


Betonarme Bir Çerçevenin Farklı Yerleşim Düzenlerine Sahip Merkezi Çelik Çaprazlarla Güçlendirilmesi

*¹Emine Aydın, ²Elif Boru

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, emineb@subu.edu.tr, 

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, eorak@subu.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 31.05.2019

Kabul Tarihi: 11.03.2020

Öz

Yönetmeliklerin değişmesi, binaya yeni katların eklenmesi, binanın kullanım amacının değişmesi ve benzeri nedenlerden binalara onarım veya güçlendirme yapılması gerekebilir. Binaların güçlendirilmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi çelik çapraz elemanlar kullanarak güçlendirme yapmaktır. Bu güçlendirme yönteminde, hangi tür çelik çaprazın kullanılacağı, çaprazların uygun yerleşiminin nasıl olacağı başlangıç aşamasında cevaplanması gereken önemli sorulardandır. Yapılan bu çalışmada, öncelikle üç açıklıklı (açıklık mesafesi eşit olup 4.5 m) ve dokuz katlı (kat yükseklikleri eşit ve 3m) betonarme çerçeve sistemin performans analizi yapılmıştır. Performans analizi sonucunda yapının güçlendirmeye ihtiyacı olduğu tespit edilmiştir. Ardından merkezi X çelik çaprazlar kullanılarak beş farklı yerleşim düzenine sahip güçlendirme modeli oluşturulmuştur. Bu sayede farklı yerleşim düzenine uygulanan çelik çaprazların binanın sismik davranışı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Modellerin karşılaştırılmasında Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi ile yapılan performans değerlendirme sonuçları kullanılmıştır. Karşılaştırma sonucunda 2 açıklığa yapılan ve düşey süreksizliği olmayan çelik çapraz uygulamasının en uygun güçlendirme şekli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme yapıların güçlendirilmesi, merkezi X çelik çaprazlar, Statik İtme Analizi, performans değerlendirmesi

Strengthening of a Reinforced Concrete Frame Using Centric Steel Braces with Different Configurations

*¹Emine Aydın, ²Elif Boru

¹Sakarya University of Applied Sciences, Department of Civil Engineering, emineb@subu.edu.tr,

² Sakarya University of Applied Sciences, Department of Civil Engineering, eorak@subu.edu.tr,

Abstract

Repair or strengthening of building may be required due to the change of the design codes, adding new floors to the building, changing the purpose of the building etc. There are many methods to retrofit buildings. One of them is to strengthen using steel braces. In this strengthening method one of the important questions that should be answered at the initial stage is what kind of steel brace is to be used and how the steel braces are to be arranged. In this study first, the performance analysis of a three-span (all spans are 4.5m), nine-storey (story height is 3m on each floor) reinforced concrete frame building analysis was performed. As a result of the performance analysis, it was determined that the structure needed to be strengthened. Using centric X braces 5 different reinforcing models were created. In this way, the effect of steel braces on the seismic behavior of the building was determined. In the comparison of the models, the results of the performance evaluation, with the Nonlinear Static Pushover Analysis, were used. As a result of the comparison, the optimum results were obtained from the model where central steel braces were used in each story from the first floor without vertical discontinuity.

Keywords: Retrofitting of reinforced concrete buildings, centric X steel braces, Nonlinear Static Pushover Analysis, performance assessment

1. GİRİŞ

Mevcut yapılara sismik performans değerlendirmesi yapıldığında, yönetmelik ve standartlardaki değişiklikler,

tasarım ve yapım kusurları, çevresel etkiler, kullanım ve yükleme koşullarındaki değişiklikler gibi nedenlerden dolayı tamir veya güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir [1]. Tamir veya güçlendirme işlemi sırasında ihtiyaç duyulacak çalışma alanı ve uygulama süresi konusundaki kısıtlamalar,

*Sorumlu Yazar: Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, emineb@subu.edu.tr / Sakarya University of Applied Sciences, Department of Civil Engineering, emineb@subu.edu.tr,

çalışma sırasında ortaya çıkan gürültü- titreşim ve kirlilik, mimari ve/veya taşıyıcı sistem tasarımının korunması, yapısal performans kadar fonksiyonel performansın da göz önünde tutulması ve yapının uygulama sırasında kullanılmaması gibi nedenler uygulanacak güçlendirme tekniğinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Sıralanan sebeplerden dolayı betonarme perde eklenerek yapılan güçlendirme teknikleri belirli kısıtlamaları beraberinde getirmektedir [2]. Bu kısıtlamaları bertaraf etmek için mühendisler, güvenli ve etkin birçok güçlendirme tekniği geliştirme faaliyeti içine girmişlerdir. Bu amaçla, sismik izolatörler, enerji yutucu sistemler ve aktif kontrol sistemleri gibi tekniklerin yanında, çelik malzeme ile uygulanan ve yukarıda bahsedilen koşulların hemen hemen hepsine uyan güçlendirme teknikleri de geliştirmişlerdir [3]. Taşıyıcı sistemin kolon- kiriş düzlemlerine yerleştirilecek çelik çaprazlar ile binaların sismik dayanımları artırılabilir. Çelik çaprazlar ile güçlendirme, geleneksel tasarım yöntemlerinin arasında diğer yöntemlerle kıyaslandığında etkinlik, kolaylık ve maliyet olarak uygunluğu nedeniyle genellikle en çok tercih edilenlerdendir [4][4][5][6].

Yapılan çalışmalarda dışmerkez çelik çapraz sistemler kullanılarak güçlendirilmiş betonarme binaların depremsel güvenilirliği incelendiğinde değişik tiplerde ve dağılımlarda kullanılan dışmerkez çelik çapraz sistemlerin binanın deprem performansı üzerinde iyileşme sağladığı gösterilmiştir [7][8]. Bununla birlikte çelik çaprazlar uygun yerleşim düzeni ile betonarme çerçevenin enerji sönmleme kapasitesini ve yanal yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır [9][10][11]. Farklı kat adedine sahip betonarme binaların betonarme perde veya çelik çaprazlarla güçlendirilmesi karşılaştırıldığında incelenen yapılarda; betonarme perde ile yapılan güçlendirmelerin çelik çaprazlarla yapılan güçlendirmeye göre görece kat ötelemeleri bakımından daha etkili olduğu görülmüştür. Ancak çelik çaprazlarla yapılan güçlendirmenin de güvenlik seviyesi bakımından yeterli davranış gösterdiği belirlenmiştir. Buna göre, incelenen yapıların güçlendirilmesinde her iki yöntemin de güvenlik seviyesi bakımından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuca dayanarak yapıların güçlendirilmesinde betonarme perde veya çelik çaprazların işçilik ve ekonomik sebepler göz önüne alınarak kullanılması önerilmektedir [12]. Ayrıca çaprazların kullanım şekilleri hakkında çeşitli deneysel çalışmalar da yapılmıştır [13]. Yapılan testler sonucunda çelik takviye elemanların çerçevenin düzlem içi mukavemetinde önemli artışlar sağladığı gösterilmiştir. [14][15]

Çelik çapraz elemanlarla güçlendirilmiş betonarme yapıların deprem davranışları doğrusal olmayan analizler yardımıyla incelenmiştir. Analizler kapsamında doğrusal olmayan analizler kullanılarak yapıların elastik ötesi davranışları belirlenmiştir. Güçlendirilen betonarme yapılarla, mevcut yapı, doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre deprem davranışları açısından karşılaştırılmıştır. Böylelikle güçlendirilmiş yapıların davranışları belirlenmiş ve güçlendirmenin yapısal davranışa katkısı ortaya konulmuştur [16]. Yapıların güçlendirilmesi için teknolojik sönmleyicilerin ve çelik çapraz elemanların en uygun yerini

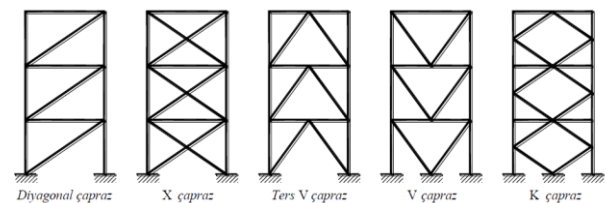
ve miktarını bulmak amacıyla oldukça etkili sayısal yöntemler önerilmiştir [17] [18].

Yapılan literatür incelemesi sonucunda çelik çaprazlar ile güçlendirmenin binanın sismik davranışını olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada; üç açıklıklı betonarme çerçeve sisteme öncelikle performans analizi yapılmıştır. Daha sonrasında binanın deprem performansını iyileştirmek amacıyla çerçeve merkezi X çelik çaprazlarla güçlendirilmiştir. Çaprazların dayanım, rijitlik ve ekonomi kriterleri dikkate alınarak uygun kullanım yerinin belirlenmesi için 5 farklı kullanım şekli ile oluşturulan modellerin Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda betonarme çerçeve sistemin sismik davranışı için en etkili merkezi X çelik çapraz kullanım yeri önerilmiştir.

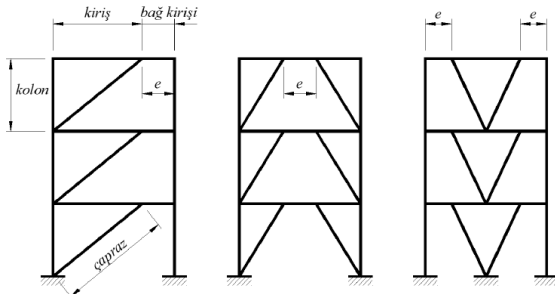
1.1. Betonarme Binaların Güçlendirilmesinde Kullanılan Çelik Çapraz Türleri

Bir yapının yanal yük dayanımı yeni yapı elemanlarının eklenmesiyle artırılabilir. Bu elemanlar uygun projelendirildiğinde deprem etkisinin büyük bir kısmına karşı koyarak, mevcut sistemin yükünü önemli ölçüde azaltırlar. Kullanılacak yeni taşıyıcı elemanın türü, mevcut yapının taşıyıcı sistemine ve hasar durumuna bağlıdır. Güçlendirme için öngörülen yeni elemanlarla sistemin rijitliği arttırılacağı için, genellikle yapıya gelen deprem kuvvetleri de artar ve sismik etkiler sistemde değişik bir dağılımla ortaya çıkar. Yeni elemanların yapı içerisinde düzgün dağıtılmasıyla, etkilerin belirli bölgede yığılması ve istenmeyen burulma etkilerinin meydana gelmesi önlenmiş olur. Mevcut ve yeni elemanlar arasındaki kuvvet geçişinin ve bütünleşmesinin sağlanması için ara bölgelerin özenle ele alınması ve projelendirilmesi gerekir [4].

Çaprazlı çelik çerçeveler, mafsallı birleşimli veya moment aktaran çerçeveler ile bunlara merkezi veya dışmerkez olarak bağlanan çaprazlardan oluşan yatay yük taşıyıcı sistemlerdir. Bu tür sistemlerin yatay yük taşıma kapasiteleri, eğilme dayanımlarının yanında, daha çok veya tümüyle elemanların eksenel kuvvet dayanımları ile sağlanmaktadır. Çaprazlı çelik çerçeveler, çaprazların düzenine bağlı olarak, merkezi çaprazlı çelik çerçeveler (Şekil 1) ve dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler (Şekil 2) olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar [19].



Şekil 1. Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler [19]



Şekil 2. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler [19]

Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler, yüksek rijitliği ve ekonomileri nedeni ile çelik çerçeve sistemlerin yanall yüklerle karşı dayanımında etkindirler [20]. Merkezi çaprazlı sistemlerdeki (Şekil 1) çapraz elemanlar, şiddetli yer hareketleri sırasında doğrusal olmayan davranış gerçekleştirecek şekilde tasarlanırlar. Çapraz elemanın, deprem yer hareketi sırasında çekme kuvvetleri altında akması, basınç kuvvetleri altında ise burkulması beklenir. Süneklik, çekme kuvveti altında akan çapraz elemanlar tarafından sağlanır, diğer bir deyişle taşıyıcı sistemin dağıtması gereken sismik enerjinin önemli bir kısmı çekme kuvveti altında akan çaprazlar tarafından tüketilir. Burkulma, sünek bir davranış olmadığından burkulanan çaprazlar, taşıyıcı sistemin sünekliğine herhangi bir katkı sağlamazlar. Burkulanan çaprazlar tarafından tüketilen sismik enerji ihmal edilebilir düzeydedir. Burkulanan çaprazlarda, ani ve büyük bir dayanım düşüşü meydana gelir ve elemanın kapasitesi önemli ölçüde düşer [21].

2. ANALİZ METOTLARI

Yapılan çalışmada çelik çaprazların binanın sismik davranışına etkisini belirleyebilmek için Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi kullanılmıştır.

2.1. Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi

Doğrusal olmayan statik itme analizi temel olarak, yapının yatay kuvvetler altındaki dayanımını ifade eden ve statik itme eğrisi olarak isimlendirilen yatay kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin, malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan teoriye göre elde edilmesine ve değerlendirilmesine dayanmaktadır. Yatay kuvvet arttıkça statik itme eğrisinde, yatay yer değiştirmeler ve plastik şekil değiştirmeler büyümekte sistemde artarak hasar meydana gelmektedir. Statik itme analizinde yapıda düşey yükler bulunurken, deprem yüklerini temsil eden yatay yükler de aralarındaki oran sabit kalacak şekilde artırılmaktadır [16]. Bu yüklemeye, noktasının yapıdaki tepe yer değiştirmesi hedef yer değiştirmeye ulaşana kadar devam edilir [22]. Hedef yer değiştirme, dikkate alınacak deprem etkisi ve bu etki altında binada ortaya çıkacak kesit etkileri ile, şekil ve yer değiştirmeleri ifade etmektedir [23]. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'de doğrusal olmayan hesap yöntemlerinden Tek ve Çok Modlu İtme Yöntemleri uygulanarak statik itme analizi gerçekleştirilmektedir. İtme Yöntemleri ile yapılan hesap sonucunda elde edilen sünek davranışa karşı gelen değerlendirmeye esas plastik şekil

değiştirmeler, seçilen performans düzeyi için izin verilen sınır değerlerle karşılaştırılarak şekil değiştirmeye göre değerlendirme yapılır [24][25].

2.2. Şekildeğiştirmelerin değerlendirilmesi

Göçmenin Önlenmesi (GÖ) ve Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyleri için toplam birim şekildeğiştirme ve plastik dönmeler için izin verilen sınır değerler TBDY 2018 bölüm 5.8'de belirtilen bağıntılarla hesaplanmaktadır. Çalışmada taşıyıcı elemanların plastik dönme sınır değerleri Denk. (1) ve Denk. (2) kullanılarak elde edilmiştir. Bu denklemlerdeki, $\theta_p^{GÖ}$: Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırını, θ_p^{KH} : Kontrollü Hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırını, Φ_u : göçme öncesi eğriliği, Φ_y : akma eğriliğini, L_p : plastik mafsal boyunu, L_s : kesme açıklığını, d_b : boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\Phi_u - \Phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \Phi_u d_b \right] \quad (1)$$

$$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)} \quad (2)$$

2.3. Göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılması

Azaltılmış göreli kat ötelemesi, herhangi bir kolon veya perde için, ardışık iki kat arasındaki yer değiştirme farkını ifade etmektedir. (X) deprem doğrultusu için TBDY 2018 bölüm 4.9'da belirtilen bağıntılarla (Denk. 3,4,5) hesap edilmektedir.

$$\Delta_i^{(X)} = u_i^{(X)} - u_{i-1}^{(X)} \quad (3)$$

$u_i^{(X)}$ ve $u_{i-1}^{(X)}$, tipik (X) deprem doğrultusu için binanın i'inci ve (i-1)'inci katlarında herhangi bir kolon veya perdenin uçlarında azaltılmış deprem yüklerine göre hesaplanan yatay yer değiştirmeleri ifade etmektedir.

Binanın i'inci katındaki kolon veya perdeler için tipik (X) deprem doğrultusu için, etkin göreli kat ötelemesi, $\delta_i^{(X)}$ ise Denk. (4) ile bulunmaktadır. Bu denklemde, R taşıyıcı sistem davranış katsayısını, I bina önem katsayısını ifade etmektedir.

$$\delta_i^{(X)} = \frac{R}{I} \Delta_i^{(X)} \quad (4)$$

Her bir deprem doğrultusu için, binanın herhangi bir i'inci katındaki kolon veya perdelerde, Denk.(4) ile hesaplanan $\delta_i^{(X)}$ etkin göreli kat ötelemesi değerlerinin kat içindeki en büyük değerinin, $\delta_{i,max}^{(X)}$ Denk. (5) ile verilen koşulu sağlaması gerekmektedir. Bu denklemde, λ göreli kat ötelemelerinin sınırlandırılmasında kullanılan ampirik katsayıyı, h_i i'inci katın yüksekliğini, κ izin verilen göreli

kat ötelemelerinin tanımında betonarme ve çelik taşıyıcı sistemler için farklı olarak kullanılan katsayıyı ifade etmektedir.

$$\lambda \frac{\delta_{i,\max}^{(X)}}{h_i} \leq 0.008 \kappa \quad (5)$$

2.4. İkinci Mertebe Etkileri

Her bir i'inci katta göz önüne alınan (X) deprem doğrultusunda İkinci Mertebe Gösterge Değeri $\theta_{II,i}^{(X)}$, TBDY 2018 bölüm 4.9'da verilen bağıntıyla (Denk.6) hesaplanmaktadır.

$$\theta_{II,i}^{(X)} = \frac{(\Delta_i^{(X)})_{\text{ort}} \sum_{k=i}^N w_k}{V_i^{(X)} h_i} \quad (6)$$

Bu bağıntıdaki $(\Delta_i^{(X)})_{\text{ort}}$, azaltılmış görece kat ötelemelerinin kat içindeki ortalama değeri, Denk. 3' göre hesaplanmalıdır. Burada w_k , k'inci kata etkileyen toplam ağırlık, $V_i^{(X)}$, (X) deprem doğrultusunda i'inci kattaki azaltılmış kat kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Tüm katlar için hesaplanan $\theta_{II,i}^{(X)}$ 'lerin maksimum değeri $\theta_{II,\max}^{(X)}$, TBDY 2018 bölüm 4.9'da verilen bağıntıyla (Denk.7) hesaplanmaktadır. Denklem 7 'de verilen koşulu sağlaması durumunda, ikinci mertebe etkilerinin tasarıma esas iç kuvvetlerin hesabında göz önüne alınması gerekli değildir.

$$\theta_{II,\max}^{(X)} \leq 0.12 \frac{D}{C_h R} \quad (7)$$

Burada, D dayanım fazlalığı katsayısını, C_h ise taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan histeretik davranışına bağlı olarak tanımlanan bir katsayıyı ifade etmektedir. Betonarme binalarda $C_h = 0.5$, çelik ve kompozit kolonlu binalarda ise $C_h = 1$ alınmaktadır.

3. SAYISAL ÇALIŞMA

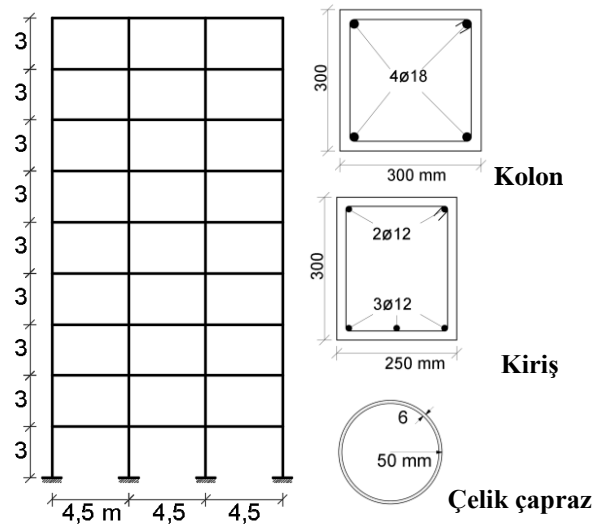
Yapılan çalışmada, betonarme binaların güçlendirilmesinde kullanılan merkezi X şeklindeki çelik çaprazların binada en uygun yerleşiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 9 katlı, taşıyıcı sistemi betonarme çerçevelerden oluşan bina kullanım sınıfı (BKS) 3 olan bir bina tasarlanmıştır.

3.1. Betonarme çerçeve modeli

Betonarme çerçevenin tasarımında TS500 Betonarme Binaların Tasarım ve Yapım Kuralları [26] ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 [19] koşulları dikkate alınmıştır. Binanın kat yüksekliği 3m'dir ve 4.5m uzunluğunda 3 adet açıklığı bulunmaktadır. Binada herhangi bir yapı düzensizliği bulunmamaktadır. Betonarme taşıyıcı elemanların tasarımında C25 beton sınıfı ve S420 donatı çeliği kullanılmıştır. Kolonlar 30x30cm boyutunda, kirişler

ise 25x30cm boyutunda minimum tasarım şartlarını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3). Minimum tasarım koşullarının kullanılmasındaki amaç güçlendirme etkisini net bir şekilde görebilmektir. Taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit rijitlikleri ise TBDY 2018 Bölüm 4'te belirtildiği şekilde uygulanmıştır.

Betonarme çerçevenin analitik modeli ve analizleri SAP2000 bilgisayar paket programında yapılmıştır [27]. Analitik modelde doğrusal olmayan davranış, kolon ve kiriş elemanlarda yatay etki altında en çok zorlanan bölgelerinde toplandığı (uç bölgeler), bunun dışında doğrusal elastik davranışın söz konusu olduğu kabulüne dayanan yığılı plastik mafsallar hipotezi ile dikkate alınmıştır. Plastik mafsallar kolonlarda iki eksenli moment ve eksenel yük etkileşimi, kirişlerde ise moment eğrilik ilişkisi ile tanımlanmıştır.

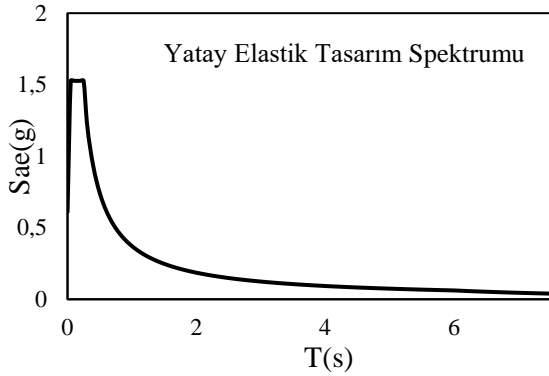


Şekil 3. Betonarme çerçeve sistemin nümerik modeli ve kesit özellikleri

Yapıların depreme dayanıklı tasarımında deprem yüklerinin hesaplanmasında dünya genelinde hazırlanmış, pek çok standart ve yönetmelik mevcuttur. Binanın yapıldığı konumdaki yer hareketi, elastik ivme spektrumu kullanılarak tarif edilmektedir. TBDY 2018 ile birlikte hazırlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritası ile deprem bölgeleri yerine artık en büyük yer ivmesi değerleri kullanılmaktadır. Tasarlanan yapının standart tasarım deprem yer hareketi olarak tanımlanan, Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) yani spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının % 10 olduğu deprem yer hareketine maruz kalacağı düşünülmüştür.

Yapının Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi arazisinde yapıldığı ve zemin sınıfının ZB olduğu varsayılmıştır. Bu kabuller çerçevesinde Türkiye Deprem Tehlike Haritaları kullanılarak binanın yapılacağı araziye ait %5 sönüm oranı için tasarım spektral ivme katsayıları ($S_{DS}=1.527$; $S_{D1}=0.372$) kullanılarak yatay elastik tasarım spektrumu elde edilmiştir (Şekil 4). DD-2 yer hareketi düzeyi için, BKS ve sismik tehlike haritasından elde edilen kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS})

değerleri dikkate alınarak binanın deprem tasarım sınıfının (DTS) 1 olduğu belirlenmiştir. Devamında ise DTS 1 için bina yükseklik sınıfının (BYS) 5 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. Binanın yapıldığı araziye ait ivme spektrumu

3.2. Betonarme çerçevenin deprem performansının değerlendirilmesi

TBDY 2018'e göre BYS değeri 2'den büyük olan binalarda kontrollü hasar (KH) performansının sağlanması gerekliliği belirtilmiştir. KH performans düzeyinde binada can kaybının yaşanmaması, bu amaçla bina taşıyıcı elemanlarındaki hasarın sınırlı düzeyde kalması hedeflenmektedir. Tasarlanan binanın KH performansını sağlayıp sağlamadığını belirlemek amacıyla Tek Modlu İtme Analizi yapılmış ve kesit plastik dönme sınırları dikkate alınarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Tek modlu itme analizini kullanabilme koşullarından biri olan $BYS \geq 5$ sağlanmaktadır. Diğer bir koşul olan burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{br} < 1.4$ olma şartı da sağlanmaktadır. Yapılan modal analiz sonucunda son şart olan hakim titreşim moduna ait taban kesme kuvveti etkin kütlelerinin binanın toplam kütlelerine oranının en az %70 olması şartının sağlandığı belirlenmiştir (Tablo 1).

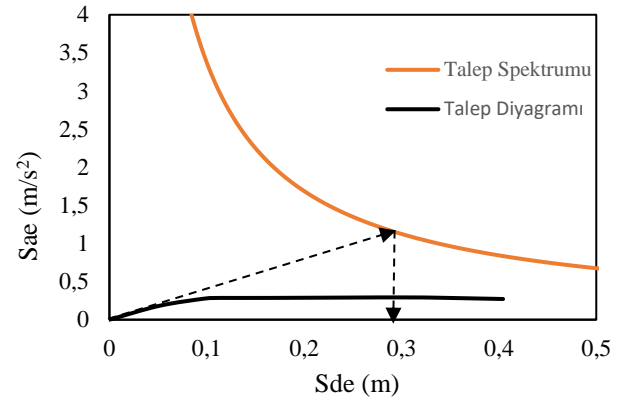
Tablo 1. Referans binanın modal analiz sonuçları

	Periyod (s)	Kütle Katılımı (%)
Referans	1.179	80.4

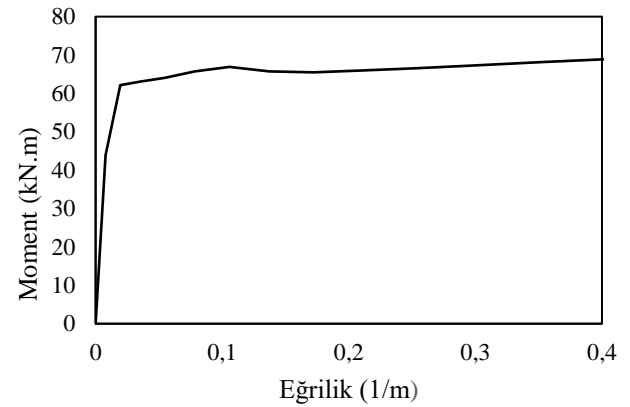
Yapılan tek modlu itme analizi sonucu elde edilen itme eğrisi TBDY 2018 Bölüm 5'te belirtilen ilgili dönüşümler uygulanarak modal kapasite diyagramına dönüştürülmüş ve talep yer değiştirme 0.29 m olarak belirlenmiştir (Şekil 5).

Talep yer değiştirme binaya uygulanması sonucunda taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan plastik dönme değerleri elde edilmiştir. Binanın performans düzeyini belirleyebilmek için yönetmelikte her bir performans düzeyi için verilen plastik dönme sınır değerlerine ihtiyaç duyulmuştur. Her performans düzeyinin plastik dönme sınır değerlerini elde etmek için tüm kesitlerin moment-

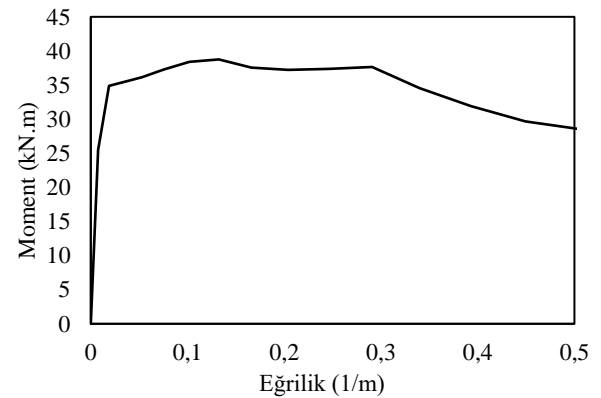
eğrilik değerleri gerekmektedir. Bu sebeple kolonlar ve kirişler için moment-eğrilik ilişkileri belirlenmiştir (Şekil 6,7).



Şekil 5. Referans binaya ait modal kapasite diyagramı



Şekil 6. Kolonlar için moment-eğrilik diyagramı



Şekil 7. Kirişler için moment-eğrilik diyagramı

Elemanlara ait akma ve göçme öncesi eğrilik değerlerinden faydalanarak kontrollü hasar (KH) ve göçmenin önlenmesi (GÖ) performans düzeyleri için yığılı plastik davranış modeline göre plastik dönmeler için izin verilen sınırlar TBDY 2018'e göre hesaplanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Hasar sınırlarına karşılık gelen plastik dönme açısı değerleri

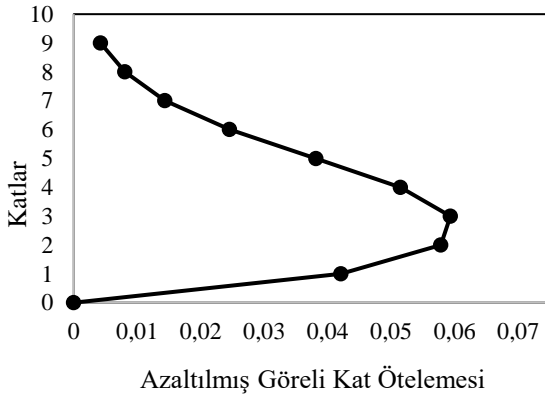
	Kontrollü Hasar (Θ_p , rad)	Göçme Öncesi (Θ_p , rad)
Kolon	0.0439	0.0586
Kiriş	0.0483	0.0644

Hedef yer değiştirme uygulanarak yapılan itme analizi sonucunda bazı kirişlerin uçlarında plastik mafsallar meydana gelmiştir. Plastik mafsalların dönme değerleri incelendiğinde KH performans düzeyi sınır değerlerini sağladığı belirlenmiştir. Kirişlerde meydana gelen en yüksek 3 mafsal dönme değeri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. İtme analizi sonucu kirişlerde oluşan plastik dönme açısı değerleri

	Mafsal Dönme Açısı (Rad)	Kontrollü Hasar (Θ_p , rad)	Durum
Kiriş 1	0.023	0.0483	Sağlıyor
Kiriş 2	0.022	0.0483	Sağlıyor
Kiriş 3	0.018	0.0483	Sağlıyor

Tasarlanan binanın performans değerlendirmesinin yanı sıra görel kat ötelemeleri ve ikinci merteye etkilerinin yönetmelikte belirtilen sınırları sağlayıp sağlamadığı da kontrol edilmiştir. İlk olarak azaltılmış görel kat ötelemeleri hesaplanmış (Şekil 8) ve buradan etkin görel kat ötelemesi değerleri elde edilerek TBDY 2018'de verilen koşulu sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir.

**Şekil 8.** Referans binanın azaltılmış görel kat ötelemesi değerleri

Yapılan kontrolde ilk 7 katta oluşan etkin görel kat ötelemesi değerlerinin yönetmelikte verilen 0.008 olan en üst sınır koşul değerini sağlamadığı belirlenmiştir (Tablo 4).

Görel kat ötelemesi kontrolünün ardından yönetmelikte belirtildiği şekilde II. merteye gösterge değeri verilen sınır değer ile karşılaştırılmış ve II. merteye etkilerinin göz önüne alınıp alınmaması gerekliliği belirlenmiştir. II. merteye etkilerinin sınır değeri Denklem 7'ye göre hesaplanmıştır. Denklemden dayanım fazlalığı katsayısı (D) C_h katsayısı 0.5, taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) 8 olarak alınmış ve sınır değer 0.09 olarak belirlenmiştir. Yapılan hesaplar sonucunda

1. kat hariç tüm katlarda II. merteye etkileri 0.09 sınır değerini aşmaktadır (Tablo 5). Bu sebeple yapılan hesaplamalarda II. merteye etkileri göz önüne alınmıştır.

Tablo 4. Referans bina görel kat ötelemelerinin kontrolü

Kat	Δ_i	δ_i	$\lambda \frac{\delta_i}{h_i}$	Sınır koşulu (0.008)
1	0.042	0.336	0.040	Sağlamıyor
2	0.058	0.463	0.055	Sağlamıyor
3	0.059	0.475	0.057	Sağlamıyor
4	0.051	0.412	0.049	Sağlamıyor
5	0.038	0.305	0.036	Sağlamıyor
6	0.025	0.196	0.023	Sağlamıyor
7	0.014	0.115	0.014	Sağlamıyor
8	0.008	0.065	0.008	Sağlıyor
9	0.004	0.034	0.004	Sağlıyor

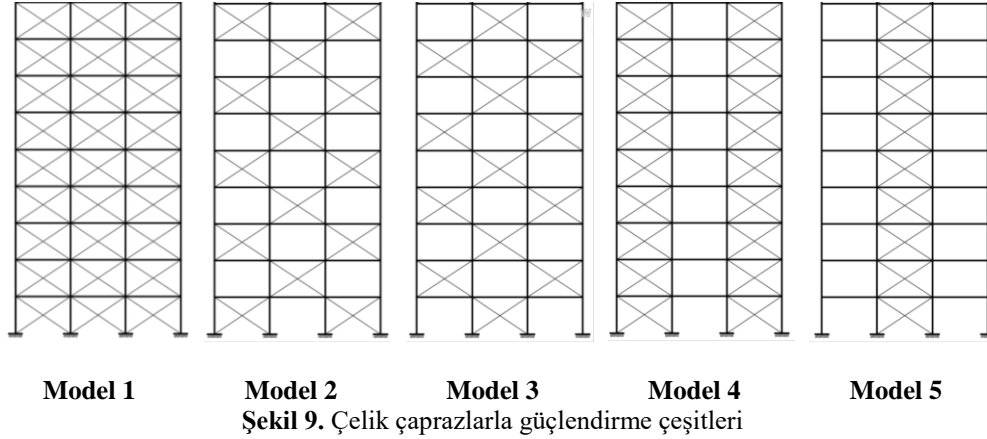
Tablo 5. Referans bina ikinci merteye etkilerinin kontrolü

Kat	Θ_{II}	$0.12 \frac{D}{C_h R}$	Durum
1	0.064	0.09	Sağlıyor
2	0.142	0.09	Sağlamıyor
3	0.226	0.09	Sağlamıyor
4	0.300	0.09	Sağlamıyor
5	0.362	0.09	Sağlamıyor
6	0.401	0.09	Sağlamıyor
7	0.429	0.09	Sağlamıyor
8	0.475	0.09	Sağlamıyor
9	0.509	0.09	Sağlamıyor

Elde edilen sonuçlar neticesinde görel kat ötelemesi değerlerinin sınırlandırılması gerektiği belirlenmiştir.

3.3. Betonarme çerçevenin güçlendirilmesi

Görel kat ötelemelerini sınırlandırmak amacıyla tasarlanan betonarme çerçeve bina çelik merkezi X çaprazlarla güçlendirilmiştir. Merkezi X çaprazlarda içi boş dairesel kesitli, S235 özellikli çelik kullanılmıştır. Çelik çaprazların analitik modellemesinde çaprazın iki ucuna atanan M3 mafsalları ile doğrusal olmayan davranış tanımlanmıştır. Güçlendirmede kullanılan çaprazın kesit özellikleri Şekil 3'te görsel olarak belirtilmiştir. Çelik çaprazların betonarme bina güçlendirmesinde çok farklı şekil ve sayıda kullanımı mümkündür. Ancak en uygun şekilde kullanmak dayanım ve maliyet açısından önem arz etmektedir. Çalışmanın bu aşamasından sonra güçlendirmede en uygun çelik çapraz kullanımını belirleyebilmek amacıyla 5 farklı güçlendirme şekli denenmiştir (Şekil 9). Güçlendirilmemiş binanın sonuçları referans alınarak Tek Modlu İtme Analizi sonucu elde edilen statik itme eğrileri ve görel kat ötelemesi değerleri dikkate alınarak modeller karşılaştırılmıştır.



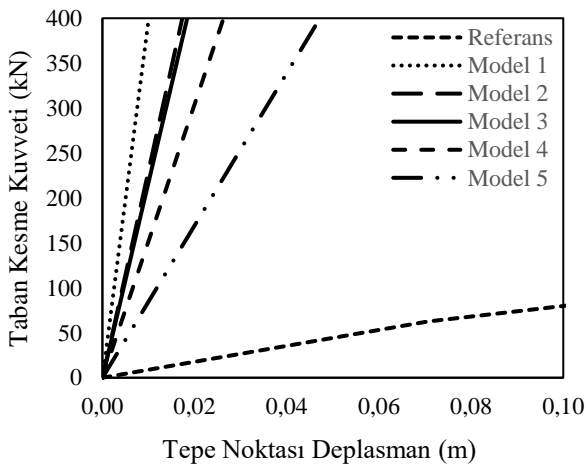
Şekil 9. Çelik çaprazlarla güçlendirme çeşitleri

3.4. Elde Edilen Bulgular

En uygun çapraz kullanımını belirlemek amacıyla Sap2000 bilgisayar paket programı kullanılarak tüm güçlendirme çeşitlerinin nümerik modelleri oluşturulmuştur. Modal analiz ve doğrusal olmayan statik itme analizi yapılmıştır. Modal analiz sonucunda tek modlu itme analizinin kullanılabilceği sonucuna varılmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. Tüm modellerin modal analiz sonuçları

Model	Çapraz sayısı	Periyod (s)	Kütle Katılımı (%)
Referans	-	1.319	80.4
Model 1	27	0.192	76.1
Model 2	14	0.251	78.8
Model 3	13	0.256	80.8
Model 4	18	0.298	71.2
Model 5	9	0.394	72.4



Şekil 10. Tüm modellerin statik itme eğrileri

İtme analizi sonucunda tüm modeller için statik itme eğrileri elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Şekil 10). Statik itme eğrileri karşılaştırıldığında güçlendirme işlemi doğru yapılırsa yapının kapasitesinin oldukça arttığı görülmektedir. İtme analizi sonucunda elde edilen statik itme eğrileri kullanılarak elde edilen kapasite diyagramları ve talep spektrumu çakıştırılarak tüm modellerin tepe yer değiştirme istemleri elde edilmiştir (Tablo 7).

Tablo 7. Modellerin yer değiştirme talepleri

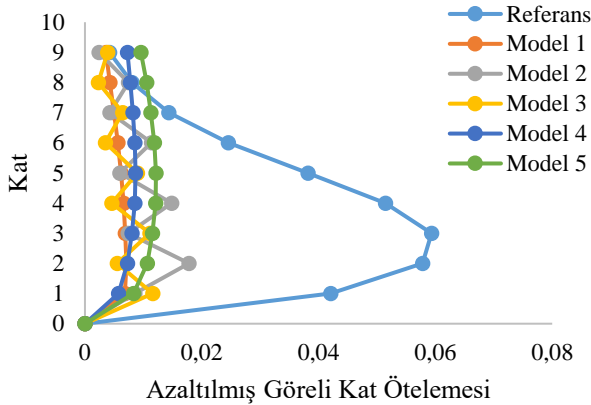
Model	Yer değiştirme Talebi (m)
Referans	0.290
Model 1	0.052
Model 2	0.080
Model 3	0.070
Model 4	0.070
Model 5	0.098

Yer değiştirme talepleri modellere uygulanarak statik itme analizi yapılmış ve modellerin plastik mafsal dönme değerleri elde edilmiştir. İtme analizi sonucunda Model 1'de mafsal oluşmamış diğer modellerde ise tüm mafsallar giriş uçlarında meydana gelmiştir. Tüm modellerin plastik dönme açısı değerleri KH performans sınır değeri ile kıyaslandığında modellerin bu performans düzeyini sağladığı belirlenmiştir. Modellerde meydana gelen en yüksek dönme açısı değerleri Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. İtme analizi sonucu modellerde oluşan plastik dönme açısı değerleri

Model	Mafsal Dönme Açısı (Rad)	Kontrollü Hasar (Θ _p , rad)	Durum
Model 1	-	0.0483	Sağlıyor
Model 2	0.0028	0.0483	Sağlıyor
Model 3	0.0018	0.0483	Sağlıyor
Model 4	0.0028	0.0483	Sağlıyor
Model 5	0.0034	0.0483	Sağlıyor

Güçlendirme yapmadaki asıl amaç görel kat ötelemelerinin sınırlandırılması olduğu için bundan sonraki aşamada görel kat ötelemesi değerleri incelenmiştir. Tüm modellerin azaltılmış görel kat ötelemeleri hesap edilmiş (Şekil 11) ve bu değerlerden faydalanarak maksimum etkin görel kat ötelemesi değerleri elde edilmiştir (Tablo 9). Yönetmelikte maksimum etkin görel kat ötelemeleri 0.008 değeri ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 11. Tüm modellerin azaltılmış görel kat ötelemesi değerleri

Tablo 9. Tüm modellerin etkin görel kat ötelemesi değerleri

Kat	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
1	0.0063	0.0071	0.0097	0.0048	0.0069
2	0.0065	0.0148	0.0046	0.0061	0.0089
3	0.0064	0.0062	0.0093	0.0067	0.0096
4	0.0061	0.0124	0.0038	0.0071	0.0101
5	0.0057	0.0049	0.0075	0.0072	0.0102
6	0.0052	0.0095	0.0029	0.0071	0.0099
7	0.0046	0.0035	0.0054	0.0068	0.0094
8	0.0039	0.0062	0.0018	0.0065	0.0088
9	0.0034	0.0020	0.0032	0.0060	0.0079

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada betonarme çerçeve bir bina merkezi X çelik çaprazlarla en uygun şekilde nasıl güçlendirilebilir sorusunun cevabı aranmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında TBDY 2018'in minimum kesit ve donatı özellikleri kullanılarak tasarlanmış 9 katlı çerçevenin tasarım depremi etkisi altında güçlendirmeye ihtiyaç olup olmadığı irdelenmiştir. Bu aşamada tek modlu itme analizinden faydalanarak performans analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan performans analizi sonucunda taşıyıcı elemanlarda meydana gelen plastik dönme açısı değerlerinin yönetmelikte verilen sınırları aşmadığı belirlenmiştir. Performans analizi ardından etkin görel kat ötelemesi değerleri irdelenmiştir. Yapılan irdelemede 1. kat hariç tüm

katlarda yönetmelikte verilen sınır değerini aştığı belirlenmiştir. Çalışmada bundan sonraki asıl amaç görel kat ötelemesi değerlerinin sınırlandırılması olmuştur. Görel kat ötelemelerinin sınırlandırılması için farklı sayıda ve farklı yerleşimlerde çelik çaprazlar ile güçlendirme denenmiştir.

Karar aşamasında modal analiz sonuçları ve etkin görel kat ötelemesi sonuçları dikkate alınmıştır. İlk karşılaştırma modal analiz sonuçları üzerinden yapılacak olursa referans binanın periyod değerinin en yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur (Tablo 6). Diğer değerlendirmelerde çapraz sayısı fazla olanların periyod değerlerinin az olanlardan düşük olması beklenirken Model 4 bu beklentiyi değiştirmektedir. Model 2 ve Model 3'ten daha fazla çapraz sayısı olmasına rağmen periyod değeri ikisinden de daha yüksektir. Model 2 ve 3'te çaprazlar dağılımdan kaynaklı olarak yapıdaki tüm elemanların rijitliğine katkı sağlamaktadır. Model 4'te ise çaprazlar perde eleman gibi davranmaktadır. Orta açıklıktaki kirişler ise bağ kiriş olarak çalışmaktadır. Elde edilen bu sonuca istinaden çapraz dağılımının bina rijitliğini önemli ölçüde değiştirdiği sonucuna varılmıştır.

İkinci karşılaştırma ise görel kat ötelemeleri sonuçları üzerinden yapılmıştır. Görel kat ötelemesi değerleri incelendiğinde (Şekil 11) güçlendirme sonucu görel kat ötelemesi değerlerinin tüm modellerde azaldığı belirlenmiştir. Çapraz dağılımı her katta aynı oranda olmayan modellerde (Model 2 ve Model 3) katlar arası görel kat ötelemesi değerleri katın rijitlik oranında artıp azalmaktadır. Maksimum etkin görel kat ötelemesi değerleri incelendiğinde ise (Tablo 9) TBDY 2018'de verilen 0.008 sınır koşulunun sadece Model 1 ve Model 4'te sağlandığı sonucuna varılmıştır. Model 1 tüm kat ve açıklıklarda çapraz bulunan oldukça rijit bir model, Model 2 ise düşeyde süreklilik sağlayacak şekilde yerleştirilmiş her katta 2 adet çapraz bulunan, rijitliği Model 1'e göre daha az olan modeldir. İki çapraz kullanımında da yönetmelikte verilen koşullar sağlandığından dolayı ekonomik parametreler de göz önünde bulundurulduğunda Model 4'ün güçlendirme çalışmalarında kullanımının daha uygun olduğu belirlenmiştir. Çalışmadan çıkartılabilecek diğer bir sonuç ise yapılan güçlendirmenin katlar arası rijitlik farklılığı oluşturmayacak şekilde, düşey doğrultuda süreksizlik olmayacak şekilde yapılmasının gerekliliğidir.

5.KAYNAKLAR

- [1] A. R. Rahai and M. M. Alinia, "Performance Evaluation and Strengthening of Concrete Structures with Composite Bracing Members," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 10, pp. 2100–2110, 2008.
- [2] H. Kasap, N. Mert, E. Sevim, and B. Şeber, "Perdeli-Çerçevesiz Taşıyıcı Sistemli Binalarda Taşıyıcı Sistem Seçiminin Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi," *Acad. Platf. J. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 48–55, 2015.
- [3] F. Piroğlu and E. Uzgüder, "Mevcut Betonarme Yapıların Çelik Malzeme ile Güçlendirilme Yöntemleri,"

Türkiye Mühendislik Haberleri, vol. 436, pp. 37–46, Feb-2005.

[4] Z. Celep and N. Kumbasar, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, 7th ed. Beta, 2004.

[5] F. Nateghi-A, “Seismic Strengthening of Eightstorey RC Apartment Building Using Steel Braces,” Eng. Struct., vol. 17, no. 6, pp. 455–461, 1995.

[6] B. M. Badoux and J. O. Jirsa, “Steel bracing of RC frames for seismic retrofitting,” J. Struct. Eng., vol. 116, no. 1, pp. 55–74, 1990.

[7] A. E. Özel, “Assessing Effects of Type and Distribution of Eccentric Steel Braces on Seismic Vulnerability of Mid-Rise Reinforced Concrete Buildings,” University of Gaziantep Graduate School of Natural & Applied Sciences, 2010.

[8] A. Rahimi and M. R. Maheri, “The effects of retrofitting RC frames by X-bracing on the seismic performance of columns,” Eng. Struct., vol. 173, no. July, pp. 813–830, 2018.

[9] Z. Yaman and E. Ağcakoca, “Dairesel Kesite Sahip Merkezi Çelik Çaprazların Performans Analizi,” Sak. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 22, no. 2, pp. 340–349, 2018.

[10] G. İnce, H. Tekeli, H. H. İnce, C. Öcal, K. Mercan, and H. Ulutaş, “Betonarme Çerçevelerin Düşey Bağ Kirişli Dışmerkez Çaprazlarla Güçlendirilmesi,” in International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015) Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu, 2015, no. May.

[11] H. Çatalkaya, “Çok Katlı Bir Çelik Yapıda Değişik Çapraz Düzenlemelerinin Yapının Depremdeki Davranışına Etkilerinin İncelenmesi,” Fen Bilimleri Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2004.

[12] B. Yön and S. E., “Betonarme Perdeler ve Çelik Çaprazlarla Yapılan Güçlendirmelerin Karşılaştırılması,” in 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 2011, pp. 237–242.

[13] B. T. D. Bush, E. A. Jones, and J. O. Jirsa, “Behavior of RC Frame Strengthened Using Structural Steel Bracing,” J. Struct. Eng., vol. 117, no. 4, pp. 1115–1126, 1991.

[14] M. R. Maheri and A. Sahebi, “Use of Steel Bracing

in Reinforced Concrete Frames,” Eng. Struct., vol. 19, no. 12, pp. 1018–1024, 1997.

[15] M. TahamouliRoudsari, A. Entezari, M. H. Hadidi, and O. Gandomian, “Experimental Assessment of Retrofitted RC Frames With Different Steel Braces,” Structures, vol. 11, no. June, pp. 206–217, 2017.

[16] K. A. Korkmaz, “Çelik Çapraz Elemanlarla Güçlendirilen Betonarme Yapıların Deprem Davranışlarının İncelenmesi,” Doğu Üniversitesi Derg., vol. 8, no. 2, pp. 191–201, 2007.

[17] E. Aydın, “Yapıların Deprem Davranışlarının İyileştirilmesi İçin Sönümleyicilerin ve Çelik Çapraz Elemanların Optimum Yerleşimi,” İstanbul Teknik Üniversitesi, 2005.

[18] M. R. Maheri and S. Yazdani, “Design of Steel Brace Connection to an RC Frame Using Uniform Force Method,” J. Constr. Steel Res., vol. 116, pp. 131–140, 2016.

[19] AFAD, TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 2018.

[20] B. V. Fell, A. M. Kanvinde, A. M. Asce, G. G. Deierlein, F. Asce, and A. T. Myers, “Experimental Investigation of Inelastic Cyclic Buckling and Fracture of Steel Braces,” J. Struct. Eng., vol. 135, no. 1, pp. 19–32, 2008.

[21] AISC 341-10 (2010) Seismic Provisions for Steel Structural Buildings, American Institute of Steel Construction. Chicago, IL.

[22] M. Taghipour, “Seismic Analysis (Non-linear Static Analysis (Pushover) and Nonlinear Dynamic) on Cable - Stayed Bridge,” Am. J. Civ. Eng., vol. 3, no. 5, p. 129, 2016.

[23] C. Yılmaz, “Statik İtme Analiziyle Mevcut Bir Betonarme Yapının Performans Değerlendirmesi,” İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.

[24] L. Balik, “Mevcut Binaların Deprem Performanslarının 2007 Ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Değerlendirilmesi,” Pamukkale Üniversitesi, 2019.

[25] I. Dalyan, B. Sahin, and E. C. Section-stiffness, “Evaluation of The Structural System Performance of an Existing Reinforced Concrete Building Under Earthquake Loads According to the 2007 and 2018 Turkish Earthquake Codes,” vol. 1, no. December, pp. 134–147, 2019.

[26] TSE, TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. 2000.

[27] Computers and Structures INC, “SAP2000.” .