

YARI RİJİT ÇELİK BAĞLANTILARIN YÜKSEK KATLI YAPILARDA DEPREM DAVRANIŞINA ETKİSİ

THE EFFECT OF SEMI-RIGID STEEL CONNECTIONS TO SEISMIC BEHAVIOR OF HIGH-RISE BUILDINGS

Kadir TOPCU¹ ve Serdar SELAMET²

ÖZET

Bu çalışmada, rijit ve yarı rijit birleşimli, süneklik düzeyi yüksek dış merkez çaprazlı ve merkezi çaprazlı çelik çerçevelerle üç boyutlu olarak modellenmiş çok katlı çelik bir yapının zaman tanım alanında yapılan deprem analizleri altındaki performansı değerlendirilmiştir. Önceki çalışmalarda sıklıkla konu edilen moment bağlantılarının aksine, mevcut yapıdaki ikincil kirişlerin mafsallı olarak tanımlanmış bağlantıları yeniden modellenmiş ve daha gerçekçi bir yaklaşımla bağlantı bölgelerinin gerçek davranışlarını temsil etmesi amaçlanarak kısmi rijitlikleri dikkate alınmıştır. İkincil kirişlere monte edilmiş yarı-rijit olarak modellenen yeni bağlantı detaylarının sistemin genel davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dinamik analizlerde 7 adet gerçek yer hareketi ilgili yönetmelikler dikkate alınarak öngörülen tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilerek kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda belirli kriterlerin yönetmelikler çerçevesinde kabul edilebilirlik kontrolleri yapılmış, yeniden matematik modeli hazırlanmış kesme bağlantıları ile mevcut mafsallı birleşim hallerinin performansları karşılaştırılmıştır. Sistemin genel davranışının sonucu olarak elde edilen taban kesme kuvvetleri, göreceli kat ötelemeleri, eleman bazında gerilme değerleri ve tepe noktası deplasman mertebelerinde değişimlere rastlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek katlı yapılar, Deprem hasarları, Çelik bağlantılar, Sismik analiz

ABSTRACT

Within the scope of this study, the performance of fully rigid and semi-rigid connected tall steel frames are investigated under ground accelerations. Apart from moment connections simple and shear connections are modified with component method to get a better understanding of the behavior in lateral resisting system. By this approach, real behavior of connections will be given instead of pinned connection type. In real behavior, extra moments and stiffness parameters will be taken into account in the system. 7 real ground motions are used in dynamic analyses after scaling the datas according to provided design spectrum which is identified in Turkish earthquake code DBYBHY-2007. As a result of performing analyses, limit controls are checked and performance of the system with modified connections is compared with traditionally connected system. To have an opinion about the efficiency, story drift ratios, base shear of both systems, top floor displacements and column stress ratios are investigated.

Keywords: Tall steel structures, Earthquake damages, Steel connections, Seismic analysis

¹ Yüksek Lisans, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, kadir.topcu@boun.edu.tr

² Y. Doç Dr., Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, serdar.selamet@boun.edu.tr

GİRİŞ

Çok katlı çelik yapılar hizmet süreleri boyunca yangın, patlama ve özellikle deprem gibi afetlere maruz kalabilirler. Süneklik kapasitesi açısından deprem performansları betonarme yapılara göre daha efektif kabul edilen çelik yapıların sismik açıdan aktif bölgelerde kuvvetli yatay deplasmanlar neticesinde ağır hasar alabildiği ve istenen performans seviyesinin gerisine düştüğü gözlenmiştir. Geçmişte yapılan çalışmalardan Muto ve Krishnan'de Güney California'daki çok katlı çelik yapıların 7.8 büyüklüğündeki ani deprem senaryosuna karşı göstermiş olduğu performanslar değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada, kaynaklı çelik moment çerçevelerin karşıladığı yatay kuvvetlere dayanıklı ve moment bağlantılar içeren sistemlerde çatlak ve hasarlar görülmüş, burulma düzensizliklerine rastlanmıştır. Birçok yapının kabul edilebilir sınırlar dışında kat ötelemesi gösterdiği ve eski tasarım binalarda göçmelerin ortaya çıktığı görülmüştür. Benzer şekilde Krishnan vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada, mevcut 18 katlı çelik bir binayı yeniden modellenerek California'da meydana gelen San Andreas depremi karşısındaki performansı incelenmiştir. Çalışmada konu edilen yapı, moment aktaran çerçeve sistemle dizayn edilmiştir. Göreli kat ötelemelerinin sınır değerlerin ötesinde çıktığı belirlenirken, bir çok bağlantı detayından kaynaklanan önemli hasar tespitlerinde bulunulmuştur. Bunlara benzer çalışmalar neticesinde özellikle 1994 Northridge ve 1995 de meydana gelen Kobe depremlerinden sonra aslında bağlantı detaylarından kaynaklanan dikkate değer deformasyonlar gözlenmiş ve yapıların performansının modellenen bağlantı detaylarının daha çok önemsenmesiyle artırılabilceği görülmüştür. Edinilen bu farkındalığın ardından Dutta ve Hamburger (2010), Awkar ve Lui (1999), Asgarian ve Moradi (2011), Degertekin ve Hayalioğlu (2004), Aksoylar vd. (2013) çalışmalarında olduğu gibi burulmayı önlemek amaçlı çaprazlar ve geleneksel modellemenin ötesinde yarı rijit moment birleşimli çelik çerçeveler üzerine araştırmalar yapılmıştır. Özellikle Awkar ve Lui (1999) ve Aksoylar vd. (2013) detaylı olarak işlenen moment bağlantı noktalarının yarı rijit olarak modellenmesinin sistemin genel performansına nasıl etkidiği daha benzer birçok çalışmada gösterilmiş ve yatay deplasmanı karşılama açısından oldukça verimli sonuçlar elde edilmiştir. Buna karşın yapılarda bulunan mafsallı birleşimlerin etkisi üzerinde çok durulmamıştır.

Bu araştırmanın geçmişte yapılan çalışmalardan farkı, yapıda bulunan ikincil kirişler üzerindeki basit mafsallı ve kesme bağlantılarının depremden ortaya çıkan yatay kuvvet ve deplasmanları karşılama açısından nasıl bir performans göstereceğinin incelemesidir. Moment birleşim noktalarının dışındaki basit bağlantılar geleneksel olarak mafsallı birleşim bölgesi şeklinde ele alınmakta ve yatay kuvvetlerin karşılanmasında dikkate alınmamaktadır. Oysaki bu bağlantı tiplerinin de kısmi rijit hale getirilmesi neticesinde sistemin yatay kuvvet performansında bir fark ortaya çıkacaktır. Bu çalışmada öncelikli amaç, nispeten kaynaklı birleşimleri temsil eden kesme bağlantılarının ve basit mafsallı bağlantıların deprem etkisi altındaki davranışlarının incelenmesidir. Ayrıca, kısmi rijit bağlantıların çok katlı yüksek çelik yapıların global davranışına nasıl etki ettiği araştırılacaktır. Lui ve Astaneh-Asl (2000) buna benzer bir çalışma yapmış ve kesme bağlantılarının döşeme sistemleriyle birlikte çalıştığını öngörmüştür. Çalışmanın neticesinde bulonlu ve kaynaklı farklı tasarımlar üzerine yapılan deneylerde kısmi rijit bağlantı noktalarının geleneksel yöntemle göre çok daha efektif davranışlar sergilediği gözlenmiştir.

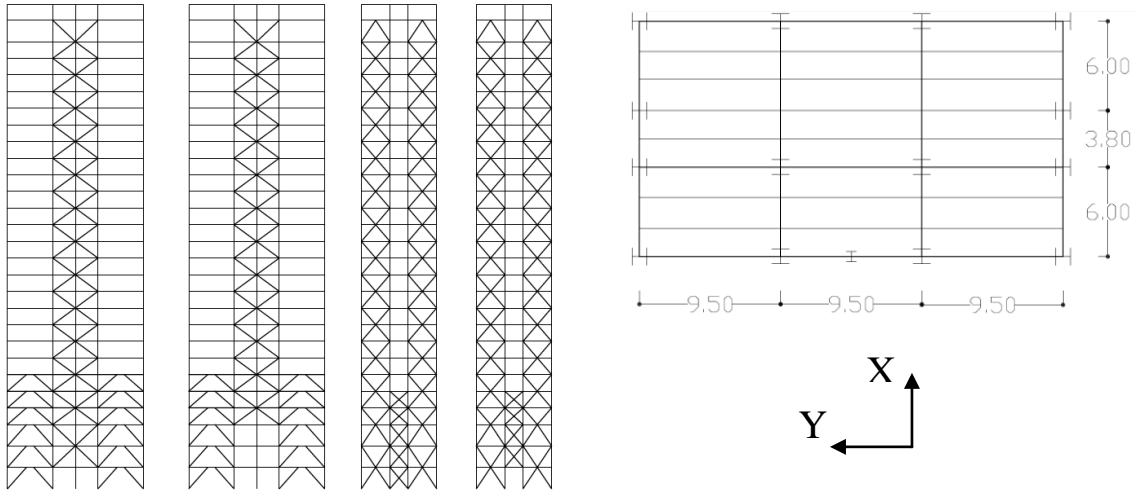
Yapılacak çalışma çerçevesinde, mevcut çok katlı çelik bir binanın üç boyutlu yapı modeli OpenSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation) sonlu eleman programı yardımıyla hazırlanmıştır (Mazzoni vd., 2006). İncelenecek bağlantı detayları da aynı programın sağlamış olduğu olanaklar sayesinde matematik yay modeli yöntemiyle hazırlanmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan deprem analizleri yapılmış, bu analizlerde ikinci mertebe etkileri de göz önünde bulundurulmuştur. Analizlerde gerçek deprem kayıtları kullanılmış ve sismik parametrelere göre belirlenmiş tasarım spektrumuna göre ölçeklenmişlerdir. Analizlerin sonuçları yorumlanırken, göreli kat öteleme oranları, taban kesme kuvvetleri incelenmiş ve sınır değerler çerçevesinde yorumlanmıştır. Bağlantı bölgelerinde yapılan değişikliklerle birlikte analizler tekrarlanmış ve normal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Araştırma kapsamında, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007), American Institute of Steel Construction (AISC, 2005-AISC 341s1-05),

European Committee for Standardization (Eurocode , 2004), Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2000-FEMA 356), American Society of Civil Engineers (ASCE, 2006-ASCE 7-05) yönetmeliklerinden gerekli kısımlarda yararlanılmıştır.

TAŞIYICI SİSTEM TANITIMI ve ANALİZLER

Bina Modeli

Bu çalışmada konu edilen bina modeli İstanbul da inşa edilmiş olan mevcut yüksek katlı bir otel binasıdır. Binanın hem x hem de y yönünde süneklik düzeyi yüksek dış merkez çaprazlı ve merkezi çaprazlı çelik çerçeveler bulunmaktadır. Ayrıca y yönündeki orta aks ve belli bölgelerde süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeveler bulunurken, birçok kolon kiriş bağlantı noktaları da mafsallı olarak modellenmiştir. Bunun yanında kolonların temele ankastre olarak mesnetlendiği kabul edilmiştir. Binanın tipik kat planı ve yan görünüşleri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Yüksek katlı çelik binanın ön, yan ve plan görünüşleri (açıklıklar metre cinsindendir)

Mevcut hali kompozit bir sistem olarak hazırlanmış bina, bu çalışmada yalnızca kolon, kiriş ve çapraz elemanlardan oluşan bir çerçeve sistem olarak modellenmiş, döşemelerden gelen sabit ve hareketli yükler her kattaki kirişlerin üzerine pay alanı (“tributary area”) yöntemiyle belirli oranlarda bölüştürülerek düşey yayılı yük olarak etkilmiştir. Eleman yükleri (kendi ağırlıkları) ise yayılı yük olarak elemanların lokal düşey doğrultularına etkilmiştir. Katlardaki toplam sabit ve hareketli yüklerin tespitinde mevcut binanın tasarımda kullanılan yükler belli bir faktör oranı kullanılmadan hesap edilmiştir. Kat kütleleri aynı düzlemdeki düğüm noktalarına ayrı ayrı etkilmiştir. Mevcut binanın bulunmuş olduğu bölgenin konumu ve zemin şartları gözönüne alındığında, DBYBHY-2007 deprem yönetmeliğine göre birinci derece deprem bölgesinde olduğu ve Z2 zemin sınıfına sahip olduğu varsayılmıştır. Buna göre deprem parametreleri Tablo 1’de verildiği gibi belirlenmiştir. Her kat düzlemindeki düğüm noktalarının kendi içlerinde serbest hareket etmesi amaçlanarak kat seviyelerinde rijit diyaframlar tanımı kullanılmamıştır.

Tablo 1. Deprem Parametreleri

Etkin Yer İvme Katsayısı, A_0	0.4
Bina Önem Katsayısı, I	1.00
Spectrum Katsayısı	$T_A = 0.15$ sn $T_B = 0.40$ sn
Davranış Katsayısı, R	5

Analizler

Çok katlı çelik yapıların analizinin normal çelik yapılardan ayrı tutulmasının başlıca sebepleri arasında , düşey yüklerin sebep olduğu ikinci merteye etkileri, kolon kiriş birleşimlerindeki panel kesme deformasyonları, yarı rijit bağlantıların esnekliği ve kolon kiriş gibi elemanlardaki kesme deformasyonlarının hesaba katılmasını gösterebiliriz. Belirtilen etkileri gözönünde bulundurarak, bu araştırma kapsamında matris methodu yaklaşımıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Bu analizlerin değerlendirilmesinde tepe noktasının deplasman değerleri, katlar arası öteleme oranları, taban kesme kuvveti diyagramları ve bağlantı noktalarındaki değişiklikler neticesinde meydana gelen moment farklılıkları irdelenmiştir. Bunların yanında her analizde seçilen elemanlar bazında kontroller yapılmış, yukarıda belirtilen kriterlerin kabul edilebilirlik sınırları içinde kalıp kalmadıklarının incelenmesi ile birlikte bağlantı bölgelerinin mevcut halleri ile modifiye edilmiş halleri arasındaki performans farkının değerlendirilmesi yapılmıştır. Dinamik analizler Berkeley Üniversitesi’ nde PEER tarafından geliştirilen OpenSEES sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır. Bu programda tanımlanan elemanların doğrusal olmayan davranışları “lif” (fiber) yaklaşımıyla eleman uzunluğu boyunca yayılı olarak analiz edilmiştir. Yapının mevcut düşey yöndeki ağırlıklarının yatay deplasmanlara etkisini, eleman ve malzeme bazında doğrusal olmayan davranışları dikkate almak için yapılan dinamik analizlerde ikinci merteye etkileri (P-Δ etkisi) de hesaba katılmıştır. Analizde kullanılan St-44, St-52 ve St-64 çelik malzeme özelliklerini simule etmek için OpenSEES kütüphane elemanlarından, iki doğrultulu kinematik yük-deplasman eğrisi davranışını taşıyan Steel01 adlı malzeme modeli kullanılmıştır. Modeldeki her eleman lif modeliyle tanımlanmış ve pekleşmesi % 0.5 alınmıştır.

Yapının doğal titreşim periyodunun hesabında Şekil 1 de verilen kesitin üç boyutlu analitik modeli kullanılmıştır. Bu model hem Etabs hem de OpenSEES bilgisayar yazılımları yardımıyla hazırlanmış ve doğal titreşim periyod hesapları her iki program içinde elde edilmiştir (Tablo 2). Periyod hesabının yapılabilmesi için öncelikle her iki program üzerinde de modal analiz yapılmıştır. Modal analiz yapı sisteminin genel davranışını analiz etmek açısından önemli sonuçlar içermektedir. Ayrıca yapılacak spektral analizlerin ve tasarım tekniklerinin kararı aşamasında da gerekli veriler modal analiz sonucunda elde edilmektedir. Modal analizin ardından dinamik analiz yapılmıştır. Dinamik analiz aşamasında rijitlik ve kütle katılım oranlarının lineer bir kombinasyon halinde dikkate alınabilmesi için doğrusal olmayan dinamik analizlerde sıklıkla kullanılan “Rayleigh” sönüm yaklaşımı kullanılmıştır.

Tablo 2. OpenSees ve Etabs de Hazırlanan Modellerin İlk Altı Periyodu (T)

	OPENSEES	ETABS
T₁ (x yönünde)	4.9056	4.2452
T₂ (y yönünde)	4.3397	3.8147
T₃ (burulma)	1.7695	2.6894
T₄	1.3342	1.1823
T₅	1.3158	1.1177
T₆	1.2018	0.7639

OpenSEES veritabanında tanımlı “Rayleigh” komutu kullanıcıya başlangıçtaki, analiz süresince ve son uygulanan rijitlik matrislerini sönümleme matrislerinin içinde kullanma imkanı sağlamaktadır. Bunun yanında sönüm formüllerinin çıkartılmasında kullanılan rijitlik ve kütle matrislerini oluştururken özdeğer “eigenvalue” analizi yapılmıştır.

Analizlerdeki eigenvalue denklemlerinde rijitlik ve kütleyi fiziksel bir sonuç olarak doğal titreşimler ve mod şekilleri karşılamaktadır.

Dinamik analiz çerçevesinde modelde tanımlanan noktaların serbestlik derecelerini ve bunların analize yansıtılması için kullanılacak denklemlerin uygulanması için dönüşüm “Transformation” metodu kullanılmıştır. Bu metodla rijitlik matrisleri, kısıtlanmış serbestlik dereceleri üzerine yoğunlaştırılarak oluşturulmakta ve çok noktalı kısıtlamalar için sistemin işlem hacmini küçültmektedir. Bunun yanında oluşturulan matrisler ve denklemler oldukça büyük ve detaylı olduğundan numaralandırılması da bir hayli karmaşık olmaktadır. Bu çalışmada

otomatik numaralandırma yapabilmek için RCM (Reverse Cuthill-Mckee) metodu kullanılmıştır (Cuthill ve Tschemmernegg, 1969). Analiz esnasında yapılan iterasyonlu hesaplamaların yakınsama toleranslarını kontrol etmek amacıyla enerji artım (“energy increment”) metodu kullanılmıştır.

Ayrıca analizlerde kullanılan çözüm metodlarında doğrusal olmayan hesaplamalarda sıklıkla kullanılan “Newton-Raphson” yönteminin güncelleştirilmiş hali olan “Modified Newton” yöntemi kullanılmıştır. Newton algoritmasında yük ve deplasman ilişkisini irdeleyen hesaplamaların her bir iterasyonunda oluşan teğet rijitlikleri (tangent stiffness) yenilenmektedir. Modified Newton algoritmasında ise teğet değerleri her iterasyon adımında sabit tutulmaktadır. Bu sayede çok serbestlik dereceli sistemlerin karmaşık hesap yükünü azaltmak mümkün olmaktadır. Buna karşılık olarak öngörülen değerlere ulaşabilmek için iterasyon sayısı artabilmektedir. Analizlerdeki diferansiyel denklemlerin çözümlerinde ise dinamik analizlerde sıklıkla kullanılan “Newmark” metodu kullanılmaktadır. Bu metodun kullanılmasında dikkate alınan sönüm matrisi rijitlik ve kütle matrislerinin kombinasyonlarından elde edilir.

Göz önüne alınan 3 boyutlu modelin doğrusal olmayan dinamik hesapları için de Opensees bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Analitik modelleme aşamasında alınan verilerin doğruluğunu görmek amacıyla hem OpenSEES de hem de Sap2000 programlarında çeşitli basit sistemler kurulmuş, yaklaşıklık kontrol edilmiş ve alınan sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu şekilde OpenSEES yazılımının çalışma prensipleri de irdelenmiştir. Elemanların kesit alanı, atalet momenti, kayma modülü gibi kesit özellikleri tamamen mevcut modelden yararlanılarak OpenSEES programına uyarlanmıştır. Yapının rijitlik matrisi kolon, kiriş, ve diagonal elemanların rijitlik matrislerinin birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Hazırlanan hesap modelinde, kolonlar, kirişler ve çapraz elemanlar ‘DispBeamColumn’ olarak isimlendirilen nonlineer elemanı kullanılmıştır. Kolonlarda oluşacak akma ve eğilme deformasyonlarının neticesinde ortaya çıkan ikinci mertebe etkilerinden doğacak dengesizlik durumlarına karşı stabilize denklemleri de kolon rijitlik matrisleriyle birlikte dikkate alınmıştır. Kolonların kendi arasındaki bağlantılar rijit olup doğrultuları boyunca rijit olarak yükselmektedirler. Kirişlerde ise bazı bölgeler rijit iken çoğunlukla mafsallı bağlantılar bulunmaktadır. Mafsallı olarak modellenmiş bu bağlantılar bu çalışma kapsamında geliştirilerek, bağlantılar bölümünde de genişçe anlatıldığı gibi yeni bir doğrusal olmayan bağlantı modellenmiştir.

DEPREM KAYITLARI

Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi

Araştırma çerçevesinde kullanılacak kayıtlar Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)’in en son arşivlenmiş veri tabanından elde edilmiştir (PEER, 2007). Araştırma kapsamındaki mevcut model binanın inşaa edildiği bölgenin zemin sınıfı DBYBHY göz önüne alınarak Z2 tipi zemin olarak seçilmiştir. Türk deprem yönetmeliğinin ilgili maddesine uygun olacak şekilde 7 adet gerçek deprem kaydı kullanılarak, tasarım için ortalama büyüklükler alınmıştır. Gerçek yer hareketi kayıtları kendilerine has özellikleri (maksimum yer ivmesi, etkin süreleri, frekans içeriği vb.) açısından farklılık gösterirler. Bu nedenle benzer bir deprem seviyesini yansıtmaları için ölçeklendirilmeleri gerekir (Aksoylar vd.,2013). Seçilen 7 adet gerçek yer hareketi kaydı için, bu konuda yetkinliği uluslar arası platformlarda kabul görmüş PEER’in verdiği imkanlar dahilinde DBYBHY Z2 zemin sınıfı tasarım spektrumuna göre ölçekleme katsayıları elde edilmiştir. Ölçekleme işlemi için gerekli olan uygun ham kayıtların seçilmesinde, yapının bulunduğu lokasyon özellikleri, zemin parametreleri, bina önem durumu ve sismik parametreler gibi depremlerin istenilen fiziksel özellikleri sağlaması için birçok parametre kullanıcı tarafından seçilmiştir. Ayrıca ilgili veritabanından kayıt seçimi yapılırken ölçekleme işleminde ciddi faydalar sağlayan, büyük esneklik içeren ağırlık fonksiyonu da tanımlanabilmektedir. Ağırlık fonksiyonu, farklı periyot aralıklarına dışardan rölatif ağırlıklar atanmasına olanak sağlayan bir fonksiyondur (PEER vd., 2010).

Kullanıcı tarafından belirlenen hedef spektrumuna göre ölçekleme işleminde, seçilen ve ölçeklenen 7 adet yer hareketi kaydının spektrum eğrilerinin geometrik ortalamasının hedef spektruma uygunluğu PEER veri tabanı sistemi tarafından Ortalama Kareli Hata (MSE) değerleri hesaplanarak araştırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında değerlendirilecek seçilen ve ölçeklenen 7 adet deprem kaydı ile ilgili bilgiler Tablo 3’de verilmiştir. Ayrıca seçilen depremlerin fiziksel özelliklerini gösteren bilgiler de Tablo 4’de verilmiştir.

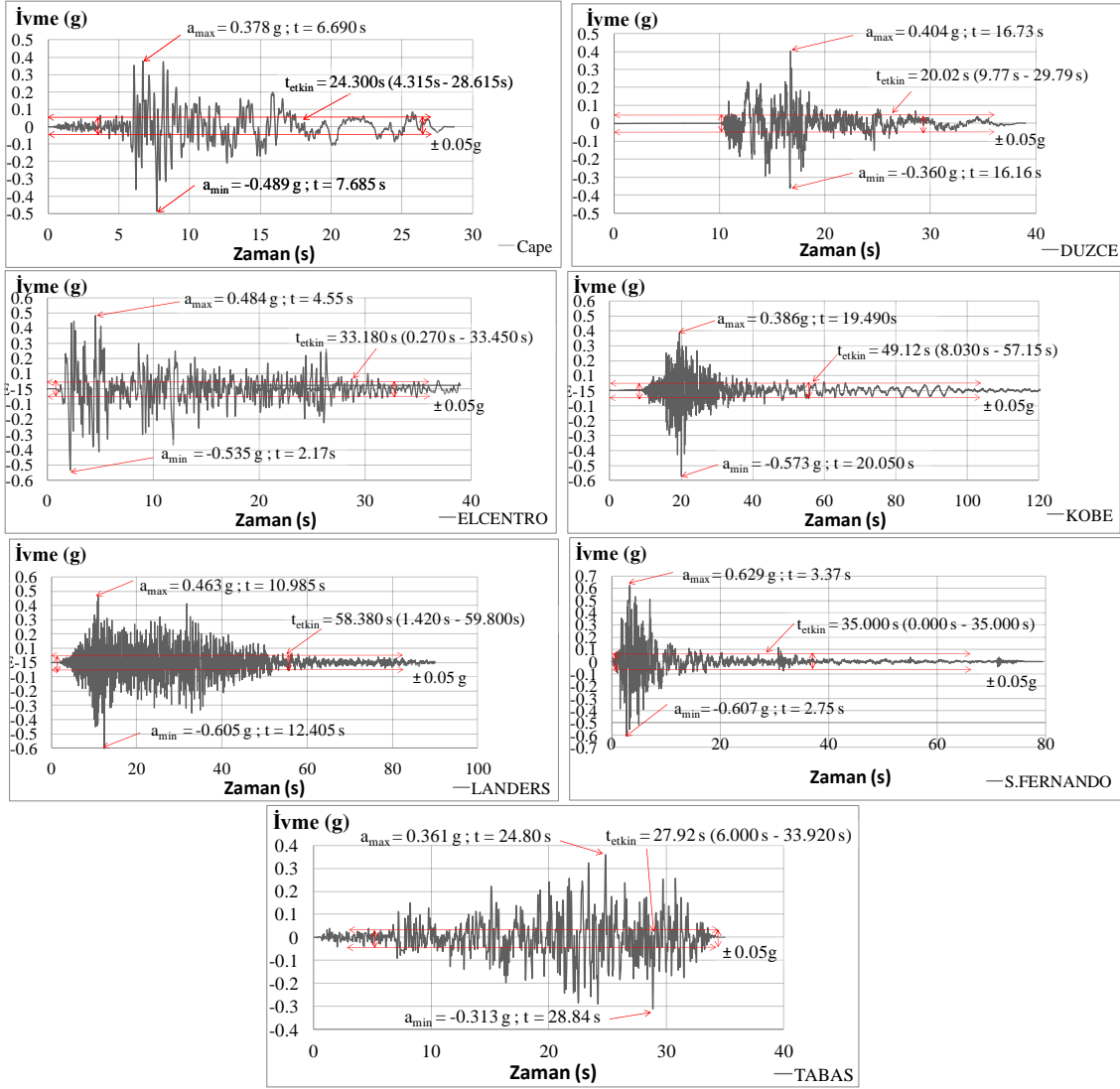
Tablo 3. Analizler İçin Seçilmiş ve Ölçeklenmiş Deprem Kayıtları

Deprem	Yıl	İstasyon	Sıra Numarası	MSE	f
San Fernando	1971	LA-Holloywood Stor FF	68	0.0201	2.7997
Tabas	1978	Boshrooyeh	138	0.0379	3.4231
Cape Mendocino	1992	Loleta Fire Station	3750	0.0257	1.8413
Landers	1992	Mission Creek Fault	880	0.0382	4.7955
Düzce	1999	Lamont 1058	1611	0.0508	3.7665
ElCentro	1940	Imperial Valley-02	6	0.1529	1.9052
Kobe	1995	Abeno	1100	0.0318	2.5979

Tablo 4. Analizler İçin Seçilmiş ve Ölçeklenmiş Deprem Kayıtlarının Fiziksel Özellikleri

Deprem	Büyükölük	Fay Mekanizması	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/s)
San Fernando	6.61	Ters Vevvli	22.77	22.77	316.46
Tabas	7.35	Ters Vevvli	24.07	28.79	324.57
Cape Mendocino	7.01	Ters Vevvli	23.46	25.91	515.65
Landers	7.28	Yanal Atılımlı	26.96	26.96	355.42
Düzce	7.14	Yanal Atılımlı	0.21	0.21	529.18
ElCentro	6.95	Yanal Atılımlı	6.09	6.09	213.44
Kobe	6.90	Yanal Atılımlı	24.85	24.85	256.00

Seçilen kayıtların DBYBHY şartlarına uygun olup olmadıklarını kontrol etmeden önce bu kayıtların ölçeklenmiş hallerine filtreleme ve düzeltme işlemleri uygulanmıştır. Daha sonra bu kayıtların DBYBHY’de belirtilen şartları sağlayıp sağlamadıkları irdelenmiştir. Tablo 5’te seçilen kayıtların etkin süreleri ve maksimum ivme, hız ve yerdeğıştirme değeri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2’de ölçeklenmiş kayıtların kuvvetli yer hareketi süreleri ve maksimum ivme değeri gösterilmiştir. Depremi etkin süresi, fay kırığının yüzey boyunca yayılması için gereken süre ile ilişkilidir. Bu araştırmada deprem kayıtlarının etkin süresini belirlemek için “Zarf süre (Bracketed Duration)” ile hesaplama yapılmıştır. Zarf süre bulunurken ölçeklenmiş ivme değeri kullanılmıştır. “Zarf süre (Bracketed Duration)” belirli bir eşik ivme değeri (genellikle 0.05) ilk ve son aşılması arasındaki geçen süre olarak tanımlanır (Fajhan, 2008).



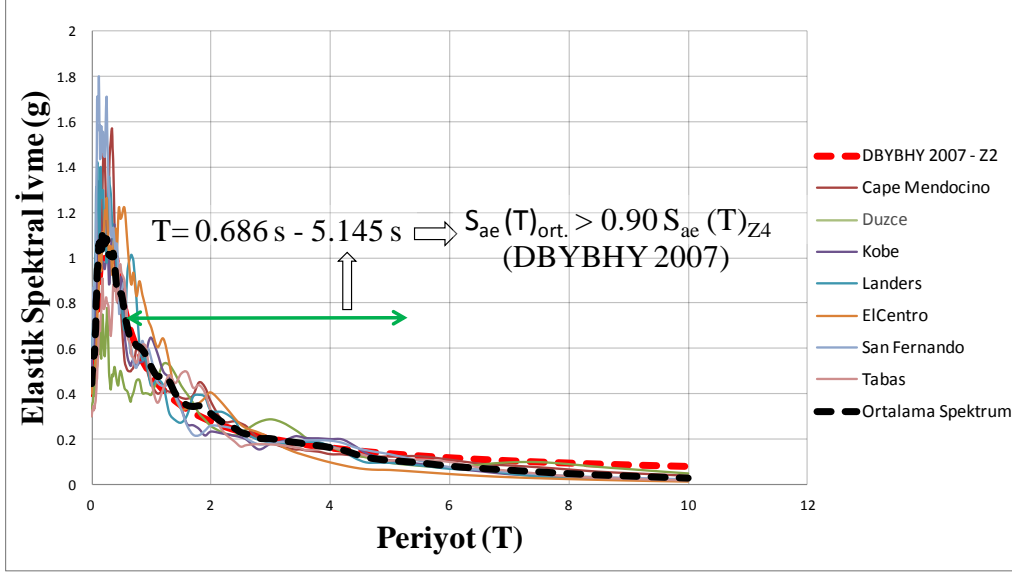
Şekil 2. Ölçeklenmiş kayıtların etkin süreleri ve maksimum ivme değerleri

Tablo 5'te de görüldüğü gibi kuvvetli yer hareketinin süresi bütün kayıtlar için DBYBHY, 2007 de öngörülen 5T1 ve 15 saniyeden daha büyüktür. Sıfır periyoda karşılık gelen maksimum yer hareketi ivme değerlerinin ortalaması ise 0.444 bulunmuştur. Bu çalışma kapsamında referans alınan etkin yer ivme katsayısı DBYBHY de belirtilmiş olduğu şekilde 1. derece deprem bölgeleri için verilen 0.4 değeridir. Burada yönetmelik gereği seçilen kayıtların sağlaması gereken bir diğer koşul da $0.444 > 0.40$ un görülmesiyle onaylanmış olmaktadır.

Tablo 5. Ölçeklenmiş İvme – Hız Deplasman Kayıtları

Deprem	Etkin Süre (t)	Mak. İvme (g)	Mak. Hız (cm/s)	Mak. Yer Değ.
San Fernando	35.000	0.6293	60.8253	35.8216
Tabas	27.920	0.3612	45.5089	25.8006
Cape Mendocino	24.300	0.3781	52.5158	53.6974
Landers	58.380	0.4628	29.6756	9.8305
Düzce	20.020	0.4039	59.5522	32.7758
ElCentro	33.180	0.4841	47.9439	11.8388
Kobe	49.120	0.3862	55.1723	20.5126

DBYBHY ne göre, ölçeklendirilmiş her bir ivme kaydının %5 sönüm oranı için yeniden bulunacak spektral ivme değerlerinin ortalamasının ilgili periyotlar için, $S_{ae}(T)$ elastik spektral ivmelerinin % 90'ından daha az olmaması gerekmektedir. Yönetmelikteki bu şartın $0.2T_1$ ile $2T_1$ arasında olması yeterliliği göz önünde bulundurularak, bu çalışma için ele alınan çok katlı çelik yapının birinci etkin periyodu ile bulunan 0.686 ile 5.145 saniyeleri arasında bütün periyotlarda bu şart sağlanmıştır (Şekil 3).



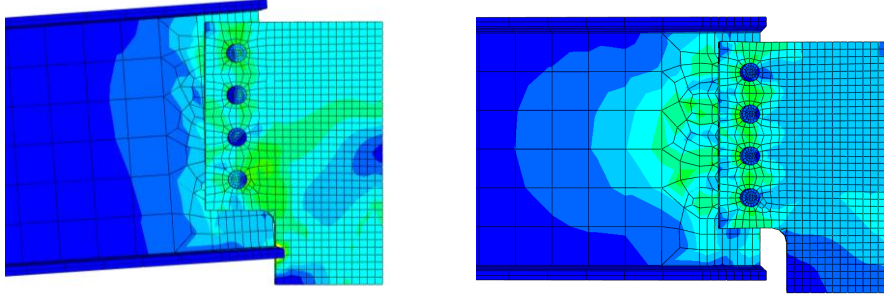
Şekil 3. Elastik spektral ivme spektrumu

Bu çalışmada zaman tanım alanında doğrusal elastik analiz yapılması amaçlandığı için, yönetmelikte kullanılması öngörülen taşıyıcı sistem davranış katsayısı R çelik binalarda çaprazların merkezi ve dışmerkez olması durumları ve süneklik düzeyi normal sistemler başlıkları dikkate alınarak 5 olarak kabul edilmiştir. Bu değer analiz sırasında I/R şeklinde deprem kayıtlarına ivme çarpanı olarak etki edilmiştir. Buradaki I, DBYBHY tarafından belirlenen bina önem katsayısıdır. Bu araştırma çerçevesindeki mevcut bina önem katsayısı yönetmeliğe göre $I=1$ olarak seçilmiştir.

BAĞLANTI DETAYLARI

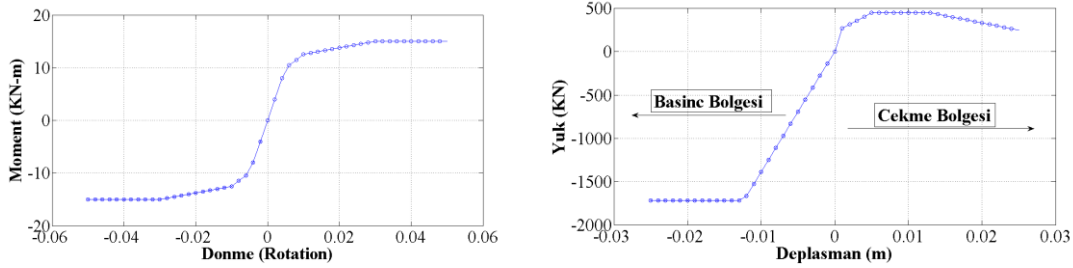
Pratik kullanımda yapılan analizlerde geleneksel olarak tamamen rijit ve mafsallı birleşimler kullanılırken, aslında gerçekte bağlantı noktaları hiçbir zaman tam rijit yada mafsallı değildir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda her türlü birleşim detayının yükler ve momentler altında deformasyonlar yaptığını ve bunların arasında en baskın deformasyon türünün eğilme bozukluklarının olduğu saptanmıştır. Çelik yapılardaki eleman bazında yapılan incelemelerde genellikle sünek deformasyonlarla karşılaşılırken, bu durum bağlantı noktaları için çoğunlukla gevrek kırılmalar şeklinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, tasarımlarda bağlantı noktalarındaki kapasitelerin eleman akma kapasitelerine oranla daha fazla olmasına dikkat edilir. Bağlantı noktalarında meydana gelen deformasyonlar sistemin global davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Örnek modelde kullanılan yarı rijit (kesme) birleşimin rijitliği Şekil 4'de gösterilen üç boyutlu sonlu eleman modeli ile belirlenmiştir. Bu model hem çekme kuvvetine hem de momente ayrı olarak maruz bırakılmış ve dayanımı hesap edilmiştir. Bağlantı modelinin dayanım hesapları ABAQUS programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4 te de görüldüğü gibi kiriş üzerindeki yük arttıkça bağlantı bölgesinde oluşan deformasyon nedeniyle kiriş alt başlığı ve gövdesi belirli bir süre sonra alt kısımda kolon birleşim levhasına değmekte ve bu aşamadan sonra birleşim moment taşımaya başlamaktadır.

Bu bölgenin ve birleşim elemanlarının kapasitelerine göre bir süre daha sistem çalışmakta ve ardından kalıcı deformasyonlar görülmektedir. Birleşim bölgesinin burada örneklendiği gibi olması gereken gerçek davranışı geleneksel yöntemlerde göz ardı edilmektedir.



Şekil 4. Birleşim bölgesi (kesme bağlantı) üç boyutlu sonlu eleman modelinin (a) çekmeye karşı ve (b) momente karşı deformasyonu

Bağlantı bölgesindeki doğrusal olmayan davranışta, basınç ve çekme bölgeleri birbirinden bağımsız olarak tanımlanan malzeme modeli paralelinde davranış göstermektedir. Yayların tanımlanmasında malzeme modeli olarak “UniaxialMaterial ElasticMultilinear” modeli kullanılmıştır. Bu modelde, doğrusal olmayan yük deplasman ilişkisi ele alınmaktadır. Model bünyesindeki davranış doğrusal olmayan elastik bir davranıştır. Bunun anlamı, malzeme yüklenme ve yükün kaldırılması (load-unload) durumlarında aynı eğri üzerinde hareket gösterecek ve herhangi bir enerji kaybı olmayacaktır. Bu sayede bağlantı bölgesinin akmaya uğrayıp (damage) plastikleşmesi hesaba katılmamıştır. Kolon ve kiriş elemanlarının uç noktalarının arasına program veritabanından “Zerolength Element” adlı eleman atanmıştır. Daha önce mafsallı olarak tanımlanmış ve ilgili doğrultulardaki serbestlik dereceleri boş bırakılmış birleşim noktalarının, yeni yaklaşımda bütün serbestlik dereceleri dikkate alınmıştır. Bu sayede moment almayan kesme bağlantılarına kısmi rijitlikler verilmiş ve kayma davranışının yanı sıra kısmi moment kapasitesi eklenmiştir. Netice itibarıyla aslında mafsallı olarak tanımlanan bağlantı noktalarının gerçek davranışları altında analiz yapılmak istenmiştir. Yayların temsil ettiği doğrusal olmayan davranışların dayanım-deformasyon grafikleri Şekil 5’de verilmiştir.

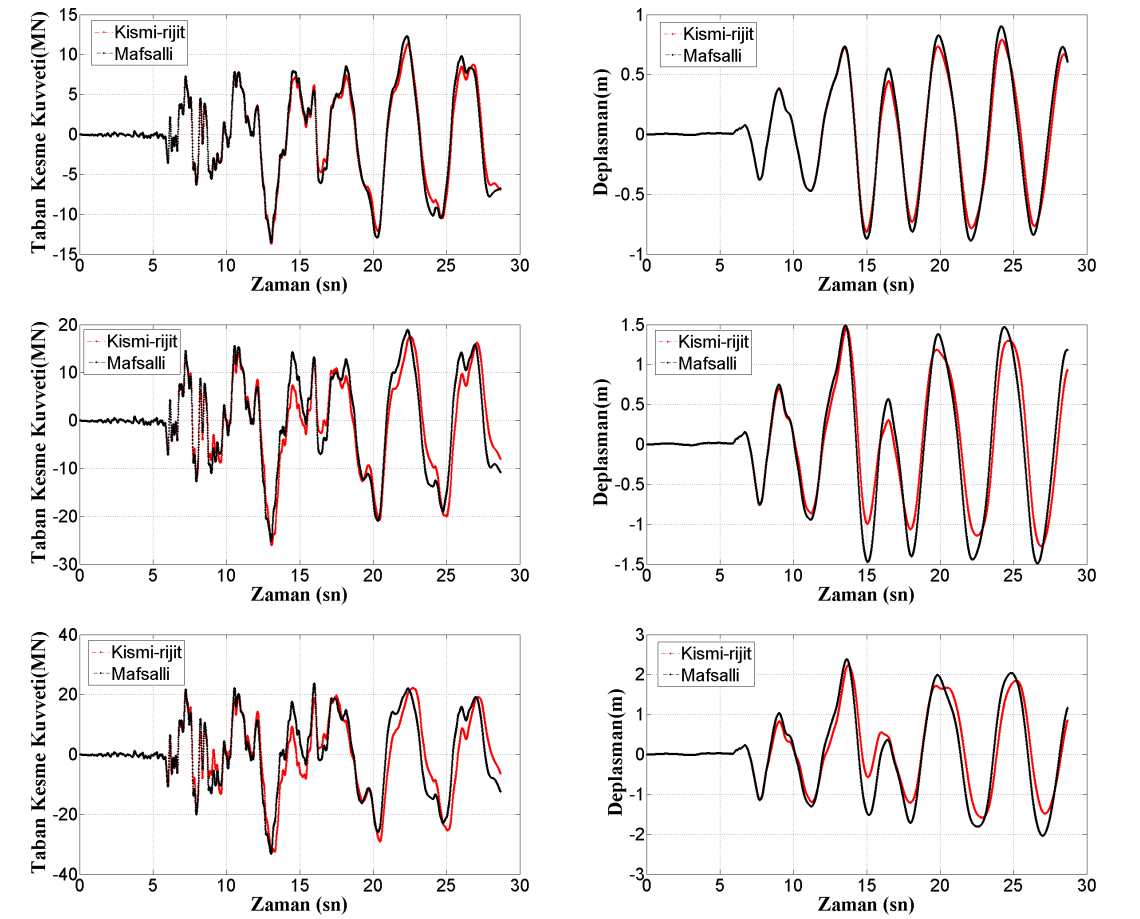


Şekil 5. Bağlantı bölgelerinin kısmi rijitlik sağlayan dayanım-deformasyon eğrileri

Sonuç olarak, Minas ve Charis (2009), Silva ve Coelho (2001), Huber ve Tschemmernegg (1998), Block vd. (2007), Warmka ve Truman (2000), Tagawa ve Gurel (2005), Zhu vd. (1995) çalışmalarında detaylı bir şekilde irdelenen rijit birleşimlerin yarı rijit hale getirilmesiyle elde edilen tepkilere paralel olarak, kesme bağlantılarının çevrimsel davranışlarının da kısmi rijitlik verilerek sismik hareketler altındaki tepkileri olumlu yönde etkilemesi beklenmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmaya konu olan 28 katlı çelik yapıda kullanılan ikincil kirişler sisteme mafsallı olarak bağlanmışlardır. Bunun nedeni, bu kirişlerin sadece döşemelerden aldıkları yükleri ana kirişlere aktarmasının ve bunun yanında bu kirişlerin yüksek moment değerleri alarak deformasyona uğramamasının istenmesidir. Bu çalışma kapsamında ikincil kirişlerin mafsallı olarak modellenen bağlantı bölgelerinin daha gerçekçi bir davranışla performans göstermesi için yarı rijit birleşim bölgesi yaklaşımı uygulanmıştır. Bu sayede belirli kapasiteye ulaşmış bağlantı detayının absorbe ettiği kısmi moment miktarları da göz önünde bulundurulmuş ve bu yaklaşımın sistemin genel davranışı ve performansı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Performans değerlendirmesi kapsamında, binanın tabanında oluşan taban kesme kuvveti, katlar arasındaki göreceli öteleme oranları, referans olarak belirlenen elemanlar üzerindeki gerilme ve moment değişimleri irdelenmiştir. Bunların yanında, bağlantı detayının değiştirilmesiyle, modal analiz sonucunda elde edilen periyot değerlerindeki değişim de incelenmiştir. Bu parametreler çerçevesinde elde edilen sonuçlar yorumlanırken Tablo 6’da rijit ve yarı rijit olarak modellenmiş sistemlerin ilk periyotları karşılaştırılmış ve ikincil kirişlerin bağlantı bölgesindeki değişikliklerin modal analiz sonucunda kayda değer bir değişim meydana getirmediği gözlenmiştir. Bunun yanında, Şekil 6 ve Şekil 7 de geleneksel mafsallı bağlantı detaylı ve yeniden modifiye edilmiş bağlantı kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen toplam taban kesme kuvveti grafikleri, tepe noktası deplasman grafikleri ve göreceli kat ötelemeleri oranları karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. Kismi-rijit ve Mafsallı Bağlantı Modelleri a) Taban Kesme Kuvveti Karşılaştırması b) Tepe Noktası Deplasman Karşılaştırması (Deprem kuvvetleri sırasıyla artırılmıştır)

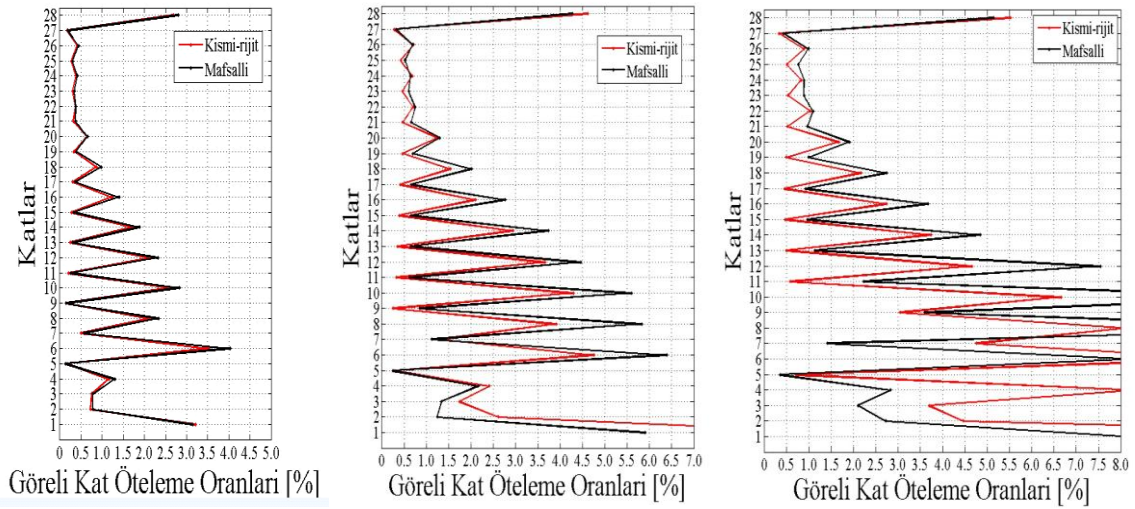
İkincil kirişlerin bağlantı noktalarında ise, yapılan değişiklikler sonucunda, sistemin genel davranışına nasıl etki ettiği irdelenmiş ve yarı rijit bağlantılar binaya eklendiğinde,

deprem yükü artırılrsa bile taban kesme kuvvetlerinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yarı rijit bağlantıların binanın ağırlığına ya da rijitlik matrisine katkı sağlamamaları ile açıklanabilir.

Tablo 6. Rijit ve Yarı-rijit Bağlantılı Hazırlanan Modellerin İlk Üç Periyodu (T)

	Rijit	Yarı-Rijit
T_1 (x yönünde)	4.9056	4.9047
T_2 (y yönünde)	4.3397	4.3002
T_3 (burulma)	1.7695	1.7692

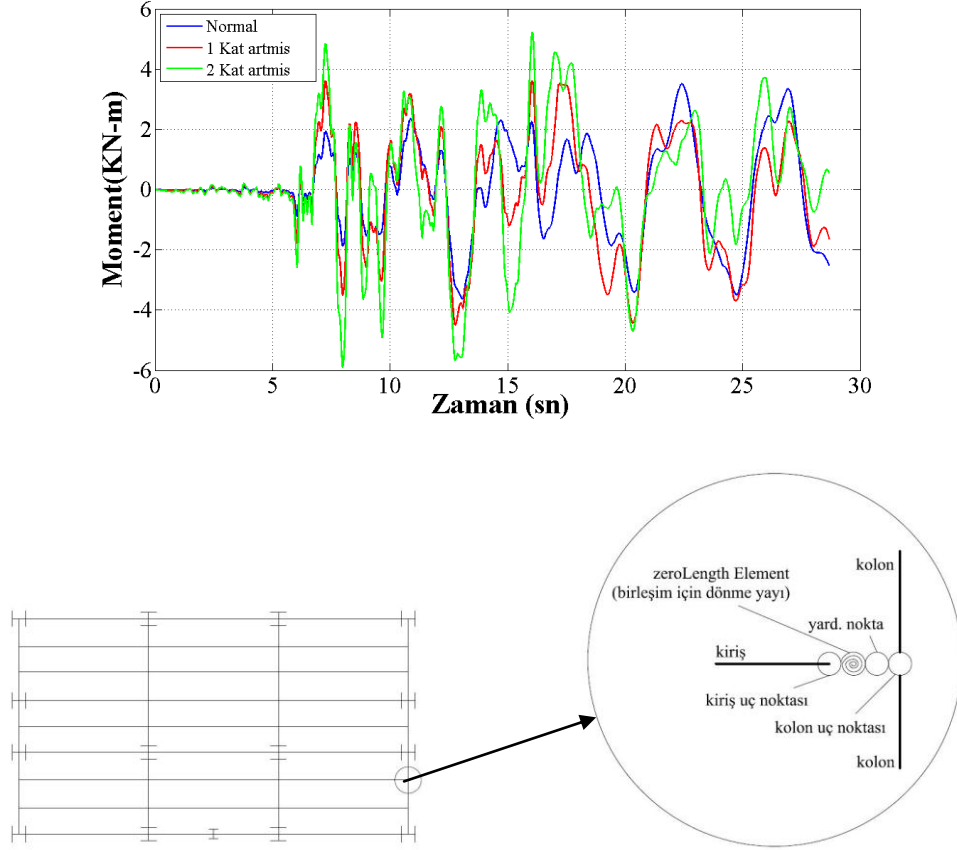
Kat ötelemesinde ise deprem yükü arttıkça büyük farklar elde edilmektedir. Mafsallı yerine yarı rijit bağlantı kullanmak binanın ikincil kirişlerinin moment taşımalarını sağlamakta, bu sayede ikincil kirişlerde yatay deplasmanın karşılanmasında sistem davranışına dahil olmakta ve böylece binadaki ötelemeleri azaltmaktadır. Bu çalışma çerçevesinde yapının performansını değerlendirmede seyrek depremler için Can Güvenliği (CG) (tasarım depremi) ve çok seyrek depremler için Göçmenin önlenmesi (GÖ) (maksimum deprem) performans seviyeleri kriter olarak kullanılmaktadır. Bu kriterler, kat öteleme sınırı başlığı altında CG performans seviyesi %2.5 ve GÖ performans seviyesi %5 olarak alınmıştır (FEMA 356). Örnek yapının davranışı kabul edilebilirlik çerçevesinde incelendiğinde her iki tip modelde de normal deprem altında maksimum deprem performans seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Deprem kuvvetlerinin arttırılmasıyla bina göçme modu sınırlarını aşmakta ve kalıcı deformasyonlara uğramaktadır. Bunun neticesinde elde edilen sonuçlarda farklılıklara rastlanabilmektedir. Binanın ilk katlarında yoğun şekilde deprem çaprazları kullanıldığı için ve üst katlarında enerji sönümlenmesi yaşandığı için orta katlara nazaran katlar arasında daha az öteleme görülmektedir.



Şekil 7. Kısmi-rijit ve Mafsallı Bağlantı Modelleri Göreli Kat Ötelemeleri Karşılaştırması (Deprem kuvvetleri sırasıyla arttırılmıştır)

Tepe noktası deplasman değerleri incelendiğinde ise normal şartlarda çok yüksek farklılıklara rastlanmasada deprem kuvvetinin arttırılması neticesinde oluşan farklılığın oldukça arttığı gözlenmiştir. Bu durum, tahrip edici deprem koşulları altında kısmi-rijit olarak modellenmiş binada oluşan deformasyon, eleman bazında meydana gelen akmaların daha uzun sürede meydana gelmesiyle açıklanabilir. Oluşan deprem altında en fazla gerilme ve moment değerlerine maruz kalan kolon elemanları üzerindeki gerilme değerleri incelendiğinde ise başlangıçta az görünse bile deprem kuvvetlerinin arttırılmasıyla oluşan farklılığın kayda değer olduğu gözlemlenmiştir. Kolonlar üzerindeki gerilme değerleri kısmi rijit modellenmiş sistemde daha azalmış olarak görülmüştür. Sistemdeki bağlantı noktalarını yarı rijit yapabilmek için

kullanılan zeroLength elemanların yerleştirildiği noktalar arasında yapılan incelemelerde, deprem kuvveti arttırıldıkça, bağlantı bölgesinin sünek bir davranış gösterdiği farkedilmiştir. Artan yatay yer hareketleriyle birleşim bölgesi daha fazla moment alabilmiş ve kapasitesi ölçüsünde sisteme yatay yönde direnç sağlamıştır (Şekil 8). Yapının eleman bazında global performası gözden geçirildiğinde normal deprem koşullarında kalıcı deformasyona uğramış elemana rastlanmamıştır. Gözden geçirilen adımlarda yapının kolon,kiriş ve bağlantı bölgeleri incelenmiş ve herhangi bir kapasite kaybına rastlanmamıştır. Ancak iki farklı bağlantı modeli ile hazırlanan sistemler arasında mertebe farklılıkları meydana gelmiştir. Deprem kuvvetleri arttırıldığında ise kademeli olarak en çok kuvvet alan elemanlar üzerinde kalıcı deformasyonlara rastlanmıştır ve bu durumun analiz sonuçlarına etki ettiği gözlenmiştir.



Şekil 8. Kısmi-rijit Bağlantılarındaki Zerolength Element Üzerindeki Moment Değişimleri

Elde edilen sonuçlar, analizde kullanılan çerçeve sisteme ve bağlantı modellerine özgü olup, bu sonuçların genellenmesi ve uygulamaya yansıtılabilmesi için farklı modeller üzerinde de incelemeler yapılması ve fiziksel testlerle elde edilen sonuçların doğrulanması gerekmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, Marie Curie IIF Projesi (no: 58000158), Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP 7122P) ve TÜBİTAK 3001 Projesine (no: 114M791), bu çalışmaya desteklerinden dolayı teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

- Aksoylar ND, Elnashai Amr S, Öztürk AZ (2013) Yari rijit birleşimli çelik çerçevelerin kat öteleme ve birleşim dönmelerinin incelenmesi, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 398, 6351-6377
- Anil K Chopra (1995) Dynamics of structures- the theory and applications to earthquake engineering, University of California at Berkeley
- Arnold C (2006) Deprem yapılar üzerindeki etkisi, Fema 454 Designing for Earthquakes A manual for Architects, pg: 111-137
- Asgarian B, Moradi S (2011) Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces, *Journal Of Construction Steel Research*, 67, 65-74
- American Institute of Steel Construction, Inc., Seismic provisions for structural steel buildings, AISC 341S1-05, 2005
- American Society of Civil Engineers, Minimum design loads for building and other structures, ASCE SEI 7-05, 2006
- Awkar JC, Lui EM (1999) Seismic analysis and response of multistory semirigid frames, *Engineering Structures* 21 425-441,
- Block FM, Burgess IW, Davison JB, Plank RJ (2007) The development of a component-based connection element for endplate connections in fire, *Fire Safety Journal* 42, 498-506
- Berkeley (2005) SAP2000, Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc., California
- Berkeley (20..) ETABS,
- Cuthill E, Mckee J (1969) Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices, *ACM '69 Proceeding of the 1969 24th national conference*, pp.157-172
- Degertekin SO, Hayalioglu MS (2004) Design of non-linear semi rigid steel frames with semi rigid column bases, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 4
- DBYBHY (2007) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik,
- Dutta A, Hamburger RO (2010) Case study of a 40-storey buckling-restrained braced frame building located in Los Angeles, *The Structural Design Of Tall and Special Buildings*, Wiley Interscience, 19, 77-93
- Eurocode BS EN1993-1-8 (2005) Design of steel structures- part 1-8: Design of joints, CEN, European committee for standardization, Brussels, Belgium
- Eurocode EN 1998-1 (2004) Design of structures for earthquake resistance-part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium,
- Fahjan YM (2008) Türkiye deprem yönetmeliği (DBYBHY,2007) tasarım ivme spektrumuna uygun gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklenmesi, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 292, 4423-4444
- FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency), Prestandart and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Washington D.C, 2000
- Huber G, Tschemmernegg F (1998) Modeling of beam to column joints, *Journal of Construction Steel Research* Vol.45, No.2, pp. 199-216
- Krishnan S, Chen Ji, Komatitsch D, Tromp J (2006) Case study of damage to tall steel moment frame buildings in Southern California during large San Andreas Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 4A, pp. 1523-1537, August, doi: 10.1785/0120050145
- Liu J, Astaneh-Asl A (2000) Seismic behavior and desing of steel shear connections with floor slabs, *12th, World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*
- Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL (2006) The open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES) user command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Uni. Calif. Berkeley, CA, (<http://opensees.berkeley.edu>)
- Minas EL, Charis JG (2009) Mechanical modeling of the nonlinear response of beam to column joints, *Journal of Construction Steel Research* 65, 879-890
- Muto M, Krishnan S, Response of tall steel buildings in Southern California to the magnitude 7.8 shakeout scenario earthquake, *Inaugural International Conference of the Engineering Mechanics Institute*,
- PEER Strong Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center California (<http://peer.berkeley.edu/smcat>), 2007

- PEER, Caltrans, CGS (2010) Technical Report for the Peer Ground Motion Database Web Application, Beta Version
- PEER, Caltrans, CGS (2010) User Manual for the Peer Ground Motion Database Web Application, Beta Version
- Silva LS, Coelho AG (2001) A ductility model for steel connections, *Journal of Constructional Steel Research* 57, 45-70
- Tagawa H, Gurel S (2005) Application of steel channels as stiffeners in bolted moment connections, *Journal of Constructional Steel Research* 61, 1650-1671
- Warmka GR, Truman KZ (2000) Improving the performance of steel beam-column moment resistant connections, *12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*
- Zhu K, Al-Bermani FGA, Kitipornchai S, Li B (1995) Dynamic response of flexibly jointed frames, *Engineering Structures, Vol.17, No.8, pp.575-580*