Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 26(6), 1086-1097, 2020

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Düşey yük taşıyıcı sistemlerin süneklik düzeyi yüksek çelik moment aktaran çerçevelerin göçme performansına etkisi

Impact of gravity frames on collapse performance of special steel moment frames

Onur ŞEKER[1*]

[1]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
oseker@gtu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 04.06.2019 Düzeltme Tarihi/Revision: 08.11.2019 doi: 10.5505/pajes.2019.34032
Kabul Tarihi/Accepted: 04.12.2019 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yapıların performans değerlendirmesinin yanı sıra taşıyıcı sistem davranış katsayısı ve elastik olmayan deplasman arttırma katsayısı gibi önem taşıyan tasarım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan olasılıksal göçme analizi prosedürü, P-695, düşey yük taşıyıcı sistemlerin yatay dayanım ve rijitliğe katkısını göz önünde bulundurmamaktadır. Basit birleşimli çelik kiriş-kolon birleşimlerinin, kiriş rijitliğinin ve dayanımın, sırasıyla, %25 ve %40'ını aktarabileceği düşünüldüğünde, bu kapasite rezervinin yapıların doğrusal olmayan davranışında göz önüne alınmaması, yapıların değerlendirilmesinde eksikliklere yol açabilmektedir. Bu çalışmanın amacı; düşey yük taşıyıcı sistemlerin, çelik yapıların deprem performansına olan etkisini sayısal yöntemlerle sistematik olarak incelemektir. Bu amaçla, iki farklı 6 katlı çelik çerçeve, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlere tabi tutularak, elde edilen sonuçlar P-695 olasılıksal göçme analizi yöntemiyle karşılaştırıldı. Yapılan değerlendirme, düşey yük taşıyıcı sistem etkisinin seçilen orta yükseklikteki yapının göçme performans değerlendirmesinde önemli fark yarattığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Çelik moment aktaran çerçeve, Düşey yük taşıyıcı sistem, Deprem performansı, Dinamik itme analizi, FEMA P-695.

Abstract

Probabilistic collapse analysis procedure, P-695, which is a methodology used for the determination of seismic design parameters such as response modification factors and deflection amplification factors along with seismic performance evaluation of structural systems, does not consider the contribution of gravity-load-carrying system to the lateral stiffness and strength. Considering the fact that shear connections are capable of transferring 25% and 40% of the beam's stiffness and strength, respectively, ignoring the impact of this extra capacity on the non-linear behavior might lead to inaccurate seismic evaluation of structures. This study aims to investigate the impact of gravity frames on the seismic performance of steel structures through numerical methods. For this purpose, incremental dynamic analyses are carried on two different frames and the results are compared using probabilistic collapse analysis methodology, P-695. The assessment conducted herein pointed out that the gravity frame played a critical role in the collapse performance of the selected mid-rise structure.

Keywords: Steel moment frame, Gravity frame, Seismic performance, Incremental dynamic analysis, FEMA P-695.

1 Giriş

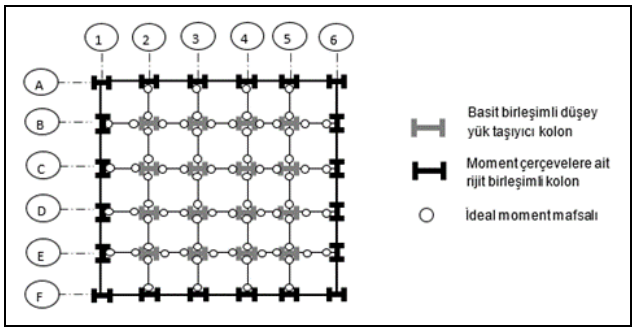
Kapasiteye dayalı tasarım, depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesinin hedeflerine ulaşılabilmesi için geliştirilmiş etkili bir yöntemdir. Bu ilke, azaltılmış deprem yüklerine göre tasarlanmış, dolayısıyla kuvvetli yer hareketlerine maruz kalması halinde doğrusal olmayan davranış göstermesi öngörülen yapıların, hasar dağılımlarının tasarımcı tarafından kontrol edilmesini ve hasarın yapının göçmesine sebep olmayacak "sismik sigorta" elemanlarla sınırlı kalmasını amaçlamaktadır. Bilindiği gibi, her bir yatay yük taşıyıcı sistem (moment aktaran çerçeveler, merkezi veya eksantrik çaprazlı çerçeveler vb.) için deprem yükü azaltma katsayısı (R katsayısı) ve arzu edilen enerji tüketme mekanizması (sigorta eleman) farklılık göstermektedir.

Moment aktaran çerçevelerde yapıya giren sismik enerjinin büyük bölümünün kiriş uçlarında oluşması beklenen plastik mafsallardan sağlanan histeretik enerjiyle tüketilmesi arzu edilmektedir. Böylelikle, kolonlardaki doğrusal olmayan deformasyonlar sınırlandırılarak, yapının stabilitesi korunacak ve tasarım esnasında azaltılan deprem yüklerinden kaynaklanan dayanım farkı, kiriş uçlarından sağlanan dönme sünekliğiyle telafi edilebilecektir. Başka bir deyişle, geleneksel yapı tasarımı dayanım esaslı olsa da, uygun detaylandırma ve kapasiteye dayalı tasarım ilkeleri kullanılarak, doğrusal olmayan davranış gözönüne alınmakta ve yapıya etkitilen tasarım taban kesme kuvveti azaltıldığı nispetle sünekliği arttırılmaktadır. Bu çerçeveden bakıldığında, yapıların süneklik seviyesi, deprem enerjisinin büyük kısmını tüketmesi arzulanan "sigorta" elemanların tekrarlı çevrimsel yükler altındaki süneklik kapasiteleri ile doğrudan ilişkilendirilebilir.

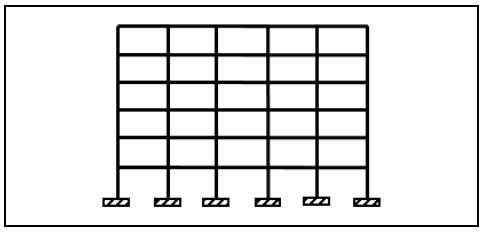
Yapı türü ne olursa olsun, temelde, iki farklı taşıyıcı sistemin varlığından bahsedilebilir. Bunlardan ilki, deprem ve rüzgâr yükleri gibi yatay yükleri taşımakla mükellef yatay yük taşıyıcı sistemlerdir. Diğeri ise, düşey yük taşıyıcı sistemler olarak adlandırılan ve yapısal elemanların zati ağırlıkları ve hareketli yüklerden oluşan düşey yükleri taşımakla mesul olan taşıyıcı sistemlerdir. Betonarme yapıların aksine, çelik yapılarda böyle bir ayrıma ihtiyaç duyulmasının başlıca sebebi, yatay yük taşıyıcı sistemlerdeki birleşimlerin, düşey yük taşıyıcı sistemlerdeki birleşimlere oranla işçilik maliyetinin çok daha yüksek olmasıdır. Bu nedenle, iç açıklıklardaki çerçeveler, geleneksel olarak sadece düşey yük taşıyacak şekilde tasarlanmaktadırlar. Bahsi geçen tasarım tekniğinin daha iyi

*Yazışılan yazar/Corresponding author

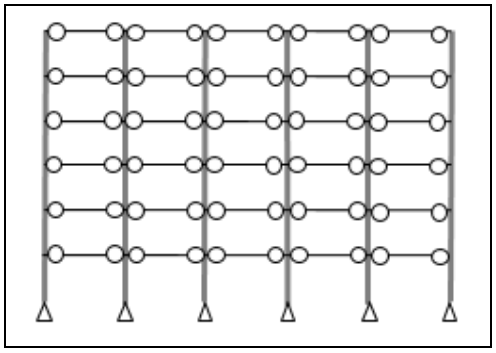
anlaşılması açısından, Şekil 1'de çevre uzunluğu boyunca moment aktaran çerçevelerle, iç açıklıklarda basit birleşimlerle teşkil edilmiş tipik bir çelik binanın planı ve düşey kesitleri görülmektedir. Burada, her bir deprem doğrultusu için birbirine paralel iki adet moment aktaran çerçeve yerleştirilmiş (Şekil 1b), geriye kalan iç akslardaki çerçeveler, yatayda labil ve sadece düşey yük taşıyacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 1c). Böylelikle, inşaat süresi kısalacak ve görece yüksek işçilik maliyetli moment aktaran birleşimlerin sayısı azaltılarak genel yapı maliyeti ciddi ölçüde azaltılabilecektir.



(a): Plan görünüşü.



(b): Rijit birleşimli yatay yük taşıyıcı sistemlere ait düsey kesit (1, 6, A ve F aksları).

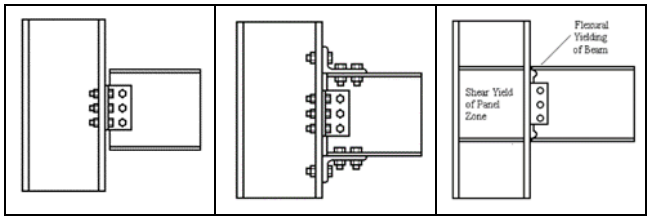


(c): Basit birleşimli düşey yük taşıyıcı sistemlere ait düşey kesit (B-E ve 2-5 aksları).

Şekil 1. Çevre uzunluğu boyunca moment aktaran çerçevelerle, iç açıklıklarda basit birleşimlerle teşkil edilmiş çerçevelerden oluşan tipik bir çelik binanın temsili.

Figure 1. Typical steel building with perimeter frame.

Bu bağlamda, çelik yapılarda kullanıldığı taşıyıcı sistemin özelliğine bağlı olarak iki farklı birleşim türünden bahsedilebilir; moment aktaran birleşimler (rijit ya da yarı rijit) ve kesme kuvveti aktaran birleşimler (mafsallı basit birleşimler). Şekil 2(b) ve (c)'de görülen rijit birleşimler, moment aktarma özellikleri sayesinde yapıya yatay rijitlik sağlayan, dolayısıyla yatay yük taşıyıcı sistemlerde (Şekil 1b) kullanılan birleşimlerdir. Yatay yük taşıma kapasitesi tasarımda ve matematik modellemede genellikle ihmal edilen, kesme kuvveti aktaran basit (mafsallı) birleşimler (Şekil 2a) ise, -planda- yapının iç açıklıklarında kullanılan ve döşemeden aktarılan düşey yükleri taşımak (Şekil 1c) amacıyla kullanılırlar. Unutulmamalıdır ki, Şekil 2(a)'da görülen birleşimler tasarım ve modelleme kolaylığı açısından ideal dönme serbestlikli moment mafsalı olarak idealleştirilse de, gerçekte bu birleşimlerin belirli oranda eğilme momenti aktardığı bilinmektedir [1],[2].



Şekil 2. Tipik. (a): Basit (mafsallı), (b): Yarı rijit ve (c): Tam rijit çelik kiriş-kolon birleşim tipleri [3].

Figure 2. (a): Shear (pin), (b): Semi-rigid and (c): Rigid steel beam-to-column connections.

Yapılan çalışmalarda, basit birleşimlerin, bağlı bulundukları kirişlerin rijitliğinin %25'ini ve pozitif yöndeki plastik moment kapasitelerinin %38'ini aktarma kabiliyetine sahip oldukları görülmüştür [1],[2]. Bu sebeple, göz ardı edilen bu kapasite rezervinin yapıya olan etkisindeki belirsizlik, tıpkı 1994 Northridge, Amerika depremi öncesinde çelik malzemedeki dayanım fazlalığının göz önüne alınmamasının yarattığı etkilere [3] benzer sonuçlar doğurabilir. Ancak, birkaç çalışma dışında [4]-[6], günümüze kadar yapılan analitik çalışmaların hemen hepsinde bu etki ihmal edilmiştir. Örneğin, Flores ve diğ. [4], düşey yük taşıyıcı sistem etkisini, 2, 4 ve 8 katlı moment aktaran çerçevelerin doğrusal olmayan davranışını değerlendirerek anlamaya çalışmışlardır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar [4], göçme olasılığının 2, 4 ve 8 katlı yapılar için, sırasıyla, %40, %33 ve %66 azaldığını göstermiştir. Flores ve diğ. (4), her ne kadar konunun araştırılmasına öncülük eden çalışmalardan biri olsa da, araştırmaya konu alan çerçevelerin statik itme analizi yöntemi ile değerlendirilmiş olması, elde edilen sonuçların doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleriyle de gözden geçirilmesini gerektirmiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla, Elkady ve Lignos [5], ATC-63'te [7] verilen farklı yüksekliklerdeki yapıları, düşey yük taşıyıcı sistem etkisini gözeterek tekrar modellemişlerdir. Yapılan dinamik analizler sonucu, çelik moment aktaran çerçevelerde düğüm noktalarında birleşen kolon/kiriş moment kapasitesi oranın göçme performansına ciddi etkisi olduğu görülmüştür. Benzer bir çalışmada, Zorlu ve diğ. [6], düşey taşıyıcı sistemlerdeki basit birleşimlerin moment aktarma kapasitesine, beton döşemenin katkısını dahil ederek ve etmeyerek, kompozit döşemenin dayanıma katkısının doğrusal olmayan davranışa etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, kompozit döşemenin dahil edilmesi halinde, sadece moment aktaran çerçeveden oluşan modele nispetle yatay dayanımın yaklaşık %15 arttığı, dahil edilmemesi halinde ise %7 arttığı gözlenmiştir [6].

Yapıların performans değerlendirmesinde yaygın kullanılan P-695 metodolojisi [7], yapıların göçme riski belirlenirken sadece yatay yük taşıyıcı sistemlerin göz önünde bulundurmasını yeterli olacağını açıkça belirtmiştir (Bk. FEMA P-695, Bölüm 1.2.4). Northridge depremi sırasında birçok moment aktaran çerçevenin birleşim bölgelerinde ciddi hasarlar görülmesine karşın hiçbir çelik binada göçme yaşanmamasının basit birleşimli düşey yük taşıyıcı sistemlerden sağlanan ikincil bir

dayanım rezervine bağlı olduğu düşünüldüğünde [8], çelik yapılarda düşey yük taşıyıcı sistemin yatay dayanım ve rijitliğe katkısının göz önüne alınmamasının doğrusal olmayan yapı davranışına muhtemel etkilerinden ilk akla gelenleri:

(1) Şüphesiz, yatay elastik rijitlik artışına bağlı olarak yapının dinamik özelliklerinin değişmesi,

(2) Yatay dayanımdaki artışa bağlı olarak sistemdeki dayanım fazlalığının beklenenin üzerinde çıkması,

(3) Yapı yüksekliği boyunca yatay deformasyonların dağılımının ve büyüklüğünün değişmesi,

(4) Deprem doğrultusunda birbirine simetrik, basit birleşimli çerçevelerdeki momentlerin yeniden dağılımı sebebiyle, büyük doğrusal olmayan deformasyonlara maruz kalınması durumunda, yapının burulma davranışının değişmesi olarak sıralanabilir.

Bu çalışmanın amacı; düşey yük taşıyıcı sistemlerin, yapıların deprem performansına olan etkisini sayısal yöntemlerle sistematik olarak incelemektir. Bu amaçla; güncel yönetmeliklere göre tasarlanmış 6 katlı bir çelik moment aktaran çerçevede oluşabilecek sismik taleplere, basit birleşimlerle teşkil edilmiş düşey yük taşıyıcı sistemlerin etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Düşey yük taşıyıcı sistemlerden gelen yatay rijitliğin/dayanımın, moment aktaran çerçevelerin davranışına olan etkileri, tasarım spektrumuna uyumlu olarak seçilmiş deprem kayıtları kullanılarak doğrusal olmayan zaman tanım alanında artımsal dinamik analiz yöntemi (dinamik itme analizi) ile analiz edilecek ve sonuçlar, ATC konsülü [7] tarafından geliştirilen P-695 olasılıksal göçme analizi yöntemi ile irdelenecektir. Böylece, kısmen de olsa, tekrarlı çevrimsel yükler altında histeretik davranışları ve kapasiteleri hakkında bilgiye sahip olduğumuz basit birleşimlerin, seçilen orta yükseklikteki yapının doğrusal olmayan dinamik davranışına ve göçme olasılığına olan etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmeye çalışılacaktır. Yapılan çalışma sonucunda, hem basit birleşimlerin doğrusal olmayan yapı davranışına etkisini yok sayan P-695 olasılıksal göçme analizinin etkinliği hem de sismik davranış, birbirine paralel olarak değerlendirilecektir.

1.1 P-695 olasılıksal göçme performansı değerlendirme yöntemi

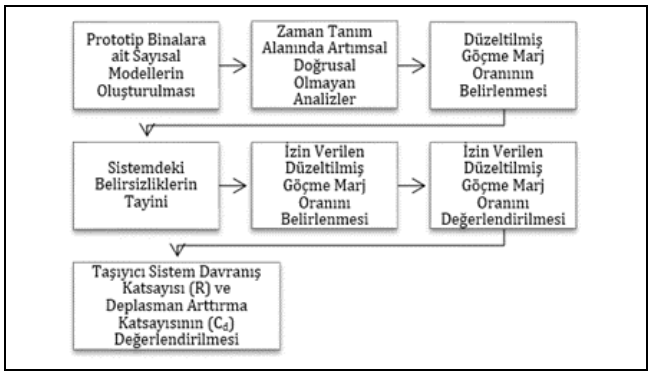
Her geçen gün daha da çok önem kazanan performansa göre tasarım ve değerlendirme yöntemlerinin son halkası olan P-695 yaklaşımı, yatay yük taşıyıcı sistemlerin tasarımı ve olasılıksal göçme riskinin değerlendirmesine esas teşkil etmek üzere geliştirilmiş, depreme göre tasarım değişkenlerini güvenilir şekilde belirlemeye amaçlayan bir yöntemdir [7]. Bu yöntemle, sayısal modellemede, tasarımda, yapısal elemanlara ait test sonuçlarında ve seçilen deprem kayıtlarındaki belirsizlikler de göz önüne alınarak, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yardımıyla, sistem performansı ve yapıya ait tasarım parametreleri (Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, R gibi [10]), göçme riski analizi ile değerlendirilebilmektedir. Başka bir deyişle, güncel sismik yönetmeliklere uyumu sayesinde bu yöntem, sismik yönetmeliklere göre tasarlanmış, onaylı yatay yük taşıyıcı sistemlerin tutarlı şekilde değerlendirilmesini ve elastik tasarımda kullanılacak değişkenlerin seçimi konusunda rehberlik sağlamayı hedeflemektedir [11].

Can güvenliği performans hedefi, bu yöntemde nicelleştirilerek, yapıların en büyük depreme (50 yılda aşılma olasılığı %2, dönüş periyodu 2475 yıl olan depremler) maruz kaldıklarında kabul edilebilir göçme olasılığına sahip olması olarak tanımlanmıştır. Statik itme analizi gibi birçok idealleştirme ve kısıt içeren analizlerin kullanıldığı yöntemlerin aksine, bu yöntemde, tasarım ve performans parametreleri dinamik itme analizi (zaman tanım alanında doğrusal olmayan artımsal dinamik analiz) yardımıyla olasılıksal olarak belirlenmektedir. Deformasyon kontrollü olarak uygulanan yatay statik yüklerin arttırılmasıyla elde edilen statik itme analizinden farklı olarak, dinamik itme analizinde, seçilen deprem ivme kaydına ait elastik tepki spekturumunda yapının doğal titreşim periyoduna karşılık gelen spektral ivmesi ($S_{ae}[T_1]$) arttırılarak, yapının göçme durumuna ulaşması sağlanır [7]. Medyan göçme olasılığı, seçilen ivme kayıtlarının %50'sinin analiz edilen prototip çerçevenin göçmesine sebebiyet vermesi olarak tanımlanmıştır [7]. Şayet, elde edilen göçme marjı ile belirlenen sınır değer arasında yeterince fark mevcutsa, ilgili yönetmeliklere dayanılarak başta seçilen tasarım parametrelerinin (R ve D katsayıları) can güvenliği performans hedefini karşılamaya kabil olduğu anlamına gelmektedir. Bu prosedür, zaman tanım alanında artımsal dinamik analizi yöntemi kullanılması ve deprem ivme kayıtlarının ölçeklendirilmesi bakımlarından benzer gözükse de, Vamvatsikos ve Cornell (2002) [12] tarafından önerilen yöntemden farklıdır [7]. Yöntemin ana bileşenleri, analiz yöntemi, deprem kayıtları, deney sonuçları, tasarım bilgisi ve son olarak bağımsız değerlendirmedir. P-695 prosedüründe izlenecek adımlar aşağıdaki gibidir:

1. Deney sonuçları, malzeme bilgisi ve tasarım yöntemleri gözetilerek çalışmaya esas alınacak prototip yapıların (çelik, betonarme veya ahşap moment aktaran çerçeveler) tanımlanması,
2. Prototip yapıların sayısal olarak modellenmesi,
3. Tasarıma uygun deprem ivme kayıtlarının seçilmesi,
4. Prototip yapıların zaman tanım alanında doğrusal olmayan artımsal analizi,
5. Sistem performansının değerlendirilmesi,
6. Eğer "göçme olasılığı" önceden belirlenen sınırın altındaysa,
7. Çalışmanın bağımsız hakemler tarafından gözden geçirilmesi ve basılması.

Altıncı adımda göçme riskinin belirtilen sınırın üzerinde çıkması halinde, çalışmanın durumu değerlendirilerek birinci veya ikinci adıma dönülmeli ve kalan adımlar tekrarlanmalıdır.

Benzer biçimde, Şekil 3'te sayısal modellerin oluşturulmasından itibaren değerlendirme süreçleri özetlenmiştir. Dinamik itme eğrilerinin elde edilmesinden sonra düzeltilmiş göçme marjının belirlenmesi için öncelikle elde edilen dinamik itme eğrileri kullanılarak kırılma eğrilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Sonrasında Şekil 3'te özetlenen adımlar takip edilerek prototip çerçevelerin düzeltilmiş göçme marjı ile izin verilen düzeltilmiş göçme marjı değerleri kıyaslanarak performans değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bahsi geçen değerlendirme yönteminin ne şekilde uygulanacağı ATC 63 (2009)'a uyumlu olarak bu çalışmanın dördüncü bölümünde detaylarıyla açıklanmıştır.



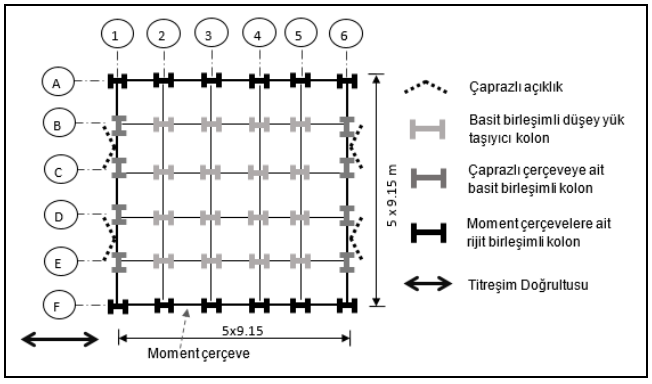
Şekil 3. Göçme performansının P-695 prosedürüne göre değerlendirilmesi.

Figure 3. P-695 procedure for collapse performance evaluation.

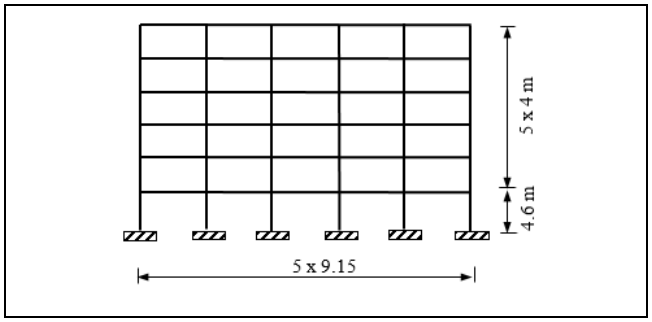
2 Bina özellikleri ve sayısal modeller

2.1 Bina özellikleri ve tasarım parametreleri

Çelik binalardaki düşey yük taşıyıcı çerçevelerin, yapıların olasılıksal göçme performansına olan etkisini değerlendirmek amacıyla, Şekil 4'te verilen tipik 6 katlı ofis binası seçilmiştir. Projede kullanılacak yapının kat kalıp planı, kolonların dizilimi ve oryantasyonu ile moment aktaran çerçevelerin düşey kesit görünüşü de yine Şekil 4(a) ve (b)'de gösterilmiştir.



(a): Çalışmaya esas alınacak çelik binaların tipik kat kalıp planı.



(b): A ve F akslarındaki momen aktaran çerçevelerin düşey kesiti.

Şekil 4. Çalışmada kullanılan binaların kat kalıp planları ve moment aktaran çerçevelerin düşey kesitleri.

Figure 4. Building plan and elevation of the studied frames.

Çelik yapı tasarımı pratiğine uygun olarak, çevre uzunluğu boyunca yerleştirilmiş moment aktaran çerçeveler ve çaprazlı çerçeveler, yatay taşıyıcı sistemi teşkil etmekte; iç açıklıklardaki çerçeveler ise düşey yük taşıyıcı sistemi oluşturmaktadır. Kare şeklinde plana sahip bina, birbirine dik deprem doğrultularında 9.15 m genişliğinde beşer açıklıktan oluşmuş, toplamda yaklaşık 45 m x 45 m'lik ölçülere sahiptir (Şekil 4a). Yatay yükler bir doğrultuda çaprazlı, diğer doğrultuda moment aktaran çerçeveler tarafından karşılanacak şekilde düzenlenmiştir. Çalışmaya konu olacak A ve F akslarındaki özdeş moment aktaran çerçeveleri ilgilendiren deprem titreşim doğrultusu ve çerçevelerin düşey kesiti Şekil 4 üzerinde belirtilmiştir.

Yapının tasarımı, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (2016) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de verilen tasarım şartlarına uygun şekilde gerçekleştirildi [9],[10]. Çalışmaya konu olan 6 katlı binanın (Şekil 4) tasarımında kullanılan ölü ve hareketli yükler, sırasıyla, 4.60 kN/m^2 ve 2.40 kN/m^2 olarak hesaplandı. Sismik tasarım parametreleri ise Tablo 1'de verilmiştir. Tasarımda kullanılan sismik tasarım parametreleri, İstanbul'un merkezinde, yüksek depremselliğe ve ZD sınıfı zemine sahip bir bölge kabul edilerek seçilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY 2018) [10] verilen yaklaşık periyot formülü (T_{pA}=0.932 sn.) kullanılarak hesaplanan tasarım taban kesme kuvveti, toplam bina ağırlığının 13.4% olarak elde edildi ve binaya etkiyen toplam taban kesme kuvveti, 7554 kN, katlara eşdeğer statik yük olarak paylaştırıldı. A ve F akslarındaki özdeş moment aktaran çerçeveler için seçilen kolon ve kiriş kesitleri Tablo 2'de verilmiştir. Tüm kolon ve kiriş kesitleri, TBDY (2018)'de belirtilen yüksek sünek kesit şartlarını daha ekonomik olarak sağlamaları sebebiyle, geniş başlıklı W profiller arasından seçilmiştir.

Tablo 1. Sismik tasarım parametreleri.

Table 1. Seismic design parameters.

Sismik Tasarım Parametresi	Kullanılan Değer
S_S	2.00g
S_1	1.00g
F_s	1.00
F_1	1.50
S_{DS}	1.33g
S_{D1}	1.00g
R	8

Tablo 2. Seçilen kolon ve kiriş kesitleri.

Table 2. Selected shapes for columns and girders.

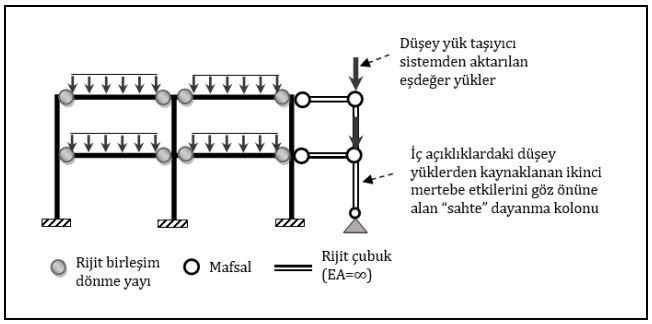
Kat	Dış Kolon*	İç Kolon**	Kiriş
6	W14x257	W14x342	W24x55
5	W14x257	W14x342	W27x102
4	W14x257	W14x342	W33x130
3	W14x342	W14x455	W33x152
2	W14x342	W14x455	W33x169
1	W14x426	W14x550	W33x169

*: 1 ve 6 akslarındaki kolonlar. **: 2-5 akslarındaki kolonlar.

2.2 Sayısal modelleme

Doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde kullanılan sayısal modeller yapısal analiz programı SAP2000 v.19 [13] kullanılarak oluşturulmuştur. Sayısal modelleme bakımından göz önüne alınan iki farklı modelden ilki Şekil 5'te

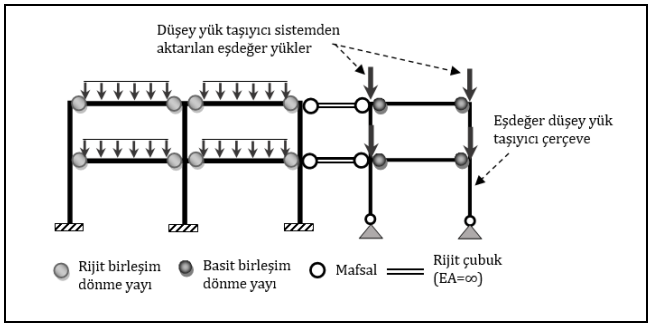
görülmektedir. Bu geleneksel modelde, deprem doğrultusunda sadece yatay yük taşıyıcı sistemlerin (moment aktaran çerçeveler) etkisi sayısal modellere dahil edilip, iç açıklıklardaki dayanım ve rijitlik göz önüne alınmamıştır. Bu model, P-695 prosedürü ve tasarımda kullanılan modellerle uyumlu klasik sayısal model olarak nitelendirilebilir. Şekil 5'te görüldüğü gibi iç açıklıklardaki düşey yüklerin yaratacağı ikinci mertebe etkileri göz önüne almak için modele dahil edilen iki ucu mafsallı rijit elemanlardan oluşan "sahte" dayanma kolonunun yatay rijitliğe veya dayanıma katkısı yoktur.



Şekil 5. Sadece yatay yük taşıyıcı sistemi göz önüne alan "klasik" sayısal model.

Figure 5. Conventional numerical model of the moment frame with dummy leaning columns.

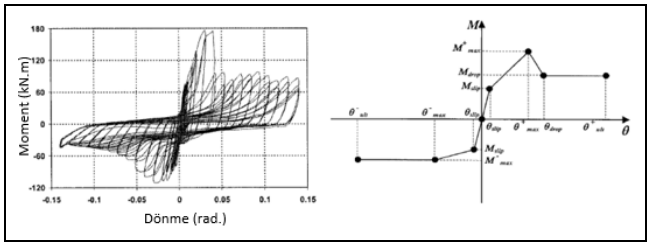
Bahsi geçen klasik (sadece moment aktaran çerçeveden oluşan model) sayısal modelle karşılaştırılmak üzere oluşturulan ikinci sayısal modelde, düşey yük taşıyıcı sistemin yatay rijitlik ve dayanımının, sırasıyla, eşdeğer çerçevelerde çubuk elemanlar ve doğrusal olmayan dönme yaylarıyla temsil edildiği sayısal model oluşturulmuştur. Şekil 6'da detaylandırıldığı gibi, bu modelde eşdeğer çerçeve, döşemeden kaynaklanan rijit diyafram etkisi gözetilerek normal doğrultuda sonsuz rijitlikteki linklerle ana çerçevelere bağlanmak suretiyle sayısal modele dahil edilmiştir. Başka bir deyişle, ilk sayısal model sadece moment aktaran çerçeveyi göz önünde bulundururken, ikinci sayısal model, hem moment aktaran çerçeve hem de düşey yük taşıyıcı sistem etkisini gözetmektedir.



Şekil 6. Yatay ve düşey yük taşıyıcı sistemleri göz önüne alan sayısal model.

Figure 6. Numerical model of the moment frame with gravity-only columns.

Basit kolon-kiriş birleşimlerinin davranışı hakkında yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. 1994 Northridge depremi sonrası hasar durumu bilinen bir yapının analiz edilmesi [8], Lui ve Astaneh-Asl (2000, 2004)'ı basit birleşimlerin moment-dönme ilişkisini deneysel olarak test etmeye yönlendirmiştir. Çalışmada; iki seri halinde, toplam 16 adet, tam ölçekli, basit birleşimli numune test edilmiştir. İlk seride, o günün pratiğine uygun şekilde tasarlanmış ve imal edilmiş numuneleri kapsamaktadır. İkinci seride ise, ilk seride elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sonucu çeşitli değişiklikler yapılmış numuneler yer almıştır. Çalışmada ayrıca, kompozit döşeme etkisinin görülebilmesi için kompozit döşemeli ve döşemesiz numunelerin davranışları da karşılaştırılmıştır. İlaveten, kirişleri kolonlara bağlayan gövde levhasındaki bulon sayısı, döşeme betonunun türü, döşemede kullanılan ekstra donatı, kolon gövdesindeki beton döşeme oyukları, gövde levhası detayı ve kalınlığı gibi parametrelerin moment-dönme ilişkisine etkisi incelenmiştir. Şekil 7'de kompozit döşemeli bir düğüm noktası birleşimine ait moment-dönme ilişkisi ve numunelerden elde edilen asimetrik moment-dönme ilişkisinin zarfı görülmektedir [1],[2]. Bu iki çalışmanın [1],[2]; nümerik çalışmalarda basit birleşimlerin yatay rijitlik veya dayanıma katkısı, moment-dönme ilişkisinin nasıl tanımlanması gerektiği gibi konularda kılavuzluk etmesi bakımından mihenk taşı niteliğinde olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Basit birleşimli kompozit iç düğüm noktası kolon-kiriş birleşimine ait histeretik davranış (solda) ve histeretik davranışın zarfı (sağda) [2].

Figure 7. Hysteresis of an interior composite joint (left) and envelope of the hysteretic behavior (right) [2].

Düşey yük taşıyıcı sistemin uygun şekilde nümerik modele entegre edilebilmesi için, öncelikle, çaprazlı ve iç açıklıklardaki kolonlar ile düşey yük taşıyıcı sisteme dahil edilen iç açıklıklardaki kirişlerin tasarımı yapılmıştır. Tablo 3'de verilen yatay taşıyıcı sisteme dahil olmayan kolon ve kiriş kesitleri, her bir kat seviyesi için ayrı ayrı gösterilmiştir.

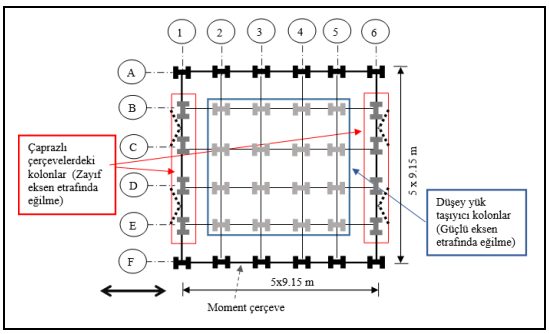
Tablo 3. Düşey yük taşıyıcı sistem için seçilen kesitler.

Table 3. Selected member sizes for gravity frames.

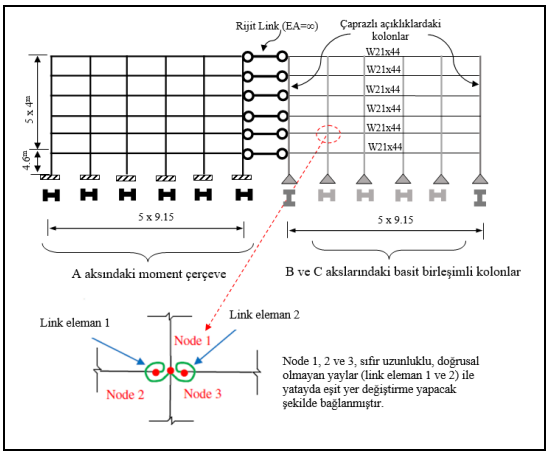
Kat	Çaprazlı Kolonlar	Düşey Yük Taşıyıcı Kolonlar	Düşey Yük Taşıyıcı Kirişler
6	W14x53	W12x50	W21x44
5	W14x53	W12x50	
4	W14x132	W12x50	
3	W14x132	W12x72	
2	W14x233	W12x72	
1	W14x233	W12x87	

Çaprazlı çerçeve kolonları ile düşey yük taşıyıcı kolonların yerleşimi (Şekil 8a) farklı olduğundan, modellemede bu kolon kesitleri, Şekil 8(b)'de gösterildiği biçimde dış kolonların zayıf ekseni, iç kolonların ise güçlü eksenleri çalışacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Buna ek olarak, Şekil 8(b)'de verilen temsili sayısal modelde, düşey yük taşıyıcı sisteme ait kolonların ve kirişlerin eğilme ve eksenel rijitlikleri iki kat arttırılmak suretiyle toplamda yatay rijitliğe katkı sağlayan eleman sayıları üç boyutlu modeldeki ile tutarlı hale getirilmiştir. Her bir basit kolon-kiriş birleşimi için atanan sıfır uzunluklu doğrusal olmayan yay özellikleri (link elemanlar), kiriş kesitinin kapasitesine bağlı olarak ve kompozit döşeme etkisi göz önünde bulundurulmak suretiyle elde edilmiştir. Basit kolon-

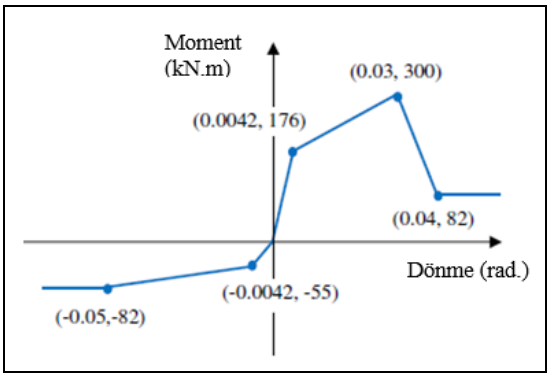
kiriş birleşimlerini temsilen atanan doğrusal olmayan „link“ elemanların moment-dönme ilişkisi Şekil 8(c)'de verilmiştir. Bu moment-dönme ilişkisi, Şekil 7'de verilen deney sonuçlarına uyumlu şekilde Wen ve diğ. (2013; 2014) [14],[15] tarafından sonlu eleman analizi yardımıyla belirlenmiştir.



(a): Düşey yük taşıyıcı kolon tanımları.



(b): İki boyutlu sayısal model.



(c): Düşey yük taşıyıcı kolon-kiriş birleşimleri için tanımlanan moment-dönme ilişkisi [14],[15].

Şekil 8. Moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistemin dahil edildiği sayısal modelde yapılan tanımlamalar.

Figure 8. Definitions in the numerical models of the moment frames with and without gravity frames.

Düşey yük taşıyıcı sistemin modele entegre edilmesinden sonra moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı çerçevelerden oluşan modelin ilk üç moduna ait titreşim periyodu sadece moment aktaran çerçeveden oluşan sayısal modelden elde edilen değerlerle karşılaştırıldı. Tablo 4'de görüldüğü gibi düşey yük taşıyıcı sistemin yatay elastik rijitliğe katkısı sebebiyle, beklendiği gibi, ikinci modelin periyot değerleri sadece moment aktaran çerçevenin dahil edildiği modele göre daha düşük çıkmıştır. Modellerin elastik özelliklerinin akla yatkın sonuçlar vermesi sonrasında iki çerçeve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlere tabi tutularak sadece moment aktaran çerçeveden oluşan modelle karşılaştırılmıştır.

Tablo 4. Sadece moment aktaran çerçeve ile moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistemden oluşan sayısal modellere ait ilk üç titreşim periyodunun karşılaştırılması.

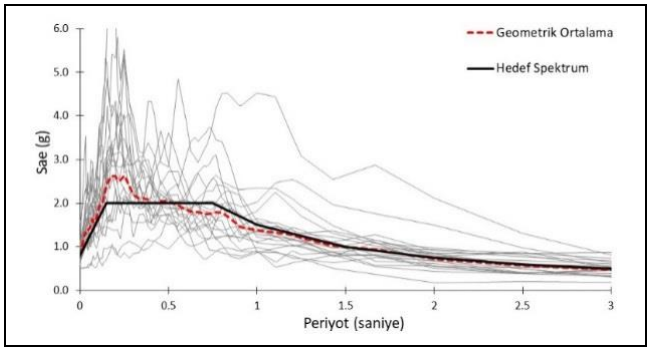
Table 4. First three period of vibration of the moment frames with and without gravity frames.

Mod	Periyot (sn.)	
	Moment aktaran çerçeve	Moment aktaran çerçeve ve Düşey yük taşıyıcı sistem
1	1.169	1.125
2	0.441	0.417
3	0.243	0.230

3 Doğrusal olmayan dinamik itme analizleri

3.1 Deprem kayıtları

Doğrusal olmayan artımsal dinamik analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının seçilmesi, ölçeklendirilmesi ve değerlendirilmesi için Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Enstitüsü (PEER) [16] veritabanından faydalanıldı. Toplamda 20 olmak üzere, 10 çift deprem kaydı seçildi. Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler Tablo 5'de verilmiştir. Yapının fay hattına göre pozisyonunu göz önüne alabilmek için her bir deprem kaydının faya normal (FN) ve faya paralel (FP) bileşenleri göz önünde bulunduruldu. Seçilen deprem kayıtlarının en büyük deprem spektrumuna (yapının tasarımına esas alınan elastik spektrumun 1.5 katı) uyumlu hale getirilmesi için, deprem ivme kayıtları Tablo 5'de verilen ölçeklendirme katsayıları ile çarpıldı. Bu ölçeklendirmeyle, seçilen kayıtların spektral ivmelerinin geometrik ortalamasının, en büyük deprem spektrumunun 1-1.5 sn.'lik periyot aralığına en uygun hale getirilmesi amaçlandı. Bu aralık, Tablo 5'te verilen birinci periyot değerleri gözetilerek belirlenmiştir. Seçilen bölgeye ait en büyük deprem spektrumu, her bir deprem kaydına ait deprem spektrumları ve bunların geometrik ortalaması Şekil 9'da sunulmuştur. Seçilen 20 deprem kaydının kesikli çizgiyle gösterilen geometrik ortalamasının bahsi geçen periyot aralığında hedef spektruma yeterli yakınlıkta olduğu söylenebilir (Şekil 9).



Şekil 9. Deprem kaydı ait spektrumlarının ölçeklendirilmesi.

Figure 9. Scaling of the spectra of the selected ground motions.

Tablo 5. Seçilen deprem kayıtları.

Table 5. Selected earthquake ground motions.

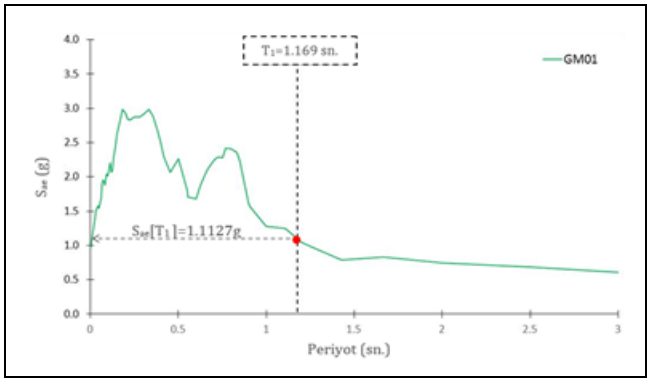
ID No.	NGA*	Ölçeklendirme Katsayısı	Bileşen**	Deprem	Yıl	Büyüklük (M_w)	Süre (sn.)
GM01	1085	1.751	FN	Northridge	1994	6.69	40
GM02		1.634	FP				
GM03	1489	4.036	FN	Chi-Chi- Taiwan	1999	7.62	90
GM04		4.036	FP				
GM05	1515	3.876	FN	Chi-Chi- Taiwan	1999	7.62	90
GM06		2.584	FP				
GM07	1009	5.702	FN	Northridge	1994	6.69	55.33
GM08		5.322	FP				
GM09	726	9.859	FN	Superstition Hills	1987	6.54	21.89
GM10		9.859	FP				
GM11	179	2.740	FN	Imperial Valley	1979	6.53	39
GM12		2.935	FP				
GM13	802	2.877	FN	Loma Prieta	1989	6.93	39.955
GM14		3.453	FP				
GM15	779	1.622	FN	Loma Prieta	1989	6.93	25.005
GM16		1.622	FP				
GM17	722	4.846	FN	Superstition Hills	1987	6.54	21.98
GM18		7.269	FP				
GM19	1148	10.093	FN	Kocaeli- Turkey	1999	7.51	30
GM20		10.813	FP				

*: PEER veritabanında seçilen depreme ait kayıt numarası. ** FN: Faya normal bileşen; FP: Faya paralel bileşen.

3.2 Analiz sonuçları

Değerlendirmede kullanılmak üzere çerçeveler, hedef spektruma uyumlu seçilen 20 deprem kaydı kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanında artımsal doğrusal olmayan analizlere (dinamik itme analizi) tabi tutulmuşlardır. Dinamik itme eğrileri, bir çerçeveye farklı büyüklükleri temsil etmesi için artımsal şekilde ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemiyle etkitilmesiyle elde edilmektedir [12].

Dolayısıyla, her bir dinamik itme eğrisi, o çerçevenin belirli bir deprem kaydına verdiği en büyük tepki değeri (hasar ölçüsü) ile o deprem kaydına ait büyüklük ölçüsü arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Geleneksel olarak dinamik itme analizinde deprem büyüklüğü, analiz edilen yapının birinci periyoduna karşılık gelen elastik spektral ivmeyle temsil edilmektedir. Şekil 10'da GM01 deprem kaydına ait ölçeklendirilmemiş spektrum görülmektedir.

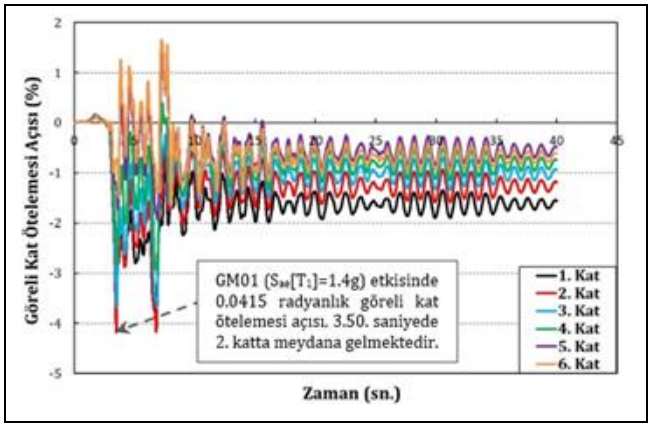


Şekil 10. Ölçeklendirilmemiş GM01 için birinci doğal titreşim periyoduna karşılık gelen elastik spektral ivme değerinin ($S_{ae}[T_1]$) elde edilişi.

Figure 10. Spectral accelaration of the unscaled GM01 corresponding to the fundamental period of the frame ($S_{ae}[T_1]$).

Bu şekilde, sadece moment aktaran çerçeveden oluşan modelin birinci doğal titreşim periyodu olan 1.169 saniyeye karşılık gelen elastik spektral ivme değeri 1.1127 g olarak elde edilmiştir. Bu büyüklük ölçüsü, deprem kaydı ölçeklendirilerek arttırılmakta ve her bir deprem seviyesine karşılık gelen tepki değeri eşleştirilerek dinamik itme eğrileri elde edilmektedir. Başka bir deyişle, dinamik itme eğrileri, deprem büyüklük ölçüsü ile seçilen sismik talep ölçüsü arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

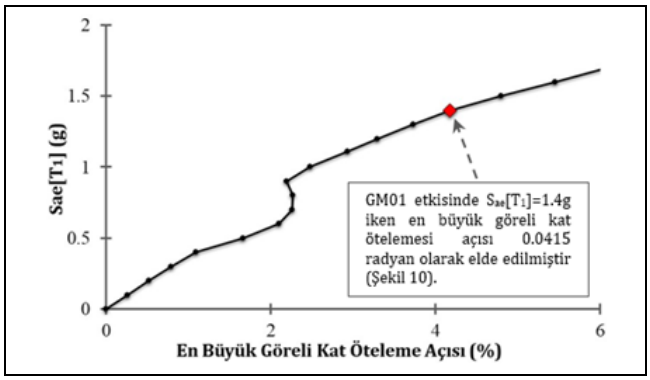
Dinamik itme eğrilerinin ne ifade ettiğinin daha iyi anlaşılması için örnek olarak Şekil 11'de verilen göreli kat ötelemesi geçmişi ele alınabilir. Tablo 6'da GM01 kodu ile verilen deprem kaydı, moment aktaran çerçevenin hâkim periyoduna karşılık gelen elastik spektral ivme değerinin $S_{ae}(T_1)$=1.4g olacak şekilde ölçeklendirilerek (ölçeklendirme katsayısı=2.2033) moment aktaran çerçeveye etkitilmesi ile elde edilen göreli kat ötelemesi geçmişi, her bir kat için Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. GM01 etkisi altında katlarda oluşan göreli kat ötelemesi açısının zamanla değişimi ($S_{ae}[T_1]$=1.4g).

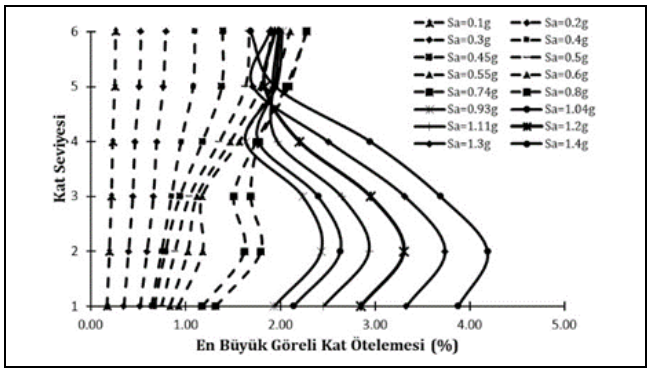
Figure 11. Drift angle history of each story level under GM01 ($S_{ae}[T_1]$=1.4g).

Bu sonuçlara incelendiğinde, en büyük göreli kat ötelemesi değerinin, deprem kaydının 3.5. sn.'de, 2. kat hizasından elde edildiği ve yaklaşık olarak 4.10% radyan civarında olduğu görülmektedir. Bu veri, Şekil 12'de GM01 için verilen dinamik itme eğrisinde kırmızı ile vurgulanmış bir veri noktasını oluşturacak şekilde işlenmiştir. Dolayısıyla, dinamik itme eğrisi üzerindeki her bir veri noktası faklı bir analizi temsil etmektedir. Her bir analiz sonucunun benzer şekilde grafiğe işlenmesi ile Şekil 12'de verilen dinamik itme eğrisi elde edilmiştir. Burada altı çizilmesi gereken husus, aynı dinamik itme eğrisi üzerindeki bir veri noktası 2. kata ait göreli kat ötelemesini temsil ederken takip eden başka bir veri noktası 6. kattan elde edilen bir değeri temsil edebilmektedir. Şekil 13'te örneklenen bu durum, yapının aynı deprem etkisinde ancak farklı deprem büyüklüklerine maruz kalması durumunda deformasyon şeklinin bina yüksekliği boyunca değişimini temsil etmektedir. Şekil 13'te kesikli çizgilerle belirtilen dağılımlardan anlaşılacağı gibi, moment aktaran çerçeve GM01 etkisinde $S_{ae}(T_1)$=0.1g ile $S_{ae}(T_1)$=0.8g büyüklükleri arasında aşağıdan yukarıya artan bir göreli kat ötelemesi dağılımı şablonu izlemektedir. Öte yandan, $S_{ae}(T_1)$ değerinin 0.93'e ulaşmasıyla, en büyük göreli kat ötelemesi 2. kat hizasına yığıldığı görülmüştür. Bu değişim, yapının farklı deprem büyüklüklerine verdiği tepkideki sıçramaların ve iniş çıkışların açıklaması açısından önem arz etmektedir.



Şekil 12. GM01(Northridge) etkisi altında moment aktaran çerçeveye ait dinamik itme eğrisi.

Figure 12. Representative IDA curve under GM01 (Northridge).



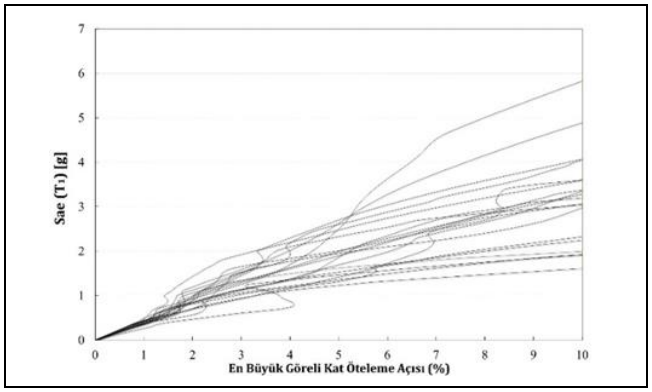
Şekil 13. Arttırılmış deprem yükleri etkisinde bina yüksekliği boyunca en büyük göreli kat ötelemesi açısı dağılımı (GM01).

Figure 13. Drift angle distribution along the frame height under ever-increasing ground motion intensity (GM01).

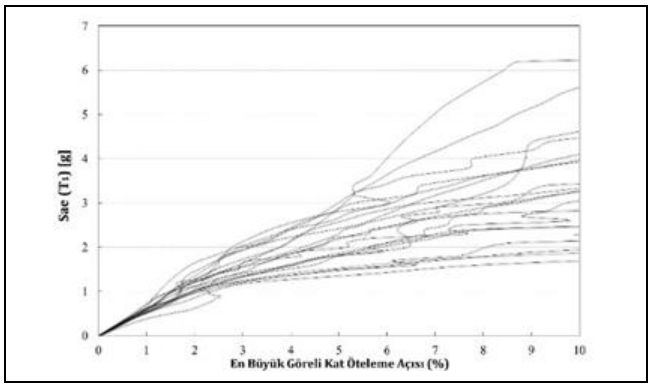
Genellikle, moment aktaran çerçevelerin dinamik itme analizinde hasar ve deprem büyüklüğü göstergeleri olarak, sırasıyla, göreli kat ötelemesi açısı (birbirini takip eden iki kat arasındaki yatay yer değiştirme farkının kat yüksekliğine oranı) ve birinci titreşim periyoduna karşılık gelen spektral ivme değerleri kullanılmaktadır. Şekil 14a'da sadece moment aktaran çerçeveden oluşan modelin birinci moda karşılık gelen elastik spektral ivme değeri ($S_{ae}[T_1]$) ile herhangi bir kat seviyesinde oluşan en büyük göreli kat öteleme açısının yüzde cinsinden değeri arasındaki ilişki görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 14(b)'de moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistemden oluşan modele ait dinamik itme analizi eğrileri görülmektedir.

Şekilde 14(a) ve (b)'de görüldüğü gibi her iki çerçeve de 0.10 radyanlık göreli kat öteleme açısına ulaşana kadar deprem kaydının büyüklüğü arttılarak analizlere devam edilmiştir. Moment aktaran birleşim tipi olarak seçilen zayıflatılmış kiriş kesitlerinin yüksek süneklikleri ve üretim kolaylığı açısından çelik moment aktaran çerçevelerde en çok tercih edilen birleşim tipi olduğu bilinmektedir [3],[17]. Yapılan test sonuçları göstermiştir ki, bu birleşimler, çevrimsel yük altında 0.04 radyana kadar plastik moment kapasitelerinin %80'nini koruyacak ve 0.06 radyan göreli kat ötelemesi açısına kadar çevrimlere devam edebilecek süneklik kapasitesine sahiptirler [18],[19]. Bu sebeple, göçme performansını değerlendirmek amacıyla üretilen dinamik itme eğrileri, 0.10 radyan gibi oldukça yüksek bir değere kadar devam ettirilmiştir. Şayet, bu

0.10 radyanlık göreli kat öteleme açısına ulaşılmadan analizlerde dinamik kararsızlık meydana gelirse, o deprem büyüklüğü etkisinde çerçevenin göçtüğü kabul edilmiştir. Aksi halde, çerçevelerin 0.10 radyana ulaştığında göçtüğü kabulü yapılmıştır. Şekil 14(a) ve (b)'de verilen dinamik itme eğrileri kullanılarak oluşturulacak kırılma eğrileri yardımıyla, her iki yapının olasılıksal göçme performansları takip eden bölümde detaylı olarak incelenmiştir.



(a): Moment aktaran çerçeve.



(b): Moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistem.

Şekil 14. Seçilen 20 deprem kaydı etkisinde dinamik itme eğrileri.

Figure 14. IDA curves under the selected 20 ground motions.

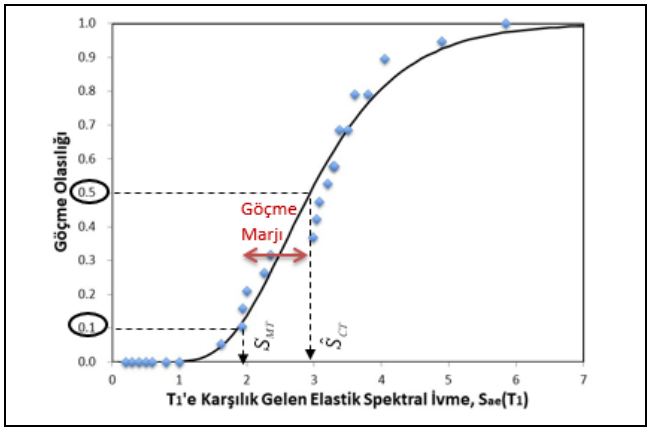
4 Performans değerlendirmesi

4.1 Göçme performansının belirlenmesi

Kırılma eğrileri, yapı mühendisliği dilinde, seçilen bir deprem büyüklüğü ölçüsü (en büyük yer ivmesi, hâkim periyoda karşılık gelen spektral ivme vb.) ile bir sınır durumun (kırılma, göçme vb.) oluşma olasılığı arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Bu çalışmada, birinci titreşim periyoduna karşılık gelen spektral ivme değeri ($S_{ae}[T_1]$) büyüklük ölçüsü olarak seçilmiştir. Bu büyüklük ölçüsüne karşılık oluşma olasılığı tahmin edilmeye çalışılan sınır durum ise "göçme" olarak belirlenmiştir. Genel anlamda kırılma eğrisi tanımlamakta kullanılan lognormal kümülatif dağılım fonksiyonu Denklem 1'de verilmiştir.

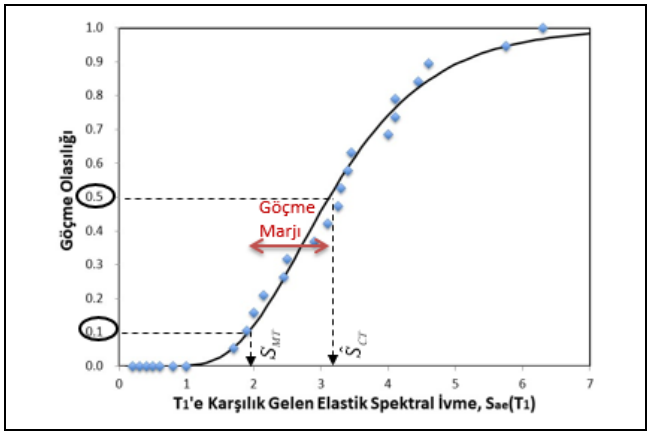
$$P(C|IM = x) = \phi\left(\frac{ln(x/\theta)}{\beta}\right) \quad (1)$$

Burada; IM: Büyüklük ölçüsü, ϕ: Normal kümülatif dağılım fonksiyonu, θ ve β: Sabitler olarak tanımlanmıştır. Büyüklük ölçüsü olarak seçilen $S_{ae}[T_1]$ ile moment aktaran çerçevelerin performans göstergesi olarak kullanılan göreli kat ötelemesi açısı arasında ilişki kuran dinamik itme analizi sonuçları kullanılarak, çerçevelerin her bir $S_{ae}[T_1]$ değerinde kaç deprem etkisinde göçme sınır durumuna ulaştığı gözlenecektir. Bu bilgi kullanılarak çerçevelerin göçme olasılıkları $S_{ae}[T_1]$ değerine bağlı olarak elde edilecektir. Baker (2015)'te önerilen olasılıksal yaklaşım kullanılarak, sadece moment aktaran çerçeveden oluşan klasik model ile moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistemden oluşan model için Şekil 15 ve 16'da verilen kırılma eğrileri elde edilmiştir. Şekil 15 ve 16'da görülen her bir mavi nokta, belirli bir $S_{ae}[T_1]$ değerine karşılık gelen göçmeye sebebiyet veren analiz sayısının toplam analiz sayısına oranını ifade etmektedir. Yine Şekil 15 ve 16'da siyah renkle gösterilen eğriler ise, bahsi geçen mavi noktalara göre uydurulmuş kırılma eğrilerini temsil etmektedir. Bu eğriler, Denklem 1'den elde edilen logaritmik olasılık değerlerinin toplamını mutlak değerce en büyük yapacak θ ve β değerleri belirlenerek elde edilmiştir.



Şekil 15. Moment aktaran çerçeveye ait kırılma eğrisi [20].

Figure 15. Fragility curves for the moment frame only [20].



Şekil 16. Moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistemin kırılma eğrisi [20].

Figure 16. Fragility curves for the moment frame with gravity frames [20].

Bu kırılma eğrileri yardımıyla Şekil 3'te akış şeması görülen performans değerlendirme adımları tamamlanacaktır. Bu adımların P-695 metodolojisine uygun şekilde ele alınması amacıyla "yapı güvenliği", göçme marj oranı cinsinden tanımlanmalıdır. Göçme marj oranı, medyan göçme olasılığına karşılık gelen spektral ivme değeri ($\hat{S}_{CT}$) ile izin verilen göçme olasılığına karşılık gelen spektral ivme (S_{MT}) değerinin oranı

olarak ifade edilmektedir. Şekil 15 ve 16'deki kırılma eğrileri üzerinde gösterilen $\hat{S}_{CT}$ ve S_{MT} değerleri, Denklem 2'de verildiği şekilde oranlanmıştır. Denklem 2'de verilen CMR katsayısı, göçme marjı oranını temsil etmektedir. Burada, ATC 63 (2009)'te önerildiği şekilde $\hat{S}_{CT}$ ve S_{MT}, sırasıyla %50 ve %10'luk göçme olasılığına karşılık gelen spektral ivme değerleri olarak kabul edilmiştir. Elde edilen S_{MT}, $\hat{S}_{CT}$ ve CMR değerleri her iki çerçeve için Tablo 6'da özetlenmiştir.

$$CMR = \frac{\hat{S}_{CT}}{S_{MT}} \quad (2)$$

Kullanılan deprem kayıtlarının frekans içeriği, değerlendirilen yapının göçme kapasitesini ciddi biçimde etkileyebilmektedir [7]. Bu sebeple, göçme marjı değeri düzeltilerek "Düzeltilmiş göçme marjı" değeri elde edilmelidir. Frekans içeriğine ek olarak, düzeltilmiş göçme marjı oranına (ACMR), düzlem çerçeve kullanılarak yapılan değerlendirmelerde üçüncü boyut etkisinin göz ardı edilmesi sebebiyle de ihtiyaç vardır. Bu sebeple, elde edilen göçme marjı değerleri frekans içeriği katsayısı (SSF) ile çarpılarak Denklem 3'te verildiği gibi düzeltilmelidir.

$$ACMR = SSF \times CMR \quad (3)$$

Frekans içeriği katsayısı (SSF), yapının hakim periyodu, T_1, sünekliği, μ ve sismik tasarım kategorisinin fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, sadece moment aktaran çerçeveden oluşan model ile moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistemden oluşan modele ait SSF değerleri, ATC 63, Tablo 7-1'den, sırasıyla, 1.19 ve 1.21 olarak elde edilmiştir. Bu SSF değerleri ile hesaplanan düzeltilmiş göçme marjı oranı değerleri yine Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Göçme marjı oranı değerleri.

Table 6. Collapse margin ratios.

Çerçeve Tipi	$\hat{S}_{CT}$	S_{MT}	CMR	SSF	ACMR
Moment aktaran çerçeve	2.95g	1.87 g	1.577	1.19	1.877
Moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistem	3.13g	1.90 g	1.647	1.21	1.993

Yapıların göçme kapasitesinin belirlenmesinde etkisi bulunan belirsizlikler P-695 metodolojisinde farklı biçimlerde yer bulmaktadır. Birçok mekanizma bahsi geçen belirsizliklere katkı sağlasa da, aşağıda sıralanan belirsizliklerin etkisinin görece daha büyük olduğu düşünülerek, belirsizlikler dört temel başlık altında göz önüne alınmaktadır.

- İvme Kayıtlarından Kaynaklanan Belirsizlikler (β_{RTR}),
- Tasarımdan Kaynaklanan Belirsizlikler (β_{DR}),
- Test Sonuçlarından Kaynaklanan Belirsizlikler (β_{TD}),
- Modellemeden Kaynaklanan Belirsizlikler (β_{MDL}).

Bu temel belirsizliklerin her biri için ayrı bir β katsayısı aralığı tanımlanmıştır. Bu belirsizliklerin hepsi birleştirerek elde edilen toplam belirsizlik katsayısı β_{TOT} Denklem 4'de verildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2} \quad (4)$$

Toplam belirsizlik katsayısı, (β_{TOT}), bahsi geçen tüm belirsizlikleri kapsayacak şekilde Tablo 7'de sunulduğu gibi 0.500 olarak elde edilmiştir. Bu tabloda verilen değerler, sayısal modelin kalitesinin iyi olduğu (Model kalitesi: B) ve periyot bazlı sünekliğin 3'ten büyük olması durumunda farklı test sonucu ve tasarım kalitesi senaryoları için oluşturulmuştur. Kullanılan zayıflatılmış kiriş kesitlerine ait moment-dönme ilişkileri birçok farklı araştırmacının test sonuçlarına dayandığından, test sonuçlarının kalitesi "iyi" olarak kabul edilmiştir. Öte yandan, uzun yıllar süren deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda oluşturulmuş olan AISC 358 (2016)'daki birleşim tasarımının ve diğer kapasiteye dayalı tasarım kurallarının (güçlü-kolon zayıf-kiriş vb.) kalitesini de "yüksek" olarak kabul etmekte bir sakınca görülmemiştir.

Tablo 7. Toplam belirsizlik katsayısı (β_{TOT}) (Model kalitesi: B ve μ > 3 için) [7].

Table 7. Total uncertainty factor (βTOT) (Model quality: B and μ > 3) [7]

Test Sonuçlarının Kalitesi	Tasarım Gerekliliklerinin Kalitesi			
	(A) Yüksek	(B) İyi	(C) Orta	(D) Zayıf
(A) Yüksek	0.475	0.500	0.575	0.675
(B) İyi	0.500	0.525	0.600	0.700
(C) Orta	0.575	0.600	0.675	0.750
(D) Zayıf	0.675	0.700	0.750	0.825

Toplam belirsizlik katsayısının da belirlenmesiyle, artık yapıların kabul edilebilir ACMR katsayısı ile analiz sonucu elde edilen mevcut ACMR katsayısı değerleri karşılaştırılarak, göçme performansının yeterli olup olmadığı değerlendirilebilir. Başta kabul edilen göçme olasılığı sınır değeri ve toplam belirsizlik katsayısı, bahsedilen kabul edilebilir ACMR katsayısının belirlenmesinde kullanılan iki değişkendir. ATC 63'te verilen Tablo 7-3'e toplam belirsizlik katsayısı ve başta seçilen göçme olasılığı değeri girilerek, kabul edilebilir ACMR değeri 1.90 olarak elde edilmiştir. Bu değer, yapının en az 1.90 katsayısına sahip olduğu zaman göçme performansının yeterli olacağı anlamına gelmektedir. Sınır değer, analiz yoluyla iki çerçeveden elde edilen ACMR değerleriyle karşılaştırıldığında, ilginç biçimde, bu değerin iki çerçevenin ACMR değerinin ortasında kaldığı görülmektedir. Başka bir deyişle, ACMR değerinin 1.877 olarak elde edildiği moment aktaran çerçeve performans kriterini sağlamazken, ACMR değerinin 1.993 olduğu düşey yük taşıyıcı sistemli çerçeve az farkla da olsa güvenli tarafta kalmıştır. Elde edilen toplam sistem belirsizlik katsayısı, göçme olasılığı ve her iki sistem için düzeltilmiş göçme marjı değerleri karşılaştırılmalı olarak Tablo 8'de sunulmuştur. Sonuçların yakınlığı göz önüne alındığında bu değerlendirmenin farklı kabuller kullanılarak yapılmasının her iki çerçevenin güvenli ya da güvensiz tarafta kalmasına sebebiyet verebileceği aşikardır. Örneğin, tasarım gerekliliklerinin kalitesinin yüksek yerine "orta" olarak kabul edilmesi, toplam belirsizliği 0.600, göçme olasılığı sınırını ise 2.16'ya çekecektir. Bu durumda her iki çerçeve de beklenen performans düzeyini sağlamayacaktır.

Tablo 8. Göçme performansı değerlendirmesi.

Table 8. Collapse performance evaluation.

Toplam Sistem Belirsizlik Katsayısı	Göçme Olasılığı	Analiz Sonucu Elde Edilen Düzeltilmiş Göçme Marjı (ACMR) Değerleri	
	%10	Moment aktaran çerçeve	Moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistem
0.500	1.900	1.877	1.993

4.2 Tasarım parametrelerinin belirlenmesi

P-695 metodolojisinde, tasarım parametreleri, statik analiz sonucunda elde edilen taban kesme kuvveti ve yatay yer değiştirme değerleri yerine, spektral koordinatlarda ifade edilen spektral ivme ve spektral deplasman ile tanımlanmıştır. Spektral koordinatlara dönüşüm yapılırken sismik efektif ağırlığın tümünün birinci moda dahil edildiği kabulü yapılmıştır [7]. Bu tarife uygun olarak aşağıda Denklem 5 ve 6'da görülen ilişkiler elde edilebilir.

$$1.5R = \frac{S_{MT}}{C_S} \tag{5}$$

$$R = C_d \tag{6}$$

Bu denklemlerde, C_s değeri tasarım esnasında hesaplanan tasarım deprem yükünün toplam sismik efektif ağırlığa oranını ifade etmektedir. En büyük deprem (50 yılda aşılma olasılığı %2) seviyesinde %10 göçme olasılığına karşılık gelen spektral ivme katsayısının (S_{MT}), tasarım depremi (50 yılda aşılma olasılığı %10) seviyesindekine oranın 1.5 olması dolayısıyla, Denklem 5'te verilen oran yapı davranış katsayısının (R) 1.5 katını ifade etmektedir. Denklem 6'da ise Newmark'ın uzun periyot bölgesinde "eşit yer değiştirme kuralına" uygun şekilde inelastik deplasman arttırma katsayısının (C_d), davranış katsayısına (R) eşit olduğu gösterilmiştir.

Tablo 9. Performans/tasarım parametreleri.

Table 9. Performance/design parameters.

Çerçeve Tipi	C_s (g)	S_{MT} (g)	R=C_d
Moment aktaran çerçeve	0.134	1.87	9.30
Moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistem	0.134	1.90	9.45

Yapılan değerlendirmenin son aşaması olarak, metodolojideki tanımlara uygun şekilde hesaplanan tasarım/performans parametreleri (R ve C_d) Tablo 9'da özetlenmiştir. Yatay taşıyıcı sistemin süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçevelerle teşkil edilmesi sebebiyle, tasarımda R katsayısı 8 olarak kabul edilerek tasarım yapılmıştır [10] Ancak, dinamik itme analizi sonuçları kullanılarak P-695 metodolojisine göre hesaplanan R katsayıları ise sırasıyla 9.30 ve 9.45 olarak elde edilmiştir.

5 Sonuçlar ve öneriler

Düşey yük taşıyıcı sistemin yapıların deprem performansına etkisini değerlendirmek amacıyla P-695 metodolojisi takip edilerek yapılan değerlendirme kapsamında, oluşturulan tipik moment aktaran çerçeve modeli ile bu modele düşey yük taşıyıcı sistemin entegre edilmesiyle elde edilen model karşılaştırılmıştır. Bu çerçevelere ait sayısal modeller, 20 deprem ivme kaydı kullanılarak dinamik itme analizlerine tabi tutulmuş, doğrusal olmayan davranışa düşey yük taşıyıcı sistemin ne ölçüde etki ettiği gözlemlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen nicel sonuçlar karşılaştırıldığında, aşağıda sıralanan çıkarımları yapmak mümkündür:

1. Düşey yük taşıyıcı sistemin sayısal modele eklenmesi, beklendiği gibi, çerçevenin yatay rijitliğinde artışa ve buna bağlı olarak birinci doğal titreşim periyodunun %4 civarında düşmesine (1.169 sn.'den 1.125 sn.'ye) sebep olduğu görülmüştür,
2. Göçme performansının olasılıksal olarak değerlendirilmesi sonucu, seçilen çerçevelerin göçme marjlarının, sadece moment aktaran çerçeve için sınır göçme marjı değerinden küçük; moment aktaran çerçeve ve düşey yük taşıyıcı sistemden oluşan modelde ise sınır değerden büyük çıktığı fark edilmiştir. Başka bir deyişle, daha yüksek göçme kapasitesine sahip olan düşey yük taşıyıcı sistemli modelin güvenli tarafta kaldığı, sadece moment aktaran çerçeveden oluşan modelin ise beklenen göçme performansı düzeyini sağlamadığı görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, yapısal sistemlerdeki kaçınılmaz tasarım, malzeme dayanımı, kullanılabilirlik sınır durumları vb. kaynaklı belirsizlikler göz önüne alındığında, tasarımda hesaba katılmayan bu kapasite rezervinin, yapıların göçme riski üzerindeki kritik önemine işaret etmektedir. Bu nedenle, deprem esnasında yatay yük taşıyıcı sisteme destek sağlayan bu güvenlik rezervini tasarım esnasında göz önüne almanın, her ne kadar tasarımı daha ekonomik hale getirecek olsa da, göçme riskini arttıracağı için oldukça riskli bir yaklaşım olacağı söylenebilir,
3. Metodolojide tanımlandığı şekilde elde edilen yapı davranış katsayısı (R=9.3) değeri, geleneksel tasarımda kullanılan 8 katsayısına oldukça yakın çıkmıştır. Bu da, TBDY (2018) ve çağdaş yönetmeliklerde kullanılan tasarım katsayısının, araştırılan moment aktaran çerçeve için abartılı ya da güvensiz olmadığını göstermektedir,
4. P-695 metodolojisi, önceki değerlendirme yöntemlerinden farklı olarak, modelleme, test sonuçları vb. yönlerden belirsizliklerin göz önüne alınması ve performansın olasılıksal olarak değerlendirilmesi gibi yönlerden üstün gözükse de; bu belirsizlik katsayılarının belirlenmesi sırasındaki nesnel yaklaşımın, bu yöntemden elde edilecek sonuçları tamamen değiştirebileceği görülmüştür,
5. Bu çalışmaya esas alınan örnekte, P-695 metodolojisinin önerdiği düşey yük taşıyıcı sistem etkisini ihmal eden yaklaşımın gerekli olduğu ve P-695 göçme performansı kriterinin, ihmal edilen kapasite rezervinin katkısı ile ancak sağlanabildiği görülmüştür. Orta yükseklikli bir çelik bina üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmadan elde edilen bulgular, gelecekte yapılması olası çalışmalara öncülük etmesi bakımından ümit verici olsa da, daha genel çıkarımlar yapılabilmesi için, şüphesiz, çok değişkenli (bina yüksekliği, süneklik düzeyi, kullanılan malzeme ve yatay taşıyıcı sistem türü gibi) sistematik bir incelenme gerekmektedir.

6 Conclusions

To evaluate the impact of gravity framing on seismic performance of moment frames using P-695 methodology, the response of an archetype moment frame with and without gravity frames is compared. Numerical models of these frames are subjected to 20 ground motion records to recognize the impact on the non-linear response. Considering the quantitative results obtained, the following can be interpreted:

1. Incorporating the gravity frame increased the lateral stiffness of the frames, as expected. Consequently, the first natural period of the frame reduced by 4% (from 1.169 to 1.125 sec.) after introducing the gravity frames,
2. Based on the probabilistic collapse performance evaluation carried out, it was shown that the collapse margin ratio was exceeded by the moment frame with gravity frames while this ratio was below the specified limit. That is, the frame satisfied the collapse performance goal only after introducing the gravity frames. The findings from the present study pointed out that considering the inevitable design-, material- and serviceability limit states-related uncertainties, this reserve capacity that is not taken into account might play a critical role in the collapse risk of structures. Therefore, considering this reserve capacity in design can be risky even though it would be more economical to do so,
3. The response modification factor obtained using the methodology (R=9.3) was found to be close to that used in the conventional design, which is 8. This indicates that the R factor adopted in the current Turkish Earthquake Code (TBDY, 2018), which is identical to those given in the international codes, neither underestimates nor overestimates the reduction factor used for the studied moment frame,
4. Although P-695 methodology seems superior to the previous methodologies in terms of considering uncertainties in modeling, test results, and so on, potential subjectivity in selecting the uncertainty factors to be introduced might have a substantial impact on the results, as exemplified,
5. The results from the archetype building adopted in this study showed that the approach that ignores the impact of gravity frames, as recommended by P-695 methodology, could be necessary since the performance goal was only met when the gravity frames were incorporated. Even though the findings based on a mid-rise steel building presented in this study are promising for its leading role for future studies, further studies that systematically investigate multiple parameters (building height, ductility level, material, and structural system type, etc.) needed to generalize the conclusions.

7 Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2232: Yurda Dönüş Burs Programı, 118C018 No.lu proje kapsamında sağlanan destekle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, yazar dışında herhangi bir kurum veya tüzel kişiliğin fikirlerini yansıtmamaktadır.

8 Kaynaklar

[1] Liu J, Astaneh-Asl A. "Cyclic testing of simple connections including effects of slab". *Journal of Structural Engineering*, 126(1), 32-39, 2000.

[2] Liu J, Astaneh-Asl A. "Moment-rotation parameters for composite shear tab connections". *Journal of Structural Engineering,* 130(9), 1371-1380, 2004.

[3] SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency. "FEMA 355D: State of the Art Report on Connection Performance". Washington DC, USA, 2000.

[4] Flores FX, Charney FA, Lopez-Garcia D. "Influence of the gravity framing system on the collapse performance of special steel moment frames". *Journal of Constructional Steel Research,* 101(0), 351-362, 2014.

[5] Elkady A, Lignos D. "Effect of gravity framing on the overstrength and collapse capacity of steel frame buildings with perimeter special moment frames". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* 44, 1289-1307, 2015.

[6] Zorlu M, Akbaş B, Shen J, Şeker O. "Contribution of Gravity Frames to Seismic Performance of Steel Moment Resisting Frames". *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B – Theoretical Science,* 6, 57-66, 2018.

[7] ATC Council. "ATC-63: Quantification of building seismic performance factors, FEMA P695". Redwood City, CA, USA, 2009.

[8] SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency. "FEMA-289: Connection Test Summaries (SAC-96-02)". Washington DC, USA, 1996.

[9] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları". Ankara, Türkiye, 2016.

[10] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, 2018.

[11] Kircher and Heintz. "Overview and key concepts of the ATC-63 Methodology". *Structures 2008: Crossing Borders,* Vancouver, British Columbia, Canada, 24-26 April 2008.

[12] Vamvatsikos D, Cornell CA. "Incremental dynamic analysis". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 491-514, 2002.

[13] CSI. "SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design," Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA, 2019.

[14] Wen R, Akbas B, Shen J. "Practical moment-rotation relations of steel shear tab connections". *Journal of Constructional Steel Research,* 88, 296-308, 2013.

[15] Wen R, Akbas B, Sutchiewcharn N, Shen J. "Inelastic behaviors of steel shear tab connections". *Structural Design of Tall and Special Buildings,* 23, 929-946, 2014.

[16] Pacific Earthquake Engineering Research Center. "PEER Ground motion database". https://ngawest2.berkeley.edu/ (20.04.2018).

[17] SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency. "FEMA 355F: State of the Art Report on Performance Prediction and Evaluation of Steel Moment-Frame Buildings". Washington DC, USA, 2000.

[18] American Institute of Steel Construction. "AISC 358-16: Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications". Chicago, IL, USA, 2016.

[19] American Institute of Steel Construction. "AISC 341-16: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings". Chicago, IL, USA, 2016.

[20] Baker JW. "Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis". *Earthquake Spectra*, 31(1), 579-599, 2015.