



Betonarme okul binasının güçlendirilmesinde, planda farklı perde yerleşiminin deprem performansına olan etkileri

The effects of different structural wall arrangements in plan on seismic performance in retrofitting of a reinforced concrete school building

Hazal Kardelen ÖZGÜL^{1*}, Mehmet Kevser DİRDİMAN²

¹ hazalkrdln@gmail.com, ORCID NO: <https://orcid.org/0009-0009-0743-3689>

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mehmetderdihan@isparta.edu.tr,
ORCID NO: <https://orcid.org/0000-0003-2359-3120>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Mayıs 2025
Revizyon 8 Eylül 2025
Kabul 10 Haziran 2026
Online 25 Haziran 2026

Anahtar Kelimeler:

Betonarme Perdeler, Mevcut Binalarda Güçlendirme, Çok Modlu İtme Analizi

ÖZ

Mevcut betonarme binalara uygulanan güçlendirme yöntemlerinden biri olan betonarme perde ilavesinin, yapının rijitliğine ve dayanımına önemli ölçüde katkı sağladığı bilinmektedir. Ancak, eklenen perdelerin bina içindeki konumunun yapısal performansa, özellikle de burulma davranışına etkileri veya oluşturabileceği olumsuzluklar her zaman net olarak öngörülemez. Bu nedenle, perdelerin taşıyıcı sistem içerisinde en etkin şekilde konumlandırılması, araştırılması gereken kritik bir konu haline gelmiştir.

Bu çalışmada, 4 katlı mevcut bir okul binasının davranışı, doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden Çok Modlu İtme Yöntemi ile incelenmiştir. Mevcut haliyle performans hedefini sağlamayan bina için 6 farklı perde yerleşimi tasarlanmış ve analiz sonuçları karşılaştırılarak yapı davranışına etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, perde duvarların özellikle binanın uzun kenar orta akslarında ve dış akslarında yerleştirilmesinin (Model-5), yer değiştirme taleplerini en aza indirerek yapının deprem performansını en üst düzeye çıkardığı görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 May 2025
Received in revised form 8 September 2025
Accepted 10 June 2026
Available online 25 June 2026

Keywords:

RC structural walls, Retrofitting of existing buildings, Multi-mode pushover analysis

ABSTRACT

Among the strengthening methods applied to existing reinforced concrete (RC) buildings, the addition of RC structural walls is known to significantly improve the stiffness and strength of the structure. While understanding the influence of RC structural wall placement on structural behavior is essential, its specific effects on structural performance—particularly regarding torsional behavior—are not fully understood. Therefore, determining the most effective arrangement of RC structural walls within the structural system has become a critical research topic.

In this study, a four-story existing school building was analyzed using the Multi-Modal Pushover Analysis Method. Since the existing building did not meet the target performance level, six different RC structural wall configurations were designed and analyzed to evaluate their effects on structural behavior. The findings revealed that placing RC structural walls strategically along the central axes of the long sides and at the building perimeter minimizes displacement demands and significantly improves seismic performance.

Doi: 10.24012/dumf.1706350

* Sorumlu Yazar

Giriş

Ülkemiz, aktif fay hatları üzerinde yer almakta ve geçmişte birçok yıkıcı deprem yaşamıştır. Bu durum, hem yeni inşa edilecek yapıların depreme dayanıklı tasarımını hem de mevcut yapı stokunun sismik açıdan iyileştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle eski yönetmeliklere göre inşa edilmiş veya yeterli mühendislik hizmeti almamış binaların oluşturduğu risk, deprem güvenliğinin artırılmasına yönelik çalışmaların önemini her geçen gün artırmaktadır.

Bu bağlamda, mevcut yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesi kritik bir ilk adımdır. Gerçekleşen depremler sonrasında binalarda meydana gelen hasarların tespiti ve bu hasar derecelerine bağlı olarak onarım, güçlendirme veya yıkım kararlarının verilmesi gerekmektedir. Şiddetli depremlerde standartlara uygun tasarlanmış binalarda dahi hasar oluşabildiği düşünüldüğünde, mevcut yapıların performansının belirlenmesi ve gerekli güçlendirme uygulamalarının gerçekleştirilmesi, deprem ve inşaat mühendisliği disiplinlerinin temel araştırma ve uygulama alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır [1].

Okul binaları gibi kamu hizmeti yapıları, deprem performansı değerlendirmesi açısından ayrı bir önem taşımaktadır. Yalın ve Ulutaş [2], düz yüzeyli (nervüzsüz) donatı ve düşük beton sınıfıyla inşa edilmiş mevcut bir okul binasını hem DBYBHY 2007 hem de TBDY 2018 çerçevesinde incelemiş; binanın her iki yönetmeliğe göre de hedef performans seviyesini karşılayamadığını ortaya koymuştur. Söz konusu çalışma, TBDY 2018'in mevcut bina değerlendirmesinde daha güvenli tarafta kalan deformasyon sınırları öngördüğünü de göstermektedir.

Betonarme binaların güçlendirilmesinde, taşıyıcı sisteme uygun şekilde perde eklemek yapının deprem davranışını önemli ölçüde iyileştirir. Ancak, mimari düzen ve taşıyıcı sistem gereksinimleri nedeniyle, perde sayısı ve yerleşimi konusunda kısıtlamalar vardır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, güçlendirme projesini tasarlayan mühendis, olası perde sayısı ve yerleşim seçeneklerini değerlendirmek üzere analizler ve irdemeler yapmalıdır [3]. Bu bağlamda, Değertekin ve Şık [4] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deprem güvenliği yetersiz betonarme bir bina için üç farklı perde güçlendirme önerisi karşılaştırılmış ve bina dış aksları ile iç akslarına birlikte perde yerleştirilmesinin rijitlik ile maliyet açısından daha uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Bir binanın deprem performansında yetersizlik görüldüğünde, ekonomik olması halinde deprem yönetmeliklerine uygun bir şekilde güçlendirilmesi gerekir. Binanın davranışını düzeltmek için bina taşıyıcı sistemine betonarme perdelerin eklenmesi, bir sistem iyileştirme yöntemidir. Perde elemanlar sahip oldukları yüksek rijitlik sebebiyle yapı sisteminin davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Deprem etkilerine maruz kalan betonarme perdelerin etkin bir şekilde çalışabilmeleri taşıyıcı sistemde nasıl yerleştirildiklerine bağlıdır [5].

Basit bir çerçeve içerisine yerleştirilmiş betonarme perdelerin binanın yatay yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı, betonarme perde ilavesi ile binaların güçlendirilebileceği deneysel çalışmalar sonucunda açıklığa kavuşturulmuştur [6].

Yatay kuvvetlerin taşınmasında betonarme perdelerin yapısal davranışı ve boyutlandırma esasları literatürde temel bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Akkaya (1997) tarafından yürütülen çalışmada, deprem kuvvetlerine karşı perdelerin taşıyıcı sistemdeki kritik rolü incelenmiş ve boyutlandırma problemlerinin çözümüne yönelik çeşitli sınıflandırmalar yapılarak tasarım prensipleri tanımlanmıştır [7].

Perde duvar eklenerek yapılan güçlendirmede perde duvarlar yanal yüklere karşı yeterli dayanımı elde etmesi amacıyla sisteme eklenmesi öngörülür. Büyük açıklıklı çerçeveleri olan ya da perde duvarsız çok katlı yapılarda güçlendirme için en uygun yol açıklıklara güçlendirme betonarme perde duvarı eklemektir. Az sayıda kolonlar hasar gördüğünde kolon güçlendirmesi yapılması uygunken hasar gören kolon sayısı fazla olduğunda bu kolonları güçlendirmek yerine tüm taşıyıcı sistemi düşünerek, uygun yer ve sayıda betonarme perdeler ekleyerek taşıyıcı sistem iyileştirmesine gitmek uygun olur. Perde eklenmesi genel olarak rijitliği artırmak ve deprem sırasında oluşacak yanal ötelenmeleri azaltmak için de uygulanır [8].

Perde yerleşiminin seçiminde mevcut perde ve kolon düzenine dikkat edilmeli ve perdeler binanın çerçeve sistemi içinde yerleştirilmeli ve temelden başlayarak ve binanın tüm katları boyunca sürekli olarak devam etmelidir. Perdeler sisteme daha sonra eklendiği için kendi ağırlıklarından hariç normal kuvvet taşımadıkları kabul edilir. Bu durumda, perdelerde küçük normal kuvvet ve büyük momentlerin etkisi sonucu temel seviyesinde çekme gerilmeleri oluşabilir. Bu çekme gerilmeleri, perde ile temelin uygun bağlantılarla çalıştırılması veya kolonlarla birlikte perde yerleşimi yapılarak kontrol edilebilir. Özellikle, perdeyi çerçeve açıklığına değil, iki kolon arasına yerleştirip kolonlarla bağlamak, kolonların taşıdığı eksenel kuvvetten faydalanmayı sağlar ve perde-temel etkileşimini güvenli hâle getirir [9].

Betonarme perdeler, sahip oldukları rijitlik nedeniyle binanın rijitlik merkezini önemli ölçüde etkiler. Deprem yönetmeliklerinde, deprem sırasında burulma etkisinin azaltılması için kütle merkezi ile rijitlik merkezinin mümkün olduğunca birbirine yakın olması istenir. Aksi halde yapımızın kütle merkezi ve rijitlik merkezi birbirinden uzaklaşacak ve böyle bir durumda eksantrisite oluşacaktır. Deprem kuvveti bu eksantrisiteye etki ettiği için ayrı bir burulma momenti oluşacak ve bu durum kolonlarda hasara neden olacaktır [10]. Bu bulgu, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin ardından yürütülen saha çalışmalarıyla da desteklenmiştir. Efe ve Bedirhanoglu [11] tarafından gerçekleştirilen kapsamlı literatür değerlendirmesinde, doğru konumlandırılmış perdeli yapıların rijitliklerini koruyarak ötelenmeyi

sınırladığı ve ağır hasar ile göçmeyi önlediği aktarılmaktadır. Buna karşın, planda düzensiz ya da simetri bozucu biçimde konumlandırılan perdelerin burulma hasarına zemin hazırladığı ve binanın toptan göçme riskini artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, perde duvarların yalnızca sayısal yeterliliğinin değil, plandaki yerleşim düzeninin de taşıyıcı sistem performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır.

Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018)'de açıklanan doğrusal olmayan hesap yöntemleri mevcut binaların deprem performansının belirlenmesinde ve yeni yapılacak yüksek bina taşıyıcı sistemlerinin tasarımında kullanılmaktadır [12]. Binanın doğrusal olmayan davranışını belirleyen bu hesap yöntemlerinde yönetmeliklerde belirtilen hasar seviyesine karşılık gelen şekil değiştirme sınır değerleri ile hasar seviyesi elde edilir. Şekil Değiştirmeye göre Değerlendirme ve Tasarım yaklaşımına dayalı olan doğrusal olmayan hesap yöntemlerinde belirli bir deprem etkisinde binanın yer değiştirme istemine ulaşıldığında hedeflenen performans düzeyini sağlayıp sağlamadığının kontrolü yapılmaktadır [13].

Çok Modlu İtme Yöntemi, doğrusal olmayan hesap yöntemlerinden biridir ve yapının deprem etkisi altındaki farklı titreşim modlarındaki davranışını değerlendirmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemde, yapı önce mod bazında modellenir ve her mod için artan yatay yükler uygulanarak yapının en yüksek tepki değerleri (yer değiştirme, kesme kuvveti ve moment gibi) belirlenir. Daha sonra, modlara ait bu sonuçlar uygun şekilde birleştirilerek binanın genel performansı tahmin edilir. Bu sayede, yapıdaki farklı modların katkısı dikkate alınarak gerçekçi bir deprem davranışı analizi yapılabilir. Zaman tanım alanındaki doğrusal olmayan analizlerin yerini alabilecek şekilde performans tahmini sağlaması nedeniyle, son yıllarda deprem mühendisliği alanında yaygın olarak kabul görmektedir [14]. İtme analizi yöntemlerinin tarihsel gelişimini ve doğruluğunu kapsamlı biçimde ele alan güncel çalışmalar, Çok Modlu İtme Yöntemi başta olmak üzere gelişmiş doğrusal olmayan statik yöntemlerin, doğru uygulandığında doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerine yakın doğrulukta sonuçlar üretebildiğini göstermektedir [15], [16].

Çok Modlu İtme Yöntemi, her bir itme adımında sistemde meydana gelen plastik mafsallık özelliklerini dikkate alır. Her adımda, doğrusal davranış gösteren sistemde mod birleştirme yöntemi ile yeni spektrum analizi artımsal olarak gerçekleştirilir. Modal yer değiştirmeler, ilk adıma ait elastik spektral yer değiştirmelerle orantılı şekilde bütün modlarda artırılır. Bu süreç, itme adımları ilerledikçe devam eder ve son adımda hedeflenen spektral yer değiştirmelere ulaşılır [17].

Bu çalışmada mevcut bir yapının TBDY 2018'e uygun olarak hedeflenen performans düzeyini sağlamadığı durumlarda eklenen perde duvarların konumunun yapının davranışı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Bu amaçla 4

katlı bir okul binasının Çok Modlu İtme Yöntemi ile performans analizi yapıldıktan sonra güçlendirme perdeleri farklı konumlara yerleştirilerek tekrar analizi yapılmış ve bu durumlar birbiri ile kıyaslanmıştır.

Yöntem ve Modellerin Tanıtılması

Çalışma kapsamında mevcut betonarme bir okul binasında doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden Çok Modlu İtme yöntemi ile performans analizi yapılmıştır. Ardından performans hedefini sağlamayan okul binası için farklı perde yerleşimleri yapılmış, bu perde yerleşimleri için tekrar performans analizi yapılmıştır. Yapılan bu performans analizlerinde ideCAD Statik (Versiyon 10) yapısal analiz ve tasarım yazılımı kullanılmıştır [18]. Farklı perde yerleşimlerine ait performans analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışmada incelenen mevcut okul binası zemin+3 katlı bir betonarme yapı olup, 1990 yılında o dönemin yönetmeliklerine göre Isparta ili Hisar mahallesinde inşa edilmiş bir yapıdır. Kat yüksekliği tüm katlarda 3m olan binanın plandaki boyutları 19.10m x 14.20m'dir. Yapının statik projeleri mevcuttur ve taşıyıcı sistemi, boyutları 70x30 cm ve 30x30 cm olan kolonlar ile 30x50 cm kesitli kirişlerden oluştuğu belirlenmiştir. TBDY 2018'de belirtilen yöntemlerle alınan karot numunelerinin analizi sonucunda, mevcut beton basınç dayanımı ortalama 19 N/mm² (günümüz standartları için düşük bir değer) tespit edilmiştir. Benzer şekilde, yapılan sıyırma ve donatı okuma işlemleriyle donatı sınıfının, betonla kenetlenme kabiliyeti zayıf olan S220 (düz yüzeyli) çeliği olduğu belirlenmiştir. Kolon ve kirişlere ait donatı bilgileri Tablo 1-2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kolonlara ait donatı bilgileri

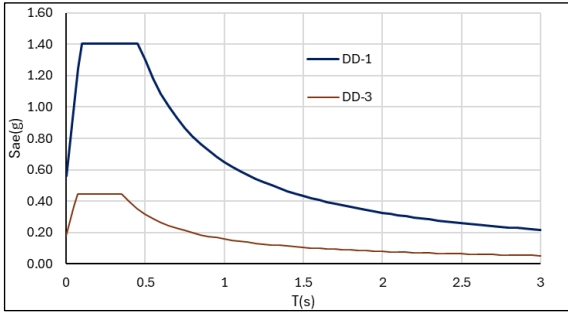
Kolon Kesit tipi	Boyuna donatısı	Etriye
30x30	8 ϕ 16	ϕ 8/20/20
70x30	12 ϕ 16	ϕ 8/20/20

Tablo 2. Kirişlere ait donatı bilgileri

Kiriş Kesit tipi	Boyuna donatısı	Etriye
Montaj donatı: 2 ϕ 16		
30x50	Düz donatı: 3 ϕ 16	ϕ 8/20/20
Pilye: 1 ϕ 16		

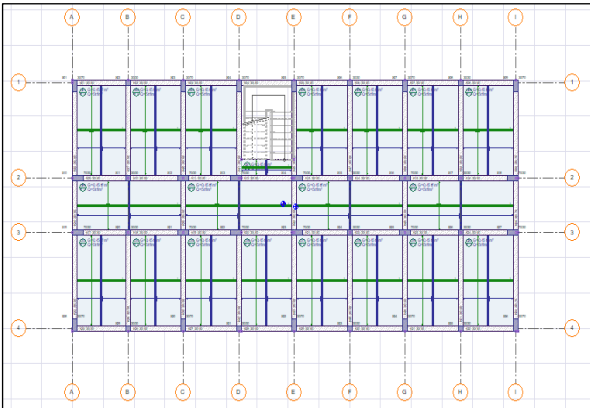
Şekil 1'de DD-1 ve DD-3 Deprem Yer Hareketi için analizlerde kullanılan yatay elastik tasarım spektrumu verilmiştir. Yapının deprem performansı değerlendirmesi, AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası interaktif web uygulamasından (<https://tdth.afad.gov.tr>), binanın bulunduğu Isparta, Hisar mahallesi konumu (Enlem: 37.758871, Boylam: 30.560145) için alınan ve ZD yerel zemin sınıfı için hesaplanan tasarım spektral ivme katsayıları kullanılarak yapılmıştır. Performans ve güçlendirme analizlerinde esas alınan bu değerler; standart tasarım depremi olan DD-2 için $S_{DS}=0.886$, $S_{D1}=0.378$; çok daha şiddetli olan DD-1 Deprem Yer Hareketi için $S_{DS}=1.406$, $S_{D1}=0.650$;

ve servis ömrü boyunca görülme olasılığı daha yüksek olan DD-3 Deprem Yer Hareketi için $S_{DS}=0.445$, $S_{D1}=0.158$ olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yapının eski bir yönetmeliğe göre inşa edilmiş olması, tespit edilen düşük malzeme kalitesi ve güncel TBDY-2018 yönetmeliğinin öngördüğü talepleri karşılayamaması nedeniyle, gerçekleştirilen performans analizlerinde binanın mevcut haliyle performansının yetersiz kaldığı ortaya çıkmıştır. Bu durum sebebiyle yapının güçlendirilmesi (maliyet analizleri de dikkate alınarak) gerekli olmaktadır.



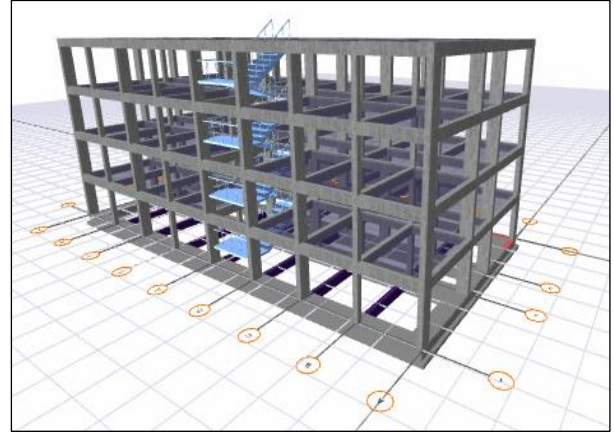
Şekil 1. DD-1 ve DD-3 Deprem Yer Hareketi için analizlerde kullanılan yatay elastik tasarım spektrumu

Şekil 2'de zemin kat planı ve Şekil 3'te mevcut okul binasına ait model verilmiştir.



Şekil 2. Zemin kat planı

Çalışma kapsamında ele alınan okul binasının mimari projesine erişim kısıtlı olduğundan, perde yerleşimleri öncelikli olarak taşıyıcı sistemin simetrisi ve rijitlik merkezi gözetilerek belirlenmiştir. Ancak önerilen modellerin mimari fonksiyon üzerinde bazı dezavantajları olabileceği göz ardı edilmemelidir. Özellikle dış akslara yerleştirilen perdelerin (Model-1, 2, 3, 4 ve 6), sınıf pencerelerini kapatarak doğal aydınlatma ve havalandırmayı azaltma riski bulunmaktadır. Buna karşılık, bina içine yerleştirilen perdelerin (özellikle Model-5'teki L perdeler) sınıfların kullanım alanını bölme ihtimali mevcuttur. Bu nedenle güçlendirme projesinin uygulama aşamasında, yapısal performansın yanı sıra kapı-pencere boşlukları ve kullanım alanları yerinde kontrol edilerek mimari revizyonlara gidilmesi önerilmektedir.



Şekil 3. Mevcut okul binasına ait model

Mevcut okul binasının TBDY 2018'de tanımlanan Çok Modlu İtme yöntemi ile yapılan performans analizi için İdecad Statik program kullanılmıştır.

Mevcut binanın performans analizi yapılmadan önce TBDY 2018'e göre binanın performans hedefi ve tasarım yaklaşımı belirlenmelidir. Bina Kullanım Sınıfı BKS=1, Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1a, Bina Yükseklik Sınıfı BYS=6'dır. Belirlenen bu değerler doğrultusunda mevcut okul binasının performans hedefi DD-1 Deprem Yer Hareketi'ne göre "Kontrollü Hasar" ve DD-3 Deprem Yer Hareketi'ne göre "Sınırlı Hasar" performans düzeyidir.

Analizlerde TBDY 2018'e uygun olarak DD-1 ve DD-3 Deprem Yer Hareketi Düzeyi'ne göre Çok Modlu İtme yöntemi ile performans analizi yapılmıştır. Çok Modlu İtme Yöntemi doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden biri olup yapının deprem etkisi altındaki davranışını özellikle birden fazla titreşim modunu dikkate alarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemde her mod için yatay yükler, elastik spektral yer değiştirmeler ile orantılı olacak şekilde artımsal olarak uygulanır. Analiz çok sayıda döngüsel işlem içerir ve her ana döngüde oluşan plastik mafsalların değiştirdiği sistem rijitliği güncellenir ve her modun tepkisi ayrı ayrı hesaplanır. Elde edilen modal yer değiştirme ve iç kuvvet değerleri, CQC (tam karesel birleştirme) yöntemiyle yapının genel deprem davranışı elde edilir. Böylece özellikle düzensiz ve yüksek yapılarda önemli rol oynayan diğer modların da hesaba katılması mümkün olmaktadır. Bu özelliği sayesinde Çok Modlu İtme Yöntemi, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlere yakın doğrulukta sonuçlar verirken, aynı zamanda daha az hesap yükü gerektirmesi nedeniyle son yıllarda deprem mühendisliğinde yaygın kabul gören bir yöntem haline gelmiştir. Analiz sonuçları şekillerde taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı grafikleri ile sunulmuştur. Taban kesme kuvveti, yapıya etkien yatay deprem yükleri sonucunda temelde oluşan toplam kesme kuvveti olup, yapının deprem etkilerine karşı global taşıma kapasitesini gösterir. Tepe deplasmanı ise binanın en üst katında meydana gelen yatay yer değiştirmeyi ifade eder ve yapının sünek davranış kapasitesi ile performansı açısından kritik bir parametredir. Bu iki büyüklük,

yapının deprem davranışını değerlendirmek için temel göstergeler olarak kullanılmıştır. Yöntem basamakları özetle şu şekildedir:

- Yapının titreşim modlarının belirlenmesi ve modal özelliklerin çıkarılması,
- Her mod için elastik spektral yer değiştirmelere karşılık gelen artımsal yatay yüklerin uygulanması,
- Her itme adımında oluşan plastik mafsalların dikkate alınarak sistem rijitlik matrisinin güncellenmesi,
- Her mod için elde edilen yer değiştirme ve iç kuvvet değerlerinin hesaplanması,
- Modlara ait sonuçların CQC yöntemi ile birleştirilerek yapının genel davranışının belirlenmesi,
- Son aşamada performans hedefleri ile elde edilen taleplerin karşılaştırılması [19]–[21].

Analiz Bulguları

Yapılan analiz sonucunda DD-3 ve DD-1 Deprem Yer Hareketi'nde Kontrollü Hasar performans düzeyi olduğu belirlenmiştir. Bu durum, yapının en şiddetli deprem altında dahi göçme tehlikesi taşımadığına ve can güvenliği açısından ani bir risk oluşturmadığına işaret etmektedir.

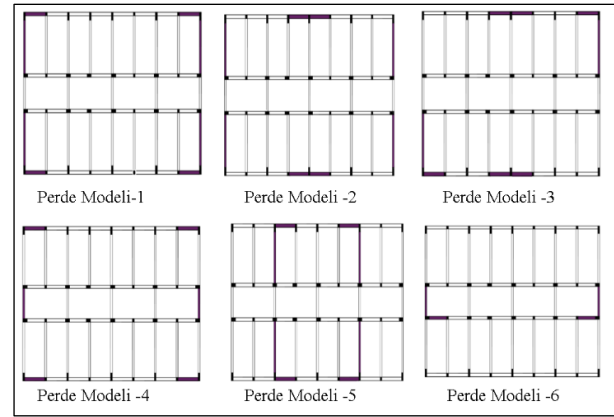
Ancak, okul binaları gibi kamu hizmeti yapılarının deprem sonrası kullanımı ve sınırlı hasar alması kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, daha sık görülme olasılığı olan DD-3 Deprem Yer Hareketi altında hedeflenen "Sınırlı Hasar" (SH) performans düzeyini sağlayamadığı; bunun yerine yapısal hasarın belirgin olduğu "Kontrollü Hasar" (KH) düzeyinde kaldığı tespit edilmiştir. Bu yetersizlik, binanın sıkça meydana gelebilecek bir deprem sonrasında dahi kullanılamaz hale gelebileceği, eğitim-öğretim faaliyetlerinin uzun süre aksayacağı ve ağır onarım masrafları gerektireceği anlamına gelmektedir ki bu durum bir eğitim yapısı için kabul edilebilir bir risk değildir. Yetersizliğin temel nedenleri incelendiğinde, sorunun sadece tekil elemanların (kolon veya kirişlerin) dayanım eksikliğinden ziyade, yapının bir bütün olarak yeterli yanal rijitliğe sahip olmamasından kaynaklandığı görülmüştür. Yapının genel yanal rijitliğinin düşük olması, katlar arası göreceli ötelenme taleplerini kabul edilebilir sınırların üzerine çıkarmaktadır. Bu aşırı ötelenme, özellikle 1990'lı yılların yapı tekniği gereği etriye sıklaştırmalarının olmadığı, etriye kanca açılarının ve boylarının yetersiz olması nedeniyle kolon-kiriş birleşim bölgelerini ve kolonların sünek davranış kapasitesini ciddi şekilde tehdit etmektedir.

Kolon mantolama veya karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) ile sargılama gibi yerel güçlendirme yöntemleri, eleman bazında dayanım ve süneklik artışı sağlayabilse de yapının temel problemi olan yetersiz global rijitliği ve

aşırı yanal ötelenmeyi çözmede yetersiz kalacaktır. Bu tür yerel ve daha ekonomik görünen çözümler, yapının genel davranışını temelden iyileştirmeyecek, sadece hasarın farklı taşıyıcı elemanlara veya birleşim bölgelerine yığılmasına neden olabilecektir. Yapıya yeni betonarme perdeler eklenmesi ise yanal rijitliği belirgin ölçüde artırarak kat ötelenmelerini kontrol altına almanın ve deprem yüklerini güvenle karşılaması açısından güvenilir bir yöntemdir.

Bu tespitler ışığında ve çalışma konusunun "Farklı Perde Düzenlerinin Yapı Davranışına Etkisi" olması nedeniyle betonarme perde eklenerek güçlendirilmesine karar verilmiş ve en etkin çözümü bulmak için 6 farklı perde yerleşim durumu (Perde Modeli-1'den Perde Modeli-6'ya kadar) modellenerek incelenmiştir.

Yerleştirilen bu perde modellerine sırası ile Perde Modeli-1, Perde Modeli-2, Perde Modeli-3, Perde Modeli-4, Perde Modeli-5 ve Perde Modeli-6 isimlendirmesi yapılmıştır.



Şekil 4. Perde Yerleşimleri

Perde yerleşim konumları Şekil 4'te verilmiştir. Perde Modeli-1'de binanın 4 köşesine her iki yönde, Perde Modeli-2'de X yönünde binanın dış ve orta akslarına Y yönünde kenar akslara, Perde Modeli-3'te X yönünde binanın dış ve orta akslarına Y yönünde kenar akslara, Perde Modeli-4'te X yönünde dış ve kenar akslara Y yönünde orta akslara, Perde Modeli-5'de X-Y yönünde orta akslarda L şeklinde perde yerleşimi yapılmıştır. Mevcut okul binasına eklenen güçlendirme perdeleri C30 beton sınıfına ve S420 çelik sınıfına ait perdelerdir. Binanın mimari yapısına uygun olarak yerleştirilen güçlendirme perdeleri tüm katlarda sürekli olarak devam etmiştir.

Tablo 3'te gösterilen performans değerlendirmesi, mevcut bina ve altı farklı perde yerleşimi modeli için DD-1 ve DD-3 deprem seviyelerinde beklenen hasar düzeylerini göstermektedir. Performans kıyaslamalarda, öncelikle kolonlarda olmak üzere taşıyıcı elemanlarda oluşan hasar seviyeleri dikkate alınmıştır; çünkü taşıyıcı sistem elemanlarındaki hasar, yapının genel deprem davranışını doğrudan etkiler.

Mevcut okul binasının doğrusal olmayan analizi sonucunda statik itme ve deprem etkisi altında yapıların

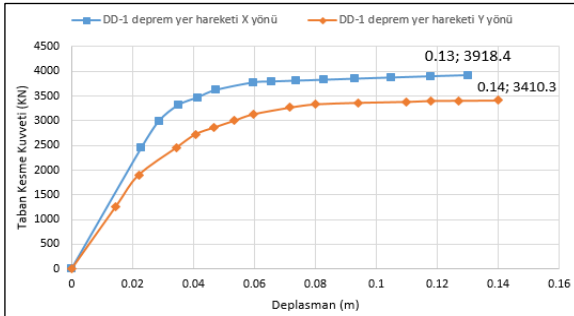
spektral ivme ve spektral yer değiştirme değerlerini veren kapasite eğrisi belirlenmiştir. Şekil 5-6'da statik itme eğrileri verilmiştir.

Tablo 3. Mevcut bina ve perde yerleşimlerinin performans değerlendirmesi

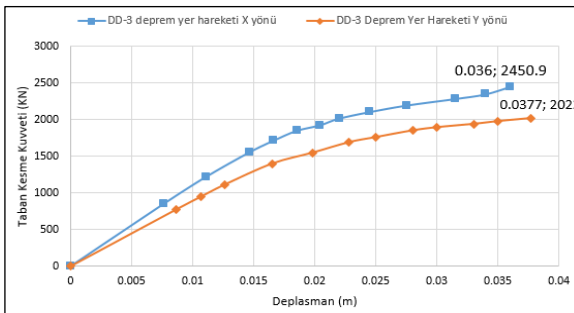
Perde yerleşimi	Performans değerlendirmesi DD-1	Performans değerlendirmesi DD-3
Mevcut bina	Kontrollü hasar	Kontrollü hasar
Perde modeli-1	Kontrollü hasar	Kontrollü hasar
Perde modeli-2	Sınırlı hasar	Sınırlı hasar
Perde modeli-3	Sınırlı hasar	Sınırlı hasar
Perde modeli-4	Kontrollü hasar	Kontrollü hasar
Perde modeli-5	Sınırlı hasar	Sınırlı hasar
Perde modeli-6	Kontrollü hasar	Kontrollü hasar

Mevcut binaya yapılan analizin ardından 6 farklı perde yerleşimi için analiz tekrarlanmıştır. Bu perde yerleşimleri için yapılan analiz sonucunda statik itme eğrileri karşılaştırmalı olarak aşağıdaki Şekil 7-10'da verilmiştir.

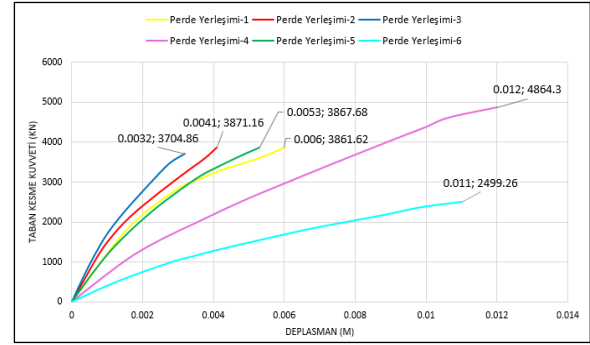
Performans hedeflerine göre yapılan ilk değerlendirmede, Tablo 3'te verilen sonuçlar esas alınarak bir eleme yapılmıştır. Bu sonuçlara göre, Perde Yerleşimi-1, Perde Yerleşimi-4 ve Perde Yerleşimi-6 modellerinin, kritik DD-3 deprem seviyesinde hedeflenen "Sınırlı Hasar" koşulunu sağlayamadıkları tespit edilmiştir. Performans hedeflerini karşılayan Perde Yerleşimi-2, Perde Yerleşimi-3 ve Perde Yerleşimi-5 modelleri arasında en optimum çözümü bulmak amacıyla detaylı bir karşılaştırma yapılmıştır.



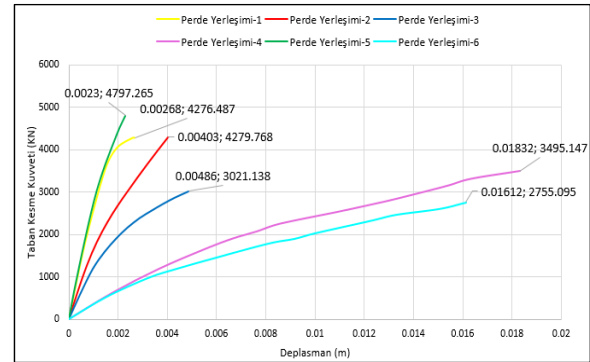
Şekil 5. Mevcut binanın DD-1 Deprem Yer Hareketine göre X ve Y yönü için statik itme eğrileri



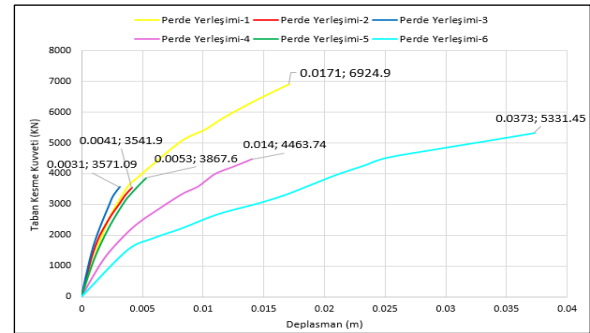
Şekil 6. Mevcut bina DD-3 Deprem Yer Hareketine göre X ve Y yönü için statik itme eğrileri



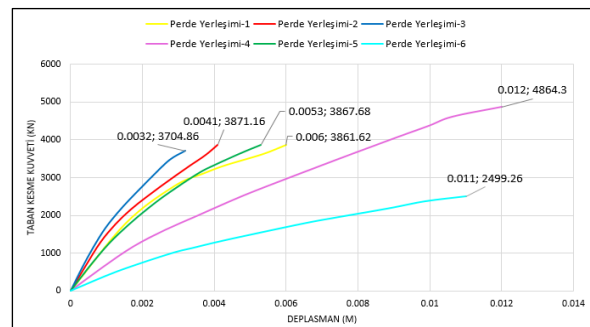
Şekil 7. Perde Modellerine ait DD-3 için X yönünde karşılaştırmalı statik itme eğrileri



Şekil 8. Perde modellerine ait DD-3 için Y yönünde karşılaştırmalı statik itme eğrileri



Şekil 9. Perde Modellerine ait DD-1 için X yönünde karşılaştırmalı statik itme eğrileri



Şekil 10. Perde Modellerine ait DD-1 için Y yönünde karşılaştırmalı statik itme eğrileri

Perde Yerleşimi-2 modelinde, güçlendirme elemanları yapının kısa kenarlarına (Y-yönü) dış aksta karşılıklı ve simetrik olarak iki adet ve X yönünde dış akslarında ve ortada olacak şekilde iki adet konumlandırılmıştır. Bu yerleşim, beklendiği gibi özellikle Y-yönünde çok etkin bir davranış sergilemiştir. Y-yönü analizlerinde yapı, ~4276 kN'a varan yüksek bir dayanım kapasitesiyle oldukça rijit bir karakter göstermiştir. X-yönünde ise perdelerin zayıf eksenleri çalışmasına rağmen, ~3500-3800 kN aralığında yeterli bir dayanım ve orta düzeyde bir deformasyon kapasitesi sunmuştur. Bu model, performans hedeflerini sağlamakla birlikte, gücünün ve rijitliğinin ağırlıklı olarak Y-yönünde yoğunlaşması sebebiyle yönsel bir karakteristiğe sahiptir.

Perde Yerleşimi-3'te, yapının X yönünde dış akslarında ve ortada olacak şekilde iki adet ve sol alt köşesi ile sağ üst köşesine L formunda iki adet perde eklenmiştir. Bu model, X-yönü doğrultusunda ~3500-3700 kN mertebesinde bir dayanım sunarak hedefleri karşılamıştır. Ancak bu yerleşimin en kritik zafiyeti Y-yönünde ortaya çıkmaktadır. Perdenin bu yöndeki ataleti çok düşük olduğundan, yapının Y-yönü dayanımı (~3021 kN) diğer başarılı modellere kıyasla belirgin ölçüde düşük kalmıştır. Ayrıca, perdelerin tek bir aksta ve asimetrik olarak yerleştirilmesi, yapının genel burulma rijitliğini olumsuz etkileyerek deprem sırasında ek burulma momentleri oluşmasına neden olabilir. Bu sebeplerle Perde Yerleşimi-3, performans hedeflerini sağlamasına rağmen, yapısal davranışındaki dengesizlikler nedeniyle en az tercih edilen başarılı modeldir.

Perde Yerleşimi-5, yapının dört köşesine yakın, Y yönü için ikinci iç akslarda, X yönü için dış akslarda olacak şekilde, her iki yönde etkin L formunda simetrik perdelerin yerleştirildiği bir tasarıma sahiptir. Bu stratejik yerleşim, itme eğrilerinde görülen yüksek performans sağlanmıştır. X-yönü analizlerinde yapı, ~4464 kN'a ulaşan en yüksek dayanımı sergilerken, 0.014 metreye varan deformasyon kapasitesiyle oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Benzer şekilde Y-yönünde de ~4797 kN ile en yüksek dayanım kapasitesine ulaşarak iyi bir rijitlik ve dayanım sunmuştur. Perdelerin L formunda Y yönü için iç akslarda kalacak şekilde uygulanması, yapının her iki yöndeki yanal yük taşıma kapasitesini ve burulma rijitliğini aynı anda ve etkin bir şekilde artırmıştır. Bu dengeli ve çok yönlü performans, Perde Yerleşimi-5'i teknik olarak en başarılı ve güvenilir güçlendirme çözümü yapmaktadır.

Başarılı bulunan üç modelin statik itme eğrileri incelendiğinde, yapısal davranışları arasında önemli farklar olduğu gözlemlenmiştir. X-yönü analizlerinde her üç model de yapıya yüksek ve birbirine yakın rijitlik katarken, Perde Yerleşimi-5'in her iki deprem düzeyinde de en yüksek dayanım kapasitesini sunduğu, diğer modellere göre daha sünek bir davranış sergileyerek daha yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Modeller arasındaki en belirgin fark ise Y-yönü davranışlarında ortaya çıkmıştır. Perde Yerleşimi-

5, Y-yönünde diğer iki modele kıyasla hem belirgin şekilde daha rijit bir davranış sergilemiş hem de taban kesme kuvveti kapasitesi açısından açık ara en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu durum, Model-5'in yapının zayıf yönünü daha etkin bir şekilde desteklediğini kanıtlamaktadır.

Tüm bu veriler değerlendirildiğinde, önerilen altı modelden üçünün temel performans hedeflerini karşılayamadığı için yetersiz olduğu, performans hedeflerini sağlayan diğer üç modelin karşılaştırmalı analizi sonucunda ise Perde Yerleşimi-5'in, hem X hem de Y yönlerinde en üstün rijitlik ve dayanım özelliklerini bir arada sunduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, yapının TBDY-2018'in getirdiği tüm güvenlik ve kullanım hedeflerini en yüksek güvenilirlikle karşılayabilmesi için en optimum ve teknik olarak en üstün güçlendirme stratejisinin Perde Yerleşimi-5 olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, TBDY-2018 performans hedeflerini sağlamayan mevcut bir okul binası için altı farklı betonarme perde güçlendirme senaryosu analiz edilmiş ve perde konumunun yapısal davranış üzerindeki kritik etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın en önemli ve dikkat çekici bulgusu, bir yapıya sadece perde eklemenin dahi her zaman yeterli bir çözüm olmayabileceğidir. İncelenen altı farklı ve makul perde yerleşiminden üç tanesi, özellikle DD-3 deprem seviyesi için hedeflenen "Sınırlı Hasar" performans hedefini karşılayamamıştır. Bu durum, az katlı ve görece basit bir geometriye sahip bir okul yapısında bile, güçlendirme elemanlarının konumlandırılmasının ne kadar hassas bir mühendislik kararı olduğunu çarpıcı bir şekilde ortaya koymaktadır.

Başarılı bulunan Perde Modeli-2, 3 ve 5'in kendi aralarındaki karşılaştırması ise en uygun çözüme nasıl ulaşılabileceğini göstermiştir. Perde Modeli-3'ün asimetrik yerleşimi nedeniyle Y-yönünde zayıf kalması ve Perde Modeli-2'nin gücünün tek bir yönde yoğunlaşması, bu modellerin optimum çözüm olmadığını göstermiştir. Analizler sonucunda, köşelere yakın yerleştirilmiş L formundaki perdeleriyle Perde Modeli-5'in, hem her iki yönde üstün dayanım ve rijitlik sağlaması hem de yeterli süneklik kapasitesi sunmasıyla teknik olarak en başarılı ve dengeli çözüm olduğu görülmüştür. Bu modelin başarısı, perdelerin yapının X yönünde dış çerçevesine, Y yönünde dış aksa yakın iç akslarda simetrik olarak yerleştirilmesinin hem ötelenme açısından hem de burulma davranışı açısından davranışın iyileştirilmesinde etkinliği doğrulanmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma, perde eklemesi ile yapılacak güçlendirmelerde tasarımcı mühendisin, yönetmelik koşullarını sağlamak için bir dizi karşılaştırmalı analiz yaparak en uygun güçlendirme sistemine karar vermesinin mutlak bir gereklilik olduğunu göstermiştir. Perde sayısı ve konumunun keyfi olarak değil, yapının dinamik davranışını ve zayıf yönlerini dikkate alan analitik bir süreçle belirlenmesi zorunludur. Elde edilen

bulgular, basit yapılar için dahi mühendislik tecrübesi ve detaylı analizin, güvenli ve ekonomik bir güçlendirme tasarımının ayrılmaz bir parçası olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”. “Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”.

Yazar Katkıları

Özgül: Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması, Revizyon.

Derdiman: Çalışma konsepti ve tasarım, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması, Revizyon.

Kaynaklar

- [1] Z. Celep, *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, 6. Baskı. İstanbul: Yazarın Kendi Yayını, 2018.
- [2] M. Yalın ve H. Ulutaş, "Mevcut okul türü bir binanın deprem performansının 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre değerlendirilmesi," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 10, sayı 2, ss. 648-661, 2021, doi: 10.28948/ngmuh.911167.
- [3] S. Yaman, H. Tekeli ve F. Demir, "Betonarme Binalarda Perde Yeri ve Değişiminin Bina Performansına Etkisi," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı 16, ss. 194-204, 2019.
- [4] S.Ö. Değertekin ve H. Şik, “Deprem güvenliği yetersiz betonarme bir bina için farklı güçlendirme önerilerinin karşılaştırılması”, *DÜMF MD*, c. 6, sy 2, ss. 121–130, Ara. 2015, [çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://izlik.org/JA22MT56US>.
- [5] E. Aracı, "Betonarme Perde Konumlarının Bina Deprem Performansına Olan Etkisinin Bilgisayar Destekli İrdelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2012.
- [6] B. Erdil ve G. Yusuf, "Betonarme Binalar için Perde Duvar Etkinliğinin Belirlenmesi," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 10, sayı 2, ss. 655-669, 2021, doi:10.17798/bitlisfen.898353.

- [7] Y. Akkaya, "Deprem Kuvvetlerine Karşı Betonarme Perdelerin Davranışı ve Boyutlandırılması," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
- [8] A. Nakipoğlu, "Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği Bulunan Betonarme Yapıların Güçlendirilmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2018.
- [9] A.A. Raofe, "Deprem Etkisi Altında Mevcut Betonarme Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirme Teknikleri Maliyet Analizlerinin Karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 2019.
- [10] Y. Gündüz, "Betonarme Binalar için Gerekli Güçlendirme Perde Duvar Miktarının Hesabı," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, 2019.
- [11] Y. Efe ve İ. Bedirhanoglu, "Betonarme Perde Duvarların Eğilme ve Kesme Etkilerine Karşı Güçlendirilmesi Üzerine Literatür Değerlendirmesi," *Dicle University Journal of Engineering*, cilt 15, sayı 3, ss. 663-675, 2024, doi:10.24012/dumf.1420105.
- [12] AFAD, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [13] S. Foroughi ve S.B. Yüksel, "TBDY 2018'e göre Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemleri ile Betonarme Yapı Sistemlerinin Performans Analizi," *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt 5, sayı 1, ss. 33-55, 2022.
- [14] F.S. Alıcı, K. Kaatsız ve H. Sucuoğlu, "Binaların Çok Modlu İtme Analizi için Genel Yük Vektörlerinin Pratik Uygulaması," *3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, İzmir, 2015.
- [15] K.K. Kuria and O.K. Kegyes-Brassai, "Pushover Analysis in Seismic Engineering: A Detailed Chronology and Review of Techniques for

- Structural Assessment," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 1, p. 151, 2024, doi: 10.3390/app14010151.
- [16] A. Daei and M. Poursha, "On the accuracy of enhanced pushover procedures for seismic performance evaluation of code-conforming RC moment-resisting frame buildings subjected to pulse-like and non-pulse-like excitations," *Structures*, vol. 32, pp. 929-945, 2021, doi:10.1016/j.istruc.2021.03.035.
- [17] O. Görgülü, "Northridge Depreminde Kayıtları Alınmış Betonarme Bir Binada Modal İtme Analizi Uygulaması," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [18] İdeyapi Yazılım Ltd. Şti., ideStatik Ver.10 Yapısal Analiz ve Tasarım Yazılımı, İstanbul, 2022. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://idecad.com.tr>
- [19] İdeyapi Yazılım Ltd. Şti., "Çok Modlu İtme Yöntemi (Arsa Yöntemi)," ideCAD Yardım Portalı, 2022. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://help.idecad.com.tr/ideCAD/cok-modlu-itme-yoentemi-arsa-yontemi>
- [20] M.N. Aydinoglu, "An Incremental Response Spectrum Analysis Procedure Based on Inelastic Spectral Displacements for Multi-Mode Seismic Performance Evaluation," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 3-36, 2003, doi:10.1023/A:1024853326383.
- [21] A.K. Chopra and R.K. Goel, "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 33, no. 8, pp. 903-927, 2004.