



Çelik Yapılarda Yarı-Rijit Bağlantıların Doğrusal Olmayan Davranışının Modellenmesi ve Üç Boyutlu Yapısal Çözümlemelere Olan Etkisinin Araştırılması

Program Kodu: 1001

Proje No: 113M223

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Afşin SARITAŞ

Bursiyerler:

Halil Fırat ÖZEL (Doktora Öğrencisi)

Zafer KARAKAŞ (Yüksek Lisans Öğrencisi)

Tayseer TASBAHJI (Lisans Öğrencisi)

KASIM 2016

ANKARA

İÇİNDEKİLER

Özet	1
Abstract	2
1. Önsöz	3
2. Literatür Özeti	6
2.1. Çerçeve Elemanı Türetimleri	7
2.2. Yarı-Rijit Bağlantılar	10
2.2.1. Kolon-Kiriş Bağlantıları	10
2.2.2. Kolon Taban Bağlantıları	11
2.2.3. Guse Levha Bağlantıları	12
3. Yarı Rijit Bağlantılı Çerçeve Elemanı	13
3.1. Timoşenko Kirişi Teorisi ve Eleman Temel Denklemleri	13
3.2. Sonlu Eleman Formülasyonu	16
3.3. Kesit Tepkisi	18
3.4. Tutarlı Kütle Matrisi	19
3.5. Çerçeve Elemanın Sonlu Elemanlar Programında Çalıştırılması	20
3.6. Doğrusal Olmayan Geometrik Etkiler	24
3.7. Özet: Geliştirilen Yarı-Rijit Bağlantı Çerçeve Elemanı Özellikleri	27
4. Yarı-Rijit Bağlantı Modellemeleri	29
4.1. Monotonik Davranış için Modeller	29
4.2. Çevrimsel Davranış için Modeller	30
4.3. Çevrimsel Davranış için Model Türetimi	31
4.4. Çevrimsel Davranış için Türetilen Modelin Doğrulaması	33
5. Statik Yükler Altında Karşılaştırmalar	39
5.1. Sayısal Karşılaştırmalar ve Doğrulamalar:	39
5.1.1. Doğrusal Elastik Davranışın İncelenmesi	39
5.1.2. Yarı-Rijit Bağlantı Sayısının Artırılması	40
5.1.3. Doğrusal Olmayan Davranışın Yakalanması – İki Ucu Ankastre Kiriş	42
5.1.4. Üç Boyutlu Davranışın Başka Programlarla Karşılaştırılması ve Doğrulaması	43
5.2. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırmalar	46
5.2.1. Vatansver ve Yardımcı'nın Deneyi ile Karşılaştırma	46
5.2.2. Vogel Portal Çerçevesi ile Karşılaştırma	47
5.2.3. Vogel Portal Çerçevesinde Yarı-Rijit Bağlantıların Sistem Etkisi	51

5.2.4.	Stelmack Deneyi ile Karşılaştırma	53
5.2.5.	Vogel'in Çok Katlı ve Açıklı Çerçevesi ile Karşılaştırma	54
5.3.	Guse Levhalardaki Yarı-Rijit Bağlantıların Yapı Davranışına Etkisi	56
6.	Titreşim Davranışı Altında Karşılaştırmalar	60
6.1.	Rijit Bağlantılı Ankastre Kiriş	60
6.2.	Yarı-Rijit Bağlantılı Ankastre Kiriş	63
6.3.	Yarı-Rijit Bağlantılı Portal Çerçeve	66
6.4.	Çok Katlı ve Açıklıklı Yarı-Rijit Bağlantılı Çerçeve	67
6.5.	Kolon Taban Yarı-Rijit Bağlantısının Etkileri	70
6.6.	Guse Levhalar için Eksenel Davranışın Yapı Titreşimine Etkisi	71
7.	Parametrik Analizler	73
7.1.	İncelenen Binaların Tanıtımı	73
7.2.	İncelenen Binalarda Yarı-Rijit Bağlantıların Etkisi	78
8.	Sonuçlar	82
8.1.	Sonuç	82
8.2.	Öneriler	85
8.3.	Sonsöz	86
9.	Referanslar	87

ŞEKİLLER

Şekil 1. Asıl sistem kuvvetleri ve deformasyonları	14
Şekil 2. Eleman deplasmanlarının bütünden asıl sisteme dönüştürülmesi	22
Şekil 3. Büyük deplasmanlar altında çerçeve elemanındaki deformasyonlar	25
Şekil 4. Deforme olmuş kiriş üstündeki denge durumu	26
Şekil 5. Geliştirilen modelin tasviri davranışı - I	32
Şekil 6. Geliştirilen modelin tasviri davranışı - II	33
Şekil 7. Abolmaali vd.'nin deneylerini yürüttüğü çift gövde bağlantılar a) bulonlu-bulonlu tipte, b) kaynaklı-bulonlu tipte	34
Şekil 8. Abolmaali vd.'nin bulonlu-bulonlu deneyleri ile karşılaştırma	35
Şekil 9. Abolmaali vd.'nin kaynaklı-bulonlu deneyleri ile karşılaştırma	36
Şekil 10. Komuro vd.'nin deneyleri: a) kiriş alt ve üst flanjlardan bağlantılı; b) ve c) kiriş alt ve üst flanjlardan ve çift gövde bağlantılı	36
Şekil 11. Komuro vd.'nin deneyleri ile karşılaştırma	37
Şekil 12. Geliştirilen modelin Bernuzzi vd.'nin [71] floş uç plakayla bağlantılı deneyleriyle karşılaştırılması	38
Şekil 13. Yarı-rijit bağlantı rijitliğinin değişmesi sonucu mesnette ve kiriş ortasında oluşan moment değerleri	40
Şekil 14. Yarı-rijit bağlantı sayısını artırarak ankastre kolonun eğilme davranışının yakalanması	41
Şekil 15. Yarı-rijit bağlantılı çerçeve modeli içinde oluşan plastikleşme	42
Şekil 16. Üç boyutlu portal çerçeve	43
Şekil 17. Doğrusal olmayan malzeme ve doğrusal elastik bağlantı durumu	45
Şekil 18. Doğrusal olmayan malzeme ve doğrusal olmayan bağlantı durumu	45
Şekil 19. Bağlantı rijitliğinin üç boyutlu çerçeve yapının davranışına olan etkisi	46
Şekil 20. Vatansever ve Yardımcı'nın yarı-rijit bağlantılı çerçeve deneyi	46
Şekil 21. Vatansever ve Yardımcı'nın yarı-rijit bağlantılı çerçevesiyle karşılaştırma	47
Şekil 22. Vogel portal çerçevesi	48
Şekil 23. Vogel portal çerçevesinin analizi ve karşılaştırması	49
Şekil 24. Tek katlı ve açıklıklı çelik çerçeve örneğinde histeretik davranışın önemi	51
Şekil 25. Kirişin sol ucundaki yarı-rijit bağlantının tepkisi ile kiriş ucunda oluşan doğrusal olmayan tepkinin farklı yarı-rijit bağlantı durumları için karşılaştırılması	52
Şekil 26. Yarı-rijit bağlantı ve yapının toplamında emilen enerjinin karşılaştırılması	52
Şekil 27. Stelmack'ın yarı-rijit bağlantılı çerçeve deneyi	53

Şekil 28. Stelmack'ın yarı-rijit bağlantılı çerçeve deneyi ile karşılaştırma	53
Şekil 29. Vogel'in 6 katlı ve 2 açıklıklı ve yarı-rijit bağlantılı çerçeve örneği	54
Şekil 30. Vogel'in 6 katlı ve 2 açıklıklı çerçevesinde rijit bağlantı tepkisi karşılaştırmaları	55
Şekil 31. Vogel'in 6 katlı ve 2 açıklıklı çerçevesinde yarı-rijit bağlantı tepkisi karşılaştırmaları (Geliştirilen Model Tepkisi (--), Nguyen ve Kim (--), Chan ve Chui (:))	56
Şekil 32. Statik itme yükünün profile – birinci moda göre	57
Şekil 33. Normalize taban kesme kuvvetinin çatı deplasman oranına göre değişimi: 3-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve	58
Şekil 34. Katlar arası görece deplasman: 3-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve	58
Şekil 35. Normalize taban kesme kuvvetinin çatı deplasman oranına göre değişimi: 9-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve	59
Şekil 36. Katlar arası görece deplasman: 9-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve	59
Şekil 37. Karşılaştırmalarda dikkate alınan Avrupa I-kesitleri (boyutlar mm'dir)	61
Şekil 38. Karşılaştırmalarda dikkate alınan Amerikan I-kesitleri (boyutlar mm'dir)	61
Şekil 39. ANSYS'teki temsili modelin görüntüsü	62
Şekil 40. Avrupa I-kesitleri için karşılaştırma	63
Şekil 41. Amerikan I-kesitleri için karşılaştırma	63
Şekil 42. Görece hata (%)'nin eleman sayısına göre değişimi, $L/d = 2$	64
Şekil 43. Görece hata (%)'nin eleman sayısına göre değişimi, $L/d = 5$	65
Şekil 44. Görece hata (%)'nin eleman sayısına göre değişimi, $L/d = 10$	65
Şekil 45. Portal çerçeve [85]'de birinci titreşim frekansının bağlantının değişen rijitliği altındaki değişimi	66
Şekil 46. Çok katlı ve açıklıklı çelik çerçeve yapı [85]	68
Şekil 47. Çok katlı açıklıklı yapıda [85] birinci titreşim frekansının değişen bağlantı rijitliği altında değişimi ve karşılaştırılması	69
Şekil 48. Çok katlı açıklıklı yapıda [85] ikinci titreşim frekansının değişen bağlantı rijitliği altında değişimi ve karşılaştırılması	69
Şekil 49. Çok katlı açıklıklı yapıda [85] üçüncü titreşim frekansının değişen bağlantı rijitliği altında değişimi ve karşılaştırılması	70
Şekil 50. Çok katlı yapıda [85] kolon taban bağlantısı ve kolon-kiriş bağlantılarında mevcut olan yarı-rijit davranışın birinci titreşim frekansına olan etkisi	71
Şekil 51. Portal Çaprazların ucunda guse levhanın bulunduğu portal çerçeve	72
Şekil 52. Portal çerçevede çaprazların ucunda guse levhalarda eksenel deformasyonun bulunmasının yapı titreşime etkisi	72

Şekil 53. Çok katlı özel moment aktaran çelik çerçeve yapının plan görüntüsü (Northridge Depremi sonrası için tavsiye edilmiştir)	74
Şekil 54. Yarı-rijit bağlantının varsayılan davranışı	76
Şekil 55. Alt limit tasarım binada (W14 kolonlu) oluşan etkiler	79
Şekil 56. Üst limit tasarım binada (W36 kolonlu) oluşan etkiler	80

TABLULAR

Tablo 1. Geliştirilen yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanları ve özellikleri.....	28
Tablo 2. Vogel portal çerçevesinin analizi karşılaştırmaları.....	50
Tablo 3. 3-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve yapının özellikleri.....	57
Tablo 4. 9-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve yapının özellikleri.....	57
Tablo 5. Alt limit tasarım binanın özellikleri.....	75
Tablo 6. Üst limit tasarım binanın özellikleri.....	75
Tablo 7. Kesit özellikleri (1 in = 2.54 cm'dir).....	76
Tablo 8. Los Angeles (LA) Deprem Kayıtları 50 yılda %10 aşılma olasılığı seviyesi.....	77
Tablo 9. Los Angeles (LA) Deprem Kayıtları 50 yılda %2 aşılma olasılığı seviyesi.....	78



ÖZET

Bu proje kapsamında, yarı-rijit bağlantılı çelik çerçeve yapı sistemlerinde, doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yürütülebilmesi için bir çerçeve elemanı geliştirilmiştir. Geliştirilen eleman Timoshenko kiriş teorisine dayanmakta, kolon ve kiriş elemanları boyunca I-kesitlerde oluşan kesme deformasyonlarını yakalanabilmektedir. Elemanın formülasyonu kuvvet-bazlı fonksiyonlar kullanmasıyla doğrusal olmayan davranışlar altında da gerçekçi sonuçlar sunabilmektedir. Geliştirilen elemanla kolon ve kirişler boyunca ve derinliğinde oluşan yayılı plastisite yakalanabilmekte ve böylece örneğin aksel kuvvet ve moment arasındaki etkileşim elde edilebilmekte, ayrıca düğüm noktalarında (yani serbestlik derecesinde) herhangi bir artış yapmadan kolon-kiriş, kolon taban ve ayrıca çaprazların uçlarındaki bağlantılar eleman formülasyonuna katılabilmektedir. Bu sayede sistem seviyesinde çözülecek olan denklemlerin boyutu ciddi anlamda azaltılabilmekte ve ayrıca modelleme açısından da daha stabil çözüm yöntemi sunulabilmektedir. Geliştirilen elemanda ayrıca tutarlı kütle matrisi kuvvet-bazlı formülasyona dayanarak türetilmiştir. Bağlantı davranışı açısından hem doğrusal elastik, hem de pek çok farklı doğrusal olmayan bağlantı davranışı modellerinin uygulaması başarıyla gerçekleştirilmiştir ve ayrıca çevrimsel hareket sırasında oluşabilecek bağlantı dayanımında azalmalar ve bağlantının enerji harcama kapasitesinde düşüğe sebep olan daralma (pinching) etkisi de dikkate alınmıştır. Geliştirilen çerçeve elemanı ve ayrıca bağlantı modeli davranışları, literatürde mevcut olan deneysel ve analitik sonuçlar ve ayrıca farklı çözüm platformlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve geliştirilen modellerin yüksek doğrulukta tepkileri farklı yüklemeler ve sınır şartları altında sunduğu görülmüştür. Ayrıca parametrik analizler yürütülerek yarı-rijit bağlantıların modellenmesinin önemi vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik çerçeve yapılar; yarı-rijit bağlantı; sonlu eleman yöntemi

ABSTRACT

In this project, an accurate frame finite element model that can consider semi-rigid connection response is developed for the nonlinear analysis of steel framed structures. Proposed frame element model bases on the use of Timohensko beam theory assumptions and can capture shear deformations accurately for I-sections. Element formulation relies on the use of force-based interpolation functions in order to capture nonlinear response in a robust fashion. Proposed element can model spread of inelasticity along element length and section depths for beam and column members, and can also consider the presence of nonlinear semi-rigid connections without the need to model additional nodes and degrees of freedom for their presence at beam-column, column base or brace end regions. As a result of this approach, robust solutions are provided for the analysis of large structural systems. Proposed frame element can also consider the presence of consistent mass matrix through the use of force-based approach. As part of this project, semi-rigid connection models for both monotonic and cyclic loading cases are considered, and a cyclic model that can intake strength and stiffness degradation and pinching is proposed. Proposed frame element is tested via various benchmark examples and other analyses platforms, and results clearly demonstrate superior performance. Furthermore, the presence of semi-rigid connections on steel framed structures is assessed through a parametric study.

Keywords: Steel framed structures; semi-rigid connections; finite element method

1. ÖNSÖZ

Çelik çerçeve yapıların deprem yüklemeleri ve titreşimleri altındaki davranışını gerçekçi modelleyebilmek için hem eleman boyunca ve derinliğindeki doğrusal olmayan davranışı ve hem de çelik yapılarda bolca mevcut olan bağlantıların davranışlarını dikkate almak gerekmektedir. Bu kapsamda analizlerin gerçekleştirilebilmesi için ayrıca çerçeve elemanlarında kesme davranışının da çelik kesitler için gerçekçi yakalanabilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda hem iki boyutlu hem de üç boyutlu analizler yürütebilmek maksadıyla çıkarılan projemiz 36 aylık süreçte tamamlanmıştır.

TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Destek Grubu tarafından 113M223 kodu ile desteklenmiş ve PTİ ödemeleri hariç proje bütçesi 101.640 TL'dir; bu meblağın 76.500 TL'si bursiyer ücretleri, 9240 TL'si ise kurum hissesidir. Proje esnasında büro makinaları, bilgisayar, kırtasiye alım ve seyahat giderleri kalemleri tamamen harcanmıştır. Projede doktora öğrencisi Halil Fırat ÖZEL, yüksek lisans öğrencisi Zafer KARAKAŞ ve lisans öğrencisi Tayseer TASBAHJI bursiyer olarak çalışmıştır. Bu 3 bursiyere verilen ücretlerle projede mevcut olan tüm burs destekleri de tüketilmiştir.

Proje esnasında 5 uluslararası ve 1 de ulusal konferansa katılım yapılmıştır. Bu arada 1 adet de uluslararası konferansa özet gönderilmiş ve Şubat 2017'de bu konferansa katılım yapılması hedeflenmektedir. Konferanslarda sunulan bildiriler ve aşağıda detayları sunulan diğer makaleler proje çıktısı olarak sonuç raporu başvurusuna eklenmiştir ve ayrıca <http://users.metu.edu.tr/asaritas/Research.html> adresinde mevcuttur. İleriki süreçte proje yürütücüsünün değerlendirme aşamasında olan ve göndermeyi planladığı çalışmaların yayına kabul edilmesi durumunda, proje yürütücüsünün internet sitesinden bu çalışmalar indirilebilecektir.

Proje çıktısı olarak alanında prestijli (Impact Factorü 2.481 olan) SCI asıl endekste taranan *International Journal of Mechanical Sciences* Dergisinde 2015 yılında makale yayınlanmıştır. Bu makaledeki yazarlar Afşin SARITAŞ ve önceki yüksek lisans öğrencim Ahmet KÖSEOĞLU'nun 2.yazar olarak katkı sunması ile oluşmuştur. Bu makaledeki başlıca ve ayrıca iletişime geçilecek yazar Afşin SARITAŞ'tır.

Bu arada Mart 2016'da proje çıktısı olarak alanında prestijli SCI asıl endekste taranan (Impact Factorü 1.893 olan) *Engineering Structures* Dergisine yayınlanmak üzere gönderilen makalemize Eylül 2016'da yorumlar ve düzeltmeler gelmiştir. Bu makaledeki yazarlar sırasıyla Halil Fırat ÖZEL, Afşin SARITAŞ ve Tayseer TASBAHJI'dir ve makalede iletişime geçilecek yazar Afşin SARITAŞ'tır. Makaleye gelen düzeltmeleri ve ilerletmeleri gerçekleştirebilmek için doktora öğrencisiyle proje yürütücüsü yoğun çalışma gerçekleştirmiş ve bu makalenin düzeltilmiş hali Kasım 2016 başında dergiye iletilmiştir. Bu çalışmanın aksilik olmazsa çok büyük ihtimalle kabul edileceğini bekliyoruz.

Proje sürecinde çıktı olarak gerçekleştirilemeyen, ancak doktora öğrencisi Halil Fırat ÖZEL'in tez çalışmaları kapsamında tamamlayacağı çalışmaların ürünü olarak 2017 yılı ilk çeyreğinde gönderilmesi planlanan diğer bir uluslararası makalede de doğrusal olmayan üç boyutlu çerçeve elemanın türetimini ve bu projenin sonuç raporlarında sunulduğundan çok daha detaylı karşılaştırmalarını sunacağız. Bu makalenin yazarları Halil Fırat ÖZEL ve Afşin SARITAŞ olacak ve bu makalemizi de alanında prestijli bir SCI'de taranan dergiye sunulması hedeflenmektedir. Bu arada yazarları yüksek lisans öğrencisi Zafer KARAKAŞ ve Afşin SARITAŞ olacak diğer bir çalışmada çelik yapılarda yarı-rijit bağlantıların davranışını parametrik olarak incelediğimiz bir makaleyi de gene 2017 yılının ilk yarısında SCI'de taranan bir dergiye gönderilmesi planlanmaktadır.

Proje kapsamı içerisinde tamamlanmış olan iş paketleri aşağıda özetlenmektedir.

- a) İş Paketi 1 - Üç boyutlu yarı-rijit bağlantı çerçeve elemanının geliştirilmesi: Bu kapsamda hem iki hem de üç boyutlu analizlerde kullanılacak yarı-rijit bağlantı davranışını ihtiva eden ve eleman boyunca ve derinliğinde plastik davranışı gerçekçi modelleyebilen çerçeve elemanı geliştirilmiştir. Ayrıca bu elemanın türetimi aşamasında dinamik titreşimleri gerçekçi modellemeyi sağlayacak tutarlı kütle matrisi türetimi de sunulmuştur.
- b) İş Paketi 2 - Kolon-kiriş yarı-rijit bağlantı modellerinin geliştirilmesi: Bu kapsamda hem monotonik hem de çevrimsel yükler altında kullanılacak modeller dikkate alınmış ve çerçeve modeli ile birlikte analizlerde başarıyla kullanılmıştır.
- c) İş Paketi 3 - Kolon taban levha bağlantı modelinin geliştirilmesi: Bu kapsamda geliştirilen çerçeve modelinde yapı tabanında ekstradan düğüm noktasına gerek

kalmadan modele katılabilecek yarı-rijit bağlantı modeli geliştirilen çerçeve elemanı ile birlikte başarıyla kullanılmıştır.

- d) İş Paketi 4 - Guse levha bağlantı modelinin geliştirilmesi: Çerçeve elemanı ile birlikte kullanılmak üzere çaprazların ucunda bulunan guse levhasını temsilen aksel ezilmeyi modelleyecek şekilde ve ayrıca mümkün olabilecek yarı-rijit dönmeyi temsil edecek modeller çerçeve elemanı ile yürütülen analizlerde başarıyla kullanılmıştır.
- e) İş Paketi 5 - Geliştirilen elemanın ve modellerin doğruluk ve performansının testi: Daha önceki iş paketlerinde gerçekleştirilen tüm geliştirmeler ve türetmeler bilgisayar ortamında kodlanması aşamasında, ortaya çıkabilecek sorunlar, modelleme hataları düzeltilmiş. Ayrıca deneysel verilerle karşılaştırmalar da başarıyla tamamlanmıştır.
- f) İş Paketi 6 – Geliştirilen modellerin çelik çerçeve sistemlerin üç boyutlu davranışına etkisi: Bu kapsamda çelik yapılarda yarı-rijit bağlantı davranışının sistem yapısına etkisi incelenmiştir ve parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda verilen iş paketleri kapsamındaki sonuçların sunulduğu bu rapor aşağıdaki şekilde organize edilmiştir. Giriş bölümünü izleyen ikinci bölümde literatür özeti, üçüncü bölümdeyse yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanının üç boyutlu ortamdaki türetimi sunulmuştur. Dördüncü bölümde yarı-rijit bağlantı modellemeleri ve ayrıca türetimi yapılan modelin sunumu yapılmış ve literatürde sunulan verilerle karşılaştırma yapılmıştır. Beşinci bölümde geliştirilen yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanı ve bağlantı modelleri hem iki boyutlu hem de üç boyutlu örnekler dikkate alınarak türetilen örnekler, literatürde var olan problemler ve ayrıca farklı yapı analizi ve sonlu elemanlar bilgisayar programlarının da kullanılmasıyla statik yüklemeler altında hem doğrusal hem de doğrusal olmayan davranışlar altında incelenmiştir. Bu kapsamda guse levhaların modellenmesi ve etkisi de çalışılmıştır. Altıncı bölümde geliştirilen çerçeve elemanı titreşim davranışlarının yakalanması açısından pek çok farklı bilgisayar programı, literatürde var olan sonuçlar da dikkate alınarak detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda hem kolon-kiriş bağlantılarına hem de kolon tabanlarına da yarı-rijit bağlantılar eklenerek örnekler çözülmüştür. Yedinci bölümde ise yarı-rijit bağlantılı çerçeve yapılarda bağlantı davranışında oluşacak pek çok farklı doğrusal olmayan tepkinin yapı sistemi üstüne etkisi detaylı olarak çalışılmıştır. Bu kapsamda SAC projesi [1] kapsamında tavsiye edilen çelik yapıların incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde doğrusal olmayan statik ve deprem kayıtları altında davranışlar farklı parametrelerin irdelenmesi ile çalışılmıştır. Sekizinci bölümdeyse sonuç raporunun özeti, yorumlar ve öneriler belirtilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Çelik yapıların analizi ve tasarımında bağlantı bölgelerinin davranışının doğru bir şekilde çözümlenmeye katılması çok önemlidir. Bağlantı davranışlarında oluşan sorunlar gelişmiş ülkelerde de açıkça tespit edilmiştir. Moment aktaran çelik çerçevelerde kolon kiriş bağlantılarında oluşan hasarlar 1994 Northridge [2] ve kolon tabanlarında da 1995 Kobe [3] Depremlerinde tespit edilmiştir. Hatta bağlantıların çalışılması için özel projeler (SAC Projesi [1]) geliştirilerek araştırmalar yürütülmüştür.

Mevcut yapı analizlerinde genellikle tamamen rijit (moment tipi) veya basit (kesme tipi) olmak üzere iki çeşit bağlantı varsayımı yapılmaktadır. Tamamen rijit bağlantıların hiçbir dönme yapmadan tüm momenti aktardığı, basit bağlantıların ise dönmeye serbest olup hiç bir moment aktarmadığı farzedilir. Hâlbuki pratikte hem bir miktar dönme yapan hem de bir miktar moment aktaran üçüncü bir bağlantı tipi – yarı rijit bağlantı- ile doğal olarak karşılaşılmaktadır [4]. Bu ara davranış tipinin varlığı dünya çelik tasarım yönetmeliklerinde de artık dikkate alınmaktadır (ABD’de AISC [5] ve AB’de Eurocode [6]).

Yarı-rijit bağlantıların çelik çerçeve sistemlerde deprem yükleri altında doğrusal olmayan analize etkisinin katılması için bu bağlantıların moment-dönme eğrilerinin çevrimsel hareketinin (cyclic behavior) bilinmesi ve ayrıca çerçeve elemanlar boyunca yayılı plastisitenin de doğru olarak yakalanması gereklidir. Bazı yarı-rijit bağlantı tiplerinde ise, moment-dönme eğrisine aksel yükün ve hatta kesme kuvvetinin seviyesi de etki etmektedir. Bu tip bağlantılara örnek olarak en alt kat kolonların taban bağlantıları ve ayrıca çapraz bağlantı elemanların guse levhalarla kolon-kiriş bölgesine bağlandığı yerlerde görülmektedir. Bu bağlantılardaki doğrusal olmayan davranışın elde edilmesi kolay olmayıp bu eğrilerin yapı analizine dahil edilmesi de ayrı bir çalışma gerektirmektedir.

Performansa dayalı deprem mühendisliğinin gerekleri arasında yapılacak analizlerin çevrimsel hareketi ve doğrusal olmayan davranışı mümkün olduğunca tüm yükleme ve sınır şartları altında gerçekçi ve genel yaklaşımlarla modellenmesi gerekmektedir. Çerçeve sistemlerin analizlerinde kullanılan pek çok ticari sonlu elemanlar programları doğrusal olmayan modellemeler için yayılı değil yığılı (lumped) plastisite modelleri sunabilmektedir ve

bu modellerin programdaki çalışması sırasında doğrusal olmayan statik analiz ve ayrıca zaman tanım aralığında dinamik analizlerde stabilite ve yakınsama sorunları yaşadığı bilinmektedir. Bu programlar çözümlemenin global seviyede devam etmesi için lokal seviyede davranışlarda sapmalara ve hatalara izin vermektedir. Bu sebeple ki, bu programlardan güvenilirliği düşük sonuçlar elde edilmektedir.

Aşağıda çelik yapılarda yarı-rijit bağlantıların davranışlarının çalışılması üzerine geçmiş araştırmalar sunulmuştur. Bu kapsamda öncelikle çerçeve elemanı türetimleri üzerine literatür sunulacaktır. Bu sunumda yarı-rijit bağlantılı ya da bağlantısız genel olarak sonlu elemanlar yöntemi ile çerçeve elemanı türetimleri üzerine detaylı bir tarama yapılmıştır. Bu kapsamda ayrıca yarı-rijit bağlantılar içeren çalışmalar da sunulmuştur. Bu sunumun ardından yarı-rijit bağlantılar üzerine gerçekleştirilen deneyler, model türetimleri sunulmuştur.

2.1. Çerçeve Elemanı Türetimleri

Çerçeve yapı elemanı modellemelerinde, iki temel farklı formülasyon kullanılmaktadır; deplasman bazlı veya kuvvet bazlı (karma) formülasyon [7]. Kuvvet bazlı formülasyonun çerçeve elemanların geliştirilmesi açısından en doğru sonuçları veren yaklaşım sunduğu literatürde artık kabul görmektedir [8, 9]. Bu arada yarı-rijit bağlantıların varlığı da bu kapsamda yapı analizlerinde dikkate alınması ve formülasyonlara katılması gereken bir husustur. Ayrıca çelik yapı elemanlarının tipik olarak I-kesitlerden oluşması sebebiyle, kesme deformasyonunun yüksek katlara olan toplam etkisinin doğru bir şekilde formüle edilmesi gerekmektedir [10]. Bir çalışmada kesme deformasyonlarının ihmal edilmesi durumunda 10 katlı bir yapıda %10 ve 40 katlı bir yapıda ise %30 mertebesinde hatalara sebep olduğu gösterilmiştir [11].

[7]'de sunulan çalışmada, karma formülasyon modeli kullanılması durumunda deplasman bazlı elemanların kullanımına göre sonuçların doğruluğunda ve ayrıca analiz sürelerinde ciddi avantajlar elde edildiği gösterilmiştir. Yayılı plastisite davranışının yakanlanması herhangi bir çerçeve elemanı modellemede kabul edilen en ileri modelleme seviyesidir. Bu açıdan karşılaştırma yapıldığında, bir adet karma formülasyon elemanı kullanımı ile elde edilen sonuç en az 8 ve hatta 16 deplasman bazlı eleman kullanımı ile benzer doğruluk seviyesinde olabilmektedir. Bu da çok katlı ve çok açıklıklı yapıların analizinde ciddi anlamda serbestlik derecesinde artışa, oluşturulan matrislerin büyümesine ve ayrıca analiz sürelerinin uzamasına da sebep olmaktadır. Unutmamak gerekir ki analiz süreleri sadece doğrusal

olmayan denklemlerin çözümlerinden değil çok büyük sistemlerde ayrıca oluşturulan verinin sabit diske yazma sürelerindeki gecikmelerden de ciddi anlamda artmaktadır. Bu açıdan mümkün olduğunca az elemanın kullanılması oluşturulacak verinin miktarını da ciddi anlamda azaltmaktadır.

Karma formülasyon çerçeve elemanı geliştirilmesinde öncü çalışma [8]'deki türetime dayanmaktadır. Bu çalışmada, Euler-Bernoulli (EB) kiriş teorisine dayanan ve elemanın formülasyonu kuvvet bazlı olan bir çerçeve elemanı geliştirilmiş ve betonarme elemanların analizine yönelik uygulama sunulmuştur. [12]'deki çalışmada ise Hellinger-Reissner prensibine dayanan ve doğrusal olmayan malzeme ve geometrik etkilerin de dikkate alındığı bir Euler-Bernoulli çerçeve elemanı geliştirilmiştir. [9]'te sunulan çalışmada Timoshenko kiriş teorisine dayanan ve Hu-Washizu varyasyonel prensibi ile bir çerçeve elemanı sunulmuştur. Bu elemanda eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkisi doğrusal olmayan etkileşimli ve kesit modeli fiber modele dayandırılmıştır; ancak kesme kuvvetinin doğrusal elastik ve diğer iki iç kuvvetten bağımsız kaldığı varsayılmıştır. [13]'teki çalışmada ise EB kiriş teorisine dayanan ve kuvvet bazlı formülasyonla elde edilen eleman kullanımı ile çelik çapraz elemanların doğrusal olmayan davranışının gerçekçi olarak yakalanabildiği gösterilmiştir. [14]'daki çalışmada Timoshenko kiriş teorisine dayanan, eksenel kuvvet, eğilme momenti ve kesme kuvveti arasındaki etkileşimi dikkate alarak çelik bağ kiriş modeli geliştirilmiştir. Bu elemanın kullanımı ile kısa ve hatta uzun bağ kirişlerinin doğrusal olmayan davranışı gerçekçi olarak modellenabilmektedir. Benzer elemanı ayrıca betonarme kirişlerin analizi için denenmiş [15], eğilme ve ayrıca kesme kırılma tiplerinin gerçekçi olarak yakalanabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca karma formülasyon elemanların kesme kilitlemesi sorunu yaşamadığı da ispatlanmıştır [16].

Deplasman bazlı elemanların formülasyonu açısından ise Timoshenko kiriş teorisine dayanan ve kilitleme sorunu yaşamayan eleman [17] ve [18]'daki çalışmalarda sergilenmiştir. Bu elemanlarda kullanılan polinom fonksiyonlar doğrusal elastik şartlar altında türetilmesi sebebiyle, doğrusal olmayan davranışı modellemede yukarıda da belirtildiği üzere ciddi anlamda eleman ve düğüm noktasında artışa ihtiyaç duymaktadır. Homojen ve izotropik malzemeler için çerçeve elemanı türetimi açısından deplasman bazlı formülasyonlar artık sonlanmıştır denilebilir. Yeni çalışmalarda kompozit ve fonksiyonel olarak değişen malzemeler için türetimler yapılmaktadır ve bu türetimler de gene doğrusal elastik malzeme davranışını yakalamaya yöneliktir.

Karma formülasyona dayanan çerçeve elemanı geliştirilmesinde ise çalışmalar hala devam etmektedir ve yayınlanan bir makalede [19] Hu-Washizu formülasyonuna dayanan homojen ve isotropik malzemelerin analizi için üç boyutlu çerçeve elemanı geliştirilmiştir; ancak elemanın doğrusal olmayan tepkisi deneysel verilerle karşılaştırılmamıştır. Buna rağmen bu makalede kesitlerin çarpılmasına yönelik sunumlar çalışmanın değerini artıran husus olmuştur.

Yarı-rijit bağlantıların çerçeve elemanlarda analize katılması açısından ise sunulabilecek literatür taraması şu şekildedir. Kolon ve kirişler arasındaki yarı-rijit bağlantıların modellenmesi hususunda öncü çalışmalar Wai Fah Chen tarafından gerçekleştirilmiştir. [20]'deki çalışmada doğrusal elastik çerçeve elemanların uçlarına yay elemanları yerleştirerek türetim yapılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen eleman içinde yayılı plastisiteyi dikkate almamış ve ayrıca yay elemanında kullanılan moment-dönme modelleri de çok sınırlı seviyede kalmıştır.

[20]'deki çalışmaya benzer tarzda literatürde pek çok çalışma mevcuttur ([21], [22], [23]). Bunların pek çoğunda sadece yay elemanındaki moment-dönme davranışında geliştirme kaydedilmeye çalışılmıştır. Bu açıdan [22]'deki çalışmada aşağıdaki moment-dönme modelini kullanarak deplasman bazlı formülasyonlar açısından ileri bir model sunulmuştur; ancak bu çalışmada deneysel verilerle herhangi bir karşılaştırma yapılmamıştır. Bu arada moment-dönme modelleri hakkında literatür taraması bir sonraki maddede sunulacaktır, bu açıdan bu noktada sunulan literatür taraması sadece moment-dönme modellerinin çerçeve elemanlarla birlikte kullanılması ile sınırlandırılmıştır.

[24]'daki çalışmada ise kuvvet bazlı formülasyona dayanan ve eleman içinde yayılı plastisiteyi dikkate alan iki boyutlu çerçeve elemanı geliştirmiştir. Bu elemanın geliştirilmesi açısından yarı-rijit bağlantıların varlığı ekstradan serbestlik derecesinde artışa sebep olmamıştır. Yarı-rijit bağlantıların modellenmesinde Ramberg-Osgood modeli [25] kullanılmıştır; ancak geliştirilen modeller deneysel verilerle karşılaştırılmamıştır. Bu tip modellerin burda da belirtmekte fayda var, sadece belli tipteki yarı-rijit bağlantıların relatif olarak küçük dönmeler altındaki davranışını modellemesinde kullanılabildiği bilinmektedir. Yarı-rijit bağlantılarda ciddi anlamda daralma (pinching) etkileri, rijitlik ve kapasite dayanımında düşüşler de oluşabilmektedir. Bu davranışların modellenebilmesi ve ayrıca çevrimsel yükler altında sistem davranışına katılması önemli hususlardır.

2.2. Yarı-Rijit Bağlantılar

2.2.1. Kolon-Kiriş Bağlantıları

Çelik yapısal sistemlerde monolitik inşaat olmaması sebebiyle, kolon, kiriş, çapraz elemanlar arasındaki bağlantıların tipi, yapısal sistemin davranışına ciddi anlamda etki etmektedir. Bu bağlantılar önceleri perçin ve kaynaklarla oluşturulurken, diğer bir alternatif yöntem olarak bulonlu bağlantılar ortaya çıkmıştır. Bulonlu bağlantıların kurulumu ilk yöntemle göre işçilik açısından daha pratiktir ve son 15-20 yılda bu bağlantı tiplerine artan ilgi bulunmaktadır. Bahsi geçen bağlama yöntemleriyle tamamen rijit (moment tipi) veya tamamen basit (kesme tipi) bağlantılar elde edilebilmektedir; ancak rijit veya basit bağlantı davranışları aslında tamamen idealde olacak davranışlardır. Gerçekte tüm bağlantı tiplerinde bir miktar idealin dışında davranışlar oluşmakta ve bazı bağlantı topolojilerinde ise idealden ciddi anlamda sapılmaktadır. Davranışı iki uç idealden sapan bağlantı tiplerine ise yarı-rijit bağlantı denmektedir. Bu bağlantılara örnek olarak son zamanlarda üzerinde bilimsel araştırma yoğunlaşan üst-alt ve gövdeden L profille kolon-kirişe bulonla bağlantı (top and seat with double web angles connection) dikkati çekmektedir. Bu bağlantı üzerine ilk deney 1936 yılında Rathbun tarafından yapılmış, ikinci deneysel çalışma yaklaşık 50 yıl sonra 1985'te Azizinamini [26] tarafından tamamlanmıştır. Son 15-20 yılda ise bu bağlantının davranışının tespitine yönelik ciddi deneysel çalışmalar yürütülmüştür ([27], [28], [29]). Bu bağlantının ve ayrıca pek çok yarı-rijit bağlantı topolojisinin doğrusal olmayan davranışının tespit edilmesine yönelik 1994 Northridge ve ayrıca 1995 Kobe depremleri sonrası ciddi ilgi oluşmuştur (örnek olarak üst-alt bulonla bağlantılar üzerine [30] çalışması; gövdeden bulonla ve/veya kaynakla bağlantılı yarı-rijit bağlantılar üzerine [31] ve ayrıca [32]'teki çalışması gösterilebilir).

Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle yarı-rijit bağlantıların basitleştirilmiş moment-dönme tipinde matematiksel modelleri oluşturulmaktadır. Bu modeller monotonik ve çevrimsel olmak üzere iki kısma ayrılabilir.

Monotonik yüklemelerde yarı-rijit bağlantı davranışının tespit edilmesi için tek doğrusal, iki doğrusal, çok parçalı doğrusal olmak üzere modeller kullanılabilir. [30]'deki deneysel çalışmada iki doğrusal moment-dönme modeli tavsiye edilmiştir. Model parametreleri bağlantının ilk rijitliği, akma moment dayanımı ve ayrıca pekleşme rijitliğidir. Parçalı doğrusal modellerin dışında çok daha yaygın olarak kullanılan modeller ise polinom modeli (Frye ve Morris modeli [33]) ve power modelidir. [33]'da sunulan modelde tüm kolon-kiriş bağlantı tipleri için

polinom modelinin ihtiyaç duyduğu eğri sabitleri bulunmaktadır; yani bu modeldeki parametreler herhangi farklı bir yarı-rijit bağlantı topolojisinde aslında hatalı sonuçlar verebilmekte ve ayrıca polinom modelinin sistem davranışı içinde kullanımında ciddi yakınsama sorunları yaşanabilmektedir [4]. [34]'deki çalışmada tavsiye edilen power modeli iki parametreye dayanmakta ve gene deneysel verilere ihtiyaç duymaktaydı. Power modelinin ilerletilmiş hali olarak üç parametrelili power modelinde ise: bir parametre deneysel verilere dayanmakta, iki adet önemli parametresi ise bağlantı parçalarının mekanik davranışlarından türetilmektedir. Modelin bu iki parametresi bağlantının ilk rijitliği ve bağlantının en büyük moment dayanımıdır (ultimate moment capacity). [35] ve [36]'daki çalışmalarda power modelindeki parametrelerin elde edilmesine yönelik türetimler sunulmuştur.

Yarı-rijit bağlantıların çevrimsel hareketinin doğru olarak modellenmesi çok büyük önem arz etmektedir. Bu modellerin en basiti olarak [22] ile [24]'deki çalışmalarda sunulan modeller gösterebilir; ancak bu çalışmalarda kullanılan modeller için deneysel verilerle karşılaştırma yapılmamış, sadece geliştirilen çerçeve eleman modelinde kullanımları gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir modelin bu sebeple aslında hasar, artık moment kapasitesinin negatif ve pozitifte farklı olmasını dikkate alması ve en önemlisi de daralma (pinching) etkisini de modelleyebilmesi gerekmektedir.

2.2.2. Kolon Taban Bağlantıları

Kolon taban bağlantıları betona gömülü veya açıkta olmak üzere iki farklı tiptedir. Gömülü olanların davranışı tam gömülü ve kısmi gömülü olarak sınıflandırılabilir ve tam gömülü olanların tepkisi rijit bağlantıya yakındır. Açıkta olanların bazı bağlantı topolojileri için tepkisi basit mesnetlenmiş olarak idealize edilse de gerçek tepkilerinin yarı-rijit olduğu bilinmektedir. Özellikle de açıkta olan bağlantıların tepkisinin incelenmesi hususunda ciddi çalışmalar yürütülmüş ([37], [38], [39], [40]) ve hâlihazırda yakın zamanda sonlanan deneysel çalışmalar bulunmaktadır ([41], [42]).

Deneysel çalışmaların dışında ayrıca matematiksel basitleştirilmiş modeller de türetilmektedir. Bu modellerin pek çoğu moment-dönme eğrileri sunmakta ve bu eğrileri eksenel kuvvetin etkisini azaltılmış moment dayanımı kullanarak sağlamaktadır. Eksenel kuvvet ve dönme momenti arasındaki etkileşim eğrileri [43]'deki çalışmada sergilenmiştir.

[44]'daki çalışmada ise monotonik yüklemeler için moment-dönme eğrisi tavsiyesi yapılmıştır. Bu modeldeki bir parametre deneysel veri tabanına dayanmakta ve diğer iki parametre olan temsili akma momenti ve dönme değeri ise mekanik yaklaşımlarla elde edilmektedir. Aynı çalışmada çevrimsel hareketin yakalanması için modelde türetim yapılmış ve [40]'de sunulanı deneyle yapılan karşılaştırmalarda güzel sonuçlar elde edilmiştir. Bu modelin çerçeve elemanları ile birlikte kullanımı sadece monotonik yüklemeler altında [45]'daki çalışmada çok sınırlı olarak görülmektedir ve ayrıca bu çalışmada elemanlarda oluşan doğrusal olmayan davranış yığılı plastisite modeli ile dikkate alınmıştır.

2.2.3. Guse Levha Bağlantıları

Guse levha bağlantıları kafes yapı sistemlerde yani örneğin köprülerde ve ayrıca çerçeve yapılarda kolon-kiriş ve ayrıca çapraz elemanlar arasında sürekliliğin yani bağlantının sağlanması amacıyla kullanılan levhalardır. Guse levhaları üzerinde ilk yapılan çalışmalar kafes çelik köprüler üzerindeki etkiyi incelemek amacıyla [46]. Kafes yapılarıdaki çalışmalardan elde edilen tasarım ilkeleri çapraz elemanların uçlarındaki guse levhalarda da uygulanmaya devam etmiş; ancak çevrimsel hareket altında çaprazların ucundaki levhaların davranışının elde edilmesine yönelik yeterli çalışma olmadığı belirtilmektedir [47].

Deneysel çalışmalar monotonik ve çevrimsel olarak sınıflanabilmektedir. Binalarda çevrimsel eksenel yüklerin çaprazlarda mutlak olarak oluşacak olması yüzünden ikinci davranış tipinin bilinmesi gerekmektedir. Literatür taramalarında guse levhalarla ilgili çoğunlukla eksenel kuvvet ve deformasyon arasındaki doğrusal olmayan davranışın çalışıldığı gözlemlenmiştir ([48], [49], [50], [51], [52]). Bir başka yaklaşımsa çapraz elemanın ve çerçeve sistemin birlikte deneyinin yürütülmesi ve bunun aslında çok daha gerçekçi bir yaklaşım olduğudur ([47], [53]). Çaprazların ucundaki hareket düzlem içinde ve düzlem dışında olmak üzere sınıflandığında, davranışın tespiti de önem arz etmektedir [54]. Guse levhaların moment-dönme tipinde doğrusal olmayan davranışının elde edilmesine yönelik deneysel çalışma tespiti yapılamamıştır. Yürütülen bir yapısal analitik çalışmada linear elastik moment-dönme tipi modellerin çapraz elemanların uçlarında kullanıldığı bilinmektedir [55].

3. YARI RİJİT BAĞLANTILI ÇERÇEVE ELEMANI

Bu bölümde proje kapsamında geliştirilmesi ve bilgisayar ortamında kodlaması ve ayrıca ileriki bölümlerde doğrulama çalışmaları yapılan lokal noktalarda yarı-rijit bağlantı davranışı ihtiva edebilen çerçeve elemanın formülasyonu sunulmuştur.

3.1. Timošenko Kiriş Teorisi ve Eleman Temel Denklemleri

Üç boyutlu çerçeve yapılarda, bir çerçeve elemanının üstündeki malzeme noktasında oluşacak deplasmanlar xyz koordinat sisteminde Timošenko kiriş teorisi kullanarak aşağıdaki denklemlerle hesaplanır. Kiriş teorisinde deformasyondan önce düzlem olan kesitler deformasyondan sonra da düzlem kalır ilkesi dikkate alınmaktadır ve aşağıdaki denklem ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{Bmatrix} u_x(x, y, z) \\ u_y(x, y, z) \\ u_z(x, y, z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u(x) - y\theta_z(x) + z\theta_y(x) \\ v(x) - z\theta_x(x) \\ w(x) + y\theta_x(x) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde $u_x(x, y, z)$, $u_y(x, y, z)$ ve $u_z(x, y, z)$ deplasmanları x, y ve z yönlerinde çerçeve elemanı üstündeki hareketi belirler. Burada $u(x)$ çerçeve elemanı eksenindeki deplasman, $v(x)$ ve $w(x)$ bu eksenindeki y ve z yönlerindeki deplasmandır. $\theta_x(x)$, $\theta_y(x)$ ve $\theta_z(x)$ ise aynı eksen etrafında x, y and z yönlerinde rijit hareket ettiği varsayılan kesitin dönme değerleridir.

Denklem 1'de sunulan deplasman alanları kullanılarak, malzeme noktasında sıfırdan farklı olan birim şekil değiştirme (gerinme) değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

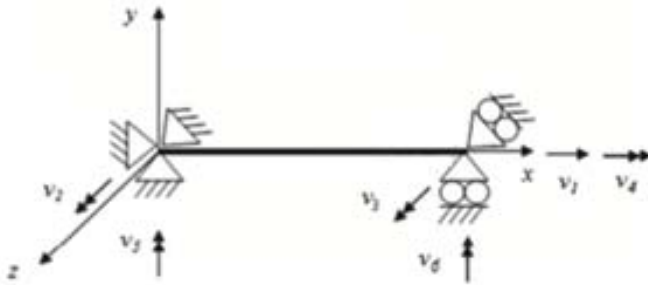
$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u'(x) - y\theta_z'(x) + z\theta_y'(x) \\ -\theta_z(x) + v'(x) - z\theta_x'(x) \\ \theta_y(x) + w'(x) + y\theta_x'(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_a(x) - y\kappa_z(x) + z\kappa_y(x) \\ \gamma_y(x) - z\varphi(x) \\ \gamma_z(x) + y\varphi(x) \end{Bmatrix} = \mathbf{a}_s(y, z) \mathbf{e}(x) \quad (2)$$

Yani x yönünde aksenal birim şekil değıştirme ve kesit düzlemi üstündek, xy ve xz birim şekil değıştirmeleri yukarıda görüldüğü gibi elde edilebilmektedir. Bu denklemin toparlanması sonucu ortaya kesit deformasyonlarını oluşturan $\mathbf{e}(\mathbf{x})$ vektörü şu şekilde yazılabilmektedir:

$$\mathbf{e}(\mathbf{x}) = \left[\varepsilon_a(x) \quad \kappa_z(x) \quad \kappa_y(x) \quad \gamma_y(x) \quad \gamma_z(x) \quad \varphi(x) \right]^T \quad (3)$$

$\varepsilon_a(x)$ kesit aksenal deformasyonu, $\varphi(x)$ burulma deformasyonu, $\gamma_y(x)$ ve $\gamma_z(x)$ y ve z yönlerindeki kesme deformasyonları ve $\kappa_y(x)$ ile $\kappa_z(x)$ ise y ve z etrafındaki eğrilme deformasyonudur. Kesit deformasyonları Denklem 2 kullanılarak birebir karşılaştırma yapılırsa kolaylıkla elde edilebilir. Bu arada Denklem 2'de kesit uygunluk matrisi $\mathbf{a}_s(y, z)$ de oluşturulmuştur ve detayı aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{a}_s(y, z) = \begin{bmatrix} 1 & -y & z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & y \end{bmatrix} \quad (4)$$



Şekil 1. Asıl sistem kuvvetleri ve deformasyonları

Çerçeve elemanın türetimi üç boyutlu ortamda yani xyz 'de gerçekleştirilmiş, elemanın her iki ucunda düğüm noktaları olduğu dikkate alınmıştır. Üç boyutta her bir düğüm noktasında 6'şar serbestlik derecesi bulunmakta, yani elemanda toplam 12 serbestlik derecesi yazılmaktadır. Bu sisteme bütün sistem denir. Eleman açısından lokal eksen, kendi ekseni boyunca olan bir düğüm noktasından diğerine uzanan eksendir ve bu eksene x ekseni adı verilir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, bütün sistemin dışında, elemandaki deformasyonları elde edebilmemizi sağlayan asıl sisteme dönüş yapabilmek de mümkündür. Bütün sistemde rijit hareket modları ve deformasyon modları mevcutken, asıl sistemde sadece deformasyon modları bulunmaktadır. Bu şekilde türetim yapılmasının avantajı, doğrusal olmayan

geometriyi de katarken kolaylık sağlamasındandır. Şekil 1’de sunulduğu üzere, birinci deformasyon modu aksenal, ikinci ve üçüncü deformasyon modları xy düzleminde sol ve sağ uçlardaki dönmeler, dördüncü deformasyon burulma, beşinci ve altınca deformasyonlarsa xz düzlemindeki dönmelerdir. Elemanın boyunun da L olduğu dikkate alınır, bütün sistem ile asıl sistem arasındaki ilişki aşağıda \mathbf{a} dönüşüm matrisi kullanılarak elde edilebilir.

Asıl eleman deformasyonları \mathbf{v} vektöründe oluşturulursa, bu deformasyonlar ile elemanın ucundaki 12 adet serbestlik derecesini içeren düğüm deplasmanları \mathbf{u} arasındaki ilişki aşağıdaki gibi \mathbf{a} matrisi kullanılarak kurulabilir:

$$\mathbf{v} = \mathbf{a}\mathbf{u} \quad (5)$$

Ayrıca benzer şekilde elemanın ucundaki düğüm kuvvetleri ile, asıl sistemdeki eleman kuvvetleri arasındaki ilişki de aşağıda denklemle elde edilebilir.

$$\mathbf{p} = \mathbf{a}^T \mathbf{q}; \text{ and } \mathbf{a} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1/L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Elemanın ucundaki asıl kuvvetler \mathbf{q} kullanarak eleman boyunca oluşacak tüm kesit kuvvetleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\mathbf{s}(x) = \left[N(x) \quad M_z(x) \quad M_y(x) \quad V_y(x) \quad V_z(x) \quad T(x) \right]^T = \mathbf{b}(x, L) \mathbf{q}$$

$$\mathbf{b}(x, L) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x/L - 1 & x/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - x/L & -x/L & 0 \\ 0 & -1/L & -1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L & 1/L \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemde, kesit kuvvetleri \mathbf{s} vektörüne yerleştirilmiştir ve bunlar $N(x)$ aksenal kuvveti, $V_y(x)$ ve $V_z(x)$ kesme kuvvetleri, $M_y(x)$ ve $M_z(x)$ momentleri ve son olarak da $T(x)$ burulma momentidir.

3.2. Sonlu Eleman Formülasyonu

Yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanının türetimi 3 alanlı karma formülasyon türetimine dayandırılarak elde edilmiştir. Literatürde sunulan Hu-Washizu fonksiyonelinin [56] giriş elemanlara yapılan uygulamasında [57] ve [7] , türetim içinde eleman düğüm deplasmanları \mathbf{u} , eleman asıl kuvvetleri \mathbf{q} ve kesit deformasyonları \mathbf{e} bulunmaktadır. Bu fonksiyonelin dinamik durumlara olan ilerletmesi $\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}}$ atalet kuvvetlerinin düğüm noktalarına D'Alembert prensibi kullanarak etkilmesi ile aşağıdaki denklem elde edilir [58].

$$\begin{aligned} \delta\Pi_{\text{HW}} = & \int_0^L \delta\mathbf{e}^T (\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{e}(x)) - \mathbf{b}(x, L)\mathbf{q} - \mathbf{s}_p(x)) dx - \delta\mathbf{q}^T \int_0^L \mathbf{b}^T(x, L)\mathbf{e}(x) dx + \delta\mathbf{q}^T \mathbf{a}\mathbf{u} \\ & + \delta\mathbf{u}^T \mathbf{a}^T \mathbf{q} + \delta\mathbf{u}^T \mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} - \delta\mathbf{u}^T \mathbf{p}_{\text{app}} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Denklemt (8) bütün $\delta\mathbf{u}$, $\delta\mathbf{q}$ ve $\delta\mathbf{e}$ değerleri için geçerli olmak zorundadır.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{p} \equiv \mathbf{p}_{\text{app}}; \quad \mathbf{p} = \mathbf{a}^T \mathbf{q} \quad (9)$$

$$\mathbf{v} \equiv \int_0^L \mathbf{b}^T(x, L)\mathbf{e}(x) dx; \quad \mathbf{v} = \mathbf{a}\mathbf{u} \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{s}}(\mathbf{e}(x)) \equiv \mathbf{b}(x, L)\mathbf{q} + \mathbf{s}_p(x) \quad (11)$$

Doğrusal elastik ve statik durumlar için, yukarıdaki denklemler aşağıda yazıldığı üzere basitleştirilebilir ve böylece kesit deformasyonları ile kesit kuvvetleri arasında $\mathbf{e} = \mathbf{k}_s^{-1} \hat{\mathbf{s}}$ ilişkisi denklemlere yerleştirilebilir, burada \mathbf{k}_s kesit rijitlik matrisidir. Bu varsayımlar altında temsili olarak durumu göstermek adına sonuçlar şu şekilde gelişir:

$$\mathbf{a}\mathbf{u} = \mathbf{v} = \mathbf{f} \mathbf{q}; \quad \mathbf{f} = \int_0^L \mathbf{b}^T(x, L) \mathbf{f}_s(x) \mathbf{b}(x, L) dx \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemde \mathbf{f} eleman esneklik matrisidir (yani rijitlik matrisinin tersi), \mathbf{f}_s kesit esneklik matrisidir ve kesit rijitlik matrisinin tersinin alınmasıyla elde edilir. Elde edilen sonuçların Denklem 7'ye yerleştirilmesiyle (statik durum için), aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\mathbf{ku} = \mathbf{p}_{app}; \quad \mathbf{k} = \mathbf{a}^T \mathbf{f}^{-1} \mathbf{a} \quad (12)$$

Burada \mathbf{k} matrisi 12×12 eleman rijitlik matrisidir (bütün sistemdeki).

Türetimin bu aşamasında, yarı-rijit bağlantıların (YRB) eleman formülasyonuna açıkça katılması kolaylıkla mümkün olabilecektir. YRBler elemanın her hangi bir noktasında mevcut olabilecek şekilde lokalize noktalarda aşağıdaki formülle türetime dahil edilmiştir.

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{Çerçeve} + \mathbf{v}_{YRB}; \quad \mathbf{v}_{Çerçeve} = \int_L \mathbf{b}^T(x) \mathbf{e}(x) dx; \quad \mathbf{v}_{YRB} = \sum_{i=1}^{nYRB} \mathbf{b}^T(x_i) \Delta_{YRB,i} \quad (13)$$

ve $\Delta_{YRB} = \left[\delta_{YRB}^{eksenel} \quad \theta_{Z,YRB} \quad \theta_{Y,YRB} \quad \delta_{Y,YRB}^{kesme} \quad \delta_{Z,YRB}^{kesme} \quad \phi_{SC} \right]^T$

Denklem 13'teki integral hesabı için doğrusal olmayan durumlar mevcut olacağı için kapalı integral almak yerine sayısal integral alınacaktır. Bu açıdan çoğunlukla eleman boyunca plastisitenin tespit edilebilmesi için 5 Gauss veya Lobatto kesit noktaları kullanmak mümkündür. Yukarıdaki denklemde $nYRB$ toplam yarı-rijit bağlantıların sayısıdır ve Δ_{YRB} ise bu bağlantılarda oluşabilecek tüm deformasyon tiplerini içeren vektördür. Geliştirilen çerçeve elemanında yarı-rijit bağlantılarda 6 farklı deformasyonun oluşabilecek şekilde türetim yapılmış ve ayrıca bilgisayar uygulaması (kodlaması) gerçekleştirilmiştir. Denklem 13'te görüldüğü üzere bağlantıdaki aksenal hareket, kesme deformasyonları ve 2 yöndeki dönme ile son olarak da burulma hareketi teorik olarak formülasyonda ve kodlama aşamasında dikkate alınmıştır.

Yukarıdaki denklemlerin türevlerinin alınmasıyla, eleman esneklik matrisini de aşağıda yazılı olduğu gibi elde edebiliriz:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_{Çerçeve} + \mathbf{f}_{YRB}; \quad \mathbf{f}_{Çerçeve} = \int_L \mathbf{b}^T(x) \mathbf{f}_s(x) \mathbf{b}(x) dx; \quad (14)$$

ve $\mathbf{f}_{YRB} = \sum_{i=1}^{nYRB} \mathbf{b}^T(x_i) \mathbf{f}_{YRB,i} \mathbf{b}(x_i)$

Denklem 7-9 arasını doğrusal olmayan şartlar altında bir anda çözebilmek mümkün olmayacaktır. Bu durumda bu denklemlerin doğrusallaştırılması ve düzeltmeler yaparak Newton-Raphson yöntemi kullanarak çözüm elde edilmesi gerekmektedir. Bu açıdan detaylı çözüm yöntemlerinin uygulaması açısından daha önceden sunulan çözümlmeleri [7] takip etmek mümkündür.

3.3. Kesit Tepkisi

Çelik yapılarda sıkça kullanılan I-kesitlerin tepkisini gerçekçi yakalayabilmek önem arz etmektedir. Bu açıdan dikkate alınması gereken en önemli husus kesme düzeltme katsayısının bu tip kesitler için doğru bir değer seçilerek kullanılmasıdır. Kesme düzeltmesinin yapılması zorunluluğu, Timoşenko kiriş teorisi ile elde edilen kesit deformasyonları veren uygunluk matrisi \mathbf{a}_s 'nin kesme gerilmelerinin doğrusal elastik durumlar altında parabolik değiştiğini dikkate almak zorunluluğundan kaynaklanmaktadır. Bu hususta gerçekleştirilen düzeltmeye kesme düzeltmesi denir ve Denklem 'de kullanılan \mathbf{a}_s matrisi aşağıdaki gibi değiştirilerek rijitlik matrisi hesaplarında dikkate alınır.

$$\mathbf{a}_s = \mathbf{a}_s(y, z) = \begin{bmatrix} 1 & -y & z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \kappa_{sy} & 0 & -z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa_{sz} & y \end{bmatrix} \quad (15)$$

Ana eğilme eksenindeki kesme düzeltme katsayısı κ_s değeri literatürde sunulan [59] değer dikkate alınarak ileriki doğrulama bölümlerinde görüleceği üzere başarıyla kullanılmıştır.

$$\kappa_s = 1/\kappa; \quad \kappa = 0.85 + 2.32 \frac{b_f t_f}{d t_w} \quad (16)$$

Yukarıda sunulan değerler b_f flanş genişliği, t_f flanş kalınlığı, d kesit yüksekliği, t_w ise gövde kalınlığıdır. Zayıf eksen etrafındaki eğilmede ise dikdörtgen kesitler için kullanılan 5/6 düzeltme katsayısı sadece flanşların varlığı dikkate alınarak kullanılmıştır.

Kesit kuvvetleri integral alınması yöntemiyle malzeme noktalarında oluşan gerilmelerin toplam etkisinin aşağıdaki gibi elde edilmesiyle bulunur. Bu noktada malzeme modeli olarak doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanılması gerekmektedir.

$$\mathbf{s} = \int_A \mathbf{a}_s^T \boldsymbol{\sigma} dA; \quad \boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{xx} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{xz}]^T \quad (17)$$

Yukarıda yazılı olan kesit kuvvetlerinin deformasyonlara göre türevinin alınmasıyla kesit rijitlik matrisi elde edilecektir.

$$\mathbf{k}_s = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{e}} = \int_A \mathbf{a}_s^T \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon})}{\partial \mathbf{e}} dA = \int_A \mathbf{a}_s^T \mathbf{k}_m \mathbf{a}_s dA \quad (18)$$

Denklem 18'deki malzeme tanjant modülü \mathbf{k}_m malzeme modelinden elde edilen değerdir $\mathbf{k}_m = \partial \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon}) / \partial \boldsymbol{\varepsilon}$. Denklem 17 ve 18'in integralinde çoğunlukla sayısal integral almak gerekecektir. Bunun için Gauss, orta-nokta ya da yamuk integral kuralları kullanılabilir.

3.4. Tutarlı Kütle Matrisi

Yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanı için kütle matrisinin elde edilmesi kuvvet bazlı formülasyona [60] dayanarak elde edilmiştir. Bunun için literatürde mevcut olan geliştirmeler dikkate alınmış ve bu örnekler yarı-rijit bağlantılara ilerletilecek şekilde geliştirme yapılarak kullanılmıştır. Bu yöntemde tutarlı kütle matrisi, eleman boyunca aşağıdaki denklemlerde verildiği üzere hesaplanabilmekte ve böylece ekstra olarak deplasman alanının sonlu elemanlar formülasyonunda dikkate alınmasına gerek kalmamaktadır. Eleman tutarlı kütle matrisinin türetimi öncelikle kesit kütle matrisinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Bunun için aşağıdaki kesit kütle matrisi denklemi kullanılır.

$$\mathbf{m}_s(x) = \int_A \mathbf{a}_s^T \rho(x, y) \mathbf{a}_s dA; \quad (12)$$

Yukarıdaki denklemdeki hesapta kesme düzeltme katsayısı kullanılmaması gerekmektedir. Yani \mathbf{a}_s kesit uygunluk matrisinde, kesme düzeltme katsayıları $\kappa_s=1$ olmalıdır.

Soydas ve Saritas [60] tarafından sunulan tutarlı kütle matrisi hesabı sonuç olarak aşağıdaki gibi 12×12 formda yazılabilmektedir:

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{00} & \mathbf{m}_{0L} \\ \mathbf{m}_{L0} & \mathbf{m}_{LL} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Yukarıdaki denklemdeki 6×6 alt matrislerin hesabı şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned}
\mathbf{m}_{LL} &= \mathbf{f}^{-1} \int_0^L \mathbf{b}^T(x, L) \mathbf{k}_s^{-1}(x) \left(\int_x^L \mathbf{b}^T(x, \xi) \mathbf{m}_s(\xi) \mathbf{f}_p(\xi) \mathbf{f}^{-1} d\xi \right) dx \\
\mathbf{m}_{L0} &= \mathbf{f}^{-1} \int_0^L \mathbf{b}^T(x, L) \mathbf{k}_s^{-1}(x) \left(\int_x^L \mathbf{b}^T(x, \xi) \mathbf{m}_s(\xi) (\mathbf{b}^T(0, \xi) - \mathbf{f}_p(\xi) \mathbf{f}^{-1} \mathbf{b}^T(0, L)) d\xi \right) dx \\
\mathbf{m}_{0L} &= \mathbf{m}_{L0} = -\mathbf{b}(0, L) \mathbf{m}_{LL} + \int_0^L \mathbf{b}(0, x) \mathbf{m}_s(x) \mathbf{f}_p(x) \mathbf{f}^{-1} dx \\
\mathbf{m}_{00} &= -\mathbf{b}(0, L) \mathbf{m}_{L0} + \int_0^L \mathbf{b}(0, x) \mathbf{m}_s(x) (\mathbf{b}^T(0, x) - \mathbf{f}_p(x) \mathbf{f}^{-1} \mathbf{b}^T(0, L)) dx
\end{aligned} \tag{14}$$

Burada \mathbf{f} eleman esneklik matrisidir ve Denklem 14'te bu değer mevcuttur. Ayrıca bu denklemlerde kısmi esneklik matrisine de ihtiyaç duyulmaktadır ve bunun hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{f}_p(x) = \int_0^x \mathbf{b}^T(\xi, x) \mathbf{k}_s^{-1}(x) \mathbf{b}(\xi, x) d\xi \tag{15}$$

Yukarıda verilen integral işlemlerine ek olarak yarı-rijt bağlantıların varlığı daha önce sunulan denklemlerde olduğu gibi kolayca dikkate alınabilmekte ve böylece ekstradan düğüm noktası yerleştirmeye gerek kalmadan tutarlı kütle matrisi hesabı yapılabilmektedir.

3.5. Çerçeve Elemanın Sonlu Elemanlar Programında Çalıştırılması

Geliştirilen çerçeve elemanı Matlab ortamında bilgisayarda kodlanmıştır. Ayrıca geliştirilen fonksiyonlar, Fedaslab yapısal analiz programı [61] ile çalışabilmektedir. Bu platformda her bir eleman tepkisinin direnç kuvvetleri ve rijitlik matrisi olması gerekmektedir. Programın çözüm yöntemi deplasman bazlı elemanların çalışma ilkesine benzemektedir, yani uygulanan kuvvetler \mathbf{P}_{app} ve direnç kuvvetleri \mathbf{P}_r arasında dengenin sağlanması gerekmektedir:

$$\mathbf{P}_{app} - \mathbf{P}_r(\mathbf{U}) = \mathbf{0} \tag{16}$$

Yukarıda sunulan denklem hem malzeme hem de geometrik sebeplerle doğrusal olmayan bir tepkide olacaktır ve bu denklemin kökünün bulunabilmesi için Taylor serisi kullanılarak ve

doğrusal kısım dikkate alınarak elde edilir. Bu yöntemde Newton-Raphson yöntemi denmektedir ve aşağıdaki gibi artımsal yöntemle yapıda düğüm noktalarında oluşan deplasmanların bulunmasına uğraşılır.

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{K}_t^{-1} \{ \mathbf{P}_{app} - \mathbf{P}_r(\mathbf{U}_i) \}; \quad \text{where} \quad \mathbf{K}_t = \frac{\partial \mathbf{P}_r}{\partial \mathbf{U}} \quad (17)$$

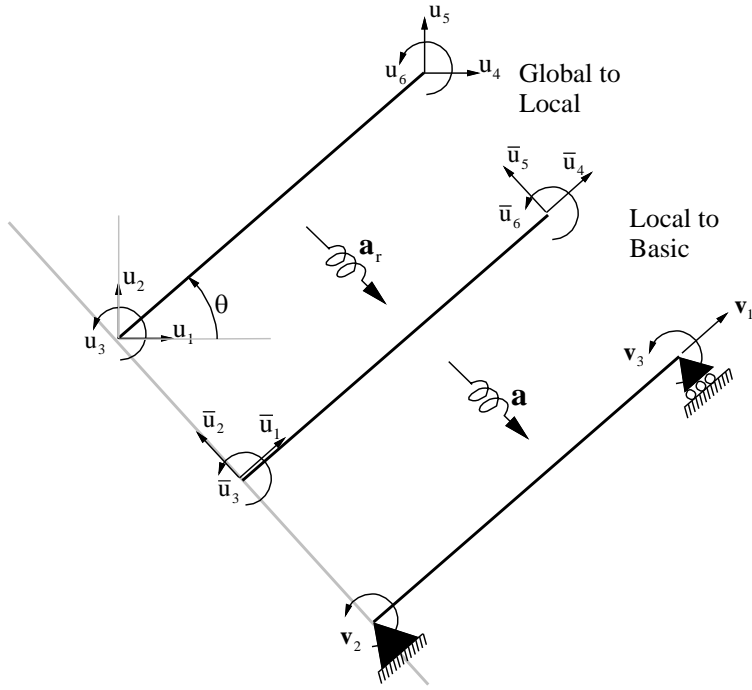
Analize başlayabilmek için başlangıç tahmini yapmak gereklidir ve bu genelde deforme olmamış ve gerilmesiz hali temsil eden ilk durum olarak alınır ki bu durumda deplasmanlar sıfırdır, yani $\mathbf{U}_0 = \mathbf{0}$. Her bir düzeltme adımında sayaç i alınır ve yapı deplasmanlarından eleman deplasmanları aşağıda yazıldığı gibi elde edilir. Bu türetimin sunumu açısından iki boyutlu problem dikkate alınmıştır. Elemanın global deplasmanlarından bütün deplasmanlara (complete system displacements) ve ardından asıl deplasmanlara (basic deformations) dönüşüm aşağıdaki gibi yapılır.

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{a}\bar{\mathbf{u}} = (\mathbf{a}\mathbf{a}_r)\mathbf{u} \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 1 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Eleman lokal deplasmanları $\bar{\mathbf{u}}$ global deplasmanlardan dönme dönüşümü ile elde edilir ve bu dönüşüm yapı elemanının lokal x-ekseni ile global X-ekseni arasındaki θ açısını içeren bir dönüşüm matrisidir

$$\mathbf{a}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix}; \quad \text{where} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Yukarıdaki \mathbf{a} matrisi ise daha önce sunulduğu üzere bütün sistemden asıl sisteme geçiş yapmayı sağlayan ve rijit hareket modlarını çıkartan bir dönüşüm matrisidir ve iki boyutlu problem için Denklem (18)'de verilmiştir. Denklem 10'daki dönüşüm doğrusal geometri altındaki durumu temsil etmektedir ve Şekil 2'de temsili hali gösterilmiştir.



Şekil 2. Eleman deplasmanlarının bütünden asıl sisteme dönüştürülmesi

Kuvvet-bazlı çerçeve elemanının deplasman bazlı sonlu elemanlar programında çalışabilmesi için elemana programdan her bir artımsal adımda gönderilen deplasmanlara tepki verebilmesi gerekmektedir. Halbuki kuvvet-bazlı elemanın çalışma prensibi tam tersi yöndedir ve aslında eleman kuvvetleri alabilmeyi beklemektedir, yani $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{q})$. Bu tepkinin o zaman yapıdan gönderilen ve uygulanan deformasyonlara $\hat{\mathbf{v}}$ eşitlenebilmesi şarttır, buradaki şapka işareti elemana yapı tarafından gönderilen deformasyonları anlatabilmek için kullanılmıştır. Sonuç olarak yapıdan gelen deformasyonlarla, çerçeve elemanının kendi içinde hesaplayacağı deformasyonlar arasında eşitleme sağlanmaya çalışılır:

$$\hat{\mathbf{v}} \equiv \mathbf{v}(\mathbf{q}) \quad (20)$$

Yukarıdaki denklemi bir anda sağlayabilmek ancak doğrusal elastik malzeme varsa mümkündür, ancak genel şartlar altında bu denklemin de doğrusallaştırılması aşağıdaki gibi gerekli olacaktır:

$$\Delta \mathbf{q} = [\mathbf{f}_i]^{-1} (\hat{\mathbf{v}} - \mathbf{v}(\mathbf{q}_i)); \quad \text{where } \mathbf{f}_i = \left. \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{q}} \right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_i} \quad (21)$$

Yukarıdaki denklemde \mathbf{f} daha önceden de sunulduğu üzere yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanının esneklik matrisidir. Eleman asıl sistemdeki kuvvetleri \mathbf{q} 'nun yukarıdaki gibi artımsal olarak elde edilmesiyle, her bir kesitte ve ayrıca yarı-rijit bağlantılarda yeni kesit kuvvetleri denge sayesinde hesaplanabilecektir.

Kesit tepkisinin elde edilebilmesi açısından Denklem 13 ile hesaplanan yeni eleman kuvvetlerinden elde edilen kesit kuvvetleri ile kesit modelinin tepkisinin uyum içinde olması gerekmektedir. Kesitlerde fiber modeli kullanarak malzeme noktalarında oluşan birim şekil değiştirmelerden kesit kuvvetleri hesaplanmaktadır. Aynı durum lokalize bağlantı noktalarında da gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak kesitlerde ve bağlantı noktalarında deformasyonlara ihtiyaç duyacak şekilde bir tepki hesaplayabilmek mümkün olmaktadır, yani $\mathbf{s}(\mathbf{e})$ kesitlerde ve $\mathbf{s}(\Delta_{YRB})$ de yarı-rijit bağlantılarda. Denklem 13'ten elde edilen yeni kesit kuvvetleri ise $\mathbf{b}(x)\mathbf{q} + \mathbf{s}_p(x)$ şeklinde hesaplanmaktadır. Elemandan gelen kuvvetlerin, kesit modellerinden ve bağlantı modellerinden gelenlerle örtüşmesinin sağlanması gerekmektedir ve bu durum aşağıdaki gibi yazılır:

$$\mathbf{b}(x)\mathbf{q} + \mathbf{s}_p(x) \equiv \mathbf{s}(\mathbf{e}) \quad (22)$$

Bu denklemin sağlanabilmesi için doğrusallaştırma yapılması genel durumlarda gerekecektir ve bu da aşağıda yazıldığı gibi gerçekleştirilir:

$$\Delta \mathbf{e} = [\mathbf{k}_{s,i}]^{-1} \{ \mathbf{b}(x)\mathbf{q}_i + \mathbf{s}_p(x) - \mathbf{s}(\mathbf{e}_i) \} \quad (23)$$

Lokalize yarı-rijit bağlantı noktalarında da benzer şekilde bir eşitleme ve ardından doğrusallaştırma gerekecektir. Bunu ifade edebilmek için örneğin sadece moment-dönme tipinde bir yarı-rijit bağlantı modeli tepkisi kullanıldıysa, aşağıda yazıldığı gibi bir eşitliğin sağlanması gerekecektir:

$$\left(\frac{x}{L} - 1 \right) q_2 + \frac{x}{L} q_3 + \frac{L^2}{2} \left(\frac{x^2}{L^2} - \frac{x}{L} \right) w_y \equiv M(\theta_{SC}) \quad (24)$$

Yukarıdaki denklemin doğrusallaştırılmasıyla artımsal ilişki elde edilir:

$$\Delta\theta_{SC} = \left[\frac{\partial M}{\partial \theta} \right]^{-1} \left\{ \left(\frac{x}{L} - 1 \right) q_{2,i} + \frac{x}{L} q_{3,i} + \frac{L^2}{2} \left(\frac{x^2}{L^2} - \frac{x}{L} \right) w_y - M(\theta_{SC,i}) \right\} \quad (25)$$

Her bir kesitte ve ayrıca bağlantılarda yeni deformasyonların hesaplanmasıyla, kesit tepki kuvvetleri bünye bağıntı modelleriyle elde edilir. Ardından kuvvet-bazlı formülasyonun eleman seviyesinde de düzeltmeleri gerçekleştirilerek, sonuç olarak eleman esneklik matrisinin tersinden rijitlik matrisi ve ayrıca elemanın ucundaki düğüm kuvvetleri hesaplanır. Bu yöntemin çok daha detaylı sunumu [7]'de yarı-rijit bağlantıların olmadığı durum için gerçekleştirilmiştir. Bağlantıların varlığı çözüm algoritmalarında değiştirmemekte, sadece eleman içinde hesaplanması gereken tepkilere yarı-rijit bağlantının tepkilerinin katılmasını gerektirmektedir.

Eleman asıl sistemindeki kuvvetler \mathbf{q} değerlerinin lokaldeki bütün sisteme $\bar{\mathbf{p}}$ ve ardından da global sisteme \mathbf{p} aktarılması da aşağıdaki denklemlerle elde edilir:

$$\mathbf{p} = \mathbf{a}_r^T \bar{\mathbf{p}}; \quad \text{where } \bar{\mathbf{p}} = \mathbf{a} \mathbf{q} \quad (26)$$

Benzer şekilde elemanın globaldeki yapı rijitlik matrisine katkısını sunacak eleman global rijitlik matrisi de aşağıdaki denklemlerle elde edilir:

$$\mathbf{k}_{el} = \mathbf{a}_r^T \left(\mathbf{a}^T \mathbf{f}^{-1} \mathbf{a} \right) \mathbf{a}_r \quad (27)$$

3.6. Doğrusal Olmayan Geometrik Etkiler

Doğrusal olmayan geometrik etkilerin yakalanabilmesi için [62] ve [12] tarafından önerilen eş-dönmeli dönüşüm (corotational transformation) kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulanabilmesi için eleman türetiminin rijit modlarından arındırılmış asıl sistemde yapılması gerekmektedir ki, zaten daha önceki kısımlarda da anlatıldığı üzere geliştirilen yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanı bu şekilde geliştirilmiştir.

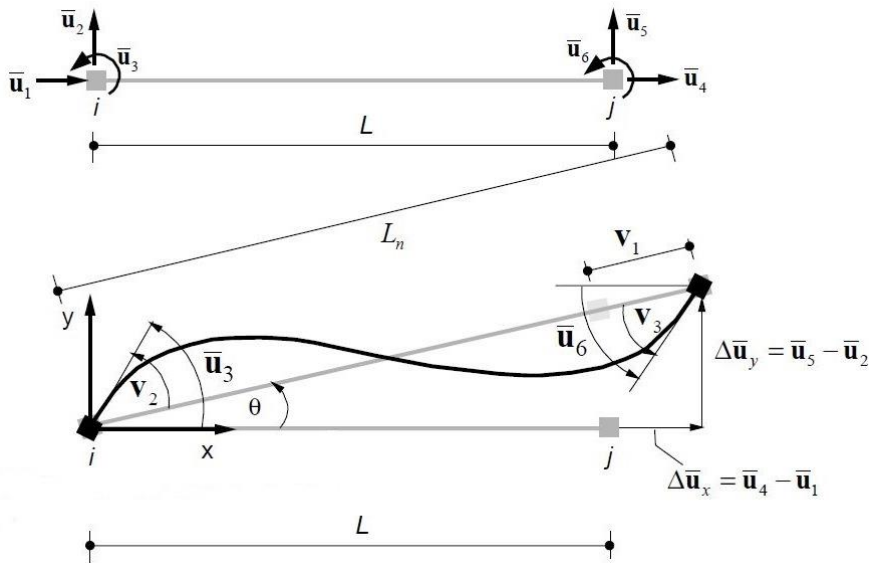
Şekil 3'te bu dönüşümü sağlayan temsili resim sunulmuştur. Burada eleman düğüm deplasmanları bütün sistemden asıl sisteme büyük deplasmanların varlığı dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Eleman asıl deformasyonları böylece aşağıda yazıldığı gibi hesaplanır:

$$\mathbf{v}_1 = \frac{1}{2L}(L_n^2 - L^2); \quad \mathbf{v}_2 = \bar{\mathbf{u}}_3 - \theta; \quad \mathbf{v}_3 = \bar{\mathbf{u}}_6 - \theta \quad (28)$$

Yukarıdaki denklemde L_n elemanın uzamış boyunu temsil etmektedir ve Şekil 3'te görülen iki düğüm noktası arasındaki en kısa mesafedir. Dönme açısı θ da aynı şekilde sunulmuştur. Bu değerler aşağıda yazıldığı gibi hesaplanır:

$$L_n = \sqrt{(L + \bar{\mathbf{u}}_4 - \bar{\mathbf{u}}_1)^2 + (\bar{\mathbf{u}}_5 - \bar{\mathbf{u}}_2)^2} \quad \text{ve} \quad \theta = \text{atan}\left(\frac{\bar{\mathbf{u}}_5 - \bar{\mathbf{u}}_2}{L + \bar{\mathbf{u}}_4 - \bar{\mathbf{u}}_1}\right) \quad (29)$$

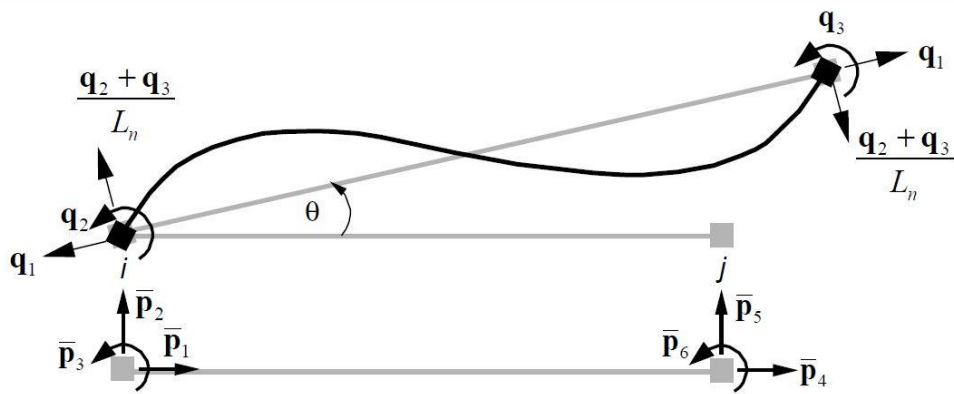
Böylece artık doğrusal geometri altında daha önceden anlatıldığı üzere asıl eleman deformasyonları hesaplanmayacak, doğrusal olmayan durum dikkate alınarak yukarıda sunulan denklemler yardımıyla bir hesap yapılacaktır.



Şekil 3. Büyük deplasmanlar altında çerçeve elemanındaki deformasyonlar

Elemana yapıdan etkileyen asıl deformasyonların doğrusal olmayan geometrik şartlar da dikkate alınarak hesaplanmasıyla \hat{v} değeri elde edilir ve bu elemana etkilir. Sonrasında eleman içindeki hesaplama yöntemi aynen bir önceki bölümde anlatıldığı üzere sürdürülür ve ardından eleman esneklik matrisi \mathbf{f} ve asıl kuvvetler \mathbf{q} elde edilir. Eleman asıl kuvvetlerinin lokal sisteme döndürülmesi de doğrusal olmayan geometri dikkate alınarak gerçekleştirilir ve bunun için Şekil 4'te sunulan denge durumu dikkate alınarak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\bar{\mathbf{p}} = \mathbf{a}_u^T \mathbf{q}; \text{ and } \mathbf{a}_u = \begin{bmatrix} -\frac{(L + \bar{u}_4 - \bar{u}_1)}{L_n} & -\frac{(\bar{u}_5 - \bar{u}_2)}{L_n} & 0 & \frac{(L + \bar{u}_4 - \bar{u}_1)}{L_n} & \frac{(\bar{u}_5 - \bar{u}_2)}{L_n} & 0 \\ -\frac{(\bar{u}_5 - \bar{u}_2)}{L_n^2} & \frac{(L + \bar{u}_4 - \bar{u}_1)}{L_n^2} & 1 & \frac{(\bar{u}_5 - \bar{u}_2)}{L_n^2} & -\frac{(L + \bar{u}_4 - \bar{u}_1)}{L_n^2} & 0 \\ -\frac{(\bar{u}_5 - \bar{u}_2)}{L_n^2} & \frac{(L + \bar{u}_4 - \bar{u}_1)}{L_n^2} & 0 & \frac{(\bar{u}_5 - \bar{u}_2)}{L_n^2} & -\frac{(L + \bar{u}_4 - \bar{u}_1)}{L_n^2} & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$



Şekil 4. Deforme olmuş kiriş üstündeki denge durumu

Elemanın lokal sistemdeki rijitlik matrisiyle eleman kuvvetlerinin deplasmanlara göre türevinin alınmasıyla aşağıdaki gibi yazılır:

$$\bar{\mathbf{k}} = \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial \bar{\mathbf{u}}} = \frac{\partial (\mathbf{a}_u^T)}{\partial \bar{\mathbf{u}}} \mathbf{q} + \mathbf{a}_u^T \mathbf{f}^{-1} \mathbf{a}_u \quad (31)$$

Yukarıdaki denklemde \mathbf{f} esneklik matrisini içeren kısım malzeme modelinden kaynaklanan rijitlik, ilk kısım ise doğrusal olmayan geometriden kaynaklanan kısımdır; ancak esneklik matrisinin de eş-dönüşüm yöntemi ile asıl sistemden lokal sisteme aktarılması sırasında doğrusal olmayan bir geometrik etkinin varlığı \mathbf{a}_u matrisi ile oluşur. Bu matrisin lokal deplasmanlar $\bar{\mathbf{u}}$ değerine göre türevine Denklem 23'te ihtiyaç duyulmaktadır ve bu da aşağıda hesaplanmıştır:

$$\frac{\partial(\mathbf{a}_u^T)}{\partial \bar{\mathbf{u}}} \mathbf{q} = \begin{bmatrix} s^2 & -cs & 0 & -s^2 & cs & 0 \\ -cs & c^2 & 0 & cs & -c^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s^2 & cs & 0 & s^2 & -cs & 0 \\ cs & -c^2 & 0 & -cs & c^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\mathbf{q}_1}{L_n} + \begin{bmatrix} -2cs & c^2 - s^2 & 0 & 2sc & s^2 - c^2 & 0 \\ c^2 - s^2 & 2sc & 0 & s^2 - c^2 & -2sc & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2sc & s^2 - c^2 & 0 & -2sc & c^2 - s^2 & 0 \\ s^2 - c^2 & -2sc & 0 & c^2 - s^2 & 2sc & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3}{L_n^2} \quad (32)$$

ve

$$c = \frac{L + \bar{\mathbf{u}}_4 - \bar{\mathbf{u}}_1}{L_n} \quad \text{ve} \quad s = \frac{\bar{\mathbf{u}}_5 - \bar{\mathbf{u}}_2}{L_n} \quad (33)$$

3.7. Özet: Geliştirilen Yarı-Rijit Bağlantı Çerçeve Elemanı Özellikleri

Yukarıda sunumu yapılan üç boyutlu çerçeve elemanının, ayrıca iki boyutlu hali de bilgisayar da kodlanmıştır. Gerekli görülen şartlar altında iki boyutlu analizler yürütmek, analiz süresinin kısaltılması açısından avantajlar sunabilmektedir. Geliştirilen çerçeve elemanında ayrıca farklı özelliklerin yakalanabilmesi açısından seçenekler de mevcuttur. Yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanının tüm özellikleri Tablo 1'de bir sonraki sayfada topluca sunulmuştur.

Tablo 1. Geliştirilen yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanları ve özellikleri

	Yarı-Rijit Bağlantılı Doğrusal olmayan Çerçeve Elemanı			
	Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi		Timoshenko Kiriş Teorisi	
	2 Boyutlu	3 Boyutlu	2 Boyutlu	3 Boyutlu
Eleman düğüm noktası sayısı	2	2	2	2
Eleman toplam serbestlik derecesi	6	12	6	12
Kesme deformasyonu				
Kesme gerilmesi	x	x	✓	✓
Kesme birim deformasyonu				
Kuvvet-bazlı formülasyon	✓	✓	✓	✓
Kuvvet şekil fonksiyonları				
Kuvvet-bazlı tutarlı kütle matrisi	✓	✓	✓	✓
Eleman boyunca yayılı plastisite (elastik olmayan davranış) modelleme	✓	✓	✓	✓
Doğrusal olmayan geometri	✓	✓	✓	✓
Doğrusal/doğrusal olmayan yarı-rijit bağlantı katma	✓	✓	✓	✓
Fiber kesit modeli kullanarak doğrusal olmayan etkileşimi kesit üstünde ve eleman boyunca dikkate alma	✓	✓	✓	✓
Kesit üstünde kullanılacak malzeme modeli kaç eksenli?	Tek	Tek	Tek/Çok	Tek/Çok
Kesitlerde doğrusal olmayan etkileşim tipleri N:Eksenel, M: Moment, V: Kesme, T: Burulma	N, M	N, M _y , M _z	N, M, V	N, M _y , M _z , V _y , V _z , T
Yarı-rijit bağlantılarda dikkate alınacak davranış tipleri	N(δ) M(θ)	N(δ) M _y (θ_y) M _z (θ_z)	N(δ) M(θ)	N(δ) M _y (θ_y) M _z (θ_z)

4. YARI-RIJİT BAĞLANTI MODELLEMELERİ

Bu bölümde proje kapsamında ileriki bölümlerde yapı sistemleri analizlerinde kullanılan yarı-rijit bağlantı modellerinin tanıtımı yapılmıştır. Ayrıca proje kapsamında geliştirilmiş olan bir modelin sunumu ve ayrıca doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.1. Monotonik Davranış için Modeller

Yarı-rijit bağlantılar için en basit modeller moment-dönme tipinde sunulmaktadır. Bu açıdan en basit model doğrusal modeldir ki bu modelin tek parametresi bağlantının ilk rijitlik değeri $k_{YRB,ilk}$ olarak tanımlanır. Bu değer genellikle bağlanılan elemanın eğrilik rijitliği EI/L değeri ile ilişkilendirilir. Doğrusal modellerin kullanımı çoğunlukla titreşim analizleri ve ayrıca burkulma yüklerinin bulunabilmesinde dikkate alınır.

Doğrusal modelden sonraki en basit doğrusal olmayan model çift doğruyla tanımlanmış modellerdir ve bunlar doğrusal olmayan davranışı katmakta kolaylık sağlar. Doğrusal olmayan modellerde ayrıca sürekli olarak türeve sahip olan polinom modeli [33] ve üstel (power) modeli [35] de literatürde sıkça kullanılmaktadır. Polinom modelinde deneysel verilere ve parametrelerin kalibrasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlantı tipine göre farklılıklar göstereceği için tavsiyeler literatürde sunulmuştur [4].

İlk sunulan power modeli iki parametrelidir [34], ve kalibrasyon açısından gene deneysel verilere ihtiyaç duymuştur. Ancak üç parametrelili power modelinin uygulaması görece olarak daha basittir ve denklem şu şekilde yazılmaktadır:

$$M = k_{YRB,ilk} \theta / \left[1 + (\theta/\theta_0)^n \right]^{1/n} \quad \text{ve} \quad \theta_0 = M_u / k_{YRB,ilk} \quad (34)$$

Yukarıdaki denklemde M_u bağlantının taşıyabileceği en büyük moment değeridir, n şekil parametresidir ve bu deneysel verilerle kalibrasyona dayanır; $k_{YRB,ilk}$ ise bağlantının ilk rijitlik değeridir ve teorik varsayımlarla bağlantı bölgesini oluşturan farklı parçaların davranışları

dikkate alınarak hesaplanır, bu hususta detaylı sunum için [63]'e bakılabilir. Bağlantının taşıyabileceği en büyük moment ise bağlantı parçalarındaki elastik ve plastikleşen parçaların davranışlarından etkilenmektedir [35]. Bu değer için Eurocode 3 ve ayrıca [36]'da sunulan çalışmalar da dikkate alınabilir.

Monotonik modeller sürekli fonksiyonlar yerine, çok parçalı doğrulardan oluşacak şekilde de tanımlanabilir. Bu tanım için power modelindeki ilk rijitlik ve ayrıca en büyük moment kapasite değerlerinin hesabından faydalanarak çok parçalı eğrinin oluşturulabilmesi mümkündür. En büyük moment dayanımının ardından ayrıca bağlantı bölgesinde kolaylıkla dayanımda düşüş tanımlayabilmek bu tür modellerle kolaylıkla sağlanabilmektedir.

Monotonik modellerde dikkate alınan davranışlar için [64] ve [65]'teki literatür taraması sunan çalışmalara bakılabilir. Bu projede hem doğrusal, hem de doğrusal olmayan polinom, power ve ayrıca çok parçalı doğrusal olmayan modeller daha sonraki bölümlerde başarıyla kullanılmış ve daha önceki bölümde sunulan yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanı ile analizler yürütülmüştür.

4.2. Çevrimsel Davranış için Modeller

Çevrimsel davranışın yarı-rijit bağlantılarda tanımlanması monotonik davranışa göre çok daha farklı karmaşıklıklar getirmektedir. Sürekli fonksiyonların kullanılmasıyla çevrimsel davranışta yükleme boşaltma davranışının, dayanım düşüşünün, daralma etkilerinin modellenmesi çok zordur. Bu açıdan aslında en uygun modelleme yaklaşımının çok parçalı doğrusal modellerin kullanılması olduğu anlaşılmaktadır.

Bu tespite rağmen, literatürde [21] ve [24]'te dayanım ve rijitlik düşüşleri ve daralma etkileri ihmal edecek şekilde modeller kullanılmıştır, örneğin sürekli doğrusal olmayan [25] ve [66] tarafından sunulan modeller. Bu çalışmalara göre ilerleme kaydetmeye çalışılmış bir araştırmada, rijitlik düşüşleri ile daralma etkisi modellenmeye çalışılmıştır [67]. Bu son çalışmanın türetildiği orijinal model [66]'daki çalışmadır. Bu modelin eksikliği de bağlantı bölgesindeki dayanım düşüşünü dikkate alamamasıdır.

Aslında daha önceden de belirtildiği üzere sürekli doğrusal olmayan modeller yerine, parçalı doğrulardan tanımlanmış doğrusal olmayan modellerin kullanılması çok daha pratiktir. Aslında bu açıdan iki parçalı bir model [68] tarafından çevrimsel davranışı modellemek için

kullanılmıştır; ancak iki parçalı modeller genel davranışı çok kabaca yakalamaya çalışmaktadır. Bağlantı bölgesinde karmaşık davranışı yakalayabilmek için iki doğruludan daha fazla modellerin kullanılması çoğunlukla gerekli olmaktadır. Örneğin farklı uygulamalar için geliştirilmiş olan [69] veya [70]'teki modeller yarı-rijit bağlantılarda denenebilir.

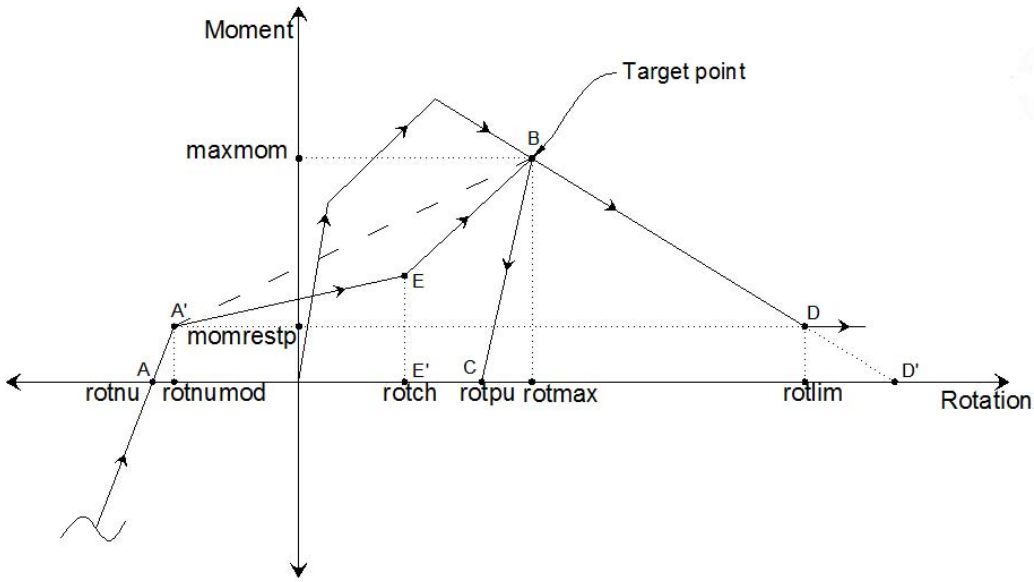
Bir sonraki kısımda, proje kapsamında geliştirilmiş olan çok parçalı doğrulardan oluşan çevrimsel bir modelin sunumu yapılmıştır. Bu model ayrıca doğrulama çalışması kapsamında deneysel verilerle de karşılaştırılmıştır ve parametrik analizler kapsamında da başarılı bir şekilde kullanımı gerçekleştirilmiştir.

4.3. Çevrimsel Davranış için Model Türetimi

Proje kapsamında geliştirilen model çok parçalı doğru bir modeldir. İhtiyaç duyulduğunda monotonik davranışı kapsayan eğrinin daha sofistike tanımlanabilmesi için üç ya da dört parçalı doğru davranış sunulabilmektedir. Ayrıca modelde dayanım ve rijitlik düşüşleri ile daralma etkisine ek olarak ihtiyaç duyulursa artık moment dayanım kapasitesi de modele girilebilmektedir. Bu modelin ihtiyaç duyduğu temel parametreler şunlardır: başlangıç (ilk) rijitlik değeri, akma değeri, maksimum dayanım değeridir. Bunlar genellikle monotonik modeller için sunulan polinom ya da power modellerinde pek çok farklı bağlantı modelleri için verilmektedir. Bu değerlerin kullanılmasıyla, bağlantının monotonik eğrisinin tanımlanması gerçekleştirilmiş olunur. Ayrıca rijitlik düşüşü hariç, yükleme boşaltıldığında ilk rijitlik değerinin başlangıç rijitliği olarak alınmasını varsaymak gerçekçi olacaktır.

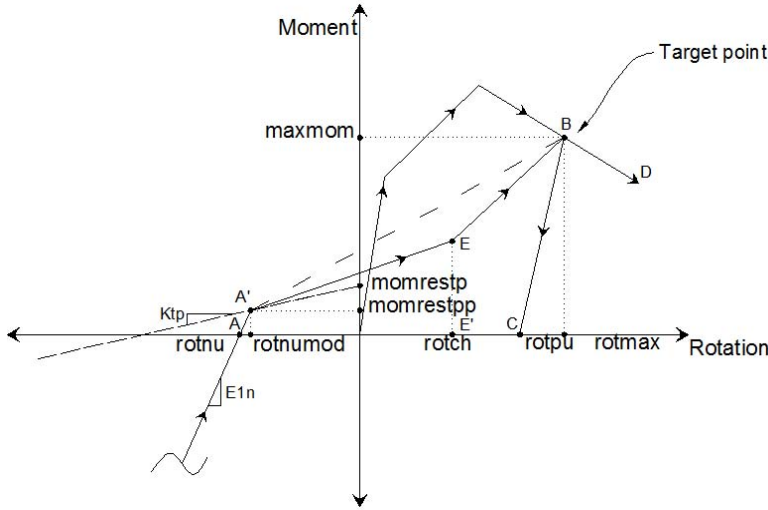
Bağlantılarda daralma etkilerinin oluşmasının farklı sebepleri vardır. Daralma davranışı, bağlantı bölgesini oluşturan parçaların birbirinden uzaklaşması ve boşluklar oluşması yüzünden yükün tersinir olarak etkimesinde bu boşluğun kapanması aşamasında meydana gelen ve bağlantı bölgesinin enerji harcama kapasitesini azaltan bir durum olarak tanımlanır. Benzer şekilde bulonların bağlandığı deliklerde de elips şeklinde ezilmeden oluşan durum oluşmakta, tersinir yük altında bulonlar boşlukta hareket ederek, temas oluşana kadar enerji harcanmayan ve sonuç olarak yük deplasman eğrisinde daralmaya neden olan durum oluşmaktadır [32]. Daralma durumu aslında pek çok yapı elemanında farklı şartlar altında gözlemlenebilecek ve modellere mutlaka katılması gereken bir davranış olarak karşımıza çıkmaktadır.

Deneylerde daralmanın gözlemlendiği durumlarda ayrıca rijitlik değerinde de düşüş veya kayıp oluşmaktadır, özellikle de bu rijitlik kaybı yükün boşalarak tam tersi yonder sıfır yükleme değerindeki eksenden geçtiğinde gözlemlenen bir davranış olarak görülmektedir [32]. Yani rijitlik değeri yük boşaltılırken belli bir seviyeye kadar etkilenmemekte (değişmemekte) ve sonrasında ortaya çıkmaktadır. Bazen bu olayın oluştuğu yük değeri sıfırdan farklı bir değerde de gözlemlenebilmektedir. Geliştirilen modelde bu durum dikkate alınmış ve örneğin moment-dönme tipi bir davranış açısından artık moment (residual moment) değerinde rijitlikte değişim/düşüşün oluşturulması dikkate alınmıştır. Şekil 5'te sunulduğu üzere, A noktasında artık moment değerinde daralmanın başladığı ve bu seviyeden sonra da rijitlikte düşüş olması dikkate alınmıştır. Ayrıca bu şekilde görüldüğü üzere, artık moment kapasitesi monotonik eğride limit bir dönme (*rotlim*) değerinden sonra da kullanılan ve eğriyi tanımlayan bir değer olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 5. Geliştirilen modelin tasviri davranışı - I

Ayrıca bazı yarı-rijit bağlantıların deneysel davranışında, artık moment değerinin çevrimsel dönüşler altında azalabildiği görülmüştür. Bu durumu da dikkate alabilmek için Şekil 6'da K_{rp} değeri dikkate alınarak modelde geliştirme yapılmıştır. Ayrıca dönüş miktarı arttıkça, bu şekilde artık moment değeri de iyice düşerek negatif değerler de alabilmektedir. Bu durum da bazı deneysel verilerde görülmüştür.



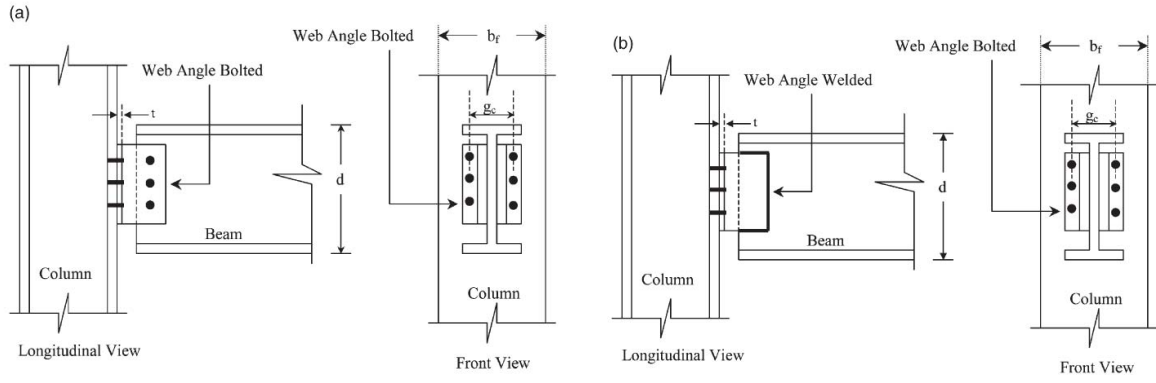
Şekil 6. Geliştirilen modelin tasviri davranışı - II

4.4. Çevrimsel Davranış için Türetilen Modelin Doğrulanması

Karşılaştırmalar açısından öncelikle Abolmaali vd.[32] tarafından literatürde sunulan hem bulonlu-bulonlu (bolted-bolted) hem de kaynaklı-bulonlu (welded bolted) çift gövde bağlantı (double web angle connection) tipinde yarı-rijit bağlantılarla ilgili deneyler dikkate alınmıştır. Abolmaali vd. çalışmasında 5 adet bulonlu-bulonlu tipte, 5 adet de kaynaklı-bulonlu tipte çift gövde bağlantılı numuneleri test etmiştir. Kaynaklı-bulonlu bağlantıların tepkisinin moment aktaran tipte bağlantı klasmanında olduğu belirtilmiştir.

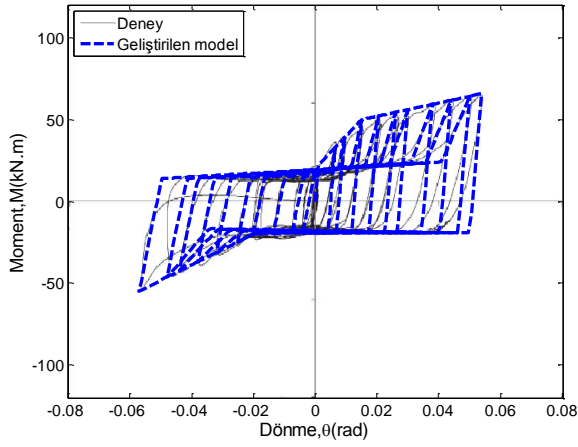
Abolmaali vd.'nin çalışmasında deneyi yapılan numunelerle ilgili sunulan temsili çizimler Şekil 7'de verilmiştir. Yürütülen deney ile ilgili detaylı bilgi için Abolmaali vd.'nin çalışmasına bakılabilir. Deney artan döngüsel yüklemenin şekilde gösterilen kirişin ucundan uygulanması ile sağlanmıştır.

Geliştirilen kolon-kiriş yarı-rijit bağlantı modelinin kullanılmasıyla öncelikle bulonlu-bulonlu tipteki numuneler için karşılaştırmalar Şekil 8'de sunulmuştur. Şekil 9'da ise kaynaklı-bulonlu tipteki numuneler için karşılaştırmalar sunulacaktır. Her iki şekilde de görüleceği üzere, çevrimsel (cyclic) eğrilerde çok ciddi seviyede daralma (pinching) etkileri görülebilmektedir ve bunun doğru bir şekilde yapısal analizlerde modellenmesi de önem arz edecektir. Geliştirilen kolon-kiriş yarı-rijit bağlantı modelinin tepkisinin deneysel sonuçlarla gerçekçi bir şekilde örtüşebildiği görülmektedir.

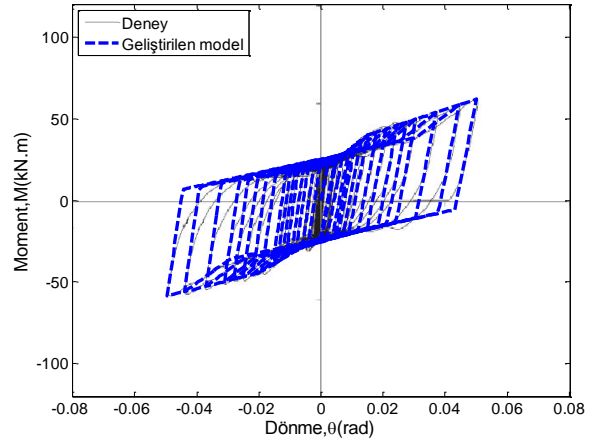


Şekil 7. Abolmalı vd.'nin deneylerini yürüttüğü çift gövde bağlantılar

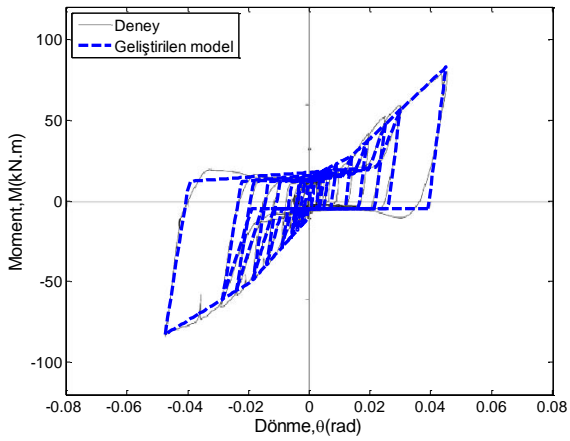
a) bulonlu-bulonlu tipte, b) kaynaklı-bulonlu tipte



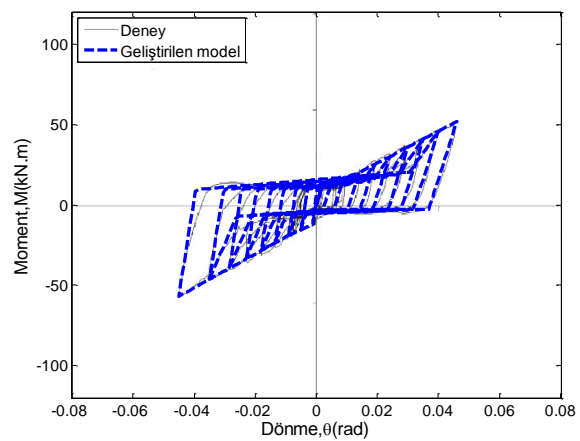
a) DW-BB-102-16-19-114-4-406



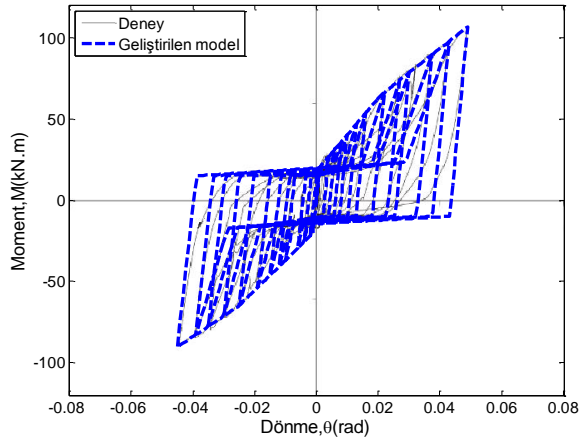
b) DW-BB-102-10-19-114-5-533



c) DW-BB-127-13-16-114-5-610

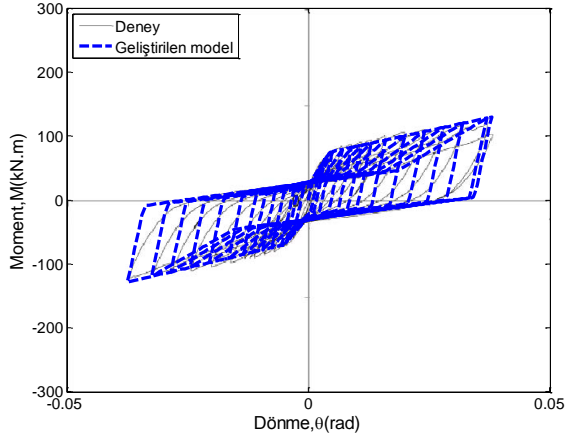


d) DW-BB-102-13-19-114-4-610

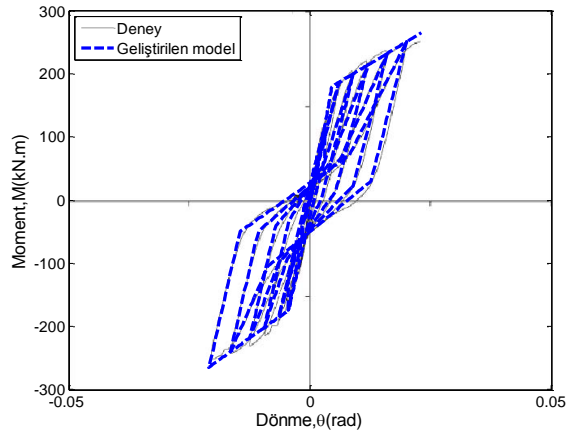


e) DW-BB-127-13-16-114-5-610

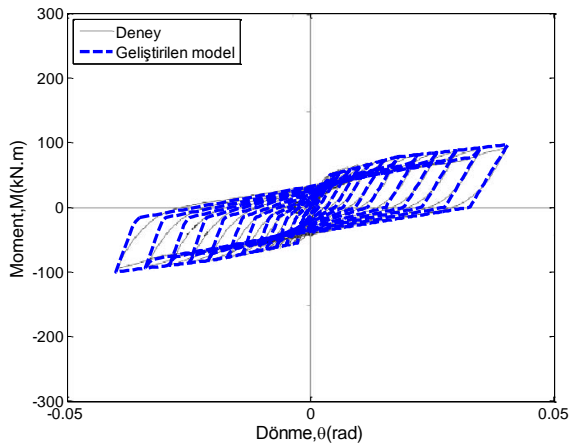
Şekil 8. Abolmaali vd.'nin bulonlu-bulonlu deneyleri ile karşılaştırma



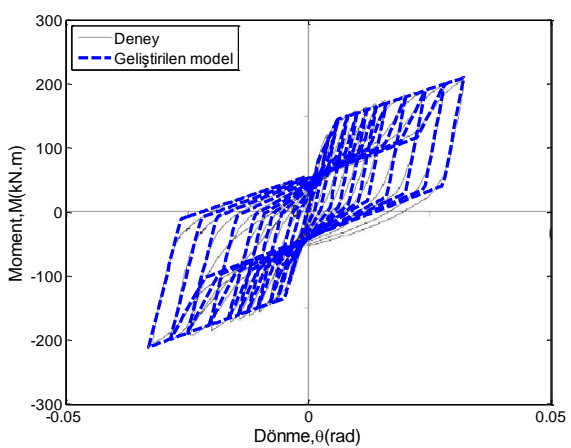
a) DW-WB-76-13-19-89-4-610



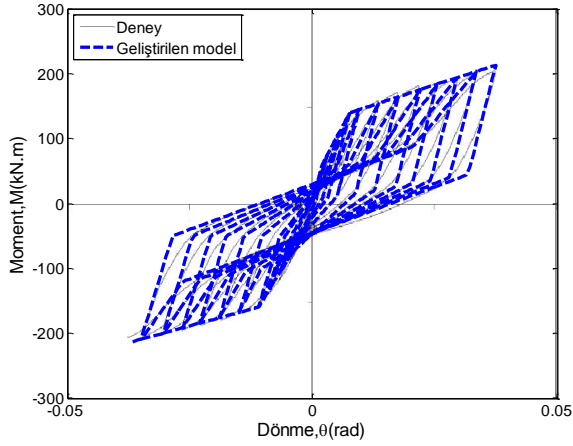
b) DW-WB-102-16-19-89-5-610



c) DW-WB-102-10-19-89-4-610



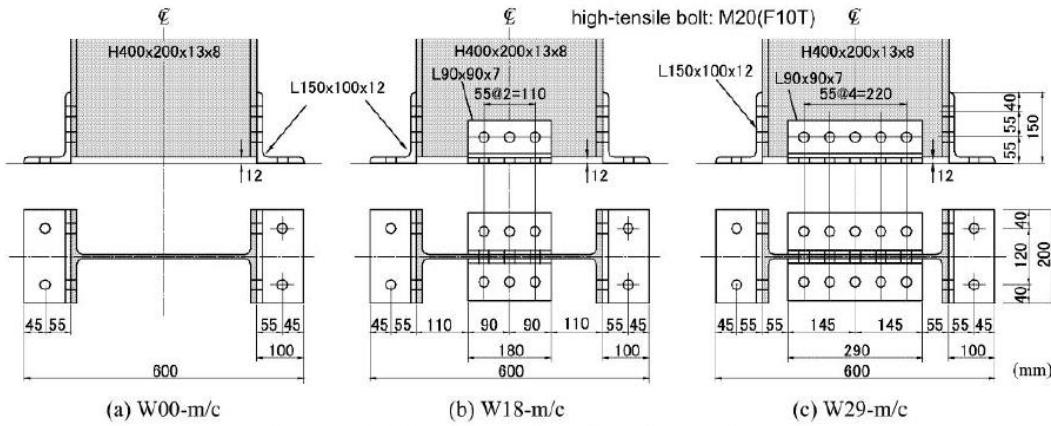
d) DW-WB-127-13-16-114-6-610



e) DW-WB-152-19-19-191-5-610

Şekil 9. Abolmaali vd.'nin kaynaklı-bulonlu deneyleri ile karşılaştırma

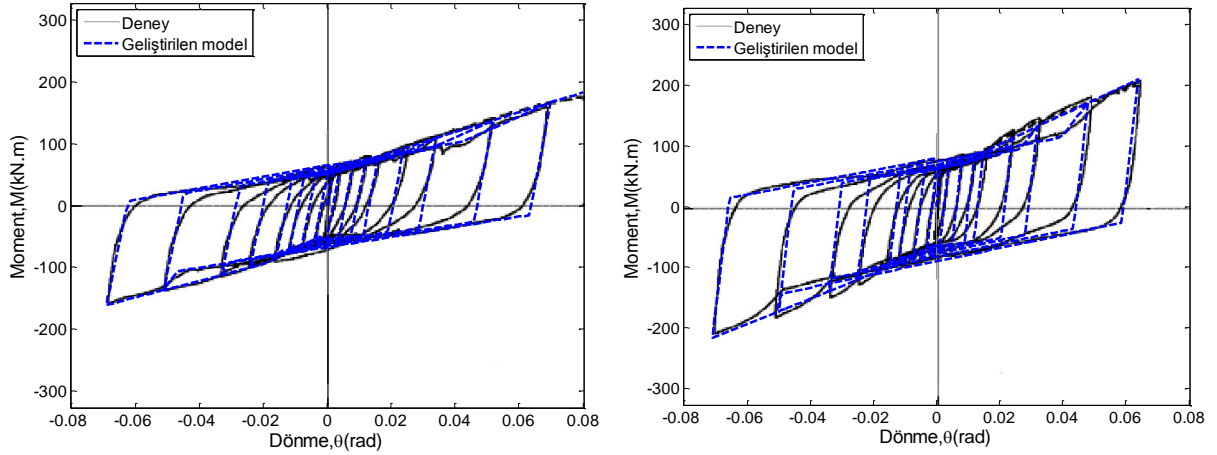
Geliştirilen kolon-kiriş yarı-rijit bağlantı modelinin ikinci karşılaştırması için Komuro vd.[29]'nin deneyini yaptığı kiriş alt ve üst flanjarından bağlantılı (top and seat angle connection); kiriş alt ve üst flanjarından ve çift gövde bağlantılı (top and seat angle with double web angle connection) tipindeki numuneler dikkate alınmıştır. Komuro vd.'nin çalışmasında deneyi yapılan numunelerle ilgili sunulan temsili çizimler Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Komuro vd.'nin deneyleri: a) kiriş alt ve üst flanjarından bağlantılı; b) ve c) kiriş alt ve üst flanjarından ve çift gövde bağlantılı

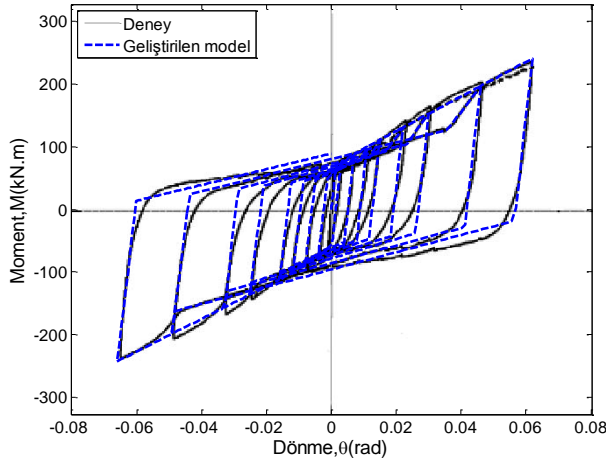
Yürütülen deney ile ilgili detaylı bilgi için Komuro vd.'nin çalışmasına bakılabilir. Deney artan döngüsel yüklemenin uygulanması ile sağlanmıştır. Komuro vd.'nin deney numuneleri flanaj ve gövdeden bağlı olmaları sebebiyle sadece gövdeden bağlı olan Abolmaali vd.'nin döngüsel eğrilere çok daha az daralma göstermektedir (Şekil 11); ancak döngüsel eğrilere

görülebileceği üzere bu bağlantı tipleri için de döngüsel hareketteki doğrusal olmayan davranışın doğru bir şekilde yakalanması önem arz etmektedir. Geliştirilen model histeretik doğrusal olmayan davranışı gerçekçi olarak modelleyebilmektedir.



a) W00 numunesi

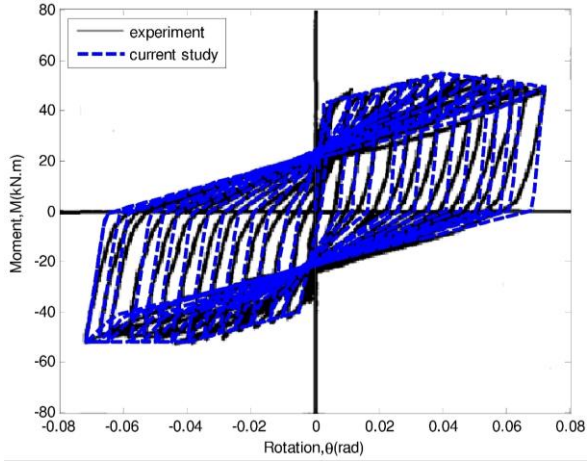
b) W18 numunesi



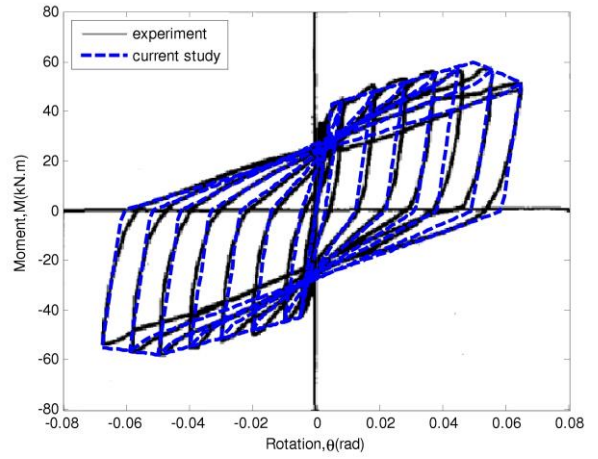
c) W29 numunesi

Şekil 11. Komuro vd.'nin deneyleri ile karşılaştırma

Son olarak da Bernuzzi vd. [71]'nin sunduğu floş plaka bağlantılı deney sonuçlarıyla karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Şekil 12'de görüldüğü üzere geliştirilen model deneysel sonuçları takip edebilmekte üstün başarı sergileyebilmektedir.



a) FPC/B bağlantısı



b) FPC/D bağlantısı

Şekil 12. Geliştirilen modelin Bernuzzi vd.'nin [71] floş uç plakayla bağlantılı deneyleriyle karşılaştırılması

5. STATİK YÜKLER ALTINDA KARŞILAŞTIRMALAR

Bu bölümde proje kapsamında daha önceki bölümlerde sunumu yapılan yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanın ve bağlantı modellerinin kullanılmasıyla detaylı doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

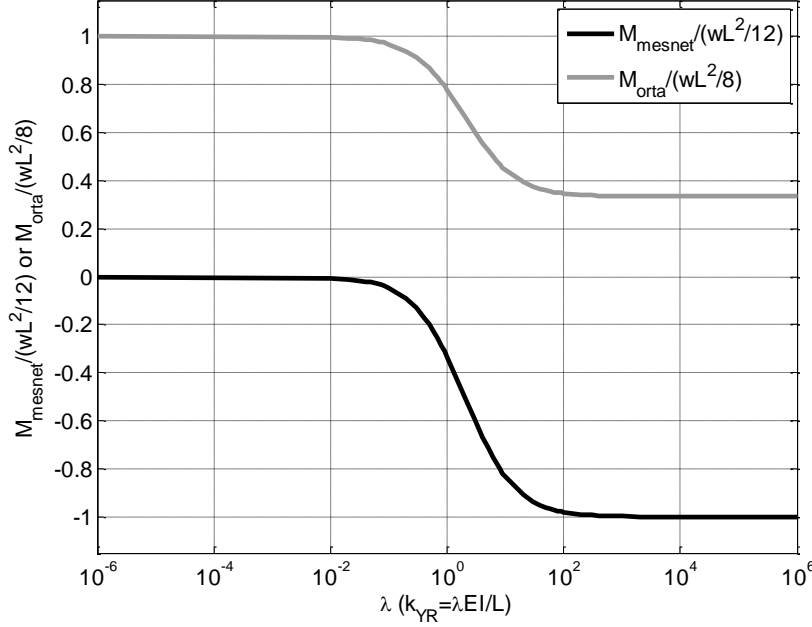
5.1. Sayısal Karşılaştırmalar ve Doğrulamalar:

5.1.1. Doğrusal Elastik Davranışın İncelenmesi

Öncelikle, geliştirilen elemanın doğrusal elastik şartlar altında performansı test edilecektir. İki ucu ankastre “ L ” boyunda kirişin sabit yayılı yük “ w ” altında yüklendiği dikkate alınmıştır. Kirişin rijitliği EI olarak alınmıştır; karşılaştırma açısından EI değerinin nümerik olarak verilmesine burada gerek duyulmamıştır. Yapısal analiz sonucunda elle hesaplandığında mesnet moment değeri $wL^2/12$ olmakta, kiriş ortasında ise $wL^2/24$ momenti hesaplanmaktadır. İki ucu basit mesnetli kiriş durumunda ise kiriş uçlarında moment doğal olarak oluşmamakta ve kiriş ortasındaki moment değeri ise $wL^2/8$ 'dir.

İki ucu ankastre kiriş problemi, geliştirilen elemanla modellenmiştir. Elemanın iki ucunda yarı-rijit bağlantı olarak doğrusal elastik olarak dönebilen bağlantı var olduğu düşünülmüştür ve ekseneldeki bağlantı davranışının rijit olduğu varsayılmıştır. Yarı-rijit (YR) bağlantının moment-dönme davranışının rijitliği $k_{YR} = \lambda EI/L$ olarak alınmıştır ve λ katsayısı 0'a yakın bir değerden çok büyük değere değişimi ile kiriş üstünde oluşacak davranışın tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu problem sadece 1 adet yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanı kullanılarak modellenmiştir ve ekstradan serbestlik derecesinde artışa gitmeden analiz yürütülebilmıştır. Rijitlik katsayısı λ değiştirilerek Şekil 13'de sunulan eleman tepkisi elde edilmiştir. Analiz yürütülürken, çerçeve elemanının her iki ucundaki tüm serbestlik dereceleri harekete karşı engellenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, λ katsayısının 0'a yaklaşması ile basit mesnet

durumu doğru bir şekilde hem mesnet hem de kiriş ortasındaki moment değerlerinde yakalanmıştır. Aynı katsayının büyümesi ile iki ucu ankastre durum da elde edilmiştir.



Şekil 13. Yarı-rijit bağlantı rijitliğinin değişmesi sonucu mesnette ve kiriş ortasında oluşan moment değerleri

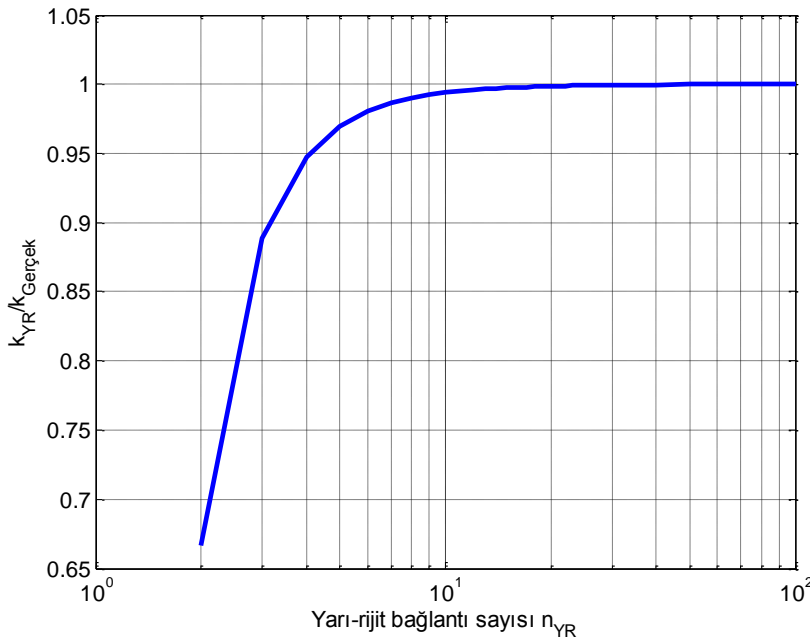
5.1.2. Yarı-Rijit Bağlantı Sayısının Artırılması

İkinci karşılaştırmada ise yarı-rijit çerçeve elemanı ile çok yüksek sayılarda yarı-rijit bağlantı katılmasının ve böylece serbestlik derecesine hiçbir artış olmadan gerçekçi sonuçlar elde edilip edilemeyeceği tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için bir ucu ankastre ve diğer ucu serbest olan bir kolon dikkate alınmıştır. Kolonun boyunun L olduğu, davranışının doğrusal elastik olduğu ve EI rijitliğine sahip olduğu varsayılmıştır. Kolonun serbest ucundan itilmesi durumunda, uygulanan P yükü ile uçta oluşan yanal deplasman Δ arasındaki bağlantının rijitlik değeri $k = 3EI/L^3$ ile elde edildiği bilinmektedir, yani $P = (3EI/L^3)\Delta$.

Bu kolonun modellenmesinde tek bir adet yarı-rijit çerçeve elemanı kullanılmış ve eleman boyunca davranışın tamamen rijit olduğu varsayılarak, hem ekseneldeki hem de eğilmedeki rijitlik değerleri çok büyük verilmiştir. Yani yarı-rijit bağlantı yerleştirilmezse, analizi yapılacak kolon tamamen rijit olduğu için hiçbir eğilme yapamayacaktır.

Kolonun eğilme durumunun yakalanması amacıyla, eleman uzunluğu boyunca n_{YR} sayıda moment-dönme tipinde doğrusal elastik yarı-rijit bağlantılar yayılmıştır. Her bir yarı-rijit bağlantının rijitlik değerine ise gerçek kolonun EI rijitlik değerinin bağlantının temsil ettiği eğilme uzunluğu olan L_{YR} 'ye bölünmesi ile elde edilen değer verilmiştir, yani $k_{YR} = EI / L_{YR}$. Bağlantı uzunluğu ise kullanılan bağlantı miktarından şu şekilde hesaplanmıştır: $L_{YR} = L / (n_{YR} - 1)$. Sonuç olarak bağlantı sayısının artması ve bağlantıların eleman boyunca yayılı olarak dağıtılması ile gerçek durumda eğilebilen kolonun esnekliğine yaklaşıması teorik olarak beklenen tepki olması gerekmektedir.

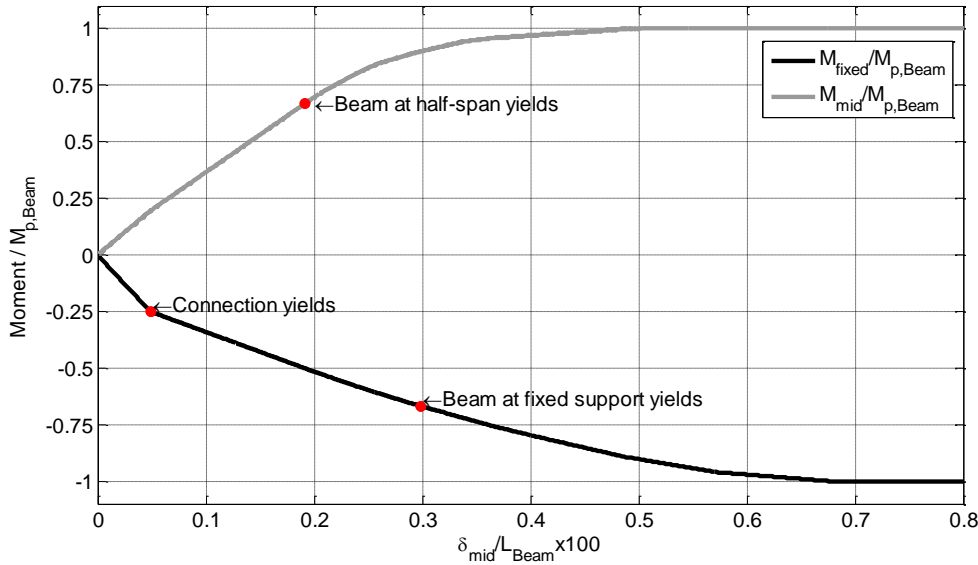
Yarı-rijit bağlantılarla yapılan analizin rijitliğinin gerçek kolonun rijitliği ile karşılaştırması Şekil 3'te sunulmuştur. En az 8 bağlantı kullanarak gerçek durumla %1 hata payı içinde sonuçlar benzeşirken, en az 23 bağlantı yerleştirildiğindeyse sonuçların %0.1 hata payıyla elde edilebildiği görülmüştür. Bağlantı sayısının artırılması ile kesin sonuca ulaşıldığı da Şekil 14'teki grafikte görülmektedir. Bu örnekte de görülebileceği üzere, geliştirilen çerçeve elemanı istenildiği kadar bağlantıyı eleman tepkisine gerçekçi olarak katabilmekte ve bunu yaparken eleman sayısında artışa ihtiyaç duymamakta ve sonuç olarak da analizlerde düğüm noktası ve serbestlik derecesi sayısında artış ortaya çıkmamaktadır.



Şekil 14. Yarı-rijit bağlantı sayısını artırarak ankastre kolonun eğilme davranışının yakalanması

5.1.3. Doğrusal Olmayan Davranışın Yakalanması – İki Ucu Ankastre Kiriş

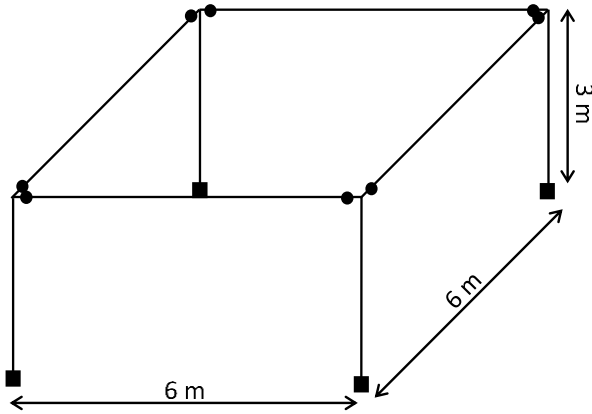
Geliştirilen yarı-rijit bağlantı çerçeve modelinin eleman uçlarında ve içinde yayılı plastisite davranışını yakalayabilmesi, bunu yakalarken kesit üzerindeki tepkileri de doğru bir şekilde hesaplayabilmesi gerekmektedir. Çerçeve modelinin ayrıca var olacak yarı-rijit doğrusal olmayan davranışın varlığını da yakalayabilmesi gerekmektedir. Bu açıdan örnek bir karşılaştırma problemi yaratılmıştır. Bu örnekte uçları ankastre tek bir kiriş elemanının her iki ucunda yarı-rijit bağlantıların olduğu varsayılmıştır. Yarı-rijit bağlantının davranışı iki parçalı doğrusal olarak modellenmiş ve ilk rijitliği $k_{SR,i} = \lambda EI / L$ değerindeki $\lambda = 11$ alınmıştır, EI/L değeri ise kirişin eğilme rijitliğini ifade etmektedir. Bağlantının pekleşme rijitliği ise $k_{SR,h} = 0.2k_{SR,i}$ olarak alınmıştır. Bağlantının akma momenti kirişin plastikleşme momentiyle ilişkilendirilmiştir, $M_{y,SR} = 0.25M_{p,Beam}$. Kirişteki yayılı plastisite 5 Lobatto entegrasyon noktası kullanılarak hesaplanmış ve kiriş derinliği boyunca 10 tabakaya ayrılarak kesit tepkisi hesaplanmıştır. Kirişin üzerine uygulanan sabit yayılı yük altında, kirişin ucunda ve ortasında oluşan tepki aşağıdaki şekilde çizilmiştir. Bu şekilde de görüleceği üzere, oluşturulan örnek problemde, tek bir çerçeve elemanı kullanarak, bağlantılardaki doğrusal olmayan davranış ilk olarak başlamış, sonrasında kirişin orta noktasında plastikleşme oluşmuş ve en son da kirişin uçlarında plastikleşme meydana gelmiştir. Bu analizden de görüleceği üzere, geliştirilen eleman yayılı plastisite davranışı ile yarı-rijit bağlantılarda oluşan doğrusal olmayan tepkiyi tek bir eleman kullanarak yakalayabilmektedir.



Şekil 15. Yarı-rijit bağlantılı çerçeve modeli içinde oluşan plastikleşme

5.1.4. Üç Boyutlu Davranışın Başka Programlarla Karşılaştırılması ve Doğrulanması

Geliştirilen yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanın üç boyutlu yapıların incelenebilmesi ve tepkilerinin control edilebilmesi açısından örnek bir problem oluşturulmuştur. Karşılaştırma yapabilmek için araştırma amaçlı kullanılan ve en ileri analiz platformlarını sunan OpenSees [72]. Bu programda da kuvvet bazlı çerçeve elemanları mevcuttur, ancak yarı-rijit bağlantıların modellenmesi için ekstra düğüm noktalarının oluşturulması, ardından localize oluşturulmuş ve sıfır mesafede olan iki düğüm noktası arasında penalty yöntemleri ile bazı serbestlik derecelerinin zorla eşitlenmesi gerekmektedir. Her ne kadar OpenSees programı şu anda dünyada çerçeve sistemlerinin deprem yükleri altında doğrusal olmayan davranışını incelemek için en ileri program da olsa, yapı modellemesi açısından oluşturulan ekstra düğüm noktaları matrislerin boyutlarını artırdığı ve ayrıca penalty formülasyonu gibi zorlamaların analizlerde sorunlar yarattığı bilinmektedir. Şekil 16'da sunulan OpenSees'de üç boyutlu portal çerçeve modelinin oluşturulması ile analizler yürütülmüştür. Benzer varsayımlar altında geliştirilen çerçeve modelinin kullanılmasıyla Matlab ortamında da aynı üç boyutlu yapının analizi gerçekleştirilmiştir. Yapının yüksekliği 3 m ve her bir yöne açıklığı ise 6 m olarak alınmıştır.



Şekil 16. Üç boyutlu portal çerçeve

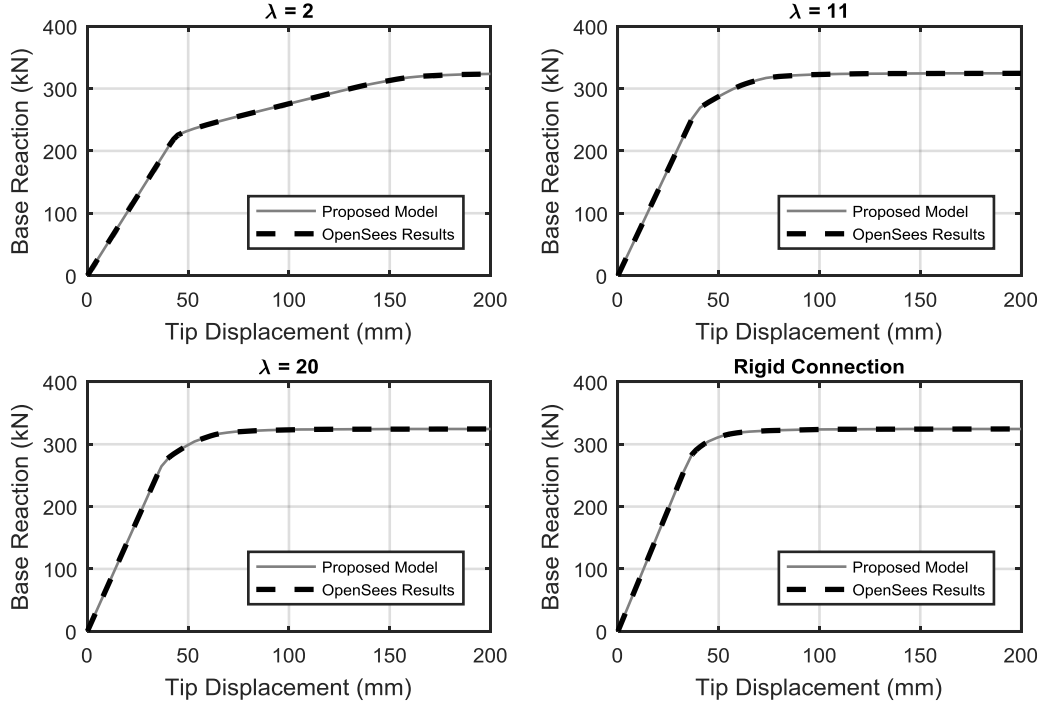
HEB180 çelik kesiti bütün kolonlarda ve IPE240 çelik kesiti ise bütün kirişlerde kullanılmıştır. Analizlerde elastisite modülü, Poisson oranı 210 GPa ve 0.3 alınmıştır. Yarı-rijit bağlantı davranışı modelleme açısından bağlantıların kirişlerin EI/L 'ye göre oranı $\lambda=2, 11$ ve 20 alınmıştır. Bu oranın fiziksel anlamı, $\lambda=2$ durumu kesme tipli bağlantıya yani basit bağlantıya

yakın durumu temsil etmekte, $\lambda=20$ ise rijit bağlantı yani moment aktaran bağlantıya yakın olan durumu temsil etmektedir. Analizlerde kolon ve kirişlerde yayılı plastisite dikkate alınmış ve iki doğrulu basit bir çelik modeli malzeme noktalarında kullanılmıştır. Bu modelde pekleşme modülü sıfıra yakın alınmıştır, 10^{-6} ve böylece kolon ve kirişlerde plastic moment kapasitesi oluştuktan sonra dayanımda artış dikkate alınmamıştır. Çerçeve elemanına tepe noktasında 200 mm deplasman kolonların güçlü eksenlerinde eğilmesi sağlanacak şekilde uygulanmıştır. Bu her ne kadar iki boyutlu analiz gibi de olsa, üç boyutlu elemanların kullanılmasıyla gerçekleştirildiği için, tüm kodlamanın ve geliştirilen elemanda dikkate alınan dönüşümlerin doğru bir şekilde kontrol edilmesini sağlayan bir durum oluşturmuştur.

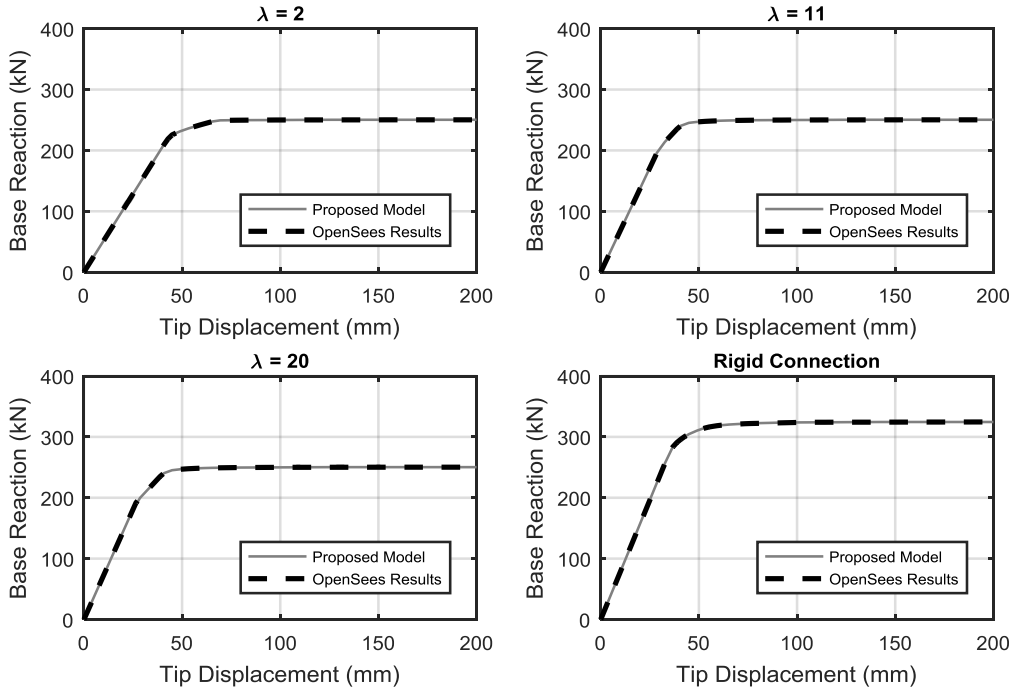
OpenSees'da yarı-rijit bağlantıları modelleyebilmek için, sıfır mesafede aynı koordinatlarda iki düğüm noktası arasına yay elemanları konularak sonuca varılabilmektedir. Bu şekilde yapılan bir modelleme düğüm noktası sayısında 50% artışa neden olmakta, bu artış oranı çok daha büyük ve yüksek yapılarda iyice artmaktadır. İki düğüm noktası arasında, örneğin moment-dönme tipinde yay konulacaksa, geriye kalan bütün diğer serbestlik derecelerinin eşitlenmesi gerekmektedir. Bu eşitleme OpenSees'de efendi (master) ve köle (slave) serbestlik derecelerinin tespit edilmesi ve penaltı formülasyonu yolu ile gerçekleştirilmektedir. Halbuki bu proje kapsamında geliştirilen yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanında istenildiği kadar bağlantı herhangi bir düğüm ve serbestlik derecesinde artış oluşturmada sistemde dahil edilebilmektedir. Bu durum da tabii ki modelleme açısından pratiklik ve ayrıca hesaplamalarda hızlanma sağlayabilmektedir.

İlk karşılaştırmada, hem OpenSees hem de geliştirilen elemanla yürütülen analizlerde öncelikle rijit bağlantı durumu altında karşılaştırma yapılmıştır. Ardından yarı-rijit bağlantılar öncelikle doğrusal elastik olacak şekilde eklenmiştir. Bütün analizlerde kolon ve kirişlerde yayılı plastisite davranışı dikkate alınmış ve kesit üstünde tepkiler fiber model kullanarak elde edilmiştir. Şekil 17'de bu ilk karşılaştırmaya açısından her iki programla da aynı tepkiler elde edildiği görülmüş ve geliştirilen elemanın davranışının doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Şekil 18'deki karşılaştırmadaysa, yarı-rijit bağlantının tepkisi çift doğrusal alınmıştır ve OpenSees ile geliştirilen modelin karşılaştırmasının mükemmel uyum gösterdiği görülmüştür.

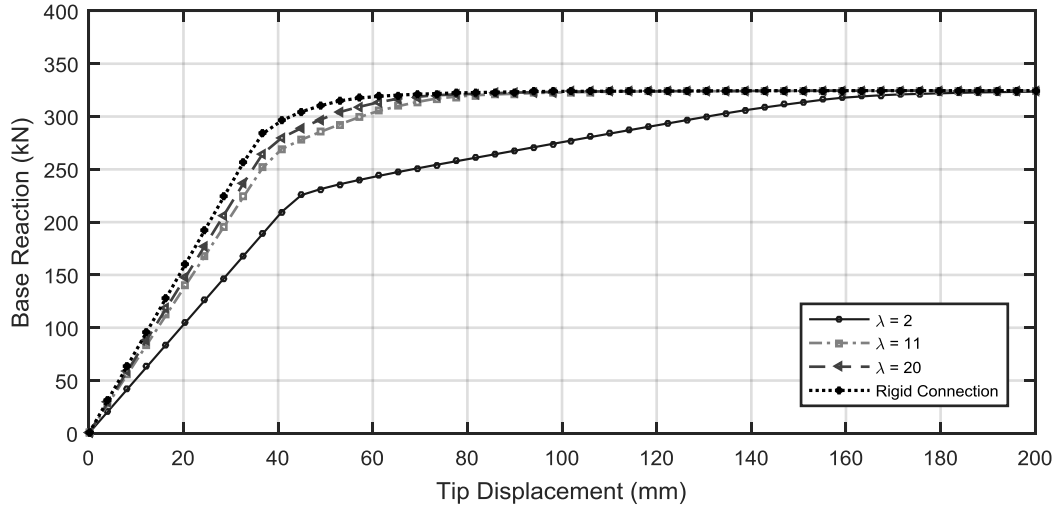


Şekil 17. Doğrusal olmayan malzeme ve doğrusal elastik bağlantı durumu



Şekil 18. Doğrusal olmayan malzeme ve doğrusal olmayan bağlantı durumu

Son olarak da yarı-rijit bağlantının ilk rijitlik katsayısının yapının doğrusal olmayan davranışına etkisi basit bir şekilde aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere karşılaştırılmıştır.

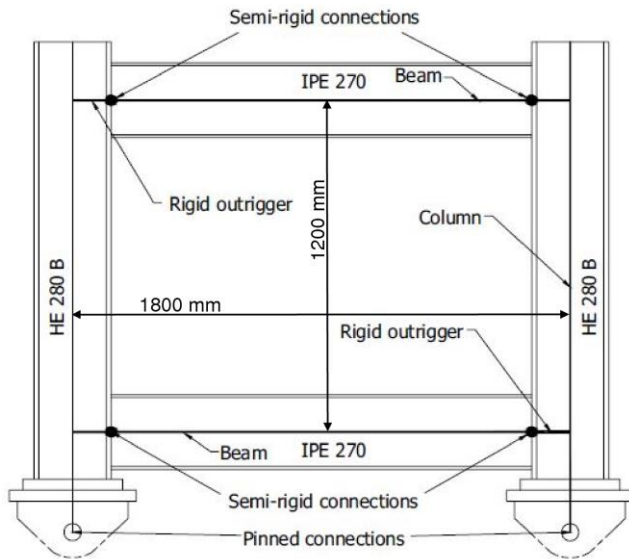


Şekil 19. Bağlantı rijitliğinin üç boyutlu çerçeve yapının davranışına olan etkisi

5.2. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırılmalar

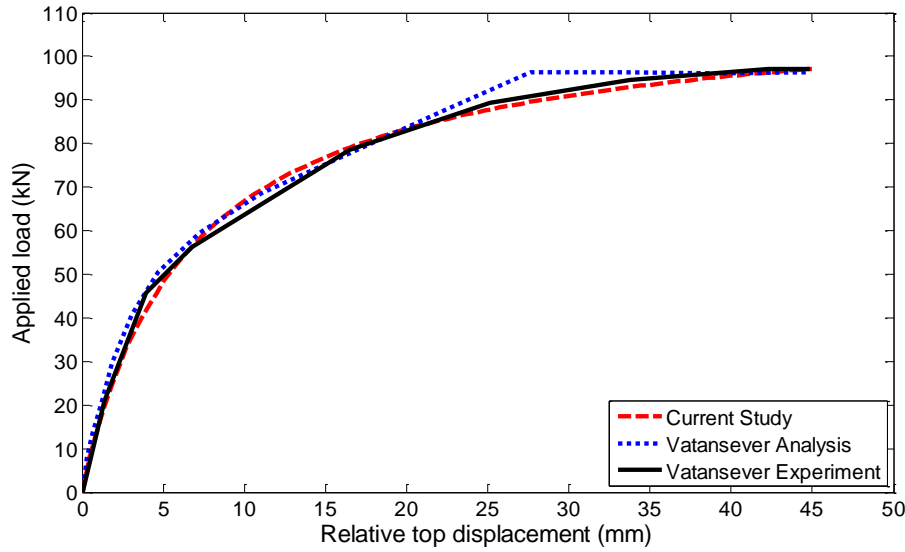
5.2.1. Vatansever ve Yardımcı'nın Deneyi ile Karşılaştırma

Vatansever ve Yardımcı [73] tarafından gerçekleştirilen tek katlı ve tek açıklıklı yarı-rijit bağlantı deneyi geliştirilen modellerin test edilmesi açısından dikkate alınmıştır. Deneyi yapılan sistemle ilgili bilgiler aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 20. Vatansever ve Yardımcı'nın yarı-rijit bağlantılı çerçeve deneyi

Bu deneyin sonucuyla beraber Vatansever ve Yardımcı'nın çalışmasında ABAQUS analizi sonucu da verilmişti. ABAQUS analizinde 4 parametre modeli kullanılarak yarı-rijit bağlantının doğrusal olmayan davranışı modellenmişti. Bu modelleme sebebiyle aşağıdaki şekilde görülen tepki elde edilmiştir. Bu proje kapsamında yapılan karşılaştırmadaysa, geliştirilen çerçeve elemanı kullanılarak, yarı-rijit bağlantı davranışı power modeli kullanılarak modellenmiştir ve deney sonuçlarıyla çok daha gerçekçi bir örtüşme elde edilebilmiştir.

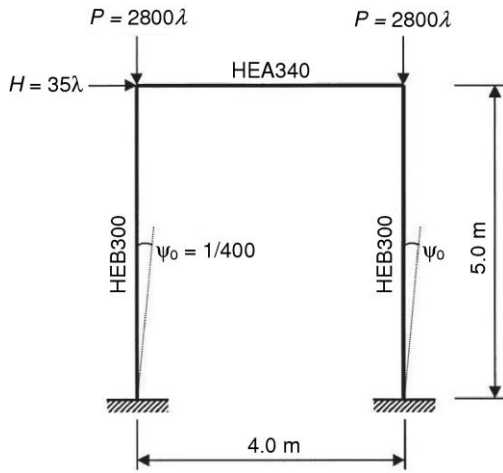


Şekil 21. Vatansever ve Yardımcı'nın yarı-rijit bağlantılı çerçevesiyle karşılaştırma

5.2.2. Vogel Portal Çerçevesi ile Karşılaştırma

Doğrusal elastik karşılaştırmalardan sonra, geliştirilen elemanın hem malzeme hem de geometride doğrusal olmayan davranışı gerçekçi olarak modelleme performansı test edilecektir. Bunun için tek katlı ve tek açıklıklı Vogel [74] portal çerçeve problemi dikkate alınmıştır (Şekil 4). Vogel bu çerçeve problemini sayısal analizler açısından doğrulamada kullanılması için yürütmüştür. Bu çerçeve için kendisi de analiz sonucunu ve elde ettiği tepkiyi sunmuştur. Bu çerçeve problemi literatürde pek çok araştırmacı tarafından modellenmeye çalışılmıştır. Bu çerçevede yarı-rijit bağlantılar bulunmamaktadır; ancak 2014 yılında Nguyen ve Kim [75] tarafından yayınlanan makalede bu çerçevenin yarı-rijit bağlantı içeren bir durumu da analiz edilmiştir. Analizleri yapılan hem rijit bağlantılı hem de yarı-rijit bağlantılı çerçeve problemi bu karşılaştırma kapsamında modellenecektir. Analizi yapılacak olan çerçeve Şekil 22'de sunulmuştur. Kolonlarda belli bir miktar kusur (imperfection)

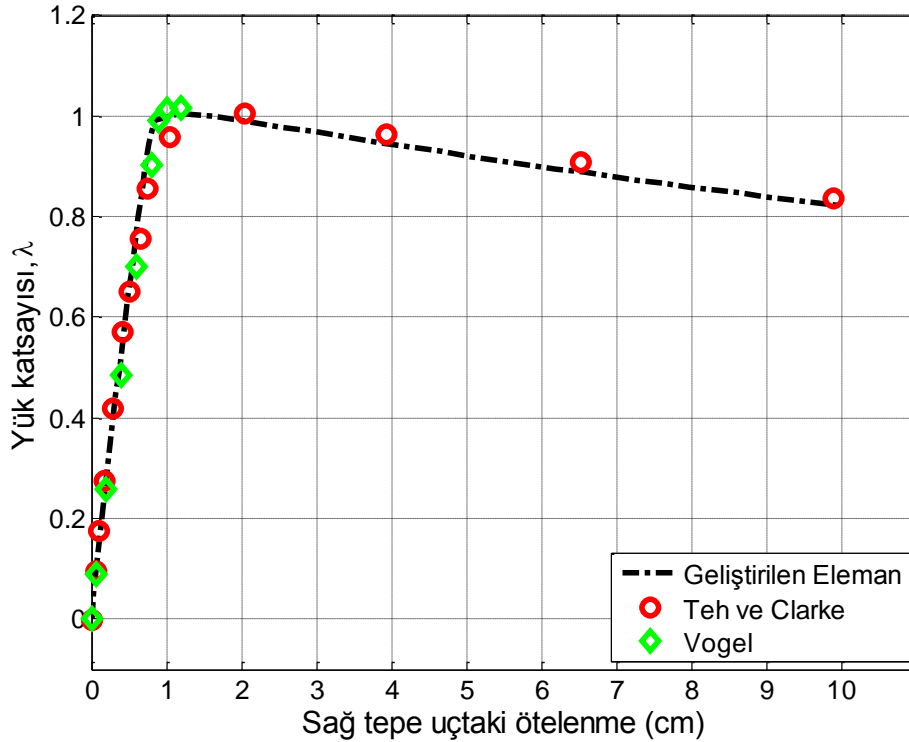
bulunmaktadır. Kolon tepe noktalarından yerçekimi yükü $P = 2800\lambda$ verilmiş ve portal çerçeve yanal olarak da $H = 35\lambda$ değeri ile itilmiştir. Kolon ve kiriş elemanları HEB300 ve HEA340 kesitleridir. Vogel [74] tarafından gerçekleştirilen analiz, yığılı plastisite (lumped plasticity/plastic hinge) modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesitlerin geometrisi ve kullanılan malzeme dikkate alınarak, plastic mafsallarda taşınacak maksimum moment hesaplanarak, plastik analiz gerçekleştirilmiştir. Vogel analizlerinde kullandığı malzeme değeri olarak şunları sunmuştur: akma dayanımı 235 MPa, elastisite modülü 205 GPa, akma birim deformasyonun 10 katına kadar gerilme 235 MPa'da sabitlenmiş (yani sıfır pekleşme), sonrasında ise elastisite modülünün %2'si kadar bir değerle pekleşme dikkate alınmıştır.



Şekil 22. Vogel portal çerçevesi

Vogel gerçekleştirdiği analizde yumuşama etkisini yakalamaya çalışmamış ve sadece taşınabilecek en yüksek yük değeri λ parametresi cinsinden elde etmeye çalışmıştır ve en yüksek değer olarak 1.017 değerine ulaşmıştır. Teh ve Clarke [76] ise çalışmasında, bu portal çerçevenin yumuşama bölgesinin tepkisini de elde etmeye çalışmıştır ve ayrıca en yüksek λ değeri olarak da 1.005 değerine ulaşmıştır. Bu iki analizin sonuçlarını da içeren grafikler Şekil 23'te sunulmuştur. Teh ve Clarke'ın çalışmasında kullanılan eleman ise sundukları makalede geliştirilmiş ve deplasman-bazlı yayılı plastisite modelidir. Bu proje kapsamında gerçekleştirilen analizde λ parametresindeki değişimin doğru olarak yakalanabilmesi için, analiz çok küçük bir başlangıç λ değeri ile başlatılmıştır. λ değerindeki değişim ve gelişim, geliştirilen doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile yani Newton-Raphson analizi, yük azaltma-artırma yöntemleri ve ayrıca kapasite kaybına uğrama durumunda yumuşamayı yakalayabilmek için arc-length çözümlene yöntemi kullanılarak, elde edilmiştir.

Böylece portal çerçevenin λ parametresi ve portal çerçevenin sağ üst ucundaki yanal ötelenme cinsinden değişim elde edilmiştir. Yarı-rijit bağlantılı çerçeve elemanında bağlantılar aktifleştirilmeden (yani rijit bırakılarak) ilk önce analiz yapılmış ve Vogel ile Teh ve Clarke'ın sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. Analizleri yürütmek için her bir kolon ve kiriş sadece tek bir geliştirilen elemandan kullanılarak modellenmiştir. Her bir elemanda oluşacak doğrusal olmayan davranış 5 adet kontrol noktası ile monitör edilmiştir ve kontrol kesitlerinin pozisyonu Lobatto entegrasyon (Lobatto integration) yöntemi ile uyumlu seçilmiştir. Bu entegrasyon yöntemi ile elemanların uçlarındaki tepkiler kesin olarak yakalanabilmektedir. Her bir kontrol noktasındaki kesitlerin tepkisi ise fiber model kullanılarak elde edilmiştir. Böylece aksel kuvvet ve eğilme momenti arasındaki etkileşim doğru bir şekilde yakalanmaya çalışılmıştır. Her bir kesit tepkisi, flanjlarda 4'er adet ve gövdede 8 adet orta nokta entegrasyonu (midpoint integration) kullanılarak elde edilmiştir. Bu analiz yöntemi ile en yüksek elde edilen λ parametresi 1.005 olmuştur. Her bir elemandaki kontrol kesiti sayısı 10 Lobatto noktasına çıkarılarak ve ayrıca her bir kesitteki fiber miktarı da flanjlarda 8'er ve gövdede de 12'ye yükseltilerek analiz sonuçlarındaki değişim irdelenmiştir ve elde edilen λ parametresinin tam olarak 1.0 değerine ulaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 23. Vogel portal çerçevesinin analizi ve karşılaştırması

Yürütülen analizin sonucu olarak elde edilen grafik Şekil 23'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere elde edilen eğrinin tepkisi Teh ve Clarke'ın analizi ile uyumluluk göstermektedir. Teh ve Clarke analizlerini çok daha fazla eleman kullanarak gerçekleştirmişken, bu proje kapsamında geliştirilen elemanla sadece birer adet elemanın her bir kolonda ve kirişte kullanılması yeterli olmuştur. Analiz sonuçlarının karşılaştırmasından da görüleceği üzere, malzemede ve geometride doğrusal olmayan davranışın gerçekçi olarak yakalanabildiği görülmektedir.

Tablo 2. Vogel portal çerçevesinin analizi karşılaştırmaları

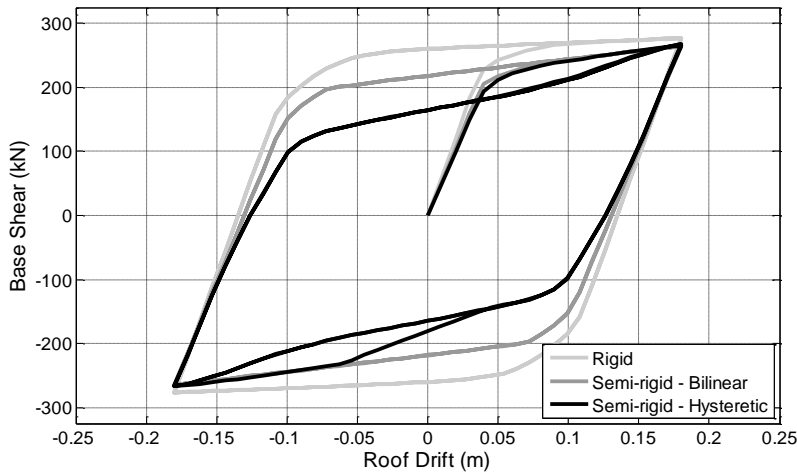
Kolon/kiriş bağlantı tipi	Yöntem	En yüksek yük katsayısı, λ
Rijit bağlantı	Vogel'in yığılı plastisite modeli	1.017
	Teh ve Clarke'ın yayılı plastisite modeli	1.005
	Nguyen ve Kim'in yığılı plastisite modeli	1.022
	Nguyen ve Kim'in yayılı plastisite modeli	1.009
	Geliştirilen eleman modeli (5 kesit/eleman)	1.005
	Geliştirilen eleman modeli (10 kesit/eleman)	1.000
Yarı-rijit bağlantı	Nguyen ve Kim'in yığılı plastisite modeli	0.924
	Nguyen ve Kim'in yayılı plastisite modeli	0.940
	Geliştirilen eleman modeli (5 kesit/eleman)	0.933
	Geliştirilen eleman modeli (10 kesit/eleman)	0.928

Vogel portal çerçevesi 2014 yılında Nguyen ve Kim [75] tarafından yayınlanan makalede hem rijit hem de yarı-rijit bağlantılar içerecek şekilde analiz edilmiştir. Öncelikle Nguyen ve Kim'in rijit bağlantı durumu için analizlerinden elde ettiği λ parametresinin en yüksek değeri 1.009 olmuştur. Bu sonucu yayılı plastisite tipinde bir model kullanarak elde etmişlerdir. Nguyen ve Kim ayrıca yığılı plastisite modeli kullanarak da analiz yapmış ve 1.022 sonucuna ulaşmışlardır. Nguyen ve Kim ardından bu çerçevedeki kirişin her iki ucuna yarı-rijit doğrusal olmayan bağlantılar eklemiştir. Bu bağlantıların analiz sırasında modellenmesi açısından power modelini kullanmıştır. Bağlantıların ilk rijitliği olarak 31635 kN-m/rad, en yüksek moment değeri olarak 142 kN-m, şekil katsayısı (n) olarak da 0.98 değeri kullanılmıştır. Analizleri hem yığılı plastisite modeli hem de yayılı plastisite çerçeve modeli kullanarak yürütmüştür. Yığılı plastisite modeli ile λ parametresi 0.924 elde edilirken, yayılı plastisite modeli ile 0.940 değeri elde edilmiştir. Bu proje kapsamında yürütülen çalışmada ise düğüm

noktası sayısında artışa gerek olmadan, yarı-rijit bağlantılar kolaylıkla eklenerek analizler yürütülmüştür. λ parametresi olarak 0.933 değeri her bir kolon ve kirişte 5 Lobatto kontrol kesiti ile, 0.928 değeri ise 10'ar Lobatto kontrol kesiti kullanılması ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların yakınlığı da türetimi yapılan yarı-rijit çerçevesel bağlantı elemanının hem eleman boyunca doğrusal olmayan malzeme davranışını, hem yarı-rijit bağlantılarda oluşan doğrusal olmayan davranışı hem de geometride oluşan doğrusal olmayan davranışı gerçekçi olarak yakalayabildiğinin ispatıdır. Vogel portal çerçevesinin analizi ile ilgili gerçekleştirilen analizlerin ve model özellikleri ile ilgili toplu sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur.

5.2.3. Vogel Portal Çerçevesinde Yarı-Rijit Bağlantıların Sistem Etkisi

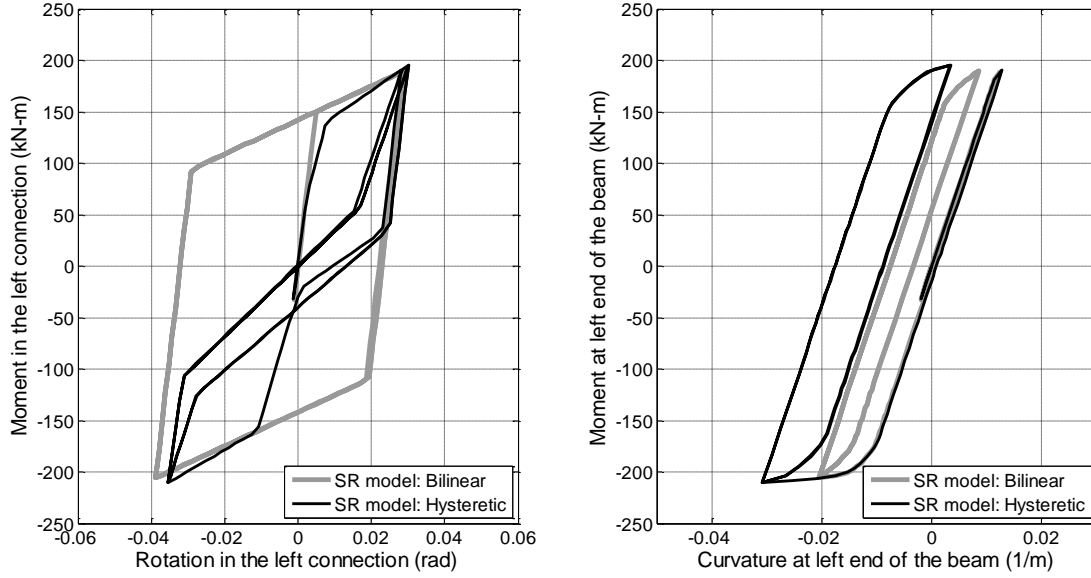
Bu karşılaştırmada ise tek katlı ve tek açıklıklı Şekil 22'dekine benzer bir portal çelik çerçevenin doğrusal olmayan davranışının modellenmesi açısından yarı-rijit bağlantı davranışının periyodik davranış tipinin enerji emmeye olan etkisi incelenmiştir. Kolon-kiriş bağlantısı ilk durumda rijit alınmış, ikinci incelemede yarı-rijit bağlantı davranışı iki doğrulu kinematik pekleşme (bilinear kinematic hardening) modeli kullanarak modellenmiştir. Bu tipteki bağlantı davranışları stabil yarı-rijit bağlantı davranışı açısından karşılaştırılabilen bir durum da olsa yüksek dönmelerde histeretik davranışlarda daralmanın etkisinin dikkate alınabilmesi için son olarak da geliştirilen yarı-rijit bağlantı modeli dikkate alınmıştır.



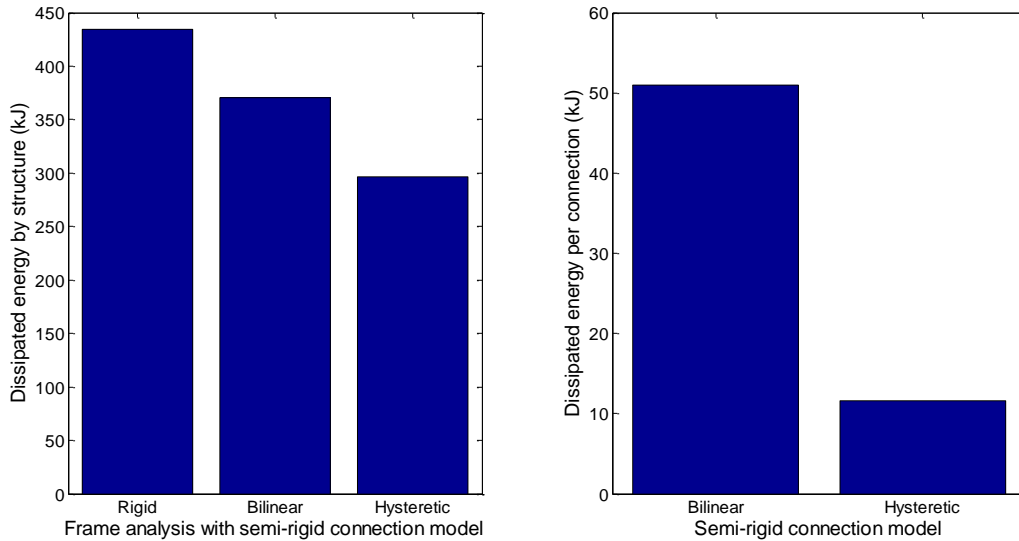
Şekil 24. Tek katlı ve açıklıklı çelik çerçeve örneğinde histeretik davranışın önemi

Bu üç farklı durum geliştirilen modellerle incelenmiş ve kolon tabanlarında oluşan toplam kesme kuvvetinin itme-çekme tepe deplasmanı altındaki doğrusal olmayan tepkisi Şekil

24'da sunulmuştur. Elde edilen global tepkinin sunumu ardından, lokal davranışlar da Şekil 25'de verilmiştir. Bu şekilde de görüleceği üzere bilinear ile histeretik bağlantı davranışlarının doğru olarak modellenmesi yapının enerji emme değerleri açısından çok önemli farklar yaratabilmektedir (Şekil 26).



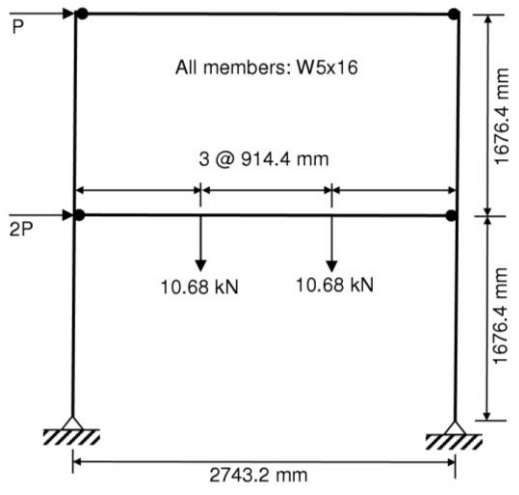
Şekil 25. Kirişin sol ucundaki yarı-rijit bağlantının tepkisi ile kiriş ucunda oluşan doğrusal olmayan tepkinin farklı yarı-rijit bağlantı durumları için karşılaştırılması



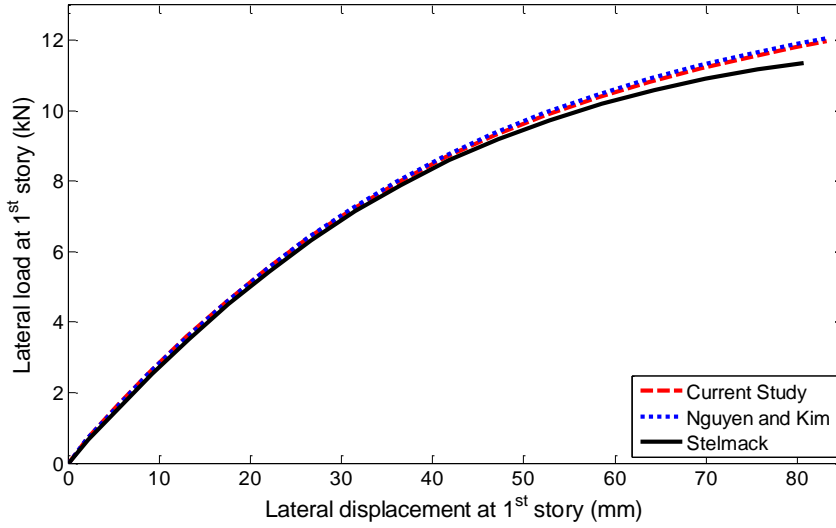
Şekil 26. Yarı-rijit bağlantı ve yapının toplamında emilen enerjinin karşılaştırılması

5.2.4. Stelmack Deneyi ile Karşılaştırma

Bu karşılaştırmada Stelmack [77] tarafından deneyi yapılan 2 katlı tek açıklıklı yarı-rijit bağlantılı çelik çerçeve yapı dikkate alınmıştır (Şekil 27).



Şekil 27. Stelmack'ın yarı-rijit bağlantılı çerçeve deneyi



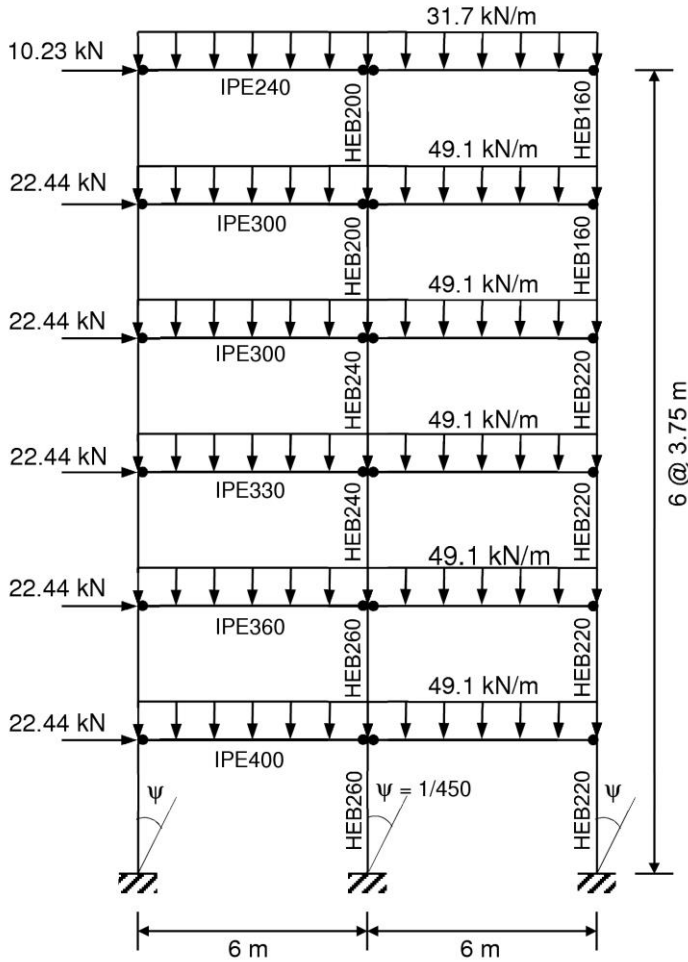
Şekil 28. Stelmack'ın yarı-rijit bağlantılı çerçeve deneyi ile karşılaştırma

Bu yapıyla ilgili bilgiler ve yükleme durumu aşağıdaki şekilde sunulmuştur. Bu çalışma Nguyen ve Kim [75] tarafından geliştirilen çerçeve elemanının kullanılmasıyla da analiz edilmiştir. Bu proje kapsamında geliştirilen elemanın kullanılmasıyla yapılan karşılaştırma da

Nguyen ve Kim tarafından elde edilen sonuçla birebir örtüşen tepki elde edilmiştir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere, elde edilen sonuçlar Stelmack'ın deney sonuçlarına da çok yakındır ve gerçeğe yakın tepkiler elde edilebilmektedir (Şekil 28).

5.2.5. Vogel'in Çok Katlı ve Açıklıklı Çerçevesi ile Karşılaştırma

Şekil 29'da sunulan Vogel [74]'in 6 katlı ve 2 açıklıklı çerçeve yapısı problemi dikkate alınarak, geliştirilen çerçeve elemanının yarı-rijit bağlantı davranışı açısından daha büyük çelik yapısal sistemlerin davranışını yakalayabilme hususundaki doğruluğu test edilmiştir.

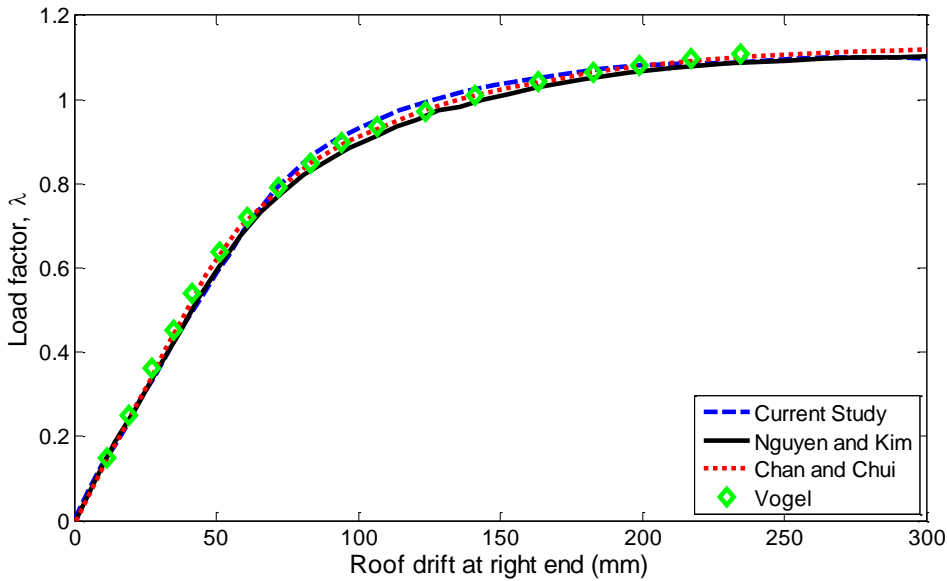


Şekil 29. Vogel'in 6 katlı ve 2 açıklıklı ve yarı-rijit bağlantılı çerçeve örneği

Bu örnekte kolon ile kiriş arasındaki bağlantılar öncelikle rijit bağlantı olarak dikkate alınmıştır. Ardından 2 farklı tipte yarı-rijit bağlantı davranışının mevcut olduğu durum da

incelenmiştir. Bu örneğin rijit bağlantı durumu altındaki en yüksek taşıdığı yük parametresi Chan ve Chui [78]'de 1.125 bulunmuştur. Çok yakın zamanda Nguyen ve Kim tarafından yayınlanan çalışmada [75] ise yük parametresi 1.100 olarak elde edilmiştir. Şekil 30'da görülen yapının doğrusal olmayan analizinde, yanal yük dağılımı bir yük parametresinin etkisi altında artırılarak yürütülmüştür.

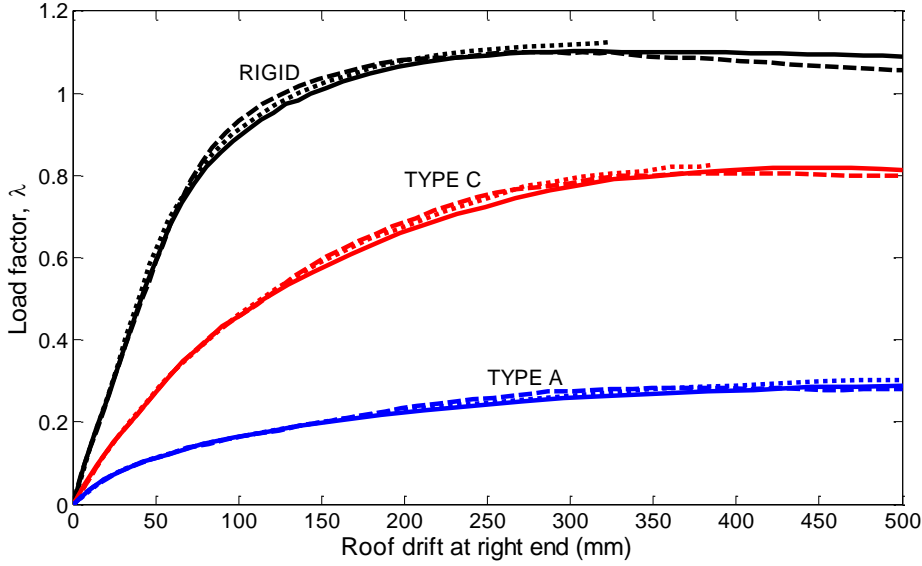
Görüldüğü üzere kolonlarda önceden mevcut olan 1/450 değerinde radyan açıyla bir yana yatmanın var olduğu baştan analizlere katılmıştır. Bu etki sayesinde doğrusal olmayan geometrik davranışların doğru olarak yakalanabilmesi de önem arz etmiştir. Bütün kolonlar ve kirişlerin modellenmesi açısından geliştirilen çerçeve elemanının kullanımı dikkate alınmıştır. Farklı modeller arasında rijit bağlantı durumu için elde edilen karşılaştırmalar Şekil 30'da sunulmuştur. Bu şekilde de görüldüğü üzere geliştirilen elemanla çok katlı çelik yapıların rijit bağlantı durumu için doğrusal olmayan malzeme ve geometri etkileri altındaki davranışı gerçekçi olarak modellenebilmektedir.



Şekil 30. Vogel'in 6 katlı ve 2 açıklıklı çerçevesinde rijit bağlantı tepkisi karşılaştırmaları

Yarı-rijit bağlantı durumunun incelenebilmesi için 2 farklı yarı-rijit bağlantı durumu analizlerde dikkate alınmıştır. Kiriş gövdesinden tek dirsekli bağlı (single web angle connection) ki bu durum analizlerde A Tipi (Type A) durum olarak adlandırılmıştır ve ayrıca düz son plaka bağlantı (flush end plate connection) ki bu C Tipi (Type C) olarak adlandırılmıştır, ve sonuç olarak bu iki tip bağlantının ayrı ayrı var olduğu durum için aynı çelik yapının analizi

yürütülmüştür. Yarı-rijit bağlantının davranışı bu karşılaştırmalarda Nguyen ve Kim [75]'de olduğu gibi eksponansiyel model [79] kullanılarak yürütülmüştür. Şekil 31'de geliştirilen modelin tepkisinin literatürdeki sonuçlarla örtüştüğü görülmüştür.



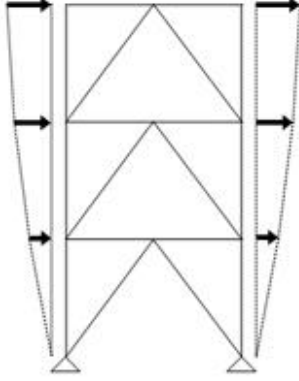
Şekil 31. Vogel'in 6 katlı ve 2 açıklıklı çerçevesinde yarı-rijit bağlantı tepkisi karşılaştırmaları (Geliştirilen Model Tepkisi (--), Nguyen ve Kim (—), Chan ve Chui (:))

5.3. Guse Levhalardaki Yarı-Rijit Bağlantıların Yapı Davranışına Etkisi

Guse levhalarda oluşabilecek yarı-rijit bağlantı davranışını modelleyebilmek için, daha önceden sunumu yapılan 3 ve 9 katlı Chevron çaprazlı [80] çelik çerçeve yapılar dikkate alınmıştır. Yapıların genel görünümü Şekil 32'de 3 katlı durum için sunulmuştur. 9 katlı durum aynı görüntünün daha fazla katlı halidir. Her iki yapının da tasarımı birinci derece deprem bölgesi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir ve detaylar [80]'de sunulmuştur. Her iki yapıdaki çaprazlar, kirişler ve kolonlarının geometrik özellikleri Tablo 3 ve 4'te sunulmuştur.

Bu yapıların analizinde elemanlar boyunca oluşabilecek yayılı plastisite davranışı her bir elemanda 5 adet kontrol kesiti olarak ve ayrıca kesit derinliğini de fiber modellere parçalara ayırarak yapılmıştır. Bu tip yapıların analizi açısından çaprazların ucunda guse levhalar sayesinde sağlanan dönmeye karşı oluşan ekstra direnç literatürde moment-dönme tipi yayların kullanılmasıyla [55] tepkiye katılmaya çalışılmıştır. Guse levhanın yapacağı bu rijitlik

katkısının 4 farklı rijitlik değeri (0, 79, 475, 1130 kNm/rad) alınmasıyla incelenmesi yapılmıştır.



Şekil 32. Statik itme yükünün profile – birinci moda göre

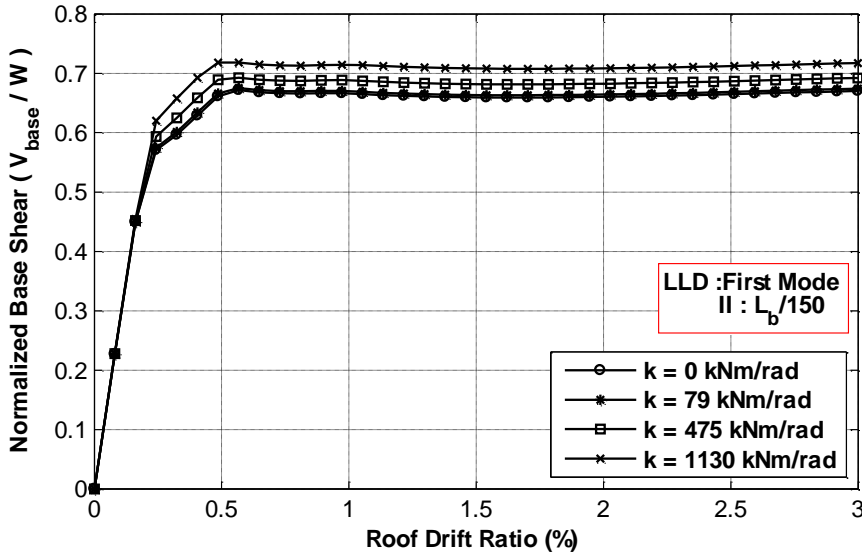
Tablo 3. 3-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve yapının özellikleri

Kat	Çapraz	Kolon	Kiriş
1	HSS 8x8x5/8	W 12x96	W 44x290
2	HSS 8x8x1/2	W 12x96	W 44x262
3	HSS 8x8x1/2	W 12x96	W 44x262

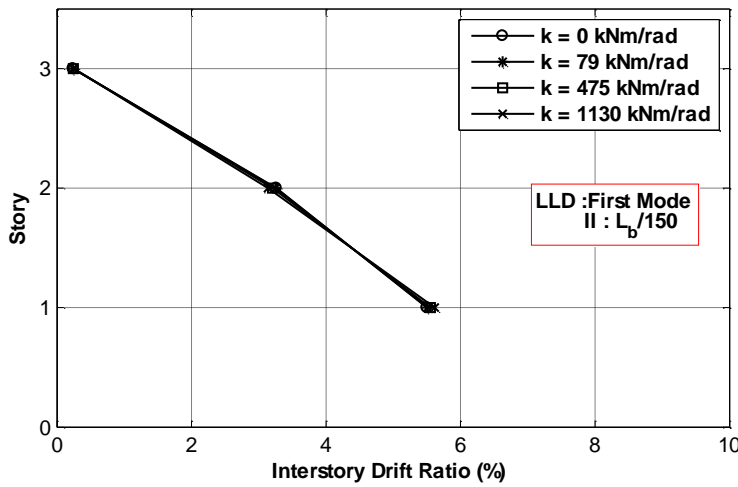
Tablo 4. 9-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve yapının özellikleri

Kat	Çapraz	Kolon	Kiriş
1	HSS 12x12x5/8	W 14x342	W 40x431
2	HSS 10x10x5/8	W 14x342	W 40x392
3	HSS 10x10x5/8	W 14x311	W 40x392
4	HSS 9x9x5/8	W 14x311	W 44x335
5	HSS 9x9x5/8	W 14x283	W 44x335
6	HSS 8x8x5/8	W 14x283	W 44x290
7	HSS 8x8x1/2	W 14x257	W 44x262
8	HSS 7x7x1/2	W 14x257	W 44x230
9	HSS 7x7x1/2	W 14x257	W 44x230

Öncelikle 3 katlı yapının tepkisi sunulmuştur. Bu kapsamda birinci mod profilinde statik itme gerçekleştirilmiş ve yapının toplam taban kesme kuvvetinin yapının ağırlığına bölünmesi ile y-eksenindeki tepkisi, yapının tepe deplasmanının toplam kat yüksekliğine bölünmesiyle x-ekseni değerleri oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere Şekil 33'de guse levhadaki rijitlik değişimi yapının tepkisine az da olsa farklılık oluşturmaktadır. Rijitlik arttıkça, guse levhalar daha fazla moment çekebildiği için, yapının da taşıyabildiği taban kesme kuvveti artmaktadır. Yapının katlar arası görece deplasmanı analiz sonunda çizildiğinde (Şekil 34), bu arada farkın aslında fazlaca oluşmadığı görülmektedir.

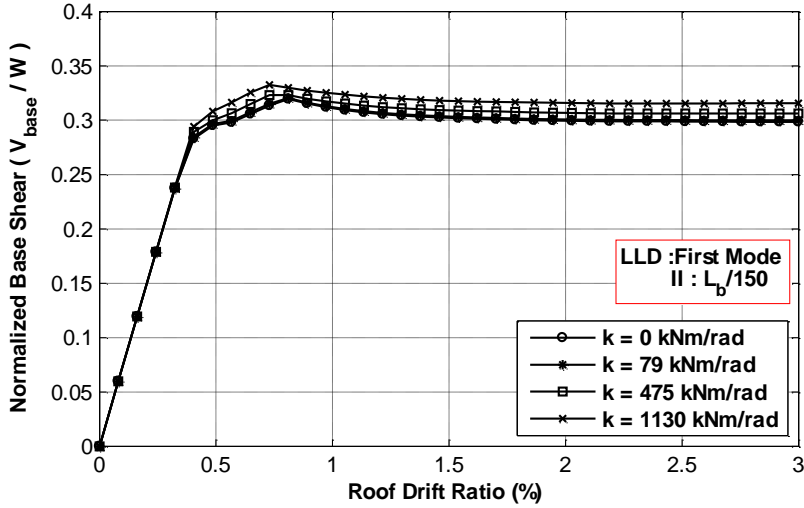


Şekil 33. Normalize taban kesme kuvvetinin çatı deplasman oranına göre değişimi:
3-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve

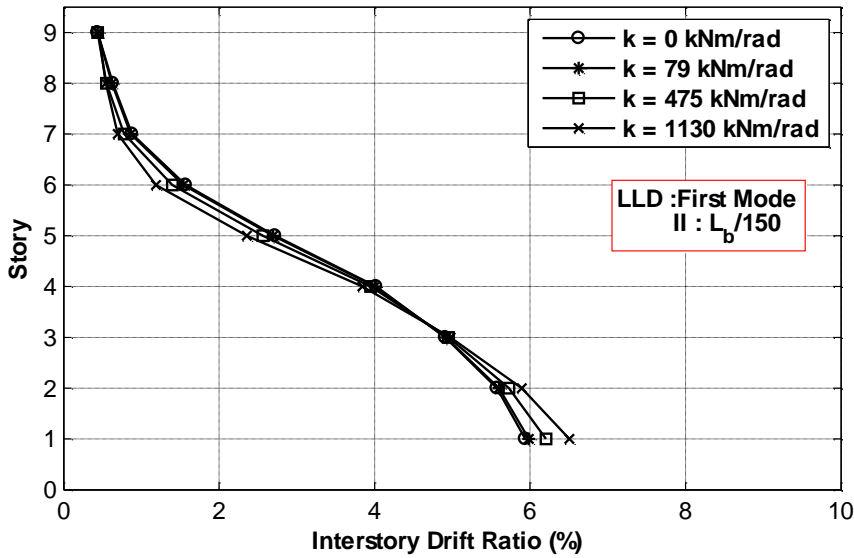


Şekil 34. Katlar arası görece deplasman: 3-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve

Aynı analiz 9 katlı çaprazlı yapıda tekrarlanmıştır. Şekil 35'te taban kesmenin tepe deplasmana göre değişimi verilmiştir. Bu seferki farkın alçak katlı yapıya göre daha düşük kaldığı görülmüştür, ancak görece kat deplasmanlarında bu sefer biraz daha görünebilir farklılıklar oluşmuştur.



Şekil 35. Normalize taban kesme kuvvetinin çatı deplasman oranına göre değişimi: 9-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve



Şekil 36. Katlar arası görece deplasman: 9-Katlı Chevron çaprazlı çelik çerçeve

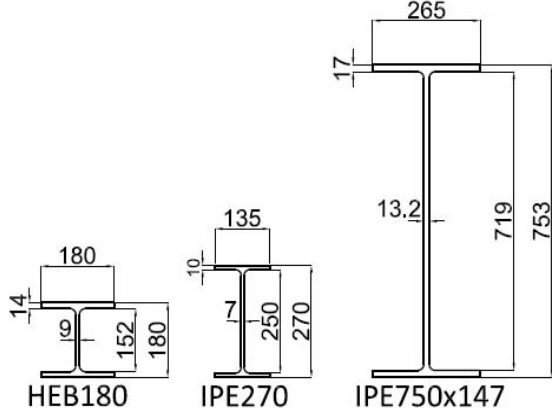
6. TİTREŞİM DAVRANIŞI ALTINDA KARŞILAŞTIRMALAR

Bu kısımda sunulacak karşılaştırmada geliştirilen çerçeve modelinin dinamik titreşim özelliklerini yakalayabilme hususundaki başarısı öncelikle incelenecektir. Araştırmacılar, son yıllarda yapıların dinamik davranışlarının etkilerini incelemekte ve birçoğu yapıların davranışlarında yarı-rijit bağlantıların etkisini göz önünde bulundurmaya karar vermektedir. Chui ve Chan [81] ve Nader ve Astaneh-Asl [82] yaptıkları laboratuvar testlerini ayrıca sayısal analizlerle de doğrulamaya çalışmış ve sayısal çalışmalarla laboratuvar testleri arasında yarı-rijit bağlantı davranışı dikkate alınınca yeterli uyum elde edilebilmiştir. Galvo v.d. [83], Da Silva v.d. [84], Alaasam ve Mandal [85] yaptıkları çalışmalarda, yarı-rijit bağlantılar ile çerçevelerin dinamik davranışlarını sonlu eleman modelleri kullanarak incelemiştir. Çalışmalara göre, çelik yapılarda yarı-rijit bağlantı etkileri yapısal sistemde önemli bir role sahiptir. Sophianapoulos [86] çalışmasında elastisite teorisi kullanarak kapalı çözümler elde ederek, yarı-rijit bağlantılı çerçevelerin titreşim özelliklerini tespit etmiş ve Eurocode 3 yaklaşımıyla karşılaştırmıştır. Sonuçlar, yapının ana modlarında sonuçların birbirine çok yakın olduğunu göstermiş; ancak, yüksek modlarda, yarı-rijit bağlantıların etkisi fark yaratmıştır. Böylece, daha önce belirtildiği gibi, yarı-rijit bağlantıların etkisi önemli bir konu olduğu kanıtlanmıştır.

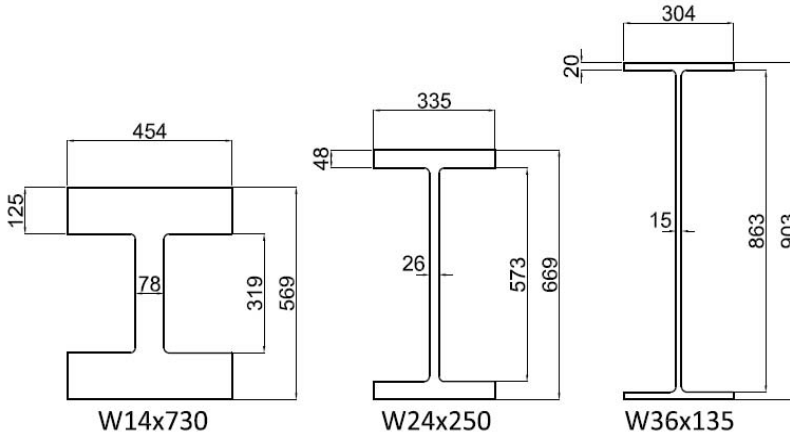
6.1. Rijit Bağlantılı Ankastre Kiriş

İlk örnekte, geliştirilen çerçeve elemanını kullanarak I-kesite sahip çelik yapı elemanların kesme deformasyonu ve kütle matrisinin doğru olarak tespit edilmesi sağlanacaktır. Bunun için bir ucu ankastre kiriş örneği dikkate alınmış ve bağlantı tipi ise ilk olarak rijit olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçların karşılaştırması açısından ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Aynı problem ANSYS'te üç boyutlu kütle elemanlarıyla modellenmiş ve eleman ağ seviyesi çok yoğun olacak şekilde ayarlanmış ve böylece ANSYS sonuçlarında kesin değerler elde edilmiştir. I-kesitler çelik yapılarda popüler bir şekilde kullanılmaktadır ve karşılaştırma açısından Avrupa'da kullanılan HEB180, IPE270 ve IPE750×147 (Şekil 37) ve ayrıca ABD'de kullanılan W36×135, W24×250 ve W14×730 kesitleri (Şekil 38) dikkate

alınmıştır. Kirişin derinliği ile boyu arasındaki oran da parametric olarak değiştirilmiş ve kiriş boyu L ile kesit derinliği d arasındaki oran (L/d) 10, 5 veya 2 olarak alınarak uzun kirişten kısa kirişe kadar tüm farklı durumlar incelenmiştir. Analizlerde elastisite modülü, Poission oranı ve çeliğin yoğunluğu sırasıyla 200 GPa, 0.3 ve 7832 kg/m^3 alınmıştır.



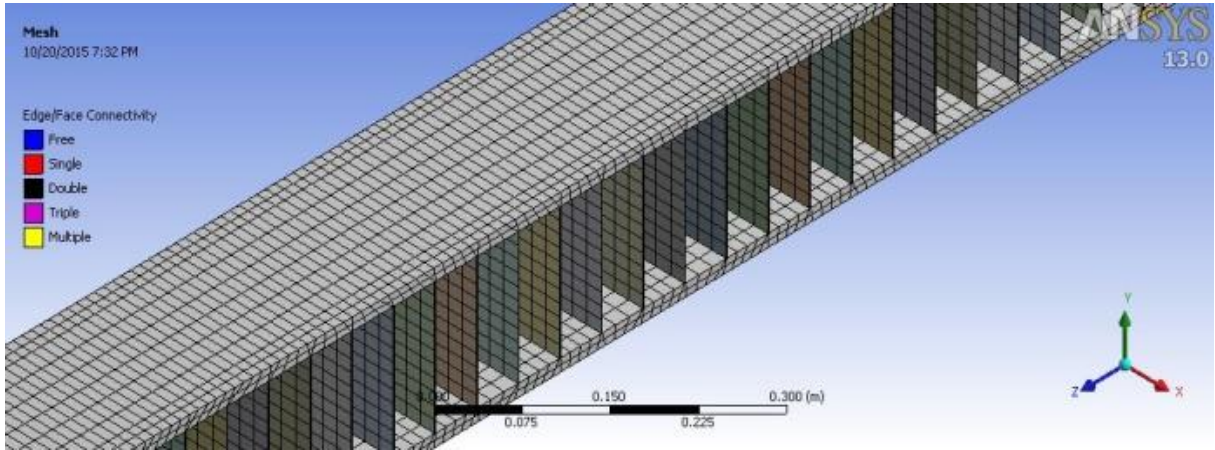
Şekil 37. Karşılaştırmalarda dikkate alınan Avrupa I-kesitleri (boyutlar mm'dir)



Şekil 38. Karşılaştırmalarda dikkate alınan Amerikan I-kesitleri (boyutlar mm'dir)

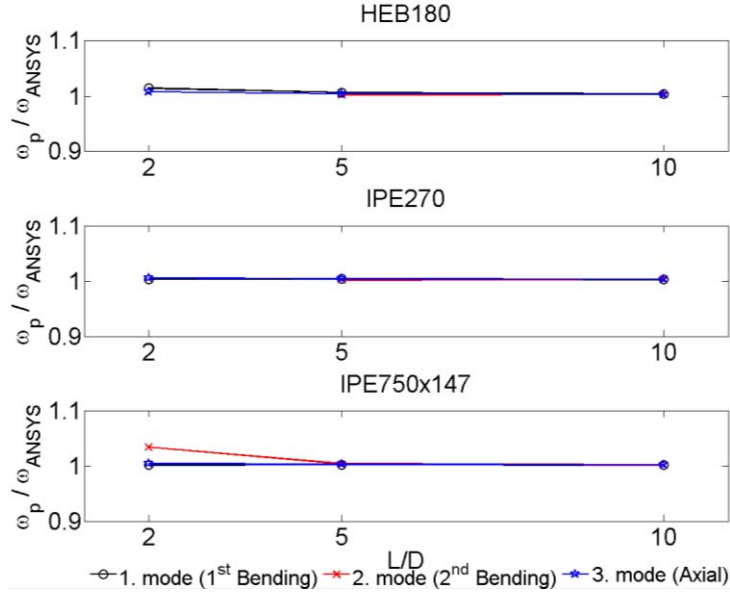
Bir ucu ankastre kiriş öncelikle ANSYS programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizlerde üç boyutlu katı sonlu elemanlar kullanılmış ve sonuçların tam doğru sonucu verebilmesi için sonlu elemanlar ağı yoğun olacak şekilde ayarlanmıştır. I-kesitin titreşim modlarının ANSYS'de elde edilmesi sırasında lokal titreşim modlarının ayıklanabilmesi amacıyla, kiriş gövdesi boyunca ihmal edilebilir kalınlıkla (1 mm) ve ihmal edilebilir malzeme yoğunluğunda ($1 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^3$) destekler konulmuştur. Bu desteklerin görüntüsü temsili olarak Şekil 39'da mevcuttur. Bu şekilde konulan desteklerle, ANSYS'de lokal modların oluşması engellenmiş,

global modların titreşim değerlerine müdahale edilmemiş ve sadece kiriş elemanı modeliyle doğrudan bir karşılaştırma yapılması sağlanmıştır. ANSYS'deki modelde tüm flanş, gövde ve destek parçaları SOLID186 elemanı ile modellenmiştir. Bu eleman 2.derece deplasman enterpolasyon fonksiyonları kullanmakta ve her bir üç boyutlu katı elemenda 20 düğüm noktası bulunmaktadır. Şekil 39'da da görüleceği üzere flanjlarda da kalınlık boyunca ağ sayısı artırılmıştır ve böylece ANSYS'de elde edilen sonuçları teorik olarak kesin sonuçlar olarak Kabul etmemiz mümkün olmuştur.

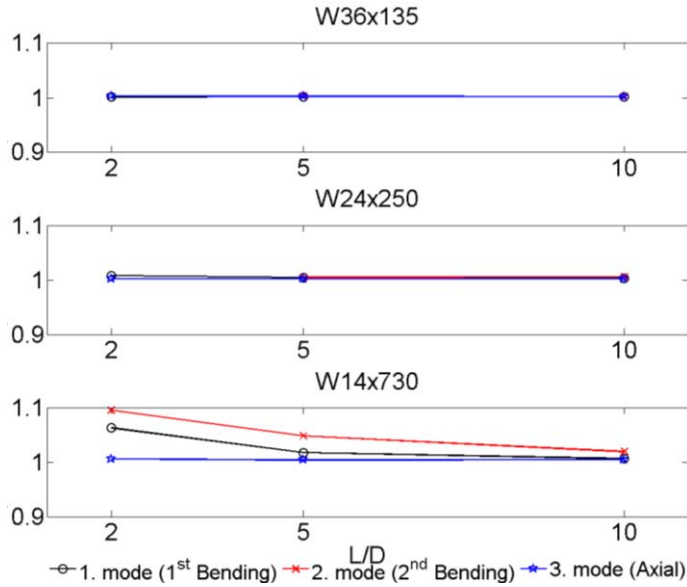


Şekil 39. ANSYS'teki temsili modelin görüntüsü

Geliştirilen çerçeve elemanı modeliyle ve ANSYS'de elde edilen sonuçlar 1., 2. Eğilme modları ile 1. Eksenel modlar dikkate alınarak seçilen tüm Amerikan ve Avrupa I-kesitleri için Şekil 40 ve 41'de sunulmuştur. Geliştirilen çerçeve elemanı ile elde edilen sonuçlar ANSYS sonucuna bölünerek boyutsuz olarak bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlardan da açıkça görüleceği üzere geliştirilen çerçeve elemanı tepkisi ω_P 'nin ANSYS sonucu ω_{ANSYS} 'e göre karşılaştırması özellikle de $L/d = 10$ ve 5 değerleri için mükemmel örtüşme vermektedir. Kısa kiriş durumu ($L/d=2$) içinse Avrupa ve Amerikan kesitlerinden birerinde sonuçlarda biraz farklılık gözükmektedir. Aslında Amerikan kesidi $W14 \times 730$ için uzun kiriş durumunda da sonuçlarda farklılıklar oluşmaktadır ve bu kesit tipinin aşırı kalın flanş ve gövde kalınlığına sahip olması sebebiyle kesme deformasyonlarının [87] veya [88] tarafından tavsiye edilen kesme düzeltme katsayıları ile net olarak tespit edilemediği anlaşılmaktadır; ancak bu kesitin aslında çelik yapılarda sıkça kullanılmayan bir kesit olduğu dikkate alınırca, bu hatanın büyük sorunlar yaratmayacağını belirtmek gerekir. Bu arada son not olarak bu tip kesitlerin analizlerinin daha doğru bir şekilde yürütülebilmesi için kesme düzeltme katsayılarının tespiti için araştırma yapılması gerekmektedir.



Şekil 40. Avrupa I-kesitleri için karşılaştırma



Şekil 41. Amerikan I-kesitleri için karşılaştırma

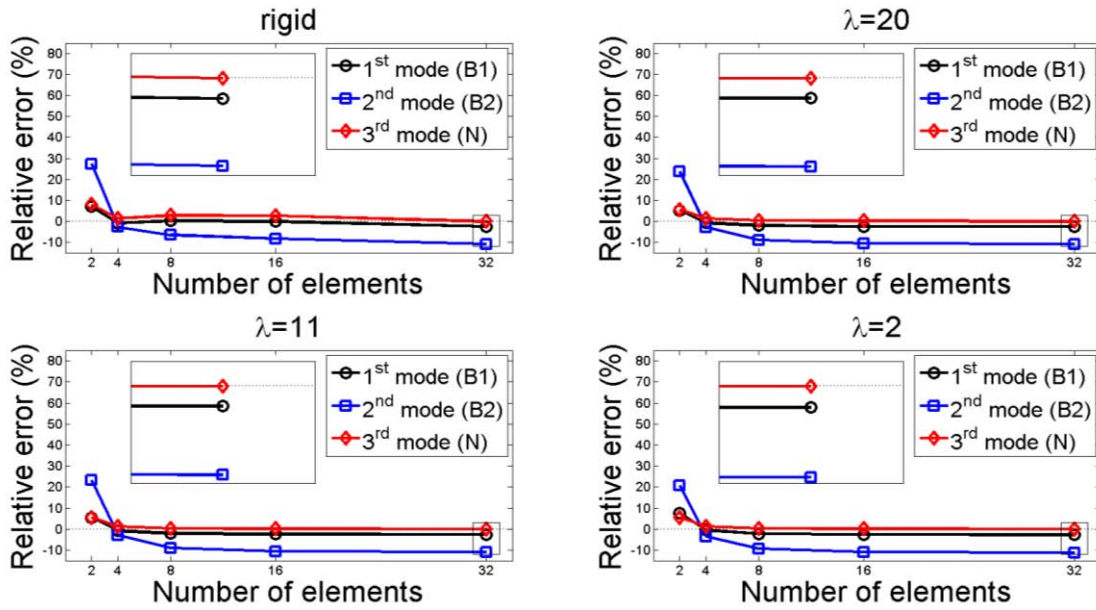
6.2. Yarı-Rijit Bağlantılı Ankastre Kiriş

İkinci karşılaştırmada, bir önceki örnekteki rijit bağlantı durumu değiştirilmiş ve kirişin ankastre olduğu uçta yarı-rijit bağlantı bulunduğu dikkate alınmıştır. Bir önceki örnekte bir kaç I-kesit haricinde tüm kesitler için geliştirilen modelin kesit sonuçlar verdiği tespit edilmişti.

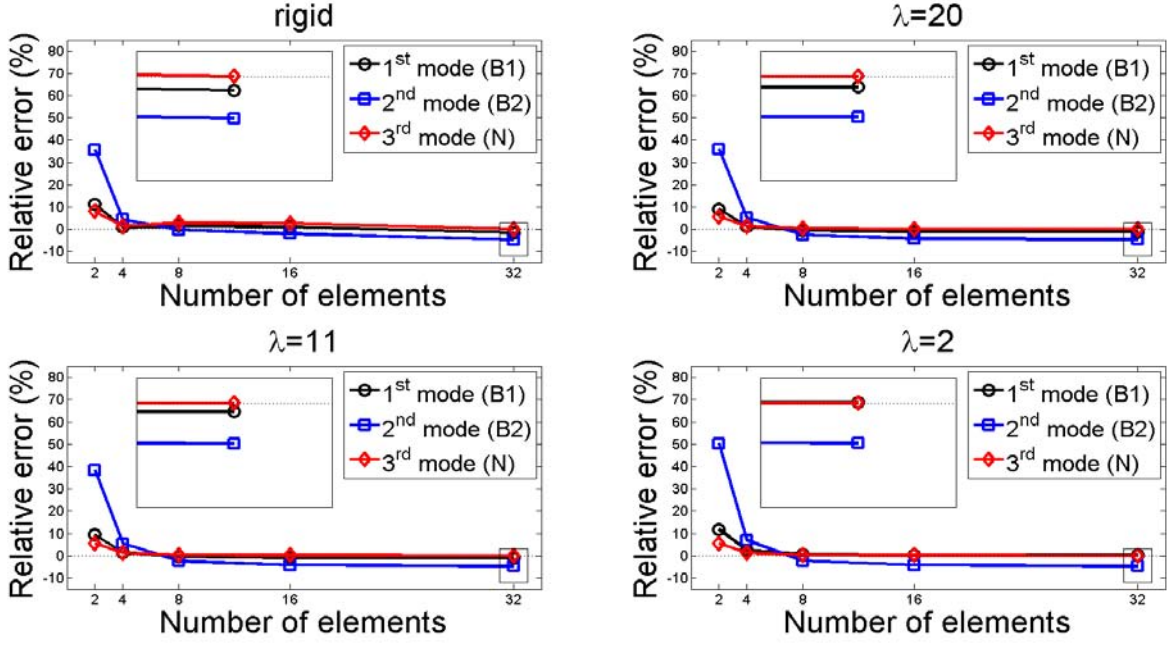
Bu seferki karşılaştırmada bu kesitlerden birisi olan IPE270 dikkate alınmıştır ve SAP2000 programının doğruluğu ve ayrıca yarı-rijit bağlantıları modellemedeki performansı test edilmiştir. SAP2000'de ekstra yay elemanları konular yarı-rijit bağlantı davranışı dikkate alınabilmektedir, ki bunun için ekstra düğüm noktaları program içinde dikkate alınmaktadır.

Karşılaştırma açısından gene rijit bağlantı durumu dikkate alınmış, ardından ankastre uçtaki yarı-rijit bağlantının moment-dönme davranışındaki rijitliğin $\lambda=2$, 11 ve 20 olacak şekilde değiştirilmesi ön görülmüştür. Burada λ katsayısı bağlantının rijitliğinin kirişin eğrilik rijitliği olan EI/L değerine bölünmesiyle elde edilen katsayıdır. Bu katsayı sıfıra yaklaştığında basit bağlantıya, bu katsayı iyice büyüdüğünde ise rijit bağlantıya yaklaşılmaktadır. Analizlerde dikkate alınan 2 değeri basit, 20 değeri ise rijit duruma daha yakın, 11 değeri ise tam olarak yarı-rijit durumu temsil edecek değerlerdir.

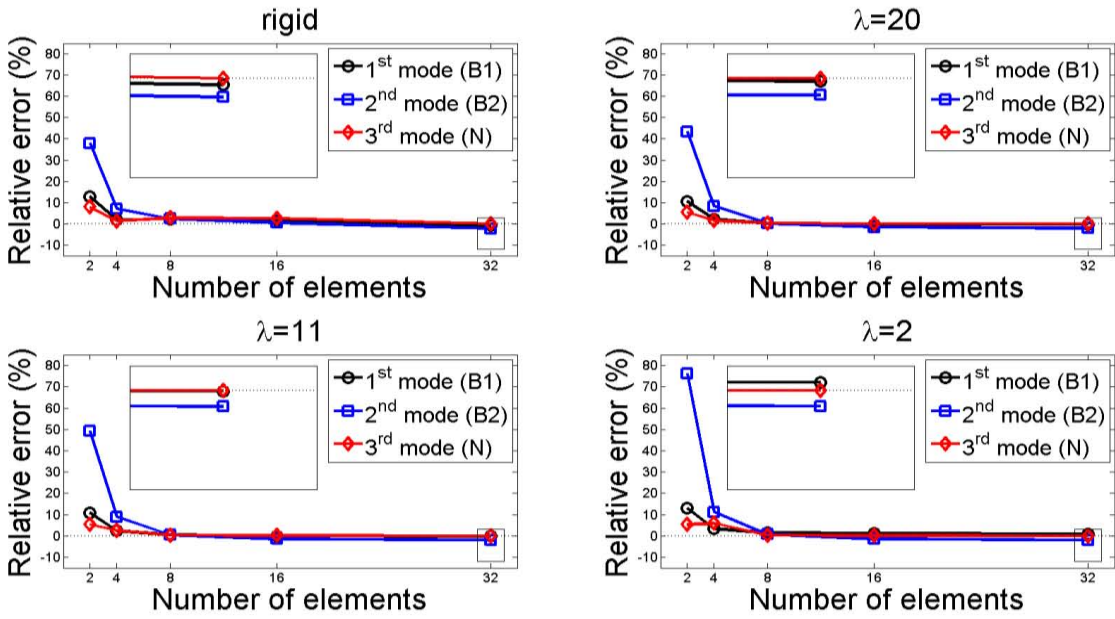
Şekil 42-44 arasında SAP2000 sonuçlarının geliştirilen model sonuçlarına göre görece hatası kısa kirişten uzun kirişe olan durumlar için gösterilmiştir. Bu karşılaştırmada geliştirilen modelin sonuçlarının kesin olan durumu çok eleman kullanılmasıyla dikkate alınmıştır. SAP2000 çözümlerinin doğruluğunu sunabilmek içinse 2, 4, 8, 16 ve 32 elemana bölünmesi gerçekleştirilmiştir. SAP2000 ile yığılı kütle matrisi kullanılmasından ötürü tek eleman sonuçlarının aşırı hatalı olduğunu belirtmek gerekir ve bu durum karşılaştırmada dikkate alınmamıştır.



Şekil 42. Görece hata (%)'nin eleman sayısına göre değişimi, $L/d = 2$



Şekil 43. Görece hata (%)’nin eleman sayısına göre değişimi, $L/d = 5$



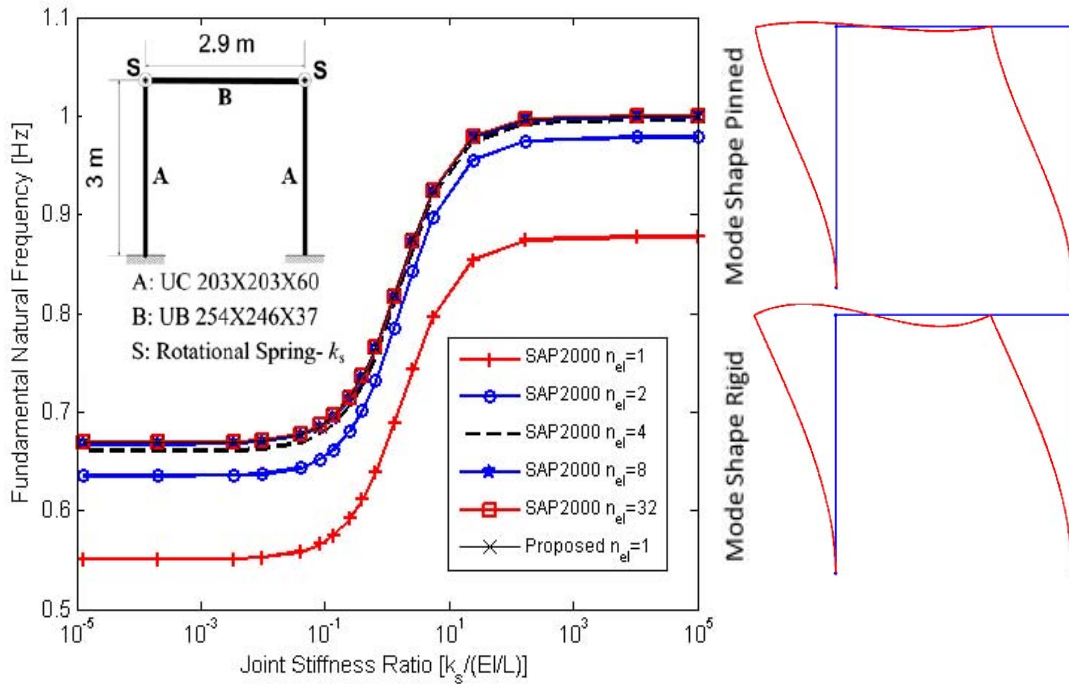
Şekil 44. Görece hata (%)’nin eleman sayısına göre değişimi, $L/d = 10$

Karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 42-44 arasında görülmektedir. SAP2000 ile elde edilen sonuçların özellikle de 2 ve 4 eleman kullanılmasıyla dahi ciddi hatalar içerdiği anlaşılmaktadır. SAP2000 ile elde edilen kesin sonuçların 32 elemanla özellikle de kısa kiriş

durumu için ters yönde %10'a yakın hatalar içerdiğini belirtmek gerekir. Unutmayalım ki IPE270 kesidi için geliştirilen çerçeve modelinin tepkisinin kısa kiriş için kesine çok yakın olduğu bir önceki örnekte tespit edilmişti. SAP2000 bu arada aksenal rijitliği de çok ilginçtir hatalı olarak yakalayabilmekte ve bu durum da SAP2000 ile elde edilen titreşim sonuçlarının ve period hesaplarının belli oranda hatalı sonuçlar oluşturabileceğini açıkça sergilemektedir.

6.3. Yarı-Rijit Bağlantılı Portal Çerçeve

Üçüncü örnekte çerçeve sistemlerinin analizine başlanılmıştır. Bu açıdan [85]'de sunulan portal çerçeve örneği kullanılmıştır. Bu çerçeve yapının detayları Şekil 45'de sunulmuştur ve kirişte UB254x146x37 kesidi, kolonlardaysa UC203x203x60 kesidi kullanılmıştır. Kirişin boyu 2.9 m, kolonların boyuysa 3m'dir. Yarı-rijit bağlantılar kirişlerin ucunda yer almaktadır ve bu bağlantıların rijitliği bir önceki örnekte olduğu gibi değiştirilerek farklı durumların oluşması sağlanmıştır.



Şekil 45. Portal çerçeve [85]'de birinci titreşim frekansının bağlantının değişen rijitliği altındaki değişimi

Geliştirilen elemanla her bir kiriş ve kolonda tek eleman kullanılarak analizler yürütülmüştür. Yarı-rijit bağlantıların varlığı ekstra düğüm noktasına ihtiyaç doğurmamaktadır. SAP2000'de

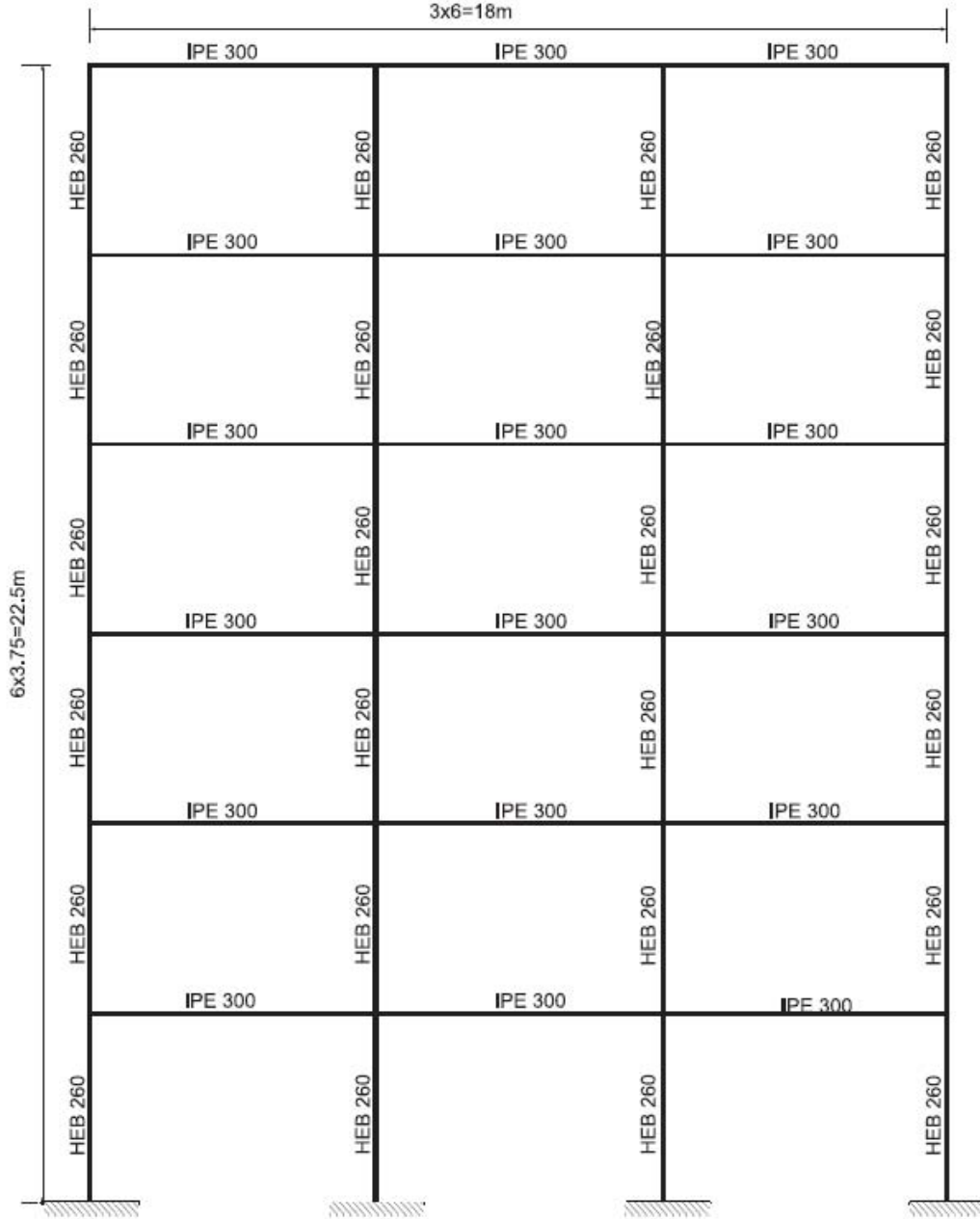
yürütülen analizlerde 1, 2, 4, 8 ve 32 elemanla kiriş ve kolonların bölünmesiyle yürütülmüştür. Ayrıca yarı-rijit bağlantılar için ekstradan yay elemanları tanımlanmıştır. Bu karşılaştırmada geliştirilen elemanın tek elemanla vereceği tepkinin doğruluğu da test edilmiştir. Geliştirilen elemanda hem rijitlik matrisleri gerçekçi yakalanmakta, hem de kütle matrisi de tutarlı türetimle çok daha doğru olarak elde edilebilmektedir. SAP2000'de ise yığılı kütle matrisi kullanılmakta, ayrıca rijitlik matrisi hesabındaysa kesme düzeltme katsayısını SAP2000 kendi içinde otomatik olarak dikkate alarak analizler yürütmektedir. Şekil 45'de görüldüğü üzere, analizler yarı-rijit bağlantının rijitliğinin sıfırdan çok büyük sayıya değiştiği tüm durumları kapsayacak şekilde yürütülmüş ve geliştirilen elemanın tek eleman tepkisi mükemmel sonuçlar vermektedir. SAP2000 ile en az 8 eleman kullanıldığında elde edilen sonuçlar gerçekçi olabilmektedir. Belli bir yakınlıkta SAP2000'de 4 eleman kullanılmasının yeterli olabildiği görülmekte, ancak 2 ya da tek eleman kullanılmasının çok hatalı sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekilde ayrıca geliştirilen elemanla elde edilen birinci titreşim modu, iki uç yarı-rijit bağlantı durumu için çizilmiştir.

6.4. Çok Katlı ve Açıklıklı Yarı-Rijit Bağlantılı Çerçeve

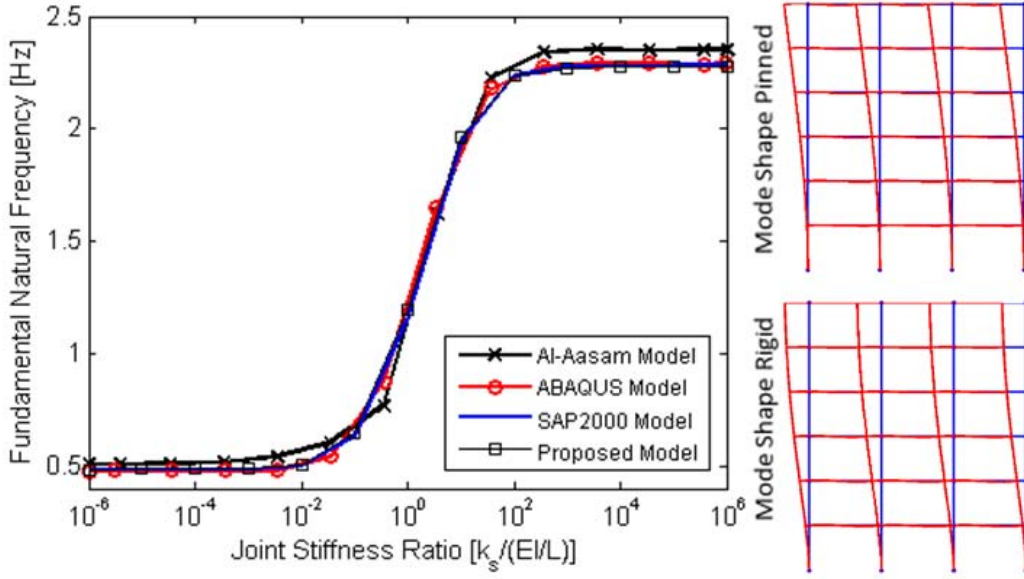
Titreşim analizlerinde son örnek olarak [85] tarafından sunulan 6 katlı ve 3 açıklıklı çelik çerçeve yapı dikkate alınmıştır (Şekil 46). Bu yapıda kolonlarda HEB260 kirişlerdeyse IPE300 kesitler kullanılmıştır. Kirişlerin boyu 6.0 m, kolonların boyuysa 3,75 m'dir. Kirişlerin ucunda yarı-rijit bağlantılar bulunmakta ve bağlantı rijitlik katsayısı basit bağlantıdan rijit bağlantıya geçecek şekilde analizlerde değiştirilmiştir.

Geliştirilen çerçeve modelinin her bir açıklıkta tek eleman kullanılarak modellenmesiyle sonuçlar elde edilmiş ve birinci titreşim modu için Şekil 47'de sunum yapılmıştır. Aynı analiz SAP2000'de her bir açıklıkta 4'er eleman kullanıldığı durumdan elde edilen sonuçlar ve ayrıca [85]'te elde edilen kapalı formdaki sonuçlar (Al-Aasam model) ve aynı çalışmada yazarların elde ettiği ABAQUS sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Al-Aasam modelinin bu yapıda özellikle de rijit durumu tespit edebilmekte hatalı sonuçlar verdiği görülmüştür. Onun dışındaki tüm modellerin tepkisinin örtüştüğü ve bu arada geliştirilen çerçeve modelinde tek eleman tepkisinin birinci titreşim modunu yakalamada mükemmel sonuçlar verdiğini göstermektedir. Şekil 48 ve 49'da ise sırasıyla ikinci ve üçüncü titreşim frekansları ve modları sergilenmiştir. Görüldüğü üzere, geliştirilen eleman tepkisi ve SAP2000 tepkisi örtüşmektedir, ki geliştirilen eleman analizlerinde her bir açıklıkta tek eleman kullanılmıştır ve yarı-rijit

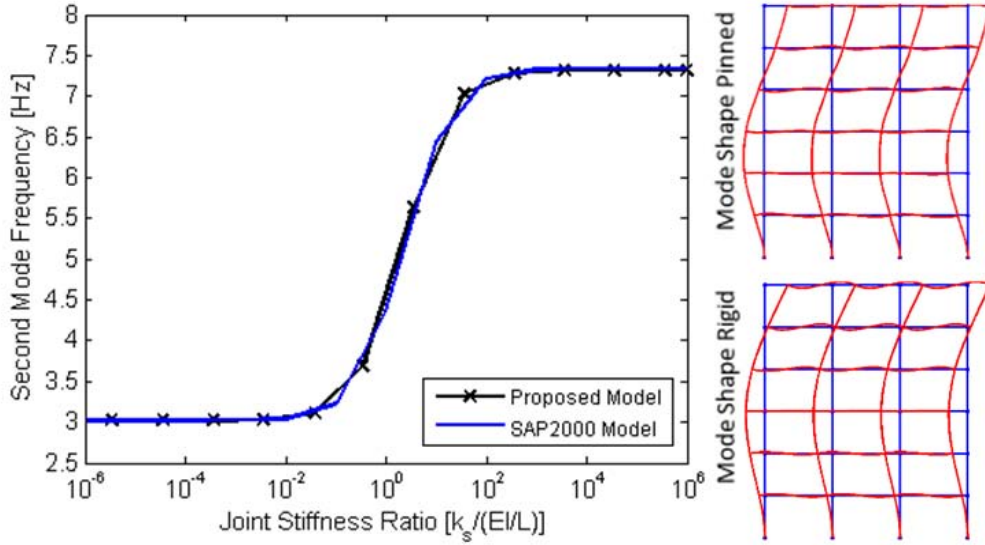
bağlantılar olmasına rağmen düğüm sayısında artış olmamış ve toplam 28 düğüm noktası bulunmaktadır. SAP2000 analizlerindeyse 162 düğüm noktası kullanılmıştır, yani 6 kat daha fazla düğüm sayısı gerekmiştir. Bu artış oranı da göstermektedir ki, çok daha büyük sistemlerin analizinde bu artışın oluşturulacak matrislerin büyümesi sebebiyle analiz sürelerini uzatacağı ve hatta bilgisayarda kayıt için gerekli depo oranını çok ciddi manada artıracacağı görülmektedir.



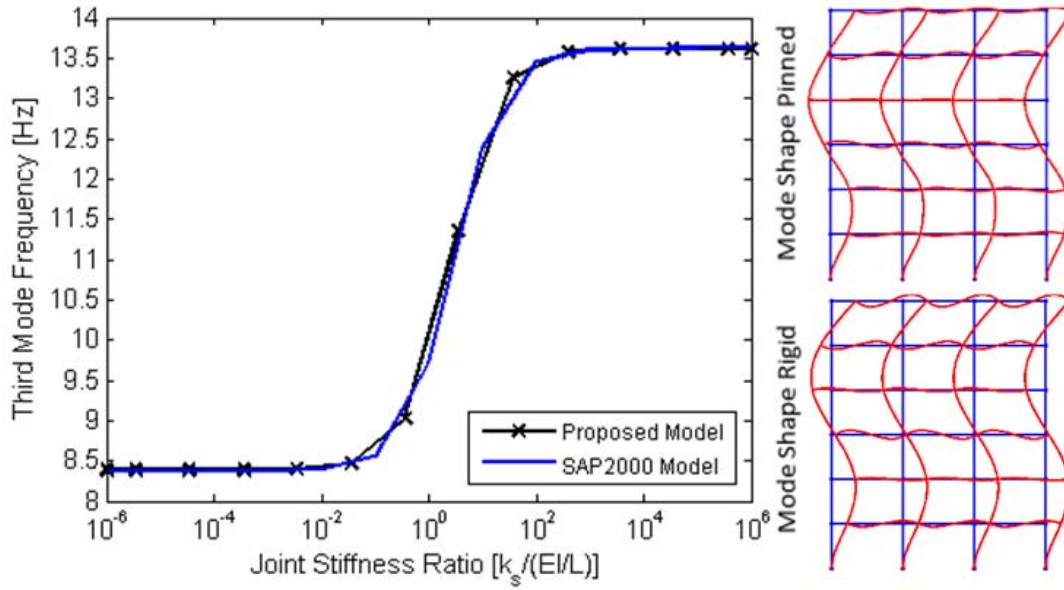
Şekil 46. Çok katlı ve açıklıklı çelik çerçeve yapı [85]



Şekil 47. Çok katlı açıklıklı yapıda [85] birinci titreşim frekansının değişen bağlantı rijitliği altında değişimi ve karşılaştırılması



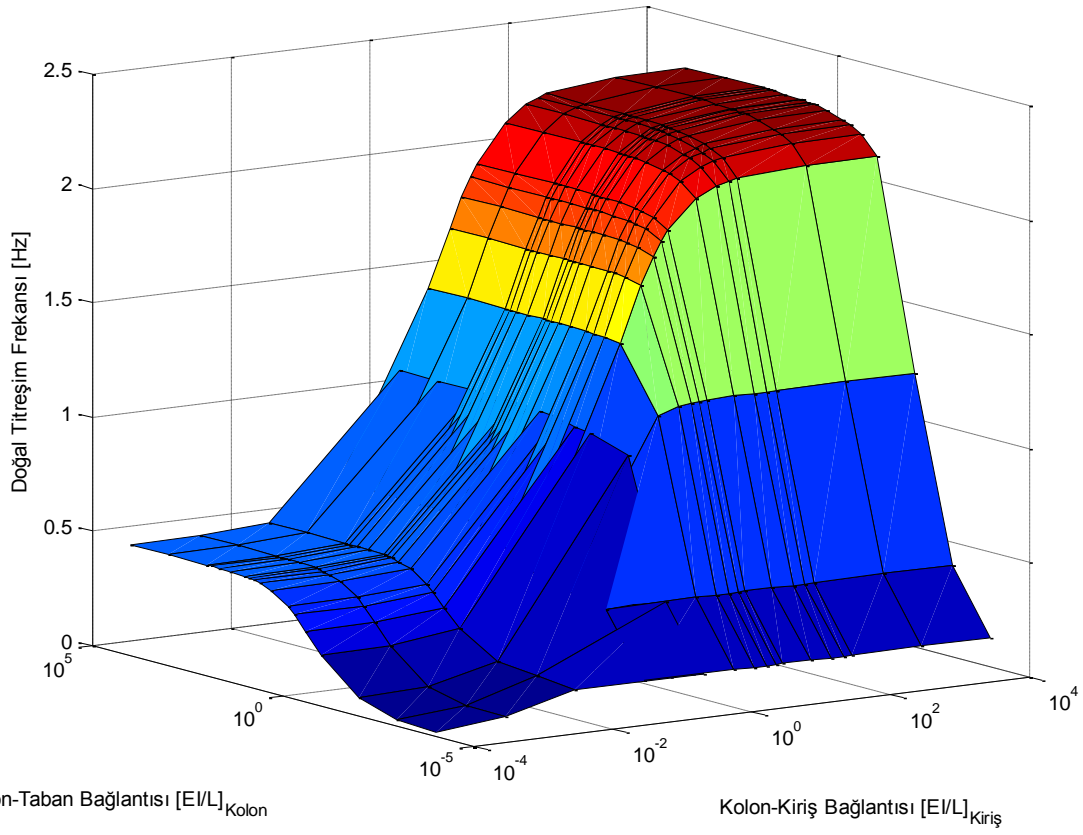
Şekil 48. Çok katlı açıklıklı yapıda [85] ikinci titreşim frekansının değişen bağlantı rijitliği altında değişimi ve karşılaştırılması



Şekil 49. Çok katlı açıklıklı yapıda [85] üçüncü titreşim frekansının değişen bağlantı rijitliği altında değişimi ve karşılaştırılması

6.5. Kolon Taban Yarı-Rijit Bağlantısının Etkileri

Yukarıda sunulan 3 açıklıklı ve 6 katlı çelik çerçeve örneğinde sadece kiriş uçlarında yarı-rijit bağlantılar mevcuttu. Bu örnek kolon tabanlarında da yarı-rijit bağlantı tepkisinin var olabileceği dikkate alınarak tekrardan analiz edilmiştir. Kolon tabanlarındaki bağlantı rijitliği de bir önceki örneklerde olduğu gibi basit bağlantıdan rijit bağlantıya geçecek şekilde farklılaştırılmıştır. Geliştirilen çerçeve modelinin tepkisinin mükemmel sonuçlar verdiği daha önceki örneklerde sergilenmişti. Bu sebeple bu sunumda sadece geliştirilen çerçeve modeli ile analizler yürütülecektir. Sunum açısından kolon tabanlarındaki rijitlik sıfırdan çok büyük sayıya değiştirildiği her bir adımda, ayrıca kiriş uçlarında da yarı-rijit bağlantıların rijitliği sıfırdan çok büyük sayıya değiştirilmiştir. Sonuç olarak 3 boyutlu bir tepki elde edilmiş ve birinci titreşim frekansının kolon taban ve ayrıca kiriş uçlarındaki yarı-rijit bağlantıların rijitliğindeki değişime göre farklılaşması Şekil 50’de sunulmuştur. Bu şekilde kırmızı olan tepedeki bölge, tüm bağlantıların rijite yakın olduğu durumu, gittikçe koyu mavileşen bölgelerinse tüm bağlantıların basit olduğu durumu temsil etmektedir. Görüldüğü üzere, yapıda mevcut olan yarı-rijit bağlantıların gerçek davranışının doğru olarak modellenmesi yapının titreşimine çok önemli etki oluşturmaktadır.

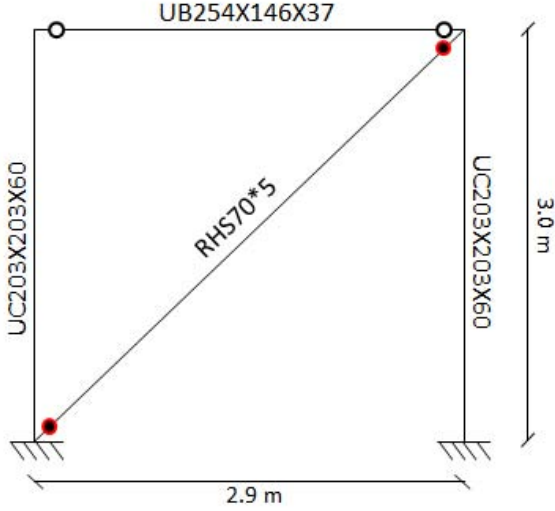


Şekil 50. Çok katlı yapıda [85] kolon taban bağlantısı ve kolon-kiriş bağlantılarında mevcut olan yarı-rijit davranışın birinci titreşim frekansına olan etkisi

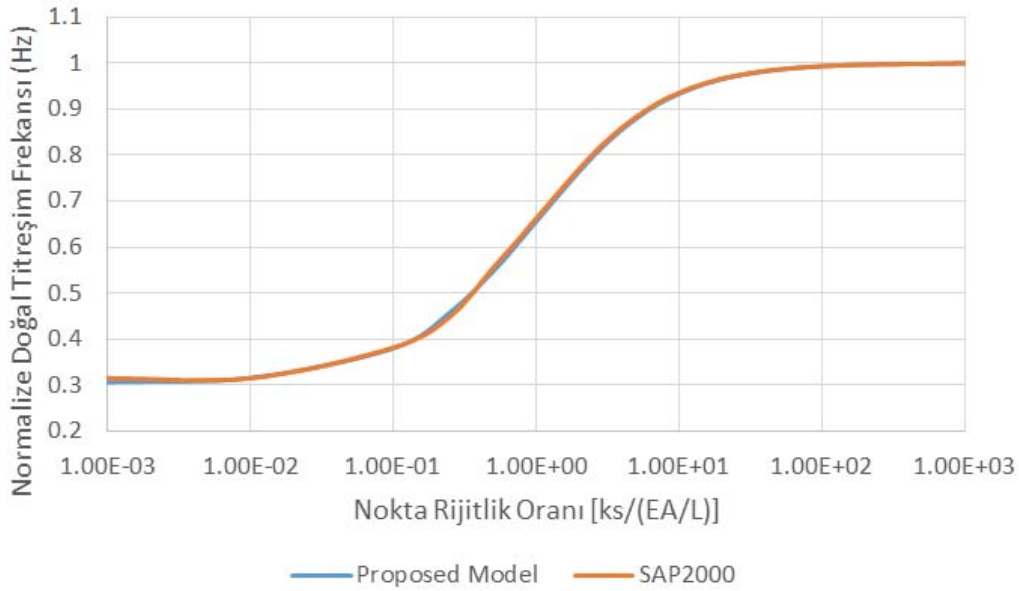
6.6. Guse Levhalar için Eksenel Davranışın Yapı Titreşimine Etkisi

Son titreşim örneğinde moment-dönme tipi yaylarla yarı-rijit bağlantı davranışını modellemek yerine eksenel kuvvet ve deformasyon tipinde yarı-rijit bağlantının var olacağı bir problem üzerinden geliştirilen çerçeve modelini test etmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda Şekil 45'te sunulan portal çerçeve örneği dikkate alınarak değişiklik yapılmıştır. Bu yapıda aynı ebatlarda kolon ve kirişler kullanılmış, kirişlerin ucunda geliştirilen yarı-rijit bağlantının kullanılmasıyla moment-dönme tipinde doğrusal davranışta sifıra yakın rijitlik verilmiş ve böylece kirişlerin ucundaki moment taşınmaması sağlanmıştır. Ek olarak Şekil 51'de görüldüğü üzere boyutları verilmiş olan bir çapraz eleman eklenmiştir. Bu çaprazların ucunda guse levhalarda eksenel deformasyondan kaynaklanan bir esneklik olabileceği varsayılmıştır. Bu esnekliğin oranı λ ise guse levhadaki eksenel rijitliğin çapraz elemanın EAL eksenel

rijitliğine bölünmesiyle elde edilen değerle tespit edilmiştir. Bu değer çok küçük bir sayıdan büyük bir sayıya doğru değiştirilmiştir. Aynı örnek SAP2000 kullanarak da analiz edilmiştir ve karşılaştırmalı sonuç Şekil 52’de sunulmuştur. Görüldüğü üzere, geliştirilen çerçeve elemanı ile aksenal yarı-rijit bağlantılar mükemmel bir şekilde ve ekstra düğüm noktasına gerek kalmadan modellenebilmektedir.



Şekil 51. Portal Çaprazların ucunda guse levhanın bulunduğu portal çerçeve



Şekil 52. Portal çerçevede çaprazların ucunda guse levhalarda aksenal deformasyonun bulunmasının yapı titreşime etkisi

7. PARAMETRİK ANALİZLER

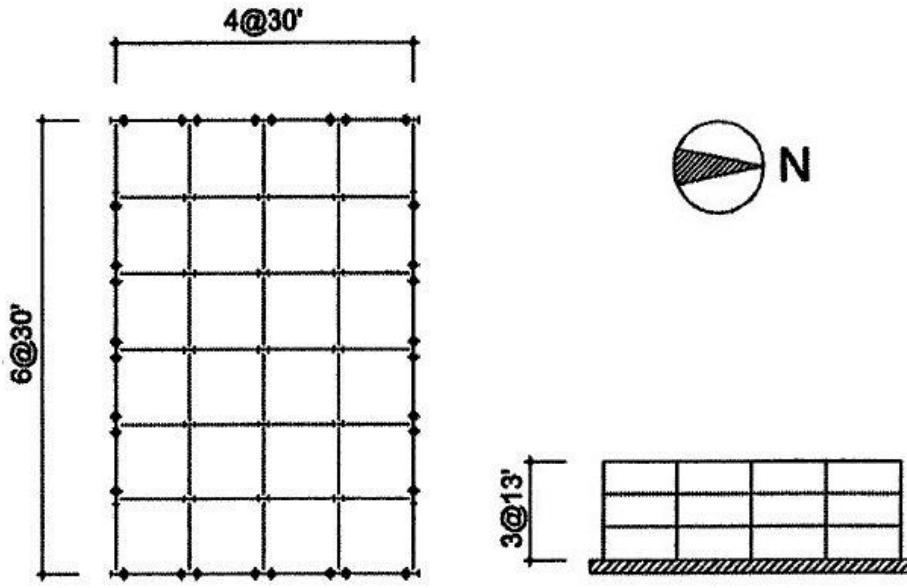
Proje kapsamında yarı-rijit bağlantılarda oluşabilecek doğrusal olmayan davranışın yapılar etkisini incelemek amacıyla SAC Projesi [1] kapsamında sunulan binalar dikkate alınmıştır. 1994 Northridge Depremi sonrasında 150'yi aşan çelik çerçeve yapıda hasarlar olduğu gözlemlenmiştir. En büyük sorunsu moment aktaran çerçevelerde kolon-kiriş bağlantı bölgesinde kaynakların kırılması sonucu yapıda oluşan hasarların önemli seviyeye oluşmasıyla gözlemlenmiş ve 7 Milyar ABD Dolarını aşan hasar oluşmuştur. Bu depremden sonra bağlantı bölgelerinde moment kapasitesine ek olarak enerji harcayabilmenin de çok önemli bir husus olduğu sonucuna varılmıştır. ABD'nin Afet ve Acil Durumlara Müdahale (Federal Emergency Management Agency - FEMA) ve Kalifornia Yapı Mühendisleri Topluluğu (Structural Engineers Association of California) tarafından ortak bir çalışma grubu SAC kurulmuştur. Bu grubun amacı ileride oluşacak depremlerde çelik çerçeve yapılarda benzer hasarların oluşmasını engellemek olarak belirlenmişti ve grup çalışmasının sonuçları FEMA 267 dokümanı olarak yayınlanmıştır.

Bu proje çalışmasının devamı olarak ikinci fazdaki bir teknik raporda [89], analizleri yürütülebilecek ve yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmış hem Northridge Depremi öncesi hem de Northridge Depremi sonrasındaki gözlemlere göre düzeltilmiş yapılar sunulmuştur. Bu proje kapsamında parametrik analizler yürütebilmek amacıyla bu rapordaki alçak katlı yapıların analizlerinin farklı parametrelerin değiştiği dikkate alınarak incelenmiştir.

7.1. İncelenen Binaların Tanıtımı

SAC/BD-00/25 raporu [89]'da alçak, orta ve yüksek katlı binalar sunulmuştur. Bu binaların doğrusal olmayan analizlerinin pek çok farklı parametre değişkenleri altında incelenmesi çok kapsamlı bir çalışma olacak ve çok ciddi bir analiz süreci gerektirecektir. Proje kapsamında bu raporda sunulan alçak katlı binaların incelenmesi dikkate alınmıştır. Bu yapılarla ilgili genel plan görüntüsü Şekil 53'de sunulmuştur.

Bu yapılarda kullanılan çeliğin sınıfı A572 Grade 50 çeliğidir. Bu çeliğin akma dayanımı 50 ksi (345 MPa), elastisite modülü 29,000 ksi (200 GPa) ve Poisson oranı ise 0.3 olarak alınır. Yürütülecek doğrusal olmayan analizlerde kolon ve kirişlerde oluşacak plastisitenin yakalanabilmesi için, çelik için çift doğrulu bir model kullanılmış ve pekleşme modülü elastisite modülünün %3'ü olarak alınmıştır. Analizlerde doğrusal olmayan geometri dikkate alınmıştır. Ayrıca yapının modellenmesinde kesme deformasyonları da dikkate alınarak, daha önceki bölümde tavsiye edilen kesme düzeltme katsayısı kullanılmıştır.



Şekil 53. Çok katlı özel moment aktaran çelik çerçeve yapının plan görüntüsü (Northridge Depremi sonrası için tavsiye edilmiştir)

Bu binaların tasarımı aşamasında aşağıdaki yükler dikkate alınmıştır ve bu yükler kullanılarak yapının sismik ağırlığı da hesaplanabilir:

- Çelik çerçevenin ağırlığı
- Döşeme ve çatı yükleri: 3 in. (7.5 cm) metal döşeme ve 2.5 in. (6.35 cm) normal ağırlıkta beton dolgul
- Çatıda: 7 psf (0.34 KPa) ortalama basınç yük dağılımı
- Tavan yüklemesi: 3 psf (0.14 KPa) ortalama yayılı
- Mekanik ve elektrik alet yükleri: 7 psf tüm katlarda ve çatı katında 40 psf ekstra
- Bölme duvarlar: yönetmelikçe 10 psf deprem ölü yükleri ve 20 psf yerçekimi için yükler (gravity loads)
- Dış duvarlar: 25 psf tüm duvar alanları ve çatı katı için

- Canlı yükler: tipik ofis kullanımı için yükler alınmıştır
- Rüzgar yükleri: tipik yönetmelik tasarım ilkeleri takip edilmiş ve sık yoğun bölgede inşa edilmiş bir yapı ve UBC yönetmeliğinde B kategorisi alınmıştır.

SAC/BD-00/25 [89] raporunda 3 katlı yapı için sismik ağırlıklar birinci ve ikinci kat için 65.5 kips-sec²/ft ve çatı katı içinse 70.9 kips-sec²/ft verilmiştir.

Pratikte mühendislerin aynı binayı tasarlarken farklı kesitler seçerek yönetmeliğe uygun tasarımlar yapabildiği bilinmektedir. Yani tasarım denilen husus aslında içinde belli bir oranda tecrübe de içeren bir süreçtir ve en optimum tasarıma sahip binanın inşa edilebilmesi ve öyle bir hesaba girilmesi genelde zordur ve gerçekleştirilmemektedir. Bu husus dikkate alınarak, [89]'da üst ve alt limitlere göre tasarlanmış 3-katlı iki farklı yapı sunulmuştur. Bu tasarımla ilgili detaylar bahsi geçen raporda sunulmuştur. Ortaya çıkan iki farklı binanın tüm geometrik kesit özellikleri Tablo 5, 6 ve 7'de sunulmuştur. Alt limit binada kolonlar W14 keside sahiptir ve üst limit binada ise W36 keside sahiptir. Alt limit tasarım bina daha esnek bir binadır ve raporda hesaplanan periyod değeri 0.96 sn'dir. Üst limit binanın periyodu ise 0.78 sn'dir.

Tablo 5. Alt limit tasarım binanın özellikleri

LA-3 Katlı Northridge Sonrası Yapı			
W14 Alt Limit Tasarım (T=0.96 sn.)			
Kat	Kolonlar		Kiriş
	Dış	İç	
1/2	W14x257	W14x283	W30x99
2/3	W14x257	W14x283	W33x118
3/Dış	W14x257	W14x283	W21x68

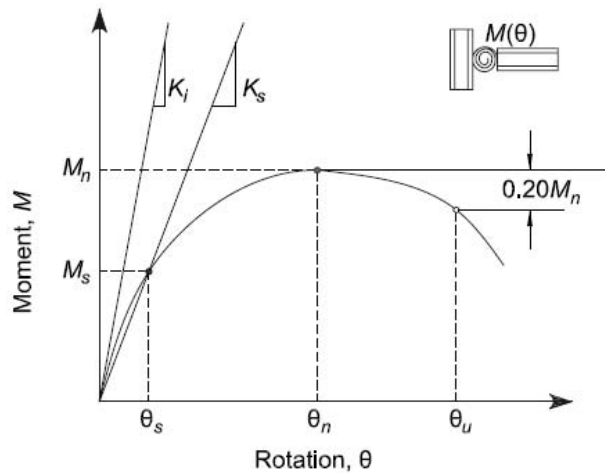
Tablo 6. Üst limit tasarım binanın özellikleri

LA-3 Katlı Northridge Sonrası Yapı			
W36 Üst Limit Tasarım (T=0.78 sn.)			
Kat	Kolonlar		Kiriş
	Dış	İç	
1/2	W36x135	W36x135	W30x108
2/3	W36x135	W36x135	W33x130
3/Çatı	W36x135	W36x135	W24x76

Tablo 7. Kesit özellikleri (1 in = 2.54 cm'dir)

W Shape	A (in ²)	I _z (in ⁴)	I _y (in ⁴)	W _{p,z} (in ³)	d (in)	b _f (in)	t _w (in)	t _f (in)
W14X257	75.6	3400	1290	487	16.4	16.0	1.18	1.89
W14X283	83.3	3840	1440	542	16.7	16.1	1.29	2.07
W21X68	20.0	1480	64.7	160	21.1	8.27	0.430	0.685
W24X76	22.4	2100	82.5	200	23.9	8.99	0.440	0.680
W30X108	31.7	4470	146	346	29.8	10.5	0.545	0.760
W30X99	29.0	3990	128	312	29.7	10.5	0.520	0.670
W33X118	34.7	5900	187	415	32.9	11.5	0.550	0.740
W33X130	38.3	6710	218	467	33.1	11.5	0.580	0.855
W36X135	39.9	7800	225	509	35.6	12.0	0.600	0.790

Bu iki farklı binanın tasarımında rijit bağlantılar mevcutmuş gibi tasarım yürütülmüştür. Aslında bağlantıların gerçek davranışı yarı-rijit olacak ve bu açıdan analizler yürütmek maksadıyla bağlantıların ilk rijitlik değer oranı $\lambda = 15$ olarak alınmıştır. Burada bu oran bağlantının ilk rijitliğinin bağlanan kirişin E/I eğrilme rijitliğine oranı değeridir. Yürütülecek analizler kapsamında ayrıca bağlantıların en büyük moment dayanımı kirişin plastik moment dayanımına göre %75 değerinde az alınmış, bu arada bağlantıların yeterli süneklik sahibi olması için [78]'de sunulduğu üzere moment dayanımında %20 düşüşün 0.04 radyanda olduğu dikkate alınmıştır (Şekil 54). Aşağıda sunulan şeklin çok parçalı doğrusal olmayan durumu daha önceki bölümlerde anlatılan model kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 54. Yarı-rijit bağlantının varsayılan davranışı

Modelleme açısından yarı-rijit bağlantının en büyük moment taşıdığı tepe noktadan iki farklı davranış sergileyebildiği dikkate alınmıştır. Bunlardan birincisinde dayanım düşüşü oluşmadan düz devam eden bir tepki, ikincisindeyse Şekil 52'de gösterildiği gibi 0.04 radyanda %20 moment dayanımı düşüşü veren doğrusal çizginin takip edilebileceği varsayılmıştır. Ayrıca ek olarak çevrimsel hareket açısından daralmanın mevcut olacağı ancak bunun az ya da çok ciddi seviyede olacak şekilde iki farklı kategoride incelenebileceği varsayılmıştır.

Binaların analizi hem statik itme hem de doğrusal olmayan zaman aralığında dinamik analizler yürüterek gerçekleştirilmiştir. Statik itme açısından birinci mod profilinde yükleme yapılmıştır. Deprem kayıtları açısından Tablo 8 ve 9'da sunulan sırasıyla tasarım ve olabilecek en büyük depremler gerekli oranlarda ayarlanarak yapıya etkilmiştir.

Tablo 8. Los Angeles (LA) Deprem Kayıtları 50 yılda %10 aşılma olasılığı seviyesi

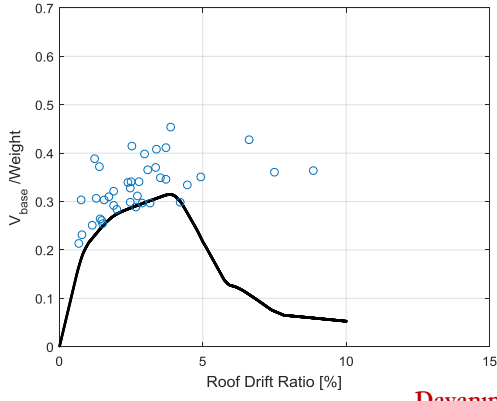
No:	Kayıt yeri	Deprem Şiddeti	Uzaklık (km)	Büyütme Oranı	Süre (sn)	PGA (cm/sn ²)	PG A (g)
LA01	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	2.01	53.46	452.03	0.46
LA02	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	2.01	53.46	662.88	0.68
LA03	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	4.1	1.01	39.38	386.04	0.39
LA04	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	4.1	1.01	39.38	478.65	0.49
LA05	Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5	1.2	0.84	39.08	295.69	0.3
LA06	Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5	1.2	0.84	39.08	230.08	0.23
LA07	Landers, 1992, Barstow	7.3	36	3.2	79.98	412.98	0.42
LA08	Landers, 1992, Barstow	7.3	36	3.2	79.98	417.49	0.43
LA09	Landers, 1992, Yermo	7.3	25	2.17	79.98	509.70	0.52
LA10	Landers, 1992, Yermo	7.3	25	2.17	79.98	353.35	0.36
LA11	Loma Prieta, 1989, Gilroy	7.0	12	1.79	39.98	652.49	0.67
LA12	Loma Prieta, 1989, Gilroy	7.0	12	1.79	39.98	950.93	0.97
LA13	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	1.03	59.98	664.93	0.68
LA14	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	1.03	59.98	644.49	0.66
LA15	Northridge, 1994, Rinaldi RS	6.7	7.5	0.79	14.945	523.35	0.53
LA16	Northridge, 1994, Rinaldi RS	6.7	7.5	0.79	14.945	586.58	0.5
LA17	Northridge, 1994, Sylmar	6.7	6.4	0.99	59.98	558.43	0.5
LA18	Northridge, 1994, Sylmar	6.7	6.4	0.99	59.98	801.44	0.82
LA19	North Palm Springs, 1986	6.0	6.7	2.97	59.98	999.43	1.02
LA20	North Palm Springs, 1986	6.0	6.7	2.97	59.98	976.61	0.99

Tablo 9. Los Angeles (LA) Deprem Kayıtları 50 yılda %2 aşılma olasılığı seviyesi

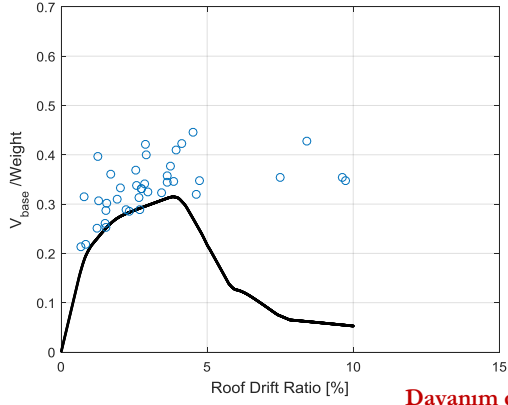
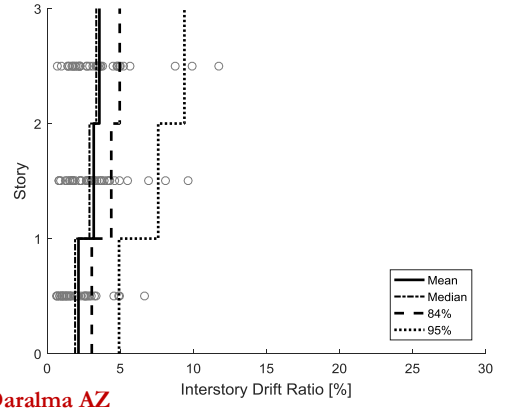
No:	Kayıt yeri	Deprem Şiddeti	Uzaklık (km)	Büyütme Oranı	Süre (sn)	PGA (cm/sn ²)	PGA (g)
LA21	1995 Kobe	6.9	3.4	1.15	59.98	1258.00	1.28
LA22	1995 Kobe	6.9	3.4	1.15	59.98	902.75	0.92
LA23	1989 Loma Prieta	7.0	3.5	0.82	24.99	409.95	0.42
LA24	1989 Loma Prieta	7.0	3.5	0.82	24.99	463.76	0.47
LA25	1994 Northridge	6.7	7.5	1.29	14.945	851.62	0.87
LA26	1994 Northridge	6.7	7.5	1.29	14.945	925.29	0.94
LA27	1994 Northridge	6.7	6.4	1.61	59.98	908.70	0.93
LA28	1994 Northridge	6.7	6.4	1.61	59.98	1304.10	1.33
LA29	1974 Tabas	7.4	1.2	1.08	49.98	793.45	0.81
LA30	1974 Tabas	7.4	1.2	1.08	49.98	972.58	0.99
LA31	Elysian Park (oluşturuldu)	7.1	17.5	1.43	29.99	1271.20	1.3
LA32	Elysian Park (oluşturuldu)	7.1	17.5	1.43	29.99	1163.50	1.19
LA33	Elysian Park (oluşturuldu)	7.1	10.7	0.97	29.99	767.26	0.78
LA34	Elysian Park (oluşturuldu)	7.1	10.7	0.97	29.99	667.59	0.68
LA35	Elysian Park (oluşturuldu)	7.1	11.2	1.1	29.99	973.16	0.99
LA36	Elysian Park (oluşturuldu)	7.1	11.2	1.1	29.99	1079.30	1.1
LA37	Palos Verdes (oluşturuldu)	7.1	1.5	0.9	59.98	697.84	0.71
LA38	Palos Verdes (oluşturuldu)	7.1	1.5	0.9	59.98	761.31	0.78
LA39	Palos Verdes (oluşturuldu)	7.1	1.5	0.88	59.98	490.58	0.5
LA40	Palos Verdes (oluşturuldu)	7.1	1.5	0.88	59.98	613.28	0.63

7.2. İncelenen Binalarda Yarı-Rijit Bağlantıların Etkisi

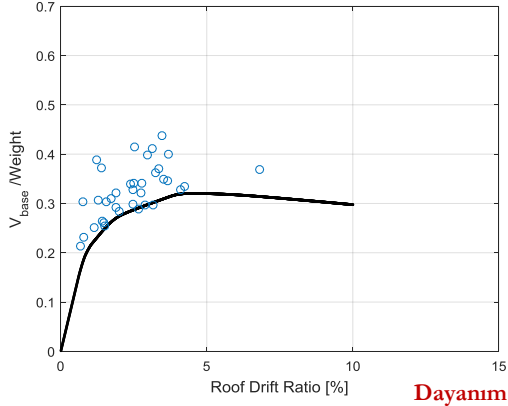
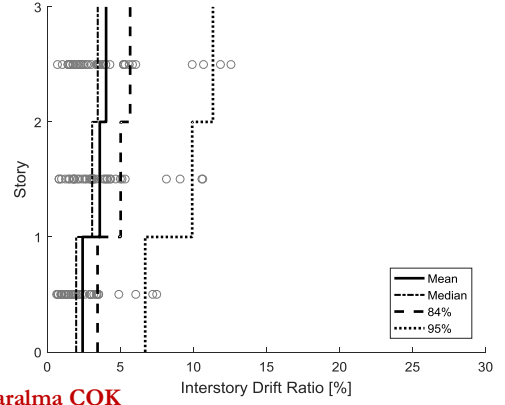
Şekil 55’de alt limit binada yani W14 kesitli kolonlara sahip ve daha esnek olan binadaki tepkiler, Şekil 56’te ise üst limit yani W36 kesitli kolonlara sahip ve daha rijit olan binadaki tepkiler sunulmuştur. Sunumda bağlantıda dayanım düşüşünün var olup olmadığı, daralma etkilerinin az ya da çok olduğu tüm durumlar grafiklerde gösterilmiştir. Sonuçlar hem normalize toplam taban kesme kuvveti (yani taban kesme kuvvetinin sismik yapı ağırlığına bölünmesi ile elde edilen kuvvet) ile tepe çatı deplasmanının toplam kat yüksekliğine bölündüğü eğri olarak sunulmuş, hem de katlar arası görece en büyük deplasmanların görüntüsü verilecek şekilde sunulmuştur.



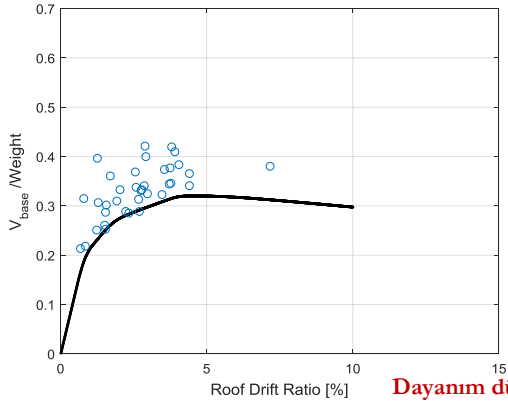
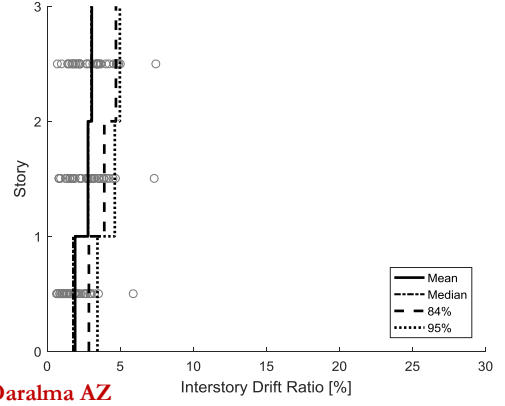
Dayanım düşüşü VAR – Daralma AZ



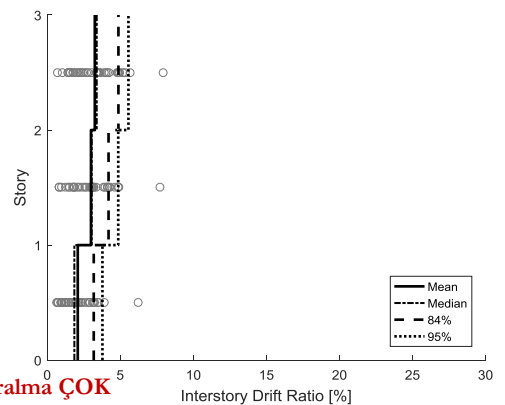
Dayanım düşüşü VAR – Daralma ÇOK



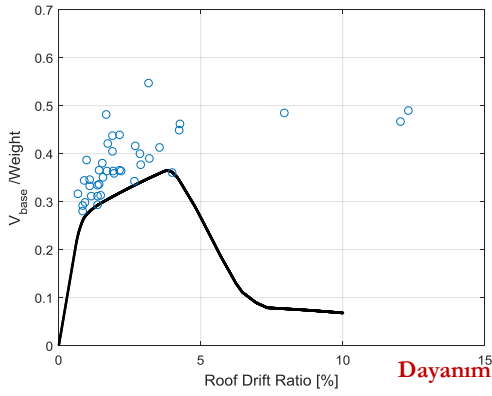
Dayanım düşüşü YOK – Daralma AZ



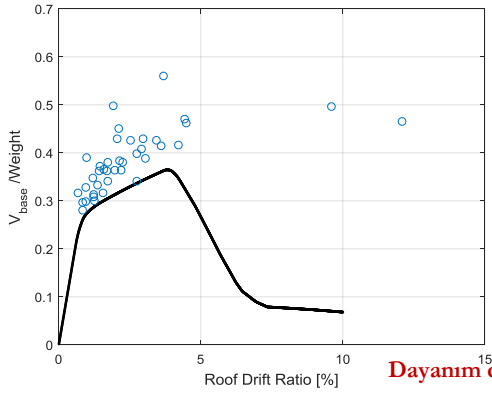
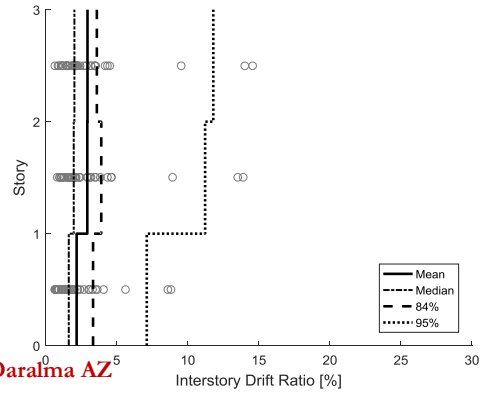
Dayanım düşüşü YOK – Daralma ÇOK



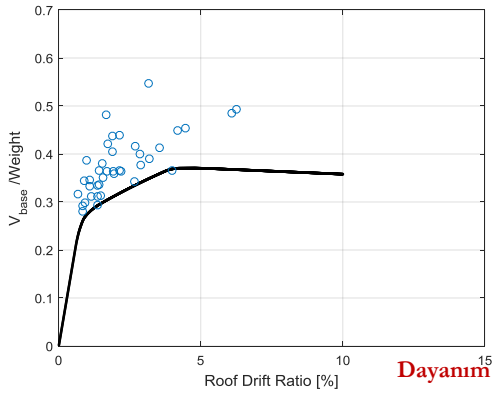
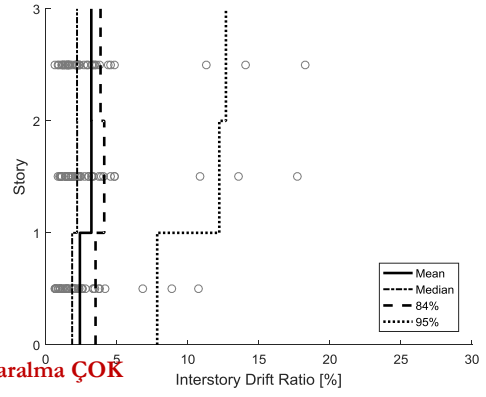
Şekil 55. Alt limit tasarım binada (W14 kolonlu) oluşan etkiler



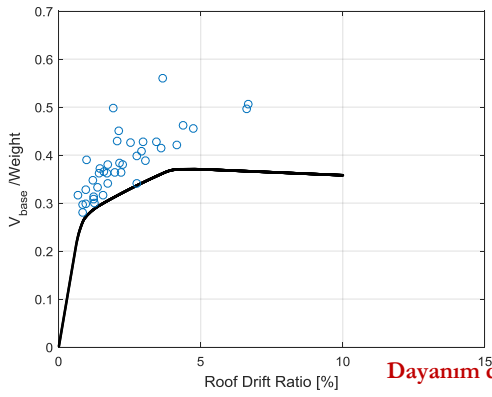
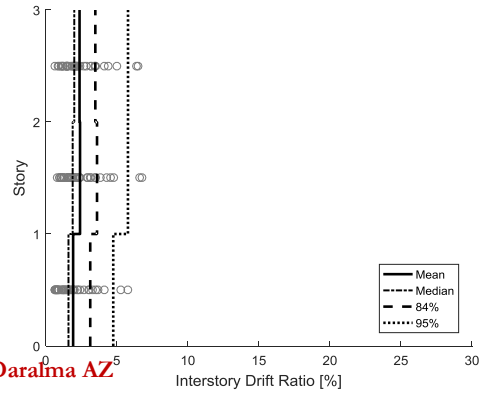
Dayanım düşüşü VAR – Daralma AZ



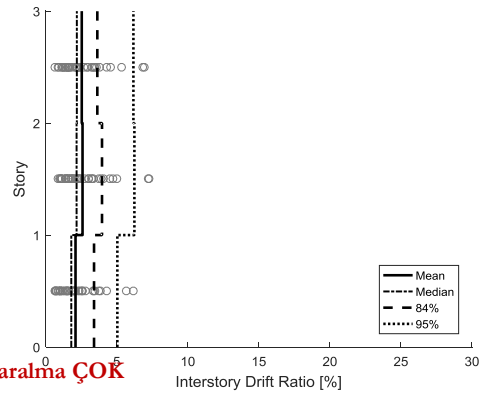
Dayanım düşüşü VAR – Daralma ÇOK



Dayanım düşüşü YOK – Daralma AZ



Dayanım düşüşü YOK – Daralma ÇOK



Şekil 56. Üst limit tasarım binada (W36 kolonlu) oluşan etkiler

Şekil 55 ve 56'da sunulan tüm değerler deprem kayıtlarından elde edilen sonuçlardır, sadece kesme kuvveti çatı deplasman grafiklerinde statik itme sonuçları koyu siyah sürekli eğrilerle gösterilmiştir.

Tüm sonuçlarda görüldüğü üzere, her iki yapı grubu için de, moment dayanımında düşüş ve ciddi seviyede daralma olduğunda, monotonik eğride yönetmeliklere göre yeterli süneklik sağlanmasına rağmen, yapıda çok ciddi görece kat ötelenmelerine sebebiyet vermektedir ve yapı kolaylıkla yönetmeliklerde yıkılma seviyesi olarak kabul edilen %5 görece kat ötelenmelerini aşmaktadır. Moment dayanımı düşüşü olsa da daralma etkisi azaltıldığında, yapının tepkisi çok daha kısıtlanmış ve görece kat ötelenmelerinde ciddi düşüşler oluşmaktadır. Ancak tüm sonuçlardan elde edildiği kadarıyla, moment dayanımında düşüş olmadığı durum en avantajlı yapı tepkisini sunmaktadır. Moment dayanımında düşüş olmadan, daralma az ya da çok olsun, yapının görece kat ötelenmeleri ciddi manada kısıtlanabilmektedir. Bu arada üst ya da alt limit binaların tepkisi açısından dikkati çeken önemli bir fark oluşmadığı da görülmektedir. Yapının periyodundan bağımsız olarak, yarı-rijit bağlantılarda dayanım düşüşü olmaması çok önemli bir tasarım ilkesi olarak dikkate alınması gereken husustur.

8. SONUÇLAR

8.1. Sonuç

113M223 Nolu ve “Çelik Yapılarda Yarı-Rijit Bağlantıların Doğrusal Olmayan Davranışının Modellenmesi ve Üç Boyutlu Yapısal Çözümlere Olan Etkisinin Araştırılması” başlıklı TÜBİTAK 1001 Projemiz 36 Aylık süreçte proje başvurusunda yapmayı önerdiği iş paketlerini başarıyla tamamlamıştır. Çelik yapıların analizleri için model türetimi ve geliştirilen modellerin iletilmesi sadece bir projeyle bitecek bir husus değildir; ancak proje yürütücüsü ve bursiyeler, proje kapsamında ciddi anlamda bu hususta atılım gerçekleştirmiş ve çalışmalarını çok daha ileri safhalara götürecek bir çözüm platformu ve tecrübeye ulaşımlardır. Bursiyelerden Halil Fırat ÖZEL, doktora çalışmalarının tez konusu yarı-rijit bağlantılara sahip çerçeve elemanı formülasyonunda atılım gerçekleştirmiş ve bu kapsamda doktorasını gecikme olmazsa bir yıl sonra tamamlamayı hedeflemektedir. Diğer bursiyer Zafer KARAKAŞ ise yüksek lisans tezini Şubat 2017’de tamamlayacaktır. Ayrıca lisans öğrencisi olarak proje kapsamında çalışmış olan ve şu an mezun olan Tayseer TASBAHJI ise proje kapsamında yaptığı katkılarla hem yaz stajını yapmış ve hem de çalışmalarını yıl içinde de devam ettirerek sonuç olarak bir SCI kapsamlı dergide makale sahibi olması beklenmektedir.

Projede çalışılan konuyla ilgili son olarak özet sunmak gerekirse, mevcut çelik yapıların analizlerinde bağlantı bölgelerinin modellenmesi en kritik hususlardan birini oluşturmaktadır. Pratikte bağlantı bölgeleri analizlerinde genellikle tamamen rijit (moment tipi) veya basit (kesme tipi) olmak üzere iki ayrı kategoriye ayrılmaktadır. Halbuki gerçekte hem bir miktar dönme yapan hem de bir miktar moment aktaran üçüncü bir bağlantı tipi – yarı rijit bağlantı- ile doğal olarak karşılaşmaktadır. Yarı-rijit bağlantıların çelik çerçeve sistemlerde deprem yükleri altında doğrusal olmayan analize etkisinin katılması için bu bağlantıların moment-dönme eğrilerinin çevrimsel hareketinin bilinmesi ve ayrıca çerçeve elemanlar boyunca yayılı plastisitenin de doğru olarak yakalanması gereklidir. Bazı yarı-rijit bağlantı tiplerinde ise, moment-dönme eğrisine aksel yükün ve hatta kesme kuvvetinin seviyesi de etki etmektedir. Bu tip bağlantılara örnek olarak en alt kat kolonların taban bağlantıları ve ayrıca

çapraz elemanların guse levhalarla kolon-kiriş bölgesine bağlandığı yerlerde görülmektedir. Bu bağlantılardaki doğrusal olmayan davranışın elde edilmesi kolay olmayıp bu eğrilerin yapı analizine dahil edilmesi de ayrı bir çalışma gerektirmektedir.

Bu proje kapsamında, çelik çerçeve yapı sistemlerinde karşılaşılan tüm yarı-rijit bağlantı olasılıklarının sistem analizine katılması gerçekleştirilmiştir. Performansa dayalı deprem mühendisliğinin gerekleri arasında yapılacak analizlerin çevrimsel hareketi ve doğrusal olmayan davranışı mümkün olduğunca tüm yükleme ve sınır şartları altında gerçekçi ve genel yaklaşımlarla modellenmesi gerekmektedir. Çerçeve sistemlerin analizlerinde kullanılan pek çok ticari sonlu elemanlar programları doğrusal olmayan modellemeler için yayılı değil yığılı (lumped) plastisite modelleri sunabilmektedir ve bu modellerin programdaki çalışması sırasında doğrusal olmayan statik analiz ve ayrıca zaman tanım aralığında dinamik analizlerde stabilite ve yakınsama sorunları yaşadığı bilinmektedir.

Çerçeve yapı elemanı modellemelerinde kuvvet bazlı formülasyon yarı-rijit bağlantı noktaları elemanın içinde veya ucunda olduğu her iki durum için de formülasyonda ve analizde büyük bir kolaylık sağlamakta, sistem serbestlik derecesini ciddi oranda azaltmaktadır; ayrıca bu formülasyonla eleman boyunca oluşan yayılı plastisiteyi doğru olarak yakalamada tek eleman kullanarak yüksek başarı elde edilmektedir. Çelik yapı elemanlarının tipik olarak I-kesitlerden oluşması sebebiyle, iç kuvvetler arasındaki etkileşimin bu tür kesitlerde düzgün olarak formüle edilmesi de proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yayılı plastisite davranışına ek olarak, eleman boyunca yarı-rijit bağlantılar istenilen yere istendiği miktarda eklenmiş şekilde eleman türetimi gerçekleştirilmiştir. Yarı-rijit bağlantılardaki çok boyutlu doğrusal olmayan etkileşimin yakalanabilmesi için model davranışına daralma (pinching) etkisi, hasar ve artık moment kapasitesinin varlığının gerçekçi olarak eklenmesi sağlanmıştır. Yarı-rijit bağlantı için elde edilen davranış var olan deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Çalışmada geliştirilen elemanın formülasyonu ve ayrıca doğrusal olan ve olmayan yarı-rijit bağlantı davranışını yakalamadaki başarısı sayısal olarak sunulmuştur. Geliştirilen çerçeve elemanına eklenen her bir yarı-rijit bağlantı ekstradan serbestlik derecesi katmadığı için yapısal analizin çözümünde hızlanma gerçekleşmiş ve bu durum diğer alternatif yaklaşım olan ekstra düğüm noktası eklenmesi ve doğrusal olmayan yayla yarı-rijit bağlantısının modellenmesi ve ayrıca deplasman veya kuvvet temelli yayılı plastisite eleman kullanımı opsiyonuyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar kapsamında, tutarlı kütle matrisi ve ayrıca yığılı kütle matrisi kullanımlarının da üç boyutlu sistem davranışına etkisi doğrusal olmayan dinamik analizlerde çalışılmıştır.

Projenin bir sonraki safhasında ise geliştirilen modellerin kullanımı ile çok katlı ve çok açıklıklı çelik çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan davranışında yarı-rijit bağlantıların etkisi incelenmiştir. Zaman tanım aralığında doğrusal olmayan analizler sonucunda, yarı-rijit bağlantı davranışının sistem davranışına etkisi parametrik olarak incelenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalardan varılan temel sonuçlar şöyledir:

- Doğrusal olan/olmayan davranışı yakalamada yüksek doğrulukta ve yarı-rijit bağlantıları yapı davranışına pratik bir şekilde katabilen çerçeve elemanı geliştirilmiştir. Kuvvet-bazlı formülasyon sayesinde, düğüm noktalarında artışa gerek kalmadan yarı-rijit bağlantılar modellenenmektedir. Doğrulama çalışmalarında da görüldüğü üzere, geliştirilen çerçeve elemanın tepkisi, literatürdeki çalışmalarla, deneylerle ve pek çok farklı yapı analizi programıyla örtüşebilmekte ve istenilen sonuçları yüksek doğrulukta ve pratik bir şekilde sunulabilmektedir.
- Geliştirilen çerçeve elemanı için tutarlı kütle matrisi türetimi yapılmış ve bu kapsamda yarı-rijit bağlantıların varlığını dikkate alan gerçekçi türetim elde edilmiştir. Böylece yapısal sistemlerin titreşim özellikleri yüksek doğrulukta az eleman kullanarak modellenenmektedir.
- Proje kapsamında geliştirilen çevrimsel davranışları yakalayabilen yarı-rijit bağlantı modeli ile dayanım ve rijitlik düşüşleri, daralma etkileri ve ayrıca artık dayanım davranışları modellenenmektedir. Literatürdeki pek çok farklı bağlantı modeli ile yapılan karşılaştırmada mükemmel örtüşen tepkiler elde edilebilmiştir. Ayrıca geliştirilen model proje kapsamında geliştirilen çerçeve elemanı ile de birlikte başarıyla kullanılmıştır.
- Yapıların titreşimini doğru olarak yakalayabilmek için I-kesitlerin kesme deformasyonu davranışının gerçekçi modellenmesi yapılmıştır. Farklı programlarla ve literatürdeki sonuçlarla yapılan karşılaştırmada, geliştirilen çerçeve elemanı model çok daha az eleman kullanımı ile çok daha doğru sonuçlar sunabilmektedir.

- Yarı-rijit bağlantıların yapısal sisteme davranışı açısından etkisi incelendiğinde, yarı-rijit bağlantının dayanımının korunabilmesi, bağlantının daralma davranışından çok daha kritik seviyede etki sunmaktadır.

8.2. Öneriler

Proje kapsamında geliştirilen modellerin doktora öğrencisi Halil Fırat ÖZEL'in ileriki 1-2 yıllık süreçte gerçekleştireceği çok daha detaylı üç boyutlu testlerle doğrulama çalışmalarının ve ayrıca geliştirmelerin sürdürülmesi ve doktora derecesini proje kapsamında ve devamında sürdüreceği çalışmalarla tamamlaması hedeflenmektedir. Bu kapsamda çelik kolonlarda burulma momenti altındaki kesitin rijitliğinin gerçekçi modellenmesine de çalışılmalıdır. Bu kapsamda titreşim analizleri karşılaştırmaları öncelikle yapılması gereklidir. Ayrıca hem doğrusal olan hem de olmayan davranışların da üç boyutlu yapısal sistem analizi açısından literatürde mevcut olabilecek örneklerle karşılaştırması yapılmalıdır.

Parametrik analizlerde 40 farklı deprem kaydı altında, pek çok farklı parametrenin davranışının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Analizlerin süresi ve oluşturulan veri sebebiyle sadece alçak katlı binaların incelenmesi yüksek lisans öğrencisi Zafer KARAKAŞ tarafından gerçekleştirilebilmiştir. Orta kat ve yüksek katlı yapılarda da benzer analizlerin devam ettirilmesi gereklidir. Alçak katlı yapılarda elde edilen sonuçların, kat sayısı yükseldikçe farklılaşma ihtimali bulunmaktadır.

Parametrik analizler iki boyutlu ortamda gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu ortamda analizler yürütülerek, yapıda var olan düzensizliklerin de etkisinin incelenebilmesi gereklidir. Ayrıca geliştirilen çerçeve elemanı modeliyle bu kapsamda üç boyutlu analizler yürütülerek çok daha detaylı doğrulama testleri yapılması mümkün olabilecektir.

Son olarak ve belki de en önemli husus da, yarı-rijit bağlantı model davranışlarının geliştirilmesi özellikle de kolon taban ve guse levha bölgeleri için ilerletilmelidir. Ayrıca kolon-kiriş bağlantıları için de çevrimsel davranışa etki eden bağlantılardaki hangi tipik geometrik ve malzeme davranışlarının olduğu, bunların çok daha genel geçer şekilde model geliştirilmesine katılabileceği hususunda araştırmalar ve geliştirmelerin devam ettirilmesi gerekmektedir.

Yarı-rijit bağlantı davranışı ve ayrıca çelik yapı elemanların davranışları ile ilgili model geliştirme, simülasyon testleri yapma, bilgisayar ortamında geliştirme yaparak bunları sunmak gerçekten çok fazla bilgi, tecrübe ve emek isteyen bir araştırma alanıdır. Bu çalışmaları yürütmüş biri olarak sadece teorik ve analitik ortamda kalmayarak ayrıca da deneysel çalışmalara da yönelerek, çelik yapıların ve bağlantı bölgelerinin tasarım ilkeleri hususunda çok daha ileri tecrübe sahibi olunabilmesinin bu tip çalışmaların çok daha ileri seviyelere getirilmesinde olumlu katkıları olacağını düşünüyorum.

8.3. Sonsöz

Bu proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmayla, yarı-rijit bağlantıların çelik çerçeve yapı sistemlerin doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarına katkısını sunabilmede çok önemli ilerlemeler sağlanmıştır. Ayrıca yarı-rijit bağlantıların modellenme prensibini anlama ve davranışlarını irdelemede önemli mesafeler kaydedildiği düşünülmektedir. Bu kapsamda katılan uluslararası konferanslarda da modelleme çabalarına çok önem verildiği görülmüştür ve bu kapsamda gerçekleştirilen yayınlara da literatürde çok ciddi ilgi duyulduğu anlaşılmıştır. Bu anlamda bu önemli çalışmayı 36 ay boyunca desteklemelerinden dolayı TÜBİTAK'a ve TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubuna (MAG'a) müteşekkirimiz. TÜBİTAK MAG'da çalışma sırasında sorularımızı ve problemlerimizi yanıtlayan ve proje yürütülmesi açısından bize yardımcı olan grup üyelerine ve bu projenin değerlendirmesinde değerli vaktini ve bilgisini sunan hakemlere teşekkürü bir borç biliriz.

9. REFERANSLAR

- [1] Venture, S.J., *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. Vol. FEMA-350. 2000.
- [2] Chen, W.F. and E. Yamaguchi, *Connection failure of steel moment-frame buildings during the Northridge Earthquake*. Vol. CE-STR-95-12. 1995, West Lafayette: Purdue University.
- [3] Shohara, R., Y. Sawamoto, K. Imai, H. Nakazawa, H. Narihara, and T. Fukumoto, *Strength and ductility of non-embedded reinforced concrete column base*. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007. 5(2): p. 223-234.
- [4] Chen, W.F., N. Kishi, and M. Komuro, *Semi-rigid Connections Handbook (Civil & Environmental Engineering)*, 2011.
- [5] AISC, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, 2010, American Institute of Steel Construction.
- [6] EN1993-1-8, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*, E.C.f. Standardization, Editor 2005.
- [7] Saritas, A. and O. Soydas, *Variational base and solution strategies for non-linear force-based beam finite elements*. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012. 47(3): p. 54-64.
- [8] Spacone, E., F.C. Filippou, and F.F. Taucer, *Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: Part I. Formulation*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996. 25(7): p. 711-725.
- [9] Taylor, R.L., F.C. Filippou, A. Saritas, and F. Auricchio, *A mixed finite element method for beam and frame problems*. Computational Mechanics, 2003. 31(1-2 SPEC.): p. 192-203.
- [10] Charney, F.A., H. Iyer, and P.W. Spears, *Computation of major axis shear deformations in wide flange steel girders and columns*. Journal of Constructional Steel Research, 2005. 61: p. 1525–1558.
- [11] Charney, F.A. *Sources of elastic deformation in laterally loaded steel frame and tube structures*. in *Tall Buildings and Beyond - Proceedings of 4th World Congress, Council on Tall Buildings and Urban Habitat*. 1990. Lehigh University, Bethlehem, PA, USA.
- [12] de Souza, R.M., *Force-based Finite Element for Large Displacement Inelastic Analysis of Frames*, 2000, University of California, Berkeley.

- [13] Uriz, P., F.C. Filippou, and S.A. Mahin, *Model for cyclic inelastic buckling of steel braces*. Journal of Structural Engineering, 2008. 134(4): p. 619-628.
- [14] Saritas, A. and F.C. Filippou, *Frame element for metallic shear-yielding members under cyclic loading*. Journal of Structural Engineering, 2009. 135(9): p. 1115-1123.
- [15] Saritas, A. and F.C. Filippou, *Numerical integration of a class of 3d plastic-damage concrete models and condensation of 3d stress-strain relations for use in beam finite elements*. Engineering Structures, 2009. 31(10): p. 2327-2336.
- [16] Saritas, A. and F.C. Filippou, *Inelastic axial-flexure-shear coupling in a mixed formulation beam finite element*. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2009. 44(8): p. 913-922.
- [17] Friedman, Z. and J.B. Kosmatka, *An improved two-node timoshenko beam finite element*. Computers and Structures, 1993. 47(3): p. 473-481.
- [18] Reddy, J.N., *On locking-free shear deformable beam finite elements*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1997. 149(1-4): p. 113-132.
- [19] Wackerfuß, J. and F. Gruttmann, *A nonlinear Hu-Washizu variational formulation and related finite-element implementation for spatial beams with arbitrary moderate thick cross-sections*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011. 200(17-20): p. 1671-1690.
- [20] Lui, E.M. and W.F. Chen, *Analysis and behaviour of flexibly-jointed frames*. Engineering Structures, 1986. 8(2): p. 107-118.
- [21] Sekulovic, M. and R. Salatic, *Nonlinear analysis of frames with flexible connections*. Computers and Structures, 2001. 79(11): p. 1097-1107.
- [22] Sekulovic, M., R. Salatic, and M. Nefovska, *Dynamic analysis of steel frames with flexible connections*. Computers and Structures, 2002. 80(11): p. 935-955.
- [23] Castellazzi, G., *Analysis of second-order shear-deformable beams with semi-rigid connections*. Journal of Constructional Steel Research, 2012. 79: p. 183-194.
- [24] Valipour, H.R. and M. Bradford, *An efficient compound-element for potential progressive collapse analysis of steel frames with semi-rigid connections*. Finite Elements in Analysis and Design, 2012. 60: p. 35-48.
- [25] Ramberg, W. and W.R. Osgood, *Description of stress-strain curves by three parameters*. Vol. Technical Note No. 902. 1943, Washington DC: National Advisory Committee For Aeronautics.
- [26] Azizinamini, A., *Cyclic characteristics of bolted semi-rigid steel beam to column connections*, in *Civil Engineering* 1985, University of South Carolina.

- [27] Elnashai, A.S., A.Y. Elghazouli, and F.A. Denesh-Ashtiani, *Response of Semirigid Steel Frames to Cyclic and Earthquake Loads*. Journal of Structural Engineering, 1998. 124(8): p. 857-867.
- [28] Calado, L., G. De Matteis, and R. Landolfo, *Experimental response of top and seat angle semi-rigid steel frame connections*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2000. 33(232): p. 499-510.
- [29] Komuro, M., N. Kishi, and R. Hasan, *Quasi-static loading tests on moment-rotation behavior of top- and seat-angle connections*, in *Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas 2003*: Naples, Italy.
- [30] Kukreti, A.R. and A.S. Abolmaali, *Moment-rotation hysteresis behavior of top and seat angle steel frame connections*. Journal of Structural Engineering, 1999. 125(8): p. 810-820.
- [31] Hartman, J., *Cyclic performance of flush end-plate connection*, in *Civil Engineering 1999*, University of Oklahoma.
- [32] Abolmaali, A., A.R. Kukreti, and H. Razavi, *Hysteresis behavior of semi-rigid double web angle steel connections*. Journal of Constructional Steel Research, 2003. 59(8): p. 1057-1082.
- [33] Frye, M.J. and G.A. Morris, *Analysis of flexibly connected steel frames*. Canadian Journal of Civil Engineering, 1975. 2(3): p. 280-291.
- [34] Krishnamurthy, N., H.T. Huang, P.K. Jeffrey, and L.K. Avery, *Analytical M- θ curves for end-plate connections*. Journal of Structural Division ASCE, 1979. 105: p. 133–145.
- [35] Kishi, N., W.F. Chen, R. Hasan, and K.G. Matsuoka, *Design aid of semi-rigid connections for frame analysis*. Engineering Journal, AISC, 1993(3rd Quarter): p. 90-107.
- [36] Faella, C., V. Piluso, and G. Rizzano, *Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design, and Software*, 1999: CRC Press.
- [37] DeWolf, J.T. and E.F. Sarisley, *Column Base Plates with Axial Loads and Moments*. Journal of the Structural Division, ASCE, 1980. 106(Nov.): p. 2167-2184.
- [38] Picard, A. and D. Beaulieu, *Behaviour of a simple column base connection*. Canadian Journal of Civil Engineering, 1984. 12: p. 126-136.
- [39] Thambiratnam, D.P. and P. Paramasivam, *Base Plates Under Axial Loads and Moments*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1986. 112(5): p. 1166-1181.
- [40] Astaneh, A., G. Bergsma, and S. J.H., *Behavior and Design of Base Plates for Gravity, Wind and Seismic Loads*, in *Proceedings of the National Steel Construction Conference, AISC 1992*: Las Vegas.

- [41] Gomez, I., A. Kanvinde, and G. Deierlein, *Exposed column base connections subjected to axial compression and flexure*, 2010: AISC.
- [42] Latour, M., V. Piluso, and G. Rizzano, *Column-base plate joints under monotonic loads: Theoretical and Experimental Analysis*, in *7th International Workshop on Connections in Steel Structures 2012*: Timișoara.
- [43] Stamatopoulos, G.N. and J.C. Ermopoulos, *Interaction curves for column base-plate connections*. Journal of Constructional Steel Research, 1997. 44(1-2): p. 69-89.
- [44] Ermopoulos, J.C. and G.N. Stamatopoulos, *Analytical modelling of column-base plates under cyclic loading*. Journal of Constructional Steel Research, 1996. 40(3): p. 225-238.
- [45] Chan, S.L., H.Y. Huang, and L.X. Fang, *Advanced Analysis of Imperfect Portal Frames with Semirigid Base Connections*. Journal of Engineering Mechanics, 2005. 131(6): p. 633-640.
- [46] Whitmore, R.E., *Experimental investigation of stresses in gusset plates*. Engineering Experiment Station. Vol. Bulletin No.16. 1952: University of Tennessee.
- [47] Lehman, D.E., C.W. Roeder, D. Herman, S. Johnson, and B. Kotulka, *Improved Seismic Performance of Gusset Plate Connections*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2008. 134(6): p. 890-901.
- [48] Bjorhovde, R. and S.K. Chakrabarti, *Tests of full size gusset plate connections*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985. 111(3): p. 667-684.
- [49] Rabinovitch, J.S. and J.J. Roger Cheng, *Cyclic Behavior of Steel Gusset Plate Connections*, 1993: University of Alberta.
- [50] Yama, M.C.H. and J.J.R. Cheng, *Behavior and design of gusset plate connections in compression*. Journal of Constructional Steel Research, 2002. 58: p. 1143-1159.
- [51] Walbridge, S.S., G.Y. Grondin, and J.J.R. Cheng, *Gusset plate connections under monotonic and cyclic loading*. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005. 32: p. 981-995.
- [52] Chen, S.J. and C.C. Chang, *Experimental study of low yield point steel gusset plate connections*. Thin-Walled Structures, 2012. 57: p. 62-69.
- [53] Roeder, C.W., D.E. Lehman, K. Clark, J. Powell, J.H. Yoo, K.C. Tsai, C.H. Lin, and C.H. Wei, *Influence of gusset plate connections and braces on the seismic performance of X-braced frames*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011. 40: p. 355-374.
- [54] Astaneh, A., S.C. Goel, and R.D. Hanson, *Cyclic out-of-plane buckling of double angle bracing*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985. 111(5): p. 1135-1153.
- [55] Yang, C.S., R. Leon, and R. DesRoches, *Pushover response of a braced frame with suspended zipper struts*. Engineering Structures, 2008. 30(4): p. 1092-1100.

- [56] Washizu, K., *Variational methods in elasticity and plasticity*, 1982, Oxford: Pergamon.
- [57] Taylor, R.L., F.C. Filippou, A. Saritas, and F. Auricchio, *Mixed finite element method for beam and frame problems*. Computational Mechanics, 2003. 31(1-2): p. 192-203.
- [58] Barr, A.D.S., *An Extension of the Hu-Washizu variational principle in linear elasticity for dynamic problems*. Journal of Applied Mechanics, 1966. June: p. 465.
- [59] Charney, F.A., H. Iyer, and P.W. Spears, *Computation of major axis shear deformations in wide flange steel girders and columns*. Journal of Constructional Steel Research 2005. 61: p. 1525–1558.
- [60] Soydas, O. and A. Saritas, *Free vibration characteristics of a 3d mixed formulation beam element with force-based consistent mass matrix*. Journal of Vibration and Control, 2016. In Press.
- [61] Filippou, F.C., *FEDEASLab Finite Elements in Design, Evaluation and Analysis of Structures*, 2004.
- [62] Crisfield, M.A. and G. Cole, *Co-rotational beam elements for two- and three-dimensional structures*, in *Discretisation Methods in Structural mechanics*, a.H.M. Kuhn G, Editor 1990, Springer-verlag: Berlin.
- [63] Uslu, C.H., *3-D FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SEMI-RIGID STEEL CONNECTIONS*, 2009, Middle East Technical University: Ankara.
- [64] Chan, S.L. and P.P.T. Chui, *Non-Linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections*, 2000: Elsevier Science.
- [65] Diaz, C., P. Marti, M. Victoria, and O.M. Querin, *Review on the modelling of joint behaviour in steel frames*. Journal of Constructional Steel Research, 2011. 67: p. 741-758.
- [66] Richard, R.M. and B.J. Abbott, *Versatile elasto-plastic stress-strain formula*. Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE, 1975. 101(EM4): p. 511-515.
- [67] Nogueiro, P., L.S. da Silva, R. Bento, and R. Simoes, *Numerical implementation and calibration of a hysteretic model with pinching for the cyclic response of steel joints*. Advanced steel construction, 2007. 3(1): p. 459-484.
- [68] Abolmaali, A., *Nonlinear Dynamic Finite Element Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Joints*, 1999, University of Oklahoma.
- [69] Sucuoglu, H. and A. Erberik, *Energy-based hysteresis and damage models for deteriorating systems*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004. 33: p. 69-88.

- [70] Ibarra, L.F., R.A. Medina, and H. Krawinkler, *Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005. 34: p. 1489-1511.
- [71] Bernuzzi, C., R. Zandonini, and P. Zanon, *Experimental analysis and modelling of semi-rigid steel joints under cyclic reversal loading*. Journal of Constructional Steel Research, 1996. 38(2): p. 95-123.
- [72] McKenna, F., G.L. Fenves, and F.C. Filippou, *OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation*, 1999: Berkeley.
- [73] Vatansever, C. and N. Yardimci, *Cyclic behavior and numerical modelling of a semi-rigid frame*. Steel Construction, 2010. 3(3): p. 128-133.
- [74] Vogel, U., *Calibrating frames*. Stahlbau, 1985. 54: p. 295–301.
- [75] Nguyen, P. and S. Kim, *An advanced analysis method for three-dimensional steel frames with semi-rigid connections*. Finite Elements in Analysis and Design, 2014. 80: p. 23-32.
- [76] Teh, L.H. and M.J. Clarke, *Plastic-zone analysis of 3d steel frames using beam elements*. Journal of Structural Engineering, 1999. 125: p. 1328-1337.
- [77] Stelmack, T.W., *Analytical and Experimental Response of Flexibly-Connected Steel Frames*, in *Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering* 1982, University of Colorado at Boulder.
- [78] Chan, S.L. and P.P.T. Chui, *Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections*, 2000, Amsterdam: Elsevier.
- [79] Lui, E.M. and W.F. Chen, *Analysis and behavior of flexibly-jointed frames*. Engineering Structures, 1986. 8: p. 107-118.
- [80] Ozcelik, Y., A. Saritas, and P.M. Clayton, *Comparison of chevron and suspended-zipper braced steel frames*. Journal of Constructional Steel Research, 2016. 119: p. 169-175.
- [81] Gupta, A. and H. Krawinkler, *Seismic Demands for Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame Structures*," Vol. Technical Report 132. 1999: The John A. Blume Earthquake Engineering Research Center, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
- [82] Block, F.M., I.W. Burgess, J.B. Davison, and R.J. Plank, *The development of a component-based connection element for endplate connections in fire*. Fire Safety Journal, 2007. 42(6): p. 498-506.
- [83] Galvao, A.S., A.R.D. Silva, R.A.M. Silveira, and P.B. Goncalves, *Nonlinear dynamic behavior and instability of slender frames with semi-rigid connections*. International Journal of Mechanical Sciences, 2010. 52: p. 1547-1562.

- [84] Da Silva, J.G.S., L.R.O. De Lima, P.C.G. Da S. Vellasco, S.A.L. De Andrade, and R.A. De Castro, *Nonlinear dynamic analysis of steel portal frames with semi-rigid connections*. Engineering Structures, 2008. 30: p. 2566-2579.
- [85] Al-Aasam, H.S. and P. Mandal, *Simplified procedure to calculate by hand the natural periods of semirigid steel frames*. Journal of Structural Engineering, 2013. 139: p. 1082-1087.
- [86] Sophianopoulos, D.S., *The effect of joint flexibility on the free elastic vibration characteristics of steel plane frames*. Journal of Constructional Steel Research, 2003. 59: p. 995-1008.
- [87] Cowper, G.R., *Shear Coefficient in Timoshenkos Beam Theory*. Journal of Applied Mechanics, 1966. 33(2): p. 335-340.
- [88] Charney, F.A., H. Iyer, and P.W. Spears, *Computation of major axis shear deformations in wide flange steel girders and columns*. Journal of Constructional Steel Research, 2005. 61: p. 1525–1558.
- [89] Lee, K. and D.A. Foutch, *Performance Prediction and Evaluation of Steel Special Moment Frames for Seismic Loads*. Vol. SAC/BD-00/25. 2000: SAC Joint Venture,.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No:113M223
Proje Başlığı: Çelik Yapılarda Yarı-Rijit Bağlantıların Doğrusal Olmayan Davranışının Modellenmesi ve Üç Boyutlu Yapısal Çözümlere Olan Etkisinin Araştırılması
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Doç.Dr. Afşin SARITAŞ (Yürütücü)
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Dumlupınar Bulvarı No:1 İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06800 Çankaya, ANKARA
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: TÜBİTAK, Tunus Caddesi No:80, 06100 Kavaklıdere, ANKARA
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 15 Eylül 2013 – 15 Eylül 2016
Öz (en çok 70 kelime) Yarı-rijit bağlantılı çelik çerçeve yapılarda, doğrusal/doğrusal olmayan analizler yürütülebilmesi için çerçeve elemanı geliştirilmiştir. Geliştirilen elemanla kolon ve kirişler boyunca ve derinliğinde oluşan yayılı plastisite yakalanabilmekte, ek düğüm noktasına gerek kalmadan yarı-rijit bağlantıların davranışı modellenabilmektedir. Bağlantılar için pek çok farklı bağlantı davranışı modelleri dikkate alınmış ve ayrıca çevrimsel hareket sırasındaki özel durumlar da gerçekçi olarak modellenebilmiştir. Geliştirilen çerçeve elemanı ve ayrıca bağlantı modeli davranışları, deneysel ve analitik sonuçlar ile başarıyla karşılaştırılmıştır.
Anahtar Kelimeler: Çelik çerçeve yapılar; yarı-rijit bağlantı; sonlu eleman yöntemi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler: A1. A. Saritas, A. Koseoglu; "Distributed Inelasticity Planar Frame Element with Localized Semi-Rigid Connections for Nonlinear Analysis of Steel Structures", International Journal of Mechanical Sciences Vol. 96-97, pp.216-231, 2015 A2. H.F. Ozel, A. Saritas, T. Tasbahji; "Consistent Matrices for Steel Framed Structures with Semi-Rigid Connections Accounting for Shear Deformation and Rotary Inertia Effects",

Engineering Structures, (Düzeltilmiş makale Kasım 2016 başında gönderildi), 2017

B. Ulusal ve uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve basılan bildiriler:

B1. H.F. Ozel, A.Saritas;" An Accurate modeling approach for calculating the vibration characteristics of steel framed structures with semi-rigid connections", 8th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas STESSA 2015, Sanghay, ÇİN, 1-3 Temmuz, 2015

B2. A.Saritas, A. Koseoglu, H.F. Ozel; "Modeling of the nonlinear behavior of steel framed structures with semi-rigid connections", 8th International Conference on Advances in Steel Structures ICASS 2015, Lizbon, PORTEKİZ, 21-24 Temmuz, 2015

B3. H.F. Özel, A. Saritaş, T. Tasbahji; "Yarı-rijit bağlantılı çelik çerçeve yapıların titreşim özelliklerinin modellenmesi", 3.Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İzmir, 14-16 Ekim 2015

B4. H.F. Ozel, T. Tasbahji, A. Saritas; "Vibration characteristics of various wide flange steel beams and columns", 6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, Kandy, SRİ LANKA, 11-13 Aralık 2015

B5. H.F. Özel, A. Saritaş, T. Tasbahji; "Finite element model with semi-rigid connections for vibration assessment of steel moment resisting framed structures", The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Timişora, ROMANYA, 30 Mayıs - 01 Temmuz 2016

B6. H.F. Ozel, A. Saritas, Z. Karakas; "Three dimensional frame element formulation for nonlinear analysis of semi-rigid steel structures", 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, Turkey, 21-23 Eylül, 2016

B7. Z. Karakas, A. Saritas; "Influence of Hysteretic Behavior of Semi-Rigid Connections to the Analysis of Low-Rise Steel Framed Structures", 2nd International Conference on Steel and Structure, Tahran, İRAN, 21-22 Şubat, 2017 (Özet gönderildi)