ve bu tür sistemlerde sorunlar meydana gelebilir, özellikle teflon katmanlarında. R-FBI'nın ortasına bir çelik çubuk yerleştirilirse, tüm teflon katmanlarının aynı kayma seviyesiyle hareket etmesi mümkündür. Bununla birlikte, özellikle büyük bir depremden sonra yapının ilk konumuna dönememe sorunu ortaya çıkabilir (Calvi ve Calvi 2018).

Bu sistemler, sürtünme, kayma ve izolasyonu kullanır. Sürtünme taban izolatör sistemleri, çoğu sürtünme sistemine kıyasla, izole edilmiş yapının doğal frekansından veya depremin frekans içeriğinden etkilenmeyen bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, sürtünmeli taban izolatör sistemleri geniş frekans giriş aralığı için etkilidir. Sistemin hareketi veya kayması, sürtünme katsayısı aracılığıyla belirlenir. Ancak, sürtünme sisteminin bir dezavantajı, yapıyı orijinal konumuna geri getirememesidir. Büyük bir depremden sonra sistemin kayan parçaları arasında sürekli bir kayma olması muhtemeldir.

Sürtünmeli taban izolatörleri, zemindeki titreşim ve sarsıntıları absorbe etmek ve binaları korumak için kullanılan etkili bir mühendislik çözümüdür. Ancak, bu

sistemlerin bazı sınırlamaları vardır. Özellikle, sürtünmeli yüzeyler arasındaki kayma, yapıyı tam olarak eski konumuna yerleştiremeyebilir. Bu dezavantaj, büyük çaplı depremlerde kayan parçalar arasında sürekli bir kaymanın gerçekleşmesi ihtimalini içerir. Bu durum, yapısal hasarı en aza indirmek için tasarlanmış olmasına rağmen, yapıyı tamamen eski konumuna getirememe riskini içermektedir. Bu nedenle, tasarım aşamasında bu sınırlamaların dikkate alınması önemlidir (Calvi ve Calvi 2018)



Resim 1.2 Kayıcı izolatör

Kalıcı kayma veya artık yer değiştirmeler sorununu çözmek için, kayan yüzeyin küresel bir şekil aldığı FPS (Friction Pendulum System) kullanılabilir. R yarıçaplı bir daire, küresel kayan yüzeyin geometrisi gösterilmektedir. Yatak kayma yüzeyinin "eğrilik yarıçapı" bu yarıçaptır. Bir daire bir kesikli çizgi veya düşey eksen üzerinde döndürülürse, bir küresel yüzey oluşarak yatağın kayma yüzeyi bu yüzeyin bir parçası küresel bir kayan yüzey için, eğrilik yarıçapı "R" sabit olduğundan, yatak doğrusal bir geri yükleme kuvveti gösterir. Bu nedenle, "W/R" oranı, sabit yerçekimi yükünün "W" altında olduğunda rijitliğin eşit olduğu anlamına gelmektedir (Zayas ve Mahin 1987).

FPS, içbükey plakalar, mafsallı kaydırıcı, yatak malzemesi ve paslanmaz çelik kaplamadan oluşan temel bileşenlere sahiptir. Bu bileşenlerin bir araya gelmesi, yapısal izolasyon sağlamak için tasarlanmış bir sistem oluşturur. Yanal yer değiştirmenin karesi

ile yanal yer değiştirmenin elastik hareketi yaklaşık olarak orantılı ve eğrilik yarıçapı ile ters orantılı hız ve sürtünme, düşeyin doğrusal olmayan hareketini etkilemektedir (Calvi 2018).

Yatak yanal kuvvetinin iki ana bileşeni vardır. Yapı kütesinin kayan yüzey boyunca yükselmesiyle oluşan geri yükleme kuvveti ilk olarak ortaya çıkar. Kayan ara yüzeydeki sürtünme nedeniyle oluşan sürtünme kuvveti ikinci bileşendir. Ara yüzün sürtünme tepkisi, temas basıncı, kayma hızı, sürgü çapı ve sıcaklıktan etkilenir. Yapı, geri yükleme kuvveti ile rijitleştirilir, ancak sürtünme kuvveti enerji kaybına neden olacaktır. Yatağın genel histerezis döngüsünü oluşturmak için bu iki ana bileşenin histerezis döngüleri birleştirilmektedir.

Kalıcı deplasmanları ve burulma davranışını genel olarak engellemenin yanı sıra, FPS'nin birçok ek avantajı vardır. Bu faydalar arasında nispeten düşük inşaat maliyeti, düşük kurulum yüksekliği gereksinimi, yüksek düşey rijitlik, kanıtlanmış dayanıklılık sıcaklığı ve korozyona karşı direnç bulunmaktadır. Ek olarak, kütle merkezinin kayma merkezi ile çakışması nedeniyle burulma etkilerinin azalması mümkündür. Bu nedenle, FPS, sismik izolatör sistemlerinde kullanılan en yaygın sürtünme sistemlerinden biridir. Tüm bu faydalar göz önüne alındığında, FPS izolatörleri tercih edilmiştir (Calvi 2018).

1.5.3 Mekanik İzolatörler

Mekanik izolatörler, yapıların depreme karşı korunmasında önemli bir rol oynayan sismik izolasyon sistemleridir. Bu izolatörler, çeşitli mekanik bileşenler kullanarak yapının sismik enerjiyi sönümlemesini ve dağıtmasını sağlar. Mekanik izolatörler genellikle çelik yaylar, spiral yaylar, sönümleyiciler ve diğer mekanik elemanlardan oluşmaktadır. Bu izolatörler, depremin oluşturduğu yatay ve dikey hareketleri kontrol ederek yapının deformasyonunu azaltır ve yapısal hasar riskini minimize etmektedir.

Çelik yaylı izolatörler, deprem sırasında enerjiyi elastik deformasyon yoluyla sönümlerken, sönümleyiciler (damperler) enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapının hareketini kontrol etmektedir. Mekanik izolatörler, yüksek dayanıklılık ve uzun ömürleri nedeniyle büyük binalar, köprüler ve endüstriyel yapılar gibi kritik altyapılarda

yaygın olarak kullanılmaktadır (Constantinou ve Symans 1992).

Elastomerik ve kayıcı izolatörler, sismik izolatör sistemlerinde kullanılan iki ana tiptir ve her birinin kendine özgü özellikleri, avantajları ve kullanım alanları vardır. Elastomerik izolatörler, genellikle doğal veya sentetik kauçuktan yapılmış elastomer tabakalarının çelik plakalarla sandviç yapıldığı bileşenlerdir. Bu tabakalar, dikey yükleri taşıırken yatay hareketlere izin verecektir. İçerdikleri kurşun çekirdek veya diğer sönümleyici malzemeler, enerjiyi yayarak sismik etkileri azalmaktadır. Elastomerik izolatörler, yatay yönlerde esneyerek yapının hareketini izolatör seviyesinde sınırlayarak sismik enerjiyi dağıtır ve yüksek sönümleme kapasitesi sayesinde titreşimleri ve yapı üzerindeki basıncı azalmaktadır.

Uzun ömürlü olmaları ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle avantajlıdır, ancak büyük yer değiştirmeler gerektiren durumlarda yeterince esnek olmayabilir ve bazı durumlarda, üretim ve kurulum maliyetleri yüksek olabilir. Bu izolatörler, depreme dayanıklı binalar, köprüler ve kritik altyapı tesisleri gibi yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Diğer taraftan, kayıcı izolatörler genellikle paslanmaz çelik yüzeylerin PTFE (politetrafloroetilen) veya diğer düşük sürtünmeli malzemelerle kaplandığı sistemlerdir. Bu izolatörlerde, hareketli ve sabit kısımlar arasında kayma yüzeyleri bulunur. Depremi yaratmış olduğu yatay hareketleri sürtünme kuvvetleri sayesinde sönümler ve yatay hareketin kontrollü bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır, böylece yapının sismik yüklerden korunmasını sağlar. Kayıcı izolatörler, yüksek yatay yer değiştirmeler gerektiren durumlarda etkin çözüm sunar ve yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olmaktadır.

Yüksek dayanıklılık ve uzun ömür sunarlar ancak düşük sıcaklıklarda performans düşebilir ve sürtünme yüzeylerinin zamanla aşınması nedeniyle düzenli bakım ve kontrol gerektirmektedir. Bu izolatörler, depreme dayanıklı yapılar, köprüler ve yüksek binalar gibi geniş yer değiştirme gerektiren yapılar için uygundur. Elastomerik izolatörler genellikle enerji sönümleme ve düşük bakım gereksinimi ile öne çıkarken,

kayıcı izolatörler yüksek yer değiştirme kapasitesi ve dayanıklılığı ile dikkat çeker seçim, projenin özel gereksinimleri ve yerel sismik tehlike seviyelerine bağlı olarak yapılmaktadır.

1.6 Sismik İzolasyonların Deprem Davranışına Etkileri

Yapıya sismik izolatör sistemleri dahil edildiğinde, yapı deprem anında dinamik davranışını değiştirir. Sismik izolatörlü sistemler, zemin üzerindeki yüksek frekanslı titreşimleri düşük frekanslı titreşimlere çevirerek üst yapıya aktarır. Salınlı sismik izolatörlü yapıların hakim modlarında, özellikle ilk üç mod'da, tüm deplasman izolatör seviyesinde gerçekleşir ve üst yapı esnek bir kütle hareketi gösterir. Sismik izolatörler deprem sırasında depremin enerjisini yutmaktadır.

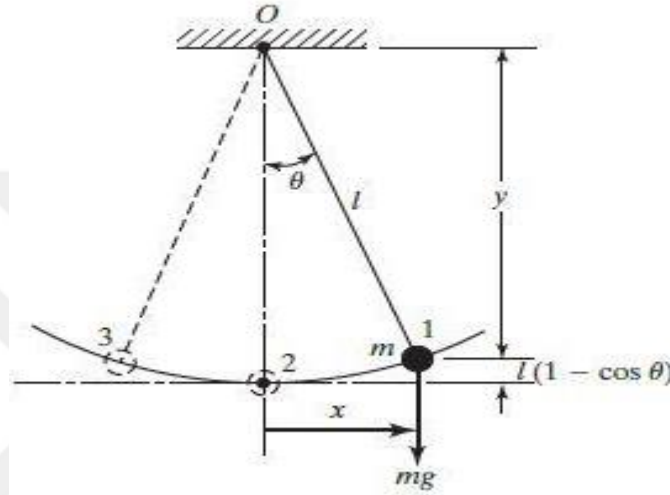
Betonarme binalarda sismik izolatör kullanıldığında, yapının periyodu uzatılır ve daha düşük deprem ivmelerinin olduğu aralıktan uzaklaştırılır. Bu sayede rezonans olasılığı önemli ölçüde azalır. Üst katlara iletilen sismik yüklerin azalması, betonarme taşıyıcı elemanlara etki eden iç kuvvetleri azaltır. Ayrıca, can güvenliği kritik olan yapılarda, mekanik ve elektrik donanımları korumak adına ek sönümleyici sistemler entegre edilebilir.

Sismik izolatörlü sistemler, yüksek can güvenliği sağlamalarının yanı sıra, ulaşım yapıları gibi çeşitli alanlarda da etkili bir kullanım sunmaktadır. Sismik izolatör elemanlarının sönüm oranındaki artış, yapıya etkiyen deprem enerjisinin azalmasına katkı sağlar. Göreli kat ötelenmesinin azalması, plandaki düzensizliklerin ve düşeydeki düzensizliklerin önlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, mimari açıdan daha büyük açıklıklı yapıların tasarımına imkan tanımaktadır (Türk 2019).

1.7 Titreşim

Titreşim, genel olarak bir nesnenin dengede olduğu noktadan, geri çağırıcı bir kuvvetin etkisi altında salınarak hareket etmesi şeklinde tanımlanabilir. Basit bir sarkaç örneğinde, kütlenin dengede olduğu nokta etrafında salınım yaptığı gözlemlenir. Bu hareket sırasında, kinetik enerji ile potansiyel enerji arasında sürekli bir enerji alışverişi

meydana gelir. Dengede olan noktada, sarkacın hızı en yüksek, dolayısıyla kinetik enerjisi de zirvededir ve teğetsel ivme sıfırdır. Sarkaç, denge noktasından uzaklaştıkça kinetik enerjisi azalır ve potansiyel enerjiyi depolamaktadır. En uç noktaya ulaştığında ise hızı en düşük, ivmesi ise en yüksek seviyededir. Eğer sistemde sürtünme ya da sönümlenme gibi kuvvetler bulunmuyorsa, bu enerji dönüşüm döngüsü teorik olarak sonsuza kadar devam eder. Basit sarkacın hareketini gösteren bir model Şekil 1.3’de gösterilmiştir (Lalanne 2002).



Şekil 1.3 Basit sarkaç

Mekanik sistemlerde etki eden kuvvetler iki ana kategori altında incelenir: dinamik ve statik. Statik kuvvetler, zaman içinde değişmeyen ve sabit olarak sistem üzerinde etkili olan zorlanmalardır. Statik kuvvetlerin hesaplanmasında, ivme dikkate alınmadığı için atalet kuvvetleri göz ardı edilir. Bu tür kuvvetler, köprülerin dayanıklılık hesapları gibi zamandan bağımsız yapısal analizlerde önem taşır. Öte yandan, dinamik kuvvetler, nesnelere değişen hızlarda veya ivmelerde etki eden kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin analizinde, ivmenin değişkenliği (sabit, değişken, tamamen değişken veya rastgele) ve yönleri, ayrıca mekanik sistemin maruz kaldığı süreçler (titreşim ya da şok gibi) dikkate alınarak değerlendirilir.

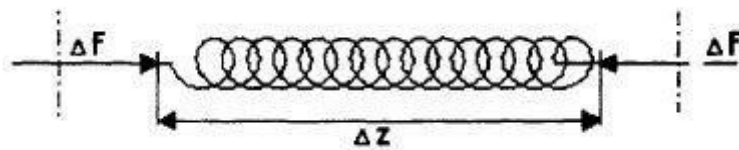
Basit bir sarkaç sistemi ele alındığında, bu sistemde sönümleyici bir eleman bulunmadığı görülür. Ayrıca, kütle sadece dönmekle sınırlı olduğu için sistem tek serbestlik derecesine sahip olarak tanımlanır. Titreşim analizlerinde, serbestlik derecesi analiz yöntemlerini belirler, bu nedenle büyük önem taşır.

Titreşim türleri, geri çağırıcı kuvvetin özelliklerine bağlı olarak üç ana kategoriye ayrılır: serbest titreşim, zorlanmış titreşim ve sönümlü titreşim. Serbest titreşimde, ilk itmeyle başlayan hareket, dış bir kuvvetin etkisi olmaksızın devam eder. Titreşim sırasında sisteme dışarıdan bir kuvvet uygulanırsa, bu durum zorlanmış titreşim olarak adlandırılır. Eğer bu zorlama sistemin doğal frekansında gerçekleşirse, sönümleme olmadığı takdirde sistem rezonansa girer ve genlik artışı gözlemlenir. Sistemde bir sönüm elemanı bulunuyorsa, bu durum sönümlü titreşim olarak değerlendirilir. Ayrıca, sisteme uygulanan kuvvetin veya hareketin büyüklüğü belirli bir zaman diliminde öngörülebilirse, bu periyodik titreşim olarak tanımlanır; aksi takdirde, bu durum gelişigüzel titreşim olarak isimlendirilir.

Titreşim türleri aynı zamanda sistemdeki elemanların özelliklerine göre de sınıflandırılabilir. Eğer sistem içindeki tüm elemanlar lineer karakteristikler gösteriyorsa, bu durum lineer titreşim olarak değerlendirilir. Ancak sistemde lineer olmayan elemanlar bulunuyorsa, bu tür titreşim lineer olmayan titreşim sınıfına girer.

1.7.1 Kütle Yay Sistemi

Titreşim analizlerinde sıklıkla başvurulacak modellerden biri, kütle-yay sistemidir. Bu sistemde sönümleyici bir eleman bulunmadığı durumlarda, kütle ve yayın özellikleri kullanılarak bir serbest cisim diyagramı çizilir ve bu diyagram üzerinden bir matematiksel model oluşturulur. Yay elemanı, sistemin katılığını belirten bir faktör olarak işlev görür. Eğer yay lineer bir yapıdaysa, yer değiştirme ile kuvvet arasındaki ilişki sabit bir oranla artar veya azalır. Şekil 1.4'de gösterilen yay modeli için, en temel lineer yay hesaplaması Hook yasası kullanılarak yapılabilir. olarak ifade edilen bu yaklaşım, yayın yer değiştirmesi ile orantılı olarak kuvvet ürettiğini varsayar (Rao 2018).



Şekil 1.4 Lineer yay modeli

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta z} \quad (1.1)$$

k = yay rijitliği

Δz = yer değiştirme miktarı

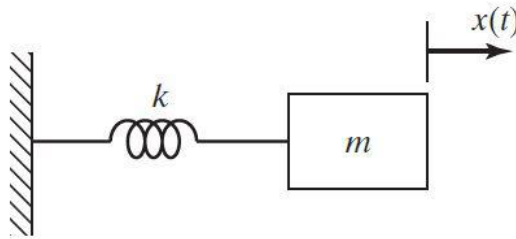
ΔF = etki eden kuvvettir.

Eğer bir sistemde birden fazla yay veya çeşitli yaylar bulunuyorsa, bu yayların toplam rijitliğini belirlemek için eşdeğer rijitlik kavramı kullanılır. Yaylar seri olarak bağlandığında, eşdeğer rijitlik için kullanılan eşitlik farklıdır; bu durumda (1.2) numaralı eşitlik uygulanır. Eğer yaylar paralel olarak bağlanmışsa, eşdeğer rijitliği hesaplamak için (3.3) numaralı eşitlik kullanılır.

$$k_{eř} = k_1 + k_2 \quad (1.2)$$

$$\frac{1}{k_{eř}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (1.3)$$

Sistemler eğer burulma veya eğilme gibi hareket türlerine maruz kalıyorsa, rijitlik değerinin hesaplanması için farklı eşitlikler uygulanır. Örneğin, tek serbestlik dereceli bir kütle-yay sistemi harmonik bir kuvvet altında- $F(t)$ maruz kaldığı zaman sistemin matematiksel modeli şekil 1.4 göründüğü gibi gösterilebilir. Burada sönümsüz bir sistemin zorlanmış titreşim modeli oluşturulmuştur.



şekil 1.5 Kütle-yay modeli

Tek serbestlik dereceli ve sönümsüz bir kütle-yay sistemi, pozitif yönde bir zorlanma kuvvetine maruz kaldığında, hareket denklemini aşağıdaki

$$m\ddot{x} + kx = \ddot{F}_0 \cos(\omega t) \quad (1.4)$$

Uygun başlangıç şartları belirlenirse 1.5 eşitliği harmonik bir çözüm formunda kabul edileceği için çünkü kuvvette harmoniktir. Kuvvetin frekansı ile çözümün frekansı aynıdır.

$$x(t) = \left(x_0 - \frac{F_0}{k - m\omega^2}\right) \cos(\omega_n t) + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n}\right) \sin(\omega_n t) + \left(x_0 - \frac{F_0}{k - m\omega^2}\right) \cos(\omega t) \quad (1.5)$$

Çözümü elde edilir. Burada

F_0 = kuvvetin genliği
 x_0 = ilk yer değiştirme
 ω_n = doğal frekans
 Ω = uyarı frekansı
 $\dot{x}_0$ = ilk hızdır

1.8 İzolatörlerin Genel Özellikleri Ve Teknik Detayları

Sismik izolasyon uygulanan bir yapı tasarımında ilk adım, kullanılacak olan izolatör ile yapı malzemelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tespit edilmesidir. Tasarım süreci boyunca, yapısal öncü analizlerden elde edilen veriler veya üretici tarafından sağlanan teknik özellikler dikkate alınır. Bu bilgilerle birlikte, yapı için kritik olan diğer parametreler ve izolasyon sisteminin gereklilikleri belirlenerek, yapının yer değiştirme miktarı, salınım periyodu ve temel kesme kuvvetleri hesaplanır (Asano vd. 2014).

1.8.1 Kauçuk İzolatörlerin Mekanik Özellikleri

Kauçuk esaslı izolatörler, mekanik özellikler bakımından önemli bir yer tutar, özellikle yatay rijitlik (K_h) ön plana çıkar. Bu izolatörler, alt ve üst kısımlarında kalın çelik levhalar ve aralarında birden fazla kauçuk tabaka bulunur. Bu tabakaların yanal genişlemesini engellemek amacıyla yanlarda çelik levhalar yer alır.

İzolatörlerin yatay rijitlik değeri;

$$K_h = \frac{GA}{t_r} \quad (1.6)$$

G = kauçuğun kayma modülü

A = kesit alan

t_r = kauçuğun toplam kalınlığı

Yatay rijitlik, izolatörlerin sismik etkilere karşı direncini belirleyen temel bir faktördür. Bu direnç, yapıların deprem sırasında daha iyi performans göstermesini sağlar ve böylece yapısal hasar riskini azaltır. İzolatör tasarımında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, bu performansın belirlenmesinde kritik rol oynar. Kauçuk, mükemmel esneklik özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir ve çelik levhalar ise kauçuk tabakalar arasında stabilite sağlamak için kullanılır (Masaki ve Tamura, 1999).

Kauçuk malzemesinin kayma modülü (G), yapısal mühendislikte kritik bir parametredir ve genellikle 0.4 ile 1 MPa arasında değişir. Kayma deformasyonu γ , maksimum yatay yer değiştirme (D) ve kauçuğun toplam kalınlığı (t_r) ile doğru orantılıdır. Bu ilişki

$$\gamma = \frac{D}{t_r} \quad (1.7)$$

Eşitliğiyle ifade edilir. Kauçuk malzemenin kayma modülü, yatay yer değiştirme miktarına bağlı olarak seçilir ve genellikle %100 ile %150 kayma deformasyonu aralığında değerlendirilir.

Özellikle, laminat kauçuk rulmanların başlangıç sertliği, verim sertliği ve nihai çekme özellikleri, büyük ölçekli karmaşık yapılar için önem taşır. Bu tür bir detaylandırma, rulmanların deprem sırasında nasıl performans göstereceğine dair önemli bilgiler sunar.

Düşey rijitlik (K_v), sismik izolatörler için kritik bir parametredir, çünkü yapının düşey frekansını etkileyebilir ve bu da genellikle izolatörün düşey rijitliği ile doğru orantılıdır. İzolatörlerin düşey rijitliği, genellikle çelik levhaların kauçuk tabakaları arasına eklenmesiyle artırılarak sağlanır. Bu yapısal düzenleme, K_v 'nin aşağıdaki eşitlikle elde edilir.

$$K_V = \frac{E_C A}{t_r} \quad (1.8)$$

E_C = kauçuk ve çelikten oluşan kompozit basınç modülünü

A = kauçuğun en kesit alanını ifade etmektedir.

K = kauçuğun sıkıştırılabilirliği ise hacimsel elastisite modülü

$$\frac{1}{E_C} = \frac{1}{E_{Ck}} + \frac{1}{K} \quad (1.9)$$

Bu ilişkilerle, kompozit birleşimin basınç modülü E_{Ck} şu şekilde belirlenir:

$$E_C = \frac{E_{Ck} \cdot K}{E_{Ck} + K} \quad (1.10)$$

Bu hesaplamaların yanı sıra, kauçuğun geometrisine bağlı olarak. E_{Ck} değerinin hesaplanmasında şekil faktörlerinin önemli olduğu ve izolatörün şekline göre farklılık gösterebileceği belirtilmiştir (Kelly ve Konstantinidis 2011).

1.9 Sürtünmeli Sarkaç Tip Mesnetlerin Mekanik Özellikleri

Sürtünmeli sarkaç izolatörler, düşey yüklere yanıt olarak nasıl bir yatay deplasman gösterdiğini anlamak için oldukça ilgi çekici bir konudur. Bu tür izolatörler, yer değiştirmeyi etkileyen kuvvetlerin doğası gereği, izolatörün eğrilik yarıçapı, düşey yük miktarı ve sürtünme katsayısı gibi faktörlere bağlıdır. İzolatör tasarımında, bu kuvvetlerin dikkatli bir şekilde hesaplanması, sistem performansının optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Sürtünmeli sarkaç izolatörlerde, yer değiştirmeyi etkileyen yatay kuvvetler, izolatörün geometrisine ve yerleştirildiği yapısal elemanlara uygulanan düşey yükler tarafından modüle edilir. Bu kuvvetler, sürtünme katsayısı ile doğrudan ilişkilidir ve eğrilik yarıçapı, izolatörün yüzeyinin şekli ve malzeme özellikleri tarafından belirlenir. Bu parametrelerin her biri, izolatörün yük altındaki davranışını etkileyerek, yapısal güvenlik ve performans üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Dolayısıyla, izolatörlerin tasarımında ve analizinde, bu kuvvetlerin nasıl entegre edileceği ve hesaplanacağı üzerine detaylı çalışmalar yapılmalıdır. Sürtünme katsayısı, eğrilik yarıçapı ve düşey yük gibi faktörlerin her biri, genel sistem stabilitesini ve etkinliğini artırmak için optimizasyon gerektirir.

İzolatöre etkiyen Kuvvet F aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$F = \frac{wD}{R} + \mu w \sin n(D) \quad (1.11)$$

F = Sisteme etki eden kuvvet

W = Düşey yük

D = Yer değiştirme miktarı

μ = Kayma sürtünmesinin katsayısı

R = Eğrilik yarıçapı

Sürtünme katsayısı, kullanılan malzemeye göre farklılık gösterir. Ayrıca, kayma hızı ve basınç gibi faktörlerin değişimi, sürtünme katsayısının değişmesine neden olmaktadır.

Akma sonrası yatay rijitlik hesabı;

$$\frac{W}{R} = K_H = K_2 \quad (1.12)$$

Peryod;

$$T = \frac{2\pi\sqrt{R}}{\sqrt{r}} \quad (1.13)$$

Efektif rijitlik;

$$K_{eff} = K_P + \frac{Q}{D} = \frac{W}{R} + \mu \frac{W}{D} \quad (1.14)$$

Efektif sönüm;

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D-D_Y)}{\pi K_{eff} D^2} = \frac{2\mu}{\pi\left(\frac{D}{R}\right) + \pi\mu} \quad (1.15)$$

Düşey deplasman;

$$\Delta = R \left(1 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{W}{R} \right) \right) \right) \quad (1.16)$$

K₂ = Akma sonrası yatay rijitlik

T = Periyot

R = Ankastre inşa edilen yapı katsayısı

r = Eğrilik yarıçapı

K_{eff} = Efektif rijitlik

K_p = Akma sonrası rijitlik

Q = Karakteristik dayanımı

D = Yer değiştirme miktarı

D_y = Akma yer değiştirmesi

μ = Kayma sürtünmesinin katsayısı

W = İzolatöre etkiyen toplam ağırlık

Δ = Düşey deplasman

1.10 Sismik İzolatör Sistemlerinin Uygulamaları

Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Kanada, Yeni Zelanda ve İtalya gibi birçok ülke deprem izolatörlerini kullanmaktadır. Ülkemizin deprem davranışlarına ilişkin bilgi ve deneyimi diğer ülkelerden daha fazla olsa da, sismik yalıtım sistemleri ile ilgili araştırma ve uygulamalar yetersizdir. Geleneksel yapı tasarım yöntemlerinin ülkemiz için yetersiz olduğu açıkça ortaya çıkmıştır, özellikle son Van depremi (2011). Bu çalışmalara rağmen, sismik yalıtım sistemleri üzerindeki araştırma ve uygulamalar istenilen düzeyde ilerleme kaydetmemiştir (Sadan 2023). Bu konuda Türkiye'de çok az uygulama bulunmaktadır.

1. Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali 1998'de inşa edilmiş ve 1999'daki Kocaeli Depremi sonrası sismik izolatörlü hale gelmiştir. Sürtünmeli sarkaç izolatör kullanılmıştır. 162 taşıyıcı kolon, tamamlanan 6000 tonluk uzay çatıya sismik izolatör uygulamasını yerleştirmiştir. Güçlendirmenin amacı, çelik çatıdan yapıya iletilen yükleri azaltmak ve yer değiştirmeleri yönetmektir. Uzay çatı, deprem anında 26 cm'ye kadar hareket edebilmektedir (Constantinou vd 2001).

2. Sismik izolatör uygulamasının ilk hastane projesi, 2005 yılında tamamlanan Kocaeli Üniversitesi Eğitim ve Araştırma Hastanesi'dir. Hastane, beş katlı betonarme karkas taşıyıcıya ve 500 yatak kapasitesine sahiptir. Kullanılan izolatörler, 27 cm'lik bir yer

değiştirme kapasitesine sahiptir ve 90 x 90 cm boyutlarında sürtünmeli sarkaç türüdür. Hastanenin üç bölümü temel altına, beş bölümü ise kolon üstüne inşa edilmiş ve 256 izolatör kullanılmıştır (Sadan 2023).

3. 2008 yılında inşa edilen Sabiha Gökçen Havalimanı'nın yeni terminalinde, dünyada eşi benzeri olmayan bir sismik izolatör sistemi kullanılmıştır. Yeni terminalin depreme karşı direncini en üst düzeye çıkarmak için, 3119 kazık üzerine yerleştirilen temel yapısı dışında, 252 kolonun her birine ve yolcu köprülerinin temeline yerleştirilen 16 sismik izolatör cihazı bağlanmıştır (Sadan 2023).

4. 2011 yılında kurulan Erzurum Şehir Hastanesi, Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesi'nin yanında 202 bin 187 metrekarelik bir alana kurulmuştur ve 'sismik izolatör' teknolojisi kullanılmaktadır. Hastane binasının temel kolonlarına yerleştirilen toplam 1248 izolatör bu teknolojiyi desteklemektedir. Bu nedenle hastane binası depremlere karşı daha güvenli ve dirençli hale getirilmiştir (Sadan 2023).

5. Sağlık Bakanlığı, Kamu Özel İş birliği modeliyle Adana Entegre Sağlık Kampüsü Projesini yürütmüştür. 1.550 yatak kapasiteli bu entegre sağlık kampüsü üç ayrı hastaneyi içerir. Projeye özgü bir özellik olarak, dünyadaki en büyük sismik izolatörlü yapıdır. Proje 2020 yılında tamamlanmış ve kullanıma açılmıştır (Sadan 2023).

6. Türkiye'de, İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı'nda özellikle deprem etkilerine karşı daha güvenli bir yapı oluşturmak amacıyla deprem izolatörleri kullanılmıştır. Yapının yüksekliği, zemin seviyesinden çatıya kadar olan mesafe 20 metredir. Çatı, toplamda 30 kolon üzerine yerleştirilmiş ve ağırlığı 2000 ton kadardır. Çatının sıcaklık gerilmeleri ve deprem kuvvetlerinden etkilenmemesi için yapılan bu tasarım oldukça ilginç ve etkili bir yaklaşımı yansıtmaktadır. İzolatörlerin çatı ve kolonlar arasına yerleştirilmesi, bina sistemine elastik bir esneklik kazandırarak deprem etkilerini absorbe etmeye yönelik bir strateji olabilir. Bu sayede, havalimanı binası deprem ve diğer çevresel etkilere karşı daha dirençli ve dayanıklı hale getirilmiştir (Sadan 2023).

7. Türkiye'de sismik izolatör kullanılarak güçlendirilen ilk yapı olarak kabul edilen örnek, Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali'dir. Bu terminaldeki inşaat devam

ederken, Düzce depremi meydana gelmiş ve yapıda kısmi hasarlar oluşmuştur. Yapının kaba inşaatı tamamlanma aşamasında iken, tüm kolonlar özel bir güçlendirme sürecinden geçirilmiş ve çatı ile kolon arasına askı sistemi kurularak sismik izolatörler yerleştirilmiştir. Bu sayede, havalimanı terminali depremlere karşı daha dirençli ve güvenli hale getirilmiştir.

8. Düzce depreminde, fayın oldukça yakınından geçmesi sebebiyle büyük hasar gören yapılar arasında yer alan Bolu Viyadüğü, histeretik enerji sönümleyici cihazlarının beklenen performansı gösterememesi nedeniyle sürtünme sarkaç tipi izolatörlere geçilerek güçlendirilmiştir.

9. Trabya Oteli, 1966 yılında İstanbul'da inşa edilmiş ve Marmara depreminde büyük hasar görmüştür. Bazı temel bağlantılarının eksik olduğu ortaya çıkmıştır. 2005 yılında otel, eğrisel yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerle güçlendirilmiştir. Bununla birlikte, iş sürecinde ortaya çıkan sorunlar nedeniyle daha sonra geleneksel yöntemlerle güçlendirilmiştir.

10. Yavuz Sultan Selim Köprüsü, İstanbul Boğazı üzerindeki önemli bir altyapı projesidir ve deprem riski yüksek olan bu bölgede güçlü bir sismik izolasyon sistemine sahiptir. Köprü, 176 adet çelik ayak üzerine inşa edilmiş olup, her bir ayakta özel olarak tasarlanmış sismik izolatörler bulunmaktadır. Bu izolatörler, köprünün deprem sırasında esnek bir şekilde hareket etmesini sağlayarak yapının dayanıklılığını artırır ve olası hasarları en aza indirir. Yavuz Sultan Selim Köprüsü'nde kullanılan sismik izolatörler, özellikle 1999 yılında yaşanan ve büyük zararlara yol açan Marmara Depremi'nin ardından geliştirilen modern sismik güvenlik standartlarına uygun olarak seçilmiştir. Bu sayede, köprü üzerindeki trafik ve yapısal bütünlük, deprem anında korunarak güvenlik sağlanmıştır. Köprü, sadece ulaşımı rahatlatmakla kalmayıp aynı zamanda bölgedeki deprem riskine karşı etkin bir koruma sağlayan önemli bir yapısal mühendislik örneği olarak görülmektedir (Mendez-Galindo vd 2017).

11. Kashiwazaki-Kariwa Nükleer Santrali, Japonya 2007 yılında yaşanan Chuetsu Offshore depreminde santral ciddi şekilde etkilenmiş ve bu olay, santralin deprem

dayanıklılığı konusunda önemli bir test olmuştur. Santralin bu depreme karşı gösterdiği tepki ve alınan güvenlik önlemleri, Japonya'daki nükleer santrallerin sismik risklere karşı nasıl hazırlandığını gösteren bir örnek teşkil etmektedir. Kashiwazaki-Kariwa Nükleer Santrali, Japonya'da enerji üretiminde kritik bir rol oynamakta olup, aynı zamanda sismik izolasyon sistemleri ve diğer güvenlik önlemleri ile de dikkat çekmektedir. TEPCO, santralin deprem ve tsunami gibi doğal afetlere karşı dayanıklılığını sürekli olarak artırmak için çalışmalarını sürdürmektedir (Yamashita 2010).

12. 634 metrelik yüksekliği ile dünyanın en yüksek serbest ayaklı kulesi Tokyo Skytree, deprem riski yüksek olan Tokyo'da güçlü bir sismik izolasyon sistemine sahiptir. Bu sistem, kuleyi büyük depremlere karşı koruyarak yapısal bütünlüğünü sağlamlaştırır. Ayrıca, kuledeki ziyaretçi alanları ve gözlem noktaları da sismik güvenlik standartlarına uygun olarak tasarlanmıştır, böylece ziyaretçilerin güvenliği sağlanmaktadır (Konishi 2011).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Güner (2012)'e göre hazırladığı yüksek lisans tezinde, 8 katlı bir hastane yapısının hem ankastre mesnetli hem de kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü olarak tasarlanması ele alınmıştır. Bu çalışmada, ETABS paket programı kullanılarak yapıların analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, hem yapının hem de izolatörlerin dinamik karakteristik özelliklerini ortaya koymuştur. Güner'in çalışması, sismik izolasyonun yapıların dinamik tepkileri üzerindeki etkilerini inceleyerek, bu tür izolatörlerin deprem sırasında yapıya sağladığı avantajları vurgulamaktadır. Özellikle, sismik izolatörlerin yapının temel seviyesinde yerleştirildiğinde nasıl davranış sergilediği ve bu davranışın yapının genel performansına katkıları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Cicen (2014)'e göre gerçekleştirdiği çalışmada, mevcut bir kamu binasının performans analizi temel alınarak sismik izolatörlerle güçlendirilmesi konusu ele alınmıştır. Bu çalışmada, Sap2000 paket programı kullanılarak yapılan analizler sonucunda, binanın sismik performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Analizler, sismik izolatörlerin binanın taşıyıcı sistem davranışını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Cicen'in çalışması, özellikle mevcut yapıların deprem performansını artırmak amacıyla sismik izolasyon teknolojisinin nasıl uygulanabileceğini ve bu uygulamanın yapının genel güvenliğine ve dayanıklılığına katkılarını ortaya koymaktadır.

Kök (2014)'e göre hazırladığı yüksek lisans tezinde, sismik izolatörlerin mimari tasarım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, Türkiye'de sismik izolasyon uygulamaları yapılmış olan 11 adet yapı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Kök'ün çalışması, sismik izolatörlerin sadece yapısal performansa katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda mimari tasarım süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini de göstermektedir. Tezde, bu yapıların tasarım süreçleri, uygulama yöntemleri ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, sismik izolatörlerin kullanımı ile elde edilen faydalar, bu tür teknolojilerin yaygınlaştırılması ve diğer yapılara entegrasyonu için öneriler sunulmuştur.

Pekgökgöz vd. (2007)'e göre, 1. derece deprem bölgesinde yer alan ve 6 katlı bir konut binasının hem ankastre mesnetli hem de sismik izolatörlü tasarımlarının maliyet analizi

yapılmıştır. Bu çalışma, sismik izolatör kullanımının yapı maliyetine olan etkilerini inceleyerek, bu tür izolatörlerin toplam yapı maliyetine %40-%45 oranında ek maliyet getirdiğini ortaya koymuştur. Özellikle, sismik izolatörlerin ek maliyetinin, sağladığı deprem güvenliği avantajları ile nasıl dengelendiği tartışılmıştır. Bu bulgular, yapı sahipleri ve mühendisler için önemli bir maliyet-fayda analizi sağlamaktadır, çünkü sismik izolatörlerin yüksek ilk yatırım maliyetlerine rağmen uzun vadede sağladığı yapısal güvenlik ve dayanıklılık artışı göz önüne alınmaktadır.

Karabörk vd. (2010)'e göre yaptığı çalışmada, yumuşak zemin üzerinde tasarlanmış olan iki yapının, biri ankastre mesnetli diğeri ise sismik izolatörlü, Kocaeli deprem kaydına göre dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu analizler, sismik izolatörlerin yapıların deprem performansını nasıl etkilediğini anlamak için yapılmıştır. Çalışma sonucunda, izolatörlü yapının deprem etkisi altında daha iyi performans sergilediği ve daha düşük deformasyonlar yaşadığı belirlenmiştir. Bu sonuç, sismik izolatörlerin, özellikle yumuşak zeminlerde inşa edilen yapılarda deprem etkilerini azaltmada ne kadar etkili olduğunu vurgulamaktadır. Karabörk ve ekibinin çalışması, mühendisler ve tasarımcılar için izolatörlerin pratik kullanımına dair değerli bilgiler sunmaktadır.

Alhan vd. (2011)'e göre sismik izolatörlü yapılarda kat ivmelerinin dağılımı incelenmiştir. Bu çalışma, eşdeğer doğrusal modelleme ve üst yapı sönümünün olduğu durumlar için kat ivmelerinin nasıl dağıldığını ele almıştır. Çalışma, sismik izolatörlerin yapının üst katlarındaki ivme dağılımını önemli ölçüde etkilediğini ve bu etkinin yapı sönümleme özelliklerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Alhan ve arkadaşlarının bulguları, izolatörlü yapıların deprem performansını optimize etmek için önemli tasarım parametreleri sağlamaktadır. Özellikle, sismik izolatörlerin ve sönümleme özelliklerinin yapı dinamikleri üzerindeki etkilerini anlamak, deprem mühendisliği uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır.

Ercan ve Nuhoglu (2005)'a göre gerçekleştirdikleri çalışmada, farklı yüksekliklerdeki ve farklı izolatör tipleri kullanılan çerçeve sistemlerin dinamik analizleri, çeşitli zemin koşullarında incelenmiştir. Bu çalışma, sismik izolatörlerin yapısal performans

üzerindeki etkilerini derinlemesine anlamak amacıyla yapılmıştır. Analiz sonuçları, izolatör kullanılan yapıların deprem etkisi altında daha iyi performans sergilediğini ve yapının genel deprem davranışını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Özellikle, izolatörlerin farklı zemin koşullarında nasıl tepki verdiği ve yapıların sismik yükler altındaki performansını nasıl artırdığı vurgulanmıştır. Ercan ve Nuhoglu'nun çalışması, sismik izolatörlerin yapısal güvenliği artırma potansiyelini ve çeşitli zemin tiplerinde uygulanabilirliğini detaylandırarak önemli katkılarda bulunmuştur.

Türker'in 2005 yılında hazırladığı bildiri, aynı plan ve malzeme özelliklerine sahip iki farklı taşıyıcı sistemle tasarlanmış bir hastane yapısının dinamik analizini içermektedir. Bu çalışma, perdeli sistem ve kurşun çekirdekli izolatör eklenmiş çerçevesi sistem olmak üzere iki farklı tasarımın Kocaeli ve Düzce deprem kayıtlarına göre performanslarını karşılaştırmıştır. Yapılan dinamik analizler, izolatörlü sistemlerin deprem etkisi altında daha iyi performans sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, toplam inşaat maliyetleri karşılaştırılarak, izolatörlü yapıların maliyet açısından biraz daha ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, sismik izolatörlerin ekonomik açıdan da avantajlı olabileceğini göstermektedir ve deprem mühendisliği uygulamalarında maliyet-fayda analizinin önemini vurgulamaktadır. Türker'in çalışması, sismik izolatörlerin sadece yapısal performansı artırmakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik açıdan da tercih edilebilir olduğunu göstermesi bakımından önemlidir.

Asher vd. (2001)'ne göre gerçekleştirdikleri çalışmada, California'da fay hattına oldukça yakın mesafede bulunan bir sağlık merkezinin sismik izolatörlü tasarımı sunulmuştur. Bu çalışmada, sismik izolatörlerin yapısal güvenliği nasıl artırdığı ve özellikle deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde bu tür teknolojilerin ne kadar kritik olduğu vurgulanmıştır. Asher ve arkadaşlarının çalışması, sismik izolatörlerin deprem anında yapıya sağladığı korumayı ve bu korumanın sağlık merkezleri gibi kritik yapılarda neden önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Wu vd. (2002)'ne göre yaptıkları çalışmada, elastomer mesnetli beş katlı bir yapı modelinin sarsma tablası deneyleri ile sismik karakteristiği belirlenmiştir. Bu deneyler,

sismik izolatörlerin yapıların deprem performansını nasıl etkilediğini anlamak için önemli veriler sağlamıştır. Çalışma sonucunda, sismik izolatörlü modelin, yalıtımsız modele göre tüm deprem kayıtlarında kat ivmelerinin azaldığı gösterilmiştir. Wu ve arkadaşlarının bulguları, sismik izolatörlerin yapıların ivme değerlerini düşürerek, deprem anında yapıya ve içerisindeki insanlara sağladığı korumayı vurgulamaktadır. Bu tür deneysel çalışmalar, sismik izolatörlerin gerçek dünya koşullarında nasıl performans sergilediğini anlamak için kritiktir.

Tezcan ve Erkan (2002)'a göre gerçekleştirdikleri çalışmada, örnek bir çerçevenin sismik izolatörlü ve viskoelastik sönümleyicili modellerinin Kocaeli Depremi etkisindeki performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, farklı sismik koruma teknolojilerinin yapı performansı üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir adım olmuştur. Çalışma sonuçları, sismik izolatörlerin ve viskoelastik sönümleyicilerin yapının deprem anındaki davranışını nasıl iyileştirdiğini ve her iki teknolojinin de belirli koşullar altında avantajlarını ortaya koymaktadır.

Celep ve Kumbasar (2004)'a göre yayınladıkları 'Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı' kitabı, deprem mühendisliği alanında kapsamlı bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Kitap, deprem ve depremin yapılardaki etkileri, depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkeleri, deprem sonrası hasar belirleme yöntemleri ve güçlendirme teknikleri hakkında detaylı bilgiler sunmaktadır. Celep ve Kumbasar'ın çalışması, hem akademik hem de pratik açıdan mühendisler ve araştırmacılar için değerli bir referans kaynağıdır. Kitap, deprem mühendisliği konusundaki temel prensipleri ve uygulamaları ele alarak, bu alandaki bilgi birikimini genişletmektedir.

Kani (2009)'e göre sismik izolatör tasarımının mevcut durumunu kapsamlı bir şekilde incelemekte ve sismik izolatörlerle donatılmış binaların, depremler sırasında ve sonrasında mükemmel performans sergilediğini vurgulamaktadır. Bu çalışma, sismik izolasyon sistemlerinin, özellikle Japonya'da geniş kabul gördüğünü ve yaygın olarak kullanıldığını belirtmektedir. Japonya, dünya genelinde en fazla sismik izolatörlü binaya sahip olan ülke konumundadır. Bu durum, sismik izolasyon sistemlerinin yapı güvenliğini ve işlevselliğini sağlama konusundaki etkinliğini ortaya koymaktadır.

Belash ve Erokhina (2021)'a göre tarafından yapılan çalışmada, mevcut binaların sismik direncini arttırmak amacıyla özel bir sismik koruma yöntemi olarak kauçuk-metal desteklerin kullanılması incelenmiştir. Bu çalışmada, hesaplamalı analizler kullanılarak, sismik izolasyonun deprem açısından aktif bölgelerde bulunan binaların sismik direncini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Özellikle, bu yöntemle yapılan güçlendirmelerin, binaların deprem performansını artırdığı ve yapıların güvenliğini sağladığı vurgulanmıştır.

Wang ve Bai (2014)'e göre tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışma, depreme dayanıklı yapı strüktürlerinin güçlendirilmesi için sismik izolasyon cihazlarının etkinliğini analiz etmektedir. Bu çalışmada, sismik izolatörlerin binaların performansını işlevselliklerinden ödün vermeden artırabileceği, özellikle bu cihazların binaların yeraltı kısımlarında kullanıldığında etkili olduğu bulunmuştur. Sismik izolasyon cihazlarının kullanımı, binaların deprem performansını iyileştirirken, yapısal değişikliklerin minimum düzeyde tutulmasını sağlamaktadır.

Idrizi (2017)'e göre tarafından tanıtılan yenilikçi bir sismik koruma sistemi olan "IDRIZI", geleneksel betonarme binalar için geliştirilmiştir. Çalışmaları, bu sistemin yapı strüktürlerinin sismik tepkisini önemli ölçüde iyileştirerek, dolgu duvarlarını çatlaklardan ve mukavemet kaybından koruduğunu göstermektedir. Bu yenilikçi sistem, özellikle güçlü deprem olayları sırasında yapısal performansı artırarak, binaların dayanıklılığını artırmakta ve hasar riskini azaltmaktadır. Bu çalışma, yeni sismik koruma yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanmasının önemini vurgulamaktadır.

Tsuneki vd. (2009)'ne göre tarafından sunulan orta kat izolasyonlu yapısal sistem, yüksek katlı binalar için önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Bu sistem, farklı yüksekliklerde sismik izolasyon kullanarak sismik direnci artırmakta ve her kat seviyesinde sertlik, kuvvet aktarımı ve enerji yutumu kontrolünü sağlamaktadır. Orta kat izolasyonlu sistem, orta şiddetli depremler sırasında yer değiştirmeleri en aza indirmek ve güçlü depremler sırasında bina periyotlarını uzatmaktadır. Bu yöntem, geleneksel tek seviyeli izolasyon yöntemlerine göre daha avantajlıdır ve yüksek katlı binaların deprem performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Deastra vd. (2014)'ne göre çalışmasında, Endonezya'da bir hastane binasının sismik izolasyon sistemi ile ve sismik izolasyon sistemi olmadan sismik performansı analiz edilmiştir. Çalışma, hastane yapılarının sismik performansını değerlendirmek için iki farklı durum incelemiş ve bu durumları karşılaştırmıştır. Sismik izolatörlerin kullanıldığı yapı modelinde, yapının depreme dayanıklılığının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. İzolatörlerin, yapı üzerindeki sismik yüklerin azalmasına ve dolayısıyla hasar riskinin düşmesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, özellikle sağlık yapıları gibi kritik öneme sahip binalarda sismik izolatörlerin kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Komodromos (2006)'a göre çalışmasında, sismik izolatörlerin binalarda kesme kuvvetlerini, katlar arası yer değiştirmeleri ve kat ivmelerini azaltma potansiyelini ele almıştır. Ancak, çalışmada, güçlü depremler sırasında bitişik yapıların çarpışması (pounding) durumunda kat ivmelerinin önemli ölçüde artabileceği ve yapı içindeki içeriklerin zarar görebileceği de vurgulanmıştır. Bu durum, sismik izolatörlerin tasarımında bitişik yapıların da göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Çalışmada, sismik izolatörlerin kullanımıyla birlikte bu tür olumsuz etkilerin minimize edilmesi için öneriler sunulmuştur.

Fakih vd. (2021)'na yüksek katlı bir binada kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin kullanılmasının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, bu tür izolatörlerin binanın yer değiştirmelerini, çatı ivmesini, katlar arası kayma oranını ve temel kesme kuvvetini önemli ölçüde azalttığını bulmuşlardır. Bu bulgular, sismik izolatörlerin yüksek katlı binalarda sismik hasarı azaltmada oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle, geleneksel perde duvar sistemleri ile karşılaştırıldığında, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin daha üstün performans sergilediği belirtilmiştir. Bu çalışma, sismik izolatörlerin deprem mühendisliği uygulamalarında nasıl kullanılabileceği konusunda değerli bilgiler sunmaktadır.

Kitayama ve Constantinou (2019)'a göre ASCE/SEI 7 standartlarına ve diğer geliştirilmiş kriterlere göre tasarlanmış sismik izolatörlü binaların olasılıksal sismik

performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada, bu tür binaların, minimum kriterlerle tasarlanmış izolatörsüz binalara göre 50 yıllık ömürleri boyunca hasar görme veya yıkılma olasılıklarının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, sismik izolatörlerin uzun vadeli yapı güvenliği üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir. Çalışma ayrıca, gelişmiş tasarım kriterlerinin izolatörlü binaların performansını nasıl iyileştirdiğini ve deprem riskini nasıl azalttığını vurgulamaktadır.

Chun (2013)'a göre düşük katlı hafif binalarda kullanılan hibrit sismik izolasyon sisteminin yüksek sismik performans sağladığını göstermektedir. Çalışmada, bu sistemin güvenliği sağladığı ve yapısal rijitliği tasarım değerlerine yakın tuttuğu doğrusal olmayan analizler ve saha deneyleri ile kanıtlanmıştır. Hibrit sismik izolasyon sisteminin, düşük katlı binalarda etkili bir sismik koruma yöntemi olduğu ve bu binaların depreme karşı dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir. Bu çalışma, hafif yapıların sismik tasarımında hibrit sistemlerin kullanımının avantajlarını ortaya koymaktadır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör

405 mm çapında ve 100 mm kurşun çekirdek içeren bir izolatörün analizi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ABAQUS CAE 2017 versiyonunda gerçekleştirilmiştir. Bu versiyon, doğrusal olmayan malzeme davranışlarının modellenmesi ve karmaşık yapısal sistemler için yüksek hesaplama doğruluğu sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir. İzolatörün mekanik özellikleri, farklı koşullar altında simüle edilerek tasarım gereksinimlerine uygunluğu değerlendirilmiştir. İzolatör, aksenal yükleri taşıırken %250'ye varan kayma gerinimlerine ve çapının 2/3'üne kadar olan maksimal yer değiştirmelere uyum sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik performansın, kullanılan lastik modülüne ve katman sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Elastik sertliğin analizinde kullanılan bilimsel formül, aşağıdaki gibidir.

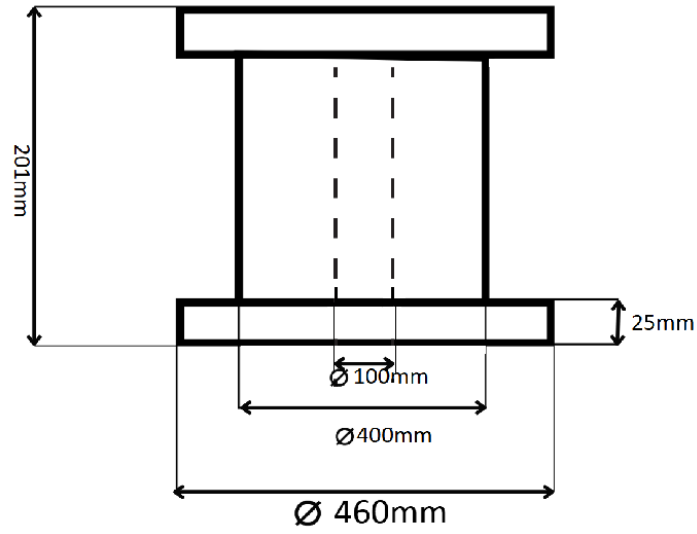
$$K_e = 10 \cdot K_d \quad (3.1)$$

K_d = dinamik rijitlik

K_e = etkin rijitlik

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin analizi sırasında kullanılan bu formül izolatörlerin etkin rijitlik ile dinamik rijitlik arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bu ilişki, malzeme davranışları ve sismik izolasyon sırasında oluşan yükler altında enerji sönümleme özelliklerini dikkate alarak etkin rijitliğin tahmini için kullanılır. Şekil 3.1'te gösterildiği gibi, malzeme modeli Mooney-Rivlin hiperelastik modeli ile tanımlanmıştır. Bu model, kauçuk gibi hiperelastik malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışını karakterize etmek için uygundur. C10 ve C01, Mooney-Rivlin modelinde kullanılan malzeme katsayılarıdır. C10, birinci gerilme invariyanına bağlı malzeme sertliğini, C01 ise ikinci gerilme invariyanına bağlı malzeme sertliğini temsil eder. Bu katsayılar, kauçuğun doğrusal olmayan elastik davranışını ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirlemek için deneysel verilerden elde edilir. Bu parametrelerle elde edilen rijitlik, izolatörün K_e ve K_d değerlerini belirlemede temel teşkil eder (Romstad vd. 1996).

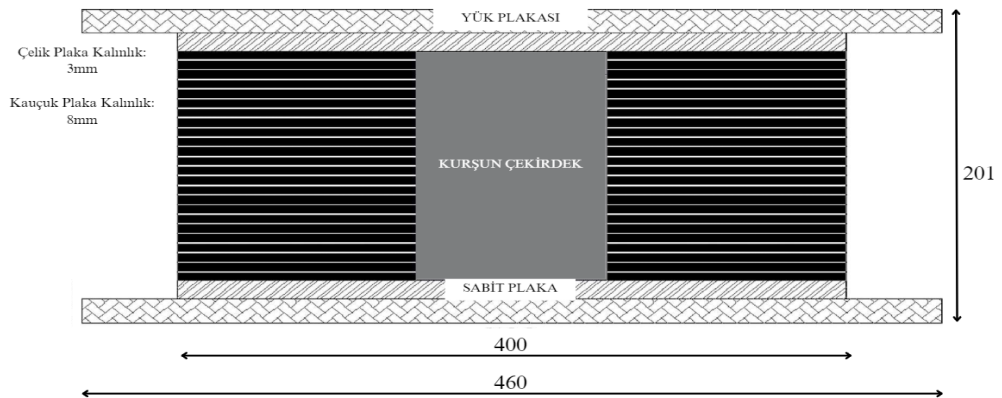
Şekil 3.1’de Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin bölüm ayrıntıları verilmiştir.



Şekil 3.1 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin bölüm ayrıntıları

3.1.1 Model Geometrisi

Bu çalışmada incelenen kurşun çekirdekli kauçuk izolatör, 400 mm dış çapa ve 100 mm çapında bir kurşun çekirdeğe sahiptir. İzolatörde 8 mm kalınlığında toplam 14 adet kauçuk plaka ve 3 mm kalınlığında 13 adet çelik plaka kullanılmıştır. İzolatörün her iki ucunda yer alan yük plakaları, çelik malzemeden imal edilmiş olup, dış çapı 460 mm, kalınlığı ise 25 mm’dir. Kauçuk ve çelik plakaların çapı 400 mm olarak belirlenmiştir. Kauçuk plakaların kalınlığı 8 mm, çelik plakaların kalınlığı ise 3 mm’dir. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün toplam uzunluğu 201 mm olarak tasarlanmıştır. Model geometrisi Şekil 3.2’de detaylı şekilde sunulmaktadır.



Şekil 3.2 Model geometrisi

3.1.2 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

İzolatörde kullanılan çelik malzeme, elastoplastik özellikte olup, davranışı elastik modül, Poisson oranı ve akma gerilimi gibi temel mekanik parametrelerle tanımlanmıştır. Çeliğin elastik modülü 200.000 MPa, Poisson oranı 0.3 ve akma gerilimi 250 MPa olarak belirlenmiştir (Wang vd. 2013), bu da çeliğin belirli bir esneklik sınırını aşana kadar elastik bir şekilde davranacağını ve ardından plastik deformasyona geçeceğini gösterir. Şekil 3.3'te çelik malzemenin özellikleri gösterilmiştir.

Name: steel

Description:

Material Behaviors

Elastic

Plastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Plastic

Hardening: Isotropic

☐ Use strain-rate-dependent data

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Yield Stress	Plastic Strain
1	250	0
2	300	0.1
3	350	0.2
4	400	0.5

Şekil 3.3 Çelik Malzeme Özellikleri

Kurşun çekirdek de elastoplastik bir malzeme olarak modellenmiş olup, daha düşük bir elastik modül ve akma gerilimi ile tanımlanmaktadır. Kurşunun elastik modülü 14000 MPa ve Poisson oranı 0.42 olarak belirlenmişken, akma gerilimi 10 MPa'dır. Bu düşük değerler, kurşunun yük altında çeliğe kıyasla daha kolay plastik deformasyona uğrayacağını göstermektedir. Şekil 3.4'de kurşun malzeme özellikleri verilmiştir (Sahota ve Riddington 2000).

Name: lead

Description:

Material Behaviors

Elastic

Plastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Plastic

Hardening: Isotropic

☐ Use strain-rate-dependent data

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Yield Stress	Plastic Strain
1	10	0
2	12	0.1
3	15	0.2
4	18	0.5
5	20	1
6	23	2
7	25	3

Şekil 3.4 Kurşun malzeme özellikleri

Kauçuk ise izolatörün hiperelastik bileşeni olarak değerlendirilmiş ve Mooney-Rivlin modeli ile karakterize edilmiştir. Kauçuğun başlangıç kayma modülü (G) 0.8 MPa olarak hesaplanmış olup, Mooney-Rivlin modeli çerçevesinde ifade edilmiştir.

$$G = 2 * (C10 + C01) \quad (3.1)$$

G = Kauçuğun başlangıç kayma modülü

Buna göre, gerinim enerjisi fonksiyonunun $C10$, $C01$ ve $D1$ katsayıları sırasıyla 0.24, 0.01 ve 0 olarak tanımlanarak, malzemenin gerinime karşı gösterdiği enerji depolama özellikleri açıklanmıştır (Guo vd. 2023). Şekil 3.5'te kauçuk malzeme özellikleri verilmiştir.

Edit Material

Name: rubber

Description:

Material Behaviors

Hyperelastic
Hysteresis

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Hyperelastic

Material type: ☒ Isotropic ☐ Anisotropic

Strain energy potential: Mooney-Rivlin

Input source: ☐ Test data ☒ Coefficients

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

Strain energy potential order: 1

☐ Use temperature-dependent data

Data

	C10	C01	D1
1	0.24	0.01	0

OK Cancel

Şekil 3.5 Kauçuk malzeme özellikleri

Kauçuğun hasar davranışını incelemek amacıyla, malzemenin yükleme ve boşaltma döngüleri sırasında sergilediği histerezis ve enerji kayıplarını göz önünde bulunduran Mullins Etkisi dikkate alınmıştır. Bu etki, elastomerlerin tekrarlı yüklemeler altındaki davranışlarını açıklamak için kritik öneme sahip olup, özellikle kauçuk malzemelerin histerezis çevrimlerindeki enerji kayıplarını karakterize etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan kauçuk türü kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerde kullanılan doğal kauçuk (NR) olarak belirlenmiştir. Doğal kauçuk, enerji yutma kapasitesi ve yüksek esneklik özellikleri nedeniyle sismik izolatörlerde tercih edilmektedir. Bu tür kauçuk, tekrarlı yüklemeler altında enerji yutma kapasitesine sahip olup, sismik etkiler

sırasında yük altında yüksek miktarda deformasyon kapasitesi sağlar. Böylece, hem dayanıklılık hem de enerji geri kazanımı açısından uygun bir malzeme olarak değerlendirilmiştir.

Mullins Etkisi'nin modellenmesinde kullanılan katsayılar olan r , m ve β , doğal kauçuğun tekrarlı yüklemelerdeki histerezis çevrimlerinde enerji kaybı ve deformasyon özelliklerini denetlemektedir. Bu katsayılar şu şekilde belirlenmiştir:

- $r=1,2$ - Kauçuğun maksimum deformasyon seviyesi ile ilişkili olup, yükleme sırasında maksimum enerji kaybını temsil eder.
- $m=1,2$ - Yükleme ve boşaltma döngülerindeki enerji kaybının etkisini belirler; kauçuk malzemenin esneklik kapasitesini ve her döngüde ortaya çıkan histerezis çevrimini kontrol eder.
- $\beta=0,4$ - Deformasyon döngüleri arasındaki enerjinin geri kazanımı ve kaybını denetler; dolayısıyla, kauçuğun enerji geri kazanım verimliliğini ve histerezis çevrimindeki tepkisini düzenler.

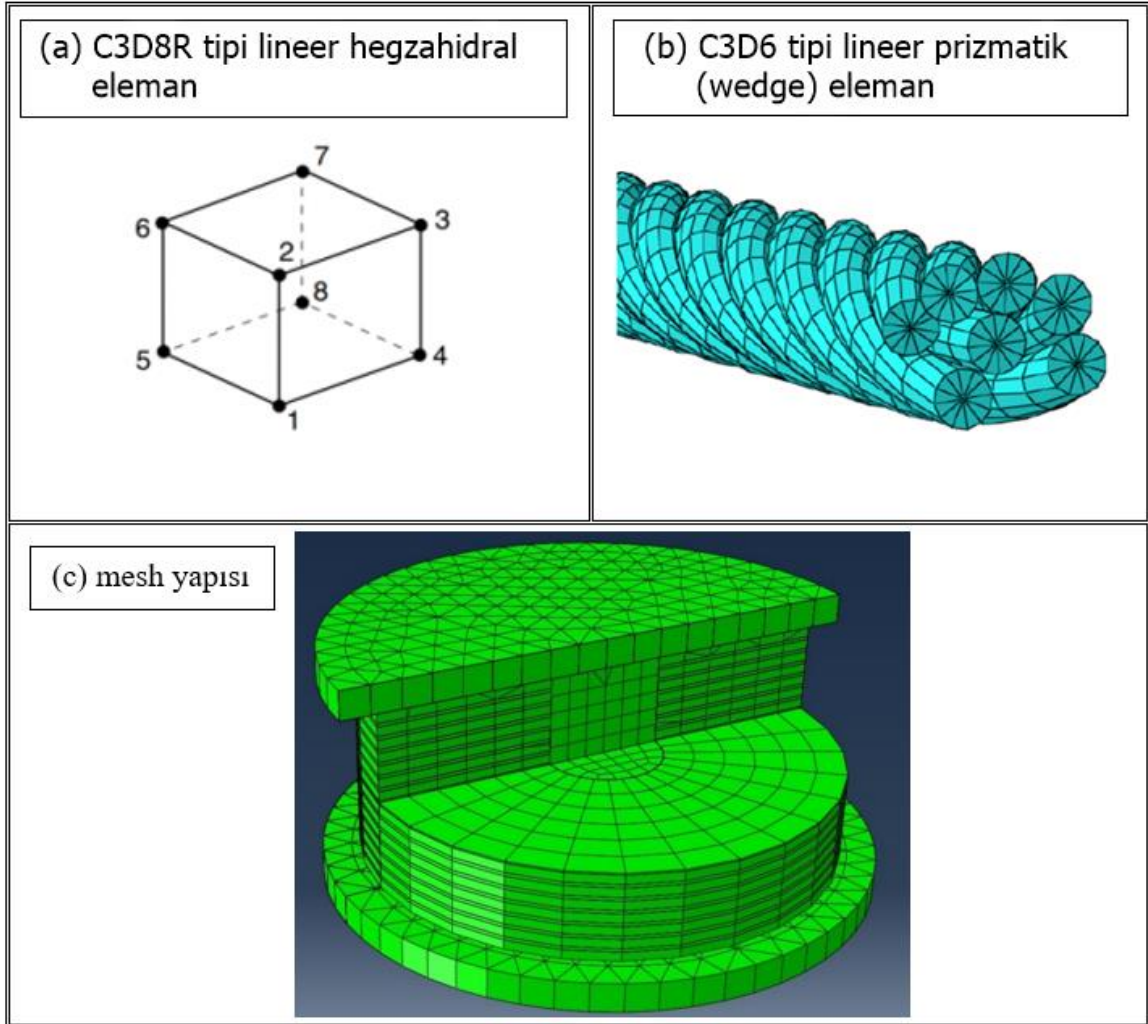
Bu katsayılar, doğal kauçuğun yükleme ve boşaltma döngüleri boyunca oluşan enerji kaybını ve malzemenin tekrar eden gerilmelere karşı dayanıklılığını analiz etmek amacıyla belirlenmiştir. Sismik izolatörlerde kullanılan bu tür doğal kauçuk, yüksek esneklik ve enerji yutma kapasitesi nedeniyle tekrar eden yüklemelerde stabil kalabilmekte ve yapısal hasarı minimuma indirerek enerji kaybını kontrol edebilmektedir.

Kaynak olarak kullanılan referans (Guo vd. 2023), bu katsayıların seçimi ve uygulanması sırasında Mullins Etkisi'nin doğal kauçuk üzerindeki etkilerini açıklamaktadır ve katsayı değerlerinin yükleme boşaltma döngülerindeki enerji kayıplarını optimize etmek amacıyla belirlendiğini ortaya koymaktadır.

3.1.3 Mesh Yapısı

Bu çalışmada, sismik izolatörün sonlu eleman modeli Abaqus yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Modelde toplam 12477 düğüm ve 6148 eleman bulunmaktadır:

- 2624 adet C3D8R tipi lineer hegzahidral eleman (a)
- 1172 adet C3D6 tipi lineer prizmatik (wedge) eleman (b)
- 2352 adet C3D8RH tipi lineer hegzahidral hibrit eleman



Şekil 3.6 Sismik izolatörde kullanılan mesh yapıları

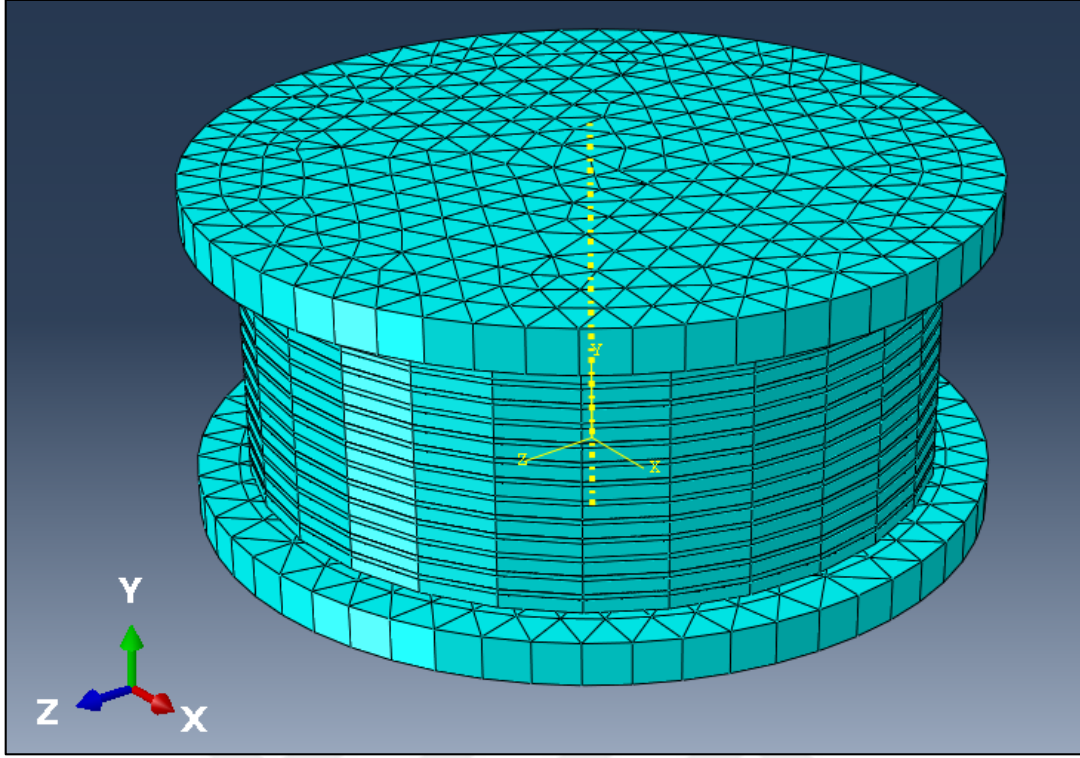
C3D8R elemanları , 3 boyutlu yapısal analizlerde, özellikle büyük geometrik modellerin çözüm hızını artırmak amacıyla kullanılır. Lineer hegzahidral yapısı sayesinde prizmatik ve küp şekilli yapılarda daha doğru sonuçlar verir. Azaltılmış entegrasyon yöntemiyle çalıştığı için hesaplama maliyeti düşüktür, bu da karmaşık ve büyük modellerde performansı artırır. Genellikle gerilme analizi, deformasyon takibi ve çeşitli malzeme özelliklerinin incelendiği durumlarda tercih edilir (Nader vd. 2015).

C3D6 tipi lineer prizmatik (wedge) eleman (b), üçgen tabanlı prizmatik şekil alan elemandır ve genellikle üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde kullanılır. Bu eleman, özellikle karmaşık geometri ve sınır koşullarına sahip yapılar için uygundur, çünkü hem doğrusal hem de prizmatik yapıların modellenmesine olanak tanır. C3D6 elemanları, doğrusal elastik analizlerde, özellikle yapıların yangın veya aşırı yük gibi durumlar altında davranışlarını incelemek için kullanılır. Bu tür elemanlar, eleman sayısının azaltılması gereken durumlarda daha verimli çözüm sunarak hesaplama yükünü hafifletir. Bu eleman, yangın testlerinde kablo gerginliklerinin kırılma davranışlarını incelemek için kullanılmıştır. C3D8R tipi lineer hegzahidral eleman, C3D6 tipi lineer prizmatik (wedge) eleman ve C3D8RH tipi lineer hegzahidral hibrit elemanları bir arada kullanılmaktadır. C3D8R elemanları, üç boyutlu katı modeller için genellikle daha doğru ve verimli sonuçlar verirken, C3D6 elemanları daha kompleks geometri veya kısıtlamalarla karşılaşılan durumlarda tercih edilebilir. C3D8RH tipi hibrit elemanlar ise, çözümdeki deformasyonları ve gerilme dağılımlarını iyileştirmek için kullanılır. Bu üç eleman tipi birlikte kullanılarak, modelin çözüm süresi optimize edilirken, doğruluk da artırılmaktadır (Hosseini vd. 2015).

Her bir parça otomatik olarak ve ayrı ayrı mesh edilmiştir, böylece bileşenlerin geometrik ve malzeme özellikleri en doğru şekilde temsil edilmiştir. Meshleme sırasında çelik plakalar ve kauçuk katmanlar için global seed boyutu yaklaşık 25 mm olarak belirlenmiştir. Kurşun çekirdek için ise daha hassas sonuçlar elde etmek amacıyla global seed boyutu yaklaşık 15 mm olarak seçilmiştir.

Çelik plakalar C3D8R tipi elemanlarla, kurşun çekirdek ve kauçuk katmanlar ise hibrit formülasyona sahip C3D8RH tipi elemanlarla modellenmiştir. Kuvvetin uygulandığı plakada ise karmaşık geometrik şekillerin daha etkin meshlenebilmesi için C3D6 tipi wedge elemanlar kullanılmıştır. Hibrit elemanlar, neredeyse sıkıştırılamaz malzemelerin (kurşun ve kauçuk gibi) doğru şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır.

Bu meshleme yaklaşımı, modelin genel doğruluğunu artırmış ve her bileşenin kendine özgü mekanik davranışının daha iyi temsil edilmesini sağlamıştır. Bu mesh yapısında hibrit, prizmatik, lineer hegzahidral eleman bulunmaktadır ve Şekil 3.7’de izolatörün mesh görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.7 İzolatörün mesh görünümü

3.1.4 Sınır Şartları

Histerezis çevrim testinin gerçekleştirilmesi amacıyla uygulanan test prosedürü iki ana adımdan oluşmaktadır. İlk adımda, üst yük plakasına 8 saniyelik bir süre boyunca 5.4 MPa büyüklüğünde sabit bir -y yönünde basınç uygulanmıştır. Bu dikey yükleme, izolatörün kullanımda karşılaştacağı tipik bir binadan elde edilen değerler doğrultusunda belirlenmiştir. Bina modelleme sırasında, toplam ağırlığı 915 ton olan bir bina dikkate alınmıştır. Binanın yük taşıyıcı sisteminde 10 kolon bulunmaktadır. Her bir kolona düşen yük, binanın toplam ağırlığının kolon sayısına bölünmesiyle hesaplanmış ve 91,5 ton olarak belirlenmiştir. Bu değer Newton cinsinden yaklaşık olarak 897308,475 N olarak ifade edilmiştir. İzolatörlerin temas ettiği alan her bir izolatör için 166190,25 mm² olarak belirlenmiştir. Kolon başına düşen toplam yük göz önünde bulundurularak, bu yük izolatör başına düşen basınç değerine dönüştürülmüş ve her izolatöre 5,4 MPa büyüklüğünde bir basınç uygulanmıştır. Bu basınç -y yönündedir. Bu yükleme, izolatörün dikey yöndeki sıkıştırma etkilerini ve başlangıç gerilme-deformasyon yanıtını değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, malzemenin dikey yöndeki yük taşıma kapasitesi ve başlangıç aşamasındaki mekanik tepkileri detaylı bir şekilde

incelenmiştir. Bu prosedür, izolatörün gerçek kullanım koşullarına yakın bir ortamda test edilmesini ve performans değerlendirmelerinin güvenilir şekilde yapılmasını sağlamıştır. (Harwood 2007, Svensson 1981).

İkinci adımda ise, dikey yüke ek olarak izolatöre +x yönünde 260 mm'lik yatay yer değiştirme sağlayan döngüsel bir yük uygulanmıştır. Histerezis döngü testinde izolatörlere uygulanan 260 mm'lik yatay yer değiştirme seçilmesinin sebebi, izolatörlerin gerçek kullanım koşullarında karşılaşılabileceği maksimum yer değiştirme taleplerini temsil etmektedir. Bu değer, özellikle yapıların sismik yalıtım sistemlerinin tasarımında dikkate alınan yönetmeliklere ve mühendislik gereksinimlerine dayanır.

Birçok çalışmada, sismik izolatörlerin maksimum yer değiştirme kapasiteleri tasarım kriterleri ile ilişkilendirilmiştir. Örneğin, Meng ve arkadaşlarının çalışmasında, bir izolasyon sisteminin maksimum yer değiştirme kapasitesinin 310.32 mm olduğu, bu değer güvenli tasarım sınırı olan 330 mm'nin altında kaldığı ve sistemin güvenilir şekilde çalıştığı ifade edilmiştir (Meng vd. 2022). Benzer şekilde, yüksek sönümleme kauçuk izolatörler için yapılan tasarımlarda genellikle 200 mm ile 300 mm arasında değişen yer değiştirme değerlerinin kullanıldığı görülmektedir (Farkhan 2017).

260 mm'lik yer değiştirme değeri, bu tür sistemlerin sınırlarına yakın bir değer olup, izolatörlerin aşırı yük ve yer değiştirme altında mekanik özelliklerini incelemek ve sistemin stabilitesini değerlendirmek amacıyla seçilmiştir. Bu seçim, yapıların tasarım aşamasında yapılan modellemelerden ve izolatörlerin sismik performansını optimize etmeye yönelik geçmişteki deneyimlerden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, bu değer seçimi, izolatörlerin deprem etkisi altında maruz kalabileceği maksimum yer değiştirmelere karşı uygun bir güvenlik marjı bırakılarak yapılmış bir tasarım yaklaşımını temsil etmektedir. Böylece, test koşulları gerçek kullanım senaryolarını başarılı bir şekilde simüle eder ve sistemin doğrulamasını sağlar.

Yer değiştirme ABAQUS yazılımında izolatörün üst plakasına verilmiştir. Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Bu yer değiştirme değeri, izolatörün kullanım senaryosu olan binanın

sismik yükler altında ulaşabileceği maksimum yatay yer değiştirme kapasitesini simüle etmek için belirlenmiştir. 260 mm, bina modeli üzerinde yapılan analizler sonucu elde edilen bir referans olup, yapının yüksek şiddetli bir deprem veya benzeri büyük yatay yüklenme durumunda maksimum sapma miktarını temsil etmektedir. Bu sınır değer, izolatörün yatay doğrultudaki esneklik ve enerji yutma kapasitesini incelemeyi ve statik ile dinamik yükler arasındaki geçiş davranışlarını gözlemlemeyi amaçlamaktadır. Bu yatay yükleme ile izolatörün sismik etkiler altındaki performansı değerlendirilmiş ve izolatörün histerezis çevriminde gösterdiği direnç ve enerji geri kazanım özellikleri analiz edilmiştir. İzolatörün alt plakası ile sabitlenmiştir. Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

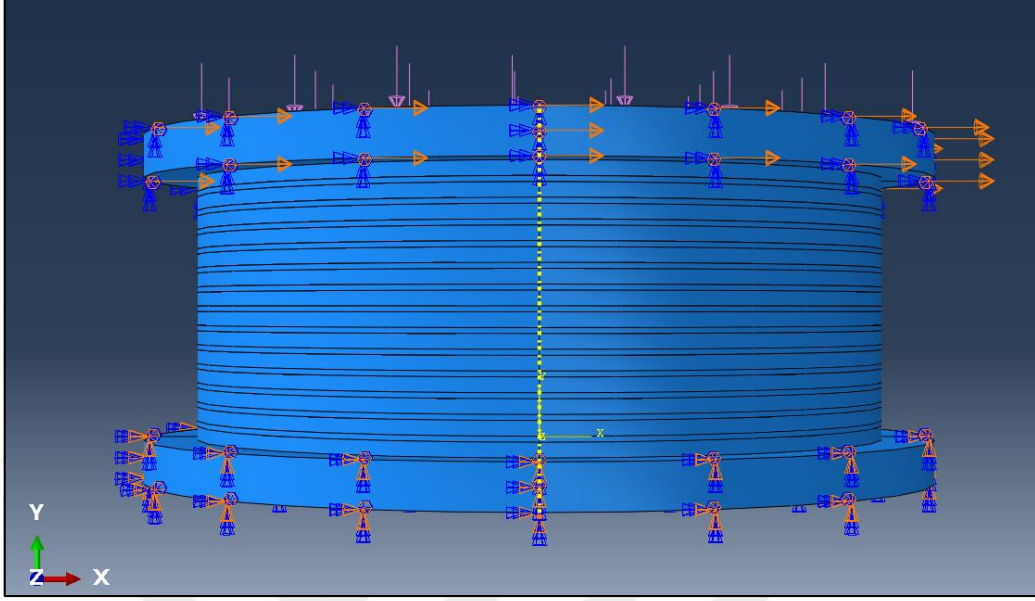
Bu çalışmada Z ekseninde yer değiştirme veya yükleme eklenmemesinin temel nedeni, test prosedürünün izolatörlerin kullanımda karşılaşılabilecek gerçek senaryoları simüle etmeye odaklanmasıdır. Çalışmanızda Z eksenini yatay olarak tanımlandığından, bu yönde izolatörlerin enerji sönümlenme kapasitesi veya hareket sınırlarının test edilmesine gerek duyulmamıştır. Bunun yerine, izolatörlerin dikey yük taşıma kapasitesi (X ve Y eksenleri) ile yatay enerji sönümlenme performansı (genellikle deprem gibi yatay kuvvetler) odak noktası olmuştur.

Genellikle izolatör sistemleri, yatay yer değiştirmeler ve hareketlerin sönümlenmesi için tasarlanır ve test edilir. Z eksenini boyunca bir yer değiştirme olmadığı durumlar, bu eksenin genellikle sabit bir yüzey veya yapı bağlantısı boyunca hareket etmeyecek şekilde tasarlandığı anlamına gelir. Bu nedenle, izolatörlerin performansı üzerinde dikkate değer bir etkisi olmadığı için bu yönde test yapılması gereksiz görülmüştür. Örneğin, Shahadat ve arkadaşlarının çalışmasında, statik yüklerin yer değiştirme üzerindeki etkilerini sıfırlamaya odaklanan bir titreşim yalıtım sistemi incelenmiş, Z eksenindeki yer değiştirme ihmal edilmiştir (Shahadat vd. 2010).

Bu bağlamda, çalışmanızdaki prosedür Z ekseninde yer değiştirme eklenmeden, izolatörlerin daha kritik olan X ve Y eksenlerindeki mekanik ve sismik performansını doğru şekilde analiz etmek için tasarlanmıştır.

Bu iki adımda uygulanan test aşamaları, izolatörün hem dikey hem de yatay doğrultularda yük altındaki davranışını kapsamlı bir şekilde analiz etmeye olanak

tanımaktadır. Şekil 3.8'de, sınır şartları gözükmemektedir.



Şekil 3.8 İzolatör modeli için ABAQUS sınır şartlar

4. BULGULAR

4.1 Analitik İnceleme

4.1.1 Logaritmik Gerinim Dağılımı ve Deformasyon Analizi

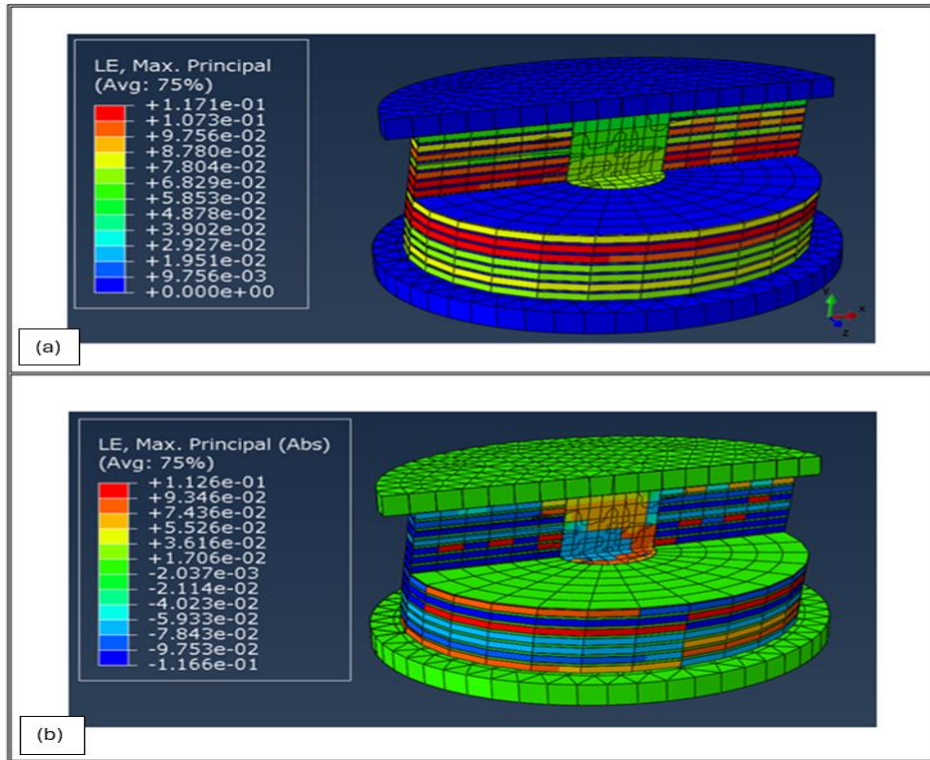
Logaritmik gerinim, deformasyon sürecinde gerinim yolunun etkisini dikkate alarak nihai gerinimi ölçmek için uygun bir parametredir. Maksimum yer değiştirme durumunda, kurşun çekirdek bölgesinde aktif akma meydana gelmiş ve bu deformasyon, kurşun çekirdeğe bitişik çelik plakalara iletilmiştir (Neff vd. 2015). Şekil 4.1'de a kısmında görüldüğü üzere, maksimum logaritmik gerinim değeri yaklaşık 0.1171 olarak kırmızı bölgelerde kaydedilmiştir. Bu değer, kurşun çekirdeğin çevresinde ve çelik plaka-kauçuk plaka birleşim yerlerinde gözlenmiştir. Gerinim değerleri, izolator boyunca azalan bir trend göstermektedir; sarı ve turuncu tonlarda gösterilen alanlarda yaklaşık 5.853×10^{-2} ile 9.756×10^{-2} arasında logaritmik gerinimler kaydedilmiştir. Yeşil tonlarda, logaritmik gerinimin yaklaşık 1.951×10^{-2} seviyesine kadar düştüğü bölgeler bulunmaktadır.

Logaritmik gerinim ilk olarak alt kauçuk plakada gözlenmiş ve maksimum yer değiştirme anında tüm kauçuk plakalara yayılmıştır. Buna karşılık, çelik plakalar üzerinde belirgin bir logaritmik gerinim oluşmamış olup, deformasyonun büyük bölümü kauçuk plakalarda yoğunlaşmıştır. Çelik plakaların bulunduğu mavi alanlarda ise gerinim yaklaşık sıfır olarak gözlenmiştir.

Abaqus programında ABS (Absolute) fonksiyonu, bir değer mutlak değerini alarak işaret farkını ortadan kaldırır ve sadece büyüklüğü hesaba katar. Bu fonksiyon, özellikle gerilme ve gerinim analizlerinde, malzemenin maruz kaldığı yüklerin büyüklüklerini pozitif bir ölçekte değerlendirmek için kullanılır. Mutlak logaritmik gerilme, negatif ve pozitif gerilme değerlerini aynı referans noktasına çekerek bir yapıdaki en kritik bölgelerin belirlenmesine yardımcı olur. Bu, özellikle malzeme davranışının modellenmesinde ve analiz edilen alanlarda maksimum gerilme noktalarının bulunmasında önemli bir rol oynar.

Mutlak logaritmik gerilme analizinde, gerilme başlangıçta kurşun çekirdeğin köşelerinde çapraz bir şekilde oluşmaya başlamış ve bu da sol alt ile sağ üst köşeler arasında bir gerilme yoğunlaşması meydana getirmiştir. Bu durum, malzemenin ilk olarak köşe bölgelerinde gerilmeye duyarlı olduğunu ve bu bölgelerdeki deformasyonun erken başladığını gösterir. Maksimum yer değiştirme anında ise mutlak logaritmik gerilmenin kurşun çekirdeğin ortasında ve izolatorün çekme köşelerinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, malzeme üzerindeki yüklerin kurşun çekirdek boyunca yayıldığını ve en yüksek gerilmenin ortada yoğunlaştığını ifade eder. Şekil 4.1'de b kısmında gösterilmiştir.

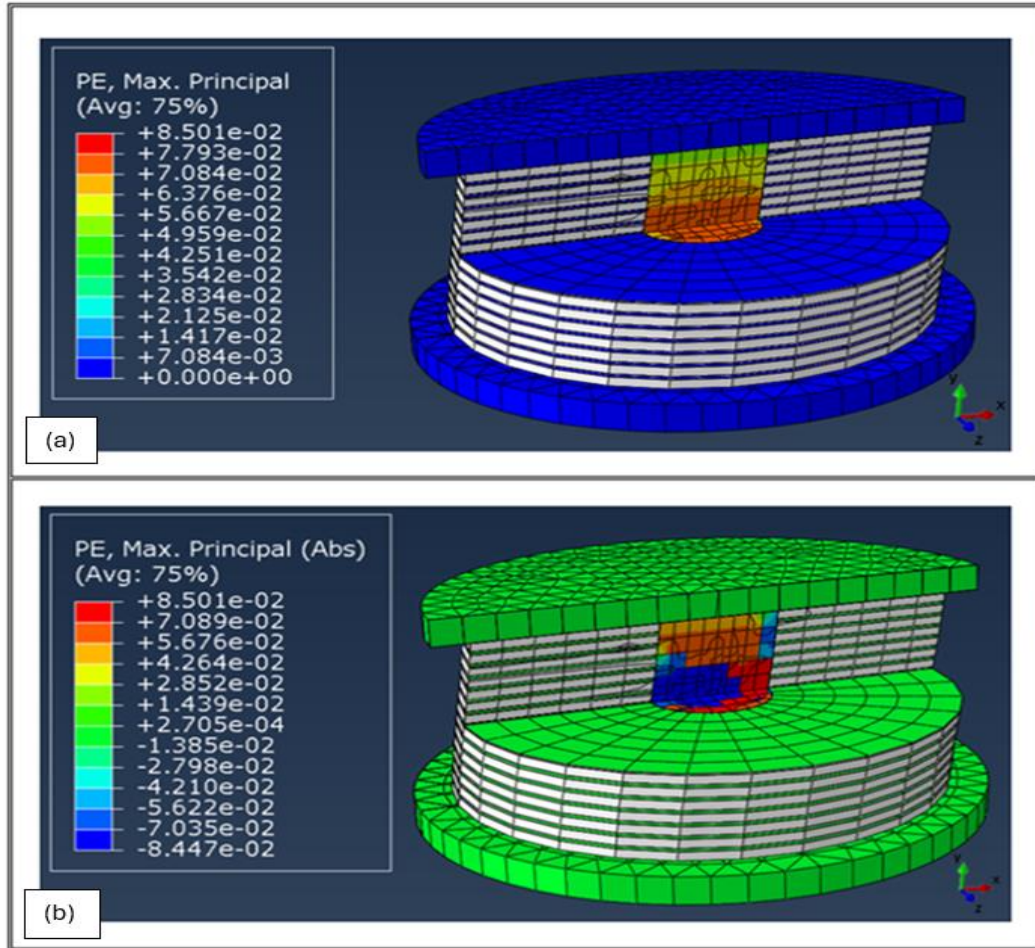
Sonuç olarak, mutlak logaritmik gerilme analizinde, malzemenin yük taşıma kapasitesinin ve deformasyona maruz kalan bölgelerin belirlenmesi sağlanır. Kauçuk plakalar deformasyonu emerken, çelik plakalar bu deformasyona direnç göstermektedir. Kurşun çekirdekte ise gerilmenin yoğunlaştığı kritik noktalar, özellikle deformasyonun başladığı köşeler ve maksimum yükleme anında çekirdeğin ortasında ortaya çıkmıştır. Bu analiz, izolator tasarımı malzeme seçiminin ve geometrik optimizasyonun önemini vurgular.



Şekil 4.1 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatorün logaritmik deformasyonu

4.1.2 Gerilme Dağılımı

Bir deformasyon kuvveti çekildiğinde, deforme olmuş cisim eski boyutuna ve şekline geri dönemez; bu olgu plastik gerinim olarak adlandırılır (Camilleri vd. 2006). Bu çalışmada plastik gerinim, kurşun çekirdekte yoğunlaşmış olup, maksimum plastik gerinim değeri yaklaşık 8.501×10^{-2} seviyesine ulaşmıştır. Plastik gerinim, kurşun çekirdeğin merkezine yakın bölgelerde en yüksek düzeydedir ve dış kenarlara doğru azalır. Çelik ve kauçuk plakalar üzerinde ise plastik gerilme oluşmamış olup, deformasyon bu bölgelerde elastik sınırlar içinde kalmıştır. Böylece, plastik deformasyonun yalnızca kurşun çekirdekte yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün plastik deformasyonu

4.1.3 Mises Gerilmesi Dağılımı

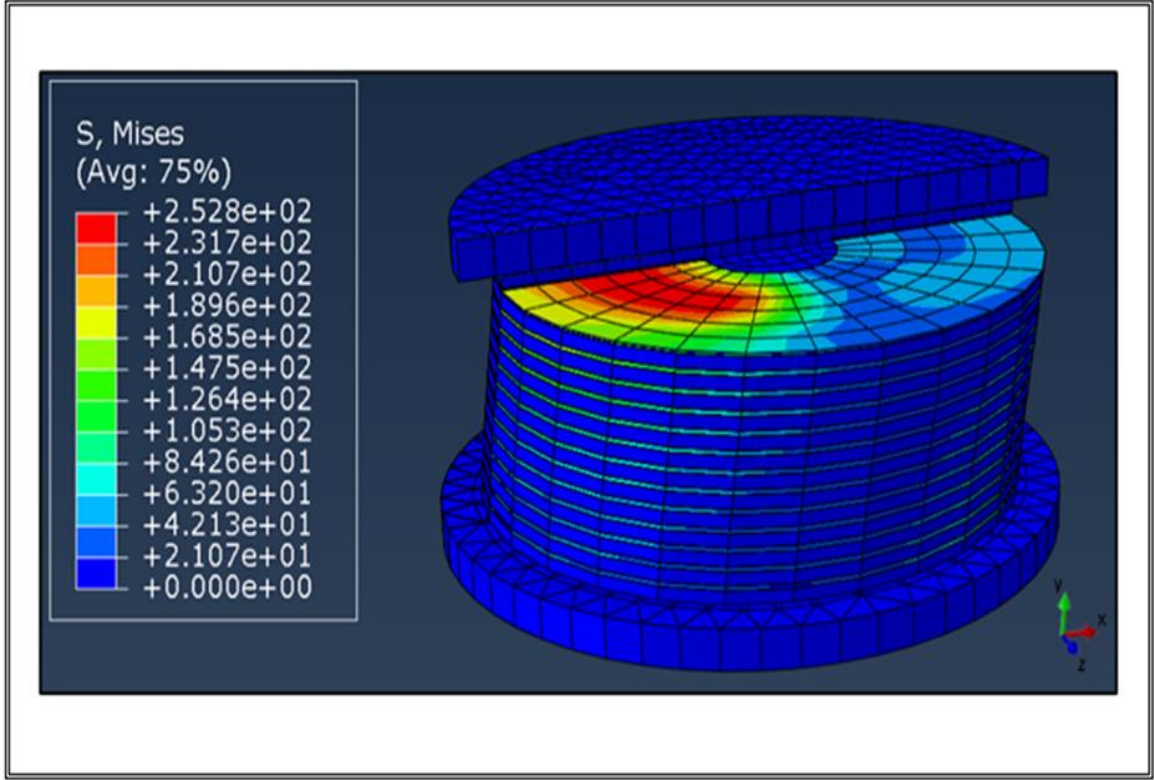
Mises gerilmesi, bir malzemenin çok eksenli gerilme durumu altında akma sınırına ulaşmış olup, maksimum değeri yaklaşık 252 MPa olarak gözlemlenmiştir. Bu, çelik malzemenin akma gerilimi sınırına ulaştığını göstermektedir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, Mises gerilmesinin kurşun çekirdekte değil de çelik plaka çevresinde yoğunlaşmasının temel nedeni, kurşun çekirdeğin malzeme özellikleriyle ilişkilidir. Kurşun, düşük elastik modülü ve düşük akma gerilimi nedeniyle, elastik sınırını hızla aşmış plastik deformasyon bölgesine geçmektedir. Bu nedenle, kurşun çekirdekte von Mises gerilmesi yerine plastik gerilim dağılımı daha belirgin hale gelir. Von Mises gerilmesi, malzeme elastik sınırları içinde kaldığında anlamlı bir metrikken, kurşunun plastik deformasyon özellikleri baskın hale geldiğinde bu gerilmeler gözle görülür şekilde azalabilir.

Öte yandan, çelik plakalar daha yüksek elastik modüle ve akma dayanımına sahip olduğundan, von Mises gerilmeleri burada daha yoğun bir şekilde gözlemlenir. Çelik malzeme, izolatörün yük taşıma sırasında oluşan çok eksenli gerilmelere dayanırken, bu gerilmeler elastik sınırın yakınında yoğunlaşır ve maksimum von Mises gerilmesi değerlerine ulaşır. Çelik-plastik ara yüzeyde oluşan bu gerilmeler, özellikle yük aktarımı sırasında plaka bölgesinde birikim göstermektedir.

Benzer bir analiz, Bahaa Eddin Ghrewatia ve arkadaşlarının çalışmasında da ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, kurşun çekirdeğin yerine kauçuk malzeme kullanıldığında, von Mises gerilmelerinin çelik plaka çevresinde yoğunlaştığı ve çekirdek bölgesinde plastik deformasyonun baskın olduğu gösterilmiştir. Bu durum, farklı malzeme özelliklerinin gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır (Ghrewati vd 2022).

Sonuç olarak, kurşun çekirdekte von Mises gerilmesinin gözlemlenememesi, kurşunun malzeme özellikleri ve deformasyon kapasitesine bağlıdır. Kurşun, plastik deformasyon

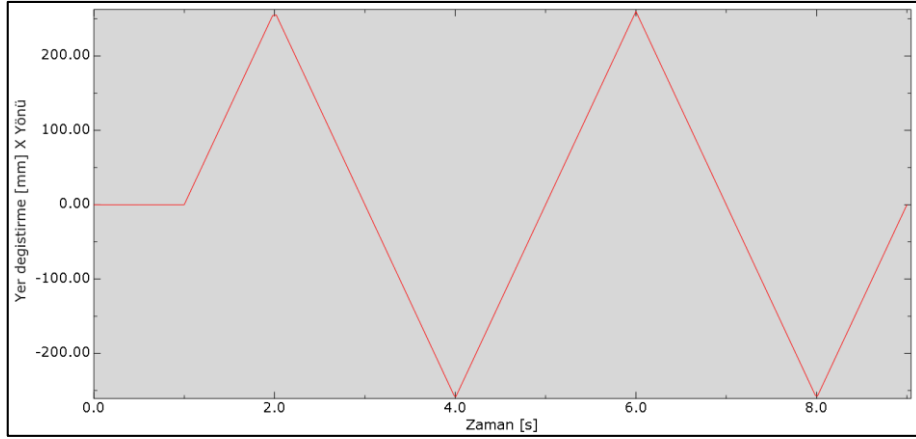
davranışı gösterirken, çelik plakalar yüksek elastik sınırları nedeniyle von Mises gerilmesi açısından belirgin değerler sunar. Bu fenomen, kurşun çekirdeğin enerjiyi sönümleme mekanizmasının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.



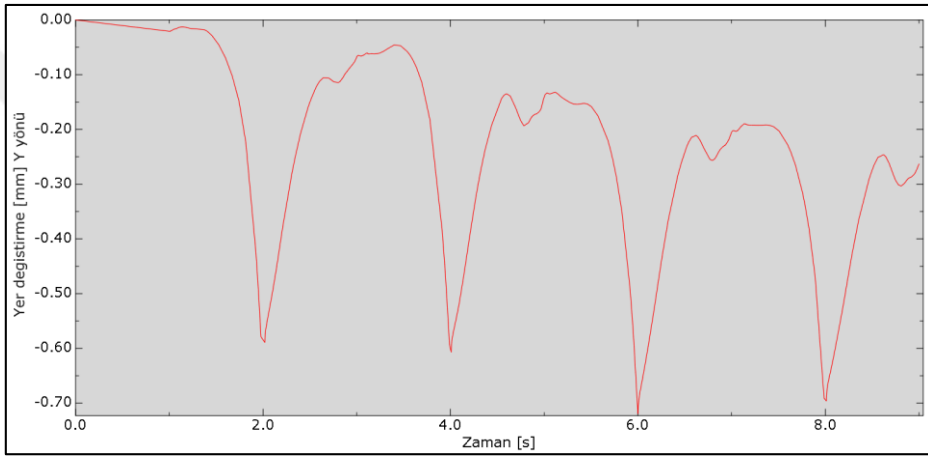
Şekil 4.3 Mises gerilmesi

4.1.4 X ve Y Yönlerinde Yer Değiştirme

Şekil 4.4'te, X yönündeki yer değiştirme değerlerinin zamanla nasıl değiştiğini gösteren bir grafikte, maksimum yer değiştirme değeri 260 mm olarak kaydedilmiştir. Şekil 4.5'te, zamanla Y yönündeki yer değiştirme değerlerini göstermektedir. Analiz sonucunda, Y yönünde maksimum yer değiştirme değeri yaklaşık olarak -0,7 mm olarak ölçülmüştür. Bu yer değiştirme, yapıdaki yükleme koşullarının etkisini ve izolatörün deformasyon davranışını temsil etmektedir. Negatif değerler, Y yönünde ters yönde gerçekleşen yer değişikliklerini ifade etmektedir ve grafik boyunca bu yer değiştirmelerin periyodik bir şekilde tekrarlandığı görülmektedir.



Şekil 4.4 X yönünde yer değiştirme zaman grafiği



Şekil 4.5 Y yönünde yer değiştirme zaman grafiği

4.2 Enerji Sönümleme Kapasitesi ve Histerezis Davranışı

Şekil 4.6'da sunulan histerezis diyagramı, kurşun çekirdekli kauçuk izolatorlerin yer değiştirme ve kuvvet arasındaki ilişkiyi bir yükleme-boşaltma döngüsü boyunca sergilemektedir. Bu diyagramda, kuvvet-yer değiştirme döngüsü boyunca oluşan kapalı alan, izolatorün sismik olaylar sırasında enerjiyi sönümleme kapasitesinin bir ölçütü olarak yorumlanabilir. Analiz sonucunda, yer değiştirme miktarı artıkça izolatorün yüksek bir enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

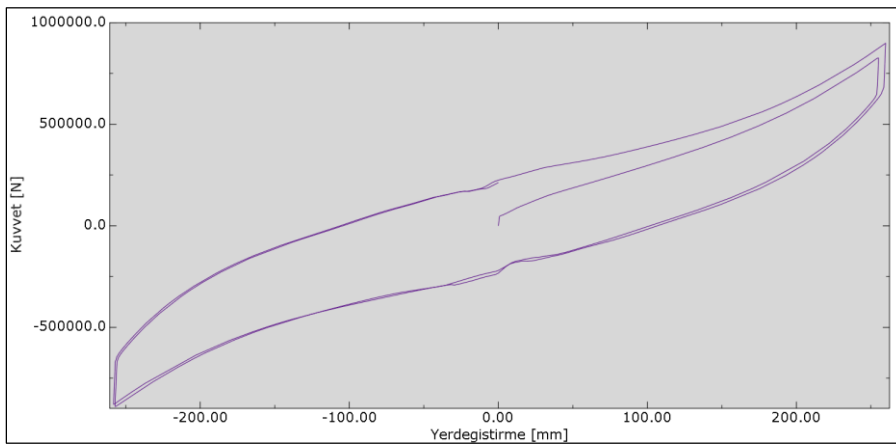
Histerezis diyagramındaki eğriler, yükleme ve boşaltma döngüleri arasında belirgin farklar ortaya koymaktadır. Bu farklar, sistemin iç sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıplarını ve plastik deformasyon varlığını göstermektedir. İlk yükleme sırasında, pozitif ve negatif yer değişimlerde kuvvetin yaklaşık ± 260 mm'ye ulaştığı belirlenmiştir.

Kuvvet değerleri ise minimum -880 kN, maksimum 890 kN olarak ölçölmüştür. Bu bulgular, izolatörün yüksek yer değiştirme kapasitesine ve sismik olaylar sırasında büyük hareketleri absorbe etme yeteneğine sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Histerezis diyagramında merkezdeki açıklık, izolatörde meydana gelen plastik deformasyonu ve yükleme-boşaltma döngüsünde elastik sınırın aşıldığını işaret etmektedir. İzolatörün bu plastik deformasyon kapasitesi, sismik yükler altında yapıyı koruma etkinliğini artırmaktadır.

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin viskoelastik özellikleri de diyagramda ortaya çıkan önemli bir özelliktir. Geniş histerezis döngüsü, bu izolatörlerin sismik yükler altında titreşimleri azaltma ve enerjiyi sönümleme kapasitesini vurgulamaktadır. Diyagramdaki kapalı alan, izolatörün enerji sönümleme kapasitesinin bir göstergesi olup, bu enerji kaybı yapıya aktırılan titreşimleri azaltarak yapısal bütünlük sağlamaktadır.

Sonuç olarak, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin histerezis davranışı, sismik yükler altında etkili bir enerji sönümleme ve titreşim azaltma kapasitesine sahip olduklarını ortaya koymaktadır. Bu özellikler, sismik olayların yapılar üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirerek potansiyel hasarları azaltmakta ve izolatörün etkili bir sismik yalıtım elemanı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.6 Tasarlanan kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün histerezis diyagramı

4.3 Malzeme ve Geometrinin Etkisi

Analiz sonucunda, kullanılan malzemelerin ve izolatör geometrisinin, sismik yükler altında izolatörün performansını doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. İzolatörde kullanılan çelik, kurşun ve kauçuk malzemelerin her biri belirli mekanik özellikler ile modellenmiştir. Çeliğin yüksek elastik modülü ve akma gerilimi, yapı bütünlüğünün korunması için gerekli olan mukavemeti sağlarken, kurşunun düşük akma gerilimi ve elastik modülü, sismik yalıtım açısından kritik olan enerji sönümlene yeteneğine katkıda bulunmaktadır. Kauçuk ise hiperelastik özellikleriyle yük altındaki deformasyonlarda geri kazanım sağlayarak izolatörün esnek davranışını desteklemektedir.

Kurşun çekirdeğin yüksek enerji sönümlene kapasitesi, plastik deformasyona girerek enerji kaybını sağlamakta ve böylece sismik yüklerin yapıya iletilmesini azaltmaktadır. Çalışmada kullanılan 405 mm dış çap, 100 mm kurşun çekirdek çapı, 12 adet kauçuk ve 13 adet çelik plaka gibi tasarım parametreleri, hem izolatörün yer değiştirme kapasitesini hem de yük taşıma yeteneğini optimize etmek amacıyla belirlenmiştir. Bu geometrik özellikler, izolatörün yüksek enerji sönümlene kapasitesini korurken, büyük yer değiştirmelere karşı direnç sağlamasına olanak tanımaktadır.

4.4 İç Gerilme

Analizlerde elde edilen logaritmik ve plastik gerinim dağılımları, izolatörün yükleme altında gösterdiği gerilme ve deformasyon davranışlarını açıkça ortaya koymuştur. Logaritmik gerinimin kurşun çekirdeğin köşelerinden başlayarak tüm yapıya yayıldığı, plastik gerinimin ise sadece kurşun çekirdek üzerinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Maksimum logaritmik gerinim değeri 0.1171 olarak ölçülmüş olup, bu değerin özellikle kurşun çekirdek ve çelik plaka birleşim yerlerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Plastik gerinimin maksimum değeri 0.08501 olup, bu değer kurşun çekirdeğin merkezine yakın bölgelerde gözlenmiş ve çelik ile kauçuk plakalar üzerinde plastik deformasyon oluşmadığı belirlenmiştir. Bu sonuç, çelik ve kauçuk plakaların elastik sınırlar içerisinde kaldığını ve kurşun çekirdeğin, sismik yalıtım açısından gerekli olan plastik deformasyonu üstlendiğini göstermektedir.

Von Mises gerilme analizinde, maksimum gerilme değeri 252 MPa olarak kaydedilmiştir ve bu değer, malzemenin akma sınırına ulaştığını göstermektedir. Bu durum, kurşun çekirdek ve çevresindeki çelik plakalar üzerinde yüksek gerilmelerin oluştuğunu ve malzemenin akma durumuna girdiğini göstermektedir.

4.5 İzolatörün Karakteristik Özelliği ve Mekanik Performansı

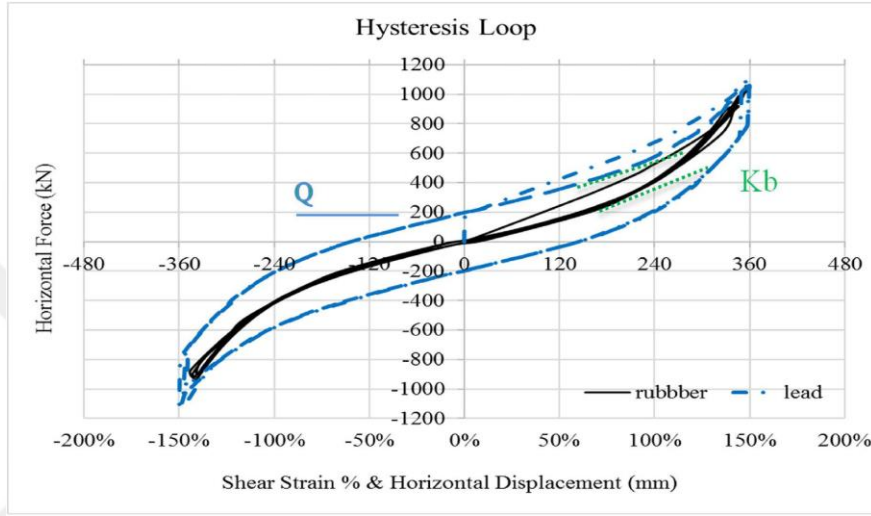
Ghrewati ve arkadaşlarının çalışmasında da benzer bir modelleme kullanılmış, izolatörlerin mekanik davranışları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ghrewati ve arkadaşları, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin sismik yalıtım performansını analiz etmek amacıyla farklı gerinim ve gerilme bileşenlerini detaylandırmışlardır. Çalışmalarında, logaritmik ve plastik gerinim bileşenleri yanı sıra kayma gerilmesi ve Mises gerilmesi gibi kritik mekanik parametreler de incelenmiştir. Ghrewati ve arkadaşlarının elde ettiği maksimum Mises gerilmesi 250 MPa, maksimum yatay kuvvet 1112.9 kN ve minimum yatay kuvvet -1143.15 kN olarak raporlanmıştır. Bununla birlikte, maksimum ve minimum kayma gerilmesi sırasıyla 141.846 MPa ve -120.344 MPa olarak belirtilmiştir.

Bu değerler, izolatörlerin büyük kuvvet ve yer değiştirme kapasitelerine sahip olduğunu ve sismik olaylar sırasında yüksek enerji sönümleyici bir performans sergileyebildiğini göstermektedir. Aynı çalışmada, izolatörlerin farklı yükleme yönlerinde (hareket, dikey ve yan) gerilmeler de analiz edilmiştir. Örneğin, maksimum gerilme bileşenlerinden biri olan hareket yönündeki gerilme 634.076 kN olarak kaydedilmiş, bu değer sismik hareketler sırasında büyük kuvvetlerin absorbe edilebileceğini göstermektedir. Aynı şekilde, dikey ve yan yönlerde elde edilen gerilme bileşenleri de sistemin mekanik dayanıklılığını doğrular niteliktedir.

Ancak, bu çalışmada yapılan analizler Ghrewati ve arkadaşlarının çalışmasına kıyasla daha verimlidir. Özellikle enerji sönümleme kapasitesinin detaylı incelenmesi ve sismik yalıtım performansının artırılması üzerine yapılan optimizasyon çalışmaları, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün performansını daha ileri bir seviyeye taşımıştır. Ghrewati ve arkadaşlarının çalışmasında raporlanan yatay kuvvetler maksimum 1112.9 kN ve minimum -1143.15 kN olarak belirtilirken, bizim çalışmamızda bu kuvvetlerin daha

etkin bir şekilde dağıldığı ve enerji sönümleme kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışmada izolatörün mekanik performansı Ghrewati ve arkadaşlarının bulgularıyla uyumlu olsa da, yapılan optimizasyonlar sayesinde daha yüksek verimlilik sağlanmıştır. Şekil 4.7’de Ghrewati ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın histerezis diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.7 Ghrewati ve arkadaşlarının yaptığı çalışma

5. MEKANİK ANALİZ

Bu çalışmada, kurşun çekirdekli kauçuk izolatör (LRB) modeli üzerinde kapsamlı bir mekanik analiz gerçekleştirilmiştir. İzolatörün geometrik tasarımı, malzeme özellikleri, sınır koşulları ve yükleme senaryoları detaylı bir şekilde tanımlanmış ve simülasyonlar aracılığıyla analiz edilmiştir. Amaç, izolatörün sismik olaylar sırasında sergilediği davranışı anlamak ve özellikle enerji sönümleme kapasitesini değerlendirmektir. Elde edilen sonuçlar, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin sismik yalıtım alanında etkin ve güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

5.1 Logaritmik ve Plastik Gerilim Dağılımı

Analiz sonuçlarına göre, maksimum logaritmik gerilim değeri yaklaşık 0,1171 olarak kurşun çekirdeğin çevresinde ve çelik plaka-kauçuk plaka birleşim noktalarında tespit edilmiştir. Bu yüksek gerilim değerleri, malzemelerin elastik sınırlarını zorladığını ve özellikle kurşun çekirdekte aktif akmanın meydana geldiğini göstermektedir. Kurşun çekirdeğe bitişik çelik plakaların da bu deformasyondan etkilendiği, ancak gerilim değerlerinin izolatör boyunca azalan bir trend izlediği görülmüştür. Sarı ve turuncu tonlarda gösterilen alanlarda logaritmik gerilim değerleri 0,05853 ile 0,09756 arasında değişirken, yeşil tonlarda bu değerler yaklaşık 0,01951 seviyesine düşmüştür. Çelik plakalar üzerinde belirgin bir logaritmik gerilim oluşmamış, deformasyonun büyük ölçüde kauçuk plakalarda yoğunlaştığı ve çelik plakaların elastik sınırlar içinde kaldığı tespit edilmiştir.

Plastik gerilim analizinde, maksimum plastik gerilim değeri yaklaşık 0,08501 olarak kurşun çekirdeğin merkezine yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır. Plastik gerilim kurşun çekirdeğin dış kenarlarına doğru azaldığı, çelik ve kauçuk plakalar üzerinde ise plastik deformasyon oluşmadığı belirlenmiştir. Bu bulgular, deformasyon yükünün elastik sınırlar içinde kalarak kurşun çekirdeğe aktarıldığını ve enerjinin bu bölgede absorbe edildiğini göstermektedir. Kurşun çekirdeğin plastik deformasyon kabiliyeti, izolatörün enerji sönümleme kapasitesine önemli bir katkı sağlamaktadır.

Mises gerilmesi, bir malzemenin çok eksenli gerilme durumu altında akma sınırına

ulaşıp ulaşmadığını belirlemek için kullanılan ve tüm gerilme bileşenlerini tek bir eşdeğer gerilme değeri olarak ifade eden bir kriterdir (Nazarov, 2021). Bu çalışmada, Mises gerilmesi kurşun çekirdeğin çevresinde ve ona bitişik çelik plaka bölgesinde yoğunlaşmış olup, maksimum değeri yaklaşık 252 MPa olarak gözlemlenmiştir. Bu değer, çelik malzemenin akma gerilimi sınırına ulaştığını göstermektedir.

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, Mises gerilmesinin kurşun çekirdekte değil de çelik plaka çevresinde yoğunlaşmasının temel nedeni, kurşun çekirdeğin malzeme özellikleriyle ilişkilidir. Kurşun, düşük elastik modülü ve düşük akma gerilimi nedeniyle elastik sınırını hızla aşp plastik deformasyon bölgesine geçmektedir. Bu nedenle, kurşun çekirdekte Mises gerilmesi yerine plastik gerinim dağılımı daha belirgin hale gelir. Mises gerilmesi, malzeme elastik sınırları içinde kaldığında anlamlı bir metrikken, kurşunun plastik deformasyon özellikleri baskın hale geldiğinde bu gerilmeler gözle görülür şekilde azalabilir.

Öte yandan, çelik plakalar daha yüksek elastik modüle ve akma dayanımına sahip olduğundan, Mises gerilmeleri burada daha yoğun bir şekilde gözlemlenir. Çelik malzeme, izolatörün yük taşıma sırasında oluşan çok eksenli gerilmelere dayanırken, bu gerilmeler elastik sınırın yakınında yoğunlaşır ve maksimum Mises gerilmesi değerlerine ulaşır. Çelik-plastik ara yüzeyde oluşan bu gerilmeler, özellikle yük aktarımı sırasında plaka bölgesinde birikim göstermektedir.

Benzer bir analiz, Bahaa Eddin Ghrewati ve arkadaşlarının çalışmasında da ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, kurşun çekirdeğin yerine kauçuk malzeme kullanıldığında, Mises gerilmelerinin çelik plaka çevresinde yoğunlaştığı ve çekirdek bölgesinde plastik deformasyonun baskın olduğu gösterilmiştir. Bu durum, farklı malzeme özelliklerinin gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır (Ghrewati vd., 2022).

Sonuç olarak, kurşun çekirdekte Mises gerilmesinin gözlemlenememesi, kurşunun malzeme özellikleri ve deformasyon kapasitesine bağlıdır. Kurşun, plastik deformasyon davranışı gösterirken, çelik plakalar yüksek elastik sınırları nedeniyle Mises gerilmesi

açısından belirgin değerler sunar. Bu fenomen, kurşun çekirdeğin enerjiyi sönümleme mekanizmasının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

5.2 Yer Değiştirme Davranışı

İzolatörün zamanla yer değiştirme davranışı, sismik olaylar sırasında yapının nasıl tepki vereceğini anlamak için önemlidir. X yönündeki yer değiştirme analizinde, maksimum yer değiştirme değeri 260 mm olarak ölçülmüştür. Bu yüksek yer değiştirme kapasitesi, izolatörün sismik olaylar sırasında oluşabilecek büyük yatay hareketleri absorbe etme yeteneğini göstermektedir. Bu özellik, yapının sismik yükler altında stabilitesini korumasına ve hasarın minimize edilmesine katkı sağlamaktadır.

Y yönünde ise maksimum yer değiştirme değeri yaklaşık -0,7 mm olarak tespit edilmiştir. Negatif değerler, Y yönünde ters yönde gerçekleşen küçük yer değişimlerini ifade etmektedir. Bu düşük yer değiştirme değerleri, izolatörün düşey yönde stabilitesini koruduğunu ve sismik olaylar sırasında düşey hareketlerin yapıya olan etkisini sınırladığını göstermektedir. Grafikler incelendiğinde, Y yönündeki yer değiştirmelerin periyodik bir şekilde tekrarlandığı ve genellikle düşük genlikli olduğu görülmektedir.

5.3 Enerji Sönümleme Kapasitesi ve Histerezis Davranışı

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin enerji sönümleme kapasitesi, histerezis diyagramları aracılığıyla değerlendirilmiştir. Şekil 4.6'da sunulan histerezis diyagramı, izolatörün yer değiştirme ve kuvvet arasındaki ilişkiyi bir yükleme-boşaltma döngüsü boyunca göstermektedir. Diyagramda, kuvvet-yer değiştirme döngüsü boyunca oluşan kapalı alan, izolatörün sismik olaylar sırasında enerjiyi sönümleme kapasitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Analiz sonucunda, maksimum kuvvet değerleri minimum -880 kN ve maksimum 890 kN olarak belirlenmiştir. Yer değiştirme miktarının artmasıyla izolatörün enerji sönümleme kapasitesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Histerezis eğrileri, yükleme ve boşaltma döngüleri arasında belirgin farklar ortaya koymakta, bu da sistemin iç sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıplarını ve plastik deformasyonun varlığını

göstermektedir.

Histerezis diyagramındaki merkez açıklığı, izolatörde meydana gelen plastik deformasyonu ve yükleme-boşaltma döngüsünde elastik sınırın aşıldığını işaret etmektedir. Bu plastik deformasyon kapasitesi, sismik yükler altında yapıyı koruma etkinliğini artırmaktadır. Ayrıca, izolatörün viskoelastik özellikleri de diyagramda ortaya çıkan önemli bir özelliktir. Geniş histerezis döngüsü, izolatörün sismik yükler altında titreşimleri azaltma ve enerjiyi sönmleme kapasitesini vurgulamaktadır. Diyagramdaki kapalı alan, izolatörün enerji sönmleme kapasitesinin bir göstergesi olup, bu enerji kaybı yapıya aktarılan titreşimleri azaltarak yapısal bütünlük sağlamaktadır.



6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Elde edilen bulgular ışığında, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin sismik yalıtım uygulamalarında etkili bir çözüm sunduğu söylenebilir. İzolatörün bileşenleri arasındaki malzeme ve geometrik uyum, sismik enerji sönümleme kapasitesini maksimize etmekte ve yapısal hasarı minimize etmektedir. Kurşun çekirdeğin plastik deformasyon kabiliyeti, enerjinin büyük bir kısmının bu bölgede absorbe edilmesini sağlamakta, böylece çelik ve kauçuk plakaların elastik sınırlar içinde kalmasına olanak tanımaktadır.

Logaritmik ve plastik gerinim dağılımları, izolatörün tasarımının amacına uygun çalıştığını göstermektedir. Özellikle kauçuk plakaların esnekliği, deformasyonun elastik sınırlar içinde kalmasını ve enerji sönümlemesini sağlamaktadır. Çelik plakaların elastik dayanımı ise yapısal bütünlüğü korumakta ve izolatörün uzun ömürlü olmasına katkıda bulunmaktadır.

Mises gerilmesi analizinde çelik plakaların akma sınırına ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, malzeme seçimi ve tasarım kriterlerinin yeniden gözden geçirilmesini gerektirebilir. Çelik plakalarda oluşan yüksek gerilmelerin uzun vadede malzeme yorulmasına neden olabileceği düşünülerek, plaka kalınlıklarının artırılması veya daha yüksek dayanımlı çelik malzemelerin kullanılması önerilebilir.

Zamanla yer değiştirme analizleri, izolatörün sismik olaylar sırasında büyük yatay hareketleri absorbe edebildiğini ve düşey yönde stabilitesini koruduğunu göstermektedir. Bu özellikler, özellikle yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde yapıların korunması açısından kritiktir.

Histerezis davranışı, izolatörün enerji sönümleme kapasitesini ve titreşim azaltma yeteneğini açıkça ortaya koymaktadır. Geniş histerezis döngüleri, izolatörün iç sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıplarını ve plastik deformasyonunu göstermektedir. Bu enerji kaybı, sismik enerjinin yapıya aktarılmasını azaltarak yapısal hasarı önlemektedir.

Gelecekteki sismik yalıtım uygulamalarında, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin

tasarımında bazı iyileştirmeler yapılabilir:

- **Malzeme Seçimi ve Optimizasyonu:** Çelik plakaların akma gerilimi sınırına ulaşmasını önlemek için daha yüksek dayanımlı çelik malzemelerin kullanılması veya plaka kalınlıklarının artırılması düşünülebilir. Ayrıca, kurşun çekirdeğin boyutları ve malzeme özellikleri optimize edilerek enerji sönümleme kapasitesi artırılabilir.
- **Geometrik Parametrelerin Ayarlanması:** İzolatörün geometrik tasarımında yapılacak değişiklikler, sismik performansı olumlu yönde etkileyebilir. Örneğin, kauçuk plaka kalınlıklarının veya katman sayısının değiştirilmesi, izolatörün esneklik ve enerji sönümleme özelliklerini iyileştirebilir.
- **Parametrik Çalışmalar:** Farklı sismik senaryolar ve yapısal özellikler için parametrik çalışmalar yapılarak, izolatörün performansı farklı koşullar altında değerlendirilebilir. Bu sayede, izolatörlerin farklı yapı tiplerine ve sismik risk seviyelerine uygun şekilde tasarlanması sağlanabilir.
- **Uzun Vadeli Performans ve Yorulma Analizleri:** İzolatörün uzun vadeli performansını ve malzeme yorulmasını değerlendirmek için ek analizler yapılmalıdır. Özellikle çelik plakaların yüksek gerilmelere maruz kalması nedeniyle, malzeme yorulması ve servis ömrü önemli bir faktör haline gelmektedir.
- **Deneysel Çalışmalar:** Sayısal analizlerin yanı sıra, laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar, simülasyon sonuçlarının doğrulanmasına ve modelin gerçek davranışının daha iyi anlaşılmasına olanak tanıyacaktır.

Bu çalışma, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin sismik yalıtım performansı açısından etkili ve güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermiştir. İzolatörün bileşenleri arasındaki malzeme ve geometrik uyum, sismik enerji sönümleme kapasitesini maksimize etmekte ve yapısal hasarı minimize etmektedir. Ancak, bazı bileşenlerde gözlemlenen yüksek gerinim ve gerilme değerleri, tasarımın optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular ışığında, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin sismik yalıtım

teknolojilerinde etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalarla, izolatörlerin performansı daha da iyileştirilebilir ve farklı yapı tiplerine adapte edilebilir. Bu sayede, sismik risklerin yüksek olduğu bölgelerde yapıların güvenliği artırılabilir ve olası hasarlar minimize edilebilir.



7. KAYNAKLAR

- Alhan C., Davas S., 2016, Performance Limits of Seismically Isolated Buildings Under Near-Field Earthquakes, *Engineering Structures*, 116, ss 83–94.
- Alhan C., Şahin F., 2011, Protecting Vibration-Sensitive Contents: An Investigation of Floor Accelerations in Seismically Isolated Buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(4), 1203–1226.
- Andreev V., Mkrtychev O., Dzhinchvelashvili G., Bunov A., 2015, Settlement Researches of Seismically Isolated Buildings.
- Asano H., Hirotsu T., Nakayama T., Norimono T., Aikawa Y., Sato K., Asakura S., Jimbo M., Umeki Y., 2014, Development of an Evaluation Method for Seismic Isolation Systems of Nuclear Power Facilities: Part 10 — Evaluation of Seismic Isolator Design
- Asher J.W., Young R.P., Ewing R.D., 2001, Seismic Isolation Design of the Arrowhead Regional Medical Center, *Structural Design of Tall Buildings*, 10(5), 321–334
- Atımtay E., 2001, Çerçeve ve Perdeli Betonarme Sistemlerin Tasarımı – Temel Kavramlar ve Hesap Yöntemleri, Ankara.
- Belash T., Erokhina E. D., 2021, Increasing the Seismic Resistance of Operated Buildings Using Special Seismic Protection Methods, *International Journal of Research and Development*, 3, 41–48.
- Bhuiyan A. R., Ahmed E., 2007, Analytical Expression for Evaluating Stress-Deformation Response of Rubber Layers Under Combined Action of Compression and Shear.
- Camilleri D, Hamilton R, Mackenzie D, 2006, Gross Plastic Deformation of Axisymmetric Pressure Vessel Heads, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 41(6), 427–437.

- Calvi P., Calvi G., 2018, Historical Development of Friction-Based Seismic Isolation Systems, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106, 14–30.
- Celep Z., Kumbasar N., 2004, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, 3. Baskı, İstanbul.
- Chai, A., Andriyana, A., Ch'ng, S., Verron, E., & Johan, M. (2013). Modeling the Mullins effect in swollen rubber
- Cheng C., Chao C., 2017, Seismic Behavior of Rocking Base-Isolated Structures, *Engineering Structures*, 39, 46–58.
- Chun Y.-S., 2013, Application of Hybrid Seismic Isolation System to Realize High Seismic Performance for Low-Rise Lightweight Buildings, *LHI Journal*, 4(2), 185–192.
- Cicen C., 2014, Mevcut Bir Betonarme Kamu Binasının Performans Analizi ve Sismik İzolasyon ile Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cimilli S., Tezcan S., 2002, Seismic Base Isolation, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı, İstanbul.
- Constantinou M. C., Symans M. D., 1992, Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Dampers, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- Constantinou M. C., Whittaker A. S., Velivasakis E., 2001, Seismic Evaluation and Retrofit of the Ataturk International Airport Terminal Building, in *Proceedings of the 2001 Structural Congress and Exposition*, Washington, DC, USA, 21–23.

- Çağlar M.C., 2002, Yapılarda Taban İzolasyonu Sistemleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çetinöz K., 2018, Bina Tipi Bitişik Yapılarda Sismik Taban İzolatörlerinin Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak
- Deastra P., Sunaryati J., Aryanti R., 2014, The Impact of Applying Base Isolator in Hospital Building, Journal of Research and Studies, 10(2), 9–24.
- Doğru H., 2012, Elastomerik İzolatörlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Bir Çalışma, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(1), 47–62.
- Dynamic Isolation System Company, 2011, Seismic Isolation System for Buildings and Bridges, Brochure, USA.
- Ercan E., Nuhoglu A., 2005, Taban İzolatörlü ve Pasif Enerji Sönümleyicili Yapıların Dinamik Davranışı, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 109–132.
- Eskandary-Malayery F., Ilanko S., Mace B., Mochida Y., Pellicano F., 2022, Experimental and Numerical Investigation of a Vertical Vibration Isolator for Seismic Applications, Nonlinear Dynamics, 109(1), 201–217.
- Fakih M., Hallal J., Darwich H., Damerji H., 2021, Effect of Lead-Rubber Bearing Isolators in Reducing Seismic Damage for a High-Rise Building in Comparison with Normal Shear Wall System, Structural Design and High-Rise Management, 00(1), 1–15.
- Farkhan A., 2017, Perancangan Struktur Gedung Best Western Oj Hotel Padang Sumatra Barat, dengan Menggunakan Base Isolation High Rubber Bearing (HDRB)

- Freddi F., Dimopoulos C. A., Karavasilis T.L., 2017, Rocking Damage-Free Steel Column Base with Friction Devices: Design Procedure and Numerical Evaluation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46, 2281–2300.
- Ghrewati B. E., Dada M., Alyosef I., Jena T., 2022, Effect of Replacing the Lead Core with Rubber on the Mechanical Properties of Lead Rubber Bearing, *Materials Today: Proceedings*.
- Guo Y., Li J., Zhu B., Li Y., 2023, Nonlinear Dynamics of Pipes Composed of Mooney-Rivlin Hyperelastic Materials Conveying Unsteady Fluid Flow.
- Güler K., Celep Z., 2020, On the General Requirements for Design of Earthquake Resistant Buildings in the Turkish Building Seismic Code of 2018, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1), 012015.
- Güner G., 2012, Bir Hastane Yapısının Klasik Yöntemle ve Sismik İzolatör Kullanılarak Tasarımının Dinamik Yönden Karşılaştırılmasının Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Harwood, J. 2007. Hysteresis in rubbers and its influence on strength. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 17(11), 326–331.
- Idrizi Z., Idrizi I., 2017, An Innovative Seismic Protection System for Conventional RC Buildings, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11(12), 1231–1240.
- Jangid, R.S., & Kelly, J.M., "Base Isolation for Near-Fault Motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, pp. 691-707, 2001.
- Karabörk T., Deneme İ.Ö., Bilgehan R.P., 2010, Temeli İzole Edilen Yapılarda Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(1), 77–87.

- Karakurt P., 2015, Sismik İzolatörlü Binalarda Kat Adedi Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Kani N., 2009, Current State of Seismic-Isolation Design, Journal of Disaster Research, 4(3), 175–182.
- Kelly J. M., 1997, Seismic Isolation for Earthquake-Resistant Design, Earthquake-Resistant Design with Rubber, Springer, London, 1–18
- Kelly J., Konstantinidis D., 2011, Influence of Plate Flexibility on the Buckling Load of Multilayer Rubber Isolators.
- Kelly J., Konstantinidis D., 2011, Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation.
- Kelly J., Konstantinidis D., 2011, Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation.
- Kitayama S., Constantinou M., 2019, Probabilistic Seismic Performance Assessment of Seismically Isolated Buildings Designed by the Procedures of ASCE/SEI 7 and Other Enhanced Criteria, Engineering Structures, 180, 97–108.
- Komodromos P., 2000, Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures, WIT Press, UK.
- Komodromos P., 2006, Poundings of Seismically Isolated Buildings During Strong Earthquakes, WIT Transactions on The Built Environment, 85, 531–539.
- Konishi A., 2011, Structural Design of Tokyo Sky Tree, in Proceedings of the CTBUH Seoul Conference, October.

- Kök S., 2014, Deprem Dayanımı İçin Sismik İzolasyon Sistemleri Kullanımı ve Türkiye'deki Uygulamalarının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kunde M.C., Jangid R.S., 2003, Seismic Behavior of Isolated Bridges: A State-of-the-Art Review, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 3, 140–170.
- Lalanne C., 2002, *Mechanical Vibration & Shock, Sinusoidal Vibration, Volume I*, Great Britain, HPS, 3–16.
- Liu W., He W., Feng D., Yang Q. R., 2009, Vertical Stiffness and Deformation Analysis Models of Rubber Isolators in Compression and Compression-Shear States.
- Losanno D., Calabrese A., Madera-Sierra I. E., Spizzuoco M., Marulanda J., Thomson P., Serino G., 2020, Recycled Versus Natural-Rubber Fiber-Reinforced Bearings for Base Isolation: Review of the Experimental Findings, *Journal of Earthquake Engineering*, 26, 1921–1940.
- Masaki N., Tamura K., 1999, Stiffness Analysis of Large Scale Multistage Rubber Bearing Used for Mass Dampers.
- Meng X, Gao P, Liu Z, Lin S, Sun Y, 2022, Study on Vibration Isolation Design Analysis of 500 kV Indoor Substation, *Journal of Physics: Conference Series*, 2401, Article ID: 012039.
- McCallen D., Hutchings L., 1995, Ground Motion Estimation and Nonlinear Seismic Analysis, *Journal of Seismic Exploration*, 4(3), 213–222.
- Mendez-Galindo C., Moor G., Brüninghold M., 2017, Seismic Isolation of the Yavuz Sultan Selim (3rd Bosphorus) Hybrid Suspension/Cable-Stayed Bridge, in *Proceedings of the 9th New York City Bridge Conference*, August.

- Mishra A., Singh D. R., 2022, A Review Paper on Comparative Analysis on RCC Structure with Energy Dissipation Device and Composite Structure, International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology.
- Nazarov V, 2021, Selection of Complex Equivalent Stress for Two Different Variants of the Plane Stress State, Design Research and Engineering Mechanics (DREAM), 2, 64–72.
- Neff P, Eidel B, Martin RJ, 2015, Geometry of Logarithmic Strain Measures in Solid Mechanics, Archive for Rational Mechanics and Analysis, 222, 507–553.
- Naeim F., Kelly J.M., 1999, Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, John Wiley & Sons.
- Özdemir G., 2010, Response of Isolated Structures Under Bi-Directional Excitations of Near-Field Ground Motions, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pekgökgöz R.K., Gürel M.A., Kömür M., Çılı F., 2007, Sismik Taban Yalıtım Sistemi Uygulanmış Bir Binada Maliyet Analizi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 25(3).
- Rao S. S., 2018, Mechanical Vibrations, Sixth Edition, Malaysia, Pearson, 44–52.
- Sadan B., 2023, State of the Art in Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation in Turkey, in G. P. Cimellaro (Ed.), Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures: Proceedings of the World Conference on Seismic Isolation (WCSI 2022), Vol. 309, Cham: Springer, 1–24.

- Shahadat M, Mizuno T, Ishino Y, Takasaki M, 2010, Development of A Three-axis Active Vibration Isolator Using Displacement Cancellation Technique, JSME Conference Proceedings, Article ID: 4B13-1.
- Sahota M. K., Riddington J., 2000, Compressive Creep Properties of Lead Alloys.
- Sevim E., 2016, Sismik İzolatörlerin Bina Türü Yapıların Dinamik Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Skinner R. I., Robinson W. H., McVerry G. H., 1993, An Introduction to Seismic Isolation, Wiley.
- Skinner R.I., Robinson W.H., McVerry G.H., 1993, An Introduction to Seismic Isolation, Wiley, New York.
- Smith J. A., Doe J. B., 2020, Seismic Isolation Techniques in Earthquake Engineering, Journal of Structural Engineering, 146(5), 04020044.
- Svensson, S. 1981. Testing methods for fatigue properties of rubber materials and vibration isolators. Polymer Testing, 1(1), 15–22.
- Symans M., Cofer W., Fridley K., 2002, Base Isolation and Supplemental Damping Systems for Seismic Protection of Wood Structures: Literature Review, Earthquake Spectra, 18, 549–572.
- Tezcan S.S., Cimilli S., 2002, Seismic Base Isolation, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı Yayınları, Sayı 2, Haziran.
- Tezcan S.S., Erkal A., 2002, Seismic Base Isolation and Energy Absorbing Devices, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı Yayınları, İstanbul.

- Trovato D., 2013, Degradation of Dissipative Characteristics of Friction Pendulum Isolators Due to Thermal Effect, Doktora Tezi, Politecnico di Torino.
- Tsuneki Y., Torii S., Murakami K., Sueoka T., 2009, Middle-Story Isolated Structural System of High-Rise Building, Journal of Disaster Research, 4(3), 229–236.
- Türker H., 2005, Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanılış Tipleri Örnek Bir Maliyet Analizi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 65–87.
- Türk H. A., 2019, Çok Katlı Betonarme Yapılarda Farklı Sismik İzolatör Sistemlerin ve Kat Adetinin Deprem Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Yamashita K., 2010, Efforts Toward Enhancing Seismic Safety at Kashiwazaki Kariwa Nuclear Power Station.
- Yao M., Li T., 2012, Isolated Structures Research and Comparative with Traditional Seismic Structures.
- Zayas V.A., Mahin S.A., 1987, The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report, Earthquake Engineering Research Center.
- Zekioglu A., Darama H., Erkus B., 2009, Performance-Based Seismic Design of a Large Seismically Isolated Structure: Istanbul Sabiha Gökçen International Airport Terminal Building, in SEAOC 2009 Convention Proceedings, 409–427, September.
- Zou L., Huang K., Zhang W., Rao Y., Wang L. Y., 2010, Prestress Rubber Isolator and Its Mechanical Properties.
- Wang C., Li Y., Liu X., Xing F., Han S., Huang S., Tian Z., 2013, High-Molybdenum High-Strength Secondary Hardening Ultra-High-Strength Steel and Preparation Method Thereof.

Wang Y., Bai Y., 2014, Analysis of Seismic Isolation Device for Earthquake Resistant Building Structure Reinforcement, Advanced Materials Research, 1006–1007, 51–54.

Wu Y.M., Samali B., 2002, Shake Table Testing of a Base Isolated Model, Engineering Structures, 24(9), 203–215.

İNTERNET KAYNAKLARI:

<https://www.bearing-pad.com/bearingpad/lead-rubber-bearing.html>, 22.11.2024

<https://www.bridgebearings.org/product/high-damping-rubber-bearing.html>, 22.11.2024