

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMEL İZOLASYONLU YAPILARIN DİNAMİK
ANALİZİ

Erkut Adasu DİNÇER

Ocak, 2013
İZMİR

TEMEL İZOLASYONLU YAPILARIN DİNAMİK ANALİZİ

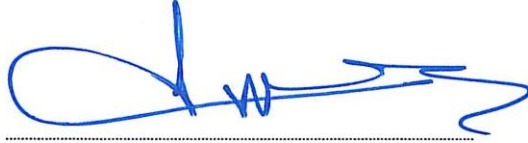
**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı**

Erkut Adasu DİNÇER

**Ocak, 2013
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ERKUT ADASU DİNÇER, tarafından **PROF. DR. HİKMET HÜSEYİN ÇATAL** yönetiminde hazırlanan “**TEMEL İZOLASYONLU YAPILARIN DİNAMİK ANALİZİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



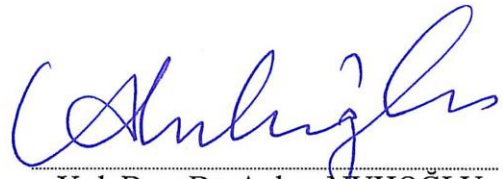
Prof. Dr. Hikmet Hüseyin ÇATAL

Yönetici



Yrd. Doç. Dr. Yusuf YEŞİLCE

Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜRLER

Çalışmamın her aşamasında, bana destek veren danışmanım Prof. Dr. Hikmet Hüseyin ÇATAL'a, ayrıca değerli bilgilerini benimle paylaşan İnş Müh. Barış TANRIVERDİ ve İnş Müh. Kerem GÜRBÜZ'e teşekkür ederim.

Erkut Adasu DİNÇER

TEMEL İZOLASYONLU YAPILARIN DİNAMİK ANALİZİ

ÖZ

Bu çalışmada deprem etkilerine karşı yapının sismik izolasyonunu sağlayan ve son yıllarda yurtdışında olduğu kadar ülkemizde de kullanımı artan sismik yapı izolatörleri, bu izolatörlerin kullanım ve tasarım esasları açıklanmıştır.

Çalışmada, sismik yapı izolatörlerinin tarihçesi Dünya’da ve Türkiye’deki ilk uygulamalarından bahsedilmiş, sismik yapı izolasyon yöntemleri açıklanmış, bu izolatörlerin karakteristik parametrelerinin elde edilmesi, teorik esasları ve UBC-97 Amerikan Standart Yapı Kanunları Yönetmeliği’nin ilgili bölümleri irdelenmiştir.

Son Bölümde 8 katlı betonarme bir yapı için yüksek sönümlü kauçuk izolatör tasarımı yapılmış ve ilgili yönetmeliklere göre kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan izolatör kendi içinde taşıdığı yüke ve bulunduğu konuma göre iki ayrı tipte tasarlanmıştır. Tasarım sonucunda elde edilen parametreler SAP2000 paket bilgisayar programında zaman tanım alanında üç boyutlu dinamik olarak analiz edilmiştir.

Dinamik analiz sonucu elde edilen sayısal değerler aynı yapının, temel izolasyonsuz olarak analizi ile hesaplanan düğüm noktalarının deplasmanı, ivme değerleri ile çubuk elemanların eksenel kuvvet, uç kesme kuvveti ve uç moment değerleri için tablolar halinde karşılaştırılmalı olarak sunulmuş ve sismik yapı izolasyonun önemi vurgulanmıştır.

Anahtar sözcükler: Sismik yapı izolasyonu, pasif kontrol sistemleri, taban izolasyonu, izolatör tasarımı

DYNAMIC ANALYSIS OF BASE-ISOLATED BUILDINGS

ABSTRACT

In this thesis, seismic isolation systems against the effects of the earthquake and which is increasingly used in recent years in Turkey as well as abroad, the seismic structure isolators, and the isolators of use and design principles are described.

The history of seismic isolators, first application in the World and in Turkey is mentioned. Seismic isolation structure methods to obtain the characteristic parameters, theoretical principles and American Standard Building Regulations relevant sections are described.

In the last section, the high damping rubber isolator for 8-storey building has been designed and controls in accordance with the relevant regulations are made. Isolators designed in two different types according to the locations of isolators and the load the carries in it. The parameters, obtained from the design were subjected to a three-dimensional time history dynamic analysis in SAP2000 computer program.

Dynamic analysis of the values obtained as a result of analysis of the same structure as determined by conventional nodes displacement, acceleration values and elements of axial force, shear force and moment values in the tables are compared and emphasized the importance of seismic isolation structure.

Keywords: Seismic structure isolation, passive control systems, base isolation, isolator design

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖZ	v

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Yapının Dinamik Davranışı.....	2
1.2 Klasik Yapı Tasarımı ve Sonuçları	3
1.3 Sismik İzolasyon Genel Özellikleri.....	6
1.4 Temel İzolasyon Sistemlerinin Tarihçesi Uygulamaları	9
1.5 Sismik İzolatör ile ilgili Yapılmış Çalışmalar	13
1.6 Türkiye’de Temel Yalıtım Uygulamaları	16

BÖLÜM İKİ – MATERYAL VE METOD 21

2.1 Giriş	21
2.2 Sismik Yalıtım Yöntemleri	23
2.2.1 Pasif Kontrol Sistemleri.....	26
2.2.1.1 Metalik Sönümleyiciler.....	26
2.2.1.2 Sürtünme Tipi Sönümleyiciler	27
2.2.2 Taban (Sismik) İzolasyon Sistemleri.....	27
2.2.2.1 Kauçuk İzolatörler	27
2.2.2.2 Kauçuk İzolatörlerin Stabilitesi ve Tasarım Unsurları	30
2.2.2.3 Düşük Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet Sistemi.....	43
2.2.2.4 Kurşun Çekirdekli Mesnet Sistemi	45
2.2.2.5 Kurşun Çekirdekli Mesnetlerin Matematiksel Modellenmesi	46
2.2.2.6 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet Sistemi.....	48

2.2.2.7 Sürtünmeli Sarkaç Sistemi	50
2.2.2.8 Esnek Sürtünmeli Taban Yalıtım Sistemi.....	53
2.3 Sismik İzolasyonun Maliyet Analizi	54
2.3.1 VA Hastanesi, Loma Linda	55
2.3.2 Medical Building, Salt Lake	56
2.4 Taban İzolasyonlu Yapıların Dinamik Formülasyonu	57
2.4.1 Lineer Teori: İki Serbestlik Dereceli Sistemler İçin Hareket Denklemleri	57
2.4.2 Çok Serbestlik Dereceli Sistemler İçin Hareket Denklemleri	65
2.5 UBC-97 Amerikan Standart Yapı Kanunları Yönetmeliği	69
2.5.1 Mesnedin Disk Çapının Hesabı	73
2.5.2 İzolasyonlu Yapıda Taban Kesme Kuvvetinin Hesabı	74
2.5.3 İzolasyonlu Yapıda Deplasman Hesabı	75
2.5.4 Efektif Düşey Modülün Hesabı	76
2.5.5 Düşey Titreşim Periyodunun Hesabı	76
2.5.6 Düşey Yük ve Kayma Gerilmesinin Hesabı	78
2.5.6.1 Kayma Gerilmesinin Hesabı	79
2.5.6.2 Ortak Alan Hesabı.....	79
2.5.6.3 Maksimum Düşey Yükün Hesabı	80
2.5.6.4 Şişme Riskinin Hesabı	80
2.5.6.5 Kurşun Tamponun Tasarımı	81
2.5.6.6 Çapın Kayma Kontrolü	82
BÖLÜM ÜÇ – UYGULAMALAR	84
3.1 Giriş	84
3.2 Sap2000 Yapısal Analiz Programı	84
3.3 UBC-97 Amerikan Standart Yapı Kanunları Yönetmeliği	84
3.4 Analiz İçin Seçilen Betonarme Yapının Özellikleri.....	85
3.5 Hesap Verileri.....	88
3.6 Yük Analizi ve Döşeme Hesapları	88
3.6.1 Döşeme Hesap Yükü	88

3.6.2 Yapı Ağırlığının Hesabı.....	88
3.6.3 Ankastre Temelli Sistemin Taban Kesme Kuvvetinin Hesabı	90
3.6.4 UBC-97'ye Göre Yapı Parametreleri	91
3.7 Örnek Yapı Modelinin Sismik Taban İzolasyon Sistemleri ile Tasarımı	92
3.7.1 Doğal Kauçuk İzolatörle Yalıtılmış Taban İzolasyonu Tasarımı	93
3.7.2 Efektif Sistemin Toplam Yatay Rijitliği	96
3.7.3 Efektif Sistem Titreşim Periyodu	96
3.7.4 Efektif Sistemde Toplam Sönüm	96
3.7.5 Maksimum Toplam Tasarım Yer Değiştirmesi	97
3.7.6 Analizde Kullanılacak Parametreler	97
3.7.7 Yatay Deprem Yükünün Katlara Dağılımı	98
3.7.8 Kauçuk İzolatör Detayı	99
3.7.9 Efektif Eksenel Rijitlik Hesabı	102
3.7.10 Düşey Titreşim Periyodunun Hesabı	103
3.7.11 Ortak Alan Hesabı	104
3.7.12 Göçme Riski Kontrolü	105
3.7.13 Dışarı Yuvarlanma Mesafeleri	106
3.8 Dinamik Analiz Sonuçları ve Değerlendirme	110
3.8.1 Ankastre Mesnetli Sistemin Dinamik Analiz Sonuçları	111
3.8.1.1 Modlara Göre Titreşim Periyotları.....	111
3.8.2 Sismik İzolasyonlu Sistemin Dinamik Analiz Sonuçları	117
3.8.2.1 Modlara Göre Titreşim Periyotları.....	117
BÖLÜM DÖRT – SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	124
KAYNAKLAR	129

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Dünya nüfusunun birçoğu deprem açısından riskli bölgelerde yaşamaktadır. Depremler, insanoğlunun imal ettiği yapılara ve yaşam alanlarına tarih boyunca zarar vermiş ve insanların yaşamlarını olumsuz yönde etkilemiştir.

Ülkemiz topraklarının % 92 sinin deprem kuşağı üzerinde olması, tarihte ve yakın zamanda yaşadığımız büyük depremleri açıklamakta ve bizleri depreme dayanıklı yapılar inşa etmek zorunda kılmaktadır. Türkiye’de yapı stokunun büyük bölümünün deprem yönetmeliğindeki kurallara uygun olmadan inşa edilmesi ve deprem riski konusunda kamu bilincinin halen oluşmaması nedeniyle, yaşanan depremlerde oldukça fazla can ve mal kaybı oluşmaktadır.

Sismik izolasyon sistemleri ülkemizde ve dünyada günden güne önem kazanmaktadır. Son yıllarda ülkemizde de uygulanmaya başlayan bu sistemler, esas olarak yapıya gelen şiddetli deprem etkilerinin azaltılmasını amaçlamaktadır.

Yapılar, ömürleri boyunca birçok farklı şiddette depreme maruz kalabilirler. Konut türü yapılardan beklenen davranış hafif şiddetli depremlerde yapının taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarında hiç hasar meydana gelmemesi, orta şiddetli depremlerde ise yapının taşıyıcı sistemlerinde bir hasar meydana gelmemesi, yapının faydalı ömründe olması beklenen en şiddetli depremde ise yapının hasar görmesi fakat yıkılmaması ve can kaybı meydana gelmemesidir.

Sismik izolasyon uygulanmış bir yapıda ise hafif ve orta şiddetli depremlerde yapının taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarında hiçbir hasar meydana gelmemesi, şiddetli depremlerde ise yapının kullanım amacını etkileyecek herhangi bir hasar meydana gelmemesi amaçlanmaktadır.

1.1 Yapının Dinamik Davranışı

Geleneksel yöntem olan ankastre temelli yapı tasarımında, yapıya üstün nitelikli bir sismik performans kazandırmak üzere yapı sistemini sağlamlaştırmak; yapının daha rijit olmasına yol açmakta, bu durum yapının taşıyıcı elemanlarının daha fazla kuvvet karşılamasına neden olmaktadır. Tasarımı yapılan yapılar sismik kuvvetlere kendi başlarına karşı koymaktadır. Bu durum yapısal sisteme gelen deprem yükünü arttırmakta dolayısıyla kesitlerin büyümesini ve gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.

Temel izolatör sistemlerinden en yaygın olarak kullanılanı, kauçuk ve çelik tabakalardan oluşan izolatörlerdir. Bu izolatörler yapının temel sistemine yerleştirilir ve yer hareketi esnasında temelden yapıya geçen dinamik etkiyi azaltır. Sismik izolasyon sistemlerini uygulamak, orta ve büyük şiddetli depremlerde, hem binanın taşıyıcı sisteminde hem de bina içindeki eşyalarda meydana gelebilecek hasarı sınırlandırmasını sağlar. Böylece insan hayatı ve stratejik yapılarda bulunan değerli ekipmanlar korunabilmektedir.

Yapıda oluşan deprem kuvvetlerinin şiddeti

- Yapı kütlesi
- Yapının periyodu
- Yer ivmesi, zemin yapı etkileşimi gibi faktörlere bağlıdır.

Deprem etkisi altında yapılar kendine özgü bir periyot ile dinamik tepki gösterirler. Eğer taşıyıcı sistemin periyodu ile deprem etkisi altındaki zeminin periyodu birbirine eşit veya çok yakın olursa rezonans oluşabilir ve yapı kütlesinin ivmeleri giderek büyür. Bundan başka deprem enerjisi yapı içerisinde değişik şekillerde sönümlenir. Deprem enerjisinin tamamı yapı içerisinde tüketilmeli fakat bu süreçte yapı çökmemelidir. Diğer bir deyişle, yapı hasar görebilir fakat can kaybına sebebiyet verecek kısmi ya da tamamen çökme meydana gelmemelidir.

Günümüzdeki depreme dayanıklı yapı tasarımında yapıların hasarını azaltmaktan öte güvenlik olgusu ön plana çıkmaktadır. Son yüz yılda değişen ve gelişen depreme dayanıklı yapı tasarımına rağmen şiddetli depremler yapılar hasar almakta ve hatta yıkılmaktadır. Bu durumlarda insan hayatı ve güvenlik olgusu kavramı en son yayımlanan UBC (Uniform Building Code) yönetmeliğinin 1626 no'lu maddesinde şu cümlelerle ifade edilmektedir:

“Burada depreme karşı yapıların tasarımındaki hazırlıklar öncelikli olarak büyük depremlerde yaşam kaybına ve yapısal göçmelere karşı bir güvenlik oluşturmaktadır. Hasarı sınırlamak veya yapının fonksiyonelliğini sürdürmek değildir.” Benzer şekilde ülkemizin deprem yönetmeliği olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te de (DBYBHY) depreme dayanıklı yapı tasarımının temel ilkesinden aşağıdaki şekilde söz edilmektedir.:

“Bu Yönetmelikte depreme dayanıklı bina tasarımının ana ilkesi; hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can kaybını önlemek amacı ile binaların kısmen veya tamamen göçmesinin önlenmesidir.”

Örneklerde de görüldüğü gibi bu yönetmelikler insan hayatını gözeterek yapılardaki hasarları amaç edinmemektedir ancak yüksek maliyetli ekipman içeren yapılarda veya depremden sonra operasyonel faaliyetlerde kritik önem taşıyan yapılarda yapılardaki hasarın önlenmesi gerekmektedir. Depremlerden sonra kullanımı gereken hastane, viyadük, havalimanı, acil durum ve afet merkezleri bu tarz yapılara örnek olarak verilebilir.

1.2 Klasik Yapı Tasarımı ve Sonuçları

Ülkemiz gibi sismik aktivitesi yüksek bölgelerde amaç; yüksek şiddette depremlere maruz kaldığında can ve mal güvenliğini sağlayarak yapısal göçmelere maruz kalmayacak yapı tasarlamaktır. Belirleyici kriterler olan deprem yönetmeliklerine uyarak uygun maliyetle bu işi yapmak zordur. Bütün bu kriterler

sağlanarak tasarlanan yapıda göçme olasılığını azaltmak için doğrusal olmayan davranıştan kaynaklanan hasar yapıda bir emniyet unsuru olur ve yapının hasar görerek deprem kuvvetlerini absorbe etmesini, toptan göçmenin önlenmesini sağlar. Bu tasarım sistemi uygun ölçütler kullanılarak tasarlandığında birçok hayatın kurtarılmasını sağlarken, şiddetli depremlerde yapılarda meydana gelen hasarlardan dolayı ülke ekonomisine olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Ülkemizde Ekim 2011 tarihinde Van'da meydana gelen depremde de görüldüğü gibi depremden sonra hasar gören evlerine giremeyen insanlar barınacak yer bulmakta ciddi sıkıntılar yaşamışlardır. Depreme karşı klasik yapı tasarımındaki amaç; birçok tasarım yönetmeliklerinde belirtildiği gibi küçük ölçekli depremlerde tüm hasara engel olmak ve bu depremlerden hasarsız çıkmak, orta büyüklüklü depremlerde yapısal olmayan elemanlarda sınırlı hasar ile karşı koymak, şiddetli depremlerde hem yapısal olan hem de yapısal olmayan taşıyıcı sistem elemanlarının kabul edilebilir seviyelerde hasar görmesine izin verip, ancak yapının tümünden göçmesine engel olmaktır.

Hasarları oluşturan durum; depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan ölçütlere göre tasarlanan yapının deprem kuvvetlerine karşı koyabilmesi için dayanım ve süneklik özellikleri artırılmasıdır. Orta yükseklikli yapılar için yapının kat kütlelerine etkiyen ivmelerden dolayı sismik yükler, zemin ivmesinin büyütülmesin olarak ortaya çıkar. Depreme karşı klasik yapı tasarımı, yapının elastik ötesi davranışı ile depremin yüksek frekanslı enerji içeriğini önceden düşünülen noktalarda sönümlendirmeyi hedefler aksi takdirde kabul edilebilir ekonomik ve mimari maliyetlerle inelastik deformasyondan kaçınmak için gereken dayanımı sağlamak pratik olarak imkânsızdır.

Çoğu sismik yönetmelikler birçok deprem datalarını ve onun yerini tutan tepki spektrumlarını kullanarak oluşturulan tasarım spektraları üzerine kurulmuştur. Bir tepki spektrumu, belli bir deprem datasından tek serbestlik dereceli bir sistemin bazı özellikleri her defasında değiştirilerek oluşturulan maksimum deplasman, hız ve ivmelerini gösteren ölçekli bir çizimden ibarettir (Furukawa, Ito, Izawa, ve Noori, 2005).

Klasik yapı tasarımının dezavantajları olarak orta yükseklikteki yapılarda meydana gelebilecek en büyük problemlerden biri, yapının etkin periyodunun depremin baskın periyodu ile aynı sınır değerler arasına düşmesi sayılabilir. Bu olay yapıların ve onların taşıyıcı unsurlarının aşırı hasarına sebep olan zemin ivmesinin büyütülmesine neden olur.

Klasik yapı tasarımında yukarıda belirtilen unsurları aşmak için veya en aza indirmek için yapının taşıyıcı sisteminin en kesitleri büyütülerek inşaat ve proje maliyetleri önemli derecede arttırılmalı, tasarım aşamasında mimari kaygılarla oluşturulabilecek yapı düzensizliklerine yer verilmemelidir. Yapı ne kadar basit düzenlenmişse, depreme dayanıklılığın o derecede yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunu, birkaç şekilde açıklamak olasıdır. Basit ve düzenli yapıların yapımı kolaydır ve yapımda imalat hatası yapma olasılığı azdır. Bu tür yapıların depremdeki davranışını tahmin etmek ve buna göre bir çözümleme yapmak daha kolaydır. Karmaşık ve düzensiz yapıları modellemek ve ek olarak ortaya çıkan burulma etkisini göz önüne almak daha karmaşık analizler gerektirir. Bu nedenlerden dolayı yapının iki yönde simetriye sahip olması istenir. Böylece çözümlemelerde bulunan davranış şekliyle, deprem altında meydana gelecek olan davranış modları birbirine yakın olur. Plandaki H, L ve T şeklindeki binalar meydana gelen depremlerde önemli hasar görmüşlerdir. Simetrik bir sistemde her zaman yeterli olmayabilir. Örneğin, planda artı şeklinde yapı simetrik olmasına rağmen, deprem hareketinde orta kısımla kenar kısımlar farklı yatay rijitlikten dolayı birbirini zorlar. Binanın dış kısmına ve binaya bağlı olarak düzenlenen merdiven ve asansörler, rijitlik merkezini simetri merkezinden kenara çektikleri için, ek burulma meydana getirirler. Yani, simetri yalnız plandaki şekille değil, taşıyıcı sistemdeki ayrıntılarda da sağlanmalıdır. Ayrıca, deprem sırasında perde ve kolonlarda meydana gelen hasar elemanların dayanım ve rijitliklerini değiştirir ve statik konumda simetrik olan yapı, dinamik durumda burulma etkisine maruz kalabilir. Mimari istekler çoğu zaman binanın simetrik olmasını imkânsız kılabilir. Bu durumda binanın dilatasyon derziyle bölünmesi bir çözüm olabilir (Özdaş, 2008).

Planda uzun olan yapılar kısıllara göre daha çok zemin özelliklerinin değışimine ve farklı zemin çökmelerine maruz kalırlar. Özellikle tekil temellere sahip uzun yapılar zemin hareketlerine daha hassastır. Sürekli temellerde, zemin hareketinin bir kısmını kendi karşıladığı için taşıyıcı sistemin davranışı daha uygun duruma getirilebilir. Düşey kesitte de yapının plandaki boyutlarının ani azalmasında kaçınılmalıdır.

1.3 Sismik İzolasyonun Genel Özellikleri

Sismik izolasyon, özellikle orta yükseklikteki titreşim frekansı büyük yapıların deprem yüklerini ele almak için depreme karşı klasik yapı tasarımına alternatif bir yoldur. Depreme dayanıklı klasik yapı tasarımı sadece orta şiddetteki depremlerde yapılardaki aşırı hasarı önleme amacını taşıyan bir yaklaşımdır. Çok şiddetli depremler için, depremden hemen sonra yapının göçmesine bakılmaksızın amaç; yapısal göçme ve sonucunda gelen yaralanmalardan kaçınmaktır. Buna, depremin yapıya verdiği sismik enerjiyi, yapının taşıyıcı sistemi üzerinde belirli yerlerde yoğunlaştırarak, elemanların inelastik deformasyona izin verecek şekilde sönmölendirmek ve taşıyıcı sistem elemanlarının göçmesini önleyecek uygun dayanımı sağlayarak ulaşılabilir. Yapısal elemanların ve birleşim noktalarının dikkatli tasarımı ile yönetmeliklere uygun bir şekilde tasarlanan yapısal sistemin, hayat kurtarıcı niteliği olmasına rağmen, gerçekte taşıyıcı sistem bir bütün olarak korunamaz.

Hasar sorununu dikkat çekmek için alternatif bir tasarımın gerekliliği vurgulanmalıdır. Özellikle kritik tesisleri barındıran ve depremden sonra fonksiyonelliğine devam etmesi gereken binalar için veya şiddetli bir depremden sonra şehirlerin hayati damarlarını oluşturan altyapılarda ve ana yollara bağlantılı bulunan köprülerdeki istenmeyen hasarların oluşması artık kabul edilemez bir gerçektir. Kültürel değerlere sahip tarihi yapılar ve önemli müzeler alternatif bir tasarım yaklaşımı olan taban yalıtım sistemleri ile korunabilir. Benzer şekilde büyük şirketlerin merkez binaları, iletişim ve afet merkezleri, yüksek teknolojiye sahip endüstriyel fabrikalar gibi yapıların içeriklerinin hasar görmesi veya operasyonel

faaliyetlerinin aksaması ekonomik boyutta yıkıcı etkiler doğurabileceği için bu tür yapıların sismik tehlikelerden korunma zorunluluğu vardır. Ancak, sismik izolasyon maliyet yönünden ekonomik ve yapılabilirliği toplumsal binaların mülkiyetlerini ve sahip olduğu elemanları korumaya yönelik olursa, bu tür ileri düzey tasarım yaklaşımları özel konutlarda bile tercih edilebilir. Bu tür konutlarda deprem sonrası onarım maliyetleri çok yüksek rakamlara çıkabilmektedir (Murat, 2007).

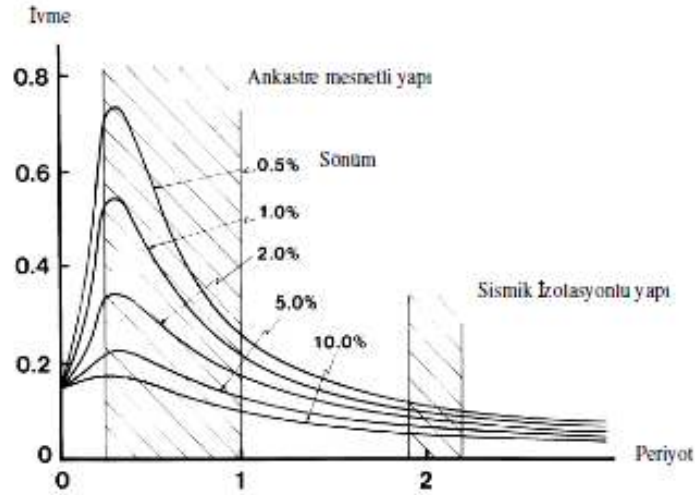
Sismik izolasyon, binalar için yeni yapısal taşıyıcı ek elemanlara ihtiyaç duyulmaksızın var olan yapıların deprem güvenliğini arttırması için etkili bir çözüm olabilir. Sismik izolasyon deprem kuvvetlerini azaltmasına rağmen, onları tamamen ortadan kaldırmaz. Sonuç olarak var olan yapıların dayanımı ve sünekliği en azından izolasyondan kaynaklanan azaltılmış deprem yüklerine direnç gösterebilecek yeterlilikte olmalıdır. Ayrıca bitişik nizam yapılarda sismik izolasyonlu güçlendirme uygulanacak yapının en üst katında 20-30 cm deplasman imkanı olması gereklidir.

Bodrum katlarının orta seviyesi, alt seviyesi ve üst seviyesinde ve kolonların boyları boyunca oluşturulacak izolasyon alanları için detaylı bir kolon kapasitelerinin değerlendirme çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Eğer kolon kapasitesi, azaltılmış izolasyon kuvvetlerine karşı koymak için yeterli rijitlikte değilse;

- Kolon dayanımı arttırılabilir
- Rijit kirişlere sahip yeni bir çerçeve sistemi kolon kuvvetlerini azaltmak için izolasyon seviyesinde gerçekleştirilebilir.
- Son olarak kolonların orta seviyelerinde oluşturulan izolasyon seviyesi ile kolon momentleri 2 kat oranında azaltılabilir (Murat, 2007).

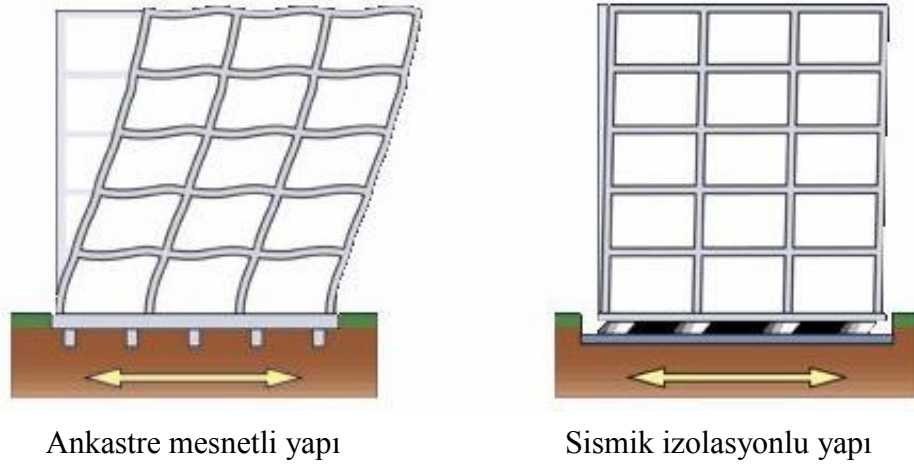
Sismik izolasyon sistemi yapı ile temeli arasına düşük yatay rijitliği olan izolatörleri monte ederek yapıyı, deprem hareketinin yatay bileşenlerinden ayırmaktadır. Bu yöntem, uygulandığı yapıya; hem ankastre mesnetli sistemin frekansından hem de yer hareketinin hâkim frekanslarından çok daha küçük olan bir asal frekans vermektedir. Şekil 1.1’de ankastre mesnetli yapıya kıyasla ve sismik

izolasyonlu yapının periyodunun büyüdüğü görülmektedir (Celep ve Kumbasar, 2004).



Şekil 1.1 Yapılarda periyodun büyütülerek ivme ve sönüm değerlerinin değiştirilmesi

Sismik izolasyonlu yapının birinci dinamik modu sırasında yer değiştirme sadece izolasyon sisteminde olur. Üstyapı nerede ise tamamen rijit davranış gösterir. Yapılan deneylerden elde edilmiş olan sonuçlar çerçevesinde, sismik izolasyon kullanılan yapılarda katlar arası yer değiştirme oranının minimum seviyelere düştüğü gözlenmiştir. Bu davranışın sonucu olarak, yapısal olan ve yapısal olmayan elemanlardaki deformasyonların minimum seviyede kaldığı ve dolayısıyla yapı elemanlarının depremin yatay kuvvetinden ve ivmelenmeden minimum seviyede etkilendikleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak sistemin periyodundaki artmadan dolayı, yüksek titreşim periyotlarında yapıya etkiyen ivmelerin azaldığı görülmüştür. Böylelikle, esneklik kazanmış olan sistem daha fazla yer değiştirme yapabilmektedir, bu da sistemin enerji yutma kapasitesini arttırmaktadır (Celep ve Kumbasar, 2004).



Şekil 1.2 Ankastre mesnetli yapı ile taban izolasyonlu yapının gösterimi

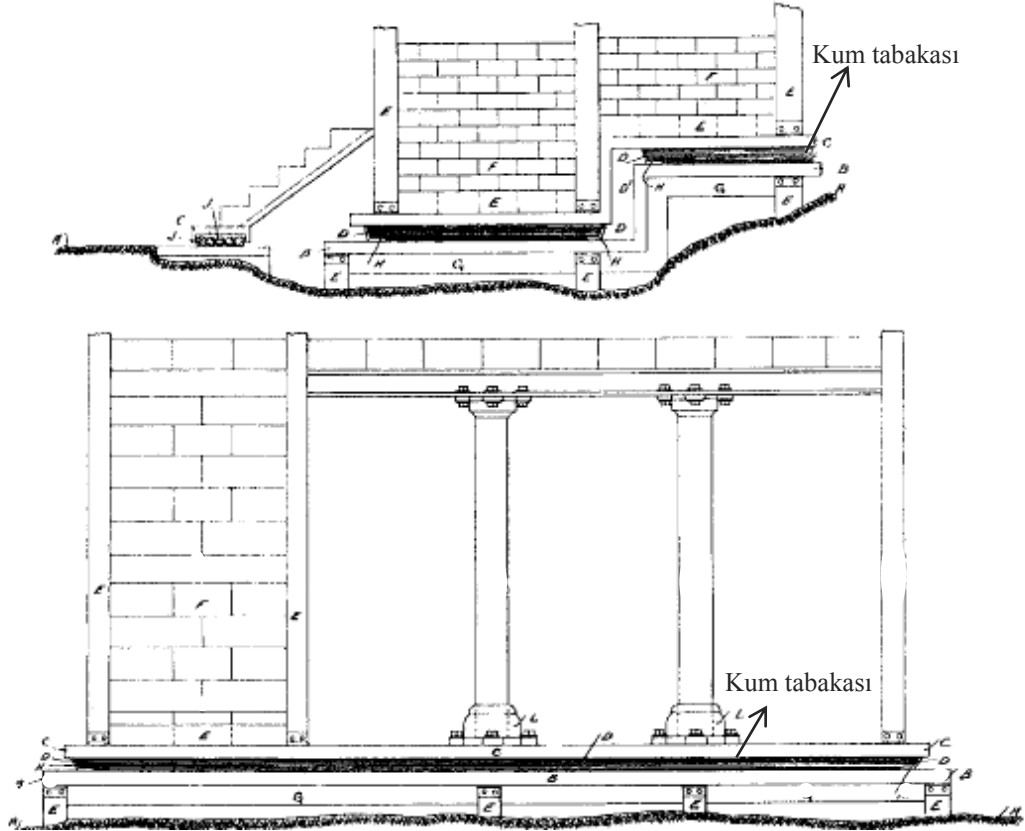
Sismik izolasyon sistemli yapı ile ankastre mesnetli yapının deprem kuvvetleri etkisi altındaki davranışı Şekil 1.2 'de gösterilmiştir (Yücesoy, 2005).

Bahsedilen tüm bu özelliklerinden ötürü sismik izolasyon sistemlerinin, özellikle içerisinde değerli cihazları barındıran ve bir ülkenin siyasal ya da ekonomik yapısı için kritik öneme sahip binalarda; deprem sonrasında işlevini sürdürmesi gereken ve kullanılabilir durumda kalması gereken binalarda (hastane, iletişim merkezleri gibi) kullanılması kaçınılmazdır. Sismik izolasyon sistemlerinin elemanı olarak kullanılan başlıca sismik izolatör tipleri; kurşun çekirdekli izolatör, çapraz doğrusal hareket sistemi, kayıcı tabakalı kauçuk izolatör ve çelik bilyeli izolatördür.

1.4 Temel İzolasyon Sistemlerinin Tarihçesi ve Uygulamaları

Yapıları depremin yıkıcı etkilerinden koruma fikri günümüzden binlerce yıl öncesine dayanır. Bunların en eskisi 1200 yıl önce yapılmış olan Japon pagodalarıdır. Bu yapılarda, tomruktan yapılan çerçeveler arasında yüksek sürtünme kuvvetleri oluşmakta ve böylece büyük miktarda enerji sönümlenmekteydi. Oldukça büyük titreşim periyotlarına sahip olan yapılar kısa periyotlu depremlerde rezonans etkisinden de kurtuluyordu. Bu tarihlerde yapılan yalıtım uygulamalarına bir diğer örnek ise Pekin'deki Kral Zi Jing Ceng'in sarayı gösterilebilir. Bu yapı, kireçtaşı ve kaynamış pirinç kabuğu serilerek oluşturulmuş yapay bir zeminin üzerine inşa

edilmişti. Zeminin akışkanlık ve yüksek sönüm özellikleri sebebiyle iyi bir yalıtım sağlanmaktaydı. 1909 yılında İngiliz tıp hekimi Dr. Calantarients, yapının temeli ile taşıyıcı duvarlar arasında ince kum tabakası oluşturmak suretiyle yatay harekete izin veren çalışmasını tasarlamış ve patent almıştır. Dr. Calantarients'in tasarımı şematik olarak Şekil 1.3' de sunulmuştur (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 1.3 Dr. Calantarients'in çalışması

Frank Lloyd Wright, 1921 yılında Tokyo'daki Imperial Hotel'in temellerinde taban yalıtımı fikrini ilk uygulayan kişi olmuştur. Wright, birbirine yakın aralıklarla yerleştirilen kazıklarla yumuşak, çamurlu bir zemin tabakasını daha aşağıda bulunan oldukça iyi bir zemin tabakasıyla birleştirmiştir. Imperial Hotel batı tarzında inşa edilmiş olup, 1923 yılında Tokyo depreminde ayakta kalabilen birkaç yapıdan biri olmuştur.

Depremden korunmak amacıyla ilk kauçuk mesnet 1969 yılında Yugoslavya'nın Skopje şehrinde üç katlı betonarme bir okul binasında kullanılmıştır. Mesnet sistemi

olarak doğal kauçuk bloklardan faydalanılmıştır. Kauçuk içerisine çelik plakalar yerleştirilmediğinden düşey yönde istenen rijitlik elde edilememiştir. Dolayısıyla, kauçuk blokların yanlara doğru şişmesi söz konusu olmuştur. Sistemin düşey yöndeki rijitliği yaklaşık olarak yatay yöndeki rijitliğe eşit olduğundan deprem hareketi esnasında bina ileriye veya geriye doğru sallanıp yukarıya doğru sıçrayabilmektedir. Mesnetler çelik plakalarla takviye edilerek karşılaşılan bu zorlukların üstesinden gelinmiştir. Bu tecrübeler ışığında, modern anlamda taban izolasyonuna sahip yapılar, yapının temeli ve tabanı arasında yerleştirilen, yatay yönde esnek ve düşey yönde ise rijit olan taşıyıcılarla yapılabilmektedir. Bu taşıyıcılar, izolatör sistemleri olarak bilinmektedir (Naeim F. and Kelly J. M., 1999).

Sismik yalıtım ürünleri çok kapsamlı araştırmalar ve geliştirmeler sonucu ortaya çıkmaktadır. Deprem izolatörlerinin ileri imalat teknolojileri ve gelişmiş mühendislik tekniklerine sahip sayılı uzman firmalar tarafından imal edilmeleri ve patentlerinin alınmaya başlanması ise 25 yıl öncelerine dayanmaktadır. 1980' li yıllardan itibaren başta Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Yeni Zelanda, İtalya olmak üzere; Türkiye, İngiltere, Hindistan, Yunanistan, Romanya, Çin, Malezya, Şili, Meksika, Portekiz, Bangladeş, Danimarka, Azerbaycan, Fransa, Dubai gibi pek çok ülkede deprem izolatörlerinin birçok farklı uygulamaları bulunmaktadır.

Taban yalıtımı uygulamalarına bir başka örnek ise Los Angeles City Hall'dır. Bina üç ayrı kısımdan oluşmaktadır. Bodrum kat ve 4. kat arası taban kısmını, 5-11. Kat arası orta kısmını, 12 ve 32. kat arası ise, kule olarak adlandırılır. Yapı, kuzey güney doğrultusunda 145 m, doğu batı doğrultusunda ise 76 m genişliğindedir. Binanın toplam yüksekliği 138 m'dir. Projede, 526 adet izolatör ve sürtünmeli sarkaç mesneti, 64 adet viskoz sönümleyici kullanılmıştır (Youssef, 2001).

Modern anlamda ilk taban izolatörü uygulanan yapı Amerika Birleşik Devletleri'nde "Foothill Communities Law and Justice Center" binasıdır. Dört katlı olan yapıya 98 adet izolatör uygulanmıştır. Taban izolatörlerinin yapının inşasından sonra güçlendirme için uygulandığı yapılara örnek olarak The New Zealand Parliament House" verilebilir. West Japan Postal Computer Center" binası 47.000 m²

oturma alanı ile taban izolasyonu uygulanmış en büyük yapılardan biridir. 1995 Kobe depreminde bina dışındaki ivme 0.41g iken, binanın altıncı katında 0.13g tespit edilmiştir. Yüksek sönüm kapasitesine sahip kauçuk izolatörler uygulanmış yapılara örnek olarak Los Angeles’da “Fire Department Command and Control Facility” ve İtalya’da “Administration Center of The National Telephone Company” binaları gösterilebilir. 68 adet kurşun çekirdekli kauçuk izolatör ve 81 adet elastomerik izolatörün kullanıldığı “The University of Southern California Teaching Hospital” binasında 1994 Northridge depreminde ($M=6,8$) üst yapıda oluşan ivme %80 oranında azalmıştır (Komodromos, 2000). Şekil 1.4’de Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör örneği görülmektedir (T.C. M.E.B. MEGEP, 2006).



Şekil 1.4 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör örneği

Kauçuk yalıtım sistemleri kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamalarına California’daki San Francisco Belediye Binası örnek olarak verilebilir. 1906 San Francisco depreminde yıkılan önceki yapının yerine 1915 yılında inşa edilen Şekil 1.5’te gösterilen bu bina, klasik mimarinin ayakta kalan bir örneğidir (Mirkelam, 2006). Beş katlı bina, 94,2*124,4 m boyutlarında olup iki bloktan oluşmaktadır. Taşıyıcı sistem çelik çerçeve ve beton döşemelerden oluşmaktadır. Bu yapının depreme dayanıklılığını geliştirmede binanın tarihsel dokusunu korumak için taban yalıtım sistemleri kullanılmıştır. Buna ek olarak, binanın içindeki yeni perdelerle üstyapı güçlendirilmiştir. Bu iyileştirme projesi 1998 yılında tamamlanmıştır.



Şekil 1.5 San Francisco Belediye binası

1.5 Sismik İzolatör İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

İlk olarak sismik izolasyon kavramı 1876 yılında Tokyo Üniversitesi maden mühendisliği profesörlerinden John Milne tarafından ortaya atılmıştır. Dr. Milne örnek yapısında 25cm çapında bilyeler kullanarak yapıyı zeminden izole etmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sismik izolasyonun deprem ve rüzgâr yüklerine karşı etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu yöntem Uygulama açısından basit olsada kullanılabilir olmamıştır. Bilyeler üzerinde duran yapı rüzgar kuvvetleri ile deplasman yapmış ve ilk konumuna dönmemiştir. (Cimilli ve Tezcan 2002).

Doğal kauçuğun kullanımı ise 1970 yılında Malezya Kauçuk Üretimi ve Araştırma Birliği Tarafından kauçuk mesnetlerin geliştirilmesiyle başlamıştır. (Kelly, 1991)

Mostaghel (1983), Sürtünmeli sistem taban izolasyonu uygulamış ve bir kayan mekanizma ile yapıyı deprem yüklerinden izole etmeyi başarmıştır. Yatay sürtünme kuvvetleri sismik kuvvetlerini sönmülemiş ve yapının deplasmanını sınırlandırmıştır.

Mahin, Zayas ve Low (1985) tarafından sürtünmeli taban izolasyon sistemlerinin özellikleri deneysel olarak ortaya konmuştur. Yapılan çalışmada 2 katlı yapı modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak Sürtünmeli taban izolasyonu sistemlerinin yapının

periyodunu yükseltmekte olduğu ve yapıya etkiyen deprem kuvvetlerini azaltmakta etkili olduğu belirtilmiştir.

Mostaghel ve Kelly (1987) Elastik sürtünmeli taban izolasyon sistemlerinin tasarım prosedürlerini vermiştir.

Kelly, Griffith ve Aiken (1988) tarafından elastomerik izolasyon sistemlerinin içine monte edilebilen bir deplasman kontrol cihazı tasarlanmıştır. Bu kontrol cihazı sayesinde mesnetlerde oluşacak deplasmanların sınırlanabilmesi sağlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bu kontrol cihazının yapı modelinde mesnetlerin oluşan kaldırma kuvvetlerine karşı koyduğu, yatay deplasmanları sınırladığı belirtilmiştir.

J.A. Calantarietes (1909), Yapıların inşası sırasında yapının temeli ile taşıyıcı duvarlar arasında ince kum tabakası oluşturmak suretiyle yatay harekete izin veren çalışmasını tasarlamıştır (Şekil 1.3)

J.M. Kelly sismik izolatörler konusunu ayrıntıları ile ele almış bir bilim adamıdır. California Berkeler Üniversitesinde çalışmalarını yapmıştır ve elastomerik mesnetler konusunda teorik ve uygulamalı çalışmalar yapmıştır. Kelly (1982) tarafından taban izolasyonunun deprem yüklerinin yapıdaki etkisini incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Sarsma tablası üzerine 5 katlı yapı modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kelly yapı modelini ankastre mesnetli, kauçuk mesnetli, kauçuk ve sürtünmeli sönümleyicinin bir arada kullanıldığı, kauçuk mesnet ile birlikte enerji sönümleyici izolatörler kullanıldığı durumlar için incelemiştir.

Aiken, Kelly, Clark, Tamura, Kikuchi, ve Itah (1992) üç tip sismik izolasyon sisteminin mekanik karakteristiklerini belirlemek amacıyla bir dizi deneysel çalışma yapmıştır. Düşük ve yüksek kayma modülüne sahip yüksek sönümlü kauçuk mesnetler ve kurşun çekirdekli kauçuk mesnettir. İzolatörler düşey yük ve yükleme frekanslarında deplasman testlerine tabi tutulmuş ve kayma rijitliği ve sönüm oranı özellikleri kayma şekil değiştirmesiyle ilişkisi incelenmiştir. Ayrıca yapılan

izolatörlere uygulanan kapasite testlerinde izolatörlerin düşey yükler altındaki kesme dayanımı ve göçme durumları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda düşey yük değişimlerinin kayma rijitliği ve sönüm oranını kayda değer ölçüde değiştirmedeği gözlemlenmiştir. Kesme dayanımı deneylerinde izolatörlerin 5 katına kadar kayma şekil değiştirmelerine dayandığı tespit edilmiştir.

Chopra (1995), sismik izolasyon konusunda teorik ve uygulamalı bir çok çalışma yapmıştır. İlk defa bir bilgisayar programı yazarak hesapların daha kolay yapılmasını sağlamıştır.

Kikuchi ve Aiken (1997) sismik izolasyonlu yapıların sismik tepkisini en az hata ile hesaplamak maksadıyla elastomerik izolasyon mesnetleri için analitik histeretik bir model tasarlamışlardır. İki tipte yüksek sönümlü kauçuk izolatör, bir kurşun çekirdekli kauçuk izolatör ve bir silikon kauçuk izolatör olmak üzere 4 tipte izolatör tanımlamışlardır. Bu izolatörlerin mekanik özelliklerini yük deneylerinde belirlemişlerdir. Belirlenen bu izolatörler için sarsma tablasında örnek bir yapı üzerinde testler yapılmış ve bu testlerden elde edilen sonuçların mesnetlerin mekanik özelliklerin kullanılarak bulunan değerlere uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Kelly (1999) sismik izolasyon sistemlerinde sönümlemenin etkisini araştırmış deplasman değerlerini azaltmak amacıyla sönümleyici eklenen lineer bir modelin teorik esasları verilmiştir.

Makris ve Changt (2000), sismik yalıtım uygulanmış yapıların sismik davranışına viskoz, viskoplastik ve sürtünmeli sönümleyicilerin etkisini araştırmışlardır. Sürtünmeli sönümleyicilerin deplasmanları azaltmak için çok etkili olduğunu fakat bazı durumlar altında sürekli ötelenmeleri oluşturabileceğini, histerik sönümleyicilerinde sürtünmeli sönümleyiciler kadar başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Ryan ve Chopra (2001) asimetrik plana sahip taban yalıtımlı binaların analizi için yaklaşık bir yöntem konusunda çalışma yapmışlardır. Üç farklı metod

geliştirmişlerdir. İlk olarak Rayleigh-Ritz metodunun doğrudan uygulanması, Etkili dış merkezlilik için basitleştirme kullanılması ve son olarak üst yapının rijit olduğu yaklaşımıdır.

1.6 Türkiye’de Temel Yalıtım Uygulamaları

Ülkemizde İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanında, MRO Hangarında Sismik İzolatör uygulanmıştır. Sabiha Gökçen Uçak hangarı toplam 45,000 m² inşaat alanına sahiptir. Oturum alanı 15,000 m²’dir. Aprondan itibaren yapı yüksekliği yaklaşık 20 m dir. Havaalanı pistine paralel yönde 75m + 75 m olmak üzere iki açıklıktan oluşmakta diğer yönde ise toplam 100 m olmak üzere 9 açıklıktan oluşmaktadır. Toplam 30 kolona oturan 2000 ton ağırlığındaki çatının termal gerilmelerden ve deprem kuvvetinden gelecek olumsuz tesirlerinin kolonları en az seviyede etkilemesi için kolonlar ile çatı arasına toplam 30 adet Robinson Sismik Ltd. kauçuk izolatörleri konmuştur. Bunlardan düşey kuvvetin az olduğu 2 kenar aksa 10+10 toplam 20 adet HDRB (Yüksek sönümlü kauçuk izolatör) orta betonarme kolonların olduğu aksta ise 10 adet LRB kurşun çekirdekli kauçuk izolatör yerleştirilmiştir. Kuvvetli rüzgârda orta akstaki izolatörlerdeki kurşun sayesinde çatının hareketi engellenmiştir. Aynı şekilde izolatör seviyesinde cephe kaplamaları da harekete izin verecek şekilde düşünülmüştür. Şiddetli bir rüzgâr sırasında apron tarafındaki kapıların açık olma ihtimaline karşı çatının paraşüt etkisine karşı izolatörlerin çekme tahkikleride yapılmıştır. Sonuç olarak bu tip büyük bir yapıda izolatör kullanılarak ortadaki yapılması gereken dilatasyon ve dolayısıyla ekstra 100 tonluk makas iptal edilerek izolatörlerin maliyeti karşılanmıştır.

Türkiye’de sismik yalıtım konusunda son yıllarda önemli gelişmeler olmasına rağmen, bu sistemlerin binaya getirdiği ek maliyet ve işçilik yüzünden Türkiye’de sismik yalıtım sistemleri yeteri kadar kullanılmamaktadır. Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Kampüsü’nde yapımına 2002’de başlanan ve 12 bin 500 m² alan üzerine 67 bin 500 m² kapalı alana sahip olan Tıp Merkezi, Türkiye’de sismik izolatör kullanılarak inşa edilen ilk yapıdır. 256 adet izolatör üzerinde duran hastane, deprem anında 27cm deplasman yapabilmektedir.

Geçtiğimiz yıllarda yapımı biten 186 bin m²'lik Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali'nin temelinde yaklaşık 5 milyon Amerikan Doları'na mal olan 180 adet sismik izolatör yerleştirilmiştir. Bu sistem sayesinde 8 büyüklüğünde bir deprem olması halinde yapının camları bile kırılmayacak, bina servis hizmetini aksamadan yerine getirebilecektir. Amerikan Mühendisler Konseyi (ACAC) tarafından her yıl geleneksel olarak verilen Mühendislik Akademi Ödülü, Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali'ni yapan Türk şirketi' ne verilmiştir (Doka Endüstri internet sitesinden alınmıştır).

17 Ağustos 1999 Marmara Depremi'nde fay hattının çok yakınından geçmesi sebebiyle büyük hasar gören Bolu Tüneli Viyadükleri'ne Amerika'da geliştirilen 3 metre çapında 6 ton ağırlığında 500 tane izolatör takılmıştır. Yaklaşık değeri 15 milyon Amerikan Doları'nı bulan sismik izolatör takviyesi, viyadüklerin bundan sonra yaşanacak bir depremde çok daha az zarar görmesini sağlayacaktır. Viyadüklerin normal durumda doğal titreşim periyodu 0,5 sn ve 1 sn arasındayken izolatörler ile periyodun 5–6 saniyeye çıkarak deprem anında 70cm deplasman yapabileceği ifade edilmiştir.

İstanbul'da 40 yıl önce yapılan ve Marmara Depremi sonucu bazı temel bağlantılarının olmadığı saptanan Tarabya Oteli, sürtünmeli sarkaç sistemiyle (Friction Pendulum Bearing) 3 milyon 775 bin Amerikan Doları'na güçlendirilmiştir. Yapı, uygulanan yalıtım sistemi sayesinde depremde her yönde 30cm deplasman yapabilmektedir.

Şekil 1.6'da gösterilen Antalya Hava Limanı Dış Hatlar Terminalinde uygulanan sistem Dünya'da sismik yalıtım konusunda yapılmış en iyi ilk beş projeden birisidir. 50.000 m² alana sahip Terminal binasında 411 adet kolon kesilerek Agom firmasının ürettiği kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler yerleştirilmiştir. Kesilen perde duvarlara ise kayıcı mesnetler monte edilmiştir. Yine proje gereği uzay çatı ile tüm elektromekanik sistemlerde depreme karşı izole edilmiştir (Agom Metal Rubber Engineering internet sitesinden alınmıştır).

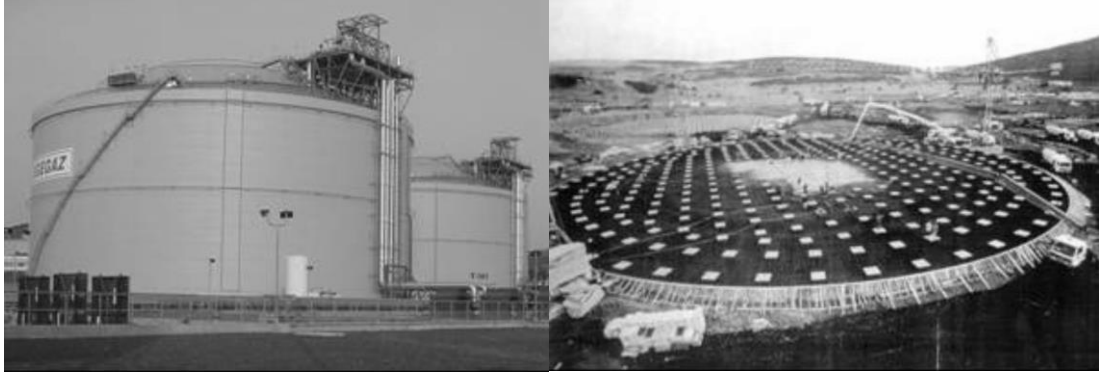


Şekil 1.6. Antalya Havaalanına sismik izolatörün uygulanışı görülmektedir.

Depremler sırasında ve sonrasında zarar almaksızın ayakta kalması gereken yapılardan bir tanesi de hastanelerdir. Erzurum Devlet Hastanesi depremin kuvvetlerinin etkisine karşı sismik izolasyon uygulamalarıyla inşa edilmiştir. Erzurum Devlet Hastanesi'nin deprem yalıtımı için 386 adet kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanılmıştır. Bu izolatörlerin çapları 80, 90, 100, 110 cm'dir. 80 cm çaplı olanların bazılarında kurşun çekirdek bulunmamaktadır.

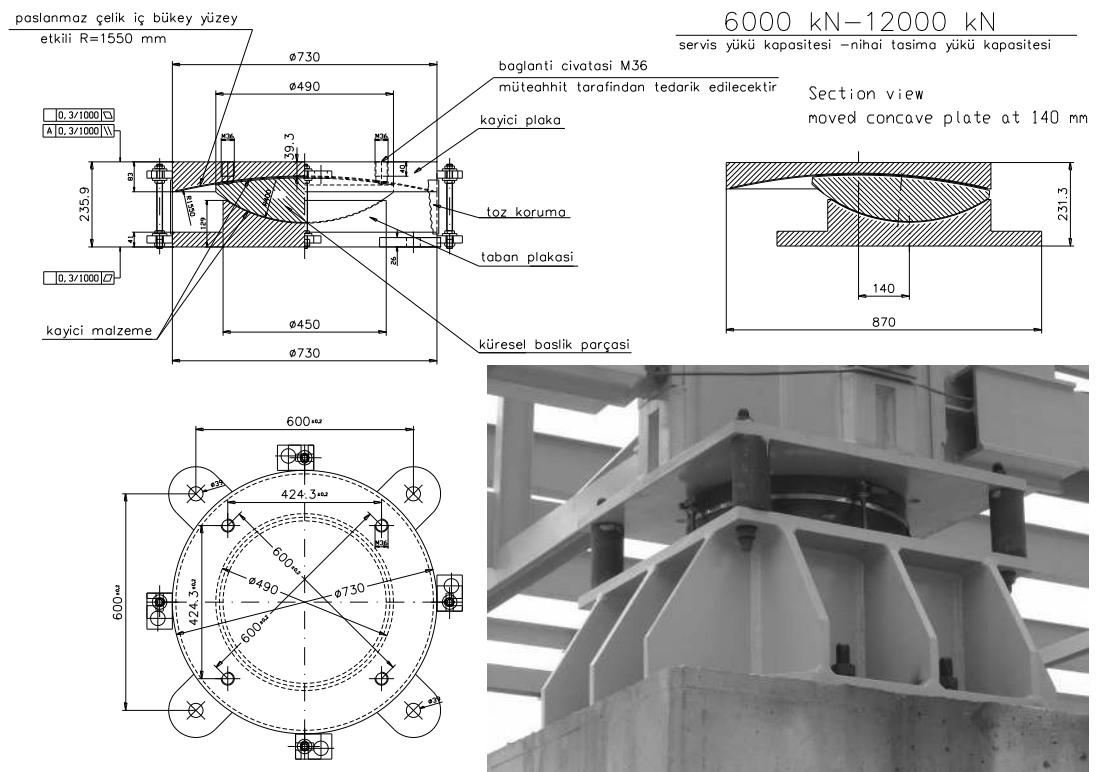
Erzurum'daki sismik yalıtımlı diğer bir bina ise Bilkent Lisesidir. Bu binanın sismik izolasyon uygulaması açısından farklılığı ise inşası sırasında izolatörlerin siparişi yetişmediğinden izolatör gelecek yerler boş bırakılarak inşaata devam edilmiş ve izolatör yerlerinin yan tarafları izolatör yerleştirilebilecek şekilde yükseltilmiş daha sonra izolatörler buraya yerleştirildikten sonra yan taraftaki bu kısımlar kesilerek bina izolatörler üzerine oturtulmuştur.

Deprem durumunda kentler arası ulaşımın sektöre uğramaması için viyadüklerde sismik izolasyona başvurulduğu gibi sanayi sektöründe de bu uygulama hayat bulmuş ve İzmir Aliaga'da bulunan Ege Gaz terminalindeki LNG tanklarının inşasında sismik izolasyonlu yapılmıştır. 140.000 m³ kapasiteli bu tankların kenarlarında 112 adet kurşun çekirdekli kauçuk mesnet (LRB) ve iç kısımlarda 221 düşük sönümleyicili kauçuk mesnetler (LDRB) kullanılmıştır. Bu LNG tanklarının ve inşasının görüntüleri Şekil 1.7'de verilmiştir (Terbay İnşaat internet sitesinden alınmıştır).



Şekil 1.7 İzmir Aliğa'da bulunan LNG tankları

Sismik izolasyon kullanılan diğer bir yapı olan Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi, Eskişehir Yolu'nda, Söğütözü mevkiinde bulunan Metro ve Ankaray ortak istasyonun üzerinde inşası yarım kalan yapıdır. Şekil 4'de de görülmekte olan 280x95 m'lik oturma alanına sahip bina tamamlandığında yaklaşık 210.000 m²'lik kapalı alana ve 70 m yüksekliğe sahip olması bekleniyordu. Deprem yalıtım hesabı, binanın 110 km uzaklığında bulunan Kuzey Anadolu Fay hattında meydana gelebilecek 8 büyüklüğündeki tasarım depremine göre yapılmıştır. Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi'nde izolatör kotunda kolonlar arasında oluşabilecek maksimum görelî deplasman 13 cm olarak hesaplanmıştır ve bunun sonucunda izolatörler ± 14 cm deplasmana sahip şekilde tasarlanmıştır. Sismik izolasyonda Maurer firmasından temin edilmiş sürtünmeli sarkaç tipindeki izolatörler kullanılmıştır (Şekil 1.8). Bu parçalar yapının deprem yükleri altındaki analizi sonucu elde edilen yatay deplasmanları karşılayacak şekilde, istenilen boyutlarda üretilmiştir. dört farklı boyutta üretilen izolatörlerde deplasman değerleri değişmemiş, servis yükü kapasiteleri ve nihai taşıma kapasiteleri değişmiştir. Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi'nde çelik yapı şekil 7'de de gösterilen 105 adet izolatör ile alttaki betonarme sistemden izole edilmiştir. Ayrıca 8 ana kolon üzerinde bulunan kabuk kısmı da 8 adet izolatörle depreme karşı yalıtılmıştır. İnşası yarım kalan bu merkezin Aralık 2012 tarihi itibarıyla yıkımı başlamıştır ve bu proje hayata geçmeden son bulmuştur (Kürklü ve Ergün, 2009).



Şekil 1.8 Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi İzolator Detayı

BÖLÜM İKİ

MATERYAL VE METOD

2.1 Giriş

Sismik taban izolasyonu; yapı ile zemin arasındaki etkileşimi minimuma indirebilecek sistemler kullanarak, yapının zeminden yalıtılmasının sağlanmasıdır. Depreme dayanıklı yapı üretiminde, tasarımı olumsuz etkileyen faktör olarak, dinamik etkiler esnasında zeminin tahmin edilemeyecek olan karmaşık, doğrusal olmayan davranışı gelmektedir. Tasarımda göz önüne alınan zemine ait değerler, zemin emniyet gerilmesi, zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesi gibi zemin özellikleri, dinamik etkiler nedeniyle tahmin edilenden daha farklı değerlere ulaşabilmektedirler. Bu durumda yapı ile zemin arasındaki etkileşimin en aza indirilmesi yaklaşımı, bir anlamda çözüm olmuştur. Taban izolasyonu tasarımında, yapının dinamik özellikleri değiştirilerek, yapı yatay yönde serbestçe hareket edebilecek şekilde tasarlanmakta ve yatay yüklere maruz kalan yapının deformasyonu önlenmiş olmaktadır. Fakat yük etkisi altında yapıda oluşabilecek deformasyonların bilinebilmesi, yapıda oluşacak enerji kayıplarının bilinmesiyle mümkündür. Sismik bir etki süresince yapıya bir miktar enerji girişi olmaktadır. Bu enerji kısmen ısı enerjisine dönüşerek yapı içinde sönmölenmekte veya potansiyel enerji ve kinetik enerji olarak iki farklı enerjiye dönüştürölmektedir. Fakat enerji kayıplarından dolayı elde edilen sönmö sınırlıdır. Hareket sona erene kadar titreşim şiddeti gittikçe azalmaktadır. Bu nedenle sismik taban izolasyon sistemleri gibi, yapıya ilave edilen bazı araçlar ile yapı sistemine giren enerjinin bir kısmı sönmölenerek, yapının enerji yutma kapasitesi artırılır. Sistemde titreşim şiddeti sona erene kadar enerji kayıplarının minimuma indirilmesi hedeflenir ve bu sayede yapıda meydana gelen şiddetli deformasyonlar önlenmiş olur (Soong ve Constantinou, 1994).

Taban yalıtımı düşöncesi oldukça basit bir mantığa dayanmaktadır: Yalıtım sistemi binayı, temel ile üstyapı arasına yerleştirilmiş düşük yatay rijitliğe sahip yapı elemanları ile yer hareketlerinin yatay unsurlarından büyük ölçöde ayırır. Bu sistemin yapıya verdiği frekans yer hareketinin baskın frekansından ve yalıtılmamış

olan yapı frekansından daha düşüktür. Yalıtılmış yapının birinci dinamik modu yalnızca yalıtılmış sistemin deformasyonlarını içermektedir. Yapıda deformasyon üreten daha yüksek modlar birinci moda, dolayısıyla zemin hareketine diktir. Bu modların harekete katılımı yoktur. Bu nedenle daha yüksek frekanslı zemin hareketlerindeki yüksek enerji üst yapıya geçemez. Yalıtım sistemi, deprem enerjisini soğurmak yerine sistemin dinamiği yoluyla baksa yöne çevirir ve bu etki sönümden bağımsızdır. Fakat belirli bir seviyedeki sönüm, olası bir rezonansı bastırmak açısından faydalıdır. Sismik izolasyon sistemleri yapılarak proje aşamasında uygulanabildikleri gibi inşa edilmiş yapılarda uygulanabilmektedir. İzolasyon sistemlerinin hangi yapılara uygulanabileceğini seçerken dikkat edilmesi gereken faktörler aşağıda özetlenmiştir. İzolatör uygulanacak yapı inşası tamamlanmış bir yapı ise bu yapının deprem sırasında korunmasını ve tahrip olmasını engellemek için için gereklidir. Nükleer santraller, hastaneler, petrol tankları, hassas aletlerin bulunduğu yapılarda ve depremden sonra ayakta bulunması gereken yapılarda kullanılabilir. Sismik izolasyon uygulanacak olan yapıda, sağlanması gereken bazı koşullar vardır. Bilindiği gibi izolasyonlu yapı yatay yönde belli bir oranda hareket serbestliğine sahiptir. (Naeim ve Kelly, 1999)

Sağlanması gereken özel koşullardan en önemlisi, yapının çevresinde izolatörlerin deplasmanı kadar boşluk olmasıdır. Eğer izolatörler inşası tamamlanmış bir yapıya uygulanacaksa bu şart sağlanmadan diğer işlemlerin hiçbir getirisi olmayacaktır. Örneğin deprem derzine sahip olmayan yapılarda sismik izolasyon tekniği uygulanamaz. Çünkü bu tür yapılar bitişik nizam yapılardır ve bir doğrultuda deplasman yapmaları mümkün olmadığı için sismik izolasyon söz konusu olamamaktadır. Bu koşul sağlandıktan sonra, göz önüne alınması gereken diğer bir hususta, yapının tesisat bağlantılarının düzenlenmesidir. Depremler sırasında yapının dışarıyla bağlantısını sağlayan elemanların, elektrik, telefon, içme suyu, kanalizasyon, doğalgaz vb., yapının yapmış olduğu yer değiştirme sonrasında kopma yada kırılma riski söz konusudur. Bu nedenle tesisat ekipmanlarının hepsinin deplasman için bırakılan boşluk kadar esneme yada yer değiştirme kapasitesine sahip olması gerekmektedir (Kelly, 2001).

2.2 Sismik Yalıtım Yöntemleri

Taban yalıtımında kullanılan izolatör tipleri, şekil ve büyüklük itibarı ile ve yapıldıkları malzemeler bakımından farklılık göstermektedirler. İzolatörlerin büyük çoğunluğu elastomer malzemeden üretilmektedirler. Elastomer malzeme kalıba kolayca yerleştirilebildiğinden istenilen şeklin verilebilmesi bakımından avantajlıdır. Metal malzeme ile aderansı güçlüdür, bu özelliğinden dolayı üretimi kolaydır. Uygulamada maruz kalacakları kuvvete göre şekillendirilebilirler. İzolatör sönümü, rijit kütle rezonansında büyük yer değiştirmeleri engelleyecek, yüksek frekansta dalga hareketinden koruyacak düzeyde seçilmelidir. İzolatörler düşey doğrultuda çok rijit fakat aksine yatay doğrultuda ise esnektir. Deprem hareketinin düşey bileşenine karşı koruyuculuğu yoktur, yani depremin düşey bileşeni yapı tarafından karşılanır. Taban izolasyonu yapıların titreşim periyotlarını arttırdığı için, kısa periyotlu yapılarda kullanımı daha uygundur. Sönüm gibi kauçuk malzeme özellikleri frekans ve sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle izolatörler en uygun sönüm ve rijitliğe göre uygulanmalıdırlar. İzolatörler zamanla yıpranabilirler. Bu nedenle izolatör kullanımında uzun süreli basınç ve düşük sıcaklıktaki etkileri düşünülmelidir. Yaygın olarak kullanılan izolatör tipi elastomer malzemeden oluşan, tabakalı kauçuk mesnetlerdir. Kauçuklar arasındaki tabakalaşma izolatörün basınç altındaki mukavemetini artırır. Basınç altında diğer yönlerde genişlemeye olanak sağlar ve uniform yük dağılımını sağlar. Tabakalı kauçuk sistemlerinin düşey rijitliğinin belirlenmesinde, izolatör şekli önem taşımaktadır. Şekil faktörü, izolatörde yükün etkidiği alanın, serbest genişleme alanına oranı olarak tanımlanır. Yatay rijitlikte izolatör şeklinin önemi yoktur.

Helezon yaylardan oluşan izolasyon sistemleri, kuvvet sistemlerindeki aletlerin titreşimlerini önlemek için kullanılmaktadır. Bu tip sistemlerde, yaylar düşey harekette yatay harekete göre çok fazla rijit değildirler. Oysa tabakalı

kauçuk mesnetlerin düşey rijitlikleri, yatay rijitliğin birkaç yüz katı olabilmektedir.

Kayıcı sistemler, kesme kuvvetinin indirgenmesi prensibine dayandırılmaktadır. Genelde çelik mesnetlerden oluşmuş sistemlerdir. Deprem hareketi esnasında yanal rijitlik ve her bir yatakta oluşan sürtünme kuvveti yatak üzerine mesnetlenen ağırlıkla direk olarak bağlantılıdır. Burada yapı ağırlık mesnedi ile yatakların rijitlik merkezleri çakışmalıdır.

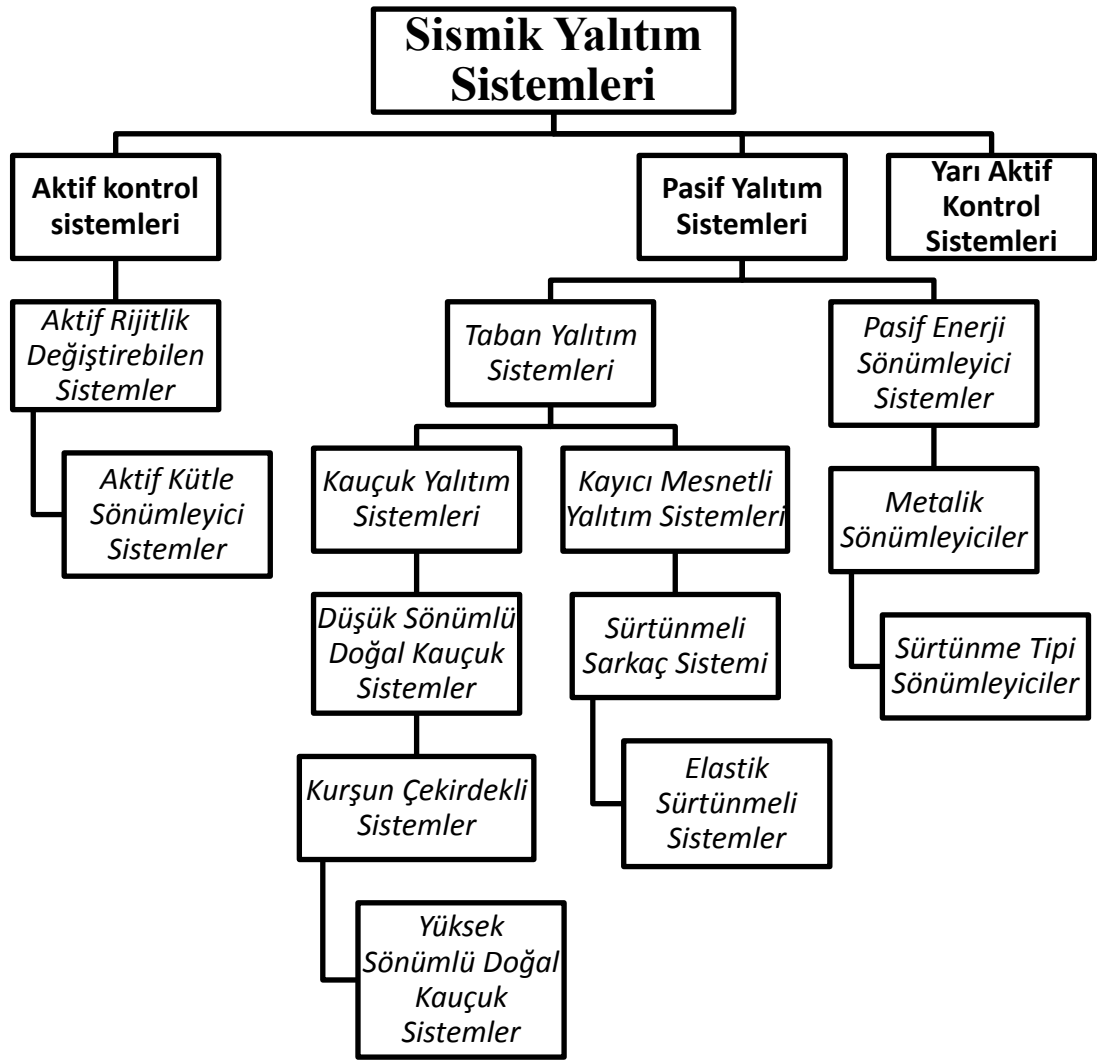
Yapılan çalışmada bu yalıtım sistemleri üç ana başlık altında incelenecektir. Bu sistemler;

- Pasif Yalıtım Sistemleri
- Aktif Kontrol Sistemleri
- Yarı Aktif Kontrol Sistemleri'dir

Pasif kontrol sistemleri sabit özelliklere sahiptir, dışsal bir enerji kaynağı gerektirmezler. Yapıya bir kez kurulduktan sonra modifikasyona ihtiyaç duymazlar. Dolayısıyla, etkili olabilmeleri için güvenilir bir tasarım yükü tahminini ve herhangi bir pasif kontrol taslağı için fiziksel sistemin sayısal modelinin doğru olmasını gerektirirler. Beklenmeyen bir yükleme değişikliği durumunda sistemde sonradan bir değişiklik veya telafi mümkün olmayacaktır. Pasif kontrolde karşımıza çıkan bu sınırlamalar, aktif kontrol sistemlerinin gelişmesini sağlamıştır. Aktif kontrol sistemlerinde sistem özelliklerinin ve yüklemenin dinamik olarak değiştirilebilmesi, performansı iyileştirme durumunu sağlamaktadır. Bir aktif yapı kontrol sisteminde, yapının mevcut durumunu belirleyebilme yeteneği vardır ve bu durumu arzu edilen duruma dönüştürebilmek için sistem, gerekli durumları kısa bir zaman içinde oluşturabilir. Bu tür kontrol sistemleri, teorik olarak, beklenmeyen çevresel değişikliklere uyum sağlayabilir, performans gereksinimlerini tam olarak karşılar ve sınırlı sayıda taşıyıcı sistem elemanlarındaki hataları telafi edebilir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak sistemin değiştirilmesi mümkündür. Hem ekonomik hem de teknik olarak geniş bir uygulama aralığında daha verimli çözümler sunar.

Pasif yalıtım sistemleri aktif sistemlerin aksine dışarıdan ek bir güç gereksinimi olmadan yapıyı izole ederler. Aktif sistemlere oranla daha basit ve ucuz sistemlerdir.. Aktif kontrol sistemlerinde sensörler (zemin veya yapının içinde) ve tepki elemanları vardır.

Yarı aktif kontrol sistemleri ise aktif ve pasif sistemlerin bir birleşimi olarak ön plana çıkmaktadır. Bu sistemler kontrol edilebilen pasif sistemler ya da enerji gereksinimi aktif sistemlerden daha az olan yalıtım sistemleri olarak tanımlanabilir. Tamamen kontrol edilebilen bu sistemler, deprem esnasında oluşabilecek bir enerji kesintisinde akü gibi küçük enerji kaynakları ile koruma işlevine devam eder. Genelde sistemlerin çoğu elektrik ve manyetik alana duyarlı sıvılar içerir. Şekil 2.1.'de sismik yalıtım sistemlerinin en çok uygulanan çeşitleri belirtilmiştir.



Şekil 2.1 Sismik yalıtım sistemlerinin sınıflandırılması

2.2.1 Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif Kontrol Sistemleri titreşim genliklerinin azaltılması ve sönümün artırılması amacı ile kullanılır. Çatlama, kırılma, plastik deformasyon gibi mekanik özellikler yapının sönüm oranını belirler. Sönüm oranı arttıkça yapıda dinamik etkilerden dolayı oluşan titreşim genlikleri azalacak dolayısı ile hasar oranı düşecektir. Klasik yöntemle yapılan yapılarda rijitliğin artması ile enerji sönüm kapasitesi azalmakta bu da yüksek titreşim genlikleri ile sonuçlanmaktadır. Pasif kontrol sistemlerinin

dışarıdan enerji gereksinimi yoktur. Yapısal kontrol sistemleri arasında en ekonomik sınıf olması ve tasarlandıkları depremlerde maksimum koruma sağlamaları sistemin avantajları olarak sayılabilir. Pasif kontrol sistemleri taban izolasyonu ve pasif enerji sönümleyen sistemler olarak sınıflandırılabilir.

2.2.1.1 Metalik Sönümleyiciler

Metalik sönümleyici sistemler, metallerin elastik olmayan sınırlar içindeki histeretik davranışları esas alınarak üretilmiştir. Metalik sönümleyiciler yapıya gelen dinamik kuvvetleri plastik şekil değiştirme yaparak sönümler. Yani, sönümleyicinin ve dolayısı ile sistemin direnç kuvveti malzemenin lineer olmayan alandaki karakteristiklerine bağlıdır. Enerjinin belli noktalarda yoğunlaşması sağlanarak taşıyıcı sistemin zarar görmesi engellenir (Aydın, 2005).

Bu sistemlerin çoğunda dikdörtgen, üçgen veya x şeklinde yumuşak çelik plakalardan oluşan mekanizmalar kullanılır. Genelde her kata yerleştirilen bu sistem çapraz kavrama çubuklarının arasına bu mekanizmaların uygulanmasıyla oluşur. Metalik enerji sönümleyici elemanların özellikle çelik yapılara uygulamaları daha kolaydır. Bu sönümleyiciler uzun servis kullanımı, çevresel etkilere dayanım ve dinamik yükler altındaki kararlı davranışları sebebiyle diğer pasif kontrol sistemlerinden ayrılır.

2.2.1.2 Sürtünme Tipi Sönümleyiciler

Malzemenin sürtünme özelliği kullanılarak geliştirilen bu sistemler de diğer enerji yutucu mekanizmalar gibi etkili ve çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Yapıya gelen kuvvetleri sürtünme yardımıyla kinetik enerjiden ısı enerjisine çevirirler böylece bu yükleri sönümleyebilirler. Sürtünmeli sönümleyiciler, yapı çerçevesine yerleştirilir ve yer hareketinden doğan kinetik enerjiyi elemanlardaki kayma sürtünmesi ile ısı enerjisine çevirir.

2.2.2 Taban (Sismik) İzolasyon Sistemleri

Sismik taban izolasyonu yapıyı iki parçaya ayırarak dinamik yüklerin üst yapıya daha az oranda iletilmesini sağlar. Taban izolasyonunda kullanılan malzeme düşey yönde rijit yatay yönlerde ise esnek davranış gösterir. Düşeyde rijitliğin artması amacı ile çok ince çelik plakalar kullanılır. Yatayda ise 100~200 mm mertebesinde deplasmana izin verilir. Bu sayede yapının birinci doğal titreşim periyodu artarak sismik yükler altında üst yapıda daha küçük ivmeler elde edilir. Klasik yöntemde ise, rijitliğin arttırılması sonucunda yapıda oluşacak ivme artacak ve yapı içinde bulunan değerli ekipmanlar zarar görecektir. Sünekliğin yüksek mertebede olması ise yapısal sistemde büyük hasarlar meydana getirecektir. Sismik izolasyon uygulanan yapı aynı sabit temelli yapıdan daha büyük periyoda sahip olmalıdır. Bu sayede birinci modda oluşan şekil değiştirmeler izolatörler üzerinde kalacaktır. Diğer titreşim modları birinci moda ve yer hareketine dik olmaları nedeniyle sismik enerji üst yapıya iletilmez ve üst yapı rijit bir davranış sergiler.

2.2.2.1 Kauçuk İzolatörler

Deprem sırasında bir dalga halinde ilerleyen yer hareketi, yapıya ulaştığında temel kotunda bir hareket meydana getirir. Temeldeki bu hareket, üst yapıya iletilir ve yer değiştirme, çatlak ve plastik mafsalları oluşumları ile sönümlenir. Deprem, yapıya kütlesi ve rijitliği oranında etki eder. Yapının temelini taşıyıcı sistemden ayrılarak, titreşimin üst yapıya geçmesini önlemek temel yalıtımının ana fikrini oluşturur. Taban yalıtım sistemleri gün geçtikçe yeni modellerle karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemler genel olarak iki kısımda incelenebilir. Bunlar kauçuk yalıtım sistemleri ve kayıcı taban yalıtım sistemleridir. Kauçuk taban yalıtım sistemleri günümüzde en yaygın olarak kullanılan sismik yalıtım metodudur. Bu sistemler birbirine volkanize işlemi ile birleştirilmiş kauçuk ve çelik tabakalarından oluşan mesnetlerdir. İzolatörün yatay rijitliği istenmeyen yer değiştirmeleri engellemek şartıyla esnektir. Bunun yanında çelik levhalar sayesinde izolatör nispeten daha büyük bir düşey rijitliğe sahiptir. Bu mesnetler kalınlığı 8–20 mm arasındaki kauçuk tabakaların ve

kalınlığı 2-3 mm arasındaki elik levhaların st üste konulmasıyla oluşur. Bu iki levha basınç ve sıcaklık altında birbirine yapıştırılırken mesnedin alt ve st yüzeylerine ise bağlantıyı gerçekleştirecek geniş ve kalın elik levhalar yerleştirilir (Celep ve Kumbasar 2004). Bu sistemlerin hareketli parçaları olmadığı için üretilmesi ve uygulanması kolaydır. evre şartlarından ve zamandan diğer sistemler kadar etkilenmezler. Uygulamada kauçuğa şekil vermek kolay olduğu için kare silindir veya içi boş olarak retilerler. Kauçuk izolatorün depremin yatay bileşenine karşı yapıyı korumasına karşın, deprem hareketinin düşey bileşenine karşı herhangi bir koruyuculuğu yoktur ve bu etkiyi aynen yapıya iletir. Taban yalıtımlı yapılarda yatay yükler ankastre durumdan daha küçük olduğu için devrilme momenti de daha küçük olur. Kauçuk esaslı yalıtım sistemleri sismik yalıtım alanında uygulanan ilk sistemlerdir. Kauçuğun bu amaçla kullanılmaya başlanması 50–60 yıl öncesine dayanır. Kauçuğun dışında şişe mantarı, keçe, fiberklas içeren malzemeler ve kauçuk köpük gibi malzemelerde yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Fakat bu malzemelerin mekanik özellikleri, elastomer malzemeler kadar iyi bilinmezler ve bunların yalıtım performansı büyük oranda tahminidir. Kauçuk yalıtım sistemleri başta köprüler olmak üzere sanayi yapıları, evler, su tankları, statlar gibi birçok yapının korunmasında, tarihi yapıların takviye edilerek güçlendirilmesinde, trafik ve makinelerin oluşturduğu titreşimlerden etkilenen yapıların kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır (Aydın, 2005).

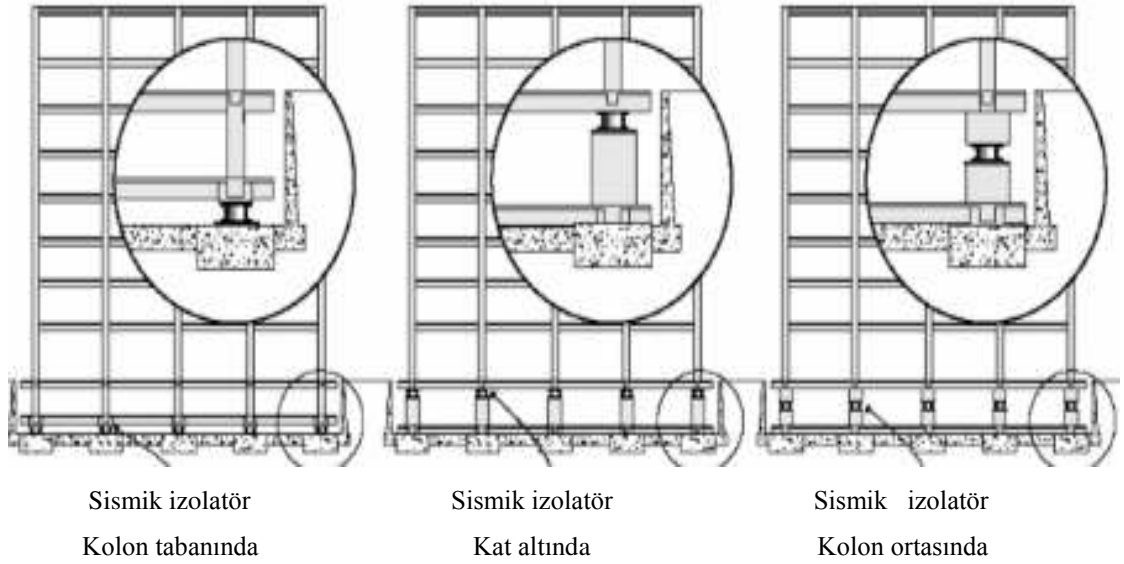
şekil 2.2 de Bulon ile bağlantıları yapılmış yük altında kauçuk izolatordeki elik ve kauçuk tabakalar görülmektedir (M.E.B. 2006).



Şekil 2.2 Kauçuk izolatör yük altında olduğunda çelik ve kauçuk tabakalar belirgin şekilde görülmektedir.

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi yapıların statik hesaplarına göre kauçuk esaslı sismik izolatörler;

- Kolon tabanına,
- Kolon ortasına,
- Kat altına, olmak üzere üç şekilde yerleştirilebilir (M.E.B. 2006).



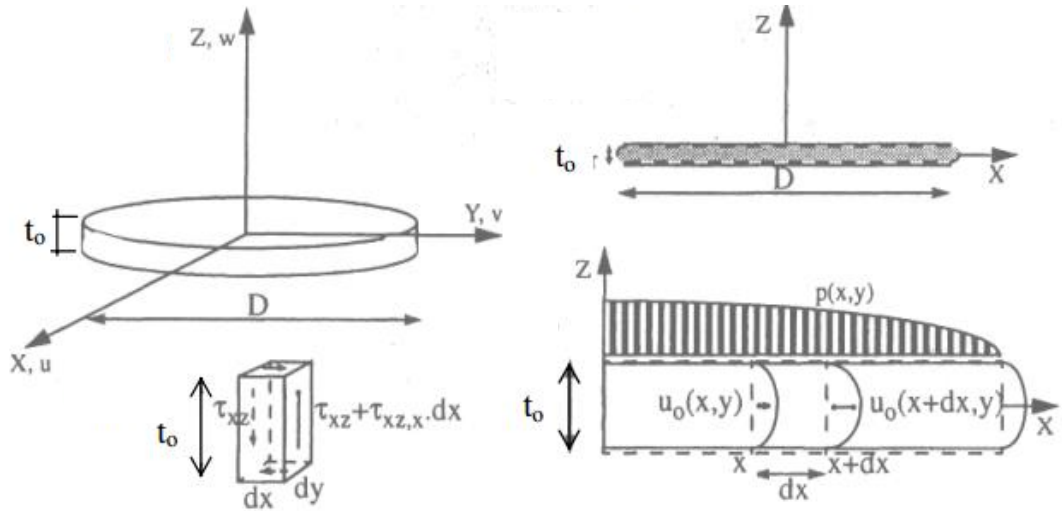
Şekil 2.3 Kauçuk izolatörlerin kolonlarda uygulama yerleri

2.2.2.2 Kauçuk İzolatörlerin Stabilitesi ve Tasarım Unsurları

Kauçuk mesnetlerin mekaniksel özellikleri ile ilgili olan S_1 ve S_2 şekil faktörleri geometrik özelliklerini tarif etmekte kullanılır. Şekil 2.4'te mesnet sisteminin boyut elemanları birim kesit üzerinde görülmektedir. İlk şekil faktörü S_1 çelik plakalarla kauçuk üzerindeki yük alanının tek bir kauçuk plakası alanına oranlayarak bulunur. S_1 şekil faktörü birimsiz olup uygun

değer aralıkları oran olarak 10 ile 20 arasında değişmektedir. Bu şekil faktörü özellikle düşey deplasmanı etkiler. S_1 arttıkça düşey rijitlikle artmaktadır. Dairesel bir izolatör için S_1 denklem (2.1) ile hesaplanır (Kelly, 1991).

$$S_1 = \frac{\text{Kauçuk tabanının yüklü alanı}}{\text{Kauçuk tabanın serbest alanı}} = \frac{\pi D^2}{4\pi D t_0} = \frac{D}{4t_0} \quad (2.1)$$



Şekil 2.4 Kauçuk mesnet sisteminin bir kauçuk ve çelik tabakadan oluşan boyut elemanları görülmektedir (Komodromos, 2000).

Diğer şekil faktörü olan S_2 , kauçuk mesnet çapının tabakalarının toplam kalınlığına oranı olup denklem (2.2) ile hesaplanır (Kelly, 1991).

$$S_2 = \frac{D}{n_r t_0} \quad (2.2)$$

Burada;

D , mesnedin çapı

n_r , kauçuk tabaka adedi

t_0 , tek bir kauçuk tabaka kalınlığı

t , çelik tabaka ile kauçuk tabakanın toplam kalınlığını göstermektedir.

Her ne kadar elastomerlerin davranışı doğrusal olmasa da doğrusal bir elastik analiz elastomer izolatörlerin tasarımı için uygun olmaktadır. Bu analiz için aşağıdaki varsayımlar yapılabilir;

- $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$, kauçuk mesnet üzerinde herhangi bir noktadaki normal gerilmeler ve p :tek bir kauçuk tabaka üzerine etkiyen parabolik yayılı yük olmak üzere Elastomer üzerinde herhangi bir noktada $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = p(x, y)$ olarak varsayılmıştır.
- Dış yükün dağılımı elastomer üzerinde paraboliktir ve mesnet yüzeylerinde bu basınç 0'a eşittir.
- Yüklemeden önceki düşey düzlemde bulunan noktalar, yüklemeden sonra bir parabol eğrisi üzerinde sıralanırlar.
- Yatay düzlemler deformasyondan sonra yatay kalırlar.

Yukarıdaki varsayımlar kullanılarak tek bir kauçuk tabakasına ait üç eksenli yer değiştirmeler olan u, v ve w (2.3), (2.4), (2.5) ile tanımlanabilir; (Tezcan ve Cimilli, 2002)

$$u(x, y, z) = u_o(x, y) \left(1 - \left(\frac{2z}{t_0} \right)^2 \right) \quad (2.3)$$

$$v(x, y, z) = v_o(x, y) \left(1 - \left(\frac{2z}{t_0} \right)^2 \right) \quad (2.4)$$

$$w(x, y, z) = w(z) \quad (2.5)$$

dx, dy, dz ve t_0 boyutlarındaki sonsuz küçüklükte bir elemanın X,Y,Z yönlerindeki hacimsel değişimi ΔV ise (2.6) ile tanımlanmaktadır.

$$\Delta V = \varepsilon_c t_o dx dy - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{4}{6} t_o u_o(x, y) \right) dx dy - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{4}{6} t_o v_o(x, y) \right) dx dy \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta t}{t} \quad (2.7)$$

Burada;

ε_c , basınç gerilmeleri altında birim boydaki kısalma

Δt , düşey yönlü yer değiştirme

t , mesnet boyunu göstermektedir.

Bu hacimsel değişim, elastomerin hacimsel modülü " K " ile ilgilidir. p : tek bir kauçuk tabaka üzerine etkiyen parabolik yayılı yük, V , kauçuk mesnedin belirlenen hacmi olmak üzere; Δt , kauçuk mesnedin düşey yük altındaki deplasmanı, aşağıdaki şekilde bulunabilir (Tezcan ve Cimilli, 2002).

$$\Delta t = \frac{pV}{K} = \frac{p \, dx \, dy \, t_o}{K} \quad (2.8)$$

Buradan; $\frac{p}{K}$ oranı ise;

$$\frac{p}{K} = \varepsilon_c - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial}{\partial x} u_o(x, y) + \frac{\partial}{\partial y} v_o(x, y) \right) \quad (2.9)$$

Hacim modülü, K ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.10)$$

G , Kayma modülü ise şu şekilde ifade edilebilir.;

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.11)$$

Burada $\tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{xy}$; sonsuz küçük elemanın xz, yz, xy düzlemlerindeki kayma gerilmeleridir.

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz} = G \left(\frac{\partial}{\partial x} w(z) + \frac{\partial}{\partial z} u(x, y, z) \right) = G \frac{\partial}{\partial z} u(x, y, z) \quad (2.12)$$

$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz} = G \left(\frac{\partial}{\partial y} w(z) + v \right) = G \frac{\partial}{\partial z} v(x, y, z) \quad (2.13)$$

Deplasmanlar için önceden bulunan değerler yukarıdaki denklemlerde yerine konularak, tek bir kauçuk tabakasına ait eksenel yer değiştirmeler olan u, v ve w ile uygun diferansiyel denklemleri çözerek (2.14) ve (2.15) denklemleri elde edilir (Tezcan ve Cimilli, 2002);

$$\tau_{xz} = G \frac{\partial}{\partial z} u(x, y, z) = - \frac{8Gzu_o(x, y)}{t_o^2} \quad (2.14)$$

$$\tau_{yz} = G \frac{\partial}{\partial z} v(x, y, z) = - \frac{8Gzv_o(x, y)}{t_o^2} \quad (2.15)$$

Bu denklemlerden;

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} = - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \frac{8Gzu_o(x, y)}{t_o^2} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} = - \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \frac{8Gzv_o(x, y)}{t_o^2} \quad (2.19)$$

elde edilir, böylece

$$u_o(x, y) = \frac{t_o^2}{8G} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} u_o(x, y) = \frac{t_o^2}{8G} \frac{\partial^2 \tau_{xx}}{\partial x^2} \quad (2.20)$$

$$v_o(x, y) = \frac{t_o^2}{8G} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \rightarrow \frac{\partial}{\partial y} v_o(x, y) = \frac{t_o^2}{8G} \frac{\partial^2 \tau_{yy}}{\partial y^2} \quad (2.21)$$

(2.20) ve (2.21) denklemlerinden

$$\frac{\partial^2 \tau_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau_{yy}}{\partial y^2} = \frac{12G}{t_o^2} \left(\varepsilon_c - \frac{p}{K} \right) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} p(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} p(x, y) = \frac{12G}{t_o^2} \left(\varepsilon_c - \frac{p}{K} \right) \quad (2.23)$$

Oluşturulan kısmi diferansiyel denklem, düşey uygulanan yükle $p(x, y)$ ve düşey birim kısalma (ε_c) ile ilişkilidir. Dairesel mesnetler için Kartezyen koordinatlar yerine (x, y, z) , silindirik bir koordinat sistemi (r, θ, z) kullanmak daha kullanışlıdır. Bu durumda (2.24) ve (2.25) kısmi diferansiyel denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir (Komodromos, 2000).

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} p(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} p(r, \theta) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} p(r, \theta) = \frac{12G}{t_o^2} \left(\varepsilon_c - \frac{p}{K} \right) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} p(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} p(r, \theta) = \frac{12G}{t_o^2} \left(\varepsilon_c - \frac{p}{K} \right) \quad (2.25)$$

Hacim modülü olan (K) nispeten çok büyüktür ve bu nedenle kauçuğun basınç altında sıkışmadığını kabul etmek olasıdır. Sonuç olarak, hacimsel değişimin sıfır olduğu kabul edilir. Buradan denklem için başlangıç koşulları $p(r=R=D/2)=0$ ile bir Poisson denklemine dönüştürülür (Tezcan ve Cimilli, 2002).

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} p(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} p(r, \theta) = \frac{12G}{t_o^2} (\varepsilon_c) \quad (2.26)$$

Yukarıdaki denklem çözümünden;

$$p(r, \theta) = p(r) = \frac{12G}{t_o^2} (R^2 - r^2) \varepsilon_c \quad (2.27)$$

Mesnet üzerindeki alanın integrasyonundan P yükünü elde edersek;

$$P = \int_{r=0}^{r=R} 2\pi r p(r) dr = \frac{3G\pi R^4 \varepsilon_c}{2t_o^2} \quad (2.28)$$

Dairesel bir mesnedi göz önüne alırsak;

$$S_1 = \frac{R}{2t_o} \quad A = \pi R^2 \quad (2.29)$$

$$P = 6GS_1^2 A \varepsilon_c \quad (2.30)$$

denklemini elde edebiliriz. Bu denklemlerden basınç modülü olan E_c 'yi tanımlayabiliriz;

$$E_c \cong E_c(\gamma) = \frac{P}{A \varepsilon_c} = 6GS_1^2 \quad (2.31)$$

Eksenel deformasyonları ihmal ederek ve kauçuğun kayma birim uzamalarını S_1 şekil faktörünün bir fonksiyonu olarak düşünerek düşey rijitlik için bir ifade elde edebiliriz.

$$K_\varepsilon(\gamma) = \frac{E_c(\gamma)A}{t} = \frac{6GS_1^2}{t} \quad (2.32)$$

Eksenel deformasyonları, kayma rijitliği ve kauçuğun eksenel birim uzamalarını paralel yaylar olarak bağlandıklarını kabul ederek hesaba katabiliriz. Böylece, düşey rijitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Komodromos, 2000).

Burada,

Δt :Düşey yönlü yer değiştirme

K_γ :Kayma gerilmelerinden dolayı oluşan düşey rijitlik olmaktadır.

$$\frac{1}{K_v} = \frac{1}{K_\varepsilon(\gamma)} + \frac{1}{K_\gamma} \quad (2.33)$$

$$\Delta t = \frac{W}{K_\varepsilon(\gamma)} \quad (2.34)$$

$$K_\gamma = \frac{W}{\Delta t} = \frac{6GS_1^2 AG}{t} \quad (2.35)$$

Burada, K_v elastomer mesnedin etkili düşey rijitlik olmaktadır.

$$K_v = \frac{6GS_1^2 AE}{(6GS_1^2 + E_c)t} \quad (2.36)$$

Kauçuk için Poisson oranını 0,5 kabul edersek Elastisite modülünü $E=2(1+0,5)G=3G$ olarak buluruz. Bu nedenle düşey rijitlik, K_v , düşey sıkışma modülünün, E_c , bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bu, çelik tabakalar tarafından zorlanan yatay deplasmanlara karşı sınırlamaları göz önünde bulundurmaktadır (Tezcan ve Cimilli, 2002).

$$K_v = \frac{6GS_1^2 A3E}{(6GS_1^2 + 3G)t} \quad (2.37)$$

$$E_c = 6GS_1^2 + 3G = E(2S_1^2 + 1) \quad (2.38)$$

Hacimsel değişim göz önünde bulundurulabilir. Örneğin yukarıda elde edilen rijitlik ile kauçuğun hacimsel değişim modülü birbirlerine paralel bağlı olduğu düşünülürse, basınçtaki etkili elastisite modülü için ($E_{eff,v}$) aşığıdaki ifade kauçuğun sıkışabilirliğini ve aynı zamanda hem kayma hem de eksenel deformasyonları dikkate almaktadır (Tezcan ve Cimilli, 2002).

$$\frac{1}{E_{eff,v}} = \frac{1}{E_c} + \frac{1}{K} = \frac{1}{6GS_1^2 + 3G} + \frac{1}{K}, E_{eff,v} = \frac{K(6GS_1^2 + 3G)}{6GS_1^2 + 3G + K} = \frac{6GS_1^2 E_c}{6GS_1^2 + E_c} \quad (2.39)$$

Burada,

$E_{eff,v}$: kauçuğun sıkışmadaki etkili elastisite modülü

K: sıkışma modülü olmaktadır

Düşey yükten meydana gelen kayma birim deformasyonlar γ_v :düşey yük etkisinde kayma birim uzaması S_1 :Kauçuğun şekil faktörü olmak üzere denklem (2.40) ile hesaplanabilir.

$$\gamma_v = 6S_1 \varepsilon_c \quad (2.40)$$

Burada,

W, toplam ağırlığı

ε_c , basınç gerilmeleri altında birim boydaki kısalma

Δt , düşey yönlü yer değiştirme

t, mesnet boyu

K_γ :Kayma gerilmelerinden dolayı oluşan düşey rijitlik olmaktadır.

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta t}{t} \quad (2.41)$$

ve

$$K_\gamma = \frac{W}{\Delta t} \quad (2.42)$$

olmak üzere buradan Denklem (2.43) elde edilir.

$$\gamma_v = 6S \frac{W}{E_c A} \quad (2.43)$$

yazılabilir. ε_b kauçuğun yırtılma anındaki birim uzaması olmak üzere, γ_v değerinin $\varepsilon_b/3$ değerinden küçük olması istenir.

Kauçuk izolatörlerin burkulma yükü kapasitesi hesabında kritik burkulma yükü P_{cr} kesiti dairesel ve kare olan kauçuk izolatörler için Naeim ve Kelly (1999) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir. Burada d , dairenin çapı, a , karenin kenar uzunluğu, t_r , kauçuğun toplam kalınlığı, t , bir adet kauçuk tabakanın kalınlığıdır. Şekil faktörü (S), Daire için $d/4t$ ve Kare için $a/4$ olmaktadır ve yaklaşık olarak $d/80$ ile $d/40$ arasında bir değer olarak seçilir (Tezcan ve Cimilli, 2002)

Dairesel kesitli izolatörlerde

$$P_{cr} = \frac{\pi G S d}{2\sqrt{2} t_r} A \quad (2.44)$$

Kare kesitli izolatörlerde

$$P_{cr} = \frac{\pi G S d}{\sqrt{6} t_r} A \quad (2.45)$$

Düşey yükler altındaki izolatörün güvenlik faktörü olarak adlandırılan n aşağıdaki gibi ifade edilir ve uygulamalarda bu değer genellikle 3 olarak alınır.

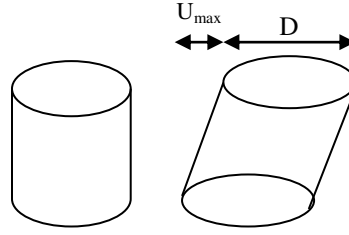
$$n = \frac{W}{P_{cr}} \quad (2.46)$$

Diğer bir konuda mesnedin plandaki alanına ve iç kauçuk tabaka kalınlığına bağlı olarak değişen izolatörün düşey yük taşıma kapasitesinin tayinidir. Efektif bir kolon, eksenel yükleri kolon, eksenel yükleri kolon

kesitinin etkili bir alanına yayarak aktarır. Etkili kayma alanı, A_{eff} , basit bir geometrik şartları dikkate alarak, maksimum deplasman (U_{max}) tanımlandığında plandaki mesnet alanının bir fonksiyonu olarak kolayca hesaplanabilir. Mesnet yatay yönde yer değiştirdikçe, efektif yük taşıma alanı azalmaktadır (Tezcan ve Cimilli, 2002).

$$\theta = 2a \cos\left(\frac{U_{max}}{D}\right) \quad (2.47)$$

$$A_{eff} = \left(\frac{\theta}{180} - \frac{\sin \theta}{\pi}\right) A = \left[1 - \frac{2}{\pi}(\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta)\right] A \quad (2.48)$$



Şekil 2.5 İzolatörün yanal deplasmanla azalan etkin yük alan kesiti

Şekil 2.5’de gösterildiği üzere $\frac{U_{max}}{D}$ oranı 0,40’tan fazla olmamalıdır. Bu değer, plandaki toplam a alanının yarısından fazlası olan etkili yük aktarım alanının üst üste düşmesi ile ulaşılabilir.

Bir elastik mesnedin kayma rijitliği kurşun çekirdek olmaksızın denklem (2.49) ile bulunabilir (Tezcan ve Cimilli, 2002).

$$K_r = \frac{G_r A_r}{t} \quad (2.49)$$

Burada;

G_r , Kauçuğun kayma modülü

A_r , Kauçuğun kesit alanı

t , kauçuğun toplam yüksekliğini göstermektedir.

Bu denklemde A_r mesnedin net alanını ifade etmektedir ($A_r = A - A_L$). Kurşun çekirdeğin varlığı, akmadan sonraki kurşun çekirdekli mesnetlerin, (LRB) rijitliğinde göz önünde bulundurulmayabilir.

Kurşun çekirdekli bir elastomer mesnedin kayma modülü, kurşunun akmadan önceki ve sonraki durumu için aşağıdaki iki denklem ile hesaplanabilir (Komodromos, 2000);

$$K_1 = \frac{G_L A_L}{H_L} + \frac{G_r A_r}{t} \quad \text{Akmadan önceki durum} \quad (2.50)$$

$$K_r = \frac{G_r A_r}{t} \quad \text{Akmadan sonraki durum} \quad (2.51)$$

Burada,

G_L : Kurşun çekirdeğin kayma modülü

A_L : Kurşun çekirdeğin kesit alanı

H_L : Kurşunun yüksekliğini göstermektedir.

Kurşun çekirdeğin çapı aşağıdaki formül ile yaklaşık olarak bulunabilir.

$$d_L \leq \frac{t}{\gamma_{max}} \quad (2.52)$$

Burada γ_{max} : Kauçuk mesnedin maksimum kayma birim uzaması olmaktadır
Kurşun çekirdeğin alanı;

$$A_L = \frac{\pi d_L^2}{4} \quad (2.53)$$

Ayrıca kurşun çekirdeğin yatay kuvvet etkisinde akma dayanımı aşağıdaki şekilde bulunabilir

$$Q_y = \tau_y A_L \quad (2.54)$$

Akma dayanımı, alternatif bir yol olarak mesnedin bir çevrimdeki histeresis eğrisi altında kalan yardımcı ile bulunabilir;

$$A_{loop} \cong 4Q_y(D_D - d_y) \quad (2.55)$$

Burada,

d_y : Kurşunun akma deformasyonu

D_D : Maksimum tasarım deplasmanını göstermektedir

Yukarıdaki denklemde d_y ihmal edilebilir düzeydedir, böylelikle denklem aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenebilir.

$$A_{loop} \cong 4Q_y(D_D) \quad (2.56)$$

Böylelikle, akma noktasına ulaşan kurşunda meydana gelen kesme kuvveti;

$$Q_y \cong \frac{A_{loop}}{4D_D} \quad (2.57)$$

Yaklaşık olarak mesnedin bir çevrimdeki histeresis eğrisi altında kalan alan;

$$A_{loop} = \beta_{eff}(2\pi K_D D_D^2) \quad (2.58)$$

K_D : Tasarım depremi için efektif rijitlik olmaktadır

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{A_{loop}}{A_{dikdörtgen}} \quad (2.59)$$

β_{eff} : Efektif Sönüm olmaktadır.

Yapılan hesaplamalar taban yalıtımlı binanın ön tasarım aşaması için belirli yaklaşımlarla kullanılabilir fakat bu hesaplamalar kauçuğun kayma deformasyonları üzerine tanımlanmıştır. Ve eksenel yükleri ve deformasyonları kısmen ihmal etmektedir. En son tasarım aşamasında ve analiz sürecinde normal gerilmelerin, birim uzama ve kısaltmaların etkisini göz önüne almaya gerek olabilir. Bununla birlikte, kesme rijitliğine kurşun çekirdeğin akmadan sonraki etkisinin de unutulmamasında fayda bulunmaktadır. Yatay rijitliğin eksenel yük üzerindeki ilişkisi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir (Tezcan, ve Cimilli, 2002);

$$K_h^* = K_h \left[1 + \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right] \quad (2.60)$$

Burada,

K_h^* , P yükü altındaki etkili rijitlik

K_h , Sıfır yük altında yatay rijitlik

P_{cr} , Burkulma yükü

P , Eksenel yükü göstermektedir.

P_{cr} yatay deplasmanın artması ile azalabilir. Bu azalma, yatay rijitliğin hem yatay deplasman hem de düşey yük üzerindeki etkisi gibi son analiz sürecinde detaylı bir doğrusal olmayan model ile hesaba katılmak zorunda kalınabilir. Kauçuğun kayma modülünün $G_r(\gamma)$, onun kayma birim uzaması, γ , üzerindeki etkisi daha detaylı bir model ve non-lineer bir analizle dikkate alınabilir. Elastomer mesnetlerin kayma ve eksenel yükler altında sismik yalıtım için kullanılmasıdaki davranışlarına etkisini gösteren deneysel çalışmalara göre, lineer elastik teoriyi kesme rijitliğini hesaplamak için kullanmak, performansın tahmininde doğru sonuçlar vermeyebilir.

%200 mertebesinde kesme birim uzamaların mesnedin kenarlarında kaldırma etkisinin oluşmasına neden olduğu ve mesnet üzerindeki maksimum normal gerilmelerinin ortalama basınç gerilmelerinden çok daha fazla olduğu bulunmuştur. (Tezcan ve Cimilli, 2002).

Kauçuk mesnetler yüksek katlı binalarda devrilme momentlerine meydan verecek kadar büyük çekme gerilmelerine karşı koyamamaktadırlar. Bu nedenle, sismik izolasyonun yüksek katlı bir yapılarda kullanılmasında dikkat edilmelidir. Kauçuk mesnetlerin kullanıldığı bir yapıda sürtünmeli sarkaç sistemli izolatörler kullanılarak ötelenmeler kısıtlanabilmektedir. (Pınarbaşı, ve Akyüz, 2005).

2.2.2.3 Düşük Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet Sistemi (LDRB)

Düşük sönümlü kauçuk mesnet sistemi (Low damping rubber bearing) ,sismik yalıtım sistemlerinde kullanılan ilk kauçuk mesnet çeşididir.

Bu sistemlerin avantajları şöyle sıralanabilir,

- Üretimleri basittir
- Kolay modellenirler
- Mekanik özellikleri, ısı ve yorulma olaylarından etkilenmez.
- Düşey yük kapasitesi yüksektir, bir tanesi 100 ile 2000 ton kapasiteye sahiptir.

Tek dezavantajı genellikle bütünleyici olarak sönümleyici bir sisteme ihtiyaç duyulmasıdır. Her bir izolatörde altta ve üstte olmak üzere iki adet kalın çelik levha vardır. Bunlar izolatörün yerleştirildiği kolona birleşmesini sağlar. Şekil 2.6'da kolona yerleşimi görülmektedir (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 2.6 Düşük sönümlü kauçuk izolator

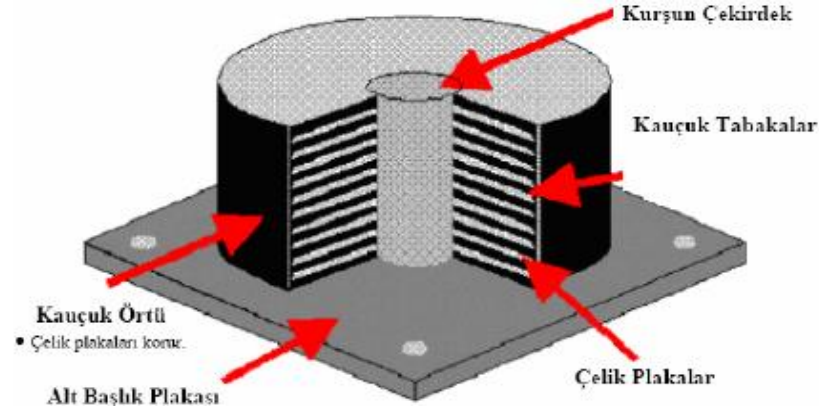
Çelik levhalar izolatörün yük kapasitesini artırırken aynı zamanda aralardaki kauçuk levhaların düşey yükler altında şişmesini önler. Düşük yatay rijitlik sayesinde yapının yatayda istenilen yer değiştirmeyi yapması sağlanır.

Düşey rijitlikleri kayma rijitliklerinden çok daha yüksek olan elastomerik yastıklar basınçta göçmeden çok yüksek deformasyon seviyelerine ulaşabilmektedirler. Basınçta göçme deneylerinde, yastıklardaki çelik plakalar aktıktan sonra bile yük taşımaya devam etmiş, plaka ancak akma yükünün yaklaşık üç katı değere ulaştığı zaman kopmuştur. Böylesi bir yükleme sonrası bile yükün kaldırılmasıyla yastıkların neredeyse yükleme öncesi kalınlıklarına dönmüş olması da yastıkların elastik davranışlarını ispatlamaktadır.

İzolatörlerin yüksekliği arttığında mekanizmada burkulma ortaya çıkacağı için, izolatör yüksekliği çapın yarısı ile sınırlandırılmıştır. Düşük sönümlü doğal kauçuk izolatörlerin imal edilmesi ve modellenmesi kolaydır. Bunun yanında mesnetler sıcaklık, hız, zaman, eskime gibi faktörlerden etkilenmemektedir. Düşey rijitlik yatay rijitliğin ortalama birkaç yüz katıdır. Meydana gelen bir deprem hareketi sırasında, oluşan büyük şekil değiştirmeler sonucunda düşeyde taşıma kapasitesi zayıflar. Bu yüzden bu yalıtım sistemi uygulamalarda tek başına kullanılamaz. Günümüzde bu yöntemle yapılmış birçok yapı vardır. Aynı zamanda bu sistemin türevlerine de rastlanmaktadır. Bunların en belirginini Yeni Zelanda’da geliştirilen kurşun çekirdekli sistemlerdir (Komodromos, 2000).

2.2.2.4 Kurşun Çekirdekli Mesnet Sistemi (LRB)

1975 yılında Yeni Zelanda’da geliştirilen, Şekil 2.7’de örneği görülen kurşun çekirdekli mesnet sistemi çalışma prensibi olarak düşük sönümlü mesnet sistemine benzerdir, farkı ise ortasına monte edilmiş olan kurşun çekirdektir (Ateş, 1999).



Şekil 2.7 Kurşun çekirdekli izolator kesiti

İzolatorün sönüm mekanizması, kauçuğun sönümüne ilave olarak izolatorün ortasında bulunan kurşun çekirdeğin sönümü ile oluşur. Kurşun çekirdekli mesnetlerde sönüm %10 ile %25 arasında değişmektedir. Sisteme yatay doğrultuda kuvvetler etki ettiğinde, çelik tabakalar kurşun çekirdeği şekil değiştirmeye zorlar. Kurşun çekirdekte meydana gelen plastik şekil değiştirme sayesinde enerji yutulur ve sönüm gerçekleşir. Kauçuk tabakalara kopmayacak şekilde yapıştırılmış olan kurşun çekirdeğin bu davranışı izolatorün yatay yer değiştirmesini azaltır. Yapıya düşük yatay kuvvetler etki ettiğinde ise kurşun çekirdek yatay ve düşeyde rijit kalır ve elastik bir davranış sergilerler.

Kurşun çekirdekli izolatorler çoğunlukla düşük sönümlü izolatorlerle birlikte kullanılırlar. Bu uygulamada dış kolonlara düşük kauçuk izolatorler dengeleyici olarak konulurken, iç kolonlara kurşun çekirdekli izolatorler sönümleyici olarak yerleştirilir. Kurşun çekirdekli mesnet sisteminin en büyük dezavantajı güçlü yer hareketleri sonrasında merkezde bulunan kurşun çekirdeğin zarar görüp görmediğinin tespit edilememesidir. Bu yalıtım sistemi kullanılarak yapılan yapılar,

Northridge ve Kobe depremlerinde iyi bir performans sergilemişlerdir (Celep ve Kumbasar, 1996).

2.2.2.5 Kurşun Çekirdekli Mesnetlerin Matematiksel Modellenmesi

Kurşun çekirdekli elastomerik izolatörün modelleme her zaman doğrusal olmayan elemanlarla, elemanların karakteristik 3 parametresi esas alınarak yapılır. Bu parametreler ise, mesneden elastik rijitliği “ k_1 ”, akma sonrası rijitlik “ k_2 ”, ve elastomerin karakteristik kuvveti “ Q ” dur. Elastik rijitlik hesaplanması zor bir büyüklüktür, bu yüzden deneysel olarak elde edilen bir katsayı ile akma sonrası rijitliğin çarpımına eşit alınır. Akma sonrası rijitlik ise (plastik bölgedeki rijitlik denebilir), mesneden kayma modülünden hesaplanabilir. Q ise kurşunun akma gerilmesinden hesaplanabilir. Sistemin efektif rijitliği mesneden histeretik döngüsel eğrisindeki parametrelerin maksimumları alınarak hesaplanan rijitliktir. Sistemde oluşan maksimum yatay deplasman “ D ”, plastik deplasman D_y ’ den daha büyüktür

$$K_{eff} = k_2 + \frac{Q}{D} \quad D > D_y \quad (2.61)$$

Akma deplasmanı ;

$$D_y = \frac{Q}{k_1 - k_2} \quad (2.62)$$

olarak ifade edilir. Sistemin doğal titreşim frekansı ise;

$$\omega = \sqrt{\frac{K_{eff}}{W}} = \sqrt{\omega^2 + \mu(g/D)} \quad (2.63)$$

şeklinde ifade edilir. W :sistemde taşınan yük olmaktadır.

$$\mu: \frac{Q}{W} \quad (2.64)$$

Aynı zamanda efektif periyotta hesaplanmış olur

$$T_{eff} = 2\pi/\omega \quad (2.65)$$

Kurşun çekirdekli döngüsel davranış eğrisi içinde kalan alan W_D , aynı zamanda mesneden bir döngüde dağıttığı enerjiye eşittir. Bu durumda bir tam periyot zamanında

$$W_D = 4Q(D - D_y) \quad (2.66)$$

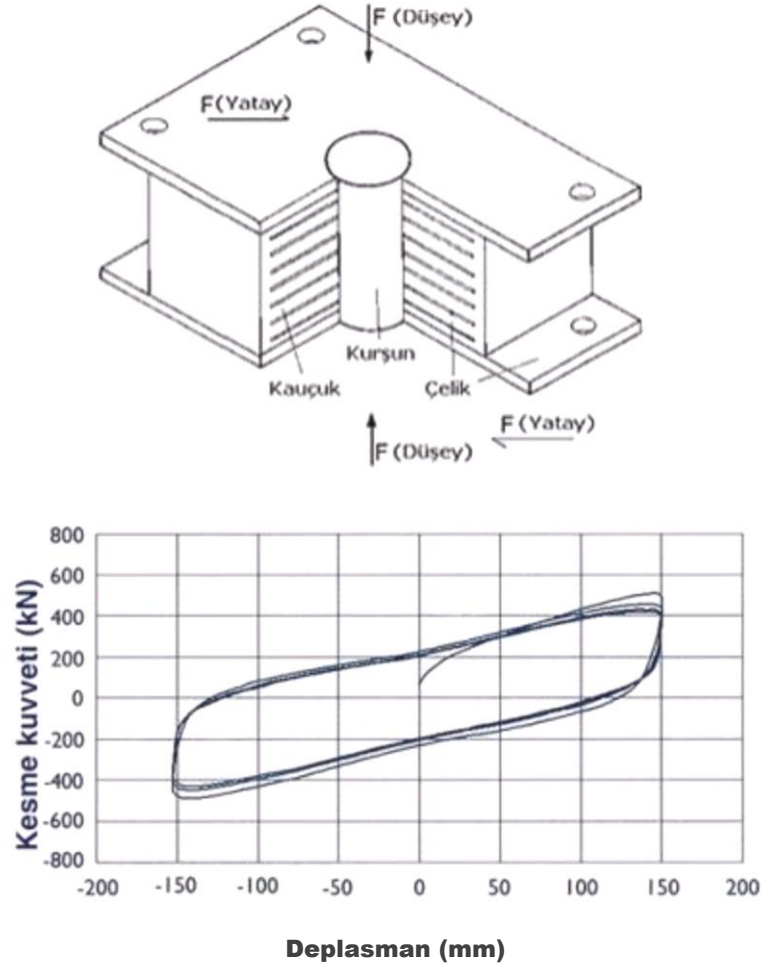
şeklinde yazılabilir. Sistemin genel efektif sönümü

$$B_{eff} = \frac{\text{Döngüsel eğrinin alanı}}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (2.67)$$

Bulunan değerler yerine konulduğu zaman kurşun çekirdekli mesneden efektif sönümü denklem (2.66)'daki gibi yazılabilir.

$$B_{eff} = \sqrt{\frac{4Q(D - D_y)}{2\pi(k_2 D + Q)D}} \quad (2.68)$$

Kurşun çekirdekli elastomerik izolatörün deplasman grafiği Şekil 2.8' de sunulmuştur (Bayülke, 1998).



Şekil 2.8 Kuşun çekirdekli elastomerik izolatörün deplasman grafiği

2.2.2.6 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet Sistemi (HDRB)

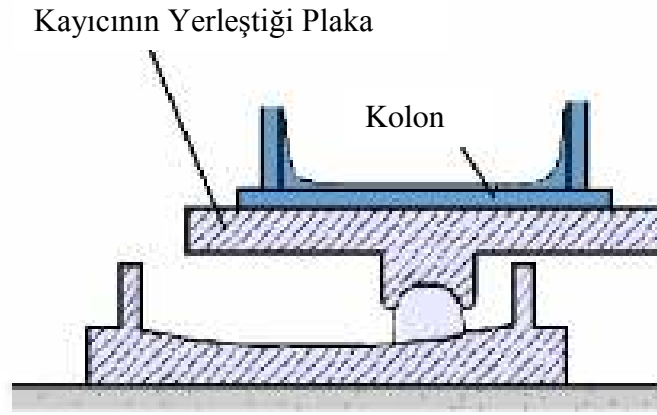
Yüksek sönümlü kauçuk mesnet sistemi (High damping rubber bearing), mesnet malzemesi olarak doğal kauçuk kullanılarak geliştirilmiştir. İngiltere’de bulunan “Malaysian Rubber Producers Research Association” kurumu tarafından 1982 yılında, ek sönüm elemanlarına olan ihtiyacı gidermek amacı ile üretilmiştir. Sönüm miktarı; aşırı saf karbon blok, yağlar, reçine ve patentli katkı maddeleri eklenilmesi suretiyle arttırılmaktadır. %100 oranındaki kayma Şekil değiştirmelerinde sönüm %10 ve %20 mertebelerine çıkarılmıştır. Malzeme boy uzamaları %20’den daha küçük olduğu zaman doğrusal olmayan davranış gösterir. Bu özelliği sayesinde rüzgâr yükü, düşük seviyeli depremler karşısında yapının yer hareketine tepkisini azaltmaya yönelik bir davranış sergiler (Kösedağ, 2002)

Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler, diğer elastomer mesnetler gibi düşük bir yatay rijitliğe sahiptir ve bu sayede yatayda büyük yer değiştirmeler yaparak yapının periyodunu arttırır. Bunun yanında sahip oldukları sönüm özelliği sayesinde bir sönümleyici gibi çalışarak deprem enerjisini yutarlar. Sönüm katsayısındaki değişikliğin dışında üretim, montaj, yerleştirme gibi uygulama detayları düşük sönümlü doğal kauçuk mesnetlerle aynıdır. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnetler, sistemin rüzgâr yükleri gibi küçük dinamik yüklerden etkilenmesini önleyecek bir başlangıç rijitliğine sahip değildir. Bu yüzden yapı küçük dış etkilerde dahi hassas davranış gösterir. Bu sistemlerin bir diğer avantajı ise çevresel titreşimin azaltılmasında, kullanılabilmesidir. Trafığın yoğun olduğu veya metro hattının yakınında bulunan bir yapıda, meydana gelebilecek düşey titreşimleri azaltma konusunda çok iyi performans göstermektedirler. Kauçuk esaslı yalıtım sistemlerine bir alternatif olarak ortaya çıkan kayıcı taban yalıtım sistemleri de, günümüzde geniş bir kullanım sahasına sahiptirler. Bu sistemlerin çalışma şekli, yalıtım ara yüzünde kesme kuvveti geçişinin kayıcı bir yalıtım tabakası kullanılarak sınırlandırılması olarak özetlenebilir. Bu tabakanın direnç kuvveti aşıldığı anda kayıcılar devreye girerek üst yapı kaymaya başlayacak ve ortaya çıkan enerji sürtünme yolu ile sönümlenecektir. Direnç kuvvetinin aşılmadığı durumlarda ise kayıcı yalıtım sistemi harekete geçmeyecektir.

Kayıcı mesnetler için en çok kullanılan malzemeler, paslanmaz çelik üzerine kaplanan teflondur (politetrafloraetilen). Teflon kaplı kayıcı mesnetler çevre şartlarına ve sıcaklığa karşı elastomerik mesnetlerden daha dayanıklı olmasının yanında daha küçük boyutludur ve deprem esnasında daha az yer değiştirme yaparlar. Sistemin sürtünme karakteristikleri; aşınma derecesine, ara yüzeydeki hareketin hızına, sıcaklığa ve yüzey temizliğine bağlıdır. Bu sistemlerde deprem sonrasında kalıcı yatay yer değiştirmeler oluşabilir. Bu yüzden bu yer değiştirmeleri azaltmak için yanal direnç sağlayan bazı yardımcı elemanlarla birlikte kullanılmalrı gerekmektedir. Kayıcı mesnetli yalıtım sistemlerinin çok farklı uygulamaları mevcuttur (Zamarano ve Sarrazin, 1996).

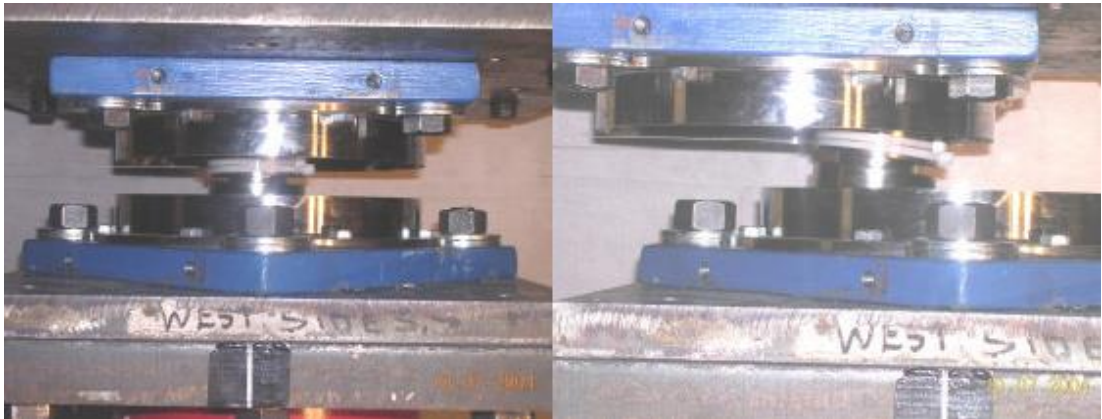
2.2.2.7 Sürtünmeli Sarkaç Sistemi (FPS)

Sürtünmeli sarkaç modelinde, yapının sarkaç hareketi ile depremdeki hareketin ve enerjinin sürtünme yolu ve yer çekimi sayesinde sönümlenmesi amaçlanmıştır. Sistemin elemanları kayıcı mafsalsal ve eğrisel çelik yüzeydir ve Şekil 2.9'da görülmektedir (Elma, 2006).



Şekil 2.9. Sürtünmeli sarkaç izolatör kesiti

Sürtünme ve sönüm kayıcı mafsalsal ile eğrisel yüzey arasında olur. Rijitlik ve yapının titreşim periyodu, yüzeyin eğimi ile kontrol edilir (Zhang, 2000).



Şekil 2.10. Sürtünmeli sarkaç sisteminin maksimum yer değiştirmesi

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi deprem esnasında üst yapı yanal etki ile içbükey yüzey üzerinde kayarak yükselir (Constantinou, 2004). Üst yapının yükselmesi ile

kinetik enerji potansiyel enerjiye dönüşür ve dinamik etki ortadan kalkınca sarkaç ilk denge konumuna gelene kadar hareketini sürdürür.

Bu sistemdeki bir diğer önemli sönüm mekanizması ise sürtünme ile deprem enerjisinin yutulmasıdır. Deprem hareketi sırasında yanal rijitlik ve her bir mafsal ayağında oluşacak sürtünme kuvveti, yatak üzerindeki ağırlıkla ilgilidir. Bu nedenle üst yapının ağırlık merkezi ile yatakların rijitlik merkezi çakışmalıdır. Bu durum burulmayı ortadan kaldırır. Sürtünmeli sarkaç sistemi elastomerik sistemlerin tüm avantajlarını sağladığı gibi dezavantaj sayılabilecek teknik özellikleri içermemektedir. Elastomerlerin yapısı itibari ile kauçuk sistemler yapıya uygulandıktan sonra yangına karşı izole edilmek zorundadır. Bunun yanında yapının hesaplarda öngörülen depremden daha büyük bir depreme maruz kalma ihtimali az da olsa mevcuttur. Böyle bir durumda kauçuk mesnedin kopmasına karşılık yapının bir emniyet sistemine ihtiyacı vardır Sarkaç sisteminde böyle bir emniyet sistemine gerek olmadığı gibi elemanların tümü çelik olduğu için ekstra bir yangın koruma önlemine de ihtiyaç yoktur



Şekil 2.11 Sürtünmeli sarkaç mesnetin açık hali görülmektedir

Şekil 2.11’de Benicia-Martinez Köprüsü’nde uygulanan izolatörlerden biri görülmektedir (Constantinou, 2004). 1998 yılında güçlendirme çalışması yapılan ve yaklaşık 2 km uzunluğunda olan köprü, 6 şeritlidir ve günde ortalama 100.000 araç taşımaktadır. Köprüde şimdiye kadar üretilen en büyük boyutlara sahip sürtünmeli sarkaç mesnedi kullanılmıştır. Yaklaşık 3.96 m çapında ve 5 ton ağırlığa sahip olan

Tablo 2.1’de sürtünme yüzeyi olan μ sürtünme katsayısı için teflon malzemesinin düşey basınç altında sürtünme katsayısı değerleri verilmektedir. Bu katsayı artan basınçla azalır

Tablo 2.1 Teflon malzemesi için tavsiye edilen sürtünme katsayısı değerleri

Düşey basınç (MPa)	Düşük hızlardaki sürtünme katsayısı	Yüksek hızlardaki sürtünme katsayısı
<5	0,04	0,14
5-15	0,03	0,12
>15	0,03	0,10

$\text{sgn}(\dot{D}) = Z$ değişkeni aşağıdaki diferansiyel denkleme bağlıdır;

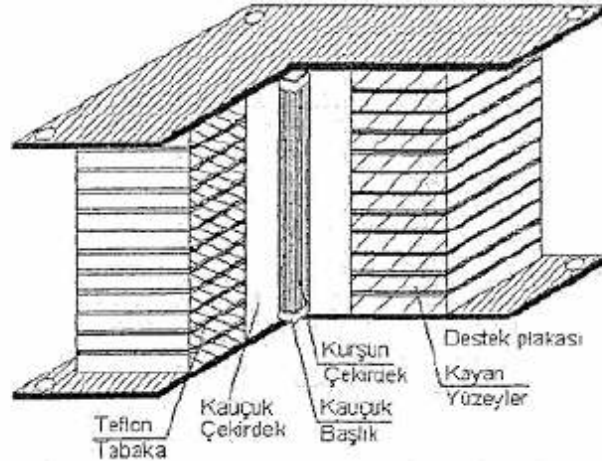
$$Y\ddot{Z} + r|\dot{D}|Z|Z|^{n-1} + \beta\dot{D}|Z|^n - A\dot{D} = 0 \quad (2.72)$$

β, n, r, A boyutsuz sabitlerdir. Y ise akma yer değiştirmesini ifade etmektedir, ampirik olarak bu değer 0,005 olarak kullanılmaktadır.

Sürtünmeli sarkaç sistemlerde sistemin başlangıç konumuna dönüş hareketinin herhangi bir anında geri döndüren kuvvetin Z katı, sürtünme kuvvetine eşit ya da küçük olursa sistem başlangıç konumuna geri dönemez. Bu durum özellikle uzun periyotlu sistemler için sorun olabilmektedir (Baştuğ, 2004).

2.2.2.8 Esnek Sürtünmeli Taban Yalıtım Sistemi (RFBS)

Sistem modellenmesi bakımından kauçuk sistemlere, çalışma açısından ise kayıcı sistemlere benzeyen esnek sürtünmeli taban yalıtım sistemlerde, sistemde yer hareketi sırasında teflon kaplı tabakaların hızla sürtünmesi sonucu oluşan deformasyonun izolatör içinde birçok kayan ara yüzey konulması ile giderilmesi amaçlanmıştır. Böylece alt ve üst levhalar arasındaki hız tabakalara ayrılarak deformasyon azaltılır. Şekil 2.13’de esnek sürtünmeli mesnet sistemi örneği görülmektedir. (Kösedag, 2002).



Şekil 2.13 Esnek sürtünmeli mesnet sistemi

Sürtünen elemanların yanı sıra merkezde düşey yük taşımayan, dengeleyici bir çekirdek ilave edilmiştir. Bu çekirdek sayesinde, mesnet yer değiştirmesi ve hızın mesnet yüksekliği boyunca dağıtılması amaçlanmıştır. Bu sistem üzerinde yapılan incelemelerde kauçuk çekirdeğin, yer değiştirmeyi tek bir ara yüzeyde toplanmasını engelleyemediği görülmüş, bu yüzden sisteme kauçuk çekirdeğin içine tabakalar arası yer değiştirmeyi düzenleyen çelik bir çekirdek daha ilave edilmiştir. Mesneden etrafında olan kauçuk kılıf, mesnedi toz, paslanma ve benzeri dış etkilerden korumak için yerleştirilmiştir. Kauçuğun sönüm yeteneği az olduğu için enerji yutulması için sürtünme de kullanılmaktadır. Bu sistemlerin ortaya çıkmasındaki en büyük etken diğer kayıcı sistemlerde, sistemin ilk denge haline geri dönüş mekanizmasının büyük depremlerde yetersiz kalmasıdır. Deprem hareketi sürtünme kuvvetini asana kadar hiçbir mekanizma çalışmaz. Kuvvet asıldığında, kauçuk deforme olur ve sistemi eski haline döndürecek kuvvet ortaya çıkar (Uz, 2007).

2.3 Sismik İzolasyonun Maliyet Analizi

Sismik izolasyonlu yapıların inşaat maliyetlerini ve izolasyon sisteminin avantajlarını görmek amacıyla, Amerika Birleşik Devletlerinde yapılan iki ayrı proje için fizibilite çalışmaları sunulmuştur (Doğan, 2007).

2.3.1 VA Hastanesi, Loma Linda

California Loma Linda’da bulunan hastane için fizibilite araştırması “D’ Appolonia and Associates” ile National Science Foundation” işbirliği ile hazırlanmıştır (1984). Miktarlar 13.12 2012 tarihli 1 USD= 1,7750 TL Merkez Bankası Amerikan Doları kurundan Türk Lirasına çevrilerek sunulmuştur.

Tablo 2.2’de VA Hastanesi için sismik izolatör kullanılınca İnşaat maliyetinden eksilecek miktarlar sunulmuştur. Tablo 2.3’de ise sismik izolatör kullanınca eklenecek maliyetler sunulmuştur.

Tablo 2.2 VA Hastanesi, Loma Linda sismik izolatör kullanılınca eksilecek maliyetler

Eksilecek Maliyetler	Miktar (TL)
Diyaframlar	232.525,00
Kesme Perdeleri	2.329.971,50
Bodrum Perdeleri	367.425,00
Temel	2.671.375,00
Yapısal Çelik	431.325,00
Tüneller ve Zemin Duvarları	775.675,00
Kazılan Yerlerin Doldurulması	16.862,50
Zeminde Rijit Diyafram	1.610.812,50
Temel Odaları ve Tünel Kazıları	268.025,00
TOPLAM	8.702.996,50

Tablo 2.3 VA Hastanesi, Loma Linda sismik izolatör kullanılıncaya eklenecek maliyetler

Eklenecek Maliyetler	Miktar (TL)
Kazı	430.437,50
Deplasman Duvarları	621.250,00
Oda Duvarları	144.218,75
Çamurluklar	305.300,00
Elastomer İzolatörler	167.737,50
İzolatör Blokları	426.000,00
Birinci Kat Kirişleri	1.331.250,00
Birinci Kat Döşemeleri	1.853.100,00
Çevre Birleşimleri	182.825,00
TOPLAM	6.971.756,25

Sismik izolasyonun uygulanması durumunda 1.731.240,25 TL kadar ekonomi sağlandığı görülmektedir.

2.3.2 Medical Building, Salt Lake

Salt Lake’de bulunan sağlık merkezinin fizibilite araştırması Reid ve Tarics Mühendislik şirketi tarafından yapılmıştır. Tablo 2.4’de Medical Building için sismik izolatör kullanılıncaya İnşaat maliyetinden eksilecek miktarlar sunulmuştur. Tablo 2.5 de ise sismik izolatör kullanılıncaya eklenecek maliyetler sunulmuştur.

Tablo 2.4 Medical Building, Salt Lake sismik izolatör kullanılıncaya eksilecek maliyetler

Eksilecek Maliyetler	Miktar (TL)
Kesme Perdeleri	302.992,50
Yapısal Çelik	230.217,50
Donatı Çeliği	420.675,00
Bağlantılar	175.725,00
Döşemeler	115.730,00
Servis ve Ekipman İndirimleri	26.625,00
TOPLAM	1.271.965,00

Tablo 2.5 Medical Building, Salt Lake sismik izolatör kullanılıncı eklenecek maliyetler

Eklenicecek Maliyetler	Miktar (TL)
Döşeme ve Kiriş Sistemleri	257.375,00
İzolatörler	142.000,00
Deplasman Duvarları	66.562,50
Temeller	79.697,50
Esnek Servis Bağlantıları	14.200,00
TOPLAM	559.835,00

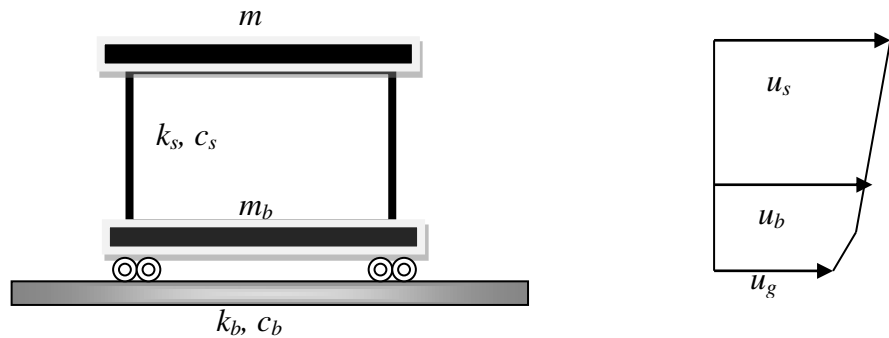
Sismik izolasyonun uygulanması durumunda 712.130.000 TL kadar ekonomi sağlandığı görülmektedir.

Sismik izolatör kullanımı yaygın olan Amerika Birleşik Devletlerinde bu sistem kullanılarak yapılan yapılarda ek maliyetten öte kazanç sağlamaktadır. Ülkemizde bu durumun böyle olmasını beklemek olası değildir fakat sismik izolatör kullanımı ve üretimi yaygınlaştığında izolatör kullanımı daha az maliyetli hale gelecektir.

2.4 Taban İzolasyonlu Yapıların Dinamik Formülasyonu

2.4.1 Lineer Teori: İki Serbestlik Dereceli Sistemler İçin Hareket Denklemleri

Sismik izolasyonda lineer teori, iki kütleli yapı modeline dayanır (Naeim ve Kelly 1999). Dinamik etki dikkate alınacağı için, üst yapının rijit davrandığı varsayılarak tek kütle olarak Şekil 2.14’de sunulduğu gibi modellenir.



Şekil 2.14 İki serbestlik dereceli izolasyonlu sistemde parametreler

Burada,

m , üst yapı kütesini

m_b , izolasyon sisteminin üzerindeki kütle

k_s , kolon rijitliklerini

k_b , izolasyon sisteminin toplam yatay rijitliği

c_s , üst yapının sönümü

c_b , izolasyon sisteminin sönümü

u_g , zeminin yer değiştirmesi

u_s , üst yapının mutlak yer değiştirmesi

u_b , izolasyon sisteminin mutlak yer değiştirmesini göstermektedir.

İzolasyon sistemi yapıların periyodunun artmasını sağlamaktadır. Periyot büyümesi yapıya gelecek deprem kuvvetlerinin genelde azalmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak, üst yapı genelde elastik sınırlar içerisinde deformasyonlara maruz kalırken, taban izolasyon elemanlarında elastik veya elastik ötesi deformasyonlar görülebilir. Taban izolasyonlu sistemin dinamik formülasyonu, kauçuk mesnetlerin kolonların alt uçları ile temel arasına yerleştirilmesi hali için verilecektir.

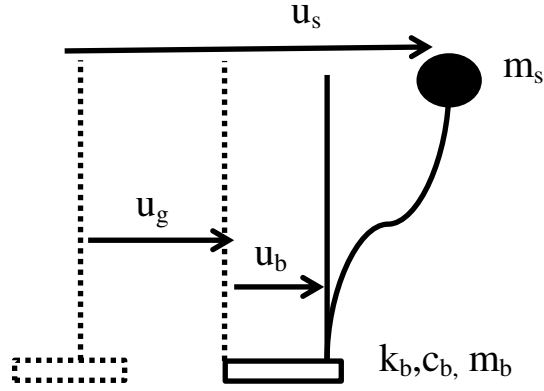
Üst yapının hareket denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -mr\ddot{u}_g \quad (2.73)$$

Şekil 2.15'te gösterilen u_b ve u_s , kütlelerin yaptıkları toplam yer değiştirmeler olmakla beraber, hesaplarda daha çok görelî yer değiştirmeler kullanılmaktadır. Görelî yer değiştirmeler Denklem (2.74) ve (2.75)'de sunulmuştur.

$$v_b = u_b - u_g \quad (2.74)$$

$$v_s = u_s - u_b \quad (2.75)$$



Şekil 2.15 İki serbestlik dereceli taban izolasyonlu yapı modeli

u_g , zeminin yaptığı yer değiştirmeyi ifade etmektedir. İzolatörlerin zemine göre görelî yer değiştirmesi " v_b " ve üst katın alt kattakine göre görelî yer değiştirmesi " v_s " olarak kabul edilmektedir. Bu büyüklükler dikkate alınarak, 2 serbestlik dereceli sistem için temel eşitlikler baştan yazılırsa;

$$(m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (2.76)$$

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \quad (2.77)$$

Denklemler matris formuna dönüştürülürse;

$$\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.78)$$

elde edilir. Denklemden $M = m + m_b$, toplam küttedir. Denklem aşağıdaki halini alır.

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -Mr\ddot{u}_g \quad (2.79)$$

Sistemde kütleler oranı γ ;

$$\gamma = \frac{m}{m + m_b} = \frac{m}{M} \quad (2.80)$$

Sistemde açısal frekanslar;

$$\omega_s^2 = \frac{k_s}{m} \quad (2.81)$$

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m + m_b} \quad (2.82)$$

Sönüm faktörleri β_b ve β_s ;

$$2\omega_b\beta_b = \frac{c_b}{m + m_b} \quad (2.83)$$

$$2\omega_s\beta_s = \frac{c_s}{m} \quad (2.84)$$

Bu büyüklükler, hareketin ana denklemleri olan (2.85) ve (2.86)'de yerine yazılırsa eşitlik;

$$\gamma\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2\omega_b\beta_b\dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (2.85)$$

$$\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2\omega_s\beta_s\dot{v}_s + \omega_s^2 v_s^2 = -\ddot{u}_g \quad (2.86)$$

Sistemde mod şekilleri dikkate alındığında, hesaplanacak diğer parametreler; ϕ^1, ϕ^2 olacaktır.

$$\phi^{iT} = (\phi_b^i, \phi_s^i) \quad i=1,2 \quad (2.87)$$

Aynı zamanda dikkate alınan her mod için açısal frekanslar ω_1 ve ω_2 hesaplanır. Açısal frekanslar için karakteristik eşitlik yazıldığında,

$$(1-\gamma)\omega^4 - (\omega_s^2 + \omega_b^2)\omega^2 + \omega_b^2\omega_s^2 = 0 \quad (2.88)$$

Denkleminin çözümünde 1. ve 2. modlara karşılık gelen hareketin açısal frekansları denklem (2.89) ve (2.90) şöyle ifade edilir.

$$\omega_1^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 - [(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.89)$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 - [(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.90)$$

$\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$ değişken dönüşümü yapılırsa, işlemlerden sonra açısal frekanslar ε' 'ya bağlı olarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\omega_1^2 = \omega_b^2(1 - \gamma\varepsilon), \quad \omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{1-\gamma\varepsilon}(1 + \gamma\varepsilon) \quad (2.91)$$

Sistemde mod şekillerini hesaplamak için $\phi_b^i = 1$, $i = 1,2$ olarak alınır.

$$(\phi^1)^T = (1, \varepsilon), \quad (\phi^2)^T = \left\{ 1, \frac{-1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\varepsilon] \right\} \quad (2.92)$$

Modal koordinatlardaki orijinal yer değiştirmeleri ifade etmek için;

$$v_b = Y_1\phi_b^1 + Y_2\phi_b^2 \quad (2.93)$$

q_1 ve q_2 zamana bağlı modal katılım çarpanları ve M_i modal (genelleştirilmiş) kütle olmak üzere, diğer model büyüklükler de hesaplanır;

$$M_i = (\phi^i)^T M \phi^i \quad M_i q_i = (\phi^i)^T M r \quad (2.94)$$

Denklemler ε' 'ye bağlı olarak tekrar düzenlenirse;

$$M_1 = (M(1 + 2\gamma\varepsilon)) \quad (2.95)$$

$$M_2 = M \frac{(1 - \gamma)[1 - 2(1 - \gamma)\varepsilon]}{\gamma} \quad (2.96)$$

ve,

$$q_1 = 1 - \gamma\varepsilon \quad (2.97)$$

$$q_2 = \gamma\varepsilon \quad (2.98)$$

Hareket denklemlerindeki rölatif yer değıştirmeler (v_b, v_b), Φ^1 ve Φ^2 ,ye bağı olarak ifade edilirse, model katsayılar (q_1 ve q_2)’nin yer aldığı iki denklem elde edilir.

$$\ddot{Y}_1 + 2\omega_1\beta_1\dot{Y}_1 + \omega_1^2 Y_1 = -q_1\ddot{u}_g \quad (2.99)$$

$$\ddot{Y}_1 + 2\omega_1\beta_1\dot{Y}_1 + \omega_1^2 Y_1 = -q_1\ddot{u}_g \quad (2.100)$$

$$\ddot{Y}_2 + \lambda_2\dot{Y}_1 + 2\omega_1\beta_2 + \omega_2^2 Y_2 = -q_2\ddot{u}_g \quad (2.101)$$

" $2\omega_1\beta_1$ " , " $2\omega_1\beta_2$ " değerleri aşağıdaki eşitlikten hesaplanır,

$$2\omega_1\beta_1 = 2\omega_b\beta_b(1 - \gamma\varepsilon) \quad (2.102)$$

$$2\omega_1\beta_2 = \frac{1}{1 - \gamma}(2\omega_s\beta_s + 2\gamma\omega_b\beta_b) \quad (2.103)$$

$M_i 2\omega_i\beta_i = (\phi^i)^T \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \phi^i$ eşitliğinden elde edilen değerler ise;

$$\beta_1 = \beta_b[1 - (3/2)\gamma\varepsilon] \quad (2.104)$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_s + \gamma\beta_2\epsilon^{\frac{1}{2}}}{(1-\gamma)^{\frac{1}{2}}} \left(1 - \frac{\gamma\epsilon}{2}\right) \quad (2.105)$$

olmaktadır. Böylece modal birleştirme katsayıları,

$$\lambda_1 M_1 = (\emptyset^1)^T \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \emptyset^2 \quad (2.106)$$

$$\lambda_2 M_2 = (\emptyset^2)^T \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \emptyset^1 = \lambda_1 M_1 \quad (2.107)$$

Buradan;

$$\lambda_1 M_1 = (1, \epsilon) \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a \end{pmatrix} = c_b - \epsilon a c_s, \quad a = \left(\frac{1}{\gamma}\right) [1 - (1 - \gamma)\epsilon] \quad (2.108)$$

M_1 ve M_2 ifadeleri kullanılarak;

$$\lambda_1 = \frac{2\omega_b\beta_b M - \epsilon[1/\gamma[1 - \gamma\epsilon]]2\omega_s\beta_s M}{M(1 + 2\gamma\epsilon)} \quad (2.109)$$

$$= 2\omega_b\beta_b (1 - 2\gamma\epsilon) - 2\epsilon\omega_s\beta_s (1 - 2\gamma\epsilon) \quad (2.109)$$

$$= 2\omega_b[\beta_b (1 - 2\gamma\epsilon) - \epsilon^{1/2}\beta_s] \quad (2.110)$$

$$\lambda_2 = \frac{2\omega_b\beta_b M - \epsilon[(1/\gamma)[1 - (1 - \gamma)\epsilon]]2\omega_s\beta_s M}{[M(1 - \gamma)/\gamma][1 - 2(1 - \gamma)\epsilon]} \quad (2.111)$$

$$= (2\omega_b\beta_b - \epsilon 2\omega_b\beta_b)(1 + 2(1 - \gamma)\epsilon) \frac{\gamma}{1 - \gamma} \quad (2.112)$$

$$= 2\omega_b[\beta_b(1 + 2(1 - \gamma)\varepsilon) - \varepsilon^{1/2}\beta_s]\frac{\gamma}{1 - \gamma} \quad (2.113)$$

olarak elde edilir. Yapısal uygulamaların büyük bir bölümünde sönüm yeterince küçük olduğu için, sönüme bağlı dik bileşenlerin (burada λ_1 ve λ_2) etkisi ihmal edilir. Böylelikle gerekli çözüm, birleştirilmemiş formdaki eşitliklerden elde edilir.

$$\ddot{Y}_1 + 2\omega_1\beta_1\dot{Y}_1 + \omega_1^2 Y_1 = -q_1\ddot{u}_g \quad (2.114)$$

$$\ddot{Y}_2 + \lambda_2\dot{Y}_1 + 2\omega_1\beta_2 + \omega_2^2 Y_2 = -q_2\ddot{u}_g \quad (2.115)$$

Yapının tepkisi Y_1 Y_2 ise u_g yer hareketinin tanımlanmasıyla aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$Y_1 = \frac{q_1}{\omega_1} \int u_g(t - \tau) e^{-\omega_1\beta_1\tau} \sin \omega_1\tau d\tau \quad (2.116)$$

$$Y_2 = -\frac{q_2}{\omega_2} \int u_g(t - \tau) e^{-\omega_2\beta_2\tau} \sin \omega_2\tau d\tau \quad (2.117)$$

Maksimum değerlerin bulunabilmesi için aşağıdaki yol izlenecektir;

$$|Y_1|_{max} = q_1 s_d(\omega_1\beta_1) \quad (2.118)$$

$$|Y_2|_{max} = q_2 s_d(\omega_2\beta_2) \quad (2.119)$$

Burada $s_d(\omega, \beta)$ yer değiştirme spektrumunda “ ω ” açısal frekansında, “ β ” sönüm faktöründe yer hareketi için karşılık gelen değerdir. İzolasyon sisteminin ve yapının en büyük yer değiştirme değerleri, SRSS metoduyla belirlenir.

$$|v_s|_{max} = [(\phi_2^1 |q_1|_{max})^2 + (\phi_2^2 |q_2|_{max})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.120)$$

$$|v_b|_{max} = [(\phi_1^1 |q_1|_{max})^2 + (\phi_2^2 |q_2|_{max})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.121)$$

Bulunan değerler yardımıyla bu denklem düzenlenirse;

$$|v_b|_{max} = \{(1 - \gamma\varepsilon)^2 [s_d(\omega_1, \beta_1)]^2 + \gamma^2 \varepsilon^2 (s_d(\omega_2, \beta_2)^2)\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.122)$$

$$|v_s|_{max} = \varepsilon \{(1 - 2\gamma\varepsilon)^2 [s_d(\omega_1, \beta_1)]^2 + [1 - 2(1 - \gamma)\varepsilon]^2 (s_d(\omega_2, \beta_2)^2)\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.123)$$

olarak bulunur. “ $\varepsilon^2 S_d(\omega_2 \beta_2)$ ” terimi ihmal edilebilir. Yüksek frekanslarda oluşan ω_2 deplasmanı, düşük frekanslarda yapılan ω_1 deplasmanından çok küçüktür. Bu ihmal göz önüne alınarak tekrar düzenlenirse;

$$|v_b|_{max} = (1 - \gamma\varepsilon) [s_d(\omega_1, \beta_1)] \quad (2.124)$$

Olarak bulunur. Eğer “ ε^2 ” den büyük olan bütün terimleri ihmal edersek böylelikle katlar arası maksimum yer değiştirmeyi de bulmuş oluruz.

$$|v_s|_{max} = \varepsilon \{[s_d(\omega_1, \beta_1)]^2 + (s_d(\omega_2, \beta_2)^2)\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.125)$$

Tasarım taban kesme kuvveti katsayısı “ C_s ”,

$$C_s = \left| \frac{k_s v_s}{m} \right|_{max} = \omega_s^2 |v_s|_{max} \quad (2.126)$$

$$C_s = \omega_s^2 \varepsilon [s_d(\omega_1, \beta_1)^2 + s_d(\omega_2, \beta_2)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.127)$$

2.4.2 Çok Serbestlik Dereceli Sistemler İçin Hareket Denklemleri

Lineer modelin iki serbestlik dereceli sistemler için yapılan kabuller, çok katlı yapı sistemleri için de uygulanabilir. Çok katlı yapı için “m” kütle matrisi, “c” sönüm

matrisi ve “k” rijitlik matrisi olarak tanımlansın. Geleneksel yapılar için hareket denklemini anımsayarak konvansiyonel yapı sistemi için, her bir serbestlik derecesinin yere göre bağıl yer değiştirme,

$$m_v + c_v + k_v = -m_r u_g \quad (2.128)$$

Şeklinde. Bu eşitlikte “r” vektörü her bir serbestlik derecesini yer hareketine bağlayan bir vektör, “u” ise yere göre yer değiştirme vektörüdür. İzolatörlü modelde ise denkleme ek olarak “m_b” taban kütlesi, “k_b” izolatör rijitliği ve “c_b” izolasyon sisteminin sönümü gelmektedir.

$$M_v + C_v + K_v = -M_r(u_g + v_b) \quad (2.129)$$

Bu eşitlikte, “v” taban kütlesine göre rölatif yer değiştirme, “v_b” ise taban kütlesinin zemine göre rölatif yer değiştirmesidir. Bütün sistemde birleşik yapı ve taban kütlesine göre bir eşitlik yazılırsa;

$$r^T M(\ddot{v} + r\ddot{v}_b + r\ddot{u}_g) + m_b(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = 0 \quad (2.130)$$

Bu denklem düzenlenirse;

$$r^T M\ddot{v} + (m + m_b)\ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (2.131)$$

olarak düzenlenebilir.

“r^TMr” üst yapının toplam kütlesi, “m” ve “m + m_b” ise izolasyon sisteminin üzerinde taşınan toplam kütledir. Bu eşitlikleri matris formunda yazacak olursak;

$$M^* v^* + C^* v^* + K^* v^* = -M^* r^* \ddot{u}_g \quad (2.132)$$

bu denklemden;

$$M^* = \begin{bmatrix} m + m_b & r^T M \\ Mr & M \end{bmatrix}, \quad C^* = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \quad (2.133)$$

$$K^* = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \quad (2.134)$$

$$r^* = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.135)$$

$$v^* = \begin{bmatrix} v_b \\ v \end{bmatrix} \quad (2.136)$$

elde edilebilir. Sismik izolasyonlu yapı için gerekli denklemleri aşağıdaki şekilde yazabiliriz; Ankastre mesnetli sistemin periyodu;

$$T_{ankastre} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_s}} \quad (2.137)$$

Aynı şekilde taban izolasyonlu yapının periyodu;

$$T_{izolasyonlu} = 2\pi \sqrt{\frac{(m + m_b)}{k_d}} \quad (2.138)$$

olarak elde edilebilir. Ankastre mesnetli sistemin periyodunun, taban izolasyonlu sistemin periyoduna oranı (α); taban kütlelerinin üst yapı kütlelerine oranını da (η) olarak ifade edersek,

$$\alpha = \frac{T_{ankastre}}{T_{izolasyonlu}} \quad (2.139)$$

$$\eta = \frac{m_b}{m} \quad (2.140)$$

Elde edilen değerler frekans denkleminde yerine yazılır, yüksek dereceden terimler ihmal edilmek suretiyle gerekli hesaplamalar yapılırsa, yapının 1. ve 2. moddaki titreşim periyotları;

$$T_1 = \sqrt{(1 + \alpha^2)} T_{izolasyonlu} \quad (2.141)$$

$$T_2 = \frac{T_{ankastre}}{\sqrt{(1 + \eta + \eta \alpha^2)}} \quad (2.142)$$

Sisteme ait mod şekilleri aşağıdaki gibidir,

$$\phi_1 = \left\{ \begin{matrix} 1 \\ 1 + \alpha^2 \end{matrix} \right\} \quad (2.143)$$

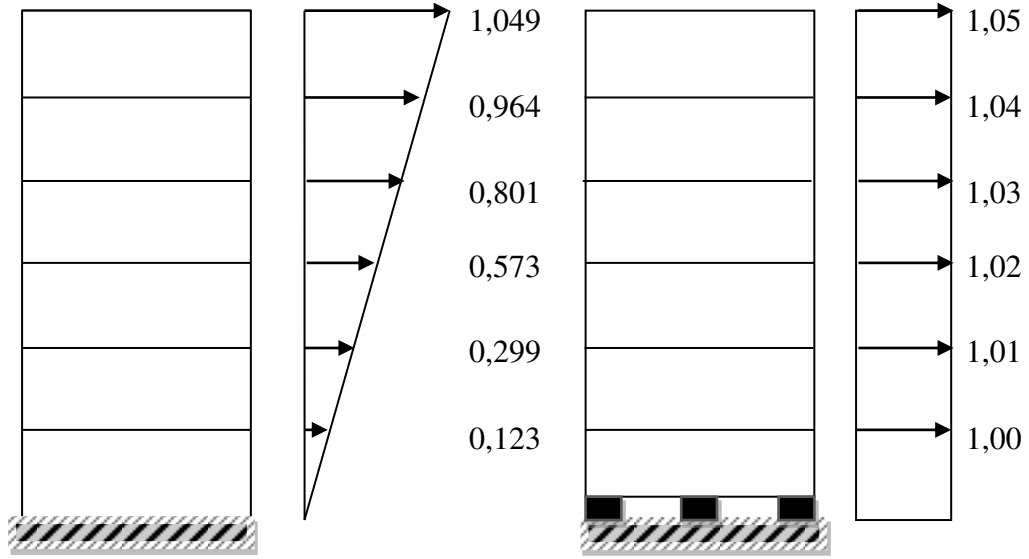
$$\phi_2 = \left\{ \begin{matrix} 1 \\ (\alpha^2 - 1)/\eta \end{matrix} \right\} \quad (2.144)$$

Periyotları oranı α 'nın açık yazılması halinde;

$$\alpha = \sqrt{k_b/k_s} \sqrt{m/(m + m_b)} \quad (2.145)$$

İzolasyon sisteminin rijitliği k_b , üst yapının rijitliği k_s 'ye göre çok küçük olduğunu ve taban kütlesi m_b 'nin çoğu zaman üst yapı kütlesi m 'den küçük olduğunu düşünürsek α değerinde 1'den küçük bir sayı olacağı anlaşılmaktadır. Ortalama 0,01 ile 0,4 arasında olan bu sayının karesi kendisinden küçük olacağından, $1 + \alpha^2 \cong 1$ alınabilir.

A. K. Chopra (1995), sismik izolasyonun sistem üzerindeki etkisini göstermek amacıyla 6 katlı bir modeli ele alarak, yaptığı hesaplamalarla yapının 1. Mod şekli için Şekil 2.16'daki durumu oluşturmuştur.



Şekil 2.16 Ankastre mesnetli ve temel izolasyonlu modellerin 1. Mod şekillerinin karşılaştırılması

Şekilde görüldüğü gibi taban izolasyonlu sistemde 1. Mod için, periyotlar oranı α 'nın ihmal edilmediği hesaplarda dahi, en alt ve en üst kat arasındaki fark mertebesinde küçükür.

Bir yapının deprem anındaki davranışının belirlenmesindeki en önemli etken 1. Titreşim modudur. 1. Titreşim modunun yapının yapının tüm davranışına olan katkısı kimi zaman %90'lara çıkmaktadır. Hareket denkleminin çözümünden de anlaşılacağı gibi sismik izolasyonlu bir yapıda 1. Titreşim moduna ait değerler ana yapıdan bağımsızlaşmakta ve yalıtım sisteminin özellikleriyle birleşmektedir.

2.5 UBC-97 Amerikan Standart Yapı Yönetmeliği

UBC-97 yönetmeliği, yer değiştirmenin taban izolasyon seviyesinde kaldığı ve üst yapının rijit davrandığı varsayımı üzerine kurulmuştur. Bu nedenle bu yönetmeliğe göre ilk titreşim modu önemlidir. Yönetmelikte yer alan minimum koşullar, statik analiz sonucunda elde edilen kuvvet ve deplasmanlardır. Bu bakımdan statik analiz öntasarım için gerekli bir kıstas olmaktadır. Yönetmelikte yer alan hususlardan biri analiz tipinin belirtilmesidir. Zayıf zemin tipleri için, yapının maksimum deprem yükü altında periyodu 3sn'den büyük ise, spektral analiz şart koşulmuştur. Aynı

zamanda spektral analiz, üstyapı yatayda ve düşeyde düzensiz ise, dört kattan veya 19,8 m²'den yüksek ise zorunlu tutulmaktadır. Zaman tanım alanında analiz de, davranış spektrumu analiziyle aynı koşullarda zorunludur. UBC-97 kanunlarında sıklıkla kullanılan ifadelerin tanımı kısaca aşağıda özetlenmektedir;

- a. Tasarım Depremi (D_{BE}) : 50 yıl içerisinde meydana gelen ve asılma ihtimalinin %10 olduğu depremlerdir. 475 yılda bir oluşan deprem periyoduna karşılık gelmektedir.
- b. Efektif Maksimum tasarım Depremi (M_{CE}) : Yapı mahallinde beklenen maksimum yer sarsıntısıdır. 1000 yıllık periyotlarda, 100 yıllık zaman dilimi içerisinde asılma ihtimalinin %10 olduğu depremlerdir.
- c. Efektif Sönüm(β): İzolatörlerden enerji devri süresince, sistemin viskoz sönümleyicilere eşit değeridir.
- d. Efektif Rijitlik (k) : İzolasyon sisteminde, göz önünde bulundurulmuş yatay kuvvetin neden olduğu yer değiştirme oranı olan değeridir.
- e. Tasarım Deplasmanı (d_D) : İzolasyon sisteminin tasarımında ihtiyaç duyulan, ikinci mertebeden dönme ve hareket süresince, sistemde oluşan ek deplasmanlar haricinde, temel deprem tasarımında kullanılan yatay deplasmanlardır.
- f. Maksimum Toplam Deplasman (d_M) : Olması beklenen en büyük depremde, ikinci mertebeden dönme ve hareketler sonucu meydana gelen yatay deplasmanlar haricinde, burulmalarda dikkate alınarak hesaplanan yatay deplasmandır.
- g. Toplam Tasarım Deplasmanı (d_{TD}) : İzolasyon sisteminin tasarımında kullanılan temel deplasmandır
- h. Tasarım Titreşim Periyodu (TD) : Tasarım deplasmanında sistemin periyodudur. Tasarımda kullanılan efektif periyottur.
- i. Maksimum Efektif Periyot (TM) : Sistemin maksimum deplasmanında kullanılan periyottur.

UBC-97 Standartlarına göre sistemin tasarımında kullanılacak olan depremin sarsıntı şiddetinin hesabı, zemin faktörü Z ve sismik kaynak faktörü N_v 'nin çarpımıyla hesaplanır.

Tablo2.6 Maksimum deprem katsayısı

Tasarım Depremi Sarsıntı Şiddeti (ZN_v)	Olabilecek Maksimum Deprem Katsayısı (M_M)
0,075	2,67
0,15	2,0
0,20	1,75
0,30	1,50
0,40	1,25
$\geq 0,50$	1,20

Bu tablo, tasarımda kullanılan deprem sarsıntı şiddeti kullanılarak okunur. Sismik katsayılar C_a ve C_v , Tablo 2.7 ve Tablo 2.8’de belirtilmiştir,

Tablo2.7 Sismik deprem katsayısı C_a

Zemin Tipi	Sismik deprem katsayısı C_a				
	$Z=0,075$	$Z=0,15$	$Z=0,20$	$Z=0,30$	$Z=0,40$
S_A	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32 N_a
S_B	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40 N_a
S_C	0,09	0,18	0,20	0,30	0,40 N_a
S_D	0,12	0,22	0,28	0,36	0,44 N_a
S_E	0,19	0,30	0,34	0,36	0,36 N_a
S_F	Bu tür zeminlerde, sismik zemin katsayısına geoteknik araştırmalar ve dinamik analiz sonucunda karar verilir.				
Zemin Tipi	Sismik Zemin Katsayısı C_v				
	$Z=0,075$	$Z=0,15$	$Z=0,20$	$Z=0,30$	$Z=0,40$
S_A	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32 N_v
S_B	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40 N_v
S_C	0,13	0,25	0,32	0,46	0,56 N_v
S_D	0,18	0,32	0,40	0,54	0,64 N_v
S_E	0,26	0,50	0,64	0,84	0,96 N_v
S_F	Bu tür zeminlerde, sismik zemin katsayısına geoteknik araştırmalar ve dinamik analiz sonucunda karar verilir.				

UBC-97 de;

M_M : Maksimum Deprem Katsayısı

Z : Sismik Zemin Faktörü

N_A : Sismik Zemin Kategorisi

N_V : Sismik Kaynak Faktörü

A : Sismik Zemin Katsayısı

UBC-97 standartlarında kullanılan izolatör tipine göre etkin sönüm β_{eff} , Bölüm 4, formül 65- 2'de ifade edilmektedir. Sönüm indirgeme faktörü β , aşağıdaki şekilde belirtilen β değerlerinden okunur. Yapı indirgeme faktörü R olmak üzere taban kesme kuvveti V , aşağıdaki şekilde hesaplanır, Tablo 2.7 den spektral değerler alınır;

$$0,11C_aIW \leq V = \frac{C_vI}{RT}W \leq \frac{2,5C_aI}{R}W \quad (2.146)$$

Burada W , Yapı ağırlığının %25'idir. Bu orana, konutlarda $0,48\text{KN/m}^2$ döşemeye hareketli yük ilave edilir, çatılarda ise toplam $1,44\text{ KN/m}^2$ kar yükü eklenerek hesaplanır. Standart yapı kanunları UBC-97'ye göre izolasyonlu sistemin temel titreşim periyodunun, 2,0 ile 3,0 saniye değerleri arasında olması istenmektedir. Hedef periyod, tasarım periyodu (T_D) ve maksimum periyottur (T_M). Elastisite modülü E , kayma modülü G , maksimum kayma gerilemesi γ max, seçilen mesnedin tipine göre tanımlanır. Minimum yatay rijitliğin hesabı, UBC-97 Bölüm 4, formül 58-2'gözönüne alınarak, izolasyonlu sistemin yatay doğrultudaki rijitliği k_{Dmin} aşağıdaki şekilde bulunur

$$k_{Dmin} = \frac{4\pi^2W}{T_D^2g} \quad (2.147)$$

Burada W , her bir izolatöre yapıdan aktarılan toplam ağırlığın yayılarak hesaplanması ve bir izolatör tarafından taşınan ağırlıktır. Minimum deplasman (d_{Dmin}), UBC-97, Bölüm 4, formül 58-1 de, izolasyon sisteminin rijitlik merkezi göz önüne alınarak şöyle hesaplanır;

$$d_{Mmin} = \frac{gC_{vd}T_d}{B(4\pi^2)} \quad (2.148)$$

Maksimum deplasman (d_{Mmin}), rijitlik merkezi göz önünde bulundurularak aşağıdaki şekilde bulunur.

$$d_{Mmin} = \frac{gC_{vm}T_M}{B(4\pi^2)} \quad (2.149)$$

2.5.1 Mesnedin Disk Çapının Hesabı

Mesnet disk çapı, UBC-97'deki bağıntıları kullanarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

Burada;

t , mesnet yüksekliği

A , mesnedin en kesit alanı

d_D , tasarım deplasmanı

k_D , tasarım rijitliği

γ_{max} , maksimum kayma gerilmesini göstermektedir.

$$d_D = t\gamma_{max} \quad (2.150)$$

$$t = d_D/\gamma_{max} \quad (2.151)$$

$$k_D = AG/t \quad (2.152)$$

$$A = \frac{k_D t}{G} \quad (2.153)$$

Yukarıda belirtilen değişkenler kullanılarak mesnet çap aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır;

$$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2.154)$$

2.5.2 İzolasyonlu Yapıda Taban Kesme Kuvvetinin Hesabı

İzolatörlerin toplam rijitliği kullanılarak, etkin periyot T_D , aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\Sigma k_D g}} \quad (2.155)$$

Daha sonra etkin periyot hedef periyot ile kıyaslanır. İzolasyon sisteminin yapı elemanlarının taban kesme kuvveti aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$V_D = (\Sigma k_D) d_D \quad (2.156)$$

Taban kesme kuvveti, izolatörlerden üstyapıya indirgenerek dağıtılır. R_i indirgeme faktörü olmak üzere;

$$V_{S,D} = (\Sigma k_D) d_D \frac{B}{R_i} = V_D \frac{B}{R_i} \quad (2.157)$$

izolasyon sistemi için $R_i=2$ dir. UBC-97 de T_D 'nin hesabında, ankastre temelli yapı için sismik yanal kuvvetlere gerek vardır. Taban kesme kuvveti V_{fix} aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$V_{fix} = \frac{C_v I}{R T_D} W \geq 0,11 C_a I W \quad (2.158)$$

Taban kesme kuvveti $V_{S,D}$ değeri, ankastre mesnetli sistemin taban kesme kuvvetinden V_{fix} , küçük seçilemez ve izolasyon sisteminin yatay sismik faktörü 1,5'tan az olamaz.

2.5.3 İzolasyonlu Deplasman Hesabı

Şekil 2.17’de boyut elamanları gösterilen izolatörün UBC-97 de toplam deplasmanı d_{total} aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

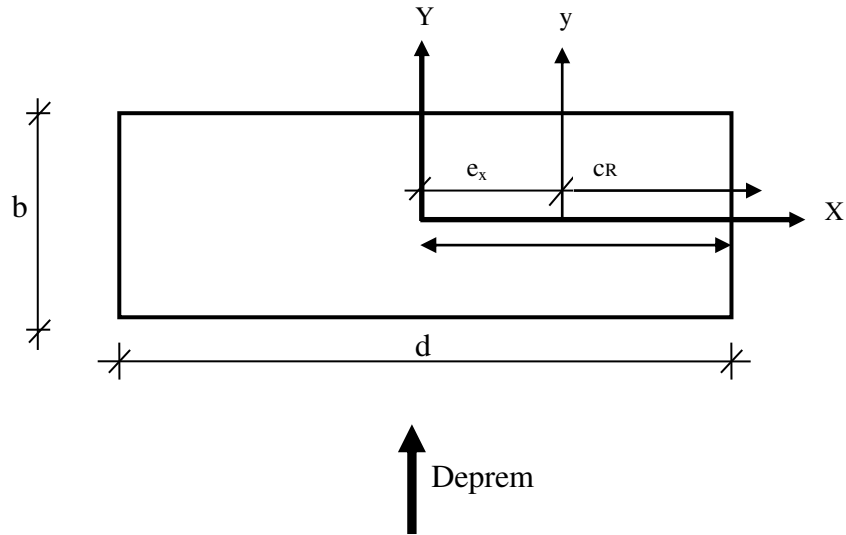
$$d_{total} = d_D \left(1 - \frac{12xe}{b^2 + d^2}\right) \quad (2.159)$$

e ve d, deprem doğrultularıdır. d_{total} ise d_D ’nin 1,1 katından daha küçük olamaz.

$$e_x = e_r \pm 0,05d \quad (2.160)$$

$$e_r = \frac{\sum x_i k_{yi}}{\sum k_{yi}} \quad (2.161)$$

Deprem y doğrultusu için bahsedilmiş olan bu ifadeler, x doğrultusu içinde hesaplamalarda tekrar edilmelidir. Tüm koordinat eksenlerine kendi değerleri verilir.



Şekil 2.17 Dönme nedeniyle oluşan eksantrisite grafiği

2.5.4 Efektif Düşey Modülün Hesabı

D, Kauçuk mesneden çapı olmak üzere, kauçuk katmanının kalınlığı t_0 , aşağıdaki şekilde hesaplanır:

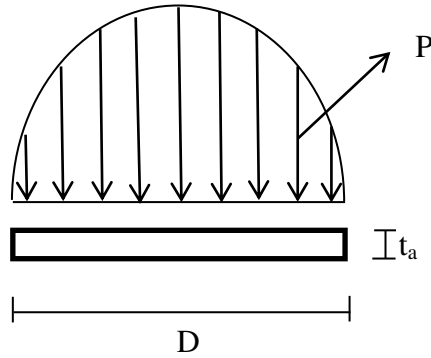
$$\frac{D}{80} \leq t_0 \leq \frac{D}{40} \quad (2.162)$$

Kauçuk katmanların şekil katsayısı S;

$$S = \frac{\text{Disk alanı}}{\text{Kesit Alanı}} = \frac{\pi D^2 / 4}{\pi D t_0} = \frac{D}{4 t_0} \quad (2.163)$$

2.5.5 Düşey titreşim Periyodun Hesabı

Şekil 2.18’de, Yayılı yükün dağılımına dairesel bir kauçuk izolatörde alınan bir kesit üzerinde bakıldığında, merkezden kenara doğru gidildiğinde basınç kuvvetinin büyüklüğünün azaldığı görülmektedir (Celep, 2000).



Şekil 2.18 Dairesel kesitin basınç kuvveti dağılımı

Tüm mesnetler için düşey rijitlik k_ε aşağıdaki bağıntı ile elde edilmektedir:

$$k_\varepsilon = \frac{AE_c}{t} \quad (2.164)$$

Burada

t , mesnedin yüksekliği

W , İzolatöre gelen yük

A , izolatörün alanı

E_c , kompozit malzemenin elastisite modülü

k_ε :Basınçtan doğan düşey rijitlik olmaktadır

Düşey deplasman Δ_t ise ;

$$\Delta_t = \frac{W}{k_\varepsilon} \quad (2.165)$$

Şişme nedeniyle oluşan Dikey Rijitlik k_γ ;

$$k_\gamma = \frac{W}{\Delta_t} = 6S^2 \frac{AG}{t} \quad (2.166)$$

Şişme nedeniyle oluşan Düşey Periyot T_v ,

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk_\gamma 6S^2 \frac{AG}{t}}} \quad (2.167)$$

Burada,

k_ε , basınçtan doğan düşey rijitlik

E , kompozit malzemenin basınç modülü

k_γ kayma gerilmesinden doğan rijitlik olmak üzere,

efektif basınç modülü aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

Düşey doğrultudaki Etkin Basınç Modülü E_{eff} :

$$E_{eff} = \frac{6gS^2 E_c}{+GS^2 + E_c} \quad (2.168)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir,

Yatay rijitlik k_h :

$$k_h = \frac{AG}{t} \quad (2.169)$$

Yatay Periyot T_h :

$$T_h = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk_h}} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \frac{AG}{t}}} \quad (2.170)$$

Bağıntıları ile elde edilmektedirler.

Buradan,

$$\frac{T_h^2}{T_v^2} = 6S^2 \quad (2.171)$$

$$\frac{T_h}{T_v} = \sqrt{6S} \quad (2.172)$$

olmak üzere, buradan Titreşim Periyodu T_v ,

$$T_v = \frac{T_h}{\sqrt{6S}} \quad (2.173)$$

Olarak hesaplanmaktadır.

2.5.6 Düşey Yük ve Kayma Gerilmesinin Hesabı

Sismik izolatör için düşey yük ve bu yükten doğan kayma gerilmesinin hesabı Denklem (2.175)'de sunulmuştur

2.5.6.1 Kayma Gerilmesinin Hesabı

Düşey yükten doğan kayma gerilmesi γ_v :

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta_t}{t} \quad (2.174)$$

$$\gamma_v = 6S\varepsilon_z \quad (2.175)$$

Yatay yükten doğan kayma gerilmesi γ_s :

$$\gamma_s = \frac{\tau}{G} = \frac{V_D}{AG} = \frac{k_D d_D}{AG} \quad (2.176)$$

Yatay ve düşey yükten dolayı oluşan maksimum kayma gerilmesinin hesabı:

$$\gamma_{max} = \gamma_s + \gamma_v \quad (2.177)$$

2.5.6.2 Ortak Alan Hesabı

Ortak alan A' aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\sin\theta = \frac{d_D}{D} \quad (2.178)$$

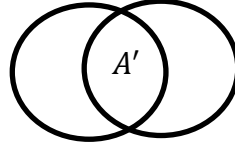
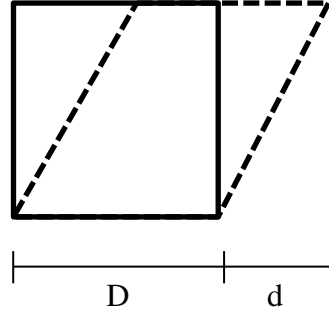
$$\theta = \sin^{-1} \frac{d_D}{D} \quad (2.179)$$

$$A' = A \left[1 - \frac{2}{\pi(\theta + \sin\theta)} \right] \quad (2.180)$$

Burada;

d_D , kayma Deplasmanı

D, izolatörün çapı olmaktadır.



Şekil 2.19 Kayma deplasmanı d_D ve ortak alan A' Gösterimi

2.5.6.3 Maksimum Düşey Yükün Hesabı

İzolatörün taşıyabileceği maksimum yük UBC-97'ye göre şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$W = A'GS\gamma_v \quad (2.181)$$

2.5.6.4 Şişme Riskinin Hesabı

UBC-97'ye göre tasarımı yapılan izolatöre şişme kontrolü yapılmalıdır. P_{cr} Düşey yük olmak üzere, izolatöre gelen yükün P_{cr} değerini aşmaması istenir.

Burada,

A , izolatörün alanı

I , atalet momenti

G , kayma modülü

E_{eff} , Efektif basınç modülü

T , izolatörün yüksekliği olarak gösterilmiştir.

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{AG\pi^2 E_{eff} I}{3t^2}} \quad (2.182)$$

$$I = \frac{\pi \frac{D^4}{2}}{4} \quad (2.183)$$

2.5.6.5 Kurşun Tamponun Tasarımı

t izolatörün yüksekliği olmakla birlikte, kurşun tamponun alanı $A_{kurşun}$ ve kurşun tamponun çapı d_1 aşağıda belirtilen şekilde bulunur:

$$\frac{t}{1,5} > d_1 \quad (2.184)$$

$$A_{kurşun} = \pi \frac{d^2}{4} \quad (2.185)$$

Yerel kesme kuvveti Q_y ise şu şekilde bulunmaktadır:

$$Q_y = \zeta_y A_{kurşun} \quad (2.186)$$

Burada ζ_y :Yerel kayma gerilmesi olarak gösterilmiştir ve ζ_y :10,5MPa olarak kabul edilebilmektedir.

Q_y 'nin bulunması için bir diğer yöntem ise d_D , tasarım deplasmanı ve d_y , kurşun çekirdekteki akma yer değiştirmesi olmak üzere,

$$A_{kurşun} = 4Q_y(d_D - d_y) \quad (2.187)$$

d_y ihmal edilebilir bir değer olduğundan 0 kabul edildiğinde tampon alanı aşağıdaki şekilde bulunur

$$A_{loop} = 4Q_y d_D \quad (2.188)$$

Buradan Yerel kesme kuvveti şu şekilde bulunur:

$$Q_y = \frac{A_{loop}}{4d_D} \quad (2.189)$$

Olarak belirlenmektedir. Tampon alanı:

$$A_{loop} = \beta(2\pi k_D d_D^2) \quad (2.190)$$

β formülasyondan elde edilirse bu değer,

$$\beta = \frac{2}{\pi} \left(\frac{A_{loop}}{A_{dikt}} \right) = \frac{A_{loop}}{2\pi K_D d_D^2} = 0,15 \quad (2.191)$$

elde edilmiş olur.

2.5.6.6 Çapın Kayma Kontrolü

Sismik İzolasyonlardaki toplam kuvvet V_D ,

$$V_D = V_{kurşun} + V_{kauçuk} = Q_y + k_2(d_D - d_y) \quad (2.192)$$

Kurşun çekirdekteki akma yer değiştirmesi;

$$d_y = \frac{Q_y}{k_1} \quad (2.193)$$

Denklemdaki k_1 kurşun çekirdeğin akma rijitliği ve Q_y ise akma kuvvetidir.

Toplam kesme kuvveti V_D ise

$$V_D = Q_y + k_2 \left(d_D - \frac{Q_y}{k_1} \right) = Q_y \left(1 - \frac{k_2}{k_1} \right) + k_2 d_D \quad (2.194)$$

Burada varsayım olarak $k_1 \approx 10k_2$ ve $k_{eff} = \frac{V_D}{d_D}$ alınırsa;

$$k_{eff} = \frac{V_D}{d_D} = \frac{Q_y}{d_D} \left(1 - \frac{k_2}{k_1} \right) + k_2 \quad (2.195)$$

$\frac{k_2}{k_1}$ İhmal edilirse sadece kauçuğun rijitliği kalır ve mesnet kurşun çekirdeksiz tasarlanmış olur. Böylece:

$$k_2 \approx k_{eff} - \frac{Q_y}{d_D} \quad (2.196)$$

Olarak hesaplanır.

BÖLÜM ÜÇ

Uygulamalar

3.1 Giriş

Bu bölümde Sismik taban izolasyonu uygulanan yapıya ait analiz çalışması sunulacaktır. Sismik taban izolasyon uygulamalarının daha iyi anlaşılabilmesi için çift yönde simetrik 8 katlı betonarme taşıyıcılı bir yapı ele alınacak, ankastre mesnetli ve taban izolasyonlu olarak iki ayrı şekilde modellenip yapısal analizi gerçekleştirilecektir. Uygulamanın analizi için SAP2000 yapısal analiz programı kullanılacaktır. İzolasyon sistemi oluşturulurken Amerika Birleşik Devletlerine ait UBC-97 yönetmeliğinde bahsedilen hükümler kullanılacaktır.

3.2 SAP2000 Yapısal Analiz Programı

SAP2000 yapısal analiz programı yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlerinde kullanılan yaygın bir yazılımdır. Görsel olarak grafik ortamda veri dosyalarını dışarıdan alma ve verme özelliği olan SAP2000 sonlu elemanlar yöntemine göre analiz yapmaktadır.

Zemin-yapı etkileşimini dikkate alan SAP2000 mod birleştirme ve zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yapmak mümkündür. SAP2000 ayrıca betonarme çerçeve sistemlerin donatı hesabını TS500 dahil olmak üzere çeşitli standartlara göre yapabilmektedir.

3.3 UBC-97 (Uniform Building Code 97) Standardı

Sismik İzolasyon sistemlerinin tasarımında en yaygın olarak kullanılan standarttır. Bu standart bir önceki UBC-94 standardının devamı niteliğinde olup yapıların etkiyen deprem yüklerine karşı sismik izolasyonla sağlanan elastik davranış sayesinde oluşacak hasarları önlemeye yöneliktir.

3.4 Analiz için Seçilen Betonarme Yapının Özellikleri

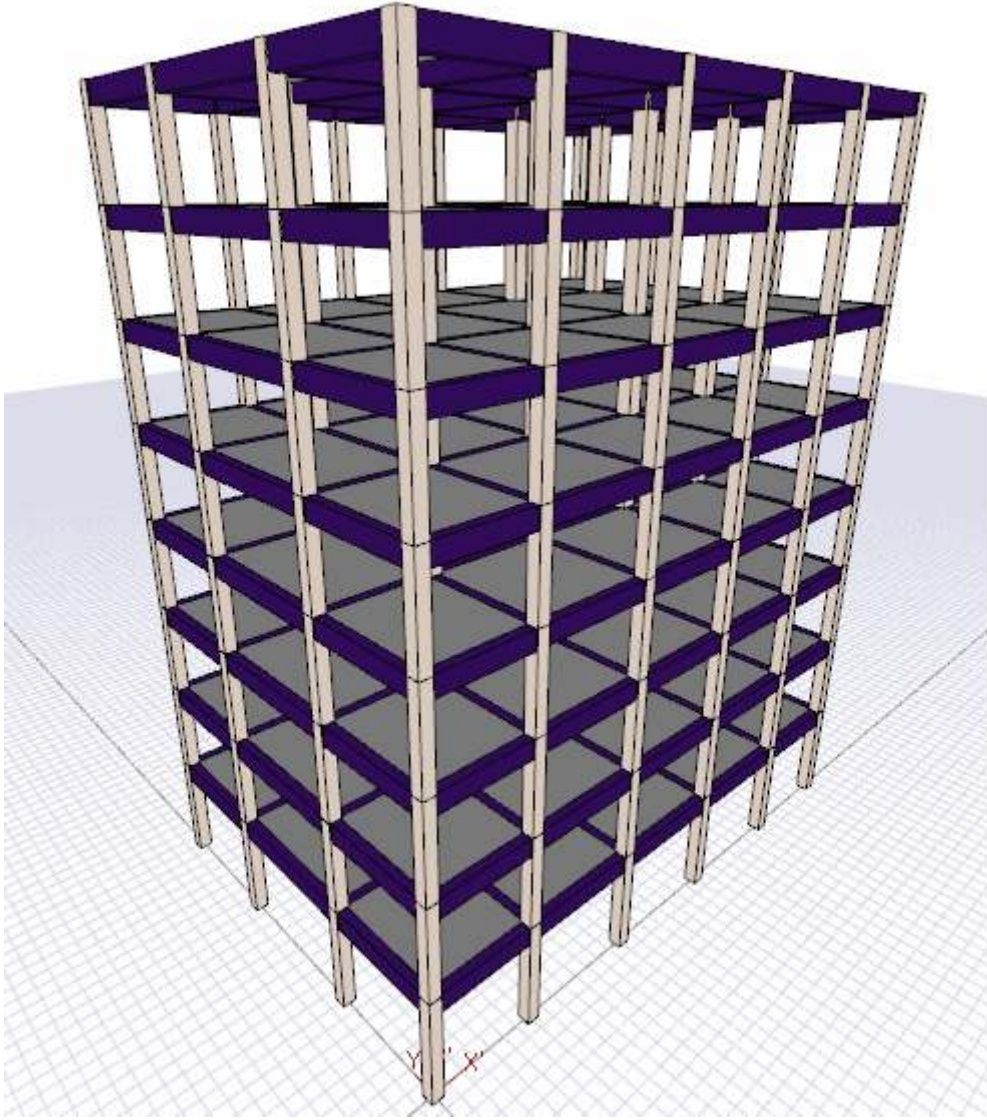
Analiz için seçilen yapı 8 katlı, x yönünde 5, y yönünde 4 açıklıklı bir yapıdır. Taşıyıcı sistem betonarme kolon ve kiriş elemanlarından oluşmuş kirişli plak döşemeye sahip bir sistemdir.

Kullanılan malzeme C25 beton sınıfı ve S420 çeliği olup kolonlar 40x40 cm ve 50x50 cm, kirişler 30x60 cm ve döşemeler ise 15 cm olarak ön boyutlandırılmıştır. Yapı modelinin 1. Derece deprem bölgesinde olduğu ve bölgede D sınıfı (Z3) zemin sınıfının bulunduğu kabul olarak alınmıştır.

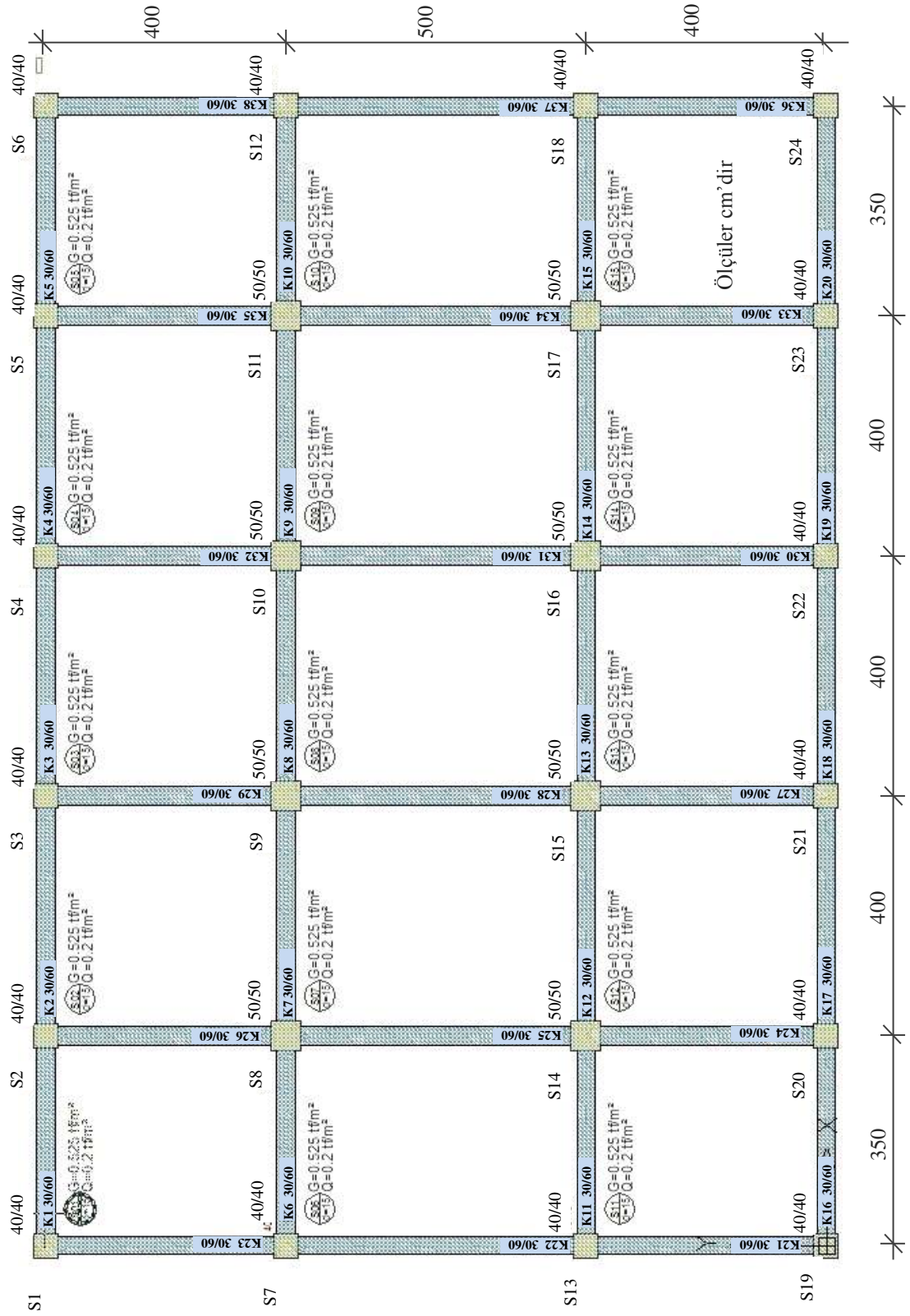
Seçilen betonarme yapıda kat yükseklikleri 3m olarak alınmıştır. Temel izolasyonlu yapıda izolatörlerin temel ile zemin kat arasına yerleştirilmiş ve eşit deplasman yapabilmeleri amacıyla sismik izolatör seviyesi üstünde üst yapı kolonları 15cm kalınlığında rijit diyafram ile birleştirilmişlerdir. Yapıda kullanılan döşemelerde hareketli yük $q=2,0 \text{ kN/m}^2$ olarak alınmıştır. Deprem hesapları esnasında yapı kütlesi tanımlanırken, toplam hareketli yükün sadece %30'unun mevcut olduğu varsayılmıştır.

Yapı önem katsayısı ise 1 olarak alınmıştır. Kat ağırlıkları hesabında betonarme malzemenin birim hacim ağırlığı 25 kN/m^3 , duvar birim hacim ağırlığı ise 10 kN/m^3 olarak alınmıştır. Her katın ağırlık merkezleri hesaplanarak, analiz esnasında kat kütleleri ve taşıyıcı elemanların bu ağırlık merkezlerine göre atalet momentleri, bu hesaplanan noktalarda dikkate alınmıştır.

Örnek yapının 3 boyutlu modeli Şekil 3.1'de ve kalıp planı şekil 3.2'de sunulmuştur tüm katların kat planı aynı olduğu için sadece zemin kat planı verilmiştir.



Şekil 3.1 Örnek Yapı Modeline ait üç boyutlu görünüş



Şekil 3.2 Örnek yapı modeline ait kat planı

3.5 Hesap Verileri

Sismik taban izolasyonu kullanılması sonucunda yapının yeni *titreşim periyodunun* $T=2,5$ sn mertebelerinde olması hedeflenmektedir. *Kayma şekil değiştirmesi* boyutsuz bir büyüklük olup, en fazla $\gamma=1,5$ olması istenmektedir (γ Disk çapının elastomer yüksekliğine oranını ifade etmektedir) .

3.6 Yük Analizi ve Döşeme Hesapları

Örnek yapı modeli için yük analizi yapılmıştır.

3.6.1 Döşeme Hesap Yükü

Döşeme yüksekliği	= 0,15 m
Döşemenin kendi ağırlığı	= 0,15 (m) * 25 (kN/m ³) = 3,75 kN/m ²
Kaplama ağırlığı	= 1,1 kN/m ²
Sıva Ağırlığı	= 0,02 (m)*20 (kN/m ³)=0,4 kN/m ²
Toplam döşeme yükü	= 5,25 kN/m ²
Hareketli yük	= q=2 kN/m ²

3.6.2 Yapı Ağırlığının Hesabı

Toplam döşeme yükü	= 5,25 kN/m ²
Hareketli yük	= 2 kN/m ²
Toplam Merdiven Döşeme yükü	= 8,23
Hareketli yük	= 3,5 kN/m ²
Döşeme ağırlıkları	=13(m)*19(m)*5,25(kN/m ²)+ 5(m)*4(m)*(8,23-5,25)(kN/m ²) =1760kN+60kN =1356kN
Kiriş Ağırlıkları	=621 kN
Kolon Ağırlıkları	2,850(m)*0,50(m)*0,50(m)*8(adet)*25*(kN/m ³) = 143 kN 2,850(m) *0,40(m) *0,40(m)*16(adet)*25*(kN/m ³) = 182,4 kN

Duvar Ağırlıkları = 650 kN

Birinci Katın Toplam Ağırlığı

$$\sum W_{1.kat} = 2953 \text{ kN}$$

Yapıya, toplam hareketli yükün sadece %30'unun mevcut olduğu kabulü ile

$$W_i = g_i + nq_i$$

$$W_{1.kat} = 2953 + 0,30 * ((2,0 \text{ (kN/m}^2) * 247 - 20 \text{ (m}^2) + 3,5 \text{ (kN/m}^2) * 20 \text{ (m}^2))$$

$$W_{1.kat} = 3110 \text{ kN} = 311 \text{ t}$$

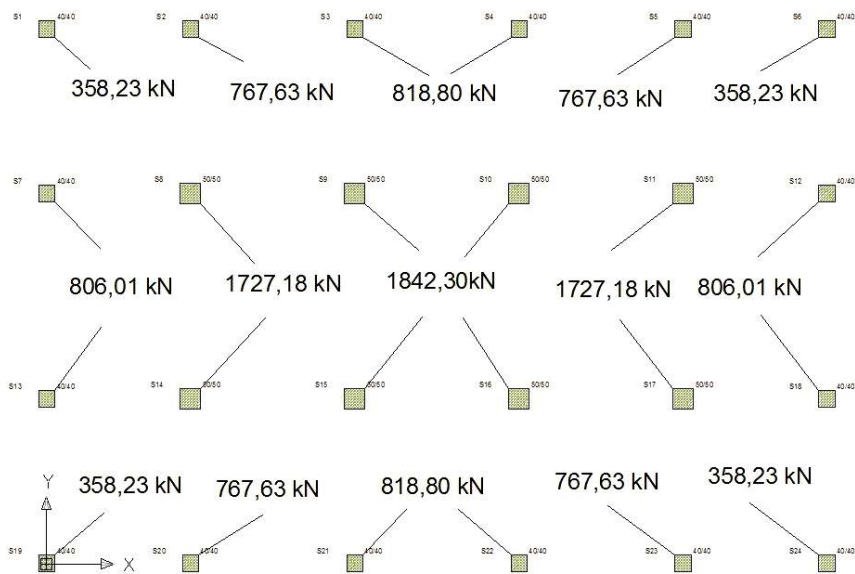
Olarak hesaplanır. Yapıdan izolatöre gelen toplam ağırlık hesaplanırken, 15cm kalınlığında rijit diyaframın ağırlığı da hesaba dâhil edilirse

$$W_{rijit\ diy.} = 0,15 * 25 * 19 * 13 = 1320 \text{ kN olur.}$$

Bu durumda toplam düşey yük şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\sum W_{toplam} = 7 * 3110 \text{ kN} + 1 * 2186 + 1320 = 25276 \text{ kN} = 2528 \text{ t}$$

Yapılan bu hesaplamalar sonucunda, üst yapıdan izolatlara yaklaşık olarak 2528t düşey yük geldiği belirlenmiştir. Kat kütleleri aşağıdaki şekilde belirlenip her bir bir izolatöre gelen düşey yükler Şekil 3.3'de sunulmuştur.



Şekil 3.3 Tüm izolatlara gelen yükler

3.6.3 Ankastre Temelli Sistemin Taban Kesme Kuvvetinin Hesabı

Yapının tümüne etki edece Toplam Eşdeğer Deprem Yüğü (Taban Kesme Kuvveti) V_t “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar” Şartlarına uygun olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$V_t = \frac{WA(T_1)}{R_a(T_1)} \geq 0,10A_0IW$$

$$A(T) = A_0 I S(T)$$

$$S(T) = 2,5 \quad T_A < T < T_B$$

$$V_t = \frac{25280 * 0,40 * 1 * 2,5}{8} \geq 0,10 * 0,40 * 1 * 25280$$

$$V_t = 3160 \geq 1011kN$$

$$V_t = 3160kN$$

F_i : i katına taşınan sismik yük

ΔF_N : Binanın N 'inci katına (tepesine) etkiyen *ek eşdeğer deprem yükü* olup aşağıdaki şekilde belirlenmektedir.

$$\Delta F_N = 0,0075 * 8 * 3160 = 189,6 kN = 0,19 MN$$

Toplam eşdeğer deprem yükünün ΔF_N dışında geri kalan kısmı N 'inci kat dâhil olmak üzere bina katlarına aşağıdaki şekilde dağıtılacaktır.

$$F_i = (V_t - \Delta F_N) \frac{w_i H_i}{\sum_{j=1}^N w_j H_j}$$

$$\sum_{j=1}^N w_j H_j = 3160 * 3 + 3160 * 6 + 3160 * 9 + 3160 * 12 + 3160 * 15 + 3160 * 18 + 3160 * 21 + 3160 * 24 = 341,280 \text{ MN}$$

$$F_1 = (3,160 - 0,19) \frac{3,160 * 3}{341,28} = 0,170 \text{ MN}$$

$$F_2 = (3,160 - 0,19) \frac{3,160 * 6}{341,28} = 0,298 \text{ MN}$$

$$F_3 = (3,160 - 0,19) \frac{3,160 * 9}{341,28} = 0,426 \text{ MN}$$

$$F_4 = (3,160 - 0,19) \frac{3,160 * 12}{341,28} = 0,553 \text{ MN}$$

$$F_5 = (3,160 - 0,19) \frac{3,160 * 15}{341,28} = 0,681 \text{ MN}$$

$$F_6 = (3,160 - 0,19) \frac{3,160 * 18}{341,28} = 0,809 \text{ MN}$$

$$F_7 = (3,160 - 0,19) \frac{3,160 * 21}{341,28} = 0,170 \text{ MN}$$

$$F_8 = (3,160 - 0,19) \frac{3,160 * 24}{341,28} = 1,065 \text{ MN}$$

3.6.4 UBC-97'ye Göre Yapı Parametreleri

Sismik Bölge Faktörü Z: Bölge 4 Z=0,40

Bölge Zemin Cinsi: S_D

Sismik Fay Tipi A tipi M ≥ 7.0 Kayma Oranı SR ≥ 5mm/yıl

Kaynak Yakınlık Faktörü: $\Delta > 15\text{km}$, $N_a=1$, $N_v=1$

Olabilecek En büyük Deprem Tepki Katsayısı: Yukarıda bulduğumuz Z ve N_v değerlerini çarparak M_M 1,25 olarak bulunur. Sismik Deprem Katsayıları,

$$C_v=0,64N_v=0,64*1$$

$$C_{vD}=0,64$$

$$C_a=0,44N_a=0,44*1$$

$$C_{aD}=0,44$$

Sismik Zemin Katsayıları C_{vM} ve C_{aM} : M_M Z N_v değerlerinin çarpılmasıyla bulunur.

$$\alpha = M_M Z N_a = 1,25 * 0,4 * 1 = 0,50$$

$$C_{aM} = 1,1 \alpha = 1,1 * 0,50 = 0,55$$

$$\alpha = M_M Z N_v = 1,25 * 0,4 * 1 = 0,50$$

$$C_{aM} = 1,6 \alpha = 1,6 * 0,50 = 0,80$$

Sönüm Azaltma Katsayısı (β) : Kritik sönüm oranına göre $\beta=1,20$ olarak belirlenir.

Yapısal Sistem Azaltma Faktörü (R_i) : İzolasyon seviyesi üzerindeki yapıya göre 2 olarak seçilir.

3.7 Örnek Yapı Modelinin Sismik Taban İzolasyon Sistemleri İle Tasarımı

Tasarımını yaptığımız örnek yapının sismik izolasyonunda iki farklı izolatör sistemi kullanılacaktır. Tasarım yapıldıktan sonra her iki farklı model için analiz aşamasında kullanılmak üzere kuvvet-yer değiştirme grafikleri çizilecektir. Yapı sisteminde tasarlanacak her izolatörün üzerinde taşıyacağı mevcut yüke göre bünyesinde bulundurması gereken minimum yatay rijitlik değerleri aşağıdaki sunulduğu gibi hesaplanmıştır.

$$k_{D1} = \frac{4\pi^2 W_1}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 0,358}{2,5^2 * 9,81} = 0,231 \text{ MN/m}$$

$$k_{D2} = \frac{4\pi^2 W_2}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 0,768}{2,5^2 * 9,81} = 0,495 \text{ MN/m}$$

$$k_{D3} = \frac{4\pi^2 W_3}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 0,806}{2,5^2 * 9,81} = 0,519 \text{ MN/m}$$

$$k_{D4} = \frac{4\pi^2 W_4}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 0,819}{2,5^2 * 9,81} = 0,527 \text{ MN/m}$$

$$k_{D5} = \frac{4\pi^2 W_5}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 1,727}{2,5^2 * 9,81} = 1,112 \text{ MN/m}$$

$$k_{D6} = \frac{4\pi^2 W_6}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 1,842}{2,5^2 * 9,81} = 1,186 \text{ MN/m}$$

Tüm yapı sisteminin sağlaması gereken yatay rijitlik değerleri aşağıda sunulduğu gibi hesaplanmıştır.

$$\sum K_H = \sum_{i=1}^{24} K_{Di} = \frac{4\pi^2 W_{Toplam}}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 25,280}{2,5^2 * 9,81} = 16,28 \text{ MN/m}$$

3.7.1 Doğal Kauçuk İzolatörle Yalıtılmış Taban İzolasyonu Tasarımı (Natural Rubber Bearing- NRB)

Kayma şekil değiştirmesinin $\gamma_{\max}=1,5$ olması istenmektedir ve farklı kayma modülüne sahip elastomerler için $G_A=0,65\text{MPa}$ ve $G_B=1,0\text{MPa}$ değerleriyle hesaba devam edilecektir. Sistemde fazla yük taşıyan orta akslardaki 8 kolon için $G_B=1,0\text{MPa}$ kayma modüllü sert kauçuk elastomerler, daha az yük taşıyan diğer 16 kolon için ise $G_A=0,65\text{MPa}$ kayma modüllü daha yumuşak kauçuk elastomerler kullanılacaktır. Yapının mevcut durumuna göre yukarıda, UBC-97 şartnamesine göre saptanmış değerler kullanılarak, kauçuk izolatörlerde oluşabilecek maksimum tasarım yer değiştirmesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D_D = \frac{g C_{vd} T_d}{\beta (4\pi^2)} = \frac{9,81 * 0,64 * 2,5}{1,2(4\pi^2)} = 0,33m$$

Maksimum deplasman (d_{Mmin}), rijitlik merkezi göz önünde bulundurularak;

$$D_M = \frac{g C_{vm} T_M}{\beta (4\pi^2)} = \frac{9,81 * 0,80 * 2,5}{1,2(4\pi^2)} = 0,41m$$

$$G_A = 0,65 \text{MPa} \text{ (65t/m}^2\text{)} \quad \beta = 0,10$$

$$G_B = 1,0 \text{MPa} \text{ (100t/m}^2\text{)} \quad \beta = 0,15$$

Toplam Elastomer Yüksekliği: $T_t = D_D / \gamma_{\max} = 0,33 / 1,5 = 0,22$ $T_t = 0,25$ olarak seçilmiştir.

Yatay rijitliklere göre tasarlanacak kauçuk izolatör çapları için mesnedin kesit alanı A olmak üzere;

$$k_D = AG/t$$

$$A = \frac{k_D t}{G}$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Sonuçta çap aşağıdaki denklem ile hesaplanacaktır;

$$A_1 = \frac{k_{D1} t_r}{G_A} = \frac{0,231 * 0,25}{0,65} = 0,089 \text{ m}^2 \quad D_1 = 34 \text{ cm}$$

$$A_2 = \frac{k_{D2} t_r}{G_A} = \frac{0,495 * 0,25}{0,65} = 0,19 \text{ m}^2 \quad D_2 = 49 \text{ cm}$$

$$A_3 = \frac{k_{D3} t_r}{G_A} = \frac{0,519 * 0,25}{0,65} = 0,20 \text{ m}^2 \quad D_3 = 50 \text{ cm}$$

$$A_4 = \frac{k_{D4} t_r}{G_A} = \frac{0,527 * 0,25}{0,65} = 0,20 \text{ m}^2 \quad D_4 = 50 \text{ cm}$$

$$A_5 = \frac{k_{D5} t_r}{G_B} = \frac{1,112 * 0,25}{1,00} = 0,278 \text{ m}^2 \quad D_5 = 59 \text{ cm}$$

$$A_6 = \frac{k_{D6} t_r}{G_B} = \frac{1,186 * 0,25}{1,00} = 0,297 \text{ m}^2 \quad D_6 = 62 \text{ cm}$$

Yukarıdaki hesaplar doğrultusunda kenar kolonların altına yerleştirilecek izolatörlerin disk çapı $D=55 \text{ cm}$ ve daha fazla yük alan orta kolonların altına yerleştirilecek izolatörlerin çaplarının $D=65 \text{ cm}$ seçilmesi uygun bulunmuştur. İzolatör alanları

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * (0,55)^2}{4} = 0,238$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * (0,65)^2}{4} = 0,332$$

olarak bulunur. Elastomer menseler için yatay rijitlikler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$K_H^A = \frac{AG_A}{t_r} = \frac{0,238 * 0,65}{0,25} = 0,619 \text{ MN/m}$$

$$K_H^B = \frac{AG_B}{t_r} = \frac{0,332 * 1,00}{0,25} = 1,33 \text{ MN/m}$$

3.7.2 Efektif Sistemin Toplam Yatay Rijitliği

Sistemde kullanılmış İkit tip İzolatör için, efektif sistemin toplam yatay rijitliği aşağıdaki gibi bulunur.

$$\sum K_H = 16(K_H^A) + 8(K_H^B) = 16 * 0,619 + 8 * 1,33 = 20,54 \text{ MN/m}$$

3.7.3 Efektif Sistem Titreşim Periyodu

Elde edilen değerlere göre, sistemin efektif titreşim periyodu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\sum k_D g}} = 2\pi \sqrt{\frac{25,28}{20,54 * 9,81}} = 2,23$$

Elde edilen değer, tasarım değeri olan $T=2$ değerine yakın olduğu için hesaplara devam edilmiştir.

3.7.4 Efektif Sistemde Toplam Sönüm

Sistemin efektif toplam sönümü;

$$\beta = \frac{W_D}{2\pi K_{D,max} D^2} = \frac{K_D^A B_A + K_D^B B_B}{K_{D,max}} = \frac{16 * 0,619 * 0,10 + 8 * 1,33 * 0,15}{20,54} = 0,13$$

Sistemde toplam sönüm ve rijitliğe göre yata yer değiştirme tekrar hesaplanır Sönüm azaltma kasayısı “B” için UBC-97 de önerilen formül aşağıdaki gibidir.

$$B = \frac{4}{1 - \ln 0,13} = 1,32$$

Bulunan yeni değerle gerçek tasarım yer değiştirmesi D_D ağıdaki gibi olur;

$$D_D = \frac{g C_{vD} T_D}{\beta (4\pi^2)} = \frac{9,81 * 0,64 * 2,23}{1,32(4\pi^2)} = 0,27m$$

$$\gamma = \frac{D_D}{t_r} = \frac{0,27}{0,25} = 1,08 < \gamma_{max} = 1,5$$

Hesaplanan değer istenilen sınırdadır.

3.7.5 Maksimum Toplam Tasarım Yer Değiştirmesi

Burada “e” planda uzun doğrultudaki mesafeyi ifade eder

.

$$E = 0,05 * e = 0,05 * 16 = 0,8 m$$

Plan boyutları a=16 m, ve b=22 m’dir.

UBC-97 de toplam deplasman d_{total} şu şekilde belirtilmiştir:

$$d_{total} = d_D \left(1 - \frac{12xe}{b^2 + d^2} \right) = 0,27 \left(1 - \frac{12 * 0,8}{16^2 + 22^2} \right) = 0,264$$

3.7.6 Analizde Kullanılacak Parametreler

İzolasyon sisteminin altında kalan elemanların tasarımı için kullanılacak olan tasarım kesme kuvveti “ V_b ”

$$V_b = K_{D,max} * D_D = 20,54 * 0,27 = 5,55$$

İzolasyon sistemi üstünde bulunan elemanların tasarımında kullanılacak tasarım kesme kuvveti “ V_s ” is şu şekilde bulunmaktadır. Burada R yapıda taşıyıcı sistem

azaltma katsayısıdır ve bu değer yapının taşıyıcı sistemine uygun olarak çizelgeden 2 olarak seçilmiştir.

$$V_s = K_{D,max} * D_D / R_1 = 20,54 * 0,27 / 2 = 2,77$$

Sismik taban kesme katsayısı C_s ise

$$C_s = \frac{V_s}{W} = \frac{2,77}{25,280} = 0,11 = \%11$$

olarak bulunur.

3.7.7 Yatay Deprem Yükünün Katlara Dağılımı

Yatay deprem kuvvetlerinin yapı yüksekliğince katlara dağılımı

$$F_x = V_s \frac{h_x W_x}{\sum_{i=1}^N (h_i W_i)}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (h_i W_i) &= (h_1 W_1) + (h_2 W_2) + (h_3 W_3) + (h_4 W_4) + (h_5 W_5) + (h_6 W_6) \\ &\quad + (h_7 W_7) + (h_8 W_8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (h_i W_i) &= (3 * 3,110) + (6 * 3,110) + (9 * 3,110) + (12 * 3,110) \\ &\quad + (15 * 3,110) + (18 * 3,110) + (21 * 3,110) + (24 * 3,110) \\ &= 335,88 \text{ MN} \end{aligned}$$

$$F_1 = 2,77 \frac{3 * 3,110}{335,88} = 0,077 \text{ MN}$$

$$F_2 = 2,77 \frac{6 * 3,110}{335,88} = 0,154 \text{ MN}$$

$$F_3 = 2,77 \frac{9 * 3,110}{335,88} = 0,231 MN$$

$$F_4 = 2,77 \frac{12 * 3,110}{335,88} = 0,308 MN$$

$$F_5 = 2,77 \frac{15 * 3,110}{335,88} = 0,385 MN$$

$$F_6 = 2,77 \frac{18 * 3,110}{335,88} = 0,462 MN$$

$$F_7 = 2,77 \frac{21 * 3,110}{335,88} = 0,539 MN$$

$$F_8 = 2,77 \frac{24 * 3,110}{335,88} = 0,616 MN$$

3.7.8 Kauçuk İzolatör Detayı

İzolatörlerde elastomer çapı ve toplam elastomer yüksekliği daha önceki adımlarda hesaplanmıştır. Yönetmeliklerde elastomer tabakaların arasına konacak her bir çelik levha kalınlığı standartlarda 2mm olarak verilmiştir. İzolatördeki tabakaların bir tanesinin kalınlığı olan “t” ise aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

“R” yarıçaplı ve dairesel kesitli bir elastomerik izolatör için şekil faktörü “S”

$$S = \frac{\text{Disk alanı}}{\text{Kesit Alanı}} = \frac{\pi D^2 / 4}{\pi D t_0} = \frac{D}{4 t_0}$$

Yönetmeliklerde “S” şekil faktörünün optimum değerinin; tek bir kauçuk tabaka kalınlığı “t₀” ‘a bağlı olarak

$$\frac{D}{80} \leq t_0 \leq \frac{D}{40}$$

$$\frac{650}{80} \leq t_0 \leq \frac{650}{40}$$

$$8,125 \leq t_0 \leq 16,25$$

$$\frac{550}{80} \leq t_0 \leq \frac{550}{40}$$

$$6,88 \leq t_0 \leq 13,75$$

Arasında bir değer alınması gerektiği belirtilmektedir.

D=700mm olduğunu göre

t_0 değeri her iki izolatör tipi içinde 10mm olarak seçilmiştir. Buradan şekil faktörü “S” ise;

$$S_A = \frac{D}{4t_0} = \frac{550}{4 * 10} = 13,75$$

$$S_B = \frac{D}{4t_0} = \frac{650}{4 * 10} = 16,25$$

Toplam elastomer yüksekliği ” t_r ” daha önce 250 mm olarak seçilmiştir. Buradan;

$$n_{elastomer} * t = 250mm$$

$$t = 10 \text{ mm için } n_{elastomer} = 25 \text{ adet olarak bulunur}$$

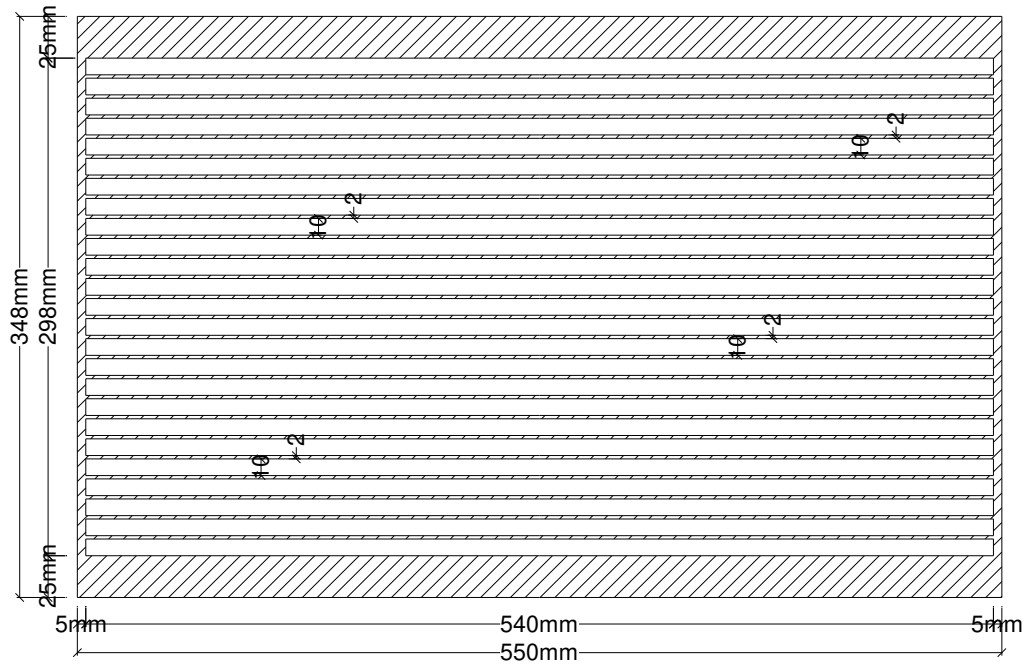
Çelik tabaka sayısı $n_{çelik} = n_{elastomer} - 1$ olmaktadır.

Çelik levhaların çapı; her iki taraftan 5'er mm kapatma plakası genişliği kadar ayrıldıktan sonra

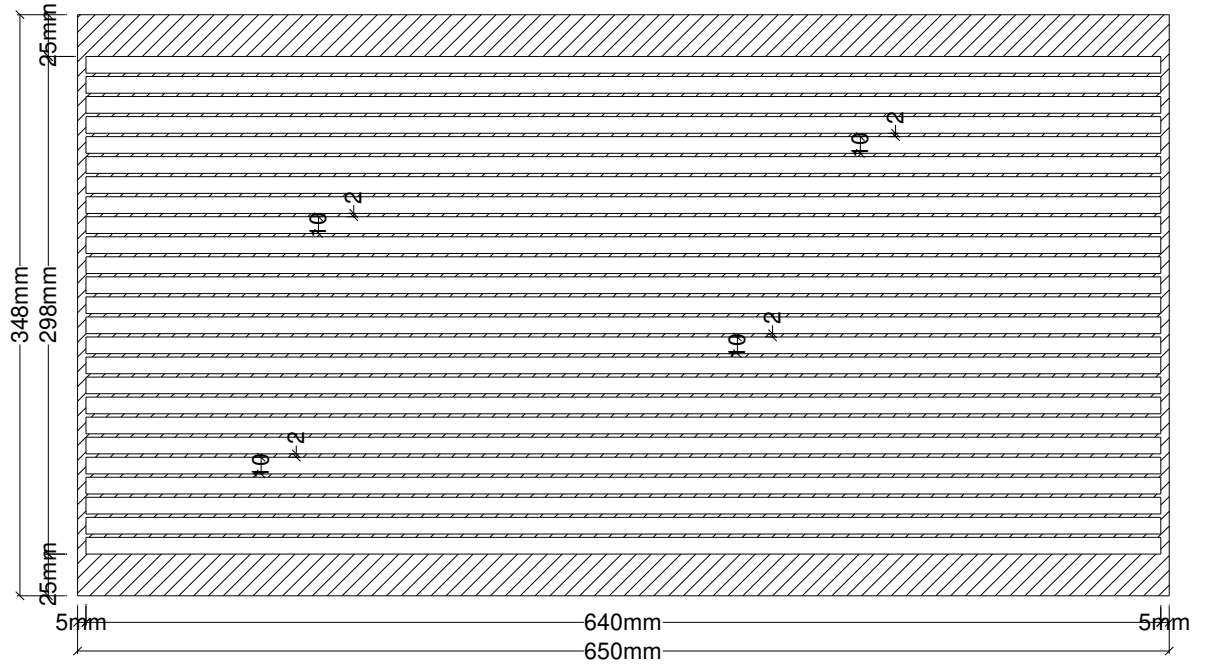
$700-(2*5)=690$ mm ve $550-2*5=540$ mm olarak belirlenir.

Her bir çelik tabaka kalınlığı 2 mm standart kalınlıkta olacak şekilde, izolatörlerin alt ve üst kısımlarında 25'er mm çelik kapatma tabakası (elastomer ve çelik plakaların bütünlüğünü sağlamak amacıyla) yerleştirmek üzere izolatör boyutlandırması tamamlanmış olur. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da detayı verilen nihai olarak izolatör yüksekliği "H" ;

$H=2*25\text{mm} + 24*2\text{ mm} + 25*10\text{mm} =348$ mm olur.



Şekil 3.5 Tip A 55 cm İzolatör Detayı



Şekil 3.6 Tip B 65 cm İzolatör Detayı

3.7.9 Efektif Eksenel Rijitlik Hesabı

İzolatörler için daha önceden seçilmiş olan kayma modülleri ve hacimsel elastisite modülüne göre;

$$G_A = 0,65 \text{ MPa}$$

$$G_B = 1,00 \text{ MPa}$$

$$K = 2000 \text{ MPa}$$

Yükleme modülleri ise

$$E_C^A = \frac{6G_A S^2 K}{6G_A S^2 + K} = \frac{6 * 0,65 * 13,75^2 * 2000}{6 * 0,65 * 13,75^2 + 2000} = 538,73 \text{ MN/m}^2$$

$$E_C^B = \frac{6G_B S^2 K}{6G_B S^2 + K} = \frac{6 * 1,00 * 16,25^2 * 2000}{6 * 1,00 * 16,25^2 + 2000} = 884,05 \text{ MN/m}^2$$

A tipi kayma modülüne sahip izolatörlerin düşey rijitliği

$$K_V^A = \frac{E_C^A * A}{t_r} = \frac{538,73 * 0,238}{0,25} = 512,87 \text{ MN/m}$$

B tipi kayma modülüne sahip izolatörlerin düşey rijitliği

$$K_V^B = \frac{E_C^B * A}{t_r} = \frac{884,05 * 0,332}{0,25} = 1174,02 \text{ MN/m}$$

Toplam eksenel rijitlik ise;

$$K_v = \frac{(16E_C^A + 8E_C^B)A}{t_r} = \frac{(16 * 538,73 * 0,238 + 8 * 884,05 * 0,382)}{0,25} \\ = 19012,56 \text{ MN/m}$$

olarak hesaplanır.

3.7.10 Düşey Titreşim Periyodunun Hesabı

Yapının düşeyde yapmış olduğu toplam tasarım yer değiştirmesi “ Δt ” yapı toplam ağırlığının, toplam eksenel rijitliğe oranıyla elde edilir.

$$\Delta t = \frac{W}{K_v} = \frac{25,280}{19012,56} = 0,00133 \text{ m}$$

Düşey titreşim periyodunun ise;

$$T_v = \frac{T_{Dv}}{\sqrt{6S}} = \frac{2,23}{\sqrt{6 * 14,58}} = 0,24 \text{ sn}$$

olarak hesaplanır.

3.7.11 Ortak Alan Hesabı

Her iki izolatör içinde ortak alan A' aşağıdaki şekilde hesaplanır;

Burada;

D_D : Kayma Deplasmanı

$$A' = A \left[1 - \frac{2}{\pi} (\theta + \sin\theta \cos\theta) \right]$$

$$\sin\theta = \frac{D_D}{D} = \frac{0,27}{0,65} = 0,415$$

$$\sin\theta = \frac{D_D}{D} = \frac{0,27}{0,55} = 0,491$$

$$\theta = \arcsin(0,415)^\circ = 24,52^\circ$$

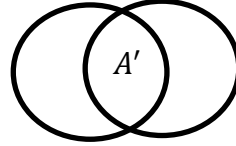
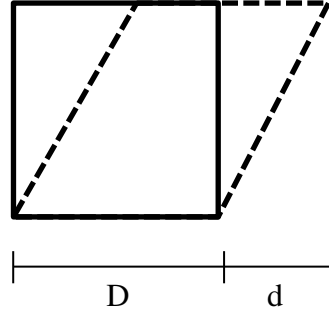
$$\theta = \arcsin(0,491)^\circ = 29,41^\circ$$

$$\cos\theta = 0,91$$

$$\cos\theta = 0,87$$

$$A' = A \left[1 - \frac{2}{\pi} (\theta + \sin\theta \cos\theta) \right] = 0,238 \left[1 - \frac{2}{\pi} (0,65 + 0,415 * 0,91) \right] = 0,0823 \text{ m}^2$$

$$A' = A \left[1 - \frac{2}{\pi} (\theta + \sin\theta \cos\theta) \right] = 0,382 \left[1 - \frac{2}{\pi} (0,65 + 0,491 * 0,87) \right] = 0,120 \text{ m}^2$$

Şekil 3.7 Ortak alan A' Gösterimi

3.7.12 Göçme Riski Kontrolü

Sistemde Göçme riski kontrolü için öncelikle kritik olan P yükü belirlenir.

$$P_{Kritik} = \sqrt{P_S P_E}$$

Çelik kısmı için kritik yük $P_S = G * A_s$

Elastomer kısmı için kritik yük $P_E = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{(t_r)^2}$

$$(EI)_{eff} = \frac{1}{3} E_c I$$

İzolatörlerde çelik levha çapları 0,69 m ve 0,54 m olduğu için “I” atalet momenti,

$$I_A = \frac{\pi}{4} (D/2)^4 = \frac{\pi}{4} (0,54/2)^4 = 0,0042$$

$$I_B = \frac{\pi}{4} (D/2)^4 = \frac{\pi}{4} (0,69/2)^4 = 0,0111$$

$$P_{Kritik} = \frac{\pi}{t_r} \sqrt{(E_c I / 3) G * A_s}$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} (0,54)^2 = 0,229 \text{ m}^2$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} (0,69)^2 = 0,374 \text{ m}^2$$

$$P_{Kritik}^A = \frac{\pi}{0,25} \sqrt{(538,73) * \frac{0,0042}{3} * 0,65 * 0,229} = 4,21 \text{ MN} = 4210 \text{ kN}$$

$$P_{Kritik}^B = \frac{\pi}{0,25} \sqrt{(884,05) * \frac{0,0111}{3} * 1,00 * 0,374} = 13,90 \text{ MN} = 13900 \text{ kN}$$

Tablo 3.1 İzolatörün kritik yükleri ve izolatörlere gelen yükler

Kritik yük	İzolatörlere gelen yükler			
$P_{Kritik}^A = 4210 \text{ kN}$	358,2 kN	767,63 kN	806,01 kN	818,80 kN
$P_{Kritik}^B = 13900 \text{ kN}$	1727,18 kN		1842,3 kN	

Tablo 3.1 görülen kritik yükler izolatörlere gelen yüklerden büyük olduğu için göçme riski bulunmamaktadır.

3.7.13 Dışarı Yuvarlanma Mesafeleri

Dışarı yuvarlanma elastomerlerde etkiyen yatay kuvvetin tasarım yer değiştirme kapasitesini aşması durumunda meydana gelmektedir. Elastomerin plakalardan sıyrılarak yuvarlanma hareketi yaparak tasarım dışı davranış göstermesine neden olacak büyüklükteki yer değiştirme de denilebilir. Dışarı yuvarlanma riski ancak, izolatör bağlantılarının bulonlu olmaması durumları için söz konusu olabilir. Bulonlu bağlantılarda bu hesaplama gerekliliği yoktur. Aşağıdaki maksimum yer değiştirme sınır değerleridir.

$$D_{max} = \frac{\phi}{1 + K_H h/W}$$

$$D_{max,1} = \frac{0,550 \text{ m}}{1 + (538,73 \text{ kN/m}) (0,348 \text{ m}) / 358,23 \text{ kN}} = 0,36 \text{ m}$$

$$D_{max,2} = \frac{0,550 \text{ m}}{1 + (538,73 \text{ kN/m}) (0,348 \text{ m}) / 767,63 \text{ kN}} = 0,44 \text{ m}$$

$$D_{max,3} = \frac{0,550 \text{ m}}{1 + (538,73 \text{ kN/m}) (0,348 \text{ m}) / 806,01 \text{ kN}} = 0,45 \text{ m}$$

$$D_{max,4} = \frac{0,550 \text{ m}}{1 + (538,73 \text{ kN/m}) (0,348 \text{ m}) / 818,8 \text{ kN}} = 0,45 \text{ m}$$

$$D_{max,5} = \frac{0,650 \text{ m}}{1 + (884,05 \text{ kN/m}) (0,348 \text{ m}) / 1727,18 \text{ kN}} = 0,55 \text{ m}$$

$$D_{max,6} = \frac{0,650 \text{ m}}{1 + (884,05 \text{ kN/m}) (0,348 \text{ m}) / 1842,30 \text{ kN}} = 0,56 \text{ m}$$

Yukarıda bulunan bu değerler sonucunda iki ayrı tipteki doğal kauçuk mesnet tipleri için analiz aşamasında matematik modellemede kullanılacak değerler aşağıda verildiği gibidir.

$$K_2^A = \frac{A * G_A}{t_r} = \frac{0,238(0,65)}{0,25} = 0,619 \text{ MN/m} = 61,90 \text{ t/m}$$

$$K_1^A = 6 * 61,90 = 371,40 \text{ t/m}$$

$$K_2^B = \frac{A * G_B}{t_r} = \frac{0,382(1,0)}{0,25} = 1,53 \text{ MN/m} = 153 \text{ t/m}$$

$$K_1^B = 6 * 153 = 917 \text{ t/m}$$

$$K_V^A = \frac{E_c^A * A}{t_r} = \frac{538,73(0,238)}{0,25} = 512,87 \text{ MN/m} = 51287 \text{ t/m}$$

$$K_V^B = \frac{E_c^B * A}{t_r} = \frac{884,05(0,382)}{0,25} = 1350,75 \text{ MN/m} = 135075 \text{ t/m}$$

$$Q^A = C_s W = 0,11 * 0,818 = 0,08998 \text{ MN} = 9,0 \text{ t}$$

$$Q^B = C_s W = 0,11 * 0,1842 = 0,02026 \text{ MN} = 20,26 \text{ t}$$

$$D_y^A = \frac{Q^A}{K_1^A - K_2^A} = \frac{9,0}{371,40 - 61,90} = 0,0291 \text{ m}$$

$$D_y^B = \frac{Q^B}{K_1^B - K_2^B} = \frac{20,26}{917 - 153} = 0,0265 \text{ m}$$

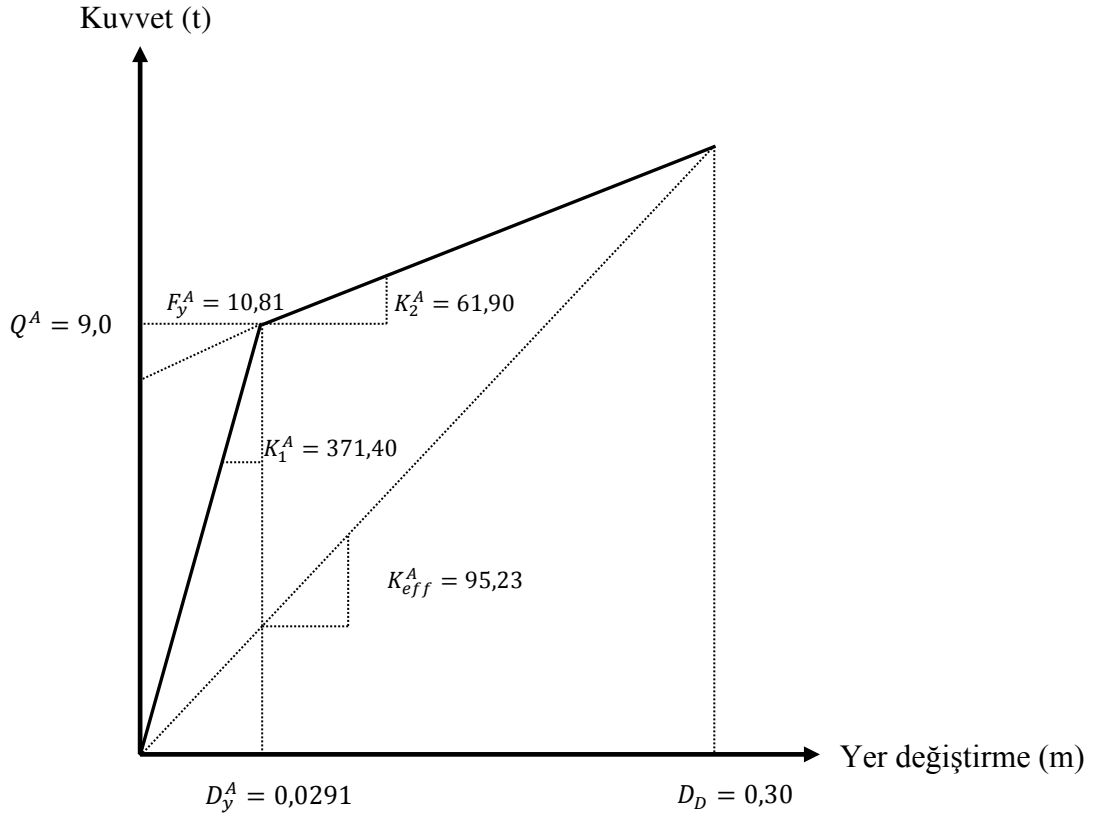
$$K_{eff}^A = K_2^A + \frac{Q^A}{D} = 61,90 + \frac{9,0}{0,27} = 95,23 \text{ t/m}$$

$$K_{eff}^B = K_2^B + \frac{Q^B}{D} = 153 + \frac{20,26}{0,27} = 228,04 \text{ t/m}$$

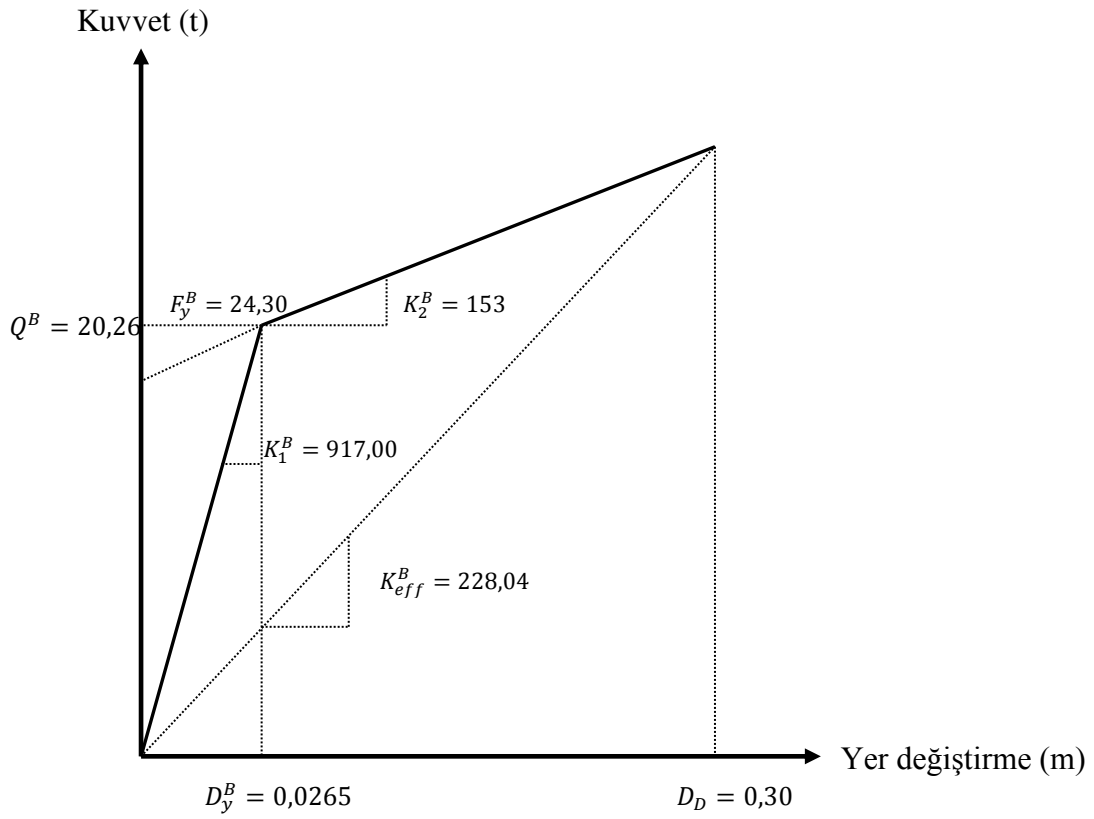
$$F_Y^A = K_1^A * D_y^A = 371,40 * 0,0291 = 10,81 \text{ t}$$

$$F_Y^B = K_1^B * D_y^B = 917 * 0,0265 = 24,30 \text{ t}$$

Bulunan bu değerler için kauçuk mesnetlerin modellemede kullanılmak üzere kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da gösterilmiştir.



şekil 3.8 A tipi doğal kauçuk izolatörlerin kuvvet-yer değiştirme grafiği



şekil 3.9 B tipi doğal kauçuk izolatörlerin kuvvet-yer değiştirme grafiği

Elde edilen bu değerlere göre Sap2000 Paket programında kullanılacak veriler Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de sunulmuştur

Tablo 3.2 İzolatörlere ait analizde kullanılacak değerler

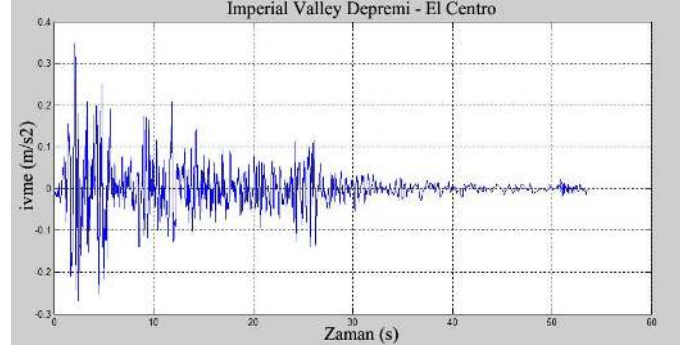
Kauçuk İzolatör		1. Tip İzolatör	
Toplam Ağırlığı:		0,3465 t	
Doğrultu	Özellik		
U1 (Düşey)	Rijitlik (t/m)	Lineer	Nonlineer
		51287	-
U2 (Yatay)	Rijitlik (t/m)	95,23	371,40
	Akma Dayanımı (t)	-	10,81
	K ₂ /K ₁	-	0,1667

Tablo 3.3 İzolatörlere ait analizde kullanılacak değerler

Kauçuk İzolatör		2. Tip İzolatör	
Toplam Ağırlığı:		0,65235 t	
Doğrultu	Özellik		
U1 (Düşey)	Rijitlik (t/m)	Lineer	Nonlineer
		135075	-
U2 (Yatay)	Rijitlik (t/m)	228,04	917
	Akma Dayanımı (t)	-	24,30
	K ₂ /K ₁	-	0,1667

3.8 Dinamik Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

Örnek yapı modeli için zaman tanım alanında önce ankastre mesnetli olarak sonrada sismik izolatörlü olarak analizler yapılmıştır. Zaman tanım alanında analizler için Şekil 3.10 da görülen 1940 El Centro depremi ivme kayıtları kullanılmıştır



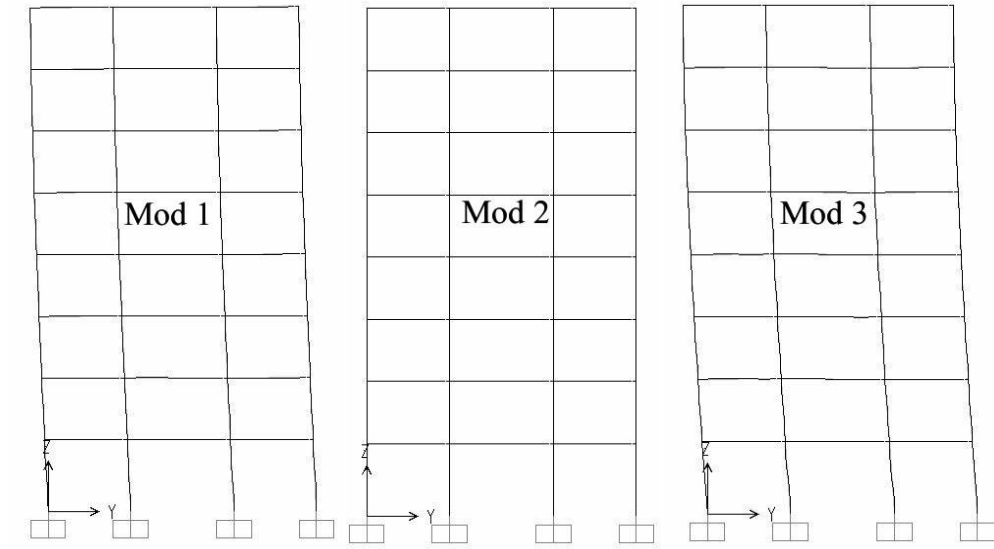
Şekil.3.10 El Centro depremi Kuzey-Güney ivme kaydı

3.8.1 Ankastre Mesnetli Sistemin Dinamik Analiz Sonuçları

Sap2000 bilgisayar programı kullanılarak zaman tanım alanında ve El Centro depremi ivme kayıtları ile ankastre mesnetli yapı modeli için dinamik analizler yapılmıştır.

3.8.1.1 Modlara Göre Titreşim Periyotları

Şekil 3.11’de ankastre mesnetli yapıya ait mod şekilleri ve Tablo 3.4’de yapının modlarına ait periyodları görülmektedir.

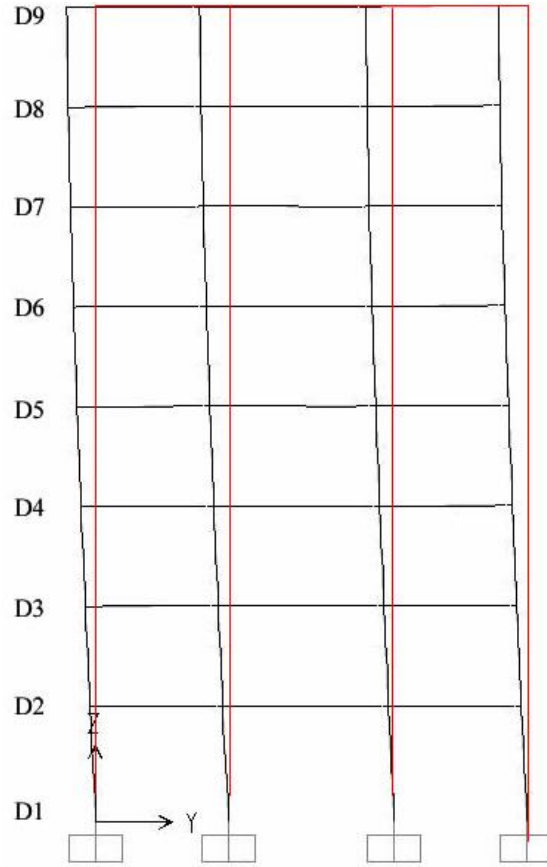


Şekil 3.11 Ankastre temelli yapının mod şekilleri

Tablo 3.4 Ankastre mesnetli yapıda El Centro depremi ivme kayıtları elde edilen modlara göre titreşim periyotları

Mod	Ankastre Yapı Periyodu (sn)
1 (Y ekseninde)	0,84
2 (X ekseninde)	0,81
3 (Z ekseninde)	0,73
4 (Y ekseninde)	0,28
5 (X ekseninde)	0,27
6 (Z ekseninde)	0,24

Yapılan analiz sonucunda ankastre temelli yapının 1. Modunun Y-Y doğrultusunda yatay yönde yapmış olduğu deformasyonlar Şekil 3.10 da görülmektedir. Her kata denk gelen düğüm noktalarındaki görelî deplasmanları Tablo 3.5’de sunulmuştur

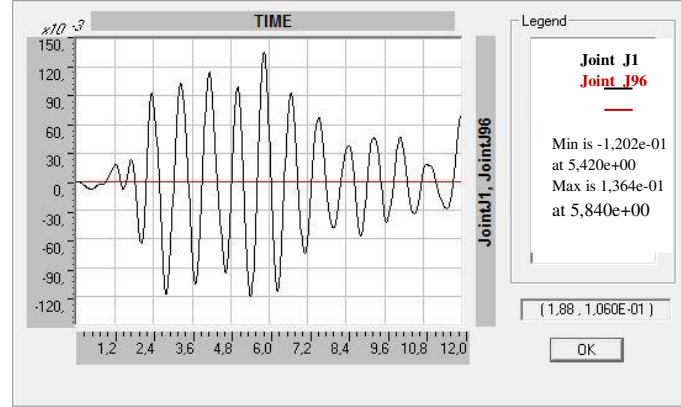


Şekil 3.12 Ankastre temelli yapının Y-Y ekseninde deprem sonucu oluşan yatay yer değiştirmeler.

Tablo 3.5 Ankastre temelli yapının Y-Y ekseninde deprem yüklemesi sonucu her kata gelen düğüm noktalarında oluşan görelî yatay yer değıştirmeler.

Y-Y Eksenî		
Düğün Noktası	Deplasman (m)	Görelî Deplasmanlar (m)
D1	0,0000	0,0265
D2	0,0265	
D3	0,0482	0,0217
		0,0204
D4	0,0686	0,0190
D5	0,0876	
D6	0,1045	0,0169
		0,0135
D7	0,1180	0,0114
D8	0,1294	
D9	0,1364	0,0070

Yapının ankastre temel seviyesi (D1) ve en üst kat (D9) düğüm noktalarının yatay yer değıştirmeleri Şekil 3.13’de aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. D1 düğüm noktası (kırmızı renkte gösterilen) ankastre temel seviyesinde seçilen bir düğüm noktası olduğı için hiç görelî deplasman yapmamıştır fakat D9 düğüm noktası (Siyah renkte gösterilen) ise - 0,12 ile 0,136 m arasında deplasman yapmıştır.



Şekil 3.13 Ankastre temelli yapıda D1 ile D9 düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin aynı grafikte gösterimi.

Ankastre temelli yapı için El Centro deprem yüklemesi sonucu oluşan eksenel kuvvetler Şekil 3.14’de, kolon kesme kuvvetleri Şekil 3.15’te, kiriş kesme kuvvetleri Şekil 3.16’da, kolon eğilme momentleri Şekil 3.17’de, kiriş eğilme momentleri Şekil 3.18’de sunulmuştur.

-217,42 t	-171,27 t	-130,18 t	-93,05 t	-60,75 t	-34,15 t	-14,36 t	-2,83 t
191,25 t	151,89 t	116,93 t	84,24 t	55,27 t	30,87 t	12,85 t	2,44 t
-265,83 t	-204,95 t	-152,35 t	-105,91 t	-66,42 t	-34,82 t	-13,10 t	-1,82 t
234,12 t	181,77 t	137,09 t	96,39 t	60,88 t	31,72 t	11,45 t	1,36 t
-278,77 t	-216,89 t	-162,62 t	-114,26 t	-72,78 t	-39,30 t	-15,30 t	-2,80 t
245,40 t	192,34 t	146,22 t	103,76 t	66,52 t	35,70 t	13,84 t	2,23 t
-278,77 t	-216,89 t	-162,62 t	-114,26 t	-72,78 t	-39,30 t	-15,30 t	-2,80 t
245,40 t	192,34 t	146,22 t	103,76 t	66,52 t	35,70 t	13,84 t	2,23 t
-265,83 t	-204,95 t	-152,35 t	-105,91 t	-66,42 t	-34,82 t	-13,10 t	-1,82 t
234,12 t	181,77 t	137,09 t	96,39 t	60,88 t	31,72 t	11,45 t	1,36 t
-217,42 t	-171,27 t	-130,18 t	-93,05 t	-60,75 t	-34,15 t	-14,36 t	-2,83 t
191,25 t	151,89 t	116,93 t	84,24 t	55,27 t	30,87 t	12,85 t	2,44 t

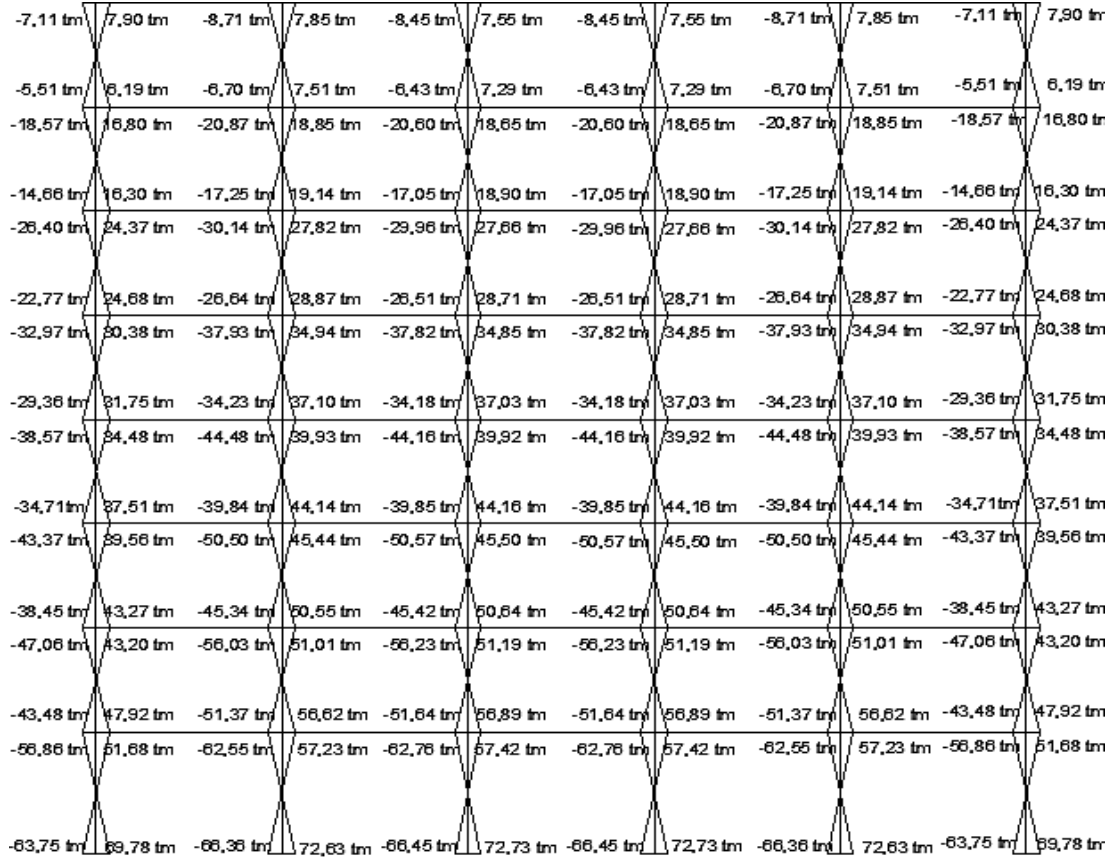
Şekil 3.14 Ankastre temelli yapı için El Centro deprem yüklemesi sonucu oluşan eksenel kuvvetler

36,13 t		31,75 t	-29,40 t	25,43 t	21,53 t	17,02 t	11,62 t	4,68 t
38,62 t	37,54 t	33,68 t	29,54 t	25,09 t	19,67 t	13,33 t	5,41 t	
38,71 t	37,70 t	33,73 t	29,54 t	24,95 t	19,56 t	13,17 t	5,24 t	
38,71 t	37,70 t	33,73 t	29,54 t	24,95 t	19,56 t	13,17 t	5,24 t	
38,62 t	37,54 t	33,68 t	29,54 t	25,09 t	19,67 t	13,33 t	5,41 t	
36,13 t	31,75 t	-29,40 t	25,43 t	21,53 t	17,02 t	11,62 t	4,68 t	

Şekil 3.15 Ankastre temelli yapı için deprem yüklemesi sonucu oluşan kolon kesme kuvvetleri

1,27 t	0,02 t		0,02 t	1,43 t
-1,43 t	-0,02 t		-0,02 t	-1,27 t
2,01 t	0,14 t		0,16 t	2,26 t
-2,26 t	-0,16 t		-0,14 t	-2,01 t
1,13 t	0,09 t		0,10 t	1,27 t
-1,27 t	-0,10 t		-0,09 t	-1,13 t
2,02 t	0,03 t		0,03 t	2,27 t
-2,27 t	-0,03 t		-0,03 t	-2,02 t
1,95 t	0,04 t		0,03 t	2,19 t
-2,19 t	-0,03 t		-0,04 t	-1,95 t
1,75 t	0,09 t		0,08 t	1,99 t
-1,99 t	-0,08 t		-0,09 t	-1,75 t
1,42 t	0,12 t		0,11 t	1,61 t
-1,61 t	-0,11 t		-0,12 t	-1,42 t
0,86 t	0,11 t		0,10 t	0,97 t
-0,97 t	-0,10 t		-0,11 t	-0,86 t

Şekil 3.16 Ankastre temelli yapı için deprem yüklemesi sonucu oluşan kiriş kesme kuvvetleri

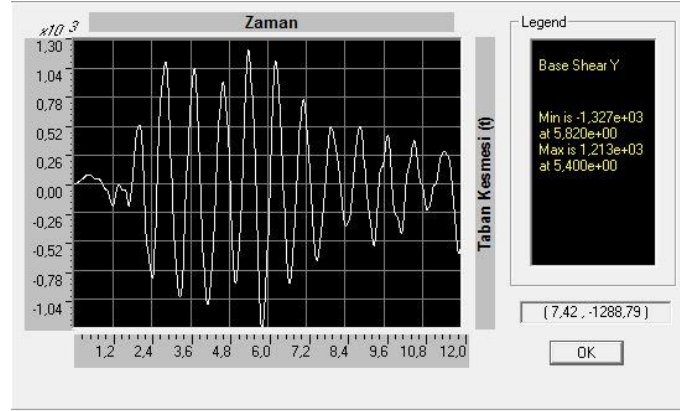


Şekil 3.17 Ankastre temelli yapı için deprem yüklemesi sonucu oluşan kolon eğilme momentleri



Şekil 3.18 Ankastre temelli yapı için deprem yüklemesi sonucu oluşan kiriş eğilme momentleri

Ankastre temelli yapıda oluşan taban kesmesi Şekil 3.19’da sunulmuştur.



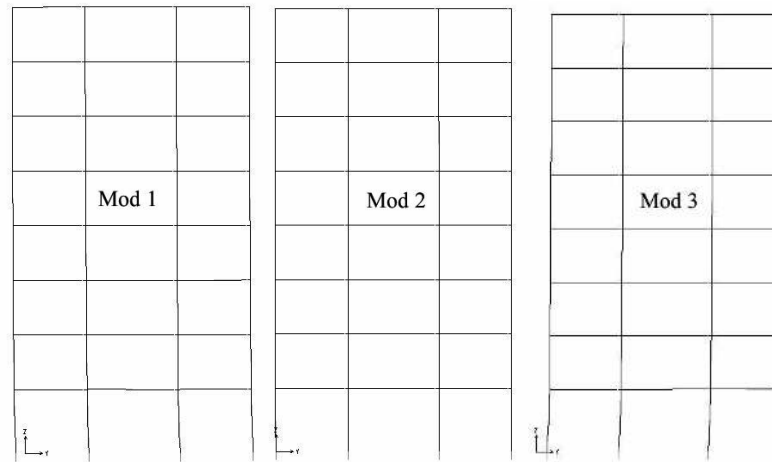
Şekil 3.19 Ankastre temelli yapıda oluşan taban kesmesi

3.8.2 Sismik İzolasyonlu Sistemin Dinamik Analiz Sonuçları

Sap2000 bilgisayar programı kullanılarak zaman tanım alanında ve El Centro depremi ivme kayıtları ile ankastre mesnetli yapı modeli için dinamik analizler yapılmıştır.

3.8.2.1 Modlara Göre Titreşim Periyotları

Şekil 3.20’de Sismik izolasyonlu yapıya ait mod şekilleri ve Tablo 3.6’de yapının modlarına ait periyotları görülmektedir.

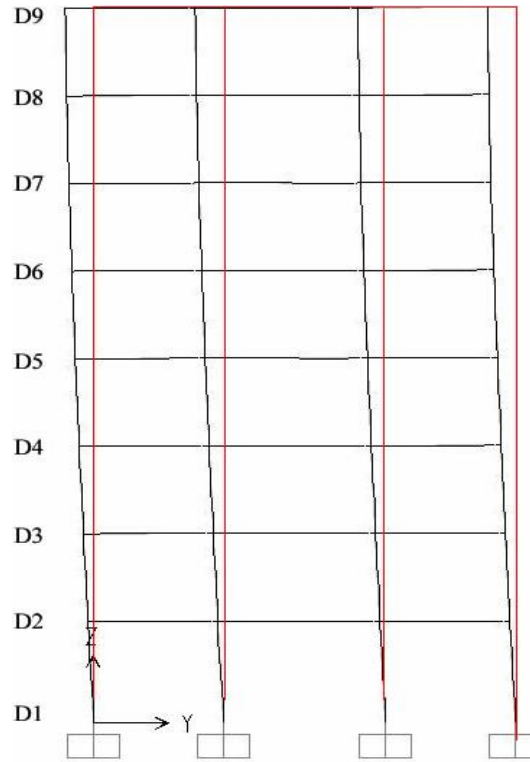


Şekil 3.20 Sismik izolasyonlu yapının mod şekilleri

Tablo 3.6 Sismik izolasyonlu yapıda El Centro depremi ivme kayıtları elde edilen modlara göre titreşim periyotları

Modlar	Sismik İzolasyonlu Yapı Periyodu (sn)
1 (Y ekseninde)	2,25
2 (X ekseninde)	2,23
3 (Z ekseninde)	1,92
4 (Y ekseninde)	0,40
5 (X ekseninde)	0,38
6 (Z ekseninde)	0,33

Sismik izolasyonlu yapıda tasarım periyoduna yakın bir değere ulaşarak analiz tamamlanmıştır. Ulaşılan bu değer yapı tasarımı için oldukça büyük önem taşımaktadır. Yapılan analiz sonucunda ankastre temelli yapının 1. modunun Y-Y doğrultusunda yatay yönde yapmış olduğu deformasyonlar Şekil 3.21 de görülmektedir. Her kata denk gelen düğüm noktalarındaki deplasmanlar Tablo 3.7’de sunulmuştur

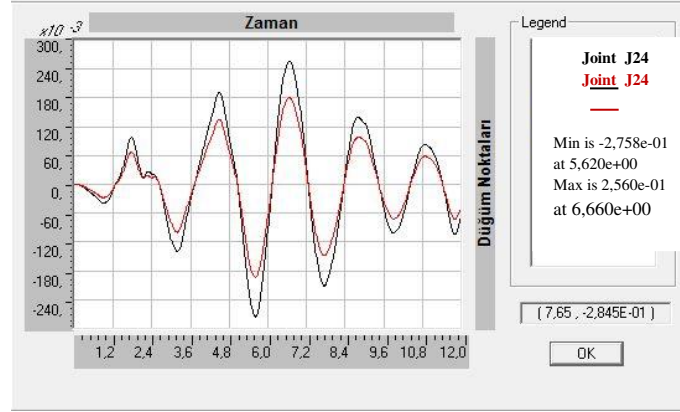


Şekil 3.21 İzolasyonlu yapının Y-Y ekseninde deprem sonucu oluşan yatay yer değiştirmeler.

Tablo 3.7 Sismik izolasyonlu yapının Y-Y ekseninde deprem yüklemesi sonucu oluşan görelî yatay yer değiştirmeler.

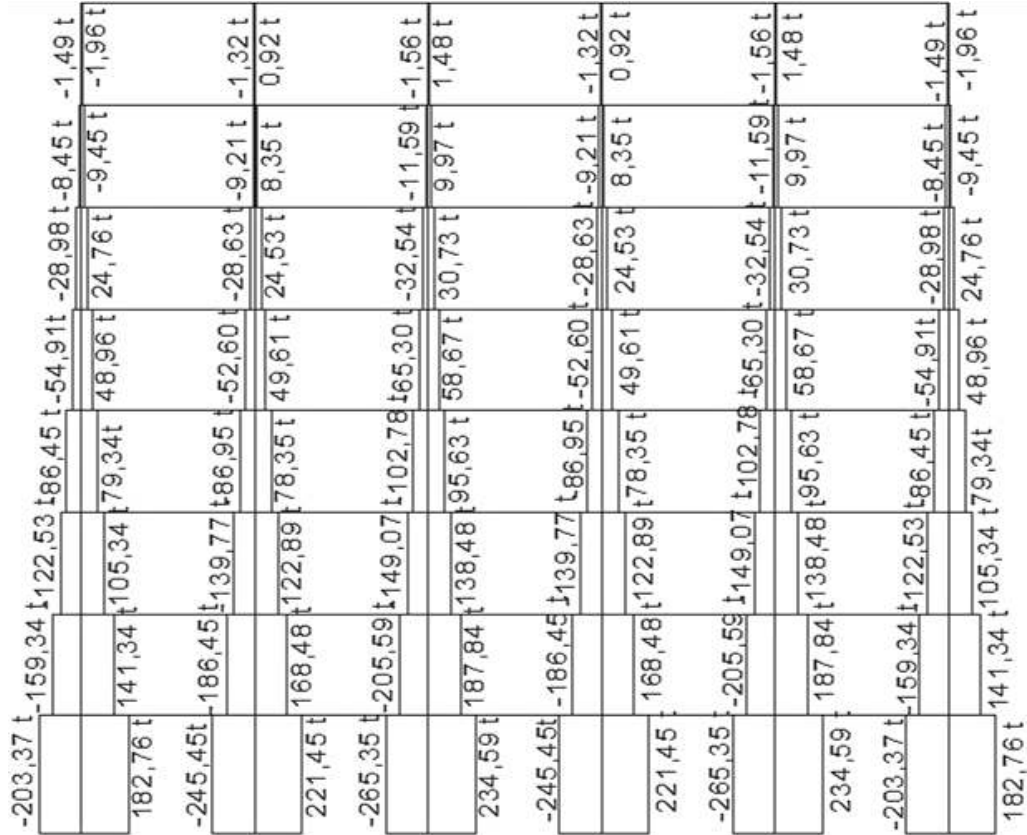
Y-Y Eksenî		
Düğün Noktası	Deplasman (m)	Görelî Deplasmanlar (m)
D1	0,1934	0,0387
D2	0,2321	
D3	0,2419	0,0098
		0,0081
D4	0,2500	0,0072
D5	0,2572	0,0063
D6	0,2635	0,0053
D7	0,2688	0,0041
D8	0,2729	0,0029
D9	0,2758	

Yapının sismik izolatör seviyesi (D1) ve en üst kat (D9) düğüm noktalarının yatay yer değiştirmeleri Şekil 3.22’de aynı grafikte üzerinde gösterilmiştir. D1 düğüm noktası (kırmızı renkte gösterilen) ile D9 düğüm noktasının (Siyah renkte gösterilen) zamana göre benzer deplasman değerlerine sahip olduğu ve -0,2560 ile 0,2758 m arasında deplasman yaptığı görölmektedir.



Şekil 3.22 Sismik izolasyonlu yapıda D1 ile D9 düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin aynı grafikte gösterimi

Sismik izolasyonlu yapı için El Centro deprem yüklemesi sonucu oluşan eksenel kuvvetler Şekil 3.23’de, kolon kesme kuvvetleri Şekil 3.24’te, kiriş kesme kuvvetleri Şekil 3.25’de, kolon eğilme momentleri Şekil 3.26’da, kiriş eğilme momentleri Şekil 3.27’de sunulmuştur.



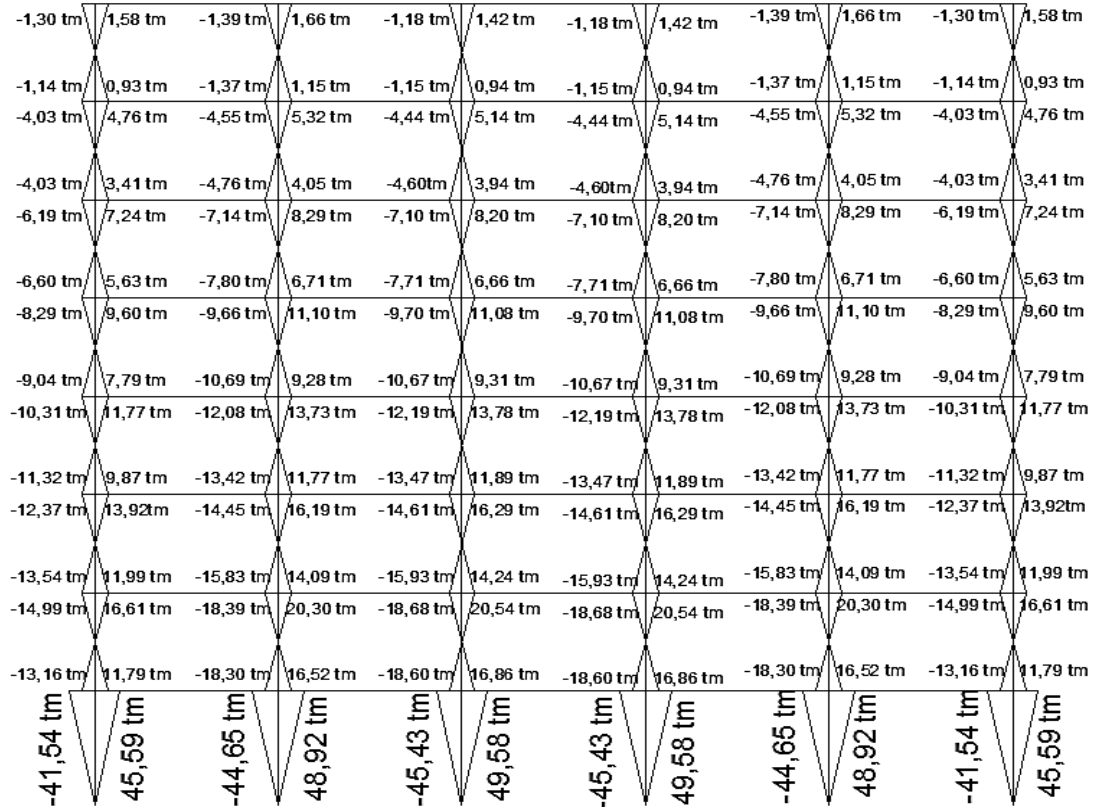
Şekil 3.23 Sismik izolasyonlu yapıda deprem yüklemesi sonucu oluşan normal kuvvetler

13,02 t	9,15 t	9,16 t	7,70 t	6,21 t	4,61 t	2,93 t	0,90 t
13,97 t	12,87 t	10,67 t	9,05 t	7,26 t	5,36 t	3,36 t	1,01 t
14,16 t	13,05 t	10,74 t	9,08 t	7,25 t	5,30 t	3,26 t	0,85 t
14,16 t	13,05 t	10,74 t	9,08 t	7,25 t	5,30 t	3,26 t	0,85 t
13,97 t	12,87 t	10,67 t	9,05 t	7,26 t	5,36 t	3,36 t	1,01 t
13,02 t	9,15 t	9,16 t	7,70 t	6,21 t	4,61 t	2,93 t	0,90 t

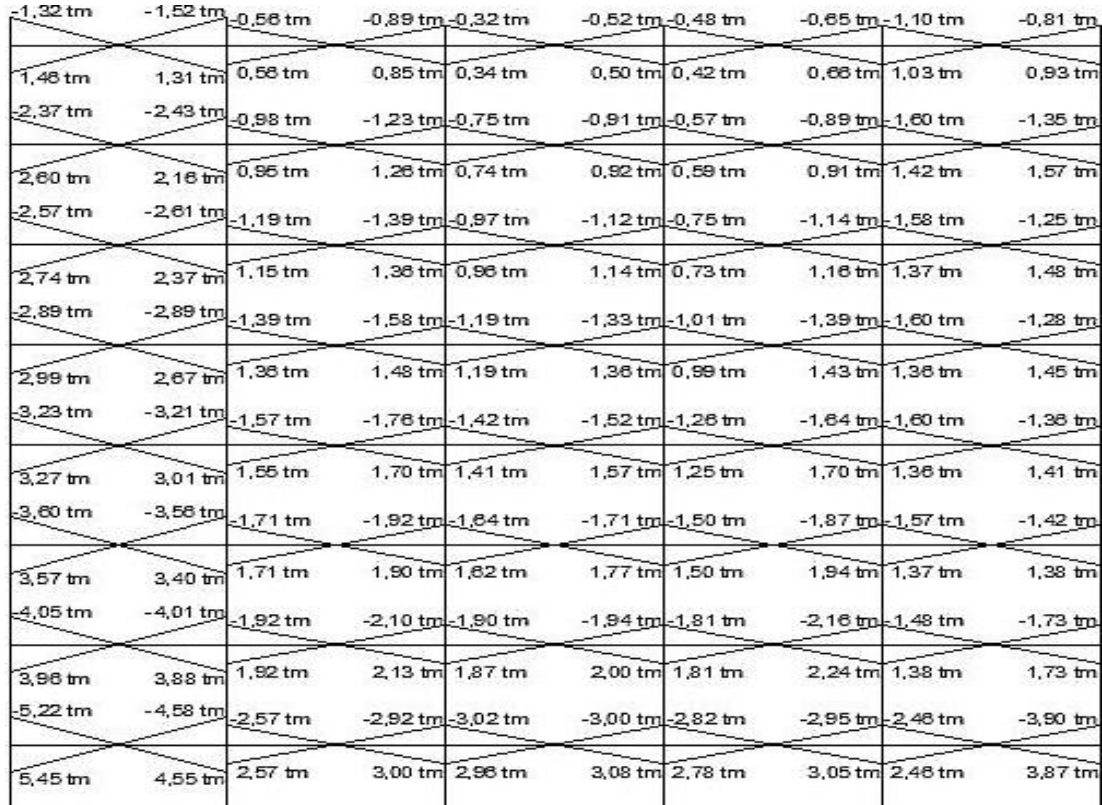
Şekil 3.24 Sismik izolasyonlu yapıda deprem yüklemesi sonucu oluşan kolon kesme kuvvetleri

0,96 t	0,32 t	0,21 t	0,22 t	0,59 t
-0,85 t	-0,31 t	-0,21 t	-0,22 t	-0,66 t
1,62 t	0,59 t	0,45 t	0,38 t	0,89 t
-1,46 t	-0,55 t	-0,46 t	-0,39 t	-1,02 t
1,72 t	0,69 t	0,57 t	0,52 t	0,84 t
-1,59 t	-0,67 t	-0,58 t	-0,52 t	-0,99 t
1,90 t	0,79 t	0,69 t	0,66 t	0,83 t
-1,79 t	-0,80 t	-0,71 t	-0,66 t	-0,98 t
2,09 t	0,89 t	0,81 t	0,80 t	0,86 t
-2,01 t	-0,91 t	-0,83 t	-0,81 t	-0,97 t
2,30 t	0,97 t	0,92 t	0,94 t	0,89 t
-2,25 t	-1,00 t	-0,95 t	-0,96 t	-0,94 t
2,57 t	1,10 t	1,06 t	1,10 t	0,91 t
-2,55 t	-1,12 t	-1,08 t	-1,13 t	-0,88 t
3,23 t	1,52 t	1,66 t	1,59 t	2,05 t
-3,07 t	-1,53 t	-1,69 t	-1,63 t	-2,04 t

Şekil 3.25 Sismik izolasyonlu yapıda deprem yüklemesi sonucu oluşan kiriş kesme kuvvetleri

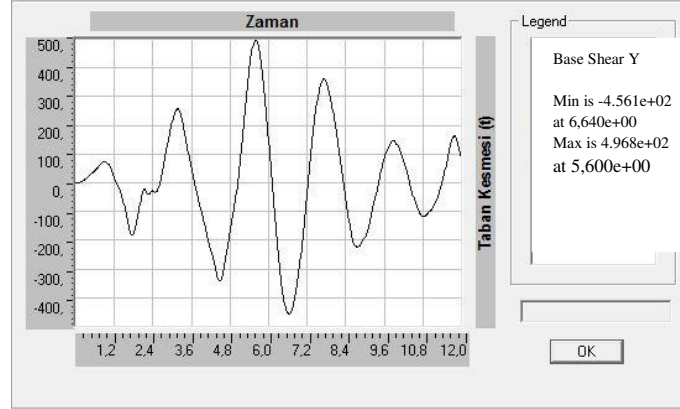


Şekil 3.26 Sismik izolasyonlu yapıda deprem yüklemesi sonucu oluşan kolon eğilme momentleri



Şekil 3.27 Sismik izolasyonlu yapıda deprem yüklemesi sonucu oluşan kiriş eğilme momentleri

Sismik izolasyonlu yapıda oluşan taban kesmesi Şekil 3.28’de grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.28 Sismik izolasyonlu yapıda El Centro deprem yüklemesi sonucu oluşan taban kesmesi

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Sismik izolasyon sistemleri ile üç boyutlu modellenen yapının, zaman tanım alanına göre dinamik analizleri yapılmıştır. Elde edilen yapı periyotları, taban kesme kuvvetleri, kat ivmeleri, görelî kat ötelemeleri ve kolon eğilme momentleri karşılaştırılarak değerlendirilecektir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Doğal Titreşim Periyotları karşılaştırılması; Tablo 3.8’de görüldüğü gibi izolasyonlu yapının periyodu ankastreli duruma göre yaklaşık üç kat daha büyüktür. Dolayısıyla izolasyon yapıyı baskın periyot aralığından uzaklaştırarak deprem ivmelerinin etkisini azaltmaktadır.

Tablo 3.8 Doğal Titreşim Periyotları karşılaştırılması

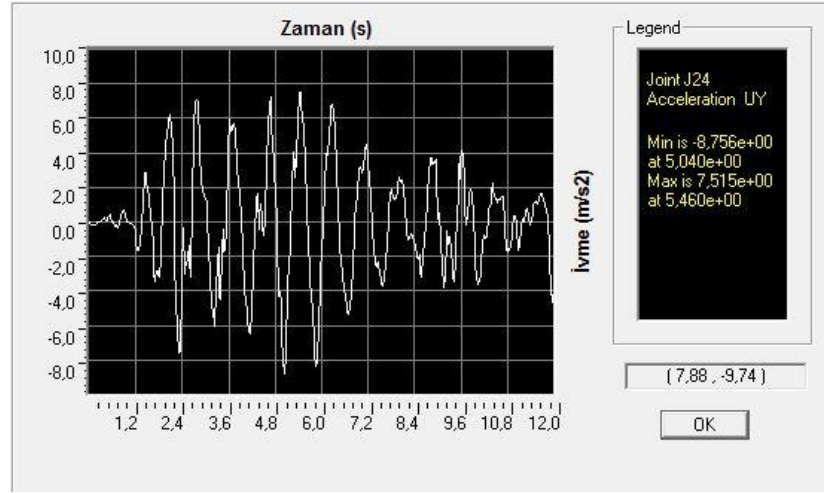
	Ankastre Mesnetli Yapı (s)	Kauçuk izolatörlü Yapı (s)
1. Mod (Y yönünde)	0,80	2,25
2. Mod (X yönünde)	0,81	2,23
3. Mod (Z yönünde)	0,73	1,92

Tablo 3.9’da sunulan izolasyonlu ve ankastre mesnetli yapının ivme değerlerinin karşılaştırılmasında görüldüğü gibi ankastre mesnetli yapının tepe noktasında ivme değeri 8,76 m/sn² iken izolasyonlu yapıda bu değer yaklaşık 3,95 m/sn² civarındadır. Özellikle yapı içindeki mekanik ve elektrik donanımlar ve özel cihazlar, izolatörün sağladığı bu özellik sayesinde depremi minimum hasarla atlattır.

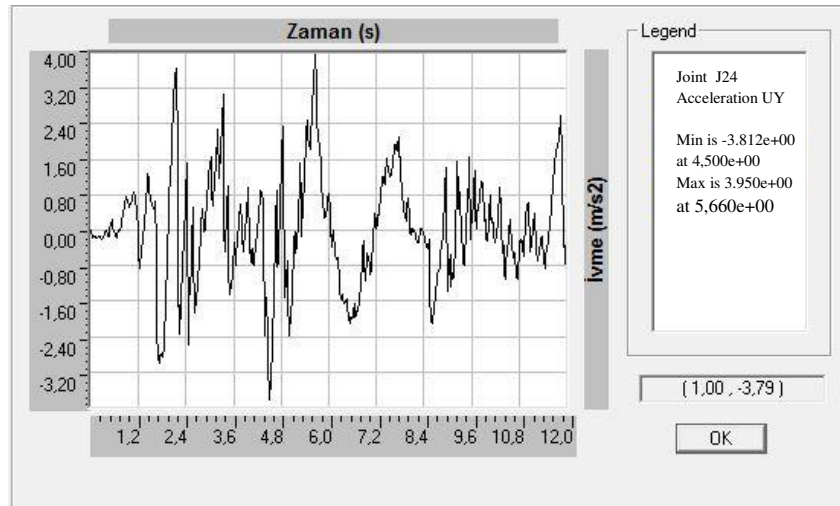
Tablo 3.9 İzolasyonlu ve ankastre mesnetli yapının ivme değerlerinin karşılaştırılması

	Ankastre Mesnetli Yapı (m/s ²)	Kauçuk İzolatörlü Yapı (m/s ²)
8. kat	8,76	3,95
5. kat	6,34	3,73
3. kat	4,57	3,42
1. kat	3,12	2,82

Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da ise görülen izolasyonlu ve ankastre mesnetli yapının çatı katı ivme değerlerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 3.29 Ankastre temelli yapının çatı katındaki ivme değerleri



Şekil 3.30 Sismik İzolasyon yapının çatı katındaki ivme değerleri

Sismik yalıtım ve çatı katı düzeyleri arasındaki görelî ötelenmeler çok önemlidir ve bu ötelenmelerin büyüklüğü, kolon ve kiriş gibi taşıyıcı elemanlarda oluşan iç kuvvet büyüklüğünü doğrudan etkilemektedir. Yalıtımlı modellerde oluşan bu ötelenmelerin çok büyük bir kısmı taban düzeyinde gerçekleşmiştir. Göz önüne alınan yapı taşıyıcı sistemin yapmış olduğu deplasmanlar incelendiğinde izolasyon katının da diğer katlarla birlikte hareket ettiği ve bu durumun görelî kat ötelenmelerini en aza indirdiği açıktır. Tablo 3.10’da, göz önüne alınan sistemde

katlar arası yer değiştirmelerin de, izolasyon kullanılmayan yapı taşıyıcı sistemine kıyasla minimum seviyede olduğu görülmektedir.

Tablo 3.10 İzolasyonlu ve ankastre mesnetli yapının görel kat ötelenmelerinin karşılaştırılması

	Ankastre mesnetli yapı	Sismik izolasyonlu yapı
Düğüm Noktası	Deplasman (m)	Deplasman (m)
D1 – D2	0,0265	0,0387
D2 – D3	0,0217	0,0098
D3 – D4	0,0204	0,0081
D4 – D5	0,0190	0,0072
D5 – D6	0,0169	0,0063
D6 – D7	0,0135	0,0053
D7 – D8	0,0114	0,0041
D8 – D9	0,0070	0,0029

Analizi yapılan yapıların belirli kolonları örnek olarak seçilerek kesit tesirleri karşılaştırılması yapılmıştır. Normal kuvvet değerlerinin olduğu Tablo 3.11’de görüldüğü gibi deprem yüklemesi altında normal kuvvetlerde kayda değer bir azalma görülmemektedir.

Tablo 3.11 İzolasyonlu ve ankastre mesnetli yapının normal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

Eksenel Kuvvetler		
Kolon	Ankastre Mesnetli Yapı (t)	İzolatörlü Yapı (t)
1	217,42	203,37
2	265,83	245,45
3	278,77	265,35

Tablo 3.12’de görüldüğü gibi kesme kuvveti değerleri ise belirgin bir azalma söz konusudur.

Tablo 3.12 İzolasyonlu ve ankastre mesnetli yapının Kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması

Kesme Kuvvetleri		
Kolon	Ankastre Mesnetli Yapı (t)	İzolotörlü Yapı (t)
1	38,71	14,16
2	33,73	10,74
3	24,95	7,25
4	13,17	3,26

Tablo 3.13’de eğilme momenti değerlerinin de yaklaşık %50 azaldığı görülmektedir.

Tablo 3.13 İzolasyonlu ve ankastre mesnetli yapının Eğilme Moment değerlerinin karşılaştırılması

Eğilme Momentleri		
Kolon	Ankastre Mesnetli Yapı (tm)	İzolotörlü Yapı (tm)
1	72,73	49,58
2	50,64	16,29
3	37,03	11,08
4	8,90	5,14

Yapılan analizler ve bulgular sonucunda, sismik izolasyon kullanarak yapının periyodunda artışlar gözlenmiştir birinci doğal titreşim periyotlarına bakıldığında taban izolasyonlu sistem periyotlarının ankastre mesnetli sistem periyot değerlerinin 3 katı büyük olduğu görülmektedir bu da taban izolasyonlu yapı tasarımının ankastre mesnetli yapı tasarımına oranla 3 kat daha fazla sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu yapı modelinin deplasman değerlerine bakıldığında, sismik izolasyonlu yapının deplasman değerlerinin ankastre mesnetli yapıya oranla daha büyük olduğu görülmüştür. Burada önemli olan çatı kat ile temel seviyesindeki görel kat ötelenmeleri olup, sismik izolasyon kullanılan bir yapının görel kat ötelenmesi ankastre mesnetli yapıya oranla çok daha küçük değerlerinin olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, izolatör kullanılan yapının, ankastre temelli

duruma göre en üst kat deplasmanı yaklaşık iki kat fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, görelî kat ötelenmeleri karşılaştırıldığında, izolatörlü yapının görelî kat ötelenmesinin ankastre mesnetli yapıya göre daha az olduğu görülmüştür.

Dinamik analizi yapılan yapıda sismik izolatör kullanılması sonucu kesit tesir değerlerinde, yaklaşık %50 oranında azalma olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Taban kesme kuvveti değeri sismik izolasyonlu yapılarda ankastre mesnetli yapı modeline göre %58 oranında azalmıştır.

Ankastre mesnetli yapıda, yer hareketinden dolayı oluşan ve yapıya aktarılan ivmeler, temel katından üst katlara doğru belirgin şekilde artmaktadır. Sismik izolasyonlu yapı modelinde ise bu ivmeler üst katlara doğru önemli bir artış göstermemektedir. Bina içerisinde oluşan maksimum ivme değeri ankastre mesnetli yapı modeline göre %45 oranında azalmıştır.

Özet olarak bu çalışmada depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan çeşitli sismik izolasyon yöntemleri incelenerek, dünyada ve ülkemizde kullanım örnekleri verilmiştir. Binaların tabanlarına yatay yöndeki rijitlikleri oldukça düşük sismik izolatörler yerleştirip üst yapı ile zemini birbirinden ayırarak yapının aynı özelliklere sahip ankastre mesnetli durumu için El Centro (1940) deprem ivmesi kaydı ile dinamik özelliklerinin değişimi gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Aiken, I. D., Kelly, J. M., Clark, P. W., Tamura, K., Kikuchi, M. ve Itah, T. (1992). *Experimental studies of the mechanical characteristics of three types of seismic isolation bearings*. Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid.
- Aydın, A. (2005). *Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik izolasyon ve Enerji Sönümleyici Sistemler*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ateş, Ş. (1999). *Vizkoelastik Taban İzolasyonlu Binaların Lineer Olmayan Dinamik Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Baştuğ, B. K. (2004). *Yapı Sistemlerinde Depreme Karşı Sismik İzolatör Kullanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayülke, N. (1998). *Depreme Dayanıklı Betonarme ve Yığma Yapı Tasarımı*. TMMOB İzmir İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N. (2004) *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*. Üçüncü Baskı İstanbul.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N. (1996). *Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş*. Üçüncü Baskı.
- Chopra, A. K. (1995) *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.

- Cimilli, S. ve Tezcan, S. (2002). *Seismic Base Isolation*. Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı, İstanbul.
- Constantinaou, C. M., Soong, T. T., ve Dargush, G. F. (1994). *Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit Multidisciplinary*. Centre for Earthquake Engineering Research,
- Constantinou, C. M. (2004). *Friction Pendulum Double Concave Bearing*. Technical Report, University at Buffalo State University New York.
- Doğan, Ö. (2007). *Sismik Taban İzolasyon Sistemleri ve Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Elma, M. (2006). *Sismik Taban İzolasyonlu Yapılarda Üst Yapı Rijitliğinin Yapının Sismik Davranışına Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Furukawa, T., Ito, M., Izawa, K. ve Noori, M. N. (2005). System Identification of Base-Isolated Building Using Seismic Response Data. *Journal of Engineering Mechanics*.
- Griffith, M. C., Kelly, J. M. ve Aiken, I. D. (1988). *A Displacement Control And Up Lift Restraint Device For Base Isolated Structures*. Proceedings Ninth World Conference On Earthquake Engineering, Tokyo ve Kyoto.
- Kelly, J. M. (1991). *Dynamic and Failure Characteristics of Bridgestone isolation Bearings*. Report No. UCB/EERC – 91/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley.
- Komodromos, P. (2000). *Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures, Advances in Earthquake Engineering*. WIT Press, Southampton, Boston.

- Kösedag, B. (2002). *Yapılarda Sismik İzolasyon*, Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kikuchi, M. ve Aiken I. D. (1997). *An Analytical Hysteresis Model For Elastomeric Seismic Isolation Bearings*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.26, no.2.
- Kürklü, G. ve Ergün, A. (2009). *Sismik İzolatörlü Çelik-Betonarme Karma Yapı Sistemi Örneği*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü.
- M.E.B. Mesleki Eğitim Geliştirme Projesi (2006). *Deprem İzolatör Sistemleri*, İnşaat Teknolojisi, Ankara.
- Makris, N. ve Chang, S. (2000) Effect Of Viscous, Viscoplastic And Friction Damping On The Response Of Seismic Isolated Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, No. 1, pp. 85-107.
- Mirkeham, Z. A. (2006). *Katları Arasında Yalıtım Elemanları Kullanılan Çok Katlı Binalarda Taban Yalıtımı Etkinliğinin Araştırılması*. Doktora Tezi, S.D.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mostaghel, N. (1983). Response of Sliding Structures to Earthquake Support Motion. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, No. 6, pp. 729-748, 1983.
- Mostaghel, N. ve Kelly, J. M. (1987). *Design Procedure For R-FBI Bearings*. Report No UCB/EERC-87/18. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

- Murat, E. (2008). *Binaların Tabanlarına Elastomer Mesnetler Yerleştirilerek Sismik Yalıtım Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Naeim, F. ve Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures*. (1th ed). John Wiley and Sons, New York.
- Özdaş, H. İ. (2008). *Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Pasif Sismik Kontrol Yöntemleri*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pınarbaşı, S. ve Akyüz U. (2005). Sismik İzolasyon ve Elastomerik Yastık Deneyleri. *İMO Teknik Dergi Yazı* 237, 3581–3598
- Pirrorta, A. ve Ibrahim, R. (1997). Experimental Investigation of Friction Base Isolation, *Journal of Engineering Mechanical Vol 12*, No 3, pp. 125–136
- Ryan, K. L. ve Chopra, A. K. (2001). *Estimating Bearing Response In Symmetric And Asymmetric-Plan Isolated Buildings With Rocking And Torsion*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35(8):1009-1036.
- Uz, M. (2007). *Taban Yalıtımlı Yapıların Dinamik Davranışı*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Youssef, N. (2001). Viscous Dampers At Multiple Levels For The Historical Preservation Of Los Angeles City Hall. *The Structural Design Of Tall Building. Volume 10*, Issue 5, pages 339–350, John Wiley & Sons, Ltd.
- Yücesoy, A. (2005). *Sismik İzolatörler İle Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zamarano, R. , Sarrazin M. ve Toro G. (1996). *Development ve Testing of Teflon Sliding Bearings*. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No 1334, Rome.

Zayas, V. A., Low, S. ve Mahin, S. A. (1985). *Feasibility And Performance Studies On Improving The Eartquake Resistance Of New and Existing Buildings Using the Friction Pendulum System*. Report No. UBC/EERC 89-09, University Of California, Berkeley.

Zhang, R. (2000). *Seismic Isolation and Supplemental Energy Dissipation*. Ed. Wai-Fah Chen ve Lian Duan, CRC Press.