



Investigation of double tee moment connections under monotonic loading

Hamza Alpaslan^{ID}, Alirza İlker Akgönen*^{ID}

Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 46040, Kahramanmaraş, Turkey

Highlights:

- Determination of moment-rotation behavior of DST joints
- Investigation of DST joints behavior with parametric study
- Multi-linear regression analysis

Keywords:

- Double tee moment connection
- Connection stiffness
- T-stub
- Monotonic loading
- Finite element analysis

Article Info:

Research Article
Received: 01.02.2021
Accepted: 27.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.872441

Correspondence:

Author: Alirza İlker
Akgönen
e-mail:
ilkerakgonen@ksu.edu.tr
phone: +90 344 300 1673

Graphical/Tabular Abstract

The moment-rotational behavior of the Double Split Tee (DST) Moment connections was investigated under the monotonic loading depending on the connection geometry. T-flange thickness, T-web thickness, the distance between shear bolts, gage distance between tension bolts, use of continuity plates, use of doubler plate, use of triangular rigidity plate in the T-stub and a circular hole in the plastic hinge zone of the beam are considered as variables. The effect of these variables on the connection behavior was examined in detail using finite element analysis. Then, multi-linear regression analysis was performed using simulation study results.

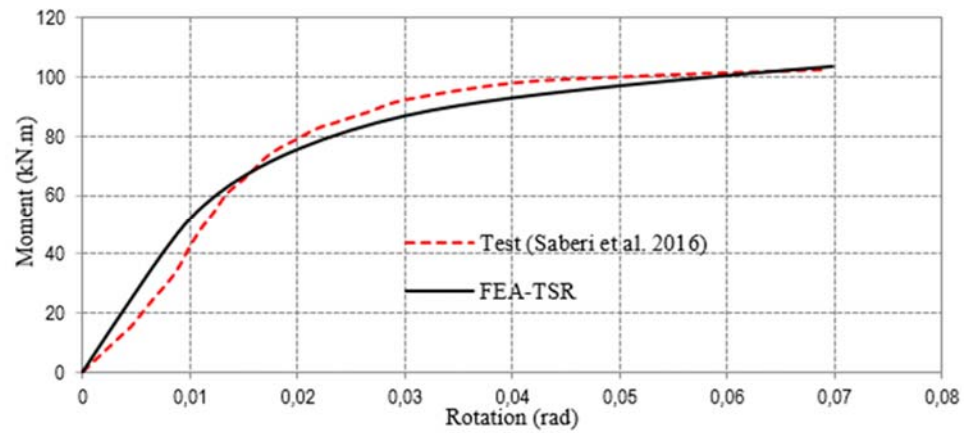


Figure A. Comparison of reference study and finite element monotonic validation study

Purpose:

Determination of the moment-rotation behavior and plastic hinge location of DST joints are important for the design of structures in which these joints are used. In this study, the moment-rotation behavior and plastic hinge location of DST joints under monotonic load were investigated depending on the geometry of the joint.

Theory and Methods:

Finite element analysis was performed using ANSYS software. Nonlinear behavior due to material and geometry was considered.

Results:

Moment-rotation behavior and plastic joint location were determined depending on the joint geometry.

Conclusion:

Multiple linear regression analysis was performed using a large number of Finite Element Analyses. Equations were derived that allow the determination of the basic behavioral properties of DST joints.



Çift te moment birleşimlerin monotonik yük altında incelenmesi

Hamza Alpaslan^{ID}, Alirıza İlker Akgönen*^{ID}

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 46040, Kahramanmaraş, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- ÇTM birleşimlerin moment-dönme davranışının tespiti
- ÇTM birleşim davranışının parametrik çalışma ile incelenmesi
- Çoklu-doğrusal regresyon analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 01.02.2021
Kabul: 27.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.872441

Anahtar Kelimeler:

Çift te moment birleşimi,
birleşim rijitliği,
t-parça,
monotonik yükleme,
sonlu eleman analizi

ÖZ

Çift Te Moment (ÇTM) birleşimlerin monotonik yükleme altında moment-dönme davranışı birleşim geometrisine bağlı olarak incelenmiştir. T-başlık kalınlığı, T-gövde kalınlığı, kesme bulonları arasındaki mesafe, çekme bulonları arasındaki dikey mesafe, süreklilik levhaları kullanımı, takviye levhası kullanımı, T-parçada üçgen rijitlik levhası kullanımı ve kirişin plastik mafsallık bölgesinde dairesel boşluk bırakma durumları değişken kabul edilerek bu değişkenlerin birleşim davranışı üzerindeki etkisi sonlu eleman analizleri yardımıyla detaylı olarak tetkik edilmiştir. Daha sonra simülasyon çalışma sonuçları kullanılarak çoklu-doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Investigation of double tee moment connections under monotonic loading

H I G H L I G H T S

- Determination of moment-rotation behavior of DST joints
- Investigation of DST joints behavior with parametric study
- Multi-linear regression analysis

Article Info

Research Article
Received: 01.02.2021
Accepted: 27.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.872441

Keywords:

Double tee moment
connection ,
Connection stiffness,
T-stub ,
Monotonic loading,
Finite element analysis

ABSTRACT

The moment-rotational behavior of the Double Split Tee (DST) Moment connections was investigated under the monotonic loading depending on the connection geometry. T-flange thickness, T-web thickness, the distance between shear bolts, gage distance between tension bolts, use of continuity plates, use of doubler plate, use of triangular rigidity plate in the T-stub and a circular hole in the plastic hinge zone of the beam are considered as variables. The effect of these variables on the connection behavior was examined in detail using finite element analysis. Then, multi-linear regression analysis was performed using simulation study results.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Northridge ve Kobe depremlerinde çok sayıda moment aktaran çelik çerçevelerde beklenmedik gevrek hasarlar meydana gelmiştir. Bu nedenle ABD’de, endüstriyel kuruluşlar, üniversiteler ve devlet organizasyonları, çelik taşıyıcı sistemlerin deprem etkisi altında performansının geliştirilmesi amacıyla çok sayıda araştırma başlatmıştır [1].

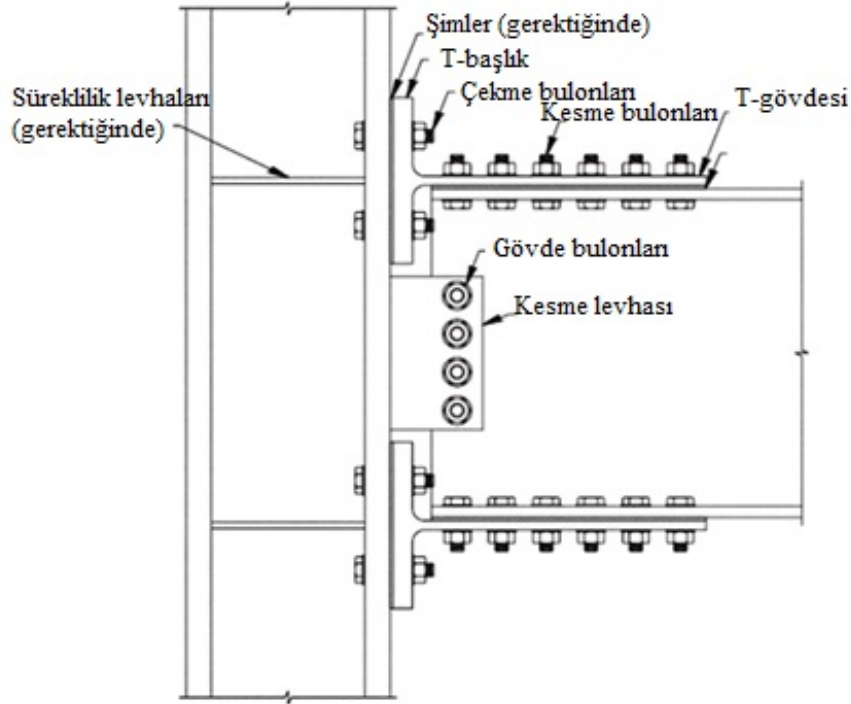
Yıllar içinde, çelik yapıların deprem tasarımında sismik enerji taleplerinin tespit edilmesine ve sünek davranış sağlanmaya yönelik birçok çalışma yürütülmüştür [2]. Yıkıcı Northridge depreminden sonra, SAC tarafından yürütülen araştırma sonucunda, FEMA yeni moment çelik çerçeve binaların tasarımı için öneriler içeren bir belge yayımlamıştır [3]. Bu belge, bazı yeterliği kanıtlanmış moment aktaran birleşimlerin tasarım prosedürleri ve sınırlamalarıyla ilgili bilgiler içermektedir ve bu çalışmada yer alan moment birleşimlerinden birisi de ÇTM birleşimidir. Bu tür birleşimler genelde Şekil 1’de gösterildiği gibi kiriş, kolon, iki T-parçası ve kesme levhasından oluşmaktadır. Ayrıca dört tane süreklilik levhaları ve takviye levhası da gerektiğinde kullanabilmektedir.

Şekil 1’de görüldüğü gibi ÇTM birleşimlerinde T-parçası yardımıyla ve bulonlar kullanılarak kolon başlığı ile kiriş başlıkları arasında bağlantı sağlanır. Dört veya sekiz adet bulon kullanarak, T-parça, kolon başlığına bağlanır. Üst ve alt T-parçaları aynı geometrik şekle sahip olmalıdır. T-parçaları haddelenmiş profiller kesilerek veya levhaların kaynaklanması ile imal edilir. Kiriş gövdesi, kolon başlığına

kesme levhası kullanılarak bağlanmaktadır. T-parçalar, kirişe etkileyen eğilme momentinin kolona aktarılmasını sağlamaktadır [4].

ÇTM birleşim ile ilgili geçmişte yapılmış olan başlıca çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Herrera vd. [5], ÇTM birleşimlerinin deprem performansını etkileyen T-parça bölgesinin davranışını ve birleşim performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneysel ve sonlu eleman çalışması gerçekleştirmiştir. T-parça için hadde profil yerine yapma T-parça kullanılması durumunda birleşim performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel ve nümerik çalışma artan monotonik yük altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda Yapma T-parçalarda kaynak hasarı sebebiyle göçme durumu tespit edilmemiştir. Francavilla vd. [6], T-parça davranışını temsil eden basitleştirilmiş bir sonlu eleman modeli oluşturmuştur. SAP2000 bilgisayar programı kullanılarak sonlu eleman analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen sonlu eleman modeli ile kıyaslanarak T-parça davranışı tespiti amaçlanmıştır. 2D sonlu eleman modeli ile sadece rijitlik ve mukavemeti değil, aynı zamanda plastik şekil değiştirme kapasitesi de tespit edilebilmiştir. Latour vd. [7], çalışmasında sürtünmeli kayma yüzeyleri kullanarak tasarlanmış kısmi mukavemetli ÇTM birleşiminin kullanılmasını önermektedir. İki deneysel çalışma programı yürütülmüştür. İlk çalışmada, sönümleyici olarak kullanılacak beş farklı sürtünme yüzeyinin enerji tüketme performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. İkinci programda ise, özel tasarlanmış ÇTM birleşimlerinde



Şekil 1. ÇTM birleşimi (Double Tee moment connection)[4].

kiriş başlıkları seviyesinde bulunan iki tür sönümleyici (metal ve kauçuk) kullanılarak sismik enerjinin dağıtılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen ÇTM bağlantılarının yapısal parçalarda hasara sebebiyet vermeden yüksek miktarda sismik enerji tüketmesi sağlanmıştır. Saberi vd. [8], zayıf bulonlu veya zayıf başlıklı T-parça birleşimlerinin güçlendirilmesi ve basit mafsallı birleşimleri moment birleşimlerine dönüştürmek için kaynaklı destek levhası (haunch) kullanarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Altı adet korniyerli birleşim numuneleri yapılmış ve SAC çevrimsel yükleme protokolü ile test edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, bu güçlendirme tekniği (haunch kullanımı) ile basit mafsallı birleşim, başarılı bir şekilde moment aktaran birleşime dönüştürülmüştür. Liu vd. [9], dişli deliğe sabitlenmiş tek taraflı bulon kullanarak T-parçanın çekme yükü altında göçme modlarını ve her bir göçme modu için mukavemetini teorik ve deneysel çalışma yaparak incelemişlerdir. Testlerden elde edilen T-parçanın çekme dayanımları, tasarım denklemlerinden hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bulon ön-germe kuvvetinin artırılması ile T-parçanın başlangıç rijitliğinin artırılabilirdiği ve birleşim akma ve kopma mukavemetinin bulon ön germe kuvvetinden etkilenmediği gözlemlenmiştir. Liang vd. [10], kaynaklı yüksek mukavemetli çelik (HSS) kullanarak T-parça birleşiminin çekme davranışını değerlendirmiş ve çekme yükü altında nominal akma mukavemeti 690 MPa olan kaynaklı T-parça birleşimler için deneysel bir çalışma yapmıştır. Deneysel çalışmada bulon çapı, bulon mukavemet sınıfı ve başlık boyutu ile değişen 12 adet kaynaklı T-parça birleşimleri tasarlanmıştır. Deneysel çalışmada elde edilmiş plastik taşıma kapasitesi ve başlangıç rijitliği sonuçları ile Eurocode3 Bölüm 1-8'e göre elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışmada malzeme modeli, geometrik özellikleri ve birleşimin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınarak sonlu eleman modeli geliştirilmiştir ve doğrulanmıştır. Birleşimlerin geometrik özelliklerine etki eden başlık kalınlığı, bulon ön-germe kuvveti ve rijitliği incelenmiştir. Bulon ön-germe kuvveti arttıkça birleşimin başlangıç rijitliğinin de doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ancak, bulon ön-germe kuvveti standart değeri aştığında, başlangıç rijitliği üzerinde etkisi azalmaktadır. Rijitlik levhasının uzunluk-yükseklik oranı 1,0'm altında olduğunda, akma sonrası rijitlik ve süneklik düzeyinin de azaldığı gözlemlenmiştir. Kong ve Kim [11], ÇTM birleşimlerinin başlangıç rijitliği ve nihai yük taşıma kapasitelerini sonlu eleman çalışması ile incelemişlerdir. ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelleri literatürde bulunan deneysel testler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Analizde malzeme özellikleri, başlık kalınlığı, gövde kalınlığı, başlık uzunluğu ve T-parça gövde yüksekliği, bulonlar arası mesafesi, kolon yüksekliği ve kiriş derinliği gibi çeşitli parametreler incelenmiştir. Çalışmada başlangıç rijitliğinin ve nihai moment kapasitesinin tespiti için geliştirilmiş bir hesap model önerilmiştir ve önerilen modeller ile test verilerinin uyumlu olduğu gösterilmiştir. Wulan vd. [12], dişli deliğe sabitlenmiş tek taraflı bulon kullanarak T-parçanın çekme yükü altında göçme mekanizmasını incelemiştir. Bulonlu Alın Levhalı birleşimdeki temel bilgileri sağlamak için bir

sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli, dört adet referans kriter (T-parça deformasyonu, kuvvet-yer değiştirme eğrisi, göçme modu ve akma dayanımı) dikkate alınarak deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Bulon çapı (d), bulon aralığı (s) ve T-parça akma mukavemeti (f_y) dikkate alınarak parametrik çalışma yapılmıştır. T-parça başlığındaki plastik mafsalların sayısına göre üç farklı göçme modu tespit edilmiştir. Teorik ve sayısal analizlere göre dişli deliklerin yüksek mukavemetli bulonları tutmak için yeterli dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Sun vd. [13], T-başlığını ve T-gövdesini birbirine kaynaklayarak T-parçayı imal etmiş ve kaynağa yakın olan alanın ısıdan etkilendiğini gözlemlenmiştir. Çalışmada, Q690 mukavemete sahip iki grup T-parçanın deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir. Isıdan etkilenen bölge, sonlu eleman analizi ile incelenmiştir. T-parça, çekme ve kesme yüklerine maruz bırakılmıştır. Yüksek mukavemetli çelikten imal edilen T-parça birleşimin, çekme ve kesme yükü altında davranışı sonlu eleman model analiz ile incelenmiştir. Çekme ve kesme test sonuçlarına göre, T-parçanın çekme ve kesme yükleri altındaki sünekliğinin, T-parçanın eksenel yük altındaki sünekliğinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada T-parçanın kombine olarak çekme ve kesme yüküne maruz kalması durumunda akma mukavemetinin tespiti için X_{CL} faktörü önerilmiştir. Lemos vd. [14], yaptığı çalışmada enerji tüketen sürtünmeli sönümleyici sistem ile tasarlanmış bir ÇTM kiriş-kolon birleşimini simülasyon modelleri oluşturarak incelemiştir. Yapılan çalışmada, sürtünmeli sönümleyicinin kaymasıyla sismik enerjinin dağıtılması ve bağlantının bir birleşeni hariç diğer tüm birleşenlerinin hasar görmesinin önlenmesi amaçlanmıştır. Sonlu eleman analizleri için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. ÇTM birleşim hem monotonik hem de çevrimsel yükleme altında incelenmiştir. Sayısal modelin doğruluğunu değerlendirmek için simülasyon çalışması sonucunda elde edilen moment-dönme grafikleri, deneysel çalışma sonucu elde edilen grafikler ile karşılaştırılmış ve tatmin edici bir uyum elde edilmiştir. Yuan vd. [15], paslanmaz çelik bulonlu T-parça birleşimlerinin yapısal davranışını deneysel çalışma yaparak incelemiştir. Çeşitli geometrik özelliklere sahip, sıcak hadde paslanmaz çelik profillerinden imal edilen ve paslanmaz çelik bulonlar ile birleştirilen toplam 27 adet T-parça birleşim modeli tasarlanmıştır. Paslanmaz çelik bulonlu T-parçası için (EN 1.430, duplex EN 1.4462) çelik ve paslanmaz çelik bulonlar için (A4-70, A4-80) kullanılmıştır. Bulonlu T-parça numuneleri monotonik yük altında test edilmiş ve nihai yük taşıma kapasiteleri, plastik deformasyon kapasiteleri ve göçme modları elde edilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre birçok şartnamenin T-parça mukavemetinin tespiti için sunduğu formüllerden elde edilen mukavemet değerlerinin, deney sonucu elde edilen mukavemet değerlerinin üzerinde kaldığı görülmüştür.

Yabancı ülkelerde yaygın olarak kullanılan ÇTM birleşimleri Türkiye'de tanınmamakta ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de [16] yeterliliği kanıtlanmış moment birleşimleri arasında yer almamaktadır. Türkiye koşullarında Avrupa profilleri ve çelik kalitesi kullanılarak

imal edilmiş ÇTM birleşimlerin moment-dönme davranışının tespiti, bu birleşimlerin kullanıldığı yapıların performansa göre tasarımı için önem arz etmektedir. Bu çalışmada ÇTM birleşimlerin monotonik yük altında moment-dönme davranışı birleşim geometrisine bağlı olarak incelenmiştir.

2. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDIES)

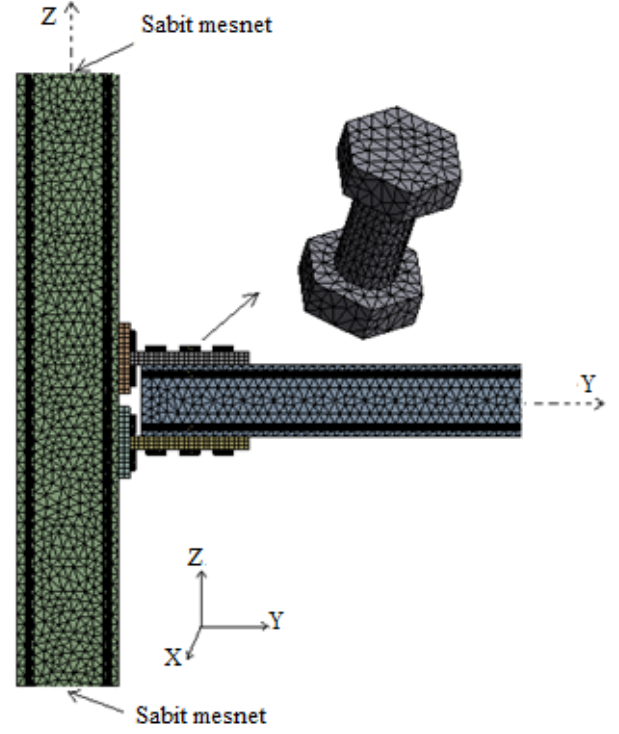
Yapılan çalışmada ÇTM birleşimli moment aktaran çerçevelerin, farklı birleşim geometrileri için monotonik yük altında moment-dönme davranışının incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman analizi için ANSYS [17] yazılımı kullanılmıştır. Sayısal model çalışmasından elde edilen moment-dönme eğrisi, geçmiş çalışmalarda bulunan ve deneysel çalışmadan elde edilen moment-dönme eğrisi ile kıyaslanarak sonlu elemanlar analiz modeli doğrulanmıştır.

2.1. Sonlu Elemanlar Modeli (Finite Element Model)

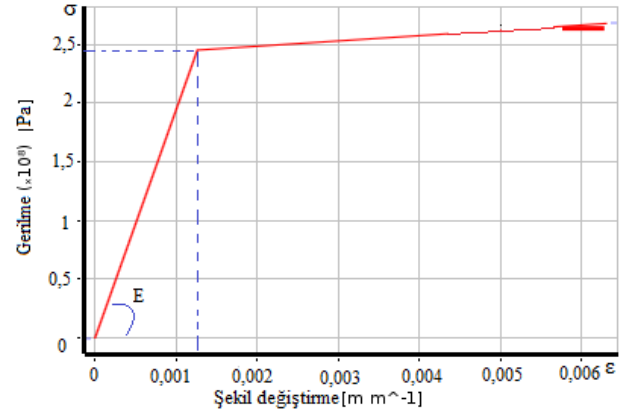
Üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde SOLID186, SOLID187 katı elemanları (Şekil 2) kullanılmıştır. SOLID186 elemanı, ikinci dereceden yer değiştirme davranışı sergileyen üç boyutlu, 20 düğümlü bir katı elemandır. Her düğümde üç serbestlik derecesine sahiptir. SOLID187 elemanı ise, üç boyutlu, 10 düğüm noktalı ve her düğümde üç serbestlik derecesine sahiptir. Bu elemanlar çelik ve benzeri süneklik özelliği sergileyen malzemelerde tercih edilmektedir. Temas yüzeylerinde TARGE170 ve CONTA174 temas elemanlarından istifade edilmiştir. CONTA174, rijit-esnek ve esnek-esnek temas analizi için tasarlanmış 8 düğümlü bir elemandır. Katı cisimler veya kabuklar arasındaki temas durumunu simüle etmek için uygulanabilmektedir. TARGE170 elemanı ise ilişkili temas elemanları (CONTA174) için çeşitli boyutlu hedef yüzeylerini temsil etmek için kullanılmaktadır [18]. Kaynaklar (Bonded) yüzey birleşim türü kullanılarak modellenmiştir. Ancak bulonlar ile temas durumundaki yüzeylerde sürtünme (Frictional) yüzey birleşim türü kullanılarak sürtünme dikkate alınmıştır.

2.2. Malzeme Modeli (Material Model)

Kiriş, kolon, T-parça, süreklilik levhası, takviye levhası ve bulonlar için çift doğrulu izotrop pekleşmeli "Bilinear Isotropic Hardening" malzeme modeli (Şekil 3) kabul edilmiştir. Çeliğin Poisson oranı 0,3 olarak kullanılmıştır. Kolon ve kirişin akma mukavemeti 245 MPa, T-parçanın akma mukavemeti 237 MPa ve bulonların akma mukavemeti 900 MPa olarak alınmıştır. Kullanılan bu değerler Saberi vd. [8] tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarından alınmıştır. Tanjant modülü, elastisite modülünün yaklaşık 44'te biri (4500 MPa), bulonlar için de yaklaşık 69'da biri (3000 MPa) kabul edilmiştir. Tüm birleşim elemanlarının akma durumu Von-Mises akma kriteri dikkate alınarak belirlenmiştir. T-parça başlığı ile kolon başlığı ve T-parça gövdesi ile kiriş başlığı arasındaki sürtünme katsayısı 0,5 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2. SOLID186 ve SOLID187 ağ modeli (SOLID186 and SOLID187 mesh model)



Şekil 3. Bi-linear malzeme modeli (Bi-linear material model)

2.3. Sınır Şartları ve Yer Değıştirme Yüğü Uygulanması (Boundary Conditions and Application of Displacement Load)

Referans çalışma [8] dikkate alınarak kolon sınır şartları sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Numunenin alt ve üst mesnetlerinde $\Delta X=0$, $\Delta Y=0$, $\Delta Z=0$, $RX=Serbest$, $RY=0$, $RZ=0$ olarak sınır şartları kabul edilmiştir. Sınır koşulları ve koordinat eksenleri Şekil 2'de gösterilmektedir. Monotonik yer değıştirme yükü altında sonlu eleman analizi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada bulonlara 172,79 kN ön-germe kuvveti verilmiştir. İkinci aşamada ise kiriş kolon yüzünden 1500 mm uzaklıkta, 15 saniyede ve 0,5 saniye adımla kirişin ucuna 112 mm yer değıştirme yükü kademe kademe uygulanmıştır.

2.4. Moment Dönme Grafiğinin Elde Edilmesi (Obtaining of Moment-Rotation Curve)

Simülasyon çalışmasında moment-dönme grafikleri, referans çalışmasında [8] belirtilen ölçüm noktaları kullanılarak elde edilmiştir. Ölçüm noktaları Şekil 4'te gösterilmektedir.

Sayısal analiz doğrulama çalışmasında toplam dönme değerleri Eş. 1'e göre elde edilmiştir.

$$\Phi_{\text{toplam(kolon+kiriş+birleşim)}} = \text{atan} \left(\frac{\delta_{DTz1}}{L_1} \right) \quad (1)$$

Kolon ve birleşimin toplam dönmesi Eş. 2 kullanılarak elde edilmiştir.

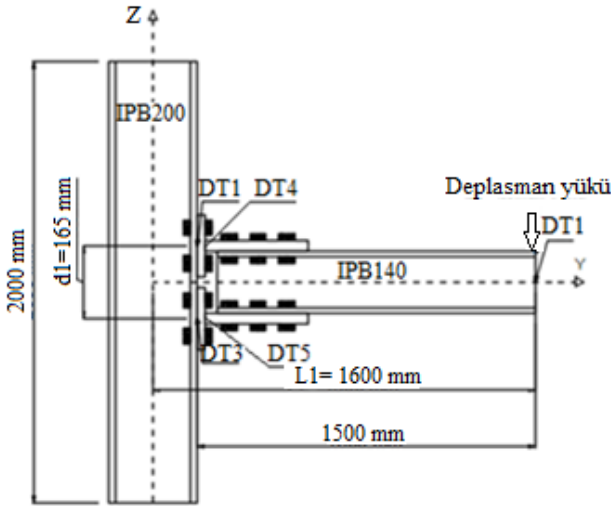
$$\Phi_{\text{(kolon+birleşim)}} = \text{atan} \left(\frac{\delta_{DTy4} - \delta_{DTy5}}{d_1} \right) \quad (2)$$

Sadece kolon dönmesi Eş. 3 kullanılarak elde edilmiştir.

$$\Phi_{\text{kolon}} = \text{atan} \left(\frac{\delta_{DTy2} - \delta_{DTy3}}{d_1} \right) \quad (3)$$

Sadece kirişin elastik ve plastik toplam dönmesi ise Eş. 4'e göre hesaplanmıştır.

$$\Phi_{\text{kiriş toplam}} = \Phi_{\text{toplam}} - \Phi_{\text{(kolon+birleşim)}} \quad (4)$$

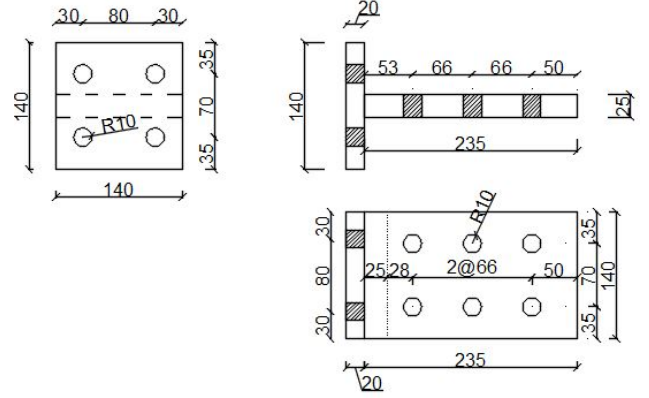


Şekil 4. Yer değiştirme ölçer konumları (LVDT locations)

2.5. Simülasyon Çalışmasının Doğrulanması (Verification of Finite Element Analysis)

Sayısal model çalışması, Saberi vd. [8] tarafından yapılan deneysel çalışma esas alınarak doğrulanmıştır. Referans alınan çalışmada kolon IPB200 profili ve kiriş IPB140 profili olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kolon uzunluğu 2000 mm ve kiriş uzunluğu 1500 mm olarak belirlenmiştir. Kesme levhası kullanılmamıştır. Yükleme kiriş ucunda (Şekil 4) yapılmış ve kolon sınır şartları sabit mesnet olarak

tanımlanmıştır. Çekme ve kesme bulonlarının elastisite modülü 206000 MPa ve bulonlara uygulanan ön-germe kuvveti $0.55F_u$ (F_u bulonların kopma mukavemetidir) olarak belirlenmiştir. Referans çalışmada kullanılan 10.9 kalite M20 civatanın mekanik özellikleri Tablo 3'te verilmektedir. Referans alınan FEA-TSR numunesinde panel bölgesinde süreklilik levhaları ve takviye levhası kullanılmamıştır. Referans numunenin malzeme ve geometrik özellikleri sırasıyla Tablo1, Tablo2 ve Tablo3'te sunulmuştur. Ayrıca T-parçanın geometrik özellikleri Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Parametrik çalışmada kabul edilen T-parça geometrik özellikleri
(T-stub geometric properties)

Simülasyon çalışmasından (FEA) elde edilen ÇTM birleşimin moment-dönme grafiği referans deneysel çalışma dikkate alınarak doğrulanmıştır. Kolon merkezinden 1600 mm uzaklıkta kiriş ucuna verilen yer değiştirme yükünün kolon merkezinde oluşturduğu dönme değerleri okunarak moment-dönme grafiği elde edilmiştir. Dönme değerleri Eş. 1 kullanılarak hesap edilmiştir.

Şekil 6'da referans çalışma ile simülasyon çalışmasının (FEA) karşılaştırılması görülmektedir. Görüldüğü üzere FEA grafiğinin elastik bölge rijitliği 0,0156 radyan toplam dönme açısına kadar deneysel çalışmaya kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. Diğer taraftan 0,0156 radyan ile 0,0624 radyan arasında ise deneysel çalışma moment eğrisi FEA modeli moment eğrisinin üzerinde yer almıştır.

Deneysel çalışma ile FEA çalışmasının arasındaki farkın başlıca sebepleri aşağıda sıralanmıştır.

- Deneysel çalışma düzeneğinde meydana gelen problemler (mesnet bölgesinde sürtünmeler, düzlem dışı hareketin tam engellenmemiş olma ihtimali) moment-dönme eğrisinin davranışında farklılığa sebep olabilmektedir. Ayrıca yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı (μ) referans çalışmasında belirtilmemiştir. Sürtünme katsayısı FEA çalışmalarında 0,5 olarak kabul edilmiştir.
- Deneysel çalışmada kullanılan bazı geometrik ölçüler (T-gövde kalınlığı, T-başlık çekme bulonları arasındaki uzaklık, T-gövde kesme bulonları arasındaki uzaklık, T-gövde kenar mesafeleri, T-başlık kenar mesafeleri) referans çalışmada [8] verilmemiştir. Bu veriler AISI 358-

Tablo 1. Referans alınan çalışmanın ölçüleri (Details of the reference study) [8]

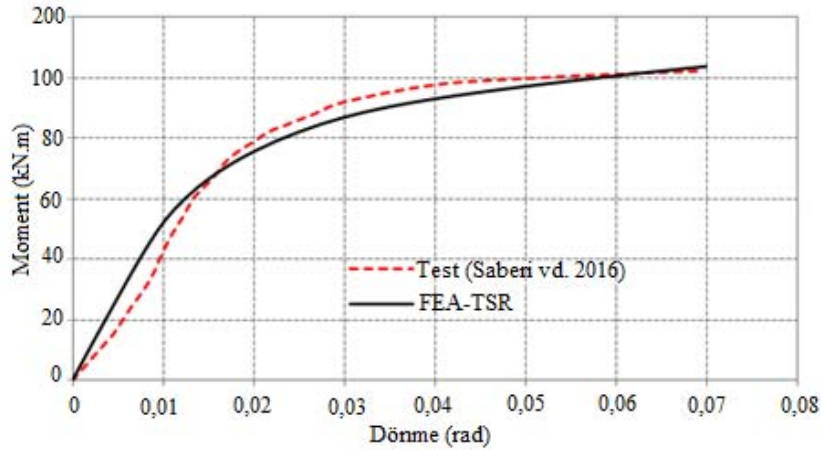
FEA-TSR profilleri	b_f (mm)	d_p (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	r (mm)	L (mm)
Kiriş IPB140	140	140	12	7	12	1500
Kolon IPB200	200	200	15	9	18	2000

Tablo 2. Referans alınan çalışmanın bulon ve kaynak özellikleri (Properties of the bolts and welds) [8]

Numune	Bulonların çapı (mm)	T-başlık kalınlığı (mm)	Bulon sayısı	Kaynak türü
FEA-TSR	20	20	8 çekme 12 kesme	Küt (CJP)

Tablo 3. Referans alınan çalışmanın malzeme özellikleri (Properties of materials) [8]

Profiller	Akma mukavemeti f_y (N/mm ²)	Kopma mukavemeti F_u (N/mm ²)	Elastisite modülü E (N/mm ²)
Kiriş- Kolon	245	372	194163
T-parça	237	364	186137
Bulon (Gr.10.9)	900	1009	206000

**Şekil 6.** Referans çalışma ile FEA'nın kıyaslanması (Comparison of the reference study and the FEA)

16 uygulama sınırları dikkate alınarak ve deney resimlerinde bilinen ölçüler üzerinden ölçekleme yapılarak tahmin edilmiştir.

- Çelik malzemesindeki atomlar arası kusurlar ve çeliğin imalatı sırasında sıcak çeliğin dış yüzeyinin iç bölgeye göre erken soğumasından kaynaklanan kalıcı gerilmeler (residual stress) malzeme ve gerilme-şekil değiştirme davranışını etkilemektedir.

3. PARAMETRİK ÇALIŞMA (PARAMETRIC STUDY)

Bu bölümde monotonik yük altında doğrulanan sonlu eleman modeli kullanılarak parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Tablo 5'te incelenen sayısal modeller gösterilmektedir. Tabloda verilen TSR kısaltması, Saberi vd. tarafından

deneysel çalışmada numuneye verilen isimdir. Simülasyon çalışması ile incelenen diğer modellerin daha iyi anlaşılması amacıyla Tablo 5'te verilen kısaltmaların açıklamaları Tablo 4'te verilmiştir.

Parametrik çalışma sonuçları, moment-dönme grafikleri yardımıyla ve doğrulanmış FEA ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Parametrik çalışmada grafikler yardımıyla K/I toplam dönme elastik rijitlik, K_2 toplam dönme plastik rijitlik ve birleşimde plastik davranış başlangıç noktasına karşılık gelen M_p değerleri tespit edilmiş (Tablo 5) ve bu değerler kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. ÇTM birleşiminde parametre olarak kullanılan süreklilik levhaları, takviye levhası, rijitlik levhaları ve dairesel boşluk yeri Şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Sayısal modellerde kullanılan kısaltmaların açıklaması
(Explanation of abbreviations used in the numerical models)

FEA-TSR	Deneysel çalışma dikkate alınarak doğrulanmış sayısal model
TSR- t_{fi} xx	T-parça başlık kalınlığının parametre olarak incelendiği modeller
TSR- t_{st} xx	T-parçanın gövde kalınlığının parametre olarak incelendiği modeller
TSR- s_{vb} xx	T-parça gövdesindeki kesme bulonları arasındaki uzaklığın parametre olarak incelendiği modeller
TSR- g_{ib} xx	T-parça başlığındaki çekme bulonları arasındaki dikey uzaklığın parametre olarak incelendiği modeller
TSR-SL	Kolon panel bölgesinde süreklilik levhalarının (SL) kullandığı ÇTM birleşim modeli.
TSR-SL-TL	Kolon panel bölgesinde süreklilik levhalarının (SL) ve takviye levhasının (TL) kullanıldığı ÇTM birleşim modeli.
TSR-T-parça RL	T-parçaya üçgen rijitlik levhası (RL) (rijitlik levhanın boyutları: 57.5x57.5mm) eklenen ÇTM birleşim modeli.
TSR-Kiriş RL	Kirişin plastik mafsallık bölgesinde rijitlik levhası (RL) kullandığı ÇTM birleşim modeli.
TSR-SL-TL-T-parça RL	TSR-SL-TL modelinin T-parçasına üçgen rijitlik levhası (RL) eklediği ÇTM birleşim modeli.
TSR-SL-TL-Kiriş RL	TSR-SL-TL modelinin giriş plastik mafsallık bölgesinde rijitlik levhası (RL) kullandığı ÇTM birleşim modeli.
TSR-d xx:	TSR-SL-TL modelin giriş plastik mafsallık bölgesine dairesel boşluk (d) açıldığı ÇTM birleşim modeli.

Tablo 5. Monotonik yükleme altında yapılan tüm sayısal modellerin sonuçları
(Results of all models under monotonic loading)

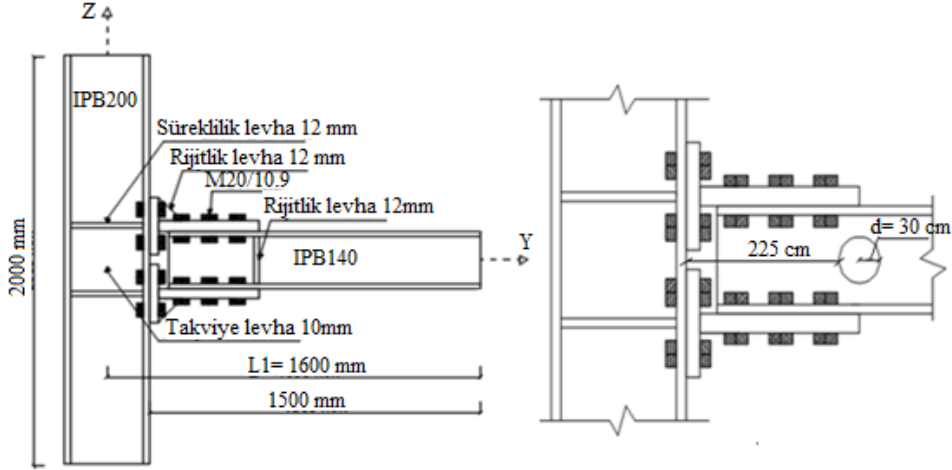
Simülasyon modelleri	t_{fi}/t_{st} (mm)	s_{vb} (mm)	g_{ib} (mm)	K1 (kN.m/rad)	K2 (kN.m/rad)	M_p (kN.m)	ϕ_p (rad)
FEA-TSR	20/25	66	70	5473	348,5	85,16	0,0156
TSR- t_{fi} 10	10/25	66	70	4932	436,4	72,2	0,0146
TSR- t_{fi} 15	15/25	66	70	5282	356,2	82,19	0,0154
TSR- t_{fi} 25	25/25	66	70	5636	354,4	87,24	0,0155
TSR- t_{st} 15	20/15	66	70	4944	309,9	79,14	0,016
TSR- t_{st} 20	20/20	66	70	5230	336,9	82,96	0,0159
TSR- t_{st} 30	20/30	66	70	5665	351,2	86,91	0,0153
TSR- s_{vb} 60	20/25	60	70	5434	343,6	84,91	0,0156
TSR- s_{vb} 70	20/25	70	70	5517	352,7	85,52	0,0155
TSR- s_{vb} 76	20/25	76	70	5587	357,7	86,01	0,0154
TSR- g_{ib} 60	20/25	66	60	5472	348,5	84,49	0,0154
TSR- g_{ib} 80	20/25	66	80	5459	348,9	85,59	0,0157
TSR- g_{ib} 90	20/25	66	90	5405	346	85,93	0,0159
TSR-SL*	20/25	66	70	5792	357	89,1	0,0154
TSR-SL, TL**	20/25	66	70	5912	302,5	95,63	0,0162
TSR-T-parça RL***	20/25	66	70	5590	358,6	87,41	0,0156
TSR-Kiriş RL	20/25	66	70	5492	348,9	85,48	0,0156
TSR-SL, TL, T-parça RL	20/25	66	70	5991	308,9	96,03	0,0160
TSR-SL, TL, Kiriş RL	20/25	66	70	5921	321,3	95,41	0,0161
TSR-d20****	20/25	66	70	5922	327,3	94,02	0,0159
TSR-d30	20/25	66	70	5922	178,5	98,21	0,0166

SL* = süreklilik levhası (12 mm), TL** = takviye levhası (10 mm), RL*** = rijitlik levhası (12 mm), d20**** = Açılan dairesel boşluğun yarıçapı d = 20 cm = 200 mm

3.1. Moment-Dönme Grafiklerinin Yorumlanması (Discussion of Moment-Rotation Curves)

ÇTM birleşimlerde parametre değişimlerine göre birleşim moment-dönme davranışının değişimi aşağıda sunulmuştur. T-başlık kalınlığı (t_{fi}) arttıkça ÇTM birleşim elastik rijitliği ($K1$) artış göstermiştir. Birleşim elastik rijitliği “FEA-TSR model ($t_{fi}=20$ mm)” için, 5473 kN.m/rad, “TSR- t_{fi} 25”

birleşimi için ise 5636 kN.m/rad olarak tespit edilmiştir. Birleşim elastik rijitliği ($K1$) %2,98 artış göstermiştir. Diğer taraftan T-başlık kalınlığı (t_{fi}) azaldıkça, ÇTM birleşim elastik rijitliği azalma göstermiştir. Birleşim elastik rijitliği “TSR- t_{fi} 15” için 5282 kN.m/rad, “TSR- t_{fi} 10” birleşimi için ise 4932 kN.m/rad olarak tespit edilmiştir. Birleşim elastik rijitliği ($K1$) doğrulama çalışmasına kıyasla “TSR- t_{fi} 15” için %3,5 ve “TSR- t_{fi} 10” için %9,9 azalmıştır. T-başlık kalınlığı



Şekil 7. ÇTM birleşimde kullanılan parametrelerin gösterimi (Display of parameters used in DST connection)

(t_f) arttıkça ÇTM birleşim plastik rijitliği (K_2) artış göstermiştir. Birleşim plastik rijitliği “FEA-TSR model ($t_f=20$ mm)” için, 348,5 kN.m/rad, “TSR- t_f25 ” birleşimi için ise 354,4 kN.m/rad olarak tespit edilmiştir. Birleşim plastik rijitliği (K_2) %1,7 artış göstermiştir. Diğer taraftan T-başlık kalınlığı (t_f) azaldıkça da, ÇTM birleşim plastik rijitliği artış göstermiştir. Birleşim plastik rijitliği “TSR- t_f15 ” için 356,2 kN.m/rad, “TSR- t_f10 ” birleşimi için ise 436,4 kN.m/rad olarak tespit edilmiştir. Birleşim plastik rijitliği (K_2) doğrulama çalışmasına kıyasla “TSR- t_f15 ” için %2,2 ve “TSR- t_f10 ” birleşimi için ise %25,2 artış göstermiştir. T-başlık kalınlığı (t_f) arttıkça ÇTM birleşim plastikleşme başlangıç moment değeri (M_p) artış göstermiştir. Plastikleşme başlangıç moment değeri “FEA-TSR model ($t_f=20$ mm)” için, 85,157 kN.m, “TSR- t_f25 ” birleşimi için ise 87,235 kN.m olarak tespit edilmiştir. Birleşim plastikleşme başlangıç moment değeri (M_p) %2,44 artış göstermiştir. Diğer taraftan T-başlık kalınlığı (t_f) azaldıkça, ÇTM plastikleşme başlangıç moment değeri (M_p) azalma göstermiştir. Plastikleşme başlangıç moment değeri “TSR- t_f15 ” için 82,187 kN.m, “TSR- t_f10 ” birleşimi için ise 72,2 kN.m olarak tespit edilmiştir. Birleşim plastikleşme başlangıç moment değeri (M_p) doğrulama çalışmasına kıyasla “TSR- t_f15 ” için %3,5 ve “TSR- t_f10 ” birleşimi için ise %15,2 azalmıştır.

Çalışmamızda ön-germe miktarı bir parametre olarak araştırılmamıştır. Ancak sayısal modeller incelendiğinde ön-germe miktarı arttıkça birleşim başlangıç rijitliğinin artış gösterdiği ve birleşim moment kapasitesinin ön-germe miktarından etkilenmediği tespit edilmiştir. Sayısal modellerde incelenen diğer geometrik özelliklerin K_1 , K_2 ve M_p üzerindeki etkisi Tablo 6’da özet olarak sunulmuştur. Ayrıca yukarıda anlatılan parametrik değişimlerin moment-dönme grafiğine etkisi Şekil 8’de gösterilmektedir.

3.2. Plastik Mafsalsal Bölgesinin İncelenmesi (Investigation of the Plastic Hinge Zone)

Yüksek sünek çelik çerçevelerde deprem enerjisi tüketim noktalarının (plastik mafsalların) kiriş ucunda oluşması hedeflenir. Birleşim ve kolon, kapasite tasarımına göre elastik kalacak şekilde ve kirişten daha güçlü olarak

tasarlanır. Birleşim ve kolonun tasarımı yapılırken Eş. 5 ve Eş. 6’da görüldüğü üzere kirişte oluşan plastik mafsalsal yerleri kullanılarak kolon merkezindeki ve kolon yüzündeki momentler hesap edilebilmektedir. Aşağıdaki formüllerde M_{pr} plastik mafsalsal eğilme kapasitesi, V_p plastik mafsalsal kesme kuvveti, x plastik mafsalsal kolon yüzünden olan uzaklığı, M_f kolon yüzünde meydana gelen momenti, M_c ise kolon merkez aksında meydana gelen momenttir.

$$M_f = M_{pr} + V_p x \quad (5)$$

$$M_c = M_{pr} + V_p (x + d_c/2) \quad (6)$$

Bu bölümde bazı geometrik parametrelerin değiştirilmesi ile (kesme civataları arası mesafe, süreklilik ve takviye levhası kullanımı ve muhtemel plastik mafsalsal oluşum yerine delik açılması) Eş. 5 ve Eş. 6’da x ile gösterilen plastik mafsalsal yerinin nasıl etkilendiği PEEQ indeksi [19] yardımıyla araştırılmıştır. Şekil 9’da doğrulama çalışmasında ve sayısal analiz çalışmasında tespit edilen plastik mafsalsal oluşumu gösterilmektedir.

Eş. 7’de verilen PEEQ indeksi eşdeğer plastik gerininim akma gerinimine ϵ_y oranıdır. ϵ_{ij} i ve j ile gösterilen yönlerde plastik gerininim birleşimini ifade etmektedir. PEEQ indeksinin belli bir bölge için artışı, o bölgede oluşabilecek çatlak, hasar veya deformasyon potansiyelinin artışı olarak değerlendirilmektedir.

$$\text{PEEQ indeksi} = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}} / \epsilon_y \quad (7)$$

Tüm modellerde plastik mafsalsal oluşumu, PEEQ indeksi kullanılarak, kiriş başlığında ve kolon yüzünden itibaren 600 mm uzunlukta bir bölge için araştırılmıştır. Şekil 10’da doğrulanmış model (FEA-TSR) için plastik mafsalsal bölgesi incelenmektedir. Maksimum plastikleşme kolon yüzünden 212,5 mm uzaklıkta oluşmuştur. Bu noktada toplam %7 dönme açısında PEEQ indeksi 14,32 olarak tespit edilmiştir. Yaklaşık 350 mm uzunlukta bir plastik mafsalsal bölgesi meydana gelmektedir. Simülasyon çalışmasında %2 toplam

Tablo 6. Monotonik yükleme altında yapılan tüm modellerin karşılaştırmaları
(Comparisons of all models under monotonic loading)

Simülasyon modelleri	Değişkenler (mm) $t_{ft}, t_{st}, s_{vb}, g_{tb}$	K1 % (kN.m/rad)	K2 % (kN.m/rad)	M_p % (kN.m)
FEA-TSR (Referans model)	$t_{ft}=20, t_{st}=25, s_{vb}=66, g_{tb}=70$	± 0	± 0	± 0
TSR- $t_{ft}10$	$t_{ft}=20 \rightarrow t_{ft}=10$	-9,9	+25,2	-15,1
TSR- $t_{ft}15$	$t_{ft}=20 \rightarrow t_{ft}=15$	-3,5	+2,2	-3,5
TSR- $t_{ft}25$	$t_{ft}=20 \rightarrow t_{ft}=25$	+2,98	+1,7	+2,44
TSR- $t_{st}15$	$t_{st}=25 \rightarrow t_{st}=15$	-9,7	-11,08	-7,07
TSR- $t_{st}20$	$t_{st}=25 \rightarrow t_{st}=20$	-4,44	-3,33	-2,58
TSR- $t_{st}30$	$t_{st}=25 \rightarrow t_{st}=30$	+3,5	+0,8	+2,06
TSR- $s_{vb}60$	$s_{vb}=66 \rightarrow s_{vb}=60$	-0,71	-1,4	-0,29
TSR- $s_{vb}70$	$s_{vb}=66 \rightarrow s_{vb}=70$	+0,8	+1,2	+0,42
TSR- $s_{vb}76$	$s_{vb}=66 \rightarrow s_{vb}=76$	+2,08	+2,64	+0,99
TSR- $g_{tb}60$	$g_{tb}=70 \rightarrow g_{tb}=60$	-0,18	0	-0,78
TSR- $g_{tb}80$	$g_{tb}=70 \rightarrow g_{tb}=80$	+0,26	+0,11	+0,5
TSR- $g_{tb}90$	$g_{tb}=70 \rightarrow g_{tb}=90$	+1,24	-0,72	+0,91
TSR-SL	SL=12	+5,8	+2,8	+4,6
TSR-SL, TL	SL=12, TL=10	+8	-2,4	+12,3
TSR-T-parça RL	T-parça RL=12	+2,14	+2,9	+2,65
TSR-Kiriş RL	Kiriş RL=12	+0,3	+0,11	+0,38
TSR-SL, TL, T-parça RL	SL=12, TL=10, T-parça RL=12	-9,46	-11,36	+12,77
TSR-SL, TL, Kiriş RL	SL=12, TL=10, kiriş RL=12	+8,2	-7,8	+12
TSR-d20	d=200	+1,35	+8,2	-1,7
TSR-d30	d=300	+1,35	-41	+2,7

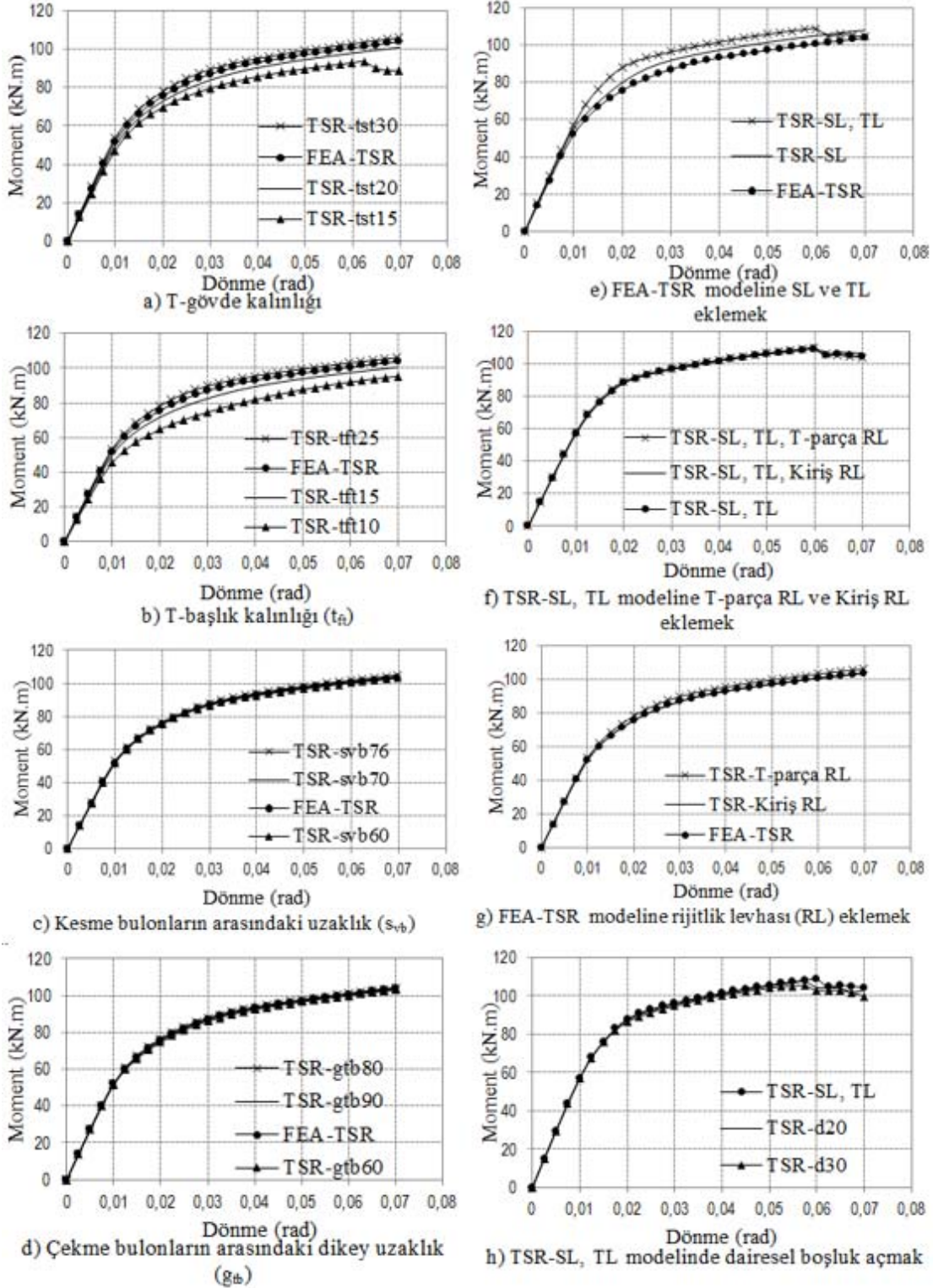
dönme açısından itibaren plastikleşme somut olarak gözlemlenmeye başlanmıştır. Şekil 10'da (TSR-Svb76) kesme civataları arasındaki mesafe 66 mm'den 76 mm'ye çıkartılmıştır. Bu durumda birleşim uzunluğu artmıştır. Maksimum plastikleşme kolon yüzünden 295 mm uzaklıkta oluşmuştur. Bu noktada toplam %7 dönme açısında PEEQ indeksi 7 olarak tespit edilmiştir. Yaklaşık 225 mm uzunlukta bir plastik mafsallık bölgesi meydana gelmektedir. Simülasyon çalışmasında %1 toplam dönme açısından itibaren plastikleşme somut olarak gözlemlenmeye başlanmıştır. Şekil 10'da (TSR-SL-TL) doğrulanmış modele süreklilik ve takviye levhası eklenmiştir. Bu durumda birleşim uzunluğu artmıştır. Maksimum plastikleşme kolon yüzünden 212,5 mm uzaklıkta oluşmuştur. Bu noktada toplam %7 dönme açısında PEEQ indeksi 18,5 olarak tespit edilmiştir. Yaklaşık 450 mm uzunlukta bir plastik mafsallık bölgesi meydana gelmektedir. Simülasyon çalışmasında %2 toplam dönme açısından itibaren plastikleşme somut olarak gözlemlenmeye başlanmıştır.

Şekil 10'da (TSR-d30) doğrulanmış modele plastik mafsallık bölgesinde 300 mm yarıçapında delik açılmıştır. Maksimum plastikleşme kolon yüzünden 300 mm uzaklıkta oluşmuştur. Bu noktada toplam %7 dönme açısında PEEQ indeksi 9,5

olarak tespit edilmiştir. Yaklaşık 288 mm uzunlukta bir plastik mafsallık bölgesi meydana gelmektedir. Simülasyon çalışmasında %3 toplam dönme açısından itibaren plastikleşme somut olarak gözlemlenmeye başlanmıştır. Görüldüğü üzere birleşim geometrisine bağlı olarak plastik mafsallık konumu, uzunluğu ve maksimum plastikleşme oranı değişiklik göstermektedir. Kesme civataları arasındaki mesafe artırılarak ve kirişte delik açılarak plastik mafsallık noktası kolondan uzaklaştırılabilmiştir.

4. İSTATİSTİKSEL ÇALIŞMA (STATISTICAL STUDY)

Bu bölümde FEA'dan elde edilen sonuçlar kullanılarak ÇTM birleşimlerin elastik moment kapasitesi, elastik dönme kapasitesi, elastik bölge rijitliği ve plastik bölge rijitliği bilgilerini veren ampirik formüllerin türetilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 30 adet simülasyon modeli oluşturulmuştur. Kirişin ucuna 112 mm monotonik yer değiştirme yükü, sonsuz rijit yüzeyden 1500 mm uzaklıkta, 15 saniyede ve 0,5 saniye adımla kademe-kademe uygulanmıştır. Moment değerleri ve toplam dönme değerleri sonsuz rijit yüzeyde okunmuştur (Şekil 11). Çalışmada T-başlık kalınlığı (t_{ft}), T-gövde kalınlığı (t_{st}), çekme bulonları arasındaki dikey mesafe (g_{tb}), kesme bulonları arasındaki

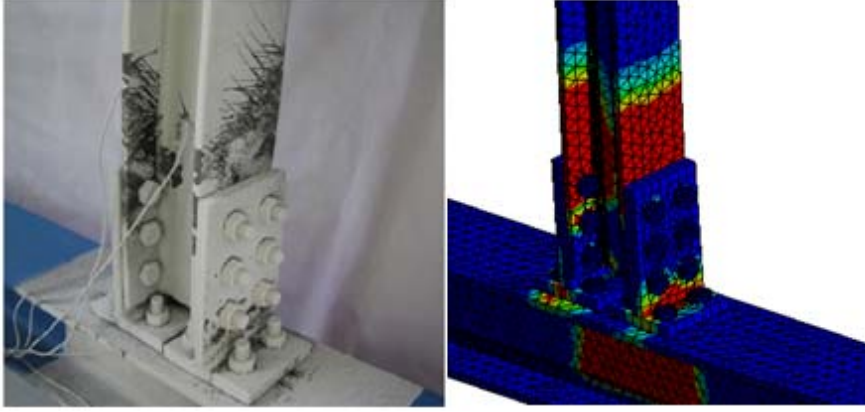


Şekil 8. Monotonik yüklemeye altındaki testlerin moment-dönme grafikleri

(Moment-rotation curves of tests under monotonic loading)

mesafe (s_{vb}), kiriş uzunluğu (L_b) ve kiriş en-kesit profili (W_p) parametre olarak kabul edilmiş ve sonlu eleman analizleri yapılmıştır. 30 farklı modelin moment-toplam dönme grafiklerinden elde edilen plastikleşme başlangıç noktası için

moment değeri (M_p), plastikleşme başlangıç noktası için toplam dönme açısı (φ_p), elastik bölgedeki rijitlik değerleri ($K_{elastik}$) ve plastik bölgedeki rijitlik değerleri ($K_{plastik}$) sonuçları DATAFIT [20] programına diğer parametrelerle



Şekil 9. Deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışmasındaki plastik mafsall oluşumu
(Plastic hinge formation in experimental study and FEA)

birlikte girilmiş ve $(M_p, \varphi_p, K_{elastik}, K_{plastik})$ değerlerini parametrelere bağlı olarak veren 4 adet denklem türetilmiştir.

4.1. İstatistiksel Çalışma Denklemlerinin Elde Edilmesi (Obtaining the Equations of Statistical Study)

Tablo 7’de görüldüğü gibi T-başlık kalınlığı (t_{ft}), T-gövde kalınlığı (t_{st}), çekme bulonları arasındaki dikey mesafe (g_{tb}), kesme bulonları arasındaki mesafe (s_{vb}), kiriş uzunluğu (L_b) ve kiriş en-kesit profili (W_p) değerleri DATAFIT programına sırasıyla $X1, X2, X3, X4, X5$ ve $X6$ olarak ve plastikleşme başlangıç momenti (M_p), plastikleşme başlangıç toplam dönmesi (φ_p) elastik rijitlik değerleri ($K_{elastik}$) ve plastik rijitlik değerleri ($K_{plastik}$), sırasıyla Y olarak girilerek plastikleşme başlangıç momenti denklemi olan Eş. 8, plastikleşme başlangıç toplam dönmesi (φ_p) denklemi olan Eş. 9, elastik rijitlik değerleri ($K_{elastik}$) denklemi olan Eş. 10 ve plastik rijitlik değerleri ($K_{plastik}$) denklemi olan Eş. 11 elde edilmiştir.

$$M_p = 151t_{ft} + 1459t_{st} - 77g_{tb} + 99s_{vb} - 10L_b + 128683W_p + 28 \quad (8)$$

$$\varphi_p = e^{(-0,94t_{ft} + 6t_{st} + 0,86g_{tb} - 0,208s_{vb} + 0,49L_b - 1146,6W_p - 5,08)} \quad (9)$$

$$K_{elastik} = 23068t_{ft} + 83730t_{st} - 8809g_{tb} + 16305s_{vb} - 3972L_b + 34488773W_p + 1665 \quad (10)$$

$$K_{plastik} = -3600t_{ft} - 1470t_{st} - 2281g_{tb} - 4685s_{vb} - 242L_b + 2948577W_p + 770 \quad (11)$$

4.2. İstatistiksel Çalışma Katsayılarının Elde Edilmesi (Obtaining the Coefficients of the Statistical Study)

Dört farklı istatistiksel çalışma katsayı kullanılarak elde edilen formüllerin hata oranları tespit edilmiştir.

Korelasyon katsayısı (r); r değeri, -1 ile 1 arasında değişkenlik göstermektedir. Korelasyon oranına göre regresyon doğrusunun ne derece iyi tahmin edilmiş olduğu anlaşılabilir. r değeri bire yaklaştıkça referans sonuçları ile elde edilen denklem sonuçları arasındaki uyum

artmaktadır. İstatistiksel çalışma için korelasyon katsayısı r , Eş. 12’ye göre hesaplanmıştır [21].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{r,i} - \bar{X}_r)(X_{s,i} - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{r,i} - \bar{X}_r)^2 \sum_{i=1}^n (X_{s,i} - \bar{X}_s)^2}}, [-1, 1] \quad (12)$$

X_r , ANSYS sayısal analiz programından elde edilen değerleri, X_s , Denklemden elde edilen değerleri, \bar{X} ise ANSYS ve denklem değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir. Korelasyon katsayısı (r) mükemmel pozitif doğrusal ilişki olduğunda $r = 1$, mükemmel negatif doğrusal ilişki olduğunda ise $r = -1$ olmaktadır. Doğrusal ilişki yok ise $r = 0$ olur.

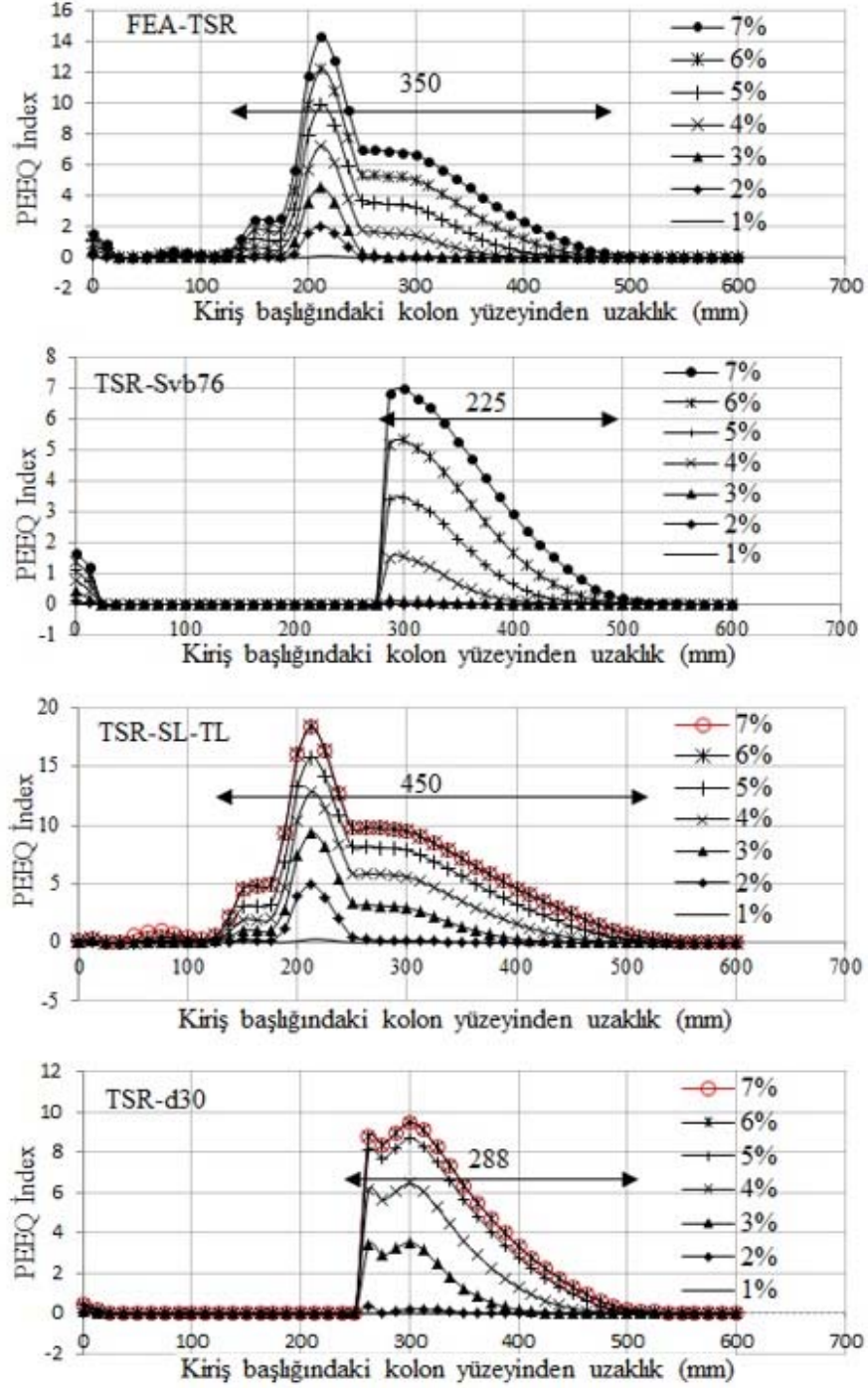
Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı (NSE); NSE , $-\infty$ ile 1 arasında değişmektedir. $NSE=1$ olması, elde edilen denklemin referans çalışmaya olan uyumunun kusursuz olduğu anlamına gelmektedir. NSE değerinin 0 ile 1 arasında değer alması elde edilen denklem performansının kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu anlamına gelmektedir. NSE değerinin 0’den küçük olması, elde edilen denklem performansının yetersiz olduğunu göstermektedir. İstatistiksel çalışma için NSE katsayısı, Eş. 13’e göre hesaplanmıştır [21].

$$NSCE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{r,i} - X_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{r,i} - \bar{X}_r)^2}, [-\infty, 1] \quad (13)$$

Centred Root-Mean-Square Error (CRMSE); $CRMSE$, 0 ile ∞ arasında değişmektedir. $CRMSE$ değeri 0’a yaklaştıkça, elde edilen denklem performansının başarılı olduğu anlaşılabilir. $CRMSE$ değerinin 100’den küçük olması, denklem performansının kabul edilebilir olduğu anlamına gelmektedir. İstatistiksel çalışma için $CRMSE$ katsayısı, Eş. 14’e göre hesaplanmıştır [22].

$$CRMSE = \frac{1}{\bar{X}_r} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [X_{r,i} - X_{s,i} - (\bar{X}_r - \bar{X}_s)]^2}{n}} \times 100\%, [0, \infty] \quad (14)$$

Mean Relative Error (MRE); MRE , $-\infty$ ile ∞ arasında değişmektedir. MRE değeri 0’a yaklaştıkça, denklem performansının başarılı artmaktadır. İstatistiksel çalışma için MRE katsayısı, Eş. 15’e göre hesaplanmıştır [22].



Şekil 10. Farklı toplam dönme açısında kiriş uzunluğu boyunca PEEQ indeks değerleri
(PEEQ index values along the beam length at different total angle of rotation)

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{s,i} - X_{r,i})}{\sum_{i=1}^n X_{r,i}}, [-\infty, \infty] \quad (15)$$

Yukarıda verilen istatistik katsayıları kullanılarak simülasyon sonuçları ile üretilen denklemler arasındaki uyum incelenmiştir. Elde edilen istatistik katsayıları Tablo 8'de sunulmuştur.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

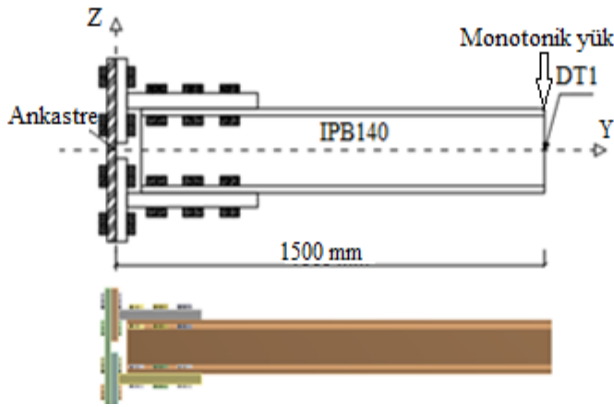
AISC	: American Institute of Steel Construction
b_f	: En-kesit başlık genişliği
CRMSE	: Centred Root-Mean-Square Error
ÇTM	: Çift Te Moment birleşimi
d	: Açılan dairesel boşluğun yarıçapı

Tablo 7. M_p , Φ_p , $K_{elastik}$ ve $K_{plastik}$ denklemlerinin elde edilmesi için DATAFIT programına girilen veriler
(Data entered into DATAFIT program to obtain M_p , Φ_p , $K_{elastik}$ and $K_{plastik}$ equations)

Numune	t_{st} (m)	t_{ft} (m)	g_{tb} (m)	S_{vb} (m)	L (m)	W_p (m ³)	ANSYS M_p (kN.m)	ANSYS Φ_p (rad)	ANSYS $K_{elastik}$ (kN.m/rad)	ANSYS $K_{plastik}$ (kN.m/rad)
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y	Y	Y	Y
TSR- $t_{st}25$	0,025	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0002	84,29	0,0117	7175	487,9
TSR- $t_{st}20$	0,020	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0002	83,26	0,01212	6869	500,8
TSR- $t_{st}15$	0,015	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0002	77,16	0,01191	6475	588,8
TSR- $t_{st}10$	0,010	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0002	55,31	0,00964	5736	557,8
TSR- $t_{st}30$	0,030	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0002	85,03	0,01151	7383	482,6
TSR- $t_{ft}40$	0,025	0,040	0,07	0,066	1,5	0,0002	86,42	0,01156	7474	462
TSR- $t_{ft}30$	0,025	0,030	0,07	0,066	1,5	0,0002	85,19	0,01162	7331	483,9
TSR- $t_{ft}25$	0,025	0,025	0,07	0,066	1,5	0,0002	84,78	0,01165	7275	485,9
TSR- $t_{ft}15$	0,025	0,015	0,07	0,066	1,5	0,0002	83,02	0,01190	6973	487,6
TSR- $t_{ft}10$	0,025	0,010	0,07	0,066	1,5	0,0002	77,90	0,01186	6561	537,5
TSR- $g_{tb}60$	0,025	0,02	0,060	0,066	1,5	0,0002	85,19	0,01181	7213	457
TSR- $g_{tb}65$	0,025	0,02	0,065	0,066	1,5	0,0002	84,35	0,01170	7210	483,1
TSR- $g_{tb}80$	0,025	0,02	0,080	0,066	1,5	0,0002	84,09	0,01186	7087	484,4
TSR- $g_{tb}85$	0,025	0,02	0,085	0,066	1,5	0,0002	83,85	0,01189	7047	486,1
TSR- $g_{tb}90$	0,025	0,02	0,090	0,066	1,5	0,0002	83,85	0,01200	6983	473,2
TSR- $s_{vb}60$	0,025	0,02	0,07	0,06	1,5	0,0002	83,61	0,01176	7111	486,4
TSR- $s_{vb}70$	0,025	0,02	0,07	0,07	1,5	0,0002	85,15	0,01177	7232	464,9
TSR- $s_{vb}76$	0,025	0,02	0,07	0,076	1,5	0,0002	86,66	0,01179	7348	447,3
TSR- $s_{vb}80$	0,025	0,02	0,07	0,080	1,5	0,0002	87,26	0,01176	7421	451,2
TSR- $s_{vb}85$	0,025	0,02	0,07	0,085	1,5	0,0002	86,96	0,01159	7500	503,7
TSR-L1000	0,025	0,02	0,07	0,066	1,00	0,0002	92,23	0,00952	9646	685,3
TSR-L1250	0,025	0,02	0,07	0,066	1,25	0,0002	86,13	0,00979	8794	624,5
TSR-L1750	0,025	0,02	0,07	0,066	1,75	0,0002	80,83	0,01319	6126	513,1
TSR-L2000	0,025	0,02	0,07	0,066	2,00	0,0002	80,71	0,01520	5307	394,6
TSR-L2250	0,025	0,02	0,07	0,066	2,25	0,0002	78,79	0,01684	4677	398,1
HE160B	0,025	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0004	113,34	0,01037	10927	1026
HE180B	0,025	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0005	128,20	0,00832	15399	2213
HE200B	0,025	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0006	152,63	0,00740	20619	1577
HE220B	0,025	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0008	159,05	0,00618	25602	2790
HE240B	0,025	0,02	0,07	0,066	1,5	0,0011	177,24	0,00488	36327	2325

Tablo 8. ANSYS sonuçları ile denklem sonuçları arasındaki istatistik katsayıları
(Statistical coefficients between ANSYS results and equation results)

Denklem	r	NSCE	MRE	CRMSE%
M_p	0,975	0,95	$-1,5 \times 10^{-15}$	6
Φ_p	0,987	0,97	$-1,7 \times 10^{-4}$	3
$K_{elastik}$	0,998	0,99	$1,2 \times 10^{-15}$	4
$K_{plastik}$	0,922	0,85	$-1,8 \times 10^{-14}$	32

**Şekil 11.** İstatistiksel çalışmada kullanılan ÇTM birleşim örneği

(DST connection sample used in statistical study)

- d_1 : Yer değiştirme ölçerler arası mesafe
- d_c : Kolon en-kesit yüksekliği
- E : Elastisite modülü
- FEA : Finite Element Analysis
- FEMA : Federal Emergency Management Agency
- F_u : Yapısal çelik kopma gerilmesi
- f_y : Yapısal çelik akma gerilmesi
- g_{tb} : T-başlığındaki çekme bulonların arasındaki dikey mesafe
- $K_{elastik}$: Elastik bölgedeki rijitlik
- $K_{plastik}$: Plastik bölgedeki rijitlik
- K1 : Birleşimin elastik rijitliği
- K2 : Birleşimin plastik rijitliği
- L_b : Kiriş uzunluğu
- M_c : Kolon merkez aksında oluşan moment
- M_f : Kolon yüzündeki moment
- M_{pr} : Plastik mafsalda oluşan moment
- M_p : Birleşim plastikleşme momenti

MRE	: Mean Relative Error
NSCE	: Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı
PEEQ İndex	: Eşdeğer plastik gerinim
R^2	: Regresyon uyum katsayısı
r	: Korelasyon katsayısı
RL	: Rijitlik levha
s_{vb}	: Kesme bulonları arasındaki mesafe
SL	: Süreklilik levha
t_f	: En-kesit başlık kalınlığı
t_{ft}	: T-parçanın başlık kalınlığı
TL	: Takviye Levhası
t_{st}	: T-parçanın gövde kalınlığı
t_w	: En-kesit gövde kalınlığı
V_p	: Plastik mafsals kesme kuvveti
x	: Plastik mafsalsın kolon yüzüne uzaklık
ϵ_{ij}	: i ve j yönlerinde plastik gerinim
ϵ_y	: Akma gerinim
ϕ_p	: Plastik toplam dönme
$\phi_{toplaml}$: Toplam dönme
ϕ_{kolon}	: Kolonun dönmesi
$\phi_{kiriştoplaml}$: Kirişin toplam dönmesi
δ_{dt}	: Yer değiştirme
δ_{dtz}	: Z yönünde yer değiştirme
δ_{dty}	: Y yönünde yer değiştirme

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri sonucunda aşağıdaki hususlar tespit edilmiştir.

- T-parça başlık (t_{ft})ve gövde kalınlığının (t_{st}) değişimi ile birleşim elastik rijitliği (KI) sırasıyla %2,98, %3,5 artış, birleşim plastikleşme başlangıç momentini (M_p) sırasıyla %2,44, %2,06 artış ve birleşim plastik rijitliği ($K2$) sırasıyla %1,7, %0,8 artış göstermiştir.
- Kesme ve çekme cıvataları arasındaki mesafenin birleşim davranışı üzerine ciddi bir etkisi gözlemlenmiştir. Kesme bulonların arasındaki mesafe (s_{vb}) arttıkça KI %2,08 artış, M_p %0,99 artış ve $K2$ %2,64 artış göstermiştir. Çekme bulonların arasındaki dikey mesafe (g_{tb})arttıkça KI %1,24 artış, M_p %0,91 artış ve $K2$ %0,72 azalma göstermiştir.
- Süreklilik levhası ve takviye levhası kullanımı ile birleşim elastik rijitliği (KI) %8 artış, birleşim plastikleşme başlangıç momentini (M_p) %12,3 artış ve birleşim plastik rijitliği ($K2$) %2,4 azalma göstermiştir.
- Rijitlik levhası kullanımının birleşim davranışı üzerine ciddi bir etkisi gözlemlenmemiştir. Kirişin plastik mafsals bölgesinde rijitlik levhası (RL) kullanımı ile KI %0,3 artış, M_p %0,38 artış ve $K2$ %0,11 artış göstermiştir.
- Korunmuş bölge olarak isimlendirilmiş bölgede oluşturulan deliklerin birleşimin başlangıç rijitliği ve moment kapasitesini beklediği ölçüde etkilemediği (KI %1,35 artış, M_p %2,7 artış) gözlemlenmiştir. Ancak plastik bölge rijitliğinde ciddi miktarda azalma ($K2$ %41 azalma) görülmüştür.
- Birleşim geometrisine bağlı olarak plastik mafsalsın konumu, uzunluğu ve maksimum plastikleşme oranı değişiklik göstermektedir. Kesme cıvataları arasındaki

mesafe artırılarak ve kırışte delik açılarak plastik mafsals noktası kolondan uzaklaştırılabilmektedir.

- Denklemlerin istatistik katsayıları (R^2) ve (NSE)'nin 1'e çok yakın olduğu, ($CRMSE$)'nin 0'a çok yakın olduğu ve (MRE)'nin 0'a yakın olduğu ispat edilmiş ve elde edilen denklemlerin referans çalışmaya olan uyumunun kusursuz olduğu gözlemlenmiştir. Taşıyıcı sistem modellemede kolon-kiriş birleşim rijitliğinin bilinmesi ve rijitlik değerinin sayısal modele doğru girilmesi ekonomik tasarım yapılabilmesi için gereklidir. Birleşim rijitliği azaldıkça bina rijitliği azalır. Bina rijitliği azaldıkça yapı periyodu artar ve binaya etki eden deprem yükü azalır. Diğer taraftan, kuvvetli kolon-zayıf kırış felsefesine göre tasarım yaparken birleşimin plastik davranışa başlayacağı açı (ϕ_p) ve moment değerinin (M_p) bilinmesi de önem arz etmektedir. Bu sebeplerle yukarıda elde edilen ve mühendislerin istifadesine sunulan denklemlerin, ÇTM birleşimli çelik taşıyıcı sistem tasarımında mühendislere önemli bir katkı sunacağı kanaatindeyiz.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

1. Uzgider, E., Piroğlu, F., Deren, H., Çağlayan, Ö., Çelik Yapılar, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 2002.
2. Doğru S., Akbaş B., Seismic energy demands of steel special moment frames, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3), 1111-1128, 2020.
3. FEMA 350. Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings, Washington (DC), 2000.
4. AISC, A. (2016). AISC 358-16. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, 2016.
5. Herrera, R. A., Bravo, M., Gomez, G., Aedo, G., Performance of Built-up T-stubs For Double T Moment Connections, Journal of Constructional Steel Research, 88, 289–295, 2013.
6. Francavilla, A. B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Simplified Finite Element Analysis of Bolted T-stub Connection Components, Engineering Structures, 100, 656–664, 2015.
7. Latour, M., Piluso, V., & Rizzano, G., Free from damage beam-to-column joints: Testing and design of DST connections with friction pads. Engineering Structures, 85, 219-233, 2015.
8. Saberi, H., Kheyroddin, A., Gerami, M., Welded Haunches for Seismic Retrofitting of Bolted T-stub Connections and Flexural Strengthening of Simple Connections, Engineering Structures, 129,31-43, 2016.
9. Liu, M., Zhu, X., Wang, P., Tuoya, W., Hub, Sh., Tension Strength and Design Method for Thread-Fixed One-Side Bolted T-stub, Engineering Structures, 150, 918–933, 2017.
10. Liang, G., Guoa, H., Liua,Y., Lia, Y., Q690 High Strength Steel T-stub Tensile Behavior: Experimental and Numerical Analysis, Thin-Walled Structures, 122, 554–571, 2018.

11. Kong, Z., Kim, S. E., Numerical Estimation for Initial Stiffness and Ultimate Moment Of T-stub Connections, *Journal of Constructional Steel Research* 141, 118–131, 2018.
12. Wulan, T., Wang, P., Li, Y., You, Y., Tang, F., Numerical Investigation on Strength and Failure Modes of Thread-Fixed One side Bolted T-stubs Under Tension, *Engineering Structures*, 169, 15–36, 2018.
13. Sun, F. F., Xue, X. Y., Xiaob, Y., Le, Y., Li, G. Q., Effect of Welding and Complex Loads on The High-Strength Steel T-stub Connection, *Journal of Constructional Steel Research*, 150, 76–86, 2018.
14. Lemos, A., da Silva, L. S., Latour, M., & Rizzano, G., Numerical modelling of innovative DST steel joint under cyclic loading. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, 687-701, 2018.
15. Yuan, H.X., Hu, S., Du, X.X., Yang, L, Cheng, X.Y., Theofanous, M., Experimental Behaviour Of Stainless Steel Bolted T-stub Connections Under Monotonic Loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 152, 213-224, 2019.
16. Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, (TBDY-2018), Ankara, 2018.
17. ANSYS Workbench Release 19.2, ANSYS Inc, Canonsburg, Pennsylvania, 2018.
18. ANSYS Mechanical. Release 18.2- © ANSYS, Inc. https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html. Erişim tarihi Nisan 14, 2021.
19. Chen, C. C., Chen, S. W., Chung, M. D., & Lin, M. C., Cyclic behaviour of unreinforced and rib-reinforced moment connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 61 (1), 1-21, 2005.
20. DATAFIT version 9.1.32., DATAFIT Systems Inc, Oakdale Engineering, 1995-2014.
21. Yaykiran, S., Sakarya Havzası'nın Yüksek Çözünürlüklü Hidrolojik Modelinin Yapılandırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
22. Dis, M. O., Anagnostou, E., Mei, Y., Using high-resolution satellite precipitation for flood frequency analysis: case study over the Connecticut River Basin, *Journal of Flood Risk Management* 11, S514-S526, 2018.