



## **BİDGE Yayınları**

Dinamik Sönümleyicilerin Tasarımı ve Uygulama Alanları

**Editör:** Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

ISBN: XXXXXX

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2023

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

[www.bidgeyayinlari.com.tr](http://www.bidgeyayinlari.com.tr) - [bidgeyayinlari@gmail.com](mailto:bidgeyayinlari@gmail.com)

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /  
Ankara



## İÇİNDEKİLER

<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	3
Sismik Sönümleyici Sistemlere Hızlı Bir Bakış .....	5
Furkan Yurdakul KAYIKÇI.....	5
Ali GÜRBÜZ .....	5
Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatörlerde Kompozit Kauçuk Malzemelerin Kullanımı .....	48
Özlem ÇAVDAR .....	48
Zeynep YILDIZ.....	48
Ali KARIMZADEH NAGHSHINEH .....	48
Enerji Sönümlemesi Esasına Dayalı Güçlendirme Yöntemleri.....	68
Samet TOSUN .....	68

Katı Katalizörlerin Yüzey Özellikleri ve Katalitik Proseslerin Karakterizasyonu için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Kullanımı .....	85
Ceyda BİLGİÇ .....	85
Şafak BİLGİÇ .....	85

# BÖLÜM I

## Sismik Sönümleyici Sistemlere Hızlı Bir Bakış

**Furkan Yurdakul KAYIKÇI<sup>1</sup>**  
**Ali GÜRBÜZ<sup>2</sup>**

### Giriş

Yıkıcı etkilere sahip deprem afeti; engellenemese de öngörülebilir bir doğa olayıdır. Depremin yıkıcı etkilerini azaltabilmek için yapıların depreme karşı dayanıklı olarak tasarlanması, gerekli dayanıma sahip olmayanların ise depreme dayanıklı hale getirilmesi gerekir. Sıkça başvurulan sünek tasarım ilkelerinde yapıların plastik mafsallar yoluyla yani hasar alarak deprem enerjisini sönümlemesi beklenir. Ancak kamu binaları, hastane gibi deprem sonrasında hizmet verebilecek yapıların depremde ayakta kalması ve kesintisiz kullanım sunması gerekir. Bu

---

<sup>1</sup> RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ

<sup>2</sup> Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Rize. e-posta: ali.gurbuz@erdogan.edu.tr

noktada çeşitli sönümleme araçları kilit rol oynar (NAİMİ and WAHEB 2019). Bu sebepten dolayı ülkemizde T.C. Sağlık Bakanlığı 2013 yılında 1. ve 2. Deprem bölgelerinde en az 100 odalı hastanelerde sismik izolasyonu zorunlu kılmıştır (Ekinçi and IPEK 2023; Akyüz et al. 2017). Sağlık bakanlığının bu kararı ülkemizde sismik izolatörlerin yaygınlaşmasında önemli rol oynamış ve sismik izolasyon kullanımına ilişkin esaslar 2018 Türk Deprem Yönetmeliğinde de yer bulmuştur.

Yapıların maruz kaldığı deprem, rüzgâr ve çeşitli titreşimleri sönümlemek amacıyla kullanılan kontrol cihazlarının genel ismi sismik izolatör olarak anılmaktadır. Bu cihazlar, doğru kullanım ve doğru konumlandırılmaları halinde deprem enerjisini dağıtma özellikleri sayesinde yapıda meydana gelebilecek hasarların önüne geçebilmektedirler.

Bu bölümde yapılara gelen titreşimleri azaltmak ve yapısal güvenliği sağlamak için geliştirilmiş sönümleyici türlerine kısa ve hızlı bir bakış sunulmuştur. Bu kapsamda; bugüne kadar geliştirilmiş sönümleyici sistemler; pasif, aktif, yarı aktif ve karma olacak şekilde dörde grupta ele alınmıştır.

## **1.Pasif Kontrol Sistemleri**

Bu sistemler yapının hareketinden faydalanarak cihazın olduğu yerlerde kuvvetler geliştirir. Bu kuvvetler enerjinin bir kısmını emer. Böylece yapının enerji talebi azalır. Ayrıca pasif kontrol sistemleri herhangi bir eyleyiciye ihtiyaç duymaz. Düşük maliyetli ve hesaplanması kolay olduğu için en çok tercih edilen sistemdir. Ayarlı kütle sönümleyici, ayarlı sıvı sönümleyici, metalik akma sönümleyici, viskoz akışkan sönümleyici bu cihazlara örnektir (Soysal 2006; Shanmuga Priya et al. 2014; Lavasani and Doroudi 2020).

### **1.1.Taban İzolasyon Sistemleri**

Taban izolasyonlu yapılarda, depremden kaynaklanan enerji, yapı boyunca tabandan çatıya doğru ilerlemeden önce izolatörler

tarafından dağıtılır. Bu nedenle, yapısal olmayan elemanlar da dahil olmak üzere yapısal elemanlara uygulanan deprem sonucu oluşan yanal kuvvet, geleneksel inşaat sistemine kıyasla taban izolasyon sisteminde daha düşüktür. Taban izolasyonu, bir üst yapıyı alt yapısından ayırması gereken yapısal elemanlar olarak tanımlanır. Sönümleme de depreme dayanıklı tasarımda hayati bir rol oynar ve yanal kuvvete maruz kaldıklarında binanın tepkisini azaltır (Abraham et al. 2021; Bahekar and Manchalwar 2019).

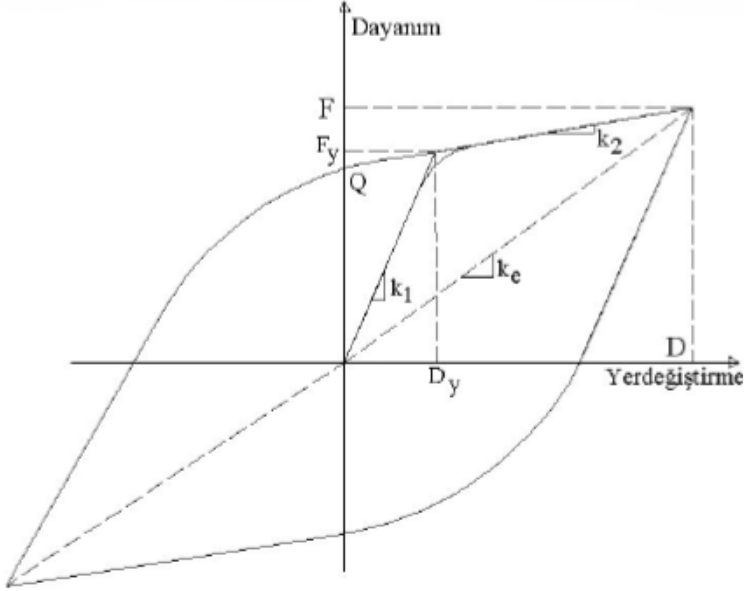
Depremden dolayı oluşan atalet kuvvetleri, yapının kütlesi ve yer ivmesi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle binanın sünekliliğini veya elastik mukavemetini artırmak geleneksel bir yöntemdir. Ancak taban izolasyonunda kapasiteyi artırmak yerine sismik talep azaltılır. Çok katlı binalar, nükleer reaktörler, köprüler ve sıvı depolama tankları gibi yapıların sismik taban izolasyonu, yapısal bütünlüğü korumak ve üst yapıdaki deprem kaynaklı kuvvetleri ve deformasyonları azaltarak bina sakinlerinin yaralanmasını ve içeriğin hasar görmesini önlemek için tasarlanmıştır. Bu bir tür pasif titreşim kontrolüdür (Bahekar and Manchalwar 2019).

Taban izolasyonu sert zeminlerde en iyi sonucu verirken gevşek zeminlerde performansı düşmektedir (Chaudhary, Devkota, and Singh 2019). Anwar ve diğerleri (2016) yılında yapmış oldukları çalışmada kireçtaşı, sert kil ve gevşek kum zeminler üzerine oturan 14 ve 18 katlı hem simetrik hem de asimetric taban izolasyonlu yapıların sismik performansını incelemişlerdir. Çalışmada taban izolasyonunun en çok sert zemin için uygun olduğunu hem orta sıkı hem de yumuşak zeminler için önemli olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca burulmayı kireçtaşı üzerinde %81, sert kil üzerinde %76 ve gevşek kum üzerinde %75 oranında azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

## **1.2.Kauçuk Mesnetler**

Kauçuk mesnetler destek olarak çelik takozlara bağlı doğal doğal kauçuk katmanlardan oluşur (Dezfuli and Alam 2013). Mekanik özelliklerini artıran çeşitli katkıları eklenmesiyle üretilirler. Kauçuğun yapısı, içine konulan malzemelerin farkı, üretildiği ortam

farklı gibi sebeplerden dolayı çeşitlere ayrılırlar. İzolatörün yanal rijitliğini kauçuğun rijitliği oluşturur. Deprem enerjisini ya içine eklenen kurşun çekirdek sönümler ya da yüksek sönümlü kauçuk mesnetler sönümler. Şekil 1’de kauçuk mesnetlere ait tipik bir histerisiz eğrisi görülmektedir.



Şekil 1. Kauçuk mesnetler için idealleştirilmiş (histerisiz) eğrisi  
(Arguc, Avsar, and Ozdemir 2017)

Kauçuk mesnetler genellikle yapının yanal sismik tepkisini yaklaşık %60 düşürebilen yatay izolasyon mesnetlerdir. Ancak düşey sismik etkisini azaltamayacağı gibi büyütmezler de. Bu kauçuk mesnetin yatay rijitliğinin binlerce katına eşdeğer düşey rijitliğe sahip olması gerçeğiyle açıklanabilir, ki bu da yaklaşık 0,1 s’lik daha küçük düşey temel periyot elde etmenin olası olduğu anlamına gelir ve düşey ivme spektrumunun can alıcı kısmında yer almasından sorumludur ve bu yüzden düşük izolasyon özelliğiyle sonuçlanır. Ancak yaşanan son büyük depremlerde yüksek deprenselliğe sahip bölgelerde oluşan güçlü düşey yer hareketlerinde, özellikle yakın fay alanlarında, yatay sismik davranış



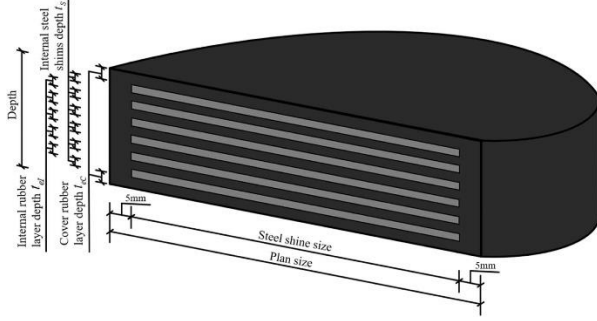
bileşenini bile aştığı görülmüştür. Yatay sismik davranış azaltıldıktan sonra yüksek tepe değerlere sahip düşey yer hareketinin özellikle hastane binaları ve sanayi tesisleri için yapısal yıkımın ana sebebi olacaktır. Zarar görür görmez bu binaların işlevi kalmayacaktır bu da toplumun psikolojisini mahvedecektir (Gu et al. 2021).

### **1.3.Tabakalı kauçuk mesnetler (LRB)**

Tabakalı kauçuk mesnetler basit üretim, uygun kurulumu, nispeten düşük ücret ve yüksek taşıma kapasitesi nedeniyle küçük ve orta açıklıklı karayolu köprülerinde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Üstyapıyı ve altyapıyı birbirine bağlayan ana yapısal eleman olarak, tabakalı kauçuk mesnetler iletim bileşeni olarak önceden tanımlanmış güvenilir yol boyunca üstyapının taşıdığı araç yükü, rüzgâr yükü, sıcaklık yükü, deprem yükü ve diğer yükler tarafında oluşan kuvvetleri ve deformasyonları altyapıya aktarır (He et al. 2023).

İç içe geçmiş çelik şimlere bağlı birkaç kauçuk tabakasından oluşur. Bu çelik şimlerin amacı mesnete düşey yük bindiğinde kauçuk katmanlarının büyük yanıl deplasman yapmasını önlemektir. Bu yüzden mesnetler büyük düşey rijitliğe sahiptir. Ayrıca bu sistemin en önemli özelliği sönümün ve rijitliğin paralel etkileri olmasıdır (Chang 2002; Uludağ 2005).

Tabakalı kauçuk mesnetler yakın fay hareketlerinden dolayı mesnet yer değiştirmeleri önemli olur ve bu da sistemin kararsız hale gelmesine neden olur (Jouneghani et al. 2023). Özyüçur ve Noroozinejad Farsangi (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada tabakalı kauçuk mesnet sisteminin belirli özelliklere sahip performansı, yakın fay hareketleri için uygun olmadığını bulmuştur. Şekil 2’de bir tabakalı kauçuk mesnet örneği görülmektedir.



Şekil 2. Tabakalı kauçuk mesnet örneği (He et al. 2023)

#### 1.4. Kurşun Kauçuk Mesnetler (LRB)

Yeni Zelandalı William Robinson tarafından icat edilmiştir. Dünya çapında en yaygın kullanılan sismik izolasyon sistemlerinden biri kurşun kauçuk mesnettir. Her biri, merkezinde yerleşmiş kurşun çekirdeğe sahiptir, üst üste bağlanmış kauçuk katmanlardan ve çelik plakalardan oluşur. Bu sistemde kauçuk düşük yanıl rijitlikten sorumluyken kurşun çekirdek artan enerji dağıtma kapasitesi sağlar. Çelik plakalar izolatörün düşey rijitliğini artırır. İzolatörün yanıl rijitliği ve dayanımı, sismik olarak izole edilmiş yapıların tasarımında iki temel parametredir (Yasar et al. 2023; Çerçevik 2019). Şekil 3’de tipik bir kurşun çekirdekli kauçuk örneği görülmektedir.



Şekil 3. Kurşun çekirdekli kauçuk örneği (Yasar et al. 2023)

### 1.5.Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet (LDRB)

Kauçuk tek seferde belirlenmiş sıcaklık ve basınç altında preslenerek üstte ve altta çelik levhaya bağlanır. Bu üst üste bindirilen levhalarla tabakanın şişmesi önlenir. Malzemenin kayma davranışı doğrusala yakındır. Sönüm oranı %2 ila %5 arasında değişir. Malzemede sünme görülmez. Uzun süreli elastisite modülü stabilitesi oldukça iyidir. Kolayca imal edilebilmeleri, kurulumun basit olması, ortamdaki fazla etkilenmemeleri, yüklemeye anında cevap vermesi bu izolatörlerin başlıca avantajlarıdır (Aldemir and Aydın 2005; Serino, Spizzuoco, and MR 2008). Ancak dezavantajları olarak sönüm oranının düşük olması, kayma modülünün 50 ila 200 psi arasında olması verilebilir (AHMADZAI 2022; Pianese, Milani, and Formisano 2022). Şekil 4’de tipik bir düşük sönümlü kauçuk mesnet örneği görülmektedir.



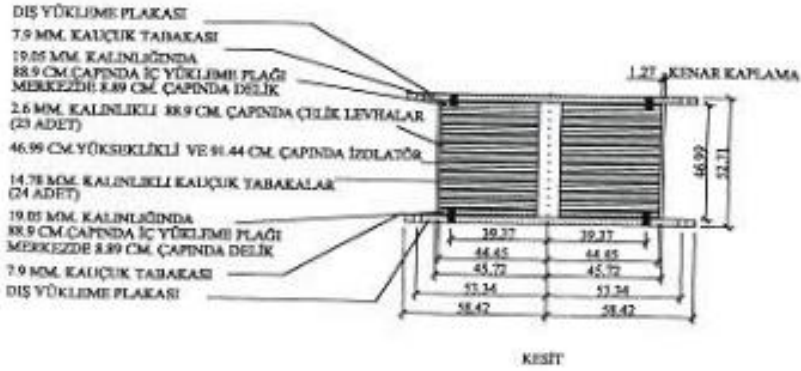
Şekil 4. Düşük sönümlü kauçuk mesnet örneği (Aldemir and Aydın 2005)

### 1.6.Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet (HDRB)

Sismik izolasyon cihazlarından biri olan yüksek sönümlü kauçuk mesnet, Japonya’daki 1995 Hyogo-ken-Nanbu depreminden sonra uygulamaya konulmuştur. Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler doğal kauçuğun ve siyah karbon dolgu malzemesinin birleştirilmesiyle yüksek sönüm performansına sahip olurlar. Bu

mesnetler ek sönüm veya cihaz olmadan mesnet ve sismik izolatör olarak davranabilmesi için tasarlanır. Ayrıca kurulumları basittir ve inşaat ve bakım maliyetleri düşüktür (Park et al. 2020).

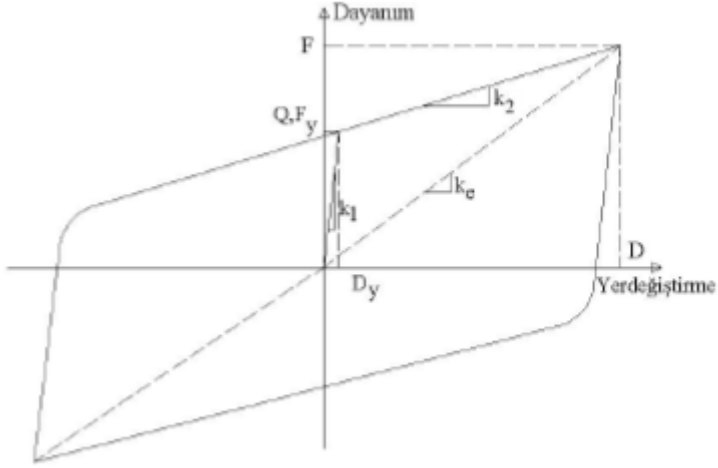
%10-%20 arasında eşdeğer viskoz sönüme sahiptirler. Yüksek başlangıç kayma modülüne sahiptir ve yaklaşık %400 gibi büyük kesme şekil değiştirmesi geçirebilir. Ancak sayısal modellemesi karmaşıktır ve büyük kesme deformasyonları altında doğrusal olmayan davranış gösterebilir (Aghaeidoost and Billah 2022; Yoshida, Abe, and Fujino 2004). Şekil 5’de yüksek sönümlü kauçuk mesnet örneği görülmektedir.



Şekil 5. Yüksek sönümlü kauçuk mesnet örneği (Hasmaden 2014)

### Sürtünlü Sarkaç Sistemler (FPS)

Sürtünlü sarkaç sistemler kaydırıcılar paslanmaz çelik ya da PTFE malzemeden oluşan içbükey bir küresel tava yüzey parçasında kayar bilyeden oluşurlar. Bu sistemler çelik malzeme arasındaki sürtünmeyle deprem enerjisini sönümler. İzolatörün rijitliği ve yapı periyodu sürtünen eğrisel yüzeydeki eğimlerle kontrol edilir (Yücesoy 2005; Sheikh, Van Engelen, and Rupaithna 2022). Sürtünlü sarkaç sistemler için tipik histerezis eğrisi Şekil 6’da gösterilmektedir.



Şekil 6. Sürtünmeli sarkaç sistemler için idealleştirilmiş (histerezis) eğrisi (Ayhan 2006)

Sürtünmeli sarkaç sistem ilk kez Victor A. Zayas tarafından sunulmuş, modellenmiş ve test edilmiştir, 1987’de bir raporunda yayınlamış ve daha sonra 1990 yılında bir araştırma makalesinde yayınlamıştır. Bundan sonra Mokha ve diğerleri (1991) yılında büyük moment dirençli ve destekli çerçevelerde sürtünmeli sarkaç sistemin deneysel bir araştırmasını sunmuştur. Mokha ve diğerleri bu çalışmada azalmış ölçekli modelde sürtünmeli sarkaç sisteminin kurulumunun deneysel bir araştırmasını sunmuştur. Bu çalışma sırasında en büyük sürtünme katsayısı 0,075 ve 0,095 olan iki farklı mesnet malzemesine kullanılmıştır ve yapı farklı frekans içeriklerine sahip çeşitli güçlü yer hareketine maruz bırakılmıştır. Deneysel sonuçlardan mesnet deplasmanının düşük olduğu görülmüştür ve kalkma olmamıştır, ve ayrıca serbest titreşiminin sonunda, kalıcı mesnet deplasmanı tasarım mesnet deplasmanının %6’sından daha az olduğu bulunmuştur (Chunwei Zhang and Ali 2021).

### 1.8.Saf Sürtünmeli Sistem (PF)

Saf sürtünmeli sistemler literatürde “sürtünmeli sarkaç sistemler” olarak da anılmaktadır. Bu sistemlerin en çekici gelen

özelliği çok çeşitli frekans girdileri için etkili olmasıdır. Diğer avantajı da en büyük sınırlayıcı sürtünme kuvvetine eşit olan maksimum ivmeyi iletebilmesidir. Bu sürtünmeli sarkaç sistemlerden birisi saf sürtünmeli sarkaç sistemdir (Shakib and Fuladgar 2003b).

En basit sürtünme tipi izolatördür. Bu izolatör tipinde kayıcılar temel ve üst yapının tabanında bulundurulur (Etedali, Hasankhoie, and Sohrabi 2020). Ancak eğer kütle merkezi saf sürtünmeli sistemli yapının rijitlik merkezi çakışmazsa, yanal depremler altında yapıda yanal ve burulma hareketleri görülecektir. Ayrıca, deprem sırasında yapı depremin düşey bileşenine de maruz kalacaktır, bu da saf sürtünmeli sistemli yapının hem yanal hem de burulma tepkilerini etkileyecektir (Shakib and Fuladgar 2003a). Şekil 7’de tipik bir saf sürtünmeli sistem örneği gösterilmiştir.



Şekil 7. Tipik bir saf sürtünmeli sistem örneği (Polycarpou 2009)

### 1.8.1. Bir Tarafı Eğri Yüzeyli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör

Bu sistemde kayıcı elamanın bulunduğu bir tarafı düzken diğer tarafı iç bükey çelik elamandan oluşur. Temel olarak bir muhafaza plakası, bir içbükey plaka ve bir kaydırıcıdan oluşur. Deprem sırasında kaydırıcı esas olarak dikey basınca, yapı tarafından iletilen yatay kuvvete, destek kuvvetine ve içbükey yüzeydeki sürtünmeye maruz kalır. İzolatörün elastik rijitliğini iç

bükey çelik elemanın eğrilik yarıçapı sağlar. Ancak izolatörün sönümünü teflon kaplamaları kayıcı birim ve paslanmaz çelik kayma yüzeyi arasında sürtünmenin sebep olduğu enerji kaybı sağlar. Şekil 8’de bir tarafı eğri yüzeyli sürtünmeli izolatör örneği gösterilmiştir (Chen and Jia 2021; Dicleli 2013).

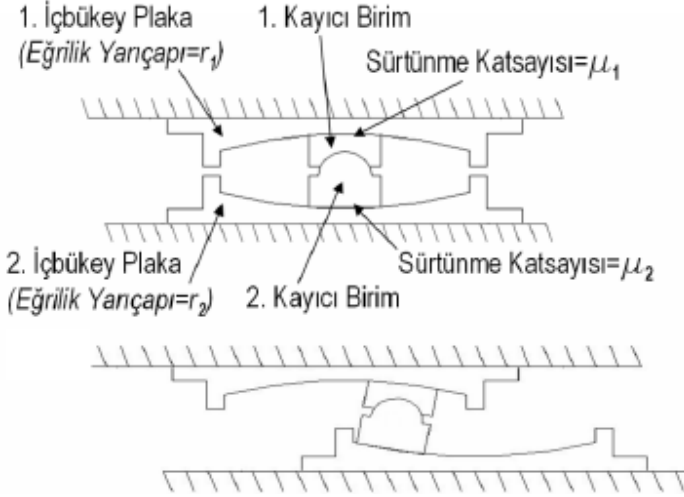


*Şekil 8. Bir tarafı eğri yüzeyli sürtünmeli izolatör örneği (Dicleli 2013)*

### **1.8.2.İki Tarafı Eğri Yüzeyli Sürtünmeli Sarkaç İzolatör**

İki tarafı eğri yüzeyli sistem dört ana elementten oluşur: içbükey plaka, kayıcı plaka, kayıcı birim ve kayma malzemesi. Kayıcı plaka paslanmaz çelikten yapılır ve içbükey plakalar denilen diğer çelik plakalara bağlanır. İçbükey küresel kayıcı plakalar kayıcının üstüne ve altına yerleştirilir ve küresel bir şekil haline getirilir. Kayıcı hem üst hem de alt yüzeylere yerleştirilmiş bir kayma malzemesine sahiptir ve bu kayma plakası olarak aynı küresel yarıçapa sahip olması için işlenmiştir. Kayma malzemesi politetrafloroetilen doku ve yapışkanlığı artırılmış yüksek dayanımlı fiberden oluşan iki dokudan oluşmuştur. Bu kombinasyon yüksek mesnet gerilmesi altında dengeli bir sürtünme kuvveti verir ve izolatöre 60 MPa referans mesnet dayanımına ulaşmasını sağlar ve

bu geleneksel mesnetin referans mesnet gerilmesinden yaklaşık üç kat daha yüksektir. Bu ayrıca iki tarafı eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatörün geleneksel mesnet kadar yoğun dış düzlem boyutlarına sahip olmasını sağlar (Imran, Siringoringo, and Michael 2021; Chunwei Zhang and Ali 2021). Şekil 9’da iki tarafı eğri yüzeyli bir sürtünmeli sarkaç sistem örneği gösterilmiştir.



Şekil 9. İki tarafı eğri yüzeyli sürtünmeli izolatörlerin basitleştirilmiş kesiti (TBDY 2018)

### 1.8.3.Üç Yüzeyle Sürtünmeli Sarkaç İzolatör

Bu mesnet dört içbükey yüzey ve üç bağımsız sarkaç sistemden oluşur. Farklı sürtünme katsayılarına sahip çoklu yüzeyleri uygulamak farklı tehlike seviyelerinde karmaşık sismik davranışa neden olur. Üç yüzeyle sürtünmeli sarkaç izolatörün deneysel doğrulamalı uygun bir döngüsel model dahil analitik davranışı Constantinou ve Fenz tarafından (2008)’de rapor edilmiştir (Loghman, Khoshnoudian, and Banazadeh 2013). Tipik bir üç yüzeyle sürtünmeli sarkaç izolatörün çalışma prensibi Şekil 10’da gösterilmiştir.

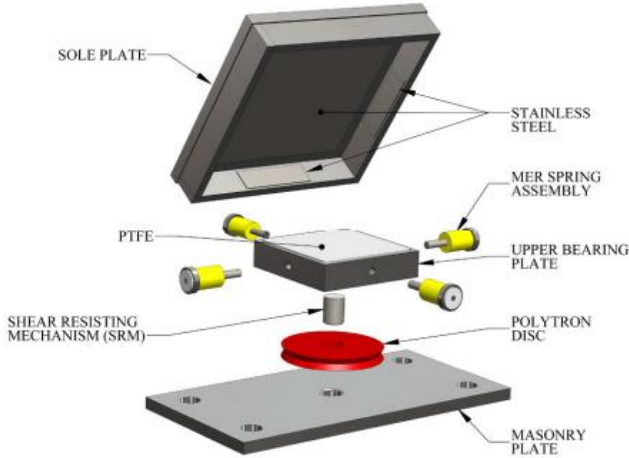




Şekil 10. Üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatörün çalışma prensibi (Dicleli 2013)

### 1.9.EradiQuake İzolatör

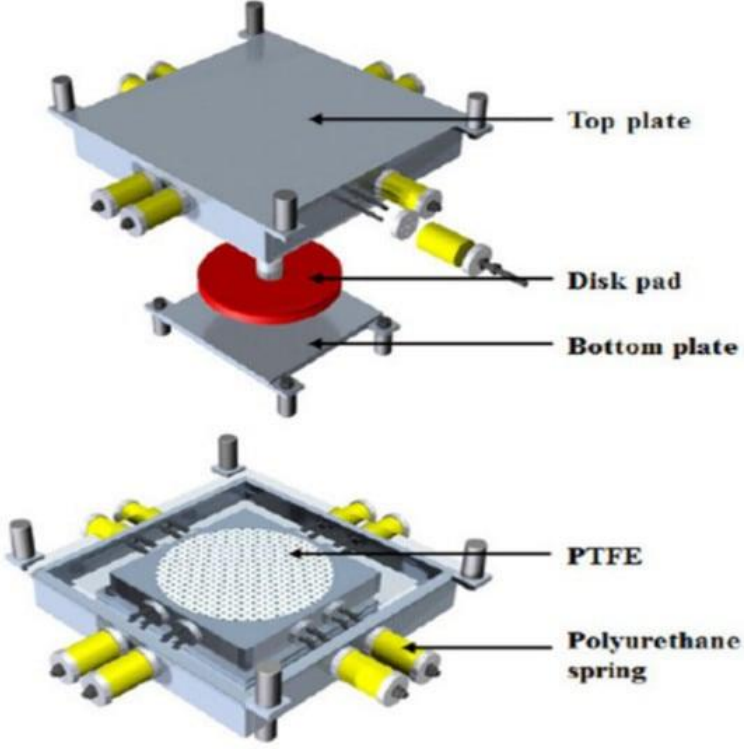
Bu sismik izolasyonun diğerlerine kıyasla tek avantajı izolatörün esnekliğinin sismik uyarımlar altında izolasyonlu yapıda arzu edilen performansa ulaşmak için farklı yönlerde değişebilmesidir. Kayıcı yüzey gereken deplasman kapasitesini sağlar ve sürtünmeyle girdi enerjisini dağıtır. Dönel kapasite poliüretan disk ile sağlanır ve merkezi mil üstyapıdan altyapıya uyarılmış yanal kuvvetleri aktarır (Fatemi and Conklin 2019). Şekil 11’de tipik bir EradiQuake izolatörünün bir örneği gösterilmiştir.



Şekil 11. Tipik çok yönlü EradiQuake sismik izolatörünün bileşenleri (Fatemi and Conklin 2019)

## 1.10.Esnek-Sürtünmeli Taban İzolasyon Sistemi (R-FBI)

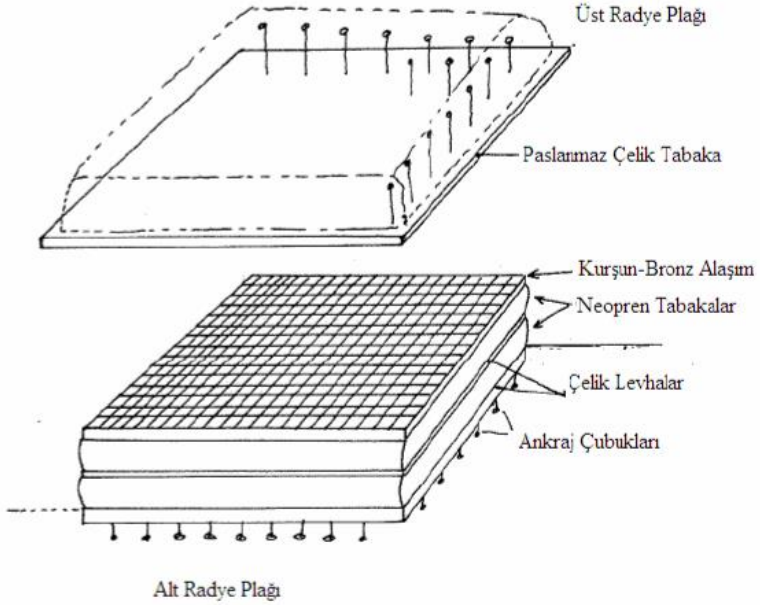
Monstaghel ve Khodaverdian'ın önerdiği bir sistemdir. Temel olarak sırasıyla köprünün üst yapısına ve alt yapısına sabitlenen üst ve alt plakalardan oluşur. Alt plakada, birincil sertliğe (Ku) sahip bir politetrafloroetilen sürtünme plakası sürtünme sönümlemesi yapar ve kayma esnek sürtünmesinin neden olduğu direnç kuvveti ile sismik enerjiyi dağıtır. Geri çağırıcı kuvvetleri üreten yanal poliüretan yaylar, yer değiştirme tepkilerini tamamladıktan sonra politetrafloroetilen plakayı ilk konumuna geri getirir. İki plaka arasında bulunan poliüretan disk ped, üst yapıdan gelen dikey yüke maruz kalan ve dönmeye izin veren yüksek mukavemetli sert kauçuk bir diskdir (Bang 2011). Önceki çalışmalardan sürtünme hızı arttıkça politetrafloroetilen plakanın yüzey sürtünme katsayısı artar. Ancak sürtünme hızı 150 m/s'nin üzerinde olduğunda atmosferik sıcaklıktan ve sürtünme plakasının üzerine uygulanan normal kuvvetin büyüklüğünden etkilenmez. Ayrıca, politetrafloroetilen katsayısı ile temas basıncı arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğu ve kayma hızı ile ortam sıcaklığının sürtünme katsayısının yoğunluğunu azalttığı ortaya çıkmıştır. Sistemin etkinliği deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır ve son yıllarda oldukça yaygın biçimde kullanılan bir sistem haline gelmiştir (Ürkmezyel 2023; Döker 2020; Gil et al. 2020). Şekil 12'de esnek-sürtünmeli taban-izolasyon sisteminin tipik bir örneği gösterilmektedir.



*Şekil 12. Esnek-sürtünmeli taban-izolasyon sisteminin tipik bir örneği (Gil et al. 2020)*

### **1.11.Fransız Elektrik Sistemi (EDF)**

Bir dizi nükleer elektrik santrallerini ve fabrika tesislerini korumak için Fransa’da ilk uygulaması 1970’lerde yapılmıştır. İşe yararlılığı 0,2g ivme için nitelendirilmiş güvenlik sınıfı ekipmanlı bir standart nükleer elektrik santralini geliştirdi. Sistem paslanmaz çelik, elastomerik mesnet üzerine kurulmuş olan kayıcı yüzey ile temas halinde kurşun-bronz alaşımli tabakalı neopren mesnetten oluşur. Kayma yüzeyinin sürtünme katsayısı izolatörün servis ömrü boyunca 0,2 olduğu kabul edilir (Failla 2021). Şekil 13’de tipik bir Fransız elektrik sistemi örneği gösterilmiştir.

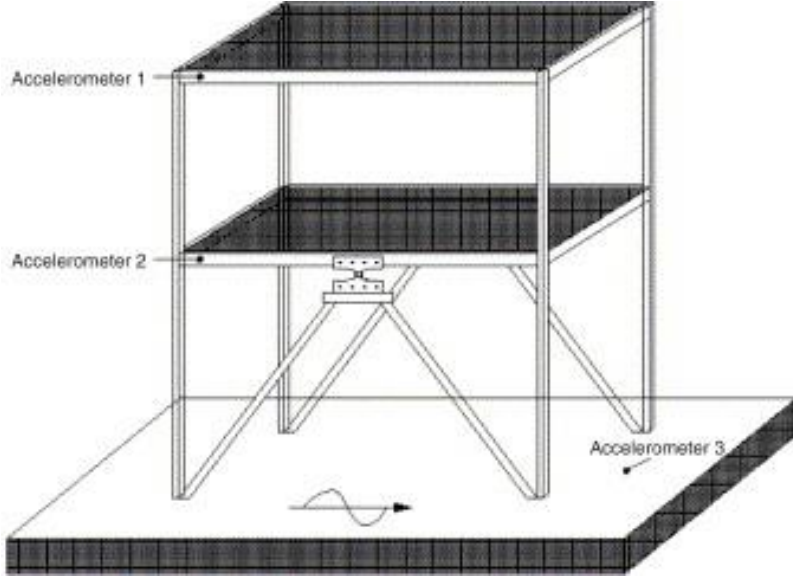


Şekil 13. Fransız elektrik sistemi detayı (Ürkmezyel 2023)

## 2.Pasif Enerji Sönümleyiciler

### 2.1.Metalik Sönümleyiciler

Kararlı histeretik davranışa sahip sönümleyicilerdir. Sıcaklıktan ve yükleme hızından etkilenmezler. Maliyet açısından diğer sönümleyici tiplerinden daha tercih edilebilir sistemdir (Yurteri and Düğenci 2022). Şekil 14’de tipik bir metalik sönümleyici yapının taslağı gösterilmiştir.



*Şekil 14. Metalik sönümleyicili yapıların taslağı (H.-N. Li and Li 2007)*

## **2.2.Visko-Elastik Sönümleyiciler**

Çoğunlukla titreşimden kaynaklanan etkileri azaltmada kullanılırlar. Daha çok yüksek katlı binalarda rüzgârın etkilerini düşürmede kullanılırlar. Karbon polimeri vb. malzemelerden oluşur. Visko-elastik çelik levhalar arasında yerleştirilir ve kayma deformasyonu ile enerjiyi sönümler. Visko-elastik malzeme şekil değiştirmeye maruz kaldığında hem elastik hem de viskoz davranış gösteren malzemedir (Kaliyaperumal 2022; Khajehsaeid et al. 2014).

Çelik yapılara uyumluluğu diğer tür yapılardan daha iyidir. Yapılan çalışmalara göre çelik yapılarda sönüm oranı daha fazla olmuştur. Fakat deplasman kapasitesi ve çevresel etkilere dayanıklılığı zayıftır. Bu yüzden sönümleyicide yırtılma oluşabilir (Şadan 2016; Lim and Matsumoto 2006; Eskandari Nasab and Kim 2022).

### **2.3.Akışkan Viskoz Sönümleyiciler (FVD)**

İlk kez askeriyede fırlatıcının yer değiştirmesini azaltmak amacıyla topların fırlatıcısına yerleştirilirdi. Daha sonra yavaş yavaş sivil hayatta kullanıma geçti ve çoğunlukla yapısal mühendislikte kullanıldı (Thomson 1965; W. Zhang, Zhang, Su, Zheng, et al. 2023). 1990'lardan itibaren Makris, Constantinou ve Lee vd. akışkan viskoz sönümleyiciyi geliştirip enerji dağıtma mekanizmasını, akışkan malzemelerini ve akışkan viskoz sönümleyicinin termodinamik özelliklerini incelemiştirler. Çalışmalarda su sonuçlara ulaşmışlardır: Viskoz akışkanın tamamen viskoz olduğu düşünüldüğünde, sönümleme kuvveti piston kolunun hızının bir gücüyle orantılıdır; piston geniş bir frekans aralığında hareket ederse, sönümleyicideki tüm akışkan visko-elastik özelliklere sahip olacaktır. Ancak piston küçük bir frekansta hareket ederse, sönümleme katsayısı piston hareket frekansından neredeyse bağımsızdır ve sönümleyici içindeki akışkan viskoz özelliklere sahip olacaktır (Lee and Taylor 2001; W. Zhang, Zhang, Su, Zheng, et al. 2023).

Bu sönümleyiciler birkaç farklı şekilde uygulanabilirler. İlki viskoz akışkanlar içi boş olan çelik duvara doldurulur ve ardından üst döşemeye bağlanarak akışkanın içine metal levha eklenir. Depremde levha akışkan içerisinde enerjiyi dağıtır. İkincisi, içi pistonlu silindirin içine viskoz akışkanlar doldurulur. Viskoz akışkan içerisinde pistonun hareket etmesiyle oluşan mekanik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek titreşim enerjisini sönümler. Üçüncüsü, viskoz akışkanlar çelik kafes gibi belirli bazı kanalların içerisinden geçirilerek enerjiyi sönümler (Arvind and Santhi 2022; Cheng Zhang, Zhang, Su, Chen, et al. 2023).

Akışkan viskoz sönümleyicilerin yağ sızıntısı, sınırlı servis ömrü, viskoz özelliğinin yüksek sıcaklığa duyarlı olması, kurulum ve bakım zorluğu gibi bazı kusurları mevcuttur (Liu et al. 2020).

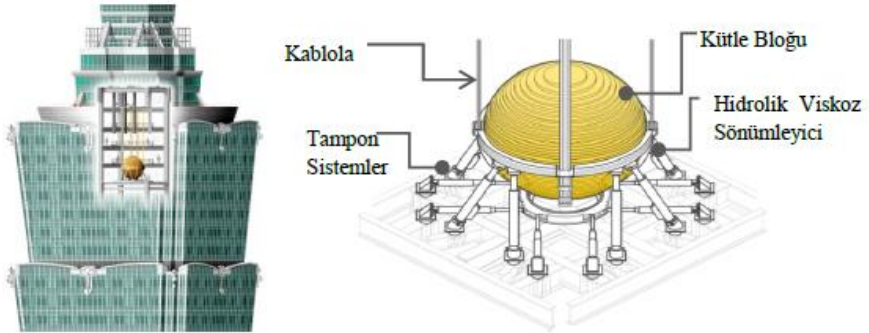
### **2.4.Ayarlı Kütle Sönümleyici (TMD)**

Ayarlı kütle sönümleyiciler en eski sönümleyicidir. Bir kütle, bir yay ve bir sönümleyiciden oluşur, deprem ve rüzgârdan dolayı

oluşan binaların tepkilerini kontrol etmek amacıyla binaların en üst katlarına eklenir. Pasif, aktif, karma ve yarı aktif olacak şekilde dörde ayrılırlar. Pasif ayarlı kütle sönümleyiciler, enerji kaynağına ihtiyaç duymadan titreşimi azaltabildikleri için kullanımı diğerlerinden daha yaygın yaygındır (NAİMİ and WAHEB 2019).

Bu sistemi ilk kez Frahm ortaya atmıştır (Frahm 1909). Ancak onun tasarladığı sistemde sönümleyici bulunmamaktadır. Bu sebepten sönümleyicinin frekansı ile yükün frekansı yaklaşık eşit olursa etkili olur (Kahya and Onur 2020).

Ayarlı kütle sönümleyiciler ya da yapının doğal frekansında oluşabilecek hatalarda ayarlı kütle sönümleyiciler sisteminin kontrol performansını olumsuz etkiler. Buna frekans kayması denilir (Kahya and Onur 2020). Şekil 15’de bir ayarlı kütle sönümleyici örneği görülmektedir.



Şekil 15. Ayarlı kütle sönümleyici (NAİMİ and WAHEB 2019)

### 3.Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemlerde harici bir enerji kaynağı analog ya da dijital sinyaller sayesinde aktifleşir. Bu sinyalleri yapının hareketini ölçen kontrol algoritmasına sahip bilgisayar oluşturur. Aktif kütle sönümleyici (AMD), aktif ayarlı kütle sönümleyici (ATMD), aktif tendon sistemleri, aktif destek sistemleri, çapraz sistemler ve darbe üretme sistemleri gibi pek çok aktif kontrol sistemleri mevcuttur (Abdel-Rohman and Leipholz 1983; Kavyashree, Patil, and Rao 2021). İlk aktif kontrol sistemleri Japonya’da 1989’da 11 katlı bir bina olan

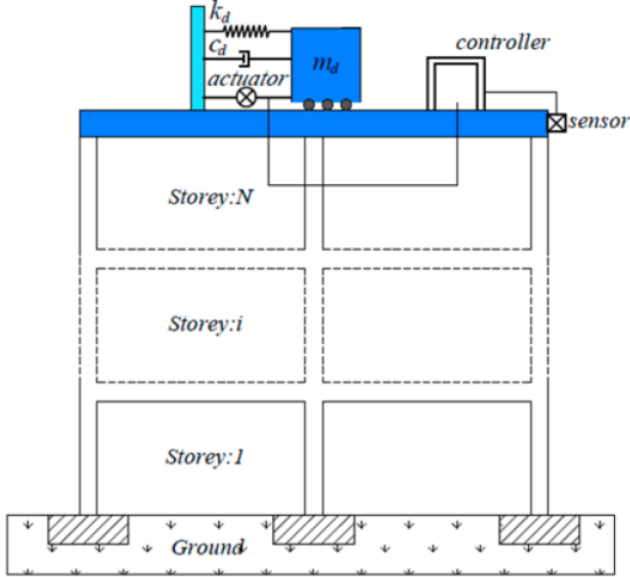
Kyobashi Seiwa için gerçek bir uygulamada kullanıldı. Bu sistem Kajima şirketi tarafından kuruldu (Pastia et al. 2005; Kavyashree, Patil, and Rao 2021). Binanın analizi farklı frekanslar ve farklı hareket türleriyle binanın farklı mod şekilleri gösterdi, böylece iki aktif kütle sönümleyici enine ve burulma hareketini kontrol etmede kullanılmıştır. (Lavasani and Doroudi 2020; NAİMİ and WAHEB 2019; Yanik and Aldemir 2019).

Pek çok çalışmada yapısal tepkiyi düşürmek için bu cihazı kullandığı gibi sönümle ilgilenen ve titreşimi azaltan değişken rijitlik sönümleyici isimli rijitliği değiştiren bir kontrol algoritması vardır. Doğrusal optimal kontrol, kutup atama tekniği, bağımsız modal alan kontrolü, ani optimal kontrol, sınırlandırılmış durum kontrolü, doğrusal olmayan kontrol, genelleştirilmiş tepki kontrolü, kayan kipli denetim, zaman gecikme telafisi, sinirsel ağ kullanarak aktif kontrol ve bulanık mantık yapıyı kontrol eden aktif kontrol algoritmalarından bazılarıdır (Kavyashree, Patil, and Rao 2021).

### **3.1. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (ATMD)**

Bir aktif sistem türü olan aktif ayarlı kütle sönümleyiciler (ATMD'ler), değişken frekanslarda uygulanabilirliğini artırmak için TMD sistemine aktif bir kontrol mekanizması (sensör, kontrolör ve aktüatör) eklenerek türetilmiş bir sistem olarak tanımlanabilir. Üst katın tepkisi, zamanla değişen kontrol kuvveti doğrusal dinamik aktüatörleri oluşturmak için kontrolörün geri beslemesi olarak kullanılır. Uygulamalarda, sensörler ve farklı aktüatör türleri için farklı ve çoklu geri bildirimler de kullanılabilir. Tokyo, Japonya'daki Shinjuku Park Kulesi (227 m), Incheon, Kore'deki Incheon Uluslararası Havaalanı Kontrol Kulesi (100,4 m), Edinburgh, İngiltere'deki Hava Trafik Kontrol Kulesi (57 m) ve Şangay, Çin'deki Şangay Dünya Finans Merkezi (492 m) gibi ATMD'lerin birkaç pratik örneği vardır (Gutierrez Soto and Adeli 2013; Kayabekir et al. 2020). Şekil 16'da aktif ayarlı kütle sönümleyici şematik olarak gösterilmiştir.





Şekil 16. Aktif ayarlı kütle sönümleyicileri (ATMD) sistemine sahip yapının genel bileşeni (Kayabekir et al. 2020).

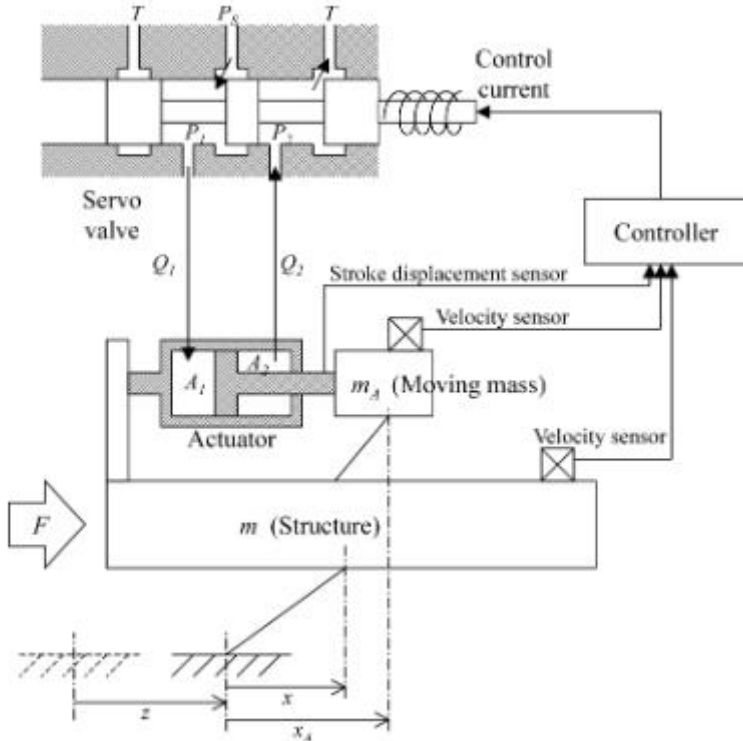
### 3.2. Aktif Kütle Sönümleyiciler (AMD)

Aktif kütle sönümleyiciler kontrol kuvveti oluşturmak için elektromekanik ya da elektrohidrolik çalıştırıcı ile hareket ettirilen bir atalet kütesinden oluşur. Ayarlı kütle sönümleyiciler 1980'lerden beri çalışılmış olsa da onlar çok küçük sayıda yapıda uygulanmıştır (Yamamoto et al. 2001).

Büyük inşaat yapılarında titreşim bastırma için diğer geleneksel teknolojilere kıyasla aktif kütle sönümleyicilerin avantajı kısaca yinelenmesidir. İzolasyon sistemleri ya da yapısal çelik gibi diğer pasif sistemlere kıyasla ayarlı kütle sönümleyici mevcut yapılara istilacı bir müdahale ve ilişkili zorluklar gerek duymadan kurulabilir (Rosti et al. 2022).

Literatürde, ayarlı kütle sönümleyicinin mevcut bir yapıya ilk uygulamalarından biri 2001 yılına dayanmaktadır (Ikeda et al.

2001). Ikeda ve ark. çalışmalarında 11 katlı bir binaya iki adet hidrolik AMD uygulamışlardır. Cihaz, bina üzerinde hem rüzgâr hem de sismik etkilerden kaynaklanan titreşimleri azaltsın diye kullanılmıştır. Saha içi veriler örneklenmiş ve cihazın güçlü rüzgâr durumunda konforu artırmadaki etkinliğini göstermiştir (salınım genliğini azaltarak). Ayarlı kütle sönümleyicinin kurulduğu dönemde meydana gelen bazı depremler de sistemin kontrol edilen yapının yapısal sönümlemesini artırmadaki etkinliğini göstermiştir (Rosti et al. 2022). Şekil 17’de aktif kütle sönümleyici şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 17. Aktif kütle sönümleyici şematigi (Rosti et al. 2022)

### **3.3.Aktif Destek Sistemleri (ABS)**

Destekleme sistemi, çapraz destek, K-destek ve X-destek ile bütünleştiği tahrik düzenekleri ile uygulamaya konulabilir. Hidrolik tahrik düzenekleri, bir hidrolik güç kaynağı, bilgisayardan bir tanımlı kontrol algoritmasıyla kontrol edilebilen bir servo valfi kontrolörü bir servo valfi boyunca destekleme ile komşu kat arasına yerleştirilir. Bilgisayardaki önceden tanımlanmış kontrol algoritması sensör ölçümlerine dayanarak gerekli kontrol sinyali üretecektir ve servo valfi kontrol sinyalinin bağlı olarak tepkiyi üretecektir (Kavyashree, Patil, and Rao 2021).

### **3.4.Darbe Üretme Sistemleri (PGS)**

Bu sistemde, hidrolik tahrik düzeneği kullanılmaz, onun yerine yüksek basınçlı havayı kullanan sıkışmış havayı kullanan pnömatik mekanizmanın üstünde çalışan darbe üreticini kullanır. Darbe üretici çevrede büyük hız olduğunda çalışır, yapının hızına göre gereken kuvveti üretir. Sıkışmış gaz kullanımını gibi bazı avantajları vardır. Ancak binayı kontrol etmede güçlü olmaması ve yüksek derecede doğrusal olmayan olması gibi bazı dezavantajları da mevcuttur (Kavyashree, Patil, and Rao 2021).

Aktif kontrol sisteminin avantajı onu pasif kontrol cihazında görülen gerçek zamanlı uygulamada gerekli frekansa ayarlamaktır. Ancak bazı dezavantajlar, inşaat mühendisliği sanayilerinde aktif kontrol sisteminin sınırlı uygulamasını meydana getirmiştir. Ana dezavantajı kontrol kuvvetinin üretimi için dış kuvvet kaynağının kullanımıdır. Maliyet ve büyük dış kaynak tedariki, binanın tepkisini azaltmak için tahrik düzeneği tarafından büyük kontrol kuvvetini çıkarmak için gerekir. Bir diğer dezavantajı deprem gibi herhangi bir belirsizlik esnasında eğer güç kaynağı bina ile bağlantısı kesilirse kontrol kuvvetinin en büyük gereksiniminde inaktif olması muhtemeldir ki bu da onu bozuk cihaz yapar (Kavyashree, Patil, and Rao 2021).

### **3.5.Aktif Ayarlı Sıvı Kolon Sönümleyiciler (ATLCD)**

Aktif ayarlı sıvı kolon sönümleyiciler rüzgâr kaynaklı titreşimleri önemli ölçüde azaltabilirler. Balendra ve diğerleri 2001’de yapmış oldukları çalışmada kulelerin rüzgâr kaynaklı ivme tepkilerini azaltmada etkili olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca aktif ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerin ivme sensör türünün hız sensör türü ve yer değiştirme sensörü türünden daha etkili olduğunu bulmuşlardır (Balendra, Wang, and Yan 2001).

### **4.Yarı-Aktif Kontrol Sistemleri**

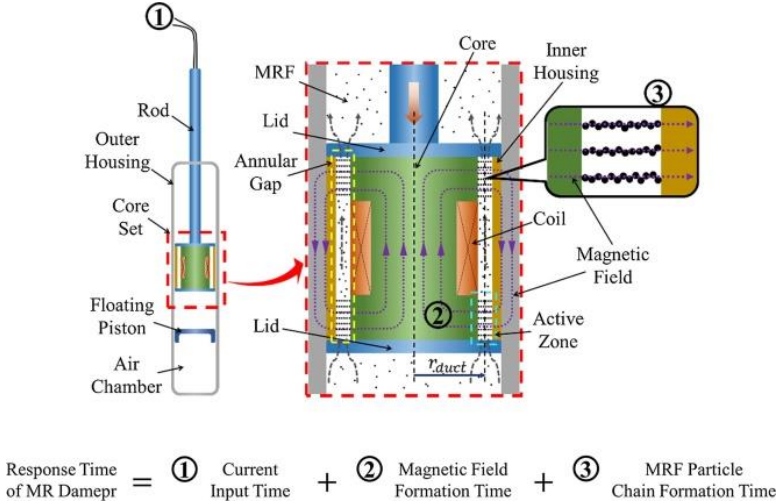
Hem pasif hem de aktif cihazların olumlu etkilerini bir sistemde birleştirmeyi hedeflerler. Maliyet ve karmaşıklık açısından aktif kontrol sistemleri ile pasif kontrol sistemlerinin arasında yer alır (Gorantiwar et al. 2020). Aslında pasif kontrol sisteminin geliştirilmiş bir versiyonudur. Temel fark, yarı-aktif kontrol sisteminin parametrelerinin giriş uyarımına bağlı olarak değiştirilebilmesidir. Avantajları yüksek düzeyde sağlam olması, sınırlı olmasa da küçük güç kaynağı sayılabilir (Hojat Jalali et al. 2023). Bu cihazlar, yapısal sisteme enerji ekleyemeyen yapının hareketi sonucunda kuvvet üretir. Bu sistemleri çalışması dış güç kaynağına bağlıdır.

Yarı aktif sistemler talebi karşılar şekilde tasarlandığında sismik uyarımın neden olduğu hasarları düşürmede etkili olabilir. Yarı aktif kontroller sadece pasif kontroller kadar güvenilir değillerdir, aynı zamanda aktif kontroller kadar ayarlanabilir ve uyum sağlayabilir. Hal böyle olunca da son yıllarda önem kazanmıştır (Lavasani and Doroudi 2020; Cheng, Jiang, and Lou 2008).

#### **4.1.Manyeto-Reolojik (MR) Sönümleyici**

Bir yarı aktif kontrol sistem türüdür. MR akışkanlarını içeren hidrolik silindiri dâhil eder. Manyetik alanı uygulayarak MR akışkanın viskozitesi artar ve bir yarı katıya dönüşür. MR sönümleyiciler karma sistem olarak kullanabilmek için ayarlı kütle sönümleyicilerle birleştirilebilir (Lavasani and Doroudi 2020; Hojat

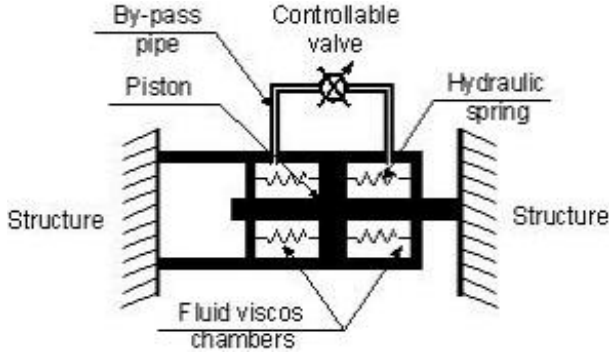
Jalali et al. 2023; Jung et al. 2004). Şekil 18’de manyeto-reolojik sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 18. Manyeto-reolojik sönümleyici örneği (Jung et al. 2004)

#### 4.2. Değişken Orifis Sönümleyici (VOD)

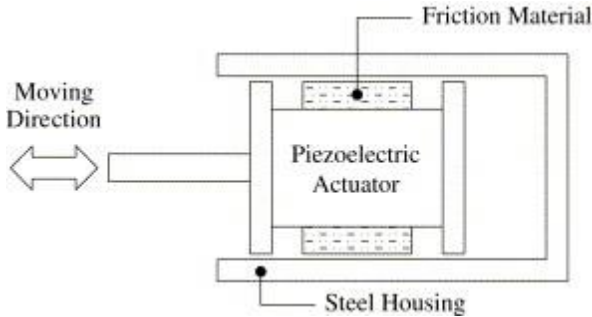
Ekstra güç ya da sensör olmadan sönümlemesini yer hareketini frekansına göre uyarlayabilen yarı-aktif kontrol sistemi sınıfına giren bir sönümleyicidir (Z.-X. Li et al. 2022). Yapının yanall desteği içinde ya da sismik izolasyon sisteminin bir parçası olarak kullanabilen yaygın bir yarı-aktif hidrolik cihazdır. Cihaz tepki kuvvetini kontrol etmek için bir vana içeren yan geçit borusu üzerinde değişken orifislerle birleşen bir akışkan viskoz sönümleyiciden oluşur. Cihazın sönüm özellikleri pistonun bir odacığından diğerine yan geçit borusuyla arasında geçen değişken sıvı miktarıyla (vana tamamen açıldığında düşük sönüm, vana tamamen kapatıldığında yüksek sönüm) iki sönüm değeri arasında kontrol edilebilir. Vana açılma sürecinin orta konumunda cihaz belirli sönüm dağıtımı üretir. Vananın kurulumu genellikle elektromekanik olarak kullanılabilir (örneğin servo vanası ya da elektromanyetik supap) (Luca and Pastia 2009). Şekil 19’da bir değişken orifis sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 19. Değişken orifis sönümleyici örneği (Luca and Pastia 2009)

#### 4.3. Değişken Sürtünme Sönümleyici (VFD)

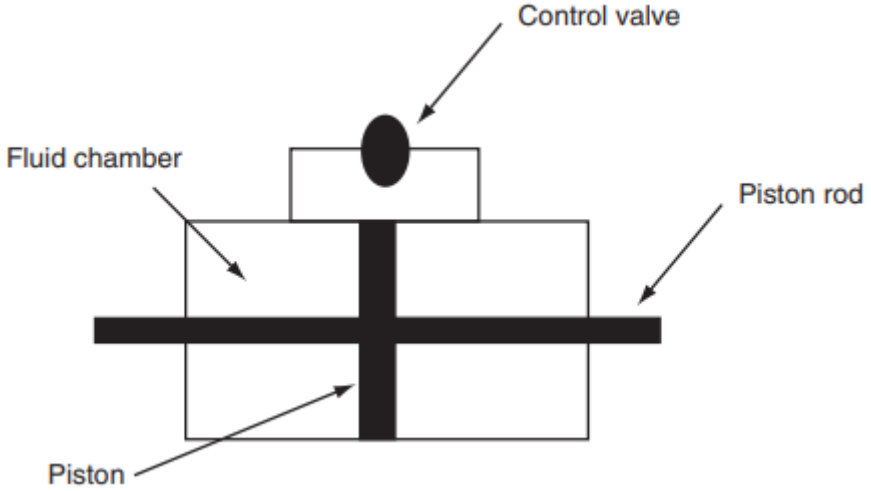
Sürtünme kuvvetini daha sonra ayarlamak için sıkıştırma kuvveti düzenleyicisi olarak piezoelektrik aktüatör kullanan değişken sürtünme sönümleyici, son yıllarda tatmin edici performansla vurgulanan en çok çalışılan şemadır. Piezo tipi değişken sürtünme sönümleyicinin çalışması için sürtünme malzemeleri üzerindeki sıkıştırma kuvveti büyüklüğünü kontrol etmek için piezoelektrik aktüatöre giriş voltajı seviyesini manipüle edilmelidir. Normalde, sıkıştırma kuvveti voltaj seviyesi ile orantılıdır. (Ng and Xu 2007). Şekil 20’de bir değişken sürtünmeli sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 20. Değişken sürtünmeli sönümleyici şematik diyagramı (Ng and Xu 2007)

#### 4.4. Değişken Rijitlikli Sönümleyiciler (VSD)

Yarı aktif değişken rijitlikli sönümleyici sistemler sönümün kontrol vanasını dinamik olarak değiştirebilirler, böylece yapıda enerji giderme gerçekleşir. Yapısal tepkilerde tepki bilgisine dayanarak kontrol cihazı yapının çapraz desteğine bağlanan enerji yayma cihazlarının kontrol vanasını devre dışı bırakabilir veya çalıştırabilir. Yapı maksimum deplasman konumuna ulaştığında ve zıt yönde hareket etmeye başladığında, enerji sönümleme cihazları kontrol sistemiyle açılır ve desteklerin rijitliği sıfır olur. Destekler tarafından emilen sismik enerji, enerji sönümleme cihazlarına bırakılır ve enerji sönümleme cihazları kapatıldığında, yapısal bileşenlerin destekleri sismik enerjiyi emen belirli bir rijitlik sağlar. (Kori and Jangid 2007; Walsh, Sallar, and Steinberg 2019). Şekil 21’de bir değişken rijitlik sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 21. Değişken rijitlik sönümleyici sistemin şematik gösterimi  
(Kori and Jangid 2007)

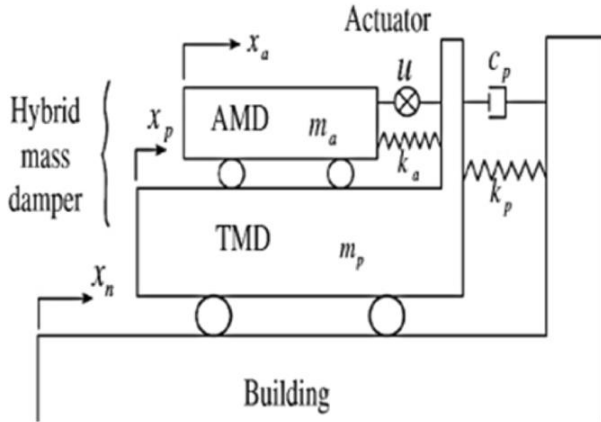
#### 5. Karma Kontrol Sistemleri (HCS)

Bu sistemler pasif ve aktif veya yarı-aktif cihazların bir birleşiminden oluşur (Fisco and Adeli 2011). Bu sistemler umut

verici çözüm olmuşlardır çünkü onlar pasif, aktif ve yarı-aktif kontrol sistemlerin avantajlarına sahiptirler. Pasif kısmı yapısal tepki azaltmaya çalışır ve arzu edilebilir sınırlar içerisinde yapının performansını tutar. Aktif kısmı tepkiyi ayarlamak ve düzenlemek için uygulanır. Karma kontrol sistemleri farklı yoğunluklu ve frekans aralığına sahip farklı uyarım tiplerine maruz bırakılmış yapıları korumak için etkilidirler. Karma kontrol sistemleri birleşik aktif ve pasif kontrol sistemlerini kullanır (Rahimi, Aghayari, and Samali 2020). Karma kontrol sistemlerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

### 5.1.Karma Kütle Sönümleyiciler (HMD)

Optimum TMD ve aktif sönümleme cihazlarının davranışlarını birleştirerek aynı anda çeşitli hedefleri gerçekleştirmeye çalışır. Bu uygulamaya dayanarak, amaçlar değişebilir. Karma kütle sönümleyici performansı artırabilir, güç tüketimini azaltabilir, hareket eden kütle vuruşunu azaltabilir, gömülü kütleyi azaltabilir ve bozulmaya karşı koruma mekanizmasını sağlayabilir. Yani, bu sönümleyici kapatıldığında bile hala etkilidir (Chesné et al. 2019). Şekil 22’de karma kütle sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 22. Karma kütle sönümleyici (Kavyashree, Patil, and Rao 2021)



## 5.2.Taban İzolasyonlu Ayarlı Kütle Sönümleyiciler

Çeşitli araştırma çabaları, taban izolasyonu alt sisteminin yer değiştirme talebi düşün diye birçok farklı stratejiye başvurmuştur. Önceki araştırmalar, taban izolasyonlu yapıların pasif, aktif veya yarı aktif cihazlarla birleştirilmesinin taban izolatörünü daha da etkili hale getirebildiğini göstermiştir (Salaas et al. 2023). Barbat ve diğ. (1995)'de, pasif doğrusal olmayan taban izolatörlerini aktif bir kontrol sistemiyle birleştirerek toplam taban yer değiştirmesini düşürmeyi amaçlamıştır. Bunun ötesinde, diğer araştırmacılar bir taban izolatörü ve ayarlı kütle sönümleyicisinin (TMD) birleşiminden oluşan pasif bir hibrit kontrol önermişlerdir (Tsai 1995).

## 5.3.Manyeto-Reolojik Sönümleyici ve Ayarlı Kütle Sönümleyici

Manyeto-reolojik sönümleyiciyi ayarlı kütle sönümleyici gibi pasif cihazlarla birleştirerek, birçok araştırmacının gösterdiği gibi mükemmel sonuçlara ulaşabilen hibrit bir kontrol sistemi oluşturulur. Amini ve Doroudi (2010) yılındaki yapmış oldukları vaka çalışmasında 14 katlı bir ana bina ve 8 katlı bir podyum yapıları bir bina kompleksini çalışmışlardır. Performans değerlendirmesi üç farklı kategoriye ayrılmıştır: bunlardan birincisi, yarı aktif kontrol stratejilerinin analizi; ikincisi hem ayarlı kütle sönümleyici hem de manyeto-reolojik sönümleyici içeren hibrit yarı aktif kontrolün incelenmesi ve son olarak üçüncüsü, sadece ayarlı kütle sönümleyici kullanımıyla pasif kontrolün değerlendirilmesi. Etkili kontrol güçlerini kolaylaştırmak için, manyeto-reolojik sönümleyici uygun voltajı belirleyebilen ve uygulayabilen bir kontrolör tasarlasın diye bulanık mantık kabul edilmiştir. Sayısal bulgular, yarı aktif kontrol ve hibrit yarı aktif kontrol uygulandığında her iki binanın sismik tepkilerini büyük oranda azalttığını göstermiştir (Brandão and Miguel 2023).

## **Sonuç**

Bu bölümde deprem başta olmak üzere hasara ve yapı kullanım sınırlarının aşılmasına neden olabilecek titreşimleri sönmölemek amacıyla geliştirilen çeşitli cihazlar kısa tanımlarıyla ele alınmış ve literatürdeki çalışmalara atıflar yapılarak gruplandırılmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında her ne kadar “pasif, aktif, yarı aktif ve karma” şeklinde bir sınıflandırma yapılmış olsa da her geçen gün gelişmekte olan sönmöleyici teknolojisi ve çeşitli sönmöleyicilerin birlikte kullanımını sonucu ortaya çıkan sistemleri araştırmacılar burada yer alan isimlerden farklı biçimde adlandırabilmektedir. Yazarların kanısı; henüz çok yeni sayılabilecek bu teknolojilerin etkin kullanımını için özellikle mühendislik eğitimi veren kurumların daha aktif rol alması ve uygulayıcıların araştırmacılarla işbirliği içinde çalışması faydalı olacaktır.

## KAYNAKÇA

Abdel-Rohman, Mohamed, and Horst H Leipholz. 1983. "Active control of tall buildings." *Journal of Structural Engineering* 109 (3): 628-645.

Abraham, Sarah Mariam, KS Selman, Nithya Mohan, Shunmu Prasad, and Salini Theres N Kurian. 2021. "Analysis of Building with Baseisolation and Damper."

Aghaeidoost, Vahid, and AHM Muntasir Billah. 2022. "Sensitivity of seismic fragility of base-isolated bridges to lead rubber bearing modeling technique." *Structural Control Health Monitoring* 29 (8): e2971.

AHMADZAI, Hasibullah. 2022. "Yapı Sistemlerinin Hesabında Matris Yöntemleri." *TAS Journal* 2 (1): 19-29.

Akyüz, U, A Caner, A Yakut, and S Ozdemir. 2017. "TÜRKİYE'DEKİ SİSMİK İZOLASYON UYGULAMALARININ İNCELENMESİ."

Aldemir, Ü, and E Aydın. 2005. "Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar." *Türkiye mühendislik haberleri* 435 (1): 81-89.

Amini, F., and R. Doroudi. 2010. "Control of a building complex with Magneto-Rheological Dampers and Tuned Mass Damper." *Structural Engineering and Mechanics* 36 (2): 181-195. <https://doi.org/10.12989/SEM.2010.36.2.181>. <https://doi.org/10.12989/SEM.2010.36.2.181>.

Anwar, SF, M Hasmath, and MA Khan. 2016. "Study on Soil-Structure Interaction and Base Isolated System for Seismic Performance of Structures Resting on Different Types of Soils." *Global Journal of Engineering Science Researches* 3 (10): 61-67.

Arguc, Sedar, Ozgur Avsar, and Gokhan Ozdemir. 2017. "Effects of lead core heating on the superstructure response of

isolated buildings." *Journal of Structural Engineering* 143 (10): 04017145.

Arvind, R., and M. Helen Santhi. 2022. "A State of Art Review on Hybrid Passive Energy Dissipating Devices." *Journal of Vibration Engineering & Technologies* 10 (5): 1931-1954. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00492-1>.  
<https://doi.org/10.1007/s42417-022-00492-1>.

Ayhan, Oğuzhan. 2006. "Binaların depreme karşı güçlendirilmesinde klasik yöntem ile sürtümlü sarkaç sistemlerin karşılaştırılması." Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bahekar, Rohini, and Atulkumar Manchalwar. 2019. "Seismic Response of Structure Equipped with Lead Rubber Bearing Considering SSI." 5: 48-52.

Balendra, T., C. M. Wang, and N. Yan. 2001. "Control of wind-excited towers by active tuned liquid column damper." *Engineering Structures* 23 (9): 1054-1067. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00015-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00015-3).  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029601000153>.

Bang, I. 2011. "Experiences of sliding disk bearing in Korea." Proceedings of the 7th World Congress on Joints Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Las Vegas, NV, USA.

Barbat, AH, J Rodellar, EP Ryan, and N Molinares. 1995. "Active control of nonlinear base-isolated buildings." *Journal of Engineering Mechanics* 121 (6): 676-684.

Brandão, Francisco Da Silva, and Letícia Fleck Fadel Miguel. 2023. "A New Methodology for Optimal Design of Hybrid Vibration Control Systems (MR + TMD) for Buildings under Seismic Excitation." *Shock and Vibration* 2023: 8159716. <https://doi.org/10.1155/2023/8159716>.  
<https://doi.org/10.1155/2023/8159716>.

Chang, Cheng-Hsiung. 2002. "Modeling of laminated rubber bearings using an analytical stiffness matrix." *International Journal of Solids and Structures* 39 (24): 6055-6078. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00471-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00471-7). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768302004717>.

Chaudhary, Budhi Ram, Suman Devkota, and Gurpreet Singh. 2019. "A Review Paper on Comparative Study of Fixed Base, Base Isolation & Damper System in RC Building." *International Research Journal of Engineering and Technology*.

Chen, Zhiyi, and Peng Jia. 2021. "Seismic response of underground stations with friction pendulum bearings under horizontal and vertical ground motions." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 151: 106984. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106984>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726121004061>.

Cheng, Franklin Y, Hongping Jiang, and Kangyu Lou. 2008. *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press.

Chesné, S., G. Inquieté, P. Cranga, F. Legrand, and B. Petitjean. 2019. "Innovative Hybrid Mass Damper for Dual-Loop Controller." *Mechanical Systems and Signal Processing* 115: 514-523. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.06.023>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327018303601>.

Constantinou, MC, and DM Fenz. 2008. "Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory." *Earthquake Eng. Struct. Dyn* 37 (2): 163-183.

Çerçevik, Ali Erdem. 2019. "Bina ve köprü tipi yapılarda pasif yapısal kontrol sistemlerin sezgisel algoritmalar ile optimizasyonu." Postgraduate, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.

Dezfuli, F Hedayati, and M Shahria Alam. 2013. "Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing." *Smart Materials Structures* 22 (4): 045013.

Dicleli, M. 2013. "Sismik izolasyon ve enerji sistemleriyle ilgili teknik gelişmeler ve sismik performansı iyileştirme amaçlı özel uygulamalar." Deprem yalıtımı yöntemleri ve uygulamaları sempozyumu, ODTÜ.

Döker, Alper Tolga. 2020. "Burulma düzensizliğine sahip taban izolasyonlu yapıların deprem davranışının incelenmesi." Bursa Uludağ Üniversitesi.

Ekinci, Nazif, and Cengiz IPEK. 2023. "FARKLI DÖŞEME TİPLERİNE SAHİP BETONARME BİNALARIN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ RC BUILDINGS WITH DIFFERENT SLAB TYPES INVESTIGATION UNDER EARTHQUAKE LOADS." *KONGRE KÜNYESİ*.

Eskandari Nasab, Mohammad Seddiq, and Jinkoo Kim. 2022. "Fuzzy analysis of a viscoelastic damper in seismic retrofit of structures." *Engineering Structures* 250: 113473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113473>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621015777>.

Etedali, Sadegh, Kazem Hasankhoie, and Mohammad Reza Sohrabi. 2020. "Seismic responses and energy dissipation of pure-friction and resilient-friction base-isolated structures: A parametric study." *Journal of Building Engineering* 29: 101194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101194>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219325069>.

Failla, Isabella. 2021. "A DIDACTIC INTRODUCTION TO MODELS AND DEVICES TO MITIGATE SEISMIC ACTIONS." *AAPP Physical, Mathematical Natural Sciences/Atti della*

Fatemi, H, and J Conklin. 2019. "Experimental Behaviour of Friction-Based EradiQuake Seismic Isolation Systems."

Fisco, N. R., and H. Adeli. 2011. "Smart structures: Part II — Hybrid control systems and control strategies." *Scientia Iranica* 18 (3): 285-295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.035>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1026309811001003>.

Frahm, H. 1909. "Devices for Damping Vibration of Bodies US Patent No. 989958."

Gil, Heungbae, Kyoungbong Han, Junho Gong, and Dooyong Cho. 2020. "Improvement of the performance-based seismic design method of cable supported bridges with the resilient-friction base isolation systems." *Applied Sciences* 10 (11): 3942.

Gorantiwar, Anish, Rajvardhan Nalawade, Arash Nouri, and Saied Taheri. 2020. "Experimental analysis of a novel double damper system with semi-active control." *Electronics* 9 (9): 1518.

Gu, Zhenyuan, Yahui Lei, Wangping Qian, Ziru Xiang, Fangzheng Hao, and Yi Wang. 2021. An Experimental Study on the Mechanical Properties of a High Damping Rubber Bearing with Low Shape Factor. *Applied Sciences* 11 (21). <https://doi.org/10.3390/app112110059>.

Gutierrez Soto, Mariantonieta, and Hojjat Adeli. 2013. "Tuned Mass Dampers." *Archives of Computational Methods in Engineering* 20 (4): 419-431. <https://doi.org/10.1007/s11831-013-9091-7>. <https://doi.org/10.1007/s11831-013-9091-7>.

Hasmaden, Hilal. 2014. "Kayma çerçevelerinde optimum sönümleyici dağılımına zemin etkisi." Niğde Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.

He, Zhongying, Yifan Song, Jianguo Wang, Wen Xu, Hongzhai Guan, and Yutao Pang. 2023. "Experimental study on mechanical property degradation of thermal aging laminated rubber bearing." *Case Studies in Construction Materials* 18: e02060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02060>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523002395>.

Hojat Jalali, Himan, Maziar Fahimi Farzam, Seyyed Ali Mousavi Gavgani, and Gebrail Bekdaş. 2023. "Semi-active control of buildings using different control algorithms considering SSI." *Journal of Building Engineering* 67: 105956. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105956>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223001353>.

Ikeda, Yoshiki, Katsuyasu Sasaki, Mitsuo Sakamoto, and Takuji Kobori. 2001. "Active mass driver system as the first application of active structural control." *Earthquake engineering structural dynamics* 30 (11): 1575-1595.

Imran, Iswandi, Dionysius M. Siringoringo, and James Michael. 2021. "Seismic performance of reinforced concrete buildings with double concave friction pendulum base isolation system: case study of design by Indonesian code." *Structures* 34: 462-478. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.084>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012421007013>.

Jouneghani, Kouros, Mahmood Hosseini, Mohammad Rohanimanesh, and Morteza Dehkordi. 2023. "Building's Controlled Seismic Isolation by Using Dampers and Stiff Core \*." *Turkish Journal of Civil Engineering* 34. <https://doi.org/10.18400/tjce.1265467>.

Jung, Hyung-Jo, BF Spencer Jr, YQ Ni, and IW Lee. 2004. "State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid



dampers in civil engineering applications." *Structural Engineering Mechanics* 17 (3-4): 493-526.

Kahya, Volkan, and ARAZ Onur. 2020. "Yüksek hızlı demiryolu köprülerinde aşırı titreşimlerin azaltılmasında paralel bağlı ayarlı kütle sönümleyiciler için basit bir tasarım yöntemi." *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 35 (2): 607-618.

Kaliyaperumal, Saravana Raja Mohan. 2022. "Numerical Investigation of Visco-Elastic Damper for Seismic Vibration." *Advances in Structural Mechanics Applications: Proceedings of ASMA- 19*: 1.

Kavyashree, B. G., Shantharam Patil, and Vidya S. Rao. 2021. "Review on vibration control in tall buildings: from the perspective of devices and applications." *International Journal of Dynamics and Control* 9 (3): 1316-1331. <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00728-6>.  
<https://doi.org/10.1007/s40435-020-00728-6>.

Kayabekir, Aylin Ece, Gebrail Bektaş, Sinan Melih Nigdeli, and Zong Woo Geem. 2020. "Optimum Design of PID Controlled Active Tuned Mass Damper via Modified Harmony Search." 10 (8): 2976. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/8/2976>.

Khajehsaeid, Hesam, Jamal Arghavani, Reza Naghdabadi, and s Sohrabpour. 2014. "A visco-hyperelastic constitutive model for rubber-like materials: A rate-dependent relaxation time scheme." *International Journal of Engineering Science* 79: 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2014.03.001>.

Kori, Jagadish G, and RS Jangid. 2007. "Semi-active stiffness dampers for seismic control of structures." *Advances in Structural Engineering* 10 (5): 501-524.

Lavasani, Seyed Hossein Hosseini, and Rouzbeh Doroudi. 2020. "Meta heuristic active and semi-active control systems of

high-rise building." *International Journal of Structural Engineering* 10 (3): 232-253.

Lee, David, and Douglas P Taylor. 2001. "Viscous damper development and future trends." *The structural design of tall buildings* 10 (5): 311-320.

Li, Hong-Nan, and Gang Li. 2007. "Experimental study of structure with "dual function" metallic dampers." *Engineering Structures* 29 (8): 1917-1928.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.007>.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029606004226>.

Li, Zhong-Xian, Dongbin Wen, Yundong Shi, and Xin Wei. 2022. "A frequency-dependent variable-damping control based variable-orifice damper for smart base-isolation system." *Smart Materials Structures* 31 (12): 125016.

Lim, Brian, and Tatsuji Matsumoto. 2006. "Characteristics of super high damping visco-elastic damper for earthquake and wind-induced vibration." 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan.

Liu, Shutong, Zheng Lu, Peizhen Li, Sunwei Ding, and Fei Wan. 2020. "Shaking table test and numerical simulation of eddy-current tuned mass damper for structural seismic control considering soil-structure interaction." *Engineering Structures* 212: 110531.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110531>.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619344372>.

Loghman, Vahid, Faramarz Khoshnoudian, and Mehdi Banazadeh. 2013. "Effect of vertical component of earthquake on seismic responses of triple concave friction pendulum base-isolated structures." *Journal of Vibration and Control* 21 (11): 2099-2113.  
<https://doi.org/10.1177/1077546313503359>.  
<https://doi.org/10.1177/1077546313503359>.

Luca, Septimiu-George, and Cristian Pastia. 2009. "Case study of variable orifice damper for seismic protection of structures." *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura* 55 (1): 39.

Mokha, Anoop, M. C. Constantinou, A. M. Reinhorn, and A. Zayas Victor. 1991. "Experimental Study of Friction-Pendulum Isolation System." *Journal of Structural Engineering* 117 (4): 1201-1217. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:4\(1201\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:4(1201)). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:4\(1201\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:4(1201)).

NAİMİ, Sepanta, and Mohammad Harris WAHEB. 2019. "Deprem Etkisindeki Yapıların Sismik Taban İzolasyonu ve Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemleri ile Karma Korunması." *Erzincan University Journal of Science Technology* 12 (1): 499-516.

Ng, C. L., and Y. L. Xu. 2007. "Semi-active control of a building complex with variable friction dampers." *Engineering Structures* 29 (6): 1209-1225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.007>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029606003300>.

Ozuygur, Ali Ruzi, and Ehsan Farsangi. 2021. "Influence of Pulse-Like Near-Fault Ground Motions on the Base-Isolated Buildings with LRB Devices." *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 26. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000603](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000603).

Park, K. H., Y. Fujiwara, T. Mazda, and Y. Kajita. 2020. "Evaluation of mechanical properties considering hysteresis characteristic of high damping rubber bearing." *Journal of Physics: Conference Series* 1687 (1): 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012019>. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012019>.

Pastia, Cristian, SEPTIMIU GEORGE Luca, FLORENTINA Chira, and VICTOR OCTAVIAN Roșca. 2005.

"Structural control systems implemented in civil engineering." *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section*: 76-80.

Pianese, G, G Milani, and A Formisano. 2022. "High Damping Rubber Isolators for Low-Rise Masonry Buildings." *MASONRY INTERNATIONAL* 35 (1): 1-10.

Polycarpou, Panayiotis. 2009. "Investigation of earthquake-induced poundings of seismically isolated buildings."

Rahimi, Fatemeh, Reza Aghayari, and Bijan Samali. 2020. "Application of tuned mass dampers for structural vibration control: a state-of-the-art review." *Civil Engineering Journal*: 1622-1651.

Rosti, Matteo, Stefano Cii, Alberto Bussini, Paolo M. Calvi, and Francesco Ripamonti. 2022. "Design and validation of a hardware-in-the-loop test bench for evaluating the performance of an active mass damper." *Journal of Vibration and Control* 29 (17-18): 4093-4106. <https://doi.org/10.1177/10775463221111262>. <https://doi.org/10.1177/10775463221111262>.

Salaas, Basel, Gebrail Bekdaş, Yasser E. Ibrahim, Sinan Melih Nigdeli, Mohamed Ezzat, Mahmoud Nawar, and Aylin Ece Kayabekir. 2023. "Design Optimization of a Hybrid Vibration Control System for Buildings." 13 (4): 934. <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/934>.

Serino, G, M Marsico Spizzuoco, and Chandrasekaran S MR. 2008. "Seismic isolation and modelling of a worship structure." Fourth European Conference on Structural Control.

Shakib, H., and A. Fuladgar. 2003a. "Effect of vertical component of earthquake on the response of pure-friction base-isolated asymmetric buildings." *Engineering Structures* 25 (14): 1841-1850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.08.008>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029603002050>.

---. 2003b. "Response of pure-friction sliding structures to three components of earthquake excitation." *Computers & Structures* 81 (4): 189-196. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00444-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00444-3). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794902004443>.

Shanmuga Priya, D, A Cinitha, PK Umesha, and R Iyer Nagesh. 2014. "Enhancing the seismic response of buildings with energy dissipation methods—An overview." *J Civil Eng Res*.

Sheikh, Hadiyah, Niel C. Van Engelen, and Rajeev Ruparathna. 2022. "A review of base isolation systems with adaptive characteristics." *Structures* 38: 1542-1555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.067>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235201242200159X>.

Soysal, Lale. 2006. "Deprem koşullarında yapı-zemin etkileşimi ve zemin iyileştirmesi." İstanbul Kültür Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği ....

Şadan, Bahadır 2016. "Deprem güçlendirmesinde sismik izolasyon sistemleri ve sönümleyici kullanımı." İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetim Enstitüsü, İstanbul.

TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.

Thomson, William Tyrrell. 1965. "Vibration theory and applications(Book on vibration theory and application in treatment of vibrations in systems with various degrees of freedom, developing mathematical techniques)." *ENGLEWOOD CLIFFS, N. J., PRENTICE-HALL, INC., . 384 P.*

Tsai, Hsiang-Chuan. 1995. "The effect of tuned-mass dampers on the seismic response of base-isolated structures." *International Journal of Solids and Structures* 32 (8): 1195-1210. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)00150-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)00150-U).

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002076839400150U>.

Uludağ, Soner. 2005. "Taban İzolasyonu Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi." Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ürkmezyel, Mete. 2023. "Sismik izolasyon sistemlerinin fayda-maliyet analizi açısından değerlendirilmesi." TC Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Walsh, Kenneth K, Grace Sallar, and Eric P Steinberg. 2019. "Hybrid base-isolation of a nonlinear building using a passive resettable stiffness damper." *Engineering Structures* 178: 206-211.

Yamamoto, Masashi, Satoru Aizawa, Masahiko Higashino, and Kotaro Toyama. 2001. "Practical applications of active mass dampers with hydraulic actuator." *Earthquake engineering structural dynamics* 30 (11): 1697-1717.

Yanik, Arcan, and Unal Aldemir. 2019. "A Short Review on the Active Control Approaches in Earthquake Engineering at the Last 10 Years (2008-2018)." *International Journal of Engineering Technology* 11 (2).

Yasar, Cansu, Volkan Karuk, Onur Kaplan, Esengul Cavdar, and Gokhan Ozdemir. 2023. Amplification in Mechanical Properties of a Lead Rubber Bearing for Various Exposure Times to Low Temperature. *Buildings* 13 (2). <https://doi.org/10.3390/buildings13020478>.

Yoshida, Junji, Masato Abe, and Yozo Fujino. 2004. "Constitutive Model of High-Damping Rubber Materials." *Journal of Engineering Mechanics* 130 (2): 129-141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:2(129)). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:2(129)).

Yurteri, Enes, and Oğuz Düğenci. 2022. "U Biçimli İki Farklı Tip Metalik Sönümleyicinin Eksenel Kuvvet Altında Yapısal Davranışı ve İki Yeni Metalik Sönümleyici Tasarımı." *Erciyes*

*Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi* 38 (3): 602-619.

Yücesoy, A. 2005. "Sismik izolatörler ile depreme dayanıklı yapı tasarımı." Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zhang, Cheng, Wenxue Zhang, Lijun Su, Ying Chen, and Xiuli Du. 2023. "Theoretical and Experimental Analysis of a Winding Rope Fluid Viscous Damper." *Structural Control and Health Monitoring* 2023: 7307224.  
<https://doi.org/10.1155/2023/7307224>.  
<https://doi.org/10.1155/2023/7307224>.

Zhang, Chunwei, and Amir Ali. 2021. "The advancement of seismic isolation and energy dissipation mechanisms based on friction." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 146: 106746.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106746>.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726121001688>.

Zhang, Wenxue, Cheng Zhang, Lijun Su, Yongrui Zheng, and Xiuli Du. 2023. "Experimental study on the dynamic performance of a winding rope fluid viscous damper." *Engineering Structures* 281: 115786.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115786>.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623002006>.

## BÖLÜM II

### Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatörlerde Kompozit Kauçuk Malzemelerin Kullanımı

Özlem ÇAVDAR<sup>1</sup>

Zeynep YILDIZ<sup>2</sup>

Ali KARIMZADEH NAGHSHINEH<sup>3</sup>

#### Giriş

Binaların depreme karşı dayanıklılığının artırılması, ekonomik kayıpların azaltılması ve yaşamın korunması için yeni bir alternatif olarak sismik izolatörler kullanılmaktadır. Sismik taban izolasyonu, temel üzerine ve bina altına konumlandırılan, binanın depreme maruz kalması sırasında yapıyı temellerin hareketinden ayıran, temellerden yapıya aktarılan kuvveti sönümleyen ve

---

<sup>1</sup> Prof. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

<sup>2</sup> Doktora Öğrencisi, Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

<sup>3</sup> Özdekan Kauçuk A.Ş., Ar-Ge Departmanı, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

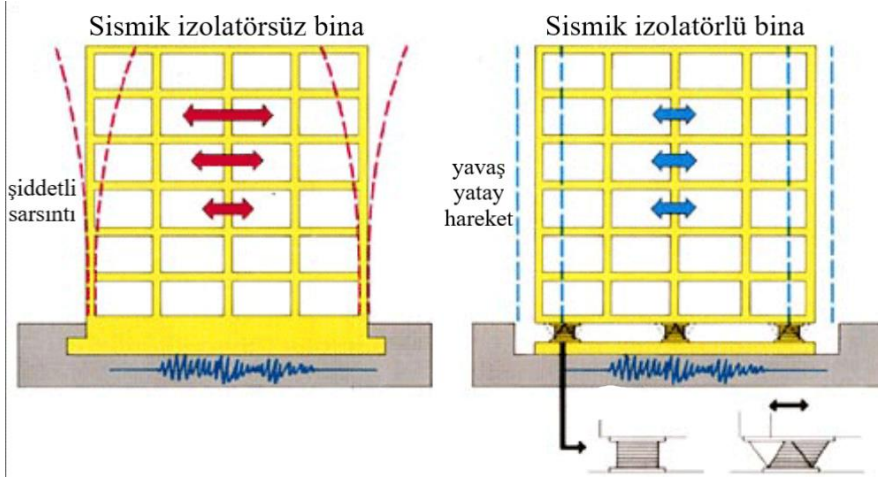


kauçuğun karbon bağlarını kırarak sismik y¼k¼ absorbe eden bir sistemdir (Şekil 1). Bu nedenle genel olarak tesisatları deprem hasarlarından korur. Başka bir deyişle izolat¼r¼n g¼revi yapının periyodunu arttırmak, deprem enerjisini dağıtmak ve yapıya depreme dayanabilecek uygun yatay esnekliği kazandırmaktır.



*Şekil 1. Yüksek s¼n¼ml¼ kauçuk mesnetin kesiti*

Sismik izolasyon, enerji dağıtımı işlevi ile binalara ileten sismik kuvveti azaltmak i¼in etkili bir y¼ntemdir. Genellikle temel ile bina arasına yerleştirilen sismik izolat¼r¼ler, binaların yapısal deformasyonunu ve histeretik s¼n¼mleme kabiliyetini artırmaktadır (Zhang & ark.,2019). Dolayısıyla taban izolasyonlu binalarda yapı elemanları daha az hasar g¼recek ve yapı farklı deprem etkilerine maruz kaldıktan sonra işlevselliğini kaybetmeyecektir. Farkı belirlemek i¼in Şekil 2' de sismik izolat¼rl¼ ve sismik izolat¼rs¼z bina tasarım metodolojisi g¼sterilmektedir (Çatlıoğlu, 2021).



Şekil 2. Sismik izolatörlü ve sismik izolatörsüz bina karşılaştırılması (Çathoğlu, 2021)

Sismik izolatörlerde kullanılan malzemelerin hasara karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Bu doğrultuda sismik izolatörler dikey yönde dayanıklı, yatay yönde ise esnek olmalıdır (Wang & ark.,2016). Binalar için yaygın olarak kauçuk esaslı sismik izolatörler kullanılmaktadır. Ara çelik plaklara bağlanan alternatif doğal veya sentetik kauçuk katmanlarından oluşmaktadır. Sismik izolatörlerde kullanılan kauçukların iyi sönümleme özelliğine, yüksek esnekliğe yüksek elastikiyete ve yüksek mukavemete sahip olması gerekmektedir (Wang & ark.,2015).

Kauçuk esaslı sismik izolatörlere yeterince esneklik kazandıran, yüksek elastikiyet ve yüksek mukavemet avantajlarına sahip olan doğal kauçuk (NR), günümüzde sismik izolatörlerde en yaygın kullanılan malzemedir (Wang & ark., 2015). NR yüksek deformasyonlarda kristalleşmektedir. NR' nin bu özelliği gerilme mukavemetini ve hasara karşı direnç yeteneğini arttırabilmektedir. NR' nin bu özellikleri sismik izolatörle açısından önem arz etmektedir (Wang & ark., 2016). Ancak NR' nin sönümleme özellikleri sismik izolatörlerin gereksinimlerini yarınc karşılayamamaktadır (Wang & ark., 2015).NR' nin makromoleküler

zincirleri esnektir ve bu da makromoleküller arasında daha az iç sürtünmeye sebep olmaktadır. İç sürtünmenin de daha az olması sönümleme özelliğini ciddi anlamda etkilemektedir (Wang & ark., 2016). Mükemmel sönümleme performansı sismik izolatör cihazları için bir ön koşuldur. NR' nin sönümleme özelliğinin geliştirilmesi sismik izolatörlerin arzu edilen sönüm oranı için önemlidir.

Geçtiğimiz birkaç on yılda, polimer fiziksel karışımları, kopolimerler, polimer/küçük organik molekül hibritleri, iç içe geçmiş polimer ağları gibi geliştirilmiş sönümleme özelliklerine sahip birçok yeni polimer malzeme geliştirilmiştir (Zhao & ark., 2018). Ayrıca, bu çalışmada da vurgulanan sismik izolatörler için geliştirilmiş sönümleme özelliklerine sahip birçok yeni karışım malzemelerin geliştirilmesi de araştırmacıların çalışmalarına konu olmuştur. Örneğin, Zhang & ark., (2019) yapmış oldukları çalışmada, nitril kauçuk (NBR), bromlu bütül kauçuk (BIIR) ve etilen-vinil asetat kopolimer (EVA) kullanılarak NBR/BIIR ve NBR/BIIR/EVA olmak üzere iki tür karışım hazırlamışlardır. Karışımların vulkanizasyon, mekanik ve sönümleme özellikleri analiz edilmiştir. Sonuçlar her iki karışımın da mükemmel vulkanizasyon platoları ve mekanik özellikler sergilediğini göstermektedir. Zhao, Xiang & Tian (2007) yapmış oldukları çalışmada, engellenmiş fenol (AO-80) kullanarak, engellenmiş fenolün (AO-80) etkisiyle yüksek sönümleme zirvesine ve kontrol edilebilir bir tepe konumuna sahip, yüksek sönümlemeli karboksilatlı nitril kauçuk hazırlamışlardır. Tian, Liu & He (2013) yapmış oldukları çalışmada, manyetik parçacıkların nitril bütadien kauçuğun sönümleme özelliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kalıcı manyetik kauçuk kompozitlerin geniş bir frekans aralığında yüksek kayıp faktörlerine sahip olduğunu gösterdiler. Mekanik mukavemet ve sönümleme özelliği açısından çoğu kauçuk kompozit, izolasyonlu kauçuk mesnetlerin gereksinimlerini karşılamamaktadır. Wu & ark., (2015) çalışmalarında, Mikroyapı-sönümleme özellik ilişkilerini kurmak amacıyla, farklı AO-80 içeriklerine sahip engellenmiş fenol AO-80/nitril-butadien kauçuk/poli (vinil klorür) (AO-80/NBR/PVC) kompozitler için deneysel ve moleküler

dinamik (MD) simülasyon yöntemlerinin birleştirilmiş bir çalışması sunulmaktadır. Yüksek sönümlenme uygulamaları için Doğal kauçuk (NR) ve bütül kauçuk (IIR) karışımları (NR/IIR) hazırlanmıştır. NR/IIR karışımlarının uyumlulaştırıcısı olarak görev yapmak üzere nispeten yüksek izopren içeriğine (%14,5 mol fraksiyonu) sahip bir izobütülen-izopren blok kopolimerini (IIBC) özel olarak sentezlenmiştir. NR/IIR karışımlarının morfolojik, yapısal ve mekanik özellikleri sistematik olarak araştırılmıştır. IIBC'nin bir bağdaştırıcı olarak arayüzey kalınlığını büyük ölçüde artırabileceği sonucuna varılmıştır. NR/IIR karışımıyla karşılaştırıldığında, uyumlulaştırılmış NR/IIR karışımları daha yüksek performans, özellikle daha yüksek bir sönümlenme faktörü sergilemiştir(Lu & ark.,2019).

Bu çalışmada kompozit kauçuk malzemelerin sismik izolatörlerde kullanımının izolatörlerde mekanik ve sönümlenme özelliklerinin iyileştirilmesi yönünde yapılan çalışmalara ve bilgilere yer verilmiştir. Bu çalışmanın, sismik izolatörlerde kompozit kauçuk malzemelerin geliştirilmesi çalışmalarına ışık tutabilecek nitelikte olduğu, konu hakkında çalışacaklara kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.

## **Kauçuk Kavramı**

Kauçuk, bazı tropikal bitkilerin özsuyundan (lateks) doğal olarak ya da petrol ve ürünlerinden suni olarak elde edilen bir malzemedir (Boşnak, 2010). Kauçuk, karakteristik elastik ve termoelastik davranışlarıyla diğer katılardan ayrılan bir malzeme sınıfının en iyi bilinen temsilcisidir. Kauçuğun geri dönüşümlü esneklik özelliği o kadar karakteristiktir ki, kimyasal yapısına bakılmaksızın, bu özelliğe sahip olan her maddeye "kauçuk" denilebilir (James & Guth, 1943). Kauçuklar sarmaşık halinde molekül zincirlerinden oluşmaktadır. Bu molekül zincirlerinin uzatılabilmesi özelliğiyle iyi bir elastikliğe (oda sıcaklığında) sahiptir. Malzemenin akışkanlığı sıcaklık arttıkça artmakta ve giderek termoplastik davranış göstermektedir (Boşnak, 2010).

Kauçuklar genel olarak doğal ve sentetik olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Kauçuklar farklı kullanım alanlarından dolayı çeşitlendirilebilir ve böylece kauçuk çeşitlerinin özelliklerine göre hangi kullanım alanına uygun olduğu belirlenebilmektedir (Akyar, 2022). Diğer bir kauçuk sınıflandırması ise kullanım yaygınlığına göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmada kauçuklar, genel kullanım ve özel kullanım kauçukları olarak ele alınmaktadır. Genel kullanım kauçuklarına örnek olarak Doğal Kauçuk (NR), Bütadien Kauçuk (BR), Butil Kauçuk (IIR) verilebilir. Özel kullanım kauçuklarına ise Nitril Kauçuk (NBR), Kloropren Kauçuk (CR), Poliakrilik Kauçuk (ACM), Silikon Kauçuk (Q) örnek verilebilir.

Kauçuk; yapısı gereği esneklik, yüksek mukavemet, düşük deformasyon, kolay işlenme, oldukça iyi yırtılma ve aşınma mukavemeti gibi birçok iyi fiziksel, kimyasal ve teknolojik özelliklere sahip olmasından dolayı yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu sebeple kauçuk türü malzemeler, günümüzün vazgeçilmez bir mühendislik malzemesi olmuştur (Boşnak, 2010).

Kauçuk ve kauçuk kompozitleri, üstün dinamik davranışları ve mekanik özellikleri nedeniyle amortisörler, endüstriyel taşıma bantları ve lastikler dahil olmak üzere geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yaygın uygulamada, ham kauçukların mekanik özelliklerini geliştirmek için çoğunlukla kimyasal çapraz bağlama ve dolgu maddelerinin ilave edilmesi kullanılmaktadır (Hu & ark., 2023). Doğal kauçuğun mekanik ve termomekanik özelliklerini değiştirmek için vulkanizasyon işlemi yapılmaktadır. Vulkanizasyon işlemi, tekli kauçuk zincirleri arasında çapraz bağlantılar oluşturmak ve çekme mukavemetini arttırmak için kauçuğu ve kükürdü birlikte ısıtmaktır (Zaoui, Zairi & Yan, 2023).

Kauçuklar çapraz bağlanmayan ama bu özelliğe sahip olan, vulkanize olabilen polimerlerdir. Çapraz bağlanabilme özelliği vulkanizasyon işlemi ile açıklanabilir. Vulkanize olmamış kauçuk, zayıf mekanik özelliklere sahip, yapışkan, yumuşak ve kimyasal etkilere karşı dayanıksız bir malzeme olarak nitelendirilebilir.

Kauçuk bir malzeme vulkanize olduktan sonra yapışkanlığını yitirir, fiziksel özellikleri ve kimyasal dayanımı daha iyi hale gelir (Dağdeviren Akan, 2022). Kauçuk, vulkanizasyon işlemi öncesi yüksek plastik özellikler sergilerken, vulkanizasyon işlemi sonrası yerini yüksek elastik özelliklere bırakır. Şekil 3'te çapraz bağlanmamış polimer yapısı ve çapraz bağlanmış polimer yapısı gösterilmektedir (Soyubol, 2006).



Şekil 3. Çapraz bağlanmamış ve bağlanmış polimer yapısı (Soyubol, 2006)

Kükürt çapraz bağlama, kauçuk endüstrisinde özellikle doymamış kauçuklar için tercih edilen bir geleneksel vulkanizasyon modu olmasına rağmen, kauçuk matrisinde kükürtün çoğalması, kauçuk vulkanizatlarının çevreye göre değişen çözünürlüğünden dolayı yüzeye doğru hareket etmesi nedeniyle kontrol edilemez. Ayrıca, eksik vulkanizasyon, önemli oranda serbest kükürtün kalmasına neden olabilmektedir. Bu da vulkanize olmuş kauçuğun özelliklerine zarar vermektedir. Öte yandan, dolgu maddesinin takviye etkisi, onun dağılım durumu ve kauçuk matris ile arayüzey etkileşimleri tarafından belirlenir (Hu & ark., 2023).

Kauçuklar bazı özelliklerinden dolayı diğer polimerik malzemelerden ayrılmakta ve kullanım olarak da plastiklerden farklıdır. Gerilmemiş durumda kauçuk amorf yapıda olup camsı geçiş sıcaklıkları üzerinde elastik yapıdadır. Plastikler ise

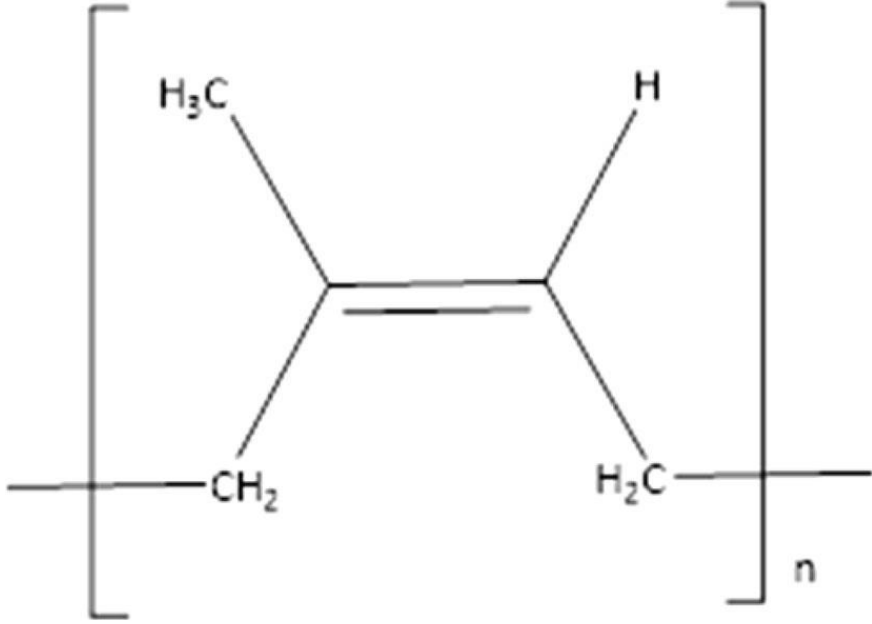
kararlılıklarını korumak için camsı geçiş sıcaklıkları altında kullanılmakta olup kristal yapıdadır.

## **Kompozit Kauçuk Malzemelerin Üretiminde Kullanılan Bazı Malzemeler**

### **Doğal Kauçuk**

Doğal kauçuk (NR) veya cis-1,4-poliizopren, yalnızca birkaç yüz binden başlayıp bir milyonun üzerine kadar yüksek molekül ağırlığı (MW) içeren bir biyopolimer malzemedir. Doğal kauçuk lateksi (NRL), dünyada yaygın olarak kullanılan tek doğal elastomerdir ve Hevea Brasiliensis adlı bir kauçuk ağacı türünün salgıladığı lateksten elde edilir (Rahman& ark., 2023). Hevea Brasiliensis ağacının kabuğu özel bir bıçakla çizildikten sonra lateks akıtmaya başlar ve bu özel bir kaptan toplanır. Toplanan lateksin akışkan kalması için koruyucu eklenir (Soyubol, 2006). Lateksten kauçuk elde etmek için konsantrasyon ve pıhtılaştırma metotları kullanılır. Konsantrasyon metodunda santrifüjleme, buharlaştırma ve kaymaklaştırma yöntemleriyle ağaçtan elde edilen %30' luk sıvı konsantrasyonu artırılarak %60 kauçuk içeren lateks elde edilir. Pıhtılaştırma yönteminde ise formik asit yardımıyla lateks pıhtılaştırılır. Pıhtılaştırılan bu lateks sıcak hava fırınlarında, duman veya açık havada kurutularak kauçuk elde edilir (Boşnak, 2010).

NR' nin genel kimyasal yapısı Şekil 4' te gösterilmektedir. Temel olarak organik bileşik izoprenin polimerleri ile proteinler, karbonhidratlar, lipitler ve inorganik tuzlar dahil olmak üzere az miktarda kauçuk olmayan ürünlerden oluşur. Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) tarafından belirtildiği üzere Ticari NR' ler, kir içeriği, kül içeriği, nitrojen içeriği, uçucu madde vb. temel alınarak derecelendirilir (Rahman& ark., 2023).



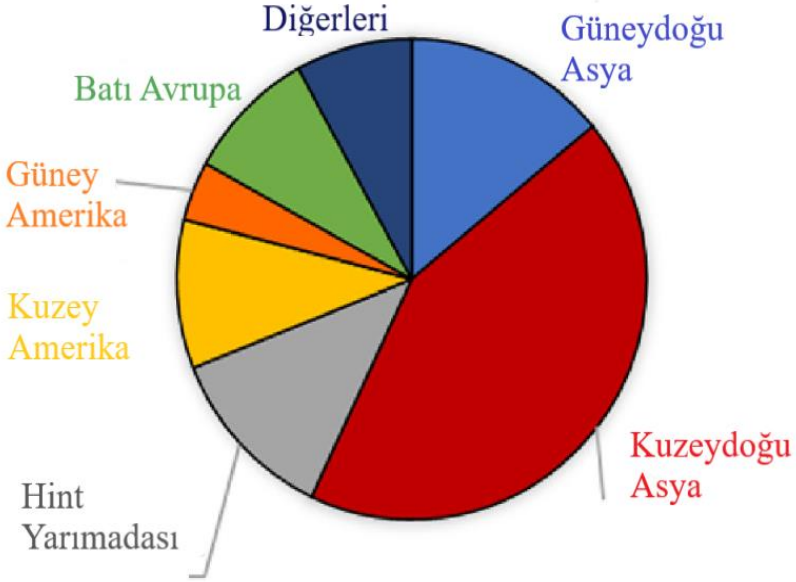
Şekil 4. NR'nin genel kimyasal yapısı (cis-1,4-poliizopren)(Rahman& ark., 2023)

NR'nin darbeleri ve şokları emme (absorbe etme) yeteneği ve yüksek elastikiyet, esneklik gibi benzersiz özellikleri, insan yaşam standartlarını farklı şekillerde etkilemektedir. NR' den hazırlanan malzeme ısı ve elektrik yalıtkanı olup atmosferik havayı geçirmez. Bu özelliklerinin yanı sıra NR, yapışkan yapısı nedeniyle nesnelere birbirine yapıştırma özelliğine de sahiptir. NR, mikroskobik lastik bantlardan büyük uçak parçalarına kadar çeşitli endüstriyel uygulamalarda çeşitli şekilde kullanılmaktadır. NR, uzun poliizopren omurga yapısına sahip doğal bir elastomer olup NR' nin omurgasında bulunan geniş çift bağ, onları kimyasal olarak değiştirilmeye duyarlı hale getirir. NR' nin kimyasal modifikasyon işlemi, NR' yi şişme, ozon ayrışımı, oksidasyon ve alev gibi olumsuzluklardan koruyabilir. NR' nin kimyasal modifikasyonu, epoksidasyon, siklizasyon, hidrojenasyon vb. gibi çeşitli yöntemler kullanılarak tarif edilmiştir. Çok sayıda kimyasal modifikasyon prosedürü arasında alkalin klorlama, oldukça stabil diklorokarbonle



modifiye edilmiş türevlerin geliştirilmesiyle sonuçlanır. Geliştirilmiş yağ, solvent, ozon ve alev direnci nedeniyle klorlu NR, geleneksel NR' nin başarısız olduğu çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Ramesan & Parvathi, 2023).

NRL, sentetik kauçuğa (SR) kıyasla üstün mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle imalat endüstrisi tarafından oldukça talep görmektedir (Rahman & ark., 2023). Ayrıca kauçuk ağaçlarının atmosferdeki karbondioksiti emerek iklim değişikliğinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Böylece çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Ancak doğal kauçuğun düşük elastikiyet, düşük çekme mukavemeti ve düşük aşınma direnci gibi uygulamalarını sınırlayan dezavantajları olduğu iyi bilinmektedir. Bu nedenle, kauçuk esaslı malzemelerin kendine özgü özelliklerinin diğer yöntemlerle ilerleyerek iyileştirilmesinin düşünülmesi önemlidir (Zaoui, Zaiří & Yan, 2023). Bunun yanı sıra NR' nin, solventler tarafından kolayca saldırıya uğraması ve oksijen, ozon, güneş ışığı, UV ışınları ve nem nedeniyle bozulması gibi dezavantajları da mevcuttur. Dünyanın en büyük NR üreticileri arasında Tayland, Endonezya, Vietnam ve Malezya ile birlikte Güneydoğu Asya yer almaktadır. Doğal kauçuk üretiminin yaklaşık %90'ı Asya'da gerçekleşmekte olup kauçuk tüketiminin %50'den fazlası Asya'da gerçekleşmektedir (Şekil 5). Bu, NR' nin şu ana kadar geçerliliğini koruduğunu ve birçok sektör için talebin her yıl artmaya devam ettiğini göstermektedir (Rahman & ark., 2023).

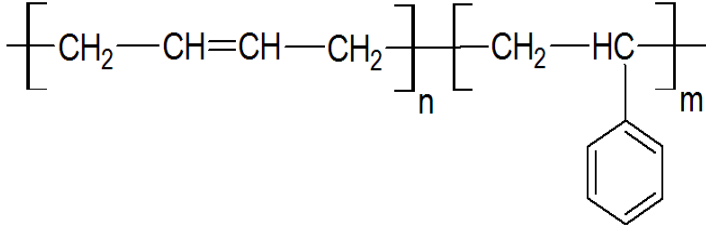


Şekil 5. 2018 yılında dünya doğal kauçuk tüketimi (Rahman & ark., 2023)

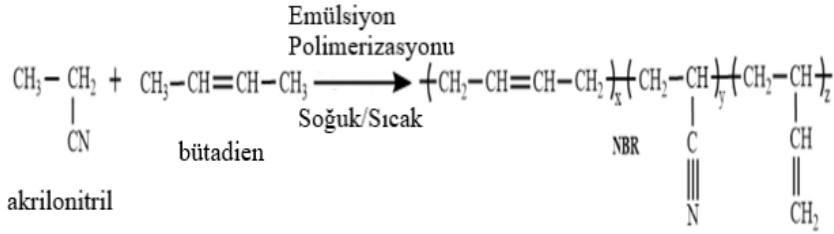
### Nitril Kauçuk (Akrilonitril - Bütadien Kauçuk (NBR))

Akrilonitril-bütadien kauçuğu, nitril kauçuğu olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 6' da polimer yapısı gösterilmektedir. Nitril kauçuk, bütadien (BE) ve akrilonitrilin (ACN) öncelikle düşük sıcaklıkta emülsiyon polimerizasyonu yoluyla oluşturulan doymamış bir kopolimerdir. NBR kauçuğu, bütadien ve akrilonitril monomerlerinin emülsiyon polimerizasyonu Şekil 7' de gösterildiği gibi üretilirler. Nitril kauçukta yüksek derecede polar nitril grupları (-CN) bulunmaktadır. Bundan dolayı NBR' nin moleküler zincirleri düşük esnekliğe, güçlü moleküller arası etkileşimlere, yüksek viskoziteye ve zayıf plastisiteye sahiptir. Bu doğrultuda viskoziteyi azaltmak ve işlenebilirliğini arttırmak için plastikleştiricilerin eklenmesi gerekir. Nitril kauçuk için yaygın olarak ester bazlı plastikleştiriciler kullanılmaktadır. Nitril kauçuğun polar yapısıyla iyi çözünürlük sergiledikleri, iyi uyumlulukları ve plastikleştirici etkileri nedeniyle yaygın olarak kullanılan ftalat esterlerdir. Ftalat

esterleri endüstriyel üretimde nitril kauçuk için plastikleştirici olarak sıklıkla kullanılırlar (Tang, Chang & Zhao, 2023).



Şekil 6. NBR ' nin polimer yapısı (Ayık, 2021)



Şekil 7. NBR'nin polimerizasyon süreci (Tang, Chang & Zhao, 2023)

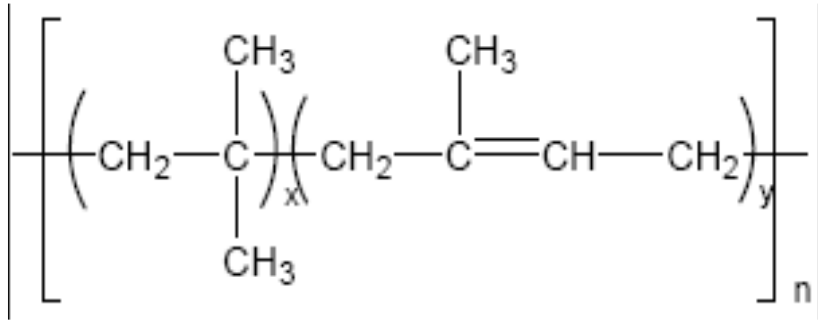
NBR kopolimerinde bulunan bütadien monomerinin işlevi, ilk olarak temel kauçuk özelliklerini sağlamaktır. İkinci olarak ise vulkanizasyon için çift bağları oluşturmaktır. NBR kopolimerinde bulunan akrilonitrilin işlevi de polar nitril grubu oluşturarak hidrokarbonlarda çözünürlüğü azaltmaktır. Bütadien manomeri, petrol ürünlerinin parçalanması sonucu meydana gelen gaz karışımının içinden ayrıştırılırken, akrilonitril manomeri ise propilen ve amonyak gazlarından elde edilmektedir (Kor Dayıoğlu, 2018).

Sentetik bir kauçuk olan NBR yapısında, bütadien monomerinin molce oranı %50-75, akrilonitril (ACN) monomerinin oranı ise %25-50 aralığında değişiklik göstermektedir. Kullanılacağı uygulama dikkate alınarak NBR tipi, ACN oranına göre seçilmektedir. Molce ACN oranının artması, mineral ve

bitkisel yağlara, yakıtlara ve aromatik hidrokarbonlara karşı dayanımı arttırmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek ACN oranlarında sertlik, mekanik dayanım, yoğunluk ve vulkanizasyon hızı da artmaktadır. ACN oranının azalması durumunda ise, düşük sıcaklık dayanımı ve gaz geçirgenliği artmakta, fakat mekanik özellikler olumsuz yönde etkilenmektedir (Yeşil, 2023).

### **Bütül Kauçuk (IIR)**

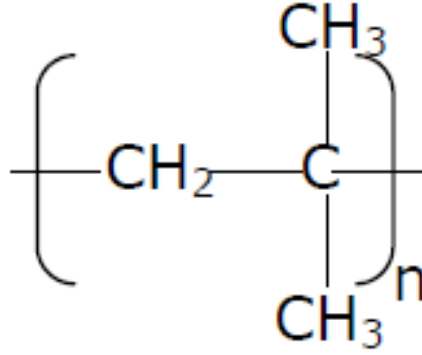
Bütül kauçuğu (IIR), izobüten ve izoprenin birlikte polimerizasyonu ile elde edilen ticari bir ürün, bir kopolimerdir. IIR' de ana bileşen İzobüten olup, İzopren monomeri reaksiyona %1-2 mol gibi çok düşük bir konsantrasyonda dahil olmaktadır (Tesser& ark., 2017). İzobütülen ve izopren polimerizasyonu metilen klorür çözeltisi içerisinde çözülmüş bulunan alüminyum klorür katalizörü etkisiyle -90 °C sıcaklıkta gerçekleştirilir. IIR' nin yapısı Şekil 8' de verilmektedir (Boşnak, 2010).



*Şekil 8. Bütül kauçuğun yapısı (Boşnak, 2010)*

IIR' nin moleküler ağırlığı genellikle 350000-400000 g/mol aralığındadır. IIR, düşük hava geçirgenliği, yaşlanmaya ve hava koşullarına karşı iyi bir direnç ve iyi visko-elastik özellikler gibi birçok istenilen özelliğe sahiptir. Çapraz bağlı IIR, organik solventler için yüksek bir emme kapasitesi sergiler ve basınca duyarlı sensörler olarak uygulama olasılığı vardır (Tesser& ark., 2017). Bütül kauçuğun yoğunluğu 0,863 g/cm<sup>3</sup>tür, "n" nin

polimerizasyon katsayısı olduğu bütül kauçuk polimerinin kimyasal bağları ve yapısı Şekil 9’ da verilmektedir (Öztan, 2011).



*Şekil 9. Bir bütül kauçuk mersinin kimyasal yapısı*

Kimyasal eylemsizlik, gazlara karşı geçirimsizlik ve hava koşullarına mükemmel dayanıklılık gibi benzersiz özelliklerinden dolayı IIR, otomobil lastiğinin iç astarında, yapıştırıcı üretiminde, bazı ekipmanların korunmasında ve sızdırmazlığında vb. kullanılır (Bhowmick, Banerjee & Kotal, 2016).

### **Bromlu Bütül Kauçuk (BIIR)**

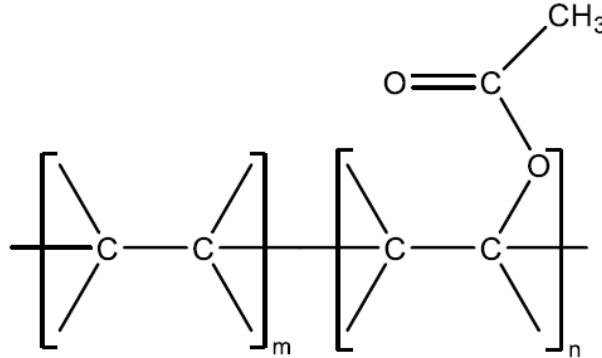
Bromlu bütül kauçuğu, bütül kauçuğun brom ile reaksiyona girmesiyle elde edilen bir bütül kauçuğu türevidir. BIIR, IIR’ ye kıyasla artırılmış sertleşme reaktivitesi, doymamış polimerlerle daha yüksek uyumluluk ve gelişmiş yapışma ve daha yüksek termal stabiliteye sahiptir. BIIR, bromun yaklaşık 50 °C’ de n-heksan içinde çözülmüş bir bütül kauçuğu ile reaksiyona sokulmasıyla hazırlanmaktadır (Tesser& ark., 2017).

Sıvı brom kullanılarak bir çözelti işleminden yapılan halojenlenmiş IIR'nin bir ürünü olarak bromlu bütül kauçuk (BIIR), yalnızca IIR'nin birçok mükemmel performansını korumakla kalmaz, aynı zamanda kürlenme aktivitesini ve doymamış kauçuklarla uyumluluğunu da geliştirir. BIIR'deki alilik bromür,

kükürtle kürlenmiş formülasyonların vulkanizasyon oranlarını artırır ve BIIR' nin peroksitlerle kürlenmesini mümkün kılar (Zhang& ark., 2017). BIIR' ler öncelikle lastik üretiminde, lastik iç astarları ve lastik yanaklarının üretiminde ve ayrıca lastik sırtlarında kullanılır. Aynı zamanda BIIR' ler tank astarları, konveyör bantları ve koruyucu giysiler gibi kimyasallara, hava koşullarına ve ozona karşı iyi direnç gerektiren kauçuk ürünler için de uygundur (Tesser& ark., 2017).

### Etilen - Vinil Asetat (EVA)

Etilen – vinil asetat (EVA), polar olmayan polietilen (PE) ile polar polivinil asetat (VA grubu) kopolimeridir. Yüksek basınç altında sürekli polimerizasyon yöntemi ile elde edilmektedir. EVA özellikleri, VA oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Ramazani, Bahmanyar & Baniasadi, 2015). EVA için VA oranlarına bakıldığında; % 40' tan az VA oranına sahip EVA, termoplastik bir malzemedir. % 40 ila % 70 arasında VA oranına sahip EVA kauçuk bir hal almaktadır. % 70' ten fazla VA oranına sahip EVA ise sıcakta eriyen yapışkan bir hal almaktadır (Huang & ark., 2023). Şekil 10' da EVA' nın kimyasal yapısı verilmektedir.



Şekil 10. EVA' nın kimyasal yapısı

EVA, iyi fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle mükemmel bir yalıtım malzemesi olarak başta kablo endüstrisi

olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır (Li & ark., 2023). EVA, iyi işlenebilirlik ve kalıplanmış parçalarda artan sertlik, yırtılma ve tokluğa karşı yüksek direnç ve nem bariyeri özellikleri nedeniyle ambalaj endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ramazani, Bahmanyar & Baniyasi, 2015).

## **Sonuç**

Sismik izolatörlerin yapısı, yalnızca yüksek dikey taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda büyük yatay kesme deformasyonu meydana geldiğinde iyi enerji dağıtma kapasitesi ve stabilite gerektirir. Doğal kauçuk, sönümlenme özelliği, düşük maliyeti ve kullanılabilirliği açısından uzun yıllardan beri sismik izolatör malzemesi olarak kullanılmaktadır. Farklı türde elastomerlerin eklenmesi ve yeni kauçuk reçetelerinin geliştirilmesi ile doğal kauçuğun sönümlenme özelliklerinin artırıldığı sonucuna varılmıştır.

Kauçuk izolasyon mesnetlerinin enerji dağıtma kapasitesini arttırmak için iyi uygulanabilirliğe ve yüksek sönümlenme özelliklerine sahip yeni bir kauçuk malzeme bulmak önemlidir. Genel olarak, iki veya daha fazla tipte kauçuğun harmanlanması, tek tek bileşenlerin özelliklerinden üstün özelliklere sahip kauçuk karışımlarının hazırlanması ve geliştirilmesi için yararlı ve önemli bir yoldur. Bunun ayrıca sönümlenme ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi açısından da faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle, uygun bir yüksek sönümlü kauçuk malzeme bulmak, yüksek sönümlü izolasyonlu mesnetlerin hazırlanmasının anahtarıdır.

Sonuç olarak, normal kauçuklu izolatörler ile karşılaştırıldığında, yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerde yüksek sönümlenme özelliklerine sahip kompozit kauçuk malzemelerin kullanılması daha iyi sönümlenme performansı sağlayacaktır. Sönümlenme özelliği yüksek ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş kauçuk karışımlarının kauçuk izolatörler alanında büyük potansiyel oluşturmasını sağlayacaktır.

## Kaynakça

Akyar, E. (2022). Kauçuk Sektöründe Bor İçeren Alev Geciktiricilerin Kullanımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Ayık, S. (2021). Ticari Olarak Üretilip Satılan Kauçukların Karakterizasyon Parametrelerin Belirlenmesi. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Bhowmick, A. K., Banerjee, S. S. & Kotal, M. (2016). Functionalized Graphene with Polymer As Unique Strategy in Tailoring The Properties of Bromobutyl Rubber Nanocomposites. Polymer 82, 121e132.

Boşnak, B. (2010). Kauçuktan Yarı Mamül Üretim Teknolojileri. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Çatlıoğlu, O. (2021). Earthquake Performance and Project Budget Comparison of A Conventional Building and A Seismically Isolated Building. Istanbul Technical University, Disaster Management Institute Earthquake Engineering Programme.

Dağdeviren Akan, G. (2022). Farklı Vulkanizasyon Sistemlerinin EPDM Kauçukların Pişme Etkinliğine, Fiziksel ve Dinamik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Hu, Y., Tang, Z., Yu, Q., Guo, M., Liu, P., Zhang, S., Guo, B., Zhou, G. (2023). Dual Functions of Inverse Vulcanized Copolymers As Both Vulcanizator and Interfacial Modifier for Improving The Mechanical Properties of Silica Reinforced Rubber Composites. Composites Science and Technology 239 (2023) 110075.

Huang, X., Du, C., Chen X. & Li, G. (2023). Investigations of The Improved Insulation Properties of Flame-Retardant Ethylene



Vinyl Acetate Copolymer in The Presence of Nanocalcined Kaolin. *Polymer Bulletin*, <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04796-4>.

James, M. H. & Guth, E. (1943). Theory of The Elastic Properties of Rubber. *Tile Journal of Chemical Physics* Volume 11, Number 10 October, 1943.

Kor Dayıoğlu, A. (2018). Vulkanizasyon Parametrelerinin Doğal Kauçukların Çapraz Bağ Yoğunluğu ve Malzeme Ömrü Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.

Li, D., Hu, F., Cheng, B., Cong, K., Zhang, W., Qin, Z. & Yang, R., (2023). Enhancing Char Formation and Flame Retardancy of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer (EVA)/Aluminum Hydroxide (ATH) Composites by Grafting Ladder Phenyl/Vinyl Polysilsesquioxane (PhVPOSS). *Polymers* 2023, 15, 3312.

Lu, Y. L., Li, J. C., Zhang, H. S., Zhao, X. Y., Jiang, J. G., Wu, Y. X., Zhang, L. Q. & Nishi, T. (2019). Development of High Damping Natural Rubber/Butyl Rubber Composites Compatibilized by Isobutylene-Isoprene Block Copolymer for Isolation Bearing. *eXPRESS Polymer Letters* Vol.13, No.8, 686–696.

Öztan, Ç. Y. (2011). Production of Ultra High Molecular Weight Poly-Ethylene / Butyl Rubber Fibers via Electrospinning. *Boğaziçi University, Graduate Program in Mechanical Engineering*.

Rahman, A. N., Kanafi, M. N., Ghani, A. A., Aziz, A. A. & Sapuan, S. M. (2023). A Review of Self-Healable Natural Rubber Based on Reversible Bonds: Fundamental, Design Principle and Performance. *J Mater Sci* (2023) 58:608–635.

Ramazani, A., Bahmanyar, M. & Baniasadi, H. (2015). Preparation and Properties of Ethylene Vinyl Acetate/Linear Low Density Polyethylene/Graphene Oxide Nanocomposite Films. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, doi: 10.1080/03602559.2014.1003231.

Ramesan, M. T. & Parvathi, K. (2023). Effect of Titanium Dioxide on The Structural, Thermal, and Electrical Properties of Chlorinated Natural Rubber/Poly (İndole) Blend Nanocomposites for Flexible Nanoelectronic Devices. *Journal of Applied Polymer Science*; 140: e53621.

Soyubol, B. (2006). Elastomerlerin Statik ve Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Tang, L., Chang, X. & Zhao, Y. (2023). Molecular Simulation of The Effect of Dioctyl Phthalate on The Properties of Nitrile Rubber. *Materials Today Communications* 37 (2023) 106983.

Tesser, R., Vitiello, R., Turco, R., Santacesaria, E., Compagnone, G. & Di Serio, M. (2017). A Critical Review on Analytical Methods and Characterization of Butyl and Bromobutyl Rubber. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*.

Tian, Y., Liu, Y. & He, M. (2013). High Damping Properties of Magnetic Particles Doped Rubber Composites at Wide Frequency. *Mater. Res. Bull* 48, 2002–2005.

Wang, W., Zhao, X., Yang, J., Zhao, D., Lu, Y., Zhang, L. & Nishi, T. (2015). Natural Rubber/Nitrile Butadiene Rubber/Hindered Phenol Composites with High-Damping Properties. *International Journal of Smart and Nano Materials*, Vol. 6, No. 4, 239–250.

Wang, W., Zhao, D., Yang, J., Nishi, T., Ito, K., Zhao, X. & Zhang, L. (2016). Novel Slide-Ring Material/Natural Rubber Composites with High Damping Property. *Scientific Reports* | 6:22810 | DOI: 10.1038/srep22810.

Wu, S. Z., Song, M., Zhao, X. Y., Chan, W. T. & Zhang, L. Q. (2015). Microstructure and Dynamic Properties Analyses of Hindered Phenol AO-80 / Nitrile – Butadiene Rubber / Poly (vinyl

chloride): A Molecular Simulation and Experimental Study. *Macromolecular Theory and Simulations*, 24, 41–51.

Yeşil, B. N. (2023). Nitril Kauçukta Lignin Etkisi ve Epokside Doğal Kauçuk Esaslı Malzemelerde Lignin ve 1,3-Bis(Sitrakonimidometil)Benzen ile Kendi Kendini Onarma. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Zaoui A., Zairi F. & Yan Z. (2023). Physical and Mechanical Properties of Vulcanized and Filled Rubber at High Strain Rate. *Chinese Journal of Physics* 86 (2023) 12–23.

Zhang, Y., Wang, J., Pan, S. & Guo, S. (2017). Crosslink Network Evolution of BIIR/EPDM Blends During Peroxide Vulcanization. *Polymer Testing* 59 (2017) 253e261.

Zhang, Y. W., Lei, T., Kuang, D. L. & Yang, Y. R. (2019). Preparation and Properties of Rubber Blends for High-Damping-Isolation Bearings. *Polymers*, 11, 1374.

Zhao, X. Y., Xiang, P. & Tian, M. (2007). Nitrile Butadiene Rubber/Hindered Phenol Nanocomposites with Improved Strength and High Damping Performance. *Polymer* 48, 6056–6063.

Zhao, X., Guo, B., Wang, J., Wang, W., Geng, X., Zhang, L., Nishi, T. & Hu, G. H. (2018). Significantly Improving Strength and Damping Performance of Nitrile Rubber via Incorporating Sliding Graft Copolymer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.

## BÖLÜM III

### Enerji Sönümlemesi Esasına Dayalı Güçlendirme Yöntemleri

**Samet TOSUN<sup>1</sup>**

#### **Giriş**

Dünya nüfusunun büyük bir oranı deprem tehdidi altında yaşamaktadır. Geçmiş olduğumuz yüzyılda ortalama yılda 20.000 insan depremler sonucu hayatını kaybetmiştir. Bunun %90'ı gelişmekte olan ülkelerdedir. Depremi önlemek mümkün değildir fakat depremin öldürücü etkisinin azaltmak mümkündür (Tsang, 2009).

Deprem esnasında açığa çıkan enerji, yeraltı katmanlarından geçerek yapının temeline ulaşır ve yapıda değişik doğrultularda hareketlere neden olarak taşıyıcı sistemde ivmeler oluşturur. Bu

---

<sup>1</sup> Samet TOSUN, Öğr. Gör., Doktora Öğrencisi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0002-5454-3057 samet.tosun@gop.edu.tr

ivmeler, taşıyıcı sistem içinde,  $F=m.a$  ilişkisine bağlı olarak, kuvvetlerin oluşmasına neden olur. Bu kuvvetlere eylemsizlik kuvveti adı verilir. Yapı, deprem davranışı esnasında değişik şekillerde enerji tüketir. Yapı deprem enerjisini tüketirken, dinamik yatay ötelenmeler yapan taşıyıcı sistem, “salınım modları” oluşturur. Deprem etkisi altında yapı kendine özgü bir periyot oluşturarak dinamik tepki gösterir (Atımtay, 2000).

Salınım yapan bir sistemin viskoz, histeretik ve sürtünme yolu ile enerjii dağıtmasına sönümleme denir. Sönüm oranı ne kadar yüksek ise yapı ilk konumuna (hereketsiz durumuna) o kadar çabuk döner. Salınıma başlayan bir sistemin hareketsiz durumuna geri dönmesini sağlayan sönümlemedir. Sönümlemenin olmaması demek titreşen sistemin durmaması anlamına gelir.

Yapının dinamik analizinde, sönümlemeye katkı yapan tüm etkilerin toplamı “kritik sönüm” ün bir oranı olarak ifade edilir. Sönümleme oranları taşıyıcı sistemin tipine göre değişir. Betonarme yapılar için yaygın olarak 0,05 değeri kullanılır (Atımtay, 2000).

Depreme karşı yapıların tasarımında geleneksel yaklaşım, her yapı elemanının sismik kuvvetlere direnç gösterebilecek dayanıma sahip olması ve sismik enerjii yutacak yeterli süneklik kapasitesini sağlamasıdır. Bu tasarım felsefesi benimsendiğinde, çok büyük bir enerji yapı tarafından yutulur ve bazı yapı elemanları çok büyük plastik deformasyon yapar. Bu yüzden modern yapı kontrol teknikleri kullanılarak binaların depreme karşı korunması son zamanlarda hızla yaygınlaşmıştır.

Yapıya gelen deprem kuvvetlerinin azaltılması için özel yapı elemanlarının kullanılması gerekir. Bu elemanlar sismik yalıtım ve enerji sönümleme yoluyla yapının titreşimini kontrol altına almaktadır (Ristik, 1993).

Enerjinin dağıtılması ve yutulması aşağıda verilen dışsal ve içsel etkenlere bağlıdır:

1. Enerjinin sönümleme nedeni malzeme viskozitesidir. Bu işlem deformasyonların zamana göre değişim oranına (hıza)

bağlıdır. Bu tür sönülemeye malzeme sönümü de denilmektedir. Viskoelastik sönümleme bu gruba girer.

2. Enerji sönümlemesi, malzemede çevirimsel bir inelastik davranışı ve bazı artık deformasyonları sağlayarak davranışın sonlanmasını sağlar. Enerji dağıtmayı sağlayan çevirimsel inelastik deformasyon bir histeretik döngü biçimindedir. Ve artık deformasyonlar, yutulmuş enerjinin miktarını gösterir. Bu işlem genellikle histeretik sönümleme olarak adlandırılır.

3. Enerjinin dağıtılması, birbiri ile esnek olarak temas halindeki iki malzemenin hareket etmesi ile sürtünmenin aşılması sonucu sağlanır. Sürtünme kuvveti büyüklüğünün sabit olduğu Coulomb sönümü bu duruma girer. Yapısal sönümleme daha genel sürtünme sönümlemesi mekanizmasıdır ki, bu değişken sürtünme kuvveti büyüklüğüne izin verir.

4. Enerji dağıtma, yapı ile onun çevresel unsurları arasındaki etkileşiminden ortaya çıkar. Yapının rölatif hareketi, harekete karşı koyan ve yapıdan enerjiyi çıkartan kuvvetleri üretir (Connor, 2000).

Enerjinin dağıtılması ve yutulması sönümleyici aygıtların kullanımı ile artırılabilir. Sönümleme aygıtları yapı içinde doğal enerji dağıtma ve yutma kapasitesini sağlayacak biçimde muhtelif yerlere yerleştirilir. Mekanizmaları pasif veya aktif olabilir. Pasif mekanizmalılar dışsal bir enerji harcaması gerektirmezler. Oysaki aktif mekanizmalılar dışsal bir enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar. Pasif mekanizmalılar viskoz sönümleyicileri, sürtünme sönümleyicileri, histeretik sönümleyicileri, ayarlı kütle sönümleyicileri (TMD) ve ayarlı sıvı kütle sönümleyicileri (TLD) kapsar. Aktif sönümleme yapıya farklı zaman aralıklarında dışsal bir kuvvet uygulanarak başlanır. Uygulanacak kuvvetin büyüklüğü, kontrol algoritmalarına göre ayarlanır (Connor, 2000).

Pasif sönümlemede enerji tepki yoluyla atılır. Dolayısıyla stabiliteyi bozacak davranışa neden olmaz. Aktif sönümleyiciler dışsal bir enerji kaynağını içerirler. Burada sistem stabilitesini bozacak bir potansiyel mevcuttur. Stabiliteyi bozmayacak

miktardaki gerekli dışsal enerji ile çalışan aygıtlar da mevcuttur. Bunlar yarı aktif sönümlenme sistemi olarak adlandırılır (Connor, 2000).

Günümüzde sönümleyicilerin üç ana kategoride uygulamaları mevcuttur:

- a. Viskoelastik ve viskoz sönümleyiciler,
- b. Metalik sönümleyiciler,
- c. Sürtünmeli sönümleyiciler (Connor, 2000).

Yapıya ilave edilmiş viskoz sönümleyiciler yapı ve deprem parametrelerine göre değişen %25-35 civarında bir kritik sönümlenme sağlayabilir. Bu da yapıdaki deprem etkisini önemli bir derecede azaltır. Viskoz sönümleyici, monte edildiği bir yapıda kat ivmelerini ve katlar arası ötelenmeyi %50 den daha yüksek oranda azaltabilmektedir. Viskoz sönümleyiciler kuvvetin yarattığı etki ile bir delikten sıvıyı iterek enerjiyi dağıtır (Chopra, 2001).

Bu sönümleyicilerde kuvvet, hareketle birlikte ortaya çıkar. Kuvveti veren eşitlik  $F=CVn$  şeklindedir. Burada F kuvveti, V hızı, n piston biçimine bağlı olarak 0,3 ile 1,0 arasında değişen üs sabitini ve C ise silindir çapı ve ağız alanına bağlı olarak değişen sönümleyici sabitini simgelemektedir (Kelly, 2001).

Kelly'nin yaptığı araştırma çalışmalarına göre viskoz sönümleyicilerin seçiminde kullanılabilecek birkaç genel kuraldan bahsetmek mümkündür. Viskoz sönümleyiciler bütün yapılar için verimlidir. Kat ötelenmesinde orta derecede bir azaltma (en az %15) amaçlanmış ise 5 katlı yapı için, 3 veya 10 katlı yapıya nazaran daha küçük bir sönümlenme sabiti gereklidir. %30 oranında veya daha fazla bir azaltma için artan yapı periyodu ile birlikte sönümlenme sabiti artırılmalıdır. Kat ağırlığının en az %16 sı kadar sönümlenme kuvveti sağlayacak şekilde yüksek sönümlenme sabiti gereklidir. Bazı durumlarda bu değer %70'e kadar çıkabilir.

Burulma düzensizliği özellikle asimetric plana sahip bir yapının deprem davranışı açısından oldukça önemli bir faktördür.

Burulma etkisi çeşitli nedenlerle ortaya çıkabilir. Burulmaya neden olan genellikle kütle ya da rijitlik dağılımındaki dengesizliktir. Aslında ideal ölçüde düzenli bir yapı neredeyse yok gibidir. Mimari bir zorunluluk olarak geometrik düzensizlik uygulamada çok sık karşılaşılan bir durumdur (Gülay vd., 2003). Burulma düzensizliği yapıyı kendi düşey eksenini etrafında dönmeye zorlayarak kolonlarda ek kesme kuvveti oluşmasına neden olur. Bu ek kuvvet düzensizliğin seviyesine göre baskın bir davranış ögesi haline gelebilir.

Dinamik etkilere karşı tasarıma yönelik yeni yaklaşımlar esas olarak aktif, pasif ve yarı aktif olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir. Aktif kontrol sistemlerinde kontrol kuvvetlerini üretebilmek için harici bir güç kaynağına ihtiyaç vardır. Zemine ve yapıya yerleştirilen sensörler aracılığıyla elde edilen bilgiler kontrol bilgisayarına iletilerek daha önceden belirlenmiş bir algoritmaya göre kontrol kuvvetleri hesaplanır. Bu kuvvetler kuvvet üreten mekanizmalar (actuator) aracılığıyla yapıya uygulanır. Pasif kontrol sistemleri ise harici bir güç kaynaklarına ihtiyaç duymazlar ve sismik enerjii kendi içlerinde sönmeler. Değişken dinamik etkilere adaptasyon kabiliyeti olmayan bu sistemler çalışma prensipleri ve malzeme özellikleri itibari ile farklılıklar gösterir. Sönümleyicileri yapıya farklı şekillerde yerleştirmek mümkündür. Yapıya eklenecek sönümün optimum miktarı ve bu sönümün yapı yüksekliği boyunca optimum dağılımı ayrı bir inceleme konusudur.

Yarı aktif kontrol sistemleri sönüm ve rijitlikleri deprem esnasında kontrol edilebilen sistemlerdir. Aktif kontrolde büyük enerji ihtiyacı olmakla birlikte, yarı aktif sistemlerde gereken enerji çok küçük bataryalarla bile sağlanabilmektedir. Yarı aktif sistemlerin büyük bir kısmı elektrik veya manyetik alana hassas özel sıvılar içermektedir. Önceden belirli kontrol algoritmalarına bağlı olarak elektrik veya manyetik alan şiddeti değiştirilerek yarı aktif sistemlerin mekanik özellikleri kontrol edilebilmektedir. Karma sistemler; aktif, yarı aktif ve pasif kontrol sistemlerinin bir arada kullanılması durumudur. Örneğin, çelik bir yapı visko-elastik sönümleyiciler ile donatılmış ve buna ek olarak aynı zamanda en üst katta aktif kütleli sönümleyici yerleştirilmiş olabilir. Benzer şekilde,



bazı yapılara tabanda sismik izolatörler yerleştirilmiş ve izolatör seviyelerinde büyük genlikli hareketlere karşı bu bölgelerde yarı aktif veya pasif olarak çalışan sönümleyiciler eklenmiş olabilir. Karma sistemler yüksek enerji ihtiyacı olmadan çalışabilmektedir. Aktif, yarı aktif ve pasif sistemlerin geliştirilmesi ve yapı içinde kullanımına yönelik çalışmalarda son yıllarda ciddi bir artış vardır (Soong vd., 1997).

## **Enerji Sönümleyiciler**

Dinamik etkilere maruz yapılardaki titreşim enerjisi esas olarak iç sürtünme ve plastik deformasyonlar ile yok edilmektedir. Yapının enerji yutma kapasitesi ne kadar fazla ise titreşimin genliği de o kadar küçük olmaktadır. Tipik çelik yapılarda sönüm oranı %2, betonarme yapılarda ise %5 civarındadır. Titreşimin genliğini azaltmak için yapının enerji yutma kapasitesini artırmak gerekmektedir. Geleneksel yapılarda elemanların kütle ve rijitlik özellikleri belli bir doğruluk derecesi ile modellenenmektedir. Sönüm özelliklerini ise, yapısal elemanların enerji yutma kapasitelerindeki ve ideal olmayan birleşim noktalarının davranışlarındaki belirsizliklerden dolayı karakterize etmek oldukça zordur. Sonuç olarak, analizi basitleştirmek için genelleştirilmiş formda sönümü orantılı olarak kabul etmek yeterli görülmektedir. Bugün, mevcut yapı analizi programları ve tasarım yöntemleri genellikle orantılı sönümü kabul etmektedirler. Pasif enerji sönümleyicili sistemler sönüm, rijitlik ve dayanımı artırıcı özellikteki malzemelerden oluştuğundan, bunlar hem yeni yapılacak yapılarda hem de yaşlı ilerlemiş yapıların veya hasarlı yapıların rehabilitasyonu için de kullanılabilirlerdir.

## **Metalik Sönümleyiciler**

Sismik enerjiyi sönümlemenin yollarından biri metallerin elastik olmayan davranışını kullanmaktır. Bu amaç için tasarlanan sistemlerin çoğunda dikdörtgen, üçgen veya X şeklinde yumuşak çelik levhalar kullanılmış ve gerilmelerin malzeme içerisinde mümkün olduğu kadar düzenli dağılmasına dikkat edilmiştir.

Metalik sönümleyicilerin bir yapı sisteminde kullanılması için teorik ve deneysel çalışmalara bağlı olarak kazanılan bilgilerin ışığında hazırlanacak yönetmeliklere ihtiyaç olmuştur. Bazı araştırmacılar metalik enerji yutan elemanların tasarımı için yapının hareket denkleminde metalik elemanların çevrimsel kuvvet-deplasman ilişkilerini katarak, birtakım dizayn metotları geliştirmişlerdir. Metalik enerji sönümleyici elemanların özellikle çelik yapılara uygulamaları daha kolaydır.

### **Sürtünme Tipi Sönümleyiciler**

Sürtünmenin de diğer enerji yutma mekanizmaları gibi oldukça etkili olduğu bilinmektedir ve yıllardır otomobil frenlerinde kinetik enerjiyi absorbe etmek için kullanılmaktadır. Sürtünme tipi sönümleyicilerin farklı mekanik ve malzeme özellikleri ile pek çok çeşidi geliştirilmiştir. Sönümleyicinin sürtünme katsayısını yapı ve sönümleyicinin ömrü boyunca koruyabilmesi için uygun malzemeler geliştirilmiştir. Pall sönümleyicileri, X şekilli çubuklardan oluşan ve sürtünme prensibini kullanan sönümleyicilerdendir. Bu sönümleyiciler rüzgar yükleri altında ve orta şiddetli depremlerde kaymayacak şekilde dizayn edilmiştir. Şiddetli deprem yükleri altında birincil yapı elemanlarında akma olmadan, daha önceden tanımlanan optimum bir yükte sönümleyici kaymaya başlamaktadır.

Bütün sürtünme tipi sönümleyicilerin sürtünme yüzeylerinde kullanılan malzemeler; çelik üstüne çelik, çelik üstüne pirinç veya paslanmaz çelik üzerine grafit ile kaplanmış bronzdan oluşmuştur. Sürtünme yüzeyinin yapısı sönümleyicinin ömrü açısından oldukça önemlidir. Mesela, düşük karbon alaşımli çelikler zamanla korozyona uğrayarak sürtünme yüzeyini değiştirebilmektedir. Pirinç veya bronz kaplama, düşük karbonlu çeliğe sürekli değdiği zaman korozyonu daha da artırmıştır. Yüksek krom içeren çelikler, pirinç veya bronz ile temas ettiğinde korozyon oluşturmamıştır.

Son yıllarda, sürtünme tipi sönümleyiciler yeni yapılar ve güçlendirilmesi gereken yapılarda sismik performansı artırmak için

kullanılmıştır. Pall tipi sönümleyiciler Kanada'da kullanılmıştır. Japonya'da, Omiya şehrindeki 31 katlı çelik yapıya Sumitomo tipi sönümleyiciler eklenmiştir.

## **Visko-Elastik Sönümleyiciler**

Enerjiyi absorbe etmek için kullanılan visko-elastik katı malzemeler de mevcuttur. Bu visko-elastik malzemelerin hem rüzgar yüklerine karşı hem de sismik etkilere karşı uygulamaları yapılmıştır. Visko-elastik malzemeler uçak çerçevelerinin titreşimini kontrol etmek için 1950'lerde kullanılmaya başlamıştır. İnşaat mühendisliğindeki ilk uygulama 11 Eylül saldırılarında yıkılan çelik taşıyıcı sistemli Dünya Ticaret Merkezinin İkiz Kulelerinde (1969) yapılmıştır. Rüzgar titreşimlerini azaltmak için yaklaşık olarak 10.000 adet visko-elastik sönümleyici monte edilmiştir. İnşaat mühendisliği yapılarında kullanılan visko-elastik malzemeler, tipik karbon polimerleri veya ona benzer katı maddelerden oluşmaktadır. Görüldüğü gibi visko-elastik malzeme çelik levhalar arasına yerleştirilmiştir. Visko-elastik sönümleyiciler, visko-elastik tabakaların kayma deformasyonları ile enerjiyi sönümlemektedir. Visko-elastik malzemelerin dinamik yükler altındaki davranışları titreşim frekansına, deformasyona ve sıcaklığa bağlıdır. Visko-elastik sönümleyicilerin çelik yapılara uygulaması daha kolay olduğundan, Taiwan'ın Taipei şehrinde 2/5 ölçeğinde bir çelik yapıya visko-elastik sönümleyiciler eklenerek farklı deprem etkileri altında 30°C sıcaklıkta test edilmiştir (Soong vd., 1997). Sonuçlar göstermiştir ki, yapıya eklenen visko-elastik sönümleyiciler yapının sönüm oranını %12'lerin ötesinde artırmış ve test yapısının elastik olmayan düktilite gereksiniminin düşmesinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. 11 Eylül deki terör olayları sonucu yıkılan Newyork'daki Dünya Ticaret Merkezinden sonra başka binalarda da visko-elastik sönümleyiciler kullanılmıştır. 1980'lerde Seattle'daki Columbia Sea First ve Two Union Square yapılarında rüzgara bağlı titreşimleri düşürmek için bu sönümleyiciler kullanılmıştır. Bu yapılarda çelik kolonlar yüksek mukavemetli beton ile sarılmıştır. Taiwan'ın Taipei şehrinde 1994

yılında, Chien-Tan demiryolu istasyonun çatısında rüzgardan kaynaklanan titreşimleri düşürmek için yine visko-elastik sönümleyiciler kullanılmıştır. Bunun yanında, California San Jose'de 13 katlı çelik Santa Clara County binasında ve San Diego'da ilk olarak 3 katlı bir betonarme yapıda, visko-elastik sönümleyiciler sismik güçlendirme için kullanılmıştır.

### **Viskoz Akışkanlı Sönümleyiciler**

Viskoz akışkanlı sönümleyiciler esas olarak uygulamada 3 çeşittir. Birinci uygulamada viskoz akışkan içi boş çelik bir duvar içine doldurulduktan sonra akışkan içine batırılan bir metal levha üst döşemeye bağlanır. Deprem anında katlararası rölatif deplasmanlar nedeniyle levhanın viskoz ortamdaki hareketi sismik enerjiyi kısmen sönümler. Japonya'nın Shizuoka şehrinde çelik taşıyıcı sistemli SUT binasında 170 adet sönüm duvarı kullanılarak yapı mukabelesinde yaklaşık %70-80 oranında azalma elde edilmiştir.

Diğer uygulamada viskoz akışkan, içinde pistonun hareket ettiği bir silindir içine doldurulmuştur. Pistonun yüksek viskoziteli akışkan içerisinde hareketi neticesinde mekanik enerji ısı enerjisine dönüşür. Bu sisteme en güzel örnek olan performansı çeşitli mühendislik alanlarında denenmiş viskoz akışkanlı sönümleyicilerdir. Viskoz akışkanlı sönümleyicinin en önemli üstünlüğü en genel halde altı serbestlik dereceli sönümleme yapabilmesidir. Üçüncü uygulamada viskoz akışkanın yerel deformasyonu yerine akışkan belirli kanallardan geçmeye zorlanarak istenen enerji sönümü gerçekleşir.

### **Ayarlı Kütle Sönümleyicileri (TMD)**

Esas yapıya birbirine paralel yay ve viskoz sönümleyici yardımıyla bağlanan kütleyle ayarlı kütle sönümleyici (TMD) denmektedir. TMD parametreleri uygun şekilde seçilerek yapının istenen titreşim moduna ayarlandığı takdirde o moddaki titreşim enerjisinin bir kısmının TMD ye akışı sağlanarak esas yapının titreşim enerjisi azaltılır.

TMD'lerin yerleştirildiği ilk yapı Avustralya'nın Sydney şehrindeki çelik taşıyıcı sisteme sahip Centerpoint gökdelenidir. Amerika Birleşik Devletlerinde TMD'lerin yerleştirildiği iki binadan birisi Newyork'da taşıyıcı sistemi çelik olan Citicorp Center, diğeri ise Boston'da John Hancock gökdelenidir. Japonya'da ise ilk TMD yine çelik taşıyıcı sistemli Chiba Port gökdelenine yerleştirildikten sonra bunu Osaka'da Funade Bridge gökdeleni, Kimitsu şehrindeki çelik bacalar ve diğeri izlemiştir. TMD 'ler ise pek çok köprüde, Dubai'de Burj Al Arab otelinde ve Emirates kulelerinde kullanılmıştır.

### **Sönümlendirici Cihazlar (Damper Sistemler)**

Deprem, sert rüzgârlar, makinelerin, trafiğin ve benzeri nedenlerin binalarda oluşturacağı olumsuz etkilerin kontrolünü sağlamak amacıyla geliştirilmiş sistemdir. Sismik yalıtım sistemlerinde enerji sönmümlendirme özelliğinin artırılması amacıyla kullanılan cihazlar, çeliğin plastik deformasyonu sırasında dinamik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürür. Oldukça yeni olan bu sistemin sağladığı teknik avantajları şu şekilde sıralayabiliriz;

\* Yapıların deprem ve rüzgâr gibi yatay etkilerine karşı korunması,

\* Yapının dinamik enerji sönmümlendirme özelliğinin geliştirilmesi,

\* Sismik yalıtım cihazları ile birlikte kullanılarak söz konusu cihazların özelliklerinin geliştirilmesi.

Yapıdaki yatay hareketleri minimuma indirmek ve yatay deprem enerjisini sönmümlendirmek amaçlı kullanılan bu sistem, yatay rijitlik sağlaması beklenen akslara (kiriş ortalarına) yerleştirilir. Hidrolik esaslı sıvıların sıkışması prensibine dayanarak çalışan cihazlar yatay yükleri sönmümlediklerinden, rijit bağlantılardan daha kullanışlı ve elverişlidir (Shen vd., 1995).

Damper sistemler aşağıda belirtilen özel kullanım avantajlarına sahiptirler.

- \* Değişik kullanımlar için geniş bir model yelpazesi
- \* Etkili çalışan ve pahalı olmayan malzemeler
- \* Kolay ve çabuk montaj
- \* Kurulu olduğu yerde kontrol edebilme ve yeniden ayarlayabilme imkânı
- \* Basit fakat şık bir tasarım
- \* Yapılardaki büyük yer değiştirmeleri idare edebilme kapasitesi
- \* Yüksek can güvenliği
- \* Yapının taşıyıcı sistemi ve mimari elemanlarından minimum deprem hasarı
- \* Şiddetli depremlerden sonra bile hemen kullanım
- \* Yapının değerli eşya ve cihaz içeriğine etkin koruma
- \* Yapının tehlikeli içeriğine etkin koruma
- \* Yapıların operasyona minimum engelleme ile güçlendirilmesi
- \* Minimum bakım gereksinimi

### **Sönümlendirici Cihazların Kullanım Alanları**

Sönümlendirici cihazların kullanım alanlarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- \* Yüksek deprem performansı istenen tüm yapılar,
- \* Sismik yapı yalıtımı ile birlikte kullanıma uygun tüm yapılar,
- \* Yüksek yapılar,
- \* Köprüler.

### **Güçlendirme**

Betonarme binalarda güçlendirme, deprem yönetmeliğinin olmadığı zamanlarda, mevcut betonarme binalar sadece düşey yükler göz önüne alınarak tasarlanıyorlardı. Özellikle bu yönetmelik öncesi binalar yüksek hasar görebilirlik riski (düşük yatay yük taşıma kapasitesi ve sınırlı sünek davranış) taşımaktadır. Burkulması Önlenmiş Çaprazlar (BRB) mevcut yapıya, yüksek miktarda deprem enerjisinin sönmek için ikinci bir yatay yük taşıyıcı sistem olarak eklenebilir. BRB'ler sayesinde bina deformasyonları yapıya en az hasar verecek seviyeye indirmek için bina yüksekliği boyunca dağıtılabilir. Binaya ciddi bir ilave yük eklenmeden, kat rijitlikleri önemli ölçüde artırılabilir. Yapılan birçok çalışmada gözlemlendiği üzere, BRB uygulanmış güçlendirme projeleri, geleneksel yöntemlerle (perde ekleme, kolon mantolama) karşılaştırıldığında daha ekonomik ve daha performanslıdır.

Yeni betonarme binalar, Burkulması Önlenmiş Çaprazlar (BRB) yeni yapılan bina, köprü ve diğer mühendislik yapılarında orta ve yüksek şiddetli depremler altında üstün performans sergilemesi için uygulanabilir. BRB'ler aynı zamanda yüksek yapılarda "outrigger" çaprazı olarak deprem kuvvetlerinin düşey taşıyıcı sisteme transferinde başarı ile kullanılabilir. BRB ile yapısal maliyetlerin azalmasının yanı sıra, oluşması öngörülen hasarların kontrol altında tutulması sağlanabilir. Star Seismic tarafından üretilmiş olan BRB'lerin birden çok tasarım seviyesi depreme karşı başarılı bir performans sergilediği için, yüksek artçıları olan bir depremden sonra dahi değiştirilmesine gerek kalmamaktadır. Değiştirilmesi gerekse bile bu işlem hasar görmüş bir yapısal perdenin onarılmasından çok daha hızlı ve ekonomik bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

Çelik yapıların güçlendirilmesi, Burkulması önlenmiş çaprazlar (BRB) deprem kuvvetlerinin dikkate alınmadığı ya da günümüz koşullarına göre yetersiz olarak alındığı yapıların güçlendirilmesinde en uygun yöntem olarak öne çıkmaktadır. BRB'ler yapının rijitliğini, dayanımını, sünekliğini ve de sönmek oranını yükseltmektedir. BRB'lerin ilave çapraz sistemi olarak kullanılmasının en önemli artlarından biri de enerji

sönümlenme oranlarının, orta ve yüksek şiddetli depremlerde hem basınç hem de çekme için oldukça düzenli (stabil) olmasıdır. Yapılmış olan detaylı NTH analizleri de bu özellikleri kanıtlamaktadır.

Yeni tasarlanan çelik yapılar, son 10 yılda, yüksek deprem bölgelerinde tasarlanan bini aşkın çelik yapısında Burkulması Önlenmiş Çaprazlar başarı ile uygulanmıştır. BRB'ler sayesinde binanın deprem dayanım performansı ekonomik olarak en üst seviyelere çıkarıldığı gibi inşaat süreleri de kısalmaktadır. Uygun tasarlanmış BRB'li bir yapının büyük bir depremden sonra hizmetine kesintisiz olarak devam etmesi rahatlıkla beklenebilir. Yapısal, yapısal olmayan ve IT sunucuları, tıp ekipmanları gibi teçhizatların hasarları BRB'ler sayesinde minimuma indirilebilir.

Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çerçeveler (BRBF) geleneksel çaprazlı çerçevelere karşı yüksek enerji sönmeye sahip ekonomik bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Burkulmanın önlenmesi sayesinde aşağıda da görüldüğü üzere daha kararlı, oldukça sünek ve yüksek sönm oranlı bir davranış elde edilir.

Yukarıda yer alan kesitte üç temel öge sergilenmiştir:

- \* Çelik çekirdek
- \* Bağlantıyı engelleyen katman
- \* Manto

Bağlantıyı engelleyen katman, çelik çekirdek ile mantoyu birbirinde ayırmaktadır. Bu sayede çapraz gelen eksenel kuvvet sadece çelik çekirdek tarafından taşınmaktadır, Manto ise eğilme rijitliği sayesinde çelik çekirdeğin burkulmasına engel olmaktadır. Çelik çekirdek çaprazda oluşan tüm eksenel kuvveti taşımaktadır. Çelik çekirdek 3 kısımda incelenebilir:

Plastik davranış sergileyen orta kısım ve elastik kalan uç kısımlar. Uç kısımların elastik kalmasının sağlanması için kesit alanları arttırılmıştır. Bu sayede elastik ötesi davranışın orta kısımda



oluşması sağlanmış ve elemanın daha tahmin edilebilir bir davranış sergilemesi sağlanmıştır.

Karşılaştırmalı çalışmalar ve tamamlanmış imalatlar incelendiğinde Burkulması Önlenmiş Çaprazlı (BRB) sistemin ekonomik avantajları, aşağıdaki özellikler ile beraber görülmektedir.

Ekonomik tasarrufları

\* Yüksek enerji sönümleme oranı

\* Yüksek deprem yük azaltma katsayısı kullanımı

\* İndirgenmiş deprem yükleri

\* Düşük deprem talebi sayesinde daha küçük kolon ve kiriş kesiti kullanımı

\* Temelerde daha az kuvvet oluşumuna bağlı ekonomik temel tasarımı

\* Daha küçük ve uygulaması kolay birleşim detaylar

\* Daha az sismik hasar ve kayıp

\* Kolay ve hızlı imalat

\* Deprem güçlendirmede daha kolay uygulanabilir teknoloji

\* Deprem sonrası kolay inceleme ve gerektiği takdirde kolay yenileme

Yapılan testlerde BRB'lerin birden çok deprem ektisine, çok az hasar görerek karşı koyduğu görülmüştür. Ancak herhangi bir BRB'nin değişimi gerektiği takdirde BRB elemanları yapısal perde, çerçeve, kolon, kiriş veya eksantrik çaprazların bağlantı elemanlarına nazaran çok daha kolay ve ekonomik olarak değiştirilebilmektedir.

## **Sonuç ve Değerlendirme**

Sönümleyicili (damper) sistemlerin genel olarak sisteme etkilerini kısaca şu şekilde sıralayabiliriz. İlk olarak sönümleyicinin

etkisinden dolayı T periyodunda azalma gözleniyor, damperler sert zeminlerde taban izolasyonu kadar etkili olmasalar da, yapıya etkileyen taban kesme kuvvetini, kat ivmelerini ve kolon eğilme momentlerini önemli ölçüde azaltırlar. Ancak yumuşak zeminlerde aynı şeyi söylemek mümkün olmaz. Yumuşak zeminlerde damperler daha etkili bir şekilde taban kesmesi, kat ivmelerini ve kolon eğilme momentlerini azaltırlar.

Yapı yükseklikleri bakımından değerlendirme yapılırsa, damperler yapı yüksekliğinden bağımsız olarak aynı oranda bir azalma sağlamaktadırlar. Taban izolasyonu ise orta yükseklikteki yapıların periyotları az katlı yapılara göre daha büyük olduğundan, taban izolasyonunun periyot arttırışı yüksek yapılarda daha fazla olmakta dolayısıyla daha fazla verim alınabilmektedir. Ancak yüksek yapılarda, taban izolasyonu sistemi devirici momentlere karşı direnç gösteremeyebilir bu stabilite sorunundan dolayı taban izolasyonu orta yükseklikte yapılar daha için uygun bir çözümdür.

Sert zeminler için hem taban izolasyonlu hem de damperli uygulamalar oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu durumda yapıda oluşan dinamik kuvvetler çok büyük oranda azalmaktadır. Yumuşak zeminlerde ise yapı periyodunun sadece izolasyonlu sistemlere göre bir miktar azalması sisteme olumsuz etkiler getirebilmektedir. Bu nedenle yumuşak zeminlerde taban izolasyonlu ve damperli yapı tasarımı uygun bir çözüm olmadığı söylenebilir.

## KAYNAKÇA

Atımtay, E. , 2000, Betonarme Sistemlerin Tasarımı I-II, ODTÜ Yayını, Ankara.

Chopra, A.K., 2001, Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.

Connor, J., J., 2000, Introduction to Structural Motion Control, Acrobar Reader dosyası olarak <http://moment.mit.edu/HPS/mbdTextbook/> adresinden 9-8-05 de alınmıştır.

Gülay, F.G., Çalım, G., 2003, A Comparative Study of Torsionally Unbalanced Multi-Storey Structures under Seismic Loading, Turkish J. Eng. Env. Sci., 27 (2003), 11-19, TÜBİTAK

Kelly, T.E., 2001, In-Structure Damping and Energy Dissipation, Holmes Consulting Group Ltd, Wellington

Milli Eğitim Bakanlığı İnşaat Teknolojisi, Deprem İzolatör Sistemleri Modülü, Ankara 2011

Naeim, F., Kelly, J.M., 1999. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, John Wiley & Sons Inc., New York.

Pall, A.S. and Marsh, C., 1982. Response of friction damped braced frames, J. of struct. div., ASCE, 108(6), 1313-1323

Ristic, D., 1993, Control of Structural Behaviour-Part 2:Passive Structural Control, Lectures for the International Post Graduate Studies, Skopje.

Shen, K.L., and Soong T.T., 1995. Modeling of viscoelastic dampers for structural application, J. Engrg. Mech., ASCE, 121(6), 694-701

Soong, T.T. and Dargush, G.F., 1997. Passive energy dissipation system in structural engineering, John Willey&Sons, New York

Tsang, H.H., 2009, Earthquake Engineering:New Research (Chapter 3 :Geotechnical Seismic Isolation), Nova Science Publishers Inc., New York

Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Thompson, C.L. and Alonso, L.J., 1991. Seismic testing of steel plate energy dissipation devices, Earthquake Spectra, 7(4), 563-604

## BÖLÜM IV

### **Katı Katalizörlerin Yüzey Özellikleri ve Katalitik Proseslerin Karakterizasyonu için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Kullanımı**

**Ceyda BİLGİÇ<sup>1</sup>**  
**Şafak BİLGİÇ<sup>2</sup>**

#### **Giriş**

Kızılötesi (IR) spektroskopisi, orta-IR radyasyonun emilmesi sonucunda moleküler titreşim enerji seviyeleri arasındaki geçişi ölçer (Larkin, 2011). Orta-IR, moleküler titreşimlerin tespit edildiği  $200-4000\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısına sahip kızılötesi radyasyonu ifade eder (Niemantsverdriet, 2007). Moleküler titreşimlerden kaynaklanan soğurma bantları, belirli bir molekül için parmak izi

---

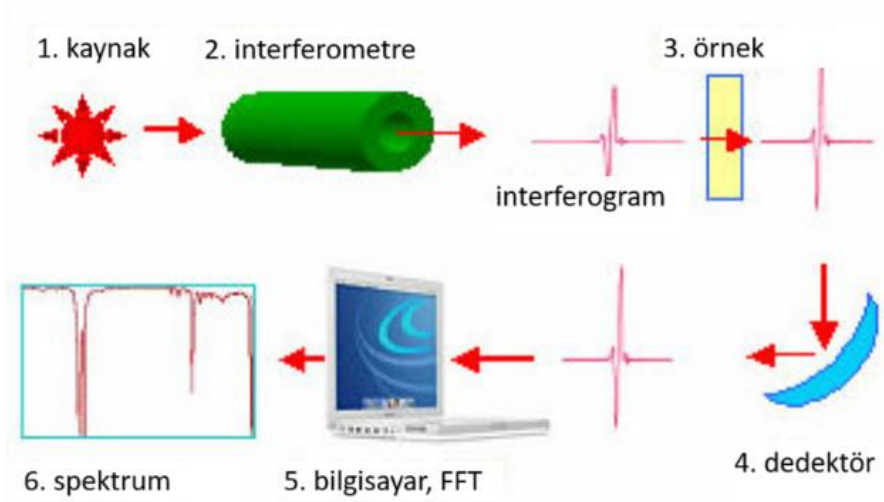
<sup>1</sup> Doç. Dr., Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Orcid No: 0000-0002-9572-3863

<sup>2</sup> Dr.Öğr.Üyesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Orcid No: 0000-0002-9336-7762

olabilir. Ayrıca, ilgilenilen malzemenin yapısal bilgileri, incelenen sistemdeki belirli bir fonksiyonel grubun veya belirli bir bağ türünün adsorpsiyon bantlarını tanımlayarak IR spektroskopisinden çıkarılabilir.

FTIR spektrometresinin şematik diyagramı Şekil 1'de bulunabilir. İnterferometrenin içinde, ışık kaynağından gelen enerji değişimi numuneden geçerken algılanır. IR kaynağından gelen IR radyasyonu önce ışın ayırıcıya gider. Işın bölücü, gelen ışına 45° açıyla yerleştirilir. Orijinal ışın, ışın ayırıcıdan geçerken, biri sabit aynaya doğru 90° yönlendirilmiş ve diğeri hareketli aynaya doğru yönlendirilmiş olmak üzere iki ışına bölünür. Her iki ışın da her bir ayna tarafından yansıtılır ve ışın ayırıcıya geri gelir. Sabit bir ayna, ışın ayırıcı ile ayna arasında sabit bir mesafe bıraktığından, ışının yol uzunluğu her zaman sabittir. Ancak, hareketli aynadan yansıyan ışın için yol uzunluğu değişmeye devam eder. Yani, iki ışın ayırıcıda tekrar buluştuğunda, bir yol uzunluğu farkı olacaktır ve bu, hareketli aynanın tutulduğu andaki konumuna bağlı olarak değişir, bu girişim desenine interferogram adı verilir. Bu interferogram, ışın ayırıcı tarafından yönlendirilen numune hücresine doğru ilerler ve ilgilenilen numunenin içinden geçer. Bu işlem sırasında, interferogramın numunedeki moleküler titreşim frekanslarıyla eşleşen frekansları emilir ve dedektör iletilen interferogramı alır. İletilen bu interferogram, ilgili maddenin konsantrasyon bilgisini içerir.

Dedektörde, absorbans bilgisini içeren interferogram zamana karşı şiddet (bir zaman alanı spektrumu) formatındadır. Numuneye dışından gelen katkıları hariç tutabilmek amacıyla background çekilerek çıkarılması gerekir. Background spektrumunun elde edilmesi, numunenin spektrumunun alınmadan önce, dedektörde spektrum alınarak yapılabilir. Background çıkarılmış interferogram hâlâ bir zaman alanı spektrumudur. Matematiksel bir işlem olan Fourier Dönüşümünün bu deseni, bize daha tanıdık gelen frekansa karşı şiddet (intensity) grafiğine (frekans alanı spektrumu) dönüştürebilir (Pavia & ark., 2014).



Şekil 1. FTIR sisteminin şematik gösterimi (Vimalan, 2021).

## Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektrometre (FTIR) Analizi

Kızılötesi ölçümler genellikle bir FTIR spektrometresi ile iletim veya dağılık yansıma modlarında (DRIFTS) gerçekleştirilir. Spektrumlar normalde  $4 \text{ cm}^{-1}$  çözünürlükte ve yüzlerce taramadan oluşan bir birikimle alınır. İletim modunda kendinden destekli bir katman olarak veya DRIFTS reaktöründe küçük bir hücreye yerleştirilen az miktarda (yaklaşık 20-30 mg) bir katalizör numunesi, kuru He akışı altında (örneğin,  $20 \text{ ml dak}^{-1}$ ) adsorbe edilen suyun uzaklaştırılması için yerinde (hücre içinde (in situ)) işleme tabi tutulur. Numune daha sonra He akışı altında soğutulur ve kendinden destekli yonga levhadaki katalizör numunesindeki hidroksil grupları hakkında bilgi edinmek için spektrumlar oda sıcaklığında alınır. Asitlik/bazlık karakterizasyonu için, CO, N<sub>2</sub>, amonyak, aminler veya piridin/CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, benzoik asit gibi bazik/asidik prob bileşikleri daha sonra prob gazı akışı gönderilerek veya He akışını bir sıvı prob şişesinden kabarcıklar halinde geçirerek numune ile temas ettirilir. Numune, fiziksel olarak adsorbe edilen prob bileşiği ile

doyurulduktan sonra, serbest prob molekülleri, numuneden yaklaşık 473 K'de He temizlenerek uzaklaştırılır.

Bir asit/baz katı için onunla ilişkili üç özellik; asit-baz tipi (Brønsted veya Lewis), asit-baz bölge yoğunluğu ve bölgelerin gücüdür. Bölge yoğunluğu ve gücü çoğu zaman TPD ve mikroklorimetre deneylerinden belirlenir (vide supra). Bir asit-baz bölgesinin doğası genellikle prob bazik/asit molekülü adsorpsiyonu üzerine FTIR ile belirlenir. Piridin adsorpsiyon analizinin yanı sıra, Fourier transform infrared (FTIR) tekniği de yaklaşık 3600-3750 cm<sup>-1</sup>'deki hidroksil grupları hakkında bilgi edinmek için kullanılabilir, yani Brønsted H<sup>+</sup> veya bazik OH<sup>-</sup> bölgeleri için.

Aşağıdaki denklemler Brønsted yoğunluğu ve Lewis bölgesi yoğunluğunun nasıl belirlendiğini göstermektedir. Brønsted asit bölgesinin molar bütünleşmiş absorpsiyon şiddeti (A<sub>B</sub>) (örneğin, piridin adsorpsiyonu için 1540 cm<sup>-1</sup>'de) ve Lewis asit bölgesinin molar bütünleşmiş absorpsiyon şiddeti (A<sub>L</sub>) (örneğin, piridin adsorpsiyonu için 1450 cm<sup>-1</sup>'de) aşağıdaki gibi ifade edilir (McFarland & Metiu, 2013).

$$A_B = \text{Alan}_B / C_B$$

$$A_L = \text{Alan}_L / C_L$$

C<sub>B</sub> ve C<sub>L</sub> sırasıyla Brønsted ve Lewis bölgesi yoğunluklarıdır; Alan<sub>B</sub> ve Alan<sub>L</sub> sırasıyla Brønsted bölgeleri ve Lewis bölgeleri altındaki pik alanıdır. Asit katalizinde önemli bir parametre olan toplam asit bölgesi yoğunluğu C<sub>T</sub> = C<sub>B</sub> + C<sub>L</sub> olarak da tanımlanabilir.

Aynı yaklaşım baziklik karakterizasyonu için de geçerlidir. Bu durumda, zayıf bir asit olarak CO<sub>2</sub> sıklıkla bir prob molekülü olarak kullanılır. Bununla birlikte, IR ile tanımlanan farklı karbonat formları vardır, bu da böyle bir probun özellikle termal yöntemlerde alan dedektörü olarak kullanılmasını zorlaştırır. Asetilenler, CO, N<sub>2</sub>, pirol ve döteryumlanmış kloroform gibi başka prob molekülleri de önerilmiştir (Knözinger & Huber, 1998; Hadjiivanov & Vayssilov,



2002). Örnek olarak, alkali metal değişimli FAU zeolite için, prob olarak CO veya asetilen kullanılabilir.

Thibault-Starzyk ve ark., (1998), asetonitrilin zeolitlerde yüksek sıcaklıklarda protonlanabildiğini ve protonlama sıcaklığının n-hekzan kraking reaksiyonundaki katalitik aktivite ile iyi korelasyon gösterdiğini ortaya koymuşlardır (Thibault-Starzyk & ark., 1998) Literatürde FTIR tekniği ile karakterize edilen asidik veya bazik özellikler ile katalitik özellikler arasında ilişki kuran başka birçok örnek bulunabilir ve örneğin bunlardan bazıları referanslarda verilmiştir (Babou & ark., 1995; Lavalley, 1996; Diallo-Garcia & ark., 2011; Diallo-Garcia & ark., 2014).

### **Katalitik Araştırmalarda FTIR Uygulamaları**

IR spektroskopisi katalizör karakterizasyonu için düzenli olarak kullanılan bir teknik olduğundan, çeşitli deneysel teknikler üzerine derlemeler ve incelemeler çok sayıdadır. Transmisyon-absorpsiyon, difüze yansıma, ATR, speküler yansıma ve fotoakustik spektroskopi en sık kullanılan teknikler arasındadır (Lercher & ark., 1996). Tüm bu tekniklerle elde edilen temel bilgiler eşdeğerdir ve numune partikül boyutu ve numunenin moleküler sönme katsayısı gibi yerel mevcudiyet ve deneysel gereklilikler kişisel seçimlere bağlıdır. Deneylerin büyük çoğunluğu şu anda transmission-absorption and the diffuse reflectance (difüze yansıma) modunda gerçekleştirilmektedir. IR, heterojen katalizörlerin karakterizasyonunda önemli bir rol oynar ve bu nedenle çok sayıda yayın bu konuyu ele almaktadır (Lavalley, 1996; Abu-Zied, 2000; Kovacheva ve ark, 1999; Leclercq & ark., 1998; Levinbuk & ark., 1998; Li & Coville, 1999; Li & ark., 1997; Li & Oshihara 1999; Li & Armor 1999; Liang & ark., 1998; Lima & ark., 1998; Lischke & ark., 1998; Loaiza-Gil & ark., 1999; Lopez & ark., 2000; Lopez-Salinas & ark., 2000; Lugstein & ark., 1999; Luukkanen & ark., 1999; Malyala & ark., 2000; Miller & Lakshmi, 2000; Myllyoja & Pakkanen, 2000; Narayana & ark., 1998; Narayanan & Krishna 1998; Tripp & Combes, 1998; Török & ark., 1997; Trombetta & ark., 2000; Viswanath & Wilson, 2000; White & Tripp, 2000; Yadav &

Bokade, 1996; Yadav & Kirthivasan, 1997; Yang & ark., 1996; Yen & Chou, 1999; Zaki & ark., 2000; Zama vd., 2000; Zheng vd., 1995; Paulis vd.,1999; Schekler-Nahama vd., 1998; Wildberger vd.,1998; Yang vd., 1998; Zhang & Smirniotis, 1998; Veefkind vd., 2000; Fally & ark., 2000; Poels & Brands, 2000; Wang & Tsai, 2000; Arsenova et al., 1998; Arsenova et al., 2000, Hannus, 1999; Baburek & Novakova, 1999; Trombetta et al., 2000; Trombetta et al., 1999; Anunziata et al., 1997; Auroux & Datka, 1997; Campelo et al, 2000; Canizares vd., 2000; Concepcion vd.,1997; Dapaah vd., 1999; Dejoz vd., 1999; Flego vd., 1998; Flego vd., 1995; Fu vd., 1995; Ghorpade vd., 1998; Li vd., 1997; Lopez vd., 1995; Mostad & ark., 1996; Paweewan vd., 1998; Paweewan vd., 1999; Rodriguez vd., 1999; Sohn vd., 1995; Tran vd., 1998; Xie ve Kaliaguine, 1997; Damyanova ve Fierro, 1996, Hashimoto vd., 1996; Segawa ve Shimura, 2000).

Bu yayınlar; reaksiyon bileşenlerinin spektral özelliklerini, katalizör öncüllerini, sıcaklık işlemine bağlı yüzey değişikliklerini içeren spektroskopik uygulamalarıdır. Seçilen prob molekülünün türü, problanan katının elde edilen özelliklerini etkileyeceğinden ve dolayısıyla türetilen yapı-aktivite ilişkisini de etkileyeceğinden, uygun prob molekülünün seçimi çok önemlidir (Lercher vd., 1996). Bilimsel literatürde, en sık kullanılanların yanı sıra çok spesifik veya daha az sıklıkla kullanılan moleküller de dahil olmak üzere farklı prob moleküllerinin uygulamaları bulunabilir. Katalitik araştırmalardaki uygulamalara örnek olarak literatürden alıntılar şu şekildedir: etilaminler (Veefkind vd., 2000), piridin (Anunziata vd., 1997; Auroux & Datka, 1997; Campelo & ark., 2000; Canizares vd., 2000; Concepcion vd.,1997; Dapaah vd., 1999; Dejoz vd., 1999; Flego vd., 1998; Flego vd., 1995; Fu vd., 1995; Ghorpade vd., 1998; Li vd., 1997; Lopez & ark., 1995; Mostad vd., 1996; Paweewan vd., 1998; Paweewan vd., 1999; Rodriguez vd., 1999; Sohn vd., 1995; Tran vd., 1998; Xie & Kaliaguine, 1997; Damyanova & Fierro, 1996, Hashimoto & ark., 1996; Segawa & Shimura, 2000; de Carvalho vd., 2000; Anderson vd., 2000; Ramírez vd., 2000; Bulanin vd., 1998; Binet vd.,1999; Pophal vd., 1998; Bentrup vd., 2000;

Pârvulescu & ark., 1999; Berndt et al., 1996; Busca, et al., 2000; Jarecka & Datka, 1999; Navarro et al., 1996; Sarbak,1997) pirol (Binet et al., 1999), 2,4,6-tri-tert-butilpiridin (Heinichen and Hölderich, 1999), asetonitril (Baburek & Novakova, 1999; Trombetta et al, 2000; Bulanin et al., 1998; Binet et al.,1999; Bentrup et al., 2000), CD<sub>3</sub>CN (tamamen döterlenmiş asetonitril) (Parvulescu et al., 1999; Ivanov et al, 1999; Coq vd., 2000; Vorobeve vd., 2000), t-bütülsiyaniür (Sarbak, 1997), trimetilasetonitril (pivalonitril, (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>CCN) (Trombetta vd., 2000; Trombetta vd., 1999), amonyak (Zhang & Smirniotis, 1998; Yang & ark., 1998; Wildberger vd., 1998; Schekler-Nahama vd., 1998; Yamauchi vd., 1995; Watson & Ozkan 2000; Salker & Weisweiler 2000; Reiche vd., 2000; Nagai vd., 2000; Müller & ark., 2000; Long & Yang, 1999; Lietti vd., 1999; Kuehne vd., 1998; Jung & Grange, 2000; Isaev & Fripiat, 1999; Heitmann vd.,1999; Amores vd., 1997; Fogash vd., 1995; Economidis & ark., 1999; Segawa vd., 2000; Berndt vd., 1996; Busca vd., 2000; Jarecka vd., 1999; Spielbauer vd., 1996), karbon monoksit (Damyanova ve Fierro, 1996; Ramírez vd., 2000; Bulanin vd., 1998; Binet vd.,1999; Coq vd., 2000; Vorob'eva vd., 2000; Martra, 2000; Baldanza vd., 2000; Navarro vd., 1996; Guglielminotti vd., 2000; Schay vd., 1998; Trunschke vd., 2000; Neyman & ark., 1995), karbondioksit (Bulanin vd., 1998; Binet vd.,1999; Labalme vd., 1995; Bando vd., 1998; Martra, 2000), azot oksit (Navarro vd., 1996; Guglielminotti vd., 2000; Schay vd., 1998; Trunschke & ark., 2000; Neyman vd., 1995; Benitez vd., 1996; Hadjiivanov vd., 2000; Eguchi vd., 1998; Hashimoto vd.,1997; Henriques vd., 1998; Huang vd., 2000; Parvulescu vd., 1998; Pawelec vd., 1998; Ramirez & ark., 2000; Shimokawabe vd., 1998; Efthimiadis vd., 1999), metanol (Fally vd., 2000; Poels ve Brands, 2000), etanol (Baldanza vd., 2000), sikloheksanol (Wang ve Tsai, 2000), dibenzenler (Arsenova vd.,1998Arsenova vd., 2000), kloroform (Hannus,1999), ağır su (D<sub>2</sub>O) (Hashimoto vd., 1996), dimetileter (Binet vd., 1999), benzaldehit (Bentrup vd., 2000; Martra, 2000), eten (Yoda & ark., 2000), propen (Pophal vd., 1998;

Yoda vd., 2000; Efthimiadis vd., 1999), bütlenler (Yoda vd., 2000), nitrojen (Neyman vd., 1995) ve nitrojen dioksit (Raj vd., 1998).

Amonyak adsorpsiyonu ile sülfatlanmış zirkonyum üzerindeki asit bölgelerinin seçici azalmasının karakterizasyonu çalışılmıştır (Fogash vd., 1995). IR spektroskopik çalışmalar, güçlü asit bölgelerinin Brønsted ve muhtemelen Lewis asit merkezleri olduğunu, orta güçteki asit bölgelerinin ise esas olarak Brønsted asit bölgeleri olduğunu göstermektedir. Sülfatlanmış zirkonyumun amonyak ile asit bölgelerinin seçici azalmasının sonuçları, orta kuvvetteki Brønsted asit bölgelerinin 423 K'de n-bütan izomerizasyonu için aktif olduğunu gösterirken, daha güçlü asit bölgelerinin olası bir rolünü göz ardı etmemektedir.

Uzun bir süre önce, bu şekilde elde edilen sonuçlara dayanarak, Eischens ve arkadaşları (1956) IR tekniğinin adsorpsiyon ve kataliz çalışmalarında son derece önemli olacağını öngörmüşlerdir (Eischens vd., 1956). Parry (1963) asitlik katılar üzerinde piridin adsorpsiyonu için hücre içinde IR çalışmaları uygulamıştır (Parry, 1963).

FTIR spektroskopisi, pirol, furan ve tiyofenin H- ve H-ZSM-5 zeolitleriyle etkileşiminin ilk adımının, zeolitin Brønsted asit bölgelerini ve heterosiklik molekülün  $\pi$ -elektron sistemini içeren hidrojen bağı türlerinin oluşumu olduğunu göstermektedir (Spoto vd., 1999).

Aseton kondenzasyon reaksiyonunda daha önce değerlendirilen üç katalizör (alümina ve HY, USY zeolitleri) üzerinde suyun kimyasal olarak absorbe eden etkisi incelenmiştir. Bu reaksiyondaki aktif bölgeler ya alümina yüzeyinde ya da zeolitlerde çerçeve olmayan alümina yüzeyinde bulunan Lewis asit bölgeleridir. Bu bölgeler su tarafından azaltılır ve reaksiyon hızı Lewis bölgelerinin kaybı oranında azalır.

Mn(CO)<sub>5</sub> Br'nin zeolit Y ve A yüzeylerindeki termal reaktivite davranışı araştırılmıştır (Panov ve Fripiat, 1999). Para-, meta- ve orto- dietilbenzenin gaz fazından H-ZSM-5 üzerine

sorpsiyonu yerinde IR ile incelenmiştir (Huang vd., 2000). Amonyak ve metilamin ortak adsorpsiyonu üzerine KL zeolitindeki benzenin konumu üzerine IR çalışması yapılmıştır (Su vd., 2000). Amonyak ve metilaminin sadece azot atomları üzerindeki yalnız çift aracılığıyla  $K^+$  iyonlarıyla değil, aynı zamanda 723 K'de ön işlemden sonra KL zeolitinde bulunan kalıntı silanollerle de etkileşime girebildiği gösterilmiştir. KL zeolitinin metilamin ile etkileşiminin amonyak ile olandan çok daha güçlü olduğu ve zeolitin kafes parametresinin değiştirilerek zeolit çerçevesinin deformasyonunu gösterecek kadar güçlü olduğu bulunmuştur. Metilamin adsorpsiyonunun neden olduğu çerçevedeki bu deformasyon, KL'nin 12R pencerelerinde benzenin konumu için faydalı bir etki sağlar. Deformasyon, KL zeolitinin başlangıçta benzen için adsorpsiyon bölgesi olmayan 12R pencerelerini, benzenin bu bölgelere yerleşmesi için elverişli hale getirmektedir. Bu, yapısal uyumluluğun benzenin 12R pencerelerindeki konumunda en önemli anahtar faktör olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bazı zeolitlerde, 12R pencerelerinin hem yapısal hem de kimyasal özelliklerinin, benzenin bulunduğu yere bir adsorbatın eklenmesiyle uyumlaştırılabileceğini göstermektedir.

Marturano ve ark. (2000), Fe-ZSM-5 zeolitlerinin hazırlanma prosedürünü incelemek için FTIR kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, demir zeolitlerin sulu çözeltilerde geleneksel iyon değişimi ile kolayca hazırlanamayacağını göstermiştir. Ayrıca, bu yöntemin etkinliği kullanılan ana ZSM-5 kaynağına bağlı görünmemektedir.  $FeCl_3$ 'nin süblimasyonu ile hazırlanan iki farklı Fe-ZSM-5 örneğindeki demirin durumu araştırılmıştır (Marturano vd., 2000). IR, binükleer Fe komplekslerinin zeolitin iyon değişim pozisyonlarında yer aldığını ve bir veya iki kafes yükünü telafi ettiğini göstermiştir.

Nitrometanın ayrışması sırasında Co-ZSM-5 üzerinde biriken türleri yerinde gözlemlemek için FTIR kullanılmıştır (Satsuma vd., 1999). 553 K'de 60 dakika sonra deaktivasyon başlar. Buna 2150 ve 2300  $cm^{-1}$  arasında NCO türlerine bağlı bantların oluşumu ve 1662  $cm^{-1}$ 'de çok güçlü bir bandın ani gelişimi eşlik

eder. İkinci bant, zeolit kanallarını bloke ederek deaktivasyona neden olan triazin bileşiği, melamin ve/veya türevlerine atanabilir. En olası kimya, nitrometanın izosiyamik aside (HNCO) ilk dehidrasyonudur ve bu da HNCO'nun hidrolizi ile elde edilen amonyak ile reaksiyona girerek melamin oluşturur. HNCO'nun küresel trimeri olan siyanürik asit, süreçte bir ara ürün olabilir (Satsuma vd., 1999).

$Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , ZSM-5 üzerinde dağılmış  $Co^{2+}$  iyonları üzerinde CO ve NO adsorpsiyonu IR spektroskopisi ile incelenmiştir. ZSM-5 zeolitinde değiştirilen  $Co^{2+}$  iyonlarının,  $Al_2O_3$  veya  $SiO_2$  üzerinde dağılmış  $Co^{2+}$  iyonlarından daha yüksek bir koordinatif doymamışlık ile karakterize edildiği bulunmuştur. Sonuç olarak, CO ortam sıcaklığında bile Co-ZSM-5 üzerinde karboniller oluştururken, Co/ $SiO_2$  ve Co/ $Al_2O_3$  örnekleri üzerindeki  $Co^{2+}$ -CO kompleksleri yalnızca düşük sıcaklıklarda kararlıdır. Yüzey dinitrosil kompleksleri, destek ne olursa olsun desteklenen Co üzerinde NO adsorpsiyonundan sonra oluşur. Bununla birlikte, Co-ZSM-5 üzerindeki  $Co^{2+}(NO)_2$  türleri 623 K'ye kadar kararlıdır, ancak Co destekli silika veya alümina üzerinde oluşan nitroziller ortam sıcaklığında tahliye ile kolayca yok edilir (Huang vd., 2000).

Yoo ve arkadaşları (2000), kimyasal buhar biriktirme yoluyla hazırlanan Ti-ZSM-5'in özelliklerini karakterize etmişlerdir. FTIR sonuçlarına dayanarak Ti'nin zeolit yüzeyine tetrahedral koordinasyonla ( $965\text{ cm}^{-1}$ ) dahil olduğu sonucuna varılmıştır (Yoo vd., 2000).

Dimerik bakır asetat ve kloroasetat kompleksleri (sırasıyla CuAc ve CuClAc), esnek ligand sentezi yöntemiyle zeolit-Y içinde kapsüllenmiştir (Chavan vd., 2000). Spektroskopik teknikler ve termal analiz, zeolit-Y'nin süper kafeslerinde asetato-köprülü dimerik bakır(II) komplekslerinin oluşumu için ikna edici kanıtlar sağlamaktadır. FT-IR spektrumlarındaki  $\nu_{as}$  (COO-) ve  $\nu_s$  (COO-) bantları arasındaki ayırım ( $\Delta\nu$ ), kapsülleme üzerine CuAc için 182 ila  $213\text{ cm}^{-1}$  ve CuClAc için 185 ila  $205\text{ cm}^{-1}$  arasında değişir ve köprü

karboksilato grupları için *syn-syn* koordinasyon moduna karşılık gelir.

$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  molar oranları 33 ve 53 olan bakır iyonu ile değiştirilmiş zeolitler ZSM-5, NO'nun doğrudan ayrıştırılması için aktivite testlerine tabi tutulmuştur (Ganemi vd., 1998). Reaksiyonu, yüzey ve gaz fazı bileşimlerini takip etmek için in situ IR ölçümleri kullanılmıştır. IR çalışmaları ayrıca gaz fazında hızlı  $\text{NO}_2$  oluşumu ile aşırı oksijen içinde yapılmıştır. Yüksek  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  oranı ile eş zamanlı olarak düşük asit bölgesi konsantrasyonu ile birlikte zeolitte yüksek düzeyde aşırı bakır değişimi NO dönüşümünü artırır. Işığın sönme sıcaklığının altında  $1631 \text{ cm}^{-1}$  'de bir titreşim bandı gözlenir ve  $\text{Cu}^{2+}\text{-O-Cu}^{2+}$  dimerlerine bağlı köprülü bir nitrato grubu olarak yorumlanır. Bu bant ışığın sönme sıcaklığının üzerinde kaybolur ancak bu sıcaklığın altındaki şiddet katalitik aktivite ile ilişkilidir. Yapılan yorum, bu köprü bağlı nitrat gruplarının NO dönüşümü için aktif bölgelerde hareket ettiği ve geçici bir reaksiyon ara ürünü olan  $\text{N}_2\text{O}_3$  'un da aynı  $\text{Cu}^{2+}\text{-O-Cu}^{2+}$  dimerlerine bir köprü konfigürasyonunda bağlandığıdır. Tanımlanamayan koordinasyona ve  $1598/1575 \text{ cm}^{-1}$  'de titreşim bantlarına sahip ikinci bir nitrato grubu izole bakır iyonlarını araştırmaktadır.  $2130 \text{ cm}^{-1}$  'deki üçüncü bir IR bandı zeolite bağlı  $\text{NO}^{2+}$  iyonlarının önceki gözlemlerini doğrulamaktadır. Bu türlerin zeolit üzerindeki deprotonlanmış ve negatif yüklü bölgelere koordine olduğu ve  $\text{NO}^{2+}$  adsorpsiyonu için bu bölgelerin  $\text{Cu}^{2+}$  iyon değişimi ile bloke edildiği sonucuna varılmıştır.  $2130 \text{ cm}^{-1}$  türlerinin doğrudan NO ayrışmasında bir rolü yok gibi görünmektedir ancak adsorpsiyon bölgeleri zeolitin kararlılığı için çok önemlidir ve kafes içindeki iyon hareketliliği ile yakından ilişkilidir (Ganemi vd., 1998).

Farklı  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarına sahip çeşitli Cr değişimli ZSM-5 zeolitleri hazırlanmış ve nemli hava akımında gaz halindeki trikloretilenin (TCE,  $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CHCl}$ ) ortam adsorpsiyonu ve ardından oksidatif yıkımı ( $523\text{-}673 \text{ K}$ ) için incelenmiştir (Chintawar ve Greene, 1997). ZSM-5 yapısında TCE molekülleri için fizisorpsiyon bölgeleri hakkında bilgi edinmek amacıyla, ortam koşullarında TPD ve in situ FTIR çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar,

çalışılan hemen hemen tüm zeolitlerde TCE'nin terminal silanol (SiOH) ve AlOH grupları ile etkileşime girdiğini ortaya koymuştur.

Zeolitlerde (Y, ZSM-5, modernit) farklı oksidasyon durumlarındaki katyonların IR tespiti ve ayrımı gerçekleştirilmiştir. Etilenin seçici dimerizasyonunda kullanılan katalizörler (Y zeolit içinde kapsüllenmiş Pt organometalik kompleks) FTIR ile karakterize edilmiştir (Zavoianu vd., 2000). 1-bütenin zeolit H-fernerit ile etkileşimi, izobüten ve yüksek sıcaklık kokuna öncülük eden türleri yerinde izole etmek amacıyla artan sıcaklıklarda (300 ila 670 K arasında) incelenmiştir (Paze vd., 1999). Taze katalizör üzerinde bütenin izobütene dönüşümünün bimoleküler mekanizması, düşük dallı C8 zincirleri gözlemlendiği için doğrulanmıştır. 300 K'de, etkileşimin ana ürünleri büten izomerleri 2-cis- ve 2-trans-bütendir. 300-393 K arasındaki sıcaklıklarda monoenik alilik karbokasyonların varlığı gözlenirken, 473-573 K arasındaki sıcaklıklarda nötral ve karbokasyonik polienler mevcuttur.  $\geq 623$  K sıcaklıklarda, polienil doymamış zincirler küreselleşerek mono ve polisiklik aromatikler oluşturur.

H-ZSM-5 zeolitinin 100-773 K sıcaklık aralığında n-bütan, izo-bütan, n-heptan, 1-büten, cis-2-büten, trans-2-büten, izo-büten, benzen ve toluen ile etkileşimi araştırılmıştır (Trombetta vd., 2000). Düşük sıcaklık deneyleri, hem H-ZSM-5'in iç köprü OH'si hem de dış terminal OH ile tüm adsorbatların hidrojen bağlı türlerinin karakterize edilmesine izin vermiştir. H-bağları görünüşe göre alkanların C-C  $\sigma$ -tipi orbitallerini ve alkenlerin ve aromatiklerin C=C  $\pi$ -tipi orbitallerini içermektedir. Benzen ve toluenin iç OH ile etkileşiminde kısmi bir sterik engel için kanıt sağlanmıştır.

2-metilpropenin (izo-büten) zeolitler (ZSM-5 ve faujasit (Y zeoliti)), silika-alümina ve silika üzerindeki adsorpsiyonu ve reaksiyonu oda sıcaklığının altında incelenmiştir. Silika üzerinde, silanol gruplarına adsorbe olan izobüten molekülleri vakumda 230 K'nin altında basitçe desorbe olurken, asit katalizörler üzerinde asidik OH gruplarına  $\pi$ -bağlı izobüten ( $\pi$ -kompleksi) dimer alkoksi (2,4,4-trimetilpentoksi) gruplarına reaksiyona girmiştir. Reaksiyon



ürünü olan dimer alkoksi gruplarının yapısının zeolitlerin gözenek boyutu tarafından sınırlandırıldığı bulunmuştur. 2,4,4-trimetil-2-pentoksi türleri silika-alümina ve Y zeolit üzerinde mordenit üzerindeki benzer şekilde tanımlanırken, izo-büten reaksiyonu ZSM-5'in gözeneklerindeki asidik OH grupları üzerinde 2,4,4-trimetil-1-pentoksi türleri ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle, zeolitlerin gözenek boyutunun reaksiyon ürünü üzerindeki alan kısıtlaması düşük sıcaklık IR çalışmasıyla doğrudan gözlemlenmiştir (Kondo vd., 1999).

Weyrich ve Holderich (1997), Ce ve zeolit destekli paladyum katalizörleri üzerinde -limonenin dehidrojenasyonunu çalışmışlardır. Piridin adsorpsiyonu, iyon değişimi ve katalizör aktivasyonunu takiben asitlik değişimini incelemek için kullanılmıştır. Saf zeolit Na-ZSM-5,  $1545\text{ cm}^{-1}$  civarındaki eksik piridin absorpsiyon bandından da anlaşılacağı üzere herhangi bir Brønsted asitliği sergilememiştir. Sadece birkaç Lewis asit bölgesi gözlemlenmiştir ( $1445\text{ cm}^{-1}$ ) (Weyrich & Holderich (1997). Ce'nin zeolite katılmasıyla (katalizör Ce/Na-ZSM-5), Lewis asitliği  $1445\text{ cm}^{-1}$  civarındaki absorpsiyon bandının artmasıyla kanıtlandığı gibi güçlü bir şekilde artar. Yaklaşık  $1545\text{ cm}^{-1}$ 'deki küçük absorpsiyon bandından da görüldüğü üzere sadece düşük bir Brønsted asitliği oluşmuştur. Pd'nin eklenmesi (katalizör Pd/Na-ZSM-5),  $1545\text{ cm}^{-1}$  civarındaki absorpsiyon bandının yükselmesinden de anlaşılacağı üzere Brønsted bölgelerinin oluşmasına yol açar. Pd değişimi üzerine saf Na-ZSM-5 ile karşılaştırıldığında Lewis asitliğinde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. Ce- ve Pd-değişimli katalizörler hem Lewis hem de Brønsted asit bölgeleri sergilemektedir. Pd içeren Na-ZSM-5 ile Ce ve Pd içeren Na-ZSM-5'in Brønsted absorpsiyon bantlarının karşılaştırılması asit gücünde büyük farklılıklar göstermemektedir. O<sub>2</sub> veya O<sub>3</sub> kullanılarak koklaştırılmış HY zeolit rejenerasyonunun FTIR çalışması yapılmıştır (Mariey vd., 1996). Oksijen rejenerasyonunun 770 K veya üzerinde gerçekleştiği, ozonun ise 450 K veya altında etkili olduğu bulunmuştur.

İzomerik doymamış C4 nitrillerin kuvvetli bazik Na/NaY üzerinde ve 623 K'de nötr NaY ve asidik CaY katalizörleri üzerinde karşılaştırılması için bir çalışma yapılmıştır (Beres vd., 1996). Adsorbe edilen moleküllerin FT-IR çalışmaları, anyonik ara maddelerin olası katılımını ortaya çıkarmıştır.

Kowalak ve diğerleri (1996), trifloroetanol (TFE) ile modifiye edilmiş SmY zeolitinin katalitik özelliklerini incelemiştir. Adsorbe edilen piridin spektrumu, ana SmY'deki Lewis bölgelerinin katkısının neredeyse ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir. Florlama, protonik asit bölgelerinin konsantrasyonunda gözle görülür bir azalmaya ve Lewis asit merkezlerinin katkısında bir artışa neden olur (Kowalak vd., 1996).

NO ve NO'nun<sub>2</sub> Pd-H-ZSM-5 ile etkileşiminin yanı sıra NO'nun CH<sub>4</sub> tarafından indirgenmesinin araştırılması kütle spektrometresi ve yerinde IR kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Lobree vd., 1999). Reaksiyon öncesinde Pd-H-ZSM-5 içindeki Pd'nin çoğu Pd<sup>2+</sup> katyonları olarak bulunur. O<sub>2</sub> yokluğunda CH<sub>4</sub> tarafından NO indirgenmesi 610 K üzerinde Pd<sup>2+</sup> katyonlarının aşamalı olarak indirgenmesine ve küçük Pd partiküllerinin oluşmasına neden olur. NO ve CH<sub>4</sub> beslemesine O<sub>2</sub> eklendiğinde Pd<sup>2+</sup> katyonlarının indirgenmesi önemli ölçüde bastırılır. Yerinde IR, adsorbe edilen başlıca türler olarak NO<sup>+</sup> ve NO'nun varlığını ortaya koymaktadır. NO<sup>+</sup> 773 K'ye kadar olan sıcaklıklarda CH<sub>4</sub> ile reaksiyona girmez. Adsorbe edilen NO 650 K'nin üzerinde CH<sub>4</sub> ile reaksiyona girer ve CN türleri ara ürün olarak gözlenir. Son tür hem NO, O<sub>2</sub>, hem de muhtemelen NO<sub>2</sub> ile reaksiyona girer.

Hadjiivanov ve diğerleri (1999) Fe-ZSM-5 üzerinde propan ile NOx'in indirgenmesi üzerinde suyun etkisini incelemiştir. NO'nun Fe-ZSM-5 üzerine adsorpsiyonu Fe<sup>n+</sup>-NO (n = 2 veya 3) türlerinin (1880 cm<sup>-1</sup>), Fe<sup>2+</sup> (NO)<sub>2</sub> komplekslerinin (1920 ve 1835 cm<sup>-1</sup>) ve NO<sup>+</sup> (2133 cm<sup>-1</sup>) oluşumuna yol açar. Su, NO<sup>+</sup> ve Fe<sup>2+</sup> (NO)<sub>2</sub> oluşumunu güçlü bir şekilde ve Fe<sup>n+</sup>-NO oluşumunu daha hafif bir şekilde bastırır. NO'ya oksijen eklenmesi nitrozilleri yüzey nitratlarına dönüştürür (1620 ve 1575 cm<sup>-1</sup>) ve bu süreç sudan

neredeysse hiç etkilenmez. Nitratlar yaklaşık 573 K'ye kadar termal olarak kararlıdır, ancak 473 K'de propan ile kolayca etkileşime girerek  $1700-1300\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde bantlar gösteren bir yüzey C-H-N-O birikintisi oluşturur. Su bu süreci engellemez. C-H-N-O birikintisi nispeten inerttir (ortam sıcaklığında NO veya  $\text{NO}^+\text{O}_2$  ile etkileşime girmez) ancak 523 K'den daha yüksek sıcaklıklarda NCO- türlerine ayrışır ( $2215\text{ (Fe-NCO)}$  ve  $2256\text{ cm}^{-1}\text{ (Al-NCO)}$  bantları). Ancak su varlığında sadece Fe-NCO türleri oluşur. Ortam sıcaklığında NCO- türleri NO ve  $\text{O}_2$ 'ye karşı inerttir, ancak  $\text{NO} + \text{O}_2$  karışımı ile kolayca reaksiyona girer. Fe-ZSM-5 üzerinde azot oksitlerin seçici katalitik indirgenmesinin mekanizması ve suyun süreç üzerindeki etkisi de tartışılmıştır (Hadjiivanov vd., 1999).

Güçlü bağlanmış nitrit-nitratlar, katyon değiştirilmiş zeolitler üzerinde oksijen fazlalığı altında hidrokarbonlar tarafından  $\text{NO}_x$  seçici indirgeme reaksiyonunda ara ürünler olarak çalışılmıştır. Kuvvetli bağlı nitratların, Cu- ve Co- içeren zeolitler tarafından katalizlenen oksijen fazlalığı altında propan ile  $\text{NO}_x$  seçici indirgemesinin hız sınırlayıcı aşamasına katılımı kesin olarak belirlenmiş ve reaksiyon mekanizması için bir şema önerilmiştir (Sadykov vd., 1998).  $\text{NO}_x$  indirgemesi için Cu-ZSM-5 katalizörlerinde bulunan bakır türleri tanımlanmıştır (Millar vd., 1999). CO adsorpsiyonunun FTIR spektroskopisi, CuO türlerinin zeolit yüzeyinde mevcut olduğunu göstermiştir ( $2143\text{ cm}^{-1}$ ).

## Sonuçlar

FTIR spektroskopisi geleneksel bir spektrumdur ve birkaç önemli avantajı vardır, gerekli örnek miktarı nispeten azdır. FTIR yöntemi, kullanımı kolay örnekleme teknikleriyle hızlı ve hassas bir tekniktir. Fourier dönüşümünü elde etmek için zaten bir bilgisayar kullanıldığından, sinyal-gürültü oranını iyileştirmek için birçok tarama yapmak kolaydır (gürültü, tarama sayısının karekökü olarak artar, oysa sinyal doğrusal olarak artar). Enstrümantasyon işlemi basittir. Spektrumların yorumlanması özellikle zor değildir ve kolayca öğrenilebilir, ışık saçılması veya floresan etkileri yoktur, kinetik ve zaman çözümlü çalışmalar mümkündür.

Katalizörlerin asit/baz özelliklerini kontrol edebilme yeteneği, yüzey yapısının katı katalizörleri ve katalitik süreçleri nasıl etkilediğini araştırmaya büyük ilgi uyandırmıştır. Çok çeşitli katıların asit/baz özellikleri (tip, kuvvet, sayı) çeşitli prob molekülleri ile FTIR ile incelenmiştir: amonyak, piridin, CD<sub>3</sub>CN, CO<sub>2</sub>, CHCl<sub>3</sub>, benzaldehit ve nitrobenzen bunlardan bazılarıdır. Bu yayındaki kapsamlı FTIR bilgileri, çok çeşitli katıların asit/baz özellikleri için uygun bir kimyasal indeks verecek ve basit bir FTIR deneyi ile katılar üzerindeki Lewis/Brønsted asit bölgelerini ve bazik bölgeleri karakterize etmek için kullanılabilir ve yeni katalizörlerin tasarlanması için güçlü bir araç sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA

Abu-Zied, B. M. (2000). Structural and catalytic activity studies of silver/chromia catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 198(1-2), 139-153.

Amores, J. G., Escribano, V. S., Ramis, G. & Busca, G. (1997). An FT-IR study of ammonia adsorption and oxidation over anatase-supported metal oxides. *Applied Catalysis B: Environmental*, 13(1), 45-58.

Anderson, J. A., Fergusson, C., Rodríguez-Ramos, I. & Guerrero-Ruiz, A. (2000). Influence of Si/Zr ratio on the formation of surface acidity in silica-zirconia aerogels. *Journal of Catalysis*, 192(2), 344-354.

Anunziata, O. A., Pierella, L. B. & Marino, R. G. (1997). Expanded regional rate analysis: A novel method to determine regional formation rates in catalyzed reactions. *Applied Catalysis A: General*, 165(1-2), 35-49.

Arsenova, N., Bludau, H., Haag, W. O. & Karge, H. G. (1998). In situ IR spectroscopic study of the adsorption behaviour of ethylbenzene and diethylbenzenes related to ethylbenzene disproportionation over HY zeolite. *Microporous and mesoporous materials*, 23(1-2), 1-10.

Arsenova-Härtel, N., Bludau, H., Schumacher, R., Haag, W. O., Karge, H. G., Brunner, E. & Wild, U. (2000). Catalytic and sorption studies related to the para selectivity in the ethylbenzene disproportionation over H-ZSM-5 catalysts. *Journal of Catalysis*, 191(2), 326-331.

Auroux, A. & Datka, J. (1997). Microcalorimetric and IR spectroscopic studies of pyridine sorption in NaH-mordenites. *Applied Catalysis A: General*, 165(1-2), 473-479.

Babou, F., Coudurier, G. & Vedrine, J. C. (1995). Acidic properties of sulfated zirconia: an infrared spectroscopic study. *Journal of Catalysis*, 152(2), 341-349.

Baburek, E. & Novakova, J. (1999). Isomerization of n-butane over acid zeolites-Role of Brønsted and Lewis acid sites. *Applied Catalysis A: General*, 185(1), 123-130.

Baldanza, M. A. S., De Mello, L. F., Vannice, A., Noronha, F. B. & Schmal, M. (2000). Adsorptive and catalytic properties of alumina-supported Pd–Mo Catalysts. *Journal of Catalysis*, 192(1), 64-76.

Bando, K. K., Soga, K., Kunimori, K. & Arakawa, H. (1998). Effect of Li additive on CO<sub>2</sub> hydrogenation reactivity of zeolite supported Rh catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 175(1-2), 67-81.

Benitez, A., Ramirez, J., Fierro, J. L. G. & Agudo, A. L. (1996). Effect of fluoride on the structure and activity of NiW/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for HDS of thiophene and HDN of pyridine. *Applied Catalysis A: General*, 144(1-2), 343-364.

Bentrup, U., Martin, A. & Lücke, B. (2000). Infrared characterization of the surface intermediates in the oxidation of toluene on vanadyl pyrophosphate catalysts. *Topics in Catalysis*, 11(1), 139-145.

Beres, A., Kónya, Z., Hannus, I., Molnár, Á. & Kiricsi, I. (1996). Interconversion of unsaturated C<sub>4</sub> nitriles under basic conditions II. Catalytic and FTIR study over basic zeolites. *Applied Catalysis A: General*, 146(2), 331-338.

Berndt, H., Lietz, G., Lücke, B. & Völter, J. (1996). Zinc promoted H-ZSM-5 catalysts for conversion of propane to aromatics I. Acidity and activity. *Applied Catalysis A: General*, 146(2), 351-363.

Binet, C., Daturi, M. & Lavalley, J. C. (1999). IR study of polycrystalline ceria properties in oxidised and reduced states. *Catalysis Today*, 50(2), 207-225.

Bulanin, K. M., Lavalley, J. C., Lamotte, J., Mariey, L., Tsyganenko, N. M. & Tsyganenko, A. A. (1998). Infrared study of ozone adsorption on CeO<sub>2</sub>. *The Journal of Physical Chemistry B*, 102(35), 6809-6816.

Busca, G. & Lorenzelli, V. (1982). Infrared spectroscopic identification of species arising from reactive adsorption of carbon oxides on metal oxide surfaces. *Materials Chemistry*, 7(1), 89-126.

Busca, G., Martra, G. & Zecchina, A. (2000). Characterisation by vibrational and electronic spectroscopies. *Catalysis today*, 56(4), 361-370.

Campelo, J. M., Lafont, F., Marinas, J. M. & Ojeda, M. (2000). Studies of catalyst deactivation in methanol conversion with high, medium and small pore silicoaluminophosphates. *Applied Catalysis A: General*, 192(1), 85-96.

Canizares, P., Carrero, A. & Sánchez, P. (2000). Isomerization of n-butene over ferrierite zeolite modified by silicon tetrachloride treatment. *Applied Catalysis A: General*, 190(1-2), 93-105.

Chavan, S., Srinivas, D. & Ratnasamy, P. (2000). Structure and catalytic properties of dimeric copper (II) acetato complexes encapsulated in zeolite-Y. *Journal of Catalysis*, 192(2), 286-295.

Chintawar, P. S. & Greene, H. L. (1997). Adsorption and catalytic destruction of trichloroethylene in hydrophobic zeolites. *Applied Catalysis B: Environmental*, 14(1-2), 37-47.

Concepcion, P., Nieto, J. L., Mifsud, A. & Pérez-Pariente, J. (1997). Synthesis, characterization and catalytic properties of microporous MgVAPO-5. *Applied Catalysis A: General*, 151(2), 373-392.

Coq, B., Tichit, D. & Ribet, S. (2000). Co/Ni/Mg/Al layered double hydroxides as precursors of catalysts for the hydrogenation of nitriles: hydrogenation of acetonitrile. *Journal of Catalysis*, 189(1), 117-128.

Damyanova, S. & Fierro, J. L. G. (1996). Surface properties of titania-supported 12-molybdophosphoric acid hydrodesulphurization catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 144(1-2), 59-77.

Dapaah, J. K. A., Uemichi, Y., Ayame, A., Matsushashi, H. & Sugioka, M. (1999). Activity enhancement of mesoporous silica (FSM-16) by modification with iron (II) sulphate for the isomerization of 1-butene. *Applied Catalysis A: General*, 187(1), 107-113.

de Carvalho, M. C. N. A., Passos, F. B. & Schmal, M. (2000). The behavior of Cu/ZSM-5 in the oxide and reduced form in the presence of NO and methanol. *Applied Catalysis A: General*, 193(1-2), 265-276.

Dejooz, A., Nieto, J. L., Marquez, F. & Vazquez, M. I. (1999). The role of molybdenum in Mo-doped V–Mg–O catalysts during the oxidative dehydrogenation of n-butane. *Applied Catalysis A: General*, 180(1-2), 83-94.

Diallo-Garcia, S., Laurencin, D., Krafft, J. M., Casale, S., Smith, M. E., Lauron-Pernot, H. & Costentin, G. (2011). Influence of magnesium substitution on the basic properties of hydroxyapatites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(49), 24317-24327.

Diallo-Garcia, S., Osman, M. B., Krafft, J. M., Casale, S., Thomas, C., Kubo, J. & Costentin, G. (2014). Identification of surface basic sites and acid–base pairs of hydroxyapatite. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(24), 12744-12757.

Economidis, N. V., Peña, D. A. & Smirniotis, P. G. (1999). Comparison of TiO<sub>2</sub>-based oxide catalysts for the selective catalytic



reduction of NO: effect of aging the vanadium precursor solution. *Applied Catalysis B: Environmental*, 23(2-3), 123-134.

Efthimiadis, E. A., Christoforou, S. C., Nikolopoulos, A. A. & Vasalos, I. A. (1999). Selective catalytic reduction of NO with C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> over Rh/alumina in the presence and absence of SO<sub>2</sub> in the feed. *Applied Catalysis B: Environmental*, 22(2), 91-106.

Eguchi, K., Kondo, T., Hayashi, T. & Arai, H. (1998). Sorption of nitrogen oxides on MnO<sub>y</sub>-ZrO<sub>2</sub> and Pt-ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Applied Catalysis B: Environmental*, 16(1), 69-77.

Eischens, R. P., Francis, S. A. & Pliskin, W. A. (1956). The Effect of Surface Coverage on the Spectra of Chemisorbed CO. *The Journal of Physical Chemistry*, 60(2), 194-201.

Fally, F., Perrichon, V., Vidal, H., Kaspar, J., Blanco, G., Pintado, J. M. & Lavalley, J. C. (2000). Modification of the oxygen storage capacity of CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> mixed oxides after redox cycling aging. *Catalysis Today*, 59(3-4), 373-386.

Flego, C., Galasso, L., Millini, R. & Kiricsi, I. (1998). The influence of the composition on the thermal and acid characteristics of multi-component oxide pillared montmorillonite. *Applied Catalysis A: General*, 168(2), 323-331.

Flego, C., Kiricsi, I., Parker Jr, W. O. & Clerici, M. G. (1995). Spectroscopic studies of LaHY-FAU catalyst deactivation in the alkylation of isobutane with 1-butene. *Applied Catalysis A: General*, 124(1), 107-119.

Fogash, K. B., Yaluris, G., Gonzalez, M. R., Ouraipryvan, P., Ward, D. A., Ko, E. I. & Dumesic, J. A. (1995). Characterization and selective poisoning of acid sites on sulfated zirconia. *Catalysis letters*, 32(3), 241-251.

Fu, Z., Yin, D., Yang, Y. & Guo, X. (1995). Characterization of modified ZSM-5 catalysts for propane aromatization prepared by a solid state reaction. *Applied Catalysis A: General*, 124(1), 59-71.

Ganemi, B., Björnbom, E. & Paul, J. (1998). Conversion and in situ FTIR studies of direct NO decomposition over Cu-ZSM5. *Applied Catalysis B: Environmental*, 17(4), 293-311.

Ghorpade, S. P., Darshane, V. S. & Dixit, S. G. (1998). Liquid-phase Friedel-Crafts alkylation using CuCr<sub>2</sub>-xFe<sub>x</sub>O<sub>4</sub> spinel catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 166(1), 135-142.

Guglielminotti, E., Boccuzzi, F., Manzoli, M., Pinna, F. & Scarpa, M. (2000). Ru/ZrO<sub>2</sub> Catalysts: I. O<sub>2</sub>, CO, and NO Adsorption and Reactivity. *Journal of Catalysis*, 192(1), 149-157.

Hadjiivanov, K., Knözinger, H., Tsyntsarski, B. & Dimitrov, L. (1999). Effect of water on the reduction of NO<sub>x</sub> with propane on Fe-ZSM-5. An FTIR mechanistic study. *Catalysis letters*, 62(1), 35-40.

Hadjiivanov, K., Concepción, P. & Knözinger, H. (2000). Analysis of oxidation states of vanadium in vanadia-titania catalysts by the IR spectra of adsorbed NO. *Topics in Catalysis*, 11(1), 123-130.

Hadjiivanov, K. I. & Vayssilov, G. N. (2002). Characterization of oxide surfaces and zeolites by carbon monoxide as an IR probe molecule, [Advances in Catalysis](#), 47, 307-511.

Hannus, I. (1999). Adsorption and transformation of halogenated hydrocarbons over zeolites. *Applied Catalysis A: General*, 189(2), 263-276.

Hashimoto, K., Hanada, Y., Minami, Y. & Kera, Y. (1996). Conversion of methanol to dimethyl ether and formaldehyde over alumina intercalated in a montmorillonite. *Applied Catalysis A: General*, 141(1-2), 57-69.

Hashimoto, K., Fukuhara, K., Fujiwara, Y., Kominami, H., Mishima, H. & Kera, Y. (1997). Selective reduction of NO<sub>x</sub> with ammonia over a titania highly dispersed on mordenite. *Applied Catalysis A: General*, 165(1-2), 451-459.

Heinichen, H. K. & Hölderich, W. F. (1999). Acylation of 2-methoxynaphthalene in the presence of modified zeolite HBEA. *Journal of Catalysis*, 185(2), 408-414.

Heitmann, G. P., Dahlhoff, G. & Hölderich, W. F. (1999). Catalytically active sites for the Beckmann rearrangement of cyclohexanone oxime to  $\epsilon$ -caprolactam. *Journal of Catalysis*, 186(1), 12-19.

Henriques, C., Ribeiro, M. F., Abreu, C., Murphy, D. M., Poignant, F., Saussey, J. & Lavalley, J. C. (1998). An FT-IR study of NO adsorption over Cu-exchanged MFI catalysts: Effect of Si/Al ratio, copper loading and catalyst pre-treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 16(1), 79-95.

Huang, S. J., Walters, A. B. & Vannice, M. A. (2000). Adsorption and decomposition of NO on lanthanum oxide. *Journal of Catalysis*, 192(1), 29-47.

Huang, Y., Poissant, R. R. & Qiu, P. (2000). Study of the Reactivity of Mn (CO)<sub>5</sub>Br on the Surface of Zeolites by Fourier Transform Raman and Infrared spectroscopy. *Langmuir*, 16(3), 889-893.

Ivanov, A. V., Graham, G. W. & Shelef, M. (1999). Adsorption of hydrocarbons by ZSM-5 zeolites with different SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios: a combined FTIR and gravimetric study. *Applied Catalysis B: Environmental*, 21(4), 243-258.

Isaev, Y., & Fripiat, J. J. (1999). A Lewis acid site-activated reaction in zeolites: Thiophene acylation by butyryl chloride. *Journal of Catalysis*, 182(1), 257-263.

Jarecka, T. & Datka, J. (1999). Acid and catalytic properties of new thermostable sulfocationic exchangers supported on aluminosilicates. *Applied Catalysis A: General*, 184(2), 203-209.

Jung, S. M. & Grange, P. (2000). Characterization and reactivity of pure TiO<sub>2</sub>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> SCR catalyst: influence of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> content. *Catalysis Today*, 59(3-4), 305-312.

Kondo, J. N., Ishikawa, H., Yoda, E., Wakabayashi, F. & Domen, K. (1999). Structure of Dimerized Alkoxy Species of 2-Methylpropene on Zeolites and Silica– Alumina Studied by FT-IR. *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(40), 8538-8543.

Kovacheva, P., Arishtirova, K. & Davidova, N. (1999). Oxidative methylation of toluene with methane catalyzed by cesium modified molecular sieves. *Applied Catalysis A: General*, 178(1), 111-115.

Knözinger, H. & Huber, S. (1998). IR spectroscopy of small and weakly interacting molecular probes for acidic and basic zeolites. *Journal of the chemical society, faraday transactions*, 94(15), 2047-2059.

Kuehne, M. A., Babitz, S. M., Kung, H. H. & Miller, J. T. (1998). Effect of framework Al content on HY acidity and cracking activity. *Applied Catalysis A: General*, 166(2), 293-299.

Labalme, V., Benhamou, N., Guilhaume, N., Garbowski, E. & Primet, M. (1995). Modifications of Pt/alumina combustion catalysts by barium addition I. Properties of fresh catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 133(2), 351-366.

Larkin, P. (2011). IR and Raman spectra-structure correlations: Characteristic group frequencies. *Infrared and Raman spectroscopy*, 73-115.

Lavalley, J. C. (1996). Infrared spectrometric studies of the surface basicity of metal oxides and zeolites using adsorbed probe molecules. *Catalysis Today*, 27(3-4), 377-401.

Leclercq, E., Rives, A., Payen, E. & Hubaut, R. (1998). X-ray photoelectron spectroscopy and infrared spectroscopy studies for the mechanism of the enantioselective hydrogenation of methyl acetoacetate over mixed nickel–cerium oxides. *Applied Catalysis A: General*, 168(2), 279-288.

Lercher, J. A., Gründling, C. & Eder-Mirth, G. (1996). Infrared studies of the surface acidity of oxides and zeolites using adsorbed probe molecules. *Catalysis Today*, 27(3-4), 353-376.

Levinbuk, M. I., Pavlov, M. L., Kustov, L. M., Fraissard, J. P., Vasina, T. V., Kazakov, A. V. & Smorodinskaya, Y. Y. (1998). Physicochemical and catalytic properties of a new type of as-synthesized aluminium-deficient Y zeolite. *Applied Catalysis A: General*, 172(1), 177-191.

Li, J. & Coville, N. J. (1999). The effect of boron on the catalyst reducibility and activity of Co/TiO<sub>2</sub> Fischer–Tropsch catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 181(1), 201-208.

Li, J., Zhang, W., Gao, L., Gu, P., Sha, K. & Wan, H. (1997). Methanol synthesis on Cu—Zn—Al and Cu—Zn—Al—Mn catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 165(1-2), 411-417.

Li, W., Oshihara, K. & Ueda, W. (1999). Catalytic performance for propane selective oxidation and surface properties of 12-molybdophosphoric acid treated with pyridine. *Applied Catalysis A: General*, 182(2), 357-363.

Li, Y. & Armor, J. N. (1999). Ammoxidation of ethane to acetonitrile. IV: substantial differences between Y and dealuminated Y zeolite. *Applied Catalysis A: General*, 183(1), 107-120.

Li, Y. G., Xie, W. H. & Yong, S. (1997). The acidity and catalytic behavior of Mg-ZSM-5 prepared via a solid-state reaction. *Applied Catalysis A: General*, 150(2), 231-242.

Liang, Q., Chen, K., Hou, W. & Yan, Q. (1998). CO hydrogenation over nanometer spinel-type Co/Mn complex oxides prepared by sol-gel method. *Applied Catalysis A: General*, 166(1), 191-199.

Lietti, L., Nova, I., Ramis, G., Dall'Acqua, L., Busca, G., Giamello, E. & Bregani, F. (1999). Characterization and reactivity of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> de-NO<sub>x</sub> SCR catalysts. *Journal of catalysis*, 187(2), 419-435.

Lima, A. A. G., Nele, M., Moreno, E. L. & Andrade, H. M. C. (1998). Composition effects on the activity of Cu–ZnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based catalysts for the water gas shift reaction: A statistical approach. *Applied Catalysis A: General*, 171(1), 31-43.

Lischke, G., Parlitz, B., Lohse, U., Schreier, E. & Fricke, R. (1998). Acidity and catalytic properties of MeAPO-5 molecular sieves. *Applied Catalysis A: General*, 166(2), 351-361.

Loaiza-Gil, A., Fontal, B., Rueda, F., Mendiáldua, J. & Casanova, R. (1999). On carbonaceous deposit formation in carbon monoxide hydrogenation on a natural iron catalyst. *Applied Catalysis A: General*, 177(2), 193-203.

Lobree, L. J., Aylor, A. W., Reimer, J. A. & Bell, A. T. (1999). NO Reduction by CH<sub>4</sub> in the Presence of O<sub>2</sub> over Pd-H-ZSM-5. *Journal of Catalysis*, 181(2), 189-204.

Long, R. Q. & Yang, R. T. (1999). Acid- and base-treated Fe<sup>3+</sup>-TiO<sub>2</sub>-pillared clays for selective catalytic reduction of NO by NH<sub>3</sub>. *Catalysis letters*, 59(1), 39-44.

Lopez, T., Navarrete, J., Gomez, R., Novaro, O., Figueras, F. & Armendariz, H. (1995). Preparation of sol-gel sulfated ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and characterization of its surface acidity. *Applied Catalysis A: General*, 125(2), 217-232.

Lopez, T., Bosch, P., Tzompantzi, F., Gomez, R., Navarrete, J., Lopez-Salinas, E. & Llanos, M. E. (2000). Effect of sulfation methods on TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> sol–gel catalyst acidity. *Applied Catalysis A: General*, 197(1), 107-117.

Lopez-Salinas, E., Hernandez-Cortez, J. G., Schifter, I., Torres-Garcia, E., Navarrete, J., Gutierrez-Carrillo, A. & Bersani, D. (2000). Thermal stability of 12-tungstophosphoric acid supported on zirconia. *Applied Catalysis A: General*, 193(1-2), 215-225.

Lugstein, A., Jentys, A. & Vinek, H. (1999). Hydroisomerization and cracking of n-octane and C<sub>8</sub> isomers on Ni-containing zeolites. *Applied Catalysis A: General*, 176(1), 119-128.

Luukkanen, S., Homanen, P., Haukka, M., Pakkanen, T. A., Deronzier, A., Chardon-Noblat, S. & Ziessel, R. (1999). Chemically modified ruthenium mono (bipyridine) carbonyl complexes in water gas shift reaction. *Applied Catalysis A: General*, 185(1), 157-164.

Malyala, R. V., Rode, C. V., Arai, M., Hegde, S. G. & Chaudhari, R. V. (2000). Activity, selectivity and stability of Ni and bimetallic Ni–Pt supported on zeolite Y catalysts for hydrogenation of acetophenone and its substituted derivatives. *Applied Catalysis A: General*, 193(1-2), 71-86.

Mariey, L., Lamotte, J., Chevreau, T. & Lavalley, J. C. (1996). FT-IR study of coked HY zeolite regeneration using oxygen or ozone. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 59(2), 241-246.

Martra, G. (2000). Lewis acid and base sites at the surface of microcrystalline TiO<sub>2</sub> anatase: relationships between surface morphology and chemical behaviour. *Applied Catalysis A: General*, 200(1-2), 275-285.

Marturano, P., Kogelbauer, A. & Prins, R. (2000). Preparation of Overexchanged Fe–ZSM-5 Zeolites Using the Ferrous Oxalate Method: Why Does It Fail? *Journal of Catalysis*, 190(2), 460-468.

Marturano, P., Drozdová, L., Kogelbauer, A. & Prins, R. (2000). Fe/ZSM-5 prepared by sublimation of FeCl<sub>3</sub>: the structure of the Fe species as determined by IR, 27Al MAS NMR, and EXAFS spectroscopy. *Journal of Catalysis*, 192(1), 236-247.

McFarland, E. W. & Metiu, H. (2013). Catalysis by doped oxides. *Chemical reviews*, 113(6), 4391-4427.

Millar, G. J., Canning, A., Rose, G., Wood, B., Trewartha, L. & Mackinnon, I. D. (1999). Identification of copper species present in Cu-ZSM-5 catalysts for NO<sub>x</sub> reduction. *Journal of Catalysis*, 183(2), 169-181.

Miller, J. M. & Lakshmi, L. J. (2000). V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> catalysts supported on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> mixed oxide: 51V, 1H MAS solid-state

NMR, DRIFTS and methanol oxidation studies. *Applied Catalysis A: General*, 190(1-2), 197-206.

Mostad, H. B., Stöcker, M., Karlsson, A. & Rørvik, T. (1996). Comparison of the iso-structural H-SAPO-37 and H-faujasite as catalysts for the isobutane/2-butene alkylation. *Applied Catalysis A: General*, 144(1-2), 305-317.

Müller, C. A., Schneider, M., Mallat, T. & Baiker, A. (2000). Titania-silica epoxidation catalysts modified by polar organic functional groups. *Journal of Catalysis*, 189(1), 221-232.

Myllyoja, S. & Pakkanen, T. A. (2000). Controlled deposition of chromium hexacarbonyl on silica surfaces in a fluidised bed reactor. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 156(1-2), 195-203.

Nagai, M., Goto, Y., Irisawa, A. & Omi, S. (2000). Catalytic activity and surface properties of nitrated molybdena-alumina for carbazole hydrodenitrogenation. *Journal of catalysis*, 191(1), 128-137.

Narayana, K. V., Venugopal, A., Rao, K. R., Masthan, S. K., Rao, V. V. & Rao, P. K. (1998). Ammoxidation of 3-picoline over V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (anatase) system. II. Characterisation of the catalysts by DTA, SEM, FTIR, ESR and oxygen and ammonia chemisorption. *Applied Catalysis A: General*, 167(1), 11-22.

Narayanan, S. & Krishna, K. (1998). Hydrotalcite-supported palladium catalysts: Part I: Preparation, characterization of hydrotalcites and palladium on uncalcined hydrotalcites for CO chemisorption and phenol hydrogenation. *Applied Catalysis A: General*, 174(1-2), 221-229.

Navarro, R., Pawelec, B., Fierro, J. L. G. & Vasudevan, P. T. (1996). Dibenzothiophene hydrodesulfurization on silica-alumina-supported transition metal sulfide catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 148(1), 23-40.



Neyman, K. M., Strodel, P., Ruzankin, S. P., Schlenso, N., Knözinger, H. & Rösch, N. (1995). N<sub>2</sub> and CO molecules as probes of zeolite acidity: An infrared spectroscopy and density functional investigation. *Catalysis letters*, 31(2), 273-285.

Niemantsverdriet, J.W. (2007). Spectroscopy in Catalysis: An Introduction. 3rd completely revised and enlarged ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Panov, A. G. & Fripiat, J. J. (1999). Poisoning of aldol condensation reaction with H<sub>2</sub>O on acid catalysts. *Catalysis letters*, 57(1), 25-32.

Parry, E. P. (1963). An infrared study of pyridine adsorbed on acidic solids. Characterization of surface acidity. *Journal of Catalysis*, 2(5), 371-379.

Pârvulescu, V., Coman, S., Grange, P. & Pârvulescu, V. I. (1999). Preparation and characterization of sulfated zirconia catalysts obtained via various procedures. *Applied Catalysis A: General*, 176(1), 27-43.

Parvulescu, V. I., Oelker, P., Grange, P. & Delmon, B. (1998). NO decomposition over bicomponent Cu-Sm-ZSM-5 zeolites. *Applied Catalysis B: Environmental*, 16(1), 1-17.

Pawewan, B., Barrie, P. J. & Gladden, L. F. (1998). Coking during ethene conversion on ultrastable zeolite Y. *Applied Catalysis A: General*, 167(2), 353-362.

Pawewan, B., Barrie, P. J. & Gladden, L. F. (1999). Coking and deactivation during n-hexane cracking in ultrastable zeolite Y. *Applied Catalysis A: General*, 185(2), 259-268.

Pawelec, B., Navarro, R., Fierro, J. L. G. & Vasudevan, P. T. (1998). Studies of molybdenum sulfide catalyst ex ammonium tetrathiomolybdate: Effect of pretreatment on hydrodesulfurization of dibenzothiophene. *Applied Catalysis A: General*, 168(2), 205-217.

Paulis, M., Martín, M., Soria, D. B., Díaz, A., Odriozola, J. A. & Montes, M. (1999). Preparation and characterization of niobium oxide for the catalytic aldol condensation of acetone. *Applied Catalysis A: General*, 180(1-2), 411-420.

Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S. & Vyvyan, J. A. (2014). *Introduction to spectroscopy*. Cengage learning. 5th ed., Brooks/Cole, California, pp. 1-689.

Paze, C., Sazak, B., Zecchina, A. & Dwyer, J. (1999). FTIR and UV–vis spectroscopic study of interaction of 1-butene on H–ferrierite zeolite. *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(45), 9978-9986.

Paze, C., Turnes Palomino, G. & Zecchina, A. (1999). CF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>H and CF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>H/CD<sub>3</sub>CN adducts in silicalite channels as model systems for H-ZSM-5 Brønsted acidity evaluation. *Catalysis letters*, 60(3), 139-143.

Poels, E. K. & Brands, D. S. (2000). Modification of Cu/ZnO/SiO<sub>2</sub> catalysts by high temperature reduction. *Applied Catalysis A: General*, 191(1-2), 83-96.

Pophal, C., Yogo, T., Yamada, K. & Segawa, K. (1998). Selective catalytic reduction of nitrous oxide over Fe-MFI in the presence of propene as reductant. *Applied Catalysis B: Environmental*, 16(2), 177-186.

Raj, A., Le, T. H. N., Kaliaguine, S. & Auroux, A. (1998). Involvement of nitrate species in the SCR of NO by NH<sub>3</sub> at ambient conditions over TS-1 catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 15(3-4), 259-267.

Ramírez, S., Viniegra, M., Domínguez, J. M., Schacht, P. & De Ménorval, L. C. (2000). n-heptane reforming over Pt supported on beta zeolite exchanged with Cs and Li cations. *Catalysis letters*, 66(1), 25-32.

Ramírez, J., Contreras, R., Castillo, P., Klimova, T., Zárata, R. & Luna, R. (2000). Characterization and catalytic activity of

CoMo HDS catalysts supported on alumina-MCM-41. *Applied Catalysis A: General*, 197(1), 69-78.

Reiche, M. A., Hug, P. & Baiker, A. (2000). Effect of grafting sequence on the behavior of titania-supported v V2O5-WO3 catalysts in the selective reduction of NO by NH3. *Journal of Catalysis*, 192(2), 400-411.

Rodriguez, L. M., Alcaraz, J., Hernandez, M., Dufaux, M., Taarit, Y. B. & Vrinat, M. (1999). Fluorinated alumina: characterization of acid sites and relationship between acidity and activity in benzene alkylation. *Applied Catalysis A: General*, 189(1), 53-61.

Sadykov, V. A., Beloshapkin, S. A., Paukshtis, E. A., Alikina, G. M., Kochubei, I., Degtyarev, S. P. & Rozovskii, A. Y. (1998). Hydrocarbon specificity in the selective catalytic reduction of NOx over Cu-ZSM-5 and Co-ZSM-5 catalysts. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 64(1), 185-191.

Salker, A. V. & Weisweiler, W. (2000). Catalytic behaviour of metal based ZSM-5 catalysts for NOx reduction with NH3 in dry and humid conditions. *Applied Catalysis A: General*, 203(2), 221-229.

Sarbak, Z. (1997). Acidity, cumene conversion and thiophene hydrodesulfurization over alumina and surface modified aluminas. *Applied Catalysis A: general*, 159(1-2), 147-157.

Satsuma, A., Cowan, A. D., Cant, N. W. & Trimm, D. L. (1999). FTIR Studies of the Origin of Deactivation during the Decomposition of Nitromethane on Co-ZSM5. *Journal of Catalysis*, 181(1), 165-169.

Schay, Z., Knözinger, H., Gucci, L. & Pál-Borbely, G. (1998). On the mechanism of NO decomposition on Cu-ZSM-5 catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 18(3-4), 263-271.

Schekler-Nahama, F., Clause, O., Commereuc, D. & Saussey, J. (1998). Evidences for the presence of aluminium

perrhenate at the surface of  $\text{Re}_2\text{O}_7/\text{Al}_2\text{O}_3$  metathesis catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 167(2), 247-256.

Segawa, K. & Shimura, T. (2000). Effect of dealumination of mordenite by acid leaching for selective synthesis of ethylenediamine from ethanolamine. *Applied Catalysis A: General*, 194, 309-317.

Shimokawabe, M., Tadokoro, K. I., Sasaki, S. & Takezawa, N. (1998). Temperature programmed desorption and infrared spectroscopic studies of nitrogen monoxide adsorbed on ion-exchanged copper mordenite catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 166(1), 215-223.

S. Kowalak, M. Łaniecki, M. Pawłowska, K.J. Balkus Jr., A. Khanmamedova, in: A. Andreev, L. Petrov, Ch. Bonev, G. Kadinov, I. Mitov (Eds.), *Heterogeneous Catalysis, Proceedings of the Eighth International Symposium, Varna, October 5–9, 1996*, Institute of Catalysis, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, 1996, pp. 793–798.

Sohn, J. R., Kim, H. W., Park, M. Y., Park, E. H., Kim, J. T. & Park, S. E. (1995). Highly active catalyst of  $\text{NiO}-\text{ZrO}_2$  modified with  $\text{H}_2\text{SO}_4$  for ethylene dimerization. *Applied Catalysis A: General*, 128(1), 127-141.

Spielbauer, D., Mekhemer, G. A., Zaki, M. I. & Knözinger, H. (1996). Acidity of sulfated zirconia as studied by FTIR spectroscopy of adsorbed CO and  $\text{NH}_3$  as probe molecules. *Catalysis letters*, 40(1), 71-79.

Spoto, G., Geobaldo, F., Bordiga, S., Lamberti, C., Scarano, D. & Zecchina, A. (1999). Heterocycles oligomerization in acidic zeolites: a UV-visible and IR study. *Topics in Catalysis*, 8(3), 279-292.

Su, B. L., Norberg, V. & Hansenne, C. (2000). Infrared spectroscopic study on the location of benzene in KL zeolite upon

coadsorption of ammonia and methylamine. *Langmuir*, 16(3), 1132-1140.

Thibault-Starzyk, F., Travert, A., Saussey, J. & Lavalley, J. C. (1998). Correlation between activity and acidity on zeolites: a high temperature infrared study of adsorbed acetonitrile. *Topics in Catalysis*, 6(1), 111-118.

Török, B., Molnár, Á., Balogh, N., Kiricsi, I., Pálinkó, I. & Horváth, L. (1997). Homogeneous catalysis by heteropoly acids: A redox transformation of H<sub>4</sub> [SiMo<sub>12</sub>O<sub>40</sub>] in electrophilic reactions. *Applied Catalysis A: General*, 158(1-2), L17-L25.

Tran, M. T., Gnep, N. S., Szabo, G. & Guisnet, M. (1998). Influence of the calcination temperature on the acidic and catalytic properties of sulphated zirconia. *Applied Catalysis A: General*, 171(2), 207-217.

Tripp, C. P. & Combes, J. R. (1998). Chemical modification of metal oxide surfaces in supercritical CO<sub>2</sub>: The interaction of supercritical CO<sub>2</sub> with the adsorbed water layer and the surface hydroxyl groups of a silica surface. *Langmuir*, 14(26), 7348-7352.

Trombetta, M., Busca, G., Lenarda, M., Storaro, L. & Pavan, M. (1999). An investigation of the surface acidity of mesoporous Al-containing MCM-41 and of the external surface of ferrierite through pivalonitrile adsorption. *Applied Catalysis A: General*, 182(2), 225-235.

Trombetta, M., Armaroli, T., Alejandre, A. G., Solis, J. R. & Busca, G. (2000). An FT-IR study of the internal and external surfaces of HZSM5 zeolite. *Applied Catalysis A: General*, 192(1), 125-136.

Trombetta, M., Busca, G., Lenarda, M., Storaro, L., Ganzerla, R., Piovesan, L., Lopez, A.J., Alcantara-Rodriguez, M. & Rodriguez-Castellon, E. (2000). Solid acid catalysts from clays: Evaluation of surface acidity of mono- and bi-pillared smectites by

FT-IR spectroscopy measurements, NH<sub>3</sub>-TPD and catalytic tests. *Applied Catalysis A: General*, 193(1-2), 55-69.

Trombetta, M., Alejandre, A. G., Solis, J. R. & Busca, G. (2000). An FT-IR study of the reactivity of hydrocarbons on the acid sites of HZSM5 zeolite. *Applied Catalysis A: General*, 198(1-2), 81-93.

Trunschke, A., Hoang, D. L., Radnik, J. & Lieske, H. (2000). Influence of lanthana on the nature of surface chromium species in La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-modified CrO<sub>x</sub>/ZrO<sub>2</sub> catalysts. *Journal of Catalysis*, 191(2), 456-466.

Veefkind, V. A., Smidt, M. L. & Lercher, J. A. (2000). On the role of strength and location of Brønsted acid sites for ethylamine synthesis on mordenite catalysts. *Applied catalysis A: general*, 194, 319-332.

Vimalan, M. (2021). Fourier Transform Infrared Spectroscopy analysis of siddha drug “Vediyuppu Seyaneer”. *Journal of Traditional and Integrative Medicine*, 4(2), 498-502.

Viswanath, R. P. & Wilson, P. (2000). Characterisation of ceria supported chromia catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 201(1), 23-35.

Vorob'eva, M. P., Greish, A. A., Ivanov, A. V. & Kustov, L. M. (2000). Preparation of catalyst carriers on the basis of alumina supported on metallic gauzes. *Applied Catalysis A: General*, 199(2), 257-261.

Wang, F. L. & Tsai, T. F. (2000). Promotion effect of Pt on Cr/MgO catalyst in the reaction of cyclohexanol and methanol to 2, 6-dimethylphenol. *Applied Catalysis A: General*, 201(1), 91-99.

Watson, R. B. & Ozkan, U. S. (2000). K/Mo catalysts supported over sol-gel silica-titania mixed oxides in the oxidative dehydrogenation of propane. *Journal of Catalysis*, 191(1), 12-29.

Weyrich, P. A. & Hölderich, W. F. (1997). Dehydrogenation of  $\alpha$ -limonene over Ce promoted, zeolite supported Pd catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 158(1-2), 145-162.

Wildberger, M. D., Mallat, T., Göbel, U. & Baiker, A. (1998). Oxidation of butane and butadiene to furan over vanadia-silica mixed oxides. *Applied Catalysis A: General*, 168(1), 69-80.

White, L. D. & Tripp, C. P. (2000). A low-frequency infrared study of the reaction of methoxymethylsilanes with silica. *Journal of colloid and interface science*, 224(2), 417-424.

Xie, J. & Kaliaguine, S. (1997). Zeolite ball milling as a means of enhancing the selectivity for base catalyzed reactions. *Applied Catalysis A: General*, 148(2), 415-423.

Yadav, G. D. & Bokade, V. V. (1996). Novelities of heteropoly acid supported on clay: etherification of phenethyl alcohol with alkanols. *Applied Catalysis A: General*, 147(2), 299-323.

Yadav, G. D. & Kirthivasan, N. (1997). Synthesis of bisphenol-A: comparison of efficacy of ion exchange resin catalysts vis-à-vis heteropolyacid supported on clay and kinetic modelling. *Applied Catalysis A: General*, 154(1-2), 29-53.

Yamauchi, S., Mori, T. & Yamamura, H. (1995). Selective reduction of nitrogen oxide with propene on protonated  $\beta$ -alumina catalyst: Design of active site for catalytic reaction. *Applied Catalysis A: General*, 132(1), 21-27.

Yang, M. G., Nakamura, I. & Fujimoto, K. (1996). M-xylene transformation over Ni/SAI2O3-USY hybrid catalysts effects of hydrogen spillover. *Applied Catalysis A: General*, 144(1-2), 221-235.

Yang, R. T., Li, W. B. & Chen, N. (1998). Reversible chemisorption of nitric oxide in the presence of oxygen on titania and titania modified with surface sulfate. *Applied Catalysis A: General*, 169(2), 215-225.

Yen, P. W. & Chou, T. C. (1999). Formation of palladium metal active sites on styrene–divinylbenzene copolymer catalyst by alcohol reduction at room temperature. *Applied Catalysis A: General*, 182(2), 217-223.

Yoda, E., Kondo, J. N., Wakabayashi, F. & Domen, K. (2000). Shape selective adsorption of olefins on Brønsted acidic OH (OD) groups on ferrierite studied by FT-IR. *Applied Catalysis A: General*, 194, 275-283.

Yoo, J. W., Lee, C. W., Chang, J. S., Park, S. E. & Ko, J. (2000). Characterization and catalytic properties of Ti-ZSM-5 prepared by chemical vapor deposition. *Catalysis letters*, 66(3), 169-173.

Zaki, M. I., Hasan, M. A. & Pasupulety, L. (2000). Influence of CuOx additives on CO oxidation activity and related surface and bulk behaviours of Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and WO<sub>3</sub> catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 198(1-2), 247-259.

Zama, K., Imada, Y., Fukuoka, A. & Ichikawa, M. (2000). Propene metathesis reaction on di- and trinuclear molybdenum complexes grafted on mesoporous FSM-16 and silica: Structural characterization and their catalytic performances. *Applied Catalysis A: General*, 194, 285-296.

Zavoianu, R., Angelescu, E., Nenu, C. & Nastase, N. (2000). in: L. Petrov, Ch. Bonev, G. Kadinov (Eds.), *Heterogeneous Catalysis, Proceedings of the Ninth International Symposium, Selective Dimerization of Ethylene on Pt Organometallic Complex Encapsulated In Y Zeolite*, Varna, 23–27 September 2000, Institute of Catalysis, Bulgarian Academy of Science, Sofia, 2000, pp. 447–452.

Zhang, W. & Smirniotis, P. G. (1998). Dealuminated zeolite-based composite catalysts for reforming of an industrial naphthene-rich feedstock. *Applied Catalysis A: General*, 168(1), 113-130.



Zheng, J., Dong, J. L., Xu, Q. H., Liu, Y. & Yan, A. Z. (1995). Comparison between  $\beta$  and L zeolites supported platinum for n-hexane aromatization. *Applied Catalysis A: General*, 126(1), 141-152.