

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KİRİŞ ENKESİTİ YÜKSEKLİĞİNDE ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON  
BİRLEŞİMLERİNİN ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDA DOĞRUSAL  
OLMAYAN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alper DEMİR**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2025**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KİRİŞ ENKESİTİ YÜKSEKLİĞİNDE ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON  
BİRLEŞİMLERİNİN ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDA DOĞRUSAL  
OLMAYAN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alper DEMİR  
(501221004)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER**

**HAZİRAN 2025**



**ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL**

**NONLINEAR BEHAVIOUR OF FLUSH END-PLATE BEAM-TO-COLUMN  
CONNECTIONS UNDER CYCLIC LOADING**



**M.Sc. Thesis**

**Alper DEMİR  
(501221004)**

**Department of Civil Engineering**

**Structural Engineering Programme**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Cüneyt VATANSEVER**

**JUNE 2025**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501221004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alper DEMİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KİRİŞ ENKESİTİ YÜKSEKLİĞİNDE ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Dr. Öğr. Üyesi Haluk Emre ALÇİÇEK** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Edip SEÇKİN** .....  
İstanbul Kültür Üniversitesi

**Teslim Tarihi**            : 21 Mayıs 2025  
**Savunma Tarihi**        : 19 Haziran 2025





*Sevgili aileme,*



## ÖNSÖZ

Eğitim hayatım ve mesleki kariyerimin yanı sıra tez çalışmamın başından sonuna kadar değerli destek, bilgi ve sabrını benimle paylaşan tez danışmanım sayın Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER'e, tez çalışmam süresince bilgi ve görüşlerini benimle paylaşan Dr. Öğr. Üyesi Haluk Emre ALÇİÇEK'e ve üzerimde emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte bana gösterdikleri her türlü destek için aileme sonsuz teşekkür ederim.

Haziran 2025

Alper DEMİR  
(İnşaat Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                           |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖNSÖZ .....                                                                               | ix    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                         | xi    |
| KISALTMALAR .....                                                                         | xiii  |
| SEMBOLLER .....                                                                           | xv    |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                                      | xix   |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                        | xxi   |
| ÖZET .....                                                                                | xxiii |
| SUMMARY .....                                                                             | xxvii |
| 1. GİRİŞ .....                                                                            | 1     |
| 1.1 Tezin Amacı .....                                                                     | 4     |
| 1.2 Literatür Araştırması .....                                                           | 5     |
| 2. KİRİŞ ENKESİTİ YÜKSEKLİĞİNDE ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON<br>BİRLEŞİMLERİNİN TASARIMI..... | 9     |
| 2.1 Kiriş Enkesiti Yüksekliğinde Alın Levhali Birleşimlerin Tasarım Esasları ....         | 10    |
| 2.2 2-Bulonlu Kiriş-Kolon Birleşiminin (FEP-2B) Tasarımı.....                             | 13    |
| 2.3 4-Bulonlu Kiriş-Kolon Birleşiminin (FEP-4B) Tasarımı.....                             | 19    |
| 3. BİRLEŞİMLERİN BAŞLANGIÇ RİJİTLİKLERİNİN VE EĞİLME<br>DAYANIMLARININ HESABI .....       | 25    |
| 3.1 Birleşimlerin Başlangıç Rijitlikleri .....                                            | 25    |
| 3.1.1 F1-3/4-3/8-16 numunesinin başlangıç rijitliği.....                                  | 27    |
| 3.1.2 FEP-2B birleşiminin başlangıç rijitliği .....                                       | 31    |
| 3.1.3 FEP-4B birleşiminin başlangıç rijitliği .....                                       | 36    |
| 3.2 Birleşimlerin Eğilme Dayanımlarının Hesabı .....                                      | 41    |
| 3.2.1 F1-3/4-3/8-16 birleşiminin eğilme momenti dayanımı .....                            | 43    |
| 3.2.2 FEP-2B birleşiminin eğilme momenti dayanımı.....                                    | 47    |
| 3.2.3 FEP-4B birleşiminin eğilme momenti dayanımı.....                                    | 51    |
| 4. BİRLEŞİMLERİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ .....                                            | 59    |
| 4.1 Doğrulama Modelinin Oluşturulması.....                                                | 59    |
| 4.1.1 Esas alınan deneysel çalışma.....                                                   | 59    |
| 4.1.2 Birleşimin sonlu eleman modeli.....                                                 | 60    |
| 4.1.3 Malzeme modeli .....                                                                | 61    |
| 4.1.4 Analiz adımları .....                                                               | 65    |
| 4.1.5 Yüzey etkileşimleri.....                                                            | 65    |
| 4.1.6 Eleman özellikleri .....                                                            | 66    |
| 4.1.7 Sonlu eleman ağı .....                                                              | 67    |
| 4.1.8 Çevrimsel yükleme protokolü .....                                                   | 68    |
| 4.1.9 Doğrulama modelinin sonlu eleman analizi sonuçları .....                            | 69    |
| 4.2 Tasarlanan Birleşimlerin Sonlu Eleman Analizleri.....                                 | 70    |
| 4.2.1 Birleşimlere ait sonlu eleman modelleri.....                                        | 70    |
| 4.2.2 Malzeme modeli .....                                                                | 71    |

|                                                                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.3 Analiz adımları .....                                                                                                  | 74         |
| 4.2.4 Yüzey etkileşimleri.....                                                                                               | 74         |
| 4.2.5 Eleman özellikleri.....                                                                                                | 75         |
| 4.2.6 Sonlu eleman ağı .....                                                                                                 | 75         |
| 4.2.7 Çevrimsel yükleme protokolü .....                                                                                      | 76         |
| 4.2.8 Sonlu eleman analizi sonuçları.....                                                                                    | 76         |
| 4.3 Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....                                                                               | 79         |
| <b>5. KİRİŞ ENKESİTİ YÜKSEKLİĞİNDE ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN YAPI DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ .....</b> | <b>81</b>  |
| 5.1 Model Yapı.....                                                                                                          | 81         |
| 5.2 Birleşimlerin Histeretik Davranış Modelinin Oluşturulması .....                                                          | 84         |
| 5.3 Yapının Eşdeğer Taşıyıcı Çerçeve Modeline Entegrasyonu .....                                                             | 86         |
| 5.4 Modal Analizler.....                                                                                                     | 91         |
| 5.5 Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizleri .....                                                                            | 92         |
| 5.6 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizler.....                                                                     | 93         |
| 5.7 Kırılma Eğrilerinin Elde Edilmesi.....                                                                                   | 103        |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                                                                             | <b>109</b> |
| 6.1 Analiz Sonuçlarının İrdelenmesi .....                                                                                    | 110        |
| 6.2 Çalışmanın Genişletilmesi İçin Öneriler .....                                                                            | 110        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                                        | <b>113</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                                         | <b>115</b> |

## KISALTMALAR

|                 |                                                                      |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>ACMR</b>     | : Adjusted Collapse Margin Ratio                                     |
| <b>AISC</b>     | : American Institution of Steel Construction                         |
| <b>CMR</b>      | : Collapse Margin Ratio                                              |
| <b>ÇYTHYE</b>   | : Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik |
| <b>DTS</b>      | : Deprem Tasarım Sınıfı                                              |
| <b>EA</b>       | : Eksenel Rijitlik                                                   |
| <b>EI</b>       | : Eğilme Rijitliği                                                   |
| <b>EN</b>       | : Eurocode Norm                                                      |
| <b>FEM</b>      | : Finite Element Model                                               |
| <b>FEMA</b>     | : Federal Emergency Management Agency                                |
| <b>GF</b>       | : Gravity Frame                                                      |
| <b>OpenSees</b> | : Open System for Earthquake Engineering Simulation                  |
| <b>PEEQ</b>     | : Plastic Equivalent Strain                                          |
| <b>PEER</b>     | : Pacific Earthquake Engineering Research Center                     |
| <b>SDOF</b>     | : Single Degree of Freedom                                           |
| <b>TBDY</b>     | : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği                                    |
| <b>YDKT</b>     | : Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım                             |



## SEMBOLLER

|                                     |                                                                                                                           |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>a</b>                            | : Bulon merkezi ile kaldırma kuvveti arasındaki mesafe                                                                    |
| <b>a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub></b> | : Kütle ve rijitlik ile orantılı sönüm katsayıları                                                                        |
| <b>A<sub>b</sub></b>                | : Bulon alanı                                                                                                             |
| <b>A<sub>thr</sub></b>              | : Dış açılmış bulon gövdesi alanı                                                                                         |
| <b>A<sub>wc</sub></b>               | : Kolon gövdesi kesme alanı                                                                                               |
| <b>b<sub>p</sub></b>                | : Alın levhası genişliği                                                                                                  |
| <b>b<sub>bf</sub></b>               | : Kiriş başlık genişliği                                                                                                  |
| <b>c</b>                            | : Sönüm matrisi                                                                                                           |
| <b>C<sub>pr</sub></b>               | : Pekleşme vb. durumları dikkate alan ve olası maksimum eğilme momenti dayanımının hesaplanmasında kullanılan bir katsayı |
| <b>C<sub>t</sub></b>                | : Ampirik doğal titreşim periyodu hesabında kullanılan katsayı                                                            |
| <b>d</b>                            | : Kiriş enkesit yüksekliği                                                                                                |
| <b>d<sub>b</sub></b>                | : Bulon çapı                                                                                                              |
| <b>d<sub>c</sub></b>                | : Kolon enkesit yüksekliği                                                                                                |
| <b>d<sub>h</sub></b>                | : Bulon deliği çapı                                                                                                       |
| <b>D</b>                            | : Dayanım fazlalığı katsayısı                                                                                             |
| <b>DD-1</b>                         | : 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi                            |
| <b>E</b>                            | : Elastisite modülü                                                                                                       |
| <b>F<sub>nt</sub></b>               | : Karakteristik bulon çekme gerilmesi dayanımı                                                                            |
| <b>F<sub>u</sub></b>                | : Kopma gerilmesi                                                                                                         |
| <b>F<sub>ub</sub></b>               | : Bulon malzemesi kopma gerilmesi                                                                                         |
| <b>F<sub>y</sub></b>                | : Akma gerilmesi                                                                                                          |
| <b>F<sub>yb</sub></b>               | : Bulon malzemesi akma gerilmesi                                                                                          |
| <b>g</b>                            | : Blonlar arası yatay mesafe                                                                                              |
| <b>G</b>                            | : Sabit yük                                                                                                               |
| <b>h<sub>1</sub></b>                | : Çekme kuvveti altındaki birinci bulon sırası için moment kolu                                                           |
| <b>h<sub>2</sub></b>                | : Çekme kuvveti altındaki ikinci bulon sırası için moment kolu                                                            |
| <b>h<sub>t</sub></b>                | : Eşdeğer bulon grubu moment kolu mesafesi                                                                                |
| <b>H<sub>n</sub></b>                | : Binanın bodrum katından itibaren toplam yüksekliği                                                                      |

|                                         |                                                                                                               |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>I</b>                                | : Bina önem katsayısı                                                                                         |
| <b>I<sub>b</sub></b>                    | : Kiriş enkesitinin atalet momenti                                                                            |
| <b>k</b>                                | : Rijitlik matrisi                                                                                            |
| <b>K<sub>i</sub><sup>*</sup></b>        | : Bulon sırasının başlangıç rijitliği                                                                         |
| <b>K<sub>t</sub></b>                    | : Bulon grubunun eşdeğer toplam rijitliği                                                                     |
| <b>l<sub>h</sub></b>                    | : Plastik mafsallın kolon yüzüne uzaklığı                                                                     |
| <b>l<sub>n</sub></b>                    | : Kiriş uçlarında plastik mafsallar arası mesafe                                                              |
| <b>m</b>                                | : Kütle matrisi                                                                                               |
| <b>M<sub>pr</sub></b>                   | : Kirişte oluşacak plastik mafsalda meydana gelen olası eğilme momenti                                        |
| <b>M<sub>q</sub></b>                    | : Bulon dayanımına göre hesaplanan birleşim eğilme dayanımı                                                   |
| <b>n<sub>i</sub></b>                    | : Aynı yatay sırada bulunan bulon sayısı                                                                      |
| <b>p</b>                                | : Bulonlar arasındaki düşey mesafe                                                                            |
| <b>p<sub>b</sub></b>                    | : Bitişik bulonların eksenleri arasındaki mesafe                                                              |
| <b>p<sub>f</sub></b>                    | : Kiriş çekme başlığına yakın bulon eksenini ile kiriş başlığı dış yüzeyi arasındaki mesafe                   |
| <b>P<sub>qi</sub></b>                   | : Kaldırma kuvveti etkisine göre belirlenen bulon çekme kuvveti                                               |
| <b>P<sub>GF</sub></b>                   | : Eşdeğer tek açıklıklı çerçeve kolonlarına etki eden noktasal düşey yük                                      |
| <b>P<sub>MF</sub></b>                   | : Eşdeğer moment aktaran çerçeve kolonlarına etki eden noktasal düşey yük                                     |
| <b>r<sub>c</sub></b>                    | : Kolon profili köşe yarıçapı                                                                                 |
| <b>R<sub>y</sub></b>                    | : Olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı                                                |
| <b>Q</b>                                | : Hareketli yük                                                                                               |
| <b>Q<sub>max</sub></b>                  | : Bulonlara etki eden maksimum kaldırma kuvveti                                                               |
| <b>S<sub>a</sub></b>                    | : Spektral ivme                                                                                               |
| <b>S<sub>j,ini</sub></b>                | : Birleşim başlangıç rijitliği                                                                                |
| <b>S<sub>a</sub>(T<sub>1</sub>, 5%)</b> | : %5 sönüm altında tek serbestlik dereceli (SDOF) sistemin 1. mod periyoduna karşı gelen spektral ivme değeri |
| <b>S<sub>CT</sub></b>                   | : Medyan (ortanca) göçme kapasitesi (ivme cinsinden)                                                          |
| <b>S<sub>DS</sub></b>                   | : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı                                                                |
| <b>S<sub>D1</sub></b>                   | : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı                                                     |
| <b>S<sub>MT</sub></b>                   | : Göz önüne alınan en büyük deprem                                                                            |
| <b>t<sub>bf</sub></b>                   | : Kiriş başlık kalınlığı                                                                                      |
| <b>t<sub>bw</sub></b>                   | : Kiriş gövde kalınlığı                                                                                       |
| <b>t<sub>cf</sub></b>                   | : Kolon başlık kalınlığı                                                                                      |
| <b>t<sub>cw</sub></b>                   | : Kolon gövde kalınlığı                                                                                       |

|                   |                                                                                       |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $t_p$             | : Alın levhası kalınlığı                                                              |
| $t_{p,reqd}$      | : Gerekli alın levhası kalınlığı                                                      |
| $T_b$             | : Bulon önçekme kuvveti                                                               |
| $T_{pA}$          | : Ampirik formül kullanılarak hesaplanan yapının hakim titreşim periyodu              |
| $V_{maks}$        | : Maksimum taban kesme kuvveti                                                        |
| $V_{des}$         | : Tasarım deprem yükü                                                                 |
| $w$               | : Etkin T-kesit genişliği                                                             |
| $W_p$             | : Plastik mukavemet momenti                                                           |
| $Y_p$             | : Akma çizgisi parametresi                                                            |
| $\beta$           | : Kesme kuvveti etkisinin dayanıma etkisinin göz önüne alınmasında kullanılan katsayı |
| $\beta_{DR}$      | : Tasarım gerekliliklerine bağlı sistem belirsizliği                                  |
| $\beta_{MDL}$     | : Yapı modellemesine bağlı sistem belirsizliği                                        |
| $\beta_{RTR}$     | : Deprem kayıtlarına bağlı sistem belirsizliği                                        |
| $\beta_{TD}$      | : Deneysel veriye bağlı sistem belirsizliği                                           |
| $\beta_{TOT}$     | : Yapı modelinin toplam belirsizliğini temsil eden terim                              |
| $\epsilon_{eng}$  | : Mühendislik şekildeğiştirme                                                         |
| $\epsilon_{true}$ | : Gerçek şekildeğiştirme                                                              |
| $\epsilon_u$      | : Kopma şekildeğiştirme                                                               |
| $\epsilon_y$      | : Akma şekildeğiştirme                                                                |
| $\theta$          | : Göreli kat ötelemesi açısı                                                          |
| $\mu_T$           | : Periyoda bağlı süneklik                                                             |
| $\phi$            | : Dayanım katsayısı                                                                   |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 2.1 : Kiriş ve kolon profillerinin enkesit özellikleri. ....                                     | 14  |
| Çizelge 2.2 : 2-Bulonlu birleşim tasarımında kullanılacak parametreler (Murray ve Eatherton, 2023). .... | 14  |
| Çizelge 2.3 : 4-Bulonlu birleşim tasarımında kullanılacak parametreler (Murray ve Eatherton, 2023). .... | 20  |
| Çizelge 3.1 : Tekil bulon sırası etkin genişliği. ....                                                   | 41  |
| Çizelge 3.2 : Grup halindeki bulonlar için etkin genişlikler. ....                                       | 42  |
| Çizelge 4.1 : Deney numunesine ait malzeme özellikleri. ....                                             | 61  |
| Çizelge 4.2 : Alın levhası malzemesine ait gerilme-şekildeğiştirme değerleri. ....                       | 63  |
| Çizelge 4.3 : A325 bulonlara ait plastik gerilme-şekildeğiştirme değerleri. ....                         | 64  |
| Çizelge 4.4 : Deneyde uygulanan yükleme protokolü. ....                                                  | 68  |
| Çizelge 4.5 : S275 için kullanılan gerilme-şekildeğiştirme değerleri. ....                               | 72  |
| Çizelge 4.6 : 10.9 bulonlar için kullanılan gerilme-şekildeğiştirme değerleri. ....                      | 73  |
| Çizelge 4.7 : Birleşimlerin moment kapasiteleri. ....                                                    | 79  |
| Çizelge 4.8 : Birleşimlerin başlangıç rijitlikleri. ....                                                 | 79  |
| Çizelge 5.1 : Histeretik davranış modellerine ait parametreler. ....                                     | 84  |
| Çizelge 5.2 : Eşdeğer çerçeve kolonlarına etki eden düşey yükler. ....                                   | 88  |
| Çizelge 5.3 : Modal analiz sonuçları. ....                                                               | 91  |
| Çizelge 5.4 : Doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçları. ....                                       | 92  |
| Çizelge 5.5 : Seçilen deprem kayıtlarına ait bilgiler. ....                                              | 95  |
| Çizelge 5.6 : Periyoda bağlı sünekliğin hesaplanmasında kullanılan değerler. ....                        | 105 |
| Çizelge 5.7 : Göçmeye olan orantısal uzaklığın hesabında kullanılan değerler. ....                       | 107 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 : Kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşim örnekleri (Murray ve Eatherton, 2023). ....            | 2  |
| Şekil 1.2 : Birleşimlerin dayanım bakımından sınıflandırılması. ....                                         | 3  |
| Şekil 1.3 : Birleşimlerin başlangıç rijitliği bakımından sınıflandırılması. ....                             | 4  |
| Şekil 2.1 : Alın levhalı birleşim mekanizmaları. ....                                                        | 10 |
| Şekil 2.2 : Alın levhası akma çizgilerinin geometrik parametreleri. ....                                     | 12 |
| Şekil 2.3 : FEP-2B birleşim detayı. ....                                                                     | 13 |
| Şekil 2.4 : FEP-4B birleşim detayı. ....                                                                     | 19 |
| Şekil 3.1 : Alın levhalı birleşimlerin mekanik modeli. ....                                                  | 25 |
| Şekil 3.2 : Bileşen yönteminde ele alınan yay elemanlar. ....                                                | 26 |
| Şekil 3.3 : Deneyde kullanılan birleşim detayı. ....                                                         | 27 |
| Şekil 3.4 : Kiriş-kolon-alın levhası birleşiminde geometrik parametreler. ....                               | 28 |
| Şekil 3.5 : Dairesel ve dairese olmayan deformasyon şekilleri. ....                                          | 41 |
| Şekil 3.6 : $\alpha$ katsayısı için kullanılan eğri (EN 1993-1-8, 2005). ....                                | 41 |
| Şekil 3.7 : Bulon grubunun dairese ve dairese olmayan deformasyon şekilleri. ....                            | 42 |
| Şekil 4.1 : Deney düzeneği. ....                                                                             | 60 |
| Şekil 4.2 : Deney düzeneğine ait fotoğraf. ....                                                              | 60 |
| Şekil 4.3 : F1-3/4-3/8-16 birleşimine ait sonlu eleman modeli. ....                                          | 61 |
| Şekil 4.4 : Yapı çeliğine ait malzeme gerilme-şekildeğiştirme modeli (Baei ve diğ, 2012). ....               | 62 |
| Şekil 4.5 : Alın levhası malzemesine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrisi. ....                                | 63 |
| Şekil 4.6 : Bulonlara ait malzeme gerilme-şekildeğiştirme modeli (Baei ve diğ, 2012). ....                   | 64 |
| Şekil 4.7 : A325 bulon malzemesine ait plastik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi. ....                          | 65 |
| Şekil 4.8 : Analiz adımları. ....                                                                            | 65 |
| Şekil 4.9 : Bulon delikleri ile bulonların gövdeleri arası yüzey etkileşimleri. ....                         | 66 |
| Şekil 4.10 : C3D8R 8-nodlu 3-boyutlu katı sonlu eleman. ....                                                 | 67 |
| Şekil 4.11 : F1-3/4-3/8-16 birleşimine ait modelin sonlu eleman ağı. ....                                    | 67 |
| Şekil 4.12 : ATC-24 (1992) çevrimsel yükleme protokolü. ....                                                 | 68 |
| Şekil 4.13 : F1-3/4-3/8-16 birleşiminin deney ve sonlu eleman analizi sonuçları. ...                         | 69 |
| Şekil 4.14 : F1-3/4-3/8-16 birleşiminin sonlu eleman analizi sonucu elde edilen moment-eğrilik grafiği. .... | 70 |
| Şekil 4.15 : FEP-4B birleşimine ait sonlu eleman modeli. ....                                                | 71 |
| Şekil 4.16 : S275 yapı çeliğine ait plastik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi. ....                             | 72 |
| Şekil 4.17 : 10.9 sınıfı bulon malzemesine ait plastik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi. ....                  | 73 |
| Şekil 4.18 : Bulon delikleri ile bulonlar arası yüzey etkileşimleri. ....                                    | 74 |
| Şekil 4.19 : Bulon ve alın levhalarına ait sonlu eleman ağı. ....                                            | 75 |
| Şekil 4.20 : FEP-4B birleşimine ait sonlu eleman ağı. ....                                                   | 75 |
| Şekil 4.21 : Çevrimsel yükleme protokolü (AISC 341-16). ....                                                 | 76 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.22 : FEP-2B birleşimi moment-dönme eğrisi.....                                                                                         | 77  |
| Şekil 4.23 : FEP-2B birleşimi analiz sonucu gerilme dağılımı ve akma çizgileri. ....                                                           | 77  |
| Şekil 4.24 : FEP-4B birleşimi moment-dönme eğrisi.....                                                                                         | 78  |
| Şekil 4.25 : FEP-4B birleşimi analiz sonucu gerilme dağılımı ve akma çizgileri. ....                                                           | 78  |
| Şekil 5.1 : İncelenecek yapıya ait normal kat planı (Karasu, 2018). ....                                                                       | 82  |
| Şekil 5.2 : Moment aktaran taşıyıcı çerçeve bilgileri (Karasu, 2018). ....                                                                     | 83  |
| Şekil 5.3 : Moment aktaran çerçeveler için kullanılan zayıflatılmış kiriş enkesiti (TBDY, 2018). ....                                          | 83  |
| Şekil 5.4 : FEP-2B birleşimine ait histeretik davranış modeli.....                                                                             | 85  |
| Şekil 5.5 : FEP-4B birleşimine ait histeretik davranış modeli.....                                                                             | 85  |
| Şekil 5.6 : Düşey yüklerin alana bağlı dağılımı.....                                                                                           | 87  |
| Şekil 5.7 : Eşdeğer taşıyıcı çerçeve modeli. ....                                                                                              | 88  |
| Şekil 5.8 : Panel bölgesi modeli.....                                                                                                          | 89  |
| Şekil 5.9 : Elastik kiriş ve kolon elemanlarında kullanılan IMKBilin daranış modeli. ....                                                      | 90  |
| Şekil 5.10 : Rayleigh sönüm modeli.....                                                                                                        | 91  |
| Şekil 5.11 : Doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçları.....                                                                               | 93  |
| Şekil 5.12 : DD-1 Tasarım spektrumu. ....                                                                                                      | 94  |
| Şekil 5.13 : H1 doğrultusunda ölçeklendirilmiş ortalama spektrum ve DD-1 tasarım spektrumu. ....                                               | 96  |
| Şekil 5.14 : H2 doğrultusunda ölçeklendirilmiş ortalama spektrum ve DD-1 tasarım spektrumu. ....                                               | 96  |
| Şekil 5.15 : Artımsal dinamik analiz eğrisi.....                                                                                               | 97  |
| Şekil 5.16 : Imperial Valley-06 depremi, El Centro Array #8 istasyonu (RSN: 183) kaydı için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi. ....         | 98  |
| Şekil 5.17 : Superstition Hills-02 depremi, El Centro Imp. Co. Cent. istasyonu (RSN: 721) kaydı için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi..... | 98  |
| Şekil 5.18 : Landers depremi, Coolwater istasyonu (RSN: 848) kaydı için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi. ....                             | 99  |
| Şekil 5.19 : Kobe depremi, Kakogawa istasyonu (RSN: 1107) kaydı için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi. ....                                | 99  |
| Şekil 5.20 : Kocaeli depremi, Düzce istasyonu (RSN: 1158) için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi. ....                                      | 100 |
| Şekil 5.21 : El Mayor-Cucapah depremi, El Centro-Imperial & Ross istasyonu (RSN: 5837) için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi.....          | 100 |
| Şekil 5.22 : Darfield depremi, DFHS istasyonu (RSN: 6893) için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi. ....                                      | 101 |
| Şekil 5.23 : El Mayor-Cucapah depremi, Westside Elementary School istasyonu (RSN: 8606) için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi.....         | 101 |
| Şekil 5.24 : Çoklu artımsal dinamik analiz sonuç eğrileri. ....                                                                                | 102 |
| Şekil 5.25 : Periyoda bağlı süneklik ifadesinin elde edilmesinde gerekli ifadeler. .                                                           | 104 |
| Şekil 5.26 : BF modeline ait kırılmalık eğrisi.....                                                                                            | 105 |
| Şekil 5.27 : GF1 modeline ait kırılmalık eğrisi.....                                                                                           | 105 |
| Şekil 5.28 : GF2 modeline ait kırılmalık eğrisi.....                                                                                           | 106 |
| Şekil 5.29 : Kırılmalık eğrileri. ....                                                                                                         | 106 |

# **KİRİŞ ENKESİTİ YÜKSEKLİĞİNDE ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

## **ÖZET**

Sünek çelik yapıların tasarımında, yapının yeterli dayanıma ve rijitliğe sahip olmasının yanı sıra uygulanan yükler altında yüksek miktarda sismik enerji sönümleyebilme yetisi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, plastik şekil değiştirme gösteren ve kapasitesine ulaşmadan önce sünek davranış sergileyebilen birleşim detaylarının tasarlanması, yapının genel sismik performansını önemli ölçüde arttırabilmektedir. Literatürde bu özelliklere sahip birleşimler “enerji sönümleyici birleşimler” (dissipative connections) olarak adlandırılmaktadır.

Genellikle yalnızca düşey yükleri taşımak üzere tasarlanan düşey yük taşıyıcı çerçevelerde yer alan birleşim detaylarının da, bu tür enerji sönümleyici mekanizmalara sahip olacak şekilde tasarlanması durumunda, yapının sismik dayanımına önemli ölçüde katkı sağlaması mümkündür. Bunun sonucunda yapının deprem sırasında daha fazla enerji sönümlemesi, dolayısıyla ani göçme riskinin azaltılması sağlanabilir. Bu yaklaşım, geleneksel olarak sadece yatay yük taşıyan taşıyıcı çerçevelere odaklanan sismik tasarım anlayışının ötesine geçerek, düşey yük sistemlerini de aktif enerji sönümleme elemanları olarak değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

Çelik yapıların düşey yük taşıyıcı çerçevelerinde yaygın olarak kullanılan kiriş-kolon birleşim türlerinden biri alın levhali birleşimlerdir. Tasarım ve işçilik aşamalarında kolaylık sağlaması sayesinde yaygın olarak kullanılan bu birleşimler, yapısal tasarım gerekliliğine göre tam dayanımlı, kısmi dayanımlı veya mafsallı birleşim olarak kullanılabilir. Ülkemizde Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) kapsamında önyeterliliği gösterilen tam dayanımlı kiriş-kolon birleşimlerine yer verilmiştir. Bu çalışmada incelenen kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhali kiriş-kolon birleşimleri çelik çerçevelerin düşey yük, rüzgar yükü ve küçük sismik yükler taşıması amacıyla tasarlanan kiriş-kolon birleşimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında 2-bulonlu ve 4-bulonlu kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhali iki kiriş-kolon birleşiminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Aynı kiriş ve kolon enkesitleri kullanılarak oluşturulan bu birleşimlerde bulon çapı ve bulon sayısı değişkenlik göstermektedir. Birleşimlerde alın levhasının diğer birleşim elemanlarından önce plastikleşerek dayanımda belirleyici olması ve enerji sönümünün levha üzerinden gerçekleşmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple ince levha-büyük çaplı bulon tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Birleşimlerin tasarım ve sınıflandırılmasında Amerikan şartnamelerinden ve Avrupa standartlarından yararlanılmıştır. Bu birleşimler Eurocode standardına göre kısmi dayanımlı ve yarı-rijit olacak şekilde sınıflandırılmaktadır.

Tasarlanan birleşimlerin doğrusal olmayan yüklemeler altında davranışını incelemek amacıyla ABAQUS programı kullanılarak sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman modellerinin kurulmasında kullanılan modelleme yöntemini doğrulamak adına, 2-bulonlu benzer bir birleşim üzerine gerçekleştirilen deneysel bir çalışma referans alınmıştır. Çalışmada kullanılan birleşimin geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme biçimi aynı olacak şekilde sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin çevrimsel yükleme altında analizleri sonucu elde edilen moment-dönme ilişkisi deney sonuçları ile karşılaştırıldığında sonlu eleman modelinin numune davranışını iyi seviyede yansıttığı gözlemlenerek modelleme tekniği doğrulanmıştır.

Sonrasında, bu çalışma kapsamında tasarlanan birleşimlerin sonlu eleman modellerinin AISC 358-16 kapsamında belirlenen çevrimsel yükleme protokolü altında analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen moment-dönme ilişkilerinin tasarım aşamasında hedeflenen eğilme dayanımı ve dönme kapasitesine ulaştığı gözlemlenmiştir. 4-bulonlu birleşimde kiriş başlığına yakın sırada bulunan bulonların diğer bulonlara kıyasla birleşim dayanımı ve rijitliğine düşük seviyede katkı sağladığı görülmüştür.

Güncel standartlar kapsamında açıklanan mekanik birleşim modelleri kullanılarak tüm birleşimlerin başlangıç rijitliği ve eğilme kapasitesi hesaplanmıştır. Bu sayede elde edilen sonlu eleman analizi sonuçlarının desteklenmesi ve mekanik modellerin incelenmesi amaçlanmıştır. AISC 341-16 standardında açıklanan akma çizgileri yöntemi ve Eurocode EN 1993-1-8 (2005) standardı kapsamında açıklanan bileşen yöntemi kullanılarak birleşimlerin eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Elde edilen eğilme dayanımları sonlu eleman analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bileşen yöntemi ile hesaplanan değerlerin sonlu eleman analizi sonuçlarına yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bileşen yöntemi ile birleşimlerin başlangıç rijitliği hesaplandığında ise bileşen yönteminin tüm birleşimler için %5 ila %12 oranında büyük değerler verdiği görülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında birleşimlerin sismik yükler altında yapı sistemi davranışına etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada ele alınan iki tip alın levhalı birleşimin sonlu eleman analizi sonucu elde edilen moment-dönme davranışı, taşıyıcı sistemi moment aktaran çerçevelerden oluşan ve TBDY (2018) esaslarına uygun olarak tasarlanan dört katlı bir çelik yapının yalnızca düşey yük taşıması planlanan kiriş-kolon birleşimlerine uygulanmıştır.

Çelik yapıların deprem yükleri altında doğrusal olmayan davranışının yeterli hassasiyette incelenebilmesi için doğrusal olmayan analizlerinin gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla OpenSees programı kullanılarak doğrusal olmayan statik itme analizleri, sonrasında TBDY (2018) uyarınca seçilen ve ölçeklendirilen deprem kayıtları ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda yapının göçme noktasına kadar davranışı ve göçme performansı incelenmiştir.

Tüm modellerin dinamik analizinde %2 Rayleigh sönüm oranı esas alınmıştır. Modellerde kompozit döşeme etkisi ihmal edilmiştir. Eşdeğer düşey yük taşıyıcı çerçeve ve moment aktaran çerçeve arasında bağlantılar rijit elemanlar ile oluşturulmuştur. Zayıflatılmış kiriş enkesitinde oluşacak plastik mafsalların moment-dönme ilişkisi güncel IMK modeli ile temsil edilmiştir. Düşey yük taşıyıcı çerçevelerde, kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin

davranışı, kolon yüzünde yer alan yay elemanları aracılığı ile, histeretik moment-dönme davranış modelleri kullanılarak tanımlanmıştır.

Doğrusal olmayan statik itme analizleri sonucunda, Model GF1 ve GF2 çerçevelerinin ulaştığı maksimum taban kesme kuvvetlerinin, Model BF'ye kıyasla sırasıyla %20 ve %25 oranında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kiriş enkesiti yüksekliğinde kiriş-kolon birleşimlerinden oluşan çerçevelerin yatay yük taşıma kapasitesine büyük katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, maksimum taban kesme kuvvetinin tasarım taban kesme kuvvetine oranı olarak tanımlanan dayanım fazlalığı katsayısı ( $D$ ), yönetmelikte öngörülen değerlerin yaklaşık iki katı olarak hesaplanmıştır.

Doğrusal olmayan dinamik analizler, artımsal dinamik analiz yönteminden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Artımsal dinamik analiz eğrileri kullanılarak, FEMA-P695 standardına uygun olacak biçimde kırılgenlik eğrileri elde edilmiştir. Analizler sonucunda, düşey yük taşıyıcı çerçevelerde kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı birleşimlerin kullanıldığı modellerin, düşey yük çerçevelerinin göz önüne alınmadığı yapıya kıyasla akmadan sonra daha yüksek rijitlik ve dayanım sergilediği, bunun sonucunda göçmenin önemli ölçüde ertelendiği gözlemlenmiştir.



## **NONLINEAR BEHAVIOUR OF FLUSH END-PLATE BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS UNDER CYCLIC LOADING**

### **SUMMARY**

One of the most important factors for ductile design of steel structures, apart from strength and stiffness, is the ability of the structure to dissipate high amounts of energy under the seismic loads. To this end, the usage of connection details capable of undergoing plastic deformations and exhibiting ductile behavior prior to reaching ultimate capacity can substantially enhance the seismic performance of the overall structural system. Such connections are commonly referred to in the literature as “dissipative connections”. Although connections within gravity load-resisting frames are conventionally designed to support only vertical loads and are assumed not to contribute to lateral resistance and usually ignored during structural analysis, detailing these connections to develop controlled inelastic behavior can significantly improve a structure’s seismic resilience. By enabling gravity frame connections to engage in energy dissipation, the structure can absorb higher seismic energy and thereby reduce the likelihood of immediate collapse. This approach goes beyond the traditional focus of seismic design, which primarily considers moment-resisting frames for lateral load resistance, and allows gravity frames to be considered as active energy-dissipating components within the structural system.

One of the most commonly used types of beam-to-column connections in the gravity load-resisting systems of steel structures is end-plate connections. Due to their ease of fabrication and installation, these connections are widely preferred and can be designed as fully rigid, partial-strength, or pinned connections depending on structural design requirements. While only full-strength extended end-plate connections are defined within the scope of the current Turkish earthquake code, other types of end-plate connections are not addressed. The flush end-plate beam-to-column connections examined in this study are commonly used in steel frames designed to carry gravity load, wind load and low levels of seismic demand.

In this study, two configurations of flush end-plate connections, two-bolted and four-bolted, were designed using the same beam and column profiles. These connections are aimed to be partial-strength and semi-rigid connections with high energy dissipation characteristics. The connection strength is determined by yield strength of the end-plate, focusing on the ductile non-linear behaviour of the plate. In order to achieve full plasticity of the end-plate, thin plate behaviour was adapted, where high strength bolts are used to prevent sudden failure of bolts under prying forces.

The designed connections were then modeled using ABAQUS finite element analysis software to investigate their moment-rotation behaviour under cyclic loading. In order to confirm the modeling methodology used, a previously carried out experimental work on a two-bolt beam-to-column connection was modeled and analysed. The created model considers the nonlinear material properties, the connection geometry, the bolt preloading and the cyclic loading protocol used in the experimental work. All

the connection members were modeled as solid elements and a high density of mesh elements were used.

The finite element analysis results and experimental data were then compared to verify the created model. It was observed that the finite element model accurately reflects the moment-rotation behaviour of the experimental work. The plastic deformations and yield lines occurred on the end-plate were similar to the experimented sample.

Afterwards, the two connections designed in this study were analysed in ABAQUS under cyclic loading specified in AISC 341-16. The moment-rotation curves obtained from these analyses proved to show sufficient ductile behaviour, as well as partial-strength and semi-rigid connection behaviour as intended in the design process.

This study also aimed to evaluate the accuracy of numerical prediction methods provided in established design codes, including Eurocode and AISC. To predict the moment capacity and initial stiffness of the designed flush end-plate connections, component method, specified in Eurocode EN 1993-1-8 (2015), was used. Component method predicted the initial stiffness and moment capacity relatively close to the values obtained from the experiment and finite element analyses.

The yield line theory, specified in AISC, determined a closer overall strength prediction for the connections compared to component method. This may be explained by the generalised approach of component method for all end-plate connections, rather than flush end-plate connections specifically.

After the moment-rotation characteristics of the connections were obtained, the beam-to-column connections were defined as an analytical model and implemented into the structural analysis program OpenSees. In order to observe the structural stiffness and strength, the connections were implemented to a four-story steel structure with moment resistant frames on the perimeter and gravity framing within. The gravity framing system, which is often ignored in structural performance assesment, was used as a means to utilize the flush end-plate connections and investigate the benefits of these connections in this study.

The structure was designed according to Turkish seismic code. Strong column-weak beam approach is utilized in seismic design. Moment resistant frame joints were created with reduced beam sections.

The structure was adapted into an equivalent frame model, utilizing the moment resisting frame and an equivalent gravity frame representing the connections. Three different structural models were created in order to differentiate the effects of the connections. The models utilized an equivalent frame assumption, with one moment resistant frame connected to an equivalent one-bay gravity frame representing all the connections and loads forming the gravity frame system. The first model was used as a reference model, where the equivalent one-bay gravity frame utilized pinned beam-to-column connections. The second and third models (GF1 and GF2 models) were created with 2-bolted and 4-bolted flush end-plate connections used for the equivalent gravity frame beam-to-column connections.

Concentrated plasticity approach was used to implement the moment-rotation relationship of the connections to zero length rotational springs located at the face of the column. Elastic beam-column elements were used for the beams and columns. Modified IMK model was used to define the bahiour of the plastic hinges formed on the beams. Effects of composite floor was ignored in all models. Two percent Rayleigh damping was applied to the structures.

Nonlinear static pushover analyses were conducted as well as nonlinear time history analyses on the frame models to investigate the seismic behaviour of the structures. Pushover analyses showed that the structures with gravity frames equipped with flush end-plate connections displayed significantly higher stiffness and reached higher base shear strength capacity. In particular, Model GF1 and GF2 achieved 20% and 25% higher maximum base shear force respectively. Overstrength factor ( $D$ ) is calculated using maximum base shear force/design base shear force ratio. It was seen that the code recommended values were almost as low as half of the values calculated by the pushover analyses.

For the seismic investigation of the structures, incremental dynamic analysis method was used. 11 earthquake records of two components (22 records in total) were chosen and scaled appropriately according to Turkish seismic code to match the target spectrum for the analyses. Incremental dynamic analysis was conducted on the structures using the selected earthquake records on OpenSees. Connections utilizing flush end-plate connections delayed collapse of the structure, while reducing maximum interstory drift ratio under the same ground motion. Both configurations displayed similar initial stiffnesses, while frame 3, utilizing 4-bolted connections, displayed higher strength than frame 2 with 2-bolted connections.

From the analysis results, seismic fragility curves of the structures were derived according to FEMA-P695 methodology to quantify the seismic vulnerability. These curves illustrated that the frames with two-bolted and four-bolted flush end plate connections had a significantly lower probability of reaching damage or collapse states at any given intensity level compared to the baseline model. The improved seismic performance of the gravity frames with flush end plate connections underlines the potential of such connection detailing in enhancing the overall resilience and ductility of steel buildings.



## 1. GİRİŞ

Çelik yapılarda sünek davranışın sağlanmasında kiriş-kolon birleşimleri oldukça önemli bir role sahiptir. Northridge Depremi (1994) öncesinde moment aktaran çelik çerçevelerin kiriş-kolon birleşimlerinde kullanılan kaynaklı birleşim detayları, deprem yükleri altında gevrek kırılmalar göstererek büyük miktarda can ve mal kaybına yol açmıştır. Bu tür gevrek kırılmaların önüne geçmek amacıyla, deprem yükleri etkisinde enerji sönümlemesinin kiriş üzerinden gerçekleştiği ve kiriş-kolon birleşimlerinde dayanımının korunduğu tasarım yaklaşımlarının benimsenmiştir. Bu doğrultuda, yapıların hedeflenen sünekliğe ulaşılması için güncel yönetmeliklerde düzenlemelerin ve bilimsel araştırmaların gerekliliği artmıştır.

Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin deprem yüklerine karşı tasarımında, kirişte plastik mafsall oluşması ve kiriş-kolon birleşimlerinin dayanımını koruması hedeflenmektedir. Kirişte plastik mafsall oluşması sonucu, alın levhasında akma gibi kiriş-kolon birleşimlerinde gözlemlenebilecek sınır durumlara kıyasla oldukça yüksek dönme kapasitesi elde edilmektedir. Bu çalışmada incelenecek kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşimleri, yaygın olarak düşey yük taşıyıcı çerçevelerin sabit ve hareketli yükler gibi kesme kuvvetlerine karşı kullanılırken sınırlı miktarda rüzgar yükü ve deprem yüklerini de karşılayabilmektedir. Yapısal analizlerde ise bu tür birleşimler genellikle mafsallı olarak kabul edilmektedir.

Deprem bölgelerinde inşa edilecek çelik yapıların tasarımında yapı elemanlarının yanı sıra bu elemanların birleşimleri de önemli rol oynamaktadır. Can güvenliğinin sağlanmasında, belirli yapı elemanlarının diğer elemanlardan önce plastikleşmesi sağlanarak bu elemanların yapı davranışında belirleyici rol üstlenmesi hedeflenmektedir. Mafsallı olarak kabul edilen kiriş-kolon birleşimlerinde ise bu elemanların yüksek plastik deformasyon göstererek belirli miktarda dayanımını koruyan elemanlardan seçilmesi, deprem etkisinde sönümlenecek enerji miktarının artışını mümkün kılmaktadır. Bu birleşimler literatürde enerji sönümleyici birleşimler (dissipative connections) olarak isimlendirilmektedir. Bu birleşimlerin rijitlik ve

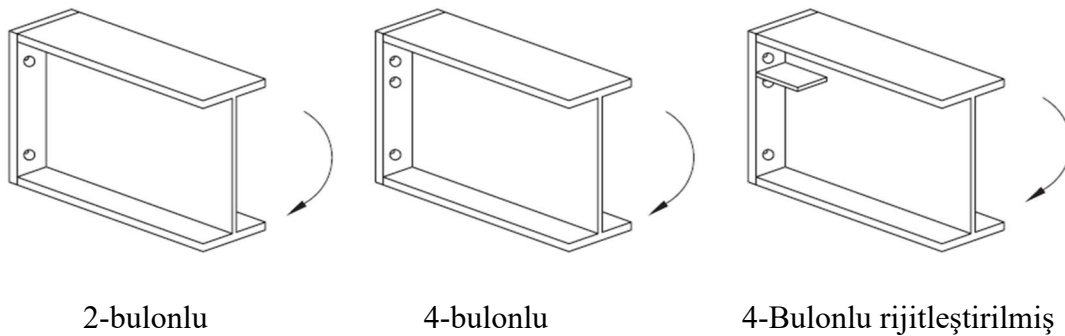
eğilme dayanımı gibi etkileri yapısal analizlerde göz önüne alındığında daha ekonomik tasarımlar gerçekleştirilebilir ve yapının yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırılmasında kullanılabilir.

Çelik yapıların kiriş-kolon birleşim tipleri arasında yaygın olarak kullanılan birleşim türleri arasında alın levhalı birleşimler yer almaktadır. Alın levhalı birleşimler; sahada uygulama kolaylığı sağlaması, tek doğrultuda veya çevrimsel yükler altında öngörülebilir davranış sergilemesi ve literatürde yapılan çalışmalarla beraber yönetmeliklerce belirlenen belirli dayanım ve rijitlik koşullarını sergilemesi sebebiyle tercih edilmektedir. Alın levhası uzunluğu, bulon çapı veya bulon yerleşimi gibi geometrik birleşim parametrelerinde yapılan değişimler ile farklı yapısal gereksinimlerini karşılayacak tasarımlara olanak sağlamaktadır.

Alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerini levhanın kirişe göre uzunluğuna bağlı olarak kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı (Flush end-plate), kısa alın levhalı (header end-plate) veya uzatılmış alın levhalı (extended end-plate) birleşim olarak sınıflandırmak mümkündür. Arıca kiriş gövdesinin rijitleştirilmesi, bulon sayısı ve yerleşimine göre daha detaylı tasarımlar yapılabilmektedir. Bu birleşimler kirişin alın levhasına kaynaklanması ve levhanın kolon başlığına bulonlu bağlantısı ile teşkil edilmektedir.

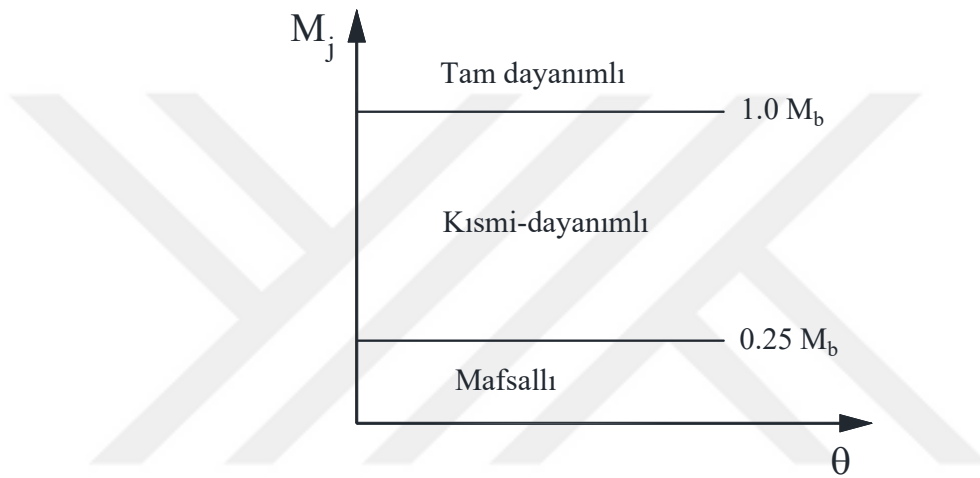
Bu çalışmada, kiriş yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimlerde alın levhası yüksekliği, kiriş enkesit yüksekliğini belirgin ölçüde aşmamakta ve bütün bulonlar kiriş başlıkları arasında yer almaktadır.

Kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı birleşimler, çelik çerçevelerin kiriş-kiriş birleşimlerinde veya kiriş-kolon birleşimlerinde teşkil edilebilmektedir. Kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimlerin uygulama örnekleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 1.1 :** Kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı birleşim örnekleri (Murray ve Eatherton, 2023).

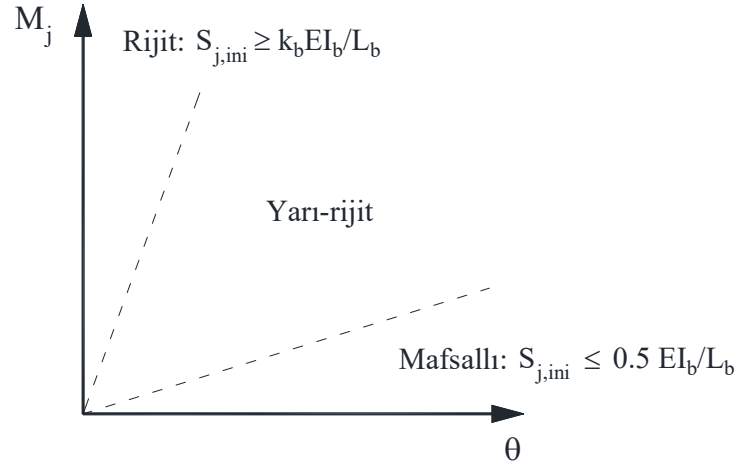
Bu birleşimler, kısa alın levhalı birleşimlere kıyasla daha yüksek rijitlik ve dayanıma sahiptir. Uzatılmış alın levhalı birleşimler ise bağlanan kirişin plastik eğilme momenti dayanımından yüksek dayanıma sahip olduğundan tam dayanımlı birleşim olarak sınıflandırılır. Dayanım bakımından birleşimlerin sınıflandırmasında; birleşimin dayanımı kirişin plastik eğilme momenti dayanımının %25'inden düşük ise mafsallı (pinned), kirişin dayanımından yüksek ise tam dayanımlı (full strength), bu iki değer aralığında ise kısmi dayanımlı (partial strength) olarak sınıflandırılmaktadır. Birleşimlerin eğilme dayanımı bakımından sınıflandırılması Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.2 : Birleşimlerin dayanım bakımından sınıflandırılması.**

Kiriş-kolon birleşimlerinin önemli karakteristik özelliklerden biri başlangıç rijitliğidir. Birleşim rijitliği yapının deprem yükleri altında, özellikle akma öncesi gözlemlenecek deplasmanları ve yapının süneklik derecesi gibi çeşitli yapısal davranışı önemli ölçüde etkilemektedir. Birleşimlerin moment-dönme eğrisinin içerisinde kalan alan, birleşim tarafından sönmölen enerjiyi temsil ettiğinden başlangıç rijitliği bu enerji miktarı ile de doğrudan ilişkilidir.

Çeşitli standartlar kapsamında kiriş-kolon birleşimlerinin sınıflandırması için birleşimin başlangıç rijitliğinin bağlandığı kirişin rijitliğine oranını kullanmaktadır. Eurocode EN 1993-1-8 (2005) standardı uyarınca kiriş-kolon birleşimlerinin başlangıç rijitliği bakımından sınıflandırılması Şekil 1.3'te gösterildiği üzere, bağlanan kirişin rijitliğine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır.



**Şekil 1.3 :** Birleşimlerin başlangıç rijitliği bakımından sınıflandırması.

Birleşimin başlangıç rijitliği ( $S_{j,ini}$ ), bağlanan kiriş için hesaplanan  $0.5EI_b/L_b$  değerinin altında ise birleşim mafsallı,  $k_bEI_b/L_b$  değerinin üstünde ise rijit olarak sınıflandırılmaktadır. Burada  $E$  bağlanan kirişin elastisite modülünü,  $I_b$  kirişin atalet momentini,  $L_b$  ise kiriş uzunluğunu temsil etmektedir. Yapı çerçevelerinde yatay deplasmanın en az %80'inin çaprazlar tarafından karşılandığı durumlarda  $k_b$  değeri 8, diğer çerçeve sistemlerinde ise 25 olarak belirlenmektedir. Rijit ve mafsallı birleşim sınırları arasındaki birleşimler ise yarı-rijit (semi-rigid) birleşimler olarak sınıflandırılmaktadır.

### 1.1 Tezin Amacı

Bu çalışma kapsamında, kiriş yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin tekrarlı yükler altında doğrusal olmayan davranışının detaylı şekilde incelenebilmesi için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilecektir. Tasarım aşamaları bu çalışma kapsamında detaylandırılan iki adet kiriş yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşiminin sonlu eleman analizi programı ABAQUS (2019) kullanılarak modelleri oluşturulmuştur.

Sonlu eleman modelleri oluşturulurken kullanılan modelleme tekniği ve varsayımların doğrulanması amacıyla benzer kiriş-kolon birleşimleri üzerine gerçekleştirilen deneysel bir çalışma sonucu elde edilen veriler kullanılarak birleşimin sonlu eleman modeli oluşturulacaktır. Oluşturulan sonlu eleman modeli, deneyde kullanılan birleşim elemanlarının malzeme, birleşim geometrisi ve yükleme biçimi bakımından tamamen yansıtacak biçimde oluşturulmuştur. Sonlu eleman analizi sonuçları incelendiğinde,

oluşturulan modelin, test edilen birleşimin moment-dönme davranışını ve alın levhasında oluşan plastik deformasyonları başarılı şekilde yansıttığı tespit edilmiştir. Bu durum sonlu eleman modelinin oluşturulma yöntemini doğrulamaktadır.

Aynı modelleme yöntemi kullanılarak, tasarımları bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş iki farklı alın levhalı birleşimin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin artan çevrimsel yükleme altında davranışı incelenerek öngörülen eğilme kapasitesi, başlangıç rijitlikleri ve plastikleşme davranışını kıyaslamak hedeflenmiştir. Sonlu eleman analizleri pekleşme gibi doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin birleşim üzerindeki etkilerini incelemeyi mümkün kılmaktadır.

Tasarlanan birleşimlerin çelik yapı sistemi üzerinde etkisinin araştırılması çalışmanın son aşamasıdır. Taşıyıcı sistemi moment aktaran çelik çerçeveler ve düşey yük taşıyıcı çerçevelerden oluşan dört katlı bir çelik yapının doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler ile incelenmesi hedeflenmiştir. Yapıda yalnızca düşey yük taşıması planlanarak tasarlanan çerçevelerde kullanılacak kiriş-kolon birleşimlerinin, tasarımı bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimler ile teşkil edildiği durumda birleşimlerin yapısal katkısı incelenecektir. Doğrusal olmayan statik itme analizleri ile taban kesme kuvveti-çatı katı ötelemesi incelenecek yapının artımsal dinamik analizler ile kırılabilirlik eğrileri oluşturulacaktır.

## **1.2 Literatür Araştırması**

1994 yılında gerçekleşen Northridge Depremine kadar kiriş başlığının kolon başlığına küt kaynak ile kaynaklandığı ve kiriş gövdesinin kolona bulonlu ek ile bağlandığı birleşimler yaygın olarak kullanılmaktaydı. Northridge Depremi sonrası bu birleşim türlerinin yeterli süneklik göstermediği anlaşılmış, birleşimlerin deprem yükleri etkisinde deneysel ve numerik davranışının incelenmesine yönelik çalışmalar artmıştır.

Bose ve diğ. (1996) tarafından yapılan deneysel çalışmada on sekiz adet alın levhalı kiriş-kolon birleşiminin tek doğrultuda artan yükleme altında davranışı incelenmiştir. İncelenen numunelerde alın levhası kalınlığı, bulon çapı ve kiriş enkesit yüksekliği gibi parametrelerinin birleşimin eğilme momenti dayanımı, dönme rijitliği ve dönme kapasitesine etkileri incelenmiştir. Deneyler sonucunda alın levhası kalınlığı ve bulon

çapının artmasıyla birleşimlerin rijitlik ve dönme kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca, Eurocode 1993-1-8 (2005) Ek J'ye göre hesaplanan eğilme momenti dayanımlarının deneysel çalışmalar sonucu elde edilen kapasitelerin altında kaldığı görülmüştür. Eurocode'a göre dayanım ve dönme kapasitesi yeterliliklerinin karşılanmayacağı öngörülen belirli birleşimlerin ise yeterli dönme ve eğilme momenti dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Da Silva ve diğ. (2004), dokuz adet kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı birleşim ve yedi adet tam dayanımlı alın levhalı birleşimin eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkisinde davranışını incelemişlerdir. Birleşimlere etki eden eksenel kuvvet değeri kirişin eksenel yük kapasitesinin %20'sine kadar arttırıldığında, birleşimlerin eğilme kapasitesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Eksenel çekme kuvveti etkisinde ise birleşimlerin eğilme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Bu durum, birleşimlerin eksenel yük etkisinde tasarımı ile ilgili tek sınırlama olan Eurocode 1993-1-8 (2005) Ek J'de belirtilen ve tasarım aşamasında göz ardı edilen %10'luk eksenel kuvvet limitinin yenilenmesi gerektiğini göstermiştir. Deneylerin sonuçları yine EN 1993-1-8 (2005) kapsamında açıklanan nümerik hesap yöntemi (bileşen yöntemi) ile kıyaslandığında ise yöntemin eksenel kuvvet ilavesini yeterince iyi yansıttığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak, bileşen yönteminin yükleme koşullarından bağımsız olarak, elemanların birbirinden ayrı şekilde incelenmesi gösterilmiştir.

Broderick ve Thomson (2002), kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin tek doğrultuda artan ve çevrimsel yüklemeler altında davranışını incelemiştir. Alın levhası kalınlığı, bulon sınıfı, bulon önçekmesi ve kolon enkesitleri gibi parametrelerin birleşim davranışına etkisi ve incelenen birleşimlerin Eurocode hesap yöntemi ile öngörülen mekanizma davranışlarını yansıtmaları incelenmiştir. Alın levhası kalınlığının yüksek olduğu birleşimlerde levhanın elastik kaldığı ve bulonların çekme dayanımına ulaşarak kopması sonucu birleşimlerin eğilmem momenti kapasitesine ulaştığı görülmüştür. Gözlemlenen diğer bir kırılma mekanizmasında ise daha ince alın levhalı birleşimlerde alın levhasında akma gerçekleşmiş, alın levhasından bulonlara etki eden ilave kaldırma kuvvetleri etkisinde bulonlar kopmuştur.

Abolmaali ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada toplam kırk sekiz adet yarı-rijit kiriş-kolon birleşiminin çevrimsel yükler altında enerji sönümleme karakteristikleri incelenmiştir. Deneysel veriler, birleşimlerin enerji sönümleme kabiliyetinin dayanımı

doğrudan etkileyen tekil parametrelere (bulon çapı gibi) doğrudan bağlı olmayıp, plastik davranışı etkileyen tüm parametrelere ve geri yükleme aşamasındaki pekleşmeye de bağlı olduğunu göstermiştir. Alın levhalı birleşimler için, birleşim geometrisi optimize edilerek sönmölen enerji miktarının arttırılabileceğı sonucuna ulaşılmıştır.

Girão Coelho ve Bijlaard (2007) tarafından yapılan çalışmalarda yüksek dayanımlı çelik kullanılarak teşkil edilen birleşimleri araştırmışlardır. Çalışmada S355 sınıfı yapısal çelik kullanılarak hazırlanan kiriş-kolon kesitleri ve S690 sınıfı yüksek dayanımlı alın levhaları ile oluşturulan yedi farklı birleşimin monotonik yükler altında davranışı incelenmiştir. Yüksek dayanımlı çelik kullanılan birleşimlerin yüksek eğilme dayanımı ve rijitliğe sahip olduğu görölmüştür. Ancak birleşimlerin akma sonrası düşük plastik deformasyon sergilediğı, dolayısıyla kısıtlı süneklığe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar Eurocode 3 (1998) hesaplarıyla dönme ve moment kapasitelerini bakımından kıyaslandığında Eurocode yönteminin kapasiteye kıyasla düşük kaldığı ve dönme kapasitesini yakın seviyede gösterdiği görölmüştür.

Qiang ve diğ. (2017), yaptıkları çalışmalarda yüksek dayanımlı çelik kullanılan kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimlerin yangın sonrası tek doğrultuda artan yükleme etkisinde davranışını incelemişlerdir. Benzer birleşimlerin oda sıcaklığında deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kıyaslanılmıştır. Çalışma sonucunda, yüksek dayanımlı çelik kullanılan ince alın levhalı birleşimlerin yangın sonrasında, yumuşak çelik kullanılan kalın alın levhalı birleşimler ile benzer dayanım ve daha yüksek dönme kapasitesine ulaşabildiğı görölmüştür.

Mak ve Elkady (2021), kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı birleşimler üzerine gerçekleştirilen araştırmaları bir araya getirerek kapsamlı bir veri tabanı oluşturmuşlardır. Literatürdeki deneysel çalışmalarda incelenen parametreleri, deney yöntemlerini, numunelerin yüklenme biçimini, döşeme veya kompozit yapısal farklılıkların birleşimler üzerine etkilerini ve literatürde çalışılma oranları gibi verileri açıklamışlardır.

Gupta ve Krawinkler (1999) tarafından yapılan çalışmada düşey yük çerçevelerinin yapısal etkilerini iki boyutlu eşdeğer çerçeve modellemesi yöntemi ile incelenmişlerdir. Lignos ve diğ. (2013), çalışmalarında benzer bir modelleme yöntemi

kullanarak moment aktaran çerçevelerin deprem performansının değerlendirilmesinde basitleştirilmiş doğrusal olmayan modellerin etkinliğini incelemiştir.



## **2. KİRİŞ ENKESİTİ YÜKSEKLİĞİNDE ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN TASARIMI**

Deprem yüklerinin ana taşıyıcı çerçeveler ile karşılandığı çelik yapılarda diğer çerçeve kiriş ve kolonlarının yalnızca düşey yük taşıdığı varsayılmaktadır. Dolayısıyla bu çerçevelerin kiriş-kolon birleşimleri kesme kuvveti taşıyacak şekilde tasarlanır ve yapısal analizlerde mafsallı olarak kabul edilir. Ancak bu çalışmada incelenecek birleşimlerin yarı rijit ve kısmi dayanımlı olması, birleşimlerin “mafsallı” kabul edilebilecek şekilde dayanım kaybına uğraması öncesi önemli ölçüde rijitlik ve dayanıma sahip olmasını, dolayısıyla deprem etkisinde göz ardı edilemeyecek seviyede enerji sönümlenmesine imkan sağlayabilmektedir.

Kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin tasarımında izlenen temel yaklaşımlar arasında, kalın alın levhası-ince bulon çapı tasarımı veya ince levha-kalın bulon yaklaşımları uygulanabilmektedir. İnce levha davranışında alın levhasının akmasına izin verilir ve bulonlara ilave kaldırma kuvvetleri etki eder. Kaldırma kuvvetleri, akmaya ulaşan alın levhasının bir kaldıraç görevi görerek bulonlara uyguladığı ilave çekme kuvveti etkisidir. Bu durumunda, bulonların kaldırma kuvvetleri etkisinde kopması veya alın levhasının tamamen plastikleşmesi ile birleşim eğilme momenti kapasitesine ulaşmaktadır. Kalın levha davranışında ise alın levhasında akma öncesinde bulonlar çekme dayanımına ulaşarak kopmaktadır.

Bu çalışma kapsamında tasarımı yapılacak alın levhalı birleşimlerin enerji sönümleyici davranış göstermesi hedeflenmektedir. Bu tip birleşimlerde belirli dayanım ve rijitlik hedeflerinin sağlanmasının yanı sıra yüksek plastik deformasyonların kapasiteye ulaşmadan gözlemlenebilmesi ile süneklik sağlanmaktadır. Bu sebeple tasarımlarda esas alınacak yöntem ince levha-kalın bulon yaklaşımıdır. Böylece kiriş-kolon birleşiminde oluşacak plastik mafsallın alın levhasında oluşması ve enerjinin alın levhası aracılığı ile sönümlenmesi sağlanacaktır.

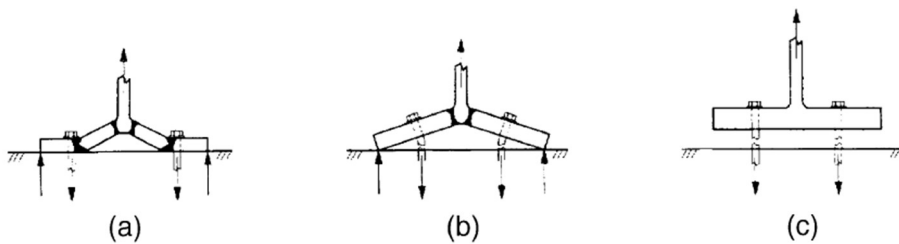
Tasarlanacak her iki birleşimde de tüm elemanların yapısal çelik sınıfı S275 ve yüksek dayanımlı 10.9 sınıfı bulonlar kullanılmıştır. Yapı çeliği için elastisite modülü

$E=200000 \text{ N/mm}^2$  olarak kabul edilmiştir. Kiriş ve kolon profilleri sırasıyla IPE300 ve HE300B olarak seçilmiştir. Birleşimler arasındaki temel fark; bulon çapları, bulonlar arası mesafeler ve bulon sayılarıdır. İsimlendirmede, kirişin tek doğrultuda yüklenmesi durumunda çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı dikkate alınmaktadır.

Tasarlanan birleşimlerin başlangıç rijitlikleri ve eğilme kapasiteleri numerik modeller yardımıyla hesaplanmıştır. Bu modeller, Eurocode EN 1993-1-8 (2005) kapsamında belirtilen bileşen yöntemi (component method) ve AISC 341-16 (2016) kapsamında belirtilen akma çizgileri (yield line) yöntemidir. Daha önceki çalışmalar (Broderick ve Thomson, 2000; Coelho ve diğ., 2007) bileşen yönteminin deneysel sonuçlara kıyasla birleşim başlangıç rijitliğini yüksek, eğilme kapasitesinin ise düşük hesapladığını göstermiştir. Bunun başlıca sebebi olarak bileşen yönteminin kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimlere özelinde değil, genel bir yaklaşım olarak çıkarılması gösterilmiştir.

## 2.1 Kiriş Enkesiti Yüksekliğinde Alın Levhalı Birleşimlerin Tasarım Esasları

Alın levhalı birleşimlerin plastik davranışını incelerken, hesap kolaylığı için, alın levhası ve kiriş gövdesinin kaynaklanarak oluşturduğu birleşimi T-kesitli tek bir eleman olarak ele almak mümkündür. Alın levhası ve bulonların dayanımına bağlı olarak, ele alınan T-kesitli elemanın plastik eğilme kapasitesine ulaşması Şekil 2.1’de gösterilen üç mekanizma durumu ile açıklanmaktadır. 1. mekanizma durumunda ince alın levhası kullanılarak, bulonlar kopma dayanımına ulaşmadan alın levhasının tamamen plastikleşmesi sonucu birleşim eğilme dayanımına ulaşmaktadır (Şekil 2.1 (a)). 2. mekanizma durumunda alın levhasında akma gözlenir ve bunun sonucu oluşacak kaldırma kuvvetleri etkisinde bulon kopması meydana gelmektedir. 3. mekanizma durumunda ise alın levhası kalın seçilerek plastikleşmesi önlenir. Bulonlar çekme dayanımına ulaşılması sonucu kopar ve birleşim dayanımına ulaşmaktadır. Bu durumda bulonlara ilave kaldırma kuvvetleri etki etmez ve çekme kuvveti bulonlar arasında eşit olarak dağılmaktadır.



**Şekil 2.1 :** Alın levhalı birleşim mekanizmaları (Broderick ve Thomson, 2002).

Mekanizma durumu 1’de açıklanan alın levhasında akmaya bağlı güvenli birleşim dayanımı denklem 2.1’de gösterilen şekilde hesaplanır.

$$\phi M_n = \phi_b M_{pl} = \phi_b F_y t_p^2 Y_p \quad (2.1)$$

Burada güvenlik katsayısı  $\phi_b = 0.90$  olarak alınır.  $F_y$  alın levhası akma dayanımı,  $t_p$  ise alın levhası kalınlığıdır. Denklem 2.1, 2-bulonlu ve 4-bulonlu alın levhali birleşimler için kullanılabilir.

2-bulonlu kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhali birleşimler için  $Y_p$  parametresi denklem 2.2 kullanılarak hesaplanır.

$$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[ h_1 \left( \frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1 (p_{fi} + s)] \quad (2.2)$$

4-bulonlu kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhali birleşimler için ise  $Y_p$  parametresi denklem 2.3 kullanılarak hesaplanır.

$$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[ h_1 \left( \frac{1}{p_{fi}} \right) + h_2 \left( \frac{1}{s} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1 (p_{fi} + 0.75p_b) + h_2 (s + 0.25p_b)] + \frac{g}{2} \quad (2.3)$$

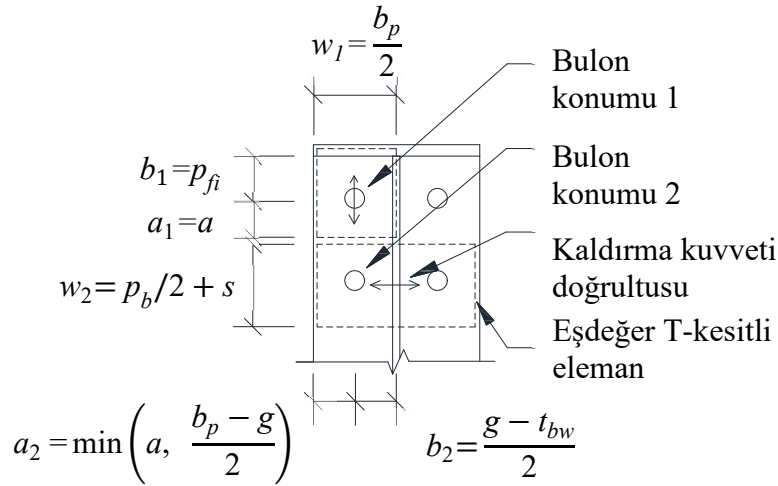
Burada alın levhasında bulon ekseninden düşey yönde olacak akma çizgisi uzunluğu (s) denklem 2.4 ile hesaplanır.

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} \quad (2.4)$$

Mekanizma durumu 2’de açıklanan kaldırma kuvvetleri etkisinde bulon kopması sınır durumu için bulonlara etki edecek kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğü hesaplanmalıdır. Gerekli minimum alın levhası kalınlığı ( $t_{p,reqd}$ ), gerekli eğilme dayanımı ( $M_u$ ) ve alın levhası akma dayanımına ( $F_y$ ) bağlı olarak denklem 2.5 kullanılarak elde edilir. Burada  $\gamma_r = 0.8$  ve  $\phi_b = 1.0$  olarak alınır.

$$t_{p,reqd} = \sqrt{\frac{M_u}{\gamma_r \phi_b F_y Y_p}} \quad (2.5)$$

Alın levhasında akma çizgileri yöntemine dayanan kapasite hesabı yapılırken, bulonların çevresinde oluşacak akma çizgilerinin genişlik ve uzunlukları elde edilmelidir. Bu parametrelerin konumu ve isimlendirmesi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.2 :** Alın levhası akma çizgilerinin geometrik parametreleri.

Bulon merkezi ile akma çizgisi arası düşey mesafe denklem 2.6 ile hesaplanır.

$$a = 91.95 \text{ mm} \left( \frac{t_p}{d_b} \right)^3 - 2.16 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Akma çizgilerinin etkin net genişliği ( $w'_i$ ), etkin genişlikten ( $w_i$ ) bulon deliği çapının çıkarılmasıyla elde edilir.

$$w'_i = w_i - d_h \quad (2.7)$$

Etkin T-kesitli elemanda oluşacak  $F'_i$  kuvveti her bulon sırası için denklem 2.8 ile hesaplanır.

$$F'_i = \frac{1}{b_i} \left[ \frac{t_p^2 F_y}{4} (0.85 w_i + 0.8 w'_i) + \frac{\pi d_b^3 F_{nt}}{32} \right] \quad (2.8)$$

Bulonlara etki eden en büyük kaldırma kuvvetinin büyüklüğü denklem 2.9 ile hesaplanır.

$$Q_{max,i} = \frac{w'_i t_p^2}{4 a_i} \sqrt{F_y^2 - 3 \left( \frac{F'_i}{w'_i t_p} \right)^2} \quad (2.9)$$

Kaldırma etkisinde bulonların çekme dayanımı, bulonun çekme dayanımından kaldırma kuvvetinin çıkarılması ile elde edilir. Birleşimdeki bulonların dayanımı ise kaldırma kuvveti etkisinde bulonların kopma dayanımı veya bulonlara uygulanan öneçekme kuvvetlerinden büyük olanına eşit olmaktadır (denklem 2.9). Bulonlara uygulanan öneçekme kuvvetinin kaldırma kuvveti etkisinde bulon çekme dayanımından büyük olması durumunda, levhalar birbirinden ayrılmayacağından kaldırma kuvveti oluşmayacaktır.

$$P_{qi} = \max(P_t - Q_{\max,i}; T_b) \quad (2.9)$$

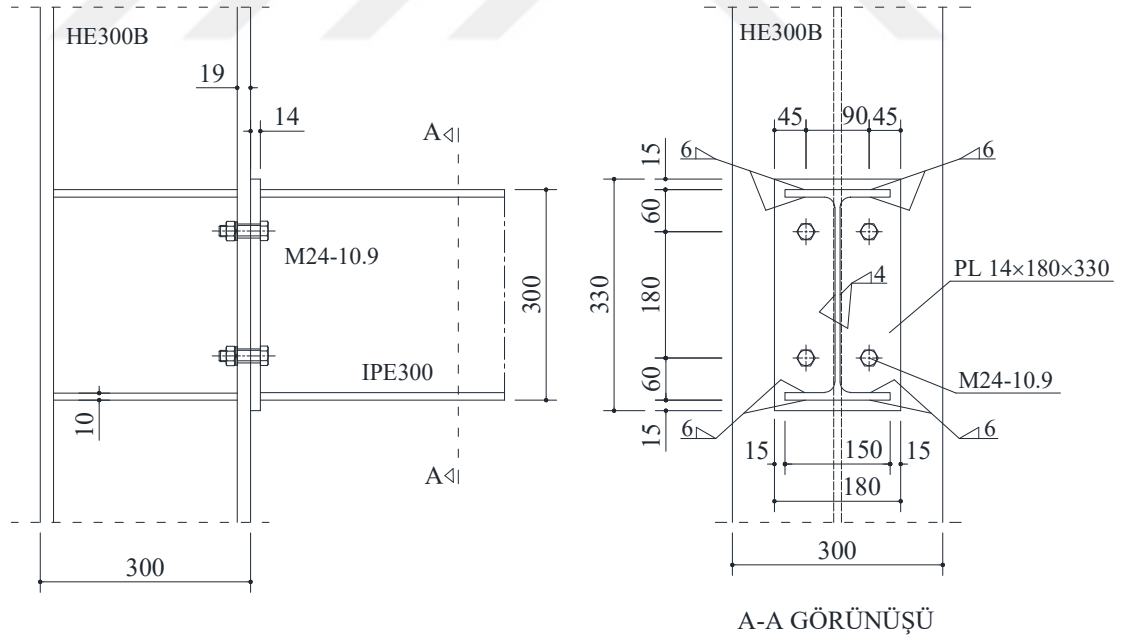
Birleşimin güvenli eğilme dayanımı, tüm bulon sıraları için elde edilen dayanımların birleştirilmesi ile denklem 2.10 kullanılarak hesaplanır.

$$\phi M_n = \phi_r M_q = \phi_r \sum \alpha_i P_{qi} n_i h_i \quad (2.10)$$

$\alpha_i$  parametresi bulon düzenine göre belirlenir ve bu çalışmadaki birleşimler için 1.0 alınacaktır.  $n_i$  aynı sırada bulunan bulon sayısını ifade etmektedir.  $\phi_r$  katsayısı 0.75 olarak alınır.

## 2.2 2-Bulonlu Kiriş-Kolon Birleşiminin (FEP-2B) Tasarımı

Bu bölümde IPE300-HE300B kiriş ve kolon kesitleri kullanılan, kiriş başlıkları başına tek yatay sırada iki bulon olacak şekilde, kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhali kiriş-kolon birleşiminin tasarım adımları gösterilmiştir. Tasarımda AISC 341-16 uyarınca Design Guide 39'da (2023) açıklanan ince levha tasarımı ve YDKT yaklaşımı kullanılmıştır. Tasarlanan birleşim için FEP-2B isimlendirilmesi kullanılacaktır. Birleşim detayı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.3 : FEP-2B birleşim detayı.**

Alın levhası kalınlığı 14 mm olarak seçilmiştir. Kolon panel bölgesi 10 mm kalınlığında süreklilik levhalarıyla desteklenmiştir. Tüm elemanlarda S275 sınıfı yapı çeliği kullanılmıştır. Alın levhası ile kiriş birleşimi için kiriş gövdesi ve başlığının her

iki tarafına sırasıyla 4 ve 6 mm kalınlıklı köşe kaynaklar Şekil 2.3'te gösterildiği gibi uygulanmıştır.

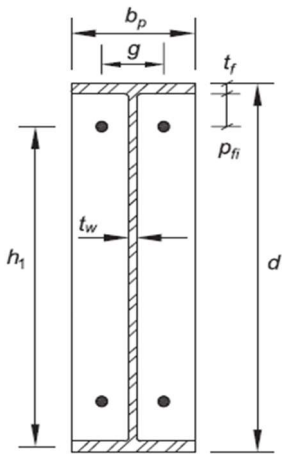
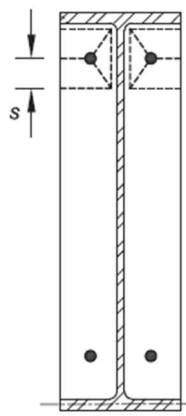
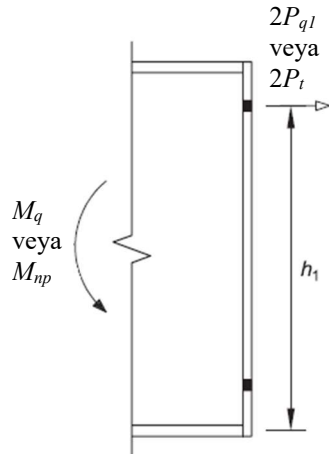
Bulon kopmasının birleşim dayanımında belirleyici olması gevrek göçmeye sebep olacağından 10.9 sınıfı yüksek dayanımlı bulonlar kullanılmıştır. Bulonlara uygulanan önçekme kuvvetinin büyüklüğü ÇYTHYE (2018) Tablo 13.6 uyarınca 247 kN olarak belirlenmiştir. Birleşimde standart dairesel bulon delikleri kullanılmıştır. Kiriş ve kolon profillerine ait gerekli enkesit özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1 : Kiriş ve kolon profillerinin enkesit özellikleri.**

| Profil  | d<br>(mm) | b <sub>f</sub><br>(mm) | t <sub>f</sub><br>(mm) | t <sub>w</sub><br>(mm) | A<br>(mm <sup>2</sup> ) | W <sub>px</sub><br>(cm <sup>4</sup> ) |
|---------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| HEB 300 | 300       | 300                    | 19                     | 11                     | 14910                   | 2683                                  |
| IPE 300 | 300       | 150                    | 10.7                   | 7.1                    | 5380                    | 628                                   |

Kiriş-kolon birleşimlerinin kısmi dayanımlı birleşim olarak sınıflandırılabilmesi için, birleşim dayanımının bağlanan zayıf elemanın (kiriş) eğilme kapasitesinin %25'inden yüksek dayanımda olması gerekmektedir. Bu sebeple FEP-2B birleşiminin tasarlanmasında gerekli eğilme momenti değeri  $M_u$ , kirişin olası plastik eğilme moment kapasitesinin %25'i olarak belirlenmiştir. Birleşim tasarımında kullanılacak geometrik parametreler ve bulon kuvvet modeli Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.2 : 2-Bulonlu birleşim tasarımında kullanılacak parametreler (Murray ve Eatherton, 2023).**

| Birleşim Geometrisi                                                                 | Akma Çizgileri                                                                      | Bulon Kuvvet Modeli                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |

Birleşim tasarımında kullanılacak geometrik parametreler aşağıda gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$p_{fi} = 60 - 10.7 = 49.3 \text{ mm}$$

$$h_1 = d - \frac{3}{2}t_{bf} - p_{fi} = 300 - \frac{3}{2}10.7 - 49.3 = 234.65 \text{ mm}$$

Akma çizgisi düşey uzunluğu ( $s$ ) denklem 2.1 ile elde edilir.

$$s = \frac{1}{2}\sqrt{180 \times 90} = 63.64 \text{ mm}$$

Akma çizgileri yöntemi için kullanılacak  $Y_p$  parametresi 2-bulonlu birleşim için denklem 2.2 ile hesaplanır.

$$Y_p = \frac{180}{2} \left[ 234.65 \left( \frac{1}{49.3} + \frac{1}{63.64} \right) \right] + \frac{2}{90} [234.65(49.3 + 63.64)] = 1349.13 \text{ mm}$$

IPE300 kirişi için plastik mafsaldaki olası maksimum moment değerinin elde edilmesinde TBDY (2018) Bölüm 9.B.1.4'te gösterilen denklem 2.12 kullanılır.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y W_{px} \quad (2.12)$$

Burada  $R_y$ , çeliğin olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranıdır. S275 çeliği için bu değer TBDY (2018) Tablo 9.2 kullanılarak 1.3 alınmıştır.  $C_{pr}$  değeri ise denklem 2.17 ile belirlenmiştir.

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} = \frac{275 + 430}{2 \times 275} = 1.28 > 1.2 \quad (2.13)$$

Hesaplanan  $C_{pr}$  değeri 1.2'yi aştığından denklemde  $C_{pr} = 1.2$  olarak dikkate alınmıştır. Bu katsayı, ön yeterliliği gösterilen tam dayanımlı kiriş-kolon birleşimlerini oluşturan kirişlerin beklenen eğilme momenti kapasitesi (TBDY, 2018) hesabında; pekleşmeyi, yerel dayanım artışlarını ve birleşim türüne göre olası diğer koşulları dikkate alan bir katsayı olarak uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında esas alınan birleşim tipleri için bu katsayının kullanılması ihmal edilebilir. Böylece gerekli birleşim dayanımı hesaplanırken daha ince bir levha kalınlığının kullanılması öngörülebilir.

Birleşim için belirlenen gerekli eğilme dayanımı ( $M_u$ ), olası plastik mafsallı dayanımının ( $M_{pr}$ ) %25'i olarak ele alınmıştır. Denklem 2.12 kullanılarak kirişin olası plastik eğilme momenti dayanımı hesaplanır.

$$M_{pr} = 1.2 \times 1.3 \times 275 \times 628 \times 10^3 \times 10^{-6} = 269.41 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0.25 \times 269.41 = 67.35 \text{ kNm}$$

Gerekli en düşük alın levhası kalınlığı denklem 2.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada alın levhasının akma dayanımı, S275 yapı çeliğinin olası akma dayanımı ( $R_y F_y = 357.5 \text{ MPa}$ ) olarak kullanılmıştır.

$$t_{p,reqd} = \sqrt{\frac{67.35 \times 10^6}{0.8 \times 0.9 \times 357.5 \times 1379.89}} = 13.93 \text{ mm} \leq t_p = 14 \text{ mm}$$

$C_{pr}$  katsayısının uygulanmaması halinde, birleşim için gerekli eğilme momenti dayanımı  $M_u = 56.13 \text{ kNm}$ , gerekli minimum levha kalınlığı ise  $t_{p,reqd} = 12.57 \text{ mm}$  olarak elde edilmektedir.

Bulon tasarımında göz önünde bulundurulacak sınır durum kaldırma kuvveti altında bulonların kopmasıdır. Kaldırma kuvvetlerinin hesaplanması için gerekli geometrik parametreler denklem 2.4 ile hesaplanır.

$$a_l = 91.95 \text{ mm} \left( \frac{14}{24} \right)^3 - 2.16 \text{ mm} = 16.09 \text{ mm}$$

$$b_l = p_{fi} = 49.3 \text{ mm}$$

Akma çizgilerinin etkin net genişliği ( $w'_1$ ) denklem 2.6 ile elde edilir.

$$w_l = \frac{b_p}{2} = \frac{180}{2} = 90 \text{ mm}$$

$$w'_l = w_l - d_h = 90 - (24 + 2 \text{ mm}) = 64 \text{ mm}$$

Alın levhası ve kirişin kaldırma şeklinde çalıştığı bulon çevresinde oluşacak  $F'_l$  kuvveti bir bulon sırası için denklem 2.7 kullanılarak hesaplanır.

$$F'_l = \frac{1}{49.3} \left[ \frac{14^2 (357.5)}{4} (0.85 \times 90 + 0.8 \times 64) + \frac{\pi \times 24^3 (750)}{32} \right] 10^{-3} = 66.02 \text{ kN}$$

Bulonlara etki eden kaldırma kuvveti büyüklüğü denklem 2.8 ile elde edilir.

$$Q_{max,l} = \frac{64 \times 14^2}{4 \times 16.09} \sqrt{357.5^2 - 3 \left( \frac{66.02 \times 10^3}{64 \times 14} \right)^2} \times 10^{-3} = 65.08 \text{ kN}$$

Kaldırma kuvvetlerinin bulonlarda çekme dayanımını azaltıcı etkisi ele alınmalıdır. Bir adet M22-10.9 bulonun karakteristik çekme dayanımı aşağıda gösterilmiştir.

$$P_t = A_b F_{nt} = \frac{\pi 24^2}{4} (0.75 \times 1000) \times 10^{-3} = 339.29 \text{ kN}$$

Birleşimdeki bulonların dayanımı, denklem 2.9 kullanılarak, kaldırma kuvveti etkisinde bulonların kopma dayanımı ve bulonlara uygulanan öneçekme kuvvetlerinden büyük olanına eşit olmaktadır. M24-10.9 bulonlar için ÇYTHYE (2018) Tablo 13'te belirtilen bulon öneçekme değeri 247 kN olarak verilmiştir.

$$P_{qI} = \max(339.29 - 65.08 = 274.24; 247) = 274.21 \text{ kN}$$

Çekme kuvveti altındaki bulon sırası için güvenli eğilme dayanımı, kaldırma kuvveti etkisinde bulonların kopma dayanımı göz önüne alınarak denklem 2.10 ile hesaplanır.

$$M_q = 1.0 \times 274.21 \times 2 \times 234.65 \times 10^{-3} = 128.69 \text{ kNm}$$

$$\phi M_q = 0.75 \times 128.69 = 96.52 \text{ kNm}$$

Alın levhasında akma sınır durumu için güvenli birleşim dayanımı denklem 2.1 ile hesaplanır.

$$\phi_b M_{pl} = 0.9 \times 357.5 \times 14^2 \times 1349.13 \times 10^{-3} = 85.08 \text{ kNm} < \phi M_q = 96.52 \text{ kNm}$$

Birleşim dayanımı alın levhasında akma sınır durumu belirleyici olmaktadır.

$$\phi M_n = \phi_b M_{pl} = 85.08 \text{ kNm}$$

Birleşim dayanımının kirişte oluşacak olası plastik mafsallara oranı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{\phi M_n}{M_{pr}} = \frac{85.08}{269.41} = \% 31.58$$

Bu değer %25'in üzerinde olduğundan birleşim kısmi dayanımlı olarak sınıflandırılır. Plastik mafsalda oluşacak oluşan moment değeri kullanılarak kolon yüzünde kesme kuvveti TBDY (2018) uyarınca aşağıdaki gibi elde edilmektedir. Plastik mafsallarda alın levhasında oluşacağından kesme kuvvetinden kaynaklanan ilave eğilme momenti oluşmayacaktır. Dolayısıyla kesme kuvveti hesaplanırken kullanılacak denklem aşağıdaki şekildedir.

$$V_{uc} = \frac{M_{pr} + M_{pr}}{L} \quad (2.14)$$

Kiriş uzunluğu 6.0 metre varsayılarak  $V_{uc}$  kesme kuvveti aşağıda hesaplanmıştır.

$$V_{uc} = \frac{2 \times 269.41}{6} = 89.80 \text{ kN}$$

Birleşime etki eden kesme kuvvetinin basınç bölgesindeki bulonlar tarafından karşılanacağı varsayılacaktır. Bulonların dış açılmış gövde kesitinin kayma düzlemi içinde olduğu göz önüne alınmıştır. Bulon deliklerinde yırtılma sınır durumu belirleyici olmayacağından hesaplanmasına gerek yoktur.

Basınç bölgesindeki bir M24-10.9 bulonun karakteristik kesme dayanımı;

$$R_{n,v} = F_{nv} A_b = 0.45 \times 1000 \times \frac{\pi \times 24^2}{4} \times 10^{-3} = 203.58 \text{ kN}$$

Alın levhasında bulon deliklerinin ezilme dayanımı;

$$R_{n,ovl} = 2.4 d_b t_p F_u = 2.4 \times 24 \times 14 \times 430 \times 10^{-3} = 346.75 \text{ kN}$$

Basınç bölgesindeki bulonların güvenli kesme kuvveti dayanımı:

$$R_n = \min(R_{n,v}; R_{n,ovl}) = 203.58 \text{ kN}$$

$$\phi V_n = 0.75 \times (2 \times 203.58) = 305.37 \text{ kN} \geq V_u = 89.80 \text{ kN}$$

Kolonun yeterli eğilme dayanıma sahip olduğu varsayılmıştır. Alın levhası akma çizgileri için kullanılan hesap yöntemi kolon başlığı için de kullanılabilir. Bu durumda akma çizgisi parametresi  $Y_p$  değişiklik gösterecektir.

Eurocode EN 1993-1-8 (2005) Bölüm 6.4.2 uyarınca bulonlu alın levhalı birleşimlerin plastik analiz için yeterli dönme kapasitesine sahip olabilmesi ve gevrek kırılmanın önlenmesi aşağıda belirtilen iki koşula bağlıdır.

1. Alın levhası veya kolon başlığı birleşim dayanımında belirleyici olmalıdır.
2. Alın levhası kalınlığının aşağıdaki denklem ile hesaplanan değeri aşmaması gereklidir.

$$t_p \leq 0.36 \times d_b \sqrt{\frac{F_{ub}}{F_y}} \quad (2.15)$$

$$t_p = 14 \text{ mm} \leq 0.36 \times 24 \sqrt{\frac{1.1 \times 1000}{357.5}} = 15.16 \text{ mm} \quad \checkmark$$

Tasarlanan birleşim EN 1993-1-8 (2005) için gerekli her iki koşulu da sağlamaktadır.



**Çizelge 2.3 : 4-Bulonlu birleşim tasarımında kullanılacak parametreler (Murray ve Eatherton, 2023).**

| Birleşim Geometrisi | Akma Çizgileri                                                                                                             | Bulon Kuvvet Modeli                                                                                                                                 |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | <p>Bulon konumu 1<br/><math>\alpha_1=1.0</math></p> <p>Bulon konumu 2<br/><math>\alpha_1=1.0</math></p> <p>Dönme eksen</p> | <p><math>2P_{q1}</math> veya <math>2P_t</math><br/><math>2P_{q2}</math> veya <math>2P_t</math></p> <p><math>M_q</math> veya <math>M_{np}</math></p> |

Birleşim tasarımında kullanılacak geometrik parametrelerin hesabı aşağıdaki gibidir.

$$p_{fi} = 45 - 10.7 = 34.3 \text{ mm}$$

$$h_1 = d - \frac{3}{2}t_{bf} - p_{fi} = 300 - \frac{3}{2}10.7 - 34.3 = 249.65 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_1 - p_b = 249.65 - 70 = 179.65 \text{ mm}$$

İkinci bulon sırasından kiriş gövdesine paralel doğrultudaki akma çizgilerinin uzunluğu ( $s$ ) denklem 2.1 ile elde edilir.

$$s = \frac{1}{2}\sqrt{180 \times 90} = 63.64 \text{ mm}$$

4-Bulonlu birleşim için alın levhası akma çizgileri parametresi ( $Y_p$ ) denklem 2.3 ile elde edilir.

$$Y_p = \frac{180}{2} \left[ 249.65 \left( \frac{1}{34.3} \right) + 179.65 \left( \frac{1}{63.64} \right) \right] + \dots$$

$$\dots + \frac{2}{90} [249.65(34.3 + 0.75 \times 70) + 179.65(63.64 + 0.25 \times 70)] + \frac{90}{2} = \dots$$

$$\dots = 1759.60 \text{ mm}$$

Birleşim için belirlenen gerekli dayanım, IPE 300 kirişinde oluşacak plastik mafsaldaki eğilme momentinin %25'i olarak hesaplanmıştır.

$$M_u = 0.25 \times 269.41 = 67.35 \text{ kNm}$$

Birleşimde kullanılacak gerekli minimum alın levhası kalınlığı ( $t_{p,reqd}$ ) denklem 2.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$t_{p,reqd} = \sqrt{\frac{67.35 \times 10^6}{0.8 \times 0.9 \times 357.5 \times 1759.60}} = 12.19 \text{ mm} \leq t_p = 14 \text{ mm}$$

Birinci bulon sırası için akma çizgilerinin etkin net genişliği ( $w'_1$ ) denklem 2.6 ile elde edilir.

$$w_1 = \frac{b_p}{2} = \frac{180}{2} = 90 \text{ mm}$$

$$w'_1 = w_1 - (d_h) = 90 - (22 + 2) = 66 \text{ mm}$$

Akma çizgisi genişliği  $a$  değeri denklem 2.5 kullanılarak hesaplanır.

$$a_1 = a = 91.95 \text{ mm} \left( \frac{14}{22} \right)^3 - 2.16 \text{ mm} = 21.54 \text{ mm}$$

$$b_1 = p_{fi} = 34.3 \text{ mm}$$

Etkin T-kesitli eleman varsayımında birinci bulon sırası için oluşacak  $F'_1$  kuvveti denklem 2.7 kullanılarak hesaplanır.

$$F'_1 = \frac{1}{34.3} \left[ \frac{14^2(357.5)}{4} (0.85(90) + 0.8(66)) + \frac{\pi(22)^3 750}{32} \right] 10^{-3} = 88.89 \text{ kN}$$

1. Bulon sırasındaki bulonlara etki eden kaldırma kuvvetinin büyüklüğü denklem 2.8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Q_{max,1} = \frac{66 \times 14^2}{4 \times 21.54} \sqrt{357.5^2 - 3 \left( \frac{88.89 \times 10^3}{66 \times 14} \right)^2} = 47.50 \text{ kN}$$

Kaldırma kuvvetlerinin bulonlarda çekme dayanımını azaltıcı etkisi ele alınmalıdır. Bir adet M22-10.9 bulonun karakteristik çekme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_t = A_b F_{nt} = \frac{\pi 22^2}{4} (0.75 \times 1000) \times 10^{-3} = 285.10 \text{ kN}$$

ÇYTHYE (2018) Tablo 13.6 uyarınca M22-10.9 bulonlar için önçekme kuvveti  $T_b=212 \text{ kN}$  olarak kullanılmıştır. Kaldırma kuvvetleri göz önünde bulundurulduğunda birinci bulon sırasındaki bulonların çekme kuvveti dayanımı denklem 2.9 ile elde edilir.

$$P_{q1} = maks(285.10 - 47.50 = 237.60; 212) = 237.60 \text{ kN}$$

İkinci bulon sırasına etki eden kaldırma kuvvetinin büyüklüğü, birinci bulon sırasına benzer şekilde hesaplanacaktır. Akma çizgileri ile ilgili geometrik parametrelerin hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$w_2 = \frac{p_b}{2} + s = \frac{70}{2} + 63.64 = 98.64 \text{ mm}$$

$$w'_2 = w_2 - d_h = 98.64 - (22 + 2) = 74.64 \text{ mm}$$

$$a_2 = \min\left(a; \frac{b_p - g}{2}\right) = \min\left(21.54; \frac{180 - 90}{2} = 45\right) = 21.54 \text{ mm}$$

$$b_2 = \frac{g - t_w}{2} = \frac{90 - 7.1}{2} = 41.45 \text{ mm}$$

Etkin T-kesitli eleman varsayımında ikinci bulon sırası için  $F'_2$  kuvvetinin büyüklüğü denklem 2.7 kullanılarak hesaplanır.

$$F'_2 = \frac{1}{41.45} \left[ \frac{14^2(357.5)}{4} (0.85 \times 98.64 + 0.8 \times 74.64) + \frac{\pi(22)^3 750}{32} \right] 10^{-3} = 79.58 \text{ kN}$$

İkinci bulon sırasına etki edecek en büyük kaldırma kuvvetinin büyüklüğü denklem 2.8 ile hesaplanır.

$$Q_{max,2} = \frac{74.64 \times 14^2}{4 \times 21.54} \sqrt{357.5^2 - 3 \left( \frac{79.58 \times 10^3}{74.64 \times 14} \right)^2} \times 10^{-3} = 56.43 \text{ kN}$$

Kaldırma kuvvetleri göz önünde bulundurulduğunda ikinci bulon sırasındaki bulonların çekme dayanımı denklem 2.9 ile elde edilir.

$$P_{q2} = \max(285.10 - 56.43 = 228.67; 212) = 228.67 \text{ kN}$$

Kaldırma kuvvetleri etkisinde bulon kopması için eğilme dayanımı denklem 2.10 kullanılarak hesaplanır.

$$M_q = [1(237.60)(2)(249.65) + 1(228.67)(2)(179.65)] 10^{-3} = 200.80 \text{ kNm}$$

$$\phi M_q = 0.75(200.80) = 150.60 \text{ kNm}$$

Alın levhasında akma sınır durumu için güvenli dayanım denklem 2.1 ile hesaplanır.

$$\phi_b M_{pl} = 0.9 \times 357.5 \times 14^2 \times 1759.60 \times 10^{-3} = 110.97 \text{ kNm} < \phi M_q = 150.60 \text{ kNm}$$

Birleşim dayanımı alın levhasında akma sınır durumu ile belirlenmiştir.

$$\phi M_n = \phi_b M_{pl} = 110.97 \text{ kNm}$$

Birleşim dayanımının kiriş olası plastik mafsallık dayanımına oranı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{\phi M_n}{M_{pr}} = \frac{110.97}{269.41} = \% 41.19$$

Bu değer %25'in üzerinde olduğundan birleşim kısmi dayanımlı olarak sınıflandırılır.

Kesme kuvvetinin basınç bölgesindeki bulonlar tarafından karşılanacağı varsayılacaktır. Bulonların dış açılmış gövde kesitinin kayma düzlemi içinde olduğu varsayılmıştır.

Basınç bölgesindeki bir bulonun karakteristik kesme dayanımı;

$$R_{n,v} = F_{nv} A_b = 0.45 \times 1000 \times \frac{\pi \times 22^2}{4} \times 10^{-3} = 171.06 \text{ kN}$$

Alın levhası kalınlığı kolon başlık kalınlığından ince olduğundan bulon deliklerinin dayanımını alın levhası belirleyici olacaktır. Bulon deliğinin ezilme dayanımı;

$$R_{n,ovl} = 2.4 d_b t_p F_u = 2.4 \times 22 \times 14 \times 430 \times 10^{-3} = 317.86 \text{ kN}$$

Ara bulon deliklerinin yırtılma sınır durumu dayanımı;

$$R_{n,to} = 1.2 L_c t_p F_u = 1.2 \times (70 - 24) \times 14 \times 430 \times 10^{-3} = 332.30 \text{ kN}$$

Bulonlu birleşimin kritik ve tasarım kesme kuvveti dayanımı:

$$R_n = \min(R_{n,v}; R_{n,ovl}; R_{n,to}) = 171.06 \text{ kN}$$

$$\phi V_n = 0.75(4 \times 171.06) = 513.18 \text{ kN} \geq V_u = 89.80 \text{ kN}$$

Eurocode EN 1993-1-8 (2005) Bölüm 6.4.2 uyarınca bulonlu alın levhalı birleşimlerin plastik analiz için yeterli dönme kapasitesine sahip olabilmesi için gerekli koşullar;

1. Alın levhası birleşim dayanımında belirleyicidir.
2. Alın levhası kalınlığının denklem 2.15 ile hesaplanan kritik kalınlık değerini aşmaması gereklidir.

$$t_p = 14 \text{ mm} \leq 0.36 \times 22 \sqrt{\frac{1.1 \times 1000}{357.5}} = 13.90 \text{ mm}$$

Alın levhası kalınlığının kritik kalınlığı temsil ettiği düşünölmektedir. Dolayısıyla tasarlanan birleşim EN 1993-1-8 (2005) için gerekli her iki koşulu da sağlamaktadır.



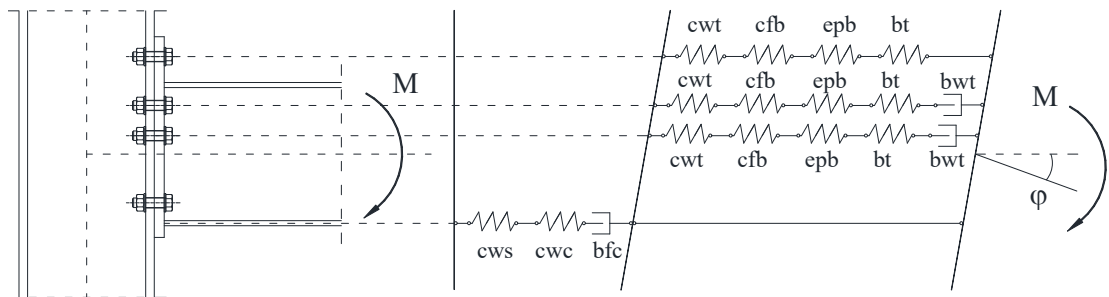
### 3. BİRLEŞİMLERİN BAŞLANGIÇ RİJİTLİKLERİNİN VE EĞİLME DAYANIMLARININ HESABI

#### 3.1 Birleşimlerin Başlangıç Rijitlikleri

Birleşimlerin başlangıç rijitliklerinin hesaplanmasında, Eurocode EN 1993-1-8 (2005) standardı kapsamındaki bileşen yöntemi (component method) kullanılmıştır. Bileşen yöntemi, birleşim elemanlarından elasto-plastik veya rijit yaylar şeklinde ele alındığı bir mekanik model oluşturulmasına dayalıdır. Oluşturulan mekanik modelde her bir elemanın birleşim rijitliğine katkısı ve eğilme kapasitesi hesaplanır. Sonrasında bu elemanların bir sistem halinde çalışması durumunda kiriş-kolon birleşiminin başlangıç rijitliği elde edilir. Alın levhali birleşimler için bileşen yönteminde dikkate alınan elemanlar;

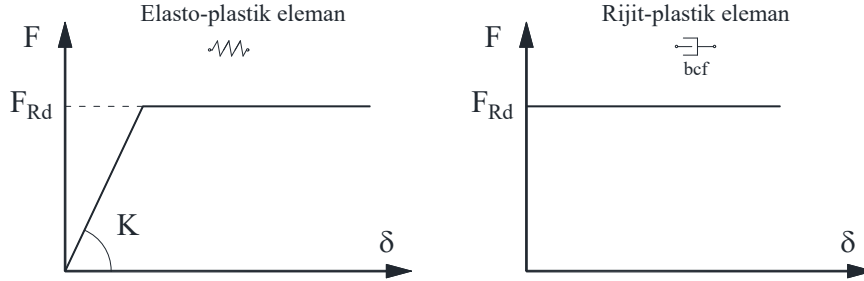
- Kolon gövdesinde kesme (CWS)
- Kolon gövdesinde çekme (CWT)
- Alın levhasında eğilme (EPB)
- Bulonlarda çekme (BT)
- Kiriş gövdesinde çekme (BWT)
- Kiriş başlığı ve gövdesinde basınç (BFC)
- Kolon gövdesinde basınç (CWC)

etkileri olarak sıralanmaktadır. Bu bileşenler ile oluşturulan mekanik model ve yay elemanları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Alın levhali birleşimlerin mekanik modeli.

Mekanik modelde basitleştirilen yay elemanlar arasında, sadece eğilme dayanımına etki eden etkiler rijit plastik yay elemanlar ile gösterilmiştir. Diğer elemanlar ise elasto-plastik yay eleman olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.2 :** Bileşen yönteminde ele alınan yay elemanlar.

Başlangıç rijitliği hesaplanırken dikkate alınmayan kiriş başlık ve gövdesinde basınç (BFC) etkisi ile kolon gövdesinde basınç (CWC) etkisi, eğilme kapasitesi hesaplanırken dikkate alınmaktadır.

Faella ve diğ. (1999) tarafından yazılan kitabın, birleşim elemanlarının etkileşimini daha detaylı şekilde hesaba katması ve Eurocode 1993-1-8 (2005) standardına kıyasla daha isabetli sonuç vermesi sebebiyle, bu çalışmada birleşimlerin başlangıç rijitlikleri hesaplanırken kitaptaki hesap adımları izlenmiştir.

Birleşimlerin başlangıç rijitliği hesaplanırken, aynı yatay hizada bulunan bulon grubunun efektif rijitliğine etki eden tüm elemanlar için eleman eksenel rijitliği hesaplanır. Tek doğrultuda eğilme etkisinde çekmeye çalışacak her bulon sırası için bu işlem uygulanmaktadır.

$$\frac{1}{K_i^*} = \frac{1}{K_{cwt,i}} + \frac{1}{K_{cfb,i}} + \frac{1}{K_{epb,i}} + \frac{1}{K_{bt,i}} \quad (3.1)$$

Aynı bulon grubu için eşdeğer toplam rijitlik katsayısı ( $K_t$ ) denklem 3.2 ile elde edilir.

$$K_t = \frac{\sum K_i^* h_i}{h_t} \quad (3.2)$$

Burada  $h_t$ , çekme kuvveti etkisindeki bulon grubu için eşdeğer kuvvet kolu uzaklığıdır ve denklem 3.3 ile hesaplanır.

$$h_t = \frac{\sum K_i^* h_i^2}{\sum K_i^* h_i} \quad (3.3)$$

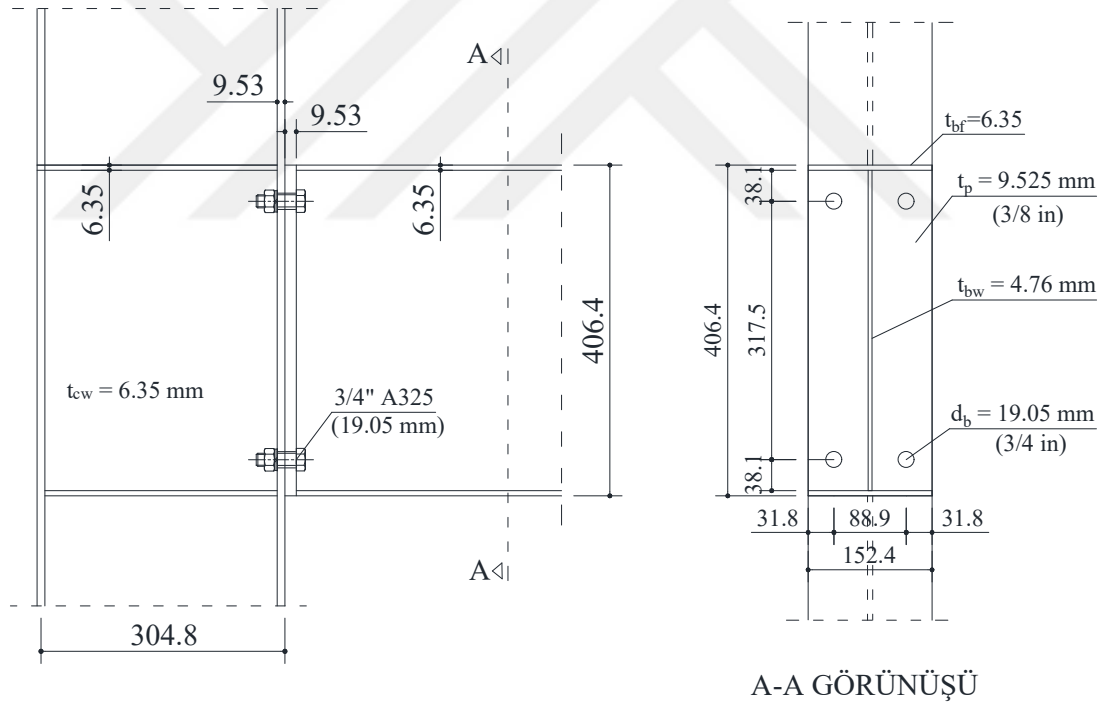
Kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhali birleşimlerin 2-bulonlu seçilmesi durumunda bulon sırası eşdeğer rijitliği ile eşit olmaktadır. Dolayısıyla  $K_1^* = K_t$  halini alır.

Bulon grubundan bağımsız birleşim elemanlarının rijitlik katsayısı elde edilir ve tüm etkiler denklem 3.4 kullanılarak birleştirilir birleşimin başlangıç rijitliği ( $K_\phi$ ) elde edilir.

$$K_\phi = \frac{h_t^2}{\frac{1}{K_{cws}} + \frac{1}{K_{cwc}} + \frac{1}{K_t}} \quad (3.4)$$

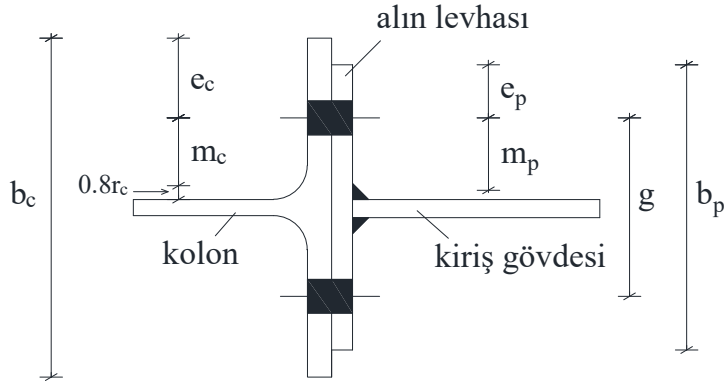
### 3.1.1 F1-3/4-3/8-16 numunesinin başlangıç rijitliği

Bu bölümde, referans alınan deneysel çalışmada kullanılan F1-3/4-3/8-16 birleşiminin başlangıç rijitliği bileşen yöntemi ile hesaplanacaktır. Birleşimin geometrik detayı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.3 :** Deneyde kullanılan birleşim detayı.

Birleşim başlangıç rijitliği hesaplanırken kiriş üst başlığının altındaki bulon sırasının etkin rijitliği dikkate alınacaktır. Kiriş gödesi, alın levhası ve kolon başlığı ile ilgili geometrik parametrelerin konumu Şekil 3.4 üzerinde gösterilmiştir.



**Şekil 3.4 : Kiriş-kolon-alın levhası birleşiminde geometrik parametreler.**

- **Kolon Başlığında Eğilme (CFB)**

Bulonların merkezi ile kolon başlığında bulunan, kolon gövdesine paralel yöndeki akma çizgileri arasındaki mesafe hesaplanır (denklem 3.5).

$$m_c = \frac{g}{2} - \frac{t_{cw}}{2} - 0.8\sqrt{2}a = \frac{88.9}{2} - \frac{6.35}{2} - 0.8 \times 6.35 \times \sqrt{2} = 34.09 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 kullanılarak etkin genişlik hesaplanır.

$$\begin{aligned} b_{eff,cfb,1} &= d_h + 2m_c = 31.75 + 2 \times 34.09 = 99.93 \text{ mm} \\ b_{eff,cfb,1} &= \frac{d_h}{2} + m_c + \frac{p}{2} = \frac{31.75}{2} + 34.09 + 317.5 = 208.72 \text{ mm} \\ b_{eff,cfb} &= \min(b_{eff,cfb,1} ; b_{eff,cfb,2}) = 99.93 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Öncekmeli bulonlar kullanıldığından, bölgede oluşan rijitlik artışı etkisi 1.0'dan büyük  $w_{cf}$  katsayısı ile arttırılmaktadır (denklem 3.7).

$$\omega_{cf} = 0.57 \left( \frac{t_{cf}}{d_b \sqrt{\frac{m_c}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{9.53}{19.05 \sqrt{\frac{34.09}{19.05}}} \right)^{-1.28} = 2.01 \geq 1.0 \quad (3.7)$$

Bu durumda eleman bazında eksenel rijitlik ( $K_{cfb}$ ) verilen denklem ile hesaplanır.

$$K_{cfb} = \omega_{cf} E \frac{0.5 b_{eff,cfb} t_{cf}^3}{m_c^3} = 2.01 \times 200000 \times \frac{0.5 \times 96.34 \times 9.53^3}{34.09^3} = 437859 \text{ N/mm} \quad (3.8)$$

- **Kolon Gövdesinde Çekme (CWT)**

Kolon gövdesi temiz uzunluğu aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$d_{cw} = h_c - 2(t_{cf} + \sqrt{2} a_c) = 304.8 - 2 \times (9.53 + \sqrt{2} \times 6.35) = 267.79 \text{ mm}$$

Faella ve diğ. (2000) kitabında Tablo 5.6'ya göre etkin genişlik değeri kolon başlığı için hesaplanan değer ile aynıdır ( $b_{eff,cwt} = b_{eff,cfb} = 99.93$  mm). Eleman eksenel rijitliği aşağıda gösterilen şekilde elde edilmektedir.

$$K_{cwt} = E \frac{b_{eff,cwt} t_{cw}}{d_{cw}} = 200000 \frac{99.93 \times 6.35}{267.79} = 473929 \text{ N/mm} \quad (3.9)$$

- **Alın Levhasında Eğilme (EPB)**

Bulonların eksenine ile alın levhası üzerinde, kiriş gövdesi doğrultusunda oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe hesaplanır.

$$m_{ep} = \frac{g}{2} - \frac{t_{bw}}{2} - 0.8a\sqrt{2} = \frac{88.9}{2} - \frac{4.76}{2} - 0.8 \times 6.35 \times \sqrt{2} = 34.88 \text{ mm} \quad (3.10)$$

Etkin genişlik Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6'da açıklanan aşağıdaki denklemler hesaplanır.

$$b_{eff,ep} = d_h + 2m_{ep} = 31.75 + 2 \times 34.88 = 101.52 \text{ mm}$$

$$b_{eff,ep2} = \frac{d_h}{2} + m_{ep} + \frac{p}{2} = \frac{31.75}{2} + 34.88 + \frac{317.5}{2} = 209.51 \text{ mm}$$

$$b_{eff1,ep} = \min[b_{eff,ep1} ; b_{eff,ep2}] = 101.52 \text{ mm}$$

Bulonlar ile kiriş başlığının iç tarafında oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe hesaplanır.

$$m_2 = p_f - 0.8a\sqrt{2} = 38.1 - 0.8 \times 6.35 \times \sqrt{2} = 24.57 \text{ mm}$$

Etkin genişlik Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 kullanılarak hesaplanır.

$$b_{eff,epb1} = d_h + 2m_2 = 31.75 + 2 \times 24.57 = 80.88 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb2} = d_h + m_2 + e_{ep} = 31.75 + 24.57 + 31.75 = 72.19 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb} = \min[b_{eff,epb1} ; b_{eff,epb2}] = 72.19 \text{ mm}$$

Bulonlara uygulanan öçekme sonucu elemanda oluşan rijitlik artışı etkisi  $w_{ef}$  katsayısı ile göz önüne alınır.

$$\omega_{ef1} = 0.57 \left( \frac{t_p}{d_b \sqrt{\frac{m_{ep}}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{9.53}{19.05 \sqrt{\frac{34.88}{19.05}}} \right)^{-1.28} \cong 2.039 \geq 1.0$$

$$\omega_{cf,2} = 0.57 \left( \frac{t_p}{d_b \sqrt{\frac{m_2}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{9.53}{19.05 \sqrt{\frac{24.57}{19.05}}} \right)^{-1.28} \cong 1.629 \geq 1.0$$

Eleman eksenel rijitliği denklem yardımıyla elde edilmektedir.

$$K_{ep} = \omega_{cf,1} E \frac{0.5b_{effl,ep} t_p^3}{m_{ep}^3} + \omega_{cf,2} E \frac{0.5b_{effl,ep} t_p^3}{m_2^3} = \dots \quad (3.15)$$

$$\dots = 200000(0.5) \left[ 2.039 \frac{(70.39)9.53^3}{34.88^3} + 1.629 \frac{(70.39)9.53^3}{24.57^3} \right] = 1106717 \text{ N/mm}$$

- **Bulonlarda Çekme (BT)**

Diş açılmış bulon enkesitlerinin çapı ve alanı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$d_{thr} = \sqrt{0.78} d_b = \sqrt{0.78} \times 19.05 = 16.82 \text{ mm}$$

$$A_{thr} = \frac{\pi d_{thr}^2}{4} = \frac{\pi \times 16.82^2}{4} = 222.32 \text{ mm}^2$$

Bulon başlığı ve somunların ortası arasındaki mesafe ( $L_b$ ) hesaplanırken, bulon başlığı ve somun kalınlıklarının yarısı ile alın levhası ve kolon başlığı kalınlıkları toplanır. Bu değerler sırasıyla 5/4in (31.75mm), 47/64in (18.65mm), 3/8in ve 3/8in (9.53mm) olarak belirlenmiştir.

$$L_b = \frac{t_{head}}{2} + \frac{t_{nut}}{2} + t_p + t_{cf} = \frac{31.75}{2} + \frac{18.65}{2} + 9.53 + 9.53 = 44.25 \text{ mm}$$

Eleman eksenel rijitliği verilen denklem ile elde edilir.

$$K_b = 1.6 \frac{EA_{thr}}{L_b} = 1.6 \times \frac{200000 \times 222.32}{44.25} = 1607666 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

- **1. Bulon sırası eşdeğer rijitliği**

1. Bulon sırası eşdeğer rijitliği ( $K_1^*$ ), denklem 3.1 kullanılarak hesaplanır.

$$K_1^* = \frac{1}{\frac{1}{437859} + \frac{1}{473929} + \frac{1}{1106717} + \frac{1}{1607666}} = 168935 \text{ N/mm}$$

Birleşimde çekme kuvveti altında tek bulon sırası bulunduğundan, bulonları eşdeğer toplam rijitliği ( $K_t$ ), 1. bulon sırası rijitliğine eşit olacaktır.

$$K_t = K_1^* = 168935 \text{ N/mm}$$

- **Kolon gövdesinde kesme (CWS)**

Kesme kuvveti etkisindeki kolon gövde alanı aşağıdaki hesaplanır.

$$A_{vc} = t_{cw}(d_c - 2t_{cf}) = 6.35(304.8 - 2 \times 6.35) = 1814.51 \text{ mm}^2$$

Kolon gövdesinde kesme kuvvetinin olumlu etkisi 1.0'dan küçük  $\beta$  katsayısı ile göz önüne alınabilir. Güvenli bir yaklaşım ile bu katsayı 1.0 olarak kabul edilebilir.

$$\beta = 1 - \frac{h_1}{L_c} = 1 - \frac{365.13}{3500} = 0.878 \quad (3.19)$$

Kolon uzunluğunu temsil eden  $L_c$  deneysel çalışmada yaklaşık 3.5 m olarak verilmiştir. Eleman eksenel rijitliği aşağıda verilen denklem kullanılarak elde edilmektedir.

$$K_{cws} = E \frac{0.38A_{vc}}{\beta h_1} = 200000 \times \frac{0.38 \times 1814.51}{0.878(365.13)} = 430025 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

- **Kolon gövdesinde basınç (CWC)**

Kolon gövdesinde basınç etkisi için etkin genişlik verilen denklem ile elde edilir.

$$k_c = t_{cf} + \sqrt{2}a = 6.35 + \sqrt{2} \times 6.35 = 18.51 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cwc} = t_{bf} + 2\sqrt{2}a + 2k_c = 10.9 + 2\sqrt{2} \times 6 + 2 \times 18.51 = 267.79 \text{ mm}$$

Eleman eksenel rijitliği hesaplanır.

$$K_{cwc} = E \frac{b_{eff,cwc}t_{cw}}{d_{wc}} = 200000 \frac{267.79 \times 6.35}{267.79} = 305874 \text{ N/mm}$$

Son olarak birleşimin başlangıç rijitliği verilen denklem yardımı ile hesaplanır.

$$K_{\phi} = \frac{d_l^2}{\frac{1}{K_{cws}} + \frac{1}{K_t} + \frac{1}{K_{cwc}}} = \frac{365.13^2}{\frac{1}{430025} + \frac{1}{168935} + \frac{1}{305874}} = 11578.40 \text{ kN} \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

Kiriş enkesiti için hesaplanan rijitlik değeri aşağıda gösterilmiştir.

$$S_b = 6E_b I_b / L = 6 \times 200000 \times 101668798 / 3500 \times 10^{-6} = 34857.84 \text{ kNm/rad}$$

### 3.1.2 FEP-2B birleşiminin başlangıç rijitliği

Bu bölümde, FEP-2B birleşiminin başlangıç rijitliği bileşen yöntemi kullanılarak hesaplanacaktır.

- **Kolon başlığında eğilme (CFB) etkisi**

Bulonların merkezi ile kolon başlığında bulunan, kolon gövdesine paralel yöndeki akma çizgileri arasındaki mesafe hesaplanır.

$$m_c = \frac{g}{2} - \frac{t_{cw}}{2} - 0.8r_c = \frac{90}{2} - \frac{11}{2} - 0.8 \times 27 = 17.9 \text{ mm}$$

Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 kullanılarak etkin genişlik hesaplanır.

$$b_{eff,cfb,1} = d_h + 2m_c = 32 + 2 \times 17.9 = 67.8 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cfb,2} = \frac{d_h}{2} + m_c + \frac{p}{2} = \frac{32}{2} + 17.9 + \frac{180}{2} = 123.9 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cfb} = \min(b_{eff,cfb,1}; b_{eff,cfb,2}) = 67.8 \text{ mm}$$

Bulonlar ile süreklilik levhalarının iç tarafında oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe hesaplanır.

$$m_2 = p_f - t_s - a_s\sqrt{2} = 60 - 10 - 5\sqrt{2} = 42.93 \text{ mm}$$

Etkin genişlik Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 kullanılarak hesaplanır.

$$b_{eff2,ep1} = d_h + 2m_2 = 32 + 2 \times 42.93 = 117.86 \text{ mm}$$

$$b_{eff2,ep} = \frac{d_h}{2} + m_2 + e_c = \frac{32}{2} + 42.93 + 105 = 163.93 \text{ mm}$$

$$b_{eff2,ep} = \min[b_{eff2,ep} ; b_{eff2,ep} ] = 117.86 \text{ mm}$$

Öncekmeli bulonlar kullanıldığından, bölgede oluşan rijitlik artışı etkisi (1.0'dan büyük)  $w_{cf}$  katsayısı ile arttırılmaktadır. Bu etki her iki doğrultu için göz önüne alınmaktadır.

$$\omega_{cf} = 0.57 \left( \frac{t_{cf}}{d_b \sqrt{\frac{m_c}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{19}{24 \sqrt{\frac{17.9}{24}}} \right)^{-1.28} \cong 0.637 < 1.0 \rightarrow \omega_{cf} = 1.0$$

$$\omega_{cf} = 0.57 \left( \frac{t_{cf}}{d_b \sqrt{\frac{m_2}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{19}{24 \sqrt{\frac{42.93}{24}}} \right)^{-1.28} \cong 1.115 > 1.0$$

Eleman eksenel rijitliği verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$K_{cfb} = \omega_{cf,1} E \frac{0.5b_{eff,cfb,1} t_{cf}^3}{m_c^3} + \omega_{cf,2} E \frac{0.5b_{eff,cfb,2} t_{cf}^3}{m_2^3} = \dots$$

$$\dots = 200000 \times (1.0 \frac{0.5(67.80)19^3}{17.9^3} + 1.115 \frac{0.5(117.86)19^3}{42.93^3}) = 9247852 \text{ N/mm}$$

- **Kolon gövdesinde çekme (CWT) etkisi**

Kolon gövdesi temiz uzunluğu aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$d_{cw} = h_c - 2(t_{cf} + r_c) = 208 \text{ mm}$$

Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6'ya göre etkin genişlik değeri kolon başlığı için hesaplanan değeri ile aynıdır ( $b_{eff,cwt} = b_{eff,cfb} = 67.8 \text{ mm}$ ).

Eleman eksenel rijitliği aşağıda gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$K_{cwt} = E \frac{b_{eff,cwt} t_{cw}}{d_{cw}} = 200000 \times \frac{67.8 \times 11}{208} = 717115 \text{ N/mm}$$

- **Alın levhasında eğilme (EPB) etkisi**

Bulonların eksenini ile alın levhası üzerinde, kiriş gövdesi doğrultusunda oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe hesaplanır.

$$m_{ep} = \frac{g}{2} - \frac{t_{bw}}{2} - 0.8a_w \sqrt{2} = \frac{90}{2} - \frac{7.1}{2} - 0.8 \times 4 \sqrt{2} = 36.92 \text{ mm}$$

Etkin genişlik Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 üzerinde açıklanan aşağıdaki denklemler hesaplanır.

$$b_{eff,ep1} = d_h + 2m_{ep} = 32 + 2 \times 36.92 = 105.85 \text{ mm}$$

$$b_{eff,ep} = \frac{d_h}{2} + m_{ep} + \frac{p}{2} = \frac{32}{2} + 36.92 + \frac{180}{2} = 142.92 \text{ mm}$$

$$b_{eff1,ep} = \min[b_{eff,ep1} ; b_{eff,ep} ] = 105.85 \text{ mm}$$

Bulonlar ile kiriş başlığının iç tarafında oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe hesaplanır.

$$m_2 = p_f - 0.8a \sqrt{2} = 49.3 - 0.8 \times 6 \times \sqrt{2} = 42.51 \text{ mm}$$

Etkin genişlik Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 kullanılarak hesaplanır.

$$b_{eff2,ep1} = d_h + 2m_2 = 32 + 2 \times 42.51 = 117.02 \text{ mm}$$

$$b_{eff2,ep2} = \frac{d_h}{2} + m_2 + e_{ep} = \frac{32}{2} + 42.51 + 45 = 103.51 \text{ mm}$$

$$b_{eff2,ep} = \min[b_{eff2,ep} ; b_{eff2,ep} ] = 103.51 \text{ mm}$$

Bulonlara uygulanan öneçkme sonucu elemanda oluşan rijitlik artışı etkisi  $w_{cf}$  katsayısı ile arttırılmaktadır. Alın levhasında düşey ve yatay doğrultuda olmak üzere iki yön için bu etki hesaplanır.

$$\omega_{cf1} = 0.57 \left( \frac{t_p}{d_b \sqrt{\frac{m_{ep}}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{14}{24 \sqrt{\frac{36.92}{24}}} \right)^{-1.28} \cong 1.497 \geq 1.0$$

$$\omega_{cf2} = 0.57 \left( \frac{t_p}{d_b \sqrt{\frac{m_2}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{14}{24 \sqrt{\frac{42.51}{24}}} \right)^{-1.28} \cong 1.638 \geq 1.0$$

Eleman eksenel rijitliği denklem yardımıyla elde edilmektedir.

$$K_{ep} = \omega_{cf1} E \frac{0.5b_{eff1,ep} t_p^3}{m_{ep}^3} + \omega_{cf2} E \frac{0.5b_{eff1,ep} t_p^3}{m_2^3} = \dots$$

$$\dots = 200000 \times (1.497 \frac{0.5(105.85)14^3}{36.92^3} + 1.638 \frac{0.5(103.51)14^3}{42.51^3}) = 1483099 \text{ N/mm}$$

- **Bulonlarda çekme (BT) etkisi**

Diş açılmış bulon enkesitlerinin çapı ve alanı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$d_{thr} = \sqrt{0.78} d_b = \sqrt{0.78} \times 24 = 21.19 \text{ mm}$$

$$A_{thr} = \frac{\pi d_{thr}^2}{4} = \frac{\pi \times 21.19^2}{4} = 352.86 \text{ mm}^2$$

Bulon başlığı ve somunların ortası arasındaki mesafe ( $L_b$ ) hesaplanırken, başlık ve somun kalınlıklarının yarısı ile alın levhası ve kolon başlığı kalınlıkları toplanır.

$$L_b = \frac{t_{head}}{2} + \frac{t_{nut}}{2} + t_p + t_{cf} = \frac{15}{2} + \frac{15}{2} + 14 + 19 = 48 \text{ mm}$$

Eleman eksenel rijitliği verilen denklem ile elde edilir.

$$K_b = E \frac{1.6A_{thr}}{L_b} = 200000 \times \frac{1.6 \times 352.86}{48} = 2352400 \text{ N/mm}$$

- **1. Bulon sırası eşdeğer rijitliği**

1. Bulon sırası eşdeğer rijitliği ( $K_I^*$ ), denklem 3.1 kullanılarak elde edilmektedir.

$$K_I^* = \frac{1}{\frac{1}{9247852} + \frac{1}{717115} + \frac{1}{1483099} + \frac{1}{2352400}} = 384324.9 \text{ N/mm}$$

Birleşimde çekme kuvveti altında tek bulon sırası bulunduğundan, bulonları eşdeğer toplam rijitliği ( $K_t$ ), 1. bulon sırası rijitliğine eşit olacaktır.

$$K_t = K_I^* = 384324.9 \text{ N/mm}$$

- **Kolon gövdesinde kesme (CWS) etkisi**

Kesme altındaki kolon gövdesi alanı aşağıdaki denklem ile hesaplanacaktır.

$$\begin{aligned} A_{vc} &= t_{cw}(d_c - 2t_{cf}) + t_{cf}(t_{cw} + 2r_c) + (2r_c)^2 - \pi r_c^2 = \dots \\ &= 11(300 - 2 \times 19) + 19(11 + 2 \times 27) + (2 \times 27)^2 - \pi \times 27^2 = 4742.78 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Kolon gövdesinde kesme etkisi için kullanılan  $\beta$  katsayısı güvenli bir yaklaşımla 1.0 olarak kabul edilmiştir. Eleman eksenel rijitliği denklem ile elde edilmektedir.

$$K_{cws} = 0.38 \frac{EA_{vc}}{\beta h_1} = 0.38 \frac{200000 \times 4742.78}{1.0 \times 234.65} = 1536123 \text{ N/mm}$$

- **Kolon gövdesinde basınç (CWC) etkisi**

Kolon gövdesinde basınç altında etkin genişlik denklem ile elde edilir.

$$b_{eff,cwc} = t_p + 2\sqrt{2}a + 2(t_{cf} + r_c) = 14 + 2\sqrt{2} \times 6 + 2(19 + 27) = 122.97 \text{ mm}$$

Eleman eksenel rijitliği ( $K_{cwc}$ ) aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$K_{cwc} = E \frac{b_{eff,cwc} t_{cw}}{d_{wc}} = 200000 \frac{122.97 \times 11}{208} = 1300644 \text{ N/mm}$$

FEP-2B birleşiminin başlangıç rijitliği, bulonların eşdeğer toplam rijitliği ve bulonlardan bağımsız eleman rijitliklerinin hesaba katılması ile denklem 2.80 kullanılarak hesaplanır.

$$K_\phi = \frac{234.65^2}{\frac{1}{384324.9} + \frac{1}{1536123} + \frac{1}{1300644}} = 13690.53 \text{ kNm/rad}$$

### 3.1.3 FEP-4B birleşiminin başlangıç rijitliği

4-Bulonlu birleşimde çekme etkisi altında iki bulon sırası bulunduğundan, çekme kuvveti etkisindeki birleşim bölgesinin eşdeğer rijitliği hesaplanmalıdır.

#### 1. Bulon sırası eşdeğer rijitliği

- **Kolon Başlığında Eğilme (CFB)**

Bulon eksenini ile kolon gövdesine paralel akma çizgisi arasındaki mesafe hesaplanır.

$$m_c = \frac{g}{2} - \frac{t_{cw}}{2} - 0.8r_c = \frac{90}{2} - \frac{11}{2} - 0.8 \times 27 = 17.90 \text{ mm}$$

Rijitleştirilmiş kolon başlığı için bulon sırasının etkin genişliği hesaplanır.

$$b_{eff,cfb,1} = d_h + 2m_c = 32 + 2 \times 17.90 = 67.8 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cfb,2} = \frac{d_h}{2} + m_c + \frac{p}{2} = \frac{32}{2} + 17.90 + \frac{70}{2} = 68.9 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cfb} = \min(b_{eff,cfb,1}; b_{eff,cfb,2}) = 67.8 \text{ mm}$$

Bulonların, süreklilik levhalarının iç tarafındaki akma çizgilerine mesafesi hesaplanır.

$$m_2 = p_f - t_s - 0.8a_s\sqrt{2} = 45 - 10 - 0.8 \times 5\sqrt{2} = 27.93 \text{ mm}$$

Etkin genişlik Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 kullanılarak hesaplanır.

$$b_{eff2,ep1} = d_h + 2m_2 = 32 + 2 \times 27.93 = 87.86 \text{ mm}$$

$$b_{eff2,ep2} = \frac{d_h}{2} + m_2 + e_c = \frac{32}{2} + 27.93 + 105 = 148.93 \text{ mm}$$

$$b_{eff,ep} = \min[b_{eff2,ep1}; b_{eff2,ep2}] = 87.86 \text{ mm}$$

Bulonlara uygulanan önçekme sonucu elemanda oluşan rijitlik artışı etkisi  $w_{cf}$  katsayısı ile arttırılmaktadır. Bu etki her iki doğrultu için göz önüne alınmaktadır.

$$\omega_{cf} = 0.57 \left( \frac{t_{cf}}{d_b \sqrt{\frac{m_c}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{19}{22 \sqrt{\frac{17.9}{22}}} \right)^{-1.28} \cong 0.603 < 1.0 \rightarrow \omega_{cf} = 1.0$$

$$\omega_{cf} = 0.57 \left( \frac{t_{cf}}{d_b \sqrt{\frac{m_2}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{19}{22 \sqrt{\frac{27.93}{22}}} \right)^{-1.28} \cong 0.801 < 1.0 \rightarrow \omega_{cf} = 1.0$$

Eleman eksenel rijitliği verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$K_{cfb} = \omega_{cf,1} E \frac{0.5b_{eff,cfb,1} t_{cf}^3}{m_c^3} + \omega_{cf,2} E \frac{0.5b_{eff,cfb,2} t_{cf}^3}{m_2^3} = \dots$$

$$\dots = 200000 \times (1.0 \frac{0.5(67.8)19^3}{17.90^3} + 1.0 \frac{0.5(87.86)19^3}{27.93^3}) = 10874247 \text{ N/mm}$$

- **Kolon G6vdesinde ekme (CWT)**

Kolon panel b6lgesi detayı FEP-2B birleşimi ile aynı olduğundan kolon g6vdesinde çekme etkisinin eleman rijitliği aynı olur.

$$K_{cwt} = 717115 \text{ N/mm}$$

- **Alın Levhasında Eğilme (EPB)**

Bulon eksenini ile alın levhası y6z6nde (kiriş g6vdesine paralel) oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe;

$$m_{ep} = \frac{g}{2} - \frac{t_{bw}}{2} - 0.8a\sqrt{2} = \frac{90}{2} - \frac{7.1}{2} - 0.8 \times 4\sqrt{2} = 36.92 \text{ mm}$$

Etkin genişlik Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 6zerinde açıklanan aşağıdaki denklemler hesaplanır.

$$b_{eff,ep1} = d_h + 2m_{ep} = 32 + 2 \times 36.92 = 105.85 \text{ mm}$$

$$b_{eff,ep2} = \frac{d_h}{2} + m_{ep} + \frac{p}{2} = \frac{32}{2} + 36.92 + \frac{70}{2} = 87.92 \text{ mm}$$

$$b_{eff1,ep} = \min[b_{eff,ep1} ; b_{eff,ep2}] = 87.92 \text{ mm}$$

Bulon eksenini ile alın levhası y6z6nde (kiriş başlığının altında, başlığa paralel) oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe;

$$m_2 = p_f - t_s - 0.8a\sqrt{2} = 45 - 10 - 0.8 \times 4\sqrt{2} = 27.51 \text{ mm}$$

Etkin genişlik Faella ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 kullanılarak hesaplanır.

$$b_{eff2,ep} = d_h + 2m_2 = 32 + 2 \times 27.51 = 87.02 \text{ mm}$$

$$b_{eff2,ep} = \frac{d_h}{2} + m_2 + e_{ep} = \frac{32}{2} + 27.51 + 45 = 88.51 \text{ mm}$$

$$b_{eff2,ep} = \min[b_{eff2,ep} ; b_{eff2,ep2}] = 87.02 \text{ mm}$$

Bulonlara uygulanan öñçekme sonucu elemenda oluşan rijitlik artışı etkisi  $w_{cf}$  katsayısı ile arttırılmaktadır. Alın levhasında düşey ve yatay doğrultuda olmak üzere iki yön için bu etki hesaplanır.

$$\omega_{cf,1} = 0.57 \left( \frac{t_p}{d_b \sqrt{\frac{m_{ep}}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{14}{22 \sqrt{\frac{36.92}{22}}} \right)^{-1.28} \cong 1.416 \geq 1.0$$

$$\omega_{cf,2} = 0.57 \left( \frac{t_p}{d_b \sqrt{\frac{m_2}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{14}{22 \sqrt{\frac{27.51}{22}}} \right)^{-1.28} \cong 1.173 \geq 1.0$$

Eleman eksenel rijitliğı denklem yardımıyla elde edilmektedir.

$$K_{ep} = \omega_{cf,1} E \frac{0.5b_{eff1,ep} t_p^3}{m_{ep}^3} + \omega_{cf,2} E \frac{0.5b_{eff2,ep} t_p^3}{m_2^3} = \dots$$

$$\dots = 200000 \times (1.416 \frac{0.5(86.79)14^3}{36.92^3} + 1.173 \frac{0.5(83.63)14^3}{27.51^3}) = 2023648 \text{ N/mm}$$

#### • Bulonlarda Çekme (BT)

M22-10.9 bulonlar için dış açılmış bulon enkesitinin çapı ve alanı hesaplanır.

$$d_{thr} = \sqrt{0.78} d_b = \sqrt{0.78} \times 22 = 19.43 \text{ mm}$$

$$A_{thr} = \frac{\pi d_{thr}^2}{4} = \frac{\pi \times 19.43^2}{4} = 296.50 \text{ mm}^2$$

$$L_b = \frac{15 + 15}{2} + 14 + 19 = 48 \text{ mm}$$

Eleman eksenel rijitliğı aşağıdaki denklem ile hesaplanır. Burada  $L_b$ ; bulon başliğı, somun kalınlığının yarısı, alın levhası ve kolon başliğı kalınlıklarının toplamıdır.

$$K_b = 1.6 \frac{EA_{thr}}{L_b} = 1.6 \times \frac{200000 \times 296.50}{48} = 1976666 \text{ N/mm}$$

#### • 1. Bulon sırası için eşdeğer rijitlik

1. Bulon sırası eşdeğer rijitliğı ( $K_1^*$ ), denklem 3.1 kullanılarak hesaplanır.

$$K_1^* = \frac{1}{\frac{1}{10874247} + \frac{1}{717115} + \frac{1}{2023648} + \frac{1}{1976666}} = 402173.8 \text{ N/mm}$$

## 2. Bulon sırası eşdeğer rijitliği

- **Kolon Başlığında Eğilme (CFB)**

Rijitleştirilmiş kolon başlığı için bulon sırasının efektif genişliği hesaplanır.

$$b_{eff,cfb,1} = d_h + 2m_c = 32 + 2 \times 17.90 = 67.8 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cfb,2} = \frac{d_h}{2} + m_c + \frac{p}{2} = \frac{32}{2} + 17.15 + \frac{70}{2} = 68.9 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cfb} = \min(b_{eff,cfb,1}; b_{eff,cfb,2}) = 67.8 \text{ mm}$$

Bulonlara uygulanan öçekme sonucu elemanda oluşan rijitlik artışı etkisi  $w_{cf}$  katsayısı ile arttırılır.

$$\omega_{cf} = 0.57 \left( \frac{t_{cf}}{d_b \sqrt{\frac{m_c}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.57 \left( \frac{19}{22 \sqrt{\frac{17.90}{22}}} \right)^{-1.28} \cong 0.603 < 1.0 \rightarrow \omega_{cf} = 1.0$$

Eleman eksenel rijitliği aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$K_{cfb} = \omega_{cf} E \frac{0.5 b_{eff,cfb} t_{cf}^3}{m_c^3} = 1.0 (200000) \frac{0.5 (67.8) 19^3}{17.9^3} = 8108329 \text{ N/mm}$$

- **Kolon Gövdesinde Çekme (CWT)**

Kolon gövdesinde çekme etkisi birinci ve ikinci bulon sırası için aynı şekildedir.

$$K_{cwt} = 717115 \text{ N/mm}$$

- **Alın Levhasında Eğilme (EPB)**

Bulonlar ile kiriş gövdesi bitişiğindeki akma çizgileri arasındaki mesafe hesaplanır.

$$m_{ep} = \frac{g}{2} - \frac{t_{bw}}{2} - 0.8a\sqrt{2} = \frac{90}{2} - \frac{7.1}{2} - 0.8 \times 4\sqrt{2} = 36.92 \text{ mm}$$

Etkin genişlik  $Fa_{ella}$  ve diğ. (2000) tarafından hazırlanan kitapta Tablo 5.6 üzerinde açıklanan aşağıdaki denklemler hesaplanır.

$$b_{eff,epb1} = d_h + 2m_{ep} = 32 + 2 \times 36.92 = 105.85 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb2} = \frac{d_h}{2} + m_{ep} + \frac{p}{2} = \frac{32}{2} + 36.92 + \frac{70}{2} = 87.92 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb} = \min[b_{eff,epb1}; b_{eff,epb2}] = 87.92 \text{ mm}$$

Eleman eksenel rijitliği denklem yardımı ile hesaplanır.  $\omega_{cf1} = 1.416$  değeri aynıdır.

$$K_{ep} = \omega_{cf} E \frac{0.5 b_{effep} t_p^3}{m_{ep}^3} = 1.416(200000) \frac{0.5(87.92)14^3}{36.92^3} = 678598 \text{ N/mm}$$

- **Bulonlarda Çekme (BT)**

Bulonlarda çekme etkisi birinci ve ikinci bulon sırası için aynı şekilde hesaplanır.

$$K_b = 1976666 \text{ N/mm}$$

- **2. Bulon sırası eşdeğer rijitliği**

2. Bulon sırası eşdeğer rijitliği ( $K_1^*$ ), denklem 3.1 kullanılarak hesaplanır.

$$K_2^* = \frac{1}{\frac{1}{8108329} + \frac{1}{717115} + \frac{1}{678598} + \frac{1}{1976666}} = 285932.6 \text{ N/mm}$$

Çekme kuvveti altındaki 2 bulon sırası için eşdeğer moment kolu hesaplanır.

$$h_t = \frac{K_1 h_1^2 + K_2 h_2^2}{K_1 h_1 + K_2 h_2} = \frac{402173.8 \times 249.65^2 + 285932.6 \times 179.65^2}{402173.8 \times 249.65 + 285932.6 \times 179.65} = 225.96 \text{ mm}$$

**1 ve 2. Bulon sıralarının grup halinde eşdeğer rijitliği**

Denklem 3.3 kullanılarak bulon grubu eşdeğer rijitliği hesaplanır.

$$K_t = \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2}{h_t} = \frac{409473.2 \times 249.65 + 293185.5 \times 179.65}{225.96} = 671676 \text{ N/mm}$$

- **Kolon gövdesinde kesme (CWS)**

Kolon gövdesinde kesme etkisi için kullanılan  $\beta$  katsayısı güvenli bir yaklaşımla 1.0 olarak kabul edilmiştir. Eleman eksenel rijitliği denklem ile elde edilmektedir.

$$K_{cws} = 0.38 \frac{EA_{vc}}{\beta h_1} = 0.38 \frac{200000 \times 4742.78}{1.0 \times 249.65} = 1443823 \text{ N/mm}$$

- **Kolon gövdesinde basınç (CWC)**

Kolon panel bölgesi detayı FEP-2B birleşimi ile aynı olduğundan kolon gövdesinde basınç etkisinin değeri aynı olur.

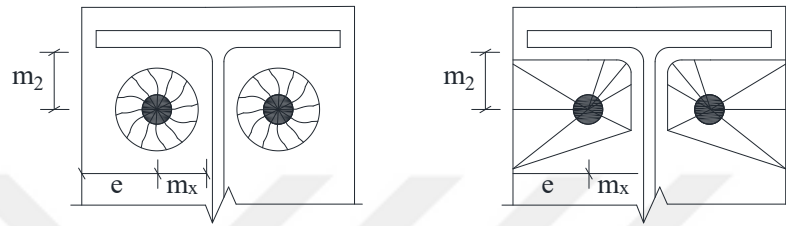
$$K_{cwc} = 1300644 \text{ N/mm}$$

Birleşimin başlangıç rijitliği denklem 3.4 ile hesaplanır.

$$K_\phi = \frac{225.96^2}{\frac{1}{671676} + \frac{1}{1443823} + \frac{1}{1300644}} = 17305.91 \text{ kNm/rad}$$

### 3.2 Birleşimlerin Eğilme Dayanımlarının Hesabı

Bu bölümde Eurocode EN 1993 1-8 (2005) kapsamında açıklanan bileşen yöntemi kullanılarak birleşimlerin moment kapasitesi hesaplanacaktır. 2-bulonlu birleşimlerde tek bulon sırası için bileşen dayanım hesaplanırken, 4-bulonlu birleşimler için ayrıca bulonların bulon grubu olarak çalıştığı iki farklı durum göz önüne alınmaktadır. Tekil bulon grubu için etkin genişlik ifadeleri dairesel ve dairesel olmayan kırılma çizgilerine göre (Şekil 3.5) Çizelge 3.1’de gösterilen şekilde hesaplanmaktadır.

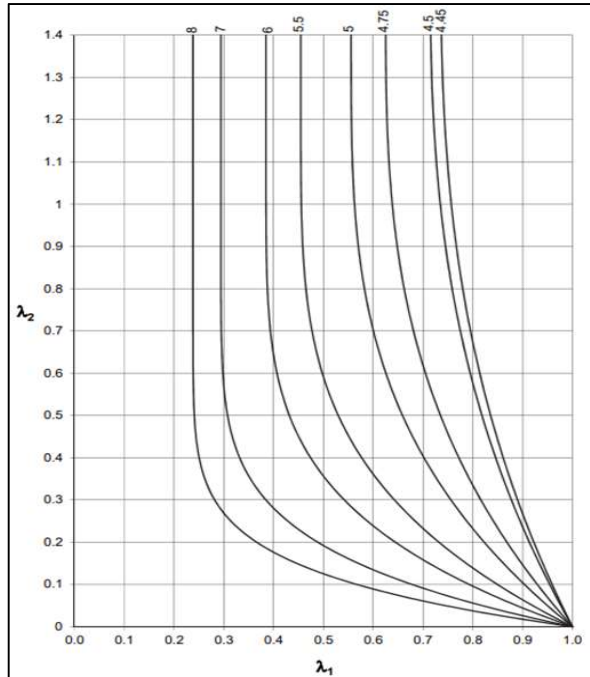


Şekil 3.5 : Dairesel ve dairesel olmayan deformasyon şekilleri.

Çizelge 3.1 : Tekil bulon sırası etkin genişliği.

| Kırılma şekli    | İç bulon     | Kolon ucundaki bulon                  | Levhaya bitişik bulon sırası |
|------------------|--------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Dairesel         | $2\pi m$     | $\min[2\pi m, \pi m + 2e_1]$          | $2\pi m$                     |
| Dairesel olmayan | $4m + 1.25e$ | $\min[4m + 1.25e, 2m + 0.625e + e_1]$ | $\alpha m$                   |

Denklem 3.8 ile hesaplanan  $\lambda$  katsayıları kullanılarak  $\alpha$  değeri Şekil 3.6 ile belirlenir.



Şekil 3.6 :  $\alpha$  katsayısı için kullanılan eğri (EN 1993-1-8, 2005).

Denklemdaki  $e_{ep}$  ve  $m_{ep}$  ifadeleri kolon başlığı için uyarlandığında  $e_c$  ve  $m_c$  halini alır.

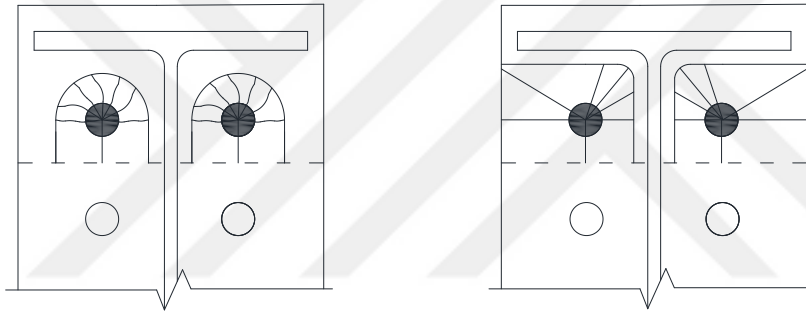
$$\lambda_1 = \frac{m_{ep}}{e_{ep} + m_{ep}} \quad ; \quad \lambda_2 = \frac{m_2}{e_{ep} + m_{ep}}$$

Bulonların grup halinde çalıştığı durum için ise etkin genişlik değerleri Çizelge 3.2 kullanılarak belirlenir.

**Çizelge 3.2 :** Grup halindeki bulonlar için etkin genişlikler.

| Kırılma şekli    | İç bulon | Kolon ucundaki bulon                  | Levhaya bitişik bulon sırası |
|------------------|----------|---------------------------------------|------------------------------|
| Dairesel         | $2p$     | $\min[2\pi m, \pi m + 2e_1]$          | $2\pi m$                     |
| Dairesel olmayan | $p$      | $\min[4m + 1.25e, 2m + 0.625e + e_1]$ | $\alpha m$                   |

Bulon grubunda oluşacak kırılma çizgileri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.7 :** Bulon grubunun dairesel ve dairesel olmayan deformasyon şekilleri.

Hesaplanan etkin genişlik değerleri kullanılarak her bileşen için dayanımlar hesaplanır. Sonrasında belirleyici dayanım elde edilir.

$$F_{Rd,min} = \min[F_{cws,Rd}, F_{cwc,Rd}, F_{cwt,Rd}, F_{cfb,Rd}, F_{cwsRd}] \quad (3.7)$$

Biren fazla bulon sırası için dayanım hesaplanırken, iç bulon sırası için dayanımda denklem 3.8 ile gösterilen şekilde belirlenir.

$$F_{Rd,min} = \min[F_{cws,Rd}, F_{cwc,Rd}, F_{cwt,Rd}, F_{cfb,Rd}, F_{cwsRd}] \quad (3.8)$$

Belirleyici dayanım her bulon sırası için hesaplandığında birleşimin moment kapasitesi ( $M_{j,Rd}$ ) denklem 3.6 ile hesaplanır.

$$M_{j,Rd} = \sum F_{i,Rd} h_i \quad (3.6)$$

Burada  $F_{i,Rd}$  Bölüm 3.1’de açıklanan bileşenler arasında göz önüne alınan bulon sırasındaki en düşük dayanımı,  $h_i$  ise bulon sırasının basınç merkezine uzaklığını temsil etmektedir.

### 3.2.1 F1-3/4-3/8-16 birleşiminin eğilme momenti dayanımı

- **Kolon gövdesinde kesme dayanımı (CWS)**

Kolon gövdesinde oluşacak kesme kuvvetini aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$V_{cws,Rd} = \frac{F_{ycw} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{496.42 \times 1814.51}{\sqrt{3} \times 1.0} = 520.63 \text{ kN} \quad (3.8)$$

Kolon gövdesinde kesme etkisi için kullanılan  $\beta$  katsayısı 0.878 olarak belirlenmiştir.

Bu durumda kolon gövdesinin kesme dayanımı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F_{cws,Rd} = \frac{V_{cws,Rd}}{\beta} = \frac{520.63}{0.878} = 592.78 \text{ kN} \quad (3.9)$$

- **Kolon gövdesinde basınç dayanımı (CWC)**

Ezilme etkili basınç dayanımı için etkin genişlik aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$s_p = 2t_p = 19.05 \text{ mm} \quad ; \quad k = t_{cf} + \sqrt{2}a = 9.53 + \sqrt{2} \times 6.35 = 18.51 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cwc} = t_{bf} + 2\sqrt{2}a + 5k + s_p = \dots$$

$$\dots = 6.35 + 2\sqrt{2}(6.35) + 5(18.51) + 19.05 = 135.89 \text{ mm}$$

Kesme kuvvetinin basınç dayanımına etkisini dikkate alan  $\rho$  katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır. Denklemden  $\xi = 0.8$  olarak verilmiştir.

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\beta^2 \xi^2 \left( \frac{b_{eff,cwc} t_{cw}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3(1.0)^2 (0.8)^2 \left( \frac{135.89 \times 6.35}{1814.51} \right)^2}} = 0.86$$

Ezilme etkili basınç dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$F_{cwc,Rd} = \frac{b_{eff,cwc} t_{cw} F_y \rho k_{cwc}}{\gamma_{M0}} = \frac{135.89(6.35)(496.42)(0.86)1.0}{1.0} = 370.74 \text{ kN}$$

Burkulma etkili basınç dayanımı için etkin genişlik aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$b'_{eff,cwc} = t_{bf} + 2\sqrt{2}a + 2 \left[ \xi \left( \frac{d_{wc} b_{cf}}{3t_{cw} t_{cf}} \right)^{\frac{1}{4}} \right] k + s_p \quad (3.10)$$

$$b'_{eff,cwc} = 6.35 + 2\sqrt{2} \times 6.35 + 2 \left[ 0.75 \left( \frac{267.79(152.4)}{3(6.35)(9.53)} \right)^{\frac{1}{4}} \right] 18.51 + 19.05$$

$$= 150.86 \text{ mm}$$

Elastik kritik yük ve boyutsuz narinlik oranı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_{cr} = \frac{\pi E t_{cw}^3}{3(1 - \nu^2) d_{wc}} = \frac{\pi \times 200000 \times 6.35^3}{3(1 - 0.3^2) 267.79} = 220.06 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\frac{b_{ef,cwc} t_{cw} F_{ycw}}{\gamma_{M0}}}{F_{cr}} = \frac{135.89 \times 6.35 \times \frac{496.42}{1.0}}{220.06} \cong 1.39 \quad (3.11)$$

$\bar{\lambda} = 1.39 > 0.67$  olduğundan;

$$F_{cwc,Rd} = \frac{b'_{eff,cwc} t_{cw} F_{ycw} \rho k_{cwc}}{\gamma_{M0}} = \frac{150.86(6.35)496.42(1.39)1.0}{1.0} = 475.54 \text{ kN}$$

$$F'_{cr} = F_{cwc,Rd} \left[ \frac{1}{\bar{\lambda}} \left( 1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}} \right) \right] = 475.54 \left[ \frac{1}{1.39} \left( 1 - \frac{0.22}{1.39} \right) \right] = 287.10 \text{ kN}$$

Kolon gövdesinde basınç dayanımını ezilme sınır durumu belirler.

$$F_{cwc,Rd} = \min(370.74 ; 287.10) = 287.10 \text{ kN}$$

- **Kiriş başlığı ve gövdesinde basınç dayanımı**

Kirişin eğilme dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$M_{b,Rd} = W_{pxb} F_y = 5.7169 \times 10^5 \times 417.82 \times 10^{-3} = 238.86 \text{ kNm}$$

Moment değerinin kuvvet koluna bölünmesiyle eksenel kuvvet dayanımı elde edilir.

$$F_{bf,Rd} = \frac{M_{b,Rd}}{d_b - t_{bf}} = \frac{238.86}{406.4 - 6.35} = 597.08 \text{ kN}$$

## 1. Bulon sırası dayanımı

- **Kolon başlığı eğilme dayanımı**

Etkin genişlik değeri Şekil 3.4'de gösterilen dairesel ve dairesel olmayan bulon deliği deformasyon şekillerine göre belirlenmektedir.

$$\lambda_1 = \frac{m_c}{e_c + m_c} = \frac{34.09}{31.75 + 34.09} = 0.518 ; \quad \lambda_2 = \frac{m_{c2}}{e_c + m_c} = \frac{38.1}{31.75 + 34.09} = 0.579$$

Şekil 3.5 kullanılarak  $\alpha$  katsayısı 5.4 olarak belirlenir ve etkin genişlik hesaplanır.

$$b_{eff,cfb,1} = 2\pi m_c = 2\pi \times 34.09 = 214.20 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb,2} = \alpha m_{2c} = 5.4 \times 38.1 = 205.74 \text{ mm}$$

1. mekanizma durumu için bileşen dayanımı ( $F_{cfbRd11}$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$b_{eff,cfb} = \min(b_{eff,cfb,1}; b_{eff,cfb,2}) = 205.74 \text{ mm}$$

$$M_{cf,Rd,1} = \frac{0.25 b_{eff,cfb} t_{cf}^2 F_{ycf}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 205.74 \times 397.14 \times 10^{-6}}{1.0} = 1.85 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,1} = \frac{4M_{cf,Rd,1}}{m_c} = \frac{4 \times 1.85 \times 10^3}{34.09} = 217.48 \text{ kN}$$

2. mekanizma durumu için bileşen dayanımı ( $F_{cfbRd12}$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$B_{rd} = \frac{0.9 A_{thr} F_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 222.32 \times 827.37 \times 10^{-3}}{1.25} = 132.44 \text{ kN}$$

$$M_{cf,Rd,2} = \frac{0.25 b_{eff,cfb,2} t_{cf}^2 F_{ycf}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.25(205.74)9.53^2(397.14)10^{-6}}{1.25} = 1.85 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,12} = \frac{2M_{cf,Rd,2} + 2B_{rd}n}{m_c + n} = \frac{2(1.85 \times 10^3) + 2(132.44)31.75}{34.09 + 31.75} = 184.03 \text{ kN}$$

3. mekanizma durumu için bileşen dayanımı ( $F_{cfbRd13}$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$F_{cfb,Rd,1,3} = 2B_{rd} = 2 \times 132.44 = 264.87 \text{ kN}$$

3. mekanizma durumu dayanımı kontrol etmektedir.

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{cfb,Rd,1,1}; F_{cfb,Rd,1,2}; F_{cfb,Rd,1,3}) = 184.03 \text{ kN}$$

- **Alın levhasının eğilme dayanımı**

Bulonlar ile alın levhası yüzünde, kiriş gövdesi ve başlığı doğrultusunda oluşan akma çizgileri arasındaki mesafeler sırasıyla  $m_{ep} = 34.88 \text{ mm}$  ve  $m_2 = 24.57 \text{ mm}$  olarak belirlenmiştir.

$$\lambda_1 = \frac{m_{ep}}{e_{ep} + m_{ep}} = \frac{34.88}{31.75 + 34.88} = 0.523 \quad ; \quad \lambda_2 = \frac{m_2}{e_{ep} + m_{ep}} = \frac{24.57}{31.75 + 34.88} = 0.369$$

Şekil 3.5 kullanılarak  $\alpha$  katsayısı 5.8 olarak belirlenir ve etkin genişlik hesaplanır.

$$b_{eff,epb,1} = 2\pi m_{ep} = 2\pi \times 34.88 = 219.19 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb,2} = \alpha m_{ep} = 5.8 \times 34.88 = 202.33 \text{ mm}$$

1. mekanizma durumu;

$$b_{eff,epb} = \min[b_{eff,epb,1} ; b_{eff,epb,2}] = 202.33 \text{ mm}$$

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 b_{eff,epb} t_p^2 F_{yp}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 202.33 \times 9.53^2 \times 369.63}{1.0} = 1.70 \text{ kNm}$$

$$F_{epb,Rd,1} = \frac{4M_{epb,Rd}}{m_{ep}} = \frac{4 \times 1.70 \times 10^3}{34.88} = 194.50 \text{ kN}$$

2. mekanizma durumu

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 b_{eff,epb2} t_p^2 F_{yp}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 202.33 \times 9.53^2 \times 369.63}{1.0} = 1.70 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,12} = \frac{2M_{cf,Rd} + 2B_{rd}n}{m_{ep} + n} = \frac{2(1.70 \times 10^3) + 2(132.44)31.75}{34.88 + 31.75} = 177.12 \text{ kN}$$

3. mekanizma durumu

$$F_{cfb,Rd,13} = 2B_{rd} = 2 \times 132.44 = 264.87 \text{ kN}$$

Alın levhası dayanımında 2. mekanizma durumu belirleyici olmuştur.

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{epb,Rd1}; F_{epb,Rd} ; F_{epb,Rd3}) = 177.12 \text{ kN}$$

- **Kolon gövdesinde çekme dayanımı**

Etkin genişlik değeri kolon başlığında eğilme için hesaplanan değer ile aynıdır ( $b_{eff,cwt}=b_{eff,cfb}=168.87 \text{ mm}$ ).  $\xi = 0.8$  olarak kabul edilir.

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\beta^2 \xi^2 \left( \frac{b_{eff,cwc} t_{cw}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3(1.0)^2 (0.8)^2 \left( \frac{205.74 \times 6.35}{1814.51} \right)^2}} = 0.75$$

Bu durumda eğilme dayanımı verilen denklem ile hesaplanır.

$$F_{cwt,Rd,1} = \frac{\rho b_{eff,cwt} t_{cw} F_{ycw}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.75 \times 205.74 \times 6.35 \times 496.42}{1.0} = 488.33 \text{ kN}$$

- **Çekme bulon sırasının eğilme dayanımı**

Belirleyici dayanım bulon grubunda bulunan en zayıf eleman ile belirlenir. Bu durumda alın levhasında eğilme dayanımı belirleyici olmuştur. Birleşim eğilme dayanımı belirleyici çekme dayanımının basınç merkezine olan mesafe ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$F_{t1,Rd} = \min(592.12; 287.29 ; 597.08 ; 184.03 ; 177.12; 488.33) = 177.12 \text{ kN}$$

$$M_{j,Rd} = F_{t1,Rd} d_1 = 177.12 \times 365.13 \times 10^{-3} = 64.67 \text{ kNm}$$

### 3.2.2 FEP-2B birleşiminin eğilme momenti dayanımı

- **Kolon gövdesinde kesme dayanımı**

Kolon gödesi kesme kuvveti dayanımı verilen denklem ile hesaplanır.

$$V_{cws,Rd} = \frac{F_y A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{357.5 \times 4742.78}{\sqrt{3} \times 1.0} = 978.92 \text{ kN}$$

Kesme kuvvetinin kolonda oluşturacağı olumlu etki 1.0'dan küçük  $\beta$  katsayısı ile göz önüne alınabilir. Güvenli bir yaklaşımla  $\beta = 1.0$  olarak belirlenmiştir.

$$F_{cws,Rd} = \frac{V_{cws,Rd}}{\beta} = \frac{978.92}{1.0} = 978.92 \text{ kN}$$

- **Kolon gövdesinde basınç dayanımı**

Ezilme etkili basınç dayanımı için etkin genişlik aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$s_p = 2t_p = 28 \text{ mm} ; \quad k = t_{cf} + r_c = 19 + 27 = 46 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cwc} = t_{bf} + 2\sqrt{2}a + 5k + s_p = 10.7 + 2\sqrt{2} \times 6 + 5 \times 46 + 28 = 285.67 \text{ mm}$$

Kesme etkisini dikkate alan  $\rho$  katsayısı hesaplanır.

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\beta^2 \xi^2 \left( \frac{b_{eff,cwc} t_{cw}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3(1.0)^2 (0.8)^2 \left( \frac{285.67 \times 11}{4742.78} \right)^2}} \cong 0.74$$

Ezilme etkili basınç dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$F_{cwc,Rd} = \frac{b_{eff,cwc} t_{cw} F_y \rho k_{cwc}}{\gamma_{M0}} = \frac{285.67 \times 11 \times 357.5 \times 0.74 \times 1.0}{1.0} = 827.54 \text{ kN}$$

Burkulma etkili basınç dayanımı için etkin genişlik aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$b'_{eff,cwc} = t_{bf} + 2\sqrt{2}a + 2 \left[ \xi \left( \frac{d_{wc} b_{cf}}{3t_{cw} t_{cf}} \right)^{\frac{1}{4}} \right] k + s_p$$

$$b'_{eff,cwc} = 10.7 + 2\sqrt{2} \times 6 + 2 \left[ 0.75 \left( \frac{208(150)}{3(11)(19)} \right)^{\frac{1}{4}} \right] 46 + 28 = 273.61 \text{ mm}$$

Elastik kritik yük ve birimsiz narinlik oranı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_{cr} = \frac{\pi E t_{cw}^3}{3(1 - \nu^2) d_{wc}} = \frac{\pi \times 200000 \times 11^3}{3(1 - 0.3^2) 208} = 1472.76 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{b_{ef,cwc} t_{cw} F_y / \gamma_{M0}}{F_{cr}} = \frac{273.61 \times 11 \times 357.5 / 1.0}{1472.76} \cong 0.87$$

$\bar{\lambda} = 0.87 > 0.67$  olduğundan;

$$F'_{cwc,Rd} = \frac{b'_{eff,cwc} t_{cw} F_y \rho k_{cwc}}{\gamma_{M0}} = \frac{273.61(11)(357.5)(0.87)(1.0)}{1.0} = 1075.96 \text{ kN}$$

$$F'_{cr} = F_{cwc,Rd} \left[ \frac{1}{\bar{\lambda}} \left( 1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}} \right) \right] = 1075.96 \left[ \frac{1}{0.87} \left( 1 - \frac{0.22}{0.87} \right) \right] = 921.63 \text{ kN}$$

Kolon gövdesinde basınç dayanımını ezilme sınır durumu belirler.

$$F_{cwc,Rd} = \min(827.54 ; 921.63) = 827.54 \text{ kN}$$

- **Kiriş başlığı ve gövdesinde basınç dayanımı**

IPE 300 kirişinin eğilme dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$M_{b,Rd} = W_{px,b} F_y = 628 \times 10^3 \times 357.5 \times 10^{-3} = 224.51 \text{ kNm}$$

Moment değerinin kuvvet koluna bölünmesiyle eksenel kuvvet dayanımı elde edilir.

$$F_{bfb,Rd} = \frac{M_{b,Rd}}{d_{beam} - t_{bf}} = \frac{224.51 \times 10^3}{300 - 10.7} = 776.04 \text{ kN}$$

## 1. Bulon sırası dayanımı

- **Kolon başlığı eğilme dayanımı**

Kolon başlığında bulunan süreklilik levhasına bitişik bulon sırası için etkin genişlik ( $b_{eff,cfb}$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanır.  $m_c = 17.9 \text{ mm}$  ve  $m_2 = 42.93 \text{ mm}$  olarak hesaplanmıştır.

$$b_{eff,cfb,1} = 2\pi m_c = 2\pi \times 17.9 = 112.47 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = \frac{m_c}{e_c + m_c} = \frac{17.9}{105 + 17.9} = 0.146 \quad ; \quad \lambda_1 = \frac{m_2}{e_c + m_c} = \frac{42.93}{105 + 17.9} = 0.349$$

Şekil 3.6 kullanılarak  $\alpha$  katsayısı belirlenir. Bulon eksenine ile kolon başlığı kenarına uzaklık yüksek olduğundan  $\alpha = 9.0$  olarak alınabilir. Etkin genişlik,  $n$  ve  $e_w$  parametreleri belirlenir. Burada  $d_w$  somun çapını temsil etmektedir.

$$b_{eff,cfb,2} = \alpha m_c = 9.0 \times 17.9 = 161.1 \text{ mm}$$

$$n = \min[e_c ; e_{ep} ; 1.25m_c] = \min[105 ; 45 ; 1.25 \times 17.9] = 22.38 \text{ mm}$$

$$e_w = \frac{d_w}{4} = \frac{30}{4} = 7.5 \text{ mm}$$

Mekanizma 1 dayanımı:

$$b_{eff,cfb} = \min(b_{eff,cfb,1} ; b_{eff,cfb,2}) = 112.47 \text{ mm}$$

$$M_{cf,Rd,1} = \frac{0.25 \sum b_{eff,cfb} t_{cf}^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 112.47 \times 19^2 \times 357.5}{1.0} = 3.63 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,1} = \frac{4 M_{cf,Rd,1}}{m_c} = \frac{4 \times 3.75 \times 10^3}{17.9} = 810.89 \text{ kN}$$

Mekanizma 2 dayanımı:

$$b_{eff,epb} = b_{eff,epb,2} = 212.32 \text{ mm}$$

$$B_{rd} = \frac{0.9 A_{thr} F_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 352.86 \times 275}{1.25} = 254.06 \text{ kN}$$

$$M_{cf,Rd,2} = \frac{0.25 \sum b_{eff,cfb,2} t_{cf}^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 154.35 \times 19^2 \times 275}{1.0} = 5.20 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,12} = \frac{2M_{cf,Rd,2} + 2B_{rd}n}{m_c + n} = \frac{2(5.20 \times 10^3) + 2(254.06)22.38}{17.9 + 22.38} = 540.41 \text{ kN}$$

Mekanizma 3 dayanımı:

$$F_{cfb,Rd,13} = 2B_{rd} = 2 \times 254.06 = 508.12 \text{ kN}$$

Mekanizma durumu 3 (bulonların kopması) dayanımı kontrol etmektedir.

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{cfb,Rd11}; F_{cfb,Rd12}; F_{cfb,Rd13}) = 508.12 \text{ kN}$$

- **Alın levhasının eğilme dayanımı**

Alın levhasında, bulonlar ile giriş gövdesi hizasındaki akma çizgileri arasındaki mesafe  $m_{ep} = 36.92 \text{ mm}$  ve giriş başlığının altında oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe  $m_2 = 43.64 \text{ mm}$  olarak belirlenmiştir.

$$\lambda_1 = \frac{m_{ep}}{e_{ep} + m_{ep}} = \frac{36.92}{45 + 36.92} = 0.450 \quad ; \quad \lambda_2 = \frac{m_2}{e_{ep} + m_{ep}} = \frac{43.64}{45 + 36.92} = 0.533$$

Şekil 3.5 kullanılarak  $\alpha = 5.9$  olarak belirlenir. Etkin genişlik değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$b_{eff,epb1} = 2\pi m_{ep} = 2\pi \times 36.92 = 232.00 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb2} = \alpha m_{ep} = 5.9 \times 36.92 = 217.85 \text{ mm}$$

Mekanizma 1 dayanımı:

$$b_{eff,epb} = \min[b_{eff,epb1} ; b_{eff,epb2}] = 217.85 \text{ mm}$$

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 \sum b_{eff,epb} t_p^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 217.85 \times 14^2 \times 357.5}{1.0} = 3.82 \text{ kNm}$$

$$F_{epb,Rd,1} = \frac{4M_{epb,Rd}}{m_{ep}} = \frac{4(3.82) \times 10^3}{36.92} = 413.41 \text{ kN}$$

Mekanizma 2 dayanımı:

$$b_{eff,epb} = b_{eff,epb,2} = 217.85 \text{ mm}$$

$$n = \min[e_c ; e_{ep} ; 1.25m_{ep}] = \min[105 ; 45 ; 1.25 \times 36.92] = 45 \text{ mm}$$

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 b_{eff,epb} t_p^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 217.85 \times 14^2 \times 357.5}{1.0} = 3.82 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,12} = \frac{2M_{cf,Rd2} + 2B_{rd}n}{m_{ep} + n} = \frac{2(3.82 \times 10^3) + 2(254.06)45}{36.92 + 45} = 372.27 \text{ kN}$$

Mekanizma 3 dayanımı:

$$F_{cf,Rd,1,3} = 2B_{rd} = 2 \times 254.06 = 508.12 \text{ kN}$$

Alın levhası dayanımını belirleyen dayanım Mekanizma durumu 1 (kaldırma kuvveti etkisinde bulonların kopması) olarak belirlenir.

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{epb,Rd,1} ; F_{epb,Rd,2} ; F_{epb,Rd,3}) = 372.27 \text{ kN}$$

- **Kolon gövdesinde çekme dayanımı**

Etkin genişlik değeri kolon başlığında eğilme ile aynıdır.  $b_{eff,cwt} = b_{eff,cfb} = 112.47 \text{ mm}$

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\beta^2 \xi^2 \left( \frac{b_{eff,cwc} t_{cw}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3(1.0)^2 (0.8)^2 \left( \frac{112.47 \times 11}{4742.78} \right)^2}} = 0.94$$

$$F_{cwt,Rd,1} = \frac{\omega b_{eff,cwc} t_{cw} F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.94 \times 112.47 \times 11 \times 357.5}{1.0} = 415.95 \text{ kN}$$

- **Çekme kuvveti etkisindeki bulon sırasının eğilme dayanımı**

Denklem 3.7 uyarınca belirleyici birleşim dayanımı en düşük dayanımlı elemana göre seçilir. Bu durumda alın levhasında eğilme dayanımı 372.27 kN ile belirleyicidir.

$$F_{t1Rd} = \min(978.92; 827.54; 776.04; 508.12; 372.27; 415.95) = 372.27 \text{ kN}$$

Birleşim eğilme dayanımı belirleyici çekme dayanımının moment kolu ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$M_{j,Rd} = F_{t1,Rd} d_1 = 372.27 \times 234.65 \times 10^{-3} = 87.35 \text{ kNm}$$

### 3.2.3 FEP-4B birleşiminin eğilme momenti dayanımı

- **Kolon gövdesinde kesme dayanımı**

FEP-2B birleşimi ile aynı şekilde kolon gövdesi kesme dayanımı elde edilir.

$$F_{cws,Rd} = 978.92 \text{ kN}$$

- **Kolon gövdesinde basınç dayanımı**

FEP-2B birleşimi ile aynı şekilde kolon gövdesi basınç dayanımı elde edilir.

$$F_{cwc,Rd} = 827.54 \text{ kN}$$

- **Kiriş başlığı ve gövdesinde basınç dayanımı**

FEP-2B birleşimi ile aynı şekilde giriş başlığı ve gövdesi basınç dayanımı elde edilir.

$$F_{fb,Rd} = 776.04 \text{ kN}$$

### 1. Bulon sırası dayanımı

- **Kolon başlığı eğilme dayanımı**

Kolon başlığında bulunan süreklilik levhasına bitişik bulon sırası için etkin genişlik ( $b_{eff,cfb}$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanır. Bölüm 3.1.2’de elde edilen  $m_c = 17.9 \text{ mm}$  ve  $m_2 = 27.93 \text{ mm}$  değerleri kullanılır.

$$b_{eff,cfb,1} = 2\pi m_c = 2\pi \times 17.9 = 112.47 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = \frac{m_c}{e_c + m_c} = \frac{17.9}{105 + 17.9} = 0.146 \quad ; \quad \lambda_1 = \frac{m_2}{e_c + m_c} = \frac{27.93}{105 + 17.9} = 0.227$$

Şekil 3.5 kullanılarak  $\alpha$  katsayısı belirlenir. Bulon eksen ile kolon başlığı kenarına uzaklık yüksek olduğundan  $\alpha = 9.0$  olarak alınabilir.

$$b_{eff,cfb,2} = \alpha m_c = 9.0 \times 17.9 = 161.1 \text{ mm}$$

$$n = \min[e_c ; e_{ep} ; 1.25m_c] = \min[105 ; 45 ; 1.25 \times 17.9] = 22.38 \text{ mm}$$

Mekanizma 1 dayanımı:

$$b_{eff,cfb} = \min(b_{eff,cfb,1} ; b_{eff,cfb,2}) = 112.47 \text{ mm}$$

$$M_{cfb,Rd,1} = \frac{0.25 \sum b_{eff,cfb} t_{cf}^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 112.47 \times 19^2 \times 357.5}{1.0} = 3.63 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,1} = \frac{4M_{cfb,Rd,1}}{m_c} = \frac{4 \times 3.63 \times 10^3}{17.9} = 810.89 \text{ kN}$$

Mekanizma 2 dayanımı:

$$b_{eff,epb} = b_{eff,epb,2} = 161.1 \text{ mm}$$

$$B_{rd} = \frac{0.9A_{thr}F_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 296.50 \times 1000 \times 10^{-3}}{1.25} = 213.48 \text{ kN}$$

$$M_{cfb,Rd,2} = \frac{0.25 \sum b_{eff,cfb,2} t_{cf}^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 161.1 \times 19^2 \times 357.5}{1.0} = 5.19 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,2} = \frac{2M_{cfb,Rd,2} + 2B_{rd}n}{m_c + n} = \frac{2(5.19 \times 10^3) + 2(213.48)21.44}{17.9 + 22.38} = 495.32 \text{ kN}$$

Mekanizma 3 dayanımı:

$$F_{cfb,Rd,1,3} = 2B_{rd} = 2 \times 213.48 = 426.97 \text{ kN}$$

Mekanizma durumu 3 (bulonların kopması) dayanımı kontrol etmektedir.

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{cfb,Rd11}; F_{cfb,Rd12}; F_{cfb,Rd13}) = 426.97 \text{ kN}$$

- **Alın levhasının eğilme dayanımı**

Bulon eksenini ile kiriş gövdesine paralel ve dik doğrultuda oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe Bölüm 3.1.3'te sırasıyla  $m_{ep} = 36.92$  mm ve  $m_2 = 27.51$  mm olarak hesaplanmıştır.

$$\lambda_1 = \frac{m_{ep}}{e_{ep} + m_{ep}} = \frac{36.92}{45 + 36.92} = 0.451 \quad ; \quad \lambda_2 = \frac{m_2}{e_{ep} + m_{ep}} = \frac{27.51}{45 + 36.92} = 0.336$$

Şekil 3.5 kullanılarak  $\alpha = 6.5$  olarak belirlenir ve etkin genişlik hesaplanır.

$$b_{eff,epb1} = 2\pi m_{ep} = 2\pi \times 36.92 = 232.00 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb2} = \alpha m_{ep} = 6.5 \times 36.92 = 240.01 \text{ mm}$$

1. mekanizma durumu:

$$b_{eff,epb} = \min[b_{eff,epb1} ; b_{eff,epb2}] = 232.00 \text{ mm}$$

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 \sum b_{eff,epb} t_p^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 232.00 \times 14^2 \times 357.5}{1.0} = 4.06 \text{ kNm}$$

$$F_{epb,Rd,1} = \frac{4M_{epb,Rd}}{m_{ep}} = \frac{4 \times 4.06 \times 10^3}{36.92} = 440.26 \text{ kN}$$

2. mekanizma durumu:

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 b_{eff,epb2} t_p^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 243.39 \times 14^2 \times 357.5}{1.0} = 4.26 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,2} = \frac{2M_{cfb,Rd} + 2B_{rd}n}{m_{ep} + n} = \frac{2(4.26 \times 10^3) + 2(213.48)45}{36.92 + 45} = 337.17 \text{ kN}$$

3. mekanizma durumu:

$$F_{cfb,Rd,1,3} = 2B_{rd} = 2 \times 213.48 = 426.97 \text{ kN}$$

Alın levhası dayanımını belirleyen dayanım;

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{epb,Rd,1}; F_{epb,Rd,2}; F_{epb,Rd,3}) = 337.17 \text{ kN}$$

- **Kolon gövdesinde çekme dayanımı**

Rijitlik levhası bitişiğindeki bulon sırası için kolon gövdesi çekme dayanımı kontrolüne gerek yoktur.

## 1. bulon sırasının nihai eğilme dayanımı

Denklem 3.7 uyarınca belirleyici birleşim dayanımı en düşük dayanımlı elemana göre seçilir. Bu durumda alın levhasında eğilme dayanımı 368.92 kN ile belirleyicidir.

$$F_{t1,Rd} = \min(978.92; 827.54; 776.04; 426.97; 337.17) = 337.17 \text{ kN}$$

## 2. Bulon sırasının tek bulon sırası olarak dayanımı

### • Kolon başlığı eğilme dayanımı

Bulon sırası iç bulon sırası olarak ele alındığında etkin genişlik ( $b_{eff,cfb}$ ) verilen denklemler yardımı ile hesaplanır.  $m_c = 17.9 \text{ mm}$  olarak hesaplanmıştır.

$$b_{eff,cfb,1} = 2\pi m_c = 2\pi \times 17.9 = 112.47 \text{ mm}$$

$$b_{eff,cfb,2} = 4m_c + 1.25e_c = 4 \times 17.9 + 1.25 \times 105 = 202.85 \text{ mm}$$

$$n = 22.38 \text{ mm} ; e_w = 7.5 \text{ mm}$$

Mekanizma 1 dayanımı:

$$b_{eff,cfb} = \min(b_{eff,cfb,1} ; b_{eff,cfb,2}) = 112.47 \text{ mm}$$

$$M_{cf,Rd,1} = \frac{0.25 \sum b_{eff,cfb} t_{cf}^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 112.47 \times 19^2 \times 357.5}{1.0} = 3.63 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,1} = \frac{4M_{cf,Rd,1}}{m_c} = \frac{4 \times 3.63 \times 10^3}{17.9} = 810.89 \text{ kN}$$

Mekanizma 2 dayanımı:

$$b_{eff,epb} = b_{eff,epb,2} = 202.85 \text{ mm}$$

$$M_{cf,Rd,2} = \frac{0.25 \sum b_{eff,cfb,2} t_{cf}^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 202.85 \times 19^2 \times 357.5}{1.0} = 6.54 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,2} = \frac{2M_{cf,Rd,2} + 2B_{rd}n}{m_c + n} = \frac{2(6.54 \times 10^3) + 2(213.48)22.38}{17.9 + 22.38} = 562.21 \text{ kN}$$

Mekanizma 3 dayanımı:

$$F_{cfb,Rd,1,3} = 2B_{rd} = 2 \times 213.48 = 426.97 \text{ kN}$$

Mekanizma durumu 3 (bulonların kopması) dayanımı kontrol etmektedir.

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{cfb,Rd,1,1}; F_{cfb,Rd,1,2}; F_{cfb,Rd,1,3}) = 426.97 \text{ kN}$$

- **Kolon gövdesinde çekme dayanımı**

Etkin genişlik değeri kolon başlığında eğilme ile aynıdır ( $b_{eff,cwt}=b_{eff,cfb}=112.47$  mm).

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\beta^2 \xi^2 \left( \frac{b_{eff,cwt} t_{cw}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3(1.0)^2 (0.8)^2 \left( \frac{112.47 \times 11}{4742.78} \right)^2}} = 0.83$$

$$F_{cwt,Rd,1} = \frac{\omega b_{eff,cwt} t_{cw} F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.83 \times 112.47 \times 11 \times 357.5}{1.0} = 664.71 \text{ kN}$$

- **Alın levhasının eğilme dayanımı**

Bulon eksenini ile giriş gövdesi doğrultusunda oluşan akma çizgileri arasındaki mesafe, Bölüm 3.1.2’de  $m_{ep} = 36.92$  mm olarak hesaplanmıştır. Etkin genişlik hesaplanır.

$$b_{eff,epb,1} = 2\pi m_{ep} = 2\pi \times 36.92 = 232 \text{ mm}$$

$$b_{eff,epb,2} = 4m_{ep} + 1.25e_{ep} = 4 \times 36.92 + 1.25 \times 45 = 203.95 \text{ mm}$$

1. mekanizma durumu:

$$b_{eff,epb} = \min[b_{eff,epb1}; b_{eff,epb2}] = 203.95 \text{ mm}$$

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 \sum b_{eff,epb} t_p^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 203.95 \times 14^2 \times 357.5}{1.0} = 3.57 \text{ kNm}$$

$$F_{epb,Rd,1} = \frac{4M_{epb,Rd}}{m_{ep}} = \frac{4 \times 3.57 \times 10^3}{36.92} = 798.36 \text{ kN}$$

2. mekanizma durumu:

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 b_{eff,epb2} t_p^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 203.95 \times 14^2 \times 357.5}{1.0} = 3.57 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,2} = \frac{2M_{cfRd2} + 2B_{rd}n}{m_{ep} + n} = \frac{2(3.57 \times 10^3) + 2(213.48)44.74}{36.92 + 44.74} = 321.74 \text{ kN}$$

3. mekanizma durumu:

$$F_{cfb,Rd,1,3} = 2B_{rd} = 2 \times 213.48 = 426.96 \text{ kN}$$

Alın levhası dayanımını belirleyen dayanım 2. Mekanizma durumudur;

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{epb,Rd,1}; F_{epb,Rd,2}; F_{epb,Rd,3}) = 321.74 \text{ kN}$$

## 2. bulon sırasının nihai eğilme dayanımı

Denklem 3.7 uyarınca belirleyici birleşim dayanımı en düşük dayanımlı elemana göre seçilir. Bu durumda alın levhasında eğilme dayanımı mekanizma durumu 2 ile belirleyicidir.

$$F_{t1,Rd} = \min(426.97; 664.71; 321.74) = 321.74 \text{ kN}$$

## 2. bulon sırasının 1. Bulon sıras ile beraber çalıştığı durumda eğilme dayanımı

### • Kolon başlığı eğilme dayanımı

1. bulon sırası için dairesel ve dairesel olmayan etkin genişlik belirlenir.

$$b_{eff,cp,1} = \pi m_c + p = \pi \times 17.9 + 70 = 126.23 \text{ mm}$$

$$b_{eff,nc,1} = 0.5p + \alpha m_c - (2m_c + 0.625e_c) = \dots$$

$$\dots = 0.5 \times 70 + 9 \times 17.9 - (2 \times 17.9 + 0.625 \times 105) = 94.68 \text{ mm}$$

2. bulon sırası dairesel ve dairesel olmayan kırılma şekli için etkin genişlik hesaplanır.

$$b_{eff,cp,2} = \pi m_c + p = \pi \times 17.9 + 70 = 126.23 \text{ mm}$$

$$b_{eff,nc,1} = 2m_c + 0.625e_c + 0.5p = 2(17.9) + 0.625(105) + 70/2 = 136.43 \text{ mm}$$

Toplam etkin genişlikler elde edilir.

$$b_{eff,cp} = b_{eff,cp,1} + b_{eff,cp,2} = 252.47 \text{ mm}$$

$$b_{eff,nc} = b_{eff,nc,1} + b_{eff,nc,2} = 231.1 \text{ mm}$$

1. mekanizma durumu:

$$b_{eff,1} = \min(b_{eff,cp}; b_{eff,nc}) = 231.1 \text{ mm}$$

$$M_{cfb,Rd,1} = \frac{0.25 \sum b_{eff,1} t_{cf}^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 231.1 \times 19^2 \times 357.5}{1.0} = 7.46 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,1} = \frac{4M_{cfRd}}{m_c} = \frac{4 \times 7.46 \times 10^3}{17.9} = 1666.21 \text{ kN}$$

2. mekanizma durumu:

$$M_{cf,Rd,2} = \frac{0.25 \sum b_{eff,nc} t_{cf}^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 231.1 \times 19^2 \times 357.5}{1.0} = 7.46 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,2} = \frac{2M_{cfRd2} + 2B_{rd}n}{m_c + n} = \frac{2(7.46 \times 10^3) + 2(213.48)22.38}{17.15 + 46.16} = 607.47 \text{ kN}$$

3. mekanizma durumu:

$$F_{cfb,Rd,1,3} = 4B_{rd} = 4 \times 213.48 = 853.93 \text{ kN}$$

3. mekanizma durumu dayanımı kontrol etmektedir.

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{cfb,Rd,1,1}; F_{cfb,Rd,1,2}; F_{cfb,Rd,1,3}) = 607.47 \text{ kN}$$

- **Alın levhasının eğilme dayanımı**

1. bulon sırası dairesel ve dairesel olmayan şekillerinde etkin genişlikler hesaplanır.

$$b_{eff,cp,1} = \pi m_{ep} + p = \pi \times 36.92 + 70 = 186 \text{ mm}$$

$$b_{eff,nc,1} = 0.5p + \alpha m_{ep} - (2m_{ep} + 0.625e_{ep}) = \dots$$

$$\dots = 0.5 \times 70 + 6.5 \times 36.92 - (2 \times 36.92 + 0.625 \times 45) = 173.04 \text{ mm}$$

2. bulon sırası dairesel ve dairesel olmayan etkin genişlikler;

$$b_{eff,cp,2} = \pi m_{ep} + p = \pi \times 36.92 + 70 = 186 \text{ mm}$$

$$b_{eff,nc,2} = 2m_{ep} + 0.625e_{ep} + 0.5p = 2(36.92) + 0.625(45) + 70/2 = 136.97 \text{ mm}$$

Toplam etkin genişlik hesaplanır.

$$b_{eff,cp} = b_{eff,cp,1} + b_{eff,cp,2} = 372 \text{ mm}$$

$$b_{eff,nc} = b_{eff,nc,1} + b_{eff,nc,2} = 310 \text{ mm}$$

1. mekanizma durumu:

$$b_{eff,1} = \min(b_{eff,cp}; b_{eff,nc}) = 310 \text{ mm}$$

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 \sum b_{eff,1} t_p^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 310 \times 14^2 \times 357.5}{1.0} = 5.43 \text{ kNm}$$

$$F_{epb,Rd,1} = \frac{4M_{epb,Rd}}{m_{ep}} = \frac{4 \times 5.43 \times 10^3}{36.92} = 588.29 \text{ kN}$$

2. mekanizma durumu:

$$M_{epb,Rd} = \frac{0.25 b_{eff,nc} t_p^2 F_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.25 \times 313.39 \times 14^2 \times 357.5}{1.0} = 5.43 \text{ kNm}$$

$$F_{cfb,Rd,1,2} = \frac{2M_{cfRd} + 2B_{rd}n}{m_{ep} + n} = \frac{2(5.43 \times 10^3) + 2(213.48)44.74}{36.92 + 44.74} = 601.63 \text{ kN}$$

3. mekanizma durumu:

$$F_{cfb,Rd,1,3} = 4B_{rd} = 4 \times 213.48 = 853.93 \text{ kN}$$

Alın levhası dayanımını belirleyen dayanım;

$$F_{cfb,Rd,1} = \min(F_{epb,Rd,1}; F_{epb,Rd,2}; F_{epb,Rd,3}) = 588.29 \text{ kN}$$

2. bulon sırasının bulon grubu olarak göz önüne alındığında belirleyici eğilme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_{t2,Rd} = F_{epb,Rd21} - F_{epb,Rd} = 588.29 - 337.17 = 251.12 \text{ kN}$$

Birleşim eğilme dayanımı, her bulon sırası için hesaplanan çekme dayanımının moment kolu ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$M_{j,Rd} = F_{t1,Rd}d_1 + F_{t2,Rd}d_2$$

$$M_{j,Rd} = (337.17 \times 249.65 + 251.12 \times 179.65) \times 10^{-3} = 129.29 \text{ kNm}$$

Birleşimlerin Eurocode EN 1993-1-8 (2005) uyarınca hesaplanan başlangıç rijitlikleri ve eğilme kapasiteleri Çizelge 2.4’de verilmiştir. IPE 300 kirişi için rijitlik verilen denklem ile hesaplanmıştır. Kiriş açıklığı bu çalışma kapsamında incelenecek yapıya uygun olarak düşey yük taşıyıcı çerçeve kirişi için 6 metre olarak belirlenmiştir.

$$S_b = 6E_b I_b / L = 6 \times 200000 \times (8356 \times 10^4) / 6000 \times 10^{-6} = 16712 \text{ kNm/rad}$$

Bölüm 2.2’de gösterildiği üzere IPE 300 kirişinin eğilme dayanımı  $M_{pr} = 269.41 \text{ kNm}$  olarak hesaplanmıştır. Birleşimlerin dayanım ve rijitliği bağlanan kiriş ile kıyaslandığında birleşimlerin kısmi dayanımlı ve yarı-rijit sınıflandırılmasına uygun olduğu görülmektedir.

**Çizelge 3.1** : Bileşen yöntemi ile hesaplanan başlangıç rijitliği ve eğilme kapasiteleri.

| Birleşim      | Hesaplanan başlangıç rijitliği $S_{j,ini}$ (kNm/rad) | Kiriş başlangıç rijitliği $S_b$ (kNm/rad) | $S_{j,ini}/S_b$ | Hesaplanan birleşim dayanımı $M_j$ (kNm) | Kiriş dayanımı $M_b$ (kNm) | $M_j/M_b$ |
|---------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| F1-3/4-3/8-16 | 11578.40                                             | 34857.84                                  | 0.33            | 64.67                                    | 262.97                     | 0.25      |
| FEP-2B        | 13690.53                                             | 16712                                     | 0.82            | 87.35                                    | 269.41                     | 0.32      |
| FEP-4B        | 17305.91                                             |                                           | 1.03            | 129.29                                   |                            | 0.48      |

#### **4. BİRLEŞİMLERİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ**

Yapı elemanlarının deneysel ve numerik olarak incelenmesi mühendislik uygulamaları için önemli bir gerekliliktir. Deneysel çalışmalar zaman ve bütçe gerektirdiğinden kapsamlı çalışmaların yürütülmesi zorlayıcı olabilmektedir. Diğer taraftan sonlu eleman analizleri, özellikle doğrusal olmayan malzeme davranışları hesaba katıldığında, karmaşık işlemleri ve elemanlar arası etkileşimleri kısa sürede ve detaylı biçimde sonuçlandırmaya imkan sağlamaktadır.

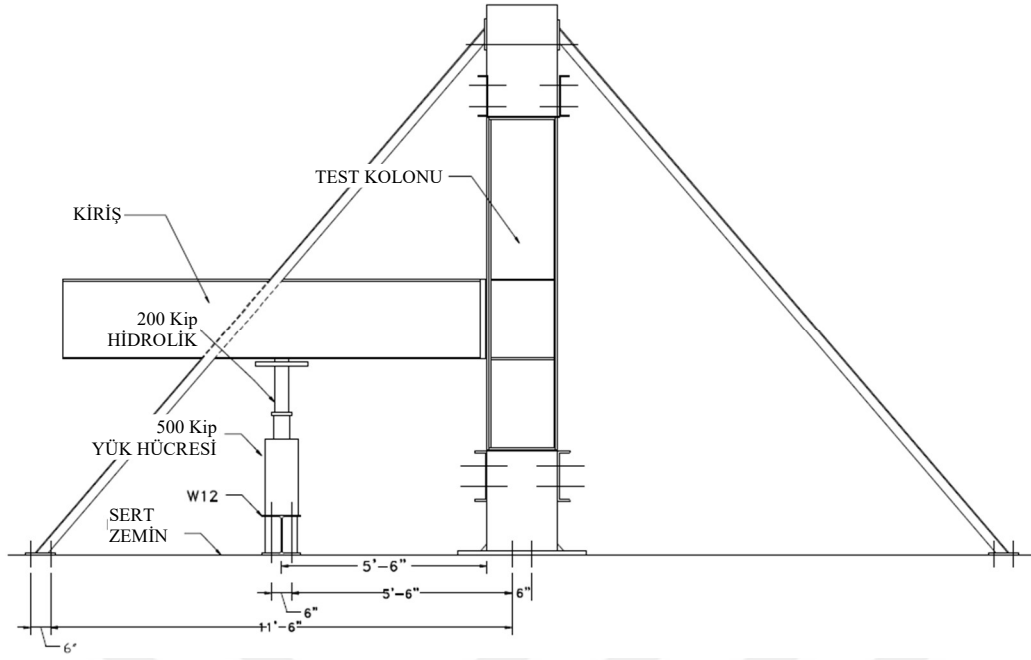
##### **4.1 Doğrulama Modelinin Oluşturulması**

Oluşturulan sonlu eleman modelinin gerçek birleşim davranışını isabetli yansıtabilmesi için; malzeme davranışı, birleşim geometrisi ve yükleme biçimi gibi konularda deneysel çalışmaya benzer şekilde tanımlanması oldukça önemlidir. Sonlu eleman analizleri için ABAQUS (2020) programından faydalanılmıştır.

###### **4.1.1 Esas alınan deneysel çalışma**

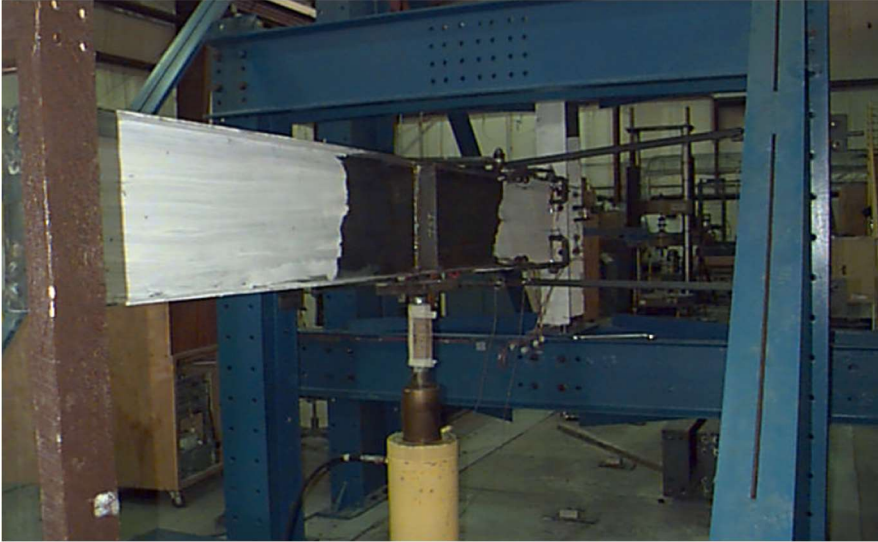
Boorse (1999) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada iki ve dört bulonlu olmak üzere toplam yedi adet kiriş enkesiti yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşimi artan tekrarlı yükler altında test edilmiştir. Farklı alın levhası kalınlığı ve bulon sayısına saship birleşimlerde bulon kopması veya alın levhasında plastikleşmeye bağlı kopma gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, doğrulama modeli oluşturulurken referans alınacak birleşim için F1-3/4-3/8-16 isimlendirilmesi kullanılmıştır. İsimlendirmede 3/4 inç (19.05 mm) bulon çapını, 3/8 inç (9.53 mm) alın levhası kalınlığını, 16 inç (406.4 mm) ise yapma kiriş enkesitinin yüksekliğini temsil etmektedir. Deney düzeneğine ait yerleşim Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.1 : Deney düzeneği (Boorse, 1999).**

Kolon düşey olarak yerleştirilmiş ve her iki ucu mafsallı olacak şekilde sabitlenmiştir. Kiriş ise yatay hizada yerleştirilmiş ve kolon yüzünden yaklaşık 1676 mm uzaklıkta hidrolik aktüatör ile düşey deplasman uygulanmıştır. Deplasman eksenine dik hareket yatay destekler ile önlenmiştir. Deney düzeneğine ait fotoğraf Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Birleşime ait geometrik detay ise Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

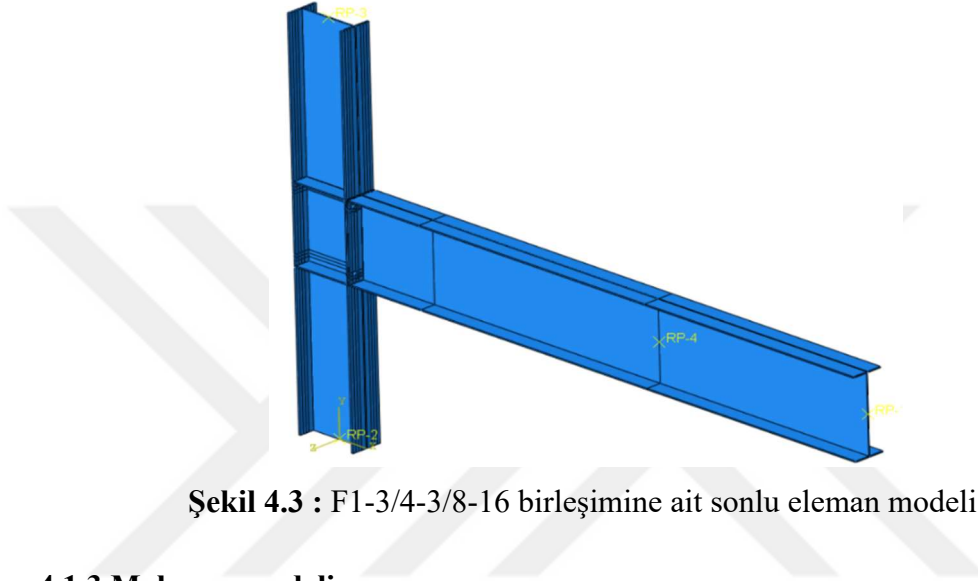


**Şekil 4.2 : Deney düzeneğine ait fotoğraf (Boorse, 1999).**

#### 4.1.2 Birleşimin sonlu eleman modeli

Deneyisel çalışmada kullanılan birleşim referans alınarak oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Kolonun alt ve üst uç noktalarında (referans

noktaları RP-2 ve RP-3) mafsal tanımlamaları “boundary conditions” modülündeki “rigid body constraint” seçeneği ile yapılmıştır. Bu noktalarda tüm doğrultular için yerdeğiştirmeler ve kolonun kendi eksenini etrafında dönmesi önlenmiştir ( $U_1=U_2=U_3=UR_2=0$ ). Kiriş yükleme noktası (RP-4) için yatay doğrultuda hareket ve kirişin kendi eksenini etrafında dönmesi engellenerek yalnızca düşey deplasmana izin verilmiştir. Kiriş uç noktasında (RP-1) ise yatay hareket önlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan köşe kaynaklar sonlu eleman modeline dahil edilmemiştir.



**Şekil 4.3 :** F1-3/4-3/8-16 birleşimine ait sonlu eleman modeli.

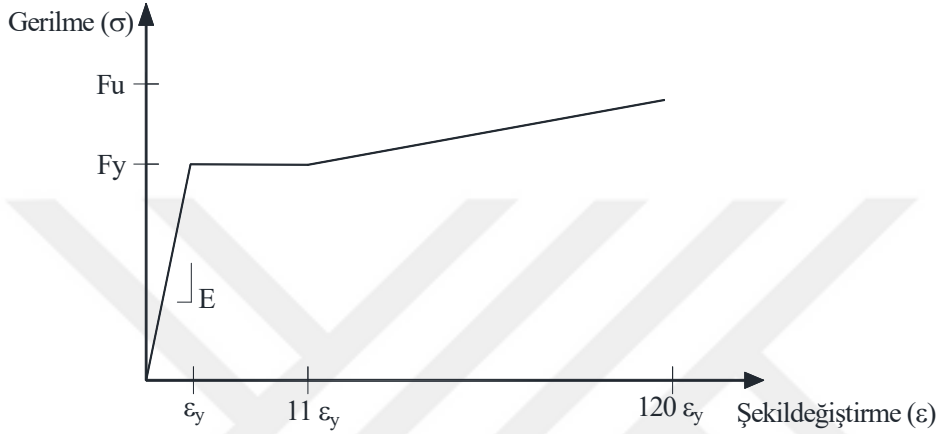
#### 4.1.3 Malzeme modeli

Sonlu eleman analizinde kullanılacak plastik malzeme özelliklerinin belirlemesi için öncelikle mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekildeğiştirmesi değerlerinin elde edilmesi gereklidir. Deney numunelerinin tümünde Gr50 sınıfı çelik kullanılmıştır. Malzemelerin kupon testi sonucu elde edilen akma ve kopma dayanımlarına çalışmada yer verilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Deney numunesine ait malzeme özellikleri.

| Eleman        | $F_y$ (MPa) | $F_u$ (MPa) | $\epsilon_u$ (%) |
|---------------|-------------|-------------|------------------|
| Alın levhası  | 369.63      | 578.74      | 23.44            |
| Kolon başlığı | 397.21      | 591.57      | 22.67            |
| Kolon gövdesi | 496.97      | 580.26      | 21.32            |
| Kiriş başlığı | 417.75      | 587.15      | 24.92            |
| Kiriş gövdesi | 508.63      | 570.15      | 12.70            |

Çeliğin mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekildeğiştirmesi değerlerinin elde edilmesinde Baei ve diğ (2012) tarafından açıklanan malzeme modelinin kullanılması uygun görölmüştür. Malzeme modeli Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Burada çeliğin pekleşme bölgesi sonunda ve kopma uzamasına ulaştığında akma uzamasına kıyasla  $\epsilon_s = 11\epsilon_y$  ve  $\epsilon_u = 120\epsilon_y$  olacak şekilde belirlenmiştir. Birleşim elemanlarına ait detaylı gerilme-şekildeğiştirme eğrilerine çalışmada yer verilmediğinden elastisite modöü  $E=200000$  MPa ve poisson oranı 0.3 olarak kabul edilmiştir.



**Şekil 4.4 :** Yapı çeliğine ait malzeme gerilme-şekildeğiştirme modeli (Baei ve diğ, 2012).

Mühendislik gerilme-şekildeğiştirme değerlerinden gerçek gerilme-şekildeğiştirme değerleri elde edilirken denklem 4.1'de gösterilen yöntem kullanılmıştır.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{true}) \quad \epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (4.1)$$

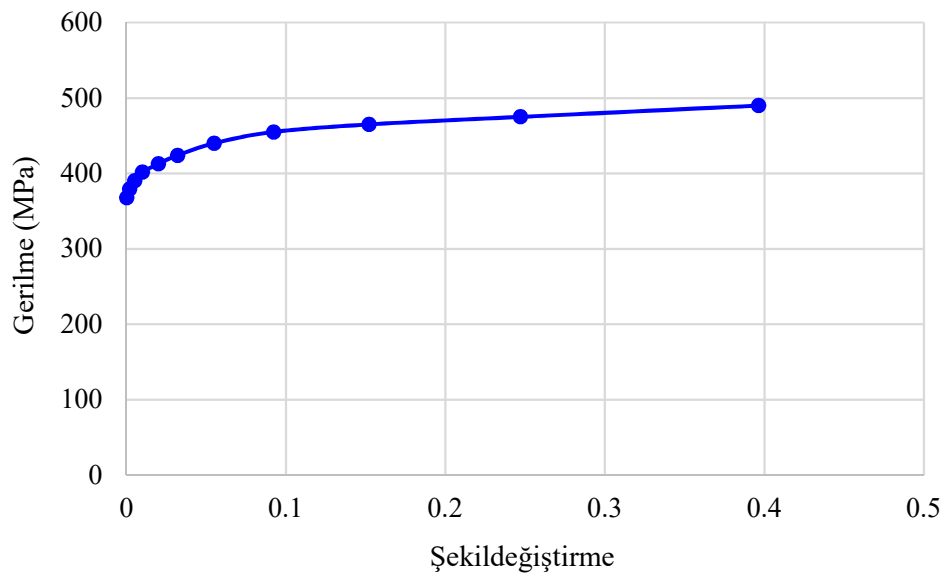
Burada  $\epsilon_{eng}$  ve  $\sigma_{eng}$  mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekildeğiştirmesini temsil etmektedir. Benzer şekilde  $\epsilon_{true}$  ve  $\sigma_{true}$  gerçek gerilme ve gerçek şekildeğiştirmeyi temsil etmektedir.

Elde edilen doğrusal gerilme-şekildeğiştirme eğrisine uygun olacak şekilde, doğrusal olmayan eğri, Kaufmann ve diğ. (2001) tarafından önerilen K ve n parametrelerine bağlı  $\sigma = K\epsilon^n$  denklemi ile elde edilmiştir. Bu doğrultuda, akma ve kopma uzaması ile gerilmesine karşı gelecek şekilde K ve n parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen eğriden elastik gerilme bölgesi çıkartıldığında, izelge 4.2'de görölen plastik gerilme-şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir.

**Çizelge 4.2 :** Alın levhası malzemesine ait gerilme-şekildeğiştirme değerleri.

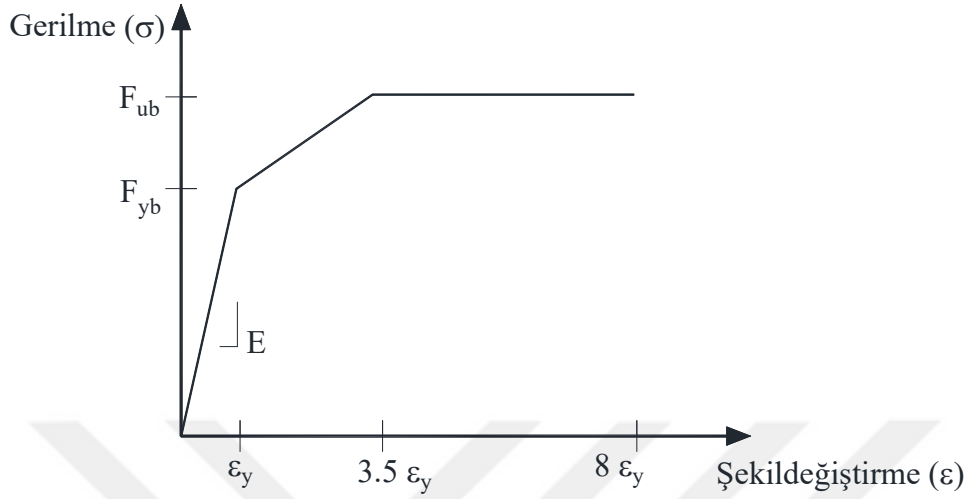
| Gerilme<br>$\sigma$ (MPa) | Plastik Şekildeğiştirme<br>$\varepsilon$ (%) |
|---------------------------|----------------------------------------------|
| 369.4                     | 0                                            |
| 383.3                     | 0.00173                                      |
| 397.8                     | 0.00472                                      |
| 413.2                     | 0.00979                                      |
| 430.2                     | 0.01827                                      |
| 449.9                     | 0.03219                                      |
| 474.1                     | 0.05455                                      |
| 505.5                     | 0.08961                                      |
| 548.5                     | 0.14302                                      |
| 609.9                     | 0.22162                                      |
| 700                       | 0.33264                                      |

Alın levhası için malzemesine ait plastik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Çevrimsel yükleme altında yapı çeliğinin pekleşme davranışını doğru yansıtabilmek için, izotropik pekleşmenin yanı sıra kinematik pekleşme tanımı yapılması gereklidir. Birleşik pekleşme yöntemi ile izotropik ve kinematik pekleşme davranışı aynı anda yansıtılabilmektedir. ABAQUS arayüzünde malzemenin plastik davranışı tanımlanırken “half cycle” yöntemi kullanılmıştır.



**Şekil 4.5 :** Alın levhası malzemesine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.

Deneyisel çalışmada kullanılan A325 sınıfı bulonlar ( $F_y=635\text{MPa}$ ,  $F_u=840\text{ MPa}$ ) için mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekildeğiştirmesi değerleri Şekil 4.6’da gösterilen malzeme modeli (Baei ve diğ, 2012) ile elde edilmiştir.



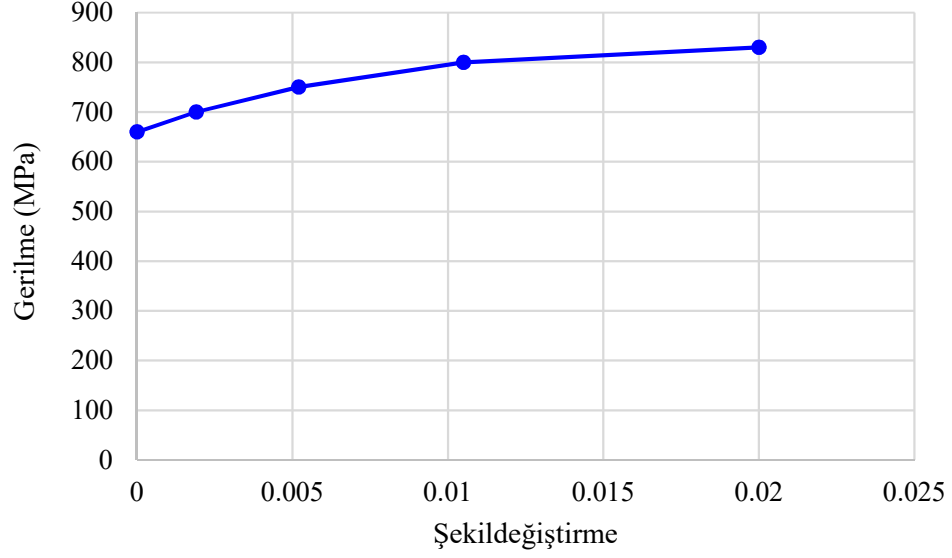
**Şekil 4.6 :** Bulonlara ait malzeme gerilme-şekildeğiştirme modeli (Baei ve diğ, 2012).

Denklem 4.1 kullanılarak A325 bulonlara ait gerçek gerilme- gerçek şekildeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Bulon malzemesine ait akma sonrası gerilme-şekildeğiştirme değerleri ise Çizelge 4.3’te gösterildiği gibi ABAQUS’e tanımlanmıştır.

**Çizelge 4.3 :** A325 bulonlara ait plastik gerilme-şekildeğiştirme değerleri.

| Gerilme<br>$\sigma$ (MPa) | Plastik Şekildeğiştirme<br>$\epsilon$ (%) |
|---------------------------|-------------------------------------------|
| 660                       | 0                                         |
| 700                       | 0.0019                                    |
| 750                       | 0.0052                                    |
| 800                       | 0.0105                                    |
| 830                       | 0.02                                      |

A325 sınıfı bulonlara ait malzemenin plastik gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.7 :** A325 bulon malzemesine ait plastik gerilme–şekildeğiştirme eğrisi.

Çevrimsel yükleme altında bulonların pekleşmesi çelik ile benzer şekilde “half cycle” yöntemi ile tanımlanmıştır.

#### 4.1.4 Analiz adımları

Sonlu eleman analizleri toplamda üç adımdan oluşmaktadır (Şekil 4.8). İlk adımda kolon uç noktalarının tüm doğrultularda ötelemesi önlenmiş, ayrıca kirişin yatay hareketi ve yanal burulmalı burkulmanın önüne geçmek amacıyla dönme önlenmiştir. İkinci adımda, deneye benzer şekilde 28 kips (124.55 kN) büyüklüğünde bulon ön çekmesi bulonların gövde kesitine dik doğrultuda uygulanmıştır. Üçüncü ve son adımda ise kiriş üzerinde bulunan yükleme noktasında düşey deplasman uygulanmıştır.

| Step Manager      |                 |        |      |
|-------------------|-----------------|--------|------|
| Name              | Procedure       | Nlgeom | Time |
| ✓ Initial         | (Initial)       | N/A    | N/A  |
| ✓ Preloading-step | Static, General | ON     | 1    |
| ✓ Loading-step    | Static, General | ON     | 104  |

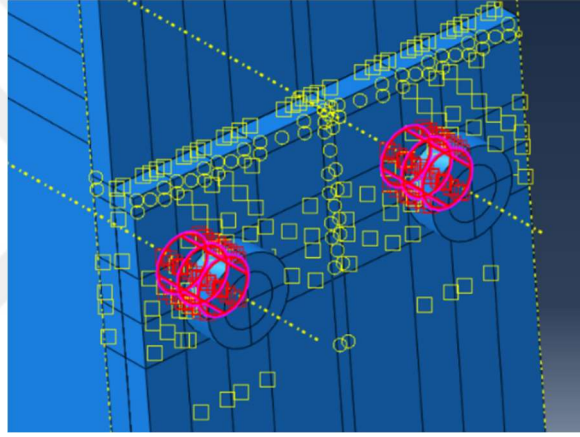
**Şekil 4.8 :** Analiz adımları.

#### 4.1.5 Yüzey etkileşimleri

Birleşimde temas özellikleri tanımlanması gereken yüzey tanımları; bulonlar ve bulon delikleri arasındaki temas (Şekil 4.9), bulon başlıkları ve alın levhası arasındaki temas,

somunlar ile kolon başlığı arasındaki temas ve alın levhası ile kolon arasındaki temas yüzeyleridir. Yüzey etkileşimleri etkileşim (interaction) modülünde yüzey-yüzey (surface-to-surface) etkileşimi biçiminde tanımlanmıştır. ABAQUS programında esas (master) ve tamamlayıcı (slave) yüzey olarak iki adet yüzey tanımı bulunmaktadır. Analizler sırasında esas yüzey tamamlayıcı yüzey içerisine hareket edemez, ancak tamamlayıcı yüzeyin esas yüzey içine hareket edebilir.

Temas yüzeyleri arasındaki teğetsel davranış “Penalty” sürtünme formülasyonu ile tanımlanmıştır. Referans alınan çalışmada ürtünme katsayısı belirtilmediğinden tüm yüzey etkileşimleri için 0.3 olarak alınmıştır. Yüzeyler arası normal yönlü etkileşim “Hard contact” seçeneği ile yapılmıştır. Bu tanım yüzeylerin birbiri içine penetrasyonunu önlemektedir.



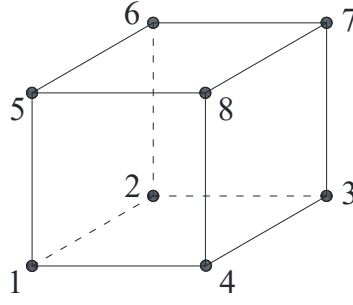
**Şekil 4.9 :** Bulon delikleri ile bulonların gövdeleri arası yüzey etkileşimleri.

Temas eden yüzeylerde birincil yüzey (master surface) ve ikincil yüzey (slave surface) tanımları yapılarak yüzeyler arası etkileşim detaylıca sınırlandırılabilir.

#### 4.1.6 Eleman özellikleri

Sonlu eleman analizinde en önemli konulardan biri kullanılan eleman tipidir. Her bir elemanda bulunan düğüm noktası sayısı ve eleman şekli değiştikçe analiz yöntemi ve elde edilen sonuç değişim göstermektedir.

Sonlu eleman modelinde bulunan tüm elemanlar sekiz düğüm noktalı, üç boyutlu katı eleman tipi C3D8R elemanlardan oluşmaktadır. İsimlendirme sürekli (continuum), 3-boyutlu, 8 nodlu, azaltılmış integrasyon yöntemi (reduced integration) ile hesaplama yapan sonlu eleman modelini temsil etmektedir. C3D8R eleman nodları Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

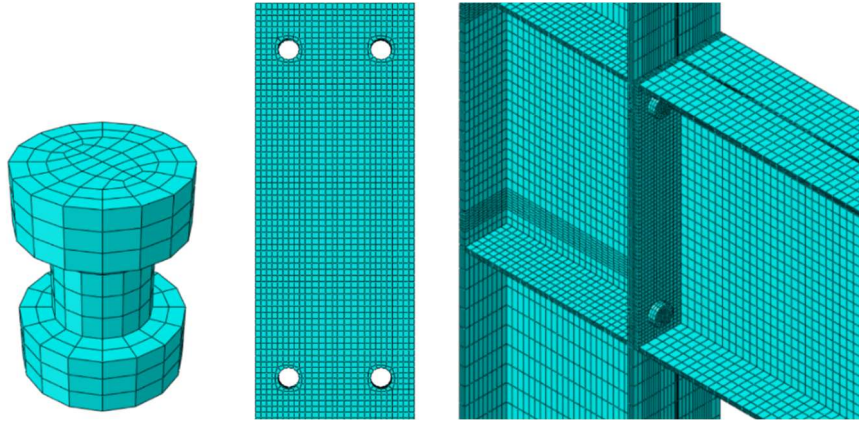


**Şekil 4.10 :** C3D8R 8-nodlu 3-boyutlu katı sonlu eleman.

C3D8R elemanlarında eleman ekseninde eğilme olmadığından, düşük sıklıkta sonlu eleman ağı kullanılması durumunda kayma kilitlemesi (shear lock) gibi çözüm problemleri meydana gelebilmektedir. Bu durumun önlenmesi için eleman kalınlığı boyunca en az 4 adet sonlu eleman ağı elemanı kullanılması gereklidir.

#### 4.1.7 Sonlu eleman ağı

Plastik şekil değiştirme ve gerilmelerin yüksek olduğu elemanlarda (alın levhası ve bulonlar) daha fazla sonlu eleman ağı elemanları kullanılmıştır (Şekil 4.11). Bulon delikleri çevresinde bulunan elemanlarda şekil bozukluklarının önüne geçilmesi için “sweep-medial axis” komutu kullanılarak simetrik geometrili eleman dağılımı elde edilmiştir.

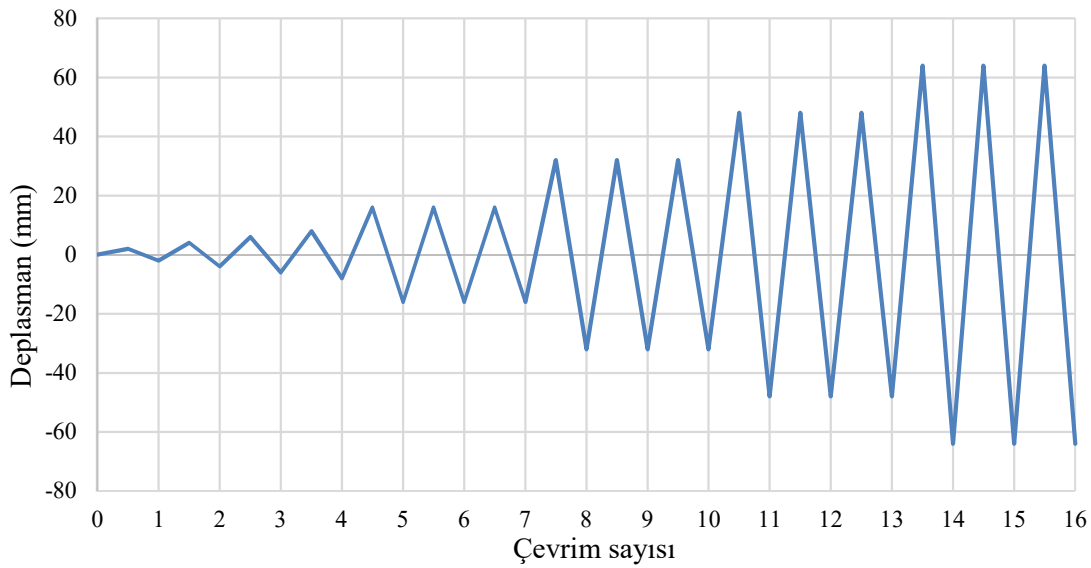


**Şekil 4.11 :** F1-3/4-3/8-16 birleşimine ait modelin sonlu eleman ağı.

Bu sebeple kolon ve kiriş başlığı ve gövdelerinde, alın levhasında ve rijitlik levhalarında kalınlık boyunca dört eleman kullanılmıştır. Sonlu eleman ağı sıklığı arttıkça analiz süresine harcanan zaman da artacağından kiriş ve kolonun panel bölgesi dışında kalan kısımlarında daha büyük elemanlar kullanılmıştır.

#### 4.1.8 Çevrimsel yükleme protokolü

Deneysel çalışmada ATC-24 (1992) çevrimsel yükleme protokolüne benzer olacak şekilde iki aşamalı bir yükleme uygulanmıştır. İlk aşamada kuvvet kontrollü çevrimler birleşimin elastik kalacağı seviyede düşük miktarda uygulanmıştır. İkinci aşamada deplasman kontrollü yükleme aşamasına geçilmiştir. Deplasman kontrollü çevrimlerin uygulanmasında numunenin akma anına karşı gelen deplasman değeri ( $e_y$ ) belirlenerek bu değerinin katlarına ( $n=1,2,3\dots$ ) karşı gelen deplasmanlar tanımlanmaktadır.



Şekil 4.12 : ATC-24 (1992) çevrimsel yükleme protokolü.

Deneysel çalışmada uygulanan dönme ve çevrim sayısı kaydedildiğinden bu çalışmada ayrıca hesaplanmamıştır. Uygulanan yükleme prosedürü Çizelge 4.4’de açıklanmıştır.

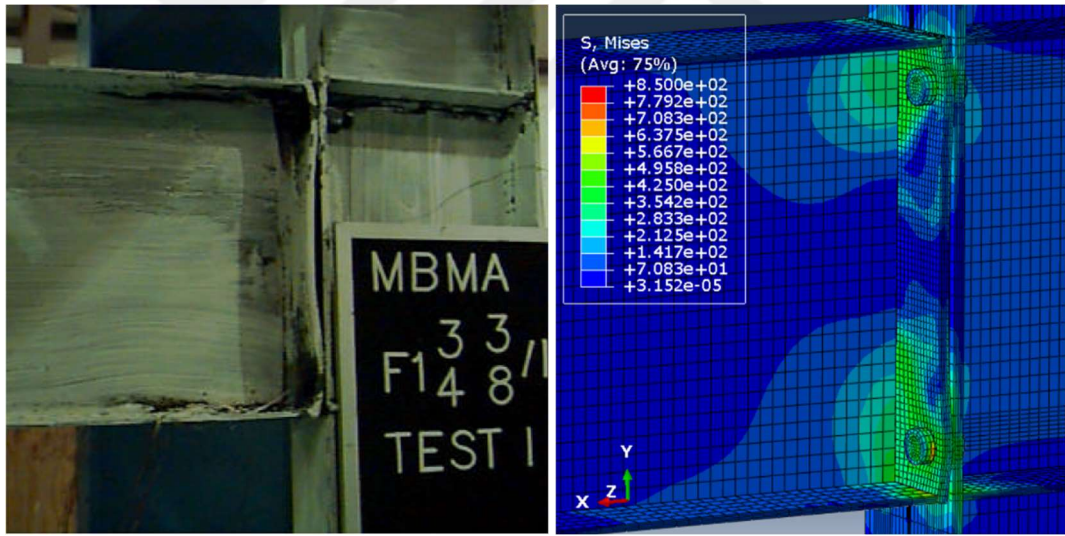
Çizelge 4.4 : Deneyde uygulanan yükleme protokolü.

| Yükleme adımı | Uygulanan kuvvet<br>kip (kN) | Uygulanan dönme<br>$\theta$ (rad) | Çevrim Sayısı |
|---------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 1             | 3 (13.34)                    | -                                 | 4             |
| 2             | 4 (17.79)                    | -                                 | 3             |
| 3             | 5 (22.24)                    | -                                 | 3             |
| 4             | -                            | 0.011                             | 3             |
| 5             | -                            | 0.0165                            | 3             |
| 6             | -                            | 0.022                             | 2             |
| 7             | -                            | 0.0275                            | 2             |
| 8             | -                            | 0.033                             | 2             |
| 9             | -                            | 0.044                             | 2             |
| 10            | -                            | 0.0465                            | 2             |

Başlangıçta uygulanan kuvvet kontrollü çevrimler için, kuvvet büyüklüğünün elde edildiği deplasman değeri hesaplanmış, bu deplasman kullanılarak yükleme prosedürü gerçekleştirilmiştir. Birleşimin dönme açısı, yük noktasında test kirişinin deplasmanını, kolon yüzüne kadar olan mesafeye bölerek ve test kolonunun dönmesini kiriş dönmesinden çıkararak hesaplanmıştır.

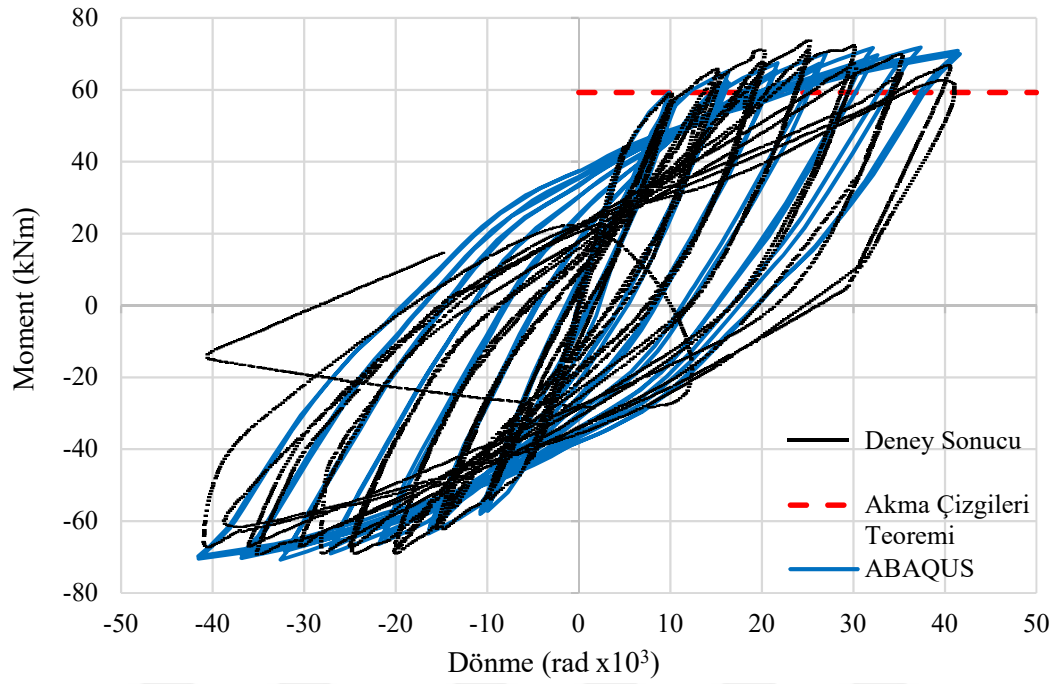
#### 4.1.9 Doğrulama modelinin sonlu eleman analizi sonuçları

Deney numunesinin test ve sonlu eleman analizi sonucu sergilediği plastik deformasyonlar ve gerilme dağılımı Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Plastik şekildeğiştirmelerin yoğunlukta olduğu alın levhası sonlu eleman analizi sonucunda deney numunesine benzer şekil almıştır. Alın levhasında akmanın bulon ve kiriş gövdesi arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Alın levhasının orta kısmı ise kolon başlığından ayrılmıştır. Alın levhası kalınlığı ile kolon başlık kalınlığının aynı olması sebebiyle kolon başlığında plastik deformasyonlar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13 : F1-3/4-3/8-16 birleşiminin deney ve sonlu eleman analizi sonuçları.

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen moment-dönme grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.14 :** F1-3/4-3/8-16 birleşiminin sonlu eleman analizi sonucu elde edilen moment-eğrilik grafiği.

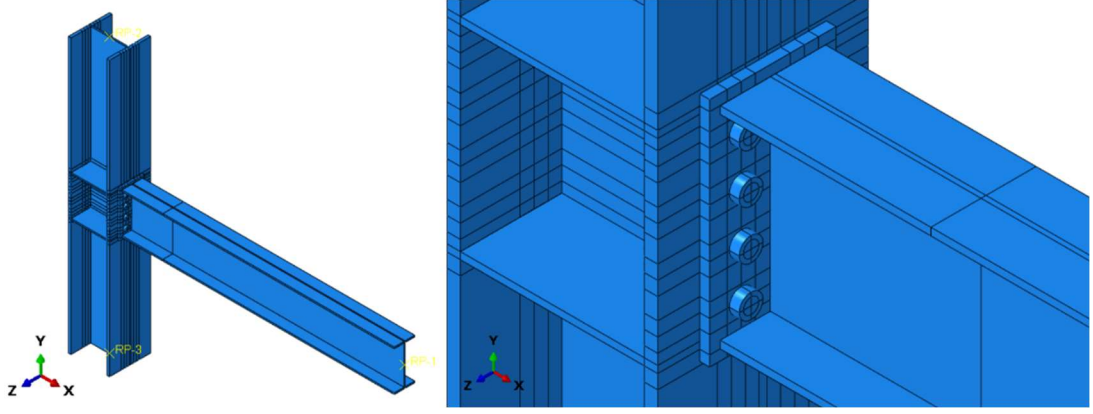
Sonlu eleman analizinin, deneysel çalışma sonucu elde edilen grafikteki başlangıç rijitliği ve moment kapasitesini oldukça yakın seviyede yansıttığı görülmektedir. Geri yükleme (unloading) yaşanan düşük seviyede sapmalar, kullanılan malzemelere ilişkin veri eksikliği ve malzemeye ait dayanım kaybı gibi sebeplerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan yöntem ve varsayımların diğer modellerde uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

## 4.2 Tasarlanan Birleşimlerin Sonlu Eleman Analizleri

Bu bölümde FEP-2B ve FEP-4B birleşimlerine ait sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında kullanılan yöntem ve sonlu eleman analizi sonuçlarının irdelenmesi ele alınacaktır.

### 4.2.1 Birleşimlere ait sonlu eleman modelleri

FEP-2B ve FEP-4B birleşimleri için oluşturulan sonlu eleman modelleri; kiriş, kolon ve süreklilik levhaları bakımından aynı yapısal elemanlara sahiptir. FEP-2 birleşimine ait sonlu eleman modeli Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.15 :** FEP-4B birleşimine ait sonlu eleman modeli.

Kiriş ve kolon uzunlukları sırasıyla 1.8 ve 2.0 metredir. Kolonun alt ve üst uç noktalarında yer alan referans noktalarında, kolonun deplasmanını önleyecek şekilde ( $U_1=U_2=U_3=0$ ) sınır koşulları tanımlanmıştır. Kirişte ise yükleme doğrultusunun dışında hareket önlenmiştir ( $U_3=UR_1=0$ ). Yükleme adımında uygulanacak düşey deplasman kirişin uç noktasında yer alan RP-1 referans noktası üzerinde etkilmiştir.

#### 4.2.2 Malzeme modeli

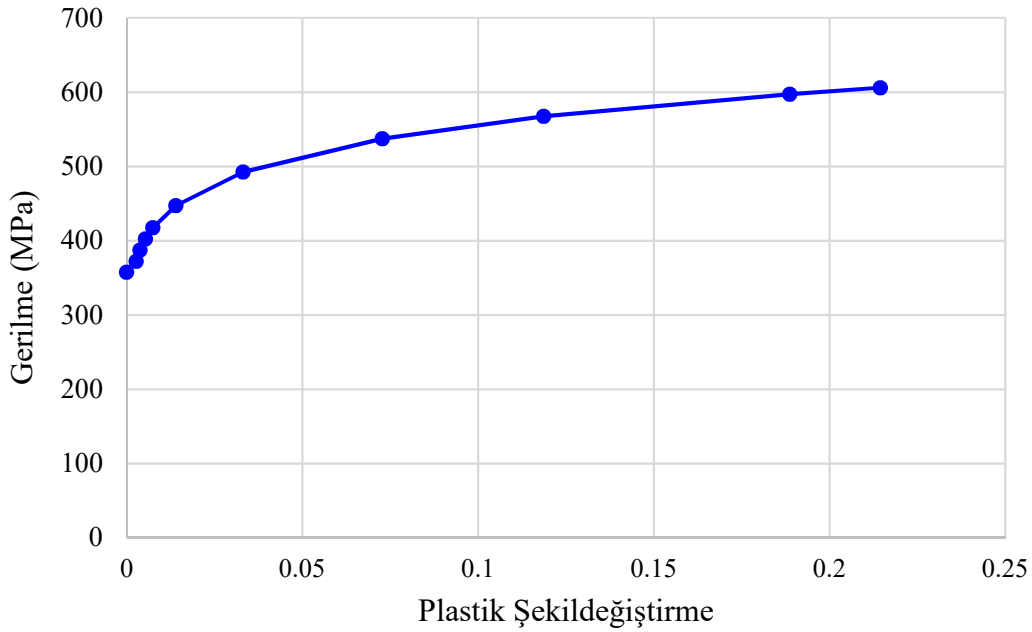
Tek doğrultuda artan yükler altında analiz için izotropik pekleşme gibi temel gerilme-şekildeğiştirme modelleri yeterli olmaktadır. Ancak çerimsel yükler altında isabetli analiz yapılabilmesi için çeliğin plastik davranışı kinematik ve izotropik pekleşmenin birlikte göz önüne alındığı birleşik pekleşme (combined hardening) modelleri kullanıldığında daha etkili sonuçlar elde edilmektedir.

FEP-2B ve FEP-4B birleşimlerinde yer alan tüm yapı elemanlarında S275 yapı çeliği kullanılmıştır. Bulonlarda ise 10.9 malzeme sınıfı kullanılmıştır. S275 çelik sınıfı için mühendislik gerilme-şekildeğiştirme değerleri hesaplanırken, Bölüm 4.1.3'te açıklanan üç-doğrulu malzeme modeli (Baei ve diğ., 2012) kullanılmıştır. Mühendislik gerilme - şekildeğiştirme değerleri kullanılarak gerçek gerilme - gerçek şekildeğiştirme değerlerinin elde edilmesinde denklem 4.1 kullanılmıştır. Sonrasında S275 yapı çeliği için elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin elastik kısmı çıkartılarak sonlu eleman analizinde kullanılan plastik gerilme-şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.5 :** S275 için kullanılan gerilme-şekildeğiştirme değerleri.

| Gerilme<br>$\sigma$ (MPa) | Plastik Şekildeğiştirme<br>$\varepsilon$ (%) |
|---------------------------|----------------------------------------------|
| 357.5                     | 0                                            |
| 372.5                     | 0.002673028                                  |
| 387.5                     | 0.003814756                                  |
| 402.5                     | 0.005371097                                  |
| 417.5                     | 0.007468296                                  |
| 447.5                     | 0.01395475                                   |
| 492.5                     | 0.033083825                                  |
| 537.5                     | 0.072729049                                  |
| 567.5                     | 0.118633402                                  |
| 597.5                     | 0.188693496                                  |
| 606.1                     | 0.2145                                       |

Gösterilen değerler kullanılarak elde edilen S275 yapı çeliğine ait plastik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



**Şekil 4.16 :** S275 yapı çeliğine ait plastik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.

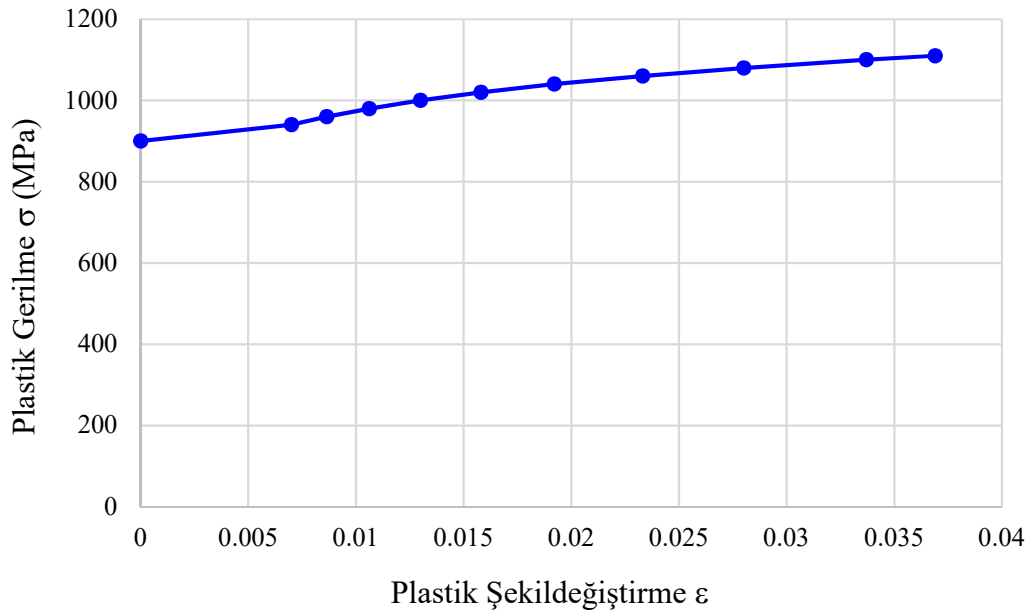
Tüm bulonlar için (10.9) mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekildeğiştirmesi değerleri Bölüm 4.1.3’de açıklanan malzeme modeli (Şekil 4.6) ile hesaplanmıştır.

Sonlu eleman analizlerinde kullanılan plastik gerilme-şekildeğiştirme değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

**Çizelge 4.6 :** 10.9 bulonlar için kullanılan gerilme-şekildeğiştirme değerleri.

| Gerilme<br>$\sigma$ (MPa) | Plastik Şekildeğiştirme<br>$\varepsilon$ (%) |
|---------------------------|----------------------------------------------|
| 900                       | 0                                            |
| 940                       | 0.006995                                     |
| 960                       | 0.008635                                     |
| 980                       | 0.010612                                     |
| 1000                      | 0.012988                                     |
| 1020                      | 0.0158                                       |
| 1040                      | 0.0192                                       |
| 1060                      | 0.0233                                       |
| 1080                      | 0.0280                                       |
| 1100                      | 0.0337                                       |
| 1110                      | 0.0369                                       |

Verilen değerler kullanılarak elde edilen S275 yapı çeliğine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.17 :** 10.9 sınıfı bulon malzemesine ait plastik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.

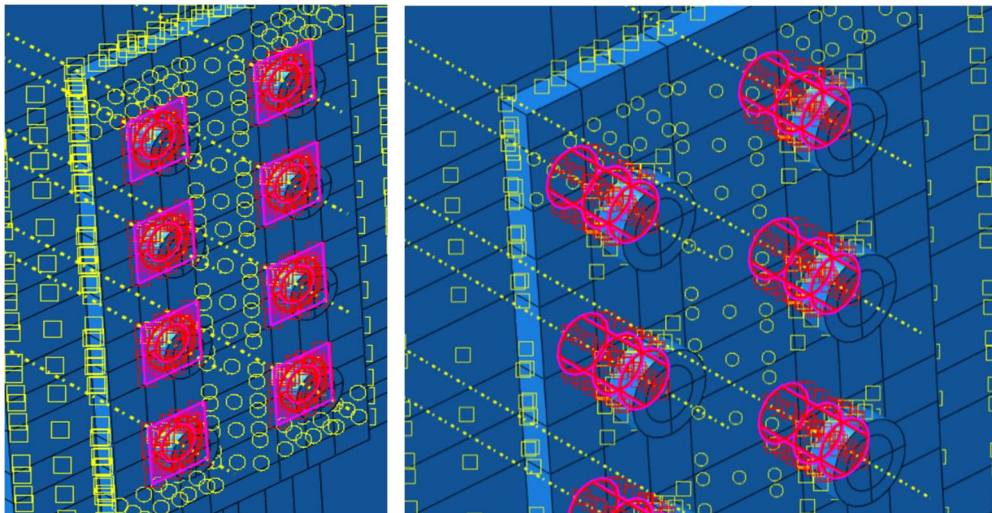
### 4.2.3 Analiz adımları

Sonlu eleman analizleri toplamda 3 analiz adımından oluşmaktadır. Başlangıç adımında kolon ve kiriş üzerinde sınır koşulları uygulanmış ve yüzeyler arası etkileşimler tanımlanmıştır. İkinci adımda bulon öçekme kuvvetleri etkilmiştir. 2-bulonlu ve 4-bulonlu birleşimlerde kullanılan M24-10.9 ve M22-10.9 bulonlara sırasıyla 247 kN ve 212 kN öçekme kuvveti uygulanmıştır. Üçüncü adımda ise kiriş yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Her iki birleşim modeli için benzer analiz adımları uygulanmıştır.

### 4.2.4 Yüzey etkileşimleri

Birleşim modellerinde temas özellikleri tanımlanan yüzey tanımları; bulonlar ve bulon delikleri arasındaki temas, bulon başlıkları ve alın levhası arasındaki temas, somunlar ile kolon başlığı arasındaki temas ve alın levhası ile kolon arasındaki temas yüzeyleridir (Şekil 4.18). Yüzey etkileşimleri etkileşim (interaction) modülünde yüzey-yüzey (surface-to-surface) etkileşimi biçiminde tanımlanmıştır.

Temas yüzeyleri arasındaki teğetsel davranış “Penalty” sürtünme formülasyonu ile tanımlanmıştır. Tüm yüzey etkileşimleri için sürtünme katsayısı 0.3 olarak alınmıştır. Yüzeyler arası normal yönlü etkileşim “Hard contact” seçeneği ile tanımlanmıştır.



Şekil 4.18 : Bulon delikleri ile bulonlar arası yüzey etkileşimleri.

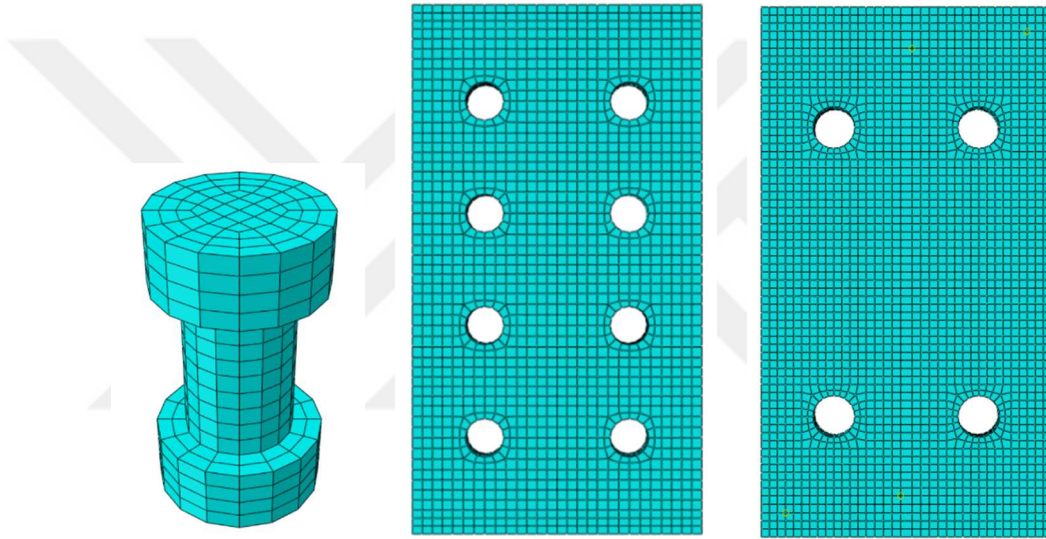
Temas eden yüzeylerde birincil yüzey (master surface) ve ikincil yüzey (slave surface) tanımları yapılarak yüzeyler arası etkileşim detaylıca sınırlandırılabilir.

#### 4.2.5 Eleman özellikleri

Sonlu eleman modelleri Bölüm 4.1.6’da açıklanan sekiz düğüm noktalı, üç boyutlu katı eleman tipi C3D8R elemanlardan oluşturulmuştur.

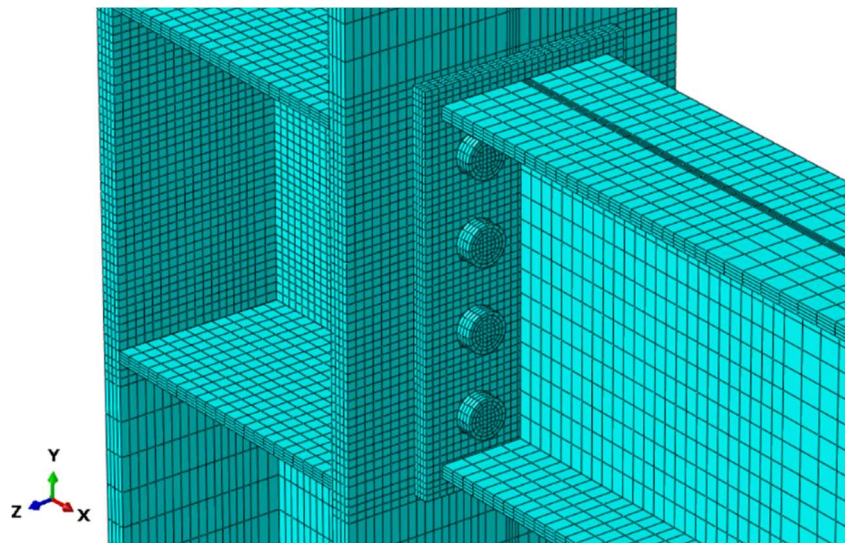
#### 4.2.6 Sonlu eleman ağı

Kayma kilitlenmesi (shear lock) gibi analiz problemlerinin önlenmesi için kiriş ve kolon gövde ve başlığı gibi elemanların kalınlığı boyunca en az 4 adet sonlu eleman ağı sıklığı uygulanmıştır. Bulon ve alın levhalarına ait sonlu eleman ağı Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 : Bulon ve alın levhalarına ait sonlu eleman ağı.

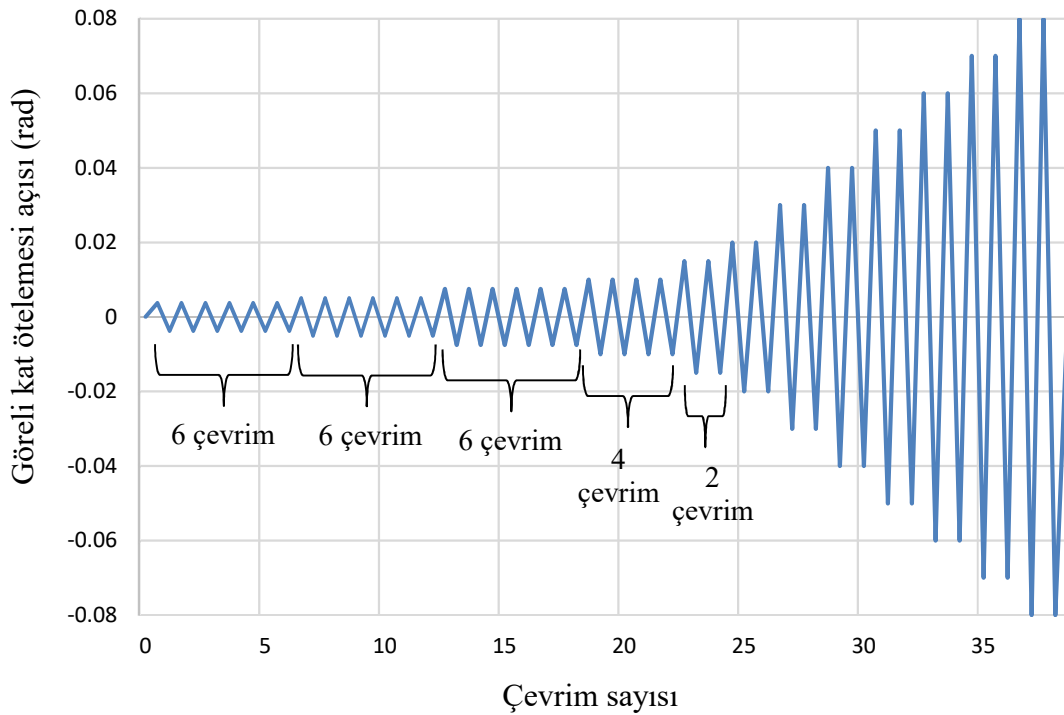
FEP-4B birleşimine ait sonlu eleman ağı Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 : FEP-4B birleşimine ait sonlu eleman ağı.

#### 4.2.7 Çevrimsel yükleme protokolü

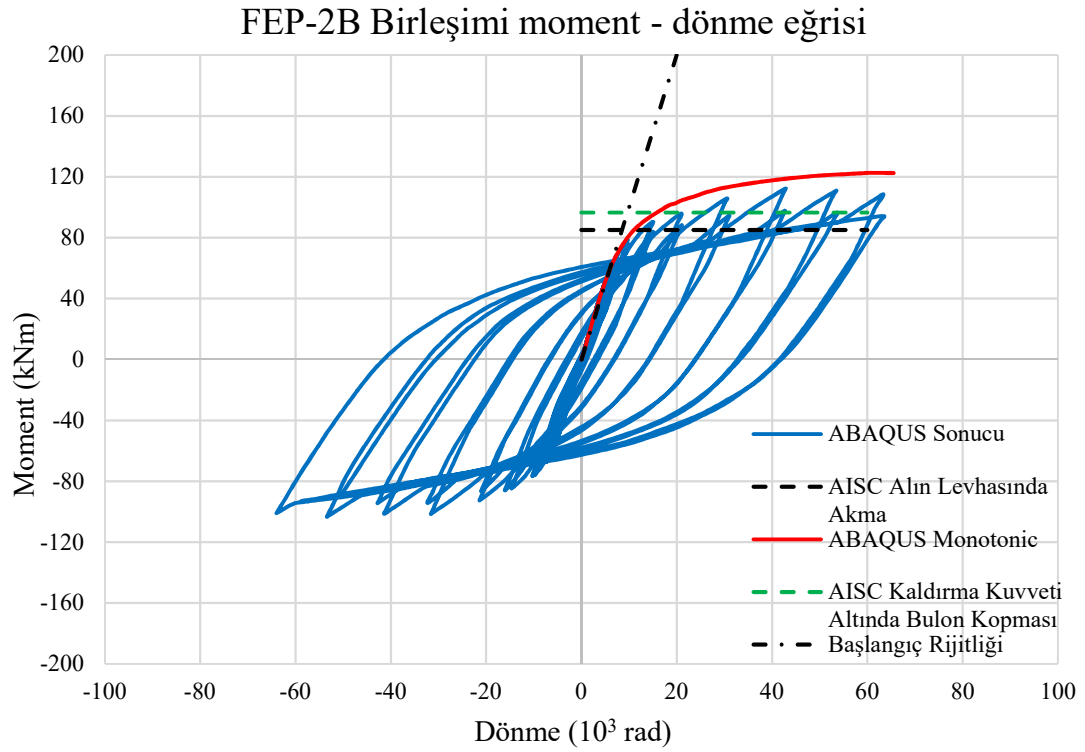
Deprem yükleri altında birleşim davranışı inceleneceğinden çevrimsel yükler altında analiz yapılması gereklidir. Birleşimler AISC 341-16 (2016) Bölüm K2-4b’de açıklanan yükleme protokolüne (Şekil 4.21) uygun olarak oluşturulmuştur. Burada görelî kat ötelemesi açısı ilk 6 çevrimde 0.00375 rad, sonrasında 6 çevrim 0.005 rad, 6 çevrim 0.0075 rad, 4 çevrim 0.01 rad, 2 çevrim 0.015 rad, 2 çevrim 0.02 rad, 2 çevrim 0.03 rad ve sonraki her 0.01 radyan artış için 2 çevrim olacak şekildedir. Yükleme adımımda uygulanacak hedef deplasmanlar, belirlenen görelî kat ötelemesi açısının yükleme noktasından alın levhasına olan mesafe (1836 mm) ile çarpılması sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.21 : Çevrimsel yükleme protokolü (AISC 341-16, 2016).

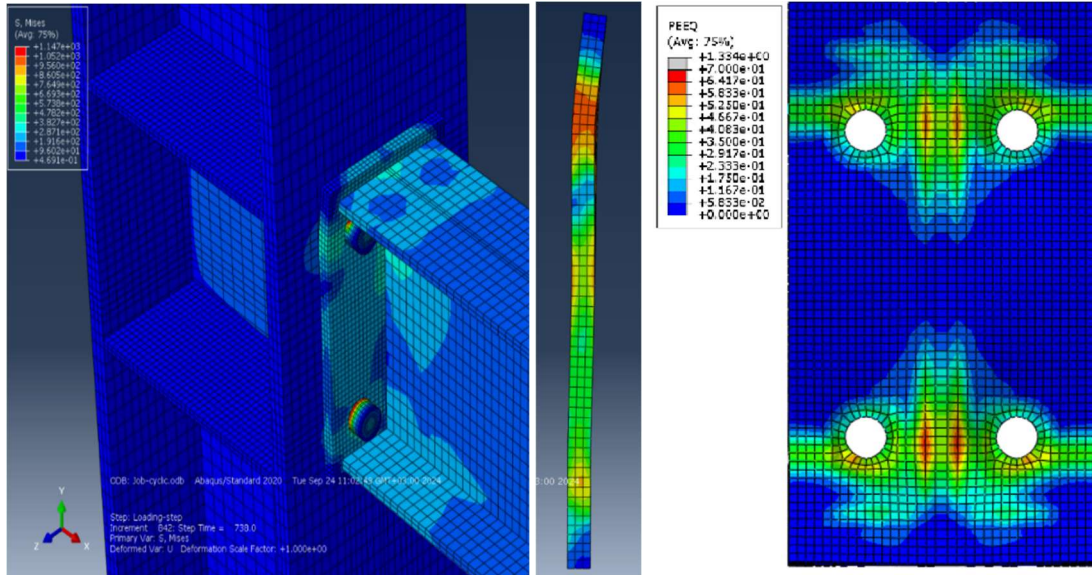
#### 4.2.8 Sonlu eleman analizi sonuçları

FEP-2B birleşimine ait sonlu eleman analizi sonucu elde edilen moment-dönme eğrisi Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Kırmızı ile gösterilen eğri birleşimin tek yönde artan yükleme etkisindeki moment-dönme ilişkisini, mavi ile gösterilen eğri ise çevrimsel yükleme etkisindeki ilişkisini temsil etmektedir.



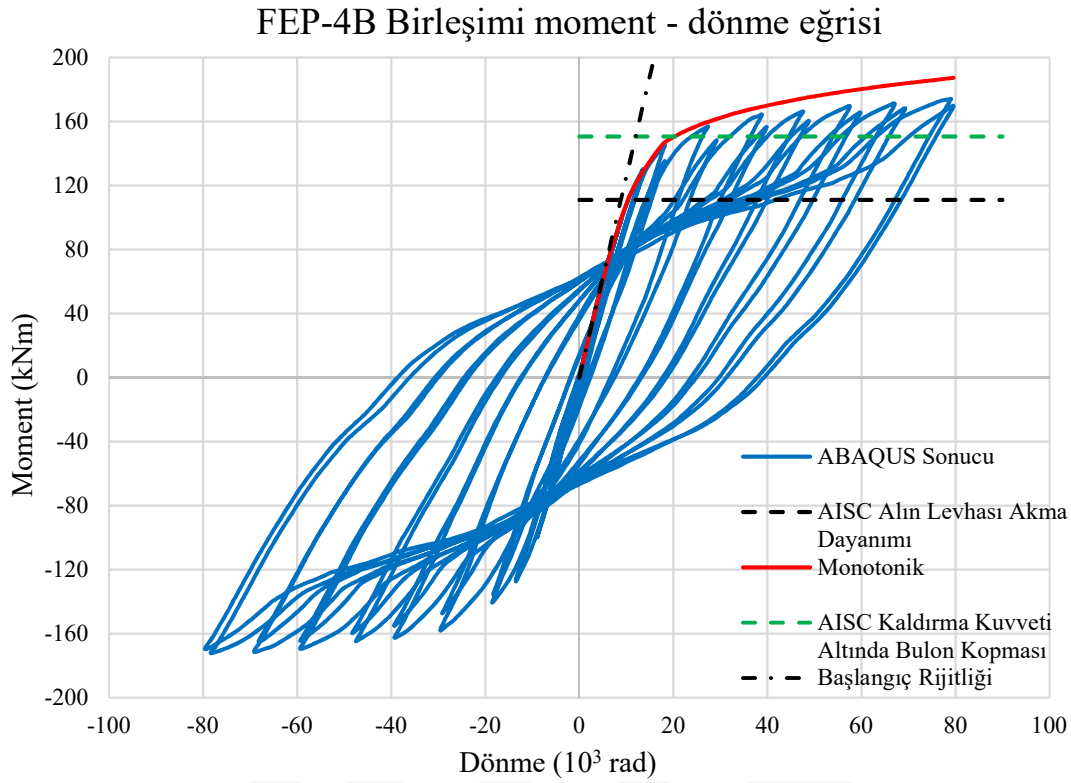
**Şekil 4.22 :** FEP-2B birleşimi moment-dönme eğrisi.

Sonlu eleman analizi sonucu alın levhasında oluşan gerilme dağılımları Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Gerilmeler akma çizgileri teorisinde açıklanan biçime benzer olarak kiriş gövdesi ile çekme altındaki bulonlar ve kiriş başlıkları arasında yoğunlaşmıştır.



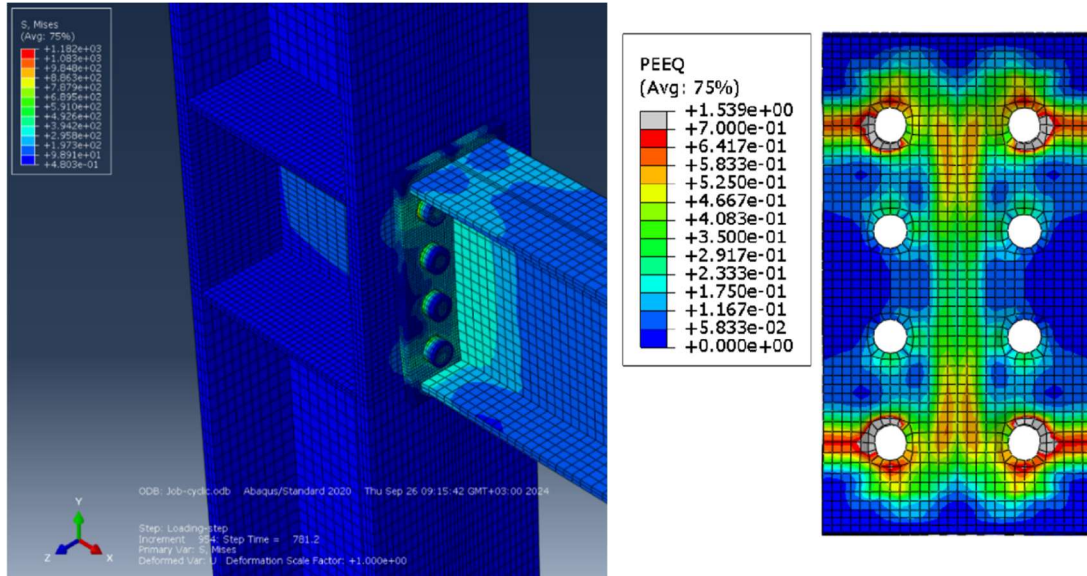
**Şekil 4.23 :** FEP-2B birleşimi analiz sonucu gerilme dağılımı ve akma bölgeleri.

FEP-4B birleşiminin sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen moment-dönme eğrisi ve analiz sonucu gerilme dağılımları ise sırasıyla Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.24 :** FEP-4B birleşimi moment-dönme eğrisi.

Alın levhasında akma çizgilerinin yoğunlukla çekme bulonları arasında ve kiriş gövdesi ile kiriş başlığı etrafında olduğu gözlemlenmiştir. İç bulon grubunda çoğunlukla plastikleşme gözlemlenmemiştir.



**Şekil 4.25 :** FEP-4B birleşimi analiz sonucu gerilme dağılımı ve akma çizgileri.

Alın levhasında akma bölgelerinin kiriş başlığı bitişiğindeki bulonların çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. İç bulon grubu çevresinde ise düşük miktarda akma görülmüştür.

### 4.3 Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Birleşimler için hesaplanan eğilme kapasiteleri ve başlangıç rijitlikleri sırasıyla Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de gösterilmiştir. Akma çizgileri yöntemi hem bulonların kaldırma kuvveti etkisinde kopması hem de alın lehvasının plastikleşmesi sınır durumlarından düşük olanı seçilerek belirlenmiştir. Tüm birleşimler için alın levhasının plastikleşmesi belirleyici olmuştur.

**Çizelge 4.7 : Birleşimlerin moment kapasiteleri.**

| Birleşim      | Deney sonucu (kNm) | Bileşen yöntemi (Eurocode) (kNm) | Akma çizgileri yöntemi (AISC) (kNm) | Sonlu eleman analizi sonucu (ABAQUS) (kNm) |
|---------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| F1-3/4-3/8-16 | 72.73              | 64.67                            | 63.18                               | 71.80                                      |
| FEP-2B        | -                  | 87.35                            | 85.08                               | 102.82                                     |
| FEP-4B        | -                  | 129.29                           | 110.96                              | 169.52                                     |

Moment-dönme grafikleri incelendiğinde, alın levhasında akmanın ilk gözlemlendiği seviyenin nümerik yöntemler ile belirlenen alın lehası dayanımlarına yakın olduğu görülmüştür. Akma sonrası kapasiteye ulaşma noktasında ise bulonların çekme dayanımı belirleyici olmaktadır.

Akma çizgileri ile hesaplanan eğilme dayanımları, sonlu eleman analizlerine kıyaslandığında F1-3/4-3/8-16, FEP-1 ve FEP-2 birleşimleri için sırasıyla %13.6, %20.9 ve %52.8 daha düşük seviyededir. Bileşen yöntemi kullanılarak hesaplanan birleşim dayanımları ise, aynı birleşimler için, sonlu eleman analizlerine kıyasla sırasıyla %11, %17.7 ve %31.1 daha düşük seviyededir.

**Çizelge 4.8 : Birleşimlerin başlangıç rijitlikleri.**

| Birleşim      | Deney sonucu (kNm/rad) | Bileşen yöntemi ( $S_{i,CM}$ ) (kNm/rad) | Sonlu eleman analizi sonucu ( $S_{i,FEM}$ ) (kNm/rad) | $S_{i,CM} / S_{i,FEM}$ |
|---------------|------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|
| F1-3/4-3/8-16 | 10235                  | 11578.40                                 | 9647                                                  | 1.200                  |
| FEP-2B        | -                      | 13690.53                                 | 10851                                                 | 1.261                  |
| FEP-4B        | -                      | 17305.91                                 | 12562                                                 | 1.378                  |

Bileşen yöntemi ile hesaplanan başlangıç rijitlikleri, sonlu eleman analizlerine kıyaslandığında F1-3/4-3/8-16, FEP-2B ve FEP-4B birleşimleri için sırasıyla %20, %26.1 ve %37.7 daha düşük seviyededir.

Başlangıç yöntemi ile hesaplanan birleşim dayanımlarının sonlu eleman analizlerine akma çizgileri teoremine kıyasla daha yakın olduğu, ancak başlangıç rijitlikleri hesaplarında önemli miktarda yüksek olduğu görülmüştür. Her iki nümerik analiz yöntemi ile de güvenli bir seviyede dayanım hesaplandığı görülmüştür.



## **5. KİRİŞ ENKESİTİ YÜKSEKLİĞİNDE ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN YAPI DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Çelik taşıyıcı sistemlerin deprem ve rüzgar gibi yatay yüklerin büyük kısmı moment aktaran veya çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılanması beklenirken, düşey yük taşıyıcı çerçevelerin (gravity frame) yalnızca düşey yükleri karşıladığı varsayılır ve sismik yükler altında yapısal etkileri göz ardı edilmektedir. Bu tür çerçevelerin kiriş-kolon birleşimleri mafsallı birleşimler ile teşkil edilmektedir. Kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimler düşey yük taşıyıcı çerçevelerde uygulanan birleşim türlerinden biridir. Farklı yöntemler ile çeşitli tasarımlara imkan sağlayan bu birleşimler, literatürde yer alan deneysel ve nümerik analizler ile önemli seviyede eğilme dayanımı ve dönme kapasitesinin yanı sıra enerji sönmeme mekanizmaları ile de yeterliliğini kanıtlamıştır. Bu birleşimlerin yapısal analizlerde detaylı yapı modelleri ile birlikte yansıtılması ve doğrusal olmayan etkilerinin incelenmesi önemlidir.

Bir yapının, düşey yüklerin yanı sıra deprem etkileri altında göstereceği davranışın doğru bir şekilde incelenebilmesi için, detaylı ve gerçekçi yapısal modeller ile analizlerin yapılması önemli bir kriterdir. Özellikle çelik yapıların doğrusal olmayan davranışı ele alınırken gerçek deprem kayıtlarının kullanılması ve kapsamlı analizlerin yapılması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında taşıyıcı sistemi moment aktaran çelik çerçevelerden oluşan 4 katlı bir çelik yapının doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Düşey yük taşıyıcı çerçevelerde, bu çalışma kapsamında tasarım ve sonlu eleman analizleri gerçekleştirilen FEP-2B ve FEP-4B isimli kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimler ile teşkil edilmiştir. Yapısal analizler OpenSees (2009) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

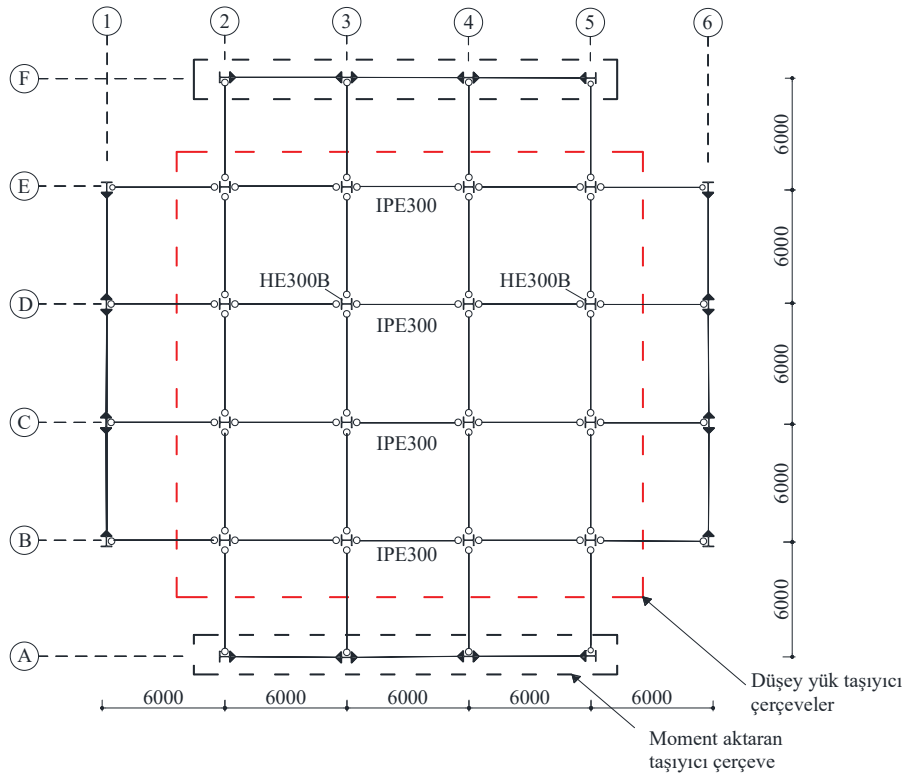
### **5.1 Model Yapı**

Bu çalışma kapsamında incelenecek yapı, TBDY (2018) ve ÇYTHYE (2017) yönetmeliklerine uygun olarak hazırlanmış 4 katlı bir çelik ofis binasıdır. Yapı elemanlarının boyutlandırması bu çalışmanın odağında olmadığından, analizlerde

Karasu (2018) tarafından eleman boyutlandırması ve doğrusal olmayan analizleri yapılmış bina kullanılacaktır. Bu sayede kısa alın levhalı kiriş kolon birleşimleri ile kiriş yüksekliğinde alın levhalı kiriş kolon birleşimlerinin yapısal etkilerinin de kıyaslanması hedeflenmektedir.

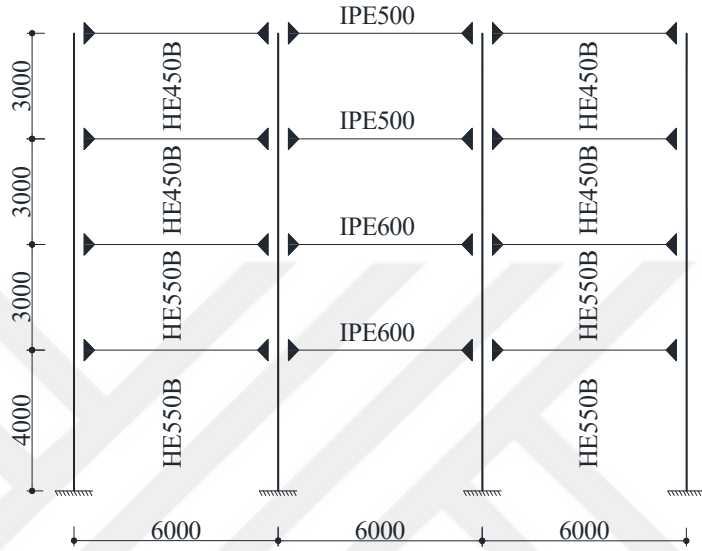
Yapının yer aldığı konum İstanbul, Maslak olarak belirlenmiştir. Türkiye Deprem Risk Haritasından (<https://tdth.afad.gov.tr>) yararlanarak kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı ve 1.0 saniyelik periyot değerine karşı gelen tasarım spektral ivme katsayısı değerleri sırasıyla  $S_{D5}=0.875g$  ve  $S_{D1}=451g$  olarak elde edilmiştir. Seçilen konum için ZD yerel zemin sınıfı kabul edilmiştir. TBDY (2018) Tablo 3.1'e göre bina kullanım sınıfı BKS=3.0 ve bina önem katsayısı  $I=1.0$  olarak belirlenmiştir. TBDY (2018) Tablo 3.2'ye göre deprem tasarım sınıfı DTS=1.0 olarak belirlenmiştir.

Yapının kat planı Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Binanın dış çevresinde yer alan moment aktaran çelik taşıyıcı çerçeveler Şekil 5.2'de gösterilen kesitlerden oluşmaktadır. Binanın iç kısmında (Şekil 5.1'de kırmızı ile gösterilen bölge) yer alan çerçeve sistemi ise yalnızca düşey yük taşıması beklenen düşey yük taşıyıcı çerçevelerden oluşmaktadır. Tali kirişler 1.5m aralıklarla, düşey yük çerçeve kirişlerine her iki uçtan mafsallı olarak yerleştirilmiştir. Görüntü sadeliği açısından Şekil 5.1'de tali kiriş yerleşimi gösterilmemiştir.



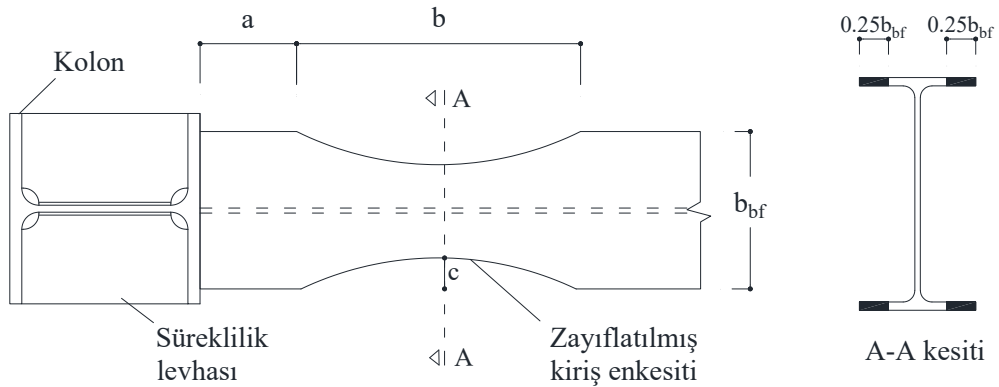
**Şekil 5.1 :** İncelenecek yapıya ait normal kat planı (Karasu, 2018).

Düşey yük çerçevelerinde tüm katlarda sırasıyla IPE300 ve HE300B kiriş ve kolon kesitleri kullanılmıştır. Moment aktaran çerçevelerde yer alan kiriş ve kolon enkesitleri TBDY (2018) uyarınca Karasu (2018) tarafından boyutlandırılmış ve yine TBDY (2018) Tablo 9.3'te gösterilen başlık ve gövde enkesitleri için narinlik sınırlarını ( $\lambda$ ) aşmayacak şekilde seçilmiştir. Tüm taşıyıcı sistem elemanlarında S275 sınıfı çelik kullanılmıştır.



**Şekil 5.2 :** Moment aktaran taşıyıcı çerçeve bilgileri (Karasu, 2018).

Deprem yüklerini karşılayacak moment aktaran çelik çerçevelerde, Şekil 5.3'te gösterilen, kaynaklı zayıflatılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimleri teşkil edilmiştir. Bu birleşimler kirişte oluşacak plastik mafsallın zayıflatılmış enkesit ile sınırlandırılması ve güçlü kolon-zayıf kiriş koşulunun sağlanmasında etkilidir.



**Şekil 5.3 :** Moment aktaran çerçeveler için kullanılan zayıflatılmış kiriş enkesiti (TBDY, 2018).

Şekilde gösterilen a, b ve c parametrelerinin yanı sıra kiriş başlık bölgesi kesim yarıçapı R, TBDY (2018) uyarınca belirlenmiştir. Yapısal analizlerde ÇYTHYE

(2016) Bölüm 6.3’te açıklanan genel analiz yöntemi kullanılmıştır. Boyutlandırma aşamasında ise Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım yöntemi (YDKT) benimsenmiştir. Moment aktaran çerçevelerin iç kolonlarında bulunan panel bölgelerinde 1 ve 2. kat için 20 mm, 3 ev 4. kat için ise 14 mm kalınlıklı takviye levhaları yer almaktadır. Kenar kolonlarda takviye levhası yer almamaktadır.

## 5.2 Birleşimlerin Histeretik Davranış Modelinin Oluşturulması

Birleşimlerin moment-eğrilik davranışı tanımlanırken “Uniaxial Hysteretic material” isimli çevrimsel davranış modellemesi kullanılmıştır. Bu davranış modeli, moment-dönme grafiğinin pozitif ve negatif bölgelerinin her biri için elde edilen zarf eğrilerinin 2 veya 3 noktası belirlenerek çevrimsel yükler altında eleman davranışını yansıtmak için kullanılır. Birleşimlerin tekrarlı tersinir yükler altında süneklik ve enerji kaynaklı uğrayacağı dayanım kaybı sırasıyla “damage1” ve “damage2” parametreleri ile modele işlenir. Süneklik ve enerji kaynaklı dayanım kayıpları bu çalışma kapsamında oluşturulan modellerde ihmal edilmiştir. Birleşimlerin moment-dönme eğrisinde gözlemlenen daralma (pinching) etkileri “pinchX” ve “pinchY” parametreleri ile tanımlanır. Geri yükleme sırasında oluşacak rijitlik kaybı ise “beta” parametresi kullanılarak modele etkitilir. Sonlu eleman analizi ile uyumlu belirlenen histeretik davranış modellerine ait parametreler Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

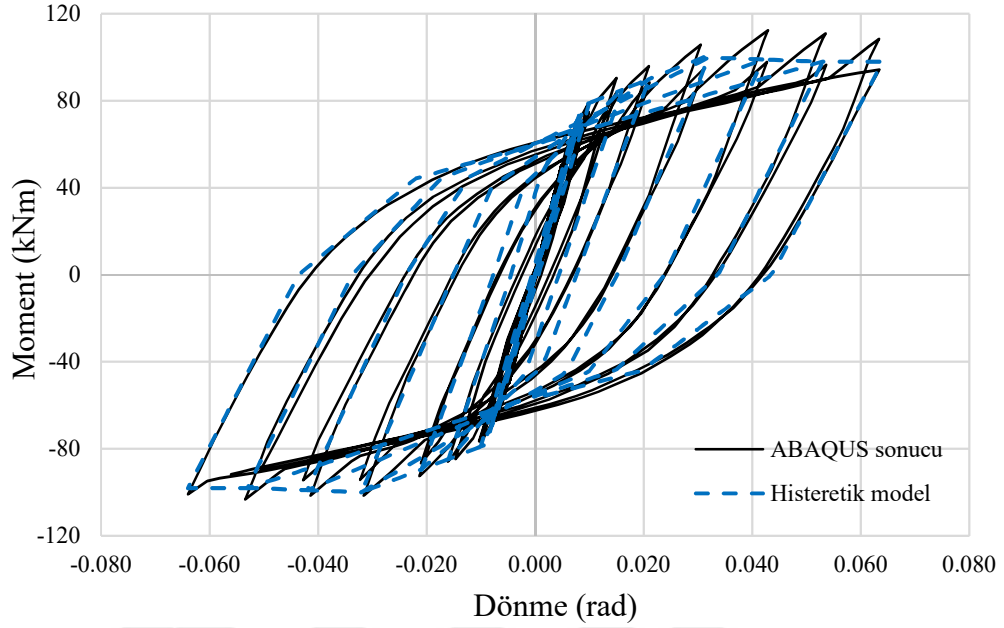
Düşey yük taşıyıcı çerçevelere ait kiriş-kolon birleşimlerinin mafsallı bağlantılar ile oluşturulduğu modelde (PinModel) eşdeğer tek açıklıklı çerçeveye ait kiriş-kolon birleşimleri mafsallı olacak şekilde modellenmiştir. Düşey yük taşıyıcı çerçevelere ait kiriş-kolon birleşimlerinin kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimler ile oluşturulduğu modellerde ise (FEP-2B ve FEP-4B Modelleri) eşdeğer tek açıklıklı çerçeveye ait kiriş-kolon birleşimleri sıfır uzunlukta eleman (zerolength element) tanımları ile oluşturulmuştur. Bu elemanların doğrusal olmayan davranışı ise “Uniaxialmaterial Hysteretic” komutundan faydalanılarak modele aktarılmıştır.

**Çizelge 5.1 :** Histeretik davranış modellerine ait parametreler.

| Birleşim | pinchX | pinchY | damage1 | damage2 | beta |
|----------|--------|--------|---------|---------|------|
| FEP-2B   | 0.25   | 0.45   | 0.0     | 0.0     | 0.30 |
| FEP-4B   | 0.90   | 0.80   |         |         | 0.45 |

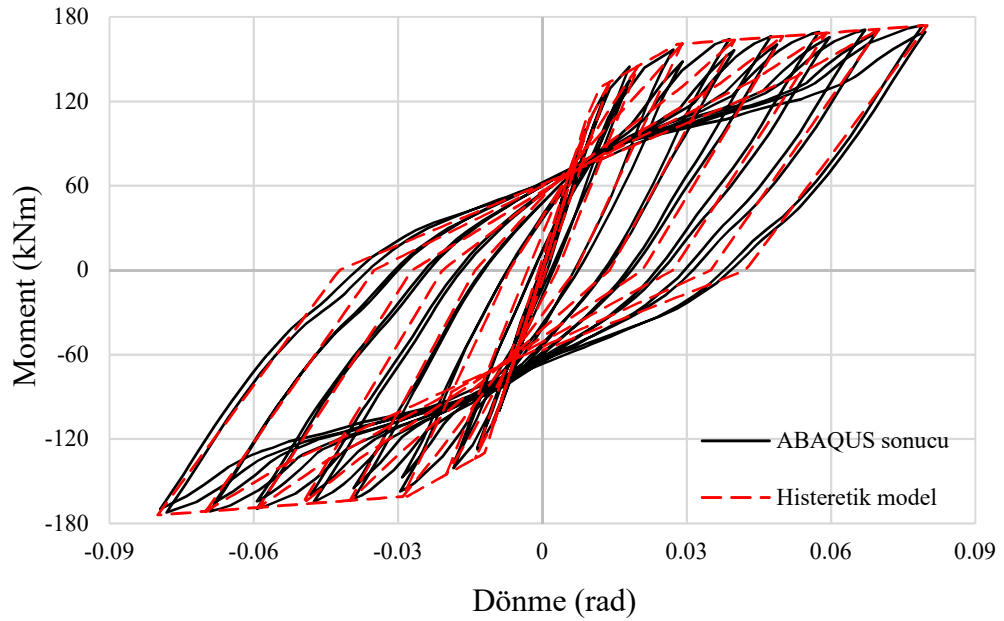
Çizelge 5.1’de gösterilen parametreler kullanılarak oluşturulan histeretik davranış modeli Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

#### FEP-2B FEA ve Histeretik Davranış Modeli



Şekil 5.4 : FEP-2B birleşimine ait histeretik davranış modeli.

#### FEP-4B FEA ve Histeretik Model



Şekil 5.5 : FEP-4B birleşimine ait histeretik davranış modeli.

Çevrimsel davranış modelleri sonlu eleman modellerini güvenli bir yaklaşımla ve simetrik olarak yansıtacak şekilde oluşturulmuştur.

### 5.3 Yapının Eşdeğer Taşıyıcı Çerçeve Modeline Entegrasyonu

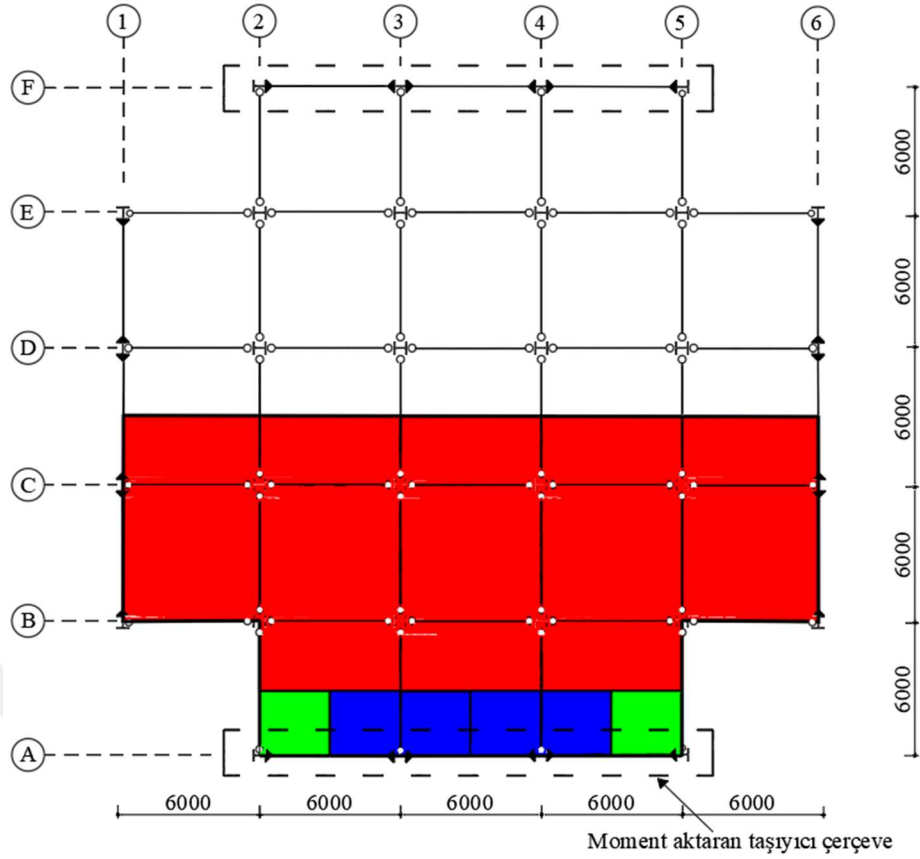
Yapı sisteminin doğrusal olmayan analizler yardımı ile kapsamlı şekilde incelenebilmesi için yapıyı oluşturan tüm elemanların detaylı biçimde modele yansıtılması gereklidir. Deprem yükleri altında doğrusal olmayan analiz için açık kaynak kodlu yapısal analiz programı OpenSees (2009) kullanılmıştır. OpenSees, kiriş-kolon birleşimlerinin yapı modeline entegre edilmesinde dayanım kaybı davranışını isabetli biçimde yansıttığı için etkili yapısal analizler yapmayı mümkün kılmaktadır.

Modeller, deprem yükü taşıyıcı sistem tarafından karşılanan tüm sismik yükleri ve P-delta etkilerini dikkate almalıdır. Buna, deprem yükü taşıyıcı sistemin bileşenlerine doğrudan etkiyen kuvvetler ile bu sistem sayesinde yatay stabilitesini sağlayan diğer düşey yükler taşıyıcı sistemler de dahildir. Modeller ayrıca göçme öncesinde sergilenen rijitlik ve dayanım kayıplarını ve binanın sönmülediği enerjiyi de hesaba katmalıdır.

Yapısal analizlerde kullanılmak üzere binanın Gupta ve Krawinkler (1999) tarafından önerilen eşdeğer çerçeve modeli kullanılarak modellenmesi uygun görülmüştür. Eşdeğer çerçeve modeline göre, döşeme sistemi rijit diyaframlardan oluştuğu varsayılan, taşıyıcı çerçevesi binanın dış açıklıklarında yer alan yapıların, iki boyutlu taşıyıcı çerçeveye indirgenmesi mümkündür.

$$\begin{aligned}\sum EI_i/L_i &= EI_{eqv}/L_{eqv} \\ \sum M_{p,i} &= M_{p,eqv}\end{aligned}\tag{5.1}$$

Burada  $I_i$ ,  $L_i$  ve  $M_{p,i}$  i katındaki kiriş için sırasıyla atalet momenti, uzunluk ve plastik moment kapasitesini temsil etmektedir. Düşey yüklerin alana bağlı dağılımı Şekil 5.6'da gösterildiği üzere belirlenmiştir. Kırmızı renkte gösterilen bölge düşey yük taşıyıcı çerçevelerin karşıladığı yük alanını, mavi ve yeşil renkli bölgeler ise, moment aktaran çerçevelerde yer alan, sırasıyla iç kolonlar ve kenar kolonlar ile karşılanan döşeme alanını temsil etmektedir.

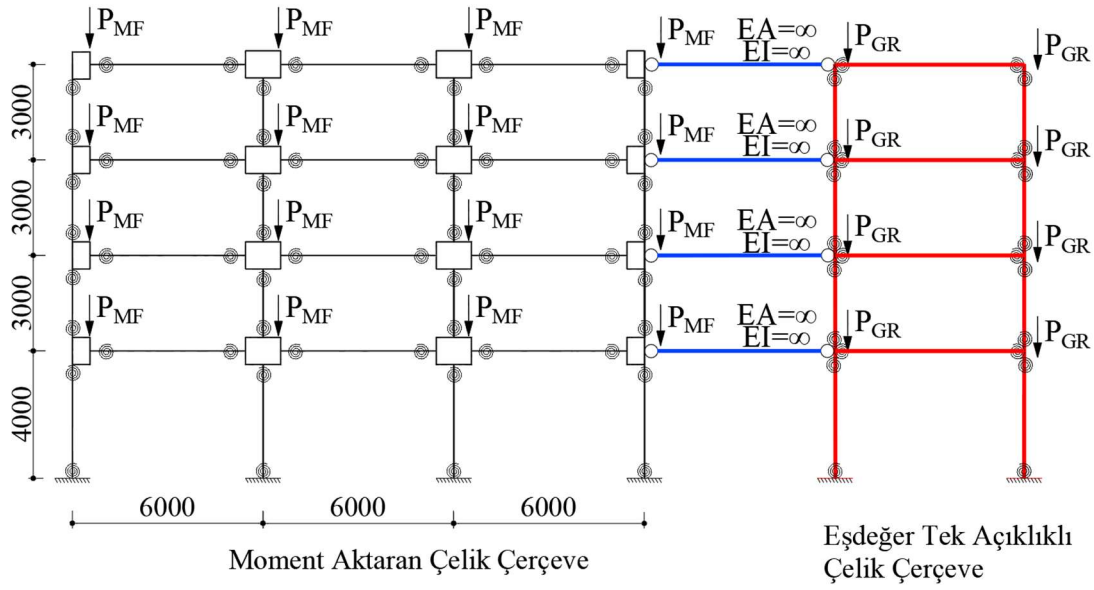


**Şekil 5.6 : Düşey yüklerin alana bağlı dağılımı.**

Birbirine dik doğrultuda olmak üzere ikişer adet moment aktaran çerçeve tarafından yatay yükler karşılanır. Düşey yüklerin dağılımında ise kat planına düşen alanın yarısından moment aktaran çerçeve kolonlarına düşen döşeme alanı çıkartılarak düşey yüklerin büyüklüğü elde edilir. Kullanılan yük kombinasyonu aşağıdaki gibidir. Kar yükü etkisi ihmal edilmiştir.

$$1.05G + 0.25Q$$

Normal katlarda sabit yayılı yük  $4.9 \text{ kN/m}^2$ , çatı katında ise  $4.0 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Hareketli yük ise tüm katlarda  $2.0 \text{ kN/m}^2$  olarak kabul edilmiştir. Moment aktaran taşıyıcı çerçeve ile düşey yük taşıyıcı çerçevenin eşdeğer çerçeve modeli Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Şekil 5.6’da gösterilen düşey yüklerin belirlenmesi sonrasında Şekil 5.7’de gösterildiği gibi düğüm noktalarına tekil yük olarak etkililmiştir.



**Şekil 5.7 :** Eşdeğer taşıyıcı çerçeve modeli.

Örneğin, eşdeğer tek açıklıklı çerçeve kolonlarına etkitilecek düşey yük  $P_{GR}$ 'nin büyüklüğü normal kat yükleri göz önüne alındığında aşağıda gösterilen şekilde hesaplanmıştır.

$$A_{GR} = 9 \times 30 + 3 \times 18 = 324 \text{ m}^2$$

$$G = 4.9 \times 324 = 1587.6 \text{ kN} ; Q = 2.0 \times 324 = 648 \text{ kN}$$

$$1.050G + 0.25Q = 1666.98 + 162 = 1828.98 \text{ kN}$$

$$P_{GR} = 1828.98/2 = 914.49 \text{ kN}$$

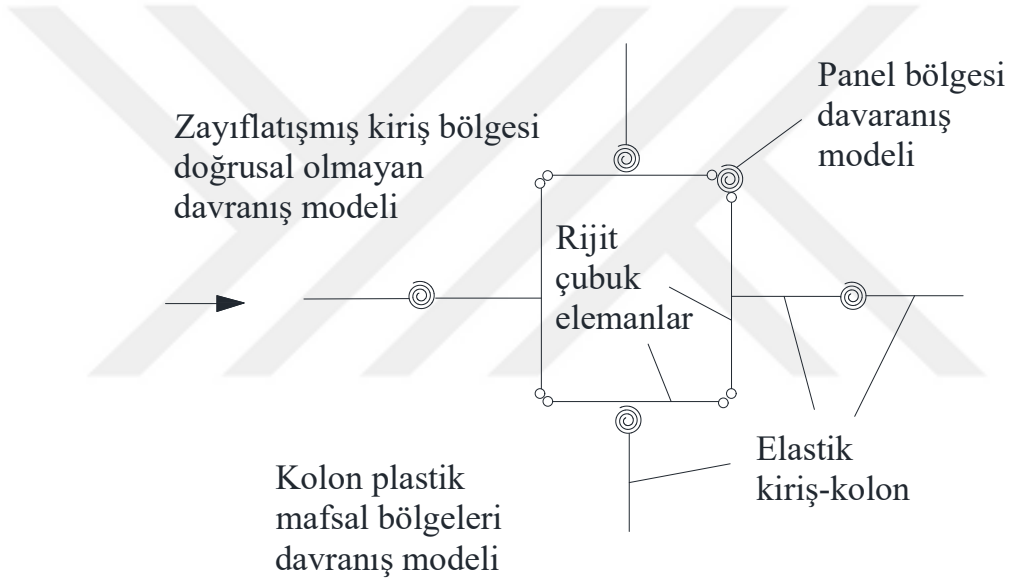
Burada  $A_{GR}$  düşey yük taşıyıcı kolonlara düşen alanı temsil etmektedir (Şekil 5.4, kırmızı ile gösterilen bölge).  $P_{GR}$  yükü bu alana karşı gelen düşey yükün eşdeğer tek açıklıklı çerçevede bulunan iki kat kolonuna bölünmesi ile elde edilir. Aynı işlem Şekil 5.4'te mavi ve yeşil renk ile gösterilen bölgeler için tekrarlanarak moment aktaran çerçeve kolonlarına etki eden düşey yükler ( $P_{MF}$ ) hesaplanmıştır. Hesaplanan kuvvetlerin büyüklüğü Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.2 :** Eşdeğer çerçeve kolonlarına etki eden düşey yükler.

|            | $P_{MF}$ (kN) |          | $P_{GR}$ (kN) |
|------------|---------------|----------|---------------|
|            | Köşe kolon    | İç kolon |               |
| Çatı katı  | 42.30         | 84.60    | 761.40        |
| Normal kat | 50.80         | 101.61   | 914.49        |

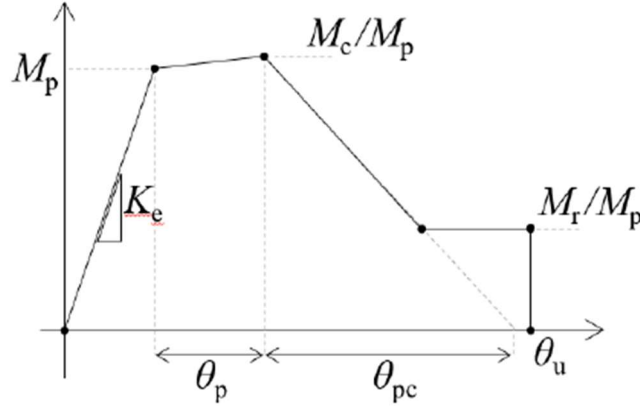
Düşey yük taşıyıcı çerçevelerinde her bir doğrultu için toplam 10 adet kiriş, 8 adet kolon ve 32 adet kiriş-kolon birleşimi yer almaktadır. Dolayısıyla bu elemanların tümü eşdeğer tek açıklıklı çerçeve üzerinde tanımlanmıştır. Denklem 5.1’de gösterildiği gibi eşdeğer tek açıklıklı çerçeveye 10 adet kiriş ve 8 adet kolon enkesitine karşı gelen enkesit özellikleri tanımlanmıştır. Moment aktaran çerçevenin eşdeğer tek açıklıklı çerçeveye bağlantısı rijitliği yüksek çubuk elemanlar (truss) ile gerçekleştirilmiştir.

Kiriş ve kolon elemanları tanımlanırken yığılı plastisite yaklaşımından faydalanılmıştır. Bu yaklaşımda, kiriş ve kolon enkesitleri, uç noktalarında dönmeye izin veren yay elemanlar bulunan elastik çubuk elemanlar olarak tanımlanır (Şekil 5.8). Böylece bu elemanlarda oluşacak plastik mafsalların konumu ve doğrusal olmayan davranışı eşdeğer çerçeve modeline tanımlanmıştır.



**Şekil 5.8 :** Panel bölgesi modeli.

Kiriş ve kolon elemanlarının uç bölgelerinde yer alan olası plastik mafsallar yay elemanları Ibarra ve diğ. (2005) tarafından açıklanan, sonrasında Lignos ve Krawinkler (2011) tarafından geliştirilen Ibarra-Medina-Krawinkler davranış modeli (Modified IMK Model) kullanılarak modele tanımlanmıştır (Şekil 5.9).



**Şekil 5.9 :** Elastik kiriş ve kolon elemanlarında kullanılan IMKBilin davranış modeli.

Yapıda sönüm Rayleigh modelinden yararlanarak tanımlanmıştır. Zareian ve Medina (2010) tarafından önerilen sönüm denklemlerine göre, Rayleigh sönümü yapısal kütle ve rijitlik ile orantılı iki terim ile formüle edilir. Kütle orantılı sönüm,  $a_0$  katsayısı ile kütle matrisinin çarpılmasıyla elde edilir.

$$a_0 = \frac{c_i^*}{m_i^*} = 2\omega_i \zeta_i \rightarrow \zeta = \frac{a_0}{2\omega_i} \quad (5.2)$$

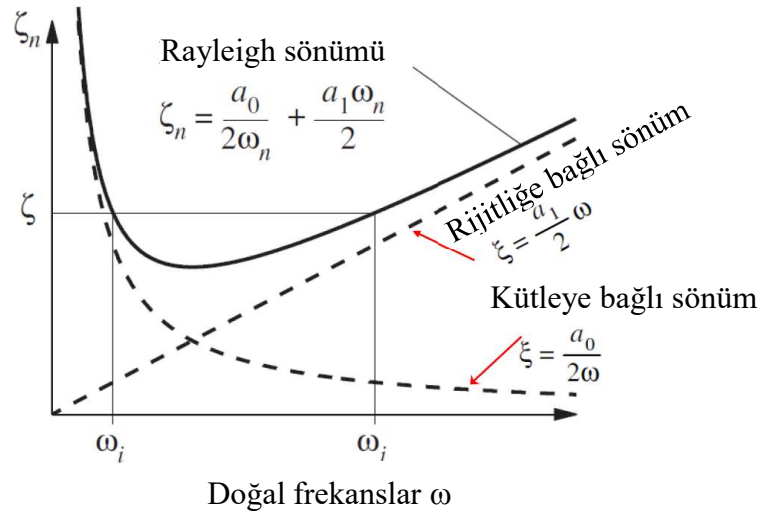
Rijitlik orantılı sönüm ise rijitlik matrisinin  $a_1$  katsayısı ile çarpılması sonucu elde edilmektedir.

$$a_1 = \frac{c_i^*}{k_i^*} = \frac{c_i^*}{\omega_i^2 m_i^*} = \frac{2\zeta_i}{\omega_i} \rightarrow \zeta = \frac{a_1 \omega_i}{2} \quad (5.3)$$

Denklem 5.4'te görüldüğü gibi Rayleigh sönümü bu iki sönüm teriminin toplanması ile elde edilir.

$$\zeta = \frac{a_0}{2\omega_i} + \frac{a_1 \omega_i}{2} \quad (5.4)$$

Burada  $\zeta$  sönüm oranını temsil etmektedir. Rayleigh sönüm modeli, Şekil 5.10'da gösterildiği üzere, rijitliğe bağlı sönüm (doğrusal) ve kütleye bağlı sönüm eğrilerinin üstünde kalan kısımda, yapının açısal frekansına ( $\omega$ ) bağlı olarak elde edilir.



**Şekil 5.10 :** Rayleigh sönüm modeli.

#### 5.4 Modal Analizler

Yapı modelleri üzerinde gerçekleştirilen modal analizler sonucu farklı mod şekillerine karşılık gelen periyotlar elde edilmiştir. Bu mod şekilleri arasında birinci mod periyodu yapının hakim doğal titreşim periyoduna karşılık gelmektedir. Farklı çerçeve modelleri için belirlenen hakim titreşim periyotları Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

**Çizelge 5.3 :** Modal analiz sonuçları.

| $T_1$ (s)                        | Model BF | Model GF1 | Model GF2 |
|----------------------------------|----------|-----------|-----------|
| SAP2000 - 3D Model               | 0.933    | 0.878     | 0.872     |
| OpenSees - 2D Model              | 0.852    | 0.820     | 0.819     |
| $1.4 \times T_{pA}$ (TBDY, 2018) | 0.767    | 0.767     | 0.767     |

Düşey yük çerçevelerinin dahil edildiği modellerde yapı periyodunun arttığı ve birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum yapıya kazandırılan rijitlik artışından kaynaklanmaktadır. OpenSees modellerinin yanı sıra TBDY (2018) kapsamında açıklanan ampirik bağıntı ile de titreşim periyotları hesaplanmıştır. Ampirik hakim doğal titreşim periyodu bağıntısı denklem 5.5'te gösterilmiştir.

$$T_{pA} = C_t H_N^{3/4} \quad (5.5)$$

Burada  $C_t$  katsayısı TBDY (2018) Bölüm 4.7.3.4'e göre taşıyıcı sistemi çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan yapılar için 0.08 olarak

alınacaktır. TBDY (2018) uyarınca denklem 5.3 ile hesaplanan doğal titreşim periyodu 1.4 katsayısı ile artırılarak aşağıda gösterildiği şekilde elde edilir.

$$1.4 \times T_{pA} = 1.4 \times 0.08 \times 13^{3/4} = 0.767 \text{ s}$$

1.4 katsayısı ile artırılmış ampirik doğal titreşim periyodu ve OpenSees kullanılarak elde edilen periyotlardan büyük olanı yapının doğal titreşim periyodu olarak belirlenir. Dolayısıyla burada modal analizler sonucu elde edilen 0.852s yapının doğal titreşim periyodu olarak belirlenmiştir.

### 5.5 Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizleri

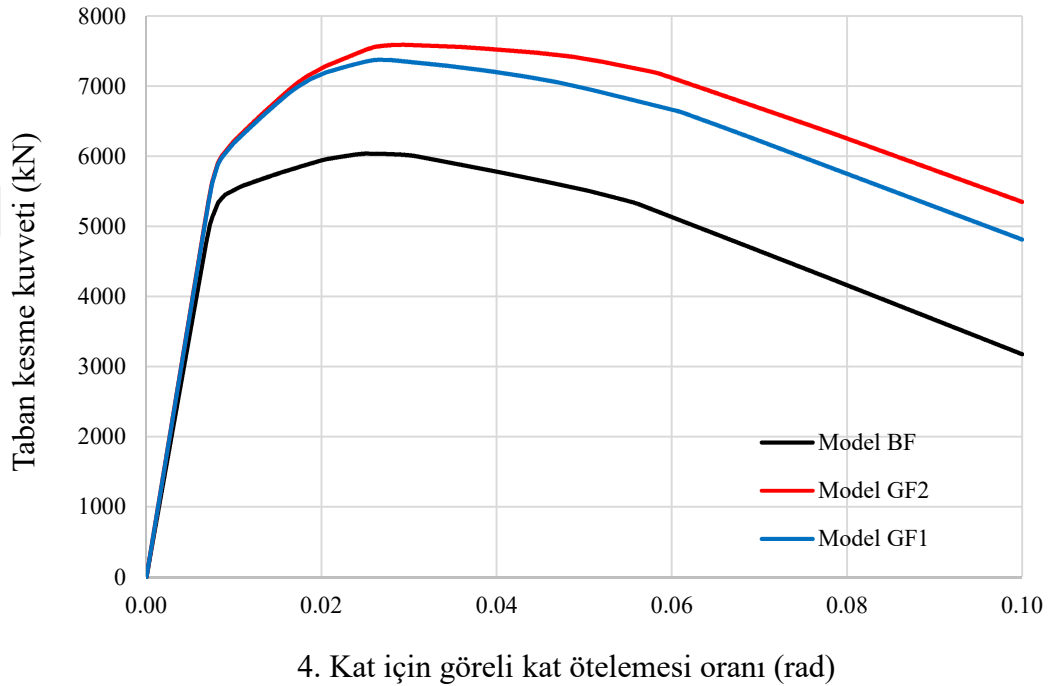
Oluşturulan çerçeve modelleri üzerinde doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilerek en yüksek taban kesme kuvveti ve yapı rijitliği gibi farklılıkların incelenmesi amaçlanmıştır. Doğrusal olmayan statik itme analizleri, doğrusal olmayan modellerin davranışını incelemek ve sistemin taşıma gücü fazlalığı (overstrength) ve süneklik kapasitesi hakkında detaylı verilerin elde edilmesinde kullanılır. Yapıların 1. mod şekli üzerinden gerçekleştirilen bu analizler, her bir kolon tabanında ölçülen taban kesme kuvvetinin, çatı katı (4. kat) görelî kat ötelemesine göre değişimini göstermektedir. Çatı katı ötelemesi oranı, 4. kat deplasmanının, binanın toplam yüksekliğine (13 m) bölünmesi ile elde edilir. TBDY (2018) uyarınca, dayanım fazlalığı katsayısı, statik itme analizleri sonucu kaydedilen en yüksek taban kesme kuvvetinin ( $V_{max}$ ), tasarım kesme kuvvetine ( $V_{des}$ ) oranı olarak açıklanmaktadır. Tasarım taban kesme kuvvetinin büyüklüğü Karasu (2018) tarafından TBDY (2018) kullanılarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen statik itme analizleri sonucu elde edilen taban kesme kuvvetleri Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

**Çizelge 5.4 : Doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçları.**

|                     | Model BF | Model GF1 | Model GF2 |
|---------------------|----------|-----------|-----------|
| $V_{max}$ (kN)      | 6039.95  | 7394.87   | 7591.88   |
| $V_{des}$ (kN)      | 1172.45  | 1172.45   | 1172.45   |
| D                   | 5.15     | 6.31      | 6.47      |
| Model GF / Model BF | -        | 1.224     | 1.256     |

Doğrusal olmayan statik itme analizleri sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-çatı katı ötelemesi eğrileri Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Oluşturulan modellerde sönüm

oranı %2 olarak belirlenmiştir. GF1 modelinden elde edilen maksimum taban kesme kuvveti, BF modeline kıyasla %22.43 oranında artış gözlemlenmiştir. GF2 modelinde ise bu artış %25.69 olarak belirlenmiştir. TBDY (2018) Tablo 4.1’de süneklik düzeyi yüksek çelik çerçeveler için dayanım katsayısının  $D=3.0$  olarak gösterilirken, hesaplanan dayanım fazlalığı katsayılarının bu değerin oldukça üzerinde olduğu görülmüştür. Bu durum düşey yük çerçevelerinin göz önüne alındığı ve alınmadığı modellerin tümünde gözlemlenmiştir.



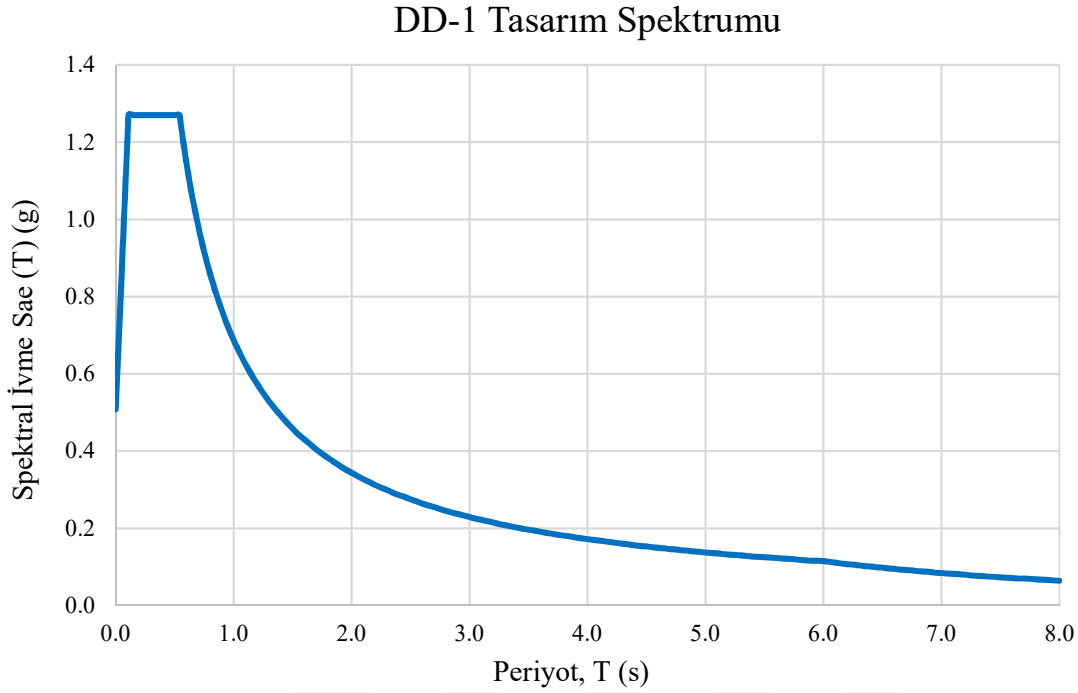
**Şekil 5.11 : Doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçları.**

Çatı katı görel kat ötelemesi oranı 0.01 radyan değerine ulaştığında birleşimlerin rijitlik ve dayanıma katkısı görülmeye başlanmıştır. Bu noktadan sonra grafiklerin eğiminde ciddi artış gözlenmiş, maksimum taban kesme kuvvetine ulaşıldıktan sonra ise özellikle FEP-4B eğrisinin eğiminde önemli ölçüde artış görülmüştür. Bu durum düşey yük çerçevelerinin yapıya önemli ölçüde rijitlik kazandırdığını göstermektedir.

## 5.6 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizler

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçek deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, ilk olarak binanın konumu, zemin sınıfı ve deprem yer hareketine bağlı olarak tasarım spektrumu belirlenmesi gerekmektedir. Tasarım spektrumu bölgede gerçekleşmesi beklenen en büyük deprem seviyesi (50 yılda aşılma

olasılığı %2, tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan deprem yer hareketi) esas alınarak oluşturulmuştur. Elde edilen tasarım spektrumu Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.12 : DD-1 Tasarım spektrumu.**

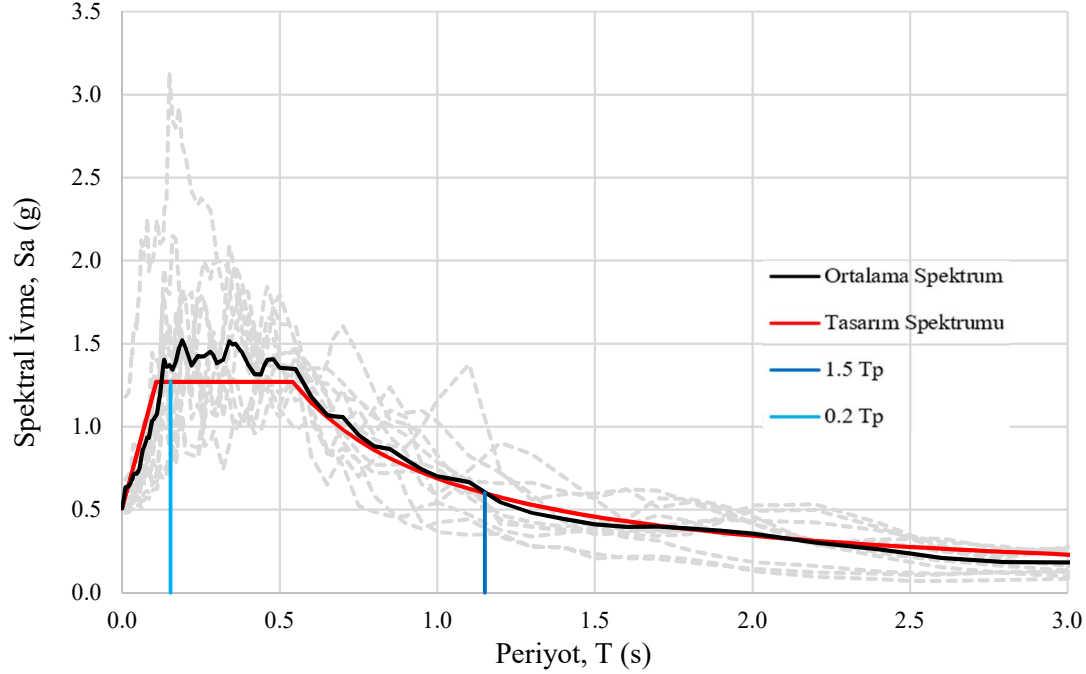
Yapıya etkitilecek deprem kayıtlarının TBDY (2018) Bölüm 2.5.1 uyarınca uygun büyüklük, fay uzaklığı, kaynak mekanizması ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak seçilmesi gereklidir. TBDY (2018) bölüm 2.5.1.3’e göre seçilecek deprem kaydı sayısı en az 11 olacaktır. Seçilen tüm deprem kayıtları doğrultu atımlı (Strike Slip) kaynak mekanizmasına sahiptir. Büyüklüğü 6.50  $M_w$  değerinin üzerinde olan deprem kayıtlarının tümünde H1 doğrultulu yatay bileşen dikkate alınmıştır. Büyük ölçekli deprem kayıtları, yapının göçme riskini değerlendirmede ve genellikle uzun süreli olmaları nedeniyle doğrusal olmayan analizlerde önemli bir rol oynamaktadır. Deprem kayıtlarında üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı ( $V_s$ )<sub>30</sub> 180-360 m/s aralığındadır. Deprem kayıtlarının elde edilmesi için PEER Ground Motion Database (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) internet adresinden yararlanılmıştır.

Newmark ortalama yöntemi kullanılarak seçilen deprem ivme kayıtlarından spektral ivme kayıtları %5 sönüm oranı için hesaplanmıştır. Elde edilen deprem spektrumları basit ölçeklendirme yöntemi ile tasarım spektrumuna uygun biçimde ölçeklendirilmiştir. Seçilen deprem kayıtlarına ait bilgiler ve belirlenen ölçek katsayıları Çizelge 5.5’te gösterilmiştir.

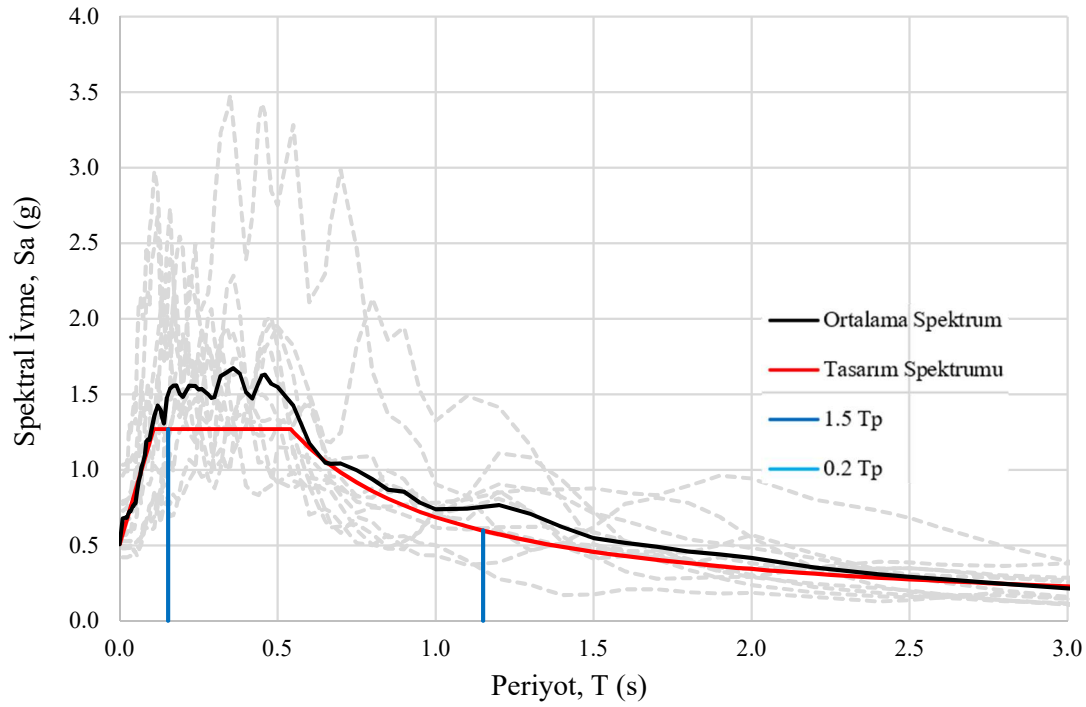
**Çizelge 5.5 : Seçilen deprem kayıtlarına ait bilgiler.**

| No | RSN  | Deprem adı            | Yıl  | İstasyon adı                | Büyüklik ( $M_w$ ) | Ölçek katsayısı |        | $(V_s)_{30}$ (m/s) |
|----|------|-----------------------|------|-----------------------------|--------------------|-----------------|--------|--------------------|
|    |      |                       |      |                             |                    | H1              | H2     |                    |
| 1  | 6    | Imperial Valley-02    | 1940 | El Centro Array #9          | 6.95               | 2.1947          | 2.4987 | 213                |
| 2  | 162  | Imperial Valley-06    | 1979 | Calexico Fire Station       | 6.53               | 2.2828          | 2.8009 | 231                |
| 3  | 183  | Imperial Valley-06    | 1979 | El Centro Array #8          | 6.53               | 1.6025          | 2.0348 | 206                |
| 4  | 721  | Superstition Hills-02 | 1987 | El Centro Imp. Co Cent      | 6.54               | 1.9098          | 2.8042 | 192                |
| 5  | 848  | Landers               | 1992 | Coolwater                   | 7.28               | 1.8399          | 2.4718 | 353                |
| 6  | 1107 | Kobe                  | 1995 | Kakogawa                    | 6.90               | 2.2949          | 2.0521 | 312                |
| 7  | 1119 | Kobe                  | 1995 | Takarazuka                  | 6.90               | 0.8746          | 0.8008 | 312                |
| 8  | 1158 | Kocaeli               | 1999 | Düzce                       | 7.51               | 1.7122          | 1.3163 | 282                |
| 9  | 5837 | El Mayor-Cucapah      | 2010 | El Centro - Imperial & Ross | 7.20               | 1.2481          | 2.1376 | 229                |
| 10 | 6893 | Darfield              | 2010 | DFHS                        | 7.00               | 2.4987          | 1.5065 | 344                |
| 11 | 8606 | El Mayor-Cucapah      | 2010 | Westside Elementary School  | 7.20               | 2.4738          | 1.4795 | 242                |

Yapıya ait DD-1 tasarım spektrumu ve deprem kayıtlarından elde edilen ölçeklendirilmiş yatay spektrumların ortalaması H1 ve H2 doğrultuları için Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te gösterilmiştir. TBDY (2018) uyarınca  $0.2T_p$  ve  $1.5T_p$  aralığında ortalama spektrum eğrisinin hedef spektrum değerlerinden yüksek olması gereklidir.

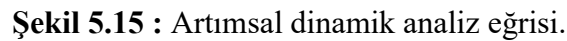


**Şekil 5.13 :** H1 doğrultusunda ölçeklendirilmiş ortalama spektrum ve DD-1 tasarım spektrumu.

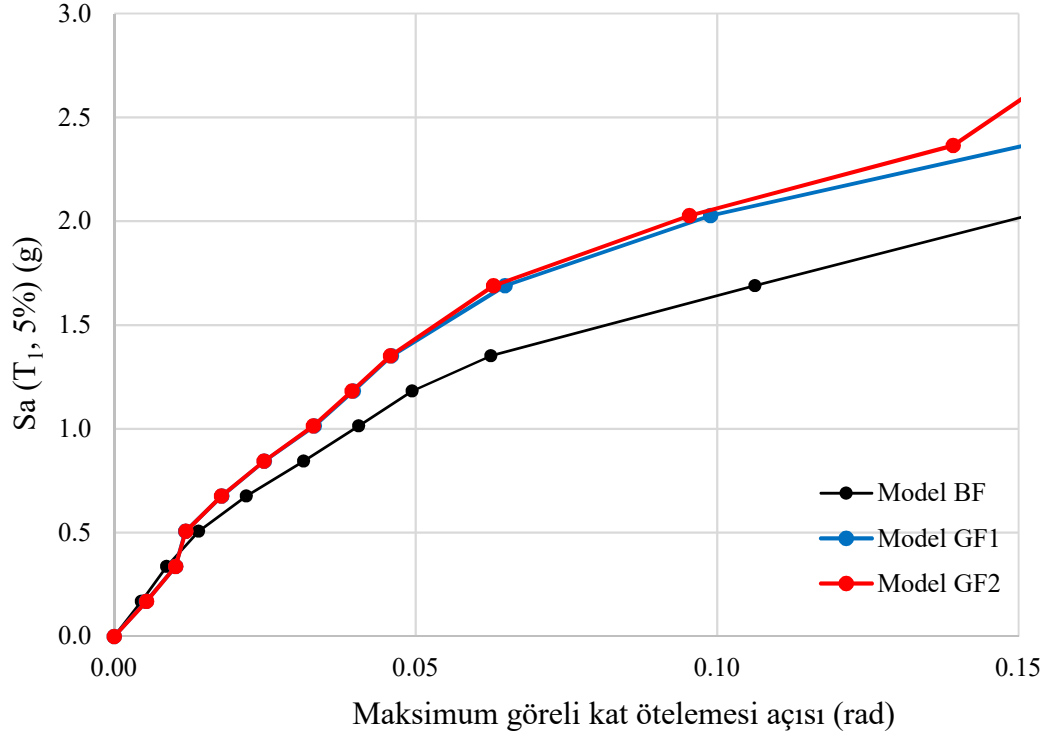


**Şekil 5.14 :** H2 doğrultusunda ölçeklendirilmiş ortalama spektrumu ve DD-1 tasarım spektrumu.

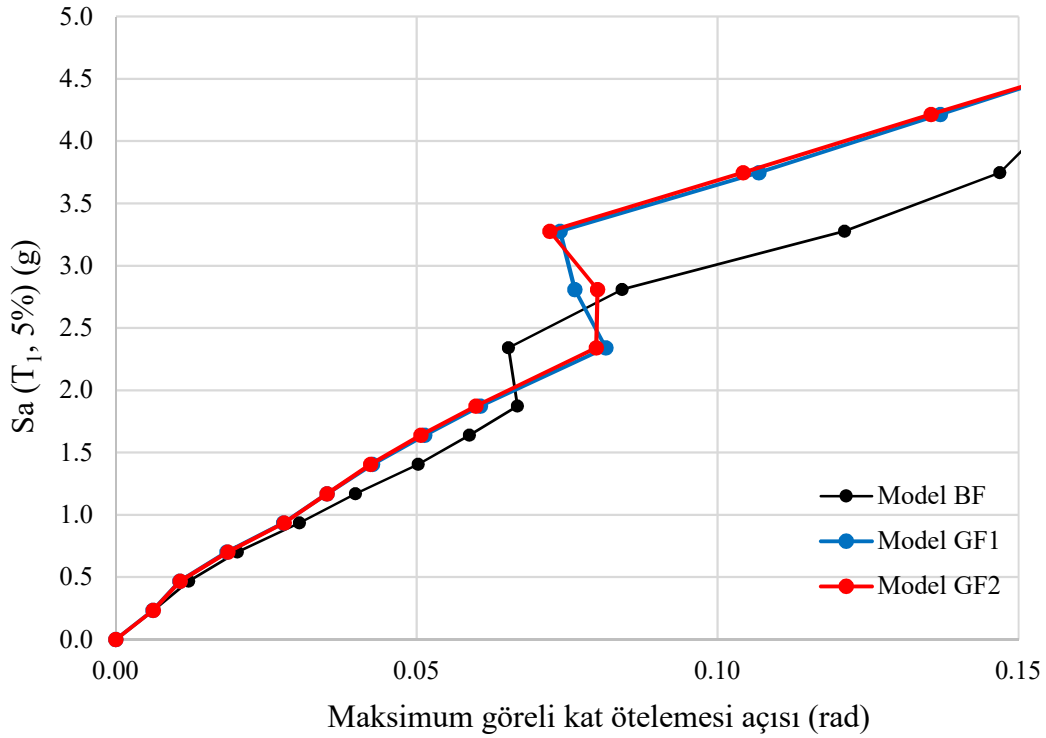
Ölçeklendirilen deprem ivme kayıtları, OpenSees ile oluşturulan yapı modellerine artımsal dinamik analiz metodu ile etkililmiştir. Her bir deprem kaydı, skaler katsayılar ile çarpılarak üç farklı yapı modeline etkililmiştir.



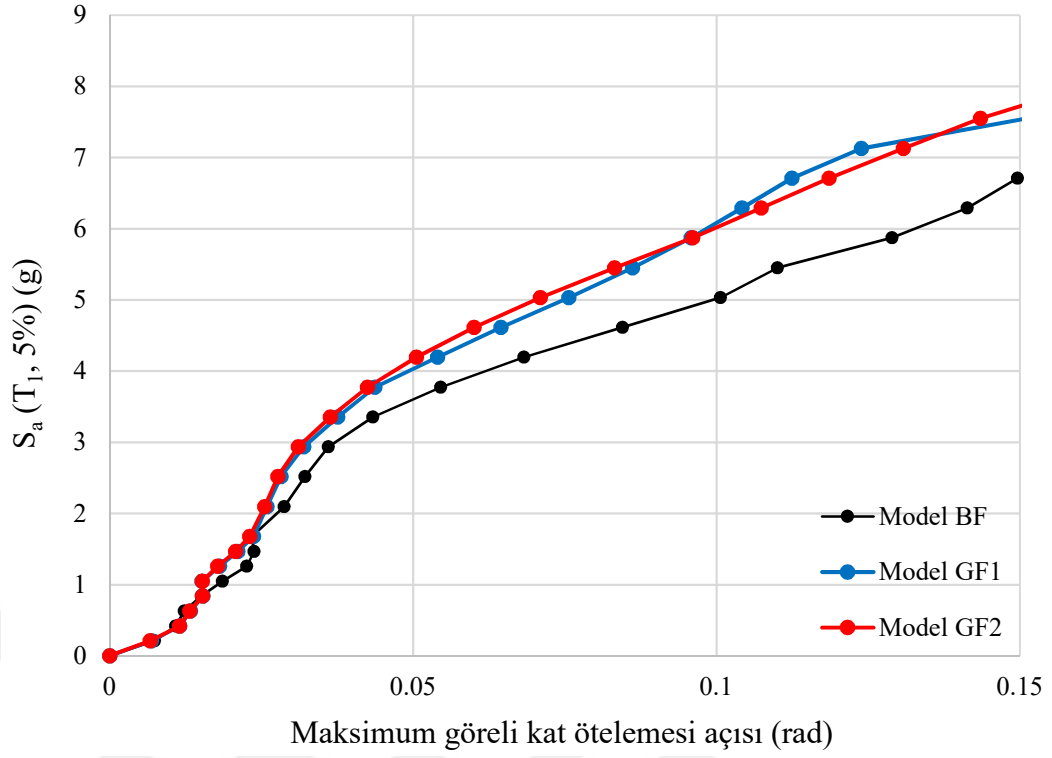
FEMA-P695 (2009) yönetmeliği ile uyumlu olacak şekilde göçme anına karşı gelen analiz adımları belirlenmiştir. Buna göre, herhangi iki nokta arasındaki çizginin eğimi, başlangıç rijitliğini temsil eden ilk çizginin eğiminin %20'sinin altında kaldığında binada göçme gözlemlendiği varsayılmaktadır.



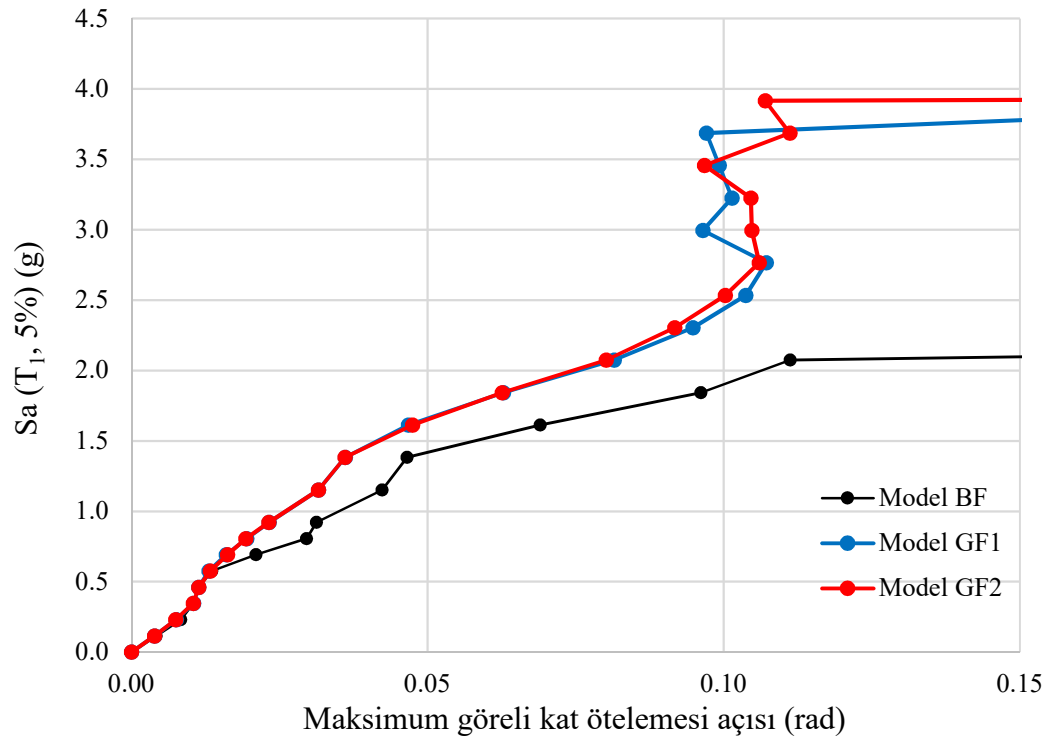
**Şekil 5.16 :** Imperial Valley-06 depremi, El Centro Array #8 istasyonu (RSN: 183) kaydı için artırsal dinamik analiz sonuç eğrisi.



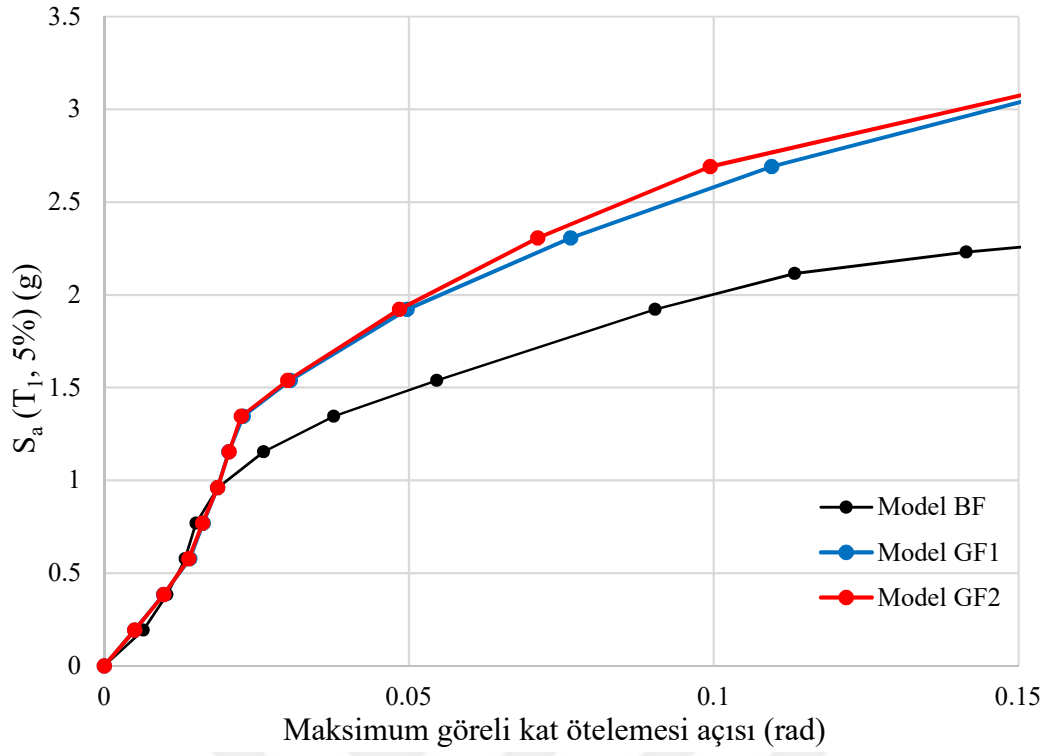
**Şekil 5.17 :** Superstition Hills-02 depremi, El Centro Imp. Co. Cent. istasyonu (RSN: 721) kaydı için artırsal dinamik analiz sonuç eğrisi.



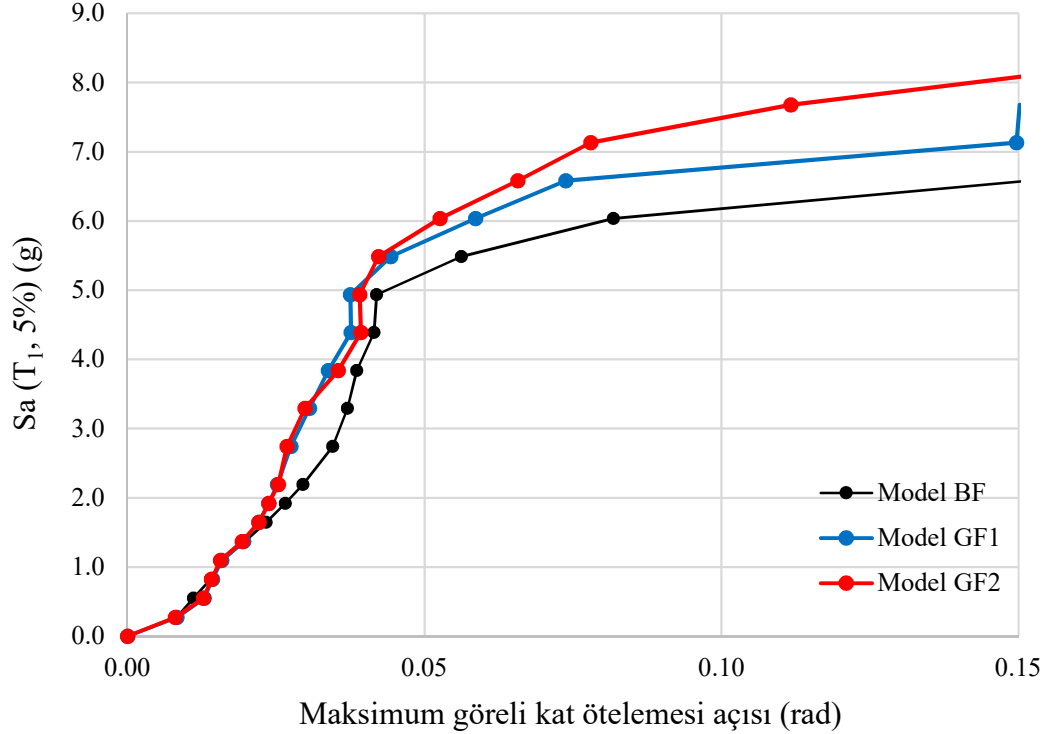
Şekil 5.18 : Landers depremi, Coolwater istasyonu (RSN: 848) kaydı için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi.



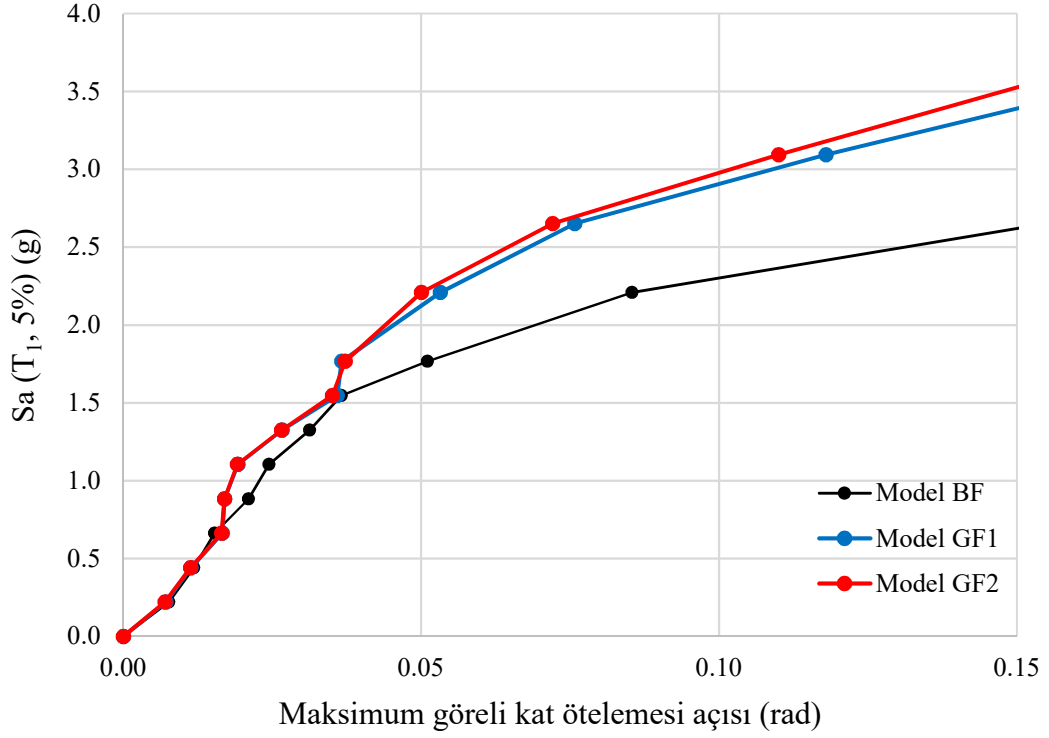
Şekil 5.19 : Kobe depremi, Kakogawa istasyonu (RSN: 1107) kaydı için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi.



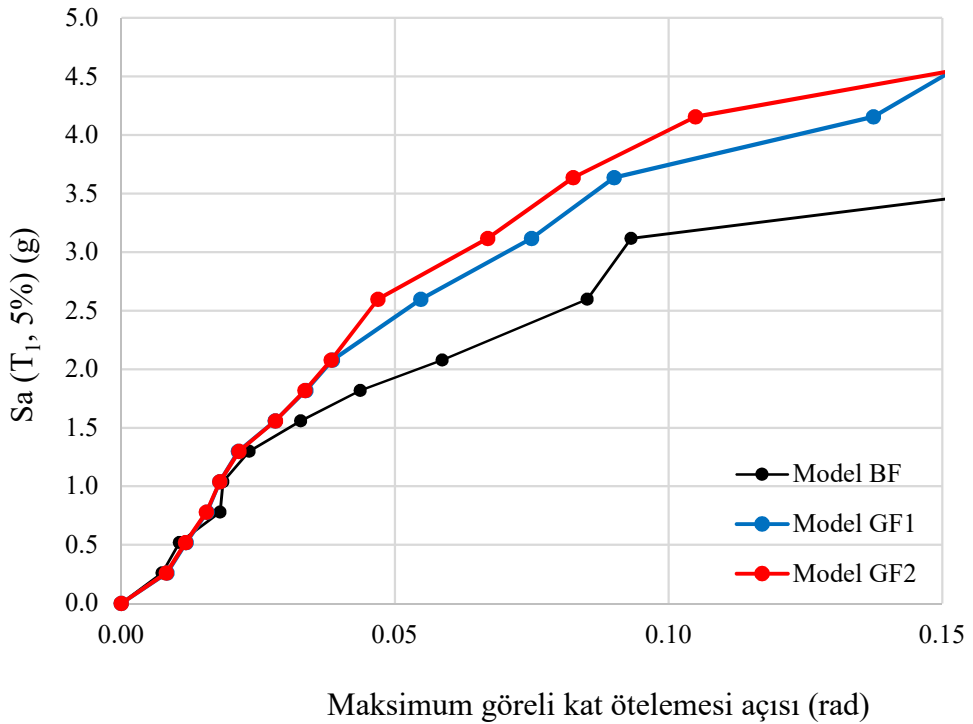
**Şekil 5.20 :** Kocaeli depremi, Düzce istasyonu (RSN: 1158) için artırsal dinamik analiz sonuç eğrisi.



**Şekil 5.21 :** El Mayor-Cucapah depremi, El Centro-Imperial & Ross istasyonu (RSN: 5837) için artırsal dinamik analiz sonuç eğrisi.

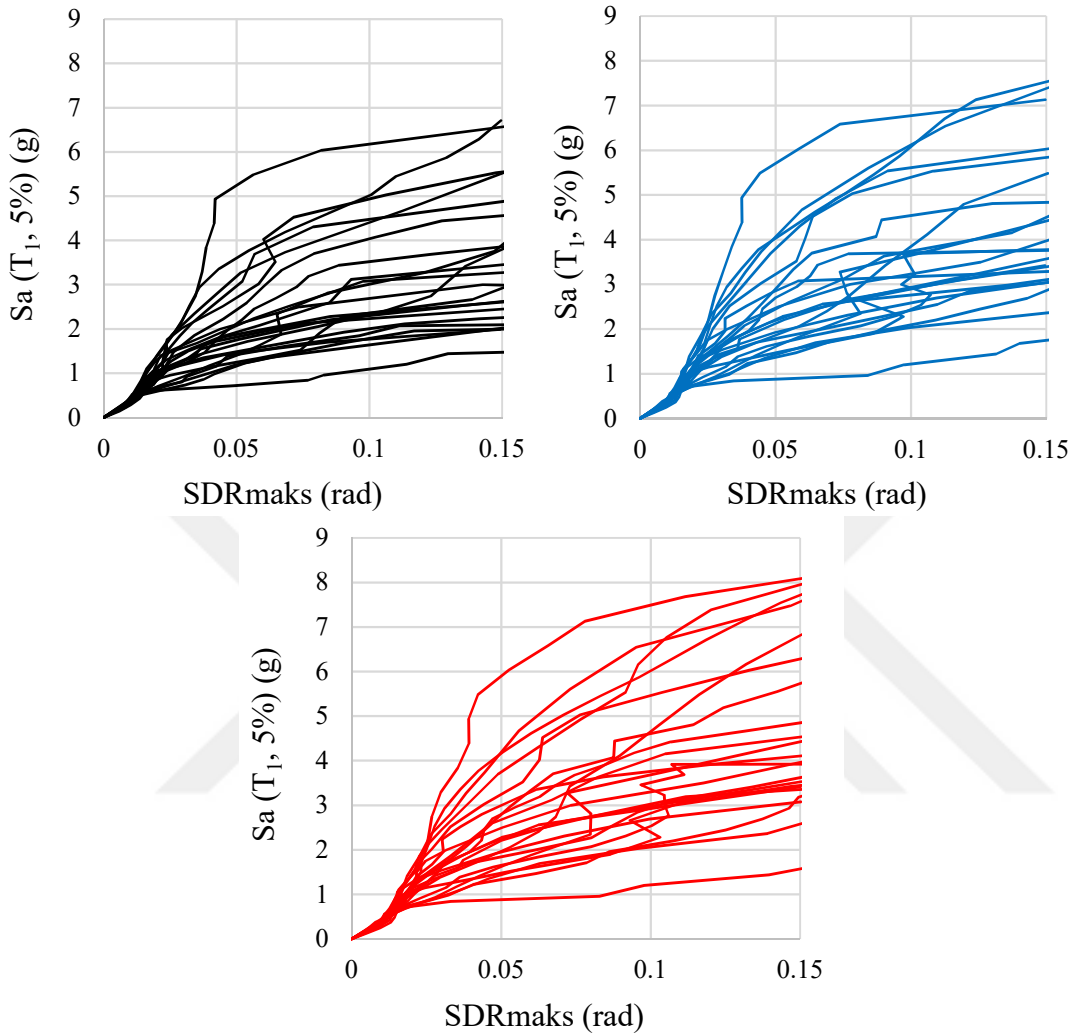


Şekil 5.22 : Darfield depremi, DFHS istasyonu (RSN: 6893) için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi.



Şekil 5.23 : El Mayor-Cucapah depremi, Westside Elementary School istasyonu (RSN: 8606) için artımsal dinamik analiz sonuç eğrisi.

Farklı yapı modelleri üzerinde gerçekleştirilen deprem analizleri sonucu Şekil 5.24'te görülen çoklu eğriler elde edilmiştir. Toplamda 1000'in üzerinde zaman tanım alanında yapısal analiz gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.24 :** Çoklu artımsal dinamik analiz sonuç eğrileri.

FEMA-P695 uyarınca, artımsal dinamik analizler sonucu elde edilen eğriler kullanılarak medyan göçme kapasitesi ( $S_{CT}$ ) belirlenir. Bu değer, kırılganlık eğrisinde yapının %50 ihtimalle göçmeye ulaşacağı spektral ivme değerine karşı gelmektedir. Medyan göçme kapasitesi, deprem yer hareketlerinin yarısının yapı modelinin çökmesine neden olduğu yer hareketi şiddetini temsil etmektedir.

Düşey yük çerçevelerinin yapı modelinde göz önüne alındığı modeller (GF1 ve GF2 modelleri) ile ihmal edildiği (BF modeli) durumda belirlenen medyan göçme kapasiteleri sırasıyla 3.21g, 3.52g ve 4.05g olarak elde edilmiştir. GF1 ve GF2 modellerinin, BF modeline kıyasla medyan göçme kapasitelerinde sırasıyla %9.6 ve %26.1 oranında artış gözlenmiştir.

## 5.7 Kırılgnlık Eğrilerinin Elde Edilmesi

Kırılgnlık eğrilerinin elde edilmesinde FEMA-P695 (2009) kapsamında açıklanan yöntem kullanılmıştır. Denklem 5.6 yardımı ile herhangi bir spektral ivme değerlerine ( $x$ ) karşı yapının göçme olasılığı hesaplanacaktır.

$$P = \Phi \left( \frac{\ln(x) - \ln(S_{CT})}{\beta_{TOT}} \right) \quad (5.6)$$

Burada  $P$ , belirlenen hasar durumunda yapının göçme olasılığını,  $\beta_{TOT}$  sistemin toplam belirsizliğini temsil eder.  $\ln(S_{CT})$  medyan göçme kapasitesinin logaritmik değerini,  $\Phi$  ise normal dağılım fonksiyonunu temsil etmektedir.

Sistemin toplam belirsizliğinin ( $\beta_{TOT}$ ) belirlenmesinde dört ana etken bulunmaktadır; yapı modeline bağlı belirsizlik ( $\beta_{MDL}$ ), deprem kayıtlarına bağlı belirsizlik ( $\beta_{RTR}$ ), deneysel veriler kaynaklı belirsizlik ( $\beta_{TD}$ ) ve tasarım gerekliliklerinin güvenilirliğine bağlı belirsizlik ( $\beta_{DR}$ ). Tasarımı gerçekleştirilen yapı güncel deprem yönetmeliklerinin kapasite tasarımına göre boyutlandırıldığından, üst seviye tasarım yeterliliklerine uygun olarak,  $\beta_{DR} = 0.1$  olarak belirlenmiştir. FEMA-P695 uyarınca  $\beta_{RTR}$  değeri sistemden bağımsız olarak 0.4 seçilmiştir.  $\beta_{RTR}$  ve  $\beta_{RTR}$  değerleri genel bir varsayım ile güvenilir veri olarak kabul edilerek 0.2 olarak belirlenmiştir. Sistemin toplam belirsizliği  $\beta_{TOT}$  verilen denklem yardımı ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} \beta_{TOT} &= \sqrt{\beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2 + \beta_{RTR}^2} \\ &= \sqrt{0.1^2 + 0.2^2 + 0.2^2 + 0.4^2} = 0.5 \end{aligned} \quad (5.7)$$

FEMA yöntemine göre ilk olarak göçmeye olan orantısal uzaklık (CMR, collapse margin ratio) verilen denklem ile hesaplanmalıdır.

$$CMR = \frac{S_{CT}}{S_{MT}} \quad (5.8)$$

Yapıya ait spektral mod şeklinin göz önüne alınabilmesi için CMR değeri spektral şekil faktörü (SSF) ile çarpılır ve düzenlenmiş göçmeye uzaklık oranı (ACMR) belirlenir.

$$ACMR = CMR \times SSF \quad (5.9)$$

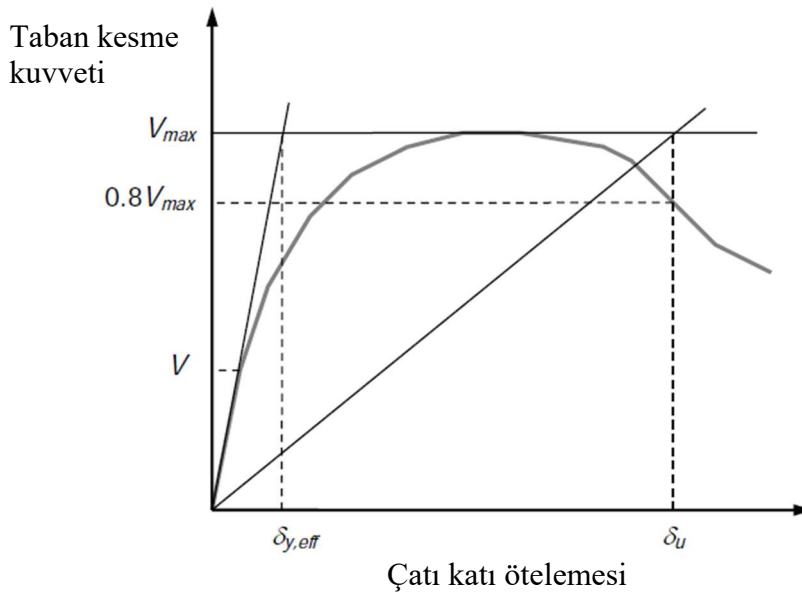
SSF terimi yapının 1. mod periyoduna ve periyoda bağlı süneklik değerine göre FEMA-P695 Tablo 7-1 kullanılarak elde edilir. FEMA-P695'e göre elde edilen sonuçların kullanılabilmesi için aşağıdaki koşul sağlanmalıdır.

$$ACMR \geq ACMR_{20\%} \quad (5.10)$$

Burada  $ACMR_{20\%}$  değeri yapının %20 ihtimalle göçmeye ulaştığı durumu temsil eden göçmeye olan orantısal uzaklıktır ve belirlenen  $\beta$  katsayısına göre FEMA-P695 Tablo 7-3 kullanılarak elde edilir. Aşağıda verilen denklem kullanılarak periyoda bağlı süneklik hesaplanır.

$$\mu_T = \frac{\delta_u}{\delta_{y,eff}} \quad (5.11)$$

Periyoda bağlı süneklik ( $\mu_T$ ) ifadesinin hesaplanmasında, statik itme analizleri sonucu elde edilen ve Şekil 5.25'de gösterilen ifadelerin belirlenmesi gereklidir.



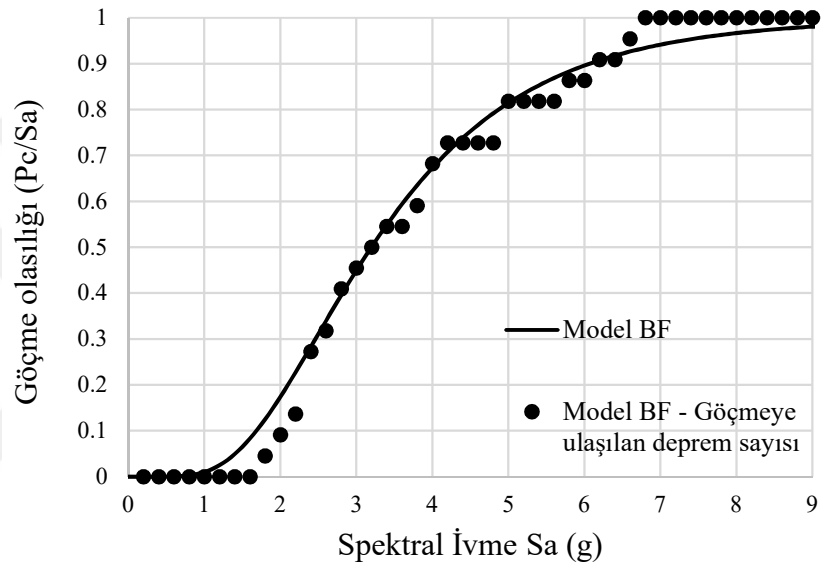
**Şekil 5.25 :** Periyoda bağlı süneklik ifadesinin elde edilmesinde gerekli ifadeler.

Bölüm 5.5 kapsamında açıklanan doğrusal olmayan statik itme analizleri sonucunda Çizelge 5.8'de gösterilen değerler elde edilerek periyoda bağlı süneklik değeri üç yapı için de hesaplanmıştır.

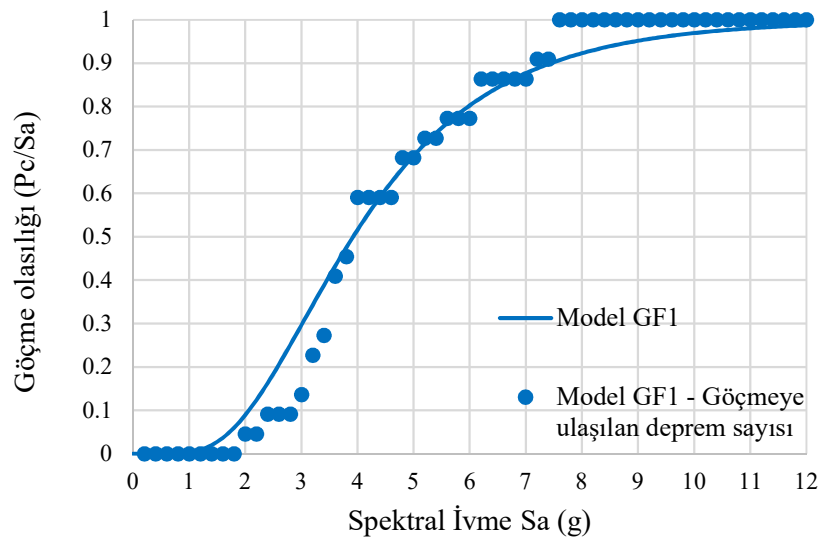
**Çizelge 5.6 :** Periyoda bağlı süneklığın hesaplanmasında kullanılan değerler.

|           | $V_{\max}$ (kN) | $0.8 V_{\max}$ (kN) | $\delta_u$ | $\delta_{y,eff}$ | $\mu_T$ |
|-----------|-----------------|---------------------|------------|------------------|---------|
| Model BF  | 6039.95         | 4831.96             | 0.0662     | 0.0087           | 7.64    |
| Model GF1 | 7377.63         | 5902.10             | 0.0768     | 0.0098           | 7.83    |
| Model GF2 | 7591.88         | 6073.51             | 0.0840     | 0.0101           | 8.36    |

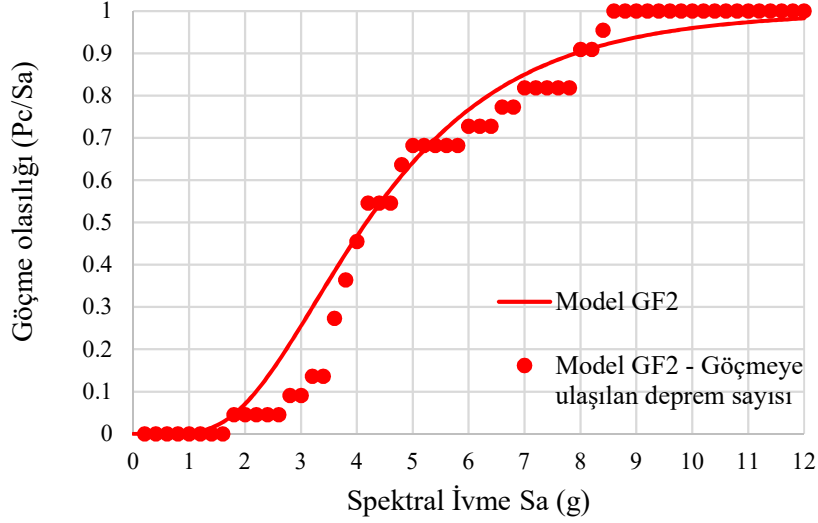
Analiz sonuçlarında elde edilen kümülatif dağılımlar ile lognormal dağılım eğrilerinin kıyaslanması Şekil 5.26, 5.27 ve 5.28’de gösterildiği üzere uyumlu olmaktadır.



**Şekil 5.26 :** BF modeline ait kırılmalık eğrisi.

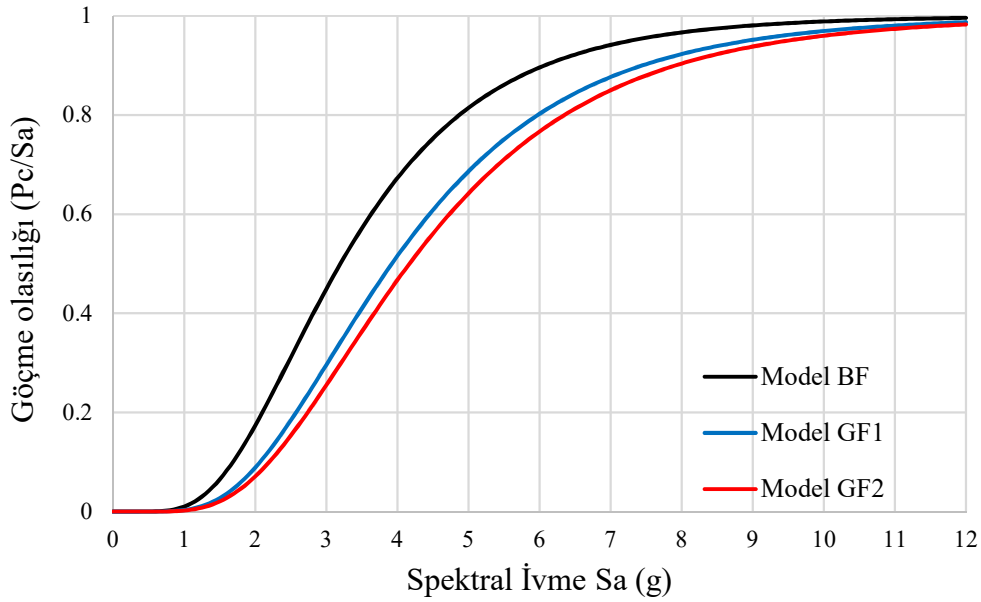


**Şekil 5.27 :** GF1 modeline ait kırılmalık eğrisi.



**Şekil 5.28 :** GF2 modeline ait kırılma eğrisi.

Eğrilerin yatay eksenini spektral ivme değerini ( $S_a(T_1, 5\%)$ ), dikey eksenini ise yapının belirtilen spektral ivme değeri için göçme olasılığını temsil etmektedir. Eğriler Şekil 5.29’da kıyaslanmıştır.



**Şekil 5.29 :** Kırılma eğrileri.

Düşey yük çerçevelerinde yer alan kiriş-kolon birleşimlerinin analizlerde göz önüne alındığı her iki durumda da, göz önüne alınmadığı duruma kıyasla önemli ölçüde artış görülmektedir. Artımsal analizlerde ise, birleşimlerin elastik kaldığı deprem yükleri altında Model GF1 ve GF2 için benzer rijitlikler gözlemlenmiştir. İki birleşim tipi arasındaki fark, özellikle büyük ölçülü deprem yükleri altında görülmektedir. Analizler sonucu elde edilen median göçme kapasiteleri Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.7 :** Göçmeye olan orantısal uzaklığın hesabında kullanılan değerler.

|           | $S_{CT}$ (g) | $S_{MT}$ | CMR  | SSF  | ACMR | ACMR <sub>20%</sub> |
|-----------|--------------|----------|------|------|------|---------------------|
| Model BF  | 3.198        | 1.678    | 1.91 | 1.20 | 2.28 |                     |
| Model GF1 | 3.922        | 1.918    | 2.04 | 1.21 | 2.47 | 1.52                |
| Model GF2 | 4.169        | 1.678    | 2.48 | 1.21 | 3.01 |                     |

$\beta_{TOT}$  terimi 0.5 olarak belirlendiğinde, ACMR<sub>20%</sub> değeri FEMA-P695 Tablo 7-1'den faydalanılarak 1.52 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla denklem 5.7'de belirtilen FEMA-P695 koşulu sağlanmaktadır.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, kiriş yüksekliğinde alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin kısmi dayanımlı ve yarı-rijit olacak şekilde tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan birleşimlerin artan çevrimsel yükler altında sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş, bunun sonucunda elde edilen moment-dönme ilişkisi ve plastikleşme mekanizması incelenmiştir. Yapılan sonlu eleman analizleri sonucunda, tasarım hedeflerinin üzerinde dayanım ve rijitlik gösteren bu birleşimlerin önemli ölçüde süneklik sergilediği görülmüştür. Oluşturulan doğrulama modelinin deneysel çalışmaya oldukça benzer seviyede dayanım ve başlangıç rijitliğine sahip olduğu, sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermiştir.

Birleşimlerin eğilme momenti dayanımı, sonlu eleman analizlerine ek olarak, AISC ve Eurocode EN 1993-1-3 (1995) standartlarında açıklanan sırasıyla akma çizgileri teorisi ve bileşen yönteminden faydalanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntemler kullanıldığında, sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen eğilme dayanımlarının tümünden daha düşük birleşim dayanımı belirlendiği görülmüştür. Bileşen yöntemi kullanılarak birleşimlerin başlangıç rijitlikleri hesaplandığında ise, sonlu eleman analizleri ile belirlenen başlangıç rijitliklerine kıyasla %20 ila %37 daha yüksek bir sonuç elde edilmiştir. Bu durum, yönetmeliklerde bulunan nümerik hesap yöntemlerinin çeşitli alın levhalı birleşim türleri için detaylandırılması gerektiğini göstermiştir.

Düşey yük taşıyıcı çerçevelerin kiriş-kolon birleşimlerinde kiriş yüksekliğinde alın levhalı birleşimlerin teşkil edilmesi durumunda, bu birleşimlerin yapısal etkileri doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler ile incelenmiştir. Birincil taşıyıcı sistemi moment aktaran çelik çerçevelerden oluşan dört katlı çelik bir ofis binası üzerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizleri sonucunda, düşey yük taşıyıcı çerçeve birleşimlerinin mafsallı birleşimler ile teşkil edildiği modele kıyasla birleşimlerin yapı dayanım ve rijitliğine önemli ölçüde katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucunda ise yapıya kazandırılan dayanım ve rijitlik artışı sonucu göçmenin her iki yapı modelinde de geciktirildiği görülmüştür.

İncelenen birleşimler arasındaki farklılıkların yüksek katlı yapılarda daha belirgin olacağı düşünülmektedir. Ancak dört katlı yapıda yer alan her iki düşey yük çerçeve birleşiminin de önemli ölçüde dayanım ve rijitlik katkısı gözlemlenmiştir.

## **6.1 Analiz Sonuçlarının İrdelenmesi**

Bu çalışmada kiriş yüksekliğinde alın levhali kiriş-kolon birleşimlerinin tasarım aşamasında kullanılabilecek yaklaşımlar ve tasarım adımları açıklanmıştır. Bu birleşimler özellikle düşey yük taşıyıcı çerçevelerde yarı-rijit ve kısmi dayanımlı bir birleşim olarak önemli ölçüde rijitlik ve dayanım kazandırmaktadır. Yapısal modelleme ve analizlerde mafsallı olduğu varsayılan düşey yük çerçeve birleşimleri, bu çalışmada deprem yükleri altında enerji sönmüleme ve göçmenin geciktirilmesi gibi katkılarda bulunabilmektedir.

Doğrusal olmayan statik itme analizleri sonucunda, düşey yük çerçevelerinde iki bulonlu kiriş yüksekliğinde alın levhali kiriş-kolon birleşimlerinin yer aldığı yapı modelinin (GF1 modeli) taban kesme kuvveti kapasitesinin yaklaşık %20 arttığı görülmüştür. Bu artış dört bulonlu birleşimlerin yer aldığı yapıda (GF2 modeli) ise %27 seviyesindedir. Aynı zamanda her iki yapının da akma sonrası rijitliklerinde artış görülmüştür.

Doğrusal olmayan dinamik analizlerden faydalanılarak elde edilen kırılma eğrileri incelendiğinde, GF1 modelinin median göçme kapasitesi, BF modeline kıyasla %22.3 artmış, GF2 modelinde ise bu artış %30.4 olarak gözlemlenmiştir.

## **6.2 Çalışmanın Genişletilmesi İçin Öneriler**

Çalışmanın genişletilmesi için önerilen bazı uygulamalar şu şekildedir;

- İncelenen birleşimlere ek olarak değişken alın levhası kalınlığı ve malzeme sınıflarının birleşim dayanımına etkisi araştırılabilir.
- Farklı alın levhali birleşim tiplerine göre (kısa alın levhali, kiriş yüksekliğinde alın levhali gibi) yöntemelikle açıklanan nümerik hesap yöntemleri detaylandırılabilir.

- Bu çalışmada incelenen dört katlı yapıya ek olarak, daha yüksek katlı yapılarda gerçekleştirilecek analizlerin ikinci mertebe (P-delta) etkilerini daha açık ortaya koyacağı düşünülmektedir.
- İncelenen birleşimlere benzer deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek doğrusal olmayan davranışı ispatlanmış birleşimler yapısal modellere aktarılabilir.
- Üç boyutlu yapı modelleri oluşturularak kompozit döşeme etkilerinin gözönüne alınması durumunda yapısal etkiler incelenebilir.





## KAYNAKLAR

- ABAQUS.** (2019). Dassault Systemes Simulia Corp., Abaqus/CAE User's Guide, Providence, RI, USA.
- Abolmaali, A., Kukreti, A., Motahari, A., Ghassemieh, M.** (2009). Energy dissipation characteristics of semi-rigid connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 1187-1197.
- AISC 341-16** (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, ANSI/A, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- AISC 358-16** (2016). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, ANSI/AISC 358-16, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ATC-24** (1992). *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*, Applied Technology Council, California.
- Baei, M., Ghassemieh M., & Goudarzi, A.** (2012). Numerical modelling of end-plate moment connection subjected to bending and axial forces. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 4 (3), pp. 463 – 472.
- Boorse, M. R.** (1999). *Evaluation of the inelastic rotation capability of flush end-plate moment connections*. (M.Sc. Thesis) Dept. Of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State Univ.
- Broderick, B. M., Thomson, A. W.** (2002). The response of flush end-plate joints under earthquake loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 58 (9), 1161-1175.
- ÇYTHYE** (2018). *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- da Silva, L. S., de Lima, L. R. O., da Vellasco, P. C. G., de Andrade, S. A. L.** (2004). Behaviour of flush end-plate beam-to-column joints under bending and axial force. *Steel and Composite Structures*, 4 (2), 77–94.
- EN 1993-1-8** (2005). *Eurocode 3: Design of Steel Structures-part 1-8: Design of Joints*. European Committee for Standardization; Brussels, Belgium.
- Faella, C., Piluso, V., Rizanno, G.** (2000). *Structural Steel Semirigid Connections, Design and Software*. Boca Raton FL: CRC Press LLC, USA.
- FEMA** (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Report FEMA-P695. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Girão Coelho, A. M., Bijlaard, F. S. K.** (2007). Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 63 (9), 1228-1240.

- Gupta, A., Krawinkler, H.** (1999). Seismic Demands for the Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame Structures. Report No. 132. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.
- Ibarra, L. F., Medina, R. A., Krawinkler, H.** (2005). Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34 (12), 1489-1511.
- Karasu, A.** (2018). *Kısa alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin çevrimsel tekrarlı yükler altında davranışlarının incelenmesi ve deprem etkileri altında yapısal davranışa katkılarının araştırılması.* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Kaufmann, E. J., Metroich, B., Pense, A.W.** (2001). Characterization of Cyclic Inelastic Strain Behavior on Properties of A572 Gr. 50 and A913 Gr.50 Rolled Sections (ATLSS Report No. 01-13). Bethlehem, USA: Lehigh University.
- Lignos, D. G., Krawinkler, H.** (2011). Deterioration Modeling of Steel Components in Support of Collapse Prediction of Steel Moment Frames under Earthquake Loading. *Journal of Structural Engineering*, 137 (11), 1291-1302.
- Mak, L., Elkady, A.** (2021). Experimental database for steel flush end-plate connections. *Journal of Structural Engineering*, 147 (7).
- Murray, T.M., & Shoemaker, W.L.** (2002). *Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections*, Design Guide No. 16, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- Murray, T.M., & Eatherton, M.R.** (2023). *End-Plate Moment Connections*, Design Guide No. 39, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- OpenSees** (2009). Version 3.0, User Command-Language Manual.
- PEER** (2013). The PEER Ground-Motion Selection Web Application. Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley. <http://ngawest2.berkeley.edu/>.
- Qiang, X., Jiang, X., Bijlaard, F. S. K., Kolstein, H., Luo, Y.** (2015). Post-fire behaviour of high strength steel endplate connections: Part 1: Experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 108, 82-93.
- TBDY** (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
- Vamvatsikos, D., Cornell, C.A.** (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31 (3), 491–514.
- Zareian, F., Medina, R. A.** (2010). A Practical Method for Modeling of Structural Damping in Inelastic Plate Structural Systems. *Computers & structures*, 88 (1), 45-53.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Alper DEMİR

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.

### YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Demir, A.,** Vatansever, C. (2025). Nonlinear analysis of flush end-plate beam-to-column connections under cyclic loading. *4th International Civil Engineering & Architecture Conference*, Trabzon, Türkiye.
- **Demir, A.,** Vatansever, C. (2025). Seismic Performance of Gravity Frames with Flush End-Plate Beam-to-Column Connections. *4th International Graduate Research Symposium: IGRS'25*, İstanbul, Türkiye.