

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOMENT AKTARAN ALIN LEVHALI BİRLEŞİMLERİN ÇEVİRİMSSEL
YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

Alırıza İlker AKGÖNEN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOMENT AKTARAN ALIN LEVHALI BİRLEŞİMLERİN ÇEVİRİMSSEL
YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

**Alırıza İlker AKGÖNEN
(501052001)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cavidan Yorgun

HAZİRAN 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **501052001** numaralı Doktora Öğrencisi **Alırıza İlker Akgönen** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**MOMENT AKTARAN ALIN LEVHALI BİRLEŞİMLERİN ÇEVİRİSEL YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Cavidan Yorgun**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nesrin Yardımcı**
Yeditepe Üniversitesi

Prof. Dr. Gülay Altay
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Zafer Öztürk
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Cüneyt Vatansever
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **1 Haziran 2015**

Sevgili anneme, babama, kardeşlerime, eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, Yapı Programında gerçekleştirilen bu doktora çalışmasında çelik yapılarda kullanılan dört bulonlu uzatılmış alın levhalı moment birleşimi monotonik ve çevrimsel yükleme altında incelenmiştir. Avrupa profilleri (IPE, HEB) kullanılarak hazırlanan numuneler DBYBHY-2007 yönetmeliği tarafından tavsiye edilen parametrik kriterlere uymakla birlikte AISC 358-10 yönetmeliği tarafından tavsiye edilen parametrik sınırlara uymamaktadır. S275 çelik kalitesi ve Avrupa profiller ile imal edilen bu numunelerin deprem yükleri altındaki performansını incelemek amacıyla 2 adet monotonik yükleme altında ve 3 adet çevrimsel yükleme altında deneysel çalışma ve bu numunelere ait sayısal analiz çalışmaları yapılmıştır. Numunelerin karakteristik özelliklerini gösteren moment-dönme eğrileri ve numunelerin göçme durumları detaylı olarak incelenmiştir. Numuneler için oluşturulan sayısal analiz modelleri ile deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılarak numunelerin afet yönetmeliği kriterlerine uygunluğu incelenmiştir.

Bu tez çalışması süresince tecrübe ve bilgilerinden istifade ettiğim, danışman hocam sayın Prof. Dr. Cavidan YORGUN başta olmak üzere, hocalarım sayın Prof. Dr. Nesrin YARDIMCI, sayın Prof. Dr. Gülay ALTAY ve sayın Yrd. Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER'e tez çalışmamı hazırladığım süre boyunca gösterdikleri sabır ve anlayış için şükranlarımı sunarım.

Tezimi hazırlamam sırasında her zaman yanımda olup sabır ve desteklerini en zor vakitlerde dahi esirgemeyen, görev ve önceliklerimi dengelememde yol göstericim olan ve bana güç veren eşim Zeynep AKGÖNEN başta olmak üzere, deneysel çalışma hazırlıklarım sırasında yaklaşık 4 ay ayrı kalmak zorunda kaldığım kızım Beren AKGÖNEN'e ve oğlum Kemal Cihan AKGÖNEN'e şükranlarımı sunarım.

İTÜ Yapı ve Deprem Laboratuvarında günde 18 saat çalışarak yaklaşık 3.5 ay sürede tamamladığım deneysel çalışmalar sırasında, dostluğunu ve yardımını benden esirgemeyen Dr. Barış Güneş başta olmak üzere laboratuvarında görev alan İnş. Yük. Müh. Hakan Saruhan, teknisyenler Mahmut Şamlı, Ahmet Şahin ve Naci Yıldız'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bütün yaşamım boyunca benden her türlü maddi ve manevi desteği esirgemeyen, doktora çalışmamı tamamlamam konusunda beni sürekli motive eden ve cesaretlendiren aileme, annem Nadire AKGÖNEN, babam M. Kemal AKGÖNEN, kardeşlerim Serhan AKGÖNEN ve Günhan AKGÖNEN'e sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

6 Nisan 2015

Alırza İlker Akgönen
(İnşaat Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
SEMBOLLER	xxiii
ÖZET.....	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 DBYBHY-2007 ve Amerikan Normlarına Göre Alın Levhalı Moment Birleşimlerinin İncelenmesi.....	5
1.2 Moment Birleşimlerinin Dönme Gereksinimlerine Göre Sınıflandırılması.....	6
1.3 Moment Birleşimlerinin Rijitlik ve Mukavemetine Göre Sınıflandırılması	8
1.4 Alın Levhalı Birleşimlerin Çevrimsel Yük Altındaki Davranışı	9
1.5 Araştırmada Kullanılan Kaynaklar.....	12
1.6 Araştırmanın Amaç ve Kapsamı	13
1.7 Yöntem ve Araştırma Yaklaşımı.....	14
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	15
2.1 Thomas M. Murray (1988).....	15
2.2 A. R. Kukreti and P. Biswas (1997).....	15
2.3 N. Nematia, D. Le Houedecb, R. Zandonini (2000)	15
2.4 L. Simões da Silva, Ana Giraõ Coelho (2001)	16
2.5 Cavidan Yorgun (2001).....	16
2.6 R. Zandonini and O.S. Bursi, (2002).....	17
2.7 Ana M. Girão Coelho, Frans S. K. Bijlaard, Luís Simões da Silva (2004).....	18
2.8 Maggi, R.M. Gonçalves, R.T. Leon, L.F.L. Ribeiro (2005)	18
2.9 P. Nogueiro, L. Simões da Silva, R. Bento and R. Simões (2006)	19
2.10 Anant R. Kukreti, Feng-Feng Zhou (2006).....	19
2.11 Ana M. Girão Coelho, Frans S.K. Bijlaard -(2007)	20
2.12 Yongjiu Shi, Gang Shi, Yuanqing Wang-(2007)	20
2.13 Cheol Min Yang, Young Moon Kim (2007).....	20
2.14 Gang Shi, Yongjiu Shi, Yuanqing Wang (2007)	21
2.15 Lutz Nasdalaa, Birger Hohn, Reinhard Rühl (2007)	21
2.16 M.R. Mohamadi-shooreh, M. Mofid (2008)	21
2.17 Gang Shia, Yongjiu Shia, Yuanqing Wang, Mark A. Bradford (2008).....	22
2.18 Aleksander Kozłowski, Ryszard Kowalczyk and Marian Gizejowski (2008)22	
2.19 Minas E. Lemonis, Charis J. Gantes (2009).....	22
2.20 A.A. Del Savio, D.A. Nethercot ve diğerleri (2009).....	23
2.21 Hooman Farrokhi, F. Danesh, Sassan Eshghi (2009)	23
2.22 D.T. Pachoumis, E.G. Galoussis, C.N. Kalfas, A.D. Christitsas (2009).....	23
2.23 Concepción Díaz ve diğerleri (2011)	24

2.24 H. Augusto, C. Rebelo & L. Simões da Silva (2012).....	24
2.25 Abdelrahim Khalil Dessouki ve diğerleri (2013)	24
3. ALIN LEVHALI MOMENT BİRLEŞİMLERİNİN TASARIMI	25
3.1 Birleşim Tasarım Momenti Hesabı	25
3.1.1 Plastik mafsalda oluşan moment	25
3.1.2 Kritik kesitte oluşan moment	25
3.2 Alın levhası ve Kolon Başlık Mukavemetinin Hesabı	27
3.2.1 Akma çizgisi teorisi.....	27
3.2.2 Birim sanal dönmeye göre iç iş	28
3.2.3 Birim sanal dönmeye göre dış iş	28
3.3 Dört Bulonlu Rijitlik Levhasız Alın levhalı Birleşim Dayanımı Hesabı	29
3.4 Dört Bulonlu Rijitlik Levhasız Alın Levhalı Birleşim Kolon Başlık Dayanımı Hesabı	29
3.5 Kennedy Metodu	30
3.6 Basitleştirilmiş Metot	31
3.7 Bulon Kuvvetlerinin Hesabı	32
4. S275JR ÇELİK KALİTESİNİN İNCELENMESİ	35
4.1 Numunelerin Çekme Testleri	36
4.2 Kullanılan Şartname ve Deney Yöntemi	38
4.3 Çekme Kupon Testleri	38
4.4 Çekme Testleri Sonuçları	39
4.5 Kapasite Tasarımında Kullanılmak üzere S275JR Kalite Çelik Yapı Elemanları için DBYBHY-2007’de verilen Da Arttırma Katsayısının İncelenmesi	40
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	43
5.1 Referans Alınan Deneysel Çalışmanın Detayları	43
5.2 Birleşimlerin Geometrik Detayları	44
5.3 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	46
5.3.1 Katı elemanların oluşturulması	47
5.3.2 Temas elemanlarının oluşturulması	48
5.3.2.1 Temas elemanlarının seçilmesi	49
5.3.2.2 Temas analizi için kullanılan doğrusal olmayan yöntemler	49
5.4 Malzeme Modeli.....	52
5.4.1 Monotonik yüklemeli çalışmalar için malzeme modeli	52
5.4.2 Çevrimsel yüklemeli çalışmalar için malzeme modeli	52
5.5 Analiz Metodu	53
5.5.1 Bulon öngerme yükünün uygulanması.....	53
5.5.2 Monotonik yüklemde yer değiştirme yükü uygulaması	55
5.5.3 Çevrimsel yüklemde yer değiştirme yükü uygulaması	55
5.6 Sınır Koşulları	56
5.7 Moment-Dönme Grafiğinin Elde Edilmesi	56
5.8 Sonuçların İrdelenmesi	58
5.9 Sayısal analiz Çalışmalarının Değerlendirilmesi.....	62
6. DENEYSEL ÇALIŞMA ÖN HAZIRLIK	65
6.1 Deneysel Çalışmanın İçeriği ve Amacı	65
6.2 Numune Seçiminde Yapılan Kabuller	65
6.3 Numunelerin Tasarımı	66
6.4 Laboratuvar Teknik Özellikleri	68
6.5 Numunelerin İmalatı.....	68
6.6 Numunelerin Laboratuvarda Deneye Hazır Hale Getirilmesi	69
6.7 Düzlem Dışı Hareketin Önlenmesi.....	70

6.8 Numune Bağlantı Düzenegi	71
6.9 Veri Okuma ve Kayıt Sistemi	72
6.10 Veri Okuma ve Kayıt Sistemi	75
6.11 Şekil Değiştirme Ölçerlerin Numuneye Yapıştırılması	76
6.12 Yerdeğiştirme Yükünün Uygulanması ve Verilerin Kaydedilmesi	76
7. DENEYSEL ÇALIŞMA VE GÖZLEMLER	81
7.1 Yükleme Protokolü	81
7.1.1 Monotonik yükleme	81
7.1.2 Çevrimsel yükleme	81
7.1.3 Çevrimsel yükleme protokolünün seçimi	82
7.1.3.1 ATC-24 protokolü	82
7.1.3.2 SAC protokolü	82
7.2 Monotonik Yükleme Altında Yapılan Testler	86
7.2.1 P0 pilot numune testi	86
7.2.1.1 P0 deneyi sırasında yapılan gözlemler	88
7.2.1.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması	89
7.2.1.3 P0 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması	92
7.2.2 P1 numune testi	95
7.2.2.1 P1 deneyi sırasında yapılan gözlemler	95
7.2.2.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması	95
7.2.2.3 P1 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması	99
7.3 Çevrimsel Yükleme Altında Yapılan Testler	101
7.3.1 P2 numune testi	101
7.3.1.1 P2 deneyi sırasında yapılan gözlemler	101
7.3.1.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması	102
7.3.1.3 P2 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması	106
7.3.2 P3 numune testi	108
7.3.2.1 P3 deneyi sırasında yapılan gözlemler	109
7.3.2.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması	109
7.3.2.3 P3 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması	113
7.3.3 P4 numune testi	115
7.3.3.1 P4 deneyi sırasında yapılan gözlemler	116
7.3.3.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması	116
7.3.3.3 P4 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması	120
8. DEĞERLENDİRME VE KIYASLAMA	123
8.1 Monotonik Yükleme Altında Yapılan Testlerin Kıyaslaması	123
8.2 Çevrimsel Yükleme Altında Yapılan Testlerin Kıyaslaması	124
9. SONUÇLAR	128
9.1 Çalışma Sonrası Elde Edilen Başlıca Sonuçlar	128
9.2 İmalat İçin Başlıca Tavsiyeler	129
9.3 Çalışmanın DBYBHY-2007 için katkısı ve sonraki çalışmalar için tavsiyeler	130
KAYNAKLAR	131
EKLER	137
ÖZGEÇMİŞ	203

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AISC	: American Institute of Steel Construction
CISC	: Canadian Institute of Steel Construction
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EN	: Euro Norm
FEA	: Finite Element Analysis
FEM	: Finite Element Model
FEMA	: Federal Emergency Managment Agency
IMF	: Intermediate Moment Frame
OMF	: Ordinary Moment Frame
SAC	: Structural Engineers Association of California
SMF	: Special Moment Frame
PR	: Partially Restrained
TEC	: Turkish Earthquake Code
UBC	: Uniform Building Code

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : DBYBHY-2007 Malzeme özellikleri tablosu	36
Çizelge 4.2 : AISC 341-10 Malzeme ek dayanım özellikleri tablosu	37
Çizelge 4.3 : Çekme testi malzeme özellikleri tablosu.....	39
Çizelge 4.4 : S275JR Profil malzeme özellikleri tablosu	41
Çizelge 4.5 : S275JR Levha malzeme özellikleri tablosu	41
Çizelge 4.6 : S355JR Levha malzeme özellikleri tablosu	41
Çizelge 5.1 : Numune tip ve detayları (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006)	44
Çizelge 5.2 : Kolon ve kiriş boyutları (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006)	44
Çizelge 5.3: Kolon ve kiriş boyutları (H. Augusto ve diğerleri, 2012)	45
Çizelge 5.4 : Deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışması birleşim kapasitesi.....	61
Çizelge 5.5 : Deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışması başlangıç rijitliği	61
Çizelge 5.6 : Akma durumunda birleşimde meydana gelen dönme	62
Çizelge 6.1 : Numune özelliklerinin tablo olarak gösterimi.....	67
Çizelge 6.2 : Şartnamelerde verilen parametrik sınırlamalar	67
Çizelge 6.3 : Yerdeğiştirme ölçerlerin hassasiyet tablosu	74
Çizelge 7.1 : SAC yükleme protokolünün tablo olarak gösterimi.....	83
Çizelge 7.2 : P3 numunesi için piston yükleme adımı.....	85
Çizelge 8.1 : Birleşim özelliklerinin tablo olarak gösterimi.....	125
Çizelge 8.2 : Tespit edilen kiriş kapasitesinin nominal kapasiteye oranı	127

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Northridge depremi öncesinde kullanılan kaynaklı birleşim (FEMA350).	1
Şekil 1.3 : Uzatılmış Alın levhalı moment birleşimleri (AISC 358-10).....	2
Şekil 1.4 : Dört bulonlu alın levhalı moment birleşimi detayı (CISC,2008).....	3
Şekil 1.5 : Dört bulonlu alın levhalı moment birleşimi (DBYBHY, 2007).....	4
Şekil 1.6 : Sekiz bulonlu takviyeli alın levhalı birleşim (DBYBHY, 2007).	4
Şekil 1.7 : Katlar arası sürüklenme açısı (FEMA-350).	7
Şekil 1.8 : Plastik mafsalların gösterimi (FEMA-350).....	8
Şekil 1.9 : Birleşimlerin sınıflandırılması (FEMA-350).	8
Şekil 1.10 : Akma mekanizması oluşabilecek bölgeler.	9
Şekil 1.11 : Gevrek kırılma meydana gelebilecek bölgeler.	10
Şekil 1.12 : Bulon kırılması M-φ grafiği (FEMA-355D).	11
Şekil 1.13 : Alın levhasında akma oluşması M-φ grafiği (FEMA-355D).	11
Şekil 1.14 : Kirişte akma oluşması M-φ grafiği (FEMA-355D).	12
Şekil 3.1 : Plastik mafsallın yeri (AISC Design Guide-4, 2003).....	26
Şekil 3.2 : Birleşim momentinin hesaplanması (AISC Design Guide-4, 2003).	27
Şekil 3.3 : Kennedy modelinde levha davranışı (AISC Design Guide-4, 2003).	31
Şekil 3.4 : Sekiz bulonlu alın levhalı moment birleşiminde kalın levha için bulon kuvvetleri tasarım modeli (AISC Design Guide-4, 2003).....	33
Şekil 4.1 : Kapasite tasarımı anlatımı için zincir benzeşimi.....	35
Şekil 4.2 : Kupon eleman geometrisi.....	39
Şekil 5.1 : Test J1.1,2,3 Numune detayı (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).....	45
Şekil 5.2 : Test J3.1,2,3 Numune detayı (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).....	46
Şekil 5.3 : Test J1.1,2,3 Deney düzeneği (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).	46
Şekil 5.4 : (SOLID187) Geometri (ANSYS Element Reference, 2009).	47
Şekil 5.5 : (SOLID187) gerilmeler ve yönleri (ANSYS Element Reference, 2009).	47
Şekil 5.6 : (SOLID187) Ağ modeli.	48
Şekil 5.7 : Yay olmaması durumunda parçaların girişimi (ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities, 2010).	48
Şekil 5.8 : (ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities, 2010).	49
Şekil 5.9 : (TARGE170) elemanı (ANSYS Element Reference, 2009).	51
Şekil 5.10 : (CONTA 174) elemanı (ANSYS Element Reference, 2009).....	51
Şekil 5.11 : Sayısal analiz çalışmasından (CONTA174) eleman.	51
Şekil 5.12 : Bi-linear Malzeme modeli.....	52
Şekil 5.13 : PRETS179 elemanı geometrik şeması (ANSYS Element Reference)... ..	54
Şekil 5.14 : Bulonlara uygulanan ön-germe kuvvetinin gösterimi.	54
Şekil 5.15 : Bulonlara ön-germe uygulandıktan sonra meydana gelen gerilmeler... ..	55
Şekil 5.16 : Yer değiştirme adımlarının grafik olarak gösterimi.	56
Şekil 5.17 : Yer değiştirme ölçerlerin gösterimi (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006). ...	58
Şekil 5.18 : Sayısal analiz çalışmasında Von-Mises gerilmelerinin gösterimi.....	59
Şekil 5.19 : Bulonlarda meydana gelen Von-Mises gerilmelerinin gösterimi.	59
Şekil 5.20 : Kolon yüzünde meydana gelen kayma gerilmelerinin gösterimi.	60

Şekil 5.21 : TestJ1.1 Moment-Dönme grafiği (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).	60
Şekil 5.22 : TestJ1.1 için sayısal analiz ile deneysel çalışma grafikleri.	60
Şekil 5.23 : TestJ3.1 için Moment-Dönme Grafiği (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).61	
Şekil 5.24 : TestJ3.1 için sayısal analiz ile deneysel çalışma grafikleri.	61
Şekil 5.25 : TestJ3.1 için sayısal analiz ile deneysel çalışma grafikleri.	62
Şekil 6.1 : İç ve Dış aks kolon-kiriş birleşimleri (Krawinkler ve diğ., 1971).....	66
Şekil 6.2 : Numunelerdeki ölçülerin gösterimi.	67
Şekil 6.3 : Numunenin sabitlendiği düzene.	70
Şekil 6.4 : Deney düzeneği 3D görünüş.	70
Şekil 6.5 : Deney düzeneğinin numune ile birlikte 3D görünüşü.	71
Şekil 6.6 : Mesnet bölgesinin görünüşü.	72
Şekil 6.7 : Mesnet bölgesinin görünüşü.	73
Şekil 6.8 : Veri okuma sistemi görünüşü.	73
Şekil 6.9 : Şekil değiştirme ölçerlerden bir kısmının görüntüsü.	75
Şekil 6.10 : Switch-box kutusu ve deney düzeneği.	77
Şekil 6.11 : Yerdeğiştirme ölçer ve gerilme ölçer yerleşim planı.	77
Şekil 6.12 : Deney düzeneğinin görüntüsü ve yerdeğiştirme ölçer planı.	78
Şekil 6.13 : Deney düzeneğinin strengçe planı (Yan görünüş).	78
Şekil 6.14 : Deney düzeneğinin strengçe planı (Cephe görünüş).	79
Şekil 7.1 : ATC-24,1992 protokolü.	82
Şekil 7.2 : SAC,1997 protokolü.	83
Şekil 7.3 : P0 pilot numunune deney öncesi görünüş.	87
Şekil 7.4 : P0 pilot numunune teçhizatların gösterimi.	87
Şekil 7.5 : Deneysel çalışma sonrası pilot numunenin görünüşü.	88
Şekil 7.6 : Deneysel çalışma sonrası pilot numunenin görünüşü.	88
Şekil 7.7 : Deneysel çalışma sonrası pilot numunenin görünüşü.	89
Şekil 7.8 : P0- Moment- Toplam dönme.	89
Şekil 7.9 : P0- Kolon Moment- Toplam dönme.	90
Şekil 7.10 :P0- Birleşim Moment- Toplam dönme.	90
Şekil 7.11 :P0- (Kolon + Birleşim) Moment- Toplam dönme.....	90
Şekil 7.12 :P0-Kiriş Moment- Toplam dönme.	91
Şekil 7.13 :P0 pilot numune kolon panel bölgesi strengçe okumaları.	91
Şekil 7.14 :P0 pilot numune giriş plastik mafsallı strengçe okumaları.....	91
Şekil 7.15 :P0 pilot numune giriş plastik mafsallı strengçe okumaları.....	92
Şekil 7.16 :P0 pilot numune giriş plastik mafsallı strengçe okumaları.....	92
Şekil 7.17 :P0 - Moment- Toplam dönme.	93
Şekil 7.18 :P0 - Kolon Moment- Toplam dönme.	93
Şekil 7.19 :P0 - Birleşim Moment- Toplam dönme.	93
Şekil 7.20 :P0-Kolon + Birleşim Moment- Toplam dönme.	94
Şekil 7.21 :P0-Kiriş Moment- Toplam dönme.	94
Şekil 7.22 :P1-Moment- Toplam dönme.	96
Şekil 7.23 :P1-Kolon Moment-Toplam dönme.	96
Şekil 7.24 :P1-Birleşim Moment-Toplam dönme.	96
Şekil 7.25 :P1-(Kolon+Birleşim) Moment-Toplam dönme.....	97
Şekil 7.26 :P1-Kiriş Moment- Toplam dönme.	97
Şekil 7.27 :P1 numunesi kolon panel bölgesi strengçe okumaları.	97
Şekil 7.28 :P1 numunesi giriş plastik mafsallı strengçe okumaları.	98
Şekil 7.29 :P1 numunesi giriş plastik mafsallı strengçe okumaları.	98
Şekil 7.30 :P1 numunesi strengçe okumaları.....	98
Şekil 7.31 :P1-Deneysel çalışma ile FEA modelinin birlikte gösterimi.	99

Şekil 7.32 :P1 - Kolon Moment- Toplam dönme	100
Şekil 7.33 :P1 - Birleşim Moment- Toplam dönme	100
Şekil 7.34 :P1-Kolon + Birleşim Moment- Toplam dönme	100
Şekil 7.35 :P1-Kiriş Moment- Toplam dönme	101
Şekil 7.36 :P2-Moment- Toplam dönme.	102
Şekil 7.37 :P2-Kolon Moment- Toplam dönme.	103
Şekil 7.38 :P2-Birleşim Moment- Toplam dönme.	103
Şekil 7.39 :P2-(Kolon+Birleşim) Moment- Toplam dönme.	103
Şekil 7.40 :P2 Kiriş-Moment- Toplam dönme (Inter-story drift angle).	104
Şekil 7.41 :P2 numunesi kolon panel bölgesi strengeç okumaları.	104
Şekil 7.42 :P2 numunesi strengeç okumaları.....	104
Şekil 7.43 :P2 numunesi strengeç okumaları.....	105
Şekil 7.44 :P2 numunesi strengeç okumaları.....	105
Şekil 7.45 :P2 numunesi strengeç okumaları.....	105
Şekil 7.46 :P2-Deneysel çalışma ile FEA modelinin birlikte gösterimi.	106
Şekil 7.47 :P2 - Kolon Moment- Toplam dönme.	107
Şekil 7.48 :P2 - Birleşim Moment- Toplam dönme.	107
Şekil 7.49 :P2 – Kolon+Birleşim Moment- Toplam dönme.	107
Şekil 7.50 :P2 - Kiriş Moment- Toplam dönme.	108
Şekil 7.51 :P3-Moment- Toplam dönme.	109
Şekil 7.52 :P3-Kolon Moment- Toplam dönme.	110
Şekil 7.53 :P3-Birleşim Moment- Toplam dönme.	110
Şekil 7.54 :P3 (Kolon+Birleşim) Moment- Toplam dönme.....	110
Şekil 7.55 :P3-Kiriş Moment- Toplam dönme.	111
Şekil 7.56 :P3 numunesi kolon panel bölgesi strengeç okumaları.	111
Şekil 7.57 :P3 numunesi strengeç okumaları.....	111
Şekil 7.58 :P3 numunesi strengeç okumaları.....	112
Şekil 7.59 :P3 numunesi strengeç okumaları.....	112
Şekil 7.60 :P3 numunesi strengeç okumaları.....	112
Şekil 7.61 :P3-Deneysel çalışma ile FEA modelinin birlikte gösterimi.....	113
Şekil 7.62 :P3 - Kolon Moment- Toplam dönme.	114
Şekil 7.63 :P3 - Birleşim Moment- Toplam dönme.	114
Şekil 7.64 :P3 – Kolon+Birleşim Moment- Toplam dönme.	114
Şekil 7.65 :P3 - Kiriş Moment- Toplam dönme.	115
Şekil 7.66 :P4-Moment- Toplam dönme.	116
Şekil 7.67 :P4-Kolon Moment- Toplam dönme.	117
Şekil 7.68 :P4- Birleşim Moment- Toplam dönme.	117
Şekil 7.69 :P4-(Kolon+Birleşim) Moment- Toplam dönme.	117
Şekil 7.70 :P4-Kiriş Moment- Toplam dönme.	118
Şekil 7.71 :P4 numunesi kolon panel bölgesi strengeç okumaları.	118
Şekil 7.72 :P4 numunesi strengeç okumaları.....	118
Şekil 7.73 :P4 numunesi strengeç okumaları.....	119
Şekil 7.74 :P4 numunesi strengeç okumaları.....	119
Şekil 7.75 :P4 numunesi strengeç okumaları.....	119
Şekil 7.76 :P4-Deneysel çalışma ile FEA modelinin birlikte gösterimi.....	120
Şekil 7.77 :P4 - Kolon Moment- Toplam dönme.	121
Şekil 7.78 :P4 - Birleşim Moment- Toplam dönme.	121
Şekil 7.79 :P4 – Kolon + Birleşim Moment- Toplam dönme.	121
Şekil 7.80 :P4 - Kiriş Moment- Toplam dönme.	122

Şekil A.1 : Data logger kanal planları.....	138
Şekil A.2 : Data logger kanal planları.....	139
Şekil B.1: HEB180-P4 profili malzeme test sonuçları.....	140
Şekil B.2: IPE270-P1,P2,P0 profili malzeme test sonuçları	140
Şekil B.3: IPE270-P3 profili malzeme test sonuçları.....	141
Şekil B.4: Levha 8 mm malzeme test sonuçları	141
Şekil B.5: Levha 20 mm malzeme test sonuçları	142
Şekil B.6: Levha 35 mm malzeme test sonuçları	142
Şekil B.7: P1 (S275) mm malzeme test sonuçları	143
Şekil B.8: P2 (S275) mm malzeme test sonuçları	143
Şekil B.9: P3 (S275) mm malzeme test sonuçları	144
Şekil B.10: P4 (S275) mm malzeme test sonuçlar	144
Şekil C.1: Numune P2 yükleme adımları.....	145
Şekil C.2: Numune P3 yükleme adımları.....	146
Şekil D.1: P0 pilot numune resimleri.	148
Şekil D.2: P0 pilot numune resimleri.	149
Şekil D.3: P1 numune resimleri.....	150
Şekil D.4: P1 numune resimleri.....	151
Şekil D.5: P2 numune resimleri.....	152
Şekil D.6: P2 numune resimleri.....	153
Şekil D.7: P3 numune resimleri.....	154
Şekil D.8: P3 numune resimleri.....	155
Şekil D.9: P4 numune resimleri.....	156
Şekil D.10: P4 numune resimleri.....	157
Şekil E.1: P0 Pilot numune grafikleri.	158
Şekil E.2: P0 Pilot numune grafikleri.	159
Şekil E.3: P0 Pilot numune grafikleri.	160
Şekil E.4: P0 Pilot numune grafikleri.	161
Şekil E.5: P0 Pilot numune grafikleri.	162
Şekil E.6: P1 numune grafikleri.	163
Şekil E.7: P1 numune grafikleri.	164
Şekil E.8: P1 numune grafikleri.	165
Şekil E.9: P1 numune grafikleri.	166
Şekil E.10: P2 numune grafikleri.	167
Şekil E.11: P2 numune grafikleri.	168
Şekil E.12: P2 numune grafikleri.	169
Şekil E.13: P2 numune grafikleri.	170
Şekil E.14: P2 numune grafikleri.	171
Şekil E.15: P3 numune grafikleri.	172
Şekil E.16: P3 numune grafikleri.	173
Şekil E.17: P3 numune grafikleri.	174
Şekil E.18: P3 numune grafikleri.	175
Şekil E.19: P3 numune grafikleri.	176
Şekil E.20: P3 numune grafikleri.	177
Şekil E.21: P4 numune grafikleri.	178
Şekil E.22: P4 numune grafikleri.	179
Şekil E.23: P4 numune grafikleri.	180
Şekil E.24: P4 numune grafikleri.	181
Şekil E.25: P4 numune grafikleri.	182
Şekil E.26: P4 numune grafikleri.	183

Şekil F.1: Alın levhalı genel birleşim şeması.....	184
Şekil G.1: Deney düzeneği 3D Görünüş.	200
Şekil G.2: Deney düzeneği ön görünüş.	200
Şekil G.3: Deney düzeneği yan görünüş.	201
Şekil G.4: Deney düzeneği üst görünüş.	201

SEMBOLLER

Φ	: Dönme
ϕ	: Faktör
Δ_y	: Numunede akma meydana gelmesi için gerekli yerdeğiştirme
δ	: Yer değıştirme miktarı
δ_{dt}	: Transducer yerdeğıştirmesi
φ	: Dönme
$\varphi_{dönme}$	: Mesnet dönmesi
φ_{toplam}	: Mesnetin toplam dönmesi
φ_{model}	: Kolon-kiriş birleşiminden oluşan mesnetin rijit kütle hareketi
$\varphi_{elastik}$	: Kolon ve kirişin elastik dönmesi
θ	: Katlar arası sürüklenme açısı
θ_{nx}	: Alın levhasının x ekseninde göreceli dönme değeri
θ_{ny}	: Alın levhasının y ekseninde göreceli dönme değeri
μ	: Uzama oranı
ε_T	: Gerçek birim uzama değeri
ε_E	: Mühendislik birim uzama değeri
ε_y	: Akma durumunda uzama
σ_a	: Akma gerilmesi
σ_E	: Mühendislik gerilmesi değeri
σ_T	: Gerçek gerilme değeri
A_0	: Yükleme öncesi malzeme kesit alanı
b_{fc}	: Kolon başlık genişliği
b_p	: Alın levhası genişliği
c	: Kiriş çekme başlığında bulon üst sırası ile alt sıra arası mesafe
C_{pr}	: Kirişte meydana gelen pekleşmeyi ifade eden katsayı
d	: Transducer arası mesafe
d_b	: Bulon delik çapı
H	: Kolon profil uzunluğu
H_b	: Kiriş yüksekliği
h_0	: Kiriş basınç başlığı merkezinden alt sıradaki çekme bulonlarına uzaklık
h_1	: Kiriş basınç başlığı merkezinden üst sıradaki çekme bulonlarına uzaklık
h_c	: Kolon profil kesit yüksekliği
D_a	: Deprem yönetmeliğinde verilen artırma katsayısı
DT	: Displacement Transducer
E	: Elastisite modülü
F_t	: Bulon kopma gerilmesi
F_u	: Çeliğin kopma gerilmesi.
$F_{u \cdot act}$	: Gerçek kopma gerilmesi
$F_{u \cdot nom}$	: Nominal kopma gerilmesi
F_y	: Akma gerilmesi

F_{yc}	: Kolon akma gerilmesi
F_{yp}	: Alın levhası akma gerilmesi
g	: Bulon merkezleri arası yatay mesafe
I_b	: Kiriş atalet momenti
I_c	: Kolon atalet momenti
K_i	: Başlangıç rijitliği
L_0	: Yükleme öncesi malzeme boyu
L_{st}	: Alın levhasındaki rijitlik levhası uzunluğu
L_{nx}	: Akma çizigisi uzunluğunun x eksenindeki birleşeni
L_{ny}	: Akma çizigisi uzunluğunun y eksenindeki birleşeni
M	: Moment
M_{cf}	: Kolon başlığı moment dayanımı
m_p	: Birim uzunluk için alın levhası plastik moment mukavemeti
M_j	: Mesnete uygulanan moment
M_{pe}	: Plastik mafsalda beklenen moment değeri
M_{pb}	: Kiriş plastik moment kapasitesi
M_{pl}	: Alın levhası eğilme mukavemeti
M_{uc}	: Kolon merkezinde meydana gelen moment
M_{np}	: Bulonlar için kaldırma kuvveti meydana getirmeyen moment
n_j	: Çevrim sayısı
P_t	: Bulon çekme mukavemeti
p_{f0}	: Kiriş başlığı dış yüzü ile dış bulon merkezi arasındaki mesafe
p_{fi}	: Kiriş başlığı iç yüzü ile iç bulon merkezi arasındaki mesafe
q	: Bulon kaldırma kuvveti
R_t	: Nihai kopma değerinin nominal kopma değerine oranıdır.
R_y	: Beklenen akma gerilmesinin nominal akma gerilmesine oranıdır.
r_u	: Kennedy modelinde bulona gelen çekme kuvveti
t_{cf}	: Kolon başlık kalınlığı
t_{bf}	: Kiriş başlık kalınlığı
t_p	: Alın levhası kalınlığı
t_{wb}	: Kiriş gövde kalınlığı
t_{wc}	: Kolon gövde kalınlığı
t_{wf}	: Kolon başlık kalınlığı
V_u	: Plastik mafsala etkiyen kesme kuvveti
W_e	: Birim sanal dönmeden meydana gelen dış iş
W_i	: Birim sanal dönmeden meydana gelen iç iş
Y_p	: Alın levhası akma çizigisi toplam uzunluğu
Z_x	: Kiriş plastik mukavemet momenti değeridir.

MOMENT AKTARAN ALIN LEVHALI BİRLEŞİMLERİN ÇEVİRİMSSEL YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

ÖZET

Kobe ve Northridge depremlerinden sonra çelik yapılarda birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükler altındaki performansının incelenmesi amacıyla çok sayıda araştırmalar yapılmış ve deprem bölgelerinde yüksek performans elde etmek amacıyla birçok tipik bağlantı detayları geliştirilmiştir. Amerikan normlarında çelik yapılar az sünek, normal sünek ve yüksek sünek olarak sınıflandırılmış ve yapı sınıfına göre değişiklik gösteren bağlantı detayları tavsiye edilmiştir. Bu bağlantı detayları şartnamelerde yeterliliği kanıtlanmış bağlantı detayları (pre-qualified connections) olarak yer almaktadır. ANSI/AISC358-10 şartnamesi, yeterliliği kanıtlanmış olan bağlantı detaylarının geometrik özellikleriyle ilgili bazı parametrik sınırlamalar tavsiye etmektedir.

1997 deprem şartnamesi de meydana gelen gelişmelere paralel olarak Amerikan Şartnamelerinden etkilenmiş ve 2007 yılında önemli değişikliklere uğramıştır. DBYBHY-2007’de çelik yapılar normal sünek ve yüksek sünek olarak sınıflandırılmış ve sadece yüksek sünek yapılar için bağlantı detayları tavsiye edilmiştir. Bu bağlantı detayları Amerikan şartnamelerinde bulunan birleşim detayları esas alınarak hazırlanmış ve bağlantı birleşenleri için Amerikan normlarına benzer şekilde bazı geometrik sınırlamalar getirmiştir.

Uzatılmış alın levhalı moment birleşimleri Türkiye ve Dünya’da tercih edilen başlıca bağlantı tiplerinden biridir. DBYBHY-2007’de Uzatılmış dört bulonlu rijitlik levhasız ve Uzatılmış 8 bulonlu rijitlik levhalı alın levhalı birleşimler için yeterliliği kanıtlanmış bağlantı detayları verilmektedir. Bu bağlantılar için verilen uygulama detayları, parametrik sınırlamaların türü ve değer aralığı Amerikan Deprem Şartnamesindeki sınırlamalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Ancak bununla birlikte, Avrupa’da kullanılan çelik kalitesi (S235JR, S275JR, S355JR vb.) ve çelik profillerin geometrisi (IPE, HEA, HEB vb.) ABD’de kullanılan çelik kalitesi (A36, A572, A992) ve profillerinden (W) farklılık göstermektedir. Bu farklılıkların Türk Deprem Şartnamesinde verilen yeterliliği kanıtlanmış Alın Levhalı Moment Birleşimi bağlantı detaylarına olan etkisini incelemek üzere bir çalışma programı yapılmıştır.

Bu çalışmada S275JR çelik kalitesi ve Avrupa normlarına uygun profillerle (IPE, HEB) imal edilmiş olan uzatılmış alın levhalı kolon-kiriş moment birleşimi araştırılmıştır. İlk aşamada deneysel çalışma öncesinde bilgisayarda sonlu eleman sayısal analiz modeli oluşturulmuş ve incelenmiştir. Bu sayısal analiz çalışması, literatürde yapılmış olan deneysel çalışmalar ile kıyaslanarak oluşturulan sayısal analiz modelinin doğruluğundan emin olunmuştur. Daha sonra deneysel çalışma öncesinde deneysel çalışmaların sayısal analiz çalışmaları oluşturulmuş ve deney öncesi numunelerin monotonik ve çevrimsel yükler altındaki davranışı tespit

edilmiştir. Sayısal analizden elde edilen veriler ışığında plastik deformasyon beklenen yerlere teçhizatlar sabitlenerek deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonrasında sayısal analiz çalışmaları ile elde edilen sonuçların deneysel çalışma sonuçları ile tatmin edici bir uyumda olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın değerlendirme ve sonuç bölümünde ise deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışmaları ışığında S275 JR çelik kalitesi ve Avrupa normlarına uygun profillerin performansı değerlendirilmiştir.

BEHAVIOUR OF END-PLATE MOMENT CONNECTIONS UNDER CYCLIC LOADING

SUMMARY

Since the Northridge and Kobe earthquakes, a number of researches have been conducted to investigate the response of connections and behavior of steel moment-frame buildings under monotonic and cyclic loading conditions. With the developments obtained through these researches a number of connection details have been revised and improved to achieve acceptable performance for use at high seismic demands. The revised specification provisions require that beam-to-column moment connections be designed with sufficient strength to force development of the plastic hinge away from the column face to predetermined location within the beam span. In addition, all elements of the connection are required to have adequate strength to develop the forces resulting from the formation of the plastic hinge. These connections designed by incorporating the provisions adopted are classified as prequalified.

ANSI/AISC 358-10 has presented the prequalified connection types with some parametric limitations regarding geometrical dimensions of the elements constituting the connection, such as beams, columns, end plates and bolts. Prequalified connections are demanded to be used in special moment frames (SMF) and intermediate moment frames (IMF) systems in accordance with the provisions specified in ANSI/AISC 341-10. AISC Design Guide 4: Extended End-Plate Moment Connections also provides design procedures and design examples for the extended end-plate moment connection configurations classified as prequalified.

Significant revisions were introduced into the Turkish Earthquake Code (TEC) in 2007 for the steel buildings. These changes were largely based on USA design codes and practice. In current seismic design code (TEC 2007), steel moment frames are classified as systems of either highly ductile moment resisting frames corresponding to special moment frames (SMF) or nominal ductile moment resisting frames corresponding essentially to ordinary moment frames (OMF) and partially intermediate moment frames (IMF) based on detailing of connections. The prequalified connection details for SMF systems have only been addressed in TEC 2007.

Steel moment frames can incorporate a number of different types of beam-to-column connections to be able to sustain their performance without significant degradation under seismic loading. The extended end-plate connections which have proved to be very effective in transmitting significant amount of moments have been widely used in Turkey. Details for two moment extended end-plate connection configuration, designed as four-bolt unstiffened and eight-bolt stiffened, are presented as prequalified connections in TEC 2007. The range and type of parameters for the connection prequalification, specified in this code, are similar with some differences to USA codes and practice. For example, in ANSI/AISC 358-10, size and flange thickness of beam, size and thickness of the end-plate, bolt gauges are considered as

design parameters of the connection; however, in TEC 2007 these parameters are not taken into account for connection design purpose. In addition, European structural steel grade and European steel sections which are very popular in Turkey differs from size of W sections employed in USA. To use the design procedure recommended by AISC Design Guide 4, this study was planned to explicate the seismic characterization and validation of current provisions necessitated by TEC 2007 for the behavior of the four-bolt unstiffened moment end-plate connections defined as prequalified connections.

Four connection specimens were prepared in order to evaluate the geometrical limitations specified in TEC 2007 and ANSI/AISC 358-10. The beam-column connections were made with four-bolt, extended, unstiffened end-plate connections. The column was designed to remain essentially elastic, resulting in HEB 320 section with 8mm doubler plates and 20 mm continuity plates, while the beam sections of IPE 270 and HEB 180 were determined so as to allow the development of their plastic moments within the end region of the beam. The steel grade, specified for the beams and columns, was S275 while the end-plates, continuity plates and doubler plates were S235. Grade 10.9 bolts were employed in all specimens. The end-plate was connected to the beam flange by complete joint penetration groove weld and to the beam web by fillet weld on both sides. Manual metal arc welding process with coated electrode was used. The minimum specified tensile strength of the weld metal (E7018) was 530N/mm². Bolts were pre-tensioned up to 70% of their ultimate tensile capacity.

The connection specimens were designed to develop the expected plastic moment capacity of the connected beams. Thus, column, end-plate, bolts and welds used in the specimens were provided to essentially remain elastic during the tests. Plastic deformation was aimed only at plastic hinge away from the column face within the region of beam end.

Specimen P1 was only subjected to monotonic loading. Three of the four specimens were subjected to displacement cycles of increasing amplitude. Specimen P2 was identical to specimen P1 except that it was subjected to cyclic loading rather than monotonic loading. Specimens P1, P2 and P3 were designed with a beam section of IPE 270 and HEB 180 was used as the beam in design of Specimen P4. Both beam sections have almost same plastic section modulus, resulting in the same plastic moment capacity. This was done so in order to observe the effect of the connection configuration on the cyclic performance depending on the dimensional properties of the connected beams.

Four test specimens consisted of extended end plate connections, denoted P1, P2, P3 and P4, were designed for monotonic and cyclic testing. The height of the column is 3.0 m. The columns of all specimens have web transverse stiffeners at the level of the beam flanges, and cantilever beam length is 2.0 m. The out-of-plane deformation of the specimens was restrained during the tests. The displacement cycles applied at the tip of the beam was provided by a hydraulic actuator capable of producing up to force of 250 kN. No any axial force on beam and column is applied.

Test specimens were instrumented with displacement transducers and strain-gauges. Each specimen was mounted to the test setup in such a way that the beam was in vertical position and the column was placed in horizontal plane. The connection regions of all specimens were painted with white wash in order to observe yield formations.

ATC-24 Protocol (ATC-24, 1992) and SAC Protocol (Clark et al., 1997) are two widely used loading protocol for testing of steel sub-structures. Both protocols use different control parameter for determination of cycle amplitudes. While ATC-24 Protocol uses yield displacement as a control parameter, SAC Protocol considers story drifts rather than yield deformation. Because of the ambiguity for determination of exact yield point, ATC-24 Protocol possesses a major difficulty for application. For this reason, SAC Protocol was preferred for testing of the specimens. Each load step corresponds to a total interstory drift angle.

Two tensile dog bone coupons cut from end plate sheet and steel profiles were tested in accordance with EN10002-1. Coupons were taken from flange of the beams and columns. Steel grade preferred for column and beam profiles was S275 with nominal minimum yield stress, $F_{y,nom}$ and nominal minimum tensile strength, $F_{u,nom}$ of 275N/mm² and 430N/mm², respectively. The structural steel for end plates was S235 with nominal minimum yield stress, $F_{y,nom}$ and nominal minimum tensile strength, $F_{u,nom}$ of 235N/mm² and 360N/mm², respectively. The results of the coupon tests showed that the experimental values were higher than the nominal ones. The coupon test results were used in determining the actual moment capacity of the beam.

It is well known that experimental researches on connections are very expensive and mostly impractical for engineers. Therefore, interest on simulations is increasing in parallel with advancing computer technology. Simulation study provides easiness and speed for performing numerous analyses with different geometries and material properties without cost. However, these types of models also needed to be verified based on experimental results. Herein, a monotonic test was used to verify the Finite Element Models (FEMs) and details of the verification are given in the sections below. In the simulation studies, FEMs of the specimens were created using the software package ANSYS. FEMs were developed without utilizing symmetry property. Several mesh models with different sizes were tried for numerical model; consequently, mesh model was established using patch confirming method. All members were meshed using 10 node quadratic tetrahedron element (SOLID187). The contact interaction between column flange and extended end plate was simulated by quadratic triangular contact element (CONTA174) and quadratic triangular target element (TARGE170). The contact and target elements are able to represent a deformable contact surface with friction and sliding effect. Friction coefficient between column flange and end plate was applied as 0.44. This value was determined based on the data obtained from monotonic test results. Bolt pre-tension loading was modelled using (PRETS179) element within the meshed model of bolt shanks. Detailed information of these elements can be found in ANSYS element reference.

Tension test results for yield stress and elastic modulus from the material test data for the end plates, beams and columns described above were used for the material properties. Kinematic hardening model was adopted to represent the stress-strain behavior of all steel members' material. Poisson ratio of steel was taken as 0.3. Von Mises yield criterion was applied to investigate yielding of materials. Tangent modulus at the plastic region was taken as 10 MPa for all materials. This was done so to avoid convergence problems in the analyses.

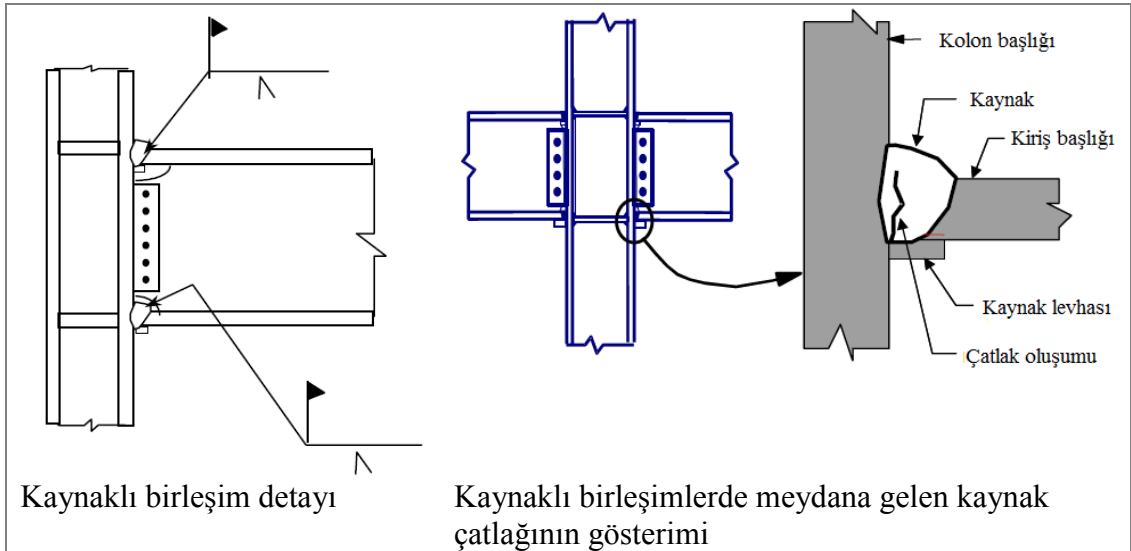
Analysis was divided into two stages similar to experimental study. First, boundary conditions were applied at the end of column and then bolts were pre-tensioned with an equivalent force of approximately 70% of the ultimate tensile strength of the bolt. After the completion of the first step, a monotonically increasing lateral displacement

load was applied at the tip of the beam. P-delta effect was considered with using large displacement static analysis.

In this study, cyclic performance of the four-bolt unstiffened moment end-plate connection, representing an exterior joint sub-assembly, designed with European steel sections made of S275 steel was investigated in terms of rotation capacity and strength. The flange widths and depths of the beams used for the connection specimens fell out of the parametric limitations required by ANSI/AISC 358-10. In first phase of the study, one specimen was tested under monotonic loading to provide data for the calibration of the finite element models of the specimens. Then, in second phase, cyclic loading was applied to each three specimen. The experimental test results are presented and discussed through the comparison made between the test results and analytical results obtained from the models in the following sections.

1. GİRİŞ

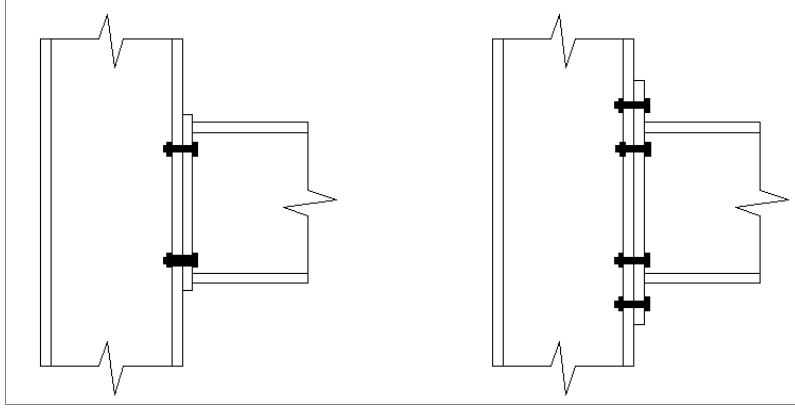
1970’li yılların başlarında ABD’nin California Eyaletinde çelik yapılar için bazı kaynaklı birleşim detayları (Şu anda bu birleşimler Nortridge öncesi detaylar olarak sınıflandırılmaktadır) genel olarak kullanılmaktaydı. Kaynaklı birleşimlerin en sünek birleşimler olduğuna dair yaygın bir kanaat hâkimdi. Bu birleşimler (UBC97) şartnamesinde yeterliliği kanıtlanmış birleşim (pre-qualified connection) olarak tavsiye edilmekteydi.



Şekil 1.1 : Northridge depremi öncesinde kullanılan kaynaklı birleşim (FEMA350).

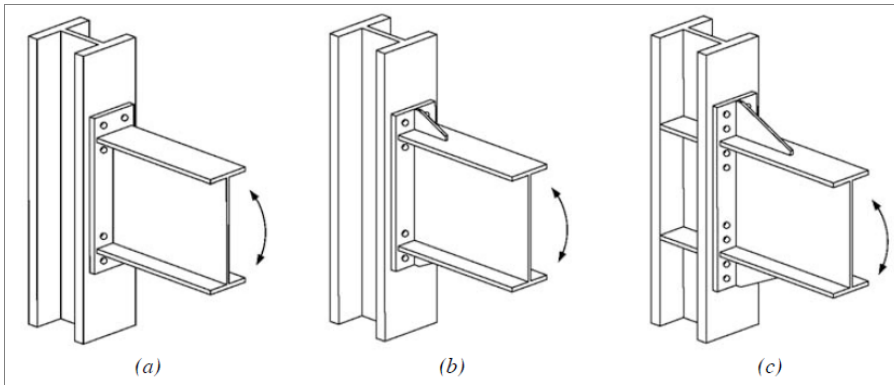
17 Ocak 1994 depreminde özellikle Güney California eyaletinde kaynaklı birleşim kullanılan çelik binalarda önemli hasarlar gözlemlenmiştir. FEMA, çelik yapılarda karşılaşılan bu beklenmedik hasar durumları üzerine birçok araştırma gerçekleştirmiştir. 1994 Northridge depremi ve 1995 Kobe depremlerinden sonra yapılan araştırmalarda bulonlu birleşimlerin kaynaklı birleşimlere iyi bir alternatif olduğu ve deprem yükü altında tatmin edici performans sergilediği tespit edilmiştir (Sumner ve diğerleri 2000a, 2001a, 2001b).

Alın levhalı bir bileşim, ucuna alın levhası kaynaklanmış kirişin diğer yapı elemanına bulonlar ile birleşiminden oluşur. Alın levhalı birleşim bir kolon-kiriş veya kiriş-kiriş bağlantısı olabilir.



Şekil 1.2 : Düz ve Uzatılmış Alın levhalı moment birleşimleri.

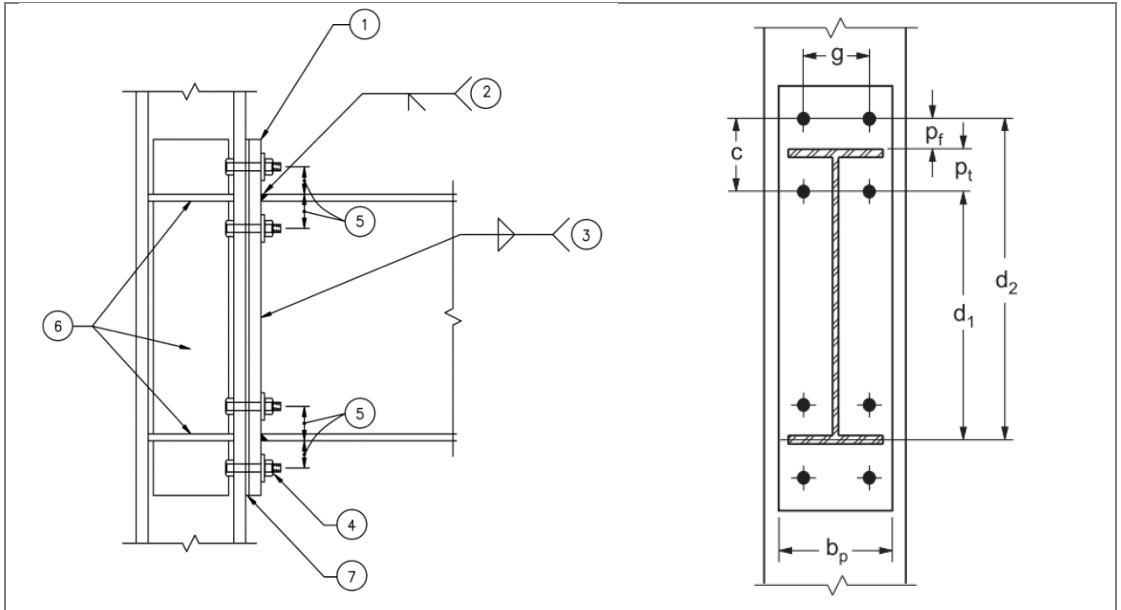
Kolon-kiriş birleşimi tipindeki alın levhalı birleşimlerin birçok çeşiti bulunmaktadır. Genel olarak düz ve uzatılmış alın levhalı birleşim olmak üzere ikiye ayrılırlar. Uzatılmış alın levhaları ise kendi aralarında bulon sayısı ve rijitlik levhası kullanımına göre sınıflandırılırlar. Uzatılmış Alın Levhalı birleşimlerde gerektiği durumlarda alın levhası ile kiriş başlığı arasında rijitlik levhası ve kiriş başlıkları hizasında (kolon başlıkları arasında) süreklilik levhası kullanılabilir. Rijitlik levhası kullanımı ile gerekli alın levhası kalınlığı azalır. Uzatılmış Alın Levhalı Moment Birleşimleri çekme başlığı bölgesindeki bulon sayısına göre isimlendirilir. Düz Alın Levhalı Moment Birleşiminde alın levhasının yüksekliği kiriş yüksekliğini geçmemektedir ve bütün bulonlar kiriş başlıklarının arasında bulunur. Düz Alın Levhalı Moment Birleşimleri, yatay yüklerin az olduğu yapılarda kullanılır. Uzatılmış Alın Levhalı Moment Birleşimlerinde alın levhası yüksekliği, kiriş yüksekliğini bulonları sabitleyecek bölge oluşacak kadar uzatılır. Kolon-Kiriş birleşimlerinde kullanılır. Uzatılmış alın levhalı birleşimler için üç farklı tip aşağıda gösterilmiştir (AISC Steel Design Guide 4, 2003).



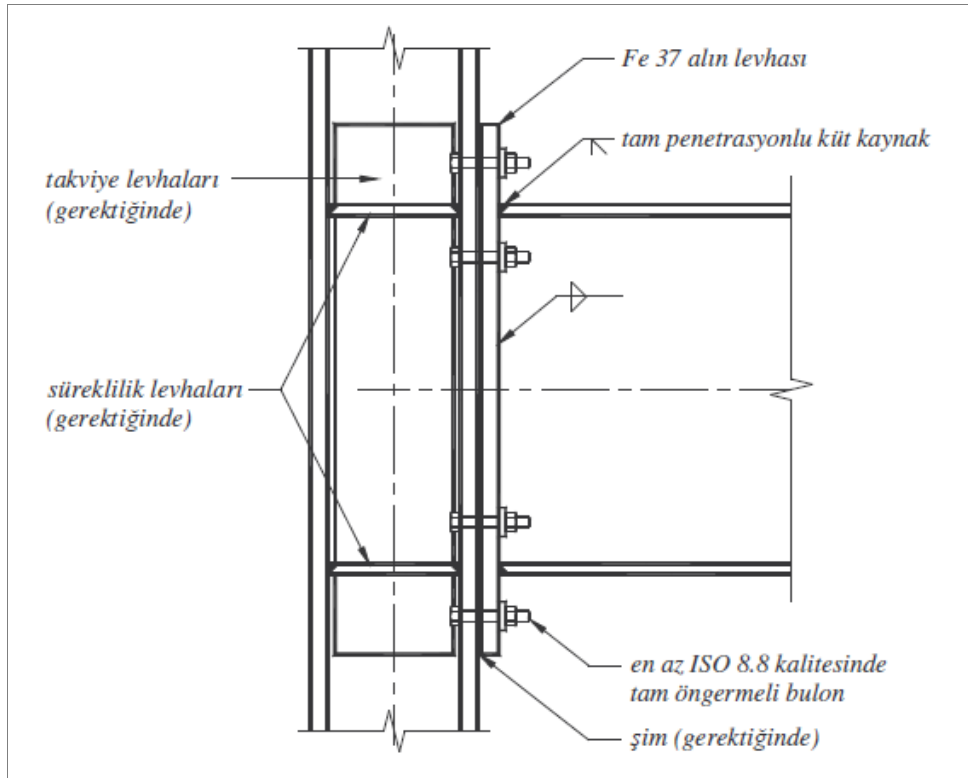
Şekil 1.3 : Uzatılmış Alın levhalı moment birleşimleri (AISC 358-10).

Alın levhalı moment birleşimlerinin kullanımı birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Sahada kurulum sırasında kaynak işçiliğini ortadan kaldırmakta ve her türlü iklim koşulunda saha montajını kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla alın levhalı birleşimlerin kullanıldığı taşıyıcı sistemlerin kurulumu kaynaklı birleşimden oluşturulmuş taşıyıcı sistemlere göre daha hızlı ve ekonomiktir. Bununla birlikte alın levhalı birleşimlerin imalatı sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. İmalat çok hassas bir şekilde, tam uzunlukta ve çarpıklık olmadan yapılmalıdır. Kurulum zorluğunu azaltmak için kirişler 5mm~10 mm kısa imal edilir. Bu boşluklar gerekirse şim levhası kullanılarak doldurulur. Ayrıca alın levhası, kirişin ucuna kaynaklanırken kaynak ısısından dolayı alın levhasının çarpılmamasına özen gösterilmelidir. Kaynak işçiliği sırasında gerekli özen gösterilmez ise üst başlık çekme bölgesindeki kaynaktan yırtılma görülebilmektedir. Alın levhası kalınlığının ince olmamasına dikkat edilmelidir. İnce alın levhası kullanıldığı durumda bulonlara ek olarak kaldırma kuvveti etki etmektedir. Alın levhalı birleşimler, ABD’de deprem bölgesi olmayan yerlerde 30 kata kadar, deprem bölgelerinde ise 10 kata kadar olan binalarda kullanılmaktadır. Alın levhalı moment birleşimleri rijit çerçeveler elde etmede ekonomi sağlamıştır (AISC Design Guide 4, 2003).

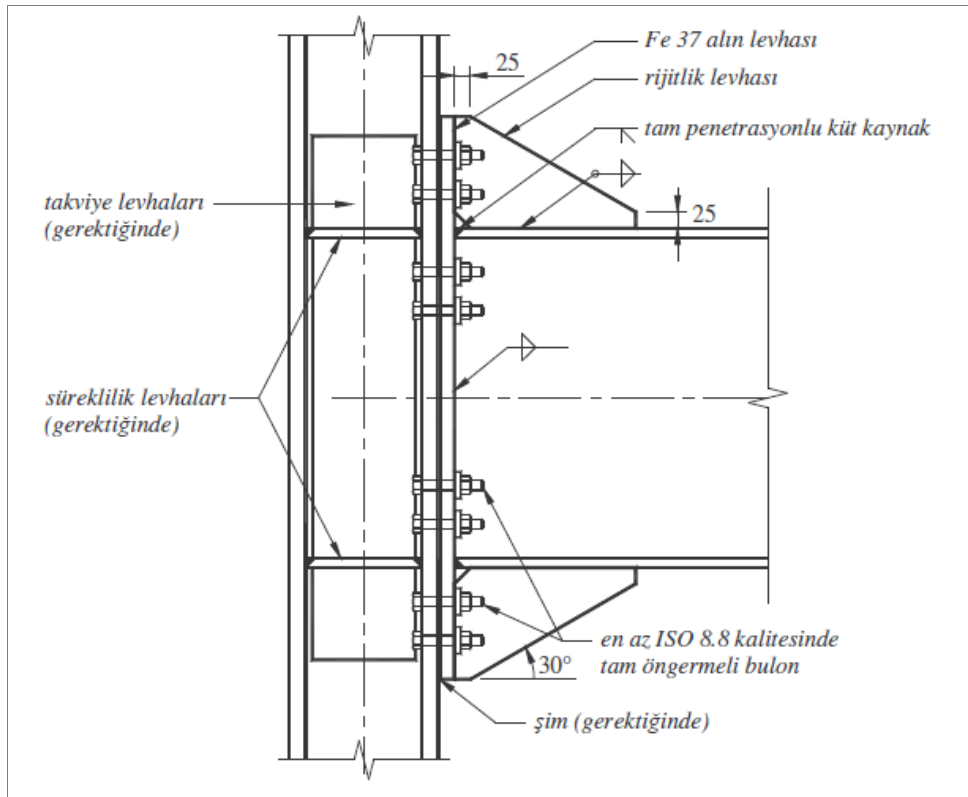
DBYBHY-2007’de 4 bulonlu rijitlik levhasız ve 8 bulonlu rijitlik levhalı Uzatılmış Alın Levhalı Moment birleşimleri için Şekil 1.4 teki detaylar tavsiye edilmektedir.



Şekil 1.4 : Dört bulonlu alın levhalı moment birleşimi detayı (CISC,2008).



Şekil 1.5 : Dört bulonlu alın levhalı moment birleşimi (DBYBHY, 2007).



Şekil 1.6 : Sekiz bulonlu takviyeli alın levhalı birleşim (DBYBHY, 2007).

1.1 DBYBHY-2007 ve Amerikan Normlarına Göre Alın Levhalı Moment Birleşimlerinin İncelenmesi

Şekil 1.4'te sunulan numaralandırma dikkate alınarak Alın Levhalı Moment Birleşimlerini oluşturan parametrik özellikler DBYBHY-2007 ve AISC358-10'a göre aşağıda kıyaslanmıştır.

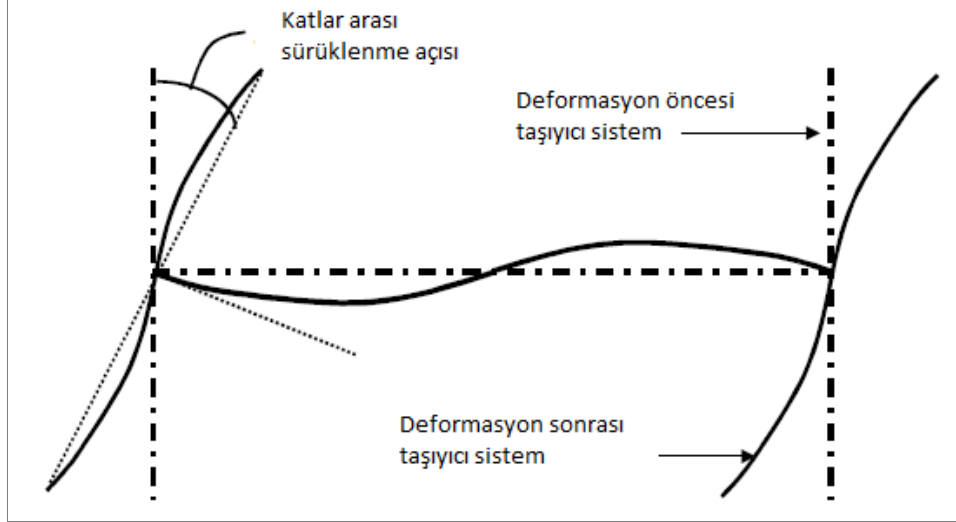
- 1- 1 numara ile gösterilen alın levhası için Amerikan normlarında A36 çelik kalitesi tavsiye edilirken Türk Deprem yönetmeliğinde S235 çelik kalitesi tavsiye edilmektedir.
- 2- 2 numara ile alın levhası ile kiriş başlığını birleştiren kaynak tipi her iki şartnamede tam penetrasyonlu küt kaynak olarak verilmektedir.
- 3- 3 numara ile alın levhası ile kiriş gövdesini birleştiren kaynak tipi her iki şartnamede köşe kaynak olarak verilmektedir.
- 4- Amerikan normlarında A325 ve A490 tipi öngerme uygulanmış civata kullanımı tavsiye edilirken, DBYBHY-2007'de ISO8.8 ve ISO10.9 kalite öngerme uygulanmış civata kullanımı tavsiye edilir (FEMA350'de bulon çapının 38mm'yi aşmaması tavsiye edilmektedir).
- 5- 5 numara ile gösterilen bulonlar arası mesafeler için (p_f , p_{f0} ve g), AISC358-10 Tablo 6,1'de sunulan bazı sınırlandırmalar getirmiştir. Bu sınırlamalar dışında kullanılan bulon aralıklarının analitik ve deneysel çalışmalar ile ispatlanması gerekmektedir. DBYBHY-2007'de böyle bir sınırlama bulunmamaktadır.
- 6- 6 numara ile gösterilen süreklilik levhaları ve kolon gövdesi takviye levhası kullanımı her iki şartnamede kolon başlık mukavemetinin ve/veya kolon panel bölgesi mukavemetinin yetersiz olduğu durumlarda kullanımı tavsiye edilmektedir. Ancak Amerikan normlarında kolon panel bölgesi takviyesi yerine daha büyük kesitlerde kolon kullanımının daha ekonomik sonuç verebileceğine ve ayrıca kolon panel bölgesi takviyesi kolonun zayıf yönündeki bağlantının kullanımını zorlaştırabileceğine dikkat çekilmektedir.
- 7- 7 numara ile kiriş elemanların kurulumu sırasında meydana gelebilecek boşlukların şim levhası ile doldurulabileceğine her iki yönetmelik işaret etmektedir.

1.2 Moment Birleşimlerinin Dönme Gereksinimlerine Göre Sınıflandırılması

Alın levhalı moment birleşimlerinin deprem yükleri altında belli miktarda deformasyon kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple AISC moment birleşimleri için birleşimin geometrik özellikleri dışında ayrıca birleşimin plastik veya toplam dönme kapasitesine göre sınıflandırmıştır.

Üç farklı sismik taşıyıcı sistem tipi mevcuttur. Bunlar düşük sünek (OMF, Ordinary Moment Frames), normal sünek (IMF, Intermediate Moment Frames) ve yüksek sünek (SMF, Special Moment Frames) olarak sıralanabilir. Düşük sünek tipi taşıyıcı sistemler deprem riskinin düşük olduğu bölgelerde tercih edilir. Düşük sünek sistemlerde birleşimlerin plastik performans göstermesi beklenmez. Taşıyıcı sistemde oluşacak deformasyonların elastik sınırlar içerisinde kalacağı öngörülür. Düşük sünek sistemde birleşimlerin 0,01 radyan katlar arası dönme kabiliyetine sahip olması yeterli görülmüştür. Yüksek sünek sistemlere göre daha güçlü ama daha az sünektir. Normal sünek tipi taşıyıcı sistemler FEMA-302'ye tanım olarak 1997 yılında eklenmiştir. Orta büyüklükte deprem beklenen bölgelerde yüksek sünek sistemlere göre daha ekonomik taşıyıcı sistem elde edilmesi düşüncesiyle kullanılmaktadır. Birleşimin 0,02 radyan katlar arası dönme (interstory drift angle) yapması beklenir. Deprem yükleri altında yüksek sünek sisteme yakın performans sergilerler. Yüksek sünek tipi taşıyıcı sistemler deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde tercih edilir. Birleşim detayları için süneklik kabiliyeti arttıran ek şartlar bulunmaktadır. Yüksek sünek tipi taşıyıcı sistemlerde ise en az 0,04 radyan katlar arası dönme kabiliyeti beklenir. Ayrıca normal sünek ve yüksek sünek yapılarda kolon yüzündeki birleşim mukavemetinin giriş plastik mukavemetinin %80 inden daha fazla olmalıdır (AISC-2002).

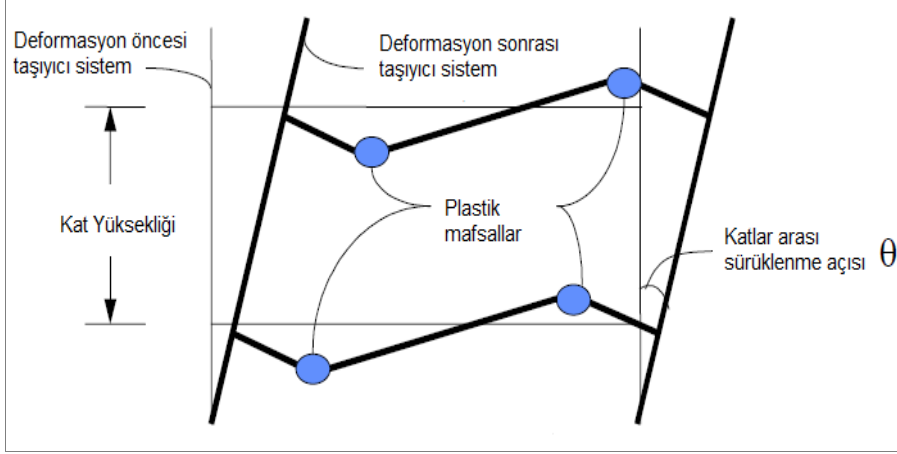
AISC-97 deprem şartnamesi birleşimlerde performans parametresi olarak plastik dönme açısını kullanmaktadır. Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalarda bu parametre yerine katlar arası sürüklenme açısı (interstory drift angle) parametresi kullanımı daha yaygın yer bulmaktadır. Bunun başlıca sebepleri katlar arası sürüklenme açısının taşıyıcı sistem analizi sonrasında kolaylıkla tespit edilebilmesi ve bunun yanında birleşimin plastik dönme açısının belirlenmesinde bir çok belirsizliklerin olmasıdır (FEMA-350).



Şekil 1.7 : Katlar arası sürüklenme açısı (FEMA-350).

Katlar arası sürüklenme açısı yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere taşıyıcı sistemin deformasyon öncesi durum ile deformasyon sonrası durum arasındaki açıya eşittir. Diğer bir ifadeyle, katlar arası sürüklenme açısı birleşimdeki elastik ve elastik olmayan dönme açılarının toplamına eşittir.

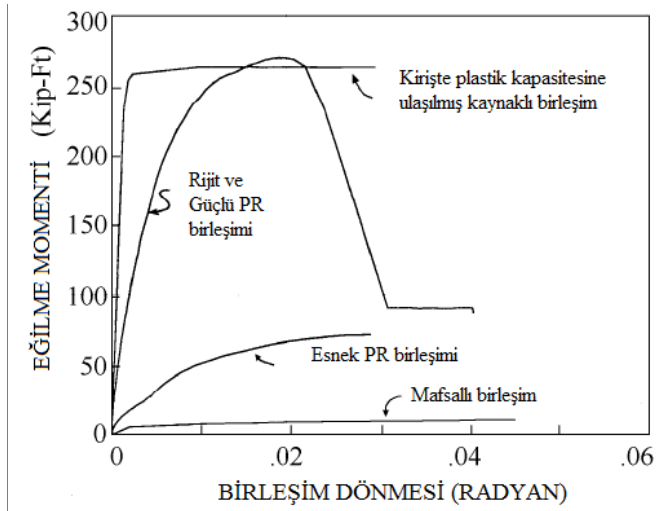
Taşıyıcı sistem elemanlarının idealleştirildiği çerçeve yaklaşımında eğilme ve kesme kuvvetlerinden meydana gelen plastik deformasyonların plastik mafsallara tanımlanan bölgelerde toplanmış olduğu varsayımı yapılır. Birleşimin tasarımı, büyük deprem kuvvetleri altında plastik mafsalda akma meydana gelecek şekilde, birleşimin diğer kısımları ise elastik kalacak şekilde tasarlanır. Plastik mafsalların kolon yüzünden belli bir mesafede meydana gelmesi sağlanmalıdır. Plastik mafsalların kiriş içinde kolon yüzüne çok yakın bir bölgede veya kolon panel bölgesinde meydana gelmesi veya bu iki durumun birlikte oluşması tercih edilmemelidir. Kolon panel bölgesinde meydana gelen büyük plastik deformasyonlar taşıyıcı sistemde birleşimlere büyük ikincil kuvvetlerin etki etmesine sebep olacaktır. Plastik mafsallın kolon yüzünde oluşması ise kaynakta ve kaynak ısısından etkilenmiş bölgede büyük gerilmelerin oluşumuna sebebiyet verebilmektedir. Tüm bu sebeplerle plastik mafsallın kiriş içinde ve kolon yüzünden belli bir mesafede oluşumu arzu edilir. Plastik mafsallaşmanın kolon yüzünden belli bir uzaklıkta oluşması birleşimin bölgesel olarak güçlendirilmesi veya plastikleşme oluşması arzu edilen bölge dayanımının zayıflatılması ile gerçekleştirilir.



Şekil 1.8 : Plastik mafsalların gösterimi (FEMA-350).

1.3 Moment Birleşimlerinin Rijitlik ve Mukavemetine Göre Sınıflandırılması

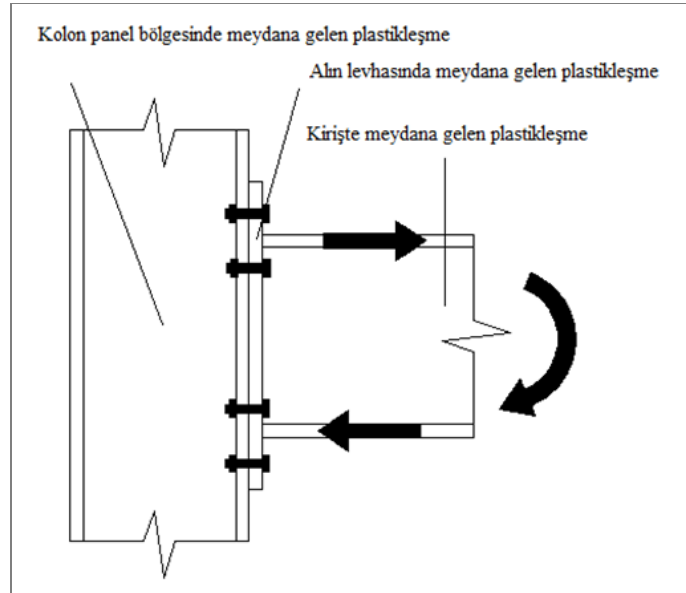
Kaynaklı birleşimler rijit birleşim olarak sınıflandırılırken alın levhalı birleşimler her zaman rijit birleşimler olmayabilir. Ancak bu birleşimlerle çevrimsel yükler altında önemli miktarda sismik performans elde edilebilir. Nortridge depreminden sonra kaynaklı birleşimlerde gözlemlenen problemler mühendisleri alternatif çözüm yollarına yönlendirmiştir. Bu sebeple bulonlu birleşimlerle imal edilen PR (Partially Restrained) olan ilgi artmıştır. PR birleşimler kısmi rijitlikli, kısmi mukavemetli veya her ikisi olabilir. Aşağıda FEMA-355D’de gösterilen benzer kesitlere ve farklı birleşim özelliklerine sahip birleşimlerin moment-dönme grafiklerini göstermektedir. Bu birleşimlerin bazıları kısmi mukavemetli birleşimlerdir ve kırışte nihai plastikleşme mukavemetine ulaşamamaktadır. PR birleşimler nihai mukavemetine ulaşana kadar önemli miktarda dönme kabiliyetine sahiptir.



Şekil 1.9 : Birleşimlerin sınıflandırılması (FEMA-350).

1.4 Alın Levhali Birleşimlerin Çevrimsel Yük Altındaki Davranışı

Alın levhali moment birleşimlerinin davranışı; geometrik çeşitliliği (4 bulonlu, 8 bulonlu olması vs.), kaldırma kuvvetinin etkisi ve birçok göçme modunun varlığından dolayı diğer birleşimlerden daha karmaşıktır. Alın levhali moment birleşimlerinin akma mekanizması, göçme modları ve plastik dönme kapasitesi sınırı birleşimin malzeme özelliklerine ve birleşimin geometrisine bağlıdır. Başlıca akma mekanizmaları; rijitlik levhasında oluşan deformasyonlar, kolon başlığında ve kolon gövdesinde oluşan deformasyonlar, kirişte eğilme etkisiyle oluşan deformasyonlar ve burkulmadan kaynaklanan deformasyonlar olarak sıralanabilir. Burkulmadan kaynaklanan deformasyonlar, kararlı ve güvenli plastik şekil değiştirme durumları değildir. Alın levhali birleşimlerde enerji tüketiminin en fazla olduğu kararlı şekil değiştirme durumu kirişin ve alın levhasının eğilme kuvveti etkisiyle plastikleşerek şekil değiştirmesiyle elde edilir. Ayrıca panel bölgesinin kesme kuvvetleriyle akmaya geçmesi durumunda birleşimde ciddi bir plastik davranış elde edilebilir. Ancak alın levhali birleşimlerdeki panel bölgesi deformasyonunu ön görmek kaynaklı birleşimlere göre daha zordur. Ayrıca panel bölgesinde meydana gelen deformasyonlar taşıyıcı sistemde ikincil moment etkilerinin oluşmasına sebebiyet verebilmektedir (FEMA-355D).

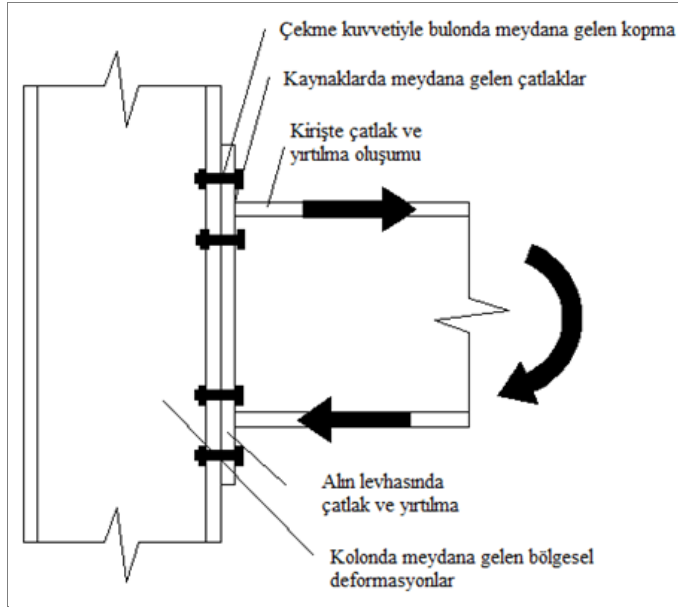


Şekil 1.10 : Akma mekanizması oluşabilecek bölgeler.

Uzatmalı alın levhali birleşimlerin kapasitesi, bulonların çekme kuvveti kapasitesi ile sınırlıdır. 4 bulonlu rijitlik levhali ve rijitlik levhasız birleşim tipleri küçük ebatlı kirişler için uygundur. Fakat 4 bulonlu alın levhali moment birleşimleri büyük kiriş

kesitlerinde tam plastik mafsall oluşumunu sağlayacak eğilme kapasitesine ulaşamazlar. Dolayısıyla 4 bulonlu geniş ve 8 bulonlu bağlantı tipi daha derin kirişler ve daha ağır başlıklı kirişler için kullanılır. 4 bulonlu geniş birleşim tipinde her başlık için 8 adet bulon bulunmaktadır. Fakat 4 bulonlu geniş olarak isimlendirilmektedir.

Alın levhalı birleşimlerin histeretik davranışı, göçme moduna bağlı olarak değişir. FEMA-355D alın levhalı birleşim için üç farklı göçme modu sunmuştur. Birinci durumda bulonların kopması, ikinci durumda alın levhasının akması, üçüncü şekilde ise kirişte plastik mafsall oluşması durumunda elde edilen moment-dönme grafiği görülmektedir. En iyi elastik ötesi performans ve enerji tüketimi kirişin akmaya ulaşması durumunda elde edilmiştir. Bulonların kopmasıyla göçme durumuna ulaşan sistemde düşük süneklilik tespit edilmiştir. Alın levhasının akması veya kirişte plastik mafsall oluştuğu durumlarda birleşimde yüksek süneklilik gözlemlenmiştir.

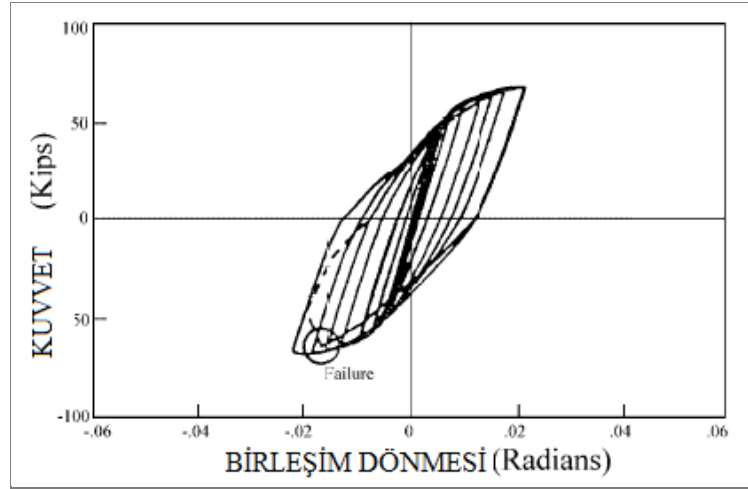


Şekil 1.11 : Gevrek kırılma meydana gelebilecek bölgeler.

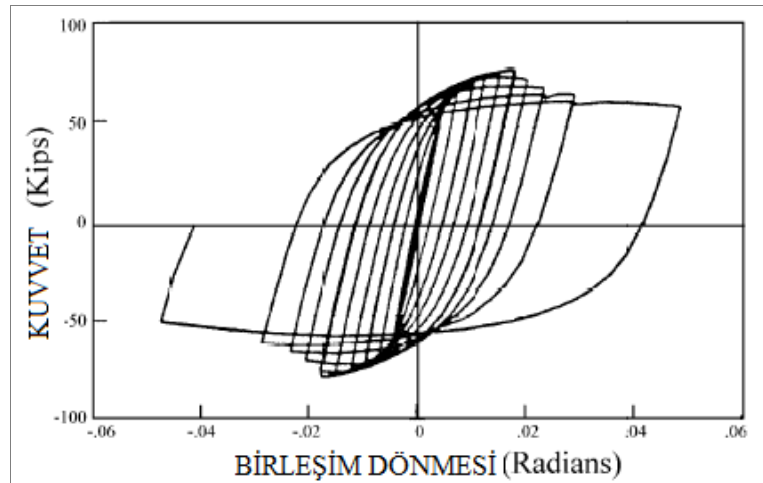
Alın levhaları ince ve kalın olmak üzere ikiye ayrılır. Yükleme altında alın levhasında akma meydana geliyor ise ince, akma meydana gelmiyorsa alın levhası kalın olarak nitelendirilir. İnce alın levhaları iyi bir süneklilik ve elastik olmayan deformasyon sağlayabilirler fakat bu durumda kirişte plastik moment kapasitesine ulaşamaz. Bu yüzden yapılan araştırmalarda kalın alın levhası kullanımı tavsiye edilmiştir. Kalın alın levhalı birleşimler büyük dönme açılarında dahi elastik davranış gösterir ve bulonlarda kaldırma kuvveti oluşmaz. İnce alın levhalı birleşimler plastik davranış sergilerler ve kaldırma kuvveti oluşumuna sebep olurlar. İnce alın levhalı birleşimler sismik tasarım için uygun değildir (FEMA-355D).

Yapılan deneylerde Alın Levhalı Moment Birleşimlerinde başka göçme modları da gözlemlenmiştir. Kolon başlığında bölgesel eğilme akması, kaldırma kuvveti etkisiyle oluşan bulon kopmaları, çekme bölgesinde alın levhasıyla kiriş arasındaki kaynakta çatlakların oluşması diğer göçme modlarına örnek olarak gösterilebilir.

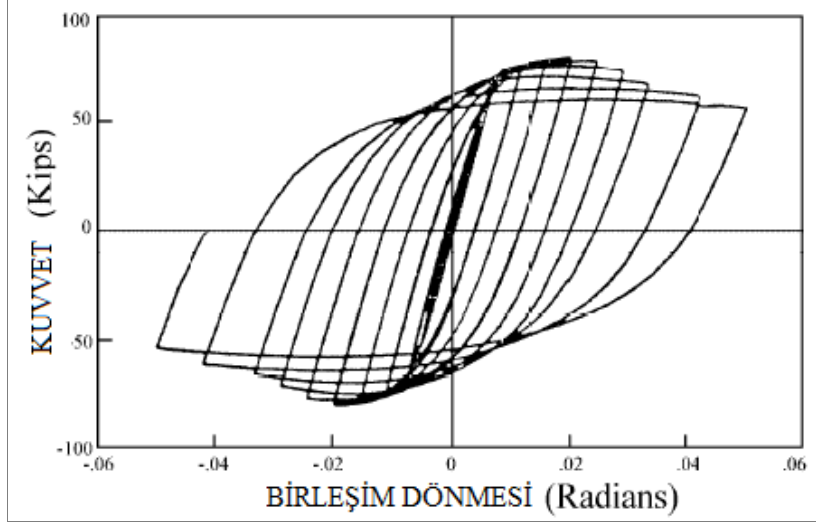
Ayrıca yapılan çalışmalarda birleşimlerde alın levhası ile kirişin kaynaklandığı bölgede köşe kaynağı kullanımından kaynaklanan çeşitli olumsuzluklar tespit edilmiş ve köşe kaynağı kullanıldığı durumlarda, birleşimlerden beklenen performansın elde edilemediği görülmüştür. Tam penetrasyonlu kaynakların kullanımı da deneylerde incelenmiş ve birleşimde kaynak giriş deliği yapılmadığı takdirde iyi bir performans sergilediği belirtilmiştir. Alın levhası ile kiriş arasındaki kaynağın çatlaması, sünekliğin, enerji tüketiminin ve elastik olmayan dönme kapasitesinin önemli ölçüde azalmasına neden olur (FEMA-355D).



Şekil 1.12 : Bulon kırılması M-φ grafiği (FEMA-355D).



Şekil 1.13 : Alın levhasında akma oluşması M-φ grafiği (FEMA-355D).



Şekil 1.14 : Kirişte akma oluşması M-φ grafiği (FEMA-355D).

1.5 Araştırmada Kullanılan Kaynaklar

EN1993-Part1-8, 2005 “Eurocode 3”

Çeşitli çelik sınıfları için çelik yapı birleşimlerinin statik yükler altında hesap esaslarını içermektedir. Birleşimlerde dönme rijitliği, dönme kapasitesi ve tasarım mukavemeti kavramları açıklanmıştır. Birleşenler metoduyla (Components Method) birleşimi oluşturan elemanların birleşim davranışına olan katkısı ayrı ayrı dikkate alınmaktadır.

FEMA 350/2000 Yeni çelik yapılar için tavsiye edilen depreme karşı tasarım kriterleri

Tasarım için tavsiye edilen kriterler dört ana bölümden oluşmaktadır. Genel gereksinimler bölümünde, çelik yapı tasarımında kullanılan mevcut standart ve yönetmelikler irdelenmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilen eksikliklere göre bazı tavsiyelerde bulunmaktadır. Standartlar bulunan hesap metoduna ek olarak alternatif performansa dayalı hesap yöntemi sunulmaktadır.

Birleşimlerin özelliklerinin anlatıldığı üçüncü bölümde çeşitli taşıyıcı sistemlerde kullanılabilecek birçok birleşim tipi incelenmiştir. Birleşimlerin tasarımı, detaylandırması ve kullanım sınırları detaylı olarak anlatılmıştır. Yeni birleşim tiplerinin geliştirilmesi için tavsiye ve metotlarda bulunmaktadır. Dördüncü bölümde ise analitik performans değerlendirme metodu sunulmaktadır.

Alın levhalı moment birleşimleri bölüm 3.6' da detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde tercih edilen taşıyıcı sistem tipine göre imalat detayları, kullanım limitleri ve tasarım metodu sunulmuştur.

FEMA 353/2000 Çelik yapılarda sismik uygulamalar için tavsiye edilen teknik özellikler ve kalite güvencesi rehberleri

Rehber iki ana bölümden meydana gelmektedir. Birinci bölümün başlığı tavsiye edilen teknik özellikler, İkinci bölümün genel başlığı ise kalite güvence rehberleri olarak isimlendirilmiştir. Birinci bölüm 5. kısımda Alın Levhalı Moment Birleşimlerinin başlık kaynağı, gövde kaynağı, rijitlik levhası kaynağı için tavsiyeler bulunmaktadır.

AISC 341-10 Çelik yapılar için sismik öngörüler

Çelik yapıların tasarımı, imalatı, saha kurulumu ve kalite kontrol ile ilgili bilgiler veren bir şartnamedir. İki ana bölümden oluşur. İlk bölümde çelik yapılar ile ilgili, ikinci bölümde ise betonarme ve kompozit yapılar ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Birinci bölüm ek kısmında çevrimsel yükler altında Kolon-Kiriş birleşimlerinin nasıl test edileceği açıklanmıştır.

AISC 358-10 Deprem yükü altında IMF ve SMF yapı sistemleri için güvenilirliği kanıtlanmış moment birleşimleri

Çelik yapı birleşimlerinin IMF ve SMF tipi taşıyıcı sistemler için tasarımı, detaylandırması, imalatı ve kalite kriterleri ile ilgili bilgi veren bir şartnamedir. Birleşimler için verilen sınırların dışında veya farklı bir birleşim tipinin kullanılabileceği belirtmektedir. Ancak bu durumda AISC 341-10 Ek-S de bulunan test yönergeleri ile bu birleşimin kullanılabilirliğinin kanıtlanmış olması gerekmektedir. Alın levhalı bulon birleşimlerinin tasarımı ve kullanım limitleri bölüm 6'da ayrıntılı olarak ele alınmıştır. C6 bölümünde ise 6.bölümün ayrıntılı açıklamaları mevcuttur.

AISC 360-10 Çelik yapılar için Şartname

Çelik yapıların tasarımı, imalatı ve kurulumu ile ilgili bir şartnamedir. Bölüm J 'de moment birleşimlerinin tasarım ilkeleri anlatılmıştır.

1.6 Araştırmanın Amaç ve Kapsamı

Çalışmanın 6 ana amacı mevcuttur.

Hedef.1: Avrupa normlarına uygun çelik profiller ile imal edilmiş alın levhalı

moment birleşimlerinin deprem bölgelerinde performansının ve karakteristik özelliklerinin (Rijitlik, Dönme kapasitesi, Süneklilik ve Nihai mukavemet) tespiti

Hedef.2: Alın levhalı moment birleşimlerinde kiriş geometrisi değişiminin birleşim karakteristik özellikleri ve performansı (Rijitlik, Dönme kapasitesi, Süneklilik ve Nihai mukavemet) üzerinde etkisinin tespiti

Hedef.3: S275 çelik sınıfı ile imal edilen birleşimlerin deprem bölgelerinde kullanım güvenliğinin ve performansının incelenmesi

Hedef.4: S275 çelik kalitesinin plastikleşme sonrası ek kapasitesinin belirlenmesi

Hedef.5: Alın levhalı moment birleşimlerinde plastik mafsal oluşum yerinin incelenmesi

Hedef.6: Sayısal analiz çalışması yapılarak deneysel çalışma sonuçlarının sayısal analiz çalışması ile karşılaştırılması

1.7 Yöntem ve Araştırma Yaklaşımı

Doktora tez konusunun genel kapsamı içinde yapılan literatür araştırması ve ön çalışmalar sonucunda, çalışmanın ana amacı (FEMA–350) ve (FEMA–353)’de verilen deney detayları ve sonuçları göz önüne alınarak, S275JR çelik kalitesi ve Avrupa profiller (IPE, HEB) kullanıldığında alın levhalı moment birleşimlerinin yönetmeliklerde (AISC 341-10; AISC 358-10 ve DBYYHY 2007) verilen kullanım sınırlarının değerlendirilmesi olarak belirlenmiştir.

Çalışmada göz önüne alınan alın levhalı moment birleşimlerinin ANSYS yazılımını kullanarak sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırılması yapılacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Thomas M. Murray (1988)

Murray (1988) makalesinde daha önce fabrika türü yapılarda kullanılan alın levhali moment birleşimi'nin tasarım metotlarındaki ve imalat tekniklerindeki ilerlemelerden dolayı yüksek katlı yapılarda kullanım alanının hızla arttığı vurgulamıştır. Çalışmada, geçmişte yapılan literatür araştırmalarına ve kolon kısmındaki limit durumu da dikkate alan tasarım metotlarına hem düz hem de uzatılmış alın levhali moment birleşimi için değinilmiştir. İki adet düz alın levhali moment birleşimi için kullanılan tasarım metodu akma çizgisi teorisine, diğer iki adet uzatmalı alın levhali moment birleşimi için kullanılan tasarım metodu ise sonlu elemanlar çalışmasına dayanmaktadır. Ayrıca kolon kısmındaki sınır durumları (kolon gövde burkulması, kolon gövde akması, kolon başlık eğilmesi) dikkate alan tasarım metotları da sunulmuştur.

2.2 A. R. Kukreti and P. Biswas (1997)

Alın Levhali Moment Birleşimlerinin deprem yükleri altında moment-dönme davranışını hesaplayan bir yazılım geliştirilmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Analiz için geliştirilmiş Newton-raphson yöntemi ve artımsal plastisite teorisi kullanılmıştır. Deneysel çalışma ile sonlu elemanlar çalışması birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

2.3 N. Nematia, D. Le Houedecb, R. Zandonini (2000)

Depreme karşı yapıların etkin tasarımı için yapının enerji yutma kabiliyetinin dayanımdan daha önemli olduğu belirtilmiştir. Birleşen metodunun ana felsefesinden bahsedilmiştir. Çalışmada birleşen metodunun geliştirilmesiyle yeni bir metot sunulması amaçlanmıştır. Yeni yöntemde birleşimin tersinir yükler altındaki performansı tespit edilmeye çalışılacaktır. Birleşim T-parçalara bölünerek incelenmiştir. Daha sonra T-parça için sonlu eleman çalışması yapılarak elastoplastik

yük-yerdeğiştirme grafiği elde edilmiş ve matematiksel enerji denge modeli çevrimsel ykleme altındaki tepkiyi elde etmek için kurulmuştur. Matematiksel modeli kurmak için gerekli olan veriler bu sonlu eleman çalışmasından elde edilmiştir. Daha sonra T-parçaların yerine yaylar konularak birleşimin moment-dönme grafiği elde edilmiş ve birleşimin yuttuğu enerji miktarı tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada alın levhalı moment birleşiminin çekme bölgesi T-parça benzeşimi yapılarak monotonik ve tersinir yükler altında incelenmiştir. Monotonik ykleme ile tersinir ykleme sonucu elde edilen grafiklerin arasındaki farklar sebepleriyle irdelenmiştir. Alın levhalı moment birleşimi'nin tasarımı için kullanılan birleşen metodunu sonlu elemanlar metodu yardımıyla geliştirerek lineer olmayan davranışın incelenmesi amaçlanmaktadır.

2.4 L. Simões da Silva, Ana Giraõo Coelho (2001)

Birleşen metoduna göre birleşim davranışına etki eden tüm unsurlar yaylar ile modellenmiştir. Her bir yay, iki doğrusal çizgiden oluşan kuvvet-yerdeğiştirme grafiği ile lineer olmayan malzeme davranışını temsil etmektedir. İncelenen birleşim tipine göre birleşim yay modeli değişiklik gösterir. Tüm birleşim modellerinde birleşim çekme, basınç ve kesme etkisine maruz bölgeler olmak üzere üçe ayrılır. Yazar alışmasında Eurocode 3'de bulunan yay modeline alternatif olarak başka bir basitleştirilmiş eşdeğer yay modeli sunmaktadır. Tüm paralel ve seri yaylar kendi bölgesinde birleştirilerek tek bir yay ile modellenmiştir. Teorik açıklama yapıldıktan sonra sayısal örnekler sunulmuştur.

2.5 Cavidan Yorgun (2001)

Alın levhalı moment birleşimi monotonik ve deprem yükleri altında incelenmiştir. Alın levhalı moment birleşimi'nin kullanım avantajlarından kısaca bahsedilmiş ve yapının sünek davranışıyla yapı birleşim özelliklerinin direk bağlantılı olduğu anlatılmıştır. Yarı-rijit moment birleşimlerinin kullanımıyla bina periyodunun arttığı ve dolayısıyla sistemin daha küçük deprem kuvvetlerine maruz kaldığı vurgulanmıştır. Mevcut çalışmada 6 adet alın levhalı moment birleşimi tersinir yükler altında incelenmiştir. Dayanım ön tahminleri Eurocode 3'de bulunan birleşen metoduna göre yapılmıştır. Alın levhası dayanımı akma çizgisi teorisine göre tespit

edilmiştir. Akma çizgisi teorisi ile Eurocode3'e göre hesaplanan dayanım değerleri deneysel çalışmadan elde edilen dayanım değerlerine göre daha düşük çıkmıştır.

Birleşimler iki adet sınır durum dikkate alınarak tasarlanmıştır. Birinci durumda birleşimin en zayıf elemanı alın levhasıdır. Birleşimin moment kapasitesi, kiriş plastik moment kapasitesinin %80'ine eşit olacak şekilde tasarlanmıştır. İkinci durumda ise kaldırma kuvveti etkisini azaltmak için alın levhası kalınlığı değiştirilmiştir ve birleşim kapasitesi kiriş plastik moment kapasitesine eşit olarak tasarlanmıştır. Deneysel çalışmada alın levhası kalınlığı arttıkça deformasyon oluşumunun alın levhasında azalmakta olduğu fakat bulonlarda arttığı gözlemlenmiştir. Alın Levhalı Moment Birleşimi'nin sahada montajı yapılırken kirişin bazen sahip olması gereken uzunluktan kısa olduğu fark edilmekte ve bu durumlarda alın levhası ile kolon yüzü arasına ince bir ara eleman yerleştirilmektedir. Mevcut çalışmada boşluk doldurmak için yerleştirilen bu ara elemanın deprem yükleri altındaki performansı da incelenmiştir. Alın levhası ile kolon arasına kısa (I) profili konulmuş ve bu şekilde hazırlanan birleşenin yeterli miktarda mukavemete, dönme kapasitesine ve rijitliğe sahip olduğu görülmüştür.

2.6 R. Zandonini and O.S. Bursi, (2002)

Bu çalışmada alın levhalı moment birleşimi tersinir yükler altında incelenmiştir. Çalışmanın giriş bölümünde yarı-rijit birleşim tasarımının öneminden ve avantajlarından bahsedilmiştir. Eurocode-3'de hesap esasları anlatılan birleşen metodu kısaca açıklanmıştır. Deneysel çalışma ayrı T-Parça, birleşik T-Parça ve tam mesnet olarak üç ayrı deney modeli oluşturarak gerçekleştirilmiştir. Birleşen metodunun statik analiz için başarıyla kullanıldığı bilinmektedir. Bu çalışmadaki amaç birleşen metodunu geliştirilerek sismik tasarıma kullanılır hale getirmektir. Deneysel çalışmada alın levhası kalınlığı, bulon çapı, ve kolon kesiti değişken parametre olarak kullanılmıştır. Kolon-kiriş birleşimleri yarı rijit olarak ve göçme kolon panel bölgesinde veya birleşim bağlantı kısmında oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Yükleme protokolü olarak monotonik yükleme dışında 7 ayrı yükleme protokolü kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda deneysel çalışmada kullanılan alın levhalı moment birleşimi'nin dönme kapasitelerinin 35 mrad'dan büyük olduğu ve dolayısıyla sünek davranış sergilediği belirtilmektedir. Birleşen metodunun sismik tasarım için gereken hassasiyette doğru sonuçlar vermediği gözlemlenmiştir.

2.7 Ana M. Girão Coelho, Frans S. K. Bijlaard, Luís Simões da Silva (2004)

Kolon- kiriş birleşimlerinde oluşan lineer olmayan davranışın sebeplerinden kısaca bahsedilmiştir. Bu bölgedeki davranışın daha kolay anlaşılması amacıyla lineer olmayan davranışa etken olan unsurlar vurgulanmış ve birleşim bölgesi çekme, basınç ve kayma bölgesi olarak üçe ayrılmıştır. Kolon ve kiriş bölgesinde oluşan T-parça benzeşimi açıklanmıştır.

Deneysel çalışmada 8 adet alın levhalı moment birleşimi statik yükleme uygulanarak göçme moduna kadar incelenmiştir. Kolon için HE340M profili, kiriş için ise IPE300 profili kullanılmıştır. Kolon çelik sınıfı S355, kiriş çelik sınıfı S235' dir. Çalışmada alın levhası çelik sınıfı ve alın levhası kalınlığı parametre olarak kabul edilmiştir. Kirişte plastik mafsall oluşumuna imkân vermeyecek şekilde kolon-kiriş birleşimleri düzenlenmiştir. Birleşimlerde göçme alın levhasında veya bulonlarda meydana gelecek şekilde tasarlanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki alın levhası kalınlığı arttıkça birleşimin dönme kapasitesi azalmakta, eğilme dayanımı ve dönme rijitliği artmaktadır. Deneysel çalışmada göçme modu olarak alın levhasında ve bulonlarda ciddi deformasyonlar oluştuğundan sonra kaynakta kopma, bulon da sıyrılma ve kopma gözlemlenmiştir.

2.8 Maggi, R.M. Gonçalves, R.T. Leon, L.F.L. Ribeiro (2005)

Birleşimlerde yarı rijit davranışın çerçeve analizi için olan avantajları vurgulanmıştır. Yarı-rijit davranışın belirlenmesi karmaşık bir olaydır. Bir çok birleşim tipinin bulunması, geometrik süreksizliklerin ve gerilme yoğunlaşmalarının bulunması, sürtünme ve kayma gibi doğrusal olmayan etkilerin varlığı, kaldırma kuvveti etkisi gibi bir çok unsur yarı rijit birleşim davranışını yapı analizine dahil etmeyi zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada yarı rijit birleşim davranışını incelemek için ileri düzeyde detaya sahip çok sayıda sonlu elemanlar çalışması yapılmıştır. Deneysel çalışmada alın levhası kalınlığı ve bulon çapı değişken olarak kabul edilmiştir. 16 mm'lik bulonlar kullanıldığında alın levhası kalınlığının değişiminin birleşimin plastik davranışı üzerinde çok büyük etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bulon çapı arttıkça bu etki azalmıştır. Deneysel çalışma ile sonlu elemanlar çalışması kalibre edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde lineer olmayan malzeme modeli kullanılmış ve geometrik süreksizlikler dikkate alınmıştır. Analitik çalışmaların sonuçları ile deneysel çalışmanın sonuçları birbirine uyumludur. Çalışmada T-parça benzerliği

kullanılarak yapılan hesap metodu irdelenmiştir.

2.9 P. Nogueiro, L. Simões da Silva, R. Bento and R. Simões (2006)

Avrupa profilleri kullanılarak, altı adet kolon-kiriş birleşimi değişik kolon ebatları için monotonik ve tersinir yükler altında incelenmiştir. Birleşimlerin moment-dönme grafikleri sunulmuştur. Monotonik yükleme sonucu birleşimin göçme modu, moment kapasitesi, birleşim rijitliği bilgileri elde edilmiştir. Tersinir yükleme sonucunda birleşimin enerji tüketimi, başlangıç ve akma sonrası birleşim rijitliği gözlemlenmiştir. Çalışmada birleşim kaynağı sebebiyle oluşan ısıdan etkilenen bölge metalografik çalışmayla incelenmiştir. Birinci gruptaki deneysel çalışmada HEA320, ikinci grup deneysel çalışmada ise HEB320 profili kolon olarak seçilmiştir. Tüm detaylar aynıdır. Sadece kolon süreklilik levhası HEA320 de 15mm, HEB320' de 18mm tercih edilmiştir. Tüm deneysel çalışmada S355 çeliği kullanılmıştır. Monotonik yükleme sonucunda HEB320 kolonunun bulunduğu birleşim de başlangıç rijitliği ve moment dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Her iki deneyde de göçme modu kesme etkisindeki kolon panel bölgesinde oluşmuştur. HEA320' nin kullanıldığı birleşim daha sünek bir davranış sergilemiştir.

2.10 Anant R. Kukreti, Feng-Feng Zhou (2006)

Bir çok kolon-kiriş birleşiminin yarı-rijit birleşim olarak değerlendirilmesi gerekirken, başta AISC olmak üzere, tasarım şartnamelerinde yarı rijit birleşimler için detaylı bilgi bulunmadığı ve yarı rijit birleşim kabulünün yapı çerçeve analizinde pek kullanılmadığı belirtilmektedir. 8 bulonlu rijitlik levhalı, alın levhalı bir birleşimin yarı rijit davranışı incelenmiştir. Sonlu elemanlar çalışması ve deneysel çalışma yapılarak birleşimin M- ϕ davranışı tespit edilmeye çalışılmış ve birleşim modelinin kullanıldığı bir çerçeve analizi yapılmıştır. Çerçeve analizi sonucunda, birleşim özelliklerinin sistem davranışı üzerinde çok önemli etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada birleşim davranışının sınıflandırılabilmesi için bir denklem verilmiştir.

2.11 Ana M. Girão Coelho, Frans S.K. Bijlaard -(2007)

Yüksek mukavemetli çelik kullanımının yumuşak çeliğe göre avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır. Yüksek mukavemetli çelik kullanımı gerekli taşıyıcı sistem ebatlarını küçülmesine yardımcı olur. Çelik daha yüksek gerilme değerlerinde akma durumuna geçer. Bununla birlikte büyük deformasyonlara maruz kalan birleşim bölgelerinde süneklik azalır. Deneylerde kolon ve kirişte S355 çeliği, alın levhasında ise S690 çeliği kullanılmıştır. Deney sonuçlarında alın levhasının kalınlığı arttıkça birleşimin rijitliği ve dayanım momenti artmıştır. Alın levhasının kalınlığı arttıkça birleşim dönme kapasitesi azalmıştır. Yüksek mukavemetli çelikte birlikte ince alın levhası kullanılarak 0,04 radyan ve üzeri dönme kapasitesi elde edilmiştir. Deneylerde 10.9 sınıfı bulon kullanılmıştır ancak bu bulonların kullanımı tavsiye edilmemektedir. Çünkü yeterli sünekliğe sahip olmadığı için bulon başlıklarında kopmalar gözlemlenmiştir. 8.8 sınıfı bulon kullanımı tavsiye edilmiştir.

2.12 Yongjiu Shi, Gang Shi, Yuanqing Wang-(2007)

Rijitlik levhalı, uzatmalı alın levhalı kolon- kiriş birleşiminde $M-\phi$ ilişkisini tespit etmek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde alın levhalı moment birleşimi'nin toplam dönme kapasitesinde panel bölgesinin, bulonların, alın levhasının ve kolon başlığının katkıları ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Dönmeye katkısı olan elemanlar ayrı ayrı analiz edildikten sonra bu katkılar süperpoze edilerek birleşimin ($M-\phi$) ilişkisi elde edilmiştir. Analitik modeli doğrulamak amacıyla beş birleşim deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, analitik modelin alın levhalı birleşimlerde dönme davranışını temsil edebildiğini göstermiştir.

2.13 Cheol Min Yang, Young Moon Kim (2007)

Birleşimlerde yarı rijit davranışın sistem davranışı üzerindeki etkisi ve yarı rijit davranış kabulünün sistem analizi için olan avantajları vurgulanmıştır. Kaynaklı birleşimler ile yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerin deprem yükleri altındaki performansı incelenmiştir. 3 farklı deney numunesine tersinir yük uygulanmıştır. Bu deney numunelerinin konfigürasyonları aynı olmakla birlikte birleşim tipleri farklıdır.

2.14 Gang Shi, Yongjiu Shi, Yuanqing Wang (2007)

Alın levhalı moment birleşimlerinin deprem yükleri altındaki davranışı araştırılmıştır. Rijitlik levhalarının, süreklilik levhalarının, bulonların ve alın levhası kalınlığının birleşim davranışına olan etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada sekiz adet birleşim tersinir yükler altında gözlemlenmiş ve bu deneylere ait sonuçlar (moment kapasitesi, histeretik eğriler, dönme rijitliği, dönme kapasitesi) sunulmuştur. Bu gözlemler ışığında bazı detaylar tavsiye edilmiştir. Sonuç olarak uzatılmış alın levhalı moment birleşimi'nin sünek taşıyıcı sistemler için uygun olduğu fakat düz alın levhalı moment birleşimi'nin yeterli rijitliğe ve enerji tüketme kabiliyetine sahip olmadığı için sünek taşıyıcı sistemlerde tavsiye edilmediği belirtilmiştir.

2.15 Lutz Nasdala, Birger Hohn, Reinhard Rühl (2007)

Tek sıra bulonlu, düz, alın levhalı moment birleşimlerinde ($M-\phi$) moment-dönme denklemlerinin tahmini için Ramberg-Osgood ve Three-Parameter Power modellerinin oluşturulması anlatılmaktadır. Kolon-kiriş birleşim bölgesinde yük-deformasyon analizi için sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Bu sonlu elemanlar modeli, malzeme davranışı, sistem geometrisi ve temas elemanı davranışı için lineer olmayan durumu temsil etmektedir. Oluşturulan sonlu eleman modeli 1980'lerde yapılan test sonuçları ve raporlar ile doğrulanmıştır. Düz alın levhalı birleşimler değişen geometri durumları için deneyler yapılarak incelenmiştir. Birleşimin ($M-\phi$) grafiği bu testler için FEM analizi ile elde edilmiştir. Elde edilen grafik Ramberg-Osgood ve Three Parameter Power eğrilerine bu denklemleri tanımlayan parametreleri elde etmek için uyarlanmıştır. Son olarak elde edilen model parametreleri için tahmin denklemleri, geometrik değişkenlerin bir fonksiyonu olarak geliştirilmiştir.

2.16 M.R. Mohamadi-shooreh, M. Mofid (2008)

Taşıyıcı sistemin davranışını doğru tespit edebilmek için birleşimlerin yarı rijit davranışının ve birleşim başlangıç dönme rijitliğinin bilinmesi gerektiği vurgulanmıştır. Sonlu elemanlar modellemesi kullanılarak bulonlu-düz alın levhalı birleşimlerin başlangıç dönme rijitliği üzerine yapılan parametrik analizlerin

sonuçları sunulmuştur. Sonlu elemanlar analizinde malzeme davranışı, geometrik süreksizlikler ve büyük deplasmanlar dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları yapılan deney sonuçları ile kalibre edilmiştir.

2.17 Gang Shia, Yongjiu Shia, Yuanqing Wang, Mark A. Bradford (2008)

Ön gerilmeli bulonlu alın levhalı moment birleşimleri ANSYS programı kullanılarak modellenmiştir. Deney sonuçlarıyla kıyaslandığında, sonlu eleman modellerinin gerçek malzeme davranışını doğru bir şekilde temsil ettiği görülmüştür. (M- ϕ) ilişkisi, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki temas etkileri, alın levhası davranışı, panel bölgesi davranışı, ön germeli bulon kuvveti etkisi gibi hususların yanı sıra sonlu eleman analiz sonuçlarıyla, deneysel çalışmada tespit edilmesi zor olan basınç dağılımı, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki sürtünme, bulon ön gerilmesinin kolon başlığına etkisi, mesnet momenti, maksimum-minimum gerilme akışı gibi birçok etki ANSYS programı yardımıyla incelenmiştir.

2.18 Aleksander Kozlowski, Ryszard Kowalczyk and Marian Gizejowski (2008)

Çelik yapı birleşimleri ve kompozit birleşimler için başlangıç rijitliğinin ve moment dayanımının tespit edilmesinde kullanılabilecek ampirik formüller geliştirilmiştir. Eurocode 3 ve Eurocode 4' te sunulan birleşen metodu zaman alan ve kullanımı zor bir metottur. Bu çalışmada tavsiye edilen ampirik formüller yardımıyla, çelik yapıların ön tasarımı mühendise kolaylık sağlamak amaçlanmıştır. Çalışmada geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla kolon boyutunun, kiriş boyutunun, alın levhası kalınlığının, bulon çapının, çelik malzeme sınıfının ve bulonlar arası düşey mesafenin başlangıç rijitliği üzerindeki etkisi grafik olarak gösterilmiştir. Ayrıca tavsiye edilen ampirik formül, EC-3 hesap metodu ve deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Yaklaşık %30 hata payı gözlemlenmiştir. Çeşitli birleşim tipleri için ampirik formüller tablo olarak sunulmuştur.

2.19 Minas E. Lemonis, Charis J. Gantes (2009)

Kolon-kiriş birleşimleri birleşenlerine ayrılarak, her bir parametre için lineer olmayan mekanik modeller oluşturulmuştur. Mekanik model ile çalışmanın, analitik ve sonlu elemanlar modeline göre avantajına dikkat çekilmiştir. Oluşturulan bu

mekanik model yardımıyla birleşimin M- ϕ eğrisinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Birleşim çekme bölgesi T-parça kabulü yapılarak karakterize edilmiştir. Oluşturulan modelin doğruluğunu kıyaslamak için sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Mekanik modelin yeterli doğrulukta sonuç verdiği görülmüştür.

2.20 A.A. Del Savio, D.A. Nethercot ve diğerleri (2009)

Gerçekçi bir yapı modellemesi için yarı rijit birleşim modelinin avantajları vurgulanmış ve birleşimlerin eksenel yüklere maruz kalabileceği durumlara dikkat çekilmiştir. Yapı birleşimlerinin davranışını tespit etmek amacıyla yapılmış teorik, ampirik ve deneysel çalışmalar özet olarak sunulmuştur. Eurocode' da eksenel yüke maruz birleşimlerin başlangıç rijitliği ve moment kapasitesinin belirlenmesi için bir hesap metodu sunulmamıştır. Yapılan çalışmada bu eksik giderilmeye çalışılmıştır. Eğilme momenti ve eksenel yüke maruz kolon-kiriş birleşimleri için birleşim parametrelerinin genel birleşim davranışına katkısını esas alan bir metot sunulmuştur. Analitik sonuçlar ile deney sonuçları uyumludur.

2.21 Hooman Farrokhi, F. Danesh, Sassan Eshghi (2009)

Kaynaklı kolon-kiriş birleşimlerinde, kaynak kökündeki kusurlardan dolayı birleşimlerin performansındaki düşüşe dikkat çekilmiştir. Yapılan çalışmada üst örtü levhasına (Cover Plate) delik açılarak kaynak bölgesinde oluşması beklenen gerilme yoğunluğunun delik bölgesine geçmesi amaçlanmıştır. Böylelikle büyük deprem kuvvetleri sebebiyle kaynak bölgesinde oluşan prematüre çatlakların önüne geçilerek daha sünek bir birleşim performansının elde edilmesi amaçlanmıştır. Birleşimdeki parametrelerin değişiminin birleşim performansı üzerindeki etkisi grafik olarak gösterilmiştir. Sonlu eleman çalışması ve deneysel çalışma yapılmıştır.

2.22 D.T. Pachoumis, E.G. Galoussis, C.N. Kalfas, A.D. Christitsas (2009)

Amerika Birleşik Devletlerinde azaltılmış kesitlerin deprem performansı üzerine çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen Avrupada bu konuya ilişkin yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu araştırmada Avrupa'da kullanılan çelik profilleri kullanılarak azaltılmış kiriş kesitlerinin deprem yükleri altındaki performansı incelenmiştir. FEMA ve Eurocode-8'e göre detaylandırılmış iki ayrı

numune oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda FEMA'ya göre detaylandırılmış numunede beklenen plastikleşme görülürken, Eurocode'a göre hazırlanmış numune beklenen performansı sergileyememiştir. Hatta plastikleşmenin kiriş gövdesinde oluşması beklenirken kiriş alt başlığında olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonlu eleman çalışmalarıyla desteklenmiştir.

2.23 Concepción Díaz ve diğerleri (2011)

Tek yönde uzatılmış alın levhali birleşim ANSYS programı yardımıyla 3D olarak simüle edilmiştir. Sayısal analiz modelinde bulonda ön-germe kuvvetinin uygulanması, malzeme ve geometrik olarak doğrusal olmayan durumlar, alın levhası ile kolon arasındaki temas durumu oluşturulan modele dahil edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasından elde edilen moment-dönme eğrisi literatür çalışması ve Eurocode 3 de sunulan modelin moment-dönme eğrisi ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Sonlu eleman modelinin oluşturulması da yapılan çalışmada izah edilmektedir.

2.24 H. Augusto, C. Rebelo & L. Simões da Silva (2012)

Çalışmada kısmi mukavemetli alın levhali kolon kiriş birleşimini çevrimsel yük altında incelemek amacıyla ABAQUS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sayısal analiz çalışmasında birleşim bölgesi ve T-parça kısmı incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçları daha önce yapılan deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmış ve doğrulanmıştır.

2.25 Abdelrahim Khalil Dessouki ve diğerleri (2013)

Alın levhali birleşimler parametrik çalışma gerçekleştirmek amacıyla ANSYS programı kullanılarak simüle edilmiş ve literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Parametre olarak kiriş derinliği, alın levhası kalınlığı, bulon çapı ve bulonlar arası mesafele incelenmiştir. Alın levhasının eğilme kapasitesini tespit etmek amacıyla akma çizgisi analiz yöntemi kullanılarak analitik hesap yöntemi sunulmuş ve bu yöntem sonlu elemanlar yöntemi ve şartnameler ile kıyaslanarak doğrulanmıştır.

3. ALIN LEVHALI MOMENT BİRLEŞİMLERİNİN TASARIMI

Alın levhalı moment birleşimlerinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken dört unsur mevcuttur. Bunlar birleşim tasarım momenti, alın levhası ve kolon başlık mukavemeti, birleşim bulon mukavemeti olarak sıralanabilir.

3.1 Birleşim Tasarım Momenti Hesabı

Taşıyıcı sistemde meydana gelen katlar arası ötelenme, elastik ve plastik çerçeve deformasyonlarının oluşmasına sebep olur. Plastik deformasyonlar, taşıyıcı sistemde plastik mafsalların oluşumuyla sağlanır. Bölüm 1’de de açıklandığı üzere alın levhalı birleşimler kullanıldığı takdirde plastik mafsalların kirişte, kolon yüzünden belli bir mesafede oluşumu tavsiye edilmektedir. Böylelikle güçlü kolon, güçlü birleşim, zayıf kiriş tasarım felsefesi sağlanmış olur.

3.1.1 Plastik mafsalda oluşan moment

$$M_{pe} = C_{pr} \cdot R_y \cdot F_y \cdot Z_x \quad (3.1)$$

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \quad (3.2)$$

R_y : Beklenen akma gerilmesinin minimum akma gerilmesine oranıdır.

F_y : Çeliğin akma gerilmesi değeridir.

F_u : Çeliğin kopma gerilmesi değeridir.

Z_x : Kirişin plastik moment dayanımıdır.

3.1.2 Kritik kesitte oluşan moment

Alın levhalı moment birleşimi tasarımında kritik kesit, kolon başlık yüzeyidir. Kolon başlık yüzeyinde oluşan moment (M_{cf}), plastik mafsalda oluşan moment (M_{pe}) ile plastik mafsaldaki kesme kuvvetinin (V_u) eksantiresinden kaynaklanan momentlerin

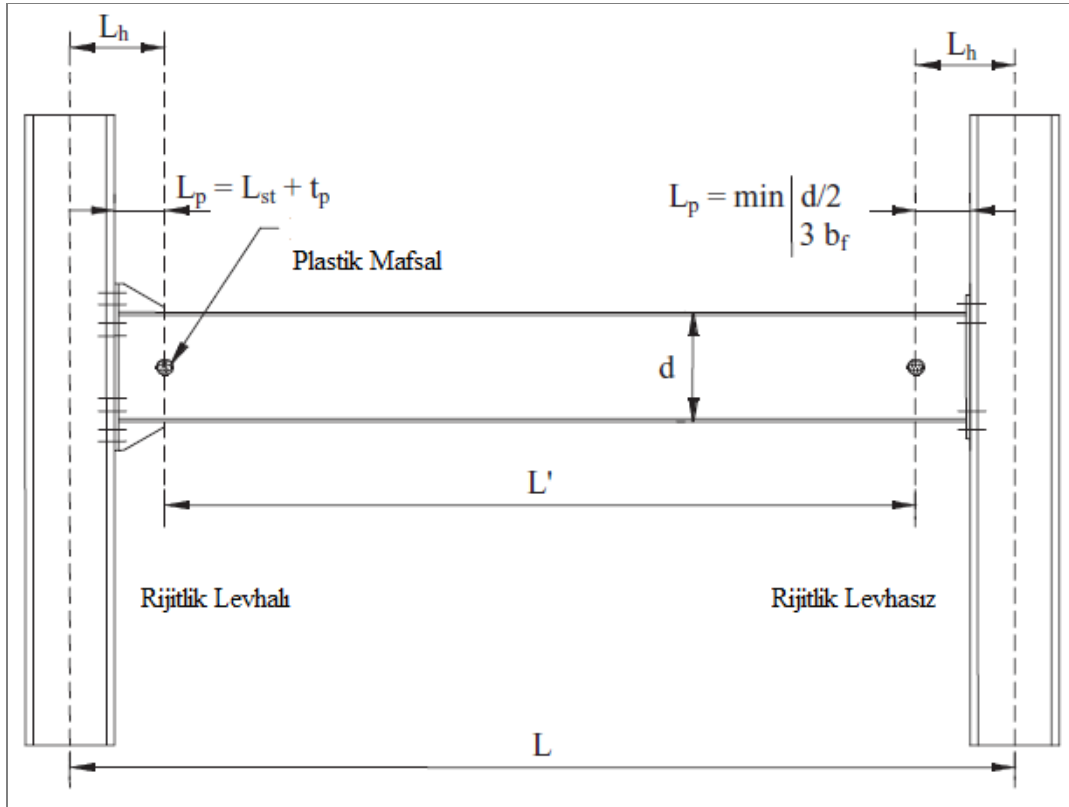
toplamına eşittir. Kirişlerdeki plastik mafsallın konumu kullanılan alın levhası birleşim tipine bağlıdır. Alın levhalı birleşimde rijitlik levhalı ve rijitlik levhasız birleşimlerde plastik mafsallın konumunu farklıdır. Rijitlik levhasız alın levhalı moment birleşimlerinde plastik mafsallın mesafesi için, kiriş derinliğinin yarısı mesafenin veya kiriş başlık genişliğinin 3 katı mesafesinin minimumu kabul edilir. Rijitlik levhalı alın levhalı birleşimlerde plastik mafsall, rijitlik levhasının bittiği yerde oluşur. d : Kiriş derinliği, t_p : Alın levhası kalınlığı, L_{st} : Alın levhasındaki rijitlik levhası uzunluğu olmak üzere kolon yüzeyinde oluşan kritik momentler aşağıdaki gibi hesaplanır (AISC358-10, AISC Design Guide 4, FEMA350, Moment Connections for Seismic Applications-Canadian Institute of Steel Construction).

Rijitlik levhasız birleşimde

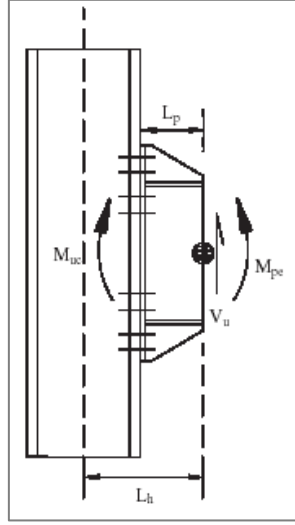
$$M_{uc} = M_{pe} + V_u \min\left(\frac{d}{2}; 3b_f\right) \quad (3.3)$$

Rijitlik levhalı birleşimde

$$M_{uc} = M_{pe} + V_u (L_{st} + t_p) f \quad (3.4)$$



Şekil 3.1 : Plastik mafsallın yeri (AISC Design Guide-4, 2003).



Şekil 3.2 : Birleşim momentinin hesaplanması (AISC Design Guide-4, 2003).

3.2 Alın levhası ve Kolon Başlık Mukavemetinin Hesabı

Alın levhası ve kolon başlığı, kritik kesitte meydana gelen eğilme momentine dayanacak mukavemette olmalıdır. Her iki kısım için dayanım akma çizgisi teorisi ile hesaplanır.

3.2.1 Akma çizgisi teorisi

Akma çizgisi teorisi betonarme döşemelerin dayanım hesabında da kullanılan bir metottur. Akma çizgisi boyunca malzemede plastik mafsall oluştuğu kabul edilir. Akma çizgisi analizi virtüel iş (enerji metodu) ve denge metodu kullanılmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilir. Çelik plakaların mukavemetinin tespiti için genel olarak tercih edilen metot virtüel iş metodudur ve alın levhası ile kolon başlık eğilme mukavemetinin tahmin denklemlerini geliştirmek için kullanılmıştır. Sanal iş metodu bir enerji metodudur. Bir plakanın akma çizgisi modelini tespit etmek için çeşitli akma çizgisi modelleri göz önünde bulundurulmalıdır. En düşük göçme mukavemetinin elde edildiği akma çizgisi modeli geçerli akma çizgisi modeli olarak kabul edilir. Alın levhasının ve kolon başlık mukavemetinin belirlenmesinde akma çizgisi teorisi kullanılırken üç adıma ihtiyaç vardır. (AISC Design Guide-4)

1. Bir akma çizgisi modelinin kabulü,
2. İç ve dış iş için denklemlerin yazılması,
3. İç ve dış iş eşitliğinin çözümü,

3.2.2 Birim sanal dönmeye göre iç iş

Akma çizgisi teorisinde bir akma çizgisi modelinde depolanan iç iş, mekanizmayı oluşturan her bir akma çizgisinde depolanan iç işlerin toplamı kadardır. Karmaşık modeller için, iç iş kartezyen sistemde x ve y bileşenlerine ayrılabilir. Akma çizgisi modelinde depolanan iç işin genel ifadesi

$$W_i = \sum_{n=1}^N (m_p \theta_{nx} L_{nx} + m_p \theta_{ny} L_{ny}) \quad (3.5)$$

θ_{nx} ve θ_{ny} rijit plaka bölümünün rölatif dönmelerinin x ve y koordinatlarındaki bileşenleridir. L_{nx} ve L_{ny} akma çizgisi uzunluğunun x ve y koordinatlarındaki bileşenleridir. m_p birim uzunluk için alın levhası plastik moment dayanımıdır.

$$m_p = F_{yp} Z_p = F_{yp} \left[\frac{(1) \times t_p^2}{4} \right] \quad (3.6)$$

İç iş, W_i , akma çizgisi modeli kenarıyla iç bulonlar arasındaki mesafeyi içerir. W_i 'nin s'ye göre minimize edilmesi, akma çizgisi modeli için en düşük iç enerjiyi verir.

3.2.3 Birim sanal dönmeye göre dış iş

$$W_e = M_{pl} \cdot \theta = M_{pl} \cdot \left(\frac{1}{h} \right) \quad (3.7)$$

M_{pl} :Alın levhası eğilme mukavemeti,

θ :Uygulanan virtüel deplasman,

h :Basınç başlığının merkezinden alın levhasının çekme bölgesi kenarına olan uzaklıktır.

$W_i = W_e$ olarak denklemler eşitlenerek içinden M_{pl} çekilir. Akma çizgisi denklemlerini basitleştirmek için bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller sırasıyla şöyle özetlenebilir. Delikler ile alın levhası veya kolon başlığında meydana gelen malzeme kaybı dikkate alınmamaktadır. Kiriş veya kolon gövdesi kalınlığı akma çizgisi denklemlerinde sıfır olarak kabul edilir. Başlık ve rijitlik levhası boyunca köşe kaynağı genişliği gövde akma çizgisi denklemlerinde göz önünde bulundurulmaz. Alın levhalı kolon-kiriş birleşimlerinde kiriş başlık çekme kuvvetleri, birleşim bulonlarıyla kolon başlığına aktarılır. Bulonun çekme kuvvetlerine karşı koyabilmesi için kolon başlığının yeterli dayanıma sahip olması gerekir. Kolon başlığı, rijitlik levhalı ve rijitlik levhasız olarak düzenlenebilir. Rijitleştirilmiş kolon başlığında başlık rijitlik levhası (süreklilik levhası) kolon gövdesine dik olacak şekilde kiriş başlığıyla aynı hizada kaynaklanır.

Rijitleştirilmemiş kolon başlığında rijitlik levhası veya süreklilik levhası bulunmaz.

3.3 Dört Bulonlu Rijitlik Levhasız Alın levhalı Birleşim Dayanımı Hesabı

Dört bulonlu rijitlik levhasız uzatılmış alın levhalı moment birleşimi için, iç iş ve dış iş denklemlerini eşitleyerek alın levhası mukavemeti aşağıdaki gibi elde edilir (AISC358-10, AISC Design Guide 4, FEMA350, Moment Connections for Seismic Applications-Canadian Institute of Steel Construction).

$$\phi M_{pl} = \phi_b F_{yp} t_p^2 Y_p \quad (3.8)$$

$$Y_p = \left(\frac{b_p}{2}\right) \left[h_1 \left(\left(\frac{1}{p_{fi}} \right) + \left(\frac{1}{s} \right) \right) + \left(h_0 \left(\frac{1}{p_{fo}} \right) \right) - \left(\frac{1}{2} \right) \right] + \left(\frac{2}{g} \right) [h_1 (p_{fi} + s)] \quad (3.9)$$

$$s = \left(\frac{1}{2} \right) \sqrt{b_p g} \quad (3.10)$$

Dayanım hesabında $\phi_b = 1$ kabul edilir. Y_p denklemde yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$Y_p = F_{yp} t_p^2 \left[\left(\frac{b_p}{2} \right) \left[h_1 \left(\left(\frac{1}{p_{fi}} \right) + \left(\frac{1}{s} \right) \right) + \left(h_0 \left(\frac{1}{p_{fo}} \right) \right) - \left(\frac{1}{2} \right) \right] + \left(\frac{2}{g} \right) [h_1 (p_{fi} + s)] \right] \quad (3.11)$$

Denklem tekrar düzenlenir ve t_p ifadesi çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$t_p = \sqrt{\frac{M_{pl}}{F_{yp} \left[\left(\frac{b_p}{2} \right) \left[h_1 \left(\left(\frac{1}{p_{fi}} \right) + \left(\frac{1}{s} \right) \right) + \left(h_0 \left(\frac{1}{p_{fo}} \right) \right) - \left(\frac{1}{2} \right) \right] + \left(\frac{2}{g} \right) [h_1 (p_{fi} + s)] \right]} \quad (3.12)$$

3.4 Dört Bulonlu Rijitlik Levhasız Alın Levhalı Birleşim Kolon Başlık Dayanımı Hesabı

Dört bulonlu rijitlik levhasız uzatılmış alın levhalı moment birleşimi için, iç iş ve dış iş denklemlerini eşitleyerek kolon başlık mukavemeti aşağıdaki gibi elde edilir

(AISC358-10, AISC Design Guide 4, FEMA350, Moment Connections for Seismic Applications-Canadian Institute of Steel Construction).

$$\phi M_{cf} = \phi_b F_{yp} t_p^2 Y_p \quad (3.13)$$

$$Y_c = \left(\frac{b_{fc}}{2}\right)h_1\left(\frac{1}{s}\right) + \left(h_0\left(\frac{1}{s}\right)\right) + \left(h_1\left(\frac{2}{g}\right)s\right) + \left(\frac{3c}{4}\right) + \left(h_0s\right) + \left(\frac{c}{4}\right) + \left(\frac{c^2}{4}\right) + \left(\frac{g}{2}\right) \quad (3.14)$$

$$s = \left(\frac{1}{2}\right)\sqrt{b_{fc}g} \quad (3.15)$$

Dayanım hesabında $\Phi_b = 1$ kabul edilir. Y_p denklemde yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$M_{cf} = F_{yc} t_{cf}^2 \left[\frac{b_{cf}}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{s} \right) \right] + \frac{2}{g} \left[h_1 \left(s + \frac{3c}{4} \right) + h_0 \left(s + \frac{c}{4} \right) + \frac{c^2}{2} \right] + \frac{g}{2} \right] \quad (3.16)$$

Denklem tekrar düzenlenir ve t_{cf} ifadesi çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

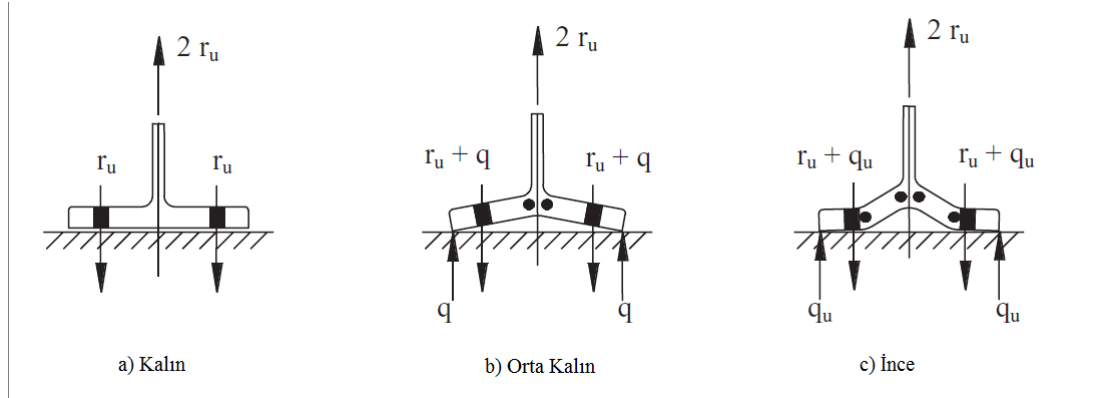
$$t_{cf} = \sqrt{\frac{M_{cf}}{F_{yc} \left[\frac{b_{cf}}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{s} \right) \right] + \frac{2}{g} \left[h_1 \left(s + \frac{3c}{4} \right) + h_0 \left(s + \frac{c}{4} \right) + \frac{c^2}{2} \right] + \frac{g}{2} \right]}} \quad (3.17)$$

Bu araştırmalardaki öncelikli amaç alın levhalı moment birleşiminde olası kaldırma kuvvetlerini tahmin etmek ve ölçmektir. Bulon kuvveti tahmin metotlarının çoğunluğu çekme bölgesindeki T-parça ile alın levhalı birleşim arasında benzerlik kurmaya dayanır. Alın levhalı moment birleşiminde bulon kuvvetlerini belirlemek için en çok kullanılan metot Kennedy ve diğerleri (1981) tarafından geliştirilen tasarım metodudur (AISC358-10, AISC Design Guide 4, FEMA350).

3.5 Kennedy Metodu

T-parça başlık levha davranışında üç aşama belirlenmiştir. Levhanın ilk aşamadaki davranışı düşük yük seviyelerinde meydana gelir ve tamamen elastik davranış gösterir. Başlık levhasının kalın olduğu varsayılır. Kaldırma kuvveti etkisinin oluşmadığı kabul edilir. Yük arttırıldığı takdirde başlık levhasında T-parça'nın dibinde bir plastik mafsallık şekillenir. Böylelikle 2. aşama davranışı oluşmuş olur.

Levhanın orta kalınlıkta olduğu ve kaldırma kuvvetinin mevcut olduğu kabul edilir. Levha davranışının üçüncü aşaması bulon hizasında plastik mafsallın gelişmesiyle oluşur. Bu durumda levha ince olarak kabul edilir ve kaldırma kuvveti etkisi maksimumdur. (Connections in Steel Structures III Behaviour, strength & design; Reidar Bjorhovde, Andre Colson, Riccardo Zandonini, AISC Design Guide-4, AISC Design Guide-16, AISC358-10, Moment Connections for Seismic Applications-Canadian Institute of Steel Construction)



Şekil 3.3 : Kennedy modelinde levha davranışı (AISC Design Guide-4, 2003).

3.6 Basitleştirilmiş Metot

Borgsmiller (1995), kaldırma kuvveti etkisindeki bulon kuvvetlerini tespit etmek için geliştirilmiş Kennedy metodunun basitleştirilmiş bir versiyonunu sunmuştur. Basitleştirilmiş metot levha davranışının sadece iki aşamasını dikkate almaktadır. Kaldırma kuvveti etkisinin oluşmadığı kalın levha davranışı ve maksimum kaldırma kuvvetinin olduğu ince levha davranışı olarak sınıflandırılabilir. Bu basitleştirme bulon kuvvetlerinin direk çözümüne imkân sağlar. Kalın levha davranışı ile ince levha davranışı arasındaki eşik değer olarak bulon kuvvetlerinin göz ardı edilebilir olan noktası kabul edilmiştir. Geçmişte yapılan deneysel çalışmalara dayanarak, Borgsmiller (1995), bu eşik değerini alın levhası mukavemetinin %90'ı olarak tespit etmiştir. Eğer uygulanan yük alın levhası mukavemetinin %90'ından az ise alın levhası kalın kabul edilir ve kaldırma kuvveti etkisinin oluşmadığı düşünülür. Eğer uygulanan yük alın levhası mukavemetinin %90'ından fazla ise alın levhası ince kabul edilir ve kaldırma kuvvetinin maksimum olduğu düşünülür.

3.7 Bulon Kuvvetlerinin Hesabı

Geliştirilmiş Kennedy Metodu ve Basitleştirilmiş Borgsmiller Metodu, alın levhalı moment birleşiminde ve T-parça birleşimlerde monotonik yükler altındaki bulon kuvvetlerini tespit etmek için geliştirilmiştir. Tersinir yükler altındaki alın levhalı moment birleşiminde dikkatle uygulanmalıdır. Tasarım felsefesi, daha önce de bahsedilen güçlü kolon, güçlü birleşim ve zayıf kiriştir. Bu yaklaşım elastik olmayan davranışın kirislerde ve panel bölgesinde gelişmesine olanak sağlar. Bunun gerçekleşmesi için kolon ve birleşimin elastik kalmasına gerek vardır. Alın Levhalı Moment Birleşimi için bu felsefeyi uygularsak, alın levhası ve kolon başlığı kalın olarak tasarlanmalıdır. Bu sayede alın levhası ve kolon başlığı elastik kalır ve bulonlara önemli bir kaldırma kuvveti etki etmez.

Kalın levha davranışı için bulon kuvvetleri, basınç başlığı merkez çizgisine göre statik moment alarak belirlenir. Birleşim mukavemeti, bulonun çekmede kopma mukavemetine bağlı olarak bulon kuvvetlerinin kolon başlığı merkez çizgisine göre statik momentine eşit olur. Şekil 3,4'te bu durum sekiz bulonlu rijitlik levhalı alın levhalı moment birleşimi için gösterilmiştir. Kaldırma etkisinin olmadığı bulon kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilir (AISC358-10, AISC Design Guide 4, FEMA350 Moment Connections for Seismic Applications - Canadian Institute of Steel Construction).

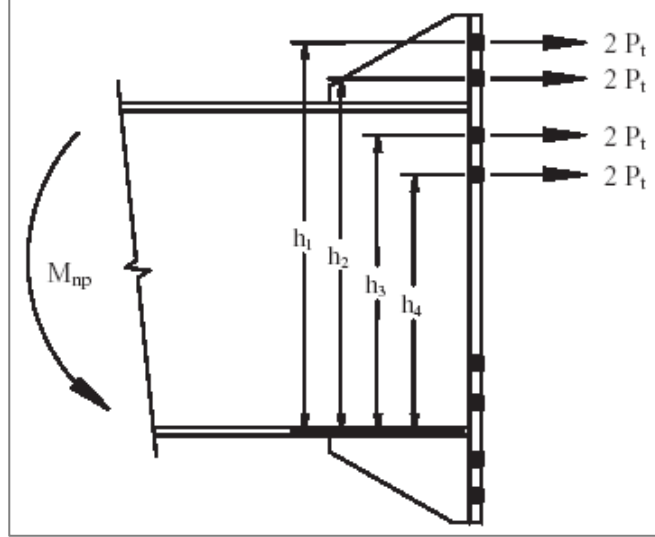
$$M_{np} = nP_t \sum_{i=1}^N h_i \quad (3.18)$$

$$P_t = F_t A_b \quad (3.19)$$

n: Her bir sıradaki bulon sayısını, N: Bulon sırasının sayısını, h_i : Basınç başlığının merkezinden bulon sırasının merkezine olan uzaklığını, P_t : Bulon çekme mukavemetini, F_t : Bulon kopma gerilmesi değerini, A_b : Nominal Bulon kesit alanını ifade etmektedir.

Borgsmiller modeline göre düzlem kesitlerin eğilmeden sonra düzlem kalması kabulüne göre en dışta bulunan bulonlar akma mukavemetine ilk ulaşan bulonlardır. İç kısımda bulunan bulonlar nihai çekme mukavemetine ulaşana kadar dış

bulonların da deformasyon yapacağı kabul edilmektedir. Bu varsayım çoklu sıralı uzatılmış birleşimler için Sumner ve Murray tarafından incelenmiş ve geçerli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.4 : Sekiz bulonlu alın levhalı moment birleşiminde kalın levha için bulon kuvvetleri tasarım modeli (AISC Design Guide-4, 2003).

Kaldırma kuvveti etkisi oluşmayacak şekilde bulonların mukavemeti denklem 3.20 kullanılarak hesaplanırsa alın levhasının ve kolon başlığının kalın olduğu kabul edilmiş olur. Kalın levha davranışını sağlamak için kaldırma kuvveti etkisinde olmayan bulon kuvveti, alın levhası veya kolon başlığı mukavemetinin %90 'ından az veya eşit olmalıdır. Bir başka deyişle kolon başlığının veya alın levhasının mukavemeti Bulon mukavemetinin 1,1 katı olmalıdır.

$$\begin{aligned} M_{np} &\leq 0,9M_{pl} \quad \text{ve} \quad M_{np} \leq 0,9M_{cf} \\ M_{pl} &\geq 1,1M_{np} \quad \text{ve} \quad M_{cf} \leq 1,1M_{np} \end{aligned} \quad (3.20)$$

M_{np} : Kaldırma kuvveti etkimeden bulon moment dayanımı

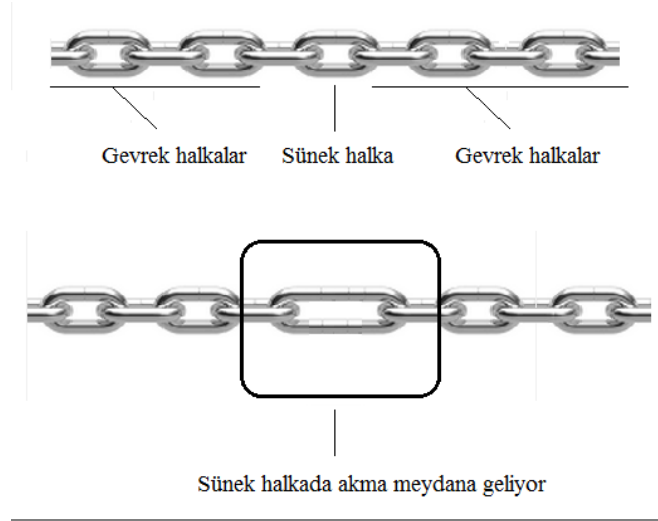
M_{pl} : Alın levhası eğilme mukavemeti

M_{cf} : Kolon başlığı eğilme mukavemeti

AISC tasarım rehberi 4 ve 13'te bulunan hesap esasları dikkate alınarak . EK F bölümünde P4 deney numunesine ait sayısal örnek sunulmuştur.

4. S275JR ÇELİK KALİTESİNİN İNCELENMESİ

Kapasite tasarımı kavramı ilk defa depreme dayanıklı yapı tasarımı için Prof. Paulay öncülüğünde Yeni Zelanda Deprem yönetmeliğinde betonarme yapılar için kullanılmıştır. Kapasite tasarımına göre bina taşıyıcı sisteminin elemanları bir zincirin halkalarına benzetilirse, zincirin taşıma kapasitesi zincir üzerindeki en zayıf halkanın taşıma kapasitesi olacaktır. Eğer bu zayıf halka sünek bir malzeme ise zincir kopmadan önce sünek bir davranış göstererek uzayacak, eğer bu halka gevrek bir malzeme ise zincir gevrek davranış gösterecek ve aniden kopacaktır. Benzer şekilde bina taşıyıcı sisteminde önceden hasar görecekt bölümler deprem yükü altında sünek davranış gösterirse taşıyıcı sistemde sünek davranış gösterecektir.



Şekil 4.1 : Kapasite tasarımı anlatımı için zincir benzeşimi.

DBYBHY-2007’de diğer birçok yönetmelikte olduğu gibi kapasite tasarımı ve uygulamaları yer almaktadır. Genel ilkeler bölümünde de belirtildiği üzere DBYBHY-2007’de yönetmeliğin ana ilkelerinden biri şiddetli bir depremde yapının can güvenliği performansını sağlaması ve kalıcı hasar oluşumunun sınırlandırılması olarak tanımlanmıştır. DBYBHY-2007’de kapasite tasarımı felsefesi; kat mekanizmaları oluşumun önlenmesi, güçlü kolon-zayıf kiriş tasarımı ile yapısal sünekliğin artırılması ve çelik yapı birleşimlerinde birleşimlerin birleşime giren elemanlardan daha yüksek kapasitede boyutlandırılması sıralanabilir. (Özer, 2007)

Tüm bu hesaplamalar için tasarımda kullanılan çelik kalitesinin nominal akma-kopma değerleri ile gerçek akma-kopma değerleri arasındaki oranın doğru tespit edilmesi önem arz etmektedir. DBYBHY-2007’de “çelik yapı elemanlarının ve birleşim detaylarının gerekli kapasitelerinin hesabında, σ_a akma gerilmesi yerine $D_a \sigma_a$ arttırılmış akma gerilmesi değerleri kullanılacaktır.” denilmektedir. DBYBHY-2007’de verilen arttırılmış akma gerilmesinin hesabında uygulanacak D_a katsayıları, yapı çeliğinin sınıfına ve eleman türüne bağlı olarak aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.1 : DBYBHY-2007 Malzeme özellikleri tablosu.

Yapı Çeliği Sınıfı ve Eleman Türü	D_a
Fe 37 çeliğinden imal edilen hadde profilleri	1.2
Diğer yapı çeliklerinden imal edilen hadde profilleri	1.1
Tüm yapı çeliklerinden imal edilen levhalar	1.1

Amerika Birleşik Devletlerinde yapı çeliği olarak A36, A572 Gr 50 ve A992 Gr 50 çelikleri tercih edilmektedir. S275JR çeliğinin ASTM standartlarına göre tam olarak karşılık gelen bir çeliği olmamasına karşılık yeterliği kanıtlanmış birleşimlerde kullanılan A572 Gr50 ve A992 Gr 50 çelikleri mekanik özellikleri yönüyle S355JR çeliğine benzerlik göstermektedir Dolayısıyla AISC’de bulunan yeterliği kanıtlanmış çelik birleşimlerin S275JR çelik kalitesiyle incelenmesi önem arz etmektedir.

AISC 341-10 şartnamesinde çelik malzeme sınıfları ve profil türüne göre kullanılacak dayanım arttırma katsayıları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

4.1 Numunelerin Çekme Testleri

Numunelerin çeşitli bölgelerinden malzeme özelliklerini tespit etmek amacıyla kupon malzemeler alınmış ve bu malzemeler İstanbul Teknik Üniversitesi malzeme laboratuvarında eksenel çekme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen bu malzeme özellikleri sonlu eleman çalışmasında kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kolon ve kiriş malzemeleri olarak nominal akma dayanımı 275 N/mm^2 , nominal kopma dayanımı ise 430 N/mm^2 olan S275JR çelik kalitesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 : AISC 341-10 Malzeme ek dayanım özellikleri tablosu.

Çelik malzemeler için Ry ve Rt Değerleri

Uygulama	R _y	R _t
Hadde yapısal profiller ve barlar		
• ASTM A36/A36M	1.5	1.2
• ASTM A1043/A1043M Gr. 36 (250)	1.3	1.1
• ASTM A572/572M Gr. 50 (345) or 55 (380)	1.1	1.1
ASTM A913/A913M Gr. 50 (345), 60 (415), or 65 (450),		
ASTM A588/A588M, ASTM A992/A992M		
• ASTM A1043/A1043M Gr. 50 (345) 1.2 1.1	1.2	1.1
• ASTM A529 Gr. 50 (345) 1.2 1.2	1.2	1.2
• ASTM A529 Gr. 55 (380)	1.1	1.2
Boşluklu yapısal profiller (HSS):		
• ASTM A500/A500M (Gr. B or C), ASTM A501	1.4	1.3
Pipe:		
• ASTM A53/A53M	1.6	1.2
Levhalar		
• ASTM A36/A36M	1.3	1.2
• ASTM A1043/1043M Gr. 36 (250)	1.3	1.1
• A1011/A1011M HSLAS Gr. 55 (380)	1.1	1.1
• ASTM A572/A572M Gr. 42 (290)	1.3	1.0
• ASTM A572/A572M Gr. 50 (345), Gr. 55 (380),	1.1	1.2
ASTM A588/A588M		
• ASTM 1043/1043M Gr. 50 (345)	1.2	1.1

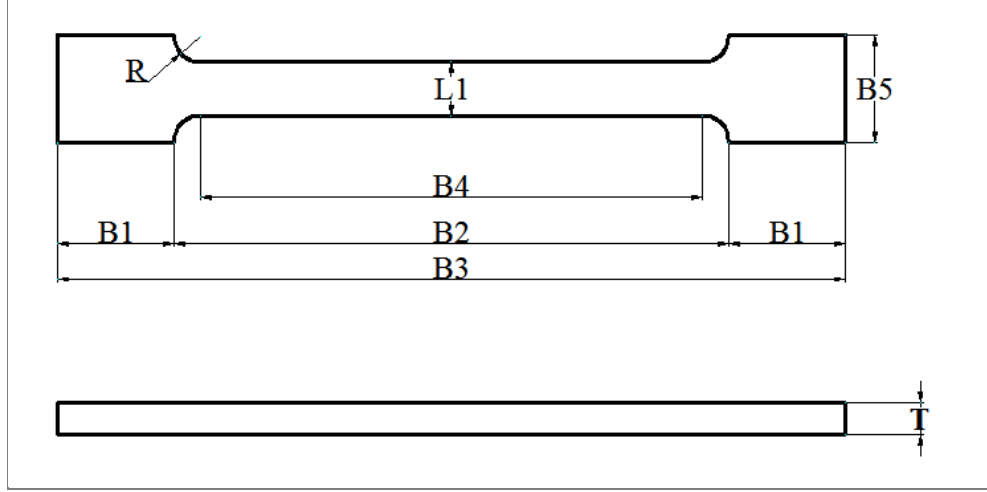
Alın levhası ve süreklilik levhası olarak nominal akma dayanımı 235 N/mm², nominal kopma dayanımı ise 360 N/mm² olan S235JR çelik kalitesi tercih edilmiştir. Çekme testleri sonucu elde edilen veriler ile kiriş elemanın gerçek moment kapasitesi tespit edilmiş ve bu değerler nominal değerler ile kıyaslanarak S275 çelik kalitesinin kapasite tasarımı için kullanılabilecek ek kapasite faktörü katsayıları yönetmeliklerin tavsiye ettiği faktörlerle kıyaslanarak incelenmiştir.

4.2 Kullanılan Şartname ve Deney Yöntemi

EN10002-1 şartnamesine uygun olarak malzeme çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Kuponlar, profil elemanların başlıklarından ve numune imalatında kullanılan levha malzemelerden kesilerek alınmıştır. Kuponlar EN 10002-1 şartnamesinde tavsiye edilen geometrik detaylara uygun olarak malzemeye ısıtılma işlemi uygulamadan kesilmiştir. Tüm kuponların geometrik merkezine çekme makinesinin değerlerini kontrol etmek maksadıyla kupon elemanın her iki yüzeyine strengerler yerleştirilmiştir. Strengerler data logger'a bağlanarak çekme testi boyunca data alınmıştır. Tüm malzeme çekme deneyleri 600 kN kapasiteli MTS Criterion Series (Model 64.605) marka çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Strengerlerden elde edilen veriler dışında çekme cihazından kupon elemanı tutan çene kısımları arasındaki uzama oranı da sayısal olarak alınmış ve strenger değerleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca numunelere extensometre takılarak veri alınmıştır. Ancak çekme cihazı çenesi ile malzemenin sıkıştırıldığı kısımda meydana gelebilecek kaymalar sebebiyle strengerlerden alınan verilerin daha güvenilir olduğu kabul edilmiştir.

4.3 Çekme Kupon Testleri

Malzeme özelliklerinin tespiti amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sırasında elastik kalacak bazı malzemeler içinde elastisite modülünün tespiti amacıyla çekme testi yapılmıştır.



Şekil 4.2 : Kupon eleman geometrisi

4.4 Çekme Testleri Sonuçları

Malzeme çekme testleri sonuçlarının ortalama değerleri aşağıda tablo olarak gösterilmektedir. Ayrıca EK-B’de her bir malzeme için ayrı ayrı gerilme-şekil değiştirme grafikleri sunulmuştur. Birleşim cıvataları deney boyunca elastik kalacak şekilde boyutlandırılması sebebiyle çekme testine tabi tutulmamıştır.

Çizelge 4.3 : Çekme testi malzeme özellikleri tablosu.

Kuponlar	Elastisite modülü, E (N/mm ²)	Akma mukavemeti f_y (N/mm ²)	Akma durumunda uzama ϵ_y (Average)	Nihai mukavemet f_u (N/mm ²)
IPE270	199.881	337.25	0.001687	454.86
HEB180	203.507	306.13	0.001504	450.02
PL8	209.470	317.00	0.001513	456.05
PL20	210.230	313.26	0.001490	449.88
PL35	212.477	401.00	0.001887	533.14
HEB320	206.669	293.00	0.001418	456.36

Yukarıda gösterilen malzeme test sonuçları sayısal analiz çalışmalarında kullanılmıştır. Çevrimsel yüklemeli sayısal analiz çalışmalarında malzemelerin mühendislik gerilme-şekil değiştirme özelliği yanında gerçek gerilme-şekil değiştirme özelliği tespit edilmiş ve sayısal analiz çalışmasında malzeme modeli olarak uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar EK B’de görülebilir.

4.5 Kapasite Tasarımında Kullanılmak üzere S275JR Kalite Çelik Yapı Elemanları için DBYBHY-2007’de verilen Da Arttırma Katsayısının İncelenmesi

Birleşime giren kiriş elemanın gerçek mukavemet dayanımı Amerikan normlarına göre bölüm 3.1.1. de belirtildiği üzere aşağıdaki gibi hesap edilir. (ANSI/AISC 358-10)

$$M_{pe} = C_{pr} \cdot R_y \cdot F_y \cdot Z_x \quad (4.1)$$

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \quad (4.2)$$

R_y , beklenen akma gerilmesinin nominal akma gerilmesine oranıdır. F_y , çeliğin akma gerilmesi değeridir. F_u , çeliğin kopma gerilmesi değeridir. Z_x , kirişin plastik moment dayanımıdır. C_{pr} , çelikte meydana gelen pekleşme etkisi vs.. unsurların etkisiyle elde edilen ek dayanımın hesabı için kullanılan bir katsayıdır.

Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere Amerikan normunda C_{pr} olarak belirtilen değer, DBYBHY-2007’de D_a olarak geçmekte ve bu katsayı değeri S275 çelik kalitesi için 1.1 olarak verilmektedir. Ayrıca kolonların kirişlerden daha güçlü olması ve benzeri hesaplamalarda D_a katsayısının 1,1 katsayısı ile arttırılması tavsiye edilmektedir. Sonuç olarak S275JR çelik kalitesinin gerçek mukavemeti hesabında kullanılan toplam arttırma katsayısı ($1.1 \times 1.1 = 1.21$) olarak hesap edilmiştir. AISC 341-10 da R_t olarak belirtilen ve malzemede beklenen nihai kopma değerinin malzeme minimum kopma değerine oranını ifade eden katsayı DBYBHY-2007’de yer almamaktadır.

Kupon çekme testleri sonucunda çelik malzemeler için R_y ve R_t değerleri tespit edilmiştir. S275JR çeliği nominal akma değeri 275 N/mm^2 , nominal kopma değeri ise 410 N/mm^2 olarak kabul edilmiştir. Aşağıdaki tabloda çelik malzemeler için hesap edilen R_y , R_t , C_{pr} oranlarını gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : S275JR Profil malzeme özellikleri tablosu.

Profiller (S275JR)	Akma mukavemeti f_y (N/mm ²)	Kopma mukavemeti f_u (N/mm ²)	$R_{y.act} = \frac{F_{y.act}}{F_{y.nom}}$	$R_{t.act} = \frac{F_{u.act}}{F_{u.nom}}$	$C_{pr.act} = \frac{F_{y.act} + F_{u.act}}{2F_{y.act}}$	$\frac{C_{pr.act}}{C_{pr}}$
IPE270	337.25	454.86	1.225	1.109	1.174	0.943
HEB180	306.13	450.02	1.113	1.097	1.235	0.991
HEB320	293.00	456.36	1.065	1.113	1.279	1.027
Ortalama	312.127	453.747	1.135	1.107	1.229	0.987

S275JR kalite levhalar için elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.5 : S275JR Levha malzeme özellikleri tablosu.

Levhalar (S275JR)	Akma mukavemeti f_y (N/mm ²)	Kopma mukavemeti f_u (N/mm ²)	$R_{y.act} = \frac{F_{y.act}}{F_{y.nom}}$	$R_{t.act} = \frac{F_{u.act}}{F_{u.nom}}$	$C_{pr.act} = \frac{F_{y.act} + F_{u.act}}{2F_{y.act}}$	$\frac{C_{pr.act}}{C_{pr}}$
PL8	317.00	456.05	1.153	1.112	1.219	0.979
PL20	313.26	449.88	1.139	1.097	1.218	0.978
Ortalama	315.130	452.965	1.146	1.105	1.219	0.979

S355 JR kalite levhalar için elde edilen katsayılar aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.6 : S355JR Levha malzeme özellikleri tablosu.

Levhalar (S355JR)	Akma mukavemeti f_y (N/mm ²)	Kopma mukavemeti f_u (N/mm ²)	$R_{y.act} = \frac{F_{y.act}}{F_{y.nom}}$	$R_{t.act} = \frac{F_{u.act}}{F_{u.nom}}$	$C_{pr.act} = \frac{F_{y.act} + F_{u.act}}{2F_{y.act}}$	$\frac{C_{pr.act}}{C_{pr}}$
PL35	401.00	533.14	1.130	1.025	1.165	0.945

Ortalama veriler dikkate alındığında ek dayanım faktörünün

S275JR profiller için $1.135 \times 1.229 = 1.395 > 1.21$

S275JR levhalar için $1.146 \times 1.219 = 1.397 > 1.21$

S355JR levhalar için $1.130 \times 1.165 = 1.316 > 1.21$

olarak tespit edilmiştir. Elde edilen ek dayanım faktörlerinin DBYBHY-2007’de verilen ek dayanım faktörlerinden yüksek olduğu görülmektedir.

5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölümde ön-germe ile sıkılmış alın levhalı kolon-kiriş birleşimleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiştir. Sayısal modelin oluşturulmasında ANSYS yazılımı kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar ile model çalışması yapmanın başlıca avantajları şunlardır. a) Etkili ve ucuz çözümlerdir. Deneysel çalışmaya gerek kalmaksızın sonlu eleman çalışması yardımıyla mesnetin moment-dönme karakteristiği tespit edilebilir, alın levhası davranışı, panel bölgesi ve bulonların davranışı, bulonlara ön-germe verilmesi etkisi incelenebilmektedir. b) Deneysel çalışmada tespit edilmesi zor birçok hususun incelenmesine olanak sağlar. (Basınç dağılımı, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki sürtünme kuvvetleri, mesnet momenti vs.) c) Ayrıca oluşturulan model çalışması ile parametrik çalışmalar yapılabilir.

Bu çalışmada üç boyutlu alın levhalı kolon-kiriş birleşimi, mesnet davranışının gözlemlenmesi amacıyla oluşturulmuştur. Model çalışması, elemanlar arasında sürtünme ve kayma durumunu, bulonda ön-germe kuvveti uygulanmasını ve malzemede ve geometri de lineer olmayan davranış durumunu kapsamaktadır. Yapılan model çalışması ile elde edilen moment-dönme grafiği ile literatürde bulunan deneysel çalışmalardan elde edilen moment-dönme grafikleri kıyaslanarak sonlu elemanlar çalışması doğrulanmıştır. Daha sonra elde edilen doğrulanmış sayısal analiz çalışması dikkate alınarak deneysel çalışmada incelenecek birleşimler modellenmiş ve bu birleşimlerin moment-dönme eğrileri elde edilmiştir.

5.1 Referans Alınan Deneysel Çalışmanın Detayları

Sonlu elemanlar çalışmasının doğruluğunu teyit etmek amacıyla P.Nogueiro ve diğerleri (2006) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma referans alınarak deney için oluşturulan sayısal analiz modelleri kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır. Referans çalışmada iki ayrı numune tipi bulunmaktadır. Her numune için bir adet monotonik ve 2 adet tersinir yüklemeli deney olmak üzere toplam 6 adet deneysel çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel yüklemeli deneysel

çalışmaların sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneyde kolon ebatı değişimi incelenecek parametre olarak tespit edilmiştir. Alın levhası kalınlığı 18 mm dir. Alın levhası ile kiriş birbirlerine 45 derece köşe kaynağı ile kaynaklanmıştır. Kaynak elektrik ark kaynağı metoduyla yapılmıştır. Birleşim elemanı olarak M24 çapında 10.9 kalitesinde bulon kullanılmıştır. Alın levhası delik çapı 26 mm dir. Tüm birleşim elemanlarının kalitesi S355JR'dir.

5.2 Birleşimlerin Geometrik Detayları

Referans çalışmada kullanılan numune detayları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Numune tip ve detayları (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).

Numune Adı	Birleşim tipi	Alın levhası Kalınlığı	Bulon Çapı	Bulon Sayısı	Süreklilik levhası	Alın levhası Rijitlik levhası
Test J1.1,2,3 Test J3.1,2,3	Uzatılmış	18	24	8	Var	Yok

Çizelge 5.2 : Kolon ve kiriş boyutları (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).

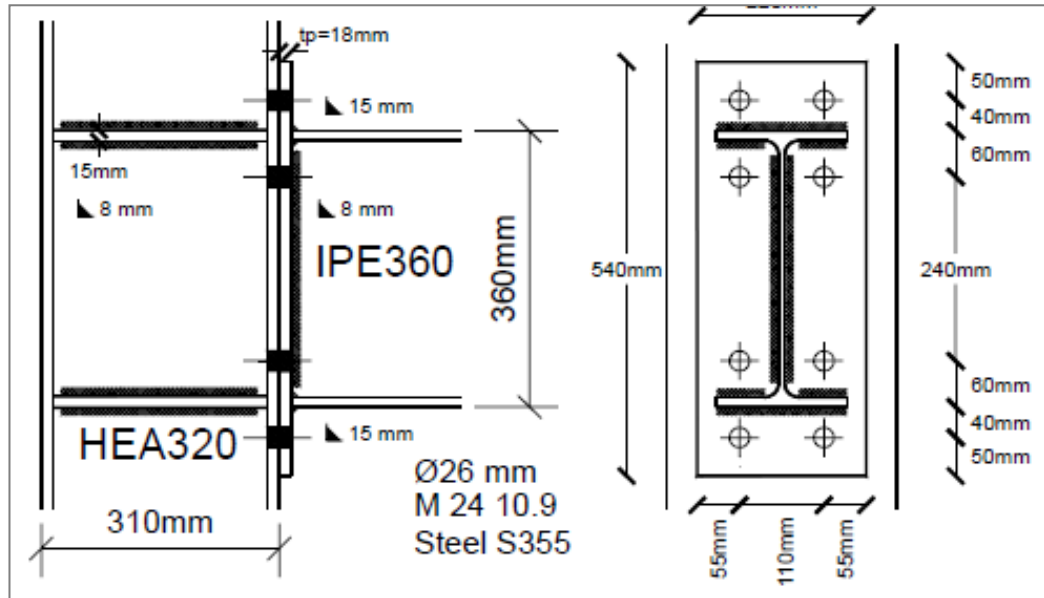
Numune Adı	Kiriş	Kolon	Malzeme	Yükleme Tipi	Eğilme	Eksenel Yük
Test J1.1	IPE 360	HEA 320	S355	Monotonik	M-	Yok
Test J1.2	IPE 360	HEA 320	S355	Tersinir	M-/M+	Yok
Test J1.3	IPE 360	HEA 320	S355	Tersinir	M-/M+	Yok
Test J3.1	IPE 360	HEB 320	S355	Monotonik	M-	Yok
Test J3.2	IPE 360	HEB 320	S355	Tersinir	M-/M+	Yok
Test J3.3	IPE 360	HEB 320	S355	Tersinir	M-/M+	Yok

P.Nogueiro ve diğerleri (2006) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmanın geometrik detayları verilmiş fakat malzeme çekme testi sonuçları verilmemiştir. Aynı çalışmanın malzeme test sonuçları, H. Augusto ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada aşağıdaki şekilde sunulmuştur

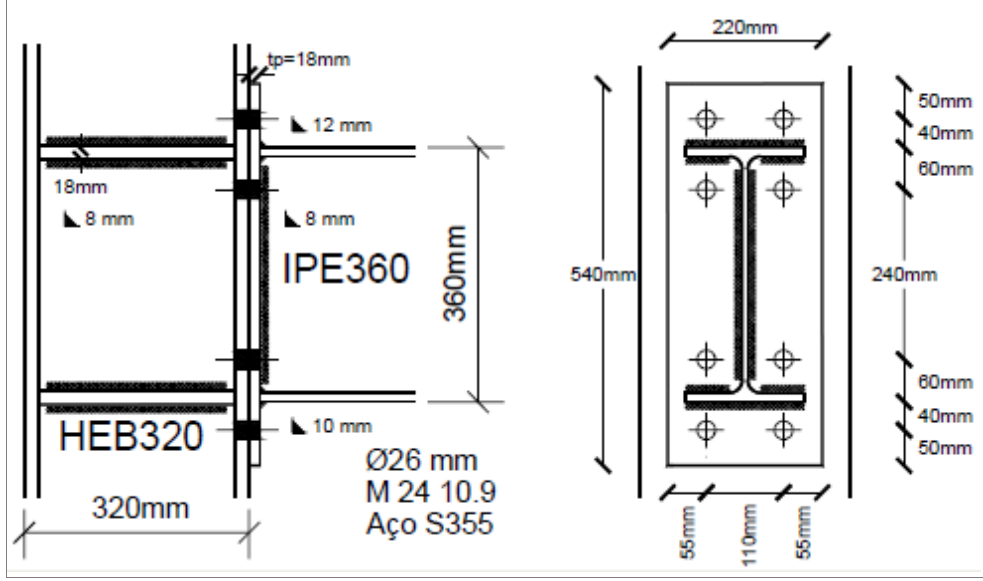
Çizelge 5.3 : Malzeme özellikleri (H. Augusto ve diğerleri, 2012).

Birleşenler		Akma gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai gerilme (MPa)	Nihai birim uzama (%)	Kopma durumunda birim uzama (%)
Başlıklar	IPE360	430,0	206,0	554,2	15	25
	HEA320	414,8	204,9	531,4	17	29
Gövdeler	IPE360	448,2	213,6	552,9	16	26
	HEA320	449,6	207,4	553,4	15	24
Alın levhası		392,9	208,4	523,0	14	24
Rijitlik levhası		286,4	205,9	451,8	20	30
Bulonlar		990,0	213,0	1170,0	11	34

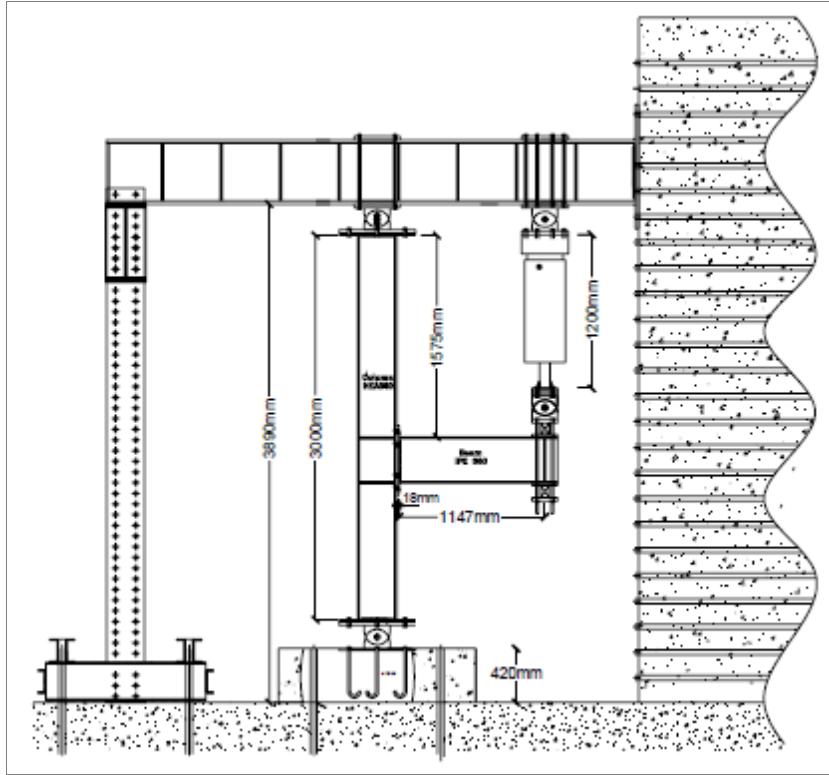
Kiriş kesitleri aynı ebatlara sahiptir. Sadece kolon ebatları değişiklik göstermektedir. Kolona eksenel yük kuvveti verilmemiştir. Monotonik yükleme yer değiştirme kontrollü olarak 0.02 mm/sn hızla uygulanmıştır.



Şekil 5.1 : Test J1.1,2,3 Numune detayı (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).



Şekil 5.2 : Test J3.1,2,3 Numune detayı (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).



Şekil 5.3 : Test J1.1,2,3 Deney düzeneği (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).

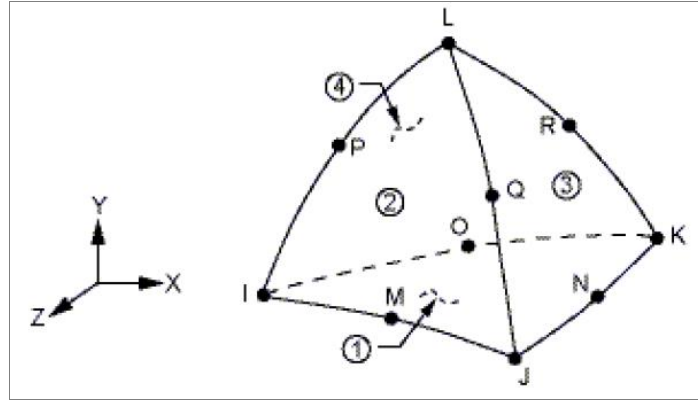
5.3 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanları modeli, katı elemanlar ve bu elemanlar arasındaki bağlantıyı ifade eden temas elemanları yardımıyla modellenmiştir. Modelde SOLID187 katı elemanı

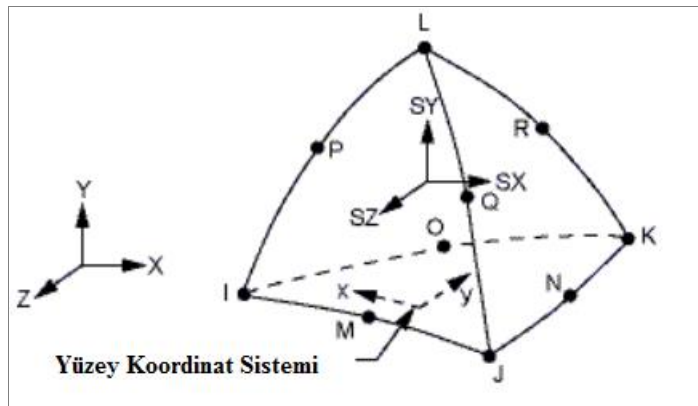
ve TARGE170 ve CONTA174 temas elemanları kullanılmıştır. Bu elemanların teknik özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

5.3.1 Katı elemanların oluşturulması

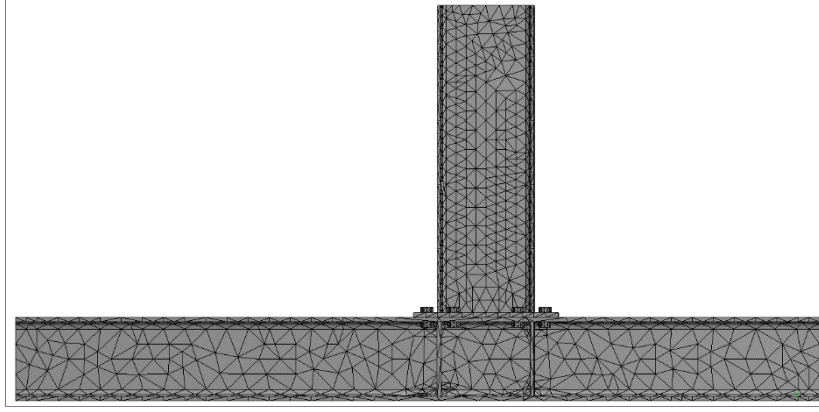
Modelde bulunan tüm üç boyutlu katı elemanlar (kolonlar, kirişler, alın levhaları, süreklilik levhaları, ve bulonlar) 10 düğüm noktalı, tetrahedron katı yapı elemanı SOLID187 kullanılarak ağ oluşturulmuştur. SOLID187 elemanı 3 boyutlu modellemeler için bir elemandır. Düzensiz ağ elemanları ile düzensiz modeller oluşturulması durumunda da tatmin edici sonuçlar vermektedir. Her düğüm noktasında x, y ve z eksenlerinde olmak üzere 3 adet serbestliği bulunmaktadır. Bu eleman yardımıyla malzemede plastisite, hiperelastisite, büzülme, büyük yerdeğiştirme ve uzama durumları modellenebilmektedir. Ayrıca sıkıştırılamaz elasto-plastik malzeme ve sıkıştırılamaz hiperelastik malzemeler bu eleman yardımıyla modellenebilmektedir (ANSYS Element Reference, 2009).



Şekil 5.4 : (SOLID187) Geometri (ANSYS Element Reference, 2009).



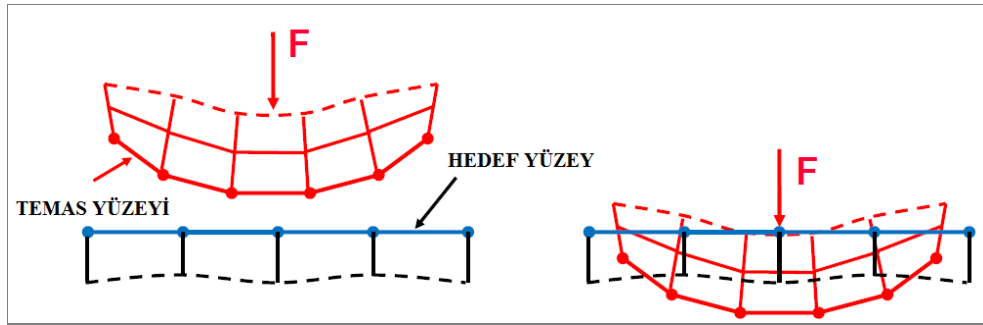
Şekil 5.5 : (SOLID187) gerilmeler ve yönleri (ANSYS Element Reference, 2009).



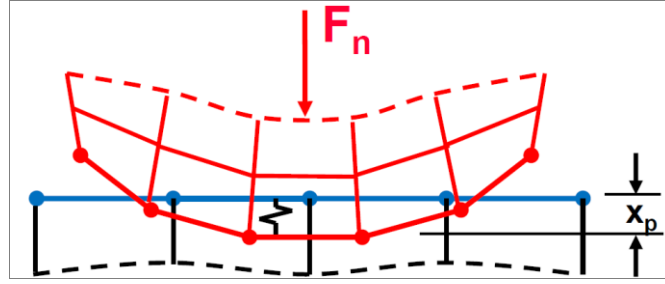
Şekil 5.6 : (SOLID187) Ağ modeli.

5.3.2 Temas elemanlarının oluşturulması

Katı elemanların yüzeylerinin teğetsel olarak birbirlerine dokunması durumuna temas denilmektedir. Parça yüzeylerinin birbirlerine temas etme durumunda kuvvet aktarımı (eksenel basınç kuvveti ve sürtünme kuvveti gibi) gerçekleşir ve katı durumda bulunan elemanlar birbirlerinin içine nüfuz etmezler. Bu durumu matematiksel olarak modellemek için temas elemanı olarak tabir edilen yay elemanlar kullanılır. Bu yayların davranışı esas olarak hook kanunu ($F=k.x$) ile ifade edilir. Parçalar arasında nüfuziyet olmaması için yay katsayısı (k) çok yüksek bir değer verilir. Oluşturulan sayısal analiz çalışmasında temas elemanları olarak TARGE170 ve CONTA174 elemanları kullanılmıştır. TARGE170 elemanı düğüm noktaları 3 adet deplasman ve 3 adet dönme serbestliği olmak üzere toplam 6 adet serbestliğe sahiptir. 3D modellerde kullanılabilir. Hedef yüzey, rijit veya deforme olabilir bir yüzey olabilir. CONTA174 temas elemanı 8 adet düğüm noktalıdır. 3D yüzeyler arasında kayma ve temas durumunu modellemek için kullanılabilir. Her düğüm noktasının üç adet yerdeğiştirme serbestliği mevcuttur.



Şekil 5.7 : Yay olmaması durumunda parçaların girişimi (ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities, 2010).



Şekil 5.8 : (ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities, 2010).

5.3.2.1 Temas elemanlarının seçilmesi

Temas elemanların seçiminde aşağıdaki hususlara dikkat edilir.

1. Konveks bir yüzeyin konkav veya düz bir yüzeyle teması durumunda düz veya konkav yüzey hedef yüzey olarak seçilmelidir.
2. İki adet yüzeyden bir tanesi ince ağırlar ile diğeri kalın ağırlar ile oluşturulmuşsa ince ağırlı yüzey kontak yüzeyi, kaba ağırlı yüzey ise hedef yüzey olarak seçilmelidir.
3. Her iki adet yüzeyden bir tanesi rijit diğeri yumuşak yüzey ise, yumuşak yüzey temas yüzeyi, rijit yüzey ise hedef yüzey olarak seçilmelidir.
4. Eğer bir yüzey diğeri temas yüzeyinde göre çok daha büyük ise daha geniş olan yüzey hedef olarak belirlenmelidir (Jake Blanchar, 2008).

5.3.2.2 Temas analizi için kullanılan doğrusal olmayan yöntemler

ANSYS dört adet çözüm yöntemi tavsiye etmektedir. Bunlar Pure Penalty, Augmented Lagrange, Normal Lagrange ve MPC yöntemleridir. Bu yöntemlerin özellikleri avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Pure Penalty yönteminin özellikleri:

- Daha az miktarda iterasyon ile daha iyi bir yakınsama sağlanır.
- Normal temas elemanı rijitliğine hassas bir davranış sergiler.
- Her türlü temas elemanı davranışında kullanılabilir.
- İterasyonlu ve direk çözümler kullanılabilir.
- Simetrik ve asimetrik davranış destekler
- Temas yüzeyinin bulunması ara noktalarda (integration points) olur.
- Parçalar arasında girişim nüfuziyet meydana gelir.

Augmented Lagrange yönteminin özellikleri:

- Eğer nüfuziyet çok fazla ise çözüm için ek iterasyonlar gerekebilir.
- Normal temas rijitliği değerine karşı daha az hassastır.
- Parçalar arası nüfuziyet mevcuttur ancak bir miktar kontrol altındadır.
- Her türlü temas elemanı davranışında kullanılabilir.
- İterasyonlu ve direk çözümler kullanılabilir.
- Simetrik ve asimetrik davranışı destekler.
- Temas yüzeyinin bulunması ara noktalarda (integration points) olur.

Normal Lagrange yönteminin özellikleri:

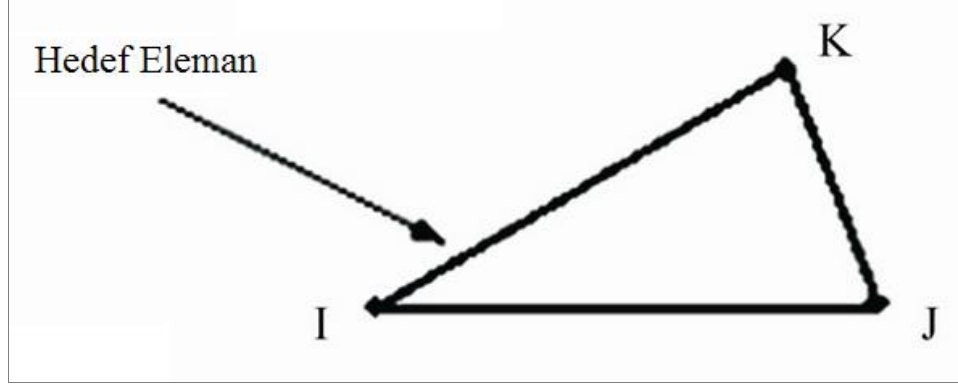
- Chattering mevcut ise ek iterasyonlara ihtiyaç olabilir.
- Normal temas rijitliği değerine ihtiyaç yoktur.
- Nüfuziyet sıfıra yakın değerlerdedir.
- Her türlü temas elemanı davranışında kullanılabilir.
- Sadece direk analiz çözümleri kullanılabilir.
- Sadece asimetrik temas davranışını destekler.
- Temas için düğüm noktaları dikkate alınır.

MPC yönteminin özellikleri:

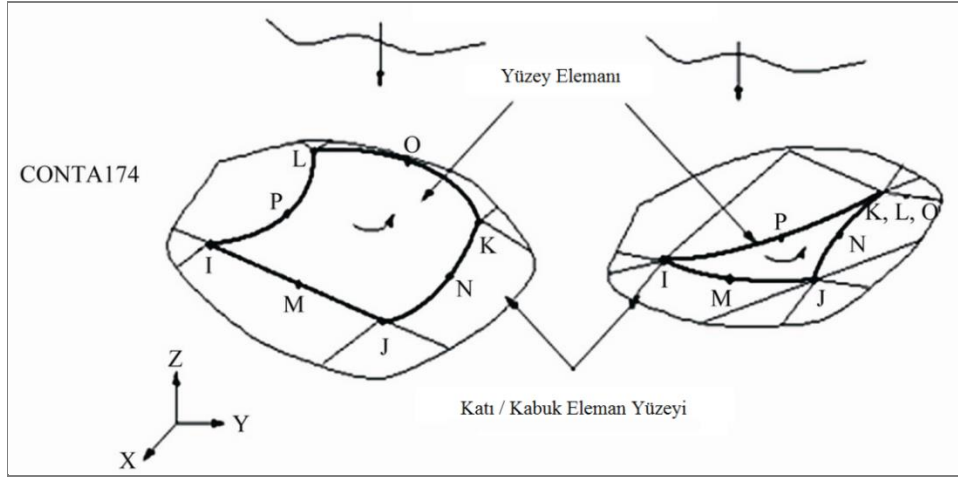
- Daha az miktarda iterasyon ile daha iyi bir yakınsama sağlanır.
- Normal temas rijitliği değerine ihtiyaç yoktur.
- Nüfuziyet sıfırdır.
- Sadece Bonded ve No separation davranışlarını destekler.
- Sadece asimetrik temas davranışını destekler.
- Temas için düğüm noktaları dikkate alınır.

Temas elemanlarının tipleri

Genel olarak temas elemanları tipleri yapışmış (bonded), ayrılma yapmayan (no separation), Sürtünmesiz, Sürtünmeli , Pürüzlü (Rough) olarak sıralanabilir. Yapılan çalışmada birbirlerine kaynakla bağlı elemanlar yapışmış (bonded) olarak, alın levhası yüzeyi ile kolon yüzeyi arası sürtünmeli yüzey olarak modellenmiştir.



Şekil 5.9 : (TARGE170) elemanı (ANSYS Element Reference, 2009).



Şekil 5.10 : (CONTA 174) elemanı (ANSYS Element Reference, 2009).



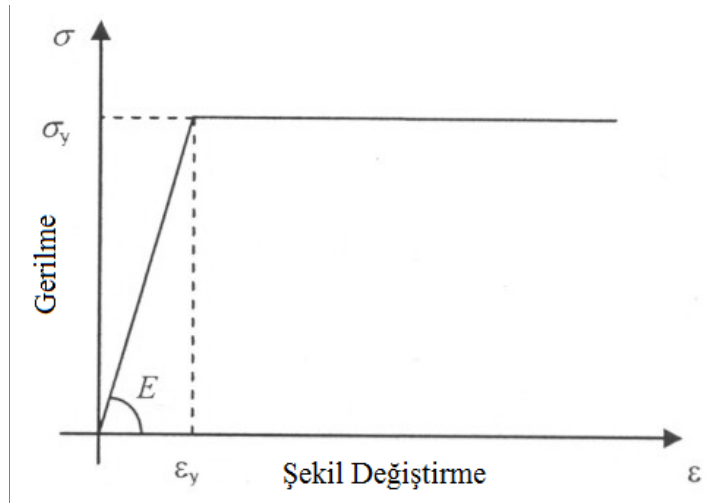
Şekil 5.11 : Sayısal analiz çalışmasından (CONTA174) eleman.

5.4 Malzeme Modeli

Sayısal analiz çalışmasında monotonik ve çevrimsel yükleme durumları için iki ayrı malzeme modeli oluşturulmuştur.

5.4.1 Monotonik yüklemeli çalışmalar için malzeme modeli

Kolon, kiriş ve alın levhası için bilineer elastik-mükemmel plastik malzeme modeli kabul edilmiştir. Poisson oranı 0,3 olarak alınmıştır. Malzeme özellikleri için çizelge 5.3’de verilen H. Augusto ve diğerleri (2012) tarafından sunulan malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Plastik bölge tanjant modülü iterasyon problemlerini önlemek amacıyla 10 MPa kabul edilmiştir. (Çok düşük seviyede pekleşme olduğu kabul edilmiştir.)



Şekil 5.12 : Bi-linear Malzeme modeli.

Tüm malzemeler için Von Mises akma kriteri dikkate alınmıştır. Alın levhası ile kolon başlığı arasındaki sürtünme katsayısı literatür çalışmalarında kullanılan sürtünme katsayıları dikkate alınarak 0.44 olarak kabul edilmiştir.

5.4.2 Çevrimsel yüklemeli çalışmalar için malzeme modeli

Genel olarak mühendislik problemlerinin çözümünde mühendislik gerilmesi-mühendislik gerinmesi değerleri kullanılır. Ancak önemli plastik şekil değiştirmelerin olduğu durumlarda malzeme hacminin sabit kaldığı kabulüyle malzeme kesitindeki daralma dikkate alınmalıdır. Tersinir yükleme deneylerinin malzeme modelini elde etmek amacıyla çekme testlerinden elde edilen mühendislik gerilme (σ_E) ve mühendislik şekil değiştirme (ϵ_E) grafikleri kullanılarak gerçek

gerilme (σ_T) - gerçek gerinme (ε_T) malzeme modeli elde edilmiştir. Bu yöntemle çevrimsel yükleme sonucu akma sonrası plastik bölgede meydana gelecek pekleşmenin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Kesite gelen kuvvet (F), yükleme öncesi malzeme kesit alanı (A_0), yükleme öncesi malzeme boyu (L_0), yükleme sonucu malzemede meydana gelen uzama miktarı (δ) olmak üzere, malzeme hacminin sabit kaldığı kabulüyle mühendislik gerilmesi (σ_E) ve mühendislik gerinmesi (ε_E) değerleri kullanılarak gerçek gerilme ve gerçek gerinme (ε_T) dönüşümleri denklem 5.3 ve 5.4 yardımıyla aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$\sigma_E = \frac{F}{A_0} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_E = \frac{\delta}{L_0} \quad (5.2)$$

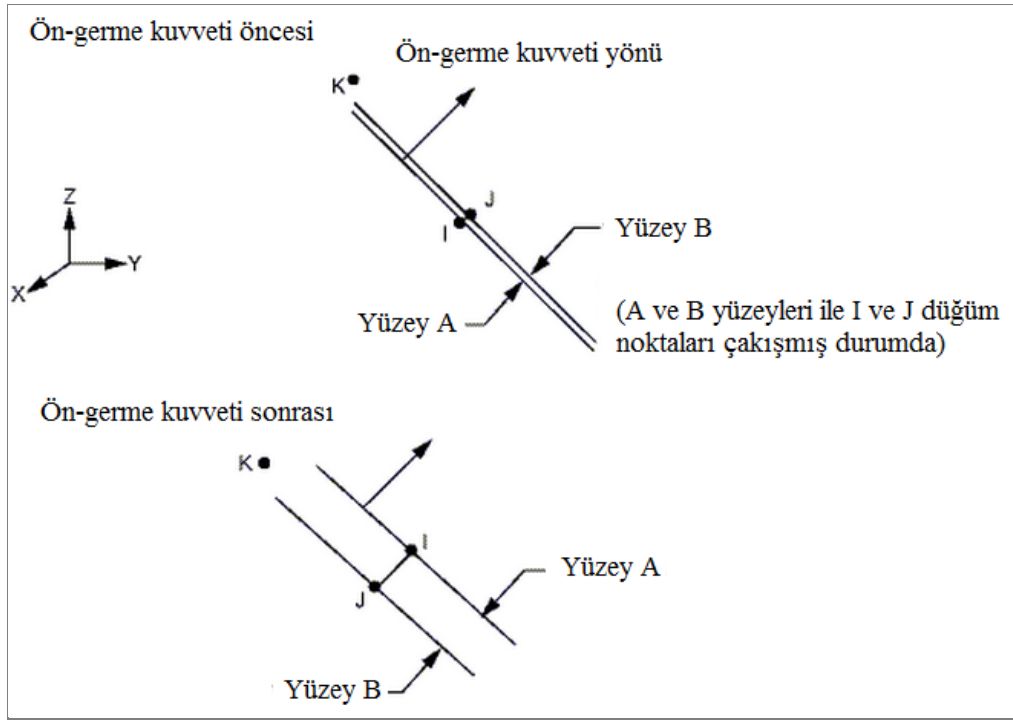
$$\sigma_T = \sigma_E (1 + \varepsilon_E) \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E) \quad (5.4)$$

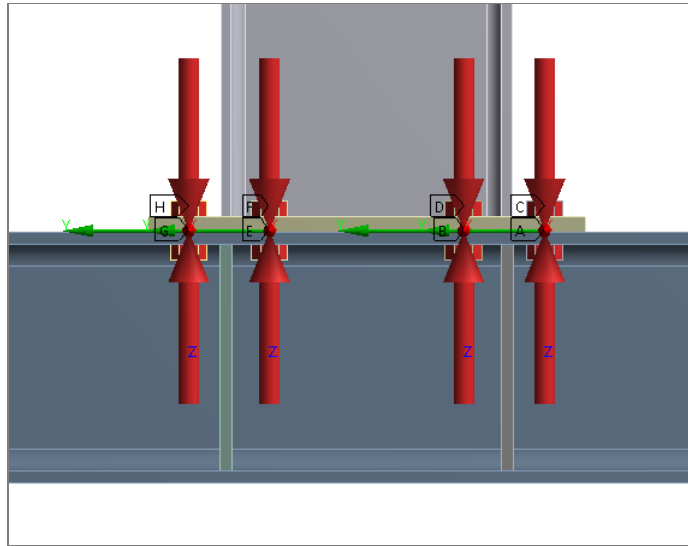
5.5 Analiz Metodu

5.5.1 Bulon öngerme yükünün uygulanması

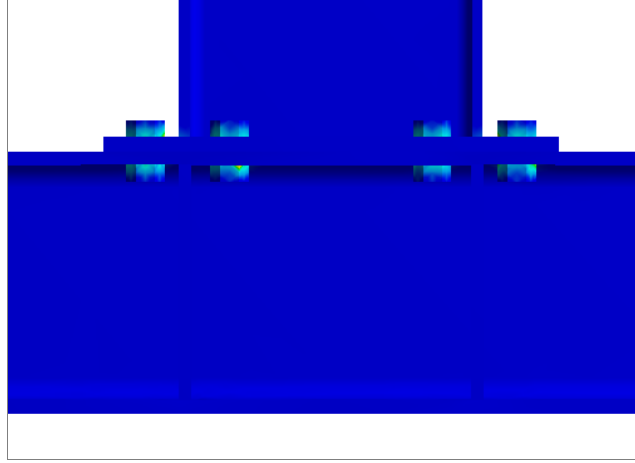
Bulonlara uygulanan ön-germe kuvvetini simüle etmek amacıyla ANSYS eleman kütüphanesinde bulunan PRETS179 elemanı kullanılmıştır. PRETS179, 2D ve 3D elemanlarda kullanılabilir. Ön-germe kuvveti doğrultusunda tek yön için hareket serbestliği mevcuttur. Sadece ön-germe kuvveti yönünde eksenel yükü desteklemektedir. Eğilme ve burulma kuvvetlerini desteklemez.



Şekil 5.13 : PRETS179 elemanı geometrik şeması (ANSYS Element Reference).



Şekil 5.14 : Bulonlara uygulanan ön-germe kuvvetinin gösterimi.



Şekil 5.15 : Bulonlara ön-germe uygulandıktan sonra meydana gelen gerilmeler.

5.5.2 Monotonik yüklemeye yer değiştirme yükü uygulaması

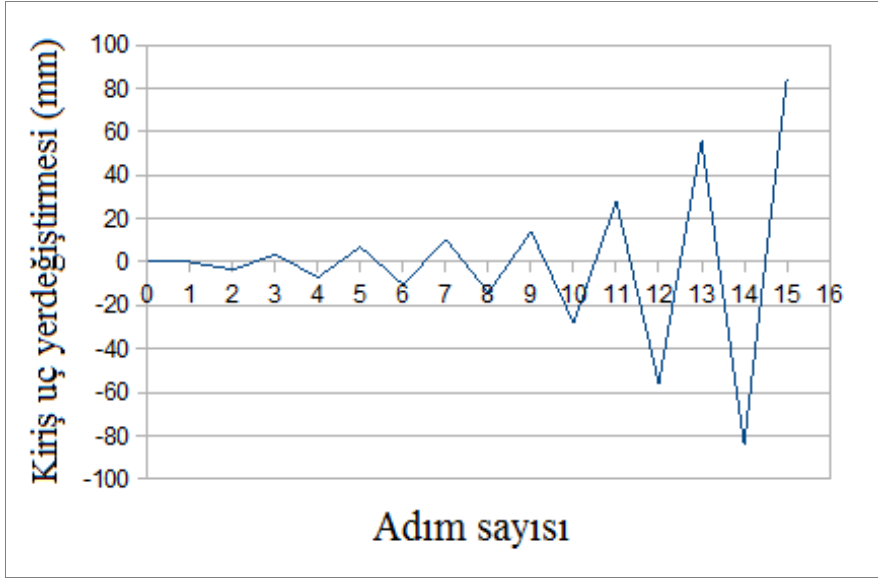
Sonlu elemanlar modelinin çözümlenmesi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada bulonlara 247 kN öngerilme verilmiştir. İkinci aşamada ise kirişin ucuna kademe kademe yer değiştirme yükü verilmiştir. Yükleme sırasında meydana gelen P-Delta etkisinin dikkate alınması için (Large Displacement Static Analysis) analiz tipi tercih edilmiştir.

5.5.3 Çevrimsel yüklemeye yer değiştirme yükü uygulaması

P.Nogueiro ve diğerleri (2006), deneysel çalışmada aynı numune için farklı yer değiştirme genlikleri ve yükleme adımı kullanılması suretiyle 2 adet tersinir yükleme deneyi yapmıştır. J1-2 testinde düşük genlikli yer değiştirme yükü ile 82 çevrimde göçme meydana gelirken, J1-3 testinde 22 adımda göçme durumuna ulaşılmıştır. Sayısal analiz çalışmasında quasi-statik analiz yapıldığı için yükleme hızının önemi yoktur (Atalet kuvvetleri dikkate alınmaz). Monotonik yükleme ile yapılan sayısal analiz çalışmasında her iki deney modeli için kiriş uç yerdeğiştirme yükü olarak akma yer değiştirmesi değerinin katları uygulanmıştır. Aşağıda moment kolu uzunluğu 1147 mm olarak uygulanan tersinir yükleme kiriş uç yer değiştirmeleri tablo ve grafik olarak gösterilmektedir. 0 ve 1. adımlarda bulon öngerme yükü uygulanmaktadır.

Sonlu elemanlar modelinin çözümlenmesi çok adımlı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada bulonlara 247 kN öngerilme verilmiştir. Daha sonra tersinir yüklemeye her farklı yönde yükleme için bir analiz adımı oluşturularak yükleme yapılmıştır. Yükleme sırasında meydana gelen P-Delta etkisinin dikkate alınması için Large

Displacement Static Analiz tipi tercih edilmiştir. Yükleme protokolü olarak ATC-24 yükleme protokolü dikkate alınmıştır. Sayısal analizde her adım için tek bir çevrim yapılmıştır. Monotonik yükleme sonrası elde edilen akma yer değiştirme değeri kullanılarak $\pm \Delta_y/4$, $\pm \Delta_y/2$, $\pm 3\Delta_y/4$, $\pm \Delta_y$, $\pm 2\Delta_y$, $\pm 4\Delta_y$... yer değiştirme yükü verilmiştir.



Şekil 5.16 : Yer değiştirme adımlarının grafik olarak gösterimi.

5.6 Sınır Koşulları

Makale çalışmasında numunenin mesnet koşullarının basit mesnet koşullu olduğu açıkça görülmektedir. Numunenin alt mesnetinde $\Delta X=0$, $\Delta Y=0$, $\Delta Z=0$, $RX=Serbest$, $RY=0$, $RZ=0$, üst mesnette ise $X=0$, $\Delta Y=0$, $\Delta Z=Serbest$, $RX= Serbest$, $RY=0$, $RZ=0$ olarak sayısal analiz modelinde kabul edilmiştir.

5.7 Moment-Dönme Grafiğinin Elde Edilmesi

Kolon yüzünde meydana gelen moment, kiriş ucuna uygulanan kuvvet ile kuvvet uygulanan noktanın kolon yüzünden olan uzaklığının çarpımına eşittir.

(Referans alınan çalışmada moment kolu hesap edilirken kolon yüzü dikkate alınırken, deneysel çalışma grafikleri elde edilirken SAC yükleme protokolüne uyularak kolon merkez aksı dikkate alınmıştır.)

$$M = P \times L \quad (5.5)$$

Mesnette meydana gelen dönme, mesnet toplam dönmesinden tüm modelin dönmesi ve kiriş ve kolondaki elastik dönmeler çıkartılarak elde edilir..

$$\varphi_{dönme} = \varphi_{toplamlam} - \varphi_{model} - \phi_{elastik} \quad (5.6)$$

Mesnette meydana gelen toplam dönme kirişin çeşitli noktalarından alınan ölçümlerle tespit edilebilir. Denklem 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10' da çeşitli ölçüm noktaları için örnekler verilmiştir.

$$\varphi_{toplamlam} = a \tan\left(\frac{\delta_{dt20} - \delta_{dt15} - \delta_{dt16}}{L_1}\right) \quad (5.7)$$

$$\varphi_{toplamlam} = a \tan\left(\frac{\delta_{dt18} - \delta_{dt15} - \delta_{dt16}}{220}\right) \quad (5.8)$$

$$\varphi_{toplamlam} = a \tan\left(\frac{\delta_{dt11} - \delta_{dt12}}{d_5}\right) \quad (5.9)$$

$$\varphi_{toplamlam} = a \tan\left(\frac{\delta_{dt1} - \delta_{dt2}}{d_3}\right) + a \tan\left(\frac{\delta_{dt3} - \delta_{dt4}}{d_4}\right) \quad (5.10)$$

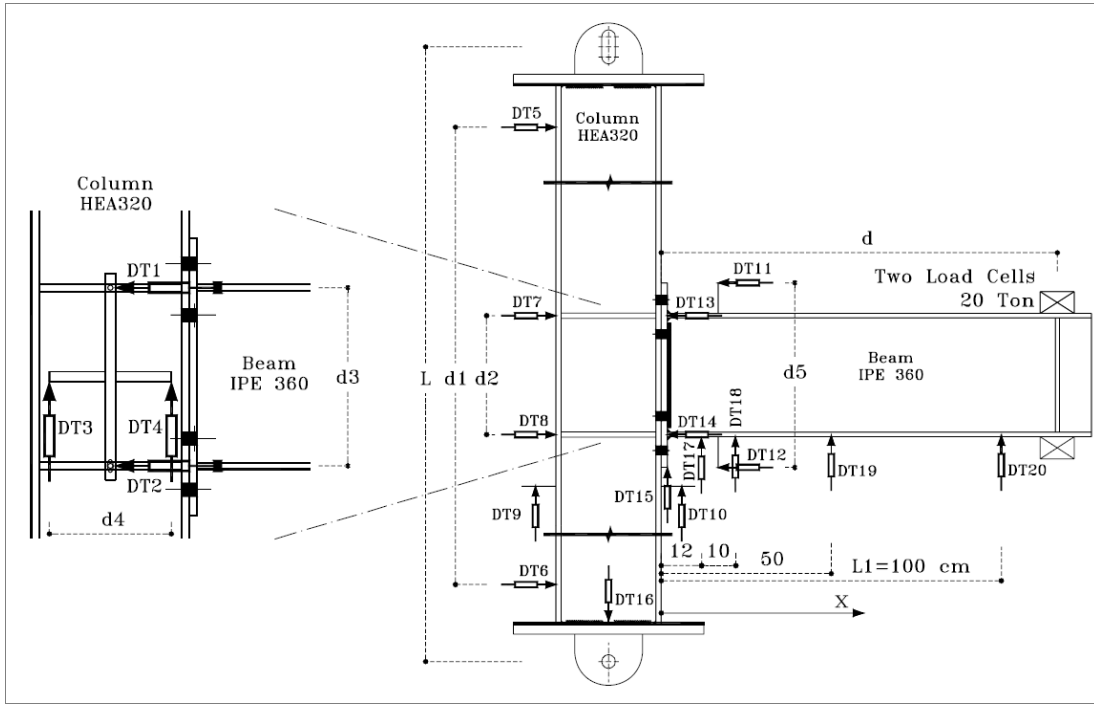
Modelde meydana gelen dönme, kolon mesnet bölgelerinin yakınından alınan ölçümlerle tespit edilir.

$$\varphi_{model} = a \tan\left(\frac{\delta_{dt5} - \delta_{dt6}}{d_1}\right) \quad (5.11)$$

Kolon ve kiriş elastik dönmesi 9 ve 10 no'lu denklemlerle tespit edilir.

$$\varphi_{kolon.elastik.dönme} = \frac{5}{64} \left(\frac{M_j \times (H - h_c)}{EI_c} \right) \quad (5.12)$$

$$\varphi_{kolon.elastik.dönme} = \frac{P}{EI_b} \left(\frac{d_b^2}{6} - \frac{L \times d_b}{2} \right) \quad (5.13)$$



Şekil 5.17 : Yer değıştirme ölçerlerin gösterimi (P.Nogueiro ve diğeri, 2006).

$\phi_{dönme}$: Mesnet dönmesi

$\phi_{toplamlam}$: Mesnetin toplam dönmesi

ϕ_{model} : Kolon-kiriş birleşiminden oluşan mesnetin rijit kütle hareketi

$\phi_{elastik}$: Kolon ve kirişin elastik dönmesi

δ_{dt} : Transducer Yerdeğıştirmesi

d : Transducer arası mesafe

I_b : Kiriş atalet momenti

I_c : Kolon atalet momenti

h_c : Kolon profil kesit yüksekliği

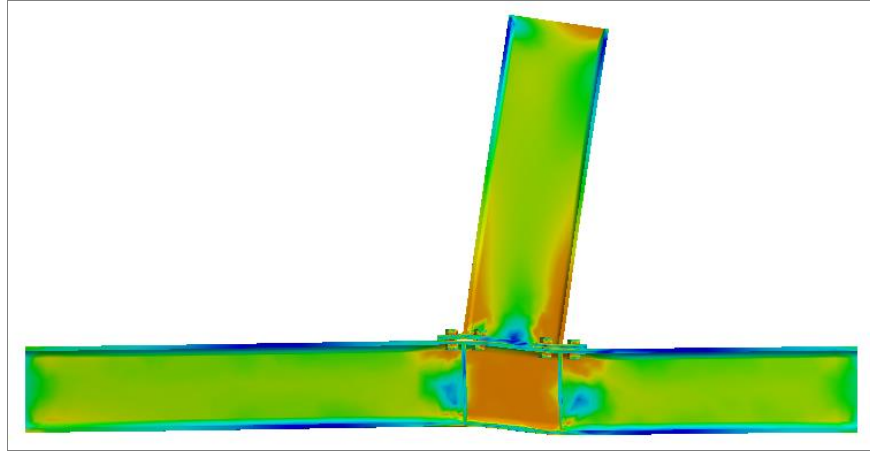
H : Kolon profil uzunluğu

M_j : Mesnete uygulanan moment

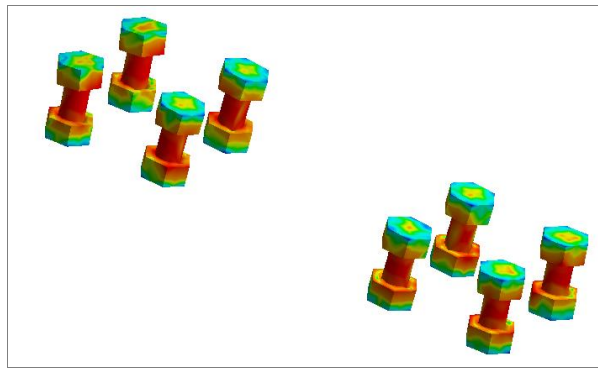
5.8 Sonuçların İrdelenmesi

Birleşim momenti hesaplanırken referans çalışması dikkate alınarak moment kolu 1147 mm olarak kabul edilmiş ve kolon yüzündeki oluşan moment dikkate alınmıştır.

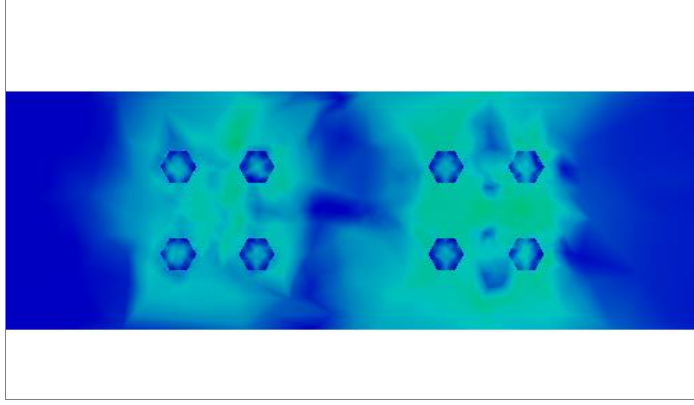
Mesnetin moment-dönme davranışı kirişte birçok farklı yerde ölçüm alınarak tespit edilebilir. Makale çalışmasında 17 numara ile gösterilen yer değiştirme ölçer sayısal analiz çalışması için esas alınmıştır. Elde edilen bu yer değiştirme değerinden kiriş ve kolonun elastik dönme deformasyonu çıkartılarak mesnette meydana gelen net dönme değeri elde edilir. P.Nogueiro ve diğerleri (2006), tarafından yapılan makale çalışmasında yukarıda 7 numara ile verilen denklemde sistemin komple dönme durumu dikkate alınmıştır. Ancak sayısal analiz çalışmasında böyle bir durum söz konusu olmadığı için bu durum dikkate alınmamıştır.



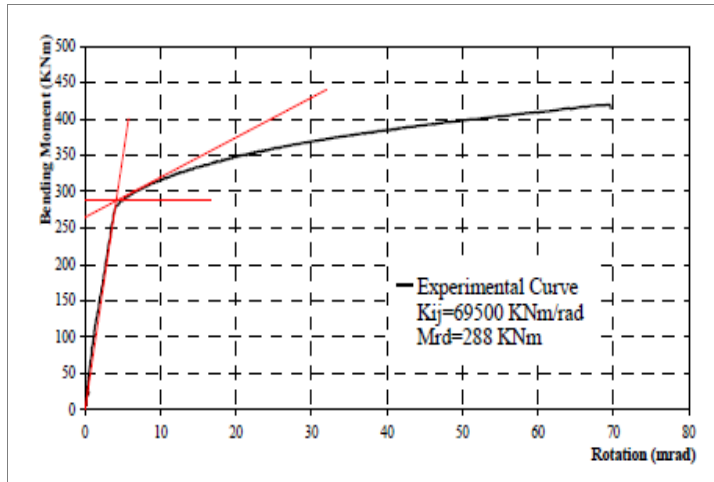
Şekil 5.18 : Sayısal analiz çalışmasında Von-Mises gerilmelerinin gösterimi.



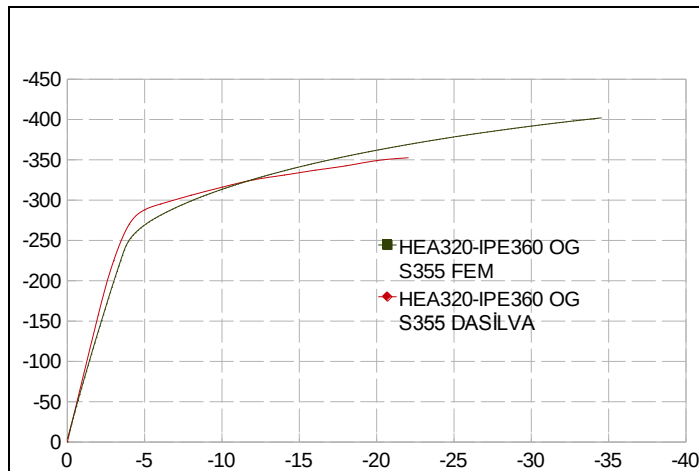
Şekil 5.19 : Bulonlarda meydana gelen Von-Mises gerilmelerinin gösterimi.



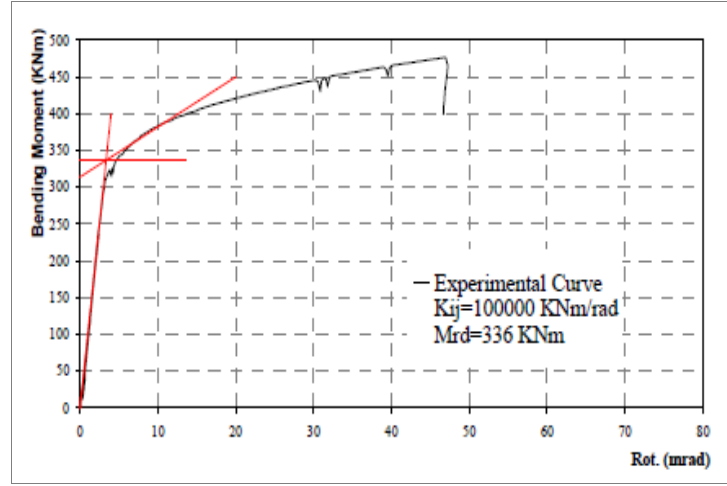
Şekil 5.20 : Kolon yüzünde meydana gelen kayma gerilmelerinin gösterimi.



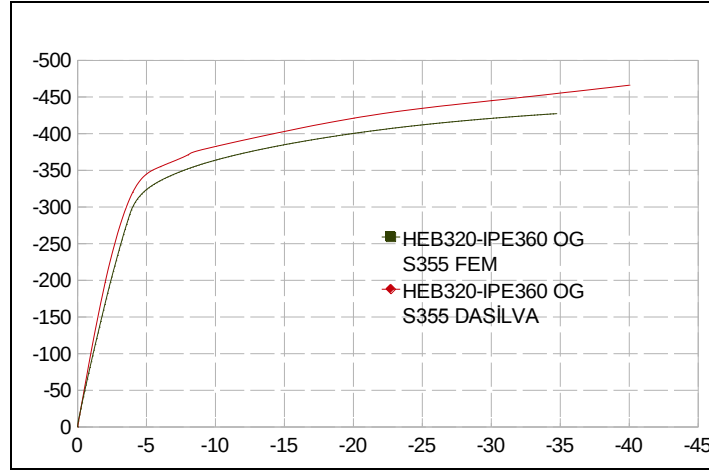
Şekil 5.21 : TestJ1.1 Moment-Dönme grafiği (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).



Şekil 5.22 : TestJ1.1 için sayısal analiz ile deneysel çalışma grafikleri.



Şekil 5.23 : TestJ3.1 için Moment-Dönme Grafiği (P.Nogueiro ve diğerleri, 2006).



Şekil 5.24 : TestJ3.1 için sayısal analiz ile deneysel çalışma grafikleri.

Çizelge 5.4 : Deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışması birleşim kapasitesileri.

Numune	Test (KN/m)	Sonlu Eleman (KN/m)	Test/Sonlu Eleman
Test J1.1	288	285.32	1.009
Test J3.1	336	333.45	1.0076

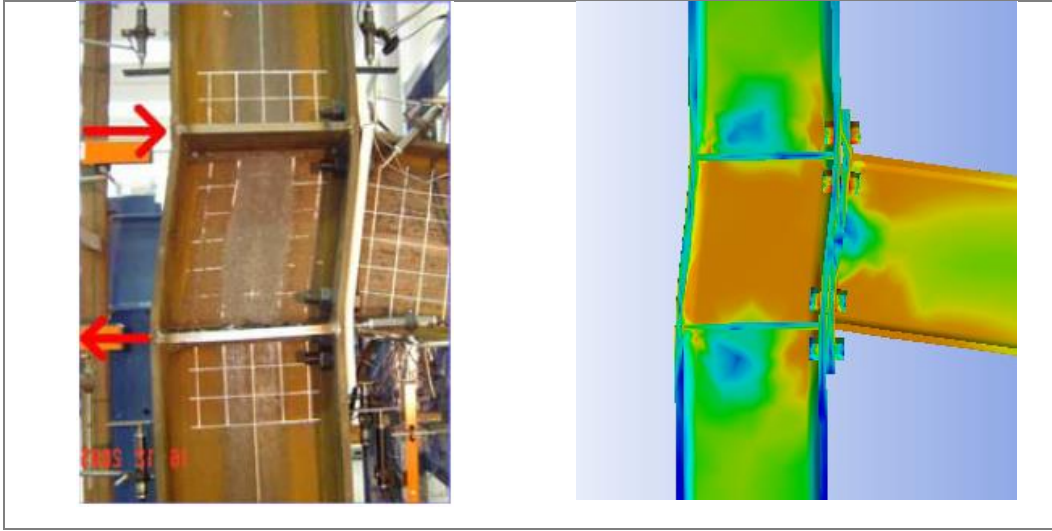
Çizelge 5.5 : Deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışması başlangıç rijitlikleri.

Numune	Test (KN/m)	Sonlu Eleman (KN/m)	Test/Sonlu Eleman
Test J1.1	69500	70000	0.993
Test J3.1	100000	90000	1.11

Çizelge 5.6 : Akma durumunda birleşimde meydana gelen dönmelerin kıyaslanması.

Numune	Test (mrad)	Sonlu Eleman (mrad)	Test/Sonlu Eleman
Test J1.1	4.14	4.076	1.015
Test J3.1	3.37	3.705	0.91

5.9 Sayısal analiz Çalışmalarının Değerlendirilmesi



Şekil 5.25 : TestJ3.1 için sayısal analiz ile deneysel çalışma grafikleri.

Bu çalışmada bulonları ön gerilme verilerek sıkılmış alın levhalı kolon-kiriş birleşimlerinin sonlu elemanlar modeli kurularak incelenmesi anlatılmıştır. Yukarıdaki tablo ve grafikler dikkate alındığında sayısal analiz çalışmasıyla, deneysel çalışma ile elde edilen birçok veriye makul bir hata payı ile ulaşıldığı görülmektedir. Sonlu elemanlar çalışması ile alın levhalı kolon-kiriş birleşimlerinin yükleme altındaki davranışı, yük kapasitesi, göçme modu, ayrıca mesneti meydana getiren birleşenlerden panel bölgesinin, alın levhasının, bulonların davranışı ve deformasyonu önemli ölçüde tespit edilebilmektedir. . Deneysel çalışma sırasında tespit edilmesi zor olan etkiler (bulon ön-germe kuvvetinden kaynaklanan gerilme dağılımı, maksimum ve minimum gerilme dağılımı, kolon başlığı ile alın levhası arasındaki sürtünme kuvvetleri gibi) sonlu elemanlar yöntemiyle başarılı bir şekilde incelemebilmektedir. Sonlu elemanlar çalışmasının doğruluğu deneysel çalışmalar ile

kıyaslanarak doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar çalışması parametrik çalışmalar yapmaya ve şartnameler için yeni tasarım metotları geliştirmek için imkân tanımaktadır.

Ancak deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışması arasında meydana gelen farklılıkların sebepleri şöyle sıralanabilir.

1- Malzeme modeli olarak sonlu elemanlarda elastik-mükemmel plastik malzeme modeli kabul edilmiş ve malzemede meydana gelen pekleşme etkisi göz ardı edilmiştir.

2- Bulonlara uygulanmak istenen öngerme kuvveti ile deneyde uygulanan öngerme kuvveti değişiklik gösterebilmesi mesnet rijitliğinin davranışını etkilemektedir.

3- Fabrikada imal edilen malzemelerde meydana gelen imalat kusurları da deneysel çalışma ile numerik çalışma sonuçları arasında farklılıklara sebebiyet vermektedir.

4- Deneysel çalışma sırasında meydana gelebilen hatalar

Sonlu elemanlar çalışmasında deneysel çalışmadaki gibi ani bir göçme durumu tespit edilememektedir. Ancak sayısal analizde meydana gelen deformasyon ve gerilmelerden birleşimde göçme meydana gelebilecek yer tahmin edilebilmektedir. J3-2 testinde alın levhasında kopma meydana geldikten sonra grafikte ani bir düşme olduğu belirtilmektedir. Sayısal analizde böyle bir kopma durumu tespit edilememekte ancak bahsi geçen yerde gerilmelerin sınır durumunda olduğu açıkça görülmektedir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA ÖN HAZIRLIK

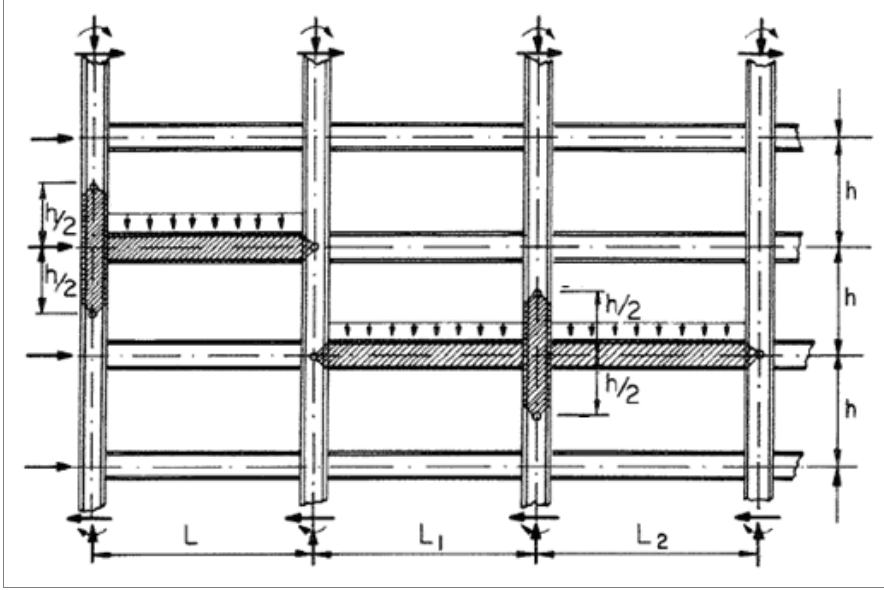
Bu bölümde numune detaylarının belirlenmesi, numunelerin imalatı, numunelerin laboratuvarda deneye hazır hale getirilmesi, deneyde kullanılan teçhizatlarının seçimi, numune üzerine deney teçhizatının kurulması, laboratuvarda veri okuma düzeneğinin kurulması gibi birçok husus açıklanmıştır.

6.1 Deneysel Çalışmanın İçeriği ve Amacı

Türk Deprem Yönetmeliğinde tavsiye edilen birleşim detaylarının piyasada çok kullanılan S275JR çeliği ve Avrupa normlarına uygun profillerle performansının tespit edilebilmesi için deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmuştur. DBYBHY-2007’de moment aktaran kolon-kiriş mesnetinin 0.04 toplam dönme kapasitesini karşılaması gerektiği belirtilmektedir. Bu kapsamda DBYBHY-2007 tasarım esaslarına göre detaylandırılmış ancak AISC 358-10’da tavsiye edilen parametrik sınırlamalara uymayan, S275 çelik kalitesi ve Avrupa profillerinin kullanıldığı (IPE, HEB) uzatılmış 4 bulonlu rijitlik levhasız moment aktaran alın levhalı kolon-kiriş birleşiminin 0.04 toplam dönme kapasitesini sağlayıp sağlamadığı gözlemlenecektir. Birleşimlerin dayanım ve elastik ötesi dönme kapasitesini tespit etmek ve deprem bölgelerinde bu birleşimlerin performansını araştırmak amacıyla kolon-kiriş birleşimleri monotonik ve çevrimsel yükleme altında incelenecektir. 5 adet deneysel çalışma ön görülmüştür. Numune detayları ile ilgili bilgiler aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

6.2 Numune Seçiminde Yapılan Kabuller

Deney düzeneği hazırlanırken bir taşıyıcı sistemde dış aksta bulunan kolon-kiriş birleşimi dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmada kolona etkiyen eksenel kuvvetin kiriş-kolon mesnet davranışına etkisi ihmal edilmiştir. Bu varsayımın başlıca sebebi numune tasarımında kolonun deney boyunca elastik kalacak şekilde boyutlandırılmış olmasıdır. Plastikleşme davranışı tümüyle kirişte meydana gelecektir.



Şekil 6.1 : İç ve Dış aks kolon-kiriş birleşimleri (Krawinkler ve diğ., 1971).

6.3 Numunelerin Tasarımı

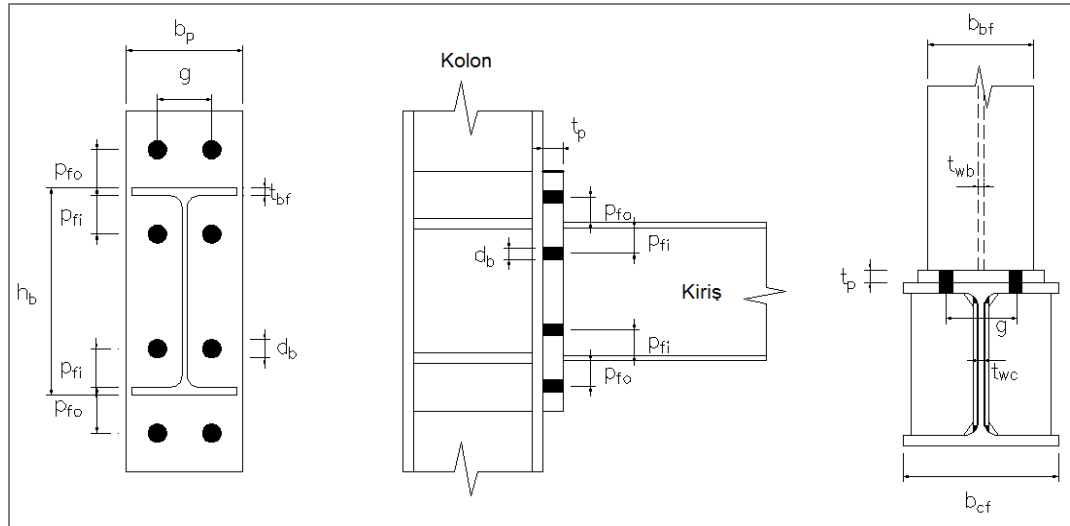
DBYBHY-2007 şartnamesine uygun olan ancak AISC 358-10'da verilen parametrik sınırlamalara uymayan, bir tanesi plot numune olmak üzere toplam 5 adet uzatılmış alın levhalı moment birleşimi için alın deneysel çalışma planlanmıştır. Pilot numune dışındaki tüm numunelerde HEB320 kolon profili kullanılmıştır. Kolonda plastik davranış meydana gelmemesi için kolon panel bölgesi 20 mm kalınlıkta süreklilik levhası ve 8 mm kalınlığında gövde takviye levhası ile güçlendirilmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılacak numuneler tasarlanırken kolonun, alın levhasının ve bulonların elastik kalması ve plastikleşmenin kirişte meydana gelmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla AISC Design Guide 4, AISC358-10 ve FEMA350 tasarım rehberleri dikkate alınarak kullanılarak kolon-kiriş birleşim bölgesi tasarımı yapılmıştır. Kiriş kesiti olarak seçilen HEB180 ve IPE270 aynı plastik mukavemet momenti değerine sahiptir. Kiriş profillerinin narinlik oranları süneklik düzeyi yüksek sistem için DBYBHY-2007 ve AISC 358-10'da aynı şekilde hesap edilmektedir. Buna göre IPE270 profili için 6.62, HEB180 profili için 6.43 olarak hesap edilmiştir. Profil narinlik hesabında elastisite modülü 200.000 N/mm^2 , akma mukavemeti 275 N/mm^2 olarak kabul edilmiştir. Kiriş kesitleri hidrolik piston kapasitesini zorlamayacak şekilde seçilmiştir. Aşağıda DBYBHY-2007 ve AISC358-10 tarafından tavsiye edilen parametreler ve numunelerin bu parametrelere uyum durumu tablo olarak

gösterilmiştir. Koyu renkle gösterilen rakamlar AISC 358-10 şartnamesi için verilen sınırlamalara uymayan ölçüleri göstermektedir.

Çizelge 6.1 : Numune özelliklerinin tablo olarak gösterimi.

Numune No	Kolon		Kiriş		Süreklilik Levhası		Alın levhası	Bulon sınıfı ve kalitesi	Yükleme Tipi
	Kesit	Kalite	Kesit	Kalite	tcp	Kalite	Tp	Kalite	
P0	IPE300	S275	IPE270	S275	-	-	20	S235	M24/10.9 Monotonik
P1	HEB320	S275	IPE270	S275	20	S235	35	S235	M22/10.9 Monotonik
P2	HEB320	S275	IPE270	S275	20	S235	35	S235	M22/10.9 Tersinir
P3	HEB320	S275	IPE270	S275	20	S235	35	S235	M24/10.9 Tersinir
P4	HEB320	S275	HEB180	S275	20	S235	35	S235	M24/10.9 Tersinir



Şekil 6.2 : Numunelerdeki ölçülerin gösterimi.

Çizelge 6.2 : Şartnamelerde verilen parametrik sınırlamalar.

Parametreler	DBYBHY-07		AISC 358-10		NUMUNELER			
	Min	Max.	Min.	Max.	P1	P2	P3	P4
t_{bf}	-	20	10	19	10.2	10.2	10.2	14
b_{bf}	-	-	152	235	135	135	135	180
h_b	-	750	349	1400	270	270	270	180
t_p	-	-	13	57	35	35	35	35
b_p	-	-	178	273	190	190	190	210
g	-	-	102	152	120	120	120	120
P_{fi}, P_{fo}	-	-	38	114	50	50	50	50

6.4 Laboratuvar Teknik Özellikleri

Deneysel çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilecektir. Yükleme için 250 kN kapasiteli, yerdeğiştirme kontrollü, MTS hidrolik piston kullanılacaktır. Hidrolik piston 600 kN kapasiteli betonarme duvara sabitlenmiş durumdadır. Numune kesitlerinin seçimini piston kapasitesi önemli ölçüde sınırlamıştır. Hidrolik piston yardımıyla, alın levhalı birleşime kolon yüzünden yaklaşık 1750 mm mesafede yükleme protokolüne bağlı olarak yer değiştirme yükü uygulanmıştır. Piston orta noktadan ± 300 mm yerdeğiştirme yapma kapasitesine sahiptir. Numunenin düzlem dışı hareketini önlemek için bir düzeneğe düşünülmüştür.

6.5 Numunelerin İmalatı

Rozak demirden temin edilen malzemeler Çelik & Çelik firmasında imal edilmiştir. İmalat öncesi gelen malzemeler Sa2.5 kalitesini sağlayacak şekilde kumlama yöntemiyle temizlenmiştir. Süreklilik levhası ve gövde takviye levhaları plazma yardımıyla, kolon ve kiriş profilleri ise elektrikli testere yardımıyla kesilmiştir. (Malzeme karakteristik özelliğini bozacak kesim tekniklerinden özellikle kaçınılmıştır.)

Kiriş başlığı ile alın levhası arasında köşe kaynağı, kiriş gövdesi ile alın levhası arasında küt kaynak kullanılmıştır. Kaynaklama işlemi aşağı el pozisyonunda atölyede yapılmıştır. Kaynaklar manuel elektirik ark kaynağı yöntemiyle yapılmış ve kaynak malzemesi olarak düşük hidrojenli yumuşak elektrot kullanılmıştır. Kaynaklama işleminde As kaynak marka E7018 elektrot kullanılmıştır. Üretici firmanın verdiği bilgilere göre Elektrot akma dayanımı 460 N/mm^2 , kopma dayanımı ise 530 N/mm^2 dir. Kolon ve alın levhası delikleri manyetik freze ve matkap kullanılarak açılmıştır. Alın levhası bulonu olarak ISO 10.9 kalitesine sahip bulon kullanılmıştır. Tüm bulonlara bulon çapı ve kalitesine uygun olarak ön germe kuvveti uygulanmıştır.

Tüm deneylerde kolon kesiti olarak HEB320 profili kullanılmıştır. Kolonda plastikleşme meydana gelmemesi amacıyla HEB320 kesiti gövde takviye levhaları ve süreklilik levhalarıyla takviye edilmiştir. Panel bölgesi S275 kalitesinde 8 mm kalınlığında levha ile her iki panel yüzeyinde takviye edilmiştir. Ayrıca kolonda kiriş

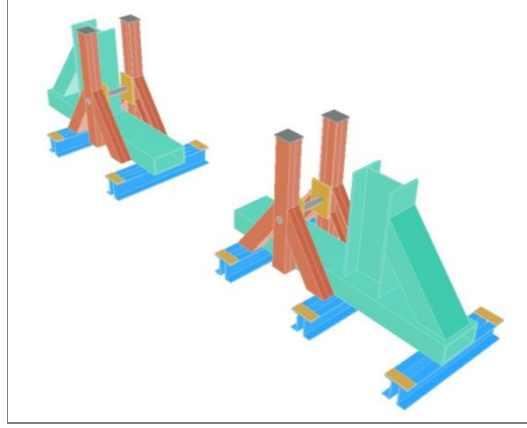
başlıkları hizasında S235 kalitesinde 20 mm kalınlığında süreklilik levhası kullanılmıştır. Kiriş kesiti olarak ise IPE270 ve HEB180 profilleri kullanılmıştır.

Tüm imalat kalemleri montaj sırasından meydana gelebilecek karışıklıkları önlemek amacıyla markalanmıştır. Nakliye sırasında deney öncesi malzemeler istiflendiği sırada malzemelerin zarar görmemesi için hassasiyet gösterilmiştir.

6.6 Numunelerin Laboratuvarda Deneye Hazır Hale Getirilmesi

- ▲ Vinç yardımıyla kolon ve kiriş elemanı deney düzeneğine sabitlenmiştir. Numuneler taşınırken malzemelerin deformasyona uğramaması için hassasiyet gösterilmiştir.
- ▲ Pistonun doğrultusu kablolar vasıtasıyla ayarlanmıştır. Düzlem dışı hareketini önlemek amacıyla piston kafa kısmının dönmesi sınırlandırılmıştır.
- ▲ Yerleştirilen numune yüzeyi temizlenerek boyaya hazır hale getirilmiştir. Kolon-kiriş mesnet bölgesi hazır olarak piyasada satılan kireç- su karışımı ile boyanmıştır. Kireç-su karışımı ile boyanarak deney sırasında malzemede meydana gelen deformasyonların kirecin dökülmesiyle daha iyi gözlemlenmesi amaçlanmıştır.
- ▲ Kireçle boyanan kısım kuruduktan sonra boyanan kısımda meydana gelen deformasyonların yerini daha rahat tespit etmek maksadıyla karelej çalışması yapılmıştır.
- ▲ Yerdeğiştirme ölçerlerinden data alınması amacıyla numunelerin üstünde daha önce belirlenen yerlere alüminyum köşebentler yerleştirilmiştir. Bu düzeneklerin sabitlenmesi sırasında yapıştırıcı katkı maddeleri kullanılmış ve kaynaklama işleminden özellikle uzak durulmuştur.
- ▲ Civataların sıkılması ve torklama

Birleşim bölgesinde kullanılan 10.9 kalitesindeki civatalar As Civata firmasından temin edilmiştir. M22 ve M24 olmak üzere iki tip civata kullanılmıştır. Yapılan sayısal analiz çalışmalarında kolon-kiriş birleşimi başlangıç rijitliği davranışını uygulanan bulon ön-germe değerlerinin önemli derecede etkilediği görülmüştür. Bu sebeple civataların sıkılması tork makinesi yardımıyla en hassas şekilde yapılmıştır. M24 civatalar için 1030 Nm, M22 civatalar için ise 850 Nm tork uygulanmıştır.



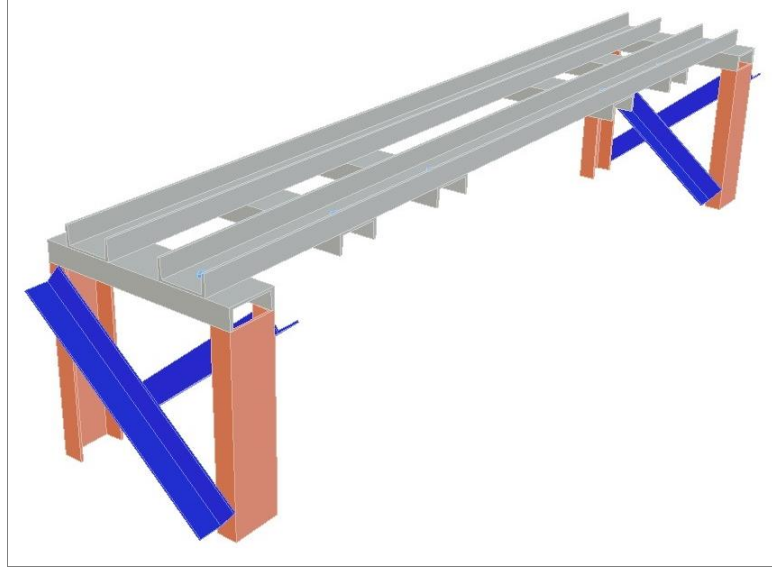
Şekil 6.3 : Numunenin sabitlendiği düzenek.

6.7 Düzlem Dışı Hareketin Önlenmesi

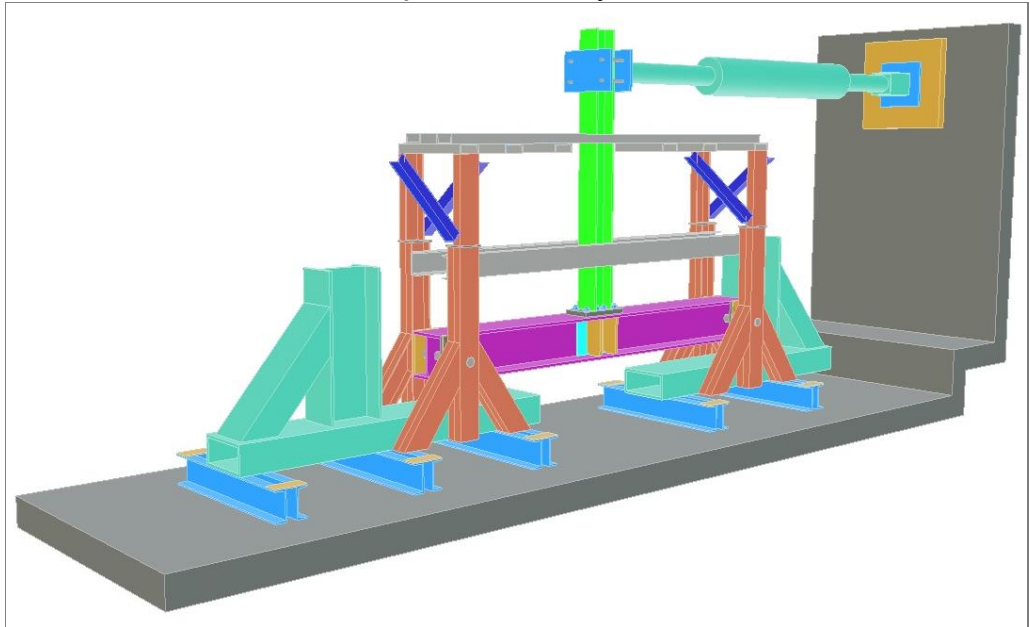
Deneyisel çalışmanın doğruluğu açısından numunenin yük altında düzlem dışı hareketinin önlenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu amaçla profil kesitlerden imal edilmiş sökülüp-takılabilen köprü vasıtasıyla düzlem dışı hareket önlenmiştir. Ayrıca düzlem dışı hareketi önleyen düzlenekten yer değiştirme ölçer kullanılarak sürekli ölçüm alınarak düzeneğin düzlem dışı hareketi sürekli takip edilmiştir. Düzlem dışı düzeneği ile deney numunesi arasında yaklaşık 2 mm boşluk bırakılmıştır. Ayrıca meydana gelebilecek sürtünmeleri asgariye indirmek maksadıyla düzlem dışı düzeneğinin sürtünebilecek bölgelerine sürtünmesiz teflon yüzey kaynaklanmış ve bu teflon yüzeyler gres yağı ile yağlanmıştır.



Şekil 6.4 : Deney düzeneği 3D görünüş.



Düzlem dışı hareketi önleyen düzenek.



Şekil 6.5 : Deney düzeneğinin numune ile birlikte 3D görünüşü.

6.8 Numune Bağlantı Düzeneği

Deney numunesinin deney düzeneğine bağlanması amacıyla kolonun iki ucuna 67 mm eninde 85 mm boyunda slot delikler açılmıştır. Düzeneğe ait 65 mm çapındaki içi dolu miller bu deliklerden geçirilerek numune sabitlenmiştir. Mesnetlerden biri kayıcı olarak bırakılmış, diğer mesnette ise yatay yer değiştirme engellenmiş ve sadece dönmeye izin verilmiştir (Basit kiriş sistem). Ayrıca mesnet kısmında kolon yüzeyinin üst kısmına demir bir çubuk kaynaklanarak kolon profilin yatay hareketi önlenmiştir.



Şekil 6.6 : Mesnet bölgesinin görünüşü.

6.9 Veri Okuma ve Kayıt Sistemi

Deneysel çalışma öncesinde başka deneysel çalışmalar gözlemlenmiş ve deneysel olarak yapılan akademik çalışmalar incelenmiştir. Yapılan araştırmalarda bir kaç önemli husus yapılan deneysel çalışmanın doğruluğu açısından dikkat çekmiştir. Bu hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yeterli sayıda ölçüm aleti kullanılması,
- Ölçüm aletlerinin doğru yerlere yerleştirilmesi,
- Ölçüm aletlerinin düzgün ve hassas bir şekilde sabitlenmesi,
- Deneysel çalışmada numunede beklenmeyen etkiler (eğilme, kayma, düzlem dışı hareket) oluşması durumunda bu etkilerin ne olduğunun ve oluşma sebebinin tespiti, bu etkilerden kaynaklanan veri hatalarının giderilmesi için ek ölçümler alınması,

Yapılacak deneysel çalışma ile çevrimsel yükler altında alın levhalı moment birleşiminde, birleşim bölgesinde oluşacak gerilme ve şekil değiştirmelerin tespiti amaçlanmıştır.



Şekil 6.7 : Mesnet bölgesinin görünüşü.



Şekil 6.8 : Veri okuma sistemi görünüşü.

Yerdeğiştirme ölçerlerin yeri tespit edilirken aşağıdaki kontrol noktaları dikkate alınarak yerleşim planı hazırlanmıştır.

1. Düzlem dışı hareketin tespit edilmesi için düzlem dışı doğrultuda yerdeğiştirme ölçer yerleştirilecektir.
2. Sistemde (tüm deney düzeneğinde) oluşması muhtemel hareket miktarının bulunması için yerdeğiştirme ölçer yerleştirilecektir.

3. Kiriş uç noktasında uygulanan yer değiştirme yükünün kontrolü için kiriş uç kısmında yerdeğiştirme miktarı tespit edilir.
4. Kirişte oluşan yerdeğiştirme ve dönmeler belirlenecektir.
5. Kolonda oluşan yerdeğiştirme ve dönmeler belirlenecektir.
6. Panel bölgesinde oluşan yerdeğiştirme belirlenecektir.
7. Süreklilik levhalarında oluşan yerdeğiştirme belirlenecektir.

Çizelge 6.3 : Yerdeğiştirme ölçerlerin hassasiyetleri

Adı	Tipi	Kapasite (mm)	Hassasiyeti
HO	DP1000	1000	
V1	CDP25	25	2.00E-003
V2	CDP25	25	2.00E-003
H3	CDP25	25	2.00E-003
H4	CDP25	25	2.00E-003
H5	CDP10	10	1.00E-003
H6	CDP10	10	1.00E-003
H7	CDP25	25	2.00E-003
H8	CDP25	25	2.00E-003
H9	CDP25	25	2.00E-003
H10	CDP25	25	2.00E-003
H11	CDP50	50	5.00E-003
H12	CDP50	50	5.00E-003
H13	CDP10	10	1.00E-003
H14	CDP10	10	1.00E-003
H15	CDP25	25	2.00E-003
H16	CDP10	10	1.00E-003
H18	SDP200	200	2.00E-002
H19	SDP200	200	2.00E-002
H20	DP1000	1000	2.00E-002
H21	SDP300	300	2.00E-002
H22	CDP10	10	1.00E-003
H23	CDP5	50	5.00E-004
H24	CDP50	50	5.00E-003
FLA 6-11			%3 (maksimum strain)
FLA 5-11			%3 (maksimum strain)
YFLA 5-11			%15-20 (maksimum strain)
Data-Logger			TML marka TDS 302

6.10 Veri Okuma ve Kayıt Sistemi

Deneysel çalışmada FLA 5-11, FLA 6-11, YFLA 5-11 tipi şekildeğiştirme ölçerler kullanılmıştır. Şekil değıştirme ölçerlerde sistematik bir isimlendirme yöntemi kullanılmaktadır. F tipi genel amaçlı olarak numunede meydana gelen gerilme-şekil değıştirme etkilerini ölçüm için kullanılır. Maksimum %3 şekil değıştirme durumu için tercih edilirler. YFLA tipi şekil değıştirme ölçerler ise malzemede akma sonrası şekil değıştirmeyi tespit etmek amacıyla (%15-20 şekil değıştirme durumu için) kullanılmaktadır. Tip kodunun yanında bulunan rakamlar ise şekil değıştirme ölçerin boyunu ifade etmektedir (FLA5, 5 mm uzunluğunda). Şekil değıştirme ölçerlerin boyu ile hassasiyeti arasında bir ilişki yoktur. Şekil değıştirme ölçerlerin boyu arttıkça daha geniş bir bölümden ortalaması alınarak data alınmaktadır. Kodlama da kullanılan 11 ise şekil değıştirme ölçerin çelik malzeme için kullanımını ifade etmektedir. Şekil değıştirme ölçerler piyasada kablolu ve kablosuz olacak şekilde bulunmaktadır. Kablosuz olarak temin edilen strengeler kablo bağlandıktan sonra belli kablo boyları için sağlaması gereken dirençlerin voltmetre ile kontrol edilmesi gerekmektedir. Direnç miktarı, şekil değıştirme ölçerlerin tipine ve kablo uzunluğuna göre değışiklik göstermektedir. Deney öncesi yapılan analitik ve sonlu elemanlar çalışmasıyla deney sırasında akma meydana gelmesi beklenen bölgeler daha önce tespit edilmiş ve bu bölgelere YFLA tipi şekil değıştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Elastik kalacak bölgelerde ise FLA tipi şekil değıştirme ölçerler tercih edilmiştir.



Şekil 6.9 : Şekil değıştirme ölçerlerden bir kısmının görüntüsü.

6.11 Şekil Değiştirme Ölçerlerin Numuneye Yapıştırılması

- ⤴ Şekil değiştirme ölçerlerin yerlerinin hassas bir şekilde tespiti için bilgisayarda A4 ebatında 1/1 ölçekli hazırlanmış şablon karton kullanılmıştır. Numunenin simetri aksında yerleştirilen şablon yardımıyla şekil değiştirme ölçerlerin yeri işaretlenmiştir.
- ⤴ İlk olarak numunede yüzey hazırlığı yapılır. Bu amaçla matkap ucuna takılan daire şeklindeki yüzey temizliği aparatıyla numunedeki pas, kir ve boşluklar giderilene kadar temizlenir.
- ⤴ Daha sonra pamuk üzerine aseton dökülerek yüzey temizliği yapılan yer temizlenir.
- ⤴ Asetonun uçması beklendikten sonra yapıştırıcı malzeme şekil değiştirme ölçer de elektronik devrenin bulunmadığı yüzeye yüzeye sürülür. Daha sonra şekil değiştirme ölçer ile birlikte üretici firma tarafından verilen yapışmaz saydam kâğıtlar yardımıyla strengeç yapıştırıldıktan sonra strengeçin üstüne parmakla baskı yapılır ve iyice yapışması sağlanır. Bu işlem yapılırken şekil değiştirme ölçerin yeri ve doğrultusuna azami derece dikkat edilir.
- ⤴ Şekil değiştirme ölçer iyice yapıştıktan sonra voltmetre ile direnç kontrolü yapılır. Ayrıca yaptıktan sonra tel ayakların birbirlerine değerek kısa devre yapmadığından emin olunmalıdır.

6.12 Yerdeğiştirme Yükünün Uygulanması ve Verilerin Kaydedilmesi

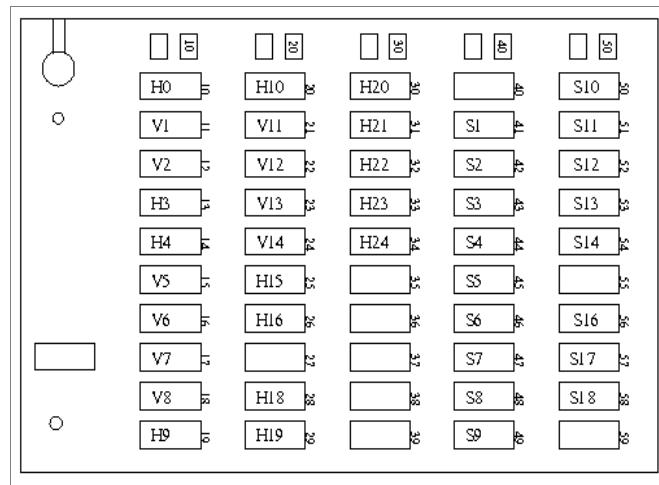
Deneyisel çalışmada kullanılacak MTS marka hidrolik piston merkez kontrol odasından OS/2 WARP İşletim Sistemi kullanılarak idare edilmektedir. TestWare-SX isimli yazılım ise isteğe bağlı olarak yerdeğiştirme veya kuvvet yükü uygulamak için kullanılmaktadır. Her kayıt adımı üç aşamada gerçekleştirilir. Bu adımlar RAM kontrolü, trigger delay ve veri toplama olarak tanımlanır. Ram kontrolü aşamasında yaklaşık bir saniye süre ile donanımın hafızası kontrol edilir. Trigger delay aşamasında uygulanan yükün elemana tam olarak tatbiki için geçen süreyi ifade eder ve bu süre yaklaşık 2 saniyedir. Veri toplama aşamasında ise tüm veri noktalarından ilgili bilgiler alınır. Tüm veriler merkez kontrol odasındaki TML marka TDS-302 Data-Logger cihazına visual log yazılımı kullanılarak aktarılır.



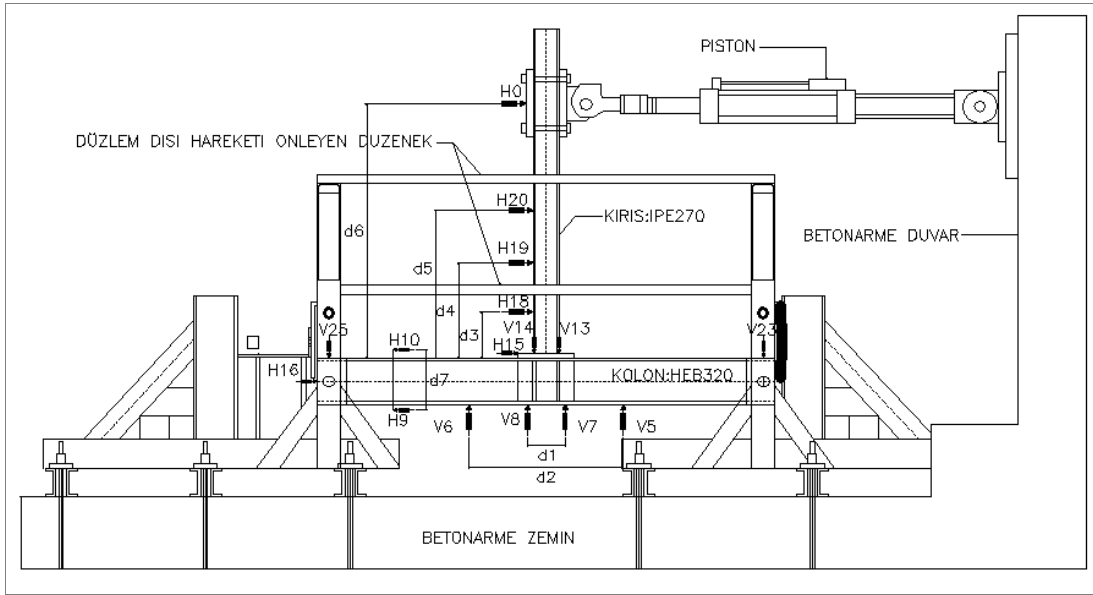
Şekil 6.10 : Switch-box kutusu ve deney düzeneği.

Deneysel çalışma öncesinde yerdeğiştirme ölçerlerin switchbox kutusundaki konumu (kanal numarası) tespit edilmiş ve bu kanal numaraları visual log programına girilerek hangi kanalın hangi ölçüm cihazına bağlı olduğu belirtilmiştir (Şekil 6.12).

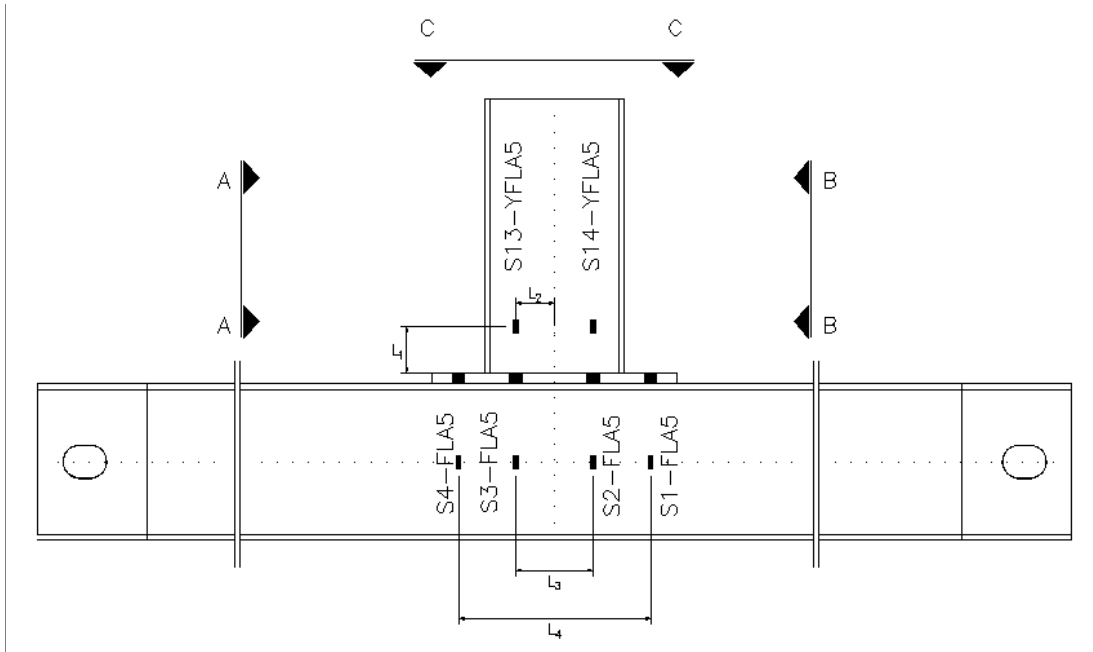
Kanal kontrolü: Ölçüm cihazlarının bağlantıları tamamlandıktan sonra çevrimsel yükleme deneyleri için tüm yerdeğiştirme ölçerler orta konumuna (mid-stroke position) getirilmiştir. Bu şekilde ölçüm cihazlarından pozitif ve negatif yönler için okuma alınmıştır. Bu işlemler yapılırken düzeç yardımıyla yer değiştirme ölçerlerin doğrultuları kontrol edilmiştir.



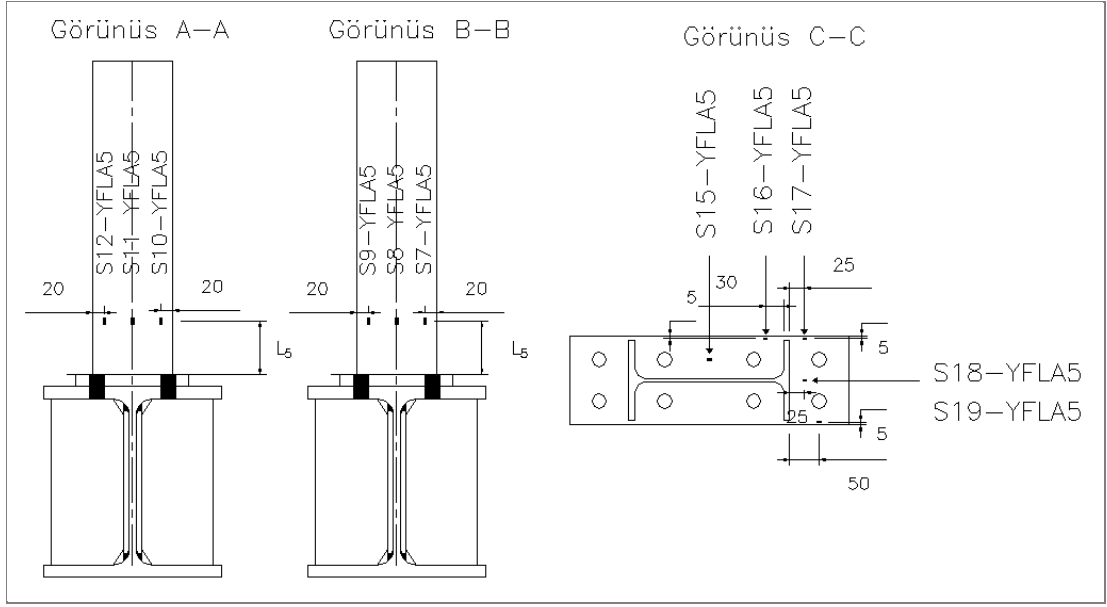
Şekil 6.11 : Yerdeğiştirme ölçer ve gerilme ölçer yerleşim planı.



Şekil 6.12 : Deney düzeneğinin görüntüsü ve yerdeğiştirme ölçer planı.



Şekil 6.13 : Deney düzeneğinin strengçe planı (Yan görünüş).



Şekil 6.14 : Deney düzeneğinin strengçe planı (Cephe görünüş).

7. DENEYSEL ÇALIŞMA VE GÖZLEMLER

Bu bölümde numuneler için uygulanan yükleme programı ve deney sırasında yapılan gözlemler detaylı olarak verilmiştir. Deneysel çalışmalar yükleme tipine göre iki ayrı grup olarak sınıflandırılmıştır. 2 adet monotonik ve 3 adet çevrimsel yüklemeli olmak üzere toplam 5 adet deney yapılmıştır. Deneysel çalışmalar S275 çelik kalitesinde imal edilmiş birleşimlerin temel özellikleri (başlangıç rijitliği, dönme kapasitesi, birleşim nihai moment kapasitesi vs.) incelenmiş ve ayrıca aynı plastik mukavemet momentine sahip kirişlerde kiriş geometrisindeki değişimin (IPE ve HEB profilleri) birleşim çevrimsel davranışı üzerindeki etkisinin tespiti amaçlanmıştır. Kolonlar, alın levhası, civatalar ve kaynaklar yükleme altında elastik kalacak şekilde boyutlandırılmıştır. Lineer olmayan deformasyonun kiriş plastik mafsallık bölgesinde oluşumu hedeflenmiştir. Deneysel çalışma sırasında çekilen resimler ve kayıt altına alınan okumalar Ek D ve Ek E’de sunulmuştur.

7.1 Yükleme Protokolü

7.1.1 Monotonik yükleme

İki adet monotonik yükleme testi gerçekleştirilmiştir. Numune kiriş ucuna monotonik yer değiştirme yükü uygulanmıştır. Monotonik yükleme hızı 0.02 mm/sn’dir. Beklenen elastik limitin yaklaşık 2/3’ü kadar ön yükleme yapıldıktan sonra sistem yükü boşaltılmış ve yük sıfırlanmıştır. Bu noktadan 0.02 mm/sn yükleme hızı ile tekrar yer değiştirme yükü uygulanmıştır.

7.1.2 Çevrimsel yükleme

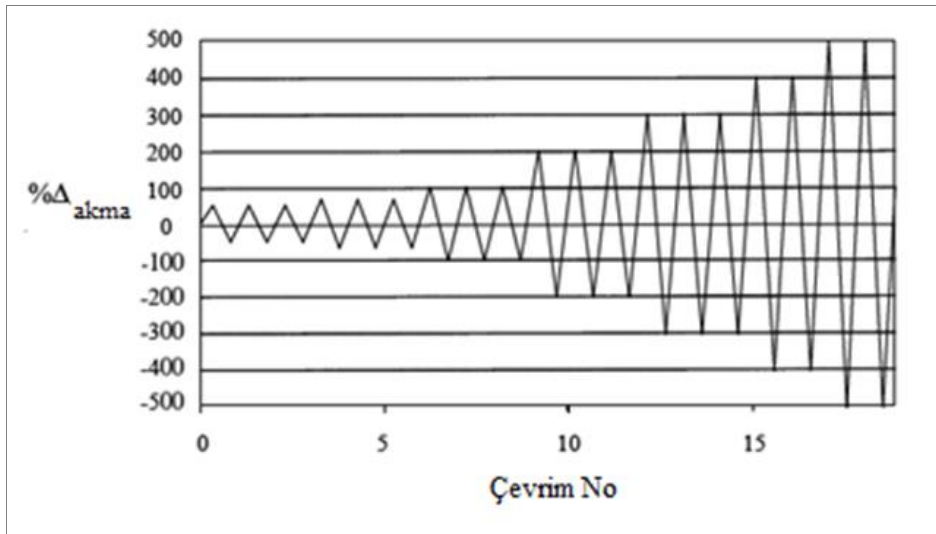
Çok adımlı bir numune yükleme metodudur. Numuneye artımsal çevrimler uygulanmaktadır. Yükleme protokolünün deformasyon için dikkate aldığı parametre katlararası sürüklenme açısı veya akma yer değiştirmesidir.

7.1.3 Çevrimsel yükleme protokolünün seçimi

Literatürde kullanılan birçok yükleme protokolü bulunmaktadır. Bu protokoller farklı yüklemeler tavsiye ettiği halde temel olarak aynı mantığı içermektedir. Literatürdeki yükleme protokolleri malzemeye göre (çelik-ahşap) farklılık göstermektedir. Deneysel çalışmada uygulanan bu yükleme protokolleri ile incelenen numunenin deprem yükleri altındaki performansının anlaşılması amaçlanmaktadır. Çelik yapıların performansına yönelik literatürde en çok kullanılan iki adet yükleme protokolü mevcuttur. Bunlar (ATC-24,1992) protokolü ile (SAC,1997) protokolüdür.

7.1.3.1 ATC-24 protokolü

Çelik yapı birleşenlerinin deprem yükleri altındaki performansının çevrimsel yükler altında tespiti için A.B.D.'de geliştirilmiştir. Resmi olarak ilk kullanılan protokollerden biridir. Çevrimlerin genliği, numunede akma durumu için meydana gelen yer değiştirmeye göre belirlenir. Yükleme protokolünde en az 6 adet elastik çevrimden sonra Δ_y akma, 2 Δ_y akma, 3 Δ_y akma olarak, Δ_y akma deplasmanı artırımlarıyla çevrimler devam etmektedir.

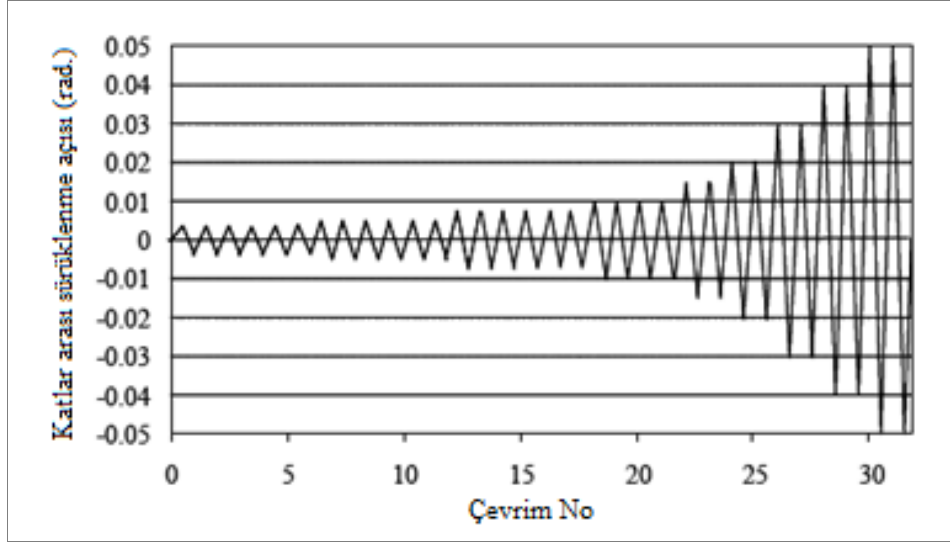


Şekil 7.1 : ATC-24,1992 protokolü.

7.1.3.2 SAC protokolü

Çeliğin deney sırasından ne zaman akmaya ulaşacağı tam olarak bilinemediği için SAC protokolü, çevrimlerin genliğinde akma yer değiştirmesi yerine katlar arası sürüklenme açısını parametre olarak kabul etmektedir. Katlararası sürüklenme açısı, katlar arası yerdeğiştirmenin kat yüksekliğine oranı ile elde edilir. Deneysel çalışmada kiriş dönmesi, kiriş yer değiştirmesinin kiriş uzunluğuna oranı ile kolonda

meydana gelen dönme ise kolon deformasyonunun kolon yüksekliğine oranı ile hesap edilir. SAC protokolü ATC-24 protokolüne göre daha çok elastik çevrim içermektedir. Bunun sebebi Northridge depreminde kaynaklarda akma durumu öncesinde çatlak oluşumlarının gözlemlenmesidir.



Şekil 7.2 : SAC,1997 protokolü.

Temel yükleme protokolüne göre çevrimler her iki yönde simetrik uygulanmaktadır. Yükleme protokolü adımlara ayrılmıştır. θ_j yükleme adımındaki maksimum deformasyon ve n_j yüklemedeki çevrim sayısı olmak üzere numuneye aşağıdaki tablodaki gibi yükleme protokolü uygulanmaktadır.

Çizelge 7.1 : SAC Yükleme protokolünün tablo olarak gösterimi.

Yükleme adımı	Maksimum deformasyon, θ_j	Çevrim sayısı, n_j
1	0,00375	6
2	0,005	6
3	0,0075	6
4	0,01	4
5	0,015	2
6	0,02	2
7	0,03	2

Deneysel programın seçimi ve yükleme protokolü deneysel çalışmanın amacına deney numunesinin tipine ve öngörülen göçme moduna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. (Numunede hızlı mukavemet kaybı, yavaş mukavemet kaybı, burkulma meydana gelmesi gibi..)

Deney numunesinde yavaş mukavemet kaybı meydana gelmesi durumunda tek bir deneysel numune ile çalışma yapmak yeterlidir. Ancak hızlı mukavemet kaybı veya burkulma meydana gelmesi durumunda tek bir numune ile çalışmak yeterli sonuç vermeyebilir. Mesela kaynaklarda göçme durumunun meydana gelmesi ani mukavemet kaybına sebebiyet vermektedir ve böyle bir durum için üç adet benzer numune ile çalışma yapılmasını tavsiye etmektedir. Üç adet numune ile çalışma yapılması durumunda numunelerden en düşük enerji tüketimi meydana getiren numune performansı dikkate alınır. Eğer daha fazla numune ile çalışma yapılıyor ise istatistiksel çalışma yapılarak kanaate ulaşılır.

Deneysel çalışmada son çevrime ulaşıldıktan sonra aralıklı rijitlik azalmasını gözlemleyebilmek için küçük çevrimlerle deneye devam edilmesi tavsiye edilmektedir. Böyle bir durumda en büyük son çevrimler tamamlandıktan sonra sistemdeki yük boşaltılarak 0,05 dönmeye sahip iki adet çevrim gerçekleştirilir. Dönmeler yüklemesiz durumdaki kalıcı deformasyona göre ölçülmektedir.

Yükleme protokolü ciddi mukavemet kaybı meydana gelene kadar devam etmelidir. Eğer mukavemet kaybı meydana gelmeden deney düzeneğinin maksimum yer değiştirme sınırına ulaşılır ise maksimum deformasyonda ciddi mukavemet kaybı meydana gelene kadar devam ettirilir. Ciddi mukavemet kaybı durumu uygulanan yükün, maksimum deformasyon yükünden %40 daha az olması durumu olarak kabul edilebilir.

- ⤴ **Sisteme uygulanacak kuvvet kolu uzunluğunun tespiti:** Yüklem protokolü uygulanırken ilk olarak kolon ekseninden giriş ucuna kadar olan kuvvetin uygulandığı konsol boyu tespit edilir.
- ⤴ **Her çevrimde uygulanacak tepe yer değiştirmenin tespit edilmesi:** Tespit edilen konsol boyu için her çevrimde uygulanması gereken ötelenme açısı için uygulanması gereken öteleme yer değiştirmesi hesap edilir.
- ⤴ **Yer değiştirme adımlarının bulunması:** Hedef yer değiştirme belli bir adım sayısına bölünerek yer değiştirme adımları bulunur.
- ⤴ **Elastik çevrimlerde uygulanan yüklerin kontrolü:** Çevrim yer değiştirmesi itme ve çekme şeklinde pozitif ve negatif yönlerde uygulanır. Deney sırasında pozitif ve negatif kuvvetlerin birbirlerine yakın sonuç vermesi gerekmektedir. Eğer pozitif ve negatif uç yer değiştirme karşılığı uygulanan kuvvetler

arasında fark var ise deney düzeneğinde bir problem olup olmadığından (sürtünme, rigid body motion etkisi vs..) emin olunmalıdır. Betonarme numuneler için yapılan deneylerde malzemenin tam anlamıyla izotrop olmaması sebebiyle bir miktar kuvvet farklılığı maruz görülebilir ancak çelik malzemede bu hata payının düşük olması gerekmektedir.

- ▲ **Elastik çevrimlerde sistemin kontrol edilmesi:** Deney başlangıcında bir kaç elastik çevrim uygulayarak deney düzeneğinde bir problem olup olmadığı kontrol edilir. Bunun için deney düzeneğinin komple hareketini ölçen yerdeğiştirme ölçerlerin grafikleri inceleyebilir. Grafiklerin elastik çevrimlerde aynı çizgi üzerinde hareket etmesi veya doğrusal bir grafik elde edilip edilmemesi gibi hususlarda deney düzeneği incelenebilir.
- ▲ **Analitik ve Sonlu elemanlar çalışması ile yapılan deneysel çalışmanın uyum kontrolü:** Daha önce yapılan sonlu elemanlar çalışmasıyla deneysel çalışmadaki elastik çevrimler kıyaslanarak deneysel çalışma ve model çalışması yorumlanmıştır. Tüm deneysel çalışmalarda sonlu elemanlar çalışması ile elde edilen moment-dönme grafiklerinin başlangıç rijitliğinin deneysel çalışma ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmalarda uygulanan yükleme protokollerinden biri aşağıda tablo olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.2 : : P3 numunesi için uygulanan piston yükleme adımı.

YÜK ADIMI	ÖTELENME AÇISI (RADYAN)	1P	1N	2P	2N	3P	3N	4P	4N	5P	5N	6P	6N
1	0.00375	32.54	32.58	32.84	32.59	32.84	32.65	32.79	32.66	32.66	32.74	32.99	32.73
2	0.00500	44.18	43.06	43.99	43.17	44.04	43.12	44.02	43.16	43.91	43.17	43.97	43.26
3	0.00750	63.45	65.84	63.69	65.87	63.63	66.105	63.50	65.94	63.68	65.91	63.66	66.02
4	0.01000	79.70	84.79	81.63	85.21	81.75	85.25	81.81	85.28				
5	0.015	95.30	101.09	95.63	102.48								
6	0.020	101.98	108.24	102.82	109.91								
7	0.030	110.87	118.22	114.93	122.46								
8	0.040	117.25	129.28	118.28	129.60								
9	0.050	109.84	121.77	130.82	110.42								
10	0.060	98.61	108.58	94.54	104.34								
11	0.070	90.46	100.87	84.65									

7.2 Monotonik Yükleme Altında Yapılan Testler

Çevrimsel yükleme altındaki testler için gerekli data elde etmek amacıyla monotonik yükleme altında P0 ve P1 isimli 2 adet test yapılmıştır. P0 ile adlandırılan ilk numune pilot numune olarak kabul edilmiştir

7.2.1 P0 pilot numune testi

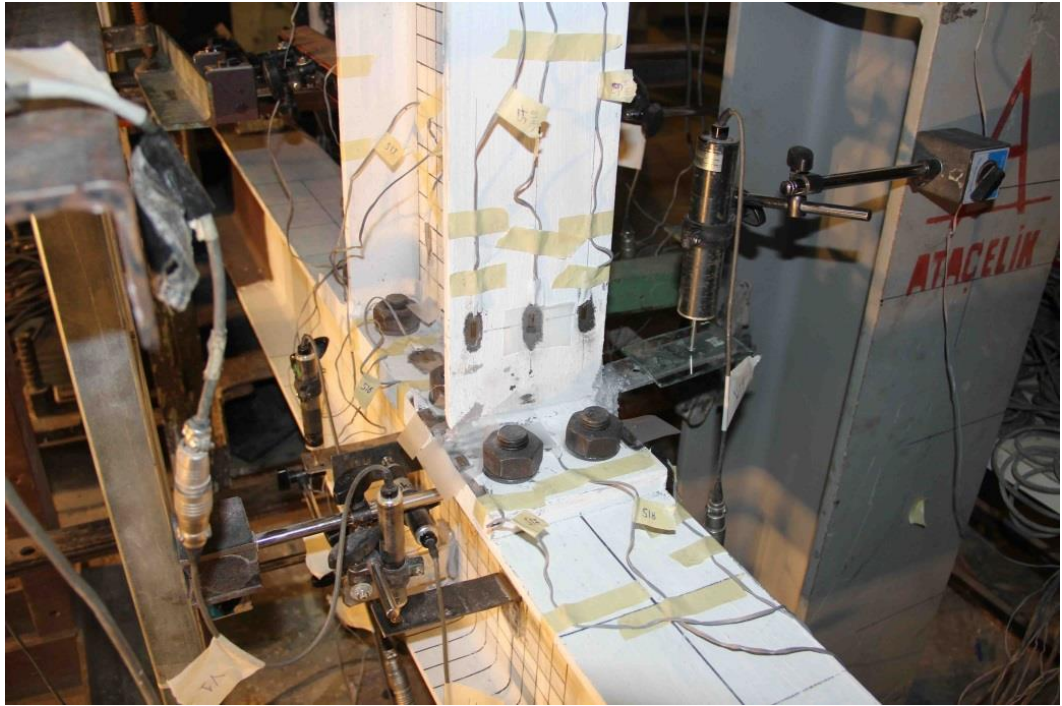
P0 pilot numune testinde aşağıdaki hususlarda bilgi edinmek amaçlanmıştır.

1. Literatürdeki deneysel çalışma ile kıyaslanan ve doğrulanan simulasyon modeli esas alınarak P0 pilot numunenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Böylelikle oluşturulan sayısal analiz çalışması deneysel çalışmayla test edilmiştir.
2. Pilot numune testi ile ana numunelerin testine başlamadan önce deney düzeneğinin kontrol edilmesi amaçlanmıştır.
3. P0 numunesi dışındaki tüm numunelerde plastikleşmenin tamamının kırıšte meydana gelmesi amaçlanırken, P0 numunesinde kolon panel bölgesinde de plastikleşme meydana gelmesi amaçlanmış ve panel bölgesinin birleşim enerji tüketimine katkısı gözlemlenmek istenmiştir. Bu sebeplerle kolon ebatı diğer numunelere göre daha küçük seçilmiş ve kolon bölgesinde takviye ve süreklilik levhası kullanılmamıştır. Ayrıca alın levhasının enerji tüketimine katkısını gözlemlemek amacıyla alın levhası da plastikleşme meydana gelecek şekilde boyutlandırılmıştır.

Numune P0, elastik yer değiştirme sınırının yarısı olan 11 mm tepe yer değiştirmesine kadar (27 kN) yatay olarak yüklenmiştir. Bu yer değiştirme değerine ulaşıldıktan sonra yükleme tamamen boşaltılmıştır ve tekrar adım adım yük uygulamaya başlanmıştır. Yükleme, numune tamamen göçme durumuna ulaşınca kadar devam etmiştir. Numune üzerinde meydana gelen ilk çatlaklar 43.1 mm tepe yer değiştirmesinde (70 kN) kolon panel bölgesinde meydana gelmiştir.



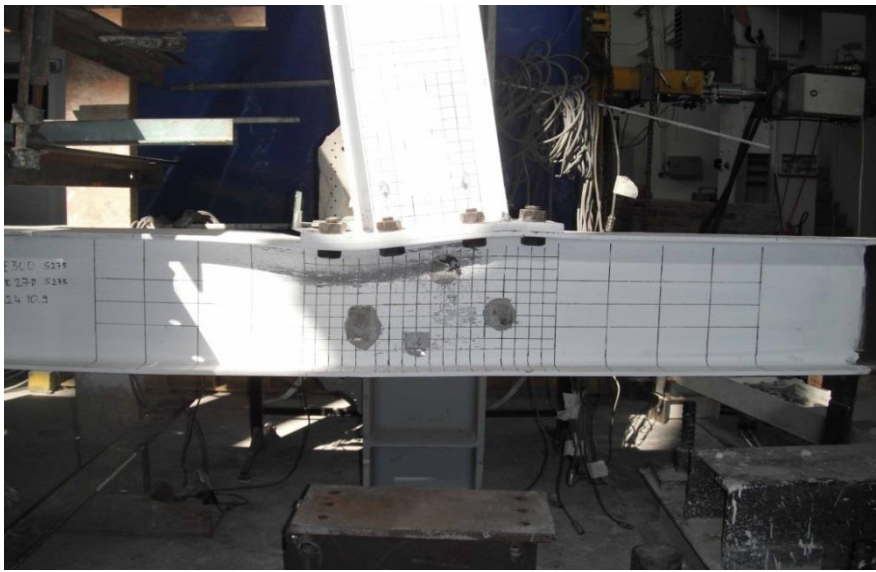
Şekil 7.3 : P0 pilot numunune deney öncesi görünüş.



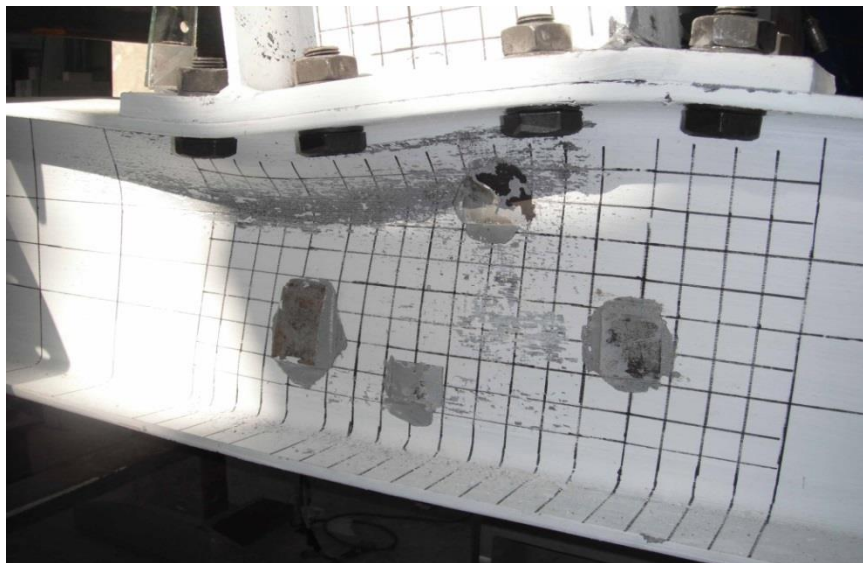
Şekil 7.4 : P0 pilot numunune teçhizatların gösterimi.

7.2.1.1 P0 deneyi sırasında yapılan gözlemler

Deney boyunca uygulanan en fazla yatay kuvvet 86,34 kN'dur. Tepe noktasında uygulanan en fazla yatay yer değiştirme 300.7 mm'dir. En fazla katlar arası sürüklenme açısı (Interstory drift angle) 0.103 radyan'dır. Deney sırasında yükleme 86.34 kN'a ulaşıncı kolon gövdesinde yerel burkulma gözlemlenmiştir. Göçme durumu, kolon panel bölgesinde meydana gelen deformasyon sebebiyle oluşmuştur. Kolon panel bölgesi ile birlikte alın levhasıda önemli miktarda deformasyon gözlemlenmiştir. Moment-dönme eğrisi grafiğinde başlangıç rijitliği 24,229 (kN/mrad) olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.5 : Deneyel çalışma sonrası pilot numunenin görünüşü.



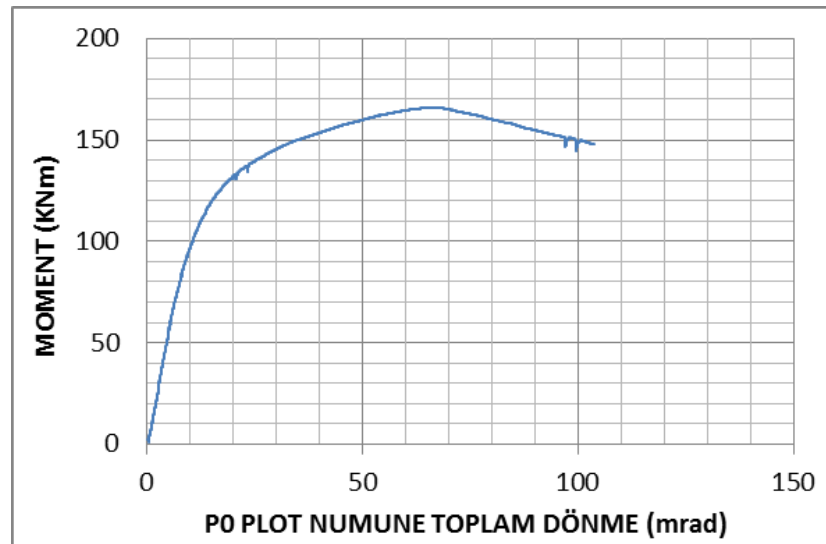
Şekil 7.6 : Deneyel çalışma sonrası pilot numunenin görünüşü.



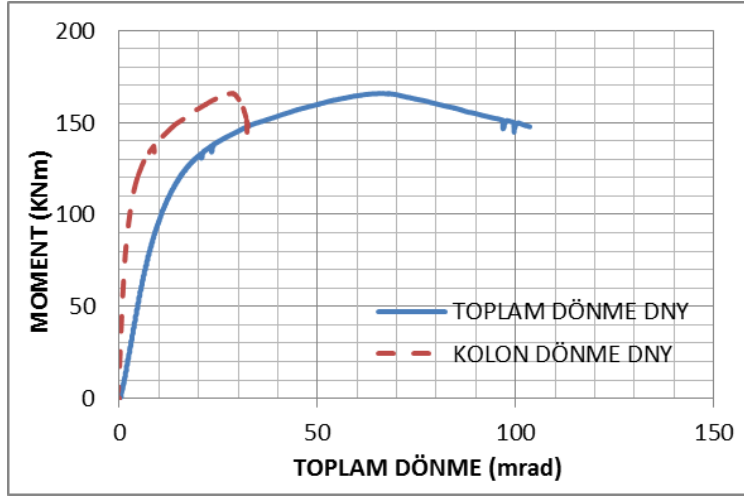
Şekil 7.7 : Deneysel çalışma sonrası pilot numunenin görünüşü.

7.2.1.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması

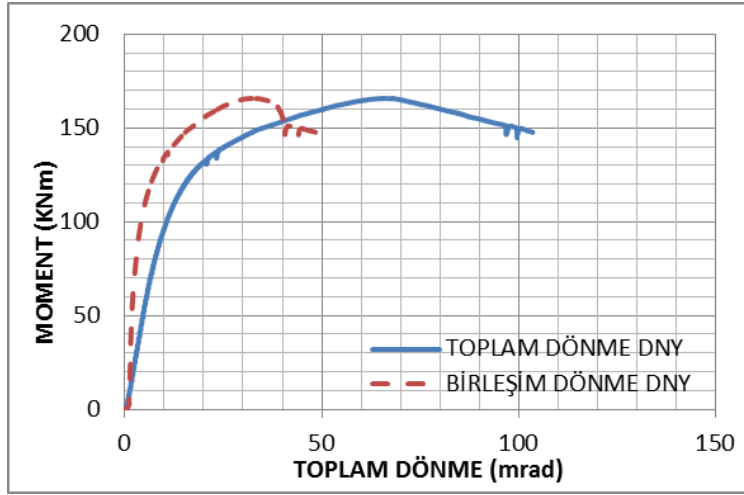
Aşağıdaki grafiklerde P0 pilot numunesine ait birleşimin ve birleşimi oluşturan elemanların moment-toplam dönme eğrileri sunulmuştur.



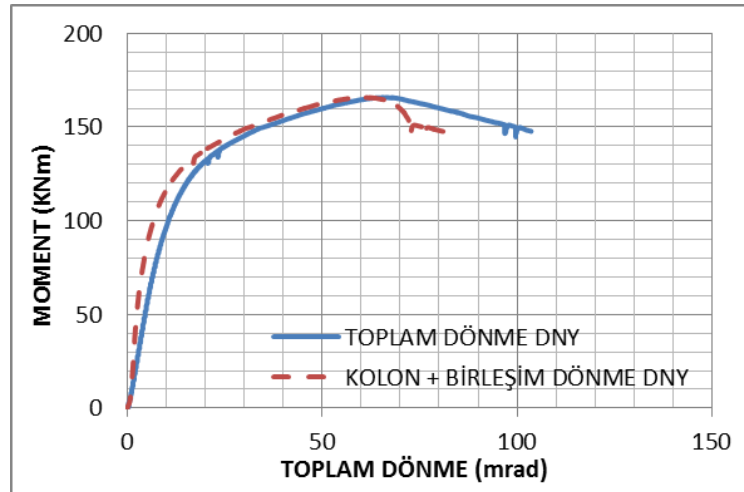
Şekil 7.8 : P0- Moment- Toplam dönme.



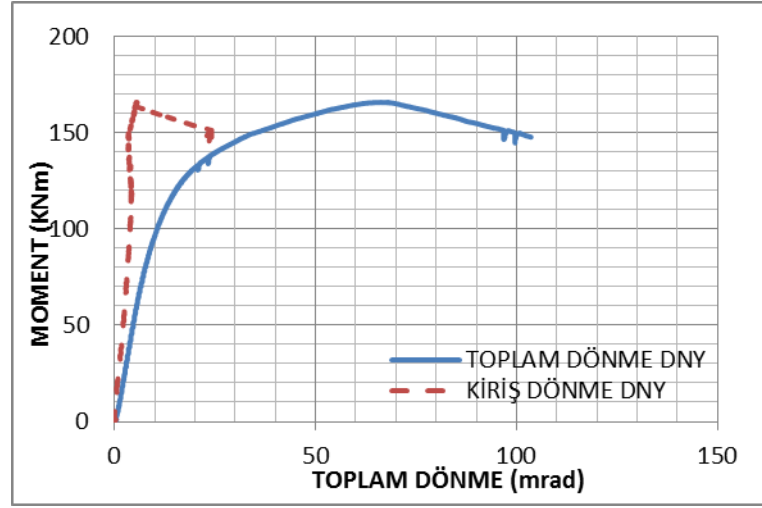
Şekil 7.9 : P0- Kolon Moment- Toplam dönme.



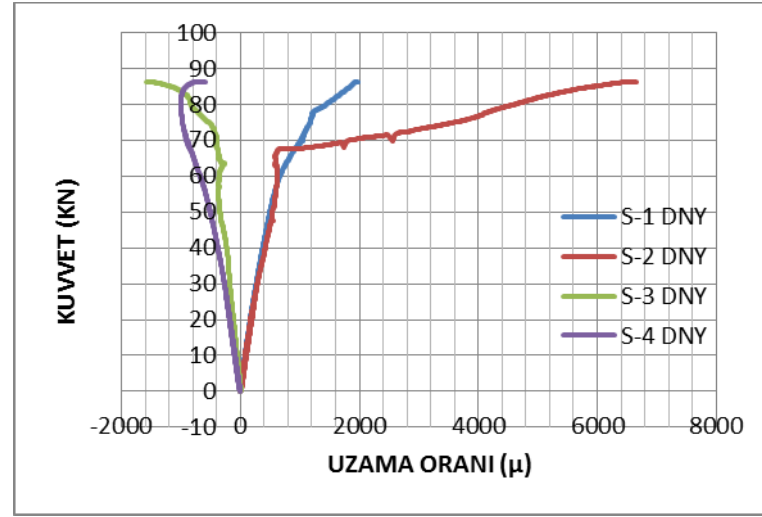
Şekil 7.10 : P0- Birleşim Moment- Toplam dönme.



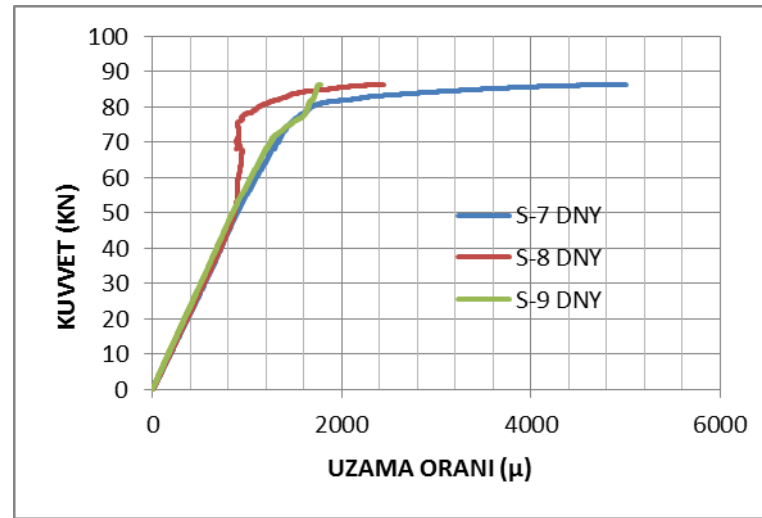
Şekil 7.11 : P0- (Kolon + Birleşim) Moment- Toplam dönme.



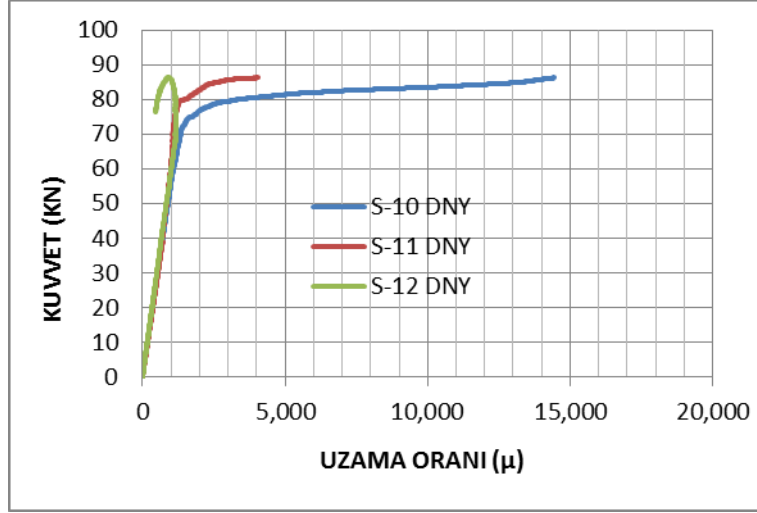
Şekil 7.12 : P0-Kiriş Moment- Toplam dönme.



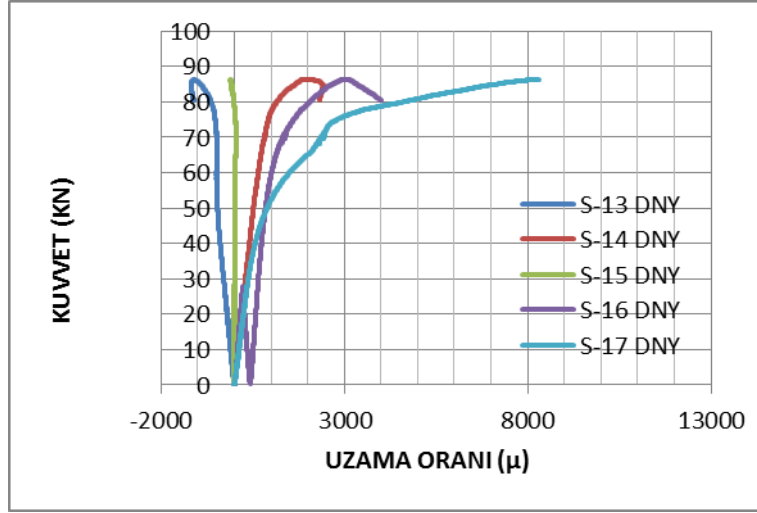
Şekil 7.13 : P0 pilot numune kolon panel bölgesi strengçeç okumaları.



Şekil 7.14 : P0 pilot numune kiriş plastik mafsalsı strengçeç okumaları.



Şekil 7.15 : P0 pilot numune kiriş plastik mafsallı strengeli okumaları.



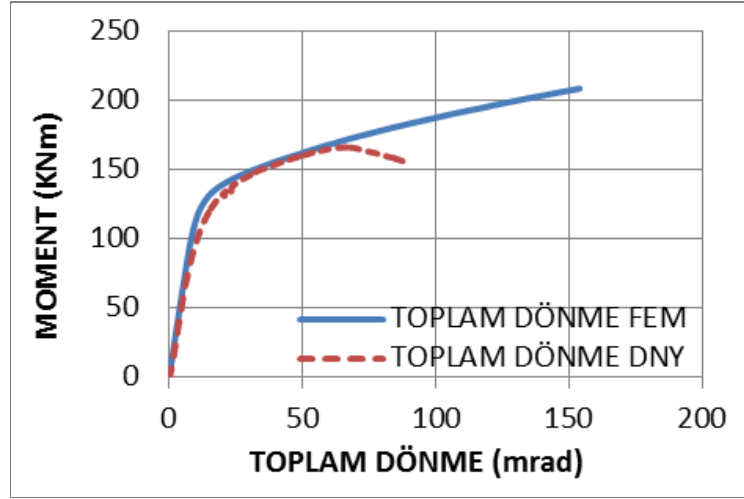
Şekil 7.16 : P0 pilot numune kiriş plastik mafsallı strengeli okumaları.

Yukarıdaki grafiklerden kolonda, alın levhasında ve kirişte meydana gelen elastik ve plastik deformasyonun birleşimin toplam dönmesine olan katkısı görülmektedir.

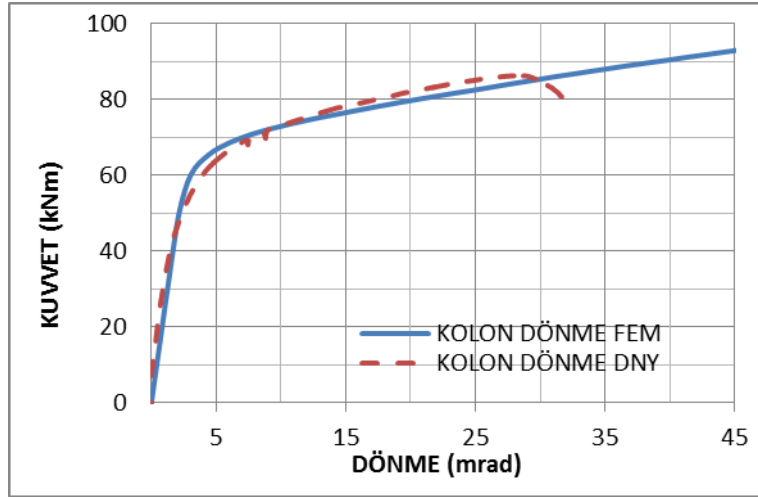
Grafiklerden anlaşıldığı üzere alın levhası ve kolonda ciddi plastik deformasyonlar meydana gelmiş, kiriş bölgesinde ise sınırlı miktarda plastik deformasyon elde edilmiştir.

7.2.1.3 P0 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması

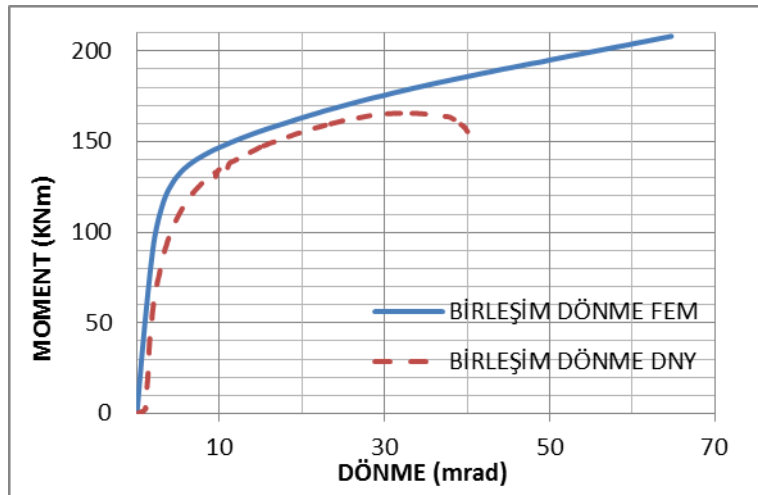
Monotonik yükleme altında test edilen P0 pilot numunesi için deneysel çalışma sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılarak aşağıda sunulmuştur.



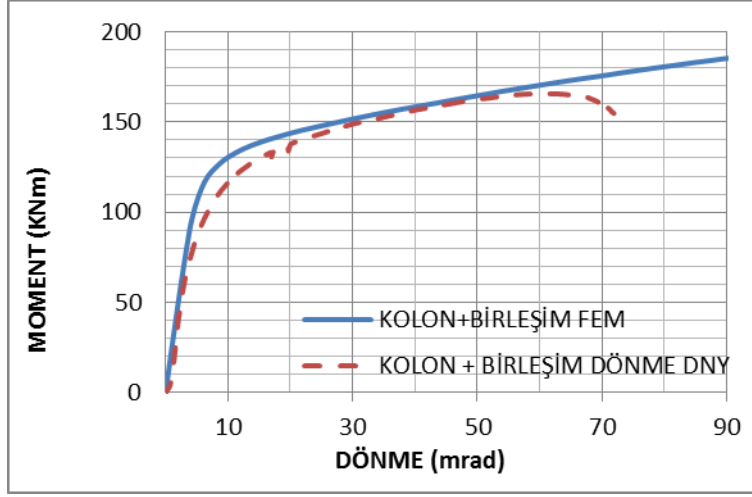
Şekil 7.17 : P0 - Moment- Toplam dönme.



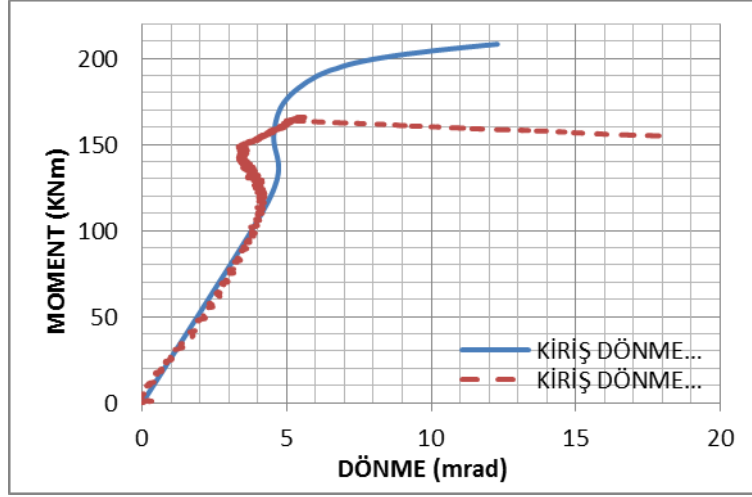
Şekil 7.18 : P0 - Kolon Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.19 : P0 - Birleşim Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.20 : P0-Kolon + Birleşim Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.21 : P0-Kiriş Moment- Toplam dönme.

Şekil 7.17-7.21 arasındaki grafiklerinde sayısal analiz çalışması ile deney sonuçları arasındaki uyum görülmektedir. Elastik ve plastik bölgede moment-dönme eğrisi başarılı bir şekilde simüle edilmiştir. Kolon panel bölgesinde burkulma meydana geldikten sonraki grafikler arasındaki farklılık artış göstermiştir.

7.2.2 P1 numune testi

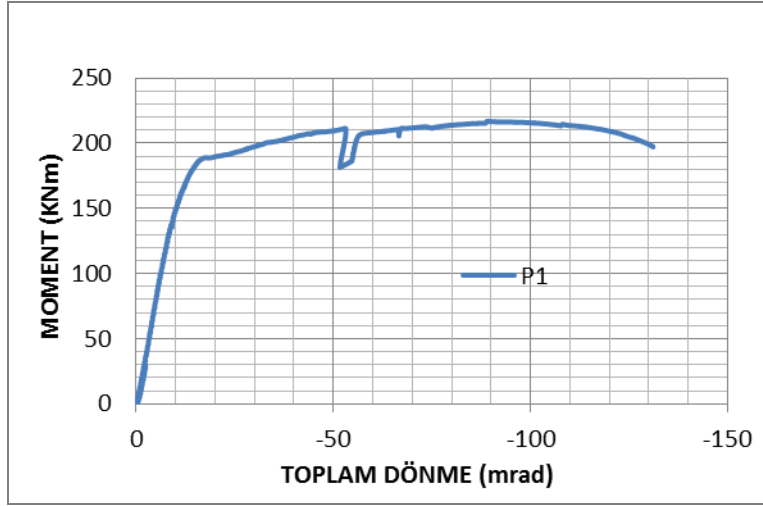
P1 numunesi, S275JR kalite IPE270 kiriş profili ve HEB320 kolon profininden oluşmaktadır. Alın levhası S235 JR kalite ve 35 mm dir. 10.9 Kalite M22 bulon kullanılmıştır. Numune monotonik yükleme altında incelenmiştir. Birleşim kuvvetli kolon, zayıf kiriş felsefesine göre tüm plastikleşme kirişte meydana gelecek şekilde tasarlanmıştır.

7.2.2.1 P1 deneyi sırasında yapılan gözlemler

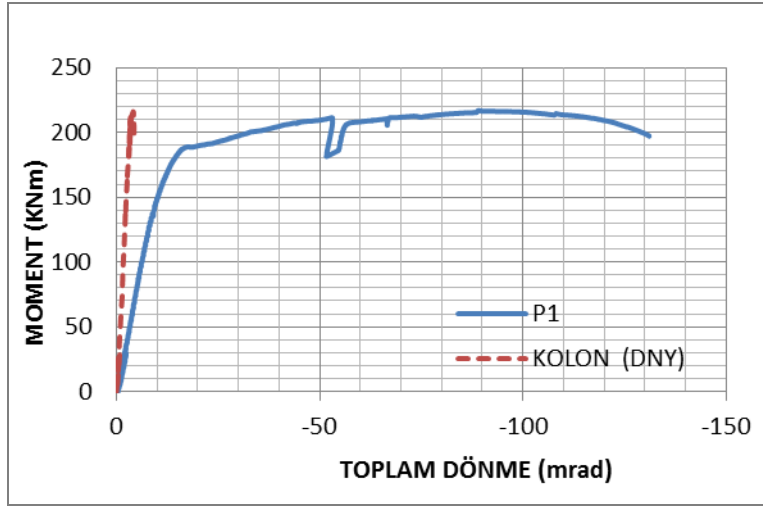
Numune P1, elastik yer değiştirme sınırının yarısı olan 13,23 mm tepe yer değiştirmesine kadar (41.4 kN) yatay olarak yüklenmiştir. Bu yer değiştirme değerine ulaşıldıktan sonra yükleme tamamen boşaltılmıştır ve tekrar adım adım yük uygulamaya başlanmıştır. Yükleme numune tamamen göçme durumuna ulaşınca kadar devam etmiştir. Numune üzerinde meydana gelen ilk çatlaklar 30 mm tepe yer değiştirmesinde (87,4 kN) kiriş başlığı ile alın levhası kesişim noktasında (kaynak ısısından etkilenmiş bölge) meydana gelmiştir. Moment-dönme eğrisi grafiğinde başlangıç rijitliği 52,389 (kN/mrad) olarak tespit edilmiştir. Deney boyunca uygulanan en fazla yatay kuvvet 112,678 kN'dur. Tepe noktasında uygulanan en fazla yatay yer değiştirme 265,5 mm'dir. En fazla katlar arası sürüklenme açısı (Interstory drift angle) 0.138 radyan'dır. Deney sırasında yükleme 112,67 kN'a ulaşılınca kiriş başlığında yerel burkulma gözlemlenmiştir. Kirişte yerel burkulma alın levhası yüzünden (0-170) mm arasında bulunan bir bölgede meydana gelmiştir. Deneyisel çalışma sırasında laboratuvarda elektrik kesintisi meydana gelmiştir. Bu sebeple numuneye uygulanan yatay kuvvet düzeneğinde (4-6 kN) mertebesinde yük kaybı meydana gelmiştir. P1 grafiklerinde de gözlemlenen bu durum için herhangi bir düzeltme yapılmamıştır. Deney boyunca kolonda, alın levhasında ve civatalarda elastik davranış gözlemlenmiştir.

7.2.2.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması

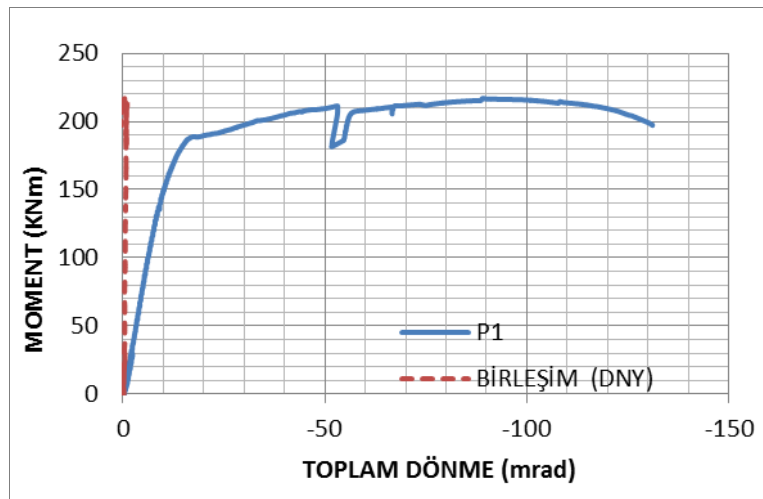
P1 numunesinde kolonun, alın levhasının ve kirişin, birleşimin enerji tüketimine katkısı aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



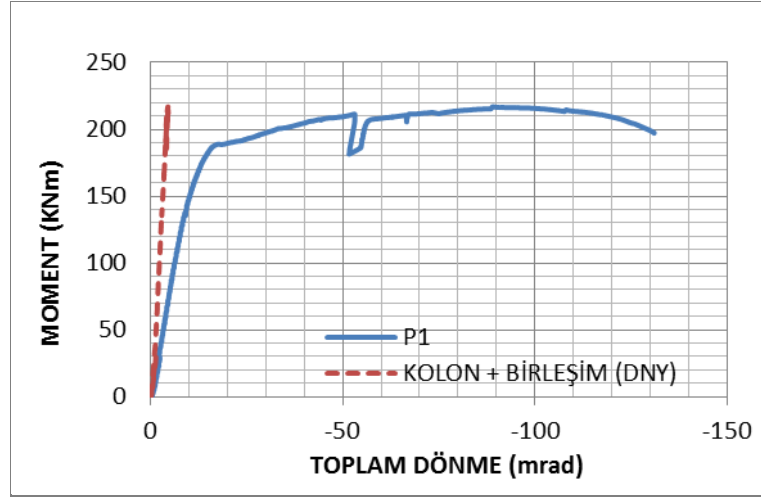
Şekil 7.22 : P1-Moment- Toplam dönme.



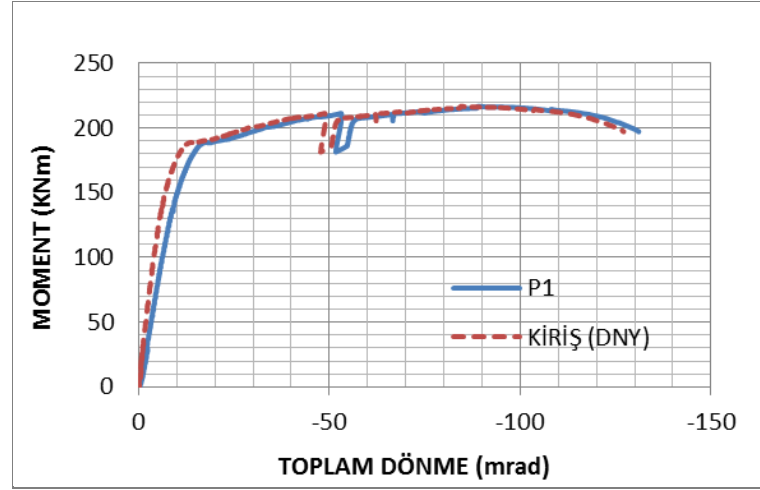
Şekil 7.23 : P1-Kolon Moment-Toplam dönme.



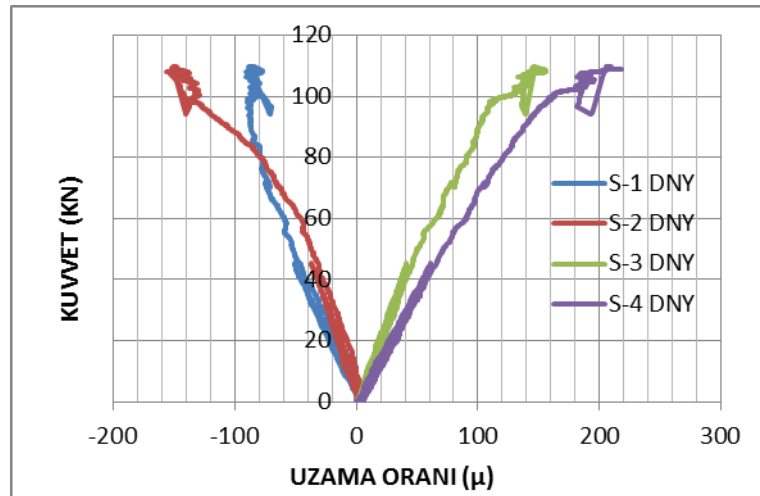
Şekil 7.24 : P1-Birleşim Moment-Toplam dönme.



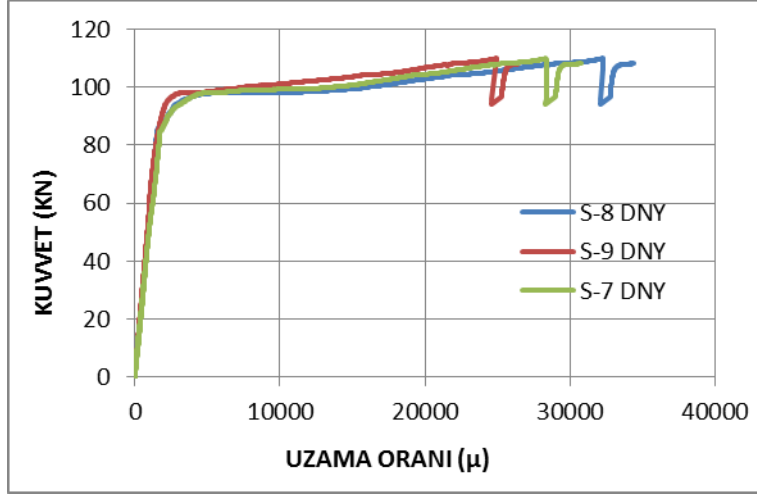
Şekil 7.25 : P1-(Kolon+Birleşim) Moment-Toplam dönme.



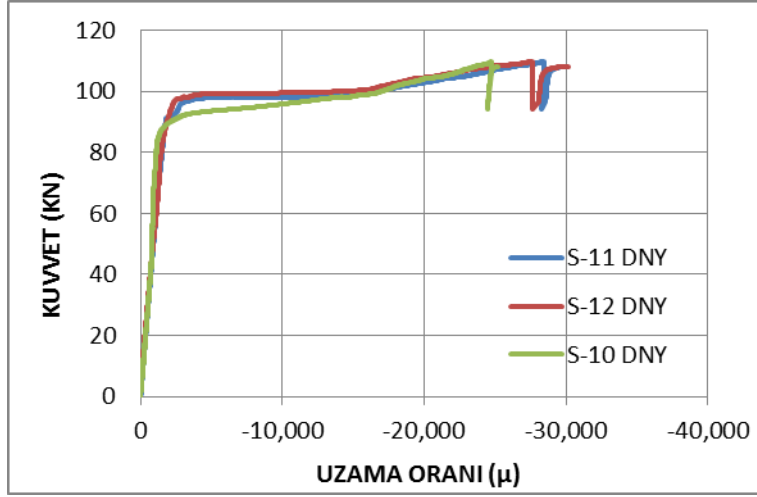
Şekil 7.26 : P1-Kiriş Moment- Toplam dönme.



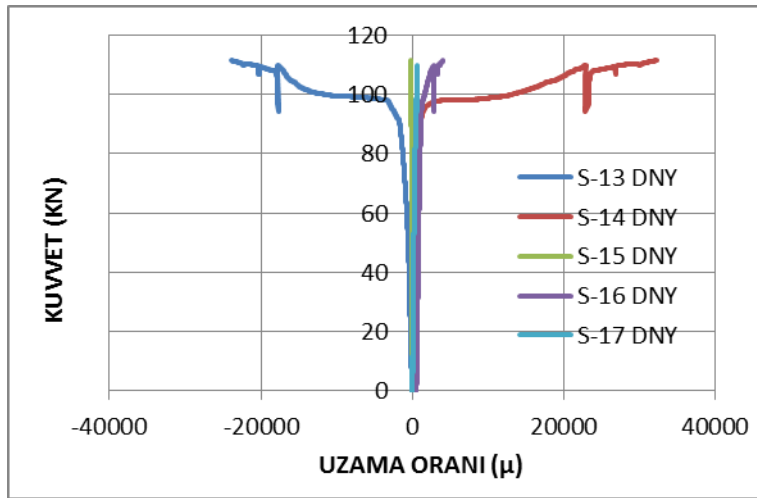
Şekil 7.27 : P1 numunesi kolon panel bölgesi strengeç okumaları.



Şekil 7.28 : P1 numunesi kiriş plastik mafsal strengçeç okumaları.



Şekil 7.29 : P1 numunesi kiriş plastik mafsal strengçeç okumaları.

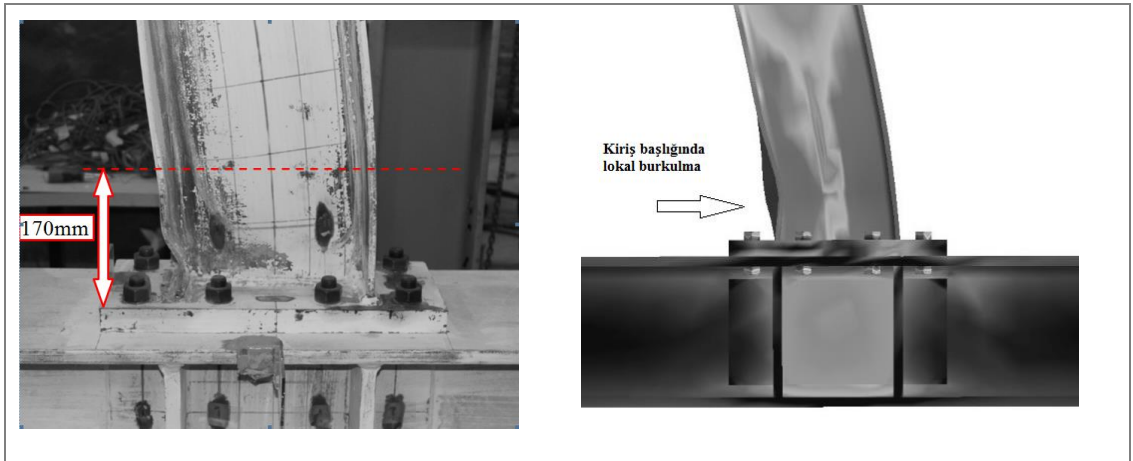


Şekil 7.30 : P1 numunesi strengçeç okumaları.

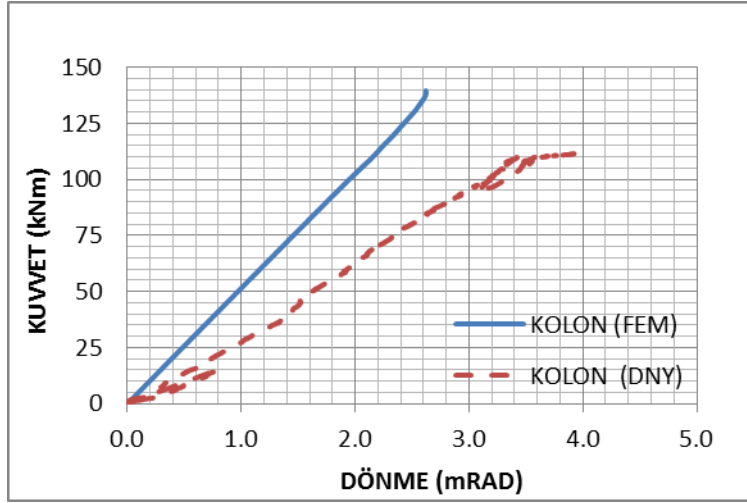
Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü gibi deney boyunca kolon elastik davranış göstermiş ve alın levhası bölgesinde hiç ayrılma meydana gelmemiştir. Deneysel çalışma sırasında meydana gelen elektrik kesintisi sebebiyle pistonda bir miktar kuvvet kaybı meydana gelmiş ve bu durum grafiklere yansımıştır. Grafiklerde meydana gelen bu durum düzeltilme yapılmaksızın sunulmuştur. Deneysel çalışma sonucunda kiriş plastik mafsallık bölgesi tam olarak tespit edilememiştir. Şekil 7.27’de kolon panel bölgesinde meydana gelen deformasyonların elastik olduğu görülmektedir. Şekil 7.28 ve 7.29’daki grafiklerden plastik mafsallık kiriş başlığı bölgesinde tam olarak plastikleşme meydana geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 7.30’da bulunan S13 ve S14 strengeli grafikleri plastik mafsallıkta kiriş gövdesinden alınan okumalardır. S15-S17 arasındaki tüm strengeliçler alın levhasının tüm deney boyunca elastik davranış sergilediğini göstermektedir.

7.2.2.3 P1 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması

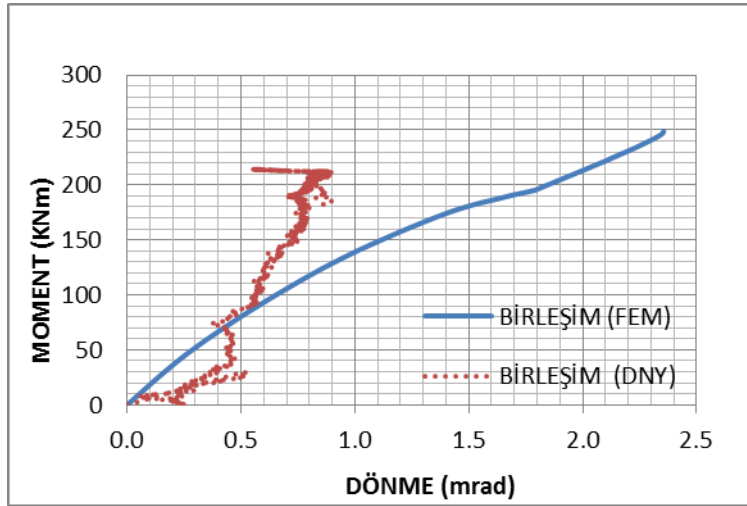
Monotonik yükleme altında test edilen P1 numunesi için deneysel çalışma sonuçları ile FEA sonuçları karşılaştırılarak aşağıda sunulmuştur. Şekil 7.27’de deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışması sonucu elde edilen göçme modları birlikte sunulmuştur. Her iki şekilde göçme modları büyük benzerlik göstermektedir.



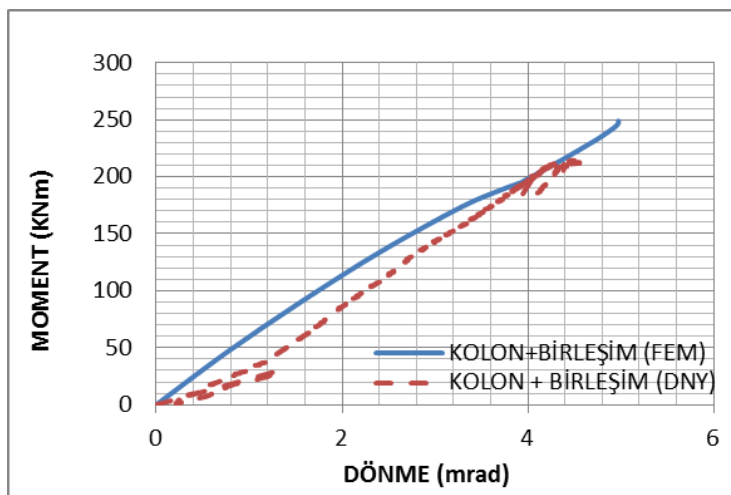
Şekil 7.31 : P1-Deneysel çalışma ile FEA modelinin birlikte gösterimi.



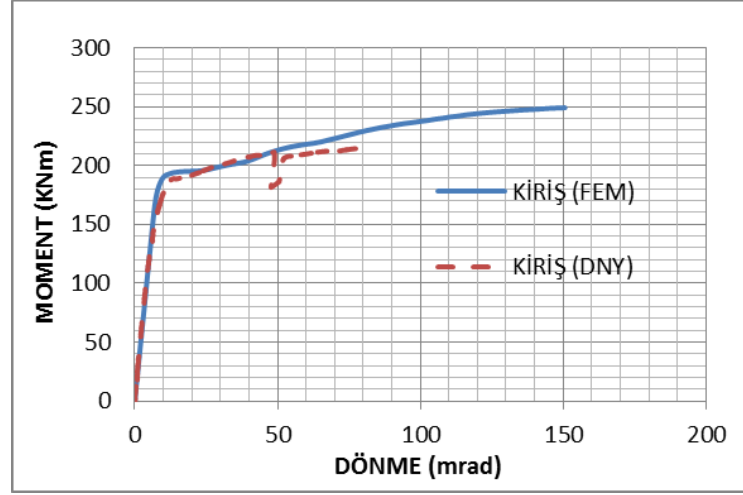
Şekil 7.32 : P1 - Kolon Moment- Toplam dönme



Şekil 7.33 : P1 - Birleşim Moment- Toplam dönme



Şekil 7.34 : P1-Kolon + Birleşim Moment- Toplam dönme



Şekil 7.35 : P1-Kiriş Moment- Toplam dönme

Yukarıdaki grafiklerden görüldüğü üzere birleşimin genel davranışı başarılı bir şekilde simüle edilmiştir. Sonlu eleman çalışmasında birleşim rijitliği deney sonuçlarına oldukça yakın elde edilmiştir.

7.3 Çevrimsel Yükleme Altında Yapılan Testler

Çevrimsel yükleme altında P2, P3, P4 numuneleri için üç adet test yapılmıştır.

7.3.1 P2 numune testi

P2 numunesi, S275JR kalite IPE270 kiriş profili ve HEB320 kolon profilinden oluşmaktadır. Alın levhası S235JR kalite ve 35 mm dir. 10.9 Kalite M22 bulon kullanılmıştır. Numune çevrimsel yükleme altında incelenmiştir. Birleşim kuvvetli kolon, zayıf kiriş felsefesine göre tüm plastikleşme kirişte meydana gelecek şekilde tasarlanmıştır. Yükleme tipi dışında P1 numunesi ile arasında bir farklılık bulunmamaktadır. Bu çalışma ile yükleme tipinin birleşimin genel davranışı üzerindeki etkisi incelenmek istenmiştir.

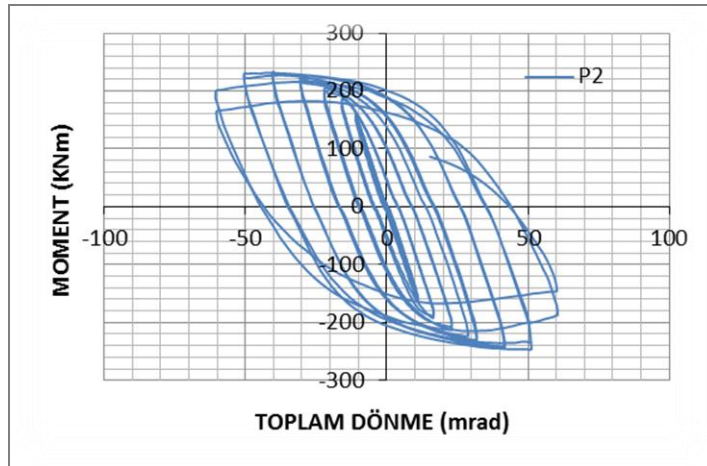
7.3.1.1 P2 deneyi sırasında yapılan gözlemler

P2 numunesi P1 ile aynı niteliklere sahiptir. Sadece yükleme tipi numune P1 den farklıdır. Çevrimsel yükleme protokolü uygulanmıştır. Numune P2 (+19,05 mm, -19,05 mm) (Kuvvet +83,637 kN, -83,63 kN) (0,01 radyan) değerine kadar elastik davranış göstermiştir. Moment-dönme eğrisi grafiğinde başlangıç rijitliği 57.548 (kN/mrad) olarak tespit edilmiştir. İlk doğrusal olmayan deformasyonlar S5 ve S6 strengçlerinde (65kN,75kN). Numuneye uygulanan en fazla yatay kuvvet

(+121,735kN;-128.788 kN) olarak tespit edilmiştir. En fazla katlar arası sürüklenme açısı 0,06 radyan (114,3 mm)'a kadar birleşimde göçme meydana gelmeden devam etmiştir. Yüklemede 0,05-0,06 radyan mertebelerine ulaşıldığında kiriş başlığında burkulma gözlemlenmiştir. Meydana gelen burkulma sebebiyle numuneye uygulanan yatay kuvvet % 40,7 oranında azalmıştır. Numunede göçme durumu kiriş başlığında meydana gelen yerel burkulma ve kiriş gövdesinde meydana gelen burkulma sebebiyle meydana gelmiştir. Kiriş başlığında meydana gelen yerel burkulma alın levhası yüzünden (0-170) mm arasında bulunan bir bölgede meydana gelmiştir. Plastik mafsal kuşağı alın levhası yüzünden yaklaşık 75 mm-110 mm mesafede gözlemlenmiştir. Deney, kiriş başlığında kopma meydana gelene kadar devam ettirilmiştir. Deney boyunca kolonda, alın levhasında ve civatalarda elastik davranış gözlemlenmiştir.

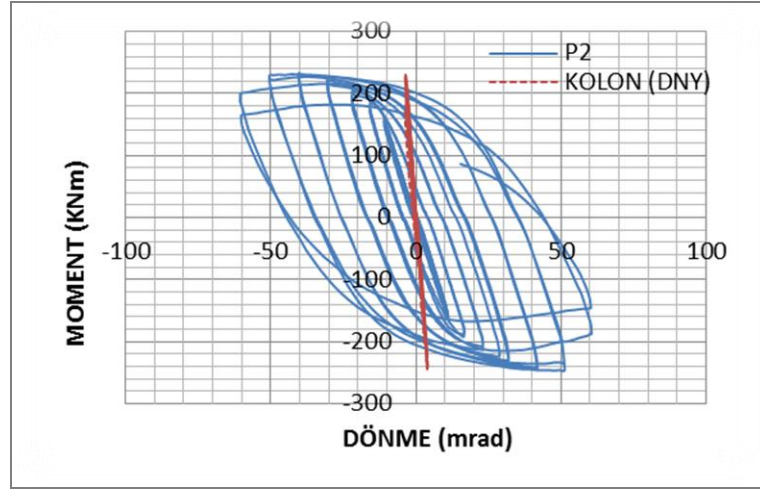
7.3.1.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması

P2 numunesinde kolonun, alın levhasının ve kirişin, birleşimin enerji tüketimine katkısı aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

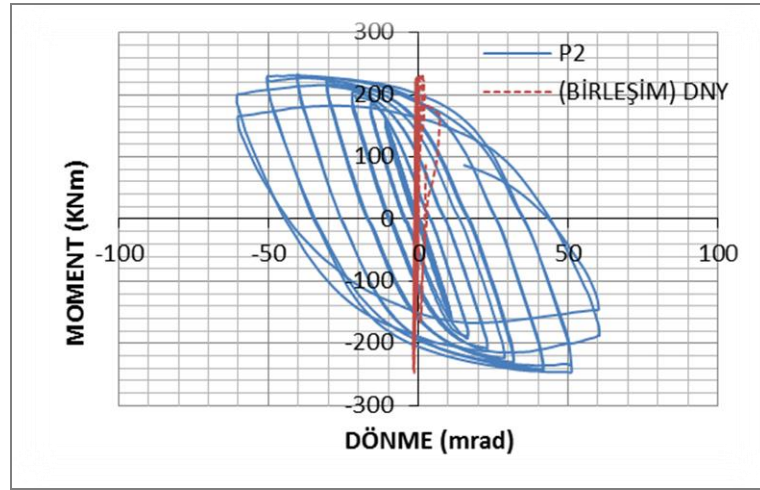


Şekil 7.36 : P2-Moment- Toplam dönme.

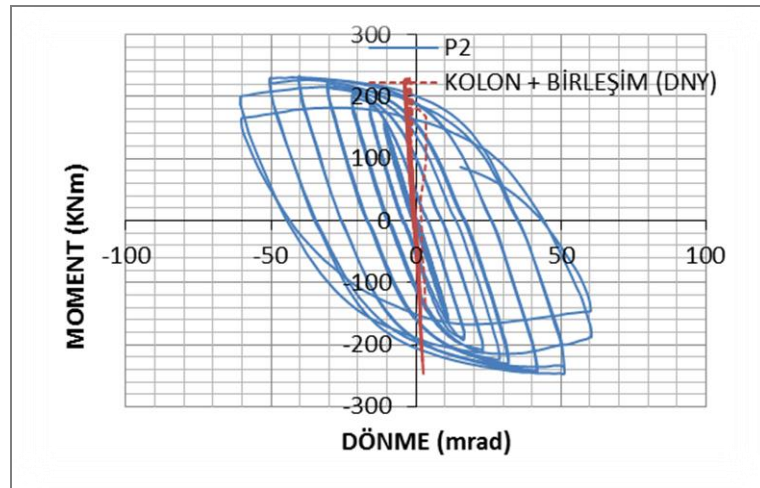
P1 numunesi deney sonuçlarına benzer şekilde yukarıdaki şekillerde görüldüğü üzere kolon ve alın levhası elastik tüm deney boyunca elastik davranış sergilemiştir. Şekil 7.36'da görüldüğü gibi tüm plastik davranış kirişte meydana gelmiştir. Deney sonucunda enerji tüketimi açısından oldukça başarılı (geniş) çevrimsel döngü grafikleri elde edilmiştir. Çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilen P2 testinde plastik mafsal oluşumu somut bir şekilde gözlemlenmiştir.



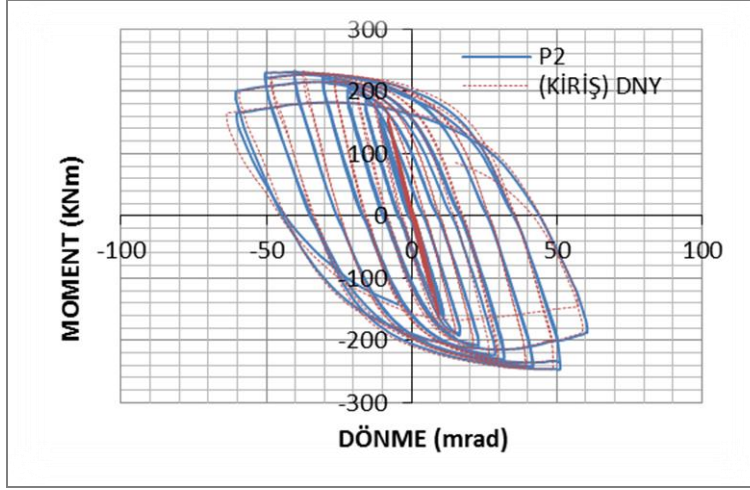
Şekil 7.37 : P2-Kolon Moment- Toplam dönme.



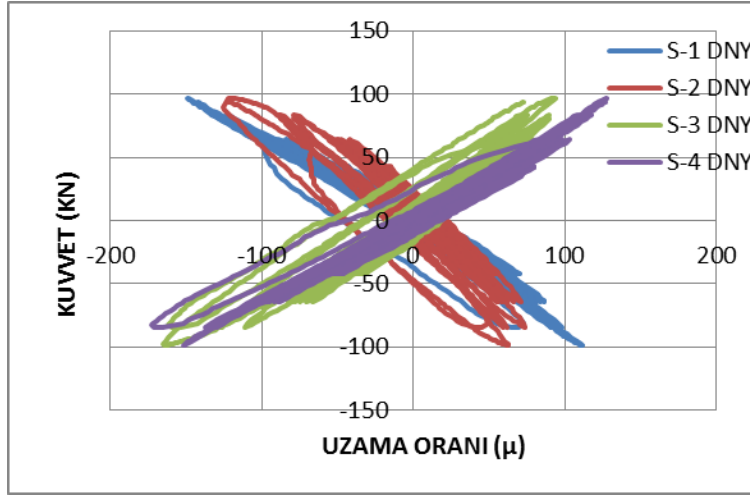
Şekil 7.38 : P2-Birleşim Moment- Toplam dönme.



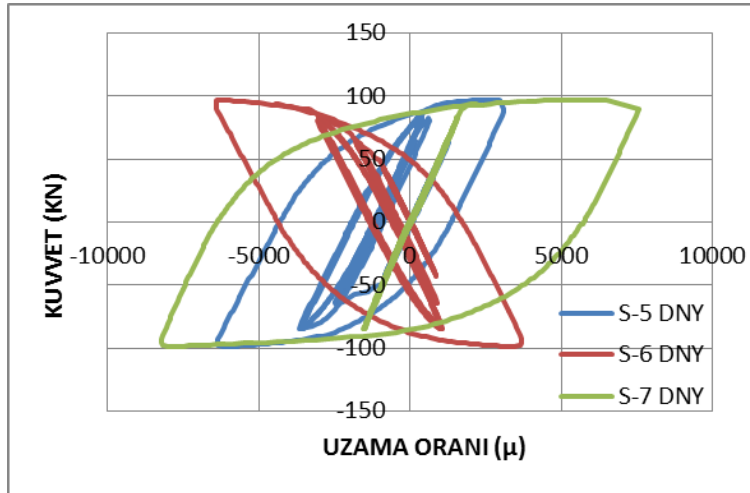
Şekil 7.39 : P2-(Kolon+Birleşim) Moment- Toplam dönme.



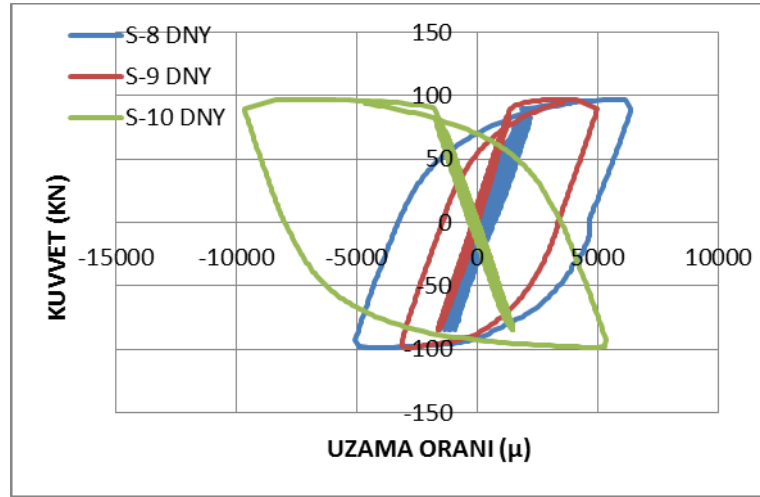
Şekil 7.40 : P2 Kiriş-Moment- Toplam dönme (Inter-story drift angle).



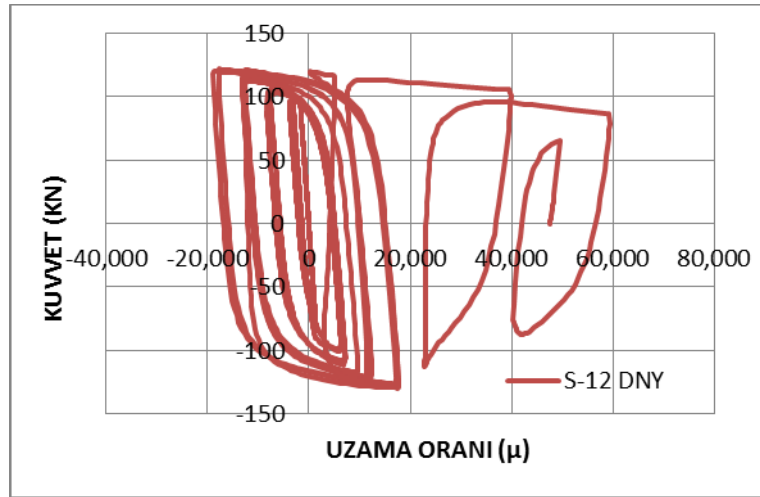
Şekil 7.41 : P2 numunesi kolon panel bölgesi strengeç okumaları.



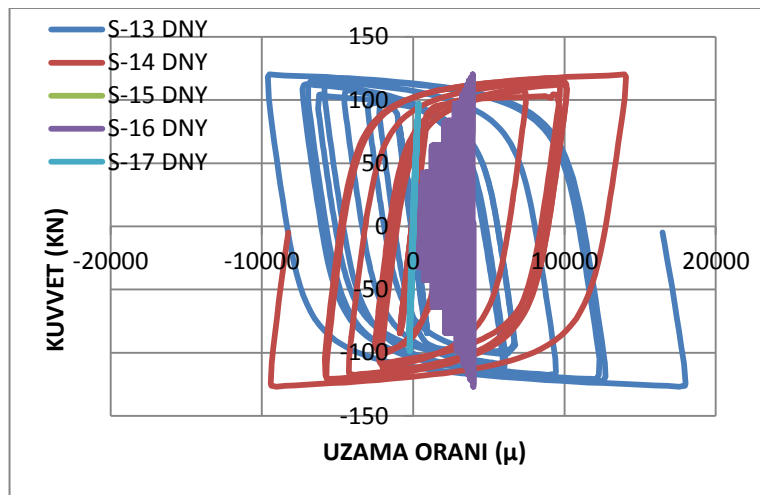
Şekil 7.42 : P2 numunesi strengeç okumaları.



Şekil 7.43 : P2 numunesi strengeç okumaları.



Şekil 7.44 : P2 numunesi strengeç okumaları.

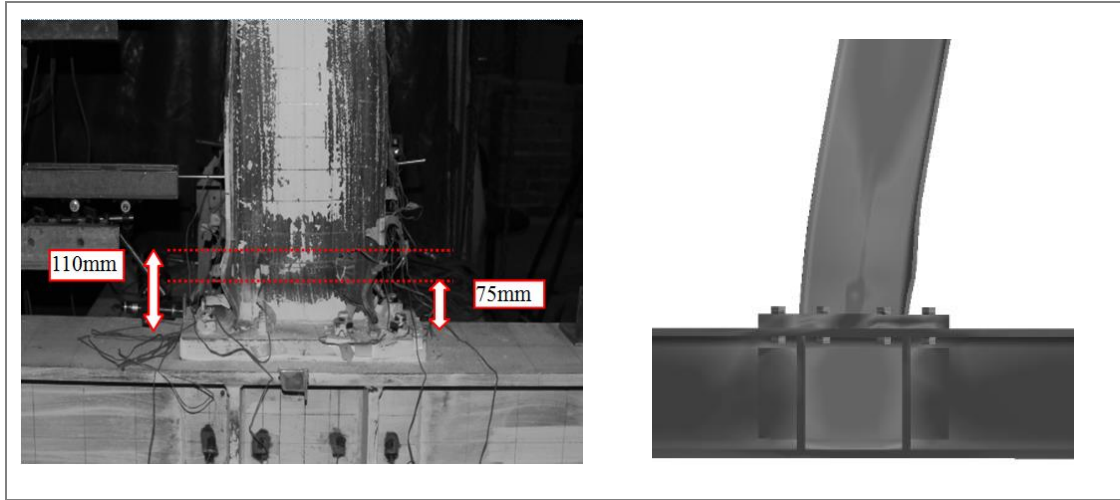


Şekil 7.45 : P2 numunesi strengeç okumaları.

Şekil 7.41’de kolon panel bölgesinde meydana gelen deformasyonların elastik olduğu görülmektedir. Şekil 7.43, 7.44 ve 7.45’deki grafiklerden plastik mafsal kiriş başlığı bölgesinde tam olarak plastikleşme meydana geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 7.45’da bulunan S13 ve S14 strengeç grafikleri plastik mafsal da kiriş gövdesinden alınan okumalardır. S15-S17 arasındaki tüm strengeçler alın levhasının tüm deney boyunca elastik davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 7.42’de gösterilen S5 ve S6 strengeçleri alın levhası ile kiriş başlığının kaynaklandığı bölgede (kaynak ısısından etkilenen bölge) kiriş başlığının orta hizasında yapılan strengeç okumalarını göstermektedir.

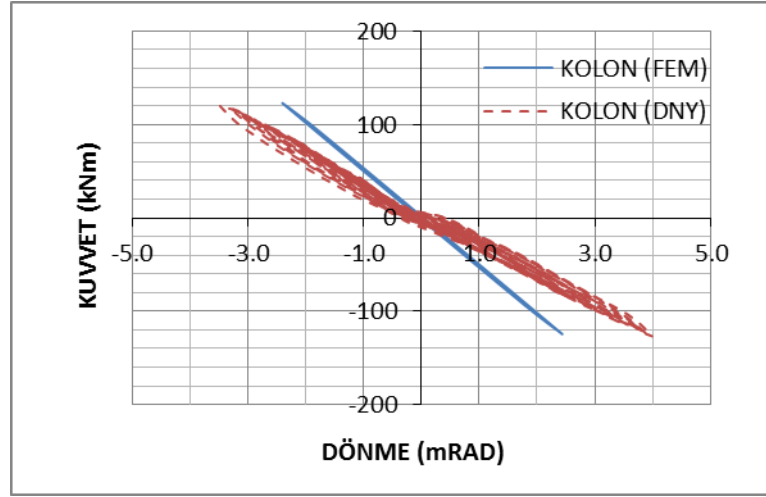
7.3.1.3 P2 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması

Çevrimsel yükleme altında test edilen P2 numunesi için deneysel çalışma sonuçları ile FEA sonuçları karşılaştırılarak aşağıda sunulmuştur. Şekil 7.37’de deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışması sonucu elde edilen göçme modları birlikte sunulmuştur. Her iki şekilde göçme modları büyük benzerlik göstermektedir.

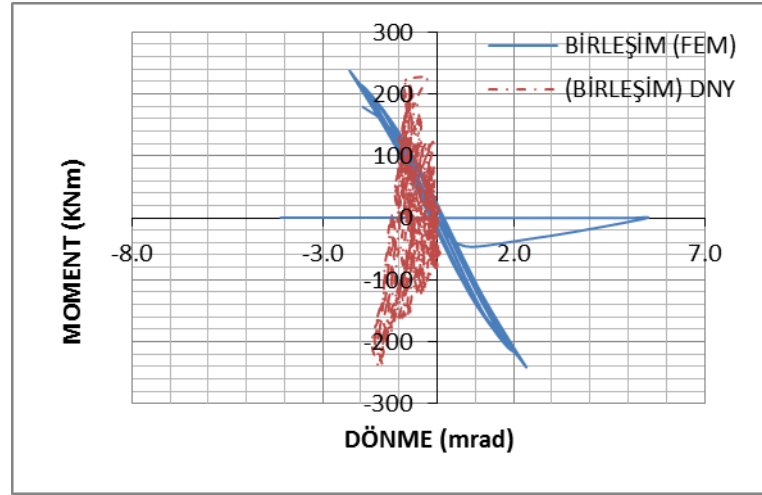


Şekil 7.46 : P2-Deneysel çalışma ile FEA modelinin birlikte gösterimi.

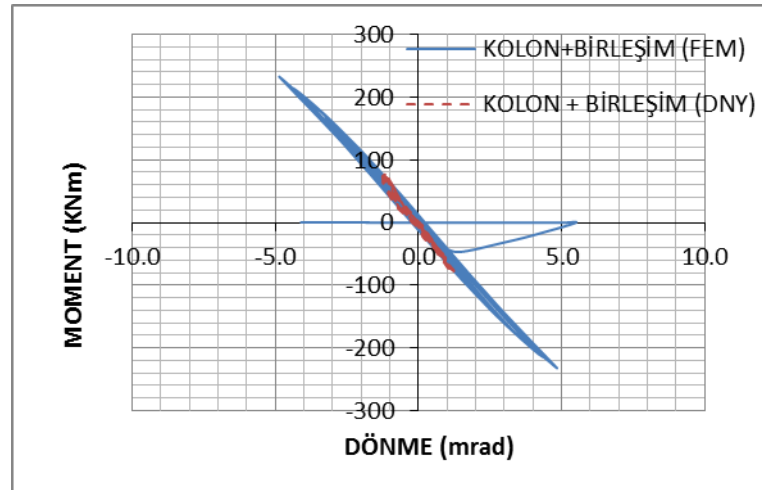
Şekil 7.47’de deneysel çalışmada gözlemlenen kolondaki elastik davranış sayısal analiz çalışmasında da elde edilmiştir. Şekil 7.48’de birleşimin dönme grafiği için deneysel grafiği ile sayısal analiz grafiği birlikte gösterilmiştir. Deney düzeneğinde numunenin mesnetlenme bölgesinde meydana gelen küçük yerdeğistirmeler sebebiyle kırmızı renk ile gösterilen deney grafiğinin mavi renk ile gösterilen grafiğe benzemesi gerekirken hassas bir şekilde elde edilememiştir. Buradan da görüldüğü üzere deneysel olarak oldukça zor elde edilebilecek bilgiler sayısal analiz çalışması ile rahatlıkla elde edilebilmektedir.



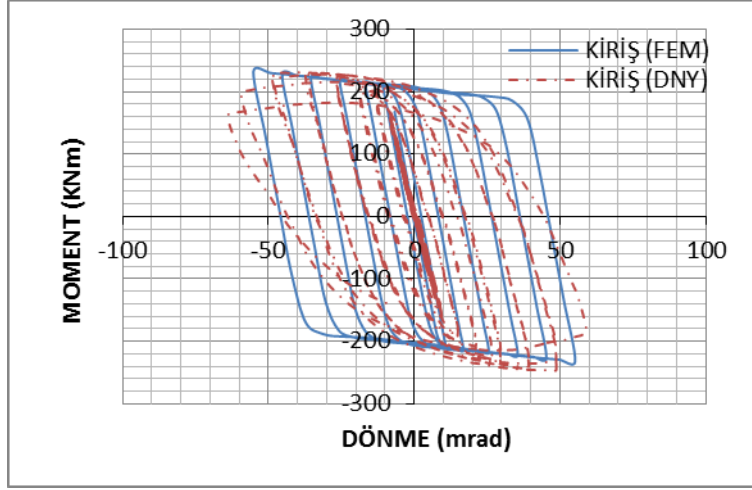
Şekil 7.47 : P2 - Kolon Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.48 : P2 - Birleşim Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.49 : P2 – Kolon+Birleşim Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.50 : P2 - Kiriş Moment- Toplam dönme.

Sayısal analiz çalışmaları deneysel çalışmaların doğruluğunu kontrol etmede önemli rol oynamaktadır. Şekil 7.49 ‘da kolon ile birleşimin toplam dönme miktarı oldukça başarılı olarak sayısal analiz çalışmasında elde edilmiştir. Şekil 7.50’de elastik bölgede ve plastik bölgenin son aşamasına kadar sayısal analiz deneysel çalışma sonuçları ile oldukça uyumludur. Ancak kiriş başlığında burkulma meydana gelmeye başladıktan sonra grafikler arasındaki farklılık artış göstermektedir. Şekil 7.46’da deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışmasında kiriş başlığında burkulma meydana gelerek göçme durumu olduğu tespit edilmiştir.

7.3.2 P3 numune testi

P3 numunesinde S355JR çelik kalitesinin çevrimsel yükleme altındaki performansı incelenmek istenmiştir. Ancak malzeme testlerinde S355JR olarak sipariş edilen malzemenin S275JR kalitede olduğu (malzemenin yanlış gönderildiği) anlaşılmıştır. Bu sebeple P3 numune testi P2 numune testinin doğrulaması amacıyla kullanılmıştır.

P3 numunesi, S275JR kalite IPE270 kiriş profili ve HEB320 kolon profilinden oluşmaktadır. Alın levhası S235 JR kalite ve 35 mm dir. 10.9 Kalite M24 bulon kullanılmıştır. Numune çevrimsel yükleme altında incelenmiştir. Birleşim kuvvetli kolon, zayıf kiriş felsefesine göre tüm plastikleşme kirişte meydana gelecek şekilde tasarlanmıştır. Bulon tipi dışında P1 ve P2 numunesi ile arasında bir farklılık bulunmamaktadır.

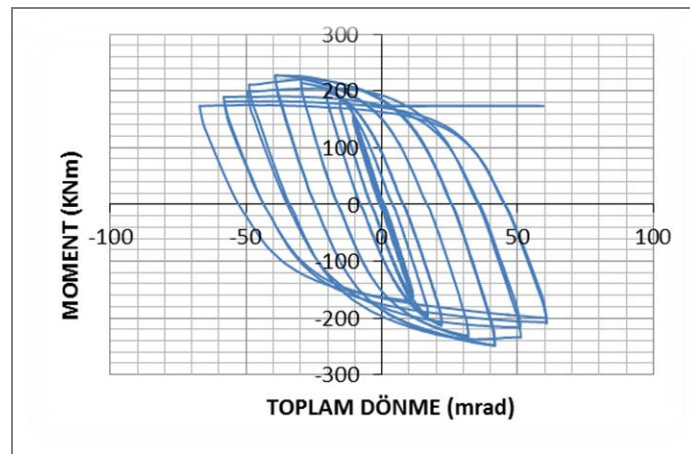
7.3.2.1 P3 deneyi sırasında yapılan gözlemler

Numune P3 (+18,95 mm, -18,95mm) (Kuvvet; +81,813 kN, -85,275 kN) değerlerine kadar doğrusal davranış sergilemiştir. Elastik bölgede birleşim başlangıç rijitliği yaklaşık ortalama 59.456, 56 (kN/mrad) olarak tespit edilmiştir. Sisteme uygulanan en fazla yatay kuvvet (+118.677;-129,595) kN'dur. Deneysel çalışmada 0,06 radyan (113,7mm) çevrimsel yükler sistemde yük kaybı olmadan başarıyla tamamlanmıştır. 0,07 radyan çevrimsel yüklerde %75 oranında başarıyla tamamlanmıştır. Ancak 0,07 radyan yüklemeleri tamamlanmadan birleşimde göçme durumuna ulaşılmıştır. 0,05-0,06 radyan için uygulanan çevrim adımlarında kiriş başlığı yerel burkulması sebebiyle yaklaşık %20 mertebesinde mukavemet kaybı gerçekleşmiştir. Yükleme numune başlığında kopma meydana gelene kadar devam ettirilmiştir. Kiriş başlığında meydana gelen yerel burkulma alın levhası yüzünden (0-170) mm arasında bulunan bir bölgede meydana gelmiştir. Plastik mafsallı kuşağı alın levhası yüzünden yaklaşık 75 mm-110 mm mesafede gözlemlenmiştir.

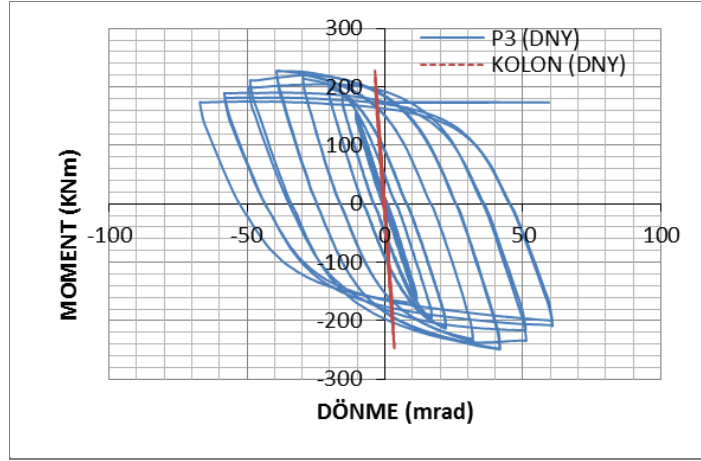
Deney boyunca kolonda, alın levhasında ve civatalarda elastik davranış gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma boyunca genel olarak P2 deneyine ile çok yakın değerler elde edilmiştir. Düzlem dışı hareket sistemi takviye edilmiştir. Bu sebeple numune kapasitesi ve sünekliği bir miktar artış göstermiştir.

7.3.2.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması

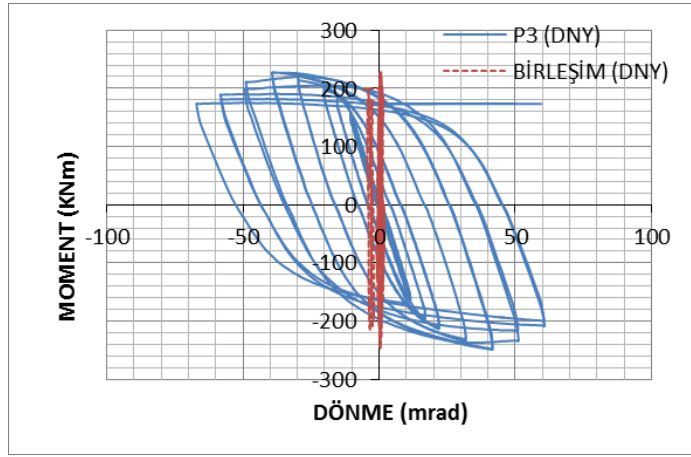
P3 numunesinde kolonun, alın levhasının ve kirişin, birleşimin enerji tüketimine katkısı aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



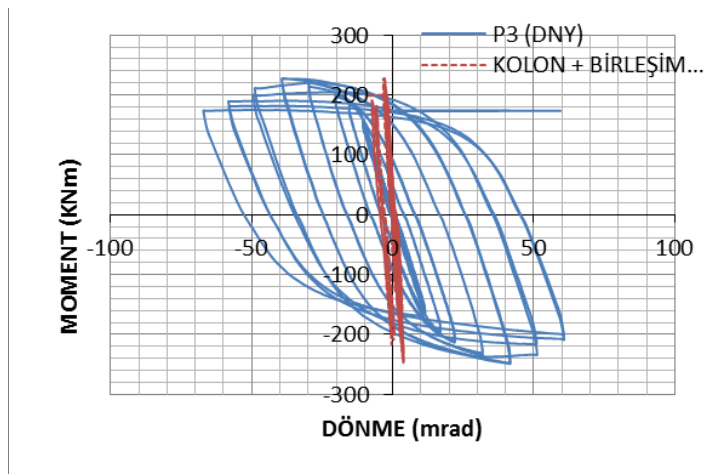
Şekil 7.51 : P3-Moment- Toplam dönme.



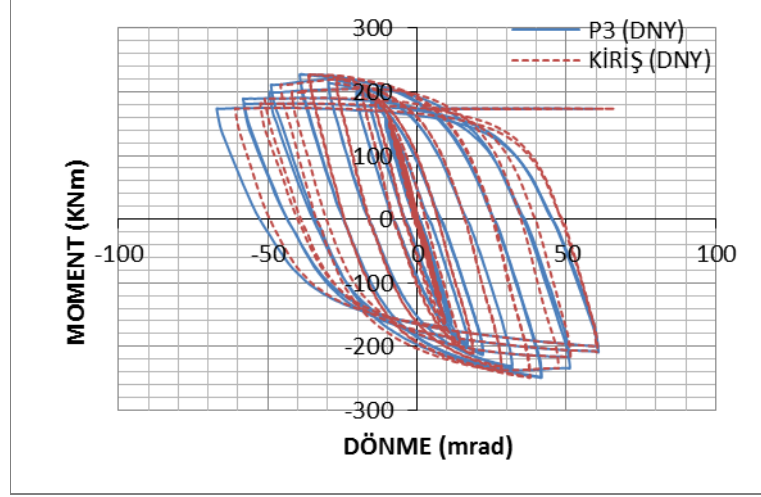
Şekil 7.52 : P3-Kolon Moment- Toplam dönme.



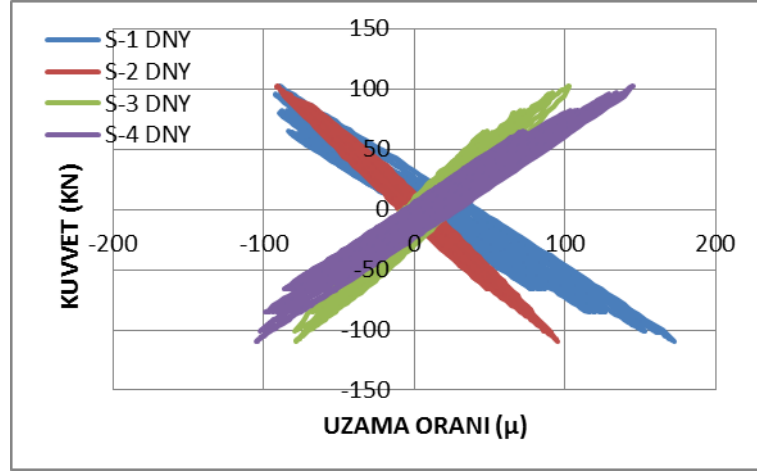
Şekil 7.53 : P3-Birleşim Moment- Toplam dönme.



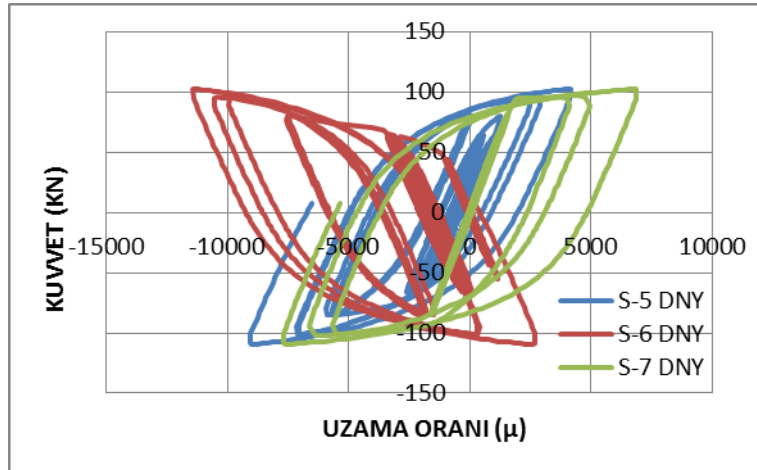
Şekil 7.54 : P3 (Kolon+Birleşim) Moment- Toplam dönme.



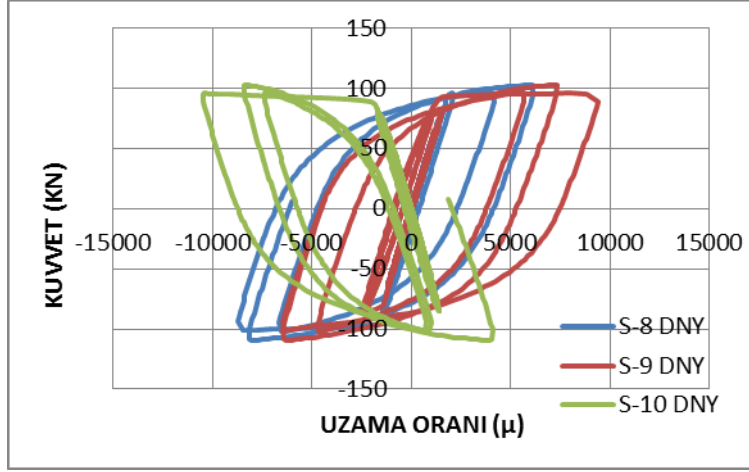
Şekil 7.55 : P3-Kiriş Moment- Toplam dönme.



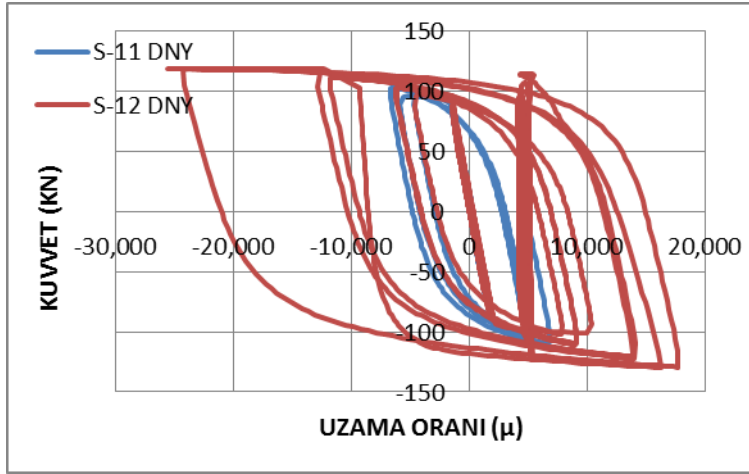
Şekil 7.56 : P3 numunesi kolon panel bölgesi strengaç okumaları.



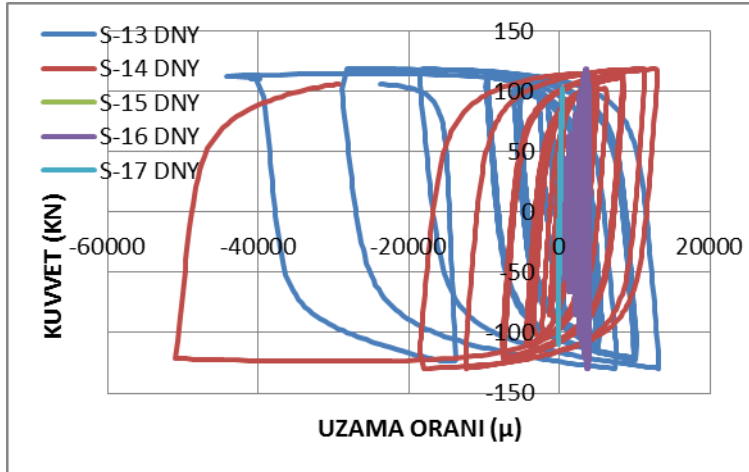
Şekil 7.57 : P3 numunesi strengaç okumaları.



Şekil 7.58 : P3 numunesi strengeç okumaları.



Şekil 7.59 : P3 numunesi strengeç okumaları.



Şekil 7.60 : P3 numunesi strengeç okumaları.

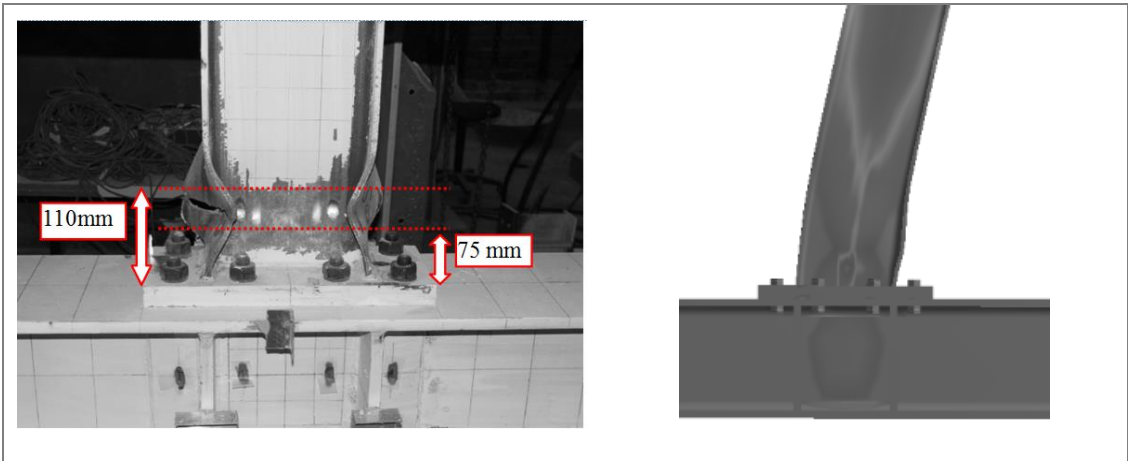
P1 ve P2 numuneleri deney sonuçlarına benzer şekilde yukarıdaki şekillerde görüldüğü üzere kolon ve alın levhası tüm deney boyunca elastik davranış sergilemiştir. Şekil 7.60'da görüldüğü gibi tüm plastik davranış kirişte meydana

gelmiştir. Deney sonucunda enerji tüketimi açısından oldukça başarılı geniş çevrimsel döngü grafikleri elde edilmiştir. Çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilen P3 testinde P2 testindeki gibi plastik mafsall oluşumu somut bir şekilde gözlemlenmiştir.

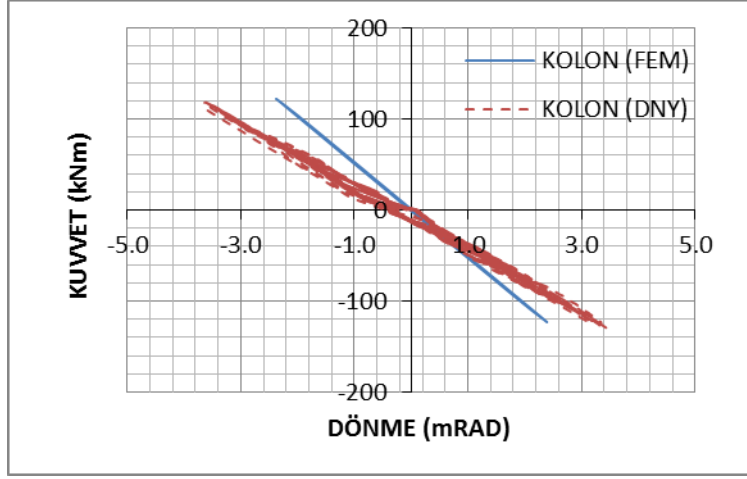
Şekil 7.56’da kolon panel bölgesinde meydana gelen deformasyonların elastik olduğu görülmektedir. Şekil 7.57, 7.58 ve 7.59’daki grafiklerden plastik mafsall kiriş başlığı bölgesinde tam olarak plastikleşme meydana geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 7.60’da bulunan S13 ve S14 strengçe grafikleri plastik mafsall da kiriş gövdesinden alınan okumalardır. S15-S17 arasındaki tüm strengçeler alın levhasının tüm deney boyunca elastik davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 7.57’de gösterilen S5 ve S6 strengçeleri alın levhası ile kiriş başlığının kaynaklandığı bölgede (kaynak ısisından etkilenen bölge) kiriş başlığının orta hizasında yapılan strengçe okumalarını göstermektedir.

7.3.2.3 P3 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması

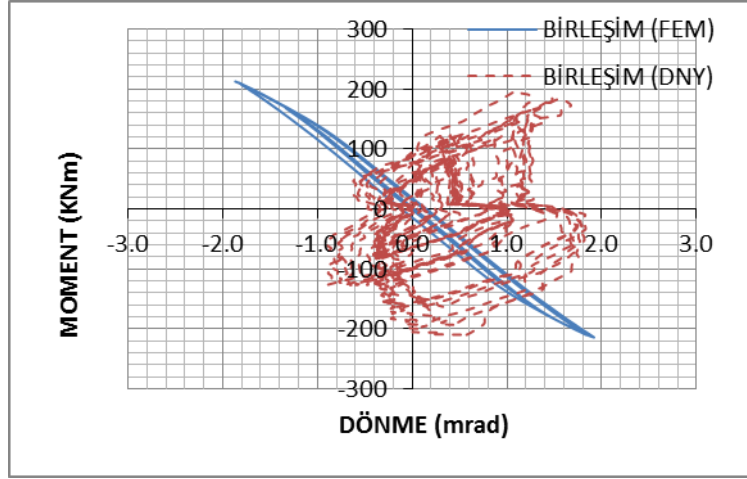
Çevrimsel yükleme altında test edilen P3 numunesi için deneysel çalışma sonuçları ile FEA sonuçları karşılaştırılarak aşağıda sunulmuştur. Şekil 7.61’de deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışması sonucu elde edilen göçme modları birlikte sunulmuştur. Her iki şekilde göçme modları büyük benzerlik göstermektedir



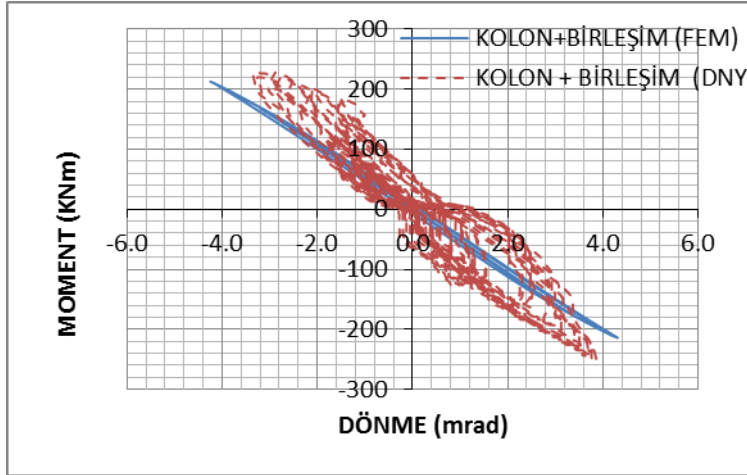
Şekil 7.61 : P3-Deneysel çalışma ile FEA modelinin birlikte gösterimi.



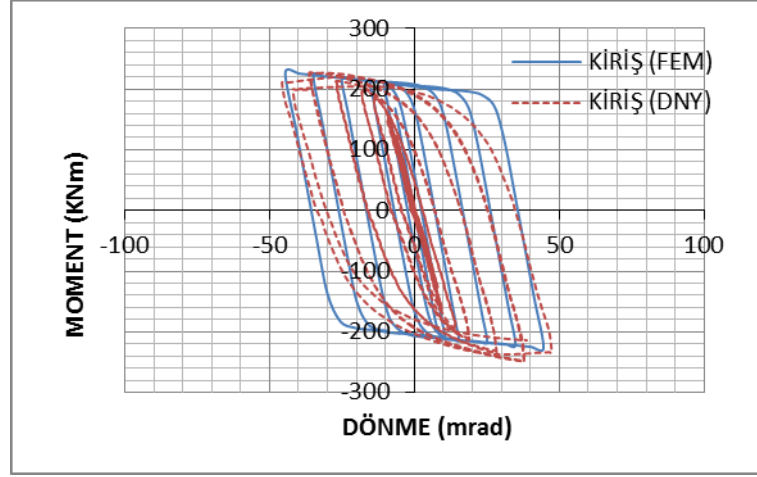
Şekil 7.62 : P3 - Kolon Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.63 : P3 - Birleşim Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.64 : P3 – Kolon+Birleşim Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.65 : P3 - Kiriş Moment- Toplam dönme.

Şekil 7.62’de deneysel çalışmada gözlemlenen kolondaki elastik davranış sayısal analiz çalışmasında da elde edilmiştir. Şekil 7.48’de birleşimin dönme grafiği için deneysel grafiği ile sayısal analiz grafiği birlikte gösterilmiştir. Deney düzeneğinde numunenin mesnetlenme bölgesinde meydana gelen küçük yerdeğıştirmeler sebebiyle kırmızı renk ile gösterilen deney grafiğinin mavi renk ile gösterilen grafiğe benzemesi gerekirken hassas bir şekilde elde edilememiştir. Buradan da görüldüğü üzere deneysel olarak oldukça zor elde edilebilecek bilgiler sayısal analiz çalışması ile rahatlıkla elde edilebilmektedir. Sayısal analiz çalışmaları deneysel çalışmaların doğruluğunu kontrol etmede önemli rol oynamaktadır. Şekil 7.64 ‘de kolon ile birleşimin toplam dönme miktarı oldukça başarılı olarak sayısal analiz çalışmasında elde edilmiştir. Şekil 7.65’de elastik bölgede ve plastik bölgenin son aşamasına kadar sayısal analiz deneysel çalışma sonuçları ile oldukça uyumludur. Ancak kiriş başlığında burkulma meydana gelmeye başladıktan sonra grafikler arasındaki farklılık artış göstermektedir. Şekil 7.61’de deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışmasında kiriş başlığında burkulma meydana gelerek göçme durumu oluştuğu tespit edilmiştir.

7.3.3 P4 numune testi

P4 numunesi, S275JR kalite HEB180 kiriş profili ve S275JR kalite HEB320 kolon profilinden oluşmaktadır. Alın levhası S23 JR kalite ve 35 mm’dir. 10.9 kalite M24 bulon kullanılmıştır. Numune çevrimsel yükleme altında incelenmiştir. Birleşim kuvvetli kolon, zayıf kiriş felsefesine göre tüm plastikleşme kirişte meydana gelecek şekilde tasarlanmıştır. P4 deneyinde kullanılan HEB180 profili, P1,P2 ve P3 testlerinde kullanılan IPE270 kiriş profili ile yaklaşık aynı plastik mukavemet

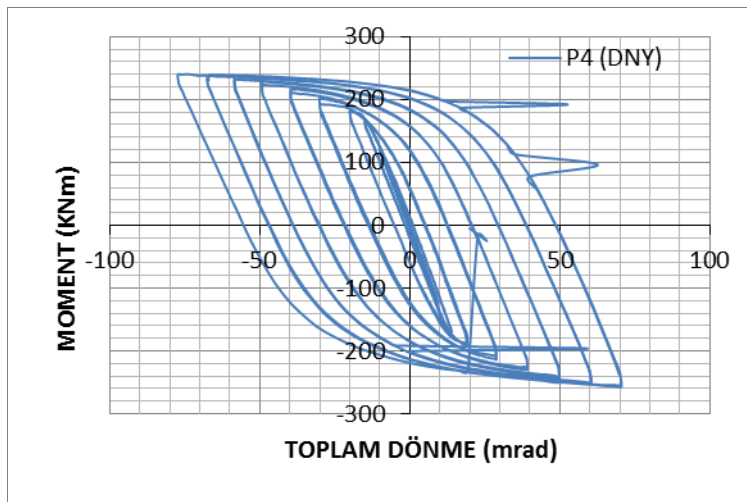
mometine sahiptir. Bu deneyle aynı plastikleşme mukavemetine sahip fakat farklı geometride kiriş profillerinin birleşimin çevrimsel yük altındaki davranışına etkisi incelenmek istenmiştir.

7.3.3.1 P4 deneyi sırasında yapılan gözlemler

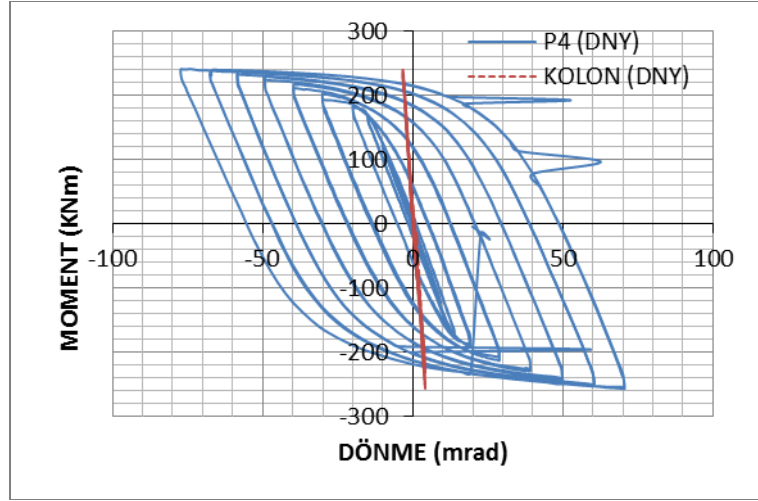
Numune P4 (+64,94 kN ; -65,24 kN) (+18,8 mm, -18,8 mm) (0,01 radyan) a kadar elastik davranış sergilemişlerdir. Elastik bölgede başlangıç rijitliği değeri yaklaşık 47.292,64 kN/mrad olarak tespit edilmiştir. Bu değer kirişte aynı plastik mukavemete sahip IPE270 kiriş profili kullanılan numunelere (P2-P3) göre daha düşüktür. Deneyisel çalışma sırasında ilk deformasyonlar S5 ve S6 strengçlerinin bulunduğu ısıdan etkilenmiş bölgede (Heat affected zone) (70kN - 80kN) mertebelerinde gözlemlenmiştir. Sisteme uygulanan en fazla yatay kuvvet (+124,3;-133,4) kN'dur. 0,07 radyan (+131,46 mm; -131,46 mm) mertebesindeki çevrimsel yüklemeler numunede mukavemet kaybı olmadan başarıyla tamamlanmıştır. 0,08 radyan mertebesindeki çevrimlerin %25'i başarıyla tamamlanmıştır. Çevrimsel yüklemeler boyunca yerel burkulma ve mukavemet kaybı gözlemlenmemiştir. Plastik mafsall oluşumu alın levhası yüzünden 60mm-120mm mesafede tespit edilmiştir. Deney boyunca kolonda, alın levhasında ve civatalarda elastik davranış gözlemlenmiştir.

7.3.3.2 Yapılan okumaların grafik olarak sunulması

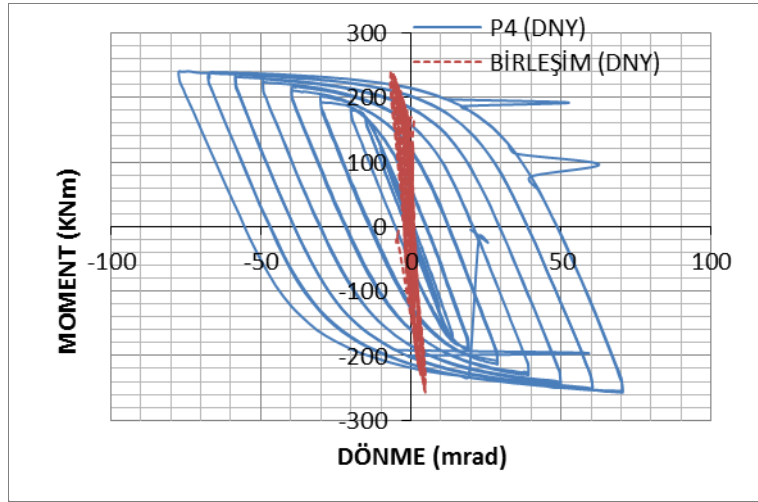
P4 numunesinde kolonun, alın levhasının ve kirişin, birleşimin enerji tüketimine katkısı aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



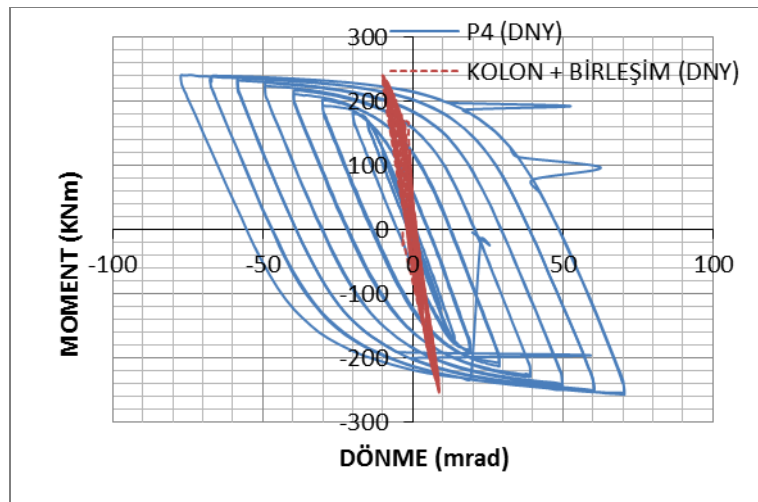
Şekil 7.66 : P4-Moment- Toplam dönme.



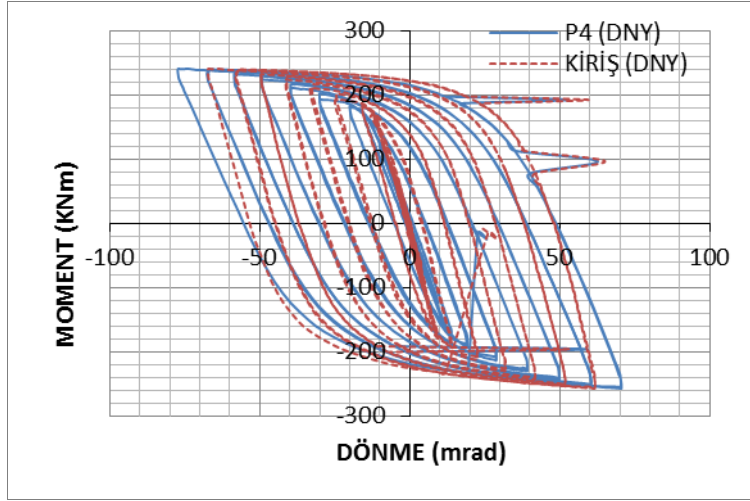
Şekil 7.67 : P4-Kolon Moment- Toplam dönme.



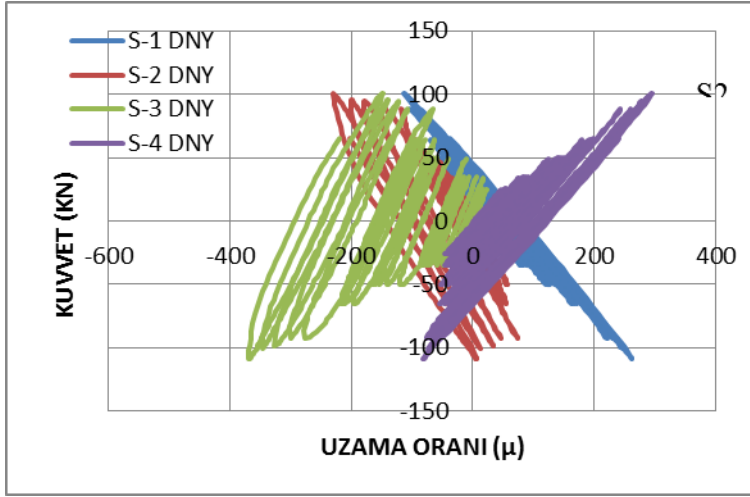
Şekil 7.68 : P4- Birleşim Moment- Toplam dönme.



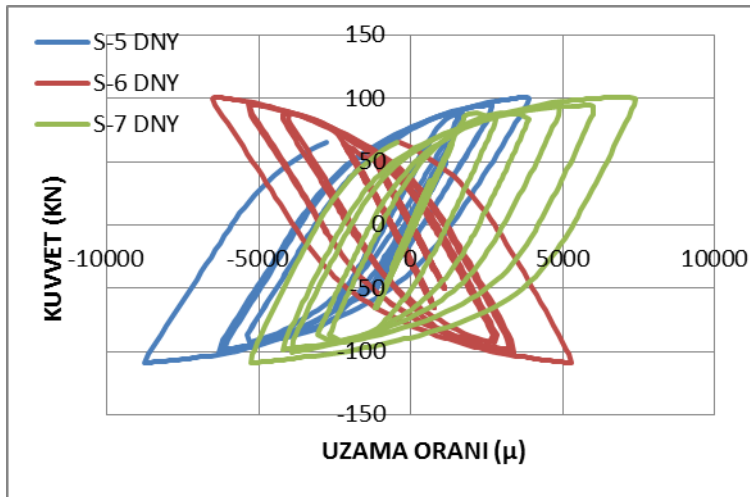
Şekil 7.69 : P4-(Kolon+Birleşim) Moment- Toplam dönme.



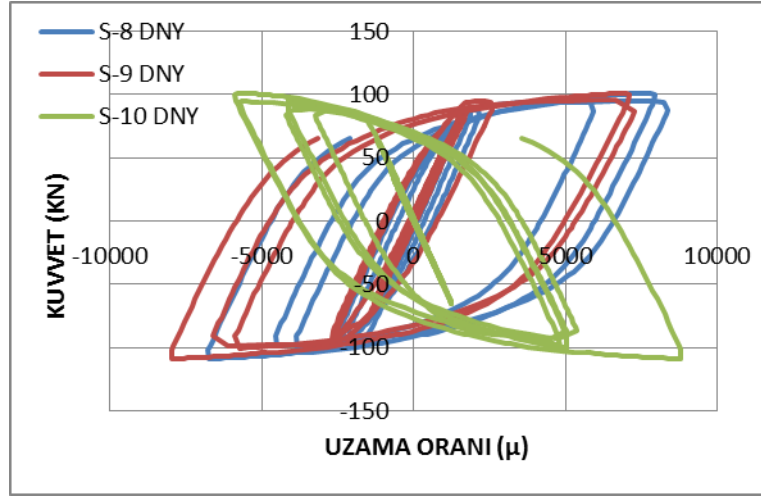
Şekil 7.70 : P4-Kiriş Moment- Toplam dönme.



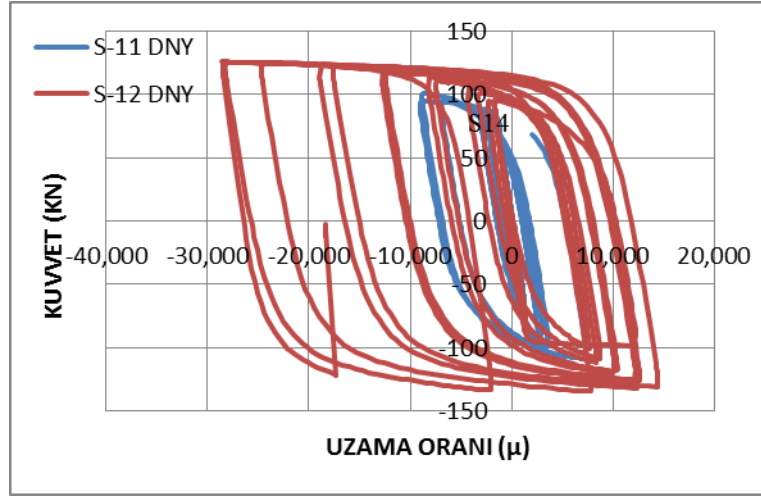
Şekil 7.71 : P4 numunesi kolon panel bölgesi strengeli okumaları.



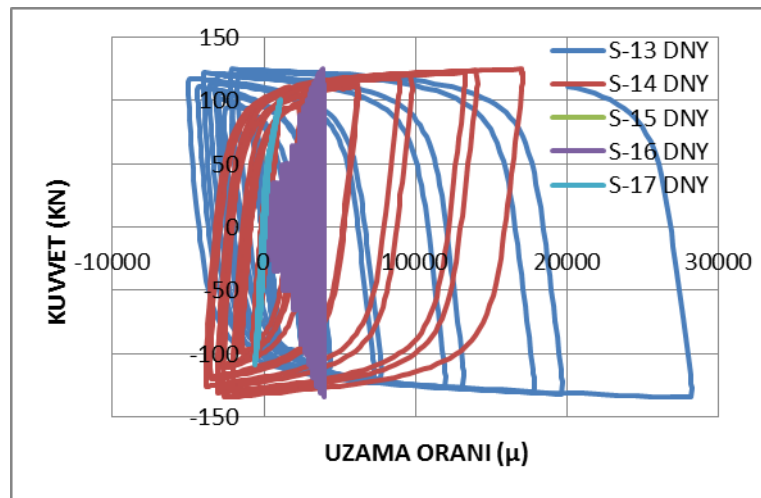
Şekil 7.72 : P4 numunesi strengeli okumaları.



Şekil 7.73 : P4 numunesi strengeç okumaları.



Şekil 7.74 : P4 numunesi strengeç okumaları.



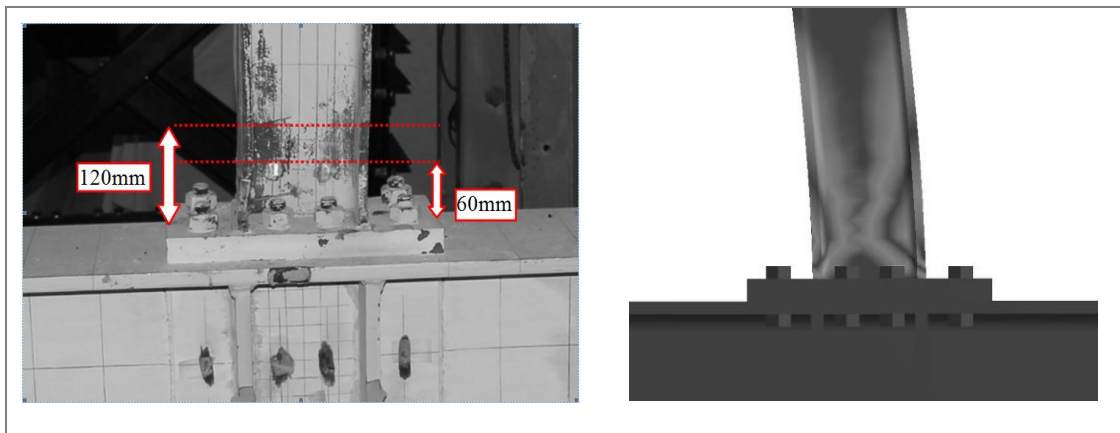
Şekil 7.75 : P4 numunesi strengeç okumaları.

P1, P2, P3 numuneleri deney sonuçlarına benzer şekilde yukarıdaki şekillerde görüldüğü üzere kolon ve alın levhası elastik tüm deney boyunca elastik davranış sergilemiştir. Şekil 7.70’da görüldüğü gibi tüm plastik davranış kirişte meydana gelmiştir. Deney sonucunda enerji tüketimi açısından oldukça başarılı geniş çevrimsel döngü grafikleri elde edilmiştir. Çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilen P4 testinde P2 ve P3 testlerindeki gibi plastik mafsall oluşumu somut bir şekilde gözlemlenmiştir.

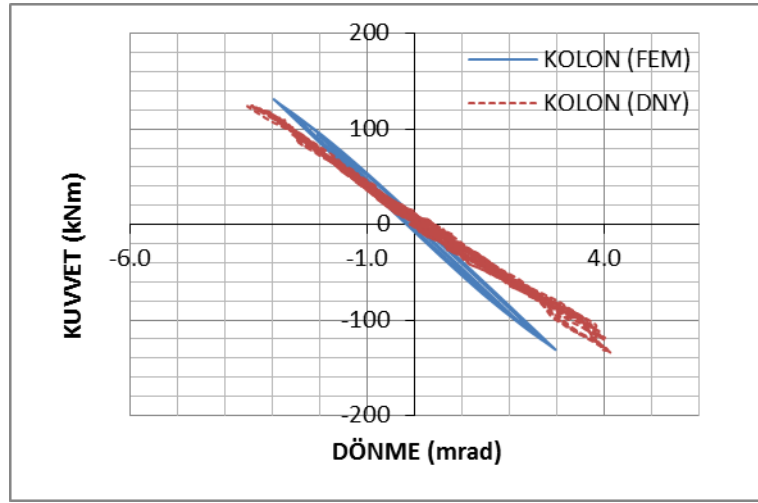
Şekil 7.67 ve şekil 7.71’de kolon panel bölgesinde meydana gelen deformasyonların elastik olduğu görülmektedir. Şekil 7.72, 7.73 ve 7.74’deki grafiklerden plastik mafsall kiriş başlığı bölgesinde tam olarak plastikleşme meydana geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 7.75’de bulunan S13 ve S14 strengeli grafikleri plastik mafsall da kiriş gövdesinden alınan okumalardır. S15-S17 arasındaki tüm strengeli alını levhasının tüm deney boyunca elastik davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 7.72’de gösterilen S5 ve S6 strengeli alını levhası ile kiriş başlığının kaynaklandığı bölgede (kaynak ısısından etkilenen bölge) kiriş başlığının orta hizasında yapılan strengeli okumalarını göstermektedir.

7.3.3.3 P4 deneyi deneysel çalışma ile sayısal analiz kıyaslaması

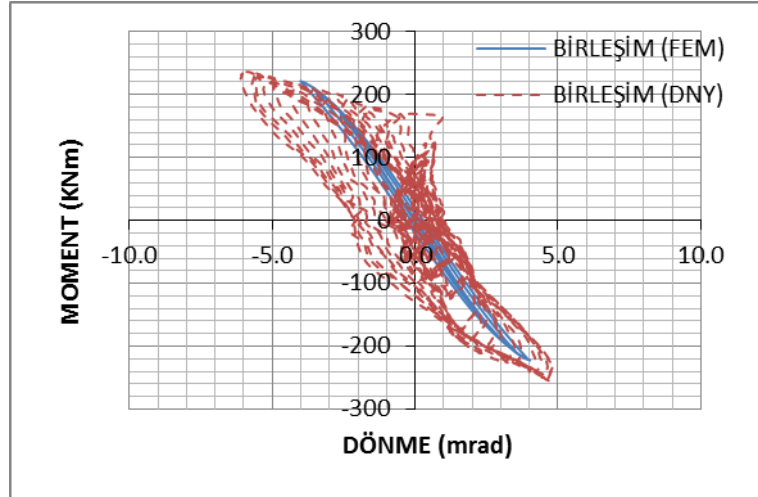
Çevrimsel yükleme altında test edilen P4 numunesi için deneysel çalışma sonuçları ile FEA sonuçları karşılaştırılarak aşağıda sunulmuştur. Şekil 7.76’de deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışması sonucu elde edilen göçme modları birlikte sunulmuştur. Her iki şekilde göçme modları büyük benzerlik göstermektedir.



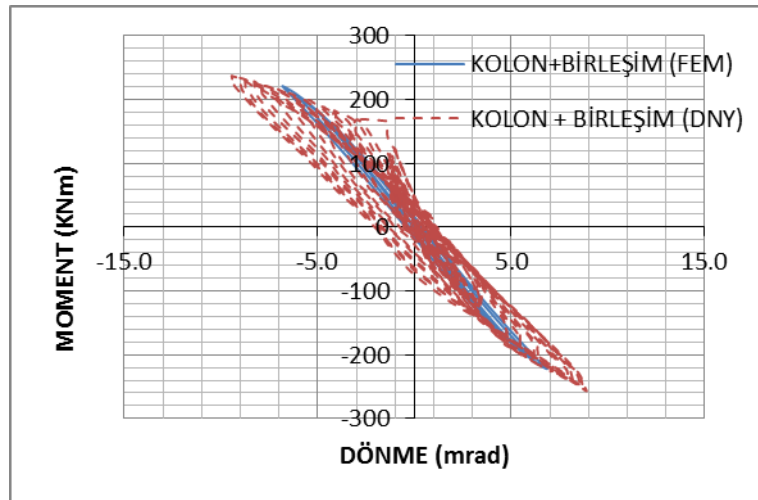
Şekil 7.76 : P4-Deneysel çalışma ile FEA modelinin birlikte gösterimi.



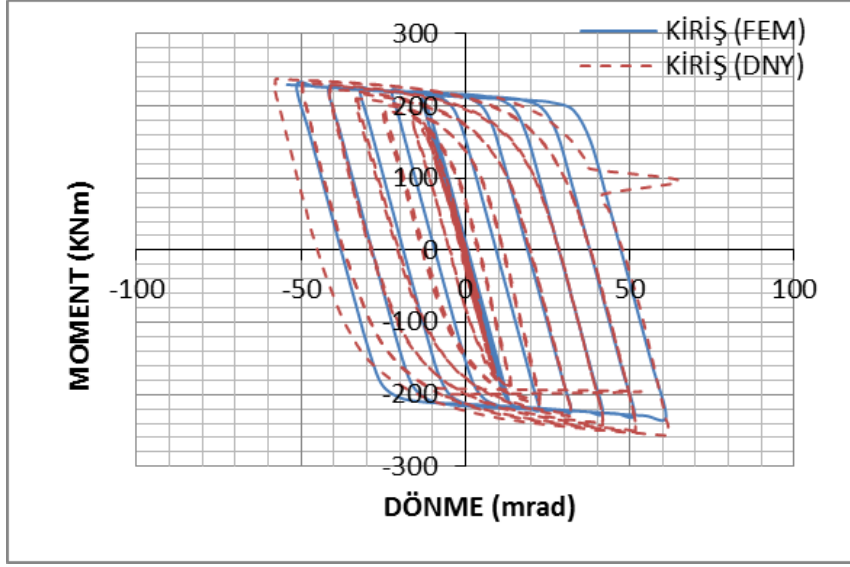
Şekil 7.77 : P4 - Kolon Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.78 : P4 - Birleşim Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.79 : P4 – Kolon + Birleşim Moment- Toplam dönme.



Şekil 7.80 : P4 - Kiriş Moment- Toplam dönme.

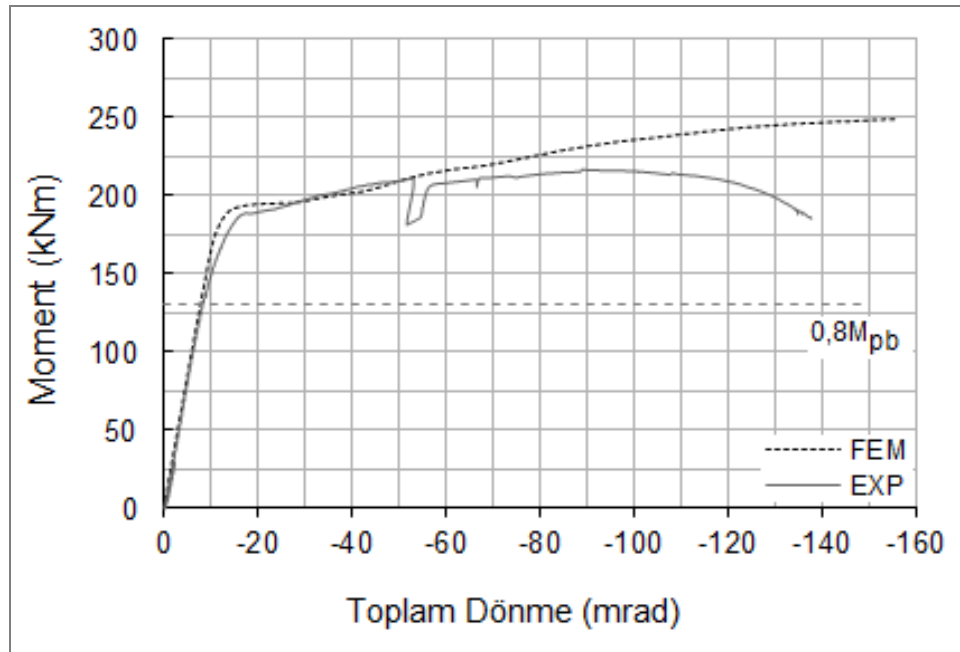
Şekil 7.77’de deneysel çalışmada gözlemlenen kolondaki elastik davranış sayısal analiz çalışmasında da elde edilmiştir. Şekil 7.78’de birleşimin dönme grafiği için deneysel grafiği ile sayısal analiz grafiği birlikte gösterilmiştir. Deney düzeneğinde numunenin mesnetlenme bölgesinde meydana gelen küçük yerdeğiştirmeler sebebiyle kırmızı renk ile gösterilen deney grafiğinin mavi renk ile gösterilen grafiğe benzemesi gerekirken hassas bir şekilde elde edilememiştir. Şekil 7.79 ‘de kolon ile birleşimin toplam dönme miktarı oldukça başarılı olarak sayısal analiz çalışmasında elde edilmiştir. Şekil 7.80’de elastik ve plastik bölgede deneysel çalışma sonuçları ile sayısal analiz sonuçları oldukça uyumludur. P2, P3 testinde kiriş başlığında burkulma meydana gelmeden kopma meydana gelmesiyle numumede göçme oluşmuştur. Önceki testlerde kiriş başlığında meydana gelen burkulma sayısal analize yansıtılamamış ve bu sebeple çevrimlerin son adımlarında grafiklerde bir miktar farklılık gözlemlenmişti. P4 testinde kiriş başlığında burkulma meydana gelmeden göçme durumu oluşması sebebiyle son çevrim adımlarına kadar deneysel çalışma oldukça başarılı bir şekilde simüle edilmiştir. Şekil 7.76’da deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışmasında kiriş başlığında burkulma meydana gelerek göçme durumu olduğu tespit edilmiştir.

8. DEĞERLENDİRME VE KIYASLAMA

Moment birleşimleri, FEMA350 ve DBYBHY-2007'ye göre asgari 0.04 radyan toplam dönme (katlar arası dönme açısı) kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Ayrıca AISC 358-10'a göre 0.04 radyan toplam dönme açısında birleşimin moment kapasitesinin kiriş nominal moment kapasitesinin %80' inden az olamaz.

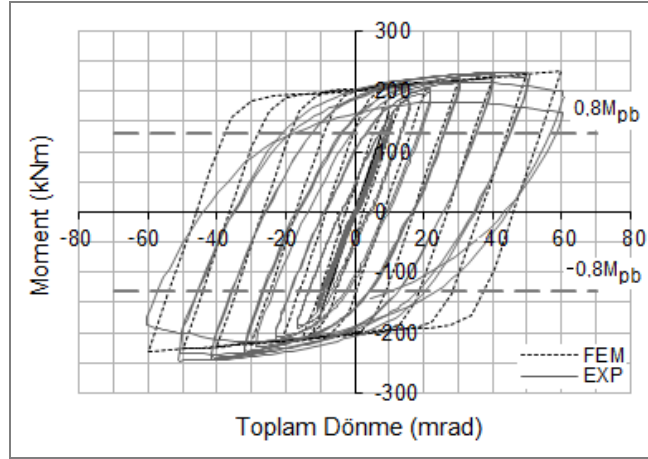
Deney grafiklerinde görüldüğü üzere P2 ve P3 numunelerinde çevrimsel yükleme altında bir miktar mukavemet kaybı gözlemlense dahi tüm numunelerde 0.04 radyan toplam dönme açısına kadar birleşimin moment kapasitesi $0.8 M_{pb}$ değerinin altına düşmemiştir. Aşağıdaki grafiklerde $0.8 M_{pb}$ değeri yatay olarak kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

8.1 Monotonik Yükleme Altında Yapılan Testlerin Kıyaslaması

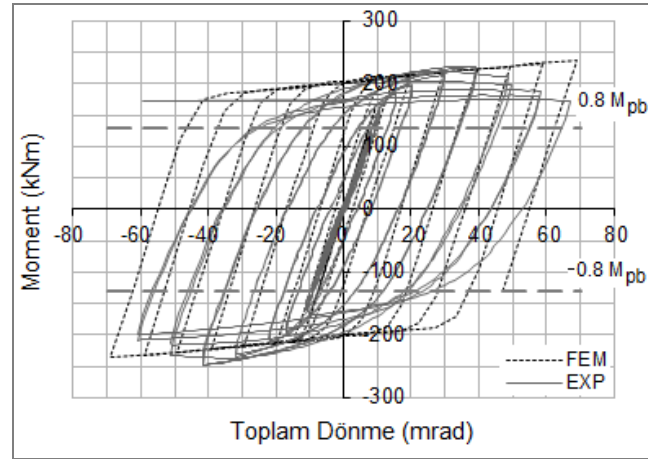


Şekil 8.1 : P1 - Moment- Toplam dönme.

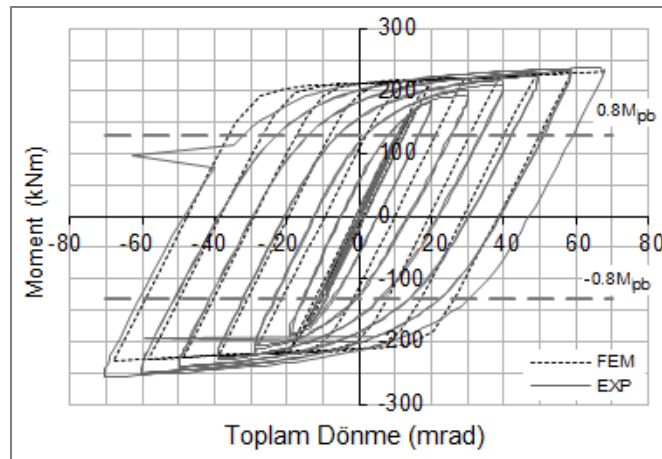
8.2 Çevrimsel Yükleme Altında Yapılan Testlerin Kıyaslaması



Şekil 8.2 : P2 - Moment- Toplam dönme.



Şekil 8.3 : P3 - Moment- Toplam dönme.



Şekil 8.4 : P4 - Moment- Toplam dönme.

P2 ve P3 numunesi sonlu eleman çalışmasında elastik bölgede tatmin edici şekilde simüle edilmiştir. Doğrusal olmayan bölgede bu numunelerde birleşim nihai kapasiteleri deney sonuçlarına yakın bir şekilde elde edilmiştir. Kiriş başlığında lokal burkulma meydana gelene kadar sayısal analiz ve deneysel çalışma grafikleri birbirlerine oldukça yakın sonuç vermiştir. Ancak deney sırasında kiriş başlığındaki lokal burkulmadan meydana gelen birleşim mukavemet kaybı sayısal analiz çalışmasında gözlemlenememiştir. Bu sebeple deneysel çalışmada kiriş başlığında lokal burkulma meydana gelen bölgede sayısal analiz grafiği ile deneysel çalışma grafikleri farklılık göstermektedir. Genel olarak sonlu eleman çalışmasının deneysel çalışma ile iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür.

P4 numunesinin göçme duruma kadar kiriş başlığında lokal burkulma meydana gelmemiştir. Bu sebeple sayısal analiz çalışması ile deneysel çalışma grafikleri arasında oldukça iyi bir uyum görülmektedir. P3 (IPE270) ve P4 (HEB180) numunelerinde kiriş plastik moment kapasitesi çok yakın olmasına rağmen P3 numunesi grafiğinde artan çevrimlerde birleşim mukavemet kaybı gözlemlenirken, P4 numunesinde birleşim mukavemet kaybı gözlemlenmemiştir. Bu sebeple kiriş başlığı kalın kiriş kullanılarak lokal burkulmaların engellendiği ve histeresis grafiği daha geniş ve kararlı eğriler elde edildiği görülmektedir.

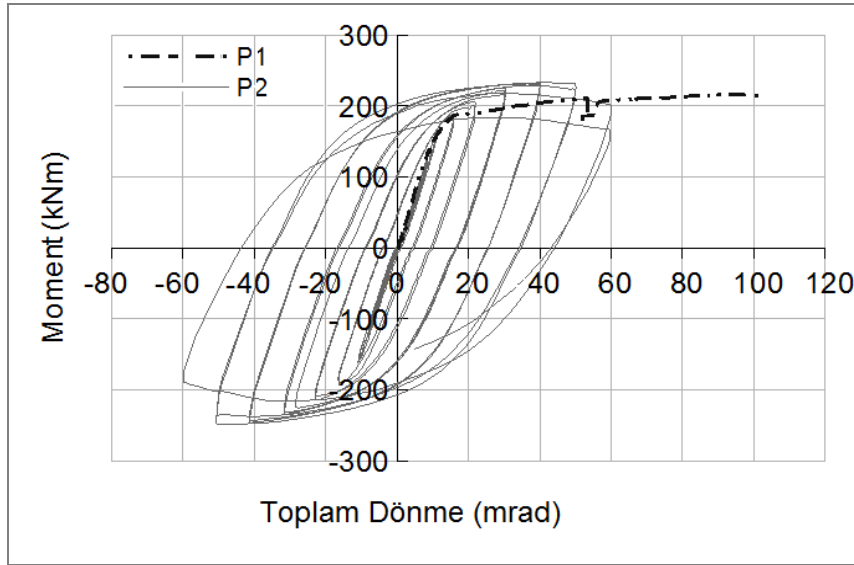
Birleşimlerin karakteristik özelliklerini ifade eden üç parametre mevcuttur. Bunlar elastik bölge başlangıç rijitliği, birleşim nihai moment kapasitesi, ve azami dönme açısı olarak sıralanabilir. $M_{u(+)}$ ve $M_{u(-)}$ uygulanan tüm yükleme protokolü boyunca uygulanan azami momenti, Φ_u azami dönme açısını K_i ise başlangıç rijitliğini ifade etmektedir. Aşağıdaki tabloda itme durumu (+) işaretiyle çekme durumu ise (-) işaretiyle gösterilmiştir.

Çizelge 8.1 : Birleşim özelliklerinin tablo olarak gösterimi.

Numune	K_i kN/mrad	$M_{u(+)}$ (kNm)	$M_{u(-)}$ (kNm)	Φ_u (mrad)	Göçme Modu
P1	52389	216,91	-	138,3	Kiriş başlığında lokal burkulma
P2	57548	231,91	-245,34	60	Kiriş başlığında lokal burkulma, Kiriş başlığında kopma
P3	59456	224,89	-245,58	60	Kiriş başlığında lokal burkulma, Kiriş başlığında kopma
P4	47292	233,44	-250,53	70	Kiriş başlığında kopma

P1 ve P2 numunelerinin karşılaştırılması:

Yükleme tipinin birleşim davranışı üzerindeki etkisini göstermek amacıyla P1 ve P2 numune grafikleri üst üste konularak karşılaştırılmıştır. P2 numunesinde (çevrimsel yük altında) lokal burkulma sebebiyle birleşim kuvvet kaybı gözlemlenirken aynı özelliklere sahip P1 numunesi (monotonik yükleme altında) lokal burkulma sebebiyle kuvvet kaybı gözlemlenememektedir.

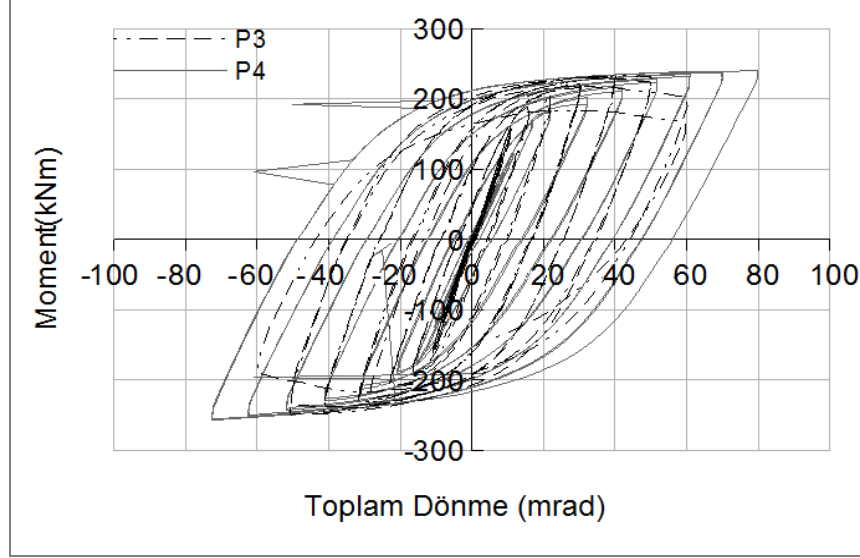


Şekil 8.5 : P1 ve P2 deney sonuçlarının karşılaştırılması.

Ayrıca çevrimsel yükleme altındaki P2 numunesi birleşim moment kapasitesinin P1 numunesi birleşim moment kapasitesinden yüksek olduğu görülmektedir. Her iki test için birleşim momenti akma değerleri birbirine oldukça yakındır. Çevrimsel yük altında P2 numunesinin elastik olmayan bölgedeki rijitliğinin ve birleşim nihai moment kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki numune için göçme modu kiriş başlığında lokal burkulma meydana gelerek gerçekleşmiştir. Çevrimsel yükleme altındaki P2 numunesi için plastik mafsalları rahatlıkla gözlemlenebilirken monotonik yükleme altındaki P1 numunesinde plastik mafsalları tam olarak tespit edilememektedir. P1 ve P2 numuneleri AISC 358-10'da tavsiye edilen parametrik sınırlamalara uymamakla birlikte DBYBHY-2007 ve FEMA350'de belirtilen performans kriterlerini sağlamıştır. Şartnameler 0,04 radyan toplam dönme kapasitesini yeterli görürken her iki numune için 0,06 radyan dönme değerine kadar birleşim moment kapasitesi $0.8 M_{pb}$ değerinden yüksek elde edilmiştir.

P3 ve P4 numunelerinin karşılaştırılması:

P3 ve P4 numunelerinde kiriş profili olarak aynı plastik moment mukavemetine fakat ayrı ayrı geometrik şekile sahip IPE270 ve HEB180 profillerinin çevrimsel yük altında performanslarının kıyaslanması amaçlanmıştır.



Şekil 8.6 : P3 (IPE270) ve P4 (HEB180) deney sonuçlarının karşılaştırılması.

Kirişte lokal burkulma meydana gelmeyen P4 numunesinde daha geniş çevrimler elde edildiği görülmektedir. IPE270 profili yüksekliğinin HEB180 profili yüksekliğinden daha fazla olması sebebiyle P3 grafiği başlangıç rijitliği daha yüksek elde edilmiştir.

Malzeme test sonuçlarının incelendiği bölümde DBYBHY- 2007'ye göre ek dayanım oranı $1.1 \times 1.1 = 1.21$ olarak hesap edilmişti. Yukarıdaki tablodaki pozitif moment değerleri dikkate alınarak kiriş eleman kapasitesinin nominal kapasiteye oranı aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 8.2 : Tespit edilen kiriş kapasitesinin nominal kapasiteye oranı.

Test	$M_{pe,nom}$ (kNm)	$M_{u(+)}$ (kNm)	$\frac{M_u}{M_{pe,nom}}$
P1 (IPE 270)	161.05	216,91	1.347
P2 (IPE 270)	161.05	231,91	1.440
P3 (IPE 270)	161.05	224,89	1.396
P4 (HEB180)	160.18	233,44	1.457

*($M_{u(+)}$ P2, P3 and P4 numuneleri için pozitif momenti ifade etmektedir)

9. SONUÇLAR

Tez çalışmasında ana hedef, Avrupa normlarına uygun geometride ve S275 çelik kalitesinde, rijitlik levhasız, 4 bulonlu uzatılmış alın levhalı moment birleşimlerinin çevrimsel yükler altındaki performansının incelenmesidir. Numune tasarımında AISC 358-10 ve DBYBHY-2007 yönetmelikleri tarafından tavsiye edilen parametrik sınırlamalar dikkate alınmıştır. Numunelerin karakteristik özelliklerinin (birleşim mukavemeti, birleşim başlangıç rijitliği, dönme kapasitesi vs...) tespiti amacıyla sayısal analiz ve deneysel çalışma yürütülmüştür. Tüm bu çalışmalar sonrasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

9.1 Çalışma Sonrası Elde Edilen Başlıca Sonuçlar

- S275 çelik kalitesi ile imal edilen tüm alın levhalı moment birleşimleri çevrimsel yükler altında 40 mrad'dan daha fazla dönme kapasitesi sergilemişlerdir.
- Avrupa normlarına uygun profiller ile imal edilen tüm alın levhalı moment birleşimleri çevrimsel yükler altında 40 mrad'dan daha fazla dönme kapasitesi sergilemişlerdir.
- Aynı plastikleşme mukavemet momentine sahip IPE270 ve HEB180 profillerinin çevrimsel yükler altındaki performansı kıyaslanmıştır. IPE270 profili kullanılan birleşimin başlangıç rijitliği daha yüksek tespit edilmiştir. Ayrıca çevrimsel yükleme HEB180 profilinde stabil bir histeresis grafiği elde edilirken IPE270 profili başlıklarında yerel burkulma gözlemlendiği için histeresis grafiği daha az sünek bir davranış sergilemiştir. Ancak tüm numunelerde 0,04 radyan toplam dönme açısı sağlanmıştır.
- Sayısal analiz çalışmaları ile deneysel çalışmalar kıyas edildiğinde sayısal analiz çalışmalarının tatmin edici sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu sayede sayısal analiz çalışmaları ile deneysel çalışmaya gerek kalmaksızın parametrik çalışmalar yapılabileceği görülmüştür. Numunelerin moment-dönme karakteristiği, numune kapasitesi, plastik mafsallık yeri, alın levhası ile

kolon başlığı arasındaki sürtünme durumu, panel bölgesinde meydana gelen deformasyonlar ve bulonlara uygulanan öngerme kuvveti gibi unsurların deneysel çalışmalara uygun olarak gerçekçi bir şekilde tespit edildiği gözlemlenmiştir.

- Çevrimsel yükleme altında kolon başlığında burkulma görülen numunelerde (IPE270 kirişli numune) plastik mafsalları yer alan levhası yüzünden yaklaşık kiriş derinliğinin 1/3'ü uzaklıkta tespit edilirken, kiriş başlığında burkulma beklenmeyen numunede (HEB180 kirişli numune) plastik mafsalları yer alan levhası yüzünden yaklaşık kiriş derinliğinin 1/2'si mesafede meydana gelmiştir. Kirişin kompaktlığının artmasıyla plastik mafsalları yerinin alan levhasından uzaklaştığı tespit edilmiştir. Plastik mafsalları oluşum yeri sayısal analiz çalışmalarında aynı şekilde gözlemlenmiştir.
- Numuneler Amerikan ve Türk deprem şartnamesinin tavsiye ettiği gibi kolon, birleşim bölgesi ve alan levhası elastik kalacak şekilde ve tüm plastikleşme kırışta meydana gelecek şekilde tasarlanmış ve tüm numunelerde gerekli asgari dönme şartı temin edilmiştir.

9.2 İmalat İçin Başlıca Tavsiyeler

- En ekonomik tasarım için bulonlar arası mesafenin asgari ölçüde olması gerekir. Bununla birlikte bulonlar arası mesafe bulonlara öngerme uygulamaya engel teşkil etmeyecek şekilde düzenlenmelidir.
- Deney numunelerinin hazırlanması sırasında kolon panel bölgesi takviyesinin işçilik isteyen maliyetli bir işlem olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple mümkün mertebe kolon panel bölgesinde takviye gerektirmeyecek kolon profillerin kullanımı tavsiye edilmektedir. Ayrıca panel bölgesi takviyesi kolonun minör aksındaki bağlantıyı olumsuz şekilde etkileyebilmektedir.
- Deneysel çalışmalarda elektrik ark kaynağı (Askaynak marka, E7018 elektrod ile yapılan tam penetrasyonlu küt kaynakların tatmin edici performans sergilediği gözlemlenmiştir.
- ISO 10.9 kalite ön-germeli civatalar çevrimsel yükler altında öngörüldüğü gibi elastik kalmış ve tatmin edici performans sergilemiştir.

9.3 Çalışmanın DBYBHY-2007 için katkısı ve sonraki çalışmalar için tavsiyeler

DBYBHY-2007’de bulunan birleşim tiplerinden alın levhalı moment birleşimi bu doktora çalışmasında Avrupa profiller ve S275 çelik kalitesi kullanılarak incelenmiş ve şartnamenin ön gördüğü 0.04 radyan katlar arası dönme açısı şartını sağladığı sayısal analiz çalışmaları ve deneysel çalışmalar ile kanıtlanmıştır. Literatürde bulunan çalışmalarda alın levhalı birleşimlerin yeterlik testlerinin amerikan profilleri ile amerikan çelik kalitesi kullanılarak incelenmiş olması sebebiyle bu birleşimlerin Türkiye’de Avrupa profilleri ve Avrupa çelik kalitesi ile kullanımında sergileyeceği performans merak konusuydu. Türkiye’de daha önce DBYBHY-2007’de bulunan birleşimlerin yeterlik testi için bir çalışma bulunmamaktadır. Bu doktora çalışması ile Avrupa normlarına uygun çelik kalitesi ve çelik profilleri kullanılarak alın levhalı moment birleşimleri incelenmiş ve bu önemli eksikliğin giderilmesi yönünde bir başlangıç yapılmıştır. Bu çerçevede DBYBHY-2007’de bulunan diğer birleşim tiplerinin Avrupa profiller ve S275JR, S355JR çelik kaliteleri kullanılarak deneysel çalışma ve sayısal analiz çalışmalarıyla incelenerek çalışma kapsamının genişletilmesinin önemli faydaları olacağı kanaatindeyim.

KAYNAKLAR

- Ana M. Girão Coelho, Frans S.K. Bijlaard.** (2007). Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(9), 1228-1240.
- ANSI/AISC** (1997). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ANSI/AISC 341-10** (2010). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ANSI/AISC 341-02** (2002). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ANSI/AISC 358-10** (2010). Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ANSI/AISC 360-10** (2010). Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ANSYS Workbench Release 11.0.** (2003), ANSYS Inc, Canonsburg. Pennsylvania
- ANSYS Element Reference.** ANSYS 12.1 documentation.
- ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities. (2010).** Introduction to Contact, Lecture3, (Aşağıdaki siteden alındı.)
(http://inside.mines.edu/~apetrell/ENME442/Labs/1301_ENME442_1ab6_lecture.pdf)
- ATC-24** (1992). Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures. *Applied Technology Council*, California, A.B.D.
- Augusto H., Rebelo C., da Silva L.S.** (2012). Modelling of the Dissipative Behaviour of Partial-Strength Beam-to-Column Steel Connections. *15WCEE*, Lisboa.
- Borgsmiller, J. T., Sumner, E. A., ve Murray, T. M.** (1995). Tests of Multi-Row Moment End-Plate Connections Having Large Inner Pitch Distances. *Research Report No. CE/VPI-ST-95/01*, submitted to Kawada Industries, Costa Mesa, California.
- Borgsmiller, J.T.** (1995). Simplified Method for Design of Moment End-Plate Connections. M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Bursi, O.S. ve Jaspart, J.P.** (1998). Basic Issues in the Finite Element Simulation of Extended End Plate Connections. *Computers and Structures*, Pergamon, 69(3), 361-382.

- Carter C. J.** (1999). Stiffening of Wide-Flange Columns at Moment Connections: Wind and Seismic Applications. American Institute of Steel Construction, Inc, Chicago, IL.
- Cheol Min Yang, Young Moon Kim** (2007). Cyclic behaviour of bolted and welded beam to column joints. *International Journal of Mechanical Sciences*, 49(5), 635-649.
- Coelho A. M. G, Bijlaard F. S. K., Silva L. S.** (2004). Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections, *Engineering Structures*, 26 (2004), 1185–1206.
- Del Savio A.A., Nethercot D.A., Vellasco P.C.G.S., Andrade S.A.L., Martha L.F.** (2009). Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(8-9), 1876-1895. doi:10.1016/j.jcsr.2009.02.011
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY).** (2007), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye.
- Dessouki A. K., Youssef A.H., Ibrahim M.M.,** (2013), Behavior of I-beam bolted extended end-plate moment connections. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 685-699.
- Diaz C., Victoria M., Marti P. and Querin O.M.** (2011). FE model of beam-to-column extended end-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1578-1590.
- EN 1998-1, Eurocode 8.** (2005). Design of Structures for Earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. *Commission of the European Communities*, Brussels.
- EN 10002-1.** (2001). Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at ambient temperature. *European Committee for Standardization*, Brussels.
- FEMA-302** (1997), NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New buildings and other Structures, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- FEMA-350** (2000), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- FEMA-353** (2000). Recommended Specifications and Quality Assurance Guidelines for Steel Moment Frame Construction for Seismic Applications, SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- FEMA-355D,** (2000). State of the art report on connection performance. *SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- Girão Coelho, A.M., Bijlaard, F.** (2007). Experimental behavior of high strength steel end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(9), 1228-1240.

- Hooman Farrokhi, F. Danesh, Sassan Eshghi.** (2009). A modified moment resisting connection for ductile steel frames (Numerical and experimental investigation). *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11), 2040-2049.
- Jake Blanchar,** (2008), Analysis of Contact,
(blanchard.ep.wisc.edu/FEM/29_Contact.pptx)
- Kennedy, N.A., Vinnakota, S. ve Sherbourne, A.N.** (1981). The Split-Tee Analogy in Bolted Splices and Beam-Column Connections. *Joints in Structural Steelwork*, Wiley, London
- Kozlowski A., Kowalczyk R. ve Gizejowski M.,** (2008). Estimation of the initial stiffness and moment resistance of steel and composite joints, *CTBUH 8th World Congress*
- Krawinkler, H., Bertero, V.V., and Popov, E.P.** (1971). Inelastic Behavior of Steel Beam-to-Column Subassemblages, *EERC Report 71-7*, University of California, Berkeley.
- Kukreti A.R. and Biswas P.** (1997). “Finite element analysis to predict the cyclic behavior and failure of end-plate connections” *Computers & Structures*, 65,127-147
- Kukreti A. R., Zhou F.** (2006). Eight-bolt end-plate connection and its influence on frame behaviour. *Engineering Structures*, 28(11), 1483-1493.
- Lutz Nasdala, Birger Hohn, Reinhard Rühl.** (2007). Design of end-plate connections with elastomeric intermediate layer, *Journal of Constructional Steel Research*, 63(4), 494-504.
- Maggi Y.I., Gonçalves R.M., Leon R.T., Ribeiro L.F.L.,** (2005). Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling, *Journal of Constructional Steel Research*, 61(5), 689-708.
- Minas E. Lemonis, Charis J. Gantes.** (2009). Mechanical modeling of the nonlinear response of beam-to-column joints *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), 879-890.
- Mohamadi-shooreh, M. Mofid.** (2008). Parametric analyses on the initial stiffness of flush end-plate splice connections using FEM. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(2008), 1129-1141 doi:10.1016/j.jcsr.2007.09.010
- Moment Connections for Seismic Applications** (2008). Canadian Institute of Steel Construction (CISC), Canada
- Murray, T.M., Sumner E.A.** (2003). AISC Steel Design Guide-4. Extended End-Plate Moment Connections. Seismic and Wind Applications. *American Institute of Steel Construction, Inc.* Chicago, IL.
- Murray, T.M.** (1988). Recent Developments for the Design of Moment End-Plate Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 10(1988),133-162
- Murray, T.M. ve Shoemaker, W.L.** (2002). Steel Design Guide-16, Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL.

- Nematia N., Houedecb D. Le, Zandonini R.** (2000). Numerical modelling of the cyclic behaviour of the basic components of steel end plate connections. *Advances in Engineering Software*, 31 (2000) 837-849.
- Pachoumis, E.G. Galoussis, C.N. Kalfas, A.D. Christitsas** (2009). Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: *Experimental analysis and FEM simulation Engineering Structures*, 31(1), 216-223.
- P. Nogueiro, L. Simões da Silva, R. Bento ve R. Simões,** (2006). Experimental behavior of standardized European end-plate beam-to-column steel joints under arbitrary cyclic loading, , *Stability and Ductility of Steel Structures*, Lisbon, Portugal.
- Özer E.,** (2007). “Kapasite tasarımı ilkesi ve Türk Deprem Yönetmeliği” Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul
- SAC Joint Venture (1997).** Protocol for fabrication, inspection, testing and documentation of beam-column connection tests and other experimental specimens Rep. No. SAC/BD-97/02, Appendix E. Sacramento, California.
- Shi G., Shi Y., Wang Y.** (2007). Behaviour of end-plate moment connections under earthquake loading, *Engineering Structures*, 29(5), 703-716
- Shi Y., Shi G., Wang Y.** (2007). Experimental and theoretical analysis of the moment-rotation behaviour of stiffened extended end-plate connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 63(9), 1279-1293.
- Shi G., Shi Y., Wang Y., Bradford M.** (2008). Numerical Simulation of Steel Pretensioned bolted End-plate Connections of Different Types and Details”, *Engineering Structures*, 30(10), 2677-2686.
- Silva L.S, Coelho A.G.** (2001). A ductility model for steel connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 57(2001), 45–70.
- Sumner, E. A., ve Murray, T. M.** (2001). Experimental Investigation of the MRE 1/2 End-Plate Moment Connection, Research Report No. CE/VPI-ST-01/14, submitted to Metal Building Manufacturers Association, Cleveland, Ohio, December 2001, 91 pages.
- Sumner, E. A., ve Murray, T. M.** (2001). Experimental Investigation of Four Bolts Wide Extended End-Plate Moment Connections. Research Report No. CE/VPI-ST- 01/15, submitted to Star Building Systems, Inc., Oklahoma City, Oklahoma, December 2001, 114 pages.
- Sumner, E.A.,** (2003). *Unified Design of Extended End-Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading.* (doktora tezi), Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. Adres: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-06192003-172135/unrestricted/etd_Sumner.pdf
- Sumner, E.A., Mays, T. W., ve Murray, T. M.** (2000). Cyclic Testing of Bolted Moment End-Plate Connections, Research Report No. CE/VPI-ST-00/03, SAC Report No. SAC/BD-00/21, submitted to the SAC Joint Venture, May 2000, 327 pages.

- Uniform Building Code (UBC)** (1997). International Conference of Building Officials, California
- Yorgun C.** (2001). Evaluation of Innovative Extended End-Plate Moment Connections under Cyclic Loading. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 26, 483-492.
- Zandonini R., Bursi O.S.** (2002). Monotonic and hysteretic behavior Of bolted endplate beam-to-column joints. *Advances in Steel Structures*

EKLER

EK A: Data logger kanal planları

EK B: Malzeme çekme testi sonuçları

EK C: Deneysel çalışmada uygulanan yükleme protokolü adımları

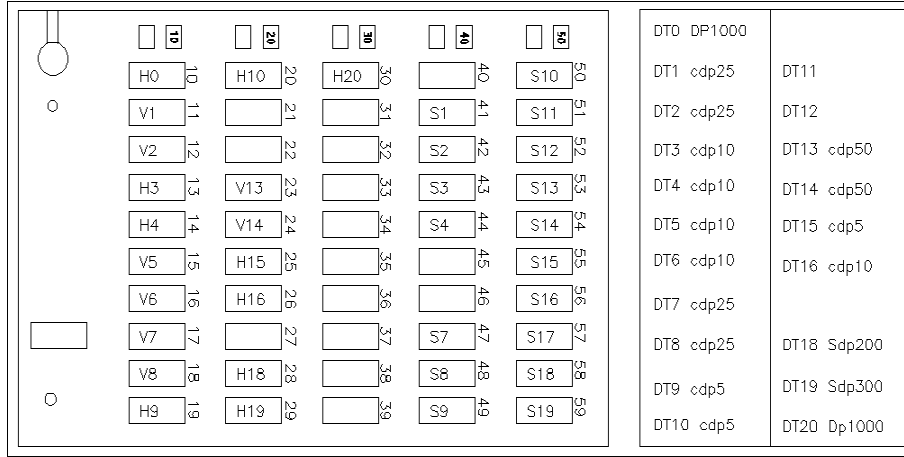
EK D: Deney resimleri

EK E: Deney grafikleri

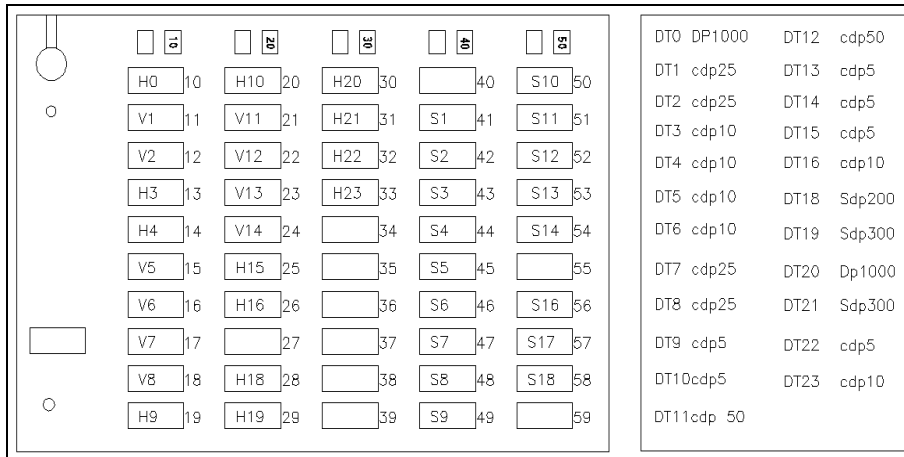
EK F: Numunelerin AISC tasarım rehberi 4'e göre hesabı

EK G: Deney düzeneği 3D görseller

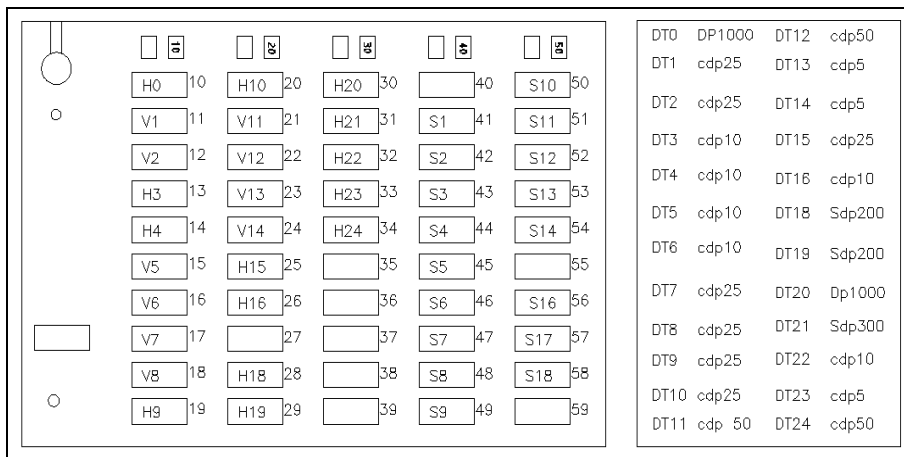
EK A : Data logger kanal planları



(P1) (a)

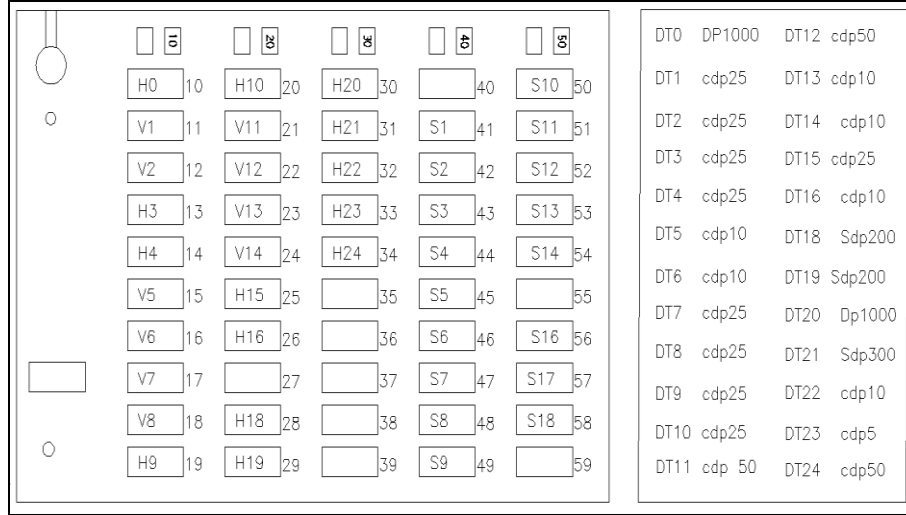


(P2) (b)

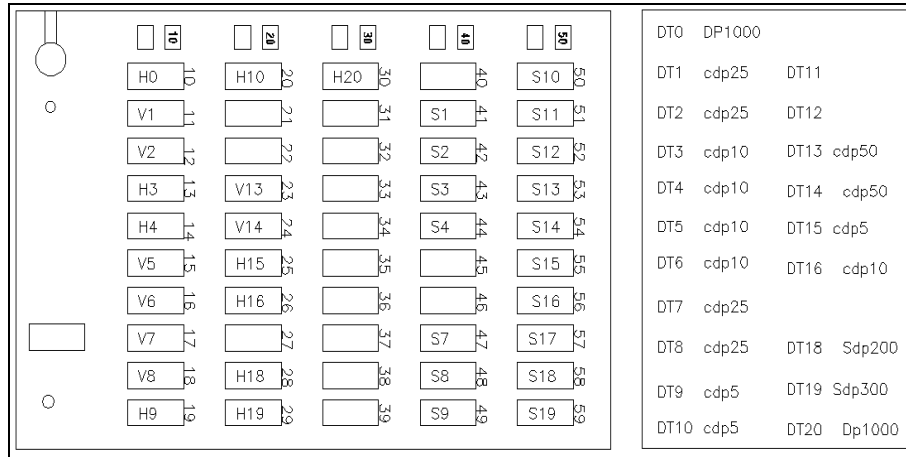


(P3) (c)

Şekil A.1 : Data logger kanal planları.



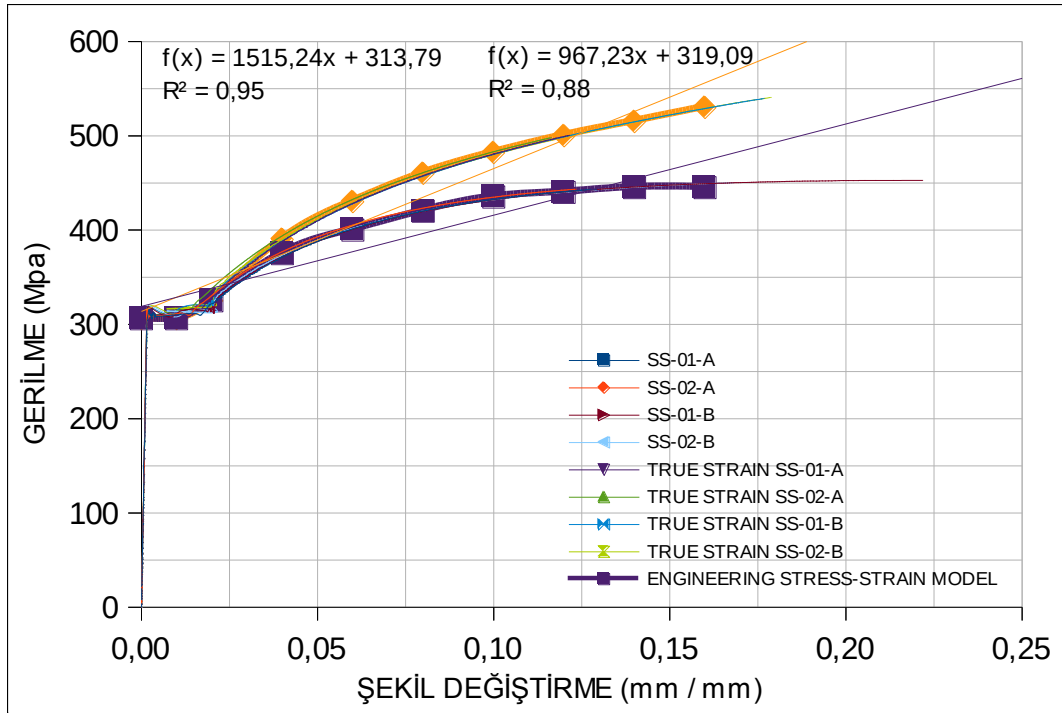
P4 (d)



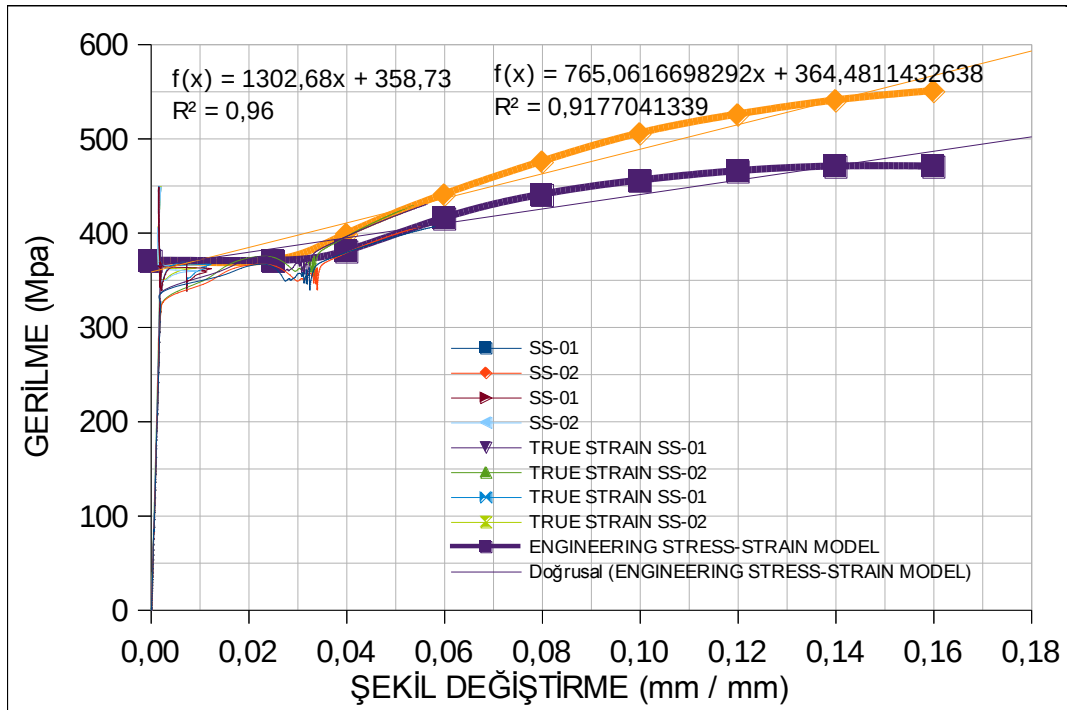
P0 (e)

Şekil A.2 : Data logger kanal planları.

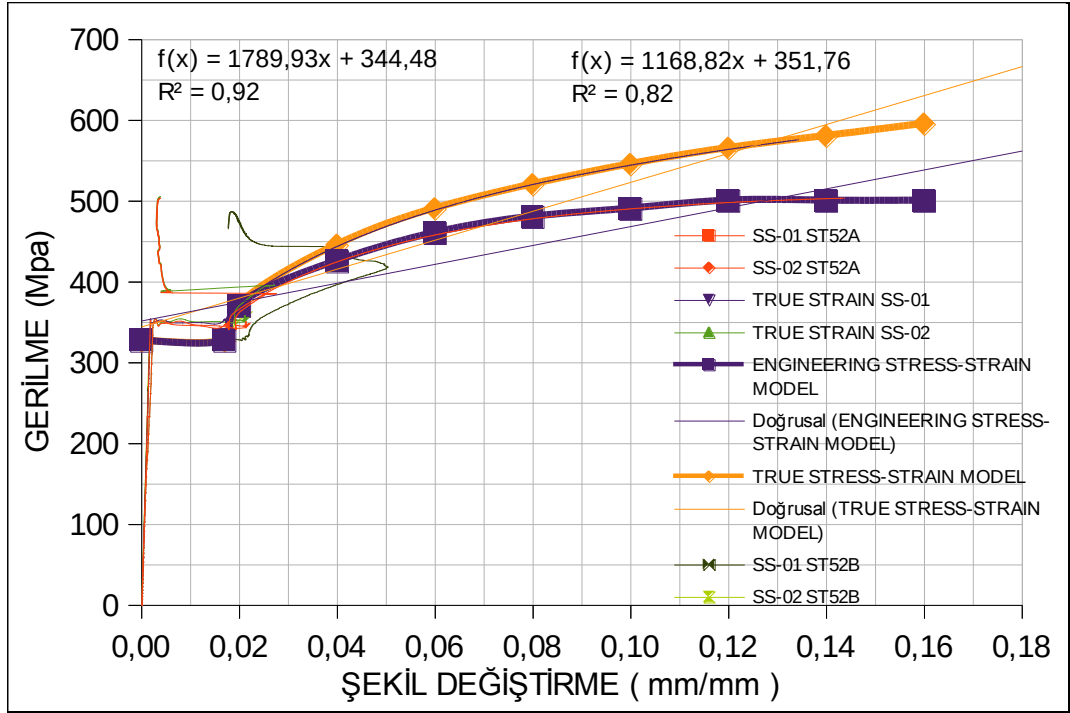
EK B : Malzeme çekme testi sonuçları



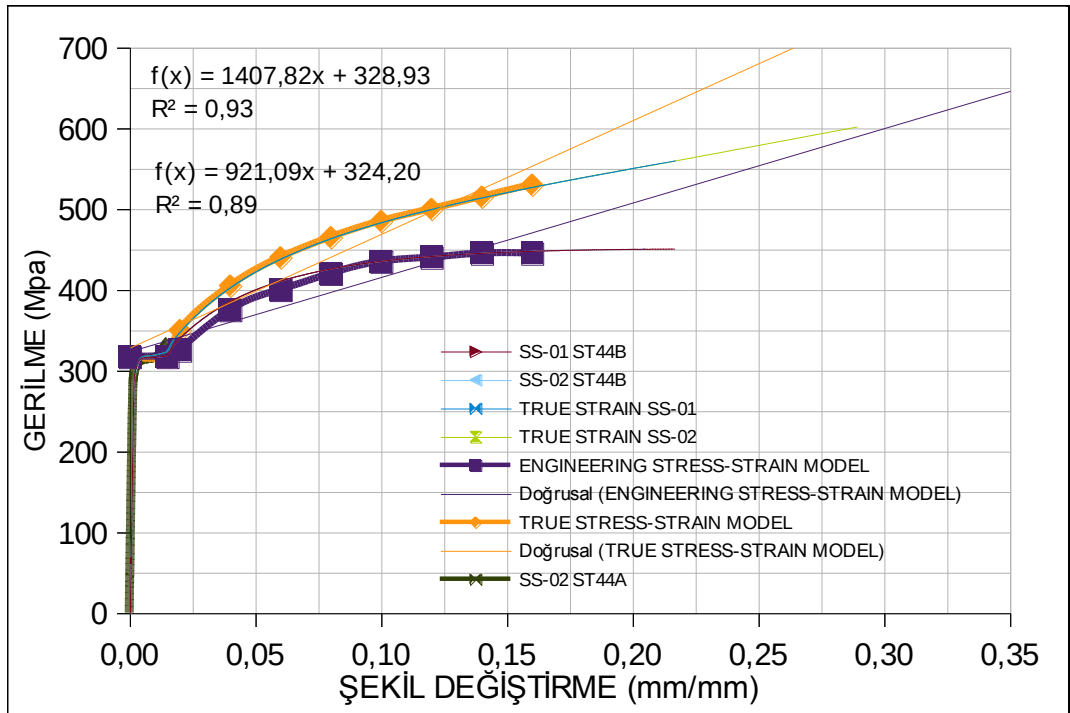
Şekil B.1: HEB180-P4 profili malzeme test sonuçları.



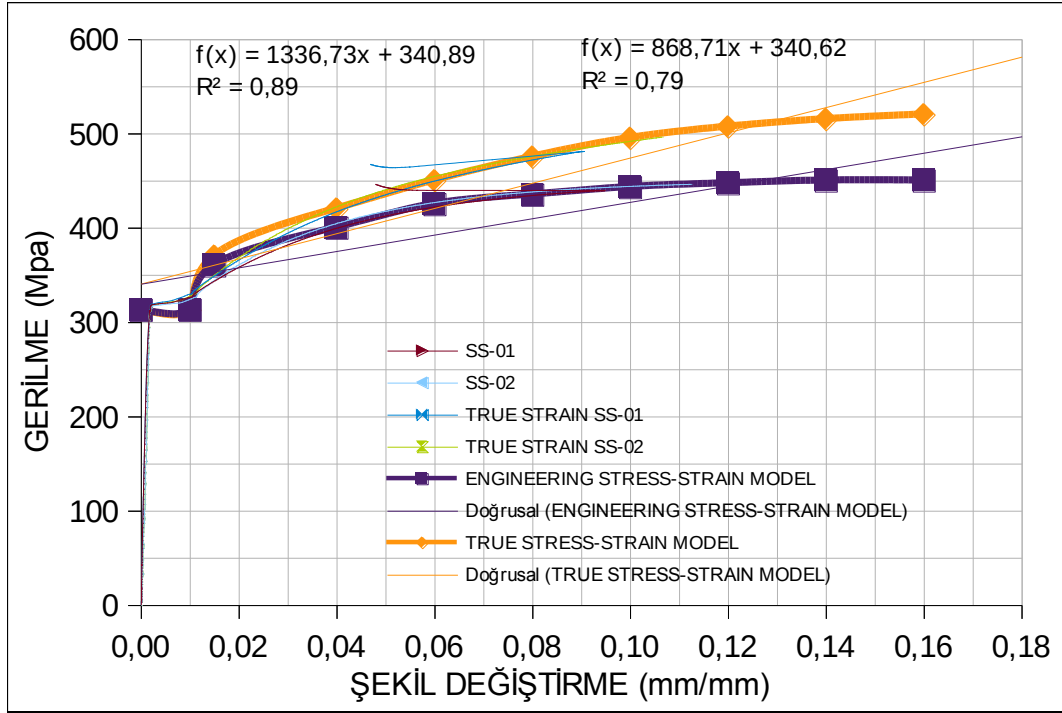
Şekil B.2: IPE270-P1,P2,P0 profili malzeme test sonuçları.



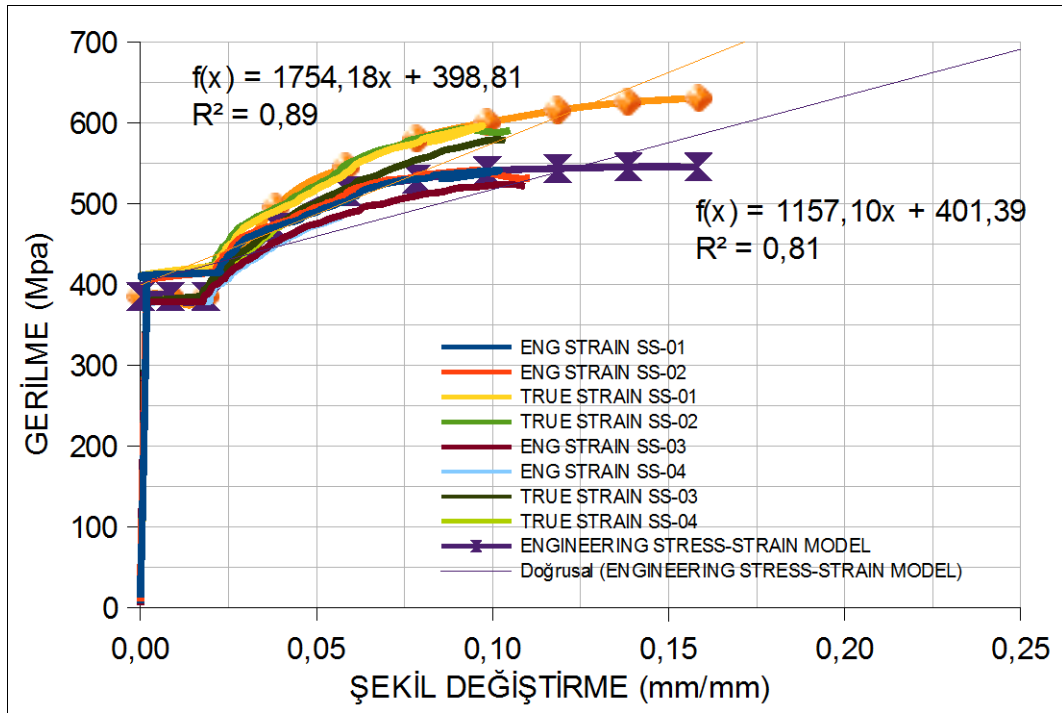
Şekil B.3: IPE270-P3 profili malzeme test sonuçları.



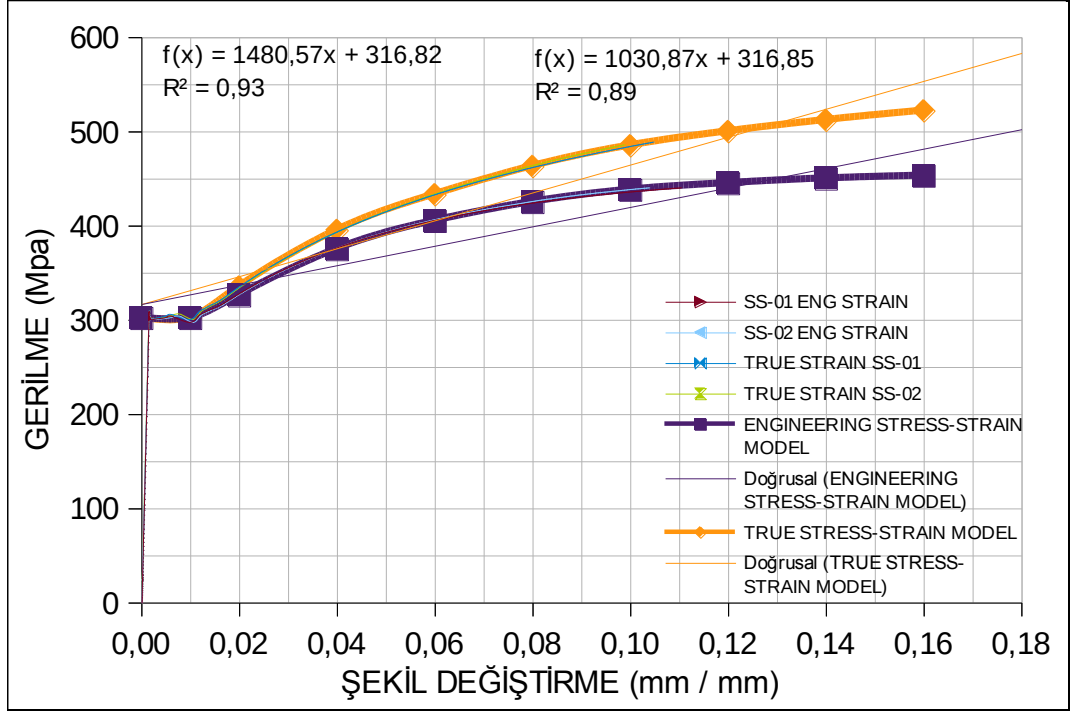
Şekil B.4: Levha 8 mm malzeme test sonuçları.



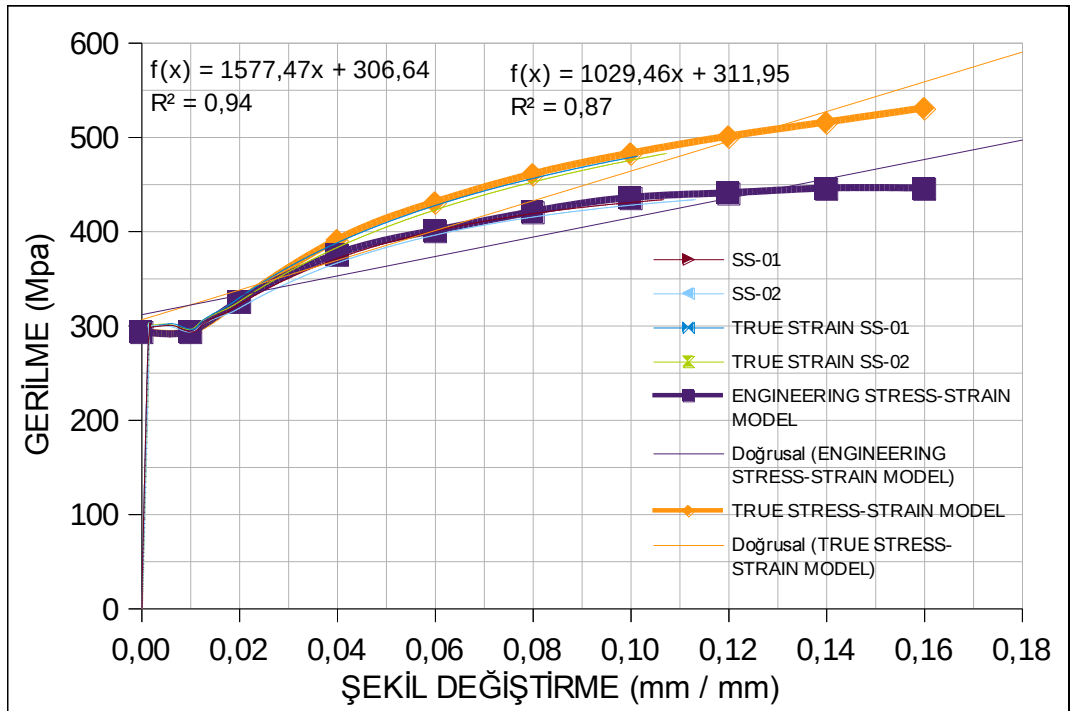
Şekil B.5: Levha 20 mm malzeme test sonuçları.



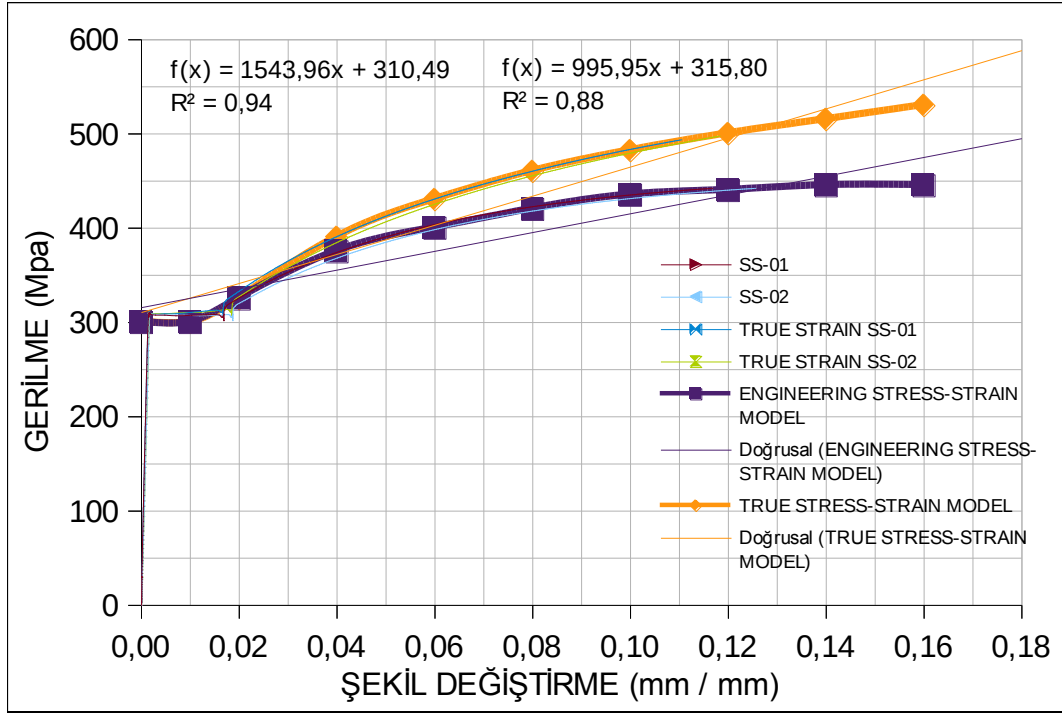
Şekil B.6: Levha 35 mm malzeme test sonuçları.



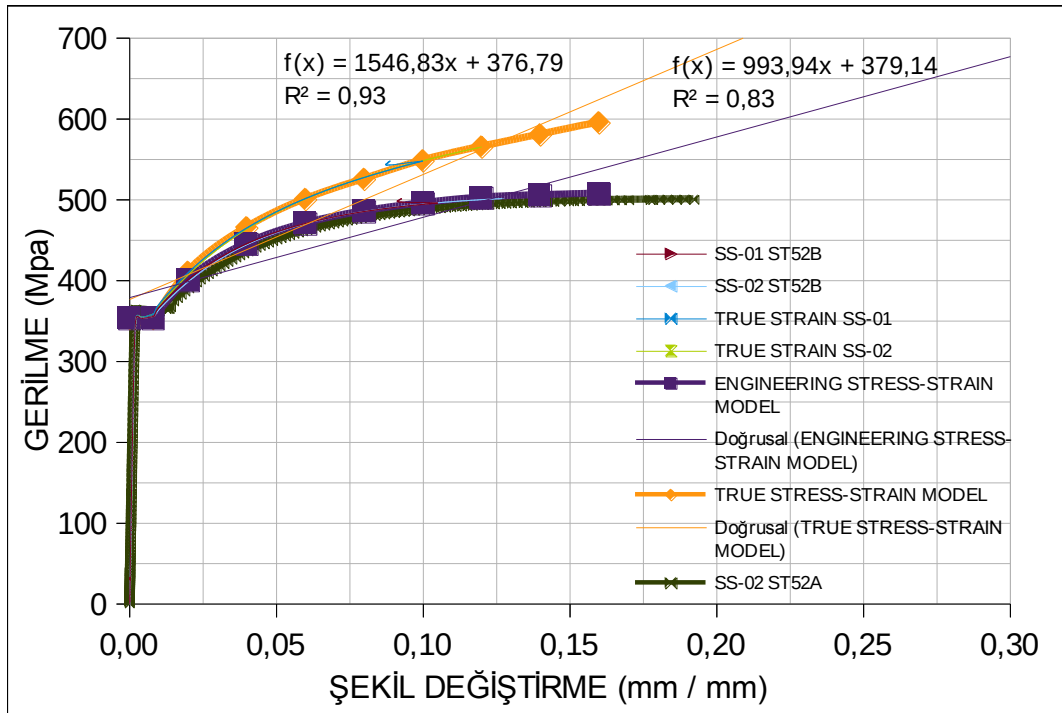
Şekil B.7: P1 (S275) mm malzeme test sonuçları.



Şekil B.8: P2 (S275) mm malzeme test sonuçları.



Şekil B.9: P3 (S275) mm malzeme test sonuçları.



Şekil B.10: P4 (S275) mm malzeme test sonuçları

EK C : Deneysel çalışmada uygulanan yükleme protokolü adımları

KONSOL BOYU (MM)	1905																	
ADIM SAYISI	20																	
YÜK ADIMI	KATLAR ARASI ÖTELENME AÇISI (RADYAN)	ÇEVİRİM SAYISI	KONSOL BOYU (MM)	TEPE YERDEĞİŞTİRME (MM)	ORT. DEPLAS. ADIMI	YÜKLEME HIZI	1P	1N	2P	2N	3P	3N	4P	4N	5P	5N	6P	6N
1	0.00375	6	1905	7.14	0.357	0.400	31.917	31.882	32.007	31.935	31.668	31.863	31.657	31.868	31.67	31.745	31.58	31.88
2	0.00500	6	1905	9.53	0.476	0.500	42.6	42.563	42.597	42.375	42.81	42.307	42.788	42.205	42.785	42.158	42.935	42.15
3	0.00750	6	1905	14.29	0.714	0.500	63.533	63.888	64.507	63.87	64.357	63.753	64.387	63.877	64.385	63.743	64.277	63.882
4	0.01000	4	1905	19.05	0.953	0.500	80.97	84.44	83.363	84.32	83.573	84.28	83.637	84.63				
5	0.015	2	1905	28.58	1.429	0.500	96.975	97.593	96.585	100.52								
6	0.020	2	1905	40.40	2.020	1.000	104.17	106.352	105.55	111.54								
7	0.030	2	1905	57.15	2.858	2.000	108.747	~~115.233~~	~~112.27~~	117.45	114.737	119.01						
8	0.040	2	1905	76.20	3.810	3.000	118.29	124.42	121.735	128.7								
9	0.050	2	1905	95.25	4.763	4.000	117.86	128.788	114	122.907								
10	0.060	2	1905	114.30	5.715	5.000	120.54	98.342	85.5	76.27								

Şekil C.1: Numune P2 yükleme adımları.

KONSOL BOYU (MM)	1895																	
STEP NUMBER	25																	
LOAD STEP	KATLAR ARASI SÜRÜKLENME AÇISI (RADYAN)	ÇEVİRİM SAYISI	KONSOL BOYU (MM)	TEPE DEPLASMANI (MM)	ORTALAMA DEPLASMAN ADIMI	YÜKLEME HIZI	1P	1N	2P	2N	3P	3N	4P	4N	5P	5N	6P	6N
1	0.00375	6	1895	7.11	0.284	0.400	32.542	32.577	32.842	32.592	32.84	32.65	32.792	32.66	32.66	32.743	32.99	32.73
2	0.00500	6	1895	9.48	0.379	0.500	44.175	43.055	43.993	43.165	44.037	43.12	44.022	43.163	43.912	43.165	43.97	43.26
3	0.00750	6	1895	14.21	0.569	0.600	63.445	65.835	63.687	65.868	63.632	-65.927 den sonra 66.105	63.495	65.943	63.68	65.912	63.66	66.02
4	0.01000	4	1895	18.95	0.758	0.700	79.698	84.79	81.628	85.207	81.745	85.25	81.813	85.275				
5	0.015	2	1895	28.43	1.137	0.800	95.298	101.09	95.628	102.475								
6	0.020	2	1895	37.90	1.516	1.000	101.975	108.235	102.822	109.91								
7	0.030	2	1895	56.85	2.274	1.500	110.868	118.215	114.925	122.46								
8	0.040	2	1895	75.80	3.032	2.000	117.25	129.283	118.275	129.595								
9	0.050	2	1895	94.75	3.790	2.500	109.837	121.767	130.823	110.415								
10	0.060	2	1895	113.70	4.548	3.000	98.605	108.577	94.54	104.338								
11	0.070	2	1895	132.65	5.306	4.000	90.46	100.87	84.653									

Şekil C.2: Numune P3 yükleme adımları.

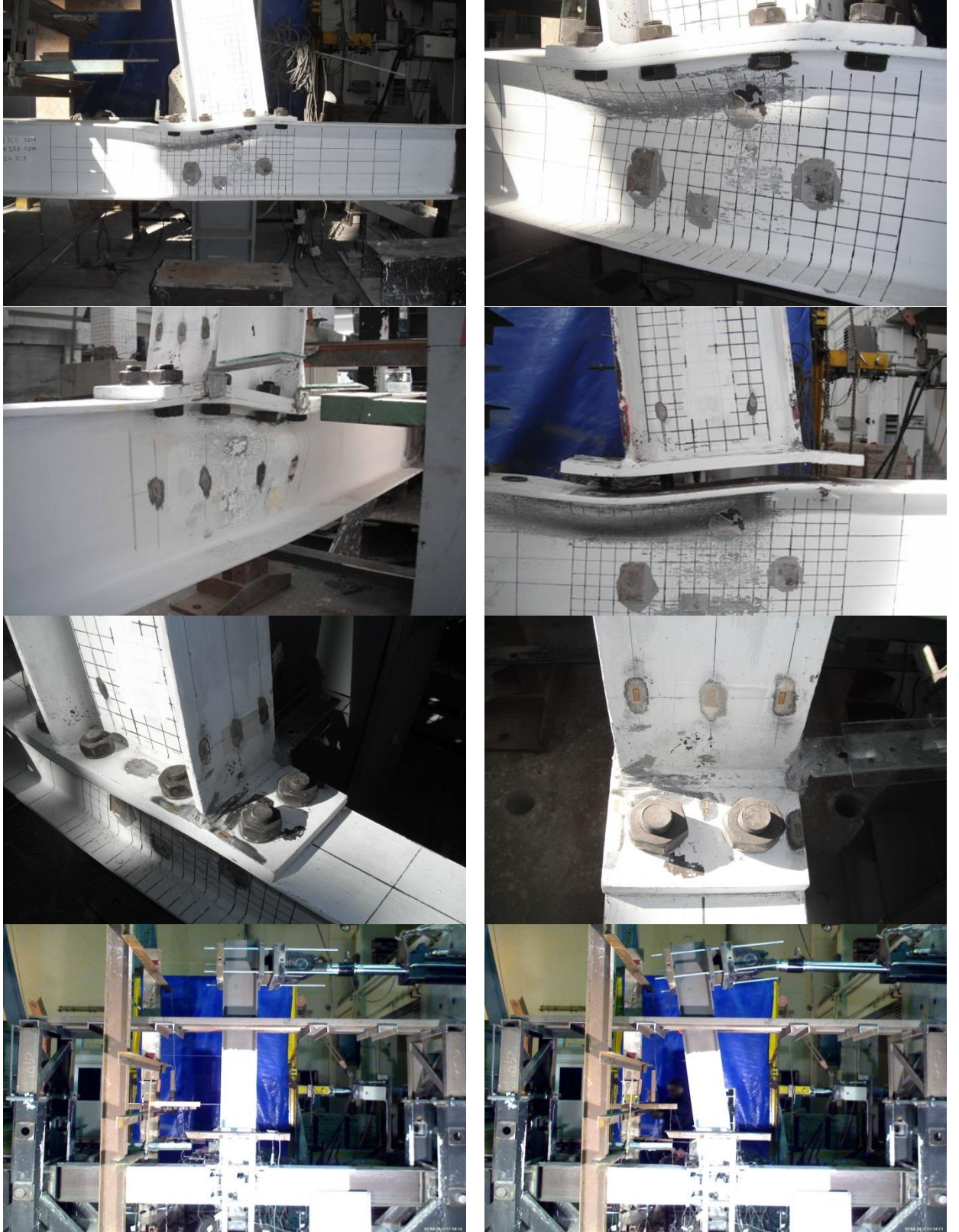
KONSOL BOYU (MM)	1878																	
ADIM SAYISI	25																	
YÜKLEME ADIMI	KATLAR ARASI SÜRÜKLENME AÇISI (RADYAN)	ÇEVİRİM SAYISI	KONSOL BOYU (MM)	TEPE DEPLASMANI (MM)	ORTALAMA DEPLASMAN ADIMI	YÜKLEME HIZI	1P	1N	2P	2N	3P	3N	4P	4N	5P	5N	6P	6N
1	0.00375	6	1878	7.04	0.282	0.400	25.07	26.06	25.03	25.897	25.3	26.13	25.615	25.99	25.587	25.965	25.64	26.05
2	0.00500	6	1878	9.44	0.378	0.500	34.445	34.548	34.603	34.507	34.697	34.465	34.557	34.497	34.645	34.41	34.737	34.44
3	0.00750	6	1878	14.35	0.574	0.600	49.138	50.115	49.248	49.351	50.05	49.765	49.935	49.7	50.108	49.513	49.99	49.67
4	0.01000	4	1878	18.86	0.754	0.700	64.202	65.263	64.47	65.235	64.603	65.21	64.947	65.24				
5	0.015	2	1878	28.17	1.127	1.000	88.66	92.573	87.9	92.625								
6	0.020	2	1878	37.56	1.502	1.500	93.478	98.558	96.007	99.9								
7	0.030	2	1878	56.34	2.254	2.000	100	108.665	105.938	109.462								
8	0.040	2	1878	75.12	3.005	2.750	108.448	117.27	112.83	118.35								
9	0.050	2	1878	93.90	3.756	3.500	115.04	126.15	120.11	124.445								
10	0.060	2	1878	112.68	4.507	4.250	121.683	131.272	123.76	131.772								
11	0.070	2	1878	131.46	5.258	5.000	122.503	134.662	124.3	133.41								
12	0.080	2	1878	150.24	6.010	5.750	125.842											

Şekil C.3: Numune P4 yükleme adımları.

EK D : Deney resimleri



Şekil D.1: P0 pilot numune resimleri.



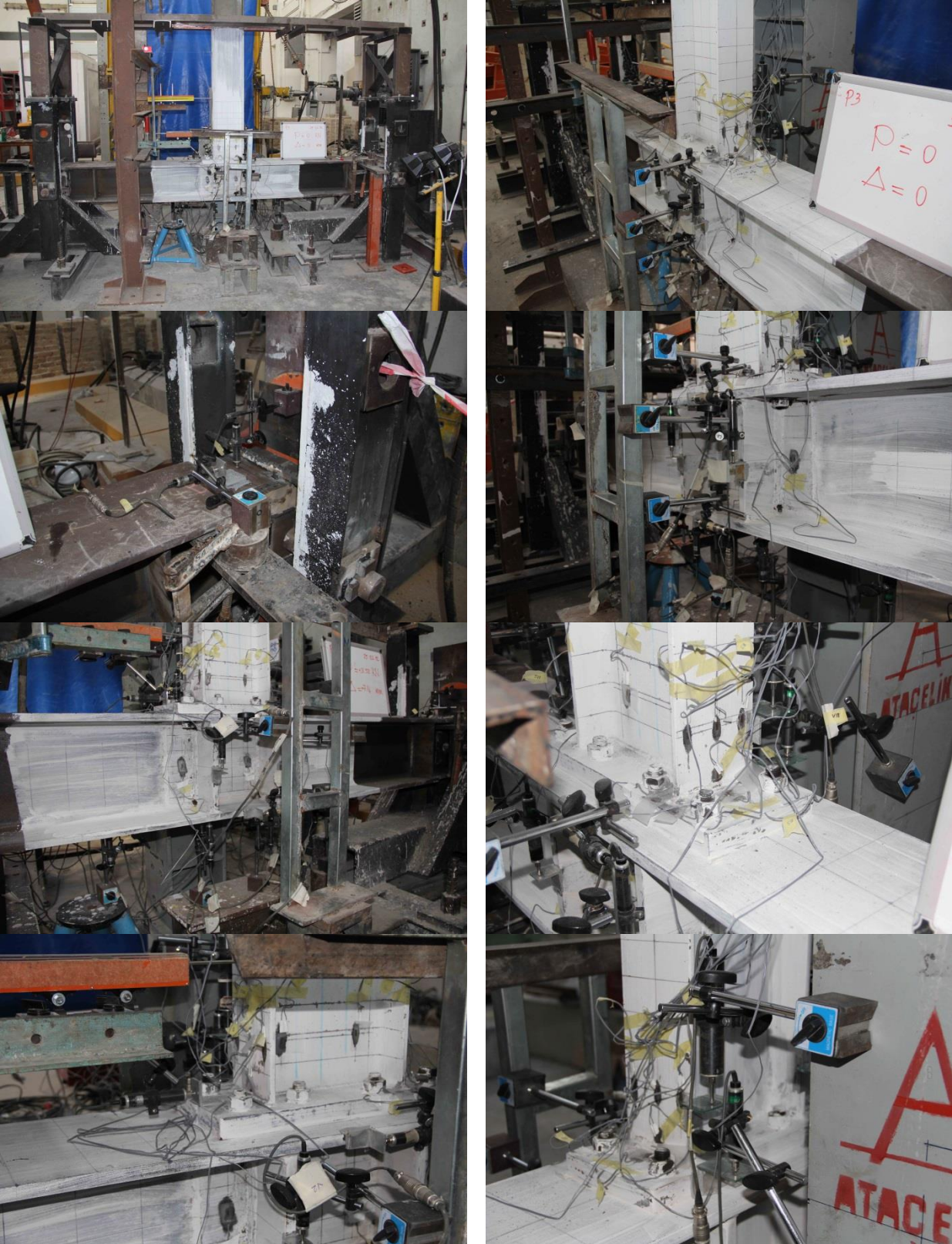
Şekil D.2: P0 pilot numune resimleri.



Şekil D.3: P1 numune resimleri.



Şekil D.4: P1 numune resimleri.



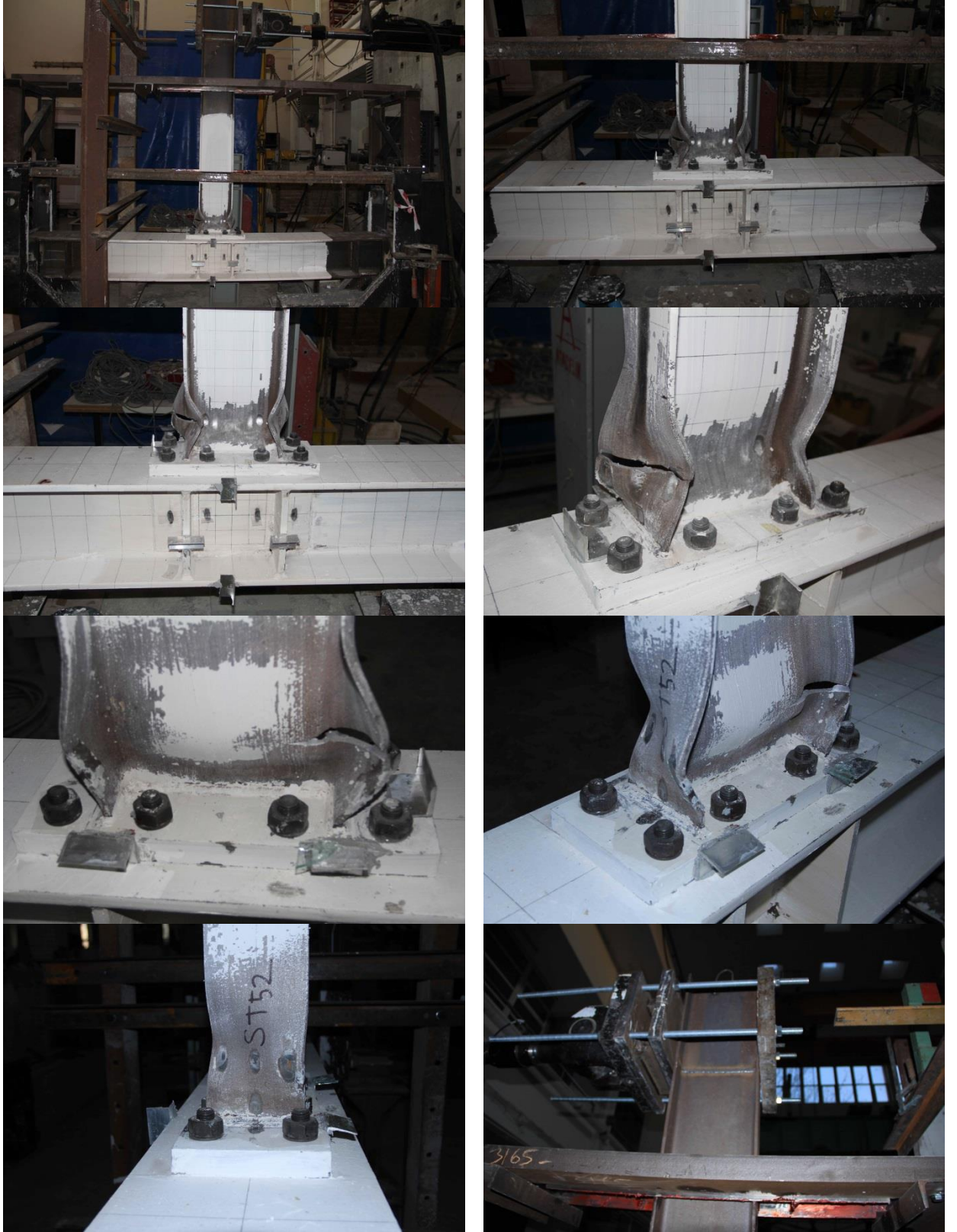
Şekil D.5: P2 numune resimleri.



Şekil D.6: P2 numune resimleri.



Şekil D.7: P3 numune resimleri.



Şekil D.8: P3 numune resimleri.

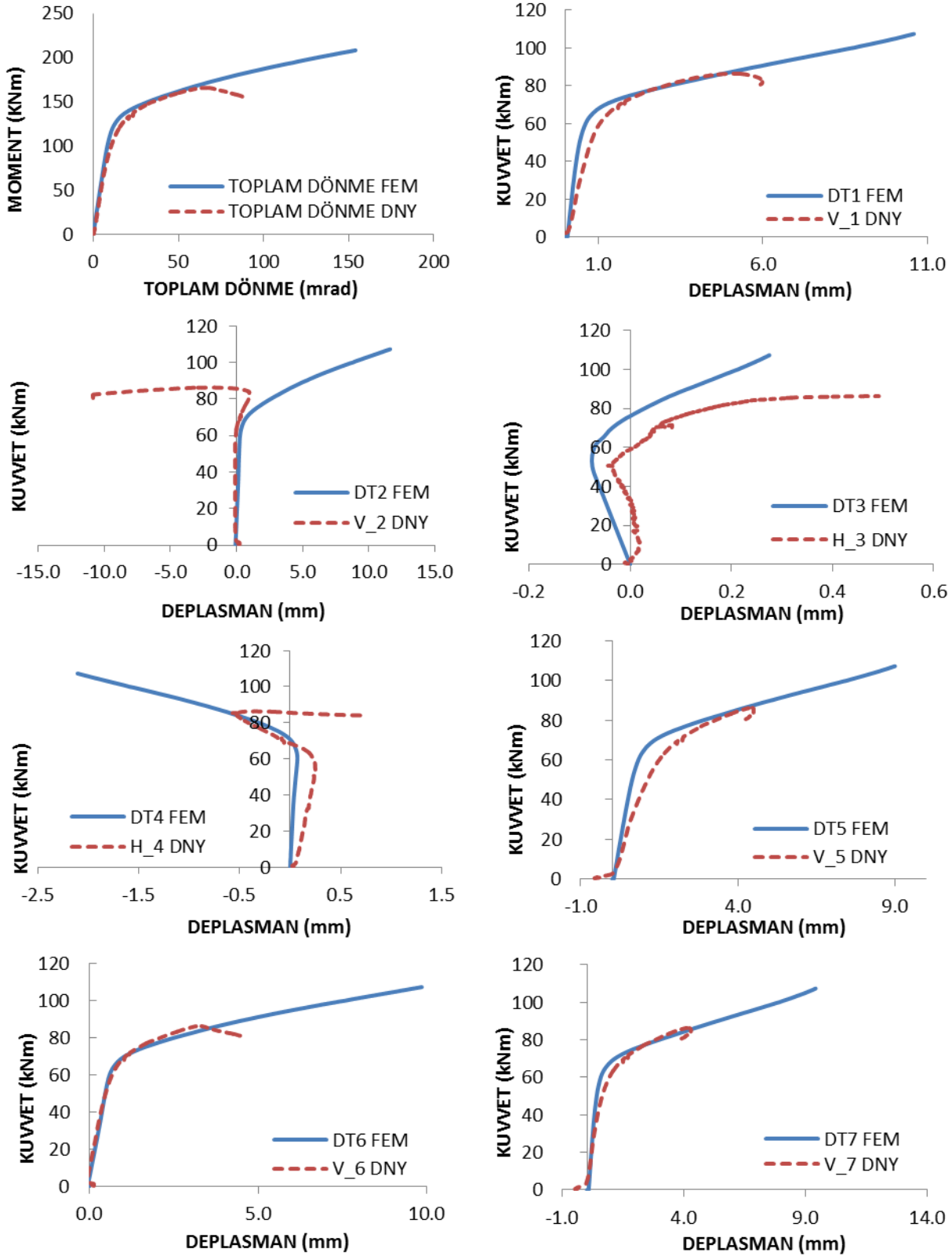


Şekil D.9: P4 numune resimleri.

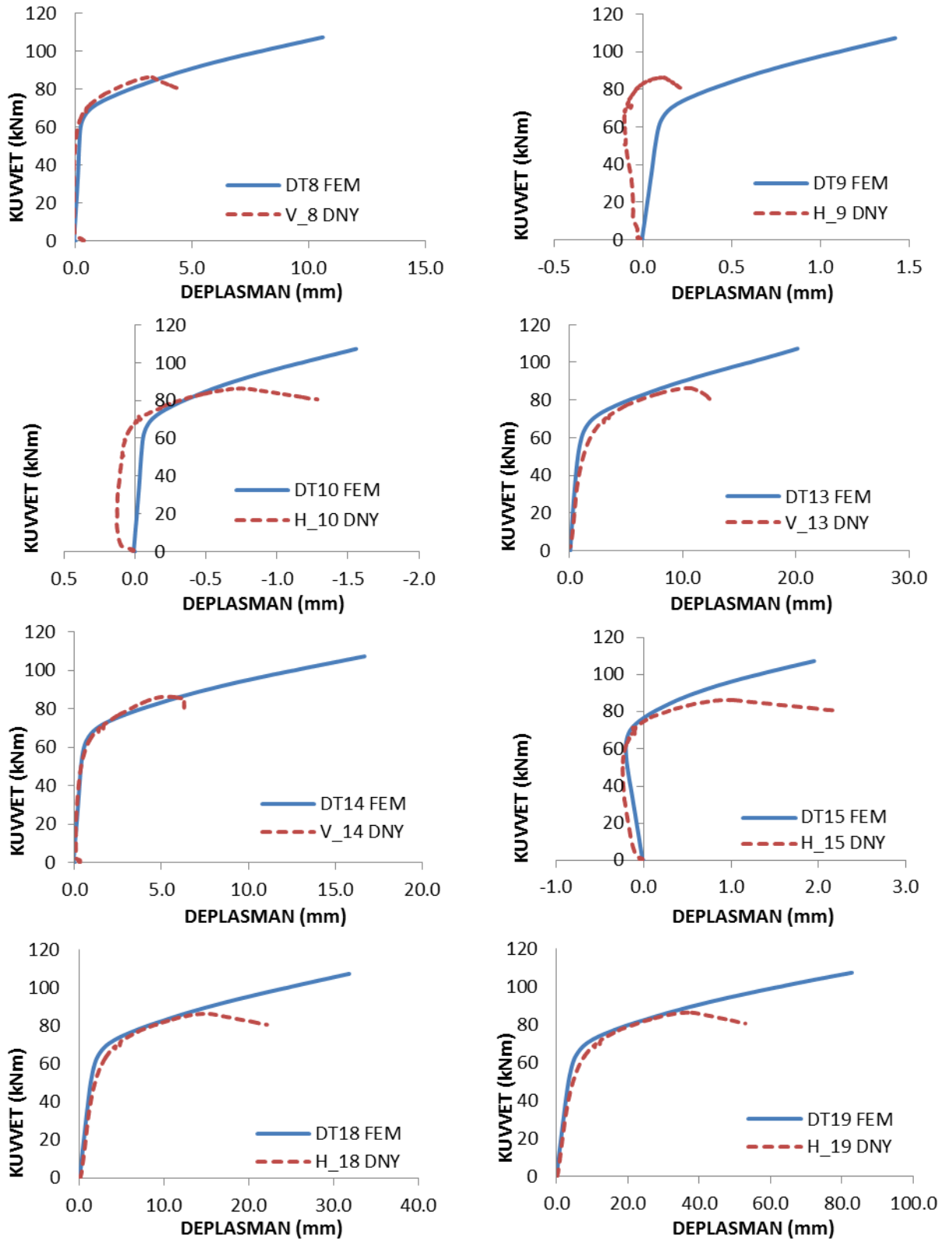


Şekil D.10: P4 numune resimleri.

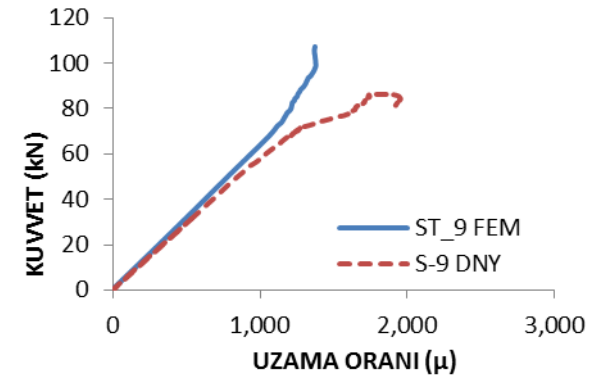
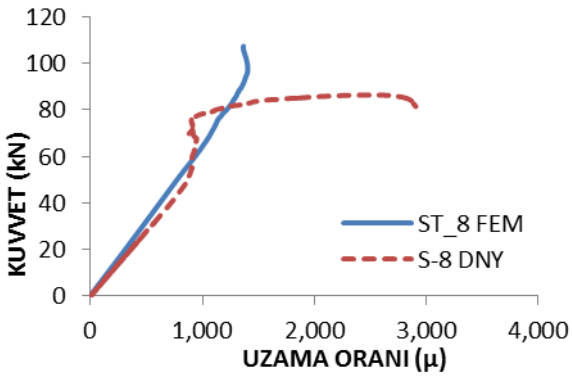
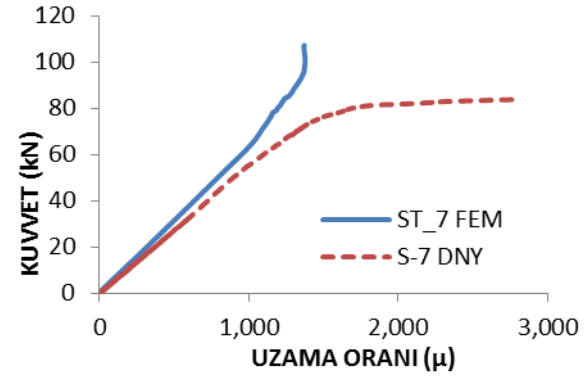
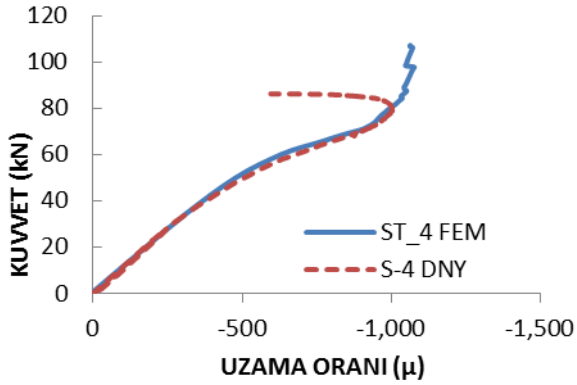
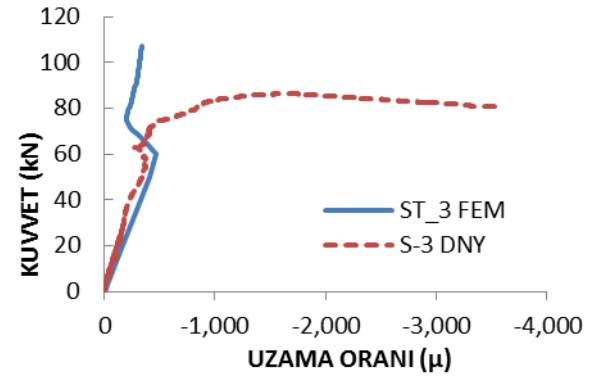
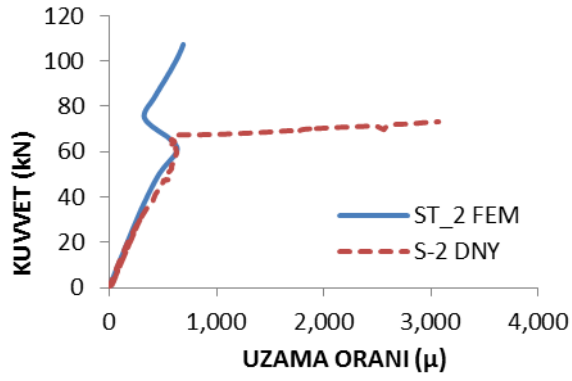
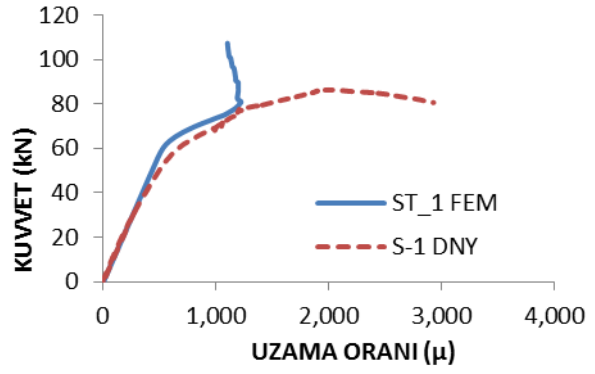
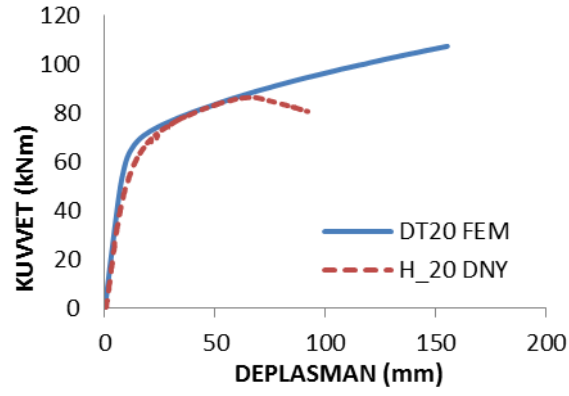
EK E : Deney grafikleri



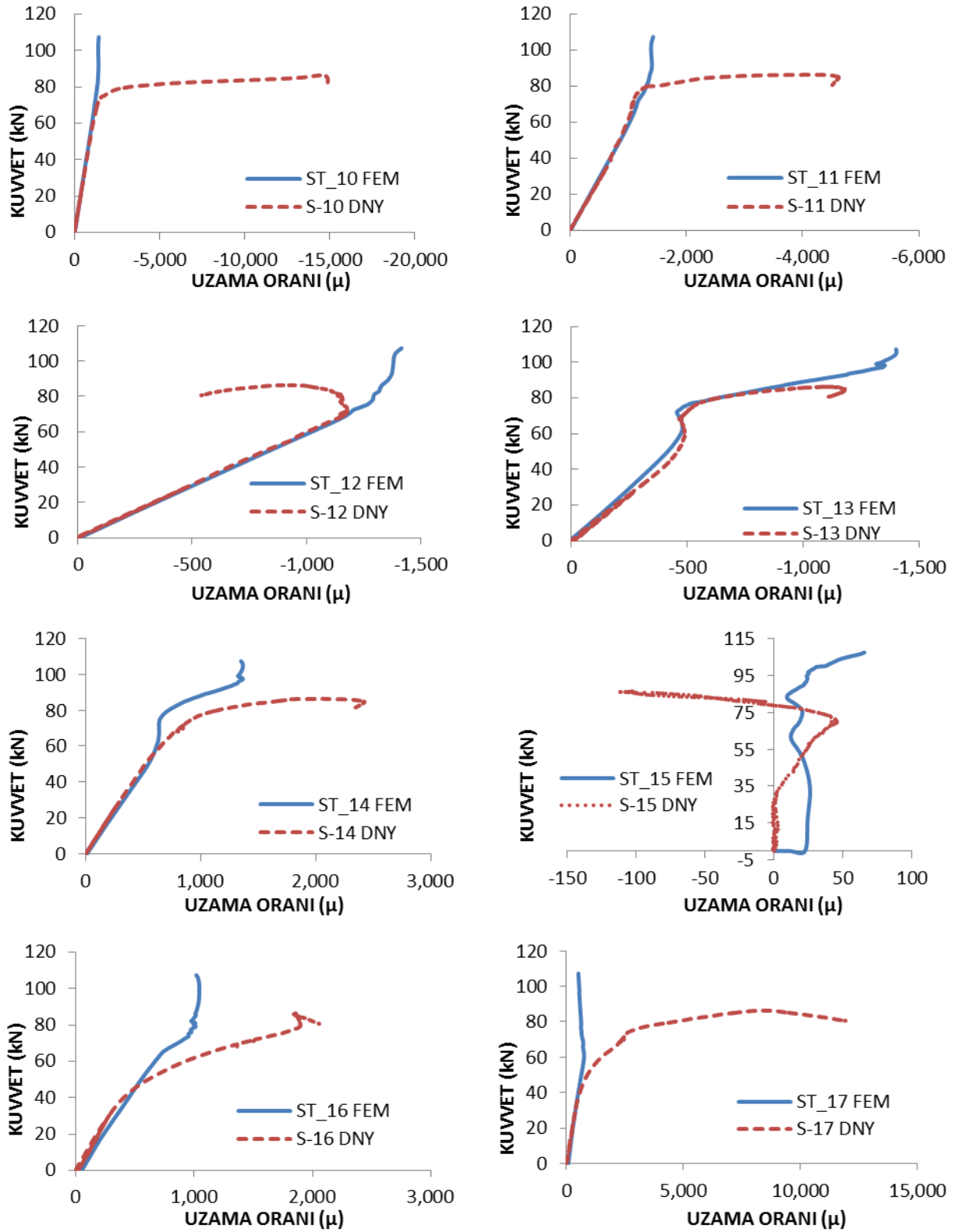
Şekil E.1: P0 Pilot numune grafikleri.



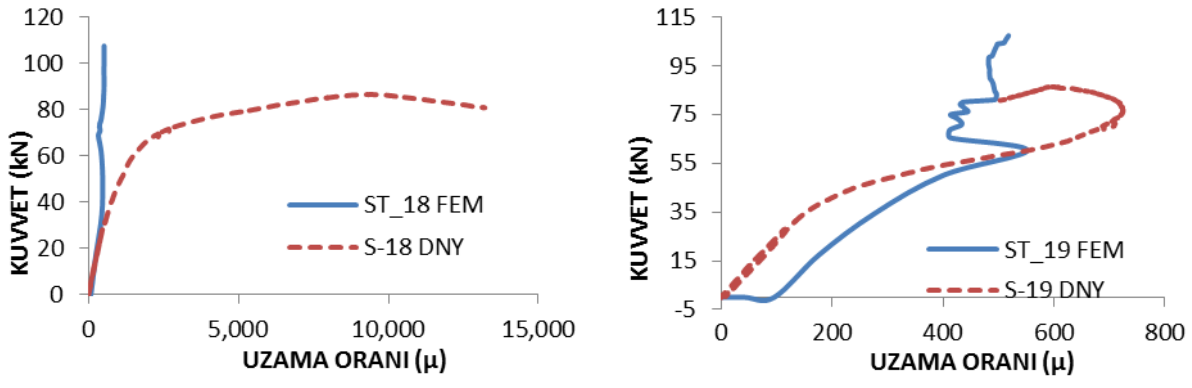
Şekil E.2: P0 Pilot numune grafikleri.



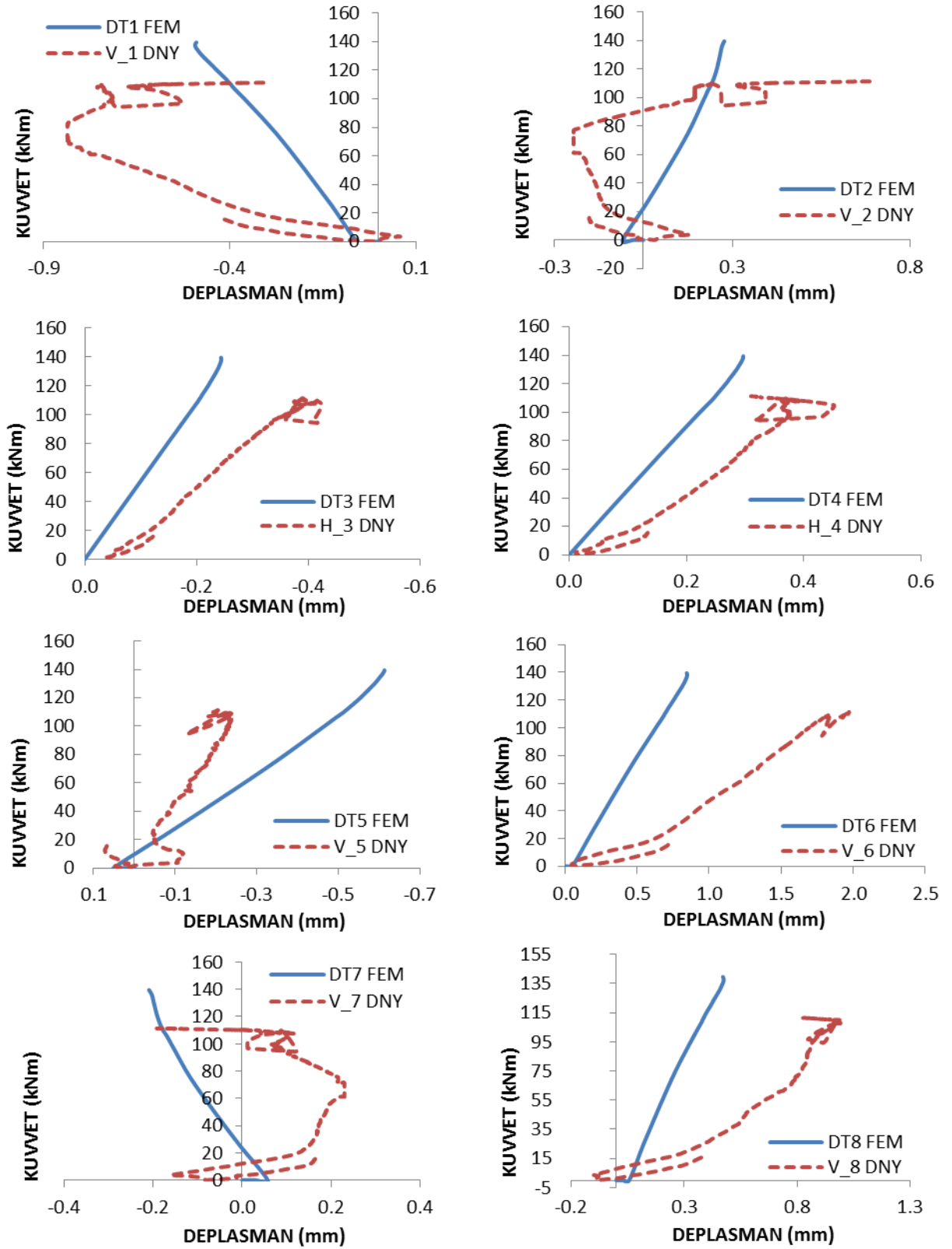
Şekil E.3: P0 Pilot numune grafikleri.



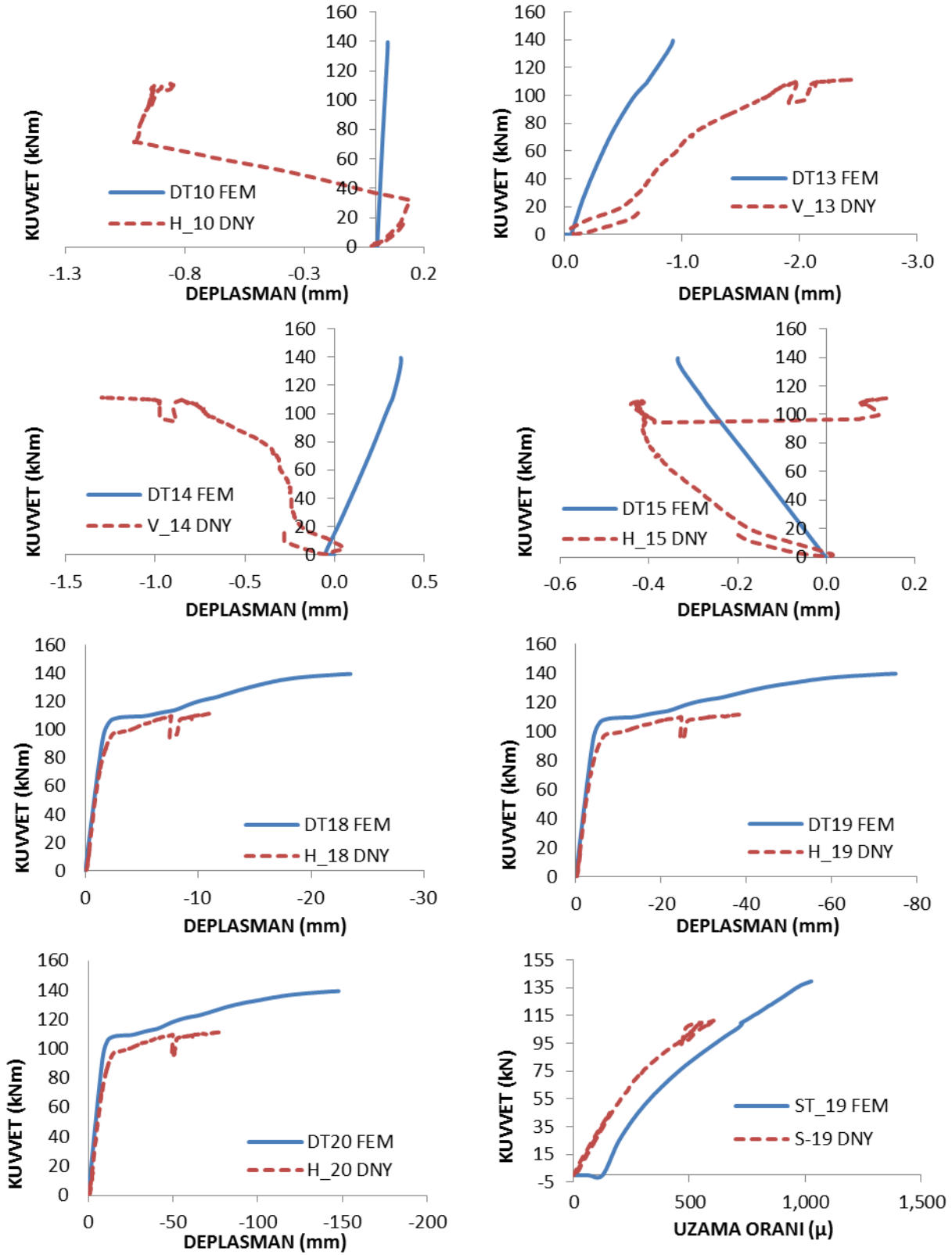
Şekil E.4: P0 Pilot numune grafikleri.



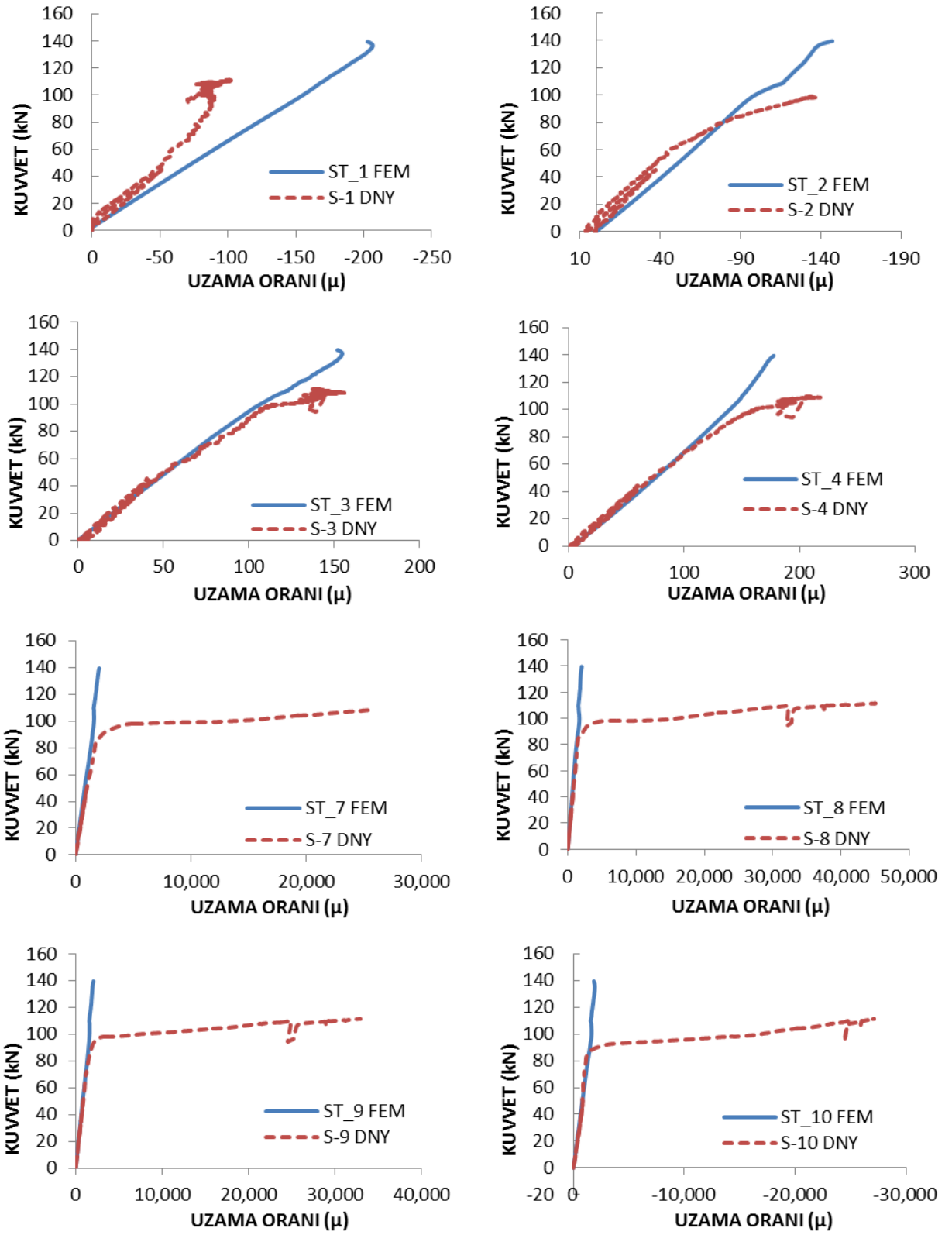
Şekil E.5: P0 Pilot numune grafikleri.



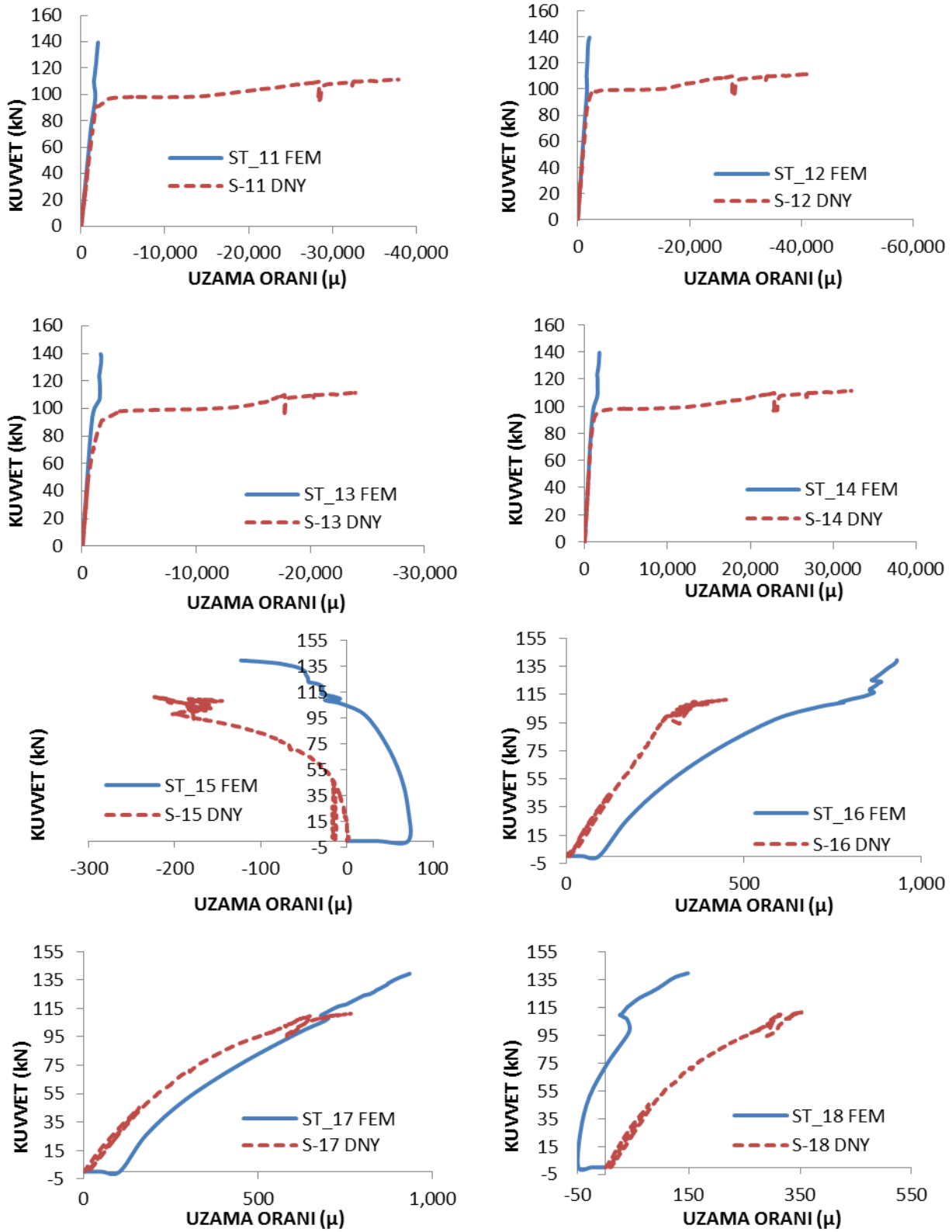
Şekil E.6: P1 numune grafikleri.



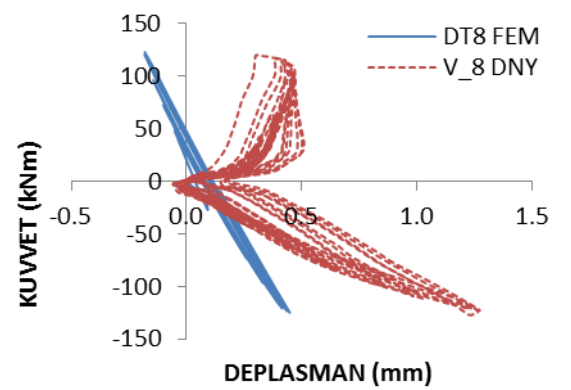
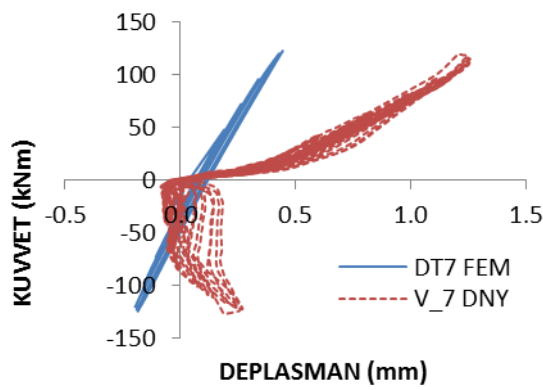
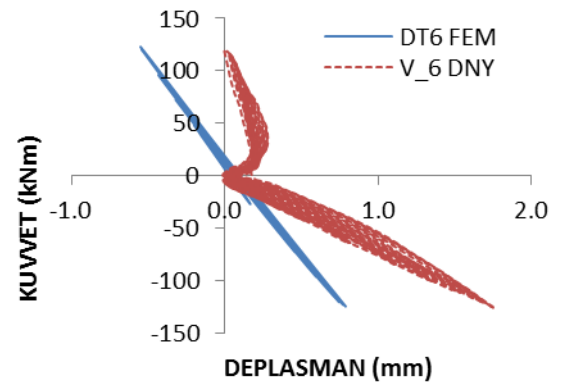
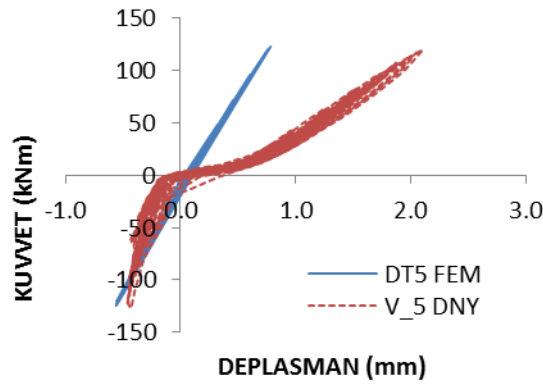
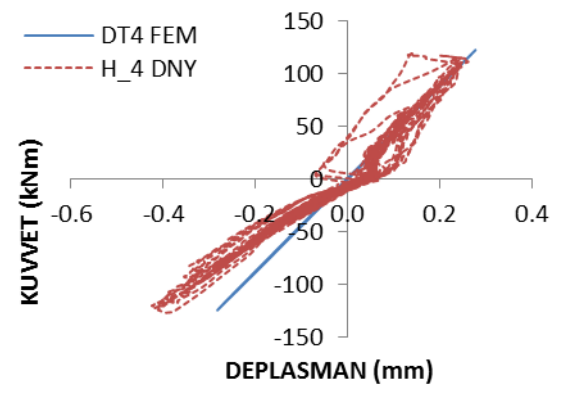
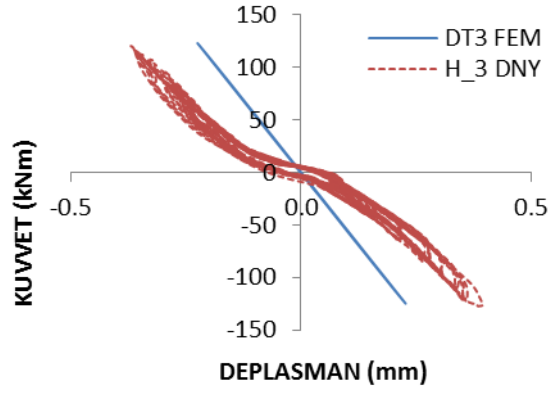
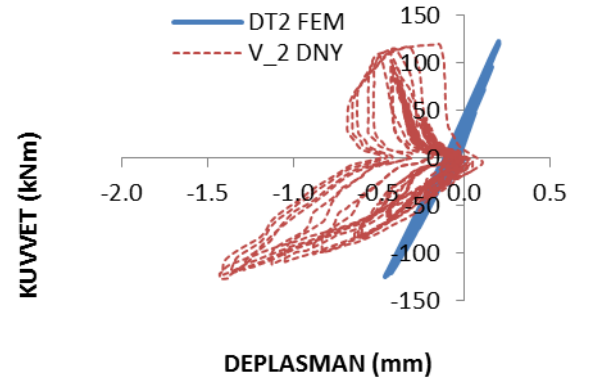
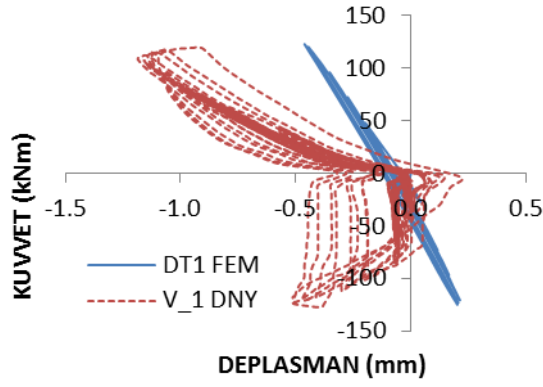
Şekil E.7: P1 numune grafikleri.



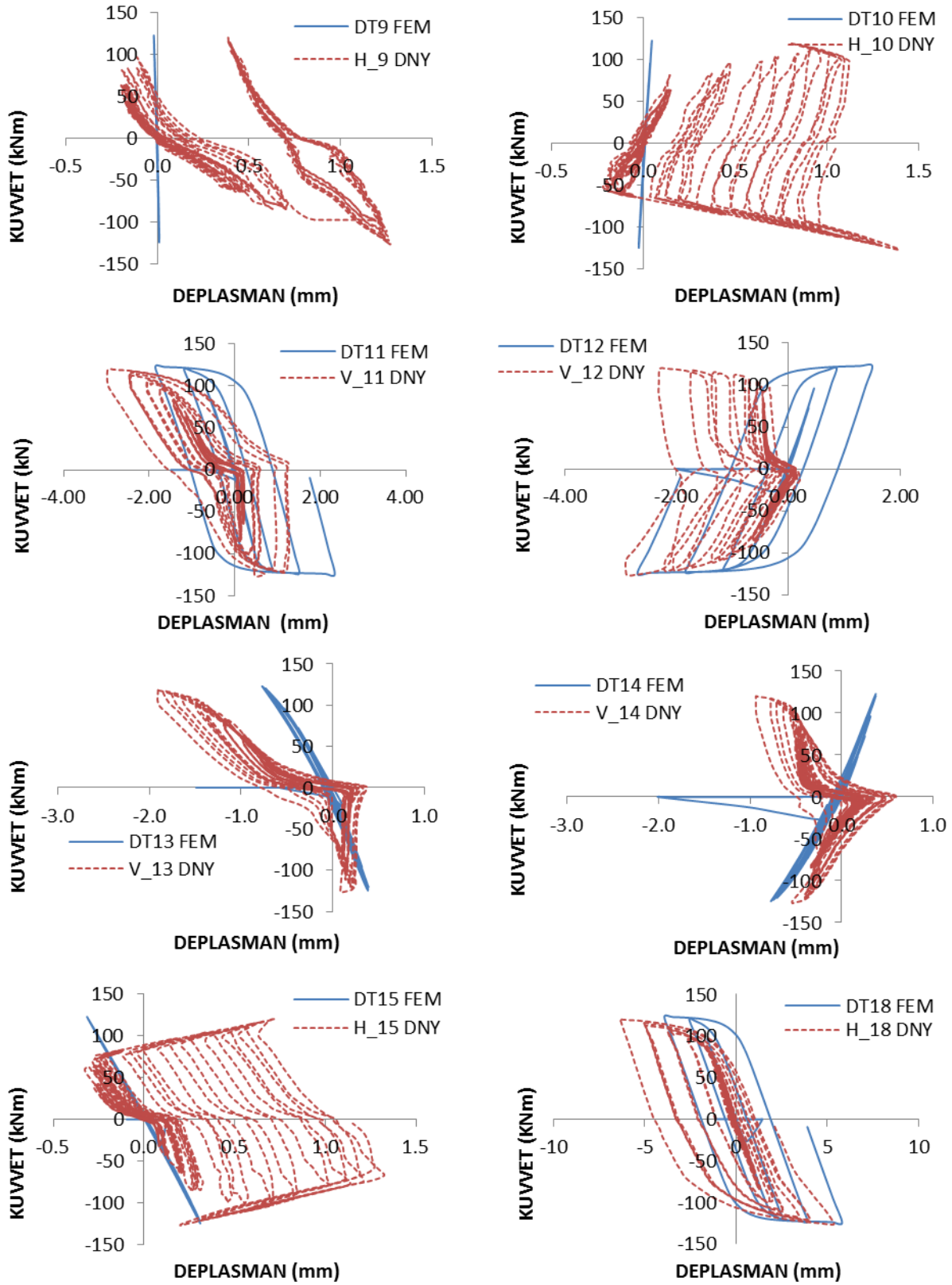
Şekil E.8: P1 numune grafikleri.



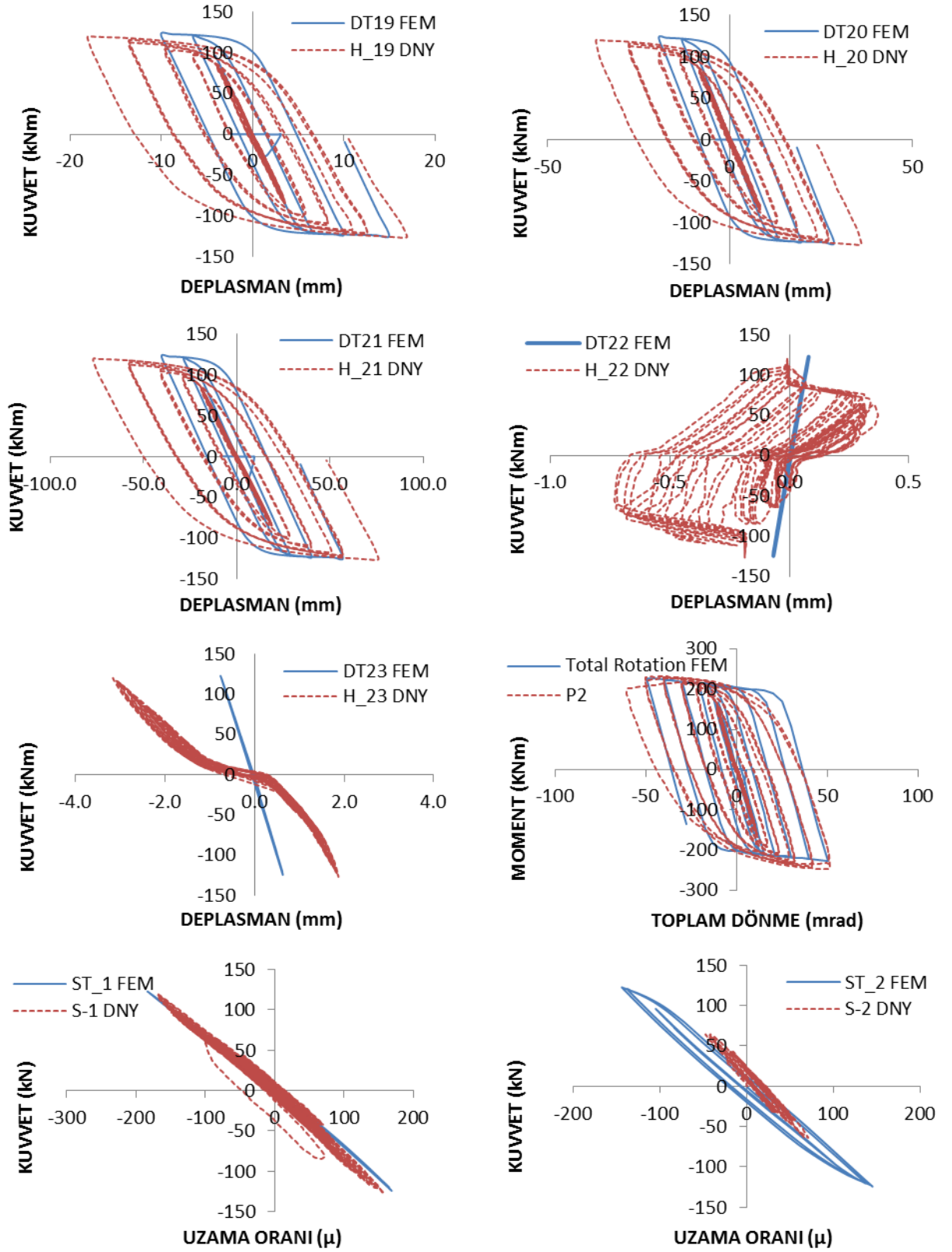
Şekil E.9: P1 numune grafikleri.



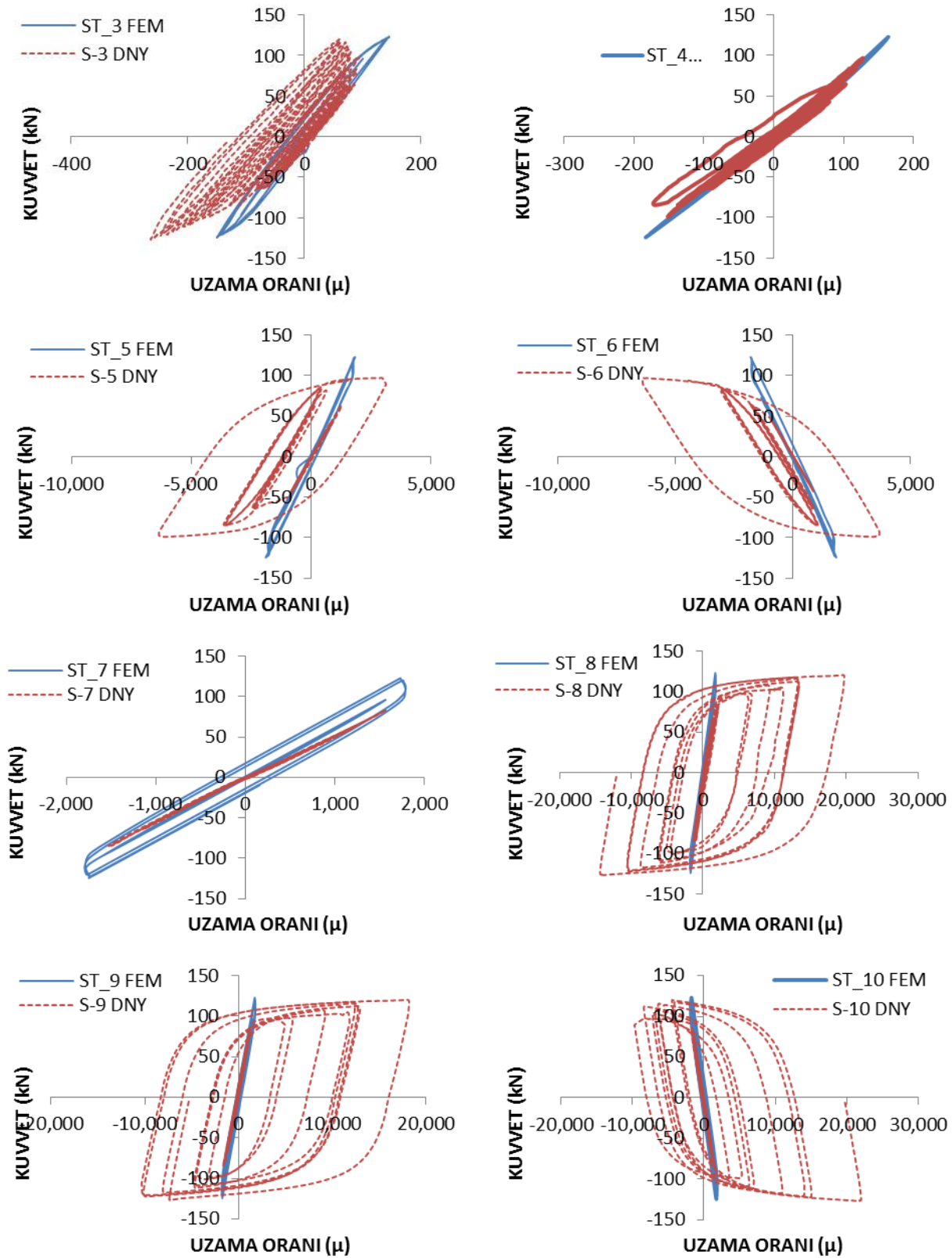
Şekil E.10: P2numune grafikleri.



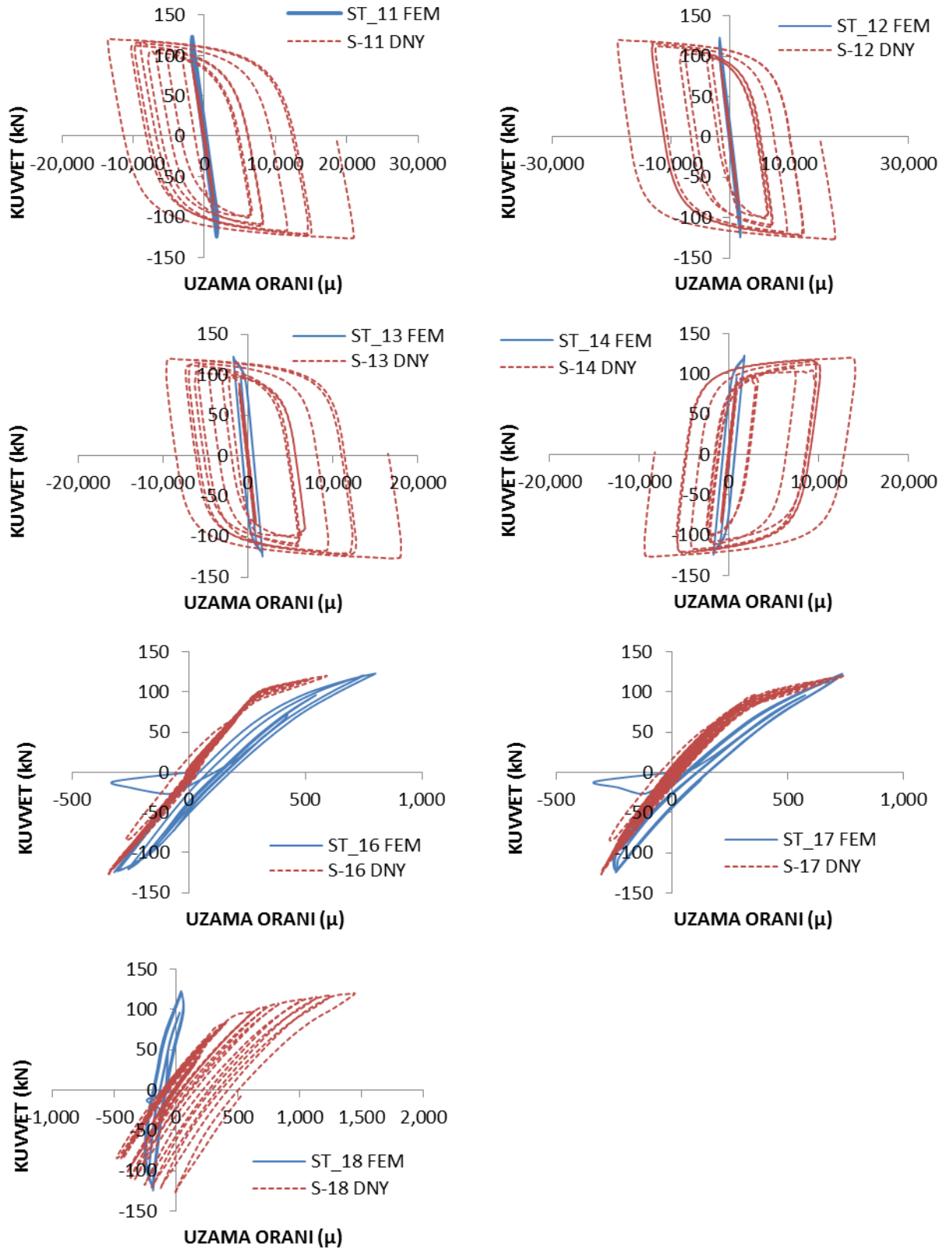
Şekil E.11: P2 numune grafikleri.



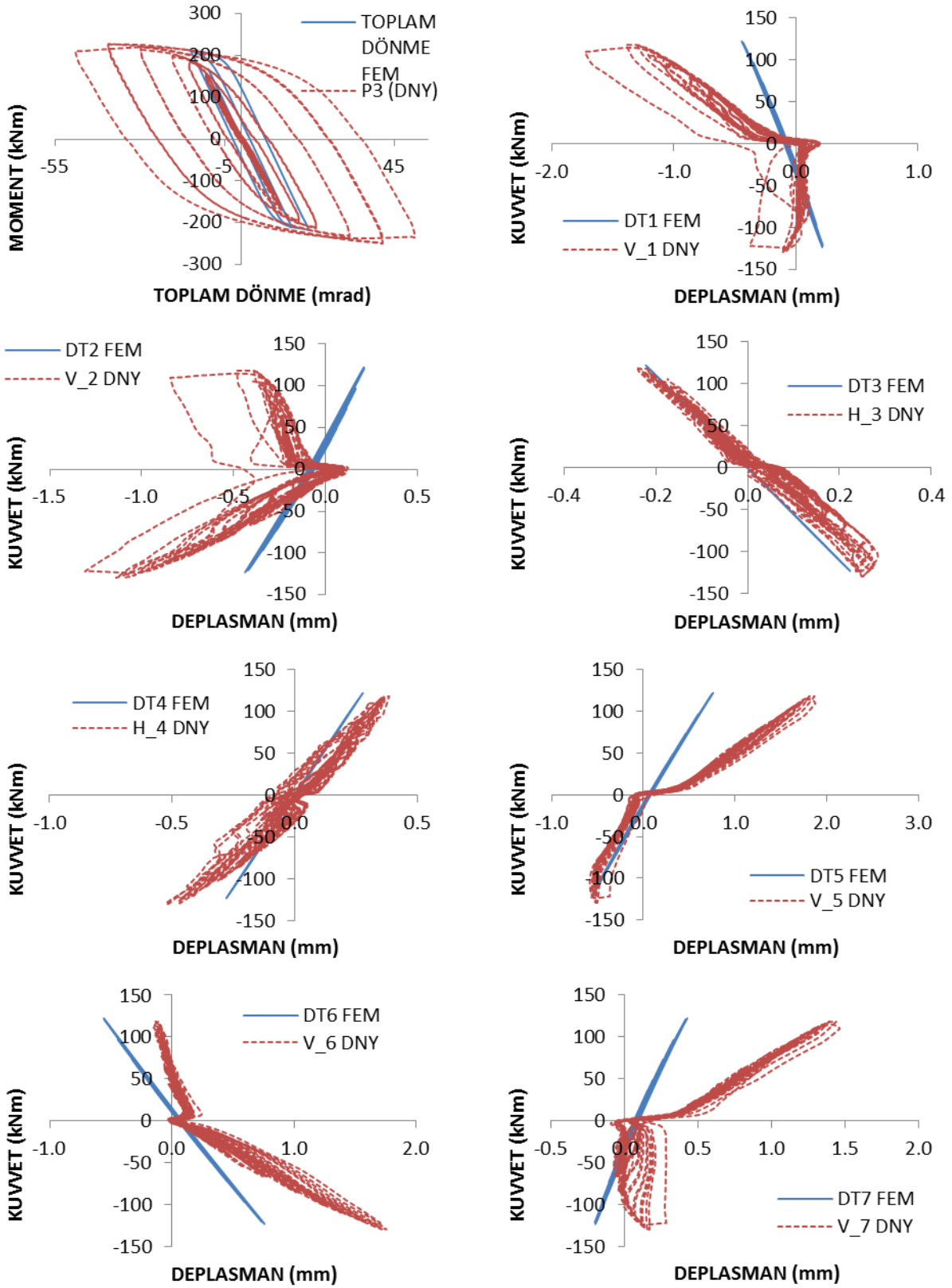
Şekil E.12: P2 numune grafikleri.



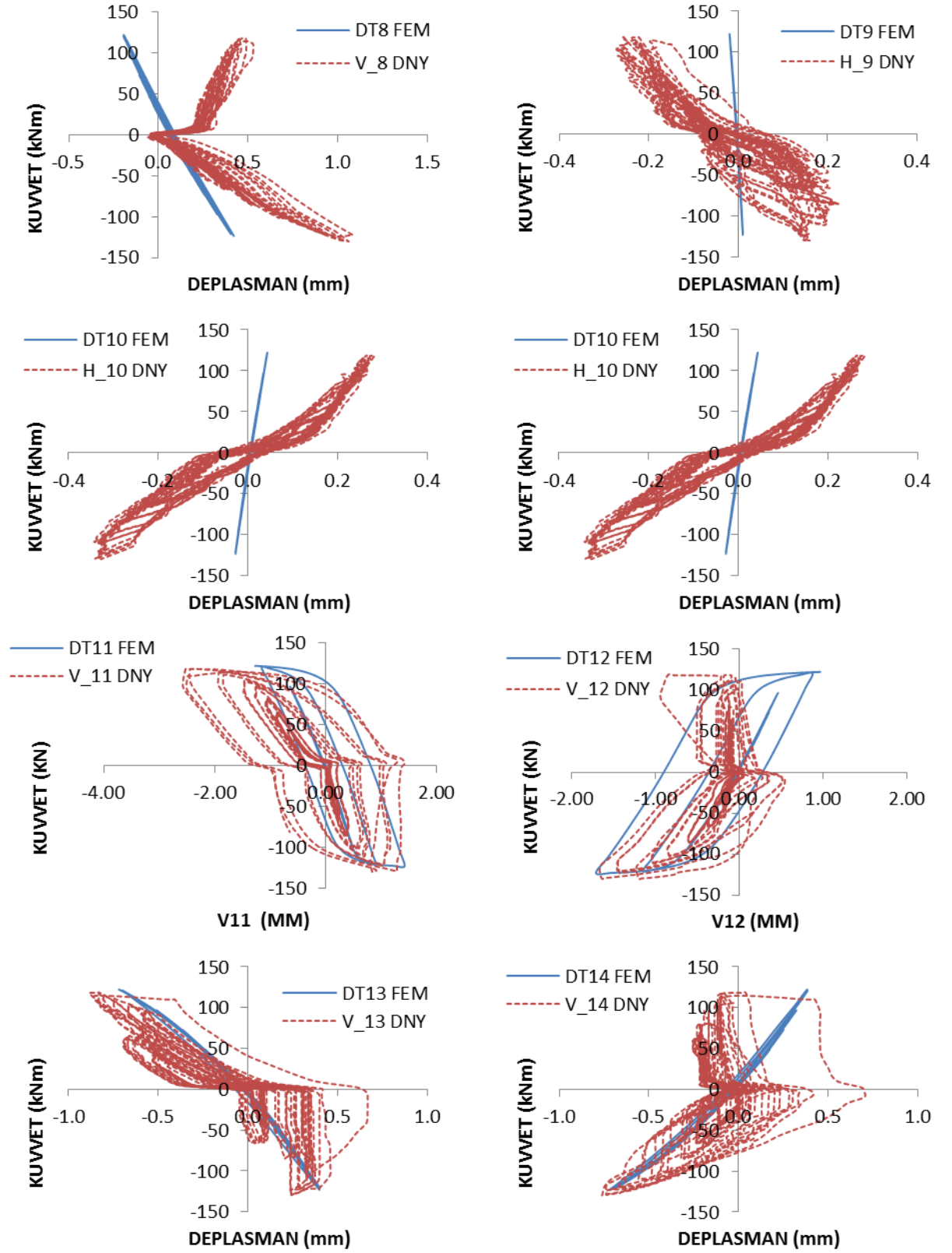
Şekil E.13: P2 numune grafikleri.



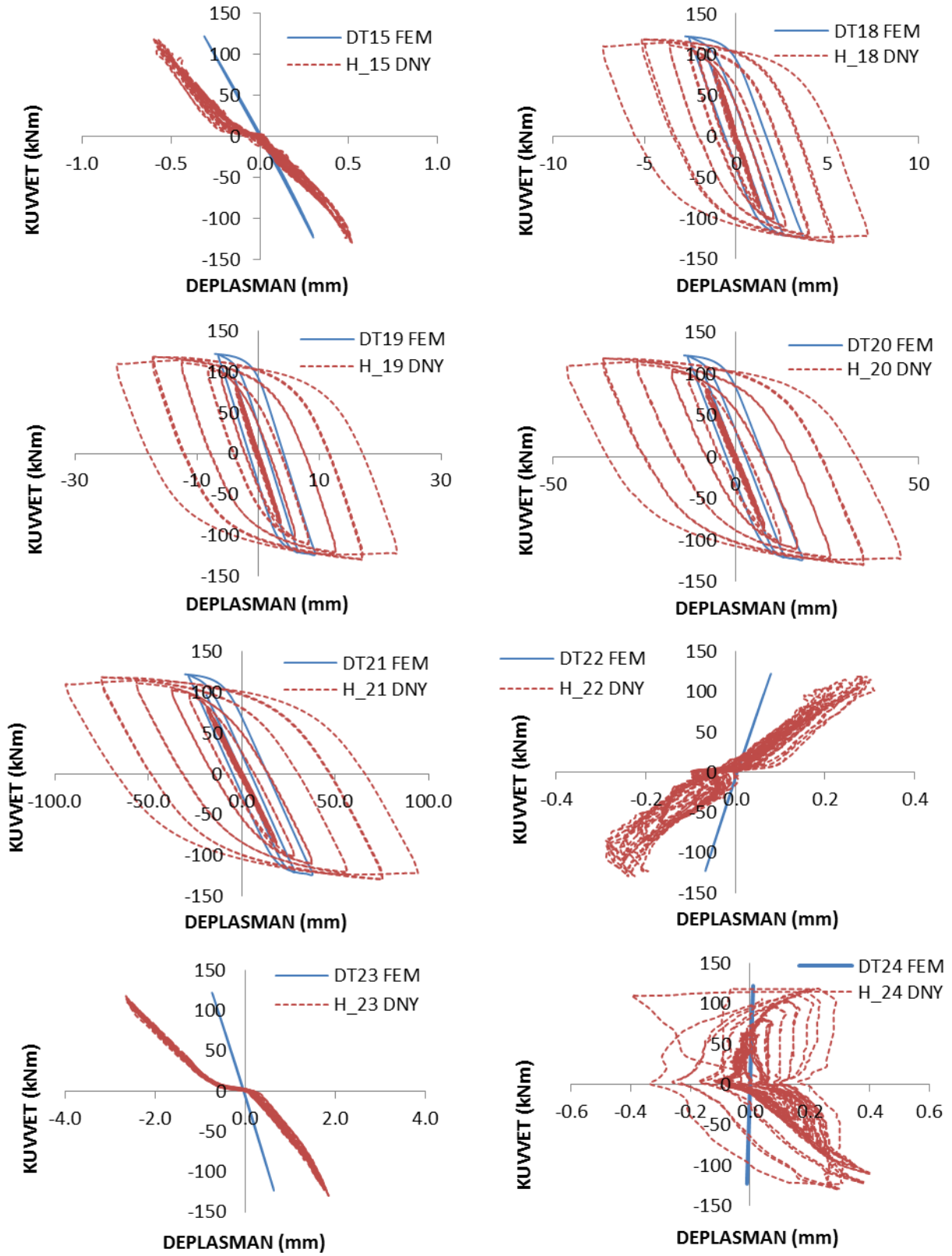
Şekil E.14: P2 numune grafikleri.



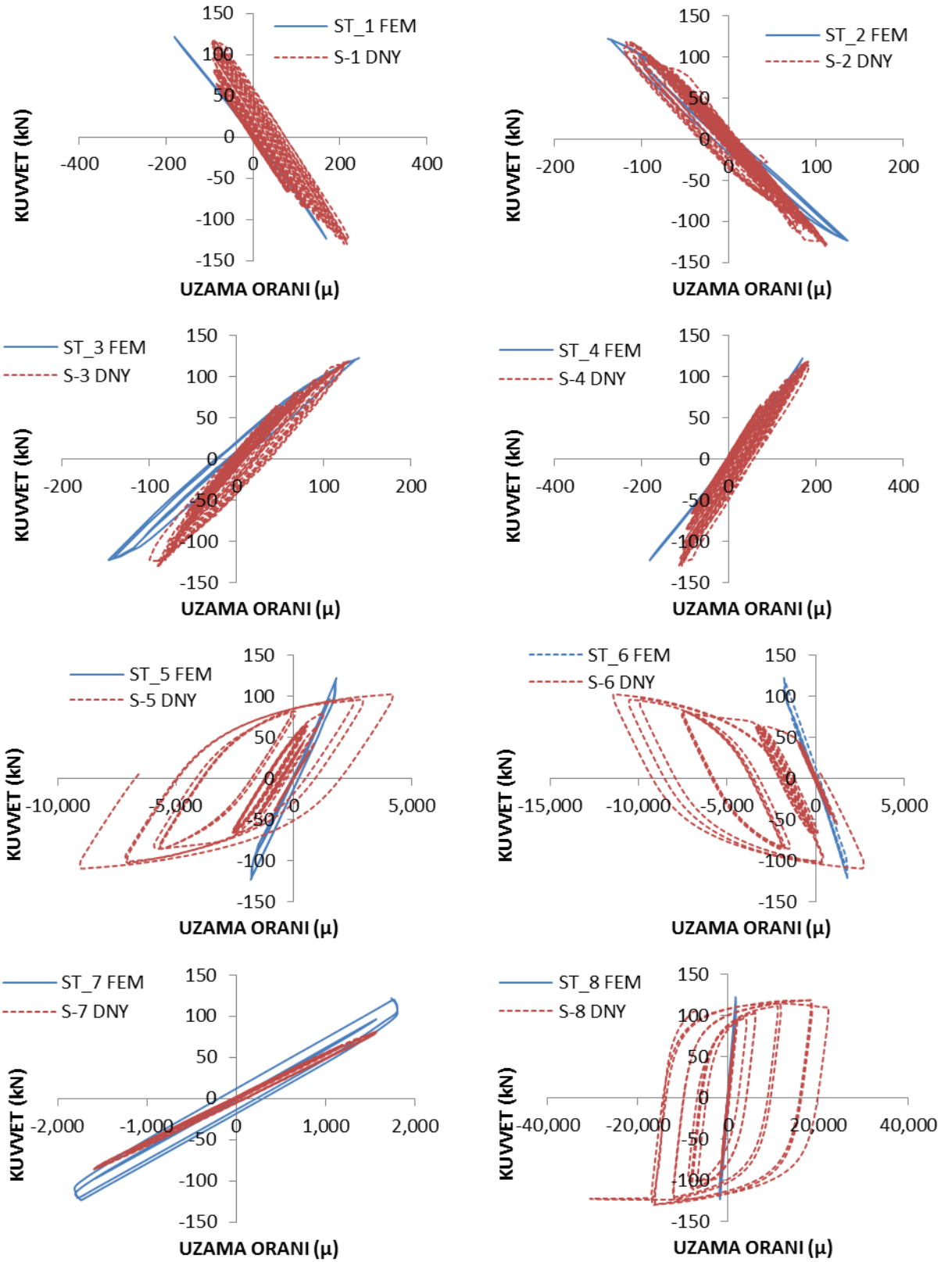
Şekil E.15: P3 numune grafikleri.



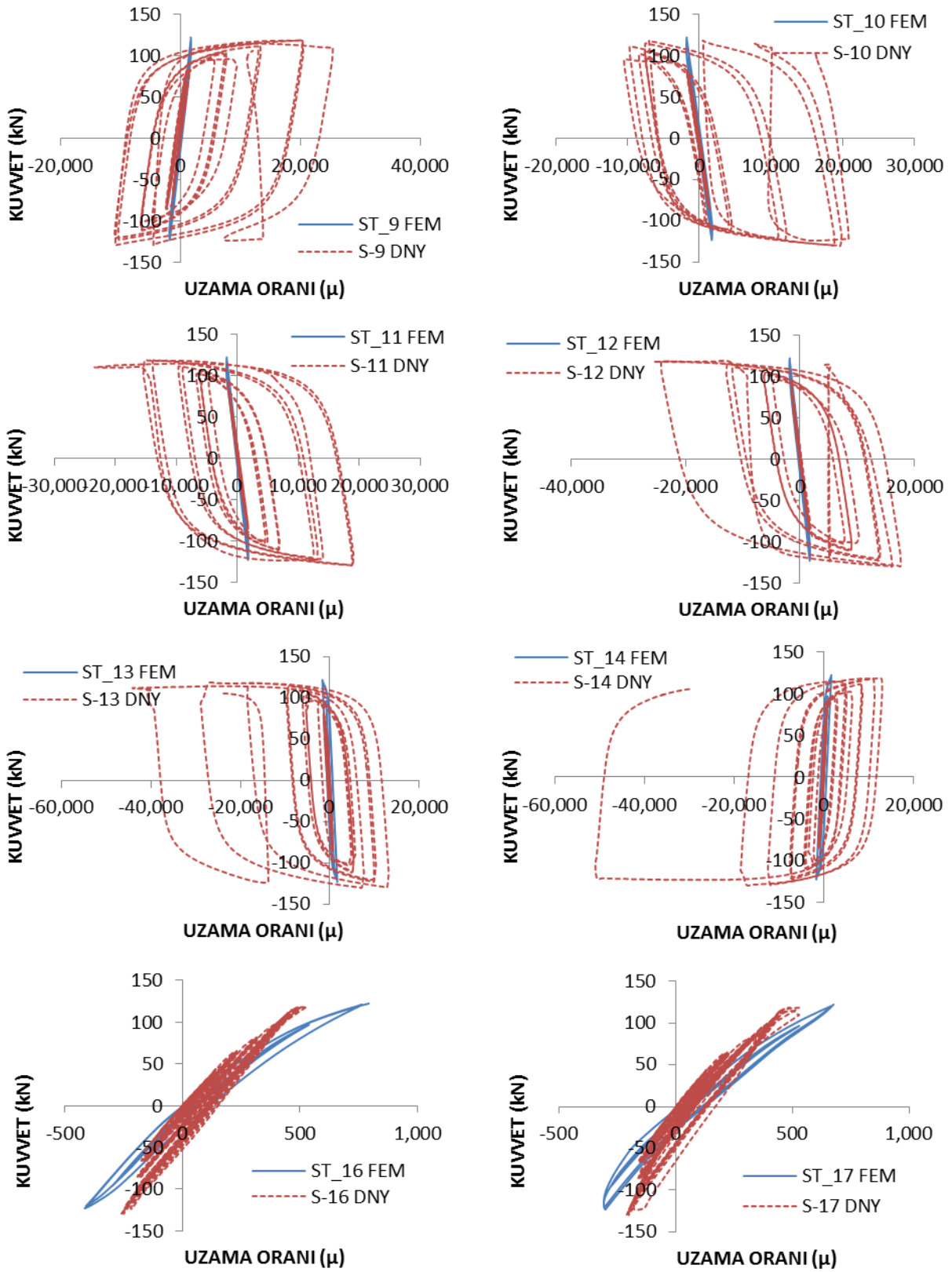
Şekil E.16: P3 numune grafikleri.



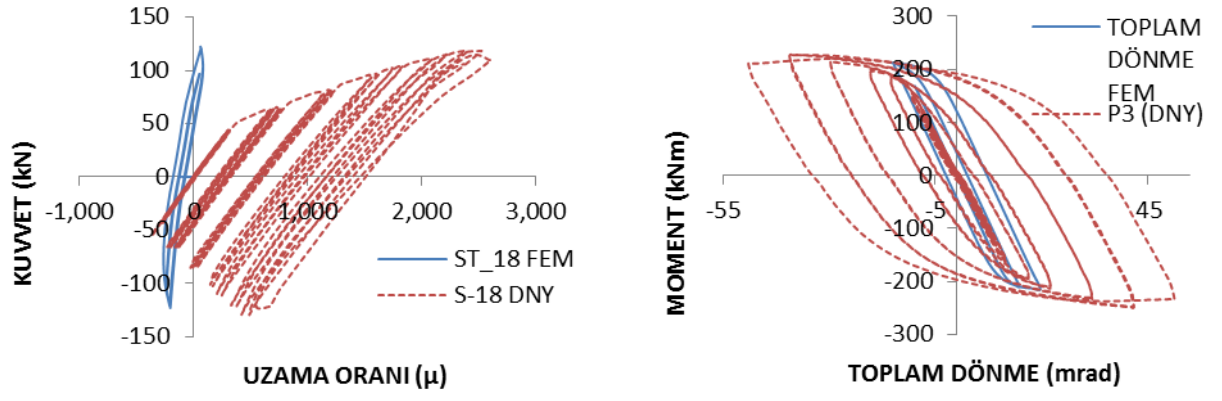
Şekil E.17: P3 numune grafikleri.



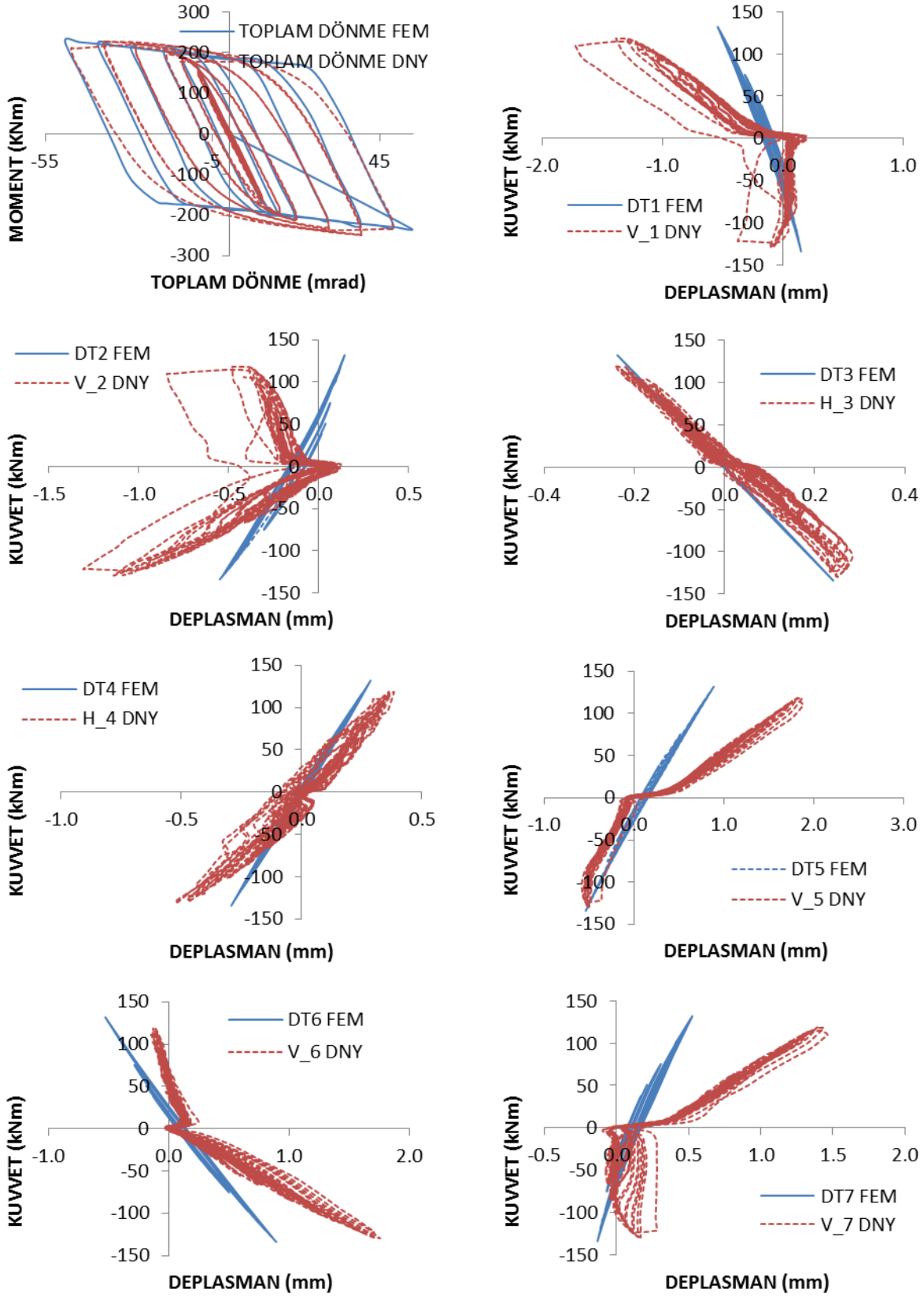
Şekil E.18: P3 numune grafikleri.



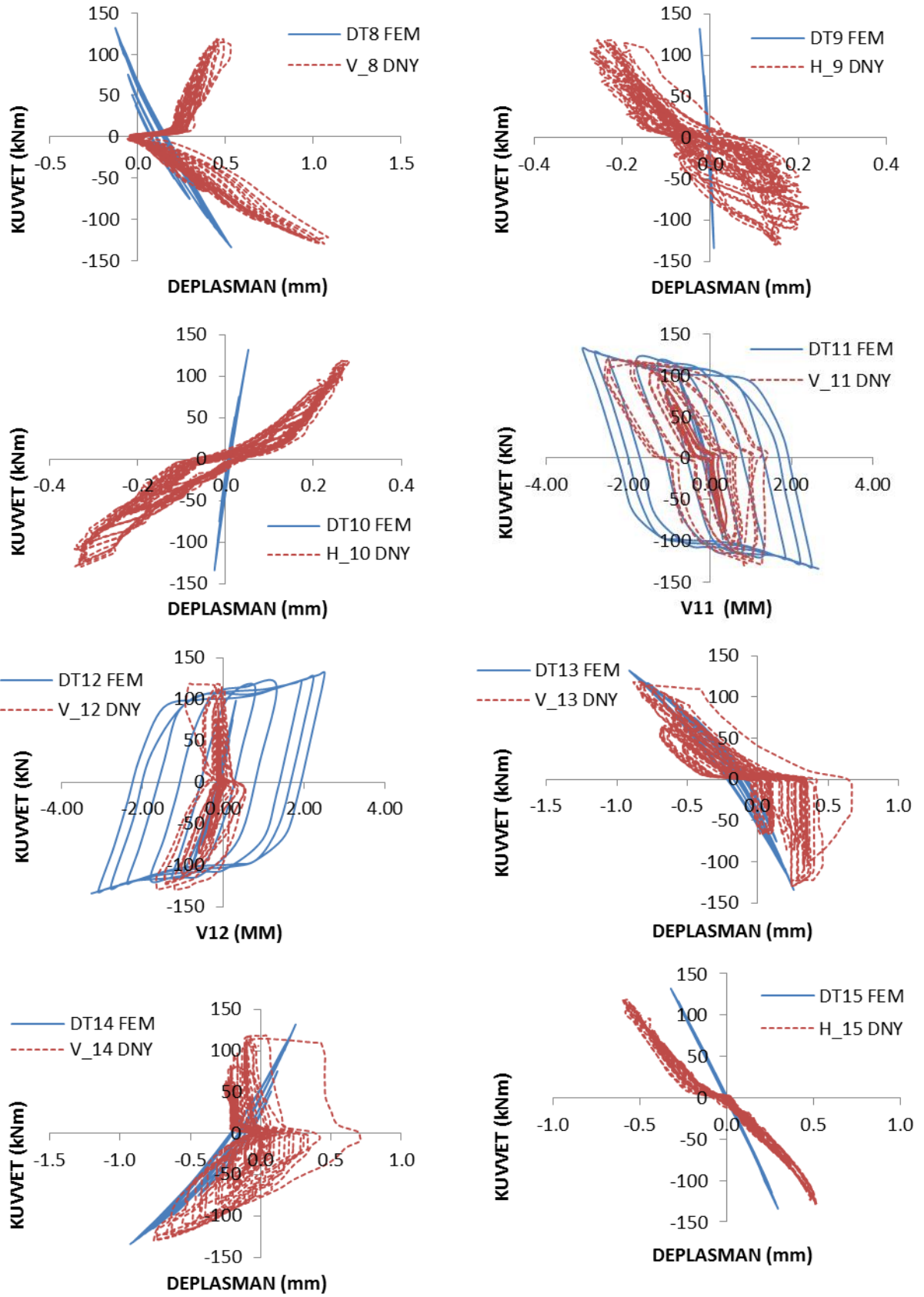
Şekil E.19: P3 numune grafikleri.



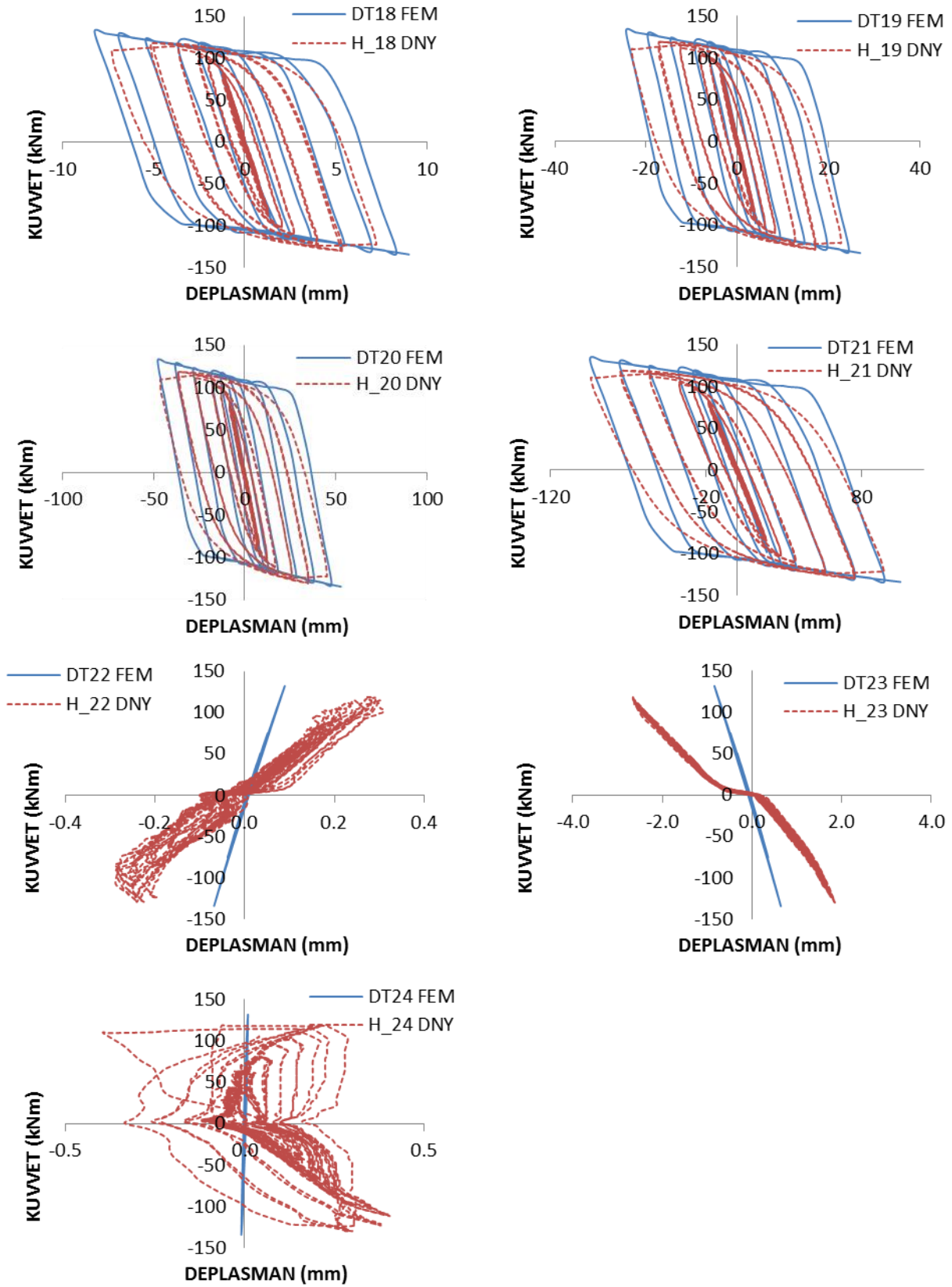
Şekil E.20: P3 numune grafikleri.



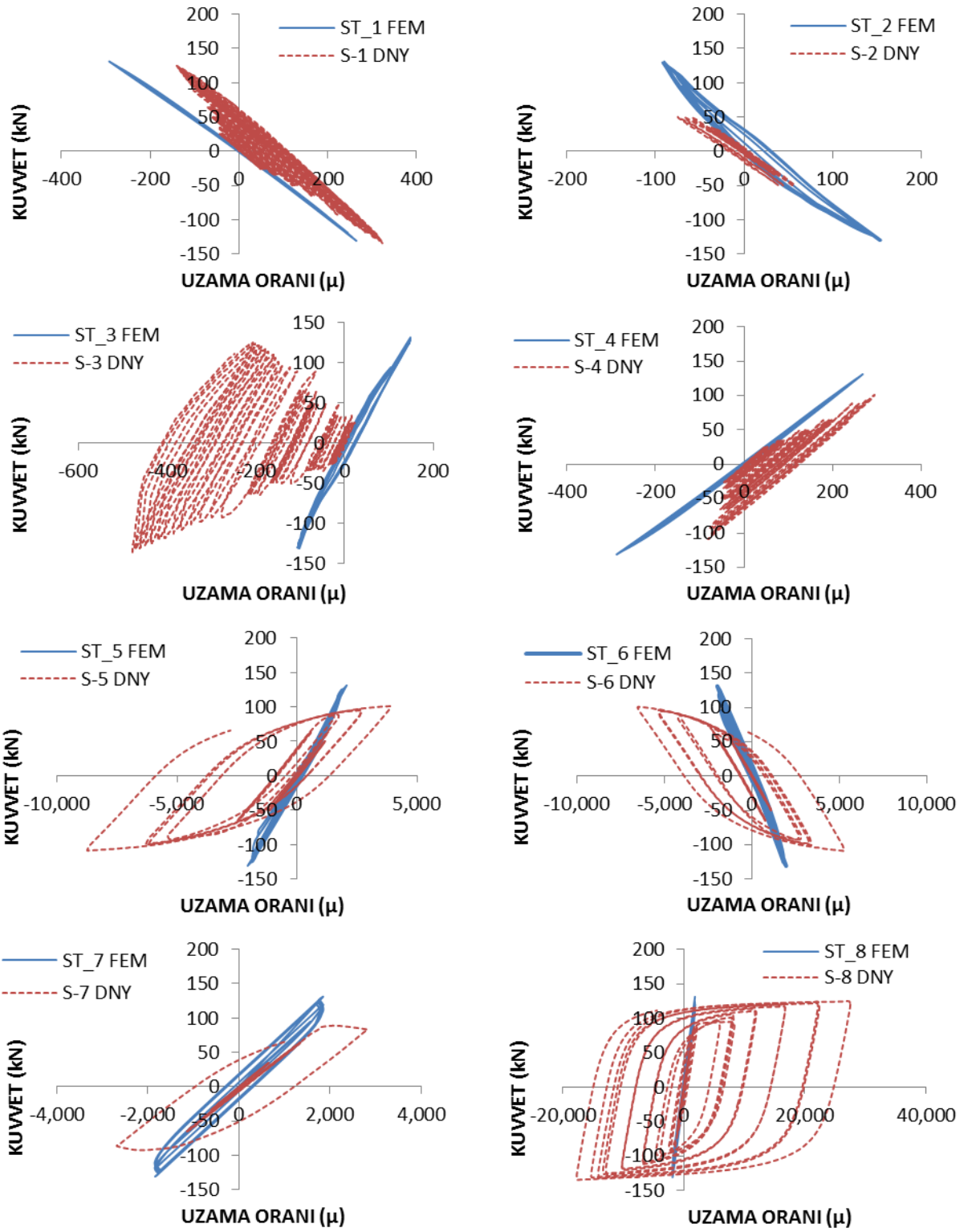
Şekil E.21: P4 numune grafikleri.



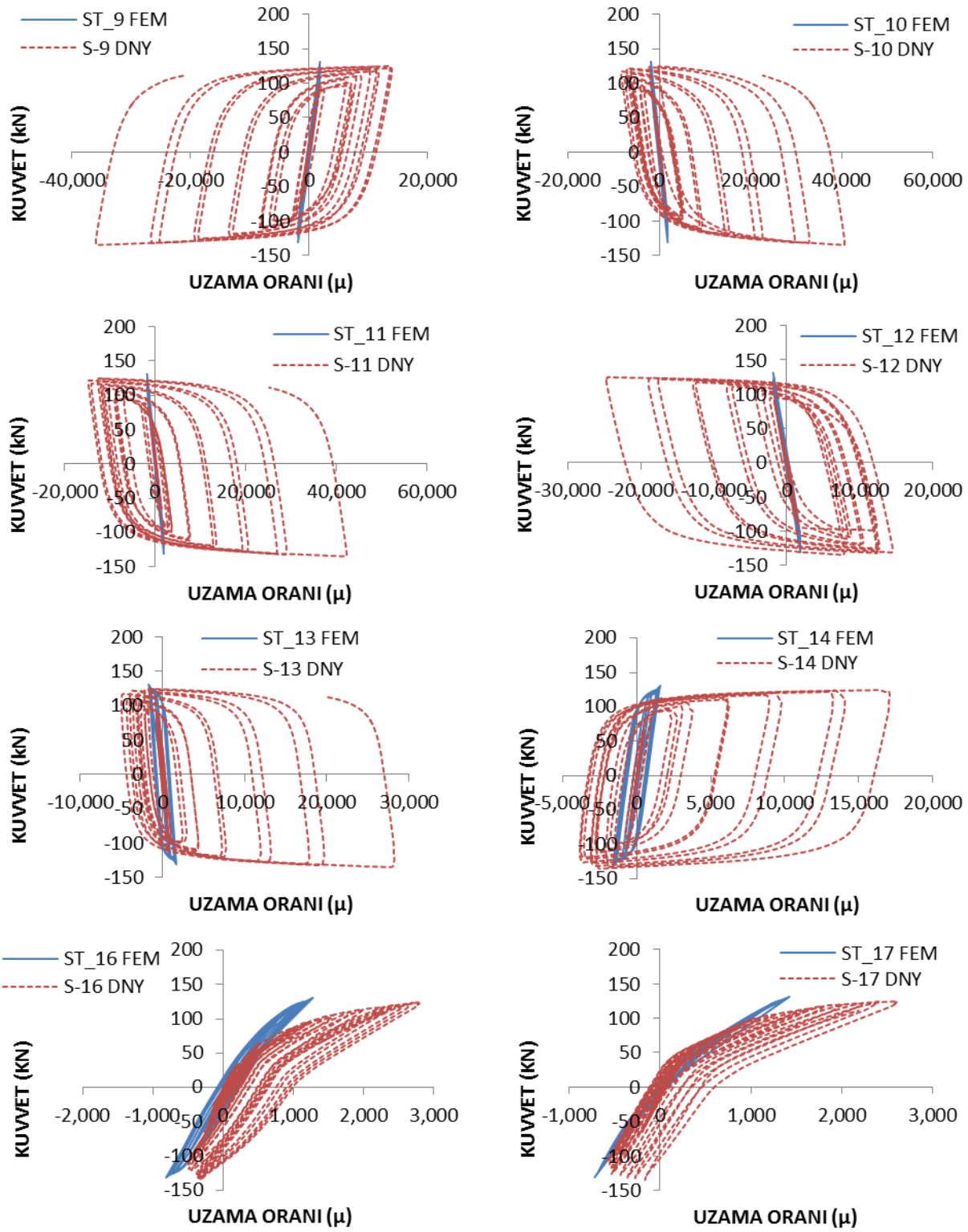
Şekil E.22: P4 numune grafikleri.



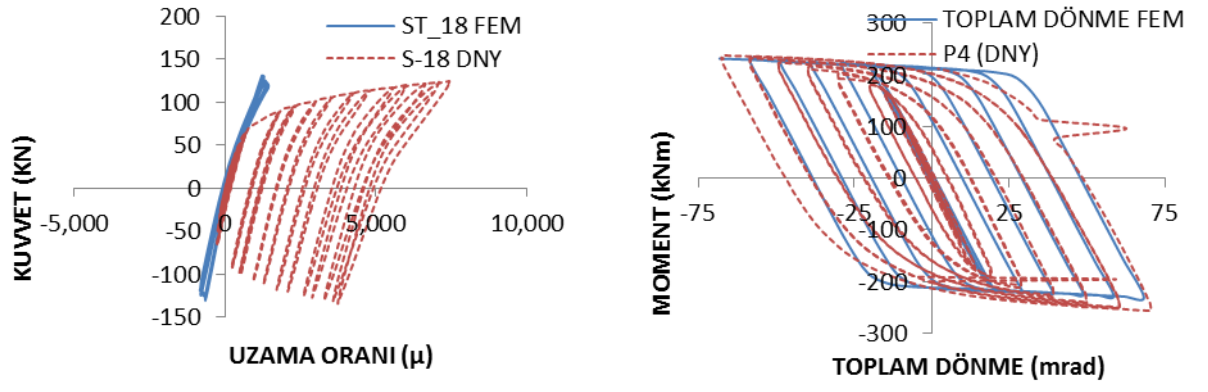
Şekil E.23: P4 numune grafikleri.



Şekil E.24: P4 numune grafikleri.



Şekil E.25: P4 numune grafikleri.



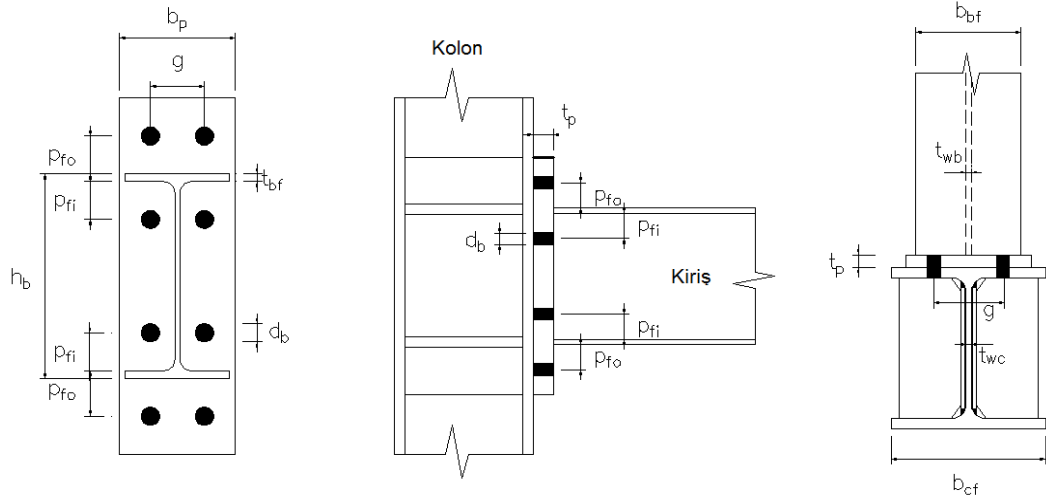
Şekil E.26: P4 numune grafikleri.

EK F: Numunelerin AISC tasarım rehberi 4'e göre hesabı

4 VE 13 NUMARALI AISC TASARIM REHBERLERİNE GÖRE P4 NUMUNESİ BİRLEŞİM HESABI

P4 numunesi için AISC tasarım rehberine göre yapılan hesaplama aşağıda sunulmuştur.

(Kapasite hesabı yapılması sebebiyle tüm faktörler 1 olarak kabul edilmiştir ($\Phi=1$))



Şekil F.1: Alın levhali birleşim genel şeması.

P4 numunesi malzeme özellikleri

Numune No	Kolon		Kiriş		Süreklilik Levhası		Alın levhası		Bulon sınıfı ve kalitesi	Yükleme Tipi
	Kesit	Kalite	Kesit	Kalite	t _{cp}	Kalite	t _p	Kalite		
P4	HEB320	S275	IPE270	S275			35	S235	M24/10.9	Tersinir

$$V_u = 25 \text{ ton}$$

$$E = 2100 \text{ ton/cm}^2$$

$$p_{fi} = 4 \text{ cm}$$

$$p_{f0} = 5.5 \text{ cm}$$

$$g = 12 \text{ cm}$$

Kiriş profili (HEB180)

$$d_b = 18 \text{ cm}$$

$$t_{wb} = 0.85 \text{ cm}$$

$$b_{fb} = 18 \text{ cm}$$

$$t_{fb} = 1.4 \text{ cm}$$

$$k_b = 2.9 \text{ cm}$$

$$g = 12 \text{ cm}$$

$$Z_{xb} = 481.4 \text{ cm}^3$$

$$f_{yb} = 2.75 \text{ ton/cm}^2$$

$$f_{ub} = 4.4 \text{ ton/cm}^2$$

$$r_{kiriş} = 1.5 \text{ cm}$$

$$A_b = 65.25 \text{ cm}^2$$

Kolon profili (HEB320)

$$d_c = 32 \text{ cm}$$

$$t_{wc} = 1.15 \text{ cm}$$

$$b_{fc} = 30 \text{ cm}$$

$$t_{fc} = 2.05 \text{ cm}$$

$$k_c = 4.75 \text{ cm}$$

$$(h/t_w)_c = 19.56 \text{ cm}$$

$$g = 12 \text{ cm}$$

$$Z_{xc} = 2149 \text{ cm}^3$$

$$f_{yc} = 2.75 \text{ ton/cm}^2$$

$$f_{uc} = 4.4 \text{ ton/cm}^2$$

$$r_{kolon} = 2.7 \text{ cm}$$

$$A_c = 161.3 \text{ cm}^2$$

1) Bağlantı tasarım momenti

$$M_{pe} = C_{pr} R_y F_y Z_x \quad (F.1)$$

$$Z_{xb} = 481,4 \text{ cm}^3$$

$$f_{yb} = 2,75 \text{ ton/cm}^2$$

$$C_{pr} R_y = 1,35 \times 1.1$$

$$M_{pe} = 1965,92 \text{ ton x cm}$$

Plastik mafsahın yeri

$$L_p = \min (d/2 ; 3b_f)$$

$$3b_f = (18 \times 3 = 54)$$

$$d/2 = (18 / 2 = 9 \text{ cm})$$

$$L_p = \min (d/2 ; 3b_f) = 9 \text{ cm}$$

2) Kolon yüzündeki moment

$$M_{uc} = M_{pe} + V_u L_p \quad (F.2)$$

$$M_{pe} = 1965,92 \text{ ton x cm}$$

$$V_u = 25 \text{ ton}$$

$$M_{uc} = 2190,92 \text{ ton x cm}$$

3) Gerekli bulon çapının belirlenmesi

$$d_{uc} = \sqrt{\frac{2M_{uc}}{\Pi \phi F_t (h_0 + h_1)}} \quad (F.3)$$

$$M_{uc} = 2190,92 \text{ ton x cm}$$

$$\phi = 1$$

$$f_{bulon} = 9 \text{ ton/cm}^2 \text{ (ISO 10,9 kalite bulon)}$$

$$h_0 + h_1 = 34.70 \text{ cm}$$

$$d_{b \text{ gerekli}} = 2.11 \text{ cm}$$

$$\text{Gerekli } A_b \text{ diş dibi kesit alanı} = 3.51 \text{ cm}^2$$

4) Bulon çapının ve kaldırma kuvvetinin oluşmadığı momentin belirlenmesi

$$P_t = F_t \times A_b = F_t \left(\frac{\pi \times d_b^2}{4} \right) \quad (\text{F.4})$$

$$\text{Seçilen bulon çapı}(d_b) = 2.4 \text{ cm}$$

$$f_{\text{bulon}} = 9 \text{ ton/cm}^2 \text{ (ISO 10,9 kalite bulon)}$$

$$P_t = 31.77 \text{ ton}$$

$$M_{np} = 2P_t(h_0 + h_1) \quad (\text{F.5})$$

$$M_{np} = 2204.84 \text{ ton x cm}$$

5) Gerekli alın levhası kalınlığının belirlenmesi

$$t_{p.gerekli} = \sqrt{\frac{1.1\phi M_{np}}{\phi_b F_{yp} Y_p}} \quad (\text{F.6})$$

$$s = \left(\frac{1}{2}\right) \sqrt{b_p g} \quad (\text{F.7})$$

$$s = 7.94 > (p_{fi}=4)$$

$$Y_p = \left(\frac{b_p}{2}\right) \left[h_1 \left(\left(\frac{1}{p_{fi}}\right) + \left(\frac{1}{s}\right) \right) + \left(h_0 \left(\frac{1}{p_{f0}} \right) - \left(\frac{1}{2}\right) \right) + \left(\frac{2}{g}\right) [h_1 (p_{fi} + s)] \right] \quad (\text{F.8})$$

$$h_0 = 22.8 \text{ cm}$$

$$g = 12 \text{ cm}$$

$$h_0 = 22,8 \text{ cm}$$

$$h_1 = 11,9 \text{ cm}$$

$$p_{fi} = 4,0 \text{ cm}$$

$$p_{f0} = 5,50 \text{ cm}$$

$$b_p = 21 \text{ cm}$$

$$Y_p = 108,93 \text{ cm}$$

$$\phi = 1$$

Yukarıdaki değerler denklemde yerine konulduğunda

$$t_p = 3,09 \text{ cm} \text{ olarak hesap edilir.}$$

6) Alın levhası kalınlığının seçilmesi

$$t_p = 3,1 \text{ cm} \text{ olarak kabul edilir.}$$

7) Kiriş başlık kuvvetinin hesabı

$$F_{fu} = \frac{M_{uc}}{d - t_{fb}} \quad (\text{F.9})$$

$$M_{uc} = 2190,92 \text{ cm}$$

$$d_b = 18 \text{ cm}$$

$$t_{fb} = 1,4 \text{ cm}$$

Yukarıdaki değerler denklemde yerine konulduğunda

$$F_{fu} = 131,98 \text{ cm} \text{ olarak hesap edilir.}$$

8) Alın levhası uzatılmış kısmının kesme kuvvetiyle akması

$$F_{fu} / 2 < \phi R_n = \phi 0.6 F_{yp} b_p t_p \quad (\text{F.10})$$

$$t_p = 3,1 \text{ cm}$$

$$b_p = 21 \text{ cm}$$

$$f_{yp} = 2,35 \quad \text{ton/cm}^2$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_n = 91,79 \quad \text{ton} > (F_{fu} / 2 = 65,99) \quad \text{ton}$$

Alın levhası yeterli ✓

9) Alın levhası uzatılmış kısmının kesme kuvvetiyle kopması

$$F_{fu} / 2 < \phi R_n = \phi 0.6 F_{up} A_n \quad (\text{F.11})$$

$$d_b = 2,4 \quad \text{cm}$$

$$b_p = 21 \quad \text{cm}$$

$$t_p = 3,1 \quad \text{cm}$$

$$A_n = 48,98 \quad \text{cm}^2$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_n = 108,74 \quad \text{ton} > (F_{fu} / 2 = 65,99) \quad \text{ton}$$

Alın levhası yeterli ✓

10) Alın levhasında rijitlik levhası kullanılmamıştır.

Rijitlik levhası kullanılmaması sebebiyle bu hesap adımı atlanmıştır.

11) Basınç bölgesi bulonlarının kesme kuvvetiyle kopması

$$V_u < \phi R_n = \phi(n_b) F_v A_b \quad (\text{F.12})$$

$$V_u = 25 \quad \text{ton} \quad (\text{Birleşim kesme kuvveti})$$

$$n_b = 4 \quad \text{adet} \quad (\text{Basınç bölgesi bulon sayısı})$$

$$F_v = 3,60 \quad \text{ton} \quad (\text{Bulon kesme kuvveti emniyet gerilmesi})$$

$$A_b = 3,53 \quad \text{cm}^2 \quad (\text{Bulon dış dibi kesit alanı})$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_n = 50,83 \text{ ton} > (V_u = 25) \text{ ton}$$

Bulonlar yeterli ✓

12) Basınç bölgesi bulonlarının ezilmesi

a) Alın levhasında ezilme ve yırtılma tahkiki

$$R_n = 1.2L_c t F_u < 2.4d_b t F_u \quad (\text{F.13})$$

$$d_b = 2,4 \text{ cm}$$

$$t_p = 3,1 \text{ cm}$$

$$F_u = 3,70 \text{ ton/cm}^2$$

$$2.4d_b t F_u = 66.07 \text{ ton/bulon}$$

$$p_{f_i} = 4,0 \text{ cm}$$

$$p_{f_0} = 5,5 \text{ cm}$$

$$t_f = 1,4 \text{ cm}$$

$$d_b = 2,4 \text{ cm}$$

$$L_c = 8,4 \text{ cm}$$

$$1.2L_c t F_u = 114,24 \text{ ton}$$

$$\phi = 1$$

$$\min(1.2L_c t F_u; 2.4d_b t F_u) = 66.07 \text{ ton/bulon}$$

$$\phi R_n = 66.07 \times 4 = 264,27 \text{ ton} > (V_u = 25) \text{ ton}$$

Bulonlar yeterli ✓

b) Kolon başlığında ezilme ve yırtılma tahkiki

$$t_{fc} = 2,05 \text{ cm}$$

$$t_p = 3,1 \text{ cm}$$

$$F_{yp} = 2,35 \text{ ton / cm}^2$$

$$F_{yc} = 2,75 \text{ ton / cm}^2$$

$$264,27 \times \left(\frac{2,05}{3,1} \right) \times \left(\frac{2,35}{2,75} \right) = 149,99 \text{ ton}$$

$$\phi R_n = 149,33 \text{ ton} > (V_u = 25) \text{ ton}$$

Bulonlar yeterli ✓

13) Kaynak hesabı

Kiriş başlığında tam penetrasyonlu küt kaynak yapılacağı için kaynak hesabına gerek yoktur.

Kiriş gövdesi kaynağı aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$D = \frac{0.6 F_{yb} t_{wb}}{2(2,036)} \quad (\text{F.14})$$

$$\phi = 1$$

$$a = 0.707$$

$$f_{E7018, \text{elektrot}} = 4,8 \text{ ton / cm}^2$$

1 cm kalınlıktaki kaynak için mukavemet

$$1 \times 0.707 \times 0,6 \times 4,8 \text{ ton/cm}^2 = 2,036 \text{ ton / cm} \text{ olarak hesap edilir.}$$

$$F_{yb} = 2,75 \text{ ton / cm}^2$$

$$t_{wb} = 0,85 \text{ cm}$$

D = 0,344 cm olarak hesap edilir. (kiriş kesme kapasitesine göre hesap edilen kaynak ölçüsü

$$D = \frac{V_u}{2(2,036)L_{eff}} \quad (\text{F.15})$$

$$L_{eff} = \text{Etkili kaynak uzunluğu} = \frac{d_b}{2} - t_{fb} \text{ (} d_b \text{ kiriş derinliği olmak üzere, sadece}$$

basınç bölgesindeki kaynak uzunluğu dikkate alındı)

D = 0,81 cm olarak hesap edilir. (V_u kesme kuvvetine göre hesap edilen kaynak ölçüsü

14) Kolon başlığının eğilme kuvvetiyle akması

$$t_{fc.gerekli} = \sqrt{\frac{1.11\phi M_{np}}{\phi_b F_{yc} Y_c}} \leq t_{fc} \quad (\text{F.16})$$

$$b_{fc} = 30 \quad \text{cm}$$

$$g = 12 \quad \text{cm}$$

$$s = 9.49 \quad \text{cm}$$

$$c = 10.90 \quad \text{cm}$$

$$h_1 = 11.90 \quad \text{cm}$$

$$h_0 = 22.80 \quad \text{cm}$$

- a) **Süreklilik levhası kullanılmadığı durumda** Y_c aşağıdaki formülle hesap edilir.

$$Y_c = \left(\frac{b_{fc}}{2}\right)h_1\left(\frac{1}{s}\right) + \left(h_0\left(\frac{1}{s}\right)\right) + \left(h_1\left(\frac{2}{g}\right)s\right) + \left(\frac{3c}{4}\right) + (h_0s) + \left(\frac{c}{4}\right) + \left(\frac{c^2}{4}\right) + \left(\frac{g}{2}\right) \quad (\text{F.17})$$

$$Y_c = 152,20 \quad \text{cm}$$

$$\phi = 1$$

$$\phi_b = 1$$

Yukarıdaki değerler yerine konduğunda gerekli kolon başlığı kalınlığı

$t_{fc.gerekli} = 2,42 > (t_{fc}=2,05)$ olarak hesap edilir. Kolon başlık kalınlığı yeterli değildir. Süreklilik levhası kullanılması gerekmektedir.

- b) **Süreklilik levhası kullanıldığı durumda** Y_c aşağıdaki formülle hesap edilir.

$$Y_c = \left(\frac{b_{fc}}{2}\right)h_1\left(\frac{1}{s}\right) + \left(\frac{1}{p_{si}}\right) + \left(h_0\left(\frac{1}{s}\right)\right) + \left(\frac{1}{p_{s0}}\right) + \frac{2}{g}h_1(s + p_{si}) + h_0(s + p_{s0}) \quad (\text{F.18})$$

Bu durumda

$$t_{fc.gerekli} = 1,87 < (t_{fc}=2,05) \text{ olarak hesap edilir.}$$

Kolon başlık kalınlığı yeterlidir. ✓

15) Rijitlik levhasız kolon başlığı mukavemetinin hesaplanması

Bu adımda süreklilik levhası tasarım kuvvetinin hesap edilmesi için kolon başlık dayanımı hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = \frac{\phi M_{cf}}{d - t_{fb}} \quad (\text{F.19})$$

$$\phi M_{cf} = \phi_b F_{yc} Y_c t_{fc}^2$$

$$F_{yc} = 2,75 \quad \text{ton/cm}^2$$

$$Y_c = 152,20 \quad \text{cm}$$

$$t_{fc} = 2,05 \quad \text{cm}$$

$$\phi = 1$$

Yukarıdaki değerler denklemde yerine konduğunda

$$\phi M_{cf} = 1758,96 \text{ olarak hesap edilir.}$$

$$d_b = 18 \quad \text{cm}$$

$$t_{fb} = 1,40 \quad \text{cm}$$

$$\phi R_{n-1} = 105,96 \quad \text{ton} < (F_{fu} = 131,98 \quad \text{ton})$$

16) Kiriş başlık kuvveti etkisiyle kolon gövdesinde akma tahkiki

$$\phi R_n = \phi C_t (6k_c + N + 2t_p) F_{yc} t_{wc} \quad (\text{F.20})$$

$$C_t = 1$$

$$N = t_{fb} = 1,40 \quad \text{cm}$$

$$k_c = 4,75 \quad \text{cm}$$

$$t_p = 3,1 \quad \text{cm}$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_{n-2} = 114,17 \quad \text{ton} < (F_{fu} = 131,98 \quad \text{ton})$$

17) Kiriş basınç başlığı bölgesinde kolon gövdesi burkulma tahkiki

$$\phi R_n = \frac{\phi 24 t_{wc}^3 \sqrt{E \cdot F_{yc}}}{h} \quad (F.21)$$

$$E = 2100 \text{ ton/cm}^2$$

$$F_{yc} = 2,75 \text{ ton/cm}^2$$

$$t_{wc} = 3,1 \text{ cm}$$

$$h = 22,5 \text{ cm}$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_{n-3} = 123,28 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

18) Gövde burkulma mukavemeti hesabı,

Süreklilik levhası kullanılmadığı durumda kolon gövdesi mukavemeti aşağıdaki formülle hesap edilir.

$$\phi R_n = \phi 0.80 \times t_{wc}^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d_c} \right) \left(\frac{t_{wc}}{t_{fc}} \right)^{1.5} \right] \times \sqrt{\frac{E \cdot F_{yc} t_{fc}}{t_{wc}}} \quad (F.22)$$

$$t_{wc} = 3,1 \text{ cm}$$

$$N = t_{fb} = 1,40 \text{ cm}$$

$$d_c = 32 \text{ cm}$$

$$t_{fc} = 2,05 \text{ cm}$$

$$E = 2100 \text{ ton/cm}^2$$

$$F_{yc} = 2,75 \text{ ton/cm}^2$$

Yukarıdaki değerler yerine konduğunda

$$\phi R_{n-4} = 113,27 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

19) Rijitlik levhası tasarım kuvvetinin hesabı

Bu adımda 15. Adımdan itibaren hesap edilen ve yeşil renk ile gösterilen en düşük dayanım değeri dikkate alınarak süreklilik levhası tasarım kuvveti hesap edilir.

$$\phi R_{\min} = 105,96 \text{ ton}$$

$$F_{CU} = 131,98 - 105,96 = 26,02 \text{ ton}$$

Bu hesap adımından sonraki hesap adımlarında kolon panel bölgesi tasarımı için AISC tasarım rehberi 13’de verilen hesap adımları takip edilmiştir.

20) Kolon gövdesi mukavemetinin hesabı (elastik sınır)

$$P_u \leq 0.4P_y \quad \phi R_v = 0.9 \times 0.6 F_{yc} d_c t_{wc} \quad (\text{F.23})$$

$$F_{yc} = 2,75 \text{ ton/cm}^2$$

$$t_{fc} = 2,05 \text{ cm}$$

$$d_c = 32 \text{ cm}$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_v = 60,72 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

Gövde takviye levhası gereklidir.

21) Kolon gövdesi mukavemetinin hesabı (plastik sınır)

$$P_u \leq 0.75P_y \quad \phi R_v = 0.9 \times 0.6 F_{yc} d_c t_{wc} \left(1 + \frac{3b_f t_f^2}{d_b d_c t_w} \right) \quad (\text{F.24})$$

$$F_{yc} = 2,75 \text{ ton/cm}^2$$

$$t_{fc} = 2,05 \text{ cm}$$

$$d_c = 32 \text{ cm}$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_v = 95,39 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

Gövde takviye levhası gereklidir.

Not: (Yukarıdaki denklemde DBYBHY'deki gibi başlık kuvveti 0,8 katsayısı ile azaltılmamıştır.)

22) Çekme bölgesi için tahkikler

a) Alın levhasında ezilme ve yırtılma tahkiki

$$P_u \leq 0.4P_y \quad \phi R_n = 0.9 \times \left(\frac{b_s}{\alpha_m p_e} \right) t_f^2 F_y \times C_t \quad (\text{F.25})$$

$$b_s = 31 \text{ cm}$$

$$k_1 = 3,275 \text{ cm}$$

$$p_e = 2,13 \text{ cm}$$

$$d_b = 2,40 \text{ cm}$$

$$\alpha_m = 1,32 \text{ cm}$$

$F_y = 2,35 \text{ ton/cm}^2$ (AISC'nin tavsiyesine göre emniyetli tarafta kalmak amacıyla düşük alındı)

$$C_t = 1,0 \text{ cm}$$

$$\phi = 1,0$$

Yukarıdaki rakamlar denklemde yerine konduğunda

$$\phi R_{n-2.1.1} = 109,21 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

Rijitlik levhası gereklidir.

b) Kolon başlığında ezilme ve yırtılma tahkiki

$$\phi R_n = \phi C_t (6k_c + N + 2t_p) F_{yc} t_{wc} \quad (\text{F.26})$$

$$C_t = 1$$

$$N = t_{fb} = 1,40 \text{ cm}$$

$$k_c = 4,75 \text{ cm}$$

$$t_p = 3,1 \text{ cm}$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_{n-2.1.2} = 114,17 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

(16. Adım ile aynı hesaplamalar yapılmıştır.)

23) Basınç bölgesi için tahkikler

a) Kolon gövdesinin basınç altında yerel burkulması

$$\phi R_n = \phi C_t (6k_c + N + 2t_p) F_{yc} t_{wc} \quad (F.27)$$

$$C_t = 1$$

$$N = t_{fb} = 1,40 \text{ cm}$$

$$k_c = 4,75 \text{ cm}$$

$$t_p = 3,1 \text{ cm}$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_{n-2.1.3} = 114,17 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

(16. Adım ile aynı hesaplamalar yapılmıştır.)

b) Kolon gövdesinde buruşma durumu (Web crippling)

$$\phi R_n = 0.75 \times 135 C_t t_w^2 \left[1 + N_d \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_y t_f}{t_w}} \quad (F.28)$$

18. adım ile hesap adımı aynıdır. Elastisite modülü kökün içinden çıkarılarak hesap yapılmıştır. (Bu formül inçli sisteme göre kısaltılmıştır.)

$$t_{wc} = 3,1 \text{ cm}$$

$$N = t_{fb} = 1,40 \text{ cm}$$

$$d_c = 32 \text{ cm}$$

$$t_{fc} = 2,05 \text{ cm}$$

$$E = 2100 \text{ ton/cm}^2$$

$$F_{yc} = 2,75 \text{ ton/cm}^2$$

Yukarıdaki değerler yerine konduğunda

$$\phi R_{n-2.1.4} = 113,27 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

(18. Adım ile aynı hesaplamalar yapılmıştır.)

c) Kolon gövdesinde basınç altında burkulma

$$\phi R_n = 0.90 \times \frac{4,100.C_t t_w^3 \sqrt{F_y}}{h} \quad (F.29)$$

(Kolonun iki yüzüne moment etkidiği durumda bu kriter bakılmalıdır. 17.

Adım ile hesaplama aynıdır, ancak Elastisite modülü kök dışına alınmıştır)

$$E = 2100 \text{ ton/cm}^2$$

$$F_{yc} = 2,75 \text{ ton/cm}^2$$

$$t_{wc} = 3,1 \text{ cm}$$

$$h = 22,5 \text{ cm}$$

$$\phi = 1$$

$$\phi R_{n-2.1.5} = 123,28 \text{ ton} < (F_{fu} = 131,98 \text{ ton})$$

(17. Adım ile aynı hesaplamalar yapılmıştır.)

24) Süreklilik levhasız gerekli kolon başlık kalınlığı hesabı (14-A alternatif hesap)

$$t_{fred} = \sqrt{\frac{P_{uf} p_e \alpha_m}{\phi F_y b_s C_t}} \quad (\text{F.30})$$

$$P_{uf} = 131,98 \quad \text{ton}$$

$$p_e = 2,13$$

$$\alpha_m = 1,32$$

$$b_s = 31$$

$$C_t = 1$$

$$F_{yc} = 2,35 \quad \text{ton/cm}^2$$

$$\phi = 1$$

25) Kolon gövde takviye levhası ve süreklilik levhası hesabı

$$\text{Çekme bölgesi için } R_{n-\min} = 109,21 \text{ ton}$$

$$\text{Basınç bölgesi için } R_{n-\min} = 113,27 \text{ ton}$$

$$R_{ust} = P_{uf} - R_{n-\min} = 22,78 \quad \text{ton}$$

$$V_{udp} = V_u - \phi R_{vcv} = 71,26 \quad \text{ton}$$

$$t_p \geq \frac{V_{udp}}{0.9 \times 0.6 F_y d_c} \quad (\text{F.31})$$

$$V_{udp} = 71,26 \quad \text{ton}$$

$$F_{ydp} = 2,35 \quad \text{ton/cm}^2$$

$$d_c = 32 \quad \text{cm}$$

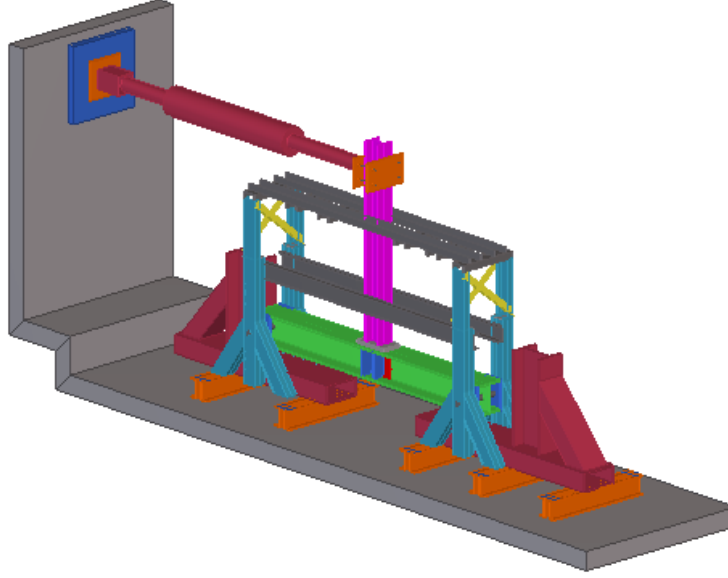
$$\phi = 1$$

Yukarıdaki değerler denklemde yerine konduğunda

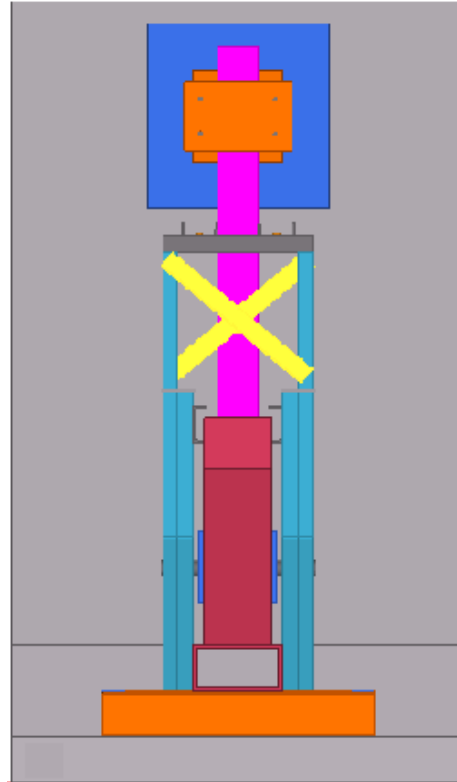
$$t_p = 1,58 \quad \text{cm} \quad \text{olarak hesap edilmiştir.}$$

EK G : Deney düzeneği 3D görseller

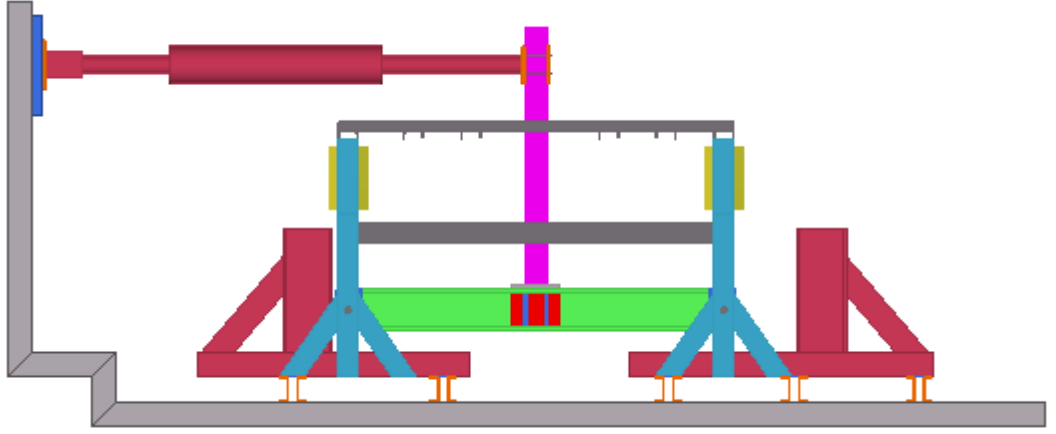
Deney düzeneğine 3D görüntüler aşağıda sunulmuştur



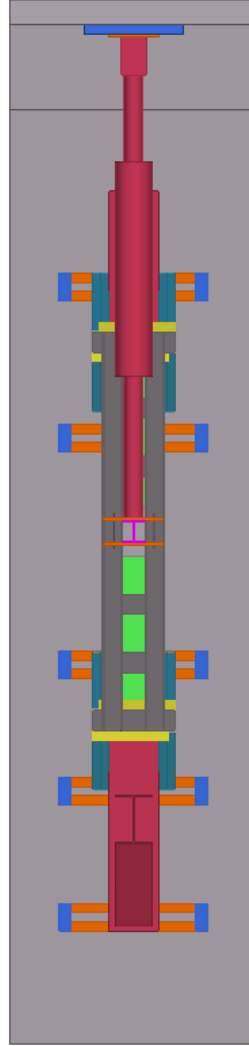
şekil G.1: Deney düzeneği 3D Görünüş.



şekil G.2: Deney düzeneği ön görünüş.

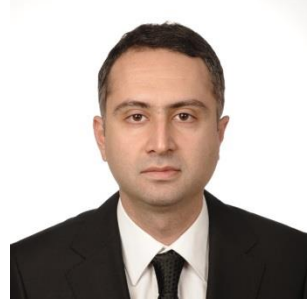


Şekil G.3: Deney düzeneği yan görünüş.



Şekil G.4: Deney düzeneği üst görünüş.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Alirıza İlker Akgönen

Doğum Tarihi ve Yeri: Kahramanmaraş

E-posta : ilkerakgonen@hotmail.com, ilkerakgonen@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2000
- **Yükseklisans** : Sütçüimam Üniversitesi, 2004

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Akgönen Alirıza İ.**, Yorgun C., Vatansever C., 2015. Cyclic behavior of extended end-plate connections with European steel shapes, *International Journal of Production Research*

