



HASTANELERDE SÜRTÜNMELİ SARKAÇ TİPİ İZOLATÖRLERİN TAŞIYICI SİSTEME ETKİSİ

Mehdi ÖZTÜRK*

İstanbul Arel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Özet
<i>Deprem, TBDY-2018, Sismik İzolatör, Sürtünmeli Sarkaç, Yapısal Deformasyon.</i>	Deprem, hem tarihi hem de modern betonarme ve çelik yapılar için büyük risk oluşturan doğal afetlerdir. Türkiye gibi aktif deprem kuşağında yer alan ülkelerde yapı güvenliğinin sağlanması kritik bir öneme sahiptir. Deprem hasarlarını minimize etmek amacıyla geliştirilen sismik izolasyon sistemleri, yapıların deprem yüklerine karşı dayanıklılığını artıran etkili mühendislik çözümlerindendir. Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'e göre, sürtünmeli sarkaç izolatörlerin sismik performans üzerindeki etkisi konu alınmıştır. Çalışma kapsamında bir hastane binası, geleneksel yaklaşım ve sismik izolatörlü olarak hedef sismik performansı sağlayacak şekilde ayrı ayrı tasarlanmıştır. Sayısal analizler sonucunda, sismik izolasyonun yapı periyodunu uzatarak deprem kuvvetlerini azalttığı, göreceli kat ötelemelerini düşürdüğü ve yapısal deformasyonları minimize ettiği belirlenmiştir. Ayrıca, izolasyon sisteminin maliyet analizi yapılmış ve izolatörlü bina maliyetinin geleneksel betonarme binaya kıyasla %20 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ancak sonuç olarak, sürtünmeli sarkaç izolatör sistemlerinin, hastane gibi kritik yapıların sismik dayanıklılığını artırmada önemli bir mühendislik çözümü olduğu vurgulanmıştır.

THE EFFECT OF FRICTION PENDULUM TYPE ISOLATORS ON THE STRUCTURAL SYSTEMS OF HOSPITALS

Keywords	Abstract
<i>Earthquake, TBDY-2018, Seismic Isolators, Friction Pendulum, Structural Deformation.</i>	Earthquakes are natural disasters that pose significant risks to both historical and modern reinforced concrete and steel structures. In countries like Turkey, which are located in active seismic zones, ensuring the safety of structures is of critical importance. Seismic isolation systems, developed to minimize earthquake-induced damage, are effective engineering solutions that enhance the resilience of structures against seismic loads. In this study, the impact of friction pendulum isolators on seismic performance is investigated in accordance with the Turkish Building Earthquake Code (TBEC) 2018. A hospital building was designed using both the conventional approach and with seismic isolation, with the goal of achieving the target seismic performance level in each case. Numerical analyses revealed that seismic isolation increases the structural period, thereby reducing seismic forces, decreasing inter-story drifts, and minimizing structural deformations. Furthermore, a cost analysis of the isolation system was conducted, indicating that the cost of the isolated building is approximately 20% higher compared to a conventional reinforced concrete structure. Nevertheless, the study concludes that friction pendulum isolator systems represent a significant engineering solution for enhancing the seismic resilience of critical structures such as hospitals.

Alıntı / Cite

Öztürk, M., (2025). Sürtünmeli Sarkaç Tipi İzolatörlerin Hastanelerin Taşıyıcı Sistemine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 570-581.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process								
M. Öztürk, 0000-0003-4147-0431	<table><tr><td>Başvuru Tarihi / Submission Date</td><td>22.02.2025</td></tr><tr><td>Revizyon Tarihi / Revision Date</td><td>14.05.2025</td></tr><tr><td>Kabul Tarihi / Accepted Date</td><td>20.05.2025</td></tr><tr><td>Yayın Tarihi / Published Date</td><td>27.06.2025</td></tr></table>	Başvuru Tarihi / Submission Date	22.02.2025	Revizyon Tarihi / Revision Date	14.05.2025	Kabul Tarihi / Accepted Date	20.05.2025	Yayın Tarihi / Published Date	27.06.2025
Başvuru Tarihi / Submission Date	22.02.2025								
Revizyon Tarihi / Revision Date	14.05.2025								
Kabul Tarihi / Accepted Date	20.05.2025								
Yayın Tarihi / Published Date	27.06.2025								

* İlgili yazar / Corresponding author: mehdiozturk@arel.edu.tr, +90 535 819 4080

THE EFFECT OF FRICTION PENDULUM TYPE ISOLATORS ON THE STRUCTURAL SYSTEMS OF HOSPITALS

Mehdi Öztürk[†],

İstanbul Arel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Highlights

- Isolators increase the total construction cost by only 20%.
- Thanks to isolators, hospitals continue to provide patient care without interruption.
- Since the relative drifts and accelerations are lower in the seismically isolated model, the earthquake effect is felt less by those living in the building.

Graphical Abstract

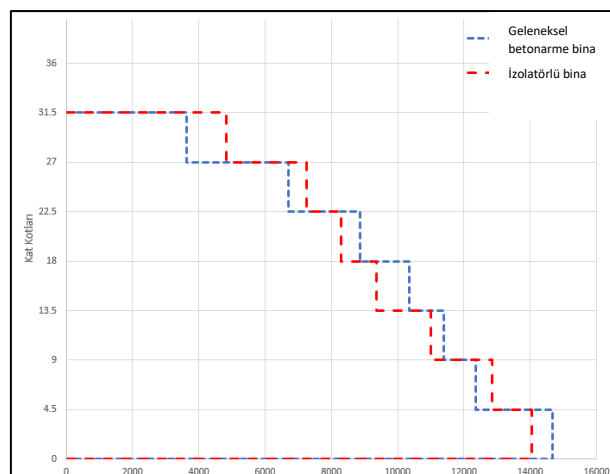


Figure. Change in shear forces on floors in buildings with and without seismic isolators

Purpose and Scope

In this study, which was carried out to demonstrate the energy absorption capacity of friction pendulum type isolators and their effect on the structural system, a cost analysis was made for a hospital building aimed to provide the immediate occupancy performance level.

Design/methodology/approach

As a methodology, earthquake parameters were calculated according to TBDY 2018 regulation in the first stage of the study. A sample hospital structure was selected and modeled and analyzed with ETABS software using the finite element method. According to the results, the quantity survey was prepared and the effect of the construction cost of the isolators was calculated.

Findings

As a result of numerical analysis, it was determined that seismic isolation reduces earthquake forces by extending the building period, reduces relative storey drifts and minimizes structural deformations. It has been observed that isolators increase the construction cost by an average of 10% .

Originality

There is a general mistake in calculating the cost of buildings with isolators. When calculating, the cost of the isolators itself is added to the building cost. However, in the design with isolators, there are structural elements that will be missing from the structure. For this reason, there will be a decrease in the cost of the structure itself. From this perspective, scientifically revealing the amount reduced in the total structure cost due to the structural elements that friction pendulum type isolators will remove from the structure distinguishes this study from others and makes it original.

[†] Corresponding author: mehdioturk@arel.edu.tr , +905358194080

1. Giriş (Introduction)

Depremler, ülkemizin gerçeği olan kaçınılmaz tektonik olaylardır. Çok eski zamanlardan günümüze kadar birçok coğrafi bölgemizde büyük depremler görülmüştür ve bu depremlerin sonucunda çok fazla can ve mal kaybı yaşanmıştır. Sismik olarak aktif bir kuşak üzerinde konumlanmamız sebebiyle büyük depremlerin gelecek yıllarda da oluşacağı açıktır. Mevcut yapıların değerlendirilmesi veya yeni yapılacak binaların tasarımlarında depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkeleri izlenmektedir. Bu prosedürlerde konu alınan yapıların, hedef bir sismik performansı sağladığı öngörülmektedir ve hesaplamalar bu doğrultuda yapılmaktadır. Depremlerde yaşanan yer sarsıntısı ile yapının kendi ataletine bağlı olarak, büyük göreceli ötelenmeler ve önemli kesit tesirleri oluşabilmektedir. Bu durumda yapının, maruz kaldığı kuvvet ve momentlerin taşıyıcı sistem tarafından taşınması gerekmektedir. Bu aşamada yapı, tasarım yaklaşımına da bağlı olarak belli bir miktar hasar alma yoluyla enerjiyi sönümleme imkanına da sahiptir. Ancak, sismik izolasyon yöntemlerinin kullanılmasıyla, yapıya aktarılan deprem ivmelerini düşürerek yapının taşımak zorunda kalacağı etkilerin azaltılması da mümkündür (Lee vd., 2001; Wu ve Samali, 2002; Türker, 2003). Sismik izolasyon uygulamasında, yer değiştirmeler yanallı rijitliği düşük olan izolasyon sisteminde toplanarak deprem ivmeleri sönümlenmektedir ve böylece üst yapının göreceli ötelenme değerleri azaltılarak rijit bir davranış sergilemesi sağlanmaktadır. Böylece yapı, depremden izole edilmiş olmaktadır (Tsai vd., 2006; Tokuç, 2008).

Sismik izolasyon yöntemleri, sismik performansı arttırılmak istenen veya yeni tasarlanacak yapılarda kullanılabilir. Özellikle deprem sonrasında hemen kullanımı gereken, yani depremlerde ağır hasarlar olarak fonksiyonelliğini kaybetmemesi gereken hastane gibi binalarda sismik izolasyon sistemleri büyük avantajlar sağlamaktadır. Ekonomik açıdan, geleneksel ankastre sistemlere kıyasla daha maliyetli olmaları ve kullanım koşullarında da bazı değişiklikler gerektirmeleri sebebiyle sismik izolasyon yöntemlerinin kullanımı günümüzde ankastre sistemlerden çok daha azdır. Ancak bu sistemlerin, sismik performans anlamında oldukça başarılı sonuçlar sağladığı hem mevcut izolasyonlu binaların yaşanan depremler sonrasındaki durumlarının incelenmesi ile hem de çeşitli akademik çalışmalarla ortaya konmaktadır (Spyrakos vd., 2009; Şirin ve Boduroğlu, 2010; Şahin, 2020).

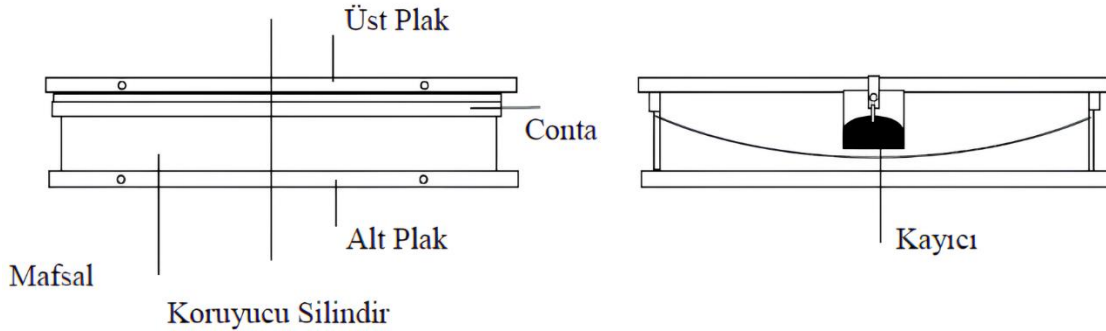
Toprak (2012), %5, %10 ve %20 mertebelerinde burulma oranı olan ve burulma davranışı gösteren 3, 5 ve 10 katlı binaları konu alarak, burulma düzensizliklerinin sismik izolatör kullanımı ile giderilmesi üzerine çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada yüksek sönümlü ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler kullanılmıştır. Sonuç olarak, sismik yalıtım sistemleri ile burulma etkilerinin ortadan kaldırılabilmesi görülmüştür. Nasery vd., (2015) ise bir hastane binasını izolatörlü ve ankastre şeklinde modelleyerek sonuçları kıyaslamıştır. İzolasyonlu sistemde kauçuk mesnetler ile taban yalıtımı yapılmıştır. Zaman tanım alanında analiz yöntemi uygulanmıştır ve yatay ötelenmeler, hakim periyotlar ve iç kuvvetler karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre izolatörlü sistemde sismik performans önemli ölçüde iyileşmiştir ve böylece muhtemel deprem hasarlarının önlenmesinde sismik izolatörlerin faydaları vurgulanmıştır. Sevim (2016), bir hastane yapısını perde ve çerçeve sistem olarak analiz etmiştir. Çalışmada, deprem perdeleri kaldırılarak farklı izolatör sistemleri UBC 1997'deki yük kombinasyonları kullanılarak test edilmiştir ve kıyaslamalar yapılmıştır. İzolatörlü durumun ankastre mesnetli duruma göre, göreceli kat ötelemeleri ve yapı periyodu açısından yapıya çok önemli katkılarda bulunduğu belirtilmiştir. Al-Ameeri, (2017), kurşun çekirdekli izolatörlerin orta ve yüksek katlı binalardaki etkisini incelemek amacıyla 5, 10 ve 15 katlı çelik yapılarda zaman tanım alanında analizler uygulamıştır. Analiz sonuçlarına göre, sismik izolatörlü binalar, izolatörsüz duruma göre çok daha az sismik etkiye maruz kalmıştır. Yıldız (2020), Sap2000 ile bir hastane binasını modelleyerek, kolonların alt ve üst ucuna yerleştirdiği izolatörlerin konum etkisini incelemiştir. Bu çalışmada araştırmacılar, yüksek sönümlü kauçuk izolatör kullanılan bu iki farklı konumun yanı sıra binayı izolatörsüz olarak da analiz etmiştir. Sonuç olarak, farklı izolasyon yerleşimlerinin ve izolatörsüz modelin karşılaştırmalı analizleri sunulmuş; izolatörlerin üst uca yerleştirilmesinin daha verimli sonuçlar sağladığı gösterilmiştir. Zulfakar (2021), tek, çift ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörlerle sismik yalıtımı yapılmış beş katlı bir yapının zaman tanım alanında analizlerini gerçekleştirmiştir. ABAQUS programı ile yapılan modellemelerde, üç eğrilikli izolatör sistemi için farklı sürtünme katsayıları ve eğrilik yarıçapları da göz önüne alınmıştır. Elde edilen bulgular, farklı sürtünme yüzeylerine ve katsayılarına sahip izolatörlerin, ankastre modellere kıyasla depreme karşı daha üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.

Sismik izolatörlerin genel olarak yapı periyodunu uzatarak deprem kuvvetlerini azalttığı, göreceli kat ötelemelerini düşürdüğü ve yapısal deformasyonları minimize ettiği görülmektedir (Asher vd., 2001; Ateş ve Dumanoglu, 2003; Castaldo vd., 2015; Hong ve Kim, 2004; Shrimali vd., 2014). Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda, sismik izolasyon yöntemlerinden olan ve son yıllarda hızla gelişen sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler daha az konu alınmaktadır. Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerin enerji yutma kapasitesi ve taşıyıcı sisteme etkisini göstermek amacıyla planlanan bu çalışmada, hemen kullanım performans seviyesini sağlaması hedeflenen bir hastane binası ele alınmıştır. Bursa ilindeki bu hastane binası 7 katlı olup sismik izolatöre sahip değildir. Yapı ETABS programıyla hem izolatörlü hemde izolatörsüz olarak analiz edilmiş periyot, ivme, göreceli kat ötelemesi ve, modal kütle katılım parametreleri kıyaslanmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada izolatörlü ve izolatörsüz tasarlanan sistemlerin maliyet kıyaslaması da yapılarak, sürtünmeli sarkaç tipi izolatör uygulamasının yapı maliyetine etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1.Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (Friction Pendulum Type Isolators)

Sürtünmeli sarkaç sistemi (Friction Pendulum System- FPS), kayma hareketini ve geri dönüş kuvvetlerini bir araya getiren yenilikçi bir izolasyon tekniğidir. Bu sistem, sürtünmeli sarkaç izolasyonu mantığını kullanarak yapının doğal titreşim sürelerini uzatır ve bu sayede büyük depremler karşısında etkili bir koruma sağlar. Sarkaçların döngüsel hareketleri, yapısal hareketleri kontrol etmeye yardımcı olur, böylece deprem anında binaların stabilitesini artırır. Bu sistem, yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde inşa edilen yapılar için, deprem enerjisinin sönmülmesi ve yapısal hasarların azaltılması sebebiyle oldukça etkili bir çözümdür. Sürtünmeli sarkaç izolatörler, paslanmaz çelik yüzeyler üzerinde hareket eden özel kayıcı elemanlardan teşkil edilir. Bu elemanlar sayesinde deprem etkileri absorbe edilir. İzolatörlerin bu özellikleri, yapının yatay hareketlerini kontrol altında tutar. FPS, yapının bütünlüğünü korur ve esnek bir hareket kabiliyeti sağlar. Böylece, deprem ivmelerinin hasar verici ve yıkıcı etkileri azaltılmış olur. Bu tür izolasyon sistemleri, özellikle sismik aktivitesi yüksek olan lokasyonlarda yer alan önemli kullanım amacındaki yapıların korunması için ideal bir yoldur. Kayıcı elemanlar, düşük sürtünme özellikleri olan özel bir malzeme ile kaplanmış olup, bu sayede istenen düşük sürtünme katsayıları elde edilir. İzolatörlerin periyodu, konkav yüzeyin eğrilik yarıçapına bağlı olarak ayarlanır ve bu düzenleme yapının ağırlığından bağımsızdır. Sistem, izolatörlerin rijitlik merkezini yapının kütle merkeziyle otomatik şekilde senkronize ederek, yapının burulma davranışını en aza indirir. FPS, farklı büyüklükteki deprem etkilerinde de oldukça başarılı bir performans sağlayabilir çünkü sürtünme katsayıları ve rijitlik parametreleri değişkendir. Bunun yanı sıra, sürtünme katsayısı ve kayma periyodu, sismik performansı optimize etmek için ayarlanabilir. Örneğin, sürtünme katsayısının düşürülmesi veya kayma periyodunun artırılması, taban kesme kuvvetlerini azaltarak yapının yatay deplasmanını artırılabilir. Bu tür sistemlerle yalıtımı sağlanmış yapılarda, bir eşik seviyesine kadar ankastre mesnetli sistem davranışına benzer davranış görülür ancak bu eşik aşıldığında ise dinamik bir davranış ortaya çıkar. İzolatör sisteminin parametrelerine bağlı olarak sismik etkiler sönmülür. Bu durum, sürtünmeli sarkaç sistemlerin değişken deprem etkisi altında esnek ve adaptif bir davranış geliştirdiğini ortaya koymaktadır (Eniş, 2024). Bu sistemlerin çalışma mekanizmasına ve sistem elemanlarına bir örnek Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Örnek bir sürtünmeli sarkaç izolatör kesiti (Cross-sectional view of a friction pendulum isolator) (Sevim, 2016)

2.2. TBDY 2018’e Göre Sismik İzolasyon (Seismic Isolation According to TBDY 2018)

Sismik izolasyonlu bina tasarımı veya sismik yalıtım uygulamaları ile güçlendirme konularına ilişkin kurallar TBDY-2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) Bölüm 14’de verilmektedir. TBDY-2018’e göre, sismik izolasyon uygulanan binalarda Bina Önem Katsayısı $I=1$ alınmaktadır. Tasarımda DD1 (50 yılda aşılma olasılığı %2 olan 2475 yıl tekrarlanma periyotlu deprem) ve DD2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 olan 475 yıl tekrarlanma periyotlu deprem) düzeyleri kullanılmaktadır. Burulma davranışının ortaya çıkmaması ve etkilerinin minimize edilebilmesi adına, izolasyon sisteminin rijitlik merkezinin, üstyapı kütle merkezi ile mümkün mertebe çakıştırılabilmesi önerilmektedir.

İzolasyon sistemindeki en büyük yerdeğiştirme değerlerinin hesabında, izolasyon birimlerinin parametrelerinin alt sınır değerleri kullanılırken üstyapıya aktarılacak maksimum kuvvetin hesabında izolasyon birimlerinin parametrelerinin üst sınır değerleri kullanılmaktadır. İzolasyon sistemindeki maksimum yerdeğiştirme hesabı DD1 ile, üstyapıya gelecek maksimum yatay kuvvet hesabı ise DD2 ile yapılmaktadır. Deprem yalıtım sistemi, DD-1 deprem yer hareketi sırasında meydana gelen en yüksek yer değiştirme ile bunun %50’sine karşılık gelen durumda oluşan iç kuvvetler arasında en az 0.025W fark olacak şekilde planlanmalıdır. Bu ifadede W terimi, binanın toplam deprem kütlelerine ilişkin ağırlığıdır. Ayrıca, sistem her bir D yer değiştirmesinde yatayda merkezleme kuvveti sağlayacak biçimde tasarlanacak ve elastik sınırın ötesine geçen rijitlik esas alınarak hesaplanan titreşim periyodu 6 saniyeyi aşmayacaktır. Merkezleme kuvveti ve teğetsel rijitlik şartları sağlanırken, yer değiştirmeden bağımsız olan kuvvetler hesaba katılmamalıdır. İzolasyon sisteminin en büyük yerdeğiştirme

değeri kadar hareket serbestliğini sağlamak amacıyla yeterli engellenmemiş alana sahip olması gerekmektedir. TBDY-2018'de, izolasyon sistem birimlerinin artan yatay yerdeğiştirmelere göre artan bir dayanıma sahip olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca, izolasyon birimlerinin tasarımında deprem etkilerinden farklı olarak, rüzgar, sıcaklık, yaşlanma, yorulma, sünme ve nem gibi diğer faktörlerin de hesaba alınması gerektiği ve bu tür etkiler için önlem alınması gerektiği ifade edilmektedir. Yalıtım birimlerinde hiçbir deprem düzeyi için çekme kuvvetlerinin oluşmasına izin verilmemesi açık bir şekilde belirtilmiştir ancak özel durumlarda çekme etkilerinin oluşumuna ve bunların özel izolasyon birimleri ile karşılanmasına, bu sistemin deneylerle doğrulanması şartı ile izin verilmektedir. Yalıtım sistemindeki tüm bileşenler, en büyük yer değiştirme koşulunda eksenel kuvvetleri güvenli bir şekilde taşıyabilecek dayanıklılığa sahip olmalıdır. Binanın yalıtım sistemi, DD-1 deprem yer hareketi altında devrilmeye karşı en az 1.0 güvenlik katsayısına sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu güvenlik katsayısı hesaplanırken, depremlili ve depremsiz tüm yük birleşimleri göz önünde bulundurulacaktır. Yalıtım sistemindeki herhangi bir elemanda kalkma ya da çekme meydana gelmesi durumunda ise binanın kararlılığının korunabildiği hesaplarla kanıtlanmalıdır. İzolasyon arayüzü ve altındaki elemanlar, üstyapı elemanları ve yalıtım birimi deneyleri için kullanılması gereken yük kombinasyonları TBDY-2018'de ayrı olarak verilmiştir. Bu yük birleşimleri Tablo 1.'de derlenmiştir.

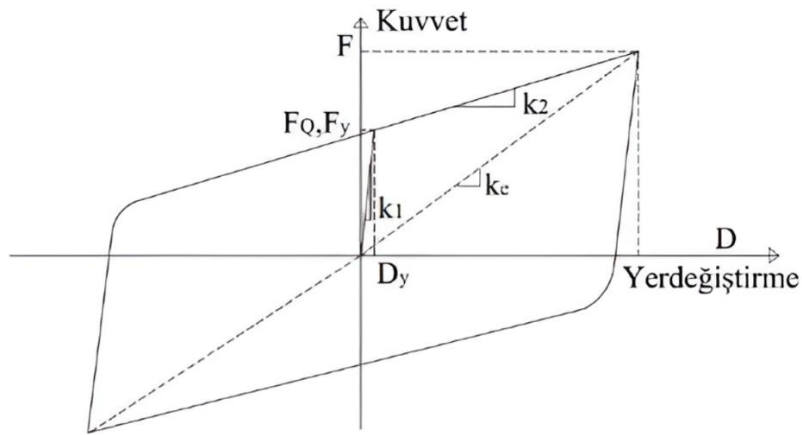
Tablo 1. Yük birleşimleri (Design load combinations) (TBDY-2018)

Konu	Yük Birleşimleri
Yalıtım arayüzü ve altındaki elemanlar	$1.4G + 1.6Q$
	$1.2G + Q \pm Ed$
	$0.9G \pm Ed$
Üstyapı elemanları	$G + Q + 0.2S + Ed^{(H)} + 0.3Ed^{(Z)}$
	$0.9G + H + Ed^{(H)} - 0.3Ed^{(Z)}$
Yalıtım birimi deneyleri	$1.4G + 1.6Q$
	$G + 0.5Q$
	$1.2G + 0.5Q \pm Ed$
	$1.2G + Q \pm Ed$
	$0.9G \pm Ed$

TBDY-2018'e göre, yalıtım birimlerinin kapasitesinin, DD1 düzeyindeki zaman tanım alanında, sistemin doğrusal olmayan davranışında oluşan yerdeğiştirme ve eksenel yükleri karşılayabilecek dayanıma sahip olması gerekmektedir.

2.3. Matematiksel Model (Mathematical Model)

TBDY-2018 Ek 14B'de, eğri yüzeyli sürtünmeli izolasyon birimlerinin tanımı yapılmaktadır ve bu tip sistemlerde kabul edilecek basitleştirilmiş kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü Şekil 2'deki gibi verilmektedir. Burada F_Q ve F_y terimleri karakteristik veya etkin akma dayanımını, k_1 terimi başlangıç rijitliğini, k_2 terimi ikincil rijitliği, k_e terimi D yerdeğiştirmesi durumundaki etkin rijitliği, F terimi yine D yerdeğiştirmesindeki kuvveti, D_y terimi ise akma yerdeğiştirmesini ifade etmektedir.



Şekil 2. Eğri yüzeyli sürtünmeli yalıtım birimlerinde kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü (Hysteretic behavior of curved surface friction pendulum isolators) (TBDY-2018)

F_Q veya F_y değerleri, izolasyon birimine gelen düşey kuvvetin, etkin sürtünme katsayısı (μ_e) ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. k_1 başlangıç rijitliği değeri, oldukça büyük bir değer olarak alınır. İkincil rijitlik ise Denklem 1'e göre hesaplanır. Burada P terimi düşey kuvveti, R_c terimi ise yalıtım birimi kayma yüzeylerinin etkin eğrilik yarıçapını ifade etmektedir.

$$k_2 = P / R_c \quad (1)$$

Etkin rijitlik k_e parametresi oldukça önemli bir terim olup, döngüdeki en büyük yatay kuvvetin en büyük yatay yerdeğiştirmeye oranı şeklinde ifade edilmektedir (Denklem 2). Etkin sönüm oranı β_e , döngüde tüketilen W_d enerjisinin $2\pi FD$ değerine oranıdır (Denklem 3).

$$k_e = \frac{F}{D} = \frac{P}{R_c} + \frac{\mu_e P}{D} \quad (2)$$

$$\beta_e = \frac{W_d}{2\pi FD} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\mu_e}{\mu_e + \frac{D}{R_c}} \right] \quad (3)$$

3. Sayısal Analiz (Numerical Analysis)

3.1. Deprem Parametreleri (Earthquake Parameters)

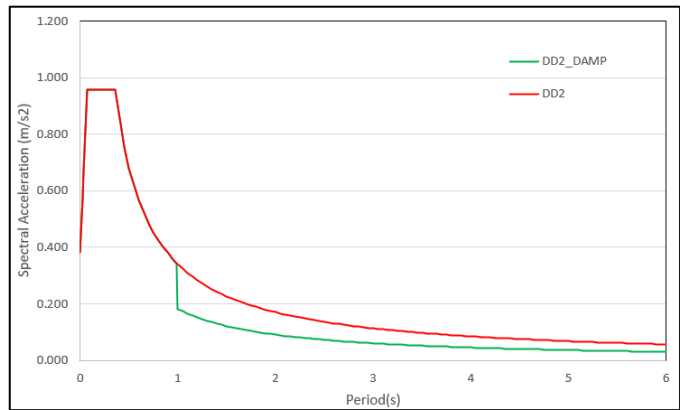
Örnek olarak seçilen betonarme hastane binası Bursa ilinde yer almaktadır. Bodrum kat, izolatör katı, zemin kat ve 5 normal kat olmak üzere toplamda 7 kata sahip olan binanın plan boyutları 59 m x 33 m'dir. Beton sınıfı C30 olup, kullanılan donatı çeliği minimum akma dayanımı 420 Mpa olan B420C çeliğidir. Malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Yapılan zemin etüd incelemeleri sonucunda, yerel zemin sınıfı TBDY-2018'e göre ZD olarak tespit edilmiştir.

Tablo 2. Malzeme ve Zemin parametreleri (Material and Soil Parameters)

Beton 28 günlük karakteristik silindirik basınç dayanımı (f_{ck}): 30 Mpa	Çelik karakteristik akma dayanımı (f_{yk}): 420 Mpa
Beton Karakteristik çekme dayanımı (f_{ctk}): $= 0.35\sqrt{f_{ck}} = 1.92 \text{ MPa}$	ÇelikElastisite modülü (E_s) = $2 \times 10^5 \text{ Mpa}$
Beton Elastisite modülü (E_c) = $3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \cong 31800 \text{ MPa}$	Tasarım akma dayanımı (f_{yd}) = $420/1.15 = 365 \text{ Mpa}$
Tasarım basınç dayanımı (f_{cd}) = $30/1.5 = 20 \text{ Mpa}$	ZD Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
Tasarım çekme dayanımı (f_{ctd}) = $1.92/1.5 = 1.28 \text{ MPa}$	(V_s) ₃₀ : 180-360 m/sn, (N_{60}) ₃₀ [darbe/30cm]: 15-50, (c_u) ₃₀ [kPa] : 70-250

Tasarımı yapılacak olan yapının analizlerinde kullanılacak deprem yüklemesine ait veriler için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) esaslarından yararlanılmıştır. Öncelikli olarak binaların bulunduğu yerin enlem ve boylamı göz önüne alınarak deprem tehlike haritalarından ilgili deprem yer hareketi düzeyine karşı gelen ivme büyüklükleri elde edilmiş ve tasarım ivme spektrumu tanımlanmıştır (Şekil 3).

Harita Spektral İvme Katsayısı (Kısa Periyod) $SS = 0.920$
 Harita Spektral İvme Katsayısı: (1.Sn. Periyod) $S1 = 0.240$
 En Büyük Yer İvmesi $PGA = 0.387 \text{ g}$
 Kısa Periyot Bölgesi için $FS = 1.132$
 1.0 Saniye Periyot Bölgesi $F1 = 2.120$
 $S_{DS} = S_S \times F_S = 0.920 \times 1.132 = 1.041$
 $S_{D1} = S_1 \times F_1 = 0.240 \times 2.120 = 0.509$
 $T_A = 0.098 \text{ s}$, $T_B = 0.498$



Şekil 3. Hastane binası lokasyonu için tanımlanan tasarım spektrumu (Defined seismic design spectrum at the hospital site)

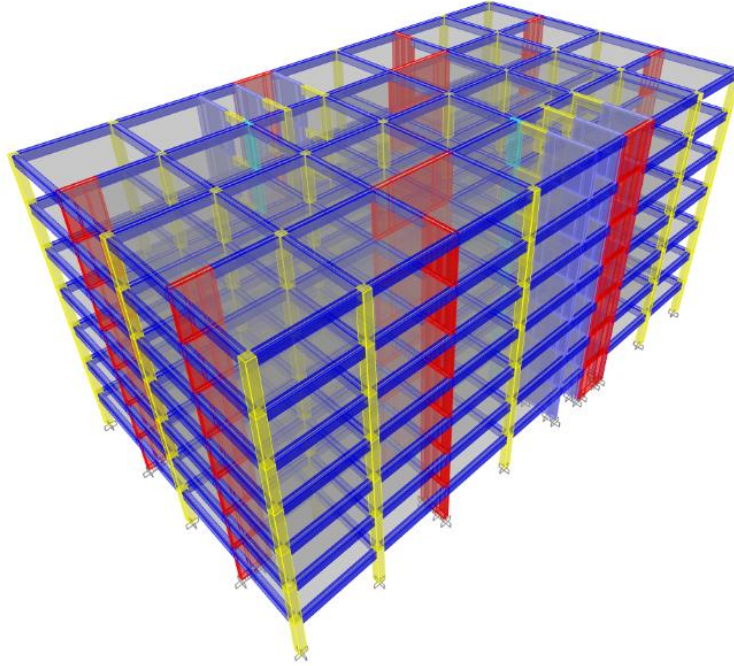
Geleneksel betonarme binada taşıyıcı sistem davranış katsayıları TBDY-2018 Tablo4.1'den belirlenmiş, deprem yükü azaltma katsayısı $R=7$ ve dayanım fazlalığı katsayısı $D=2.5$ olarak seçilmiştir. Bina önem katsayısı yapının hastane olmasından dolayı $I=1.5$ olarak alınmıştır.

İzolatörlü yapıda taşıyıcı sistem davranış katsayıları TBDY-2018 Tablo 4.2'ye göre belirlenmiş ve deprem yükü azaltma katsayısı $R=1.2$ ve dayanım fazlalığı katsayısı $D=1.2$ alınmıştır. İzolatörlü yapı olduğu için bina önem katsayısı ise $I=1$ olarak alınmıştır.

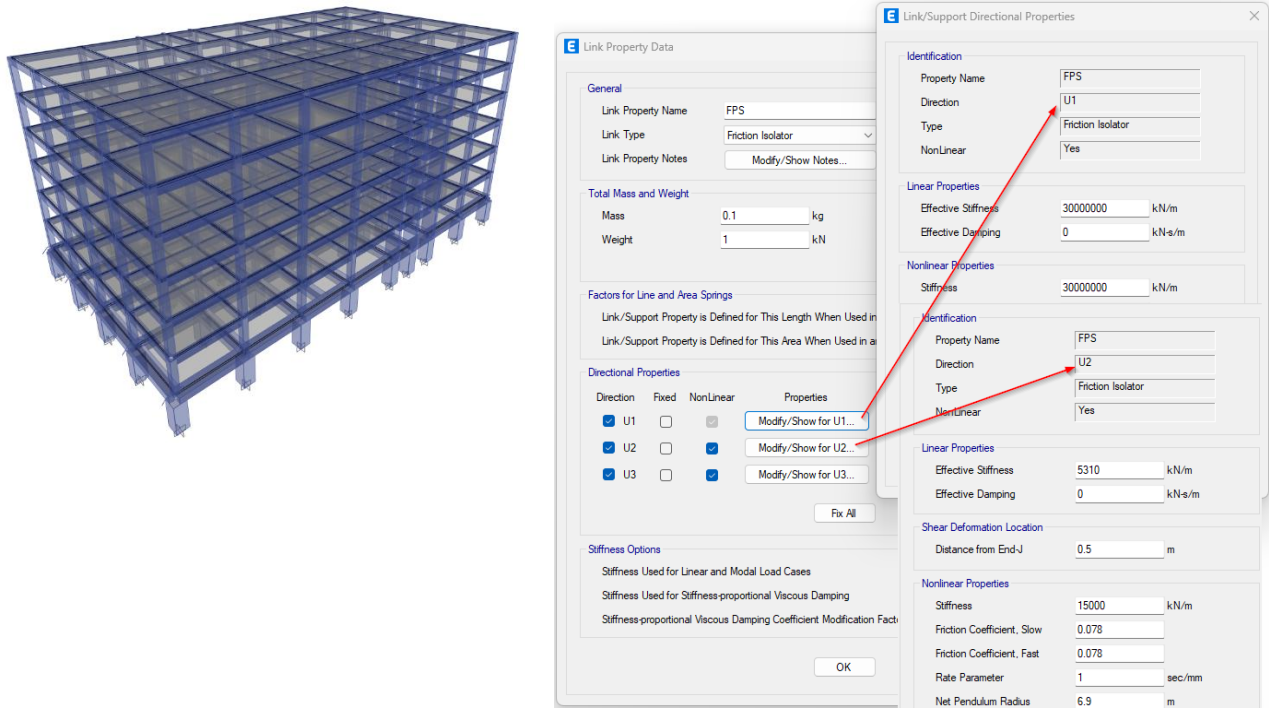
3.2. Sayısal Model (Numerical Model)

Geleneksel betonarme bina ve deprem izolatörlü bina tasarımı için ETABS V20.3 yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle geleneksel betonarme bina sistemi modellenerek tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapıda 40cmx120cm ve 70x70cm olmak üzere iki farklı tip kolon kullanılmıştır. Kirişler ise 40cmx80cm ve 50cmx80cm şeklinde iki farklı tip olarak tasarlanmıştır. Döşeme kalınlıkları 20cm olup perde kalınlıkları ise 40cm ve 50 cm olarak seçilmiştir. Döşemelerde yapı hareketli yükleri 5 kN/m² alınmıştır. Kaplama yükleri için 2kN/m², duvar yükleri için ise 2.2 kN/m² yayılı yük kabulü yapılmıştır. Ayrıca kirişler üzerinde de 7 kN/m duvar yükü alınmıştır. Yapısal elemanların zati ağırlıkları Etabs programındaki 'Dead' yük etiketi ile dikkate alınmıştır. Taşıyıcı sisteme ait ETABS model görseli Şekil 4'de gösterilmiştir.

İzolasyon sistemi tasarımında sürtünmeli sarkaç izolatörler (Friction Pandulum System- FPS) kullanılmıştır. Yapılan deneyler ve izolatör sistemine ait üretimsel veriler ile tasarımsal koşullara göre, modellemede ve davranışta dikkate alınacak parametreler ETABS modelinde link elemanlarla modellenmiştir. Deprem izolasyonu uygulanan sistemde izolatör yerleşimi yapılacak olan düşey taşıyıcıların kesit ebatları 150cmx150cm olarak seçilmiştir. İzolatör düzleminde yer alan kirişler ise 150cm genişliğinde ve 80cm derinliğindedir. İzolatör katında döşeme kalınlıkları 25 cm alınmıştır. İzolatörlü sisteme ait üç boyutlu görünüş, yay rijitlikleri ve doğrusal olmayan parametreler Şekil 5'de verilmiştir. İzolatörler için seçilen değerler, üretici firma tarafından sağlanan bilgiler ışığında seçilmiştir. Bu değerler, uygulamada benzer bir yapıda kullanılan ve testlerle onaylanmış, seçilen sarkaç tipi izolatör özelliklerine uygun gerçek değerlerdir.



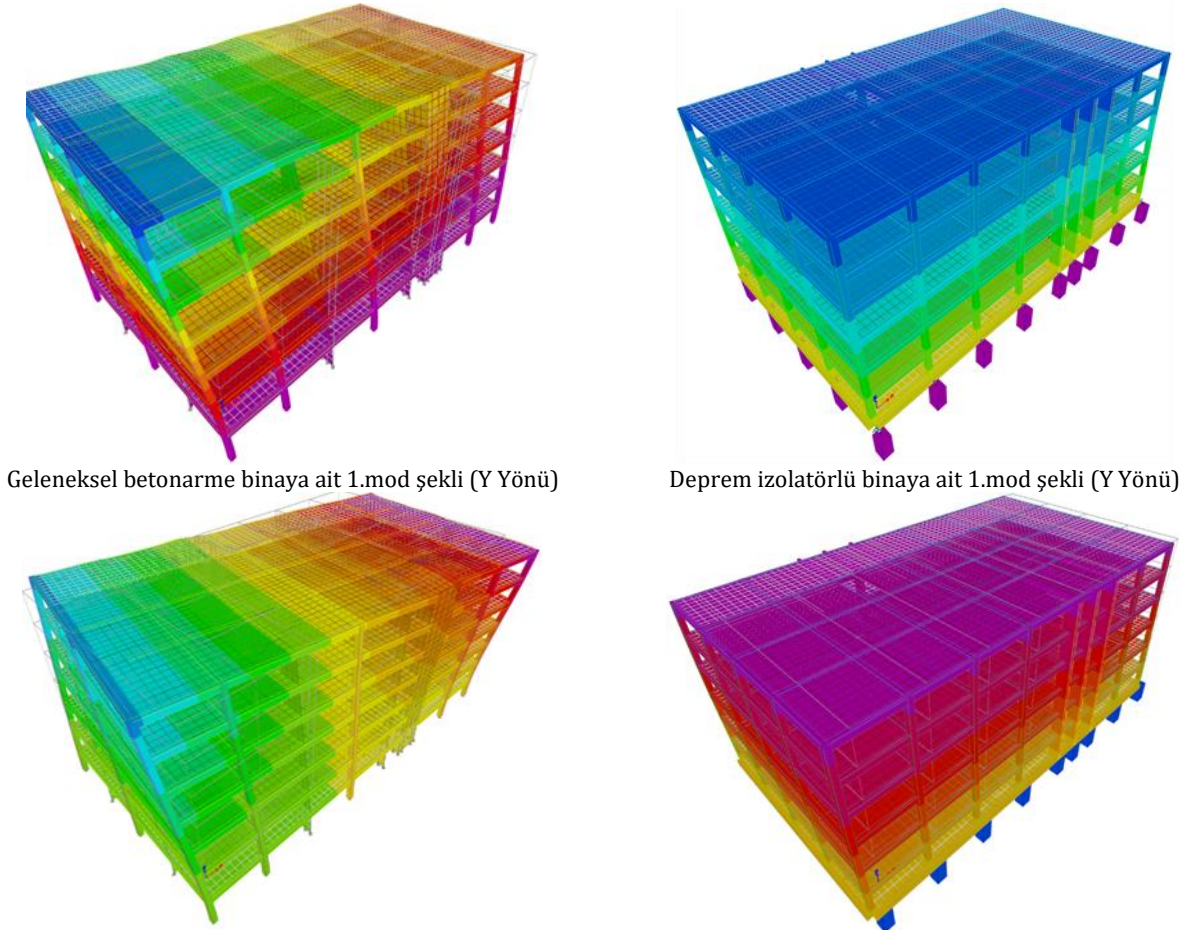
Şekil 4. Geleneksel betonarme bina modeli (Typical RC frame structure model)



Şekil 5. Deprem izolatörlü bina modeli ve izolatör özellikleri (Building with seismic Isolators and parameters)

3.3. Analiz Sonuçları (Analysis Results)

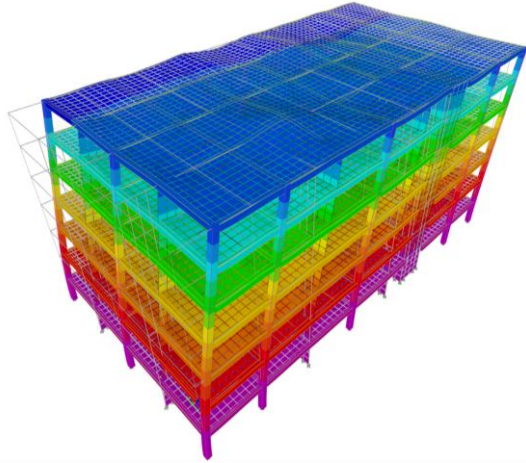
Geleneksel betonarme bina sistemi ve deprem izolatörlü sistemde hakim ilk üç moda ait görseller Şekil 6'da sunulmuştur. Modal analiz sonuçlarından elde edilen modal parametrelere ait sayısal sonuçlar ise Tablo 3'de verilmiştir.



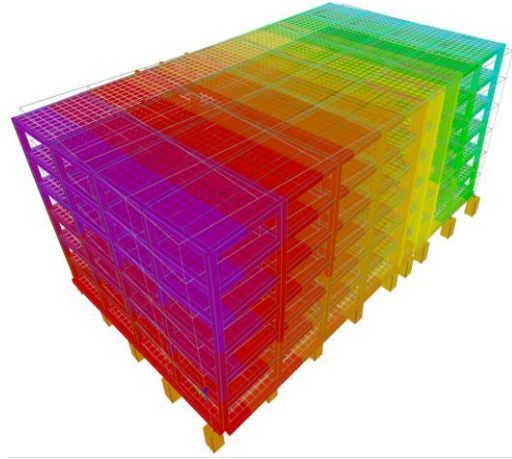
Geleneksel betonarme binaya ait 1.mod şekli (Y Yönü)

Deprem izolatörlü binaya ait 1.mod şekli (Y Yönü)

Geleneksel betonarme binaya ait 2.mod şekli (Burulma)



Deprem izolatörlü binaya ait 2.mod şekli (X Yönü)



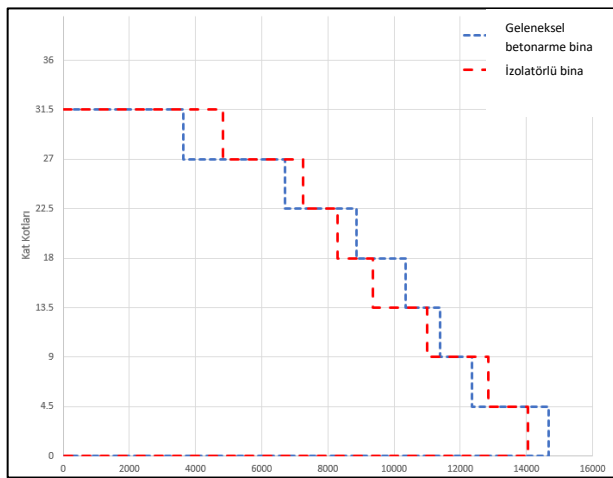
Geleneksel betonarme binaya ait 3.mod şekli (X Yönü)

Deprem izolatörlü binaya ait 3.mod şekli (Burulma)

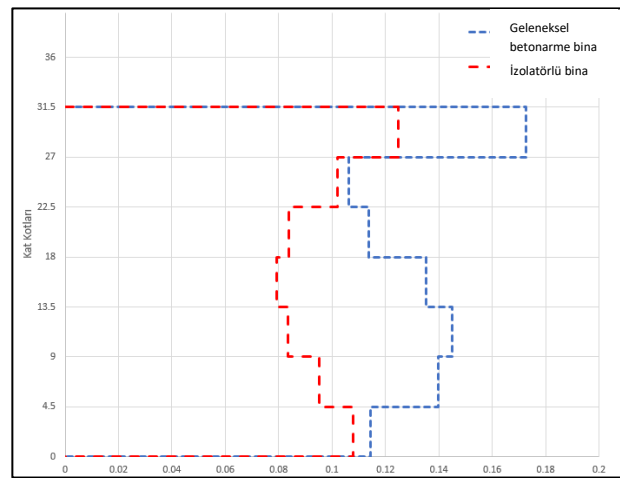
Şekil 6. Geleneksel ve izolatörlü bina hakim modları (Fundamental Modes of Typical and Base-Isolated Buildings)**Tablo 3.** Modal bilgiler (Modal analysis results)

Geleneksel Yapı						Geleneksel Yapı					
Mod	Periyot	Kütle Katılım Oranı (X)	Kütle Katılım Oranı (Y)	Toplam Kütle Katılım (X)	Toplam Kütle Katılım (Y)	Mod	Periyot	Kütle Katılım Oranı (X)	Kütle Katılım Oranı (Y)	Toplam Kütle Katılım (X)	Toplam Kütle Katılım (Y)
1	1.225	0.001	0.6142	0.001	0.6142	1	2.359	0	0.9648	0	0.9648
2	1.216	0	0.1032	0.001	0.7174	2	2.352	0.9668	0	0.9668	0.9668
3	1.032	0.7083	0.0009	0.7093	0.7183	3	2.176	0	0.0001	0.9668	0.9648
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
100	0.034	0.0001	0.0001	0.9978	0.9975	300	0.013	0	0	1	1

Modal hesap yöntemlerinde, hesaba katılması gereken yeterli titreşim modu sayısı, TBDY-18 EK 4B'ye göre (X) ve (Y) deprem doğrultularında her bir mod için hesaplanan taban kesme kuvveti modal etkin kütlelerinin toplamının bina toplam kütlelerinin %95'inden daha az olmaması kuralına göre belirlenmelidir ancak mod katkısı %3'ü aşan modlar da dikkate alınmalıdır. Bu kurala uyularak, analiz sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvvetleri ve kat dağılımlarının yanı sıra kat ivmeleri, hem geleneksel betonarme bina sistemi, hem de deprem izolatörlü sistem için karşılaştırmalı olarak Şekil 7'de verilmiştir.



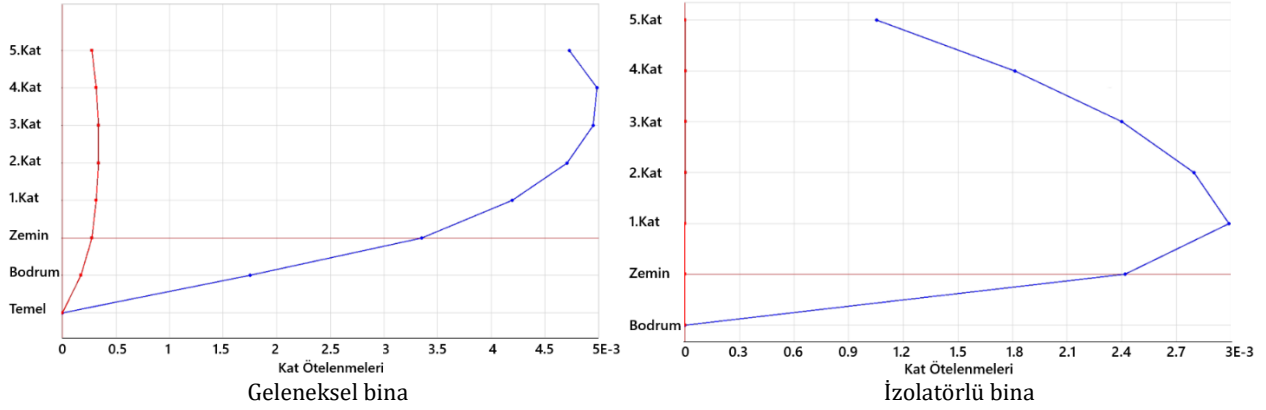
Kat kesme kuvvetleri



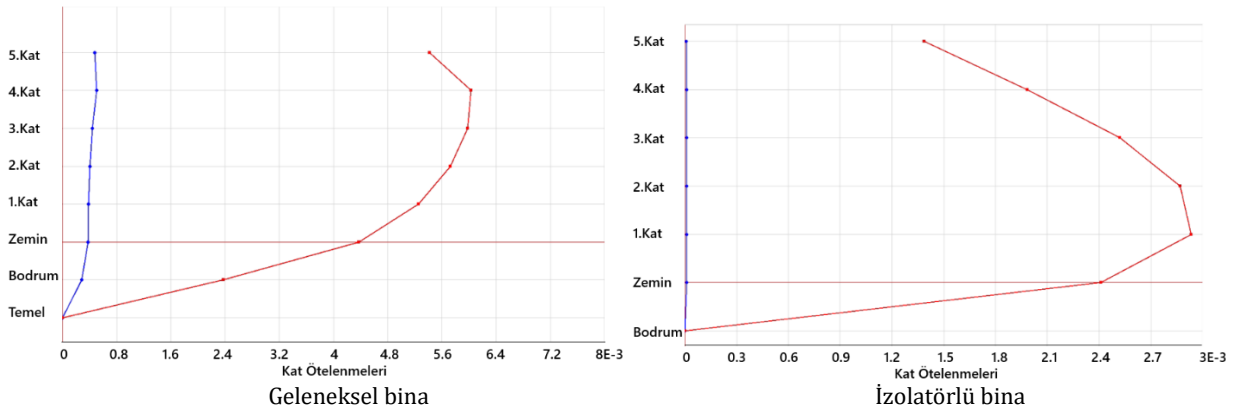
Kat ivmeleri

Şekil 7. Geleneksel betonarme bina ve izolatörlü bina için kat kesme kuvvetleri ve kat ivmeleri kıyaslaması (Seismic response comparison of typical and isolated RC structures)

TBDY 14.14.5.1'e göre üst yapıdaki görelî kat ötelemeleri, Kesintisiz Kullanım (KK) performans seviyesi için $0.005h_i$, Sınırlı Hasar (SH) performans seviyesi için $0.01h_i$, Kontrollü Hasar (KH) performans seviyesi için $0.015h_i$ değerini aşmamalıdır. Geleneksel betonarme bina ve deprem izolatörlü binada oluşan görelî kat ötelemeleri, kıyaslamalı olarak Şekil 8'de X doğrultusu, Şekil 9'da ise Y doğrultusu için verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi, analiz sonuçlarından elde edilen değerler limit değerlerin altında kalmıştır.



Şekil 8. X Doğrultusu görelî kat ötelemelerinin geleneksel ve izolatörlü bina için karşılaştırılması (Comparison of X-direction interstory drifts between typical and base-isolated buildings)



Şekil 9. Y Doğrultusu görelî kat ötelemelerinin geleneksel ve izolatörlü bina için karşılaştırılması (Comparison of Y-direction interstory drifts between typical and base-isolated buildings)

3.4. Maliyet Karşılaştırması (Cost Comparison)

Geleneksel betonarme bina yaklaşımı ve deprem izolatörlü olarak tasarlanan hastane binasının metraj hesapları Sta4CAD programı yardımıyla yapılmıştır. Her iki durum için de, ETABS ile belirlenen tasarım donatıları Sta4CAD programında oluşturulan hesap modeli elemanlarına atanmıştır ve bu yolla metraj özeti Sta4Cad çıktısı olarak alınmıştır. Alınan bu sonuçlar üzerinden maliyet kıyaslaması yapılmıştır. Metraj kıyaslamaları, beton, kalıp ve donatılar için ayrı ayrı sırasıyla Tablo 4' de verilmiştir. Deprem izolatörlü binada 44 adet izolatör kullanılmıştır. İzolatörler için 5000 \$ / 1 adet kabulü yapılarak hesaplanan toplam maliyet kıyaslamalı olarak Tablo 5'de verilmiştir. İzolatörlerin adet fiyatı, uygulamada yaygın kullanılan markalardan biri referans alınarak ortalama bir değer olarak seçilmiştir. Burada yapılan maliyet kıyaslamasında taşıyıcı sistem özellikleri, eleman ebatlarının optimizasyonu, izolatör adet ve tipinin seçimi gibi değişkenler açısından detaylandırmalar yapılmamıştır. Yapılan kıyaslama sonucunda genel bir sonuç elde etmek amaçlandığı için, yapısal ve tasarımsal detayların proje özelinde çok fazla değişkenlik gösterebileceği dikkate alınarak maliyet hesaplarında bu tür detaylandırmalardan kaçınılmıştır.

Tablo 4. Metraj ve maliyet hesapları (Cost assesment)

HASTANE YAPISI	Beton				Kalıp				Demir (Poz: 15.160.1004)			
	Miktar (m ³)	Birim Fiyat (2024)	Tutar (₺)	Oran	Miktar (m ²)	Birim Fiyat (2024)	Tutar (₺)	Oran	Miktar (ton)	Birim Fiyat (2024)	Tutar (₺)	Oran
İZOLATÖRLÜ	6781	2842.8	19.277	1.03	20707	634.51	13.138	0.93	935.7	32514.4	30.423	1.17
GELENEKSEL BETONARME	6585		18.719		22240		14.111		796.4		25.894	

Tablo 5. İzolatör maliyeti hesapları (Seismic isolator cost assesment)

HASTANE YAPISI	İzolatör Maliyeti		Toplam	
	Miktar (adet)	Birim Fiyat (2024)	Fiyat	Oran
İZOLATÖRLÜ	44	\$5,000	₺ 70,429,660	1.199
		₺ 7,590,000		
GELENEKSEL BETONARME			₺ 58,725,848	

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Çalışma kapsamında konu alınan bir hastane yapısı, ankastre mesnetli geleneksel betonarme sistem ve sürtünmeli sarkaç izolatörlü sistem olarak tasarlanmıştır. Yapısal davranış ile ilgili göstergeler olan, modal analiz verileri, taban ve kat kesme kuvvetleri, kat ivmeleri, görel kat ötelemeleri gibi parametreler karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Ayrıca, iki yönteme ait metrajlar da hesaplanarak sismik izolasyon uygulamasının maliyet açısından sonuçları görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgulara göre;

- ❖ Deprem izolatörlü sistemde hakim X ve Y yönü periyot değerleri 1 – 1.2s mertebelerinden 2.4 s mertebelerine uzamıştır. Tasarım spektrumu dikkate alındığında, bu durumun binaya aktarılacak olan deprem ivmelerini azalttığı sonucuna varılmaktadır.
- ❖ Modal sonuçlara göre, deprem izolatörlü sistemin hakim X ve Y yönü modlarına ait kütle katılım değerleri 0.97 mertebelerine ulaşmaktadır ki bu yapı davranışı açısından oldukça önemli bir durumdur. Geleneksel betonarme bina sisteminde hakim mod kütle katılımları 0.61-0.71 mertebelerindedir.
- ❖ Taban kesme kuvvetleri kıyaslandığında özellikle binanın alt katlarında geleneksel betonarme binanın kat kesme kuvvetlerinin daha büyük olduğu tespit edilmiştir.
- ❖ Geleneksel betonarme bina sistemi ile izolatörlü sistem kat ivmeleri kıyaslandığında, izolatörlü sistemdeki kat ivmelerinin beklenildiği üzere daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür.
- ❖ Görel kat ötelemelerine bakılacak olursa, deprem izolatörlü sistemde görel kat ötelemelerinin daha düşük olduğu görülmektedir ve dolayısıyla izin verilen limitlerin altında kalmak bu durumda daha kolay olmuştur. Geleneksel betonarme bina sisteminde görel öteleme değerleri daha yüksektir. İzin verilen 0.008 değerinin altında kalınabilmesi için sistemde oldukça fazla miktarda ve uygun yerleşimde deprem perdelerinin kullanımı gerektiği açıktır.
- ❖ Sismik izolasyonlu modelde görel kat ötelemeleri ve kat ivmeleri daha düşük olduğundan, deprem etkisi bina tarafından daha az hissedilmekte, deprem izolasyon katı tarafından sönümlenmektedir. Geleneksel betonarme bina sisteminde, binaya aktarılan ivmeler bina taşıyıcı sistemi tarafından taşınmak durumundadır ki bu durum eleman kesit tesirlerinin artışına sebep olmaktadır.
- ❖ Kalıp metrajı kıyaslaması yapıldığında, her iki sistem için mertebelerin yine yakın olduğu görülmektedir ancak geleneksel betonarme bina sisteminde kalıp ihtiyacı %7 mertebelerinde daha fazladır.
- ❖ Donatı metrajlarına göre izolasyonlu sistemde donatı sarfiyatı %17 civarlarında daha fazla olmuştur. Bu durumun oluşmasında, bodrum ve zemin katlarda daha büyük kesitler kullanılması etkilidir.
- ❖ Maliyet açısından geleneksel betonarme bina sistemi ve izolatörlü sistemler beton, donatı, kalıp ve izolatör elemanlarının toplam maliyeti üzerinden kıyaslanırsa izolasyon uygulanan sistemin, geleneksel betonarme bina sistemine göre %20 oranında daha maliyetli olduğu sonucuna varılmıştır.
- ❖ Sonuç olarak %20 mertebelerindeki bir maliyet artışına yol açsa da, izolasyon uygulaması yapılan hastane binasının olası tasarım depreminde hedeflenen sismik performansı sağlayacak şekilde tasarlanmasının yapısal davranış açısından oldukça olumlu katkılar sağladığı görülmüştür.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Lee, P.L., Mazeika, A., Hartman, C., Whittaker, A. ve Constantinou, M.C. (2001). Seismic Isolation of an Internet Service Exchange Facility: Abovenet ISX-SF1. Structural Engineers Association of California 70 Annual Convention Proceedings, California, 67-86..
- Wu, Y.M. ve Samali, B. (2002). Shake Table Testing of a Base Isolated Model. Engineering Structures, 24(9): 203-1215Goldberg, D., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, Boston: MA: Addison-Wesley Professional.
- Türker, H. (2005). Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanılış Tipleri Örnek Bir Maliyet Analizi. Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 65-87..
- Tsai, C.S., Chen, W.S., Chen, B.J. ve Pong, W.S. (2006). Vertical Distributions of Lateral Forces on Base Isolated Structures Considering Higher Mode Effects. Structural Engineering and Mechanics, 23(5): 543-56.
- Tokuç, M. (2008). Mevcut Betonarme Bir Okul Binasının Performansının Değerlendirilmesi ve Sismik İzolasyon Kullanılarak Güçlendirilmesi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Spyrakos, C.C., Maniatakis, C.A. ve Koutromanos, I.A. (2009). Soil-Structure Interaction Effects on Base Isolated Buildings Founded on Soil Stratum. Elsevier-Engineering Structures, 31: 729-737
- Şirin, S. ve Boduroğlu, H. (2010). Sürtünme sönümlü elemanlı betonarme sistemlerin sismik performansı. İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi, İstanbul, 9(6), 169-177.
- Şahin, M. (2020). Kauçuk İzolatörlü Bir Yapının Soğuk Hava Koşulları Etkisi Altındaki Modal Davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi. Erzurum: Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Toprak, T. (2012). Burulma Düzensizliği Olan Yapılarda Sismik İzolasyon Kullanımının Deprem Yükleri Altındaki Davranışa Olan Etkisi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Nasery, M. M., Ergün, M., Ateş, Ş. Ve Husem, M. (2015). Süneklik Düzeyi Yüksek Bir Bina'nın Dinamik Davranışına Deprem İzolatörlerinin Etkisinin Araştırılması. Conference: Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Mayıs.Wu, Y.M. ve Samali, B. (2002). Shake Table Testing of a Base Isolated Model. Engineering Structures, 24(9): 203-1215Goldberg, D., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, Boston: MA: Addison-Wesley Professional.
- Sevim, E. (2016). Sismik İzolatörlerin Bina Türü Yapıların Dinamik Davranışına Etkisi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- UBC 97, (1997). Uniform Building Code 97. International Code Council, I. Baskı, Amerika Birleşik DevletleriSpyrakos, C.C., Maniatakis, C.A. ve Koutromanos, I.A. (2009). Soil-Structure Interaction Effects on Base Isolated Buildings Founded on Soil Stratum. Elsevier-Engineering Structures, 31: 729-737
- Al-Ameeri, A. (2017). Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlü Çelik Binaların Deprem Analizi. Gaziantep: Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Zulfakar, M. (2021). Farklı Sürtünme Yüzeyli Sarkaç İzolatörlerin Yapı Deprem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Yıldız, M. B. (2020). Sismik İzolatörlerin Farklı Konumlarının Binaların Dinamik Davranışlarına Etkisi. Bayburt: Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Asher, J.W., Young, R.P. Ve Ewing, R.D. (2001). Seismic Isolation Design of the Arrowhead Regional Medical Center. Structural Design of Tall Buildings, 10(5): 321-334.
- Ateş, Ş. ve Dumanoglu, A. A. (2003). Kauçuk Mesnetli Binaların Dinamik Analizi. Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs, İstanbul.
- Castaldo, P., Palazzo, B. ve Vecchia, P.D. (2015). Seismic reliability of base-isolated structures with friction pendulum bearings. Dept. of Civil Engineering University of Salerno via Giovanni Paolo II, 80-93.
- Hong, W.K. ve Kim, H.C. (2004). Performance of a Multi-Story Structure with a Resilient-Friction Base Isolation System. Elsevier-Computer and Structures, 82: 2271 228.
- Shrimali, M.K., Bharti, S.D. ve Dumne, S.M. (2014). Seismic Response Analysis of Coupled Building Involving MR Damper and Elastomeric Base Isolation. Ain Shams Engineering Journal, 2(6): 457-470
- Eniş, A. (2024). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolatör Kullanımı ve Kullanıcı Tercihine Etkisi. İstanbul: Haliç Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, AFAD, İçişleri Bakanlığı, 2018, Ankara, Türkiye