İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNCE SİNÜZOİDAL GÖVDELİ ÇELİK I KESİTLERDEN OLUŞTURULAN BİR KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMİNİN DAVRANIŞI

DOKTORA TEZİ

Recep AYDIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNCE SİNÜZOİDAL GÖVDELİ ÇELİK I KESİTLERDEN OLUŞTURULAN BİR KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMİNİN DAVRANIŞI

DOKTORA TEZİ

Recep AYDIN
(501062012)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nesrin YARDIMCI
Eş Danışman: Doç. Dr. Ercan YÜKSEL

HAZİRAN 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501062012 numaralı Doktora Öğrencisi **Recep AYDIN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"İnce Sinüzoidal Gövdeli Çelik I Kesitlerden Oluşturulan Bir Kolon-Kiriş Birleşiminin Davranışı"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Nesrin YARDIMCI** Yeditepe Üniversitesi	.....
Eş Danışman :	**Doç.Dr. Ercan YÜKSEL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Cavidan YORGUN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Bülent AKBAŞ Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü	.....
	Prof. Dr. Y. Cengiz TOKLU Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. A. Zafer ÖZTÜRK Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 07 Nisan 2014
Savunma Tarihi : 09 Haziran 2014

Babam,

Annem,

Ağabeylerim,

Buşra'm.

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği programında hazırlanan bu doktora tezinde, ince sinüzoidal gövdeli çelik I kesitli elemanların panel bölgesi farklı biçimlerde oluşturulmuş moment aktaran alın plakalı birleşimleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiş ve yeni bir birleşim türü önerilmiştir.

Tez çalışmamda değerli fikirlerinden yararlandığım, hoşgörülü yaklaşımı ile bana her zaman destek olan, bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren, tez danışmanlarımdan değerli hocam Prof. Dr. Nesrin YARDIMCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın başından sonuna kadar, hem deneysel hem de sayısal bölümde değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, karşılaşmış olduğumuz tüm zorluklarda bana destek olan ve yol gösteren, tez danışmanlarımdan değerli hocam Doç. Dr. Ercan YÜKSEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında maddi ve manevi olarak yanımda olan, her kararımda ve anımda beni destekleyen ve bugünlere getiren, haklarını asla ödeyemeyeceğim babam, annem ve ağabeylerime sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Mühendislik eğitimimin başladığı günden bugüne kadar tüm bilgi ve birikimini bana aktaran, bıkmadan - usanmadan yol gösteren, ağabeyim, idolüm, İnş. Yük. Müh. Bülent AYDIN'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışma ve SAP2000 yazılımıyla gerçekleştirilen sayısal çalışmalardaki yardımlarından dolayı İnş. Yük. Müh. Tansu GÖKÇE'ye teşekkür ederim.

Deneysel çalışma sırasındaki yardımlarından dolayı İnş. Yük. Müh. Haşim KISA ve İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Deney numunelerini tedarik eden Zeman Bauelemente ve Zbs Alfaçelik İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmalarına, eğitimim süresince bana destek veren Zbs Alfaçelik İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş Genel Müdürü Sn. A. Rıdvan MURAT ile Teklif ve Pazarlama Bölümü Müdürü Sn. Adem KAYI'ya katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın sayısal bölümünde kullanılan *ABAQUS* yazılımı, "SAFECAST: *Performance of innovative mechanical connections in precast building structures under seismic conditions*" isimli FP7 projesi kapsamında kiralanmış olup, bu projeye desteğinden dolayı teşekkür ederim. Sayısal bölümde kullanılan SAP2000 yazılımının lisansı da Aykon Mühendislik ve Mimarlık Limited Şirketine ait olup, firmaya desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Haziran 2014

Recep AYDIN
(İnşaat Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xxv**
ÖZET ..... **xxvii**
SUMMARY ..... **xxix**
1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI **1**
1.1 İnce Sinüzoidal Gövdeli Çelik I Elemanlar ve Bileşenleri 1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 4
1.3 Tezin Genel Yapısı 4
2. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR **7**
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **17**
3.1 Genel Giriş ve Tanımlar 17
3.2 Numune Özellikleri 21
3.3 Malzeme Deneyleri 27
3.3.1 t=3 mm kalınlıklı levhalara ait deneyler 27
3.3.2 t=15 mm kalınlıklı levhalara ait deneyler 28
3.3.3 t=20 mm kalınlıklı elemanlara ait deneyler 29
3.4 Sistem Deneyleri 30
3.4.1 Ölçüm düzeneği 31
3.4.2 Yükleme düzeneği 38
3.4.3 Yatay yerdeğiştirme çevrimleri 40
3.5 Deneysel Sonuçlar 43
3.5.1 EEPC-B numunesi deneyi 43
3.5.2 EEPC-HS numunesi deneyi 68
3.5.3 EEPC-H0 numunesi deneyi 93
3.5.4 EEPC-H2 numunesi deneyi 114
3.5.5 EEPC-SDS numunesi deneyi 138
3.5.6 EEPC-DDS numunesi deneyi 166
3.6 Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi 194
4. SAYISAL ÇALIŞMALAR **215**
4.1 Genel 215
4.2 ABAQUS Yazılımı İle Sonlu Elemanlar Analizi 215
4.2.1 Malzeme modeli 216
4.2.2 Sınır koşulları ve yükleme fonksiyonunun tanımı 218
4.2.3 Sonlu elemanlara bölme işlemi 219
4.2.4 Temas yüzeyleri 221
4.3 Sayısal Hesap ve Model Kalibrasyonları 222
4.3.1 EEPC-B numunesi 222

4.3.2 EEPC-HS numunesi 226
4.3.3 EEPC-H0 numunesi 230
4.3.4 EEPC-H2 numunesi 234
4.3.5 EEPC-SDS numunesi 238
4.3.6 EEPC-DDS numunesi 242
4.4 Eşdeğer Çubuk Sistem Modeli 246
4.5 Sayısal Çalışma Sonuçlarının Tartışılması 254
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 257
KAYNAKLAR 261
EKLER 267
ÖZGEÇMİŞ 287

KISALTMALAR

AISC : American Institute of Steel Construction
DBYBHY : Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EEPC : Extended End Plate Connection
EEPC-B : Extended End Plate Connection - Bare
EEPC-DDS : Extended End Plate Connection - Double Diagonal Stiffener
EEPC-H0 : Extended End Plate Connection - Plane Web
EEPC-H2 : Extended End Plate Connection - Extended Plane Web
EEPC-HS : Extended End Plate Connection - Horizontal Stiffener
EEPC-SDS : Extended End Plate Connection - Single Diagonal Stiffener
EN : Euro Norm
FEMA : Federal Emergency Management Agency
GMAW : Gas Metal Arc Welding
ITU : İstanbul Teknik Üniversitesi
SAC : Structural Engineers Association of California
SG : Strain Gauge
WT : Wellstegträge

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Kolon ve kiriş kesit özellikleri. 22
Çizelge 3.2 : Çelik çekme deneyi sonuçları. 30
Çizelge 3.3 : Yerdeğiştirme ölçerlerin konumları. 33
Çizelge 3.4 : Numunelerde kullanılan şekildeğiştirme ölçerler sayıları. 33
Çizelge 3.5 : Şekildeğiştirme ölçerlerin mesafeleri. 37
Çizelge 3.6 : SAC yükleme protokolü. 40
Çizelge 3.7 : Kritik burkulma yükleri. 142
Çizelge 4.1 : EEPC-DDS numunesi 1. şekildeğiştirme ölçer sırası için eğilme rijitliği. 251
Çizelge 4.2 : EEPC-DDS numunesi 2. şekildeğiştirme ölçer sırası için eğilme rijitliği. 252
Çizelge 4.3 : EEPC-DDS numunesi 3. şekildeğiştirme ölçer sırası için eğilme rijitliği. 254

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I eleman. 2
Şekil 1.2 : İnce sinüzoidal gövdeli çelik I elemanın üretimi. 3
Şekil 1.3 : İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli I elemanlar ile yapılmış bir sanayi yapısı. 3
Şekil 2.1 : İnce cidarlı çelik I elemanlar ile oluşturulmuş bir sanayi yapısı. 7
Şekil 2.2 : Farklı gövde formlarına sahip kesitler (Chan ve diğ., 2002). 8
Şekil 2.3 : Khalid ve diğ. (2004) tarafından incelenen farklı gövde formlarına sahip kirişler. 8
Şekil 2.4 : Yorulma çatlakları (Ibrahim ve diğ., 2006). 9
Şekil 2.5 : Trapez formlu gövdede burkulma şekilleri (Elgaaly ve diğ., 1996). 10
Şekil 2.6 : Başlıklar ve gövdede gerilme dağılımı (Yan-lin ve diğ., 2008). 10
Şekil 2.7 : Yorulma çatlağı (Sause ve diğ., 2006). 11
Şekil 2.8 : Farklı genişlikte gövde boşlukları (Kıymaz ve diğ., 2010). 12
Şekil 2.9 : Tekil olarak etkitilen yükler (Novak ve diğ., 2000). 12
Şekil 2.10 : Kısmı olarak etkitilen basınç yükü (Elgaaly ve diğ., 1997). 13
Şekil 2.11 : Farklı burkulma modları (Martins ve diğ., 2012). 14
Şekil 2.12 : Köprü kirişlerinde burkulma türleri (Nie ve diğ., 2013). 15
Şekil 2.13 : Köprü kirişlerinde göçme modları (Kövesdi ve diğ., 2011). 16
Şekil 3.1 : Numunelerin genel ve detay görünüşleri. 19
Şekil 3.2 : Numune tipik boyut ve kesit ölçüleri. 21
Şekil 3.3 : İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli I kesitlerin kesme kapasitesi hesabında kullanılan değişkenler (Kıymaz ve diğ., 2010). 23
Şekil 3.4 : İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli I kesitlerin eğilme momenti kapasitesi hesabında kullanılan değişkenler. 25
Şekil 3.5 : 3 mm kalınlıklı örneklere ait boyutlar ve deney düzeneği. 27
Şekil 3.6 : 3 mm kalınlı levhalarda çekme deneyleri. 28
Şekil 3.7 : 15 mm kalınlıklı örneklere ait boyutlar ve deney düzeneği. 28
Şekil 3.8 : 15 mm kalınlı levhalarda çekme deneyleri. 29
Şekil 3.9 : 20 mm kalınlıklı örneklere ait boyutlar ve deney düzeneği. 29
Şekil 3.10 : 20 mm kalınlı levhalarda çekme deneyleri. 30
Şekil 3.11 : Numune üzerinde yerdeğiştirme ölçerlerin konumları. 31
Şekil 3.12 : Yerdeğiştirme ölçerlerin konumlarını tanımlamak amacıyla kullanılan değişkenler. 32
Şekil 3.13 : Şekildeğiştirme ölçerlerin numuneler üzerindeki konumları. 34
Şekil 3.14 : Şekildeğiştirme ölçerlerin yerleşim planları. 36
Şekil 3.15 : Deney düzeneği. 39
Şekil 3.16 : Deneye hazır hale getirilmiş bir numune. 40
Şekil 3.17 : SAC yükleme çevrimleri. 41
Şekil 3.18 : Göreli kat ötelenmesi açısının belirlenmesinde kullanılan değişkenlerin tanımı. 41
Şekil 3.19 : Kiriş alt ucunda dönme hesabı. 43
Şekil 3.20 : EEPC-B numunesinin genel ve detay görünüşü. 44

Şekil 3.21 : EEPC-B numunesinde yerdeğiştirme adımları. 44
Şekil 3.22 : EEPC-B numunesinin 0.01 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 45
Şekil 3.23 : EEPC-B numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 46
Şekil 3.24 : EEPC-B numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 46
Şekil 3.25 : EEPC-B numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 47
Şekil 3.26 : EEPC-B numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 47
Şekil 3.27 : EEPC-B numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. .. 48
Şekil 3.28 : EEPC-B numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi. 49
Şekil 3.29 : EEPC-B numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 49
Şekil 3.30 : EEPC-B numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 50
Şekil 3.31 : EEPC-B numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi. .. 51
Şekil 3.32 : Çevrimsel enerji ve fiktif rijitlik tanımı. 51
Şekil 3.33 : EEPC-B numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjinin değişimi. 52
Şekil 3.34 : EEPC-B numunesinde rijitlik değişimi. 52
Şekil 3.35 : EEPC-B numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler. 53
Şekil 3.36 : EEPC-B / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 54
Şekil 3.37 : EEPC-B / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 55
Şekil 3.38 : EEPC-B / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 56
Şekil 3.39 : EEPC-B / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 57
Şekil 3.40 : EEPC-B / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 58
Şekil 3.41 : EEPC-B / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 59
Şekil 3.42 : EEPC-B / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 60
Şekil 3.43 : EEPC-B / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 61
Şekil 3.44 : EEPC-B / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 62
Şekil 3.45 : EEPC-B / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 63
Şekil 3.46 : EEPC-B / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 64
Şekil 3.47 : EEPC-B / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 65
Şekil 3.48 : EEPC-B / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 66
Şekil 3.49 : EEPC-B / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 67
Şekil 3.50 : EEPC-B / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 68
Şekil 3.51 : EEPC-HS numunesinin genel ve detay görünüşü. 69
Şekil 3.52 : EEPC-HS numunesinde yerdeğiştirme adımları. 69
Şekil 3.53 : EEPC-HS numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 71
Şekil 3.54 : EEPC-HS numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 71
Şekil 3.55 : EEPC-HS numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 72
Şekil 3.56 : EEPC-HS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 72
Şekil 3.57 : EEPC-HS numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 73
Şekil 3.58 : EEPC-HS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi. 74
Şekil 3.59 : EEPC-HS numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 74
Şekil 3.60 : EEPC-HS numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 75

Şekil 3.61 : EEPC-HS numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi. 75
Şekil 3.62 : EEPC-HS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjinin değişimi. 76
Şekil 3.63 : EEPC-HS numunesinde rijitlik değişimi. 76
Şekil 3.64 : EEPC-HS numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler. 77
Şekil 3.65 : EEPC-HS / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 78
Şekil 3.66 : EEPC-HS / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 79
Şekil 3.67 : EEPC-HS / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 80
Şekil 3.68 : EEPC-HS / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 81
Şekil 3.69 : EEPC-HS / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 82
Şekil 3.70 : EEPC-HS / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 83
Şekil 3.71 : EEPC-HS / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 84
Şekil 3.72 : EEPC-HS / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 85
Şekil 3.73 : EEPC-HS / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 86
Şekil 3.74 : EEPC-HS / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 87
Şekil 3.75 : EEPC-HS / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 88
Şekil 3.76 : EEPC-HS / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 89
Şekil 3.77 : EEPC-HS / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 90
Şekil 3.78 : EEPC-HS / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 91
Şekil 3.79 : EEPC-HS / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 92
Şekil 3.80 : EEPC-H0 numunesinin genel ve detay görünüşü. 93
Şekil 3.81 : EEPC-H0 numunesinde yerdeğiştirme adımları. 94
Şekil 3.82 : EEPC-H0 numunesinin 0.02 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 95
Şekil 3.83 : EEPC-H0 numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 96
Şekil 3.84 : EEPC-H0 numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 96
Şekil 3.85 : EEPC-H0 numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 97
Şekil 3.86 : EEPC-H0 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 97
Şekil 3.87 : EEPC-H0 numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 98
Şekil 3.88 : EEPC-H0 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi. 99
Şekil 3.89 : EEPC-H0 numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 99
Şekil 3.90 : EEPC-H0 numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 100
Şekil 3.91 : EEPC-H0 numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi. 101
Şekil 3.92 : EEPC-H0 numunesinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi. 101
Şekil 3.93 : EEPC-H0 numunesinde rijitlik değişimi. 102
Şekil 3.94 : EEPC-H0 numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler. 102
Şekil 3.95 : EEPC-H0 / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 103
Şekil 3.96 : EEPC-H0 / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 104
Şekil 3.97 : EEPC-H0 / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 105
Şekil 3.98 : EEPC-H0 / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 106
Şekil 3.99 : EEPC-H0 / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 107
Şekil 3.100 : EEPC-H0 / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 108

Şekil 3.101 : EEPC-H0 / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 109
Şekil 3.102 : EEPC-H0 / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 110
Şekil 3.103 : EEPC-H0 / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 111
Şekil 3.104 : EEPC-H0 / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 112
Şekil 3.105 : EEPC-H0 / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 113
Şekil 3.106 : EEPC-H2 numunesinin genel ve detay görünüşü. 114
Şekil 3.107 : EEPC-H2 numunesinde yerdeğiştirme adımları. 115
Şekil 3.108 : EEPC-H2 numunesinin 0.02 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. ... 116
Şekil 3.109 : EEPC-H2 numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. ... 117
Şekil 3.110 : EEPC-H2 numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. ... 117
Şekil 3.111 : EEPC-H2 numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. ... 118
Şekil 3.112 : EEPC-H2 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 118
Şekil 3.113 : EEPC-H2 numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.. 119
Şekil 3.114 : EEPC-H2 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi. 120
Şekil 3.115 : EEPC-H2 numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 121
Şekil 3.116 : EEPC-H2 numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 121
Şekil 3.117 : EEPC-H2 numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi. 122
Şekil 3.118 : EEPC-H2 numunesinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi. 122
Şekil 3.119 : EEPC-H2 numunesinde rijitlik değişimi. 123
Şekil 3.120 : EEPC-H2 numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler. 123
Şekil 3.121 : EEPC-H2 / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 124
Şekil 3.122 : EEPC-H2 / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 125
Şekil 3.123 : EEPC-H2 / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 126
Şekil 3.124 : EEPC-H2 / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 127
Şekil 3.125 : EEPC-H2 / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 128
Şekil 3.126 : EEPC-H2 / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 129
Şekil 3.127 : EEPC-H2 / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 130
Şekil 3.128 : EEPC-H2 / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 131
Şekil 3.129 : EEPC-H2 / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 132
Şekil 3.130 : EEPC-H2 / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 133
Şekil 3.131 : EEPC-H2 / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 134
Şekil 3.132 : EEPC-H2 / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 135
Şekil 3.133 : EEPC-H2 / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 136
Şekil 3.134 : EEPC-H2 / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 137
Şekil 3.135 : EEPC-H2 / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 138

Şekil 3.136 : EEPC-SDS numunesinin genel ve detay görünüşü. 139
Şekil 3.137 : EEPC-SDS numunesinde yerdeğiştirme adımları. 139
Şekil 3.138 : EEPC-SDS numunesinin 0.015 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 141
Şekil 3.139 : EEPC-SDS numunesinin çapraz elemanında kuvvet değişimi. 143
Şekil 3.140 : EEPC-SDS numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.. 143
Şekil 3.141 : EEPC-SDS numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.. 144
Şekil 3.142 : EEPC-SDS numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.. 145
Şekil 3.143 : EEPC-SDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 145
Şekil 3.144 : EEPC-SDS numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 146
Şekil 3.145 : EEPC-SDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi. 147
Şekil 3.146 : EEPC-SDS numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 147
Şekil 3.147 : EEPC-SDS numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 148
Şekil 3.148 : EEPC-SDS numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi. 149
Şekil 3.149 : EEPC-SDS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi..... 149
Şekil 3.150 : EEPC-SDS numunesinde rijitlik değişimi. 150
Şekil 3.151 : EEPC-SDS numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler. 150
Şekil 3.152 : EEPC-SDS / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 151
Şekil 3.153 : EEPC-SDS / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 152
Şekil 3.154 : EEPC-SDS / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 153
Şekil 3.155 : EEPC-SDS / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 154
Şekil 3.156 : EEPC-SDS / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 155
Şekil 3.157 : EEPC-SDS / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 156
Şekil 3.158 : EEPC-SDS / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 157
Şekil 3.159 : EEPC-SDS / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 158
Şekil 3.160 : EEPC-SDS / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. ... 159
Şekil 3.161 : EEPC-SDS / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.. 160
Şekil 3.162 : EEPC-SDS / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 161
Şekil 3.163 : EEPC-SDS / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 162
Şekil 3.164 : EEPC-SDS / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 163
Şekil 3.165 : EEPC-SDS / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 164
Şekil 3.166 : EEPC-SDS / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 165
Şekil 3.167 : EEPC-SDS / SG-48 ve SG-49 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 166
Şekil 3.168 : EEPC-DDS numunesinin genel ve detay görünüşü. 167
Şekil 3.169 : EEPC-DDS numunesinde yerdeğiştirme adımları. 167
Şekil 3.170 : EEPC-DDS numunesinin 0.015 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 168
Şekil 3.171 : EEPC-DDS numunesinin 0.02 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 169
Şekil 3.172 : EEPC-DDS numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 170

Şekil 3.173 : EEPC-DDS numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 171
Şekil 3.174 : EEPC-DDS numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu. 172
Şekil 3.175 : EEPC-DDS numunesinin sağ doğrultulu diyagonal elemanlarında kuvvet değişimi. 172
Şekil 3.176 : EEPC-DDS numunesinin sol doğrultulu diyagonal elemanlarında kuvvet değişimi. 173
Şekil 3.177 : EEPC-DDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 173
Şekil 3.178 : EEPC-DDS numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi. 174
Şekil 3.179 : EEPC-DDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi..... 175
Şekil 3.180 : EEPC-DDS numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 176
Şekil 3.181 : EEPC-DDS numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri. 176
Şekil 3.182 : EEPC-DDS numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi. 177
Şekil 3.183 : EEPC-DDS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi. 177
Şekil 3.184 : EEPC-SDS numunesinde rijitlik değişimi..... 178
Şekil 3.185 : EEPC-DDS numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler..... 178
Şekil 3.186 : EEPC-DDS / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 179
Şekil 3.187 : EEPC-DDS / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 180
Şekil 3.188 : EEPC-DDS / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 181
Şekil 3.189 : EEPC-DDS / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 182
Şekil 3.190 : EEPC-DDS / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 183
Şekil 3.191 : EEPC-DDS / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 184
Şekil 3.192 : EEPC-DDS / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 185
Şekil 3.193 : EEPC-DDS / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 186
Şekil 3.194 : EEPC-DDS / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. .. 187
Şekil 3.195 : EEPC-DDS / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi. 188
Şekil 3.196 : EEPC-DDS / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri..... 189
Şekil 3.197 : EEPC-DDS / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri..... 190
Şekil 3.198 : EEPC-DDS / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri..... 191
Şekil 3.199 : EEPC-DDS / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri..... 192
Şekil 3.200 : EEPC-DDS / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri..... 193
Şekil 3.201 : EEPC-DDS / SG-46, SG-47, SG-48 ve SG-49 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri..... 194
Şekil 3.202 : EEPC-B ve EEPC-HS / SG-9 şekildeğiştirme ölçer grafikleri. 196
Şekil 3.203 : EEPC-B ve EEPC-HS numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri..... 197
Şekil 3.204 : EEPC-B ve EEPC-HS numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri..... 198
Şekil 3.205 : EEPC-B ve EEPC-HS numunelerinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkileri..... 198

Şekil 3.206 : EEPC-B ve EEPC- HS numunelerinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi. 199
Şekil 3.207 : EEPC-B ve EEPC- HS numunelerinde rijitlik değişimi. 199
Şekil 3.208 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 / SG-9 şekildeğiştirme ölçer grafikleri. 201
Şekil 3.209 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 202
Şekil 3.210 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 203
Şekil 3.211 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 numunelerinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkileri. 203
Şekil 3.212 : EEPC-H0 ve EEPC- H2 numunelerinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi. 204
Şekil 3.213 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 numunelerinde rijitlik değişimi. 204
Şekil 3.214 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS / SG-9 şekildeğiştirme ölçer grafikleri... 206
Şekil 3.215 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 207
Şekil 3.216 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 208
Şekil 3.217 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS numunelerinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkileri. 208
Şekil 3.218 : EEPC-SDS ve EEPC- DDS numunelerinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi. 209
Şekil 3.219 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS numunelerinde rijitlik değişimi. 209
Şekil 3.220 : Tüm numunelerde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 210
Şekil 3.221 : Tüm numunelerin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkileri. .. 211
Şekil 3.222 : Tüm numunelerde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi. 211
Şekil 3.223 : Tüm numunelerde rijitlik değişimi. 212
Şekil 3.224 : Tüm numunelerde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 213
Şekil 3.225 : Tüm numunelerin kiriş taban kesitinde moment - dönme zarf eğrileri. 214
Şekil 4.1 : Numunelere ait şekildeğiştirme - gerilme ilişkileri. 217
Şekil 4.2 : Numunelere etkitilen yerdeğiştirme çevrimleri. 218
Şekil 4.3 : Numunelere ait sonlu eleman ağları. 220
Şekil 4.4 : EEPC-B numunesine ait deforme olmuş görünüş. 222
Şekil 4.5 : EEPC-B numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 223
Şekil 4.6 : EEPC-B numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 223
Şekil 4.7 : EEPC-B numunesi hasar durumları. 224
Şekil 4.8 : EEPC-B numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi. 224
Şekil 4.9 : EEPC-B numunesinde rijitliklerin değişimi. 225
Şekil 4.10 : Sayısal modelde kiriş alt ucunda dönme hesabı. 225
Şekil 4.11 : EEPC-B numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri. 226
Şekil 4.12 : EEPC-HS numunesine ait deforme olmuş görünüş. 226
Şekil 4.13 : EEPC-HS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 227
Şekil 4.14 : EEPC-HS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 227
Şekil 4.15 : EEPC-HS numunesi hasar durumları. 228
Şekil 4.16 : EEPC-HS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi. 228
Şekil 4.17 : EEPC-HS numunesinde rijitliklerin değişimi. 229
Şekil 4.18 : EEPC-HS numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri. 230

Şekil 4.19 : EEPC-H0 numunesine ait deforme olmuş görünüş. 230
Şekil 4.20 : EEPC-H0 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 231
Şekil 4.21 : EEPC-H0 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 231
Şekil 4.22 : EEPC-H0 numunesi hasar durumu. 232
Şekil 4.23 : EEPC-H0 numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi. 232
Şekil 4.24 : EEPC-H0 numunesinde rijitliklerin değişimi. 233
Şekil 4.25 : EEPC-H0 numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri. 233
Şekil 4.26 : EEPC-H2 numunesine ait deforme olmuş görünüş. 234
Şekil 4.27 : EEPC-H2 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 235
Şekil 4.28 : EEPC-H2 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 235
Şekil 4.29 : EEPC-H2 numunesi hasar durumu. 236
Şekil 4.30 : EEPC-H2 numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi. 236
Şekil 4.31 : EEPC-H2 numunesinde rijitliklerin değişimi. 237
Şekil 4.32 : EEPC-H2 numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri. 237
Şekil 4.33 : EEPC-SDS numunesine ait deforme olmuş görünüş. 238
Şekil 4.34 : EEPC-SDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 239
Şekil 4.35 : EEPC-SDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 239
Şekil 4.36 : EEPC-SDS numunesi hasar durumları. 240
Şekil 4.37 : EEPC-SDS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi. 240
Şekil 4.38 : EEPC-SDS numunesinde rijitliklerin değişimi. 241
Şekil 4.39 : EEPC-SDS numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri. 241
Şekil 4.40 : EEPC-DDS numunesine ait deforme olmuş görünüş. 242
Şekil 4.41 : EEPC-DDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri. 243
Şekil 4.42 : EEPC-DDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri. 243
Şekil 4.43 : EEPC-DDS numunesi hasar durumları. 244
Şekil 4.44 : EEPC-DDS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi. 244
Şekil 4.45 : EEPC-DDS numunesinde rijitliklerin değişimi. 245
Şekil 4.46 : EEPC-DDS numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri. 245
Şekil 4.47 : EEPC-DDS numunesi çubuk sistem modeli. 246
Şekil 4.48 : EEPC-DDS numunesi için deneysel zarf eğrisi ve itme analizi sonucunun karşılaştırılması. 247
Şekil 4.49 : EEPC-DDS numunesi için deneysel zarf eğrisi ve dayanım azaltma çarpanı kullanılarak elde edilmiş itme analizi sonucunun karşılaştırılması. 248
Şekil 4.50 : EEPC-DDS numunesi hasar ilerleyişi. 249
Şekil 4.51 : EEPC-DDS numunesi 1. şekildeğiştirme ölçer sırası için elde edilen moment - eğrilik ilişkisi. 250
Şekil 4.52 : EEPC-DDS numunesi 2. şekildeğiştirme ölçer sırası için elde edilen moment - eğrilik ilişkisi. 252
Şekil 4.53 : EEPC-DDS numunesi 3. şekildeğiştirme ölçer sırası için elde edilen moment - eğrilik ilişkisi. 253
Şekil A.1 : EEPC-B / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri. 269
Şekil A.2 : EEPC-B / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri. 270
Şekil A.3 : EEPC-B / SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerleri. 270
Şekil A.4 : EEPC-B / SG-11 şekildeğiştirme ölçeri. 271
Şekil A.5 : EEPC-HS / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri. 272

Şekil A.6 : EEPC-HS / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri. 273
Şekil A.7 : EEPC-HS / SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerleri.. 273
Şekil A.8 : EEPC-HS / SG-11 şekildeğiştirme ölçeri. 274
Şekil A.9 : EEPC- H0 / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri. 275
Şekil A.10 : EEPC- H0 / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri. 276
Şekil A.11 : EEPC- H0 / SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerleri. 276
Şekil A.12 : EEPC- H0 / SG-11 şekildeğiştirme göreli kat ötelenmesi ilişkisi..... 277
Şekil A.13 : EEPC- H2 / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri. 278
Şekil A.14 : EEPC- H2 / SG-42, SG-43, SG-44 ve SG-45 şekildeğiştirme ölçerleri. 279
Şekil A.15 : EEPC- H2 / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri. 280
Şekil A.16 : EEPC- SDS / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri. 281
Şekil A.17 : EEPC- SDS / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri. 282
Şekil A.18 : EEPC- DDS / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri. 283
Şekil A.19 : EEPC- DDS / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri. 284
Şekil A.20 : EEPC- DDS / SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerleri. 284
Şekil A.21 : EEPC- DDS / SG-11 şekildeğiştirme ölçeri. 285

SEMBOL LİSTESİ

A : Alan
$A_ç$: Çapraz elemanın enkesit alanı
A_g : I profil gövde alanı
b : I profil başlık genişliği
b_b : Kiriş elemanı başlık genişliği
b_c : Kolon elemanı başlık genişliği
D : Plak rijitliği
E : Elastisite modülü
$E_ç$: Çapraz elemanın elastisite modülü
EI : Eğilme rijitliği
F : Kuvvet
f_p : Orantılılık sınırı
f_u : Kopma gerilmesi
f_y : Akma gerilmesi
h_g : I profil gövde yüksekliği
h_t : I profil toplam yüksekliği
i_x : Kesitin güçlü eksen etrafındaki atalet yarıçapı
I_x : Kesitin güçlü eksen etrafındaki atalet momenti
i_y : Kesitin zayıf eksen etrafındaki atalet yarıçapı
I_y : Kesitin zayıf eksen etrafındaki atalet momenti
L_b : Burkulma boyu
$L_ç$: Çapraz eleman boyu
L_k : Kiriş boyu
M : Moment
M_p : Plastik moment taşıma kapasitesi
P_{cr} : Kritik burkulma yükü
s : Burkulma boyu katsayısı
t : Plaka kalınlığı
t_b : I profil başlık kalınlığı
t_g : I profil gövde kalınlığı
W_{px} : Güçlü eksen plastik mukavemet momenti
WTC : 3 mm gövde kalınlığına sahip ince sinüzoidal gövdeli I profil
x_t : Alın plakasına yerleştirilen iki şekildeğiştirme ölçer arası mesafe
X.. : Şekildeğiştirme ölçerlerin x ekseni doğrultusunda mesafeleri
Y.. : Şekildeğiştirme ölçerlerin y ekseni doğrultusunda mesafeleri
Z.. : Şekildeğiştirme ölçerlerin z ekseni doğrultusunda mesafeleri
ε : Birim şekildeğiştirme
ε_1 : En büyük asal birim şekildeğiştirme
ε_2 : En küçük asal birim şekildeğiştirme
$\varepsilon_ç$: Çapraz elemandaki birim şekildeğiştirme
ε_g : Gerçek birim şekildeğiştirme
ε_{nom} : Nominal birim şekildeğiştirme
ε_x : X doğrultusunda oluşan birim şekildeğiştirme

ε_{xy} : Kayma şekildeğiştirmesi
ε_y : Y doğrultusunda oluşan birim şekildeğiştirme
α : Çubuk model malzeme düzeltme çarpanı
δ_a : Alın plakasının sol kenarının düşey hareketi
δ_b : Alın plakasının sağ kenarının düşey hareketi
δ_k : Kiriş ucu düzlem içi yerdeğiştirmesi
θ : Etkin göreli kat ötelenmesi
θ_k : Kiriş alın plakası dönme değeri
σ_g : Gerçek gerilme değeri
σ_{nom} : Nominal gerilme değeri
σ_y : Çelik malzeme akma gerilmesi
$\sigma_ç$: Çapraz eleman üzerindeki gerilme
χ_c : Burkulma nedeni ile dayanım azaltma katsayısı
$\chi_{c,g}$: Genel burkulma nedeni ile dayanım azaltma katsayısı
$\chi_{c,l}$: Bölgesel burkulma nedeni ile dayanım azaltma katsayısı
$\lambda_{c,g}$: Genel burkulma narinliği
$\lambda_{c,g}$: Bölgesel burkulma narinliği
$\tau_{cr,g}$: Genel gövde burkulma gerilmesi
$\tau_{cr,l}$: Yerel gövde burkulma gerilmesi
γ_M : Dayanım azaltma katsayısı

İNCE SİNÜZOİDAL GÖVDELİ ÇELİK I KESİTLERDEN OLUŞTURULAN BİR KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMİNİN DAVRANIŞI

ÖZET

Düzlem sac levhadan oluşturulmuş başlıklar ile sinüs dalgası formundaki ince gövdenin robotik kaynakla birleştirilmesiyle oluşturulan I profiller son yıllarda uygulamada yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu tez çalışmasında, ince sinüs gövdeli I profillerin birleştiği dış düğüm noktaları deneysel ve sayısal olarak incelenmiş ve önemli davranış özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Kiriş, kolon başlığına alın plakalı ve civatalı olarak moment aktaran tarzda bağlanmıştır. Deneysel çalışmada 6 adet 1/1 ölçekli kolon - kiriş birleşim bölgesi İTÜ İnşaat Fakültesi - Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda tersinir tekrarlı yerdeğiştirme çevrimleri etkisinde incelenmiştir.

Numuneler, güçlü kolon - zayıf kiriş prensibine dayalı olarak üretilmiştir. Kolon elemanların başlık genişliği ve kalınlığı kiriş elemana göre daha büyüktür. Kolon ve kiriş üretiminde kullanılan sinüs formlu gövde levhaları 3 mm kalınlığa sahiptir. Kolonlar üzerine eksenel kuvvet taşıma kapasitelerinin yaklaşık % 5'i mertebesinde eksenel kuvvet etkitilmiştir.

Çalışmanın ana amacı, panel bölgesinde gerçekleştirilen farklı uygulamaların kolon - kiriş birleşimi üzerindeki etkilerinin ortaya çıkarılmasıdır. Panel bölgesinin oluşturulması bakımından birbirinden farklı olan 6 numuneden ilki, panel bölgesinde hiçbir önlemin alınmadığı *EEPC-B* referans numunesidir. İkinci numune *EEPC-HS'* nin, *EEPC-B* numunesinden farkı kiriş başlıkları hizasında dört adet düşey berkitme levhası içermesidir. *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerinde panel bölgesinde düzlem sac levha kullanılmıştır. *EEPC-H2* numunesinin *EEPC-H0*'dan farkı, düzlem levhanın panel bölgesinin her iki tarafına taşırılmış olmasıdır. *EEPC-H0* numunesi uygulamada kullanılan durumu temsil etmektedir. *EEPC-SDS* ve *EEPC-DDS* numunelerinde, panel bölgesi içinde de sinüs formlu gövde devam etmekte ancak panel bölgesinin her iki tarafına tek ya da çift çapraz elemanlar eklenmektedir. Bu çapraz elemanlar, kiriş başlık ve süreklilik plakalarında kullanılan levhalarla aynı kalınlığa sahip olup, sinüs formlu gövde levhasına temas etmemektedir. Bu iki numune, önerilen yeni birleşim şeklini temsil etmektedir.

Deneysel çalışmada, düğüm noktası performans deneylerinde yaygın olarak kullanılan SAC yerdeğiştirme protokolü kullanılmıştır. Numuneler üzerine yerleştirilen çok sayıdaki yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ölçer ile farklı kesitlerde gerçekleşen yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme büyüklükleri kaydedilmiştir.

EEPC-B ve *EEPC-HS* numuneleri, benzer davranış göstermiş olup, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde panel bölgesi içinde kalan sinüs levhanın formu bozulmuştur. Her iki numunede de kiriş eğilme momenti taşıma kapasitesinin yaklaşık %45'i kullanılabilmiştir. *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numuneleri de birbirleri ile benzer davranış sergilemiş, panel bölgesinin göreli olarak daha rijit davranması neticesinde yapısal hasarlar ağırlıklı olarak kiriş uç bölgesine ötelenmiştir. *EEPC-H0*

numunesinde ayrıca kolonun panel bölgesine komşu olan kesitlerinde de hasar gözlenmiştir. Bu numunelerde kiriş eğilme momenti taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak tamamı kullanılabilmiştir. *EEPC-SDS* numunesinde 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde panel bölgesindeki çapraz elemanlarda burkulma gözlenmiştir. Bu aşamaya kadar dayanım ve rijitlik bakımından *EEPC-SDS* numunesi, *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerine benzer davranmış göstermiştir. *EEPC-SDS* numunesinde 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde pek çok yapısal hasar ortaya çıkmıştır. *EEPC-DDS* numunesinde ise yerdeğiştirme protokolü tamamlanana kadar panel bölgesindeki çapraz elemanlarda burkulma yaşanmamıştır. Bu numunede 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde kiriş ve kolonun panel bölgesi dışında kalan kısımlarında ilk kaynak çatlakları oluşmuştur.

Deneysel olarak incelenen tüm numunelerin *ABAQUS* sonlu eleman yazılımı kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. İnce sinüs gövde ve düzlem başlıklardan oluşan kesitler, *ABAQUS* modelinde bütünleşik kesit olarak tanımlanmıştır. Altı farklı durum için gerçekleştirilen sayısal çözümlemelerde ilk rijitlik, akma, akma sonrası rijitlik ve boşalma kolu eğimleri deneysel çalışma sonuçları ile uyumlu olarak elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal yolla elde edilen çevrimler ayrıklaştırılarak her çevrimde tüketilen enerjiler ve rijitlikler karşılaştırmaları yapılmıştır. İkinci bir sayısal çalışma olarak, kolon - kiriş birleşim bölgesinin eşdeğer çubuk sistem modeli oluşturularak itme analizi uygulamaları yapılmıştır.

Panel bölgesinin göreli olarak daha rijit davrandığı *EEPC-H0*, *EEPC-H2*, *EEPC-SDS* ve *EEPC-DDS* numunelerinde, 0.015 - 0.020 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde sünizoidal gövdeyi başlıklara bağlayan kaynak dikişlerinde ilk çatlaklar gözlenmiş, 0.030 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde de önemli yapısal hasarlar oluşmuştur.

Mevcut yönetmelik ve yayınlarda kolon ve kiriş elemanların eğilme momenti ve kesme kuvveti taşıma kapasiteleri için tanımlanan ifadeler, çalışılan kesitler için uygun sonuçlar vermiştir. *EEPC-H0*, *EEPC-H2* numunelerinde yapıldığı gibi, panel bölgesinde kolon gövdesinin göreli olarak daha kalın düzlem levha ile oluşturulması ya da *EEPC-SDS* ve *EEPC-DDS* numunelerinde yapıldığı gibi, panel bölgesinde kolonun ince sinüzoidal gövdesi korunarak ilave çapraz elemanlar kullanılması ile rijit düğüm noktası elde edilebilmektedir.

Rijit düğüm noktası elde edilmesine yönelik olarak kullanılabilecek bu dört farklı panel bölgesi teşkil biçiminde de tasarım felsefesine uygun olarak kiriş uç kesiti plastikleşmektedir. Deneysel olarak belirlenen ve farklı hasar durumlarına karşı gelen etkin göreli kat ötelenmesi sınırları tasarımda kullanılabilecek sınır değerler olarak önerilmektedir.

PERFORMANCE OF A BEAM-TO-COLUMN CONNECTION OF THIN SINUSOIDALLY CORRUGATED WEB I SECTIONS

SUMMARY

Corrugated web cross sections, which are composed of flat plate flanges and thin corrugated web plate through the continuous welding, are being used mostly for the members of long span portal frames and bridges for the recent years. Though the cross section has thin web, the corrugation provides enhanced shear stability and eliminates the need for transverse stiffeners as well as the higher out of plane stiffness of the cross section. Therefore its sectional capacity to resist bending moment will be increased significantly. These type sections also allow for the reduction of self-weight and increase load capacity. Due to the high structural efficiency and relatively simple production technique, the thin walled corrugated web girder has been increasingly adapted in several sectors of construction such as bridges, hangars and industrial facilities. Such kind of cross sections may be used as roof or slab beams or as components subjected to axial forces without any limitations in terms of construction.

The thin web of 2-3 mm afford a significant weight reduction compared with hot rolled profiles or build-up sections. Thanks to good distribution of mass within the cross-section those girders can be characterized by high bending capacity with relatively low self weight.

There is a big gap in the literature about cyclic behavior of the corrugated web section's connections. Although flat plate type panel zone solution is being used in the practice, it is not found out a published experimental or theoretical research work about its performance for in-plane cyclic loading.

In this study, beam-to-column connections of sinusoidally corrugated web I sections have been studied by means of the experimental and therotical methods to reveale the important behavioral characteristics. Beam element is connected to column element with high strenght bolts as moment resisting style. In the experimental part, six dissimilar 1/1 scaled beam-to-column connections have been tested under cyclic displacement loading at the Structural and Earthquake Engineering Laboratory of Istanbul Technical University (ITU).

The specimens are produced based on "*strong column-weak beam*" principle. In this context, the flange width and thickness of the column are bigger than the beam. Sinusoidally corugated webs that are used in the production of the column and beam have a thickness of 3 mm. The sections of WTC333/250-20 for columns and WTC333/220-15 for beams are chosen from the producer's catalogues. The column and beam sections, dimensions of the stiffeners, end plates and ribs are chosen same for all specimens. The only difference between the specimens is type of the panel zones.

The main aim of this thesis is to detect the effects of different panel zone applications on the beam-column connection behaviour. The first specimen is named as *EEPC-B.* Although it is not a realistic case for the practice; to obtain a lower reference response, no stiffeners are used in the panel zone for this specimen. Column web in

the panel zone is formed with the corrugated web as rest of the column web. The second specimen *EEPC-HS* has 4 stiffeners between the column flanges which are surrounding the panel zone. The stiffeners are not welded to the sinusoidal corrugated web because of corrugated web element's relatively smaller thickness. The unique difference between *EEPC-B* and *EEPC-HS* is the stiffeners. For the third specimen of *EEPC-H0*, the thin-walled corrugated web in the panel zone is replaced with relatively thicker flat plates. Continuous stiffeners at the left and right sides of the connection are used between the column flanges in *EEPC-H0*. The same principle is considered for the fourth specimen of *EEPC-H2*. The flat plate used in the panel zone is extended to the column web at both sides and totally four stiffeners are used between the column flanges. The specimen of *EEPC-H0* represents the current application style used in the practice. At the fifth specimen *EEPC-SDS*, the panel zone of *EEPC-HS* is developed with single brace member at both sides. The diagonal braces have the same thickness with beam flange and are not welded to thin-walled web because of its sinusoidal geometry and thickness. The sixth specimen of *EEPC-DDS* is similar to *EEPC-SDS* but it has double diagonal bracings at both sides of the panel zone.

The beam-to-column connection testing setup which is available in the laboratory has been used in the experimental work. A persistent axial force of 140 kN which corresponds to approximately 5% of the axial load bearing capacity, is applied to the column by using the static oil jack. Sixteen TML type displacement transducers, one load cell and wide range of uniaxial and multi-axial strain gauges are used in each test to record the displacement and strain data.

The displacement pattern used in the cyclic tests is in accordance with the SAC Protocol defined to qualify beam-to-column moment connections. The protocol consists of stepwise increasing deformation cycles. The interstory drift angles used in the protocol are defined as the beam deflection divided by the beam length.

EEPC-B and *EEPC-HS* specimens have demonstrated almost similar behavior and the sinusoidal web in the panel zone of the specimens deformed at the interstorey drift angle of 0.03 radians. No welding damages has been observed in the panel zone of these samples. Approximately 45% of beam sectional capacity in bending could be used for both samples. *EEPC-H0* and *EEPC-H2* specimens have shown similar behaviors with each other, too. Because of the relatively rigid panel zones of these specimens, the structural damage is accumulated mainly at the beam end. Also some damage has been observed on the column section that is adjacent to the panel zone in *EEPC-H0*. The first structural damage is observed at the interstorey drift angle of 0.02 radians as welding cracks in these specimens. The full sectional beam capacity in bending could be used in *EEPC-H0* and *EEPC-H2* specimens. In the testing of *EEPC-SDS*, bucking of the diagonal braces in the panel zone and cracks on web to flange fillet welding are observed at the insterstorey drift angle of 0.03 radians. Prior to this drift angle, *EEPC-SDS* specimen has almost same behaviour with *EEPC-H0* and *EEPC-H2*. The full sectional beam capacity in bending is also used in this specimen. It is not observed buckling of the diagonal bracings used in *EEPC-DDS* till the end of the loading pattern. The first welding cracks have been observed on the beam and column sections which are adjacent to the panel zone at the interstorey drift angle of 0.015 radians. The specimen of *EEPC-DDS* exhibited the most rigid behavior compared with the other specimens. Also it is not measured any plastic deformation in the panel zone of this specimen.

Finite element analysis of the moment resisting beam to columns connection of the corrugated web I sections is carried out by using the *ABAQUS* software to simulate

the experimental behavior of the connections. The section which is composed of flat flange plates and sinusoidally corrugated web plate could be defined as an unique section in the *ABAQUS* model. The welded and bolted connections at the therotical model are optimised with the *tie*, *coupling* and *connector elements* which are available in the program. The mesh size of the finite elements is optimized respect to the preliminary work in terms of the computer capacity, execution time and the robustness of the results. The boundary conditions of the experimental study are reflected to the finite element models. The displacement pattern used in the experimental work is assigned to the *ABAQUS* model as the support settlements. The material nonlinearities, nonlinear effects of the large displacements and nonlinear interaction along the contacting parts are considered in the finite element model.

Analytical results show a satisfactory converges with the experimental results. According to load-displacement and beam bottom end moment-rotation curves obtained from the therotical analysis; initial rigidity, yielding, post-yielding and unloading curves are quite compatible with the results of the experiments for each specimens. The load-displacement curves obtained from the therotical and experimantal studies are discretized with an existing software developed in Matlab to compare the dissipated energies and the lateral stiffness. The results obtained are comparable with each other.

In addition to the numerical analyses performed by *ABAQUS*, a simple frame model has been developed with *SAP2000* package for the specimen of *EEPC-DDS* which exhibits the most rigid panel behaviour. The material and geometric type nonlinearities have been accounted in this frame model. Nonlinear behavior of the beam and column is represented by the fiber model approach. The analytical load-displacement curve obtained from the model is compared with the envelope curve of the hysteretic load-displacement cycles. A fairly good correlation is existing between the results prior to the occurance of web-to-flange fillet weldings.

In general, the first welding crack between web and flanges in the cross section has been observed at the interstorey drift angle of 0.015 - 0.02 radians for specimens of *EEPC-H0*, *EEPC-H2*, *EEPC-SDS* and *EEPC-DDS* which have relatively rigid panel zone. Substantial amount of structural damages have been observed at the interstorey drift angle of 0.03 radians for these specimens. Also for *EEPC-B* and *EEPC-HS* specimens, significant amount of structural damages have occurred at the interstorey drift angle of 0.03 radian, too. The couples of *EEPC-B* and *EEPC-HS*, *EEPC-H0* and *EEPC-H2*, *EEPC-SDS* and *EEPC-DDS* perform comparable with each other before the important structural damages occur. So, it is observed very limited enhancement in the behavior of *EEPC-HS* compared with *EEPC-B*. It is seen that there is no explicit variance between the behaviors of specimens *EEPC-H0* and *EEPC-H2*. As an important result is that there is no plastic deformation in the panel zone for the specimen of *EEPC-DDS.*

It is attained to bending capacity of the beam end sections of *EEPC-H0*, *EEPC-H2*, *EEPC-SDS* and *EEPC-DDS* specimens being in agreement with the design principal. The experimentally obtained interstorey drift angles corresponding to distinct damage conditions are proposed as limit values to use in design.

1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

Yapı sistemlerinin tasarımında dikkate alınan en önemli iki kriter güvenlik ve ekonomidir. Öngörülen güvenlik düzeyi sağlanırken, malzeme ve işçilik maliyetlerinin de en az olması istenir.

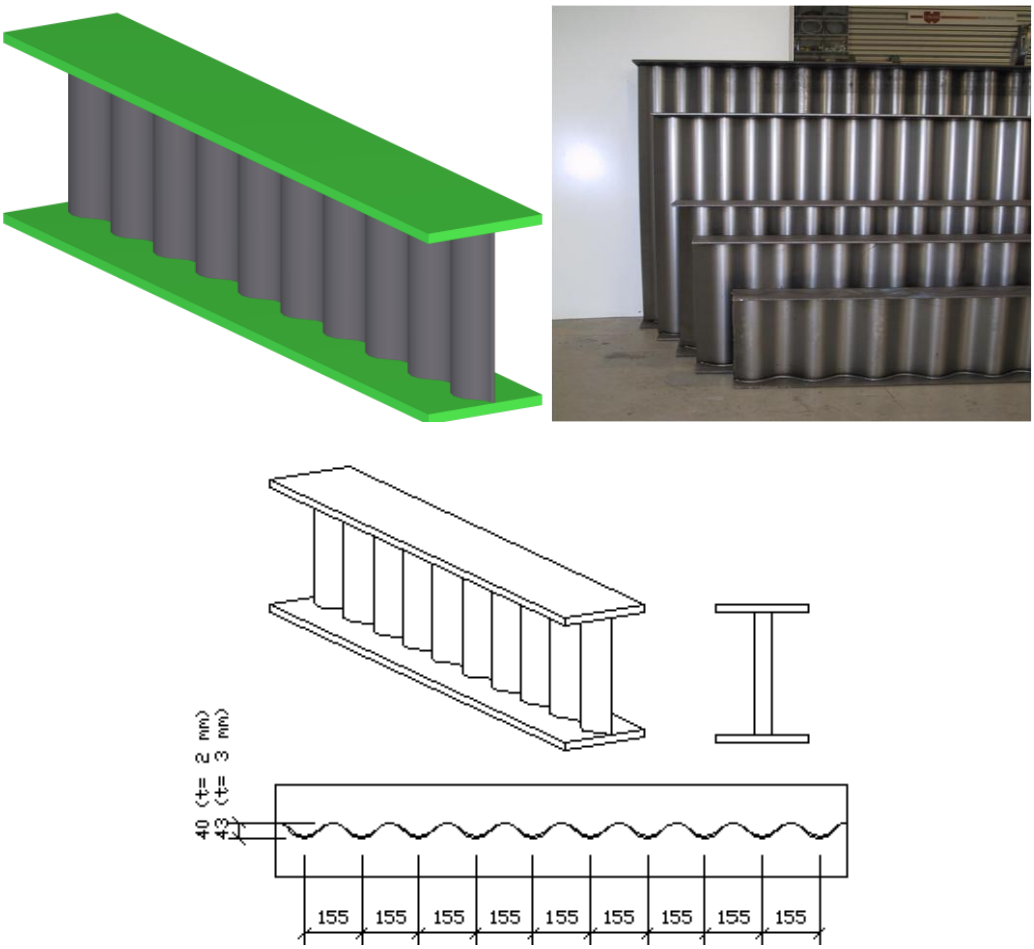
Yapı elemanlarının ağırlığı maliyet değerlendirmesinde önemli rol oynamaktadır. Çelik inşaatta taşıyıcı elemanlar, sıcakta haddelenmiş hazır profiller ya da sıcakta haddelenmiş levhaların birbirlerine kaynaklanmasıyla elde edilen yapma kesitler ile oluşturulabilmektedir. Bu seçim taşıma kapasitesi, ağırlık, üretim ve montaj kolaylığı gibi etkenler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır.

Yukarıda sözü edilen geleneksel sistemlere ek olarak son yıllarda ince sinüzoidal gövdeli çelik I elemanlardan oluşturulan sistemler de üretilmeye başlanmştır. Bu elemanlar, kalınlığı 2-3 mm düzeyinde olabilen soğukta şekil verme yöntemiyle sinüs eğrisi formu verilmiş gövde ile sıcakta haddelenmiş başlık levhalarının birbirlerine kaynaklanması ile oluşturulan kesitlerdir. Kalın düz gövdeli I kesitlere göre daha az malzeme kullanılarak göreli olarak daha büyük dayanım ve rijitlik sağlanabilmektedir (Khalid ve diğ, 2004).

1.1 İnce Sinüzoidal Gövdeli Çelik I Elemanlar ve Bileşenleri

İnce sinüzoidal gövdeli I kesitler; sinüs eğrisi formundaki ince gövde ile sıcakta haddelenmiş levhalardan yapılan başlıklardan oluşan taşıyıcı elemanlardır. Gövde formunun sağlamış olduğu avantaj nedeni ile ince gövde kalınlığına rağmen berkitme levhası kullanımına gerek kalmaksızın daha yüksek kesitler oluşturulabilmektedir (NZ, 2007; Zeman & Co., 2005). Gövde elemanının sinüzodial yapısı, plastik limit yüke erişmeden stabilite kaybına bağlı yerel veya genel burkulmaya engel olmaktadır.

İnce sinüzoidal gövdeli çelik I elemanlara ait görünüşler ve sinüs formun geometrisi Şekil 1.1'de verilmiştir.



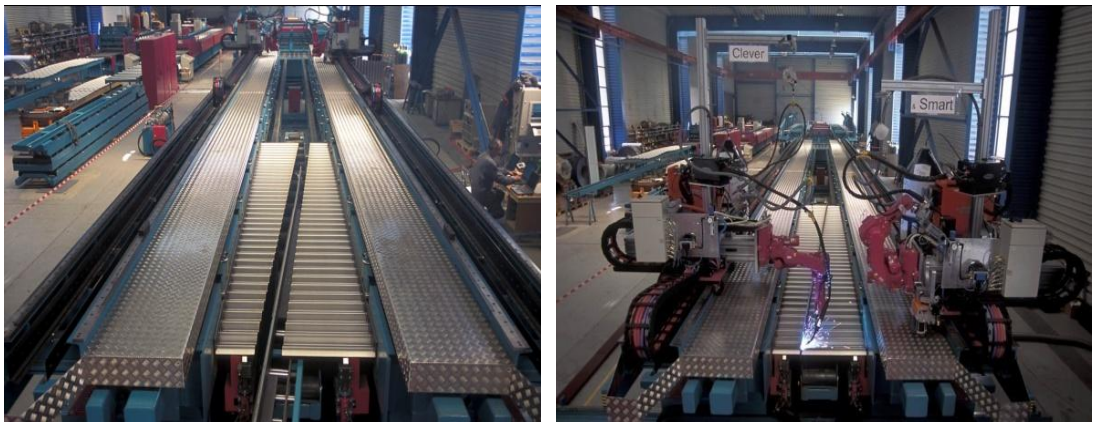
Şekil 1.1 : İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I eleman.

Bu tip profillerin gövde formu ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur. Gövdenin sinüzoidal formu standart olup, 155 mm dalga boyuna sahiptir. Sinüs formun genliği ise 2 ve 2.5 mm et kalınlığı durumunda 40 mm, 3 mm et kalınlığı durumunda ise 43 mm'dir (NZ, 2007; Zeman & Co., 2005).

Gövde yüksekliği mevcut makine teknolojisine bağlı olarak 330 mm ile 1500 mm arasında değişebilmektedir. Başlık elemanlarının kalınlığı 6 mm ile 40 mm arasında, genişliği ise 120 mm ile 450 mm arasında olabilmektedir. Eleman boyu 16.0 m'ye kadar çıkabilmektedir.

Üretim otomatik olarak yapılmaktadır. Soğukta şekil verilmiş sinüs formlu gövdenin başlık plakalarına birleşimi robot kaynak kolları ile gaz altı kaynağı (GMAW) kullanılarak tek taraflı olarak yapılmaktadır.

Üretim sürecini gösteren fotoğraflar Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2 : İnce sinüzoidal gövdeli çelik I elemanın üretimi.

Kullanılan malzeme kalitesi ihtiyaca göre değişiklik göstermekte olup, genellikle S235JR kalitesinde malzeme ile üretim yapılmaktadır.

Seri üretimi yapılan boyutlar için, üretici tarafından hazırlanmış taşıma gücü tabloları mevcuttur.

İnce sinüzoidal gövdeli çelik I elemanlar, ağırlıklı olarak endüstriyel tesis, depo ve antrepo gibi büyük açıklıklı yapılarda kullanılmaktadır. Bu tür yapılardan birine ait fotoğraf Şekil 1.3'te verilmiştir. Fotoğrafta kolon - kiriş birleşiminde panel bölgesi içinde de kolonun sinüs gövde formunun devam ettirildiği dikkat çekmektedir. Bu tür bir birleşim deneysel olarak incelenen numuneler arasında yer almaktadır.



Şekil 1.3 : İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli I elemanlar ile yapılmış bir sanayi yapısı.

Gövdenin sinüzoidal formu sayesinde gövde buruşması ve yanal burkulma ortaya çıkmadan kesit yüksekliği arttırılarak daha yüksek mukavemetli profiller elde edilebildiği için, yapı ağırlığından dolayısıyla maliyetten önemli tasarruf sağlanabilmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Deneysel ve sayısal olmak üzere iki ana bölümden oluşan bu tez çalışmasında, ince sinüzoidal gövdeli çelik I elemanlardan oluşan bir moment aktaran kolon - kiriş birleşiminin davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda seçilen moment aktaran birleşim türü alın plakalı, bulonlu birleşimdir.

Panel bölgeleri birbirlerinden farklı olarak oluşturulan 1/1 ölçekli 6 farklı numune İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında denenmiştir. Laboratuvar deneyleri, yerdeğiştirme kontrollü ve iki yönlü çevrimsel yükler etkisinde statik olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme protokolü olarak "*Steel SAC Protocol*" kullanılmıştır (Clark ve diğ., 1997). Yerdeğiştirme çevrimleri, ± 250 kN çekme ve itme kapasiteli, toplam 600 mm yerdeğiştirme uygulayabilen ve tamamen bilgisayar kontrollü olarak çalışan hidrolik veren ile gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme protokolüne göre, etkin göreli kat ötelenmesi esaslı yerdeğiştirme çevrimleri uygulanmıştır.

Sayısal çalışmalarda, *ABAQUS* ve *SAP2000* isimli sonlu eleman analiz yazılımları kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada uygulamada kullanılan ve önerilen panel bölgesi oluşturma biçimleri tartışılmıştır. Deneysel sonuçlar sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

1.3 Tezin Genel Yapısı

Bu tez, beş bağımsız bölümden oluşturulmuştur.

Bölüm 1, araştırma konusunu, ilgili genel kavram ve bilgileri, elemanların üretim metodunu, araştırma gereksinimini ve araştırmanın amacını içermektedir.

Bölüm 2'de, gerçekleştirilen geniş kapsamlı literatür taramasına dayalı olarak, önceki çalışmaların özetleri ve bu tez çalışmasının mevcut çalışmalar ile olan farklılıkları sunulmuştur.

Bölüm 3'te gerçekleştirilen deneysel çalışma anlatılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan numune tipleri, bunların geometrik özellikleri, ölçüm ve yükleme düzenekleri, numunelerin çevrimsel tersinir yükler etkisindeki davranışları sunulmuştur. Yapılan tüm gözlem ve değerlendirmeler, alınan veriler ve bu verilere dayalı grafikler bu bölümde yer almaktadır.

Bölüm 4, sayısal çalışmaların aktarıldığı bölümdür. Deneysel olarak incelenen numunelerin *ABAQUS* yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri ile *SAP2000* yazılımı kullanılarak eşdeğer çubuk sistem modeli üzerinde gerçekleştirilen itme analizi uygulamaları bu bölümde yer almaktadır. Sayısal ve deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bölüm 5'te, ulaşılan genel sonuçlar sıralanmış ve uygulamaya yönelik öneriler yapılmıştır.

2. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli I kesitler kullanılarak üretilen sistemlerde moment aktaran alın plakalı birleşimler, genellikle kolon elemanı üzerinde kalan panel bölgesinde ince cidarlı sinüzoidal gövde yerine sıcakta haddelenmiş ve göreli olarak daha kalın sac plaka kullanılarak yapılmaktadır.

İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I kesitler kullanılarak üretilmiş bir sanayi yapısına ait çerçeveler ve düğüm noktası detayı Şekil 2.1'de verilmiştir.



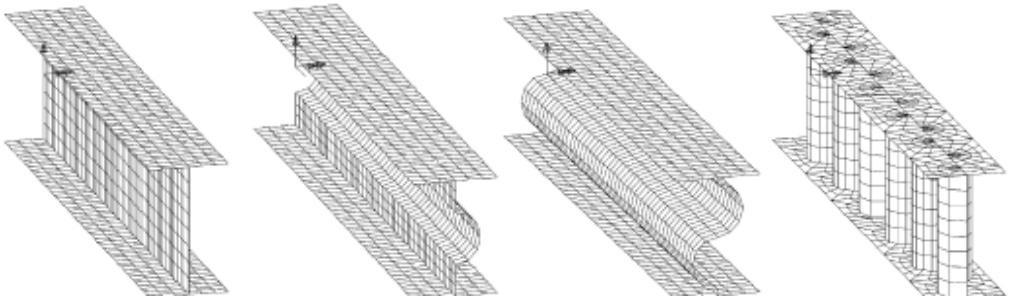
Şekil 2.1 : İnce cidarlı çelik I elemanlar ile oluşturulmuş bir sanayi yapısı.

Hadde profilleri ve yapma kesitlerle oluşturulan çelik yapıların birleşim bölgelerinin davranışını inceleyen pek çok deneysel ve sayısal çalışma mevcuttur. Buna karşın, ince sinüzoidal gövdeli I kesitlerden oluşturulan sistemlerin birleşim bölgelerini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu alandaki ilk çalışmalar, bu tez kapsamında incelenen numunelere dayalı olarak üretilmiştir (Kısa, M.H., 2013; Aydın ve diğ., 2014).

İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanlar üzerinde yapılan çalışmaların eleman düzeyinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu tür elemanların kesme ve eğilme dayanımı, yerel - genel burkulma ve sinüs formlu gövdenin büküm açısı ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur (VUT, 1990).

Chan ve diğ. (2002) eğilme etkisinde olan ve gövdeleri farklı biçimlerdeki sinüzoidal levhalardan oluşturulmuş kirişlerin davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak

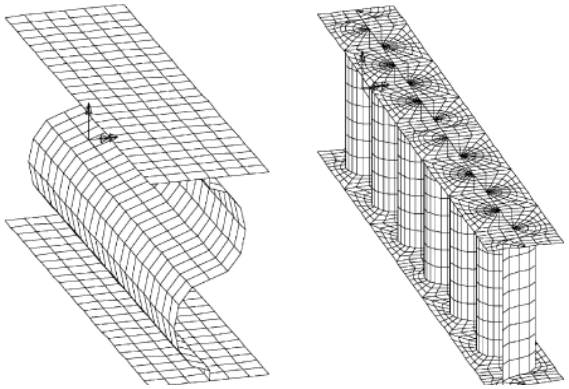
LUSAS yazılımı ile incelemiştir. Şekil 2.2'de gösterilen, dört farklı biçimde gövde formuna sahip numunelerde doğrusal olmayan davranış incelenmiştir.



Şekil 2.2 : Farklı gövde formlarına sahip kesitler (Chan ve diğ., 2002).

Yapılan analizler, dalga formu başlıklara dik olarak oluşturulan I kesitlerin, dalga formu başlıklara paralel olan kesitlere göre %38.8 ile %54.4 arasında değişen oranlarda daha büyük moment taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca dalga formunun başlıklara dik olarak yapılmasının yanal burkulma dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.

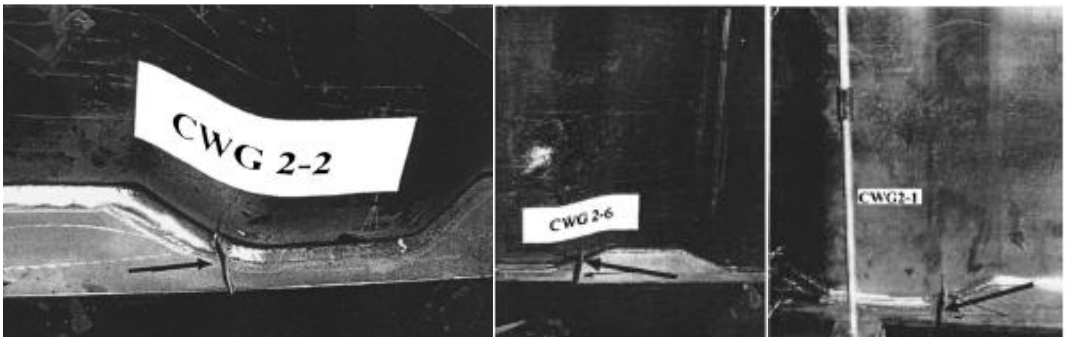
Khalid ve diğ. (2004) Şekil 2.3'te gösterilen, sinüs formu düşeyde ve yatayda oluşturulmuş I profiller üzerinde eğilme deneyleri yapmıştır. Doğrusal olmayan sayısal analizler *LUSAS* yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3 : Khalid ve diğ. (2004) tarafından incelenen farklı gövde formlarına sahip kirişler.

Yapılan karşılaştırmalar düşey sinüzoidal gövdeli kirişlerin düz gövdeli ve yatay sinüzoidal gövdeli kirişlerden %13.3 ile %32.8 oranında daha fazla eğilme momenti taşıyabildiğini göstermiştir. Daha büyük çapta bükülen sinüs gövdeli elemanlarda akma dayanımının arttığı belirtilmiştir.

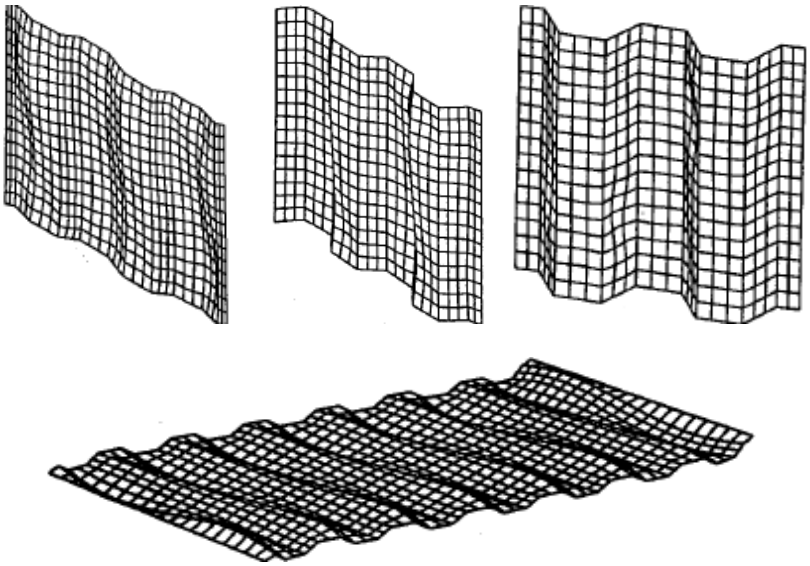
Ibrahim ve diğ. (2006) trapez formda gövdeye sahip çelik I elemanlar üzerinde yaptıkları deneyler ile bu tür elemanların yorulma ömürlerini araştırmıştır. Bu kapsamda altı adet trapez gövdeli çelik I eleman üzerinde tekrarlı ve tek yönlü yükleme gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, çekme başlığını gövdeye bağlayan kaynaklarda başlayan çatlaklar ve takip eden çekme başlığındaki çatlak ile mekanizma durumuna erişmiştir. Trapezoidal formda gövdeye sahip elemanların yorulma ömrünün, başlıkları arasına berkitme elemanları kaynatılmış geleneksel düzlem gövdeli elemanlara göre daha uzun olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.4 : Yorulma çatlakları (Ibrahim ve diğ., 2006).

Ibrahim ve diğ. (2006) trapez formda gövdeye sahip elemanlar üzerinde sonlu eleman analizleri ve kırılma mekaniği çalışmaları yapmıştır. Kesitin farklı bölgelerindeki gerilme yoğunlaşmasını irdelemek, geometrik özelliklerin etkisini görmek ve önceki deneysel çalışmalardaki bulguları açıklayabilmek amacı ile *ABAQUS* yazılımı ile doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Önceki deneysel çalışma sonuçları ile analitik sonuçların uyumlu olduğu belirtilmiştir. Dolu gövdeli kirişler ile dalgalı gövdeli kirişlerin deney sonuçlarını doğrulamak için doğrusal kırılma mekaniği yaklaşımı kullanılmıştır.

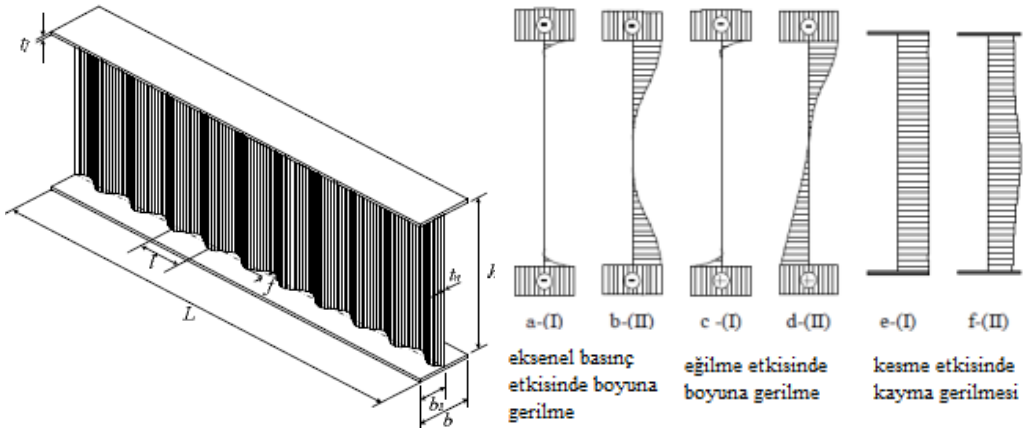
Elgaaly ve diğ. (1996) ince cidarlı ve trapez formlu gövdeye sahip kirişlerin kesme dayanımını belirlemeye yönelik deneysel ve kuramsal çalışmalar yapmıştır. Doğrusal olmayan çözümlemede *ABAQUS* yazılımı kullanılmıştır. Kesme kuvveti etkisindeki elemanlarda göçme mekanizması gövde plakasının burkulması ile ortaya çıkmış, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi gövdede genel ve yerel buruşmalar da gözlenmiştir. Deneysel ve sayısal yolla elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, sayısal sonuçların %15 seviyesinde daha büyük olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni olarak da deney numunelerinde olması muhtemel ön kusurlar gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Trapez formlu gövdede burkulma şekilleri (Elgaaly ve diğ., 1996).

Driver ve diğ. (2006) trapez gövdeli numuneler üzerinde gövdedeki ön kusurların etkisini incelemiştir. Gövdedeki ön kusurların hesaba katılmaması halinde, kayma dayanımının gerçekten daha büyük olarak hesaplanabileceği belirtilmiştir. Elastik ve inelastik bölgede hem yerel hem de genel burkulmayı dikkate alabilen bir denklem önerilmiştir.

Yan-lin ve diğ. (2008) ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların taşıma kapasiteleri üzerinde çalışmış, başlıklar için optimum bir genişlik / kalınlık oranı belirlemişlerdir. Eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkisinde oluşan normal gerilmelerin tamamına yakın bölümünün başlık elemanları, kesme gerilmelerinin ise gövde elemanı tarafından taşındığı belirtilmiştir. Kesitte başlıklar ve gövde tarafından taşınan gerilmeler, ince sinüzoidal gövdeli elemanlar için (I), geleneksel düzlem gövdeli I elemanlar için (II) rakamıyla Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

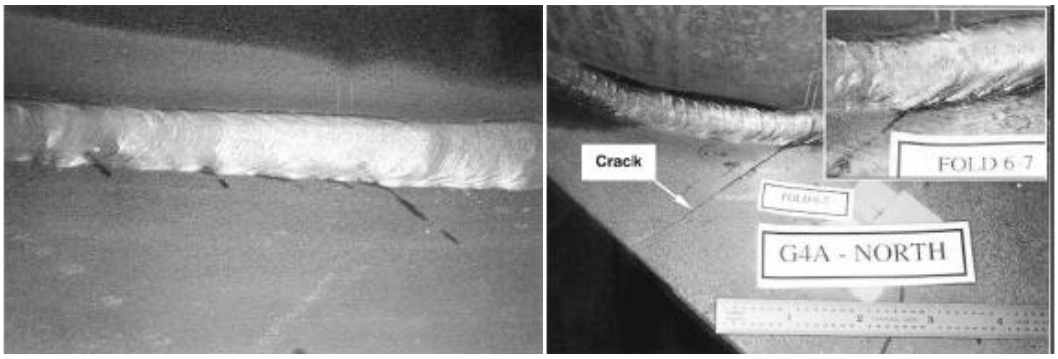


Şekil 2.6 : Başlıklar ve gövdede gerilme dağılımı (Yan-lin ve diğ., 2008).

Abbas ve diğ. (2006) ince cidarlı trapez gövdeli çelik I elemanların doğrusal elastik düzlem içi davranışı ve burkulma davranışları için kuramsal formüller önermiştir. Düzlem içi eğilme geleneksel kiriş teorisi kullanılarak analiz edilmiş, düzlem dışı burkulma davranışı ise başlık elemanın enine eğilme problemi şeklinde göz önüne alınmıştır. Enine eğilmenin bu tür elemanların davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ve tasarımda göz önüne alınması gerektiği belitrilmiştir.

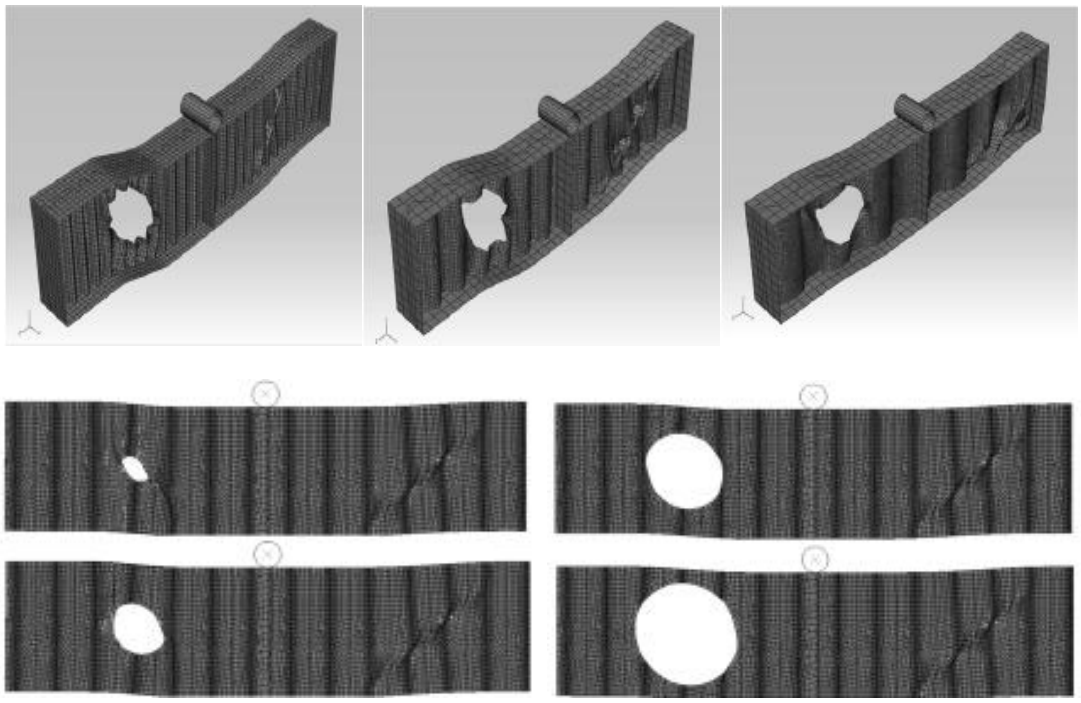
Anami ve diğ. (2005) trapez formda gövdeye sahip çelik I elemanların gövdesini başlıklara bağlayan kaynak dikişinin yorulmasını deneysel ve kuramsal olarak incelemiştir. Gövdedeki boyuna kıvrımların yorulma dayanımını olumsuz etkilediği sonucuna varılmış, kaynakların yorulma performansında en önemli değişkenin büküm açısı olduğu belirtilmiştir.

Sause ve diğ. (2006) karayolu köprülerinde kullanılan ince cidarlı trapez gövdeli çelik I elemanların yorulma ömürleri üzerinde çalışmıştır. Sekiz adet büyük ölçekli numune, dört noktadan etkitilen tekil yük etkisinde yorulma testine tabi tutulmuştur. Yorulma çatlakları, çekme başlığı tarafındaki başlık - gövde birleşiminde trapez formun eğimli olarak devam eden kısımlarından başlayarak devam etmiştir. Bu tür elemanların yorulma ömrünün enine berkitmeli geleneksel çelik I kesitlerden daha uzun olduğu belirtilmiştir. Elemanda oluşan çatlaklar Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Yorulma çatlağı (Sause ve diğ., 2006).

Kıymaz ve diğ. (2010) ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların gövdesinde çeşitli ölçülerde boşluklar olması durumundaki davranışı incelemiştir. 2 m açıklıklı basit mesnetli bir kiriş üzerinde, açılan boşluk boyutları ve gövde adım aralığı değişkenleri için sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Bu tip elemanların gövdesinde açılan boşlukların %15-50 arasında değişen oranlarda dayanım azalmasına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 2.8 : Farklı genişlikte gövde boşlukları (Kıymaz ve diğ., 2010).

Novak ve diğ. (2000) ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I kirişlerin noktasal yükler etkisindeki davranışını incelemiştir. Farklı mesnet koşulları ve dışmerkez yükleme durumlarını kapsayacak şekilde 27 farklı deney yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar Eurocode 3, Ek-Z'de verilen koşullara uygun olacak şekilde istatiksel olarak değerlendirilmiştir. Elemanlara etkitilen noktasal yükler Şekil 2.9'da verilmiştir.

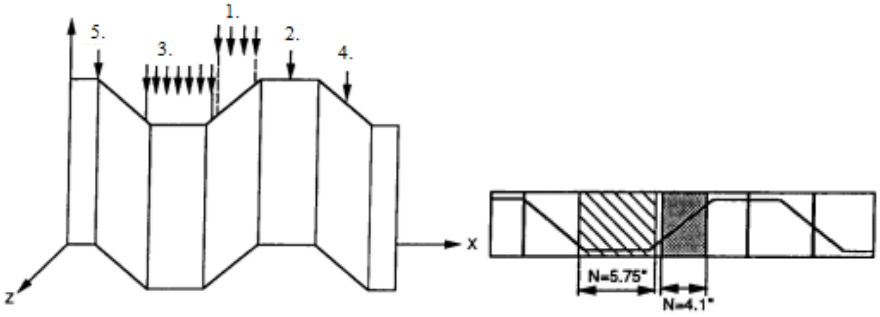


Şekil 2.9 : Tekil olarak etkitilen yükler (Novak ve diğ., 2000).

Elgaaly ve diğ. (1997) ince cidarlı trapez form gövdeli kirişleri üniform eğilme altında göçmeye zorlayan deneysel ve sayısal içerikli bir çalışma yapmıştır. Gövdedeki göçmenin, başlık elemanındaki gerilmenin akma limitine ulaştıktan sonra basınç başlığının burkulmasından dolayı ani bir şekilde olduğu belirtilmiştir. Gövde elemanının, kesitin moment taşıma kapasitesine ihmal edilebilir bir katkı sağladığı ortaya konmuş, tasarımda eğilme kapasitesinin başlıkların akmasına bağlı olarak hesaplanabileceği ve gövdenin katkısının göz ardı edilebileceği belirtilmiştir.

Elgaaly ve diğ. (1997) ince cidarlı trapez form gövdeli kirişlerin kısmi basınç yüklemesi altındaki göçme mekanizmasını incelemiş ve tasarıma yönelik önerilerde bulunmuştur. Kısmi basınç yüklemesi Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, elemanın

başlığının çeşitli bölgelerinden etkitilmiştir. Deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.10 : Kısmı olarak etkitilen basınç yükü (Elgaaly ve diğ., 1997).

Machacek ve diğ. (2002) ince sinüzoidal gövdeli I kesitli kren kirişlerini yorulma etkisine maruz bırakarak ince cidarlı dalgalı gövdenin kesme ve yerel yüklemeler altındaki yorulma dayanımını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışma kapsamında iki kiriş test edilmiştir. Birinci kirişte, gövdede sadece çevrimsel kesme kuvveti etkisi, ikinci kirişte ise gövdede çevrimsel lokal yükleme kullanılmıştır. Dalgalı gövdenin bölgesel yükleme etkisindeki yorulma dayanımını belirlemenin, çatlak, akma ve büyük plastikleşmenin ard arda meydana gelmesinden dolayı, zor olduğu belirtilmiştir.

Sayed-Ahmed (2007) dalgalı gövdeye sahip kirişlerin burkulma modlarının bulunması, önerilen denklemlerin geçerliliğinin tayini ve burkulma sonrası dayanımlarının belirlenmesi için nümerik bir çalışma yapmıştır. Nümerik model yanal stabilite kaybına neden olan kritik momentin değerlendirilmesi için genişletilmiştir. Düzlem gövdeli kirişler için kullanılan denklemlerin, dalgalı gövdeli kirişlere uygulanabilirliği ve basınç başlığındaki lokal burkulma davranışı incelenmiştir.

Li ve diğ. (2000) ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların burkulmaya karşı dayanımı üzerinde sayısal çalışmalar yapmış, bununla ilgili bir denklem önermiştir.

Abbas ve diğ. (2007) düzlem içi moment ve kesme kuvveti etkisindeki ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların başlıklarının enine eğilme durumu için *C-faktor* isimli basitleştirilmiş bir analiz yöntemi önermiştir.

Moon ve diğ. (2009) trapez form gövdeli elemanların kesme dayanımları üzerinde çalışmıştır. Bu kapsamda, genel kesme burkulması katsayısı belirlenmesi için genel

kayma denklemleri yeniden düzenlenmiştir. Elastik olmayan burkulma dayanımı, önerilen kesme burkulmaları parametrelerinden elde edilen burkulma eğrileri ile bulunmuştur. Önerilen tasarım denklemlerini doğrulamak üzere bir seri deney yapılmış, deney sonuçlarının önerilen denklemlerden elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Eldib (2009) malzemenin doğrusal olmayan davranışını göz önüne alarak köprüler için tasarlanan trapez form gövdeli elemanların kesme burkulmasını incelemiştir. Altı adet model için kesme kapasitesi incelenmiştir. İnelastik burkulma dayanımı, önerilmiş kesme burkulmaları parametrelerinden elde edilen burkulma eğrileri ile elde edilmiştir. Bu parametrelerin, malzemenin kesme akma dayanımı ve elastik kesme burkulma dayanımının fonksiyonu olduğu belirtilmiştir.

Kövesdi ve diğ. (2010) ince cidarlı trapez form gövdeli çelik I elemanların kısmi yük etkisindeki dayanım ve burkulması üzerine bir nümerik model geliştirmiştir. Yerel yükleme dayanımına ve yapısal davranışa geometrik parametrelerin etkisi modellenmiştir.

Martins ve diğ. (2012) ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların kompozit olarak kullanımları üzerine çalışmıştır, Şekil 2.11. Kompozit olarak kullanım durumunda; başlangıç rijitliğinin, dönme kapasitesinin ve moment dayanımının hesaplanması için bir tasarım prosedürü önerilmiştir. Bu önerinin doğrulanması için deneysel, sayısal ve analitik çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2.11 : Farklı burkulma modları (Martins ve diğ., 2012).

Calenzani ve diğ. (2012) Eurocode 4'te tanımlanmayan sinüs gövdeli profiller ile kompozit kirişlerin dönme rijitliğini belirlemek üzere bir ifade önermiştir. Deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, sayısal modelin geliştirilmesinde ve

kalibrasyonunda *Ansys* yazılımı kullanılmştır. Önerilen yolla belirlenen dönme rijitliği ile sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Shahmohammadi ve diğ. (2013) *ANSYS* yazılımını kullanarak düz gövdeli ve dalgalı sac gövdeli bağ kirişlerinin doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerini yapmıştır. Dört farklı tipte gövdeye sahip elemanlardan üçü dalgalı form gövdeli, biri ise düz gövdelidir. Farklı gövde kalınlığına, dalga sayısına, bükülme açısına sahip toplam 160 model üzerinde çalışılmıştır. Dalgalı gövde uygulamalarının önerilen geometrik kriterlerle yapılması durumunda, moment dönme kapasitesinin yaygın olarak kullanılan çelik bağ kirişlerden daha büyük olabileceği belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda, dalgalı gövdeli bir bağ kirişinin tasarımı için bir yaklaşım önerilmiştir.

Nie ve diğ. (2013) ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların köprü kirişi olarak kullanılması durumunda, kayma davranışı üzerinde çalışmıştır. Toplam 8 adet kiriş deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir, Şekil 2.12. Üç farklı burkulma modu üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Elastik kesme burkulması dayanımı, normalize edilmiş kesme dayanımı ve kesme burkulma narinliği oranı ilişkileri üretilmiştir.

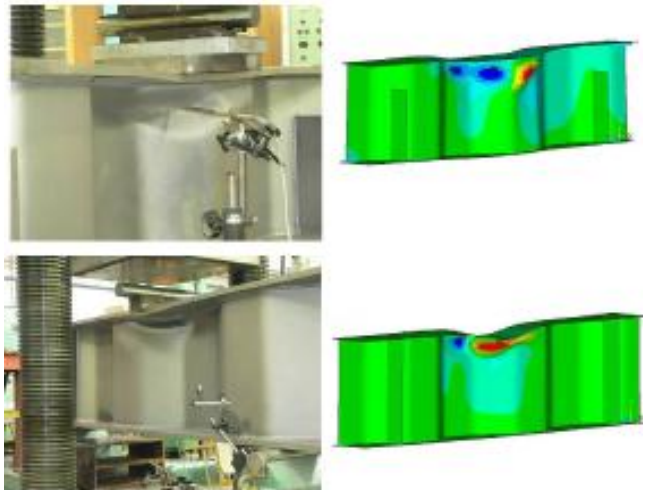


Şekil 2.12 : Köprü kirişlerinde burkulma türleri (Nie ve diğ., 2013).

Pasternak ve diğ. (2010) 1.5 mm ile 3.0 mm arasında üretimi yapılabilen ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların gelişen teknoloji ile birlikte 6.0 mm gövde kalınlığına kadar üretilebildiğini, ancak EN 1993-1-5 Ek-D'de bu profillerin boyutlanmasının 3.0 mm gövde kalınlığına göre yapıldığını belirtmiştir. Son yıllarda birçok test ve sonlu eleman çözümünün gerçekleştiği ifade edilerek, EN kurallarının tartışılabileceği belirtilmiştir.

Kövesdi ve diğ. (2011) trapez gövde formuna sahip kirişlerin bölgesel yükleme etkisindeki davranışları üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar yapmıştır. Bu kapsamda 12 numune denenmiş ve *Ansys* yazılımı kullanılarak karşılaştırmalar

yapılmıştır. Analizlerde bölgesel yükleme, geometri ve malzeme bakımından doğrusal olmayan davranış ve ön kusurlar dikkate alınmıştır. Göçme modu ile yük taşıma kapasitesindeki değişim incelenmiş ve gerçekleştirilen deneylerin ışığında bir nümerik model geliştirilmiştir, Şekil 2.13.



Şekil 2.13 : Köprü kirişlerinde göçme modları (Kövesdi ve diğ., 2011).

Hassanein ve diğ. (2013) trapez form gövdeye sahip köprü kirişlerinin ön kusur büyüklüklerini kullanarak kesme dayanımlarını belirlemeye çalışmıştır. Literatürde ifade edilen kesme dayanımları, deneysel olarak test edilen numunelerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen kesme burkulması ifadesi kullanılarak gerçekçi mesnet koşulları altında kontrol edilmiştir. Literatürde yer alan tasarım kesme dayanımının geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Moon ve diğ. (2009) trapez form gövdeli I kesitli kirişlerin yanal burulmalı burkulmasını sonlu eleman analizleriyle üniform eğilme etkisinde incelenmiştir. Kayma merkezini bulmak için yaklaşık yöntemler önerilmiştir. Sonlu eleman çözümünden elde edilen sonuçlar ile önerilen yaklaşık yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve uyumun iyi olduğu belirtilmiştir. Trapez form gövdeli I kesitli kirişlerin burulmalı burkulma dayanımının düz gövdeli kesitlere göre %10 daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında, ince sinüs formlu gövdeye sahip kolon ve kirişin alın plakalı, moment aktaran birleşimlerinde farklı panel bölgesi oluşturma biçimlerinin, birleşimin genel davranışına etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Birleşim bölgesinin davranışını belirlemeye yönelik olan bu tez çalışması, literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracaktır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında, ± 250 kN kuvvet, ± 300 mm yerdeğiştirme kapasiteli ve bilgisayar kontrollü bir hidrolik veren kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Statik karakterli tersinir tekrarlı çevrimler yerdeğiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır.

3.1 Genel Giriş ve Tanımlar

İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanlardan oluşan kolon ve kirişin alın plakalı moment aktaran birleşimi, altı farklı panel bölgesi durumu için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Deney numunelerinin üretimi *Zeman Bauelemente Produktionsgesellschaft mbH* firmasının Polonya - Katowice'de bulunan *ZEKON Sp. z o.o.* isimli üretim tesisinde gerçekleştirilmiş ve laboratuvara intikali sağlanmıştır.

Numuneler sistematik bir düzene göre isimlendirilmiştir.

EEPC-B (**E**xtended **E**nd **P**late **C**onnection - **B**are); panel bölgesi dahil olmak üzere tüm kolon gövdesi ile kirişin ince cidarlı sinüzoidal formda 3 mm kalınlıklı levhadan oluşturulduğu numune,

EEPC-HS (**E**xtended **E**nd **P**late **C**onnection - **H**orizontal **S**tiffener); panel bölgesinin sağ ve solunda arkalı önlü olarak kolon gövdesine temas etmeyen 4 adet süreklilik plakasının bulunduğu, panel bölgesi dahil olmak üzere tüm kolon gövdesi ile kiriş gövdesinin ince cidarlı sinüzoidal formda 3 mm kalınlıklı levhadan oluşturulduğu numune,

EEPC-H0 (**E**xtended **E**nd **P**late **C**onnection - **H0**); panel bölgesinin 8 mm kalınlıklı düzlem sac levhadan, kolon gövdesinin kalan bölümü ile kiriş gövdesinin ince cidarlı sinüzoidal formda 3 mm kalınlıklı levhadan oluşturulduğu numune,

EEPC-H2 (**E**xtended **E**nd **P**late **C**onnection - **H2**); panel bölgesi ile komşu $h_{kolon/2}$ genişlikli bölgelerde kolon gövdesinin 8 mm kalınlıklı düzlem sac levhadan, kolon

gövdesinin geriye kalan bölümü ile kiriş gövdesinin ince cidarlı sinüzoidal formda 3 mm kalınlıklı levhadan oluşturulduğu numune,

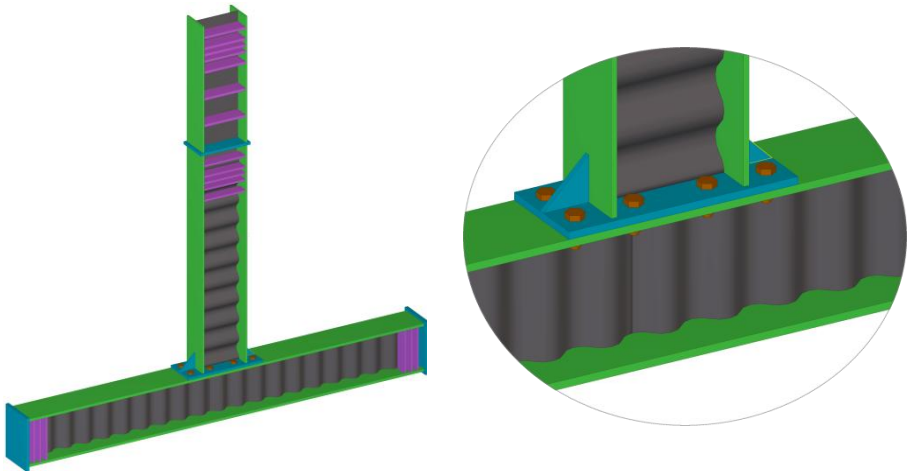
EEPC-SDS (**E**xtended **E**nd **P**late **C**onnection - **S**ingle **D**iagonal **S**tiffener); panel bölgesinin sağ ve solunda kolon gövdesine temas etmeyen 4 adet süreklilik plakasına ilave olarak ön ve arkada birer adet çapraz elemanın bulunduğu, panel bölgesi dahil olmak üzere tüm kolon gövdesi ile kiriş gövdesinin ince cidarlı sinüzoidal formda 3 mm kalınlıklı levhadan oluşturulduğu numune,

EEPC-DDS (**E**xtended **E**nd **P**late **Co**nnection - **D**ouble **D**iagonal **S**tiffener); panel bölgesinin sağ ve solunda kolon gövdesine temas etmeyen 4 adet süreklilik plakasının olduğu, bunlara ilave olarak 2 adet ön tarafta 2 adet de arka tarafta olmak üzere 4 adet çapraz elemanın bulunduğu, panel bölgesi dahil olmak üzere tüm kolon gövdesi ile kiriş gövdesinin ince cidarlı sinüzoidal formda 3 mm kalınlıklı levhadan oluşturulduğu numuneyi göstermektedir.

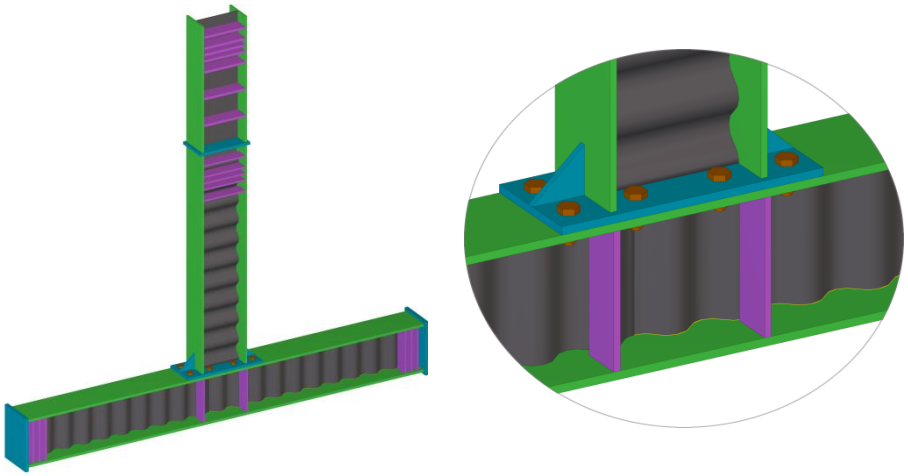
Tüm numunelerde kolon kesiti olarak *WTC333/250-20*, kiriş kesiti olarak da *WTC333/220-15* profiller kullanılmıştır.

Tüm numunelere ait genel görünüşler ve panel bölgesi yakın görünüşleri Şekil 3.1'de verilmiştir.

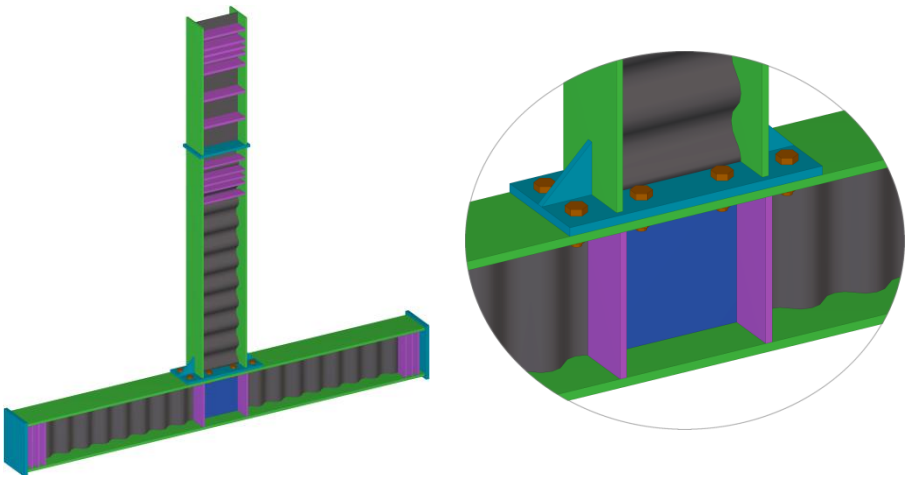
Görünüşlerde; yatay eleman kolona, düşey eleman da kirişe karşı gelmektedir.



EEPC-B

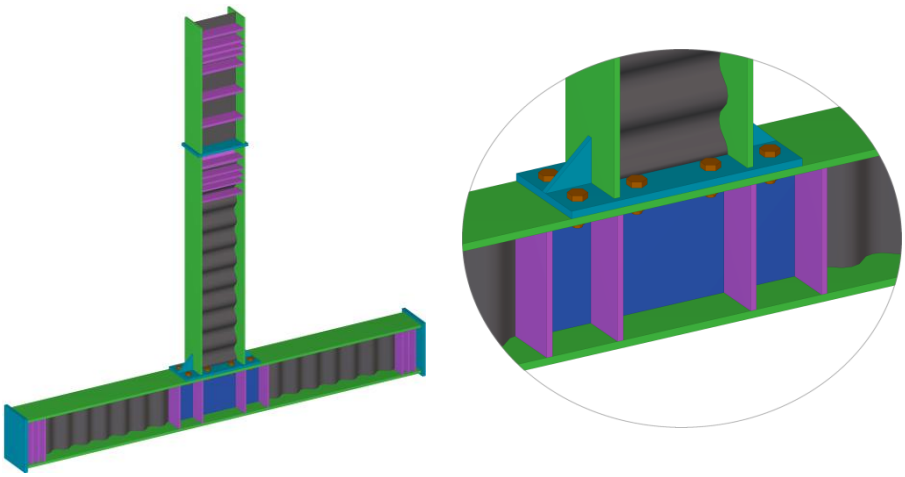


EEPC-HS

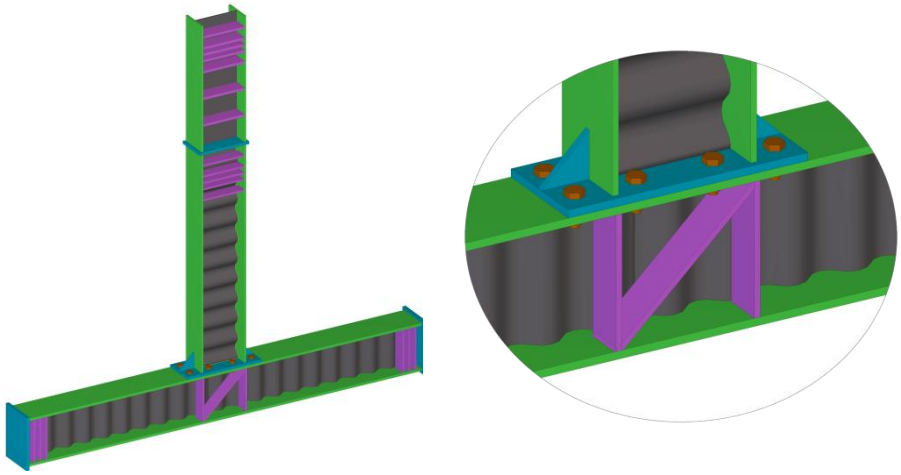


EEPC-H0

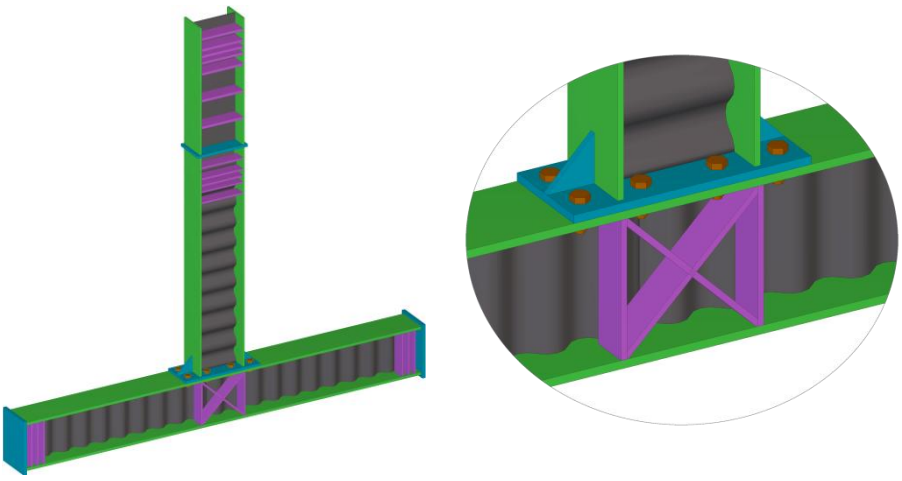
Şekil 3.1 : Numunelerin genel ve detay görünüşleri.



EEPC-H2



EEPC-SDS



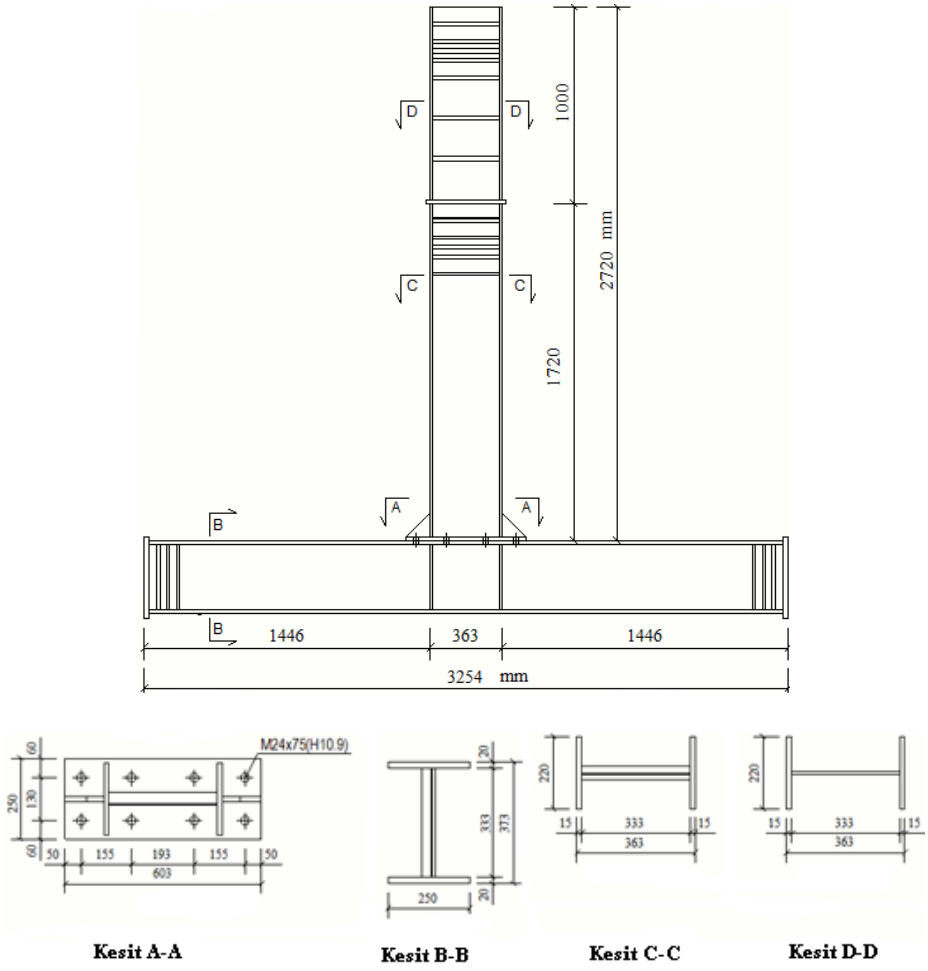
EEPC-DDS

Şekil 3.1 (devam) : Numunelerin genel ve detay görünüşleri.

3.2 Numune Özellikleri

Tüm numunelerde kolon ve kiriş elemanların kesitleri ve boyları özdeştir. Eleman kesit ve boyları, mevcut deney düzeneği geometrisi ile uyum sağlayacak şekilde ve hidrolik verenin kapasitesi dikkate alınarak yapılan ön hesaplar ile belirlenmiştir.

Numunelere ait genel ölçüler ve kesit bilgileri Şekil 3.2'de yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Numune tipik boyut ve kesit ölçüleri.

Kiriş toplam boyu 2720 mm'dir. Bunun düğüm noktasına komşu olan 1720 mm'lik bölümü ince cidarlı sinüzoidal gövdeli, hidrolik verenin bağlandığı uçtaki 1000 mm'lik bölümü ise düzlem sac levhadan yapılmıştır.

Kolon toplam boyu temas plakaları dahil olmak üzere 3254 mm'dir. Panel bölgesi ise her numunede değişiklik göstermektedir.

Numuneler, fabrika ortamında hazırlanan kolon ve alın plakalı kirişin bulonlar ile birleştirilmesiyle elde edilmiştir.

Kolon ve kiriş kesitlerinin geometrik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Malzeme kaliteleri üretici firma tarafından S235JR olarak belgelendirilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kolon ve kiriş kesit özellikleri.

Kesit	h_g (mm)	t_g (mm)	b (mm)	t_b (mm)
WTC333/250-20	333	3	250	20
WTC333/220-15	333	3	220	15

Birleşim elemanı olarak her numunede 8 adet M24×75 - H10.9 kalitesinde bulon kullanılmıştır. Bu bağlantı elemanlarının seçiminde esas alınan düşünce, birleşimde bulonlardan kaynaklanan bir göçme mekanizması oluşmamasıdır. Bu nedenle kiriş kapasitesine göre daha yüksek kapasite sağlayan bulon çapı ve yerleşimi tertip edilmiştir.

Kolon ve kiriş kesitlerinde kullanılan başlık elemanların genişlik / kalınlık oranlarının seçiminde Denklem (3.1) de verilen koşul sağlanmıştır (Yan-lin ve diğ., 2008).

$$\frac{b}{t_g} \le 20 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} \qquad \textbf{(3.1)}$$

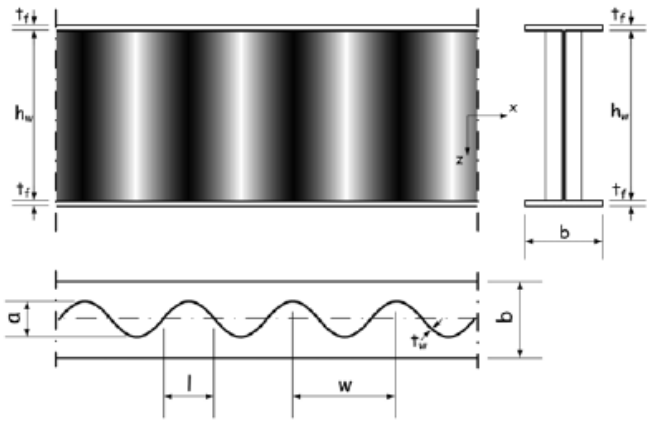
Kiriş ve kolonda kesme kuvveti taşıma kapasitesi, sinüs formlu gövdede oluşabilecek bölgesel ve genel burkulma durumları dikkate alınarak Denklem (3.2) ile hesaplanmakta olup, bu değişkenlerin tanımları Şekil 3.3'te verilmiştir (EN 1993-1-5; Kıymaz ve diğ., 2010).

$$V_{rd} = \chi_c \times \frac{f_y}{\gamma_{M1} \times \sqrt{3}} \times h_w \times t_w \qquad \textbf{(3.2)}$$

Burada χ_c kesitte oluşabilecek bölgesel ve genel burkulma etkilerinin göz önüne alınması için kullanılan bir katsayı olup, bölgesel burkulma etkisi için (3.3), genel burkulma etkisi için de (3.4) ifadeleri ile hesap yapılmaktadır.

$$\chi_{c,l} = \frac{1.15}{0.9 + \bar{\lambda}_{c,l}} \le 1.0 \qquad \textbf{(3.3)}$$

$$\chi_{c,g} = \frac{1.15}{0.5 + \bar{\lambda}_{c,g}^{\,2}} \leq 1.0 \qquad \textbf{(3.4)}$$



Şekil 3.3 : İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli I kesitlerin kesme kapasitesi hesabında kullanılan değişkenler (Kıymaz ve diğ., 2010).

$\lambda_{c,l}$ ve $\lambda_{c,g}$ ile verilen büyüklükler, bölgesel ve genel burkulmaya karşı kesit gövde narinliğini ifade etmektedir. Bu büyüklükler (3.5) ve (3.6) eşitliklerinden elde edilmektedir.

$$\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,l} \times \sqrt{3}}} \qquad \textbf{(3.5)}$$

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,g} \times \sqrt{3}}} \qquad \textbf{(3.6)}$$

$\tau_{cr,l}$ ve $\tau_{cr,g}$ sırası ile akma dayanımının bir fonksiyonu olarak, bölgesel elastik kritik kayma burkulması ve genel gövde burkulmasını işaret etmekte olup, Denklem (3.7) ve (3.8) ile hesaplanmaktadır.

$$\tau_{cr,l} = \left(5.34 + \frac{a \times s}{2 \times h_w \times t_w}\right) \times \frac{\pi^2 \times E}{12 \times \left(1 - \upsilon^2\right)} \times \frac{2 \times t_w}{s} \qquad \textbf{(3.7)}$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t_w \times h_w^2} \times \sqrt[4]{D_x \times D_z^3} \qquad \textbf{(3.8)}$$

Yukarıdaki ifadelerde yer alan D_x ve D_z plak rijitliklerini, I_z ise l boyundaki gövde formunun atalet momentini göstermektedir. Katlanmamış uzunluk s (3.12) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$D_x = \frac{E \times t_w^3}{12 \times \left(1 - \upsilon^2\right)} \times \frac{l}{s} \quad \textbf{(3.9)}$$

$$D_z = \frac{E \times I_z}{l} \quad \textbf{(3.10)}$$

$$I_z = \frac{a^2 \times t_w}{8} \times \left[1 - \frac{0.81}{1 + 2.5 \times \left(\frac{a}{4 \times l}\right)^2}\right] \quad \textbf{(3.11)}$$

$$s = l \times \left(1 + \frac{\pi^2 \times a^2}{16 \times l^2}\right) \quad \textbf{(3.12)}$$

Nominal malzeme akma dayanımı f_y= 240 kN için hesap yapılması durumunda, $\chi_{c,I}$= *1.22* ve $\chi_{c,g}$*=1.00* olarak belirlenmiştir. Malzeme için tanımlanan γ_{M1} katsayısının da 1.00 alınması (EN 1993-1-1) durumunda, kesme kuvveti dayanımı ifadesi Denklem (3.13) ile verilen hale gelmektedir.

$$V_{rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \times h_w \times t_w \quad \textbf{(3.13)}$$

Bu durumda ince sinüs gövdeli kesitler için tanımlanan kesme kuvveti kapasitesi ifadesi, başlıkların katkısı ihmal edilerek geleneksel düzlem gövdeli I kesitler için geçerli olan ve Denklem (3.14)'te verilen eşitlik ile aynı hale gelmektedir (Yan-lin ve diğ., 2008; Deren ve diğ., 2003).

$$V_p = A_g \times \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad \textbf{(3.14)}$$

Deneysel çalışmada kullanılan *WTC333/250-20* ve *WTC333/220-15* kesitleri için, nominal akma gerilmesi kullanılarak elde edilen kesme kuvveti taşıma kapasitesi 138 kN'dur.

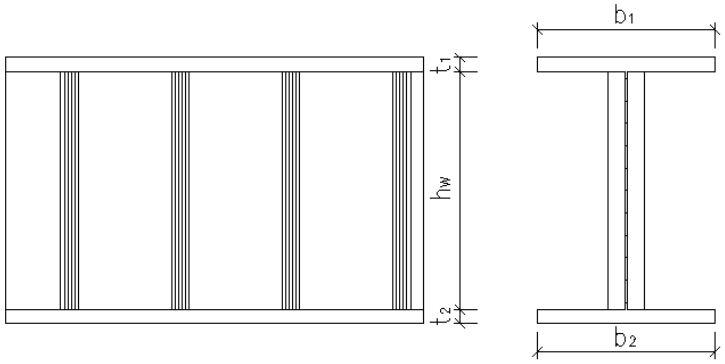
İnce sinüzoidal gövdeli I kesitin plastik moment taşıma kapasitesi (3.15), (3.16) ve (3.17) ifadelerinden elde edilen değerlerin en küçüğü olarak belirlenmektedir. Bu değişkenlerin tanımları Şekil 3.4'te verilmiştir (EN 1993-1-5).

$$M_{Rd,1} = \frac{b_2 \times t_2 \times f_{yw,r}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \quad \textbf{(3.15)}$$

$$M_{Rd,2} = \frac{b_1 \times t_1 \times f_{yw,r}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \quad \textbf{(3.16)}$$

$$M_{Rd,3} = \frac{b_1 \times t_1 \times \chi \times f_{yw}}{\gamma_{M1}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \quad \textbf{(3.17)}$$

Plastik eğilme momentinin hesabında kullanılan geometrik büyüklükler Şekil 3.4'te tanımlanmıştır.



Şekil 3.4 : İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli I kesitlerin eğilme momenti kapasitesi hesabında kullanılan değişkenler.

Burada $f_{yw,r}$ kiriş başlıklarındaki enine moment etkisi nedeniyle, azaltılmış akma gerilmesine karşı gelmekte ve (3.18) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$f_{yw,r} = f_{yw} \times f_T \quad \textbf{(3.18)}$$

f_T çarpanı moment etkisinin fonksiyonu olup, Denklem (3.19) ile hesaplanmaktadır.

$$f_T = 1 - 0.4 \times \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{\frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}}}} \quad \textbf{(3.19)}$$

γ_{M0} ve γ_{M1} malzeme güvenlik katsayılarının 1.00 olarak seçilmesi (EN 1993-1-1) durumunda elde edilen plastik moment kapasitesi ifadesi, geleneksel düzlem gövdeli kesitlerde gövde katkısının ihmal edildiği durumda kullanılan ifade ile (Yan-lin ve diğ., 2008; Deren ve diğ., 2003) aynı olmaktadır, Denklem (3.20).

$$M_p = W_{px} \times \sigma_y \quad \textbf{(3.20)}$$

Deneysel çalışmada kullanılan *WTC333/250-20* ve *WTC333/220-15* kesitleri için, nominal akma gerilmesi kullanılarak elde edilen moment taşıma kapasiteleri sırasıyla 42360 ve 27562 kNcm'dir.

Kiriş alın plakasının kalınlığı, geleneksel çelik inşaatta yapıldığı gibi kolon başlık kalınlığına eşit olarak seçilmiştir (Odabaşı, 2000). Kiriş başlıklarının, alın plakasına bağlantısı tam penetrasyonlu kaynak ile yapılmıştır. M24×75 bulonların seçiminde kolon başlık kalınlığı ve kiriş alın plakası kalınlığı dikkate alınan değişkenler arasındadır. Alın plakasının kiriş gövdesi dışında kalan bölümlerinin eğilme kapasitesini arttırmak üzere, t=15 mm kalınlığında üçgen formda berkitme levhaları kullanılmıştır. Seçilen berkitme levha kalınlığı, geleneksel çelik inşaatta yapıldığı gibi kiriş başlık kalınlığına eşit olarak seçilmiştir (Odabaşı, 2000).

Kolon başlıkları arasında, kiriş başlıklarının hizalarına yerleştirilen süreklilik plakalarının kalınlıkları t=15 mm olarak seçilmiştir. Bu seçimde, geleneksel çelik inşaatta yapıldığı gibi kiriş başlık kalınlığı esas alınmıştır (Odabaşı, 2000; Deren ve diğ., 2003). *EEPC-B* numunesinde süreklilik plakası kullanılmamıştır. *EEPC-HS, EEPC-SDS* ve *EEPC-DDS* numunelerinde süreklilik plakaları sinüzoidal gövde plakasına bağlanmamıştır. *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerinde ise süreklilik plakaları, gövde plakalarına köşe kaynak dikişleri ile bağlanmıştır.

EEPC-H0 ve *EEPC-H2* numunelerinin panel bölgelerinde kullanılan düzlem levha kalınlıkları 8 mm'dir. Panel bölgesi düzlem levha kalınlığı uygulamada genellikle 5-6 mm olabilmektedir, Şekil 2.1. Kapasite tasarımında panel bölgesi levha kalınlığının daha büyük elde edileceği bilinmekle beraber uygulamadan uzaklaşmamak için t=8 mm seçimi yapılmıştır.

EEPC-SDS ve *EEPC-DDS* numunelerinde panel bölgesi içinde kullanılan çapraz levhaların kalınlığı süreklilik plakaları ile benzer olarak t=15 mm seçilmiştir. Panel bölgesinin bir yüzünde tek ve çift çapraz kullanılması hallerinde, iki farklı narinlik durumu oluşturulmuş ve denenmiştir. Çapraz elemanlar üzerine yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden alınan veriler ile bu elemanlarda oluşan çekme ve basınç kuvvetleri izlenmiş ve yapılan kalınlık seçimi tartışılmıştır.

Tüm numunelerde, kolonun mesnetlendiği iki uçta yerel burkulma ve buruşmaları önlemek amacıyla kesit başlıkları arasında gövdeye temas etmeyen 6 adet berkitme elemanı kullanılmıştır.

3.3 Malzeme Deneyleri

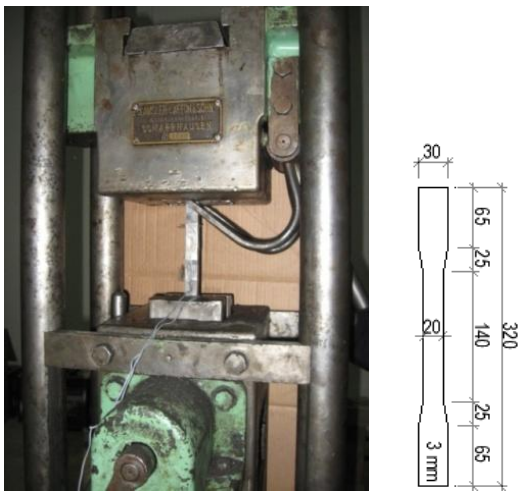
Deney numunelerinin üretildiği levhalardan TS EN ISO 6892-1 yönetmeliğine uygun olacak şekilde örnekler alınmış, malzeme davranışını belirlemek üzere çekme deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmaların ardından gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda, malzeme deneylerinde bulunan sonuçların ortalamaları kullanılmıştır.

Çekme deneyleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında bulunan 200 kN kapasiteli Amsler mekanik çekme aleti ile gerçekleştirilmiştir.

Çekme numunelerinin ön ve arka tarafına birer adet *YFLA-5-3L* tipi şekildeğiştirme ölçer yapıştırılmıştır. Şekildeğiştirmeler hem komparatör hem de şekildeğiştirme ölçerler ile okunmuştur. Akma öncesinde ve sonrasında yeterli sayıda veri alınarak gerilme - şekildeğiştirme ilişkileri çizilmiştir.

3.3.1 t=3 mm kalınlıklı levhalara ait deneyler

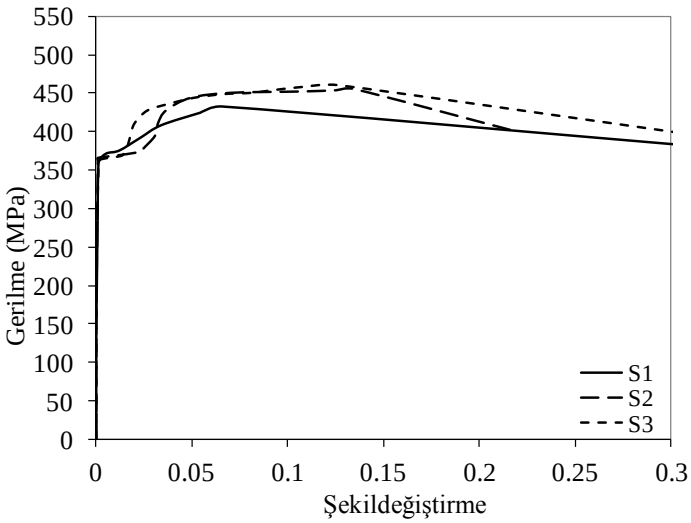
Kolon ve kiriş gövdesinde kullanılan 3 mm kalınlıklı levhadan 4 adet örnek alınmıştır. Deney düzeneği ve numune geometrisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : 3 mm kalınlıklı örneklere ait boyutlar ve deney düzeneği.

Bu numuneler için elde edilen gerilme - şekildeğiştirme ilişkilerinden en iyi olan üç tanesi Şekil 3.6'da verilmektedir. Deney sonucunda ortalama akma dayanımı 360.0 MPa, çekme dayanımı da 441.7 MPa olarak belirlenmiştir.





Şekil 3.6 : 3 mm kalınlı levhalarda çekme deneyleri.

3.3.2 t=15 mm kalınlıklı levhalara ait deneyler

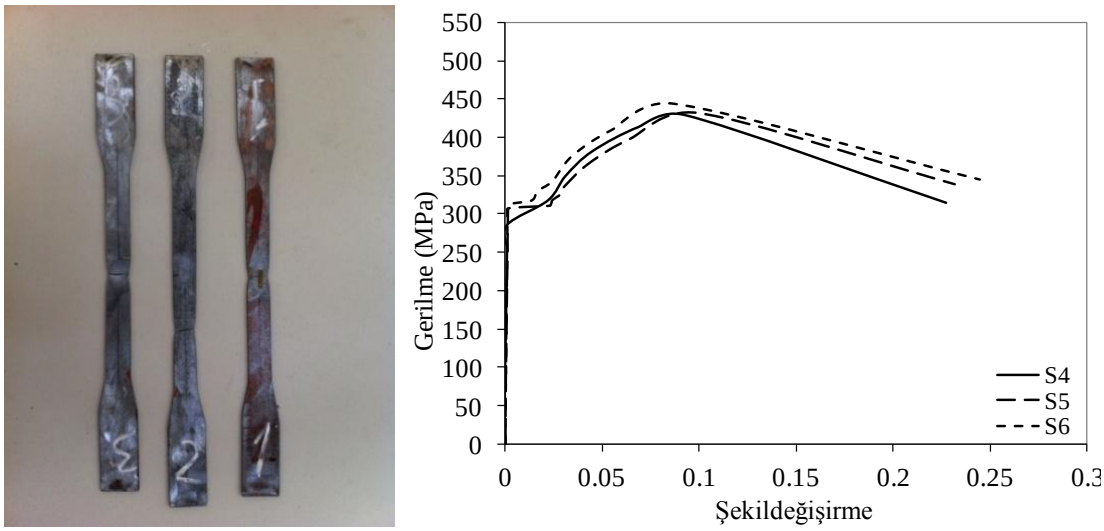
15 mm kalınlıklı kiriş başlık levhalarından alınan 3 adet örnek çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney düzeneği ile numune geometrisi Şekil 3.7'de verilmiştir.





Şekil 3.7 : 15 mm kalınlıklı örneklere ait boyutlar ve deney düzeneği.

Deneyler sonucu elde edilen gerilme - şekildeğiştirme ilişkileri ve numunelerin genel görünümü Şekil 3.8'de verilmiştir.

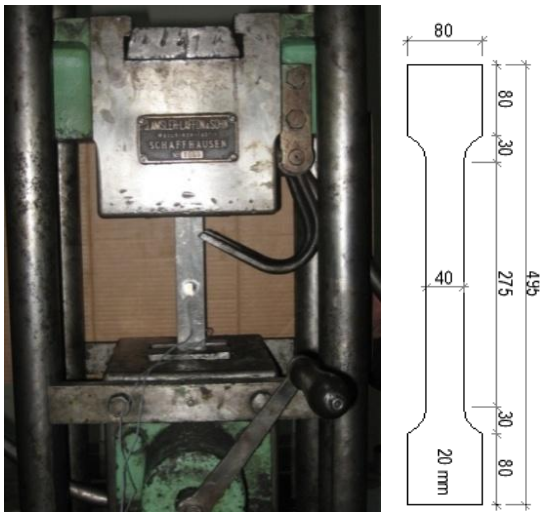


Şekil 3.8 : 15 mm kalınlı levhalarda çekme deneyleri.

Numune davranışları birbirine yakın gerçekleşmiş, ortalama akma dayanımı 303.0 MPa, ortalama çekme dayanımı da 434.9 MPa olmuştur.

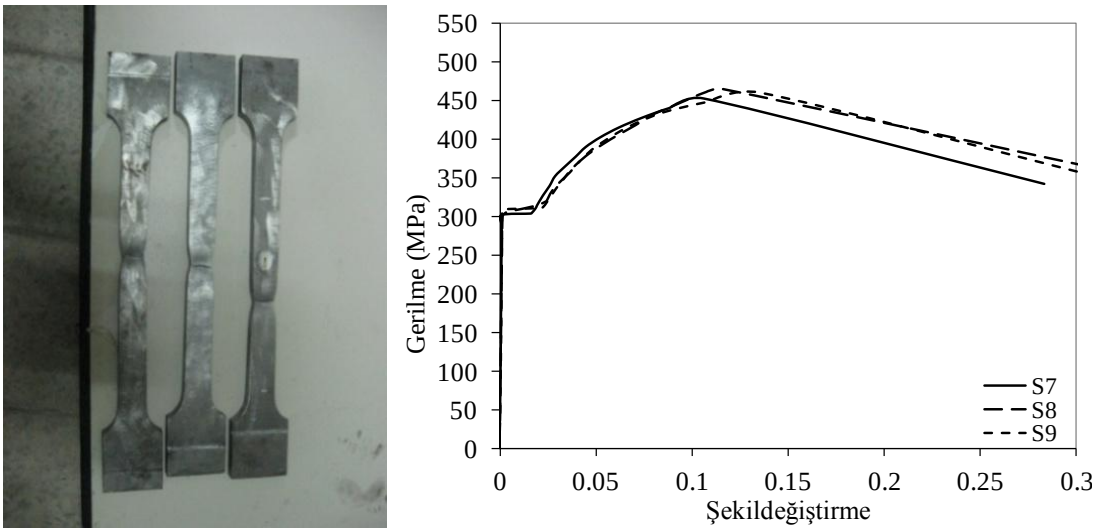
3.3.3 t=20 mm kalınlıklı elemanlara ait deneyler

20 mm kalınlıklı kolon başlık levhalarından alınan 3 örnek, çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney düzeneği ve numune boyutları Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 : 20 mm kalınlıklı örneklere ait boyutlar ve deney düzeneği.

Elde edilen gerilme - şekildeğiştirme ilişkileri ve numunelerin deney sonrasındaki görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 : 20 mm kalınlı levhalarda çekme deneyleri.

Gerçekleşen ortalama akma dayanımı 305.0 MPa, çekme dayanımı da 458.5 MPa'dır.

Tüm numunelerden elde edilen ortalama gerilme ve şekildeğiştirme değerleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 : Çelik çekme deneyi sonuçları.

Numune	Akma geril. (MPa)	En büyük çekme geril. (MPa)	En büyük çekme gerilmesine karşı gelen şekild.	Kopma geril. (MPa)	Kopma şekild.	E (MPa)
t= 3 mm	360	441.7	0.118	388.0	0.260	219733
t= 15 mm	303	434.9	0.092	332.7	0.234	229036
t= 20 mm	305	458.5	0.119	344.2	0.310	225800

3.4 Sistem Deneyleri

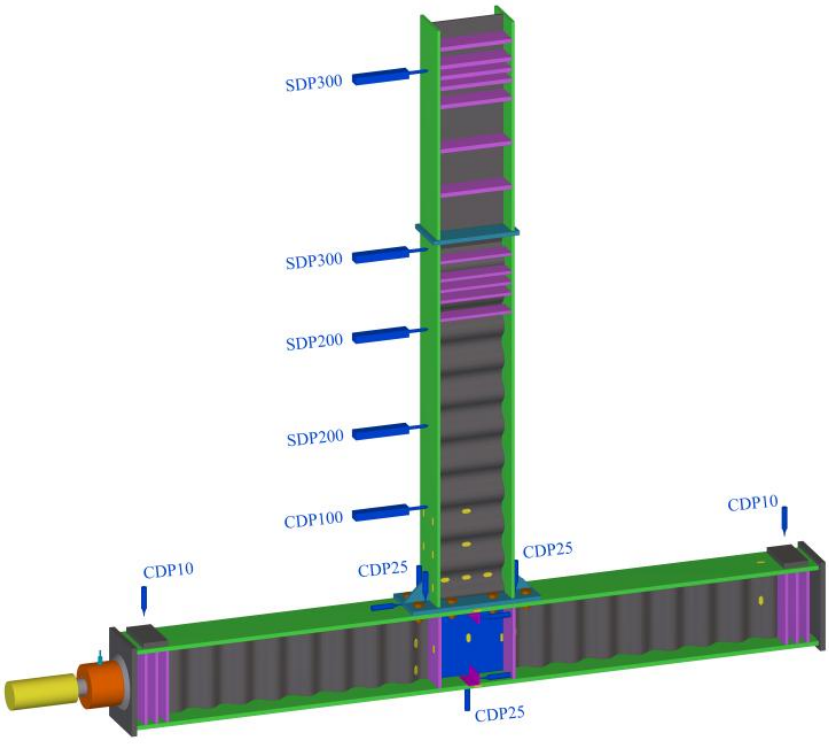
Panel bölgesi altı farklı şekilde oluşturulmuş ince cidarlı sinüzoidal gövdeli kolon ve kiriş elemandan meydana getirilen moment aktaran birleşim türü deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, 1'i pilot olmak üzere toplam 7 adet 1/1 ölçekli deney gerçekleştirilmiştir.

Deneyler yerdeğiştirme kontrollü olarak, tersinir tekrarlı çevrimler şeklinde uygulanmıştır.

3.4.1 Ölçüm düzeneği

Numunelerde şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Yerdeğiştirme ölçümleri, deney numunelerinin farklı bölgelerinde referans çerçeveye bağlanan *TML* marka *CDP-10*, *CDP-25*, *CDP-50*, *CDP-100*, *SDP-200* ve *SDP-300* tipi yerdeğiştirme ölçerler kullanılarak yapılmıştır. Yerdeğiştirme ölçerler, hem itme hem de çekme çevrimlerinde veri alacak şekilde ortalanarak Şekil 3.11'de verildiği gibi yerleştirilmiştir.

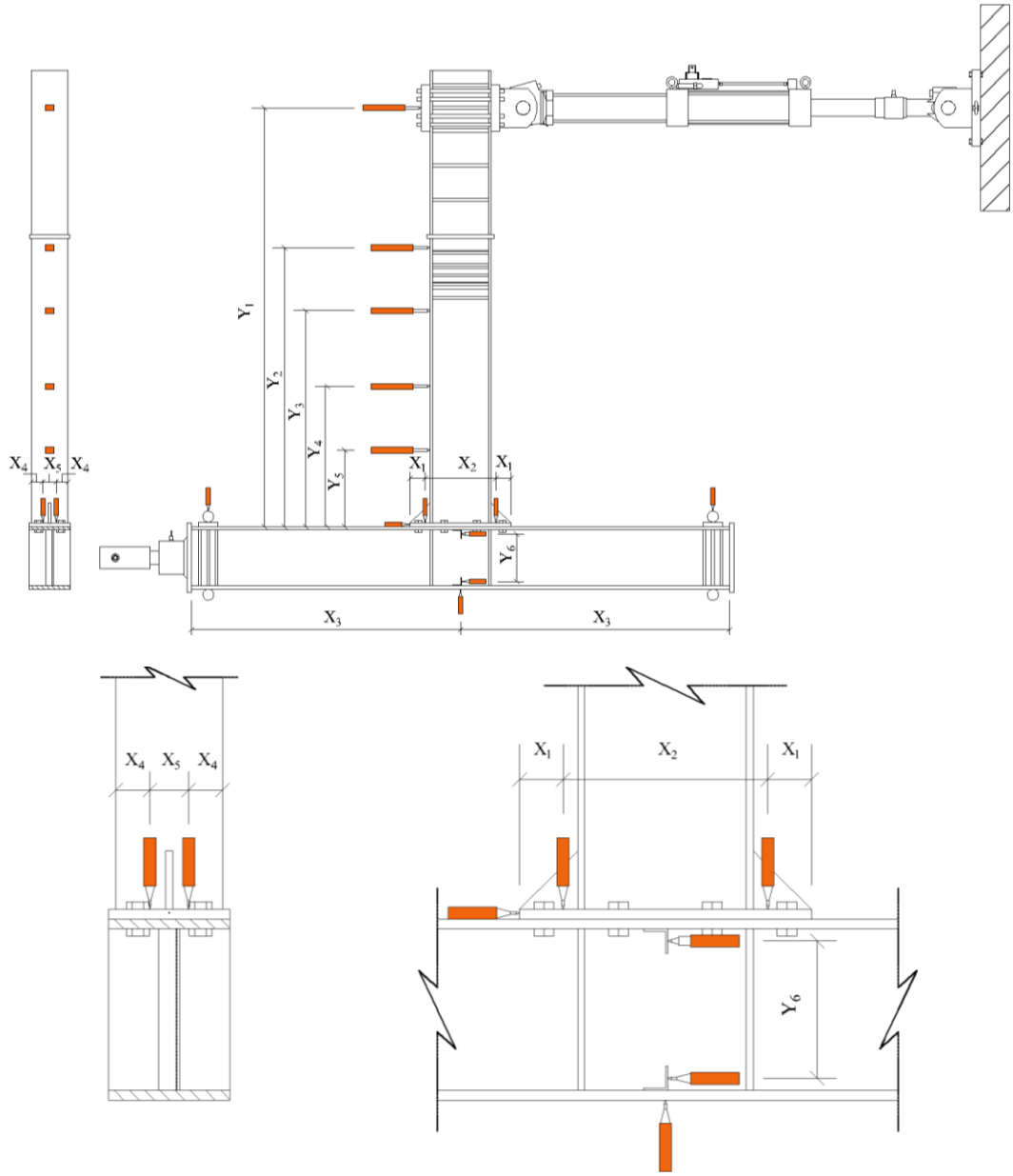


Şekil 3.11 : Numune üzerinde yerdeğiştirme ölçerlerin konumları.

Numunelerin farklı kesitlerinde gerçekleşecek mutlak ve göreli yerdeğiştirmelerin belirlenmesi ve kontrol amaçlı genel kalkma, toptan kayma, düzlem dışı hareketlerin ölçülebilmesi için toplam 18 adet yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Kirişte (düşey elemanda) farklı kesitlerde yatay yerdeğiştirmelerin ölçülebilmesi için bir *SDP-300* tipi yerdeğiştirme ölçer, iki *SDP-300*, iki *SDP-200* ve bir tane *CDP-100* tipi yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Bir adet *CDP-50* tipi yerdeğiştirme ölçer, kiriş alın plakasının yatay hareketini kaydetmek için yerleştirilmiştir. Panel bölgesinde ve alın plakasında oluşan şekildeğiştirme, dönme ve eğriliklerin hesaplanabilmesi için iki adet *CDP-25* ve iki adet *CDP-50* tipi yerdeğiştirme ölçer alın plakasına dik olarak yerleştirilmiştir. İki adet *CDP-25* tipi yerdeğiştirme ölçer ise panel bölgesinde

kolonun başlıklarına yapıştırılan korniyer üzerine yerleştirilmiştir. Bir adet *CDP-25* tipi yerdeğiştirme ölçer kolonun alt başlığında numune simetri ekseninde düşey konumlu olarak yerleştirilmiştir. İki adet *CDP-25* tipi yerdeğiştirme ölçer mesnet bölgelerinde meydana gelecek düşey hareketi kontrol etmek üzere ilgili kesitlere yerleştirilmiştir. Kirişin düzlem dışı hareketini kontrol etmek üzere bir adet *CDP-25* tipi yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır.

Tüm numunelerde yerdeğiştirme ölçerlerin kesin konumlarını tanımlamak için gerekli olan değişkenler Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Yerdeğiştirme ölçerlerin konumlarını tanımlamak amacıyla kullanılan değişkenler.

Değişkenlerin her numunede aldığı değerler Çizelge 3.3'te toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Yerdeğiştirme ölçerlerin konumları.

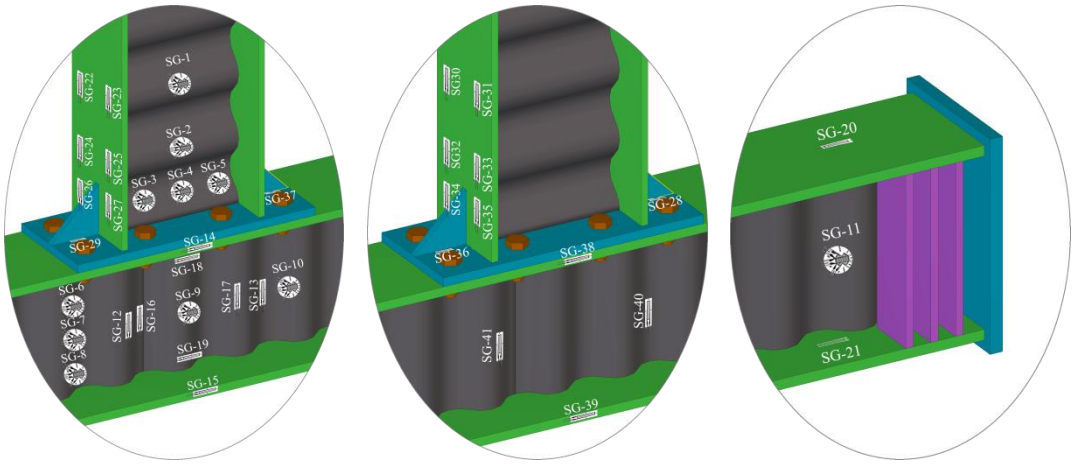
	EEPC-B (mm)	EEPC-HS (mm)	EEPC-H0 (mm)	EEPC-H2 (mm)	EEPC-SDS (mm)	EEPC-DDS (mm)
x_1	90	90	90	90	90	90
x_2	423	423	423	423	423	423
x_3	1602	1602	1602	1602	1602	1602
x_4	70	70	70	70	70	70
x_5	80	80	80	80	80	80
y_1	2530	2535	2500	2485	2515	2535
y_2	1660	1660	1660	1670	1660	1660
y_3	1300	1300	1277	1300	1300	1300
y_4	850	850	850	850	850	850
y_5	425	425	425	425	425	425
y_6	283	283	283	283	283	283

Şekildeğiştirme ölçümleri, numune kritik bölgesine yerleştirilen tek eksenli ve üç eksenli (rozet) şekildeğiştirme ölçerler ile yapılmıştır. Her numunede kullanılan şekildeğiştirme ölçer tip ve adetleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Numunelerde kullanılan şekildeğiştirme ölçerler sayıları.

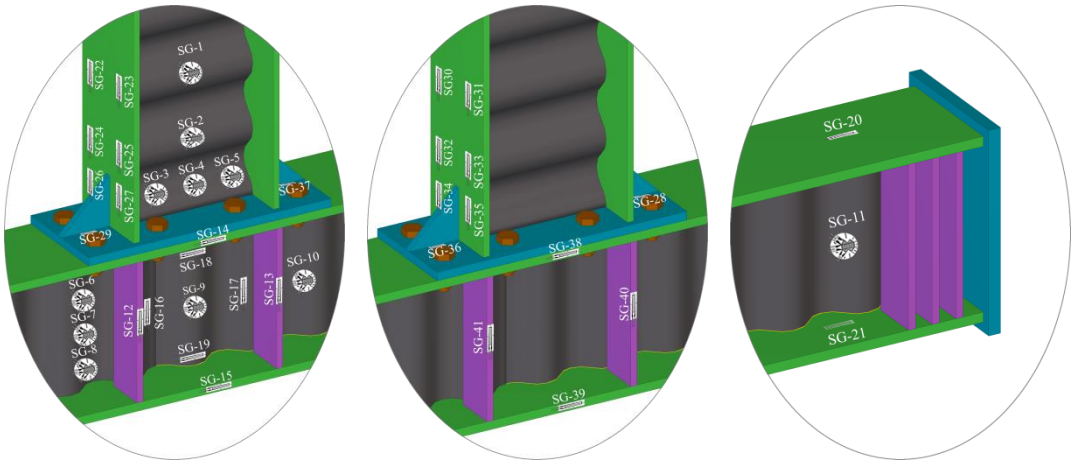
Numune	FLA6-11-3L	YFLA5-3L	FRA5-11-3L
EEPC-H0	0	30	7
EEPC-H2	22	10	10
EEPC-B	18	12	11
EEPC-HS	0	30	11
EEPC-SDS	18	12	10
EEPC-DDS	18	16	11

Plastikleşme beklenen bölgelere akma sonrasında da ölçüm yapabilen *YFLA* tipi, plastikleşme beklenmeyen bölgelere de *FLA* tipi şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmıştır. İnce sinüzoidal sac üzerine de *FRA* tipi üç eksenli şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmıştır. Kullanılan şekildeğiştirme ölçerlerin konumları her numune için Şekil 3.13'te verilmiştir.



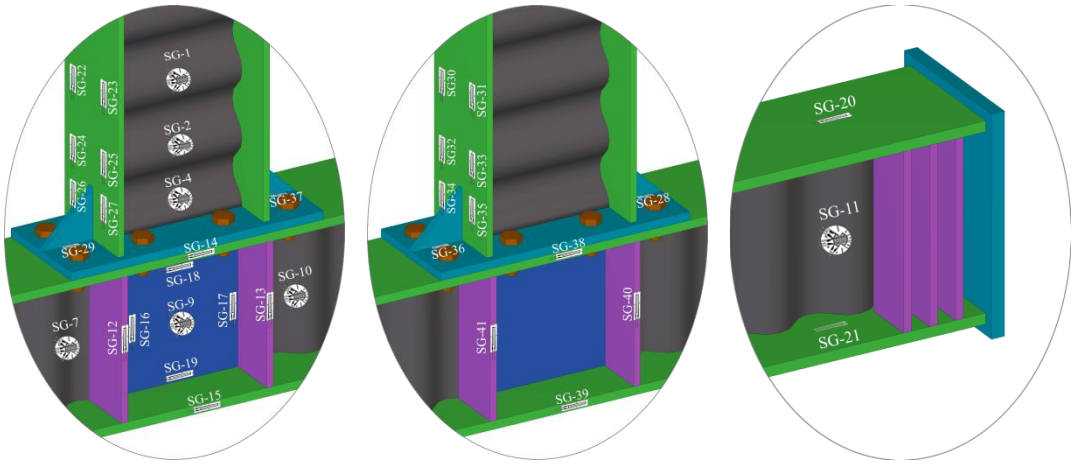
Ön Arka Sağ Mesnet

EEPC-B



Ön Arka Sağ Mesnet

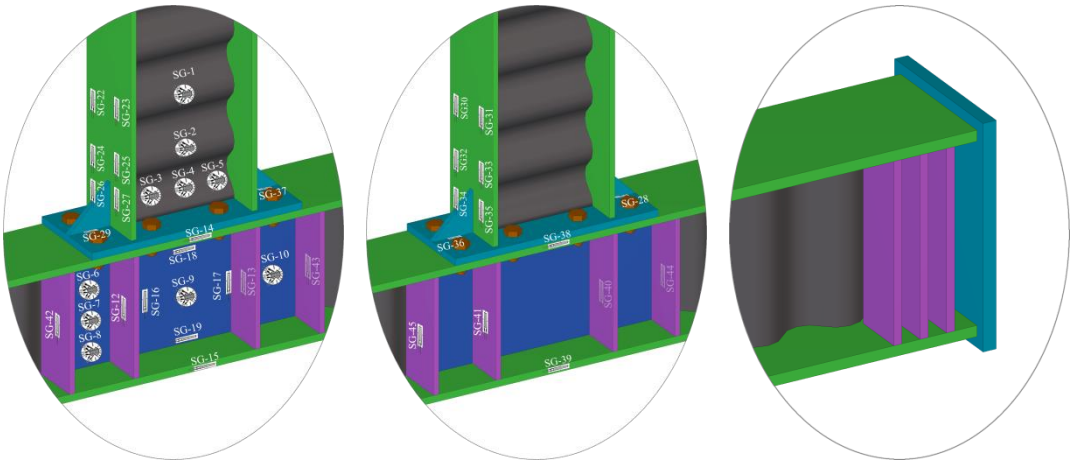
EEPC-HS



Ön Arka Sağ Mesnet

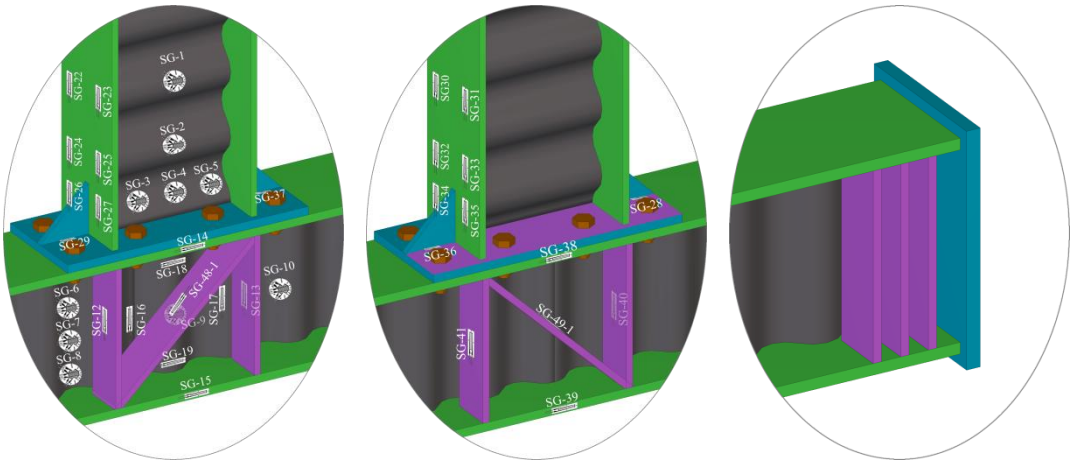
EEPC-H0

Şekil 3.13 : Şekildeğiştirme ölçerlerin numuneler üzerindeki konumları.



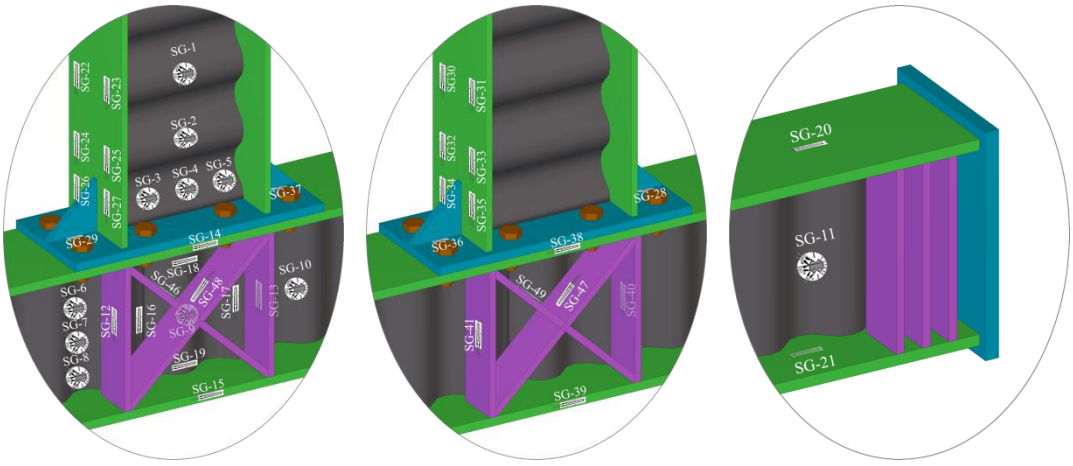
Ön Arka Sağ Mesnet

EEPC-H2



Ön Arka Sağ Mesnet

EEPC-SDS

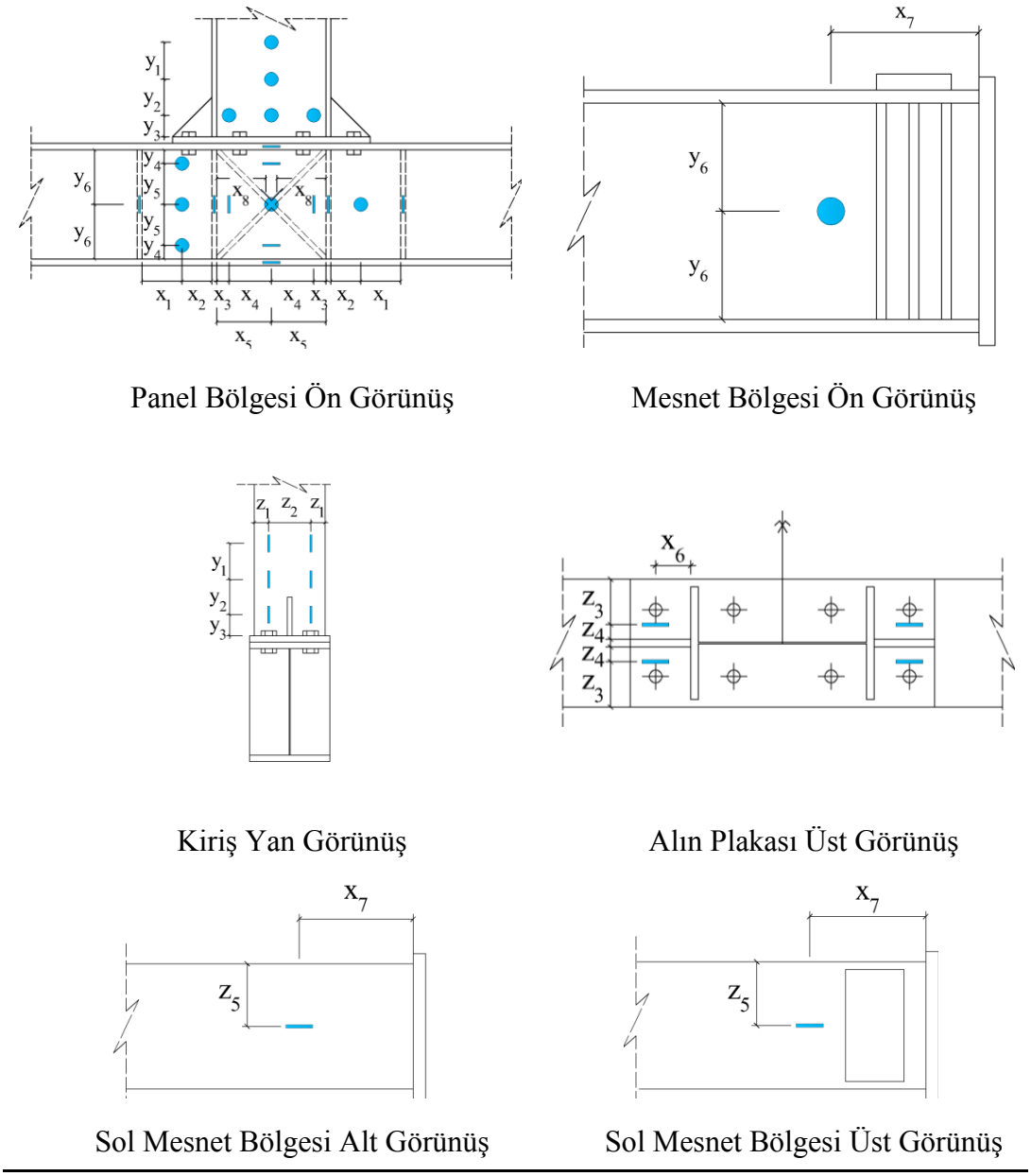


Ön Arka Sağ Mesnet

EEPC-DDS

Şekil 3.13 (devam) : Şekildeğiştirme ölçerlerin numuneler üzerindeki konumları.

Şekildeğiştirme ölçerlerin numuneler üzerindeki konumlarını tanımlamak üzere kullanılan değişkenler Şekil 3.14'te tanımlanmıştır.



Şekil 3.14 : Şekildeğiştirme ölçerlerin yerleşim planları.

Değişkenlerin her numunede aldığı değerler Çizelge 3.5'te toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Şekildeğiştirme ölçerlerin mesafeleri.

	EEPC-B (mm)	EEPC-HS (mm)	EEPC-H0 (mm)	EEPC-H2 (mm)	EEPC-SDS (mm)	EEPC-DDS (mm)
x_1	-	-	-	120	-	-
x_2	50	50	50	50	50	50
x_3	10	10	10	10	10	10
x_4	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5
x_5	166.5	166.5	166.5	166.5	166.5	166.5
x_6	70	70	70	70	70	70
x_7	100	100	100	100	100	100
x_8	-	-	-	-	-	150
y_1	131.5	131.5	131.5	131.5	131.5	131.5
y_2	131.5	131.5	131.5	131.5	131.5	131.5
y_3	50	50	50	50	50	50
y_4	10	10	10	10	10	10
y_5	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5
y_6	166.5	166.5	166.5	166.5	166.5	166.5
z_1	50	50	50	50	50	50
z_2	120	120	120	120	120	120
z_3	105	105	105	105	105	105
z_4	16	16	16	16	16	16
z_5	125	125	125	125	125	125

Deneyler; *EEPC-H0, EEPC-HS, EEPC-B, EEPC-DDS, EEPC-H2* ve *EEPC-SDS* sırasıyla gerçekleştirilmiştir.

İlk deneyde incelenen *EEPC-H0* numunesinde, panel bölgesinin sol tarafında kalan *SG-6* ve *SG-8* rozet tip şekildeğiştirme ölçerleri ile kiriş gövdesinin alın plakasına yakın tarafında yer alan *SG-3* ve *SG-5* rozet şekildeğiştirme ölçerleri kullanılmamıştır. Daha sonraki deneylerde *SG-3*, *SG-5*, *SG-6* ve *SG-8* şekildeğiştirme ölçerleri de numunelere yapıştırılmıştır.

Kolonun sağ mesnet bölgesinde yeralan *SG-11*, *SG-20* ve *SG-21* şekildeğiştirme ölçerleri ilk dört deneyde kullanılmış, elde edilen şekildeğiştirmelerin çok küçük olduğu görüldükten sonra *EEPC-H2* ve *EEPC-SDS* numunelerinde kullanılmamışlardır.

Yerdeğiştirme ölçerler için 18 kanaldan, şekildeğiştirme ölçerler için yaklaşık 70 kanaldan veri okuması yapılmıştır.

3.4.2 Yükleme düzeneği

Deneysel çalışma, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarındaki mevcut kolon - kiriş birleşim bölgesi deney düzeneği (Bedirhanoğlu ve diğ.) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin mevcut deney düzeneğine uyum sağlaması için düzenekte küçük değişiklik ve ilaveler yapılmıştır.

Deney düzeneği; ± 250 kN yükleme ve ± 300 mm yerdeğiştirme kapasiteli MTS hidrolik veren, eksenel kuvvet etkiten 500 kN yükleme kapasiteli hidrolik veren ve numunenin yerleştirildiği çelik düzenekten oluşmaktadır. MTS hidrolik veren betonarme tepki duvarına bağlıdır. Deney düzeneği reaksiyonları aktaracak şekilde rijit laboratuvar döşemesine bağlı durumdadır.

Deney düzeneğine bağlanan numunede yatay eleman kolona, düşey eleman ise kirişe karşı gelmektedir. Numuneler kolon uçlarından deney düzeneğine dairesel kesitli miller ile basit mesnetli olarak bağlanmıştır.

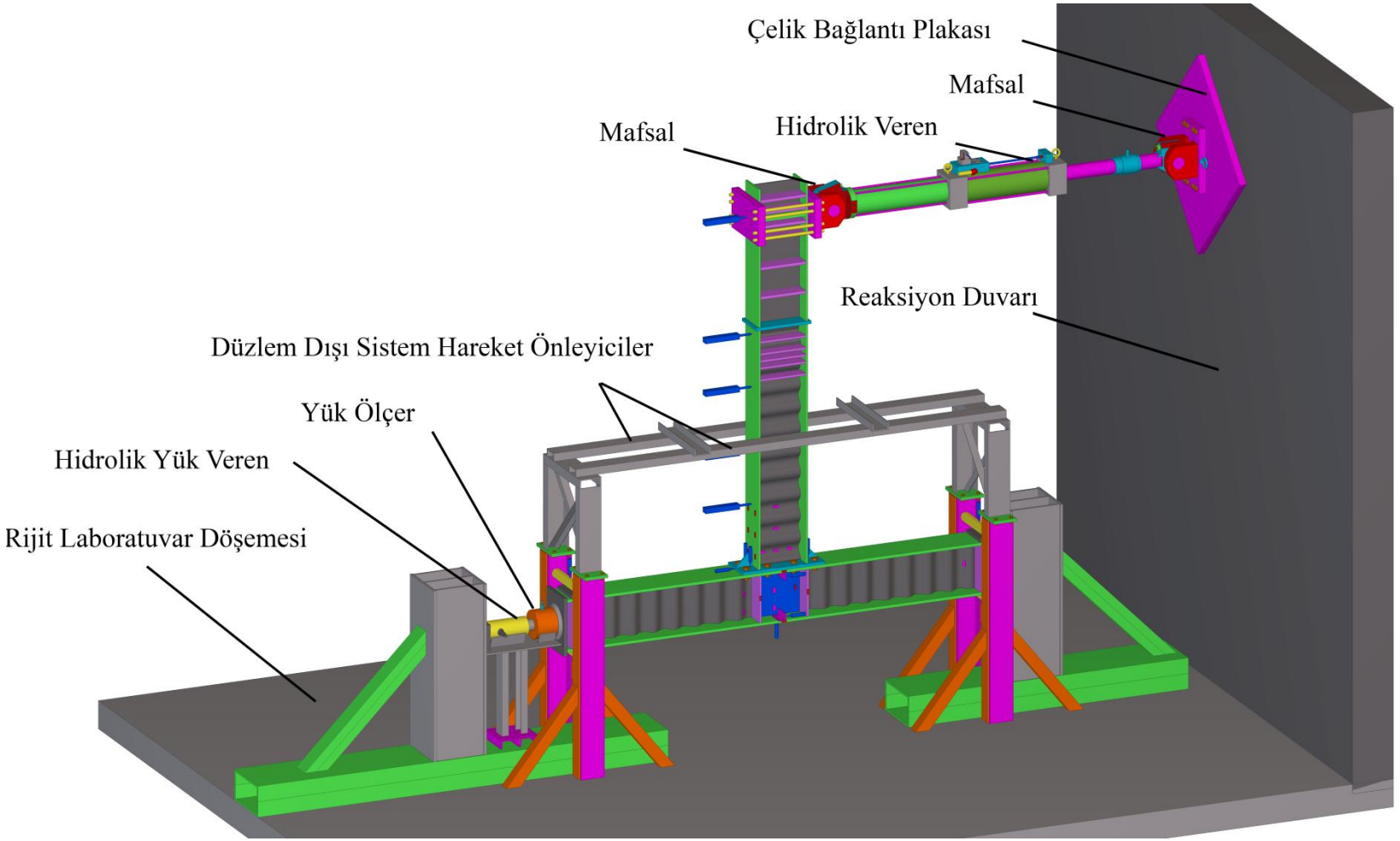
Şekil 3.10'a göre, kolon sol ucundan eksenel kuvvet etkitilmektedir. Uygulanan eksenel kuvvetin miktarı 140 kN olup, bu değer kolon eksenel kuvvet taşıma kapasitesinin yaklaşık %5'ine karşı gelmektedir.

Yatay yükleme, değişken genlikli artan göreli kat hareketleri olarak uygulanmıştır. Hedeflenen göreli kat ötelenmesine karşı gelen yerdeğiştirme hedefleri bilgisayar kontrollü olarak hidrolik verene iletilmekte ve oluşan reaksiyon kuvveti veren gövdesine bağlı yük ölçer ile ölçülmektedir.

Numunenin muhtemel düzlem dışı hareketinin engellenmesi için, deney düzeneğinin ön ve arka yüzlerine iki adet çelik kiriş yerleştirilmiştir. Bu çelik kirişlerin numune kirişine değdikleri kesitlerde, yağlanmış ince sac plakalar bulunmaktadır.

Tersinir tekrarlı yükleme ±250 kN yükleme ve ± 300 mm yerdeğiştirme kapasiteli bilgisayar kontrollü MTS hidrolik veren ile gerçekleştirilmiştir.

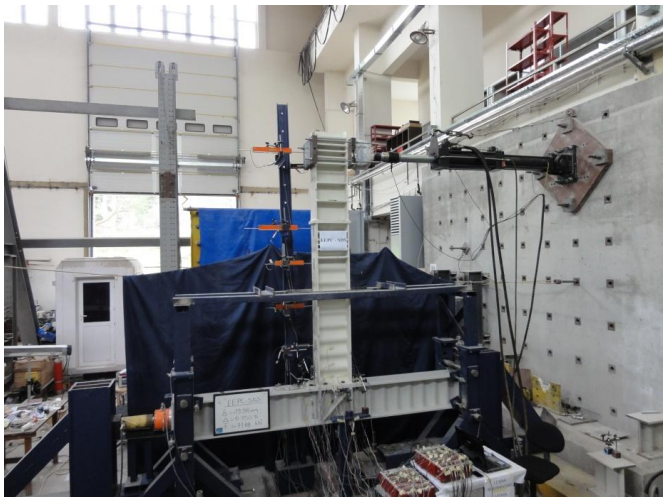
Deney düzeneğine ait genel görünüş Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15 : Deney düzeneği.

Kolon eksenel kuvveti 500 kN yükleme kapasiteli Enerpac hidrolik kriko ile oluşturulmuştur. Numune ile hidrolik kriko arasına yerleştirilen 1000 kN kapasiteli TML yükölçer aracılığı ile eksenel yük şiddeti ölçülmüştür. Deneylerde 140 kN'luk hedef eksenel yük düzeyinde ± % 10'dan daha büyük değişim olduğunda eksenel kuvvet düzeltmesi yapılmıştır.

Tipik bir numunenin deney öncesi görünümü Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16 : Deneye hazır hale getirilmiş bir numune.

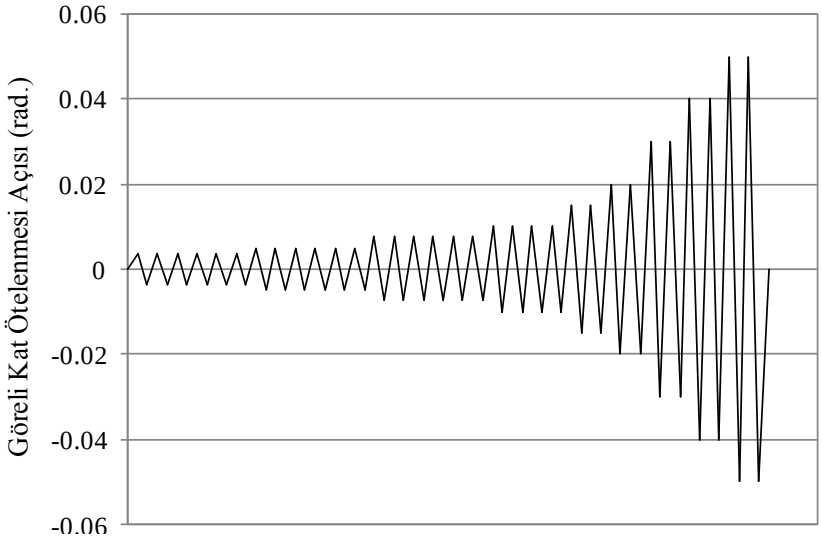
3.4.3 Yatay yerdeğiştirme çevrimleri

Deneyler yerdeğiştirme kontrollü olarak adım adım gerçekleştirilmiş, her adımdan sonra numunenin davranışı izlenmiş ve bir sonraki yerdeğiştirme adımına geçilmiştir.

Yapılan deneylerde, SAC *(Seismic Design Criteria for Steel Moment Frame Construction)* tarafından önerilen yükleme protokolü uygulanmıştır. Bu yükleme protokolüne ait çevrim adımları ve sayıları Çizelge 3.6'da, uygulama görünüşü ise Şekil 3.17'de verilmiştir.

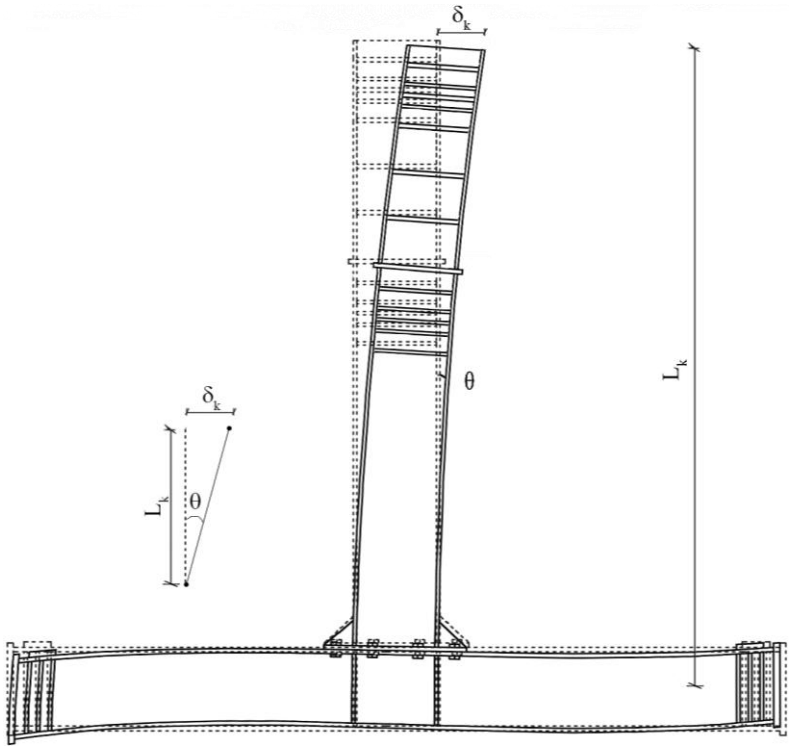
Çizelge 3.6 : SAC yükleme protokolü.

Yük Adımı	Göreli Kat Ötelenmesi Açısı (rad.)	Çevrim Sayısı
1	0.00375	6
2	0.00500	6
3	0.00750	6
4	0.01000	4
5	0.01500	2
6	0.02000	2
7	0.03000	2
8	0.04000	2
9	0.05000	2



Şekil 3.17 : SAC yükleme çevrimleri.

Bu yükleme protokolü, Northridge Depremi (1994) sonrasında çelik yapılarda gözlemlenen bazı sorunlara dayalı olarak geliştirilmiştir. Northridge Depreminde pek çok çelik yapıda elastik bölgedeki çevrim sayılarının fazlalığı nedeni ile elemanlarda akma oluşmadan kaynak hasarları gözlemlenmiştir. Bu sebeple akma öncesindeki bölgede çevrim tekrar sayıları fazla seçilmiştir (Clark ve diğ., 1997).



Şekil 3.18 : Göreli kat ötelenmesi açısının belirlenmesinde kullanılan değişkenlerin tanımı.

θ ile ifade edilen etkin göreli kat ötelenmesi açısı, δ_k ile gösterilen kiriş uç yatay yerdeğiştirmesinin yükleme ekseninden kolon eksenine kadar olan L_k mesafesine bölünmesi ile elde edilmektedir, Şekil 3.18. Göreli kat ötelenmesi açısı θ'nın ifadesi Denklem (3.21)'de verilmiştir.

$$\theta = \frac{\delta_k}{L_k} \tag{3.21}$$

Deney numunelerinin izostatik olması dolayısıyla, herhangi bir kesitteki iç kuvvet denge denklemleriyle doğrudan hesaplanabilmektedir.

Kiriş elemanın eğilme momenti kapasitesi, malzeme deneylerinden elde edilen büyüklükler ile Bölüm 3.2'de verilen eşitlikler kullanılarak;

$$M_p = \sigma_y \times W_{px} = 0.303 \times 1148000 = 347844 \text{ kNmm} \tag{3.22}$$

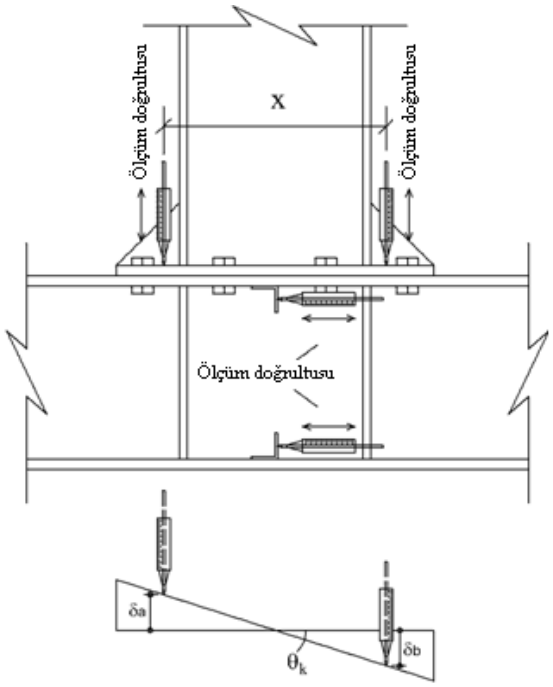
şeklinde hesaplanmıştır.

Kiriş kesme kapasitesi ise, Bölüm 3.2'de verilen eşitlikler kullanılarak, $\chi_{c,l}$= *1.21*, $\chi_{c,l}$= *0.80* dayanım azaltma katsayıları ile

$$V_{rd} = 0.8 \times \frac{36}{1 \times \sqrt{3}} \times 33.3 \times 0.3 = 166 \text{ kN} \tag{3.23}$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Alın plakası üzerinde düşey olarak konumlanmış yerdeğiştirme ölçerlerin göreli hareketinden faydalanılarak kiriş alt ucunda oluşan dönme ölçülmüştür. Dönme, iki yerdeğiştirme ölçerden okunan büyüklüğün farkının ölçüm yapılan noktalar arasındaki mesafeye bölünmesi ile elde edilmiştir. Dönme hesabında kullanılan değişkenler Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19 : Kiriş alt ucunda dönme hesabı.

Alın plakasında meydana gelen dönme denklem (3.24) ile hesaplanmıştır.

$$\theta_k = \frac{(\delta_a - \delta_b)}{x} \qquad \textbf{(3.24)}$$

3.5 Deneysel Sonuçlar

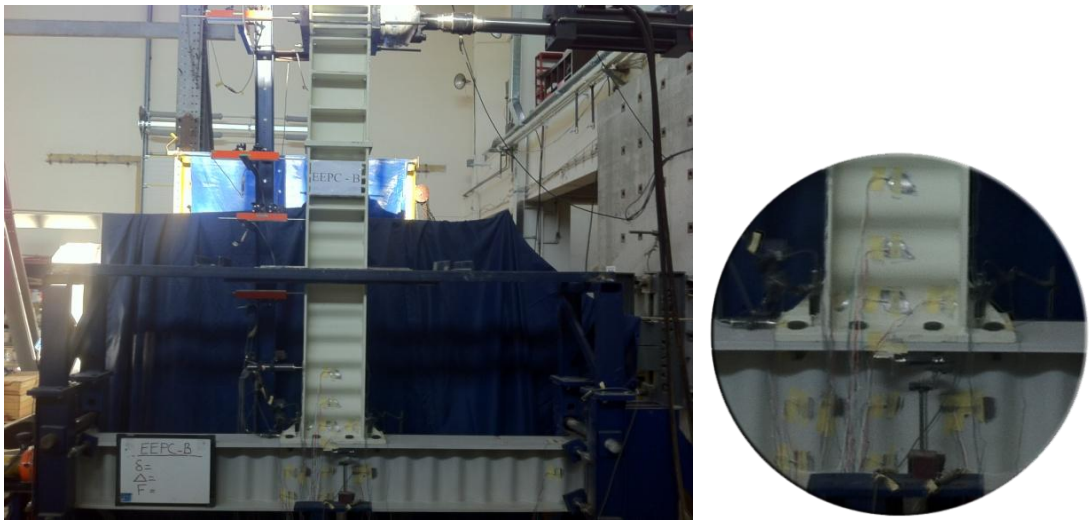
İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli I kesitlerin moment aktaran birleşimlerinin incelendiği bu çalışmada, panel bölgesi farklı şekillerde oluşturulan altı numune üzerinde çalışılmıştır.

Altı farklı tip arasında; uygulamada kullanılan durum, referans olarak kullanılacak durumlar ve uygulama kolaylığı sağlayacak öneriler yer almaktadır.

3.5.1 EEPC-B numunesi deneyi

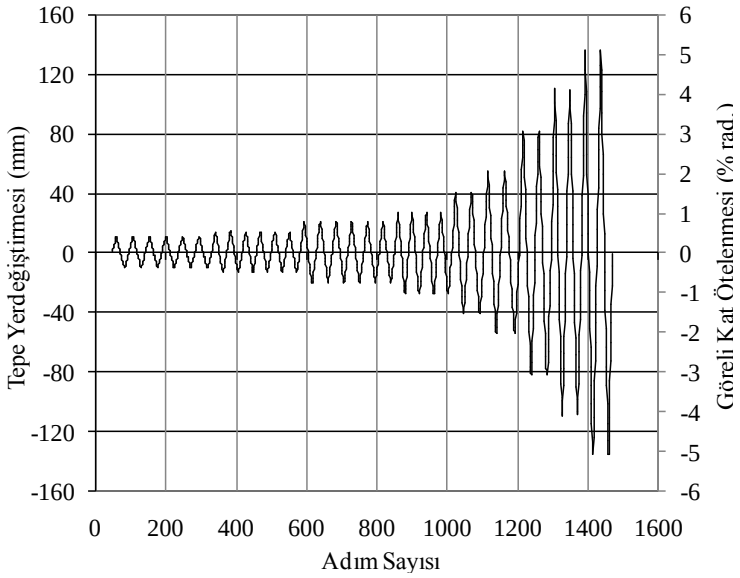
EEPC-B numunesi; panel bölgesi ve kolon gövdesi 3 mm kalınlıklı sinüzoidal levhadan oluşan numunedir. Bu numunede, panel bölgesi ve çevresinde rijitlik arttırıcı süreklilik plakası kullanılmamıştır.

Bu numune, ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların alın plakalı moment aktaran birleşimlerine alt sınır oluşturmak amacıyla denenmiştir. Deney numunesinin genel görünüşü ile panel bölgesi yakın görünüşü Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20 : EEPC-B numunesinin genel ve detay görünüşü.

İki yönlü çevrimsel yükler etkisinde gerçekleştirilen statik deneyde kullanılan yerdeğiştirme fonksiyonu Şekil 3.21'de verilmiştir. Tepe yerdeğiştirmelerine karşı gelen göreli kat ötelenmeleri de aynı şekil üzerinde yer almaktadır.



Şekil 3.21 : EEPC-B numunesinde yerdeğiştirme adımları.

Deneyde, şekildeğiştirme ölçerler için 63, yerdeğiştirme ölçerler için 16 olmak üzere toplam 79 kanaldan okuma yapılmıştır. Numuneye 32 tam yerdeğiştirme çevrimi uygulanmış olup, deney 0.05 rad. göreli kat ötelenmesinin sonuna kadar başarı ile devam etmiştir.

0.01 rad. göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar numunede hasar meydana gelmemiştir. Bu seviyeye kadar;

0.00375 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde 10.18 mm'lik son itme yerdeğiştirmesi durumunda 28.20 kN, son çekme yerdeğiştirmesi durumunda da 24.60 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur.

Bir sonraki çevrim olan 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde, 13.28 mm'lik yerdeğiştirme itme pikinin son çevriminde 33.52 kN, çekme pikinin son çevriminde ise 30.00 kN yatay yük dayanımı ortaya çıkmıştır.

20.37 mm yerdeğiştirmeye karşı gelen 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde itmede 39.70 kN, çekmede ise 36.22 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur.

0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde elemanlar üzerinde gözle görülür bir deformasyon meydana gelmemiştir. Bu seviyede kirişin gövdesi ile başlığını birbirine bağlayan kaynak dikişlerinde kılcal bir çatlak gözlemlenmiştir. 37.16 mm'lik yerdeğiştirme çevriminde itme durumunda 43.93 kN, çekme durumunda ise 39.47 kN'luk yatay yük dayanımı oluşmuştur. Bu yerdeğiştirme seviyesinin tamamlanmasının ardından gözlemlenen hasar durumu Şekil 3.22'de verilmiştir.

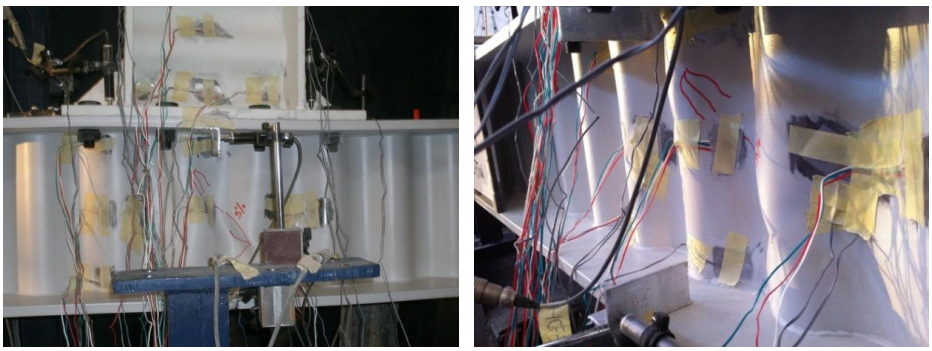


Şekil 3.22 : EEPC-B numunesinin 0.01 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, 0.01 rad. seviyesinde gözlemlenen kılcak çatlak dışında ilave bir çatlak oluşmamıştır. Bu yerdeğiştirme eşiğinde itme durumunda 49.92 kN, çekme durumunda ise 46.00 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir.

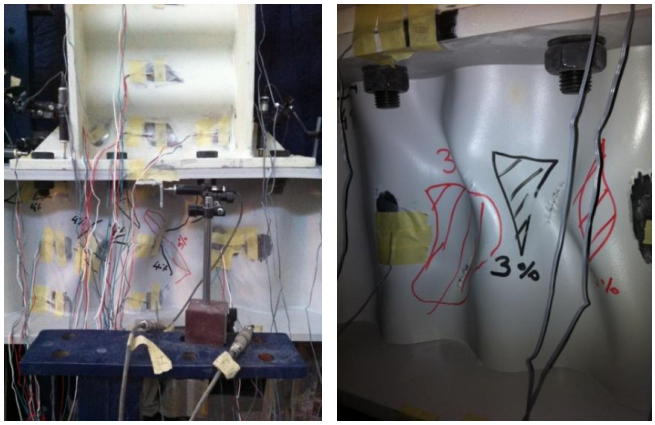
54.33 mm'lik en büyük yerdeğiştirmeye karşı gelen 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde numune bir önceki seviyedeki durumunu korumuş, yeni hasar oluşmamıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde itmede 53.70 kN yatay yük dayanımı ortaya çıkarken, çekmede 50.70 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir.

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, panel bölgesi içinde kalan kolon gövdesinin sinüs formu bozulmuştur. 81.50 mm'lik yerdeğiştirme çevriminde itme durumunda 57.27 kN, çekme durumunda ise 49.75 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur. Bu çevrimin tamamlanmasının ardından numunenin hasar durumu tespit edilmiş ve Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23 : EEPC-B numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

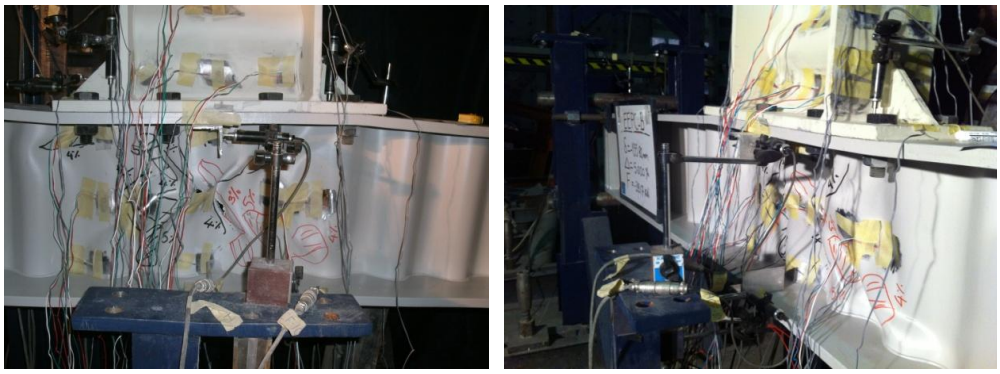
108.66 mm'lik yerdeğiştirmeye karşı gelen 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, panel bölgesi içinde kalan ve önceki göreli kat ötelemesi seviyesinde formu bozulan bölgedeki hasar büyümüş ve kiriş başlıklarının izdüşümlerinin sınırladığı alanın dışına doğru taşmalar olmuştur. Panel bölgesinin ortasında yırtık oluşmuştur. Bu yerdeğiştirme eşiğinin son itme çevriminde 50.00 kN, son çekme çevriminde ise 42.42 kN yatay yük dayanımı ortaya çıkmıştır. Bu çevrimin tamamlanmasıyla birlikte numunede meydana gelen hasar durumu fotoğraflanmış ve Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24 : EEPC-B numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

0.05 etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde, form bozulmaları ve yırtık ilerleyerek büyümüştür. Kolonun panel bölgesi içinde yer alan kısmında gövde ve

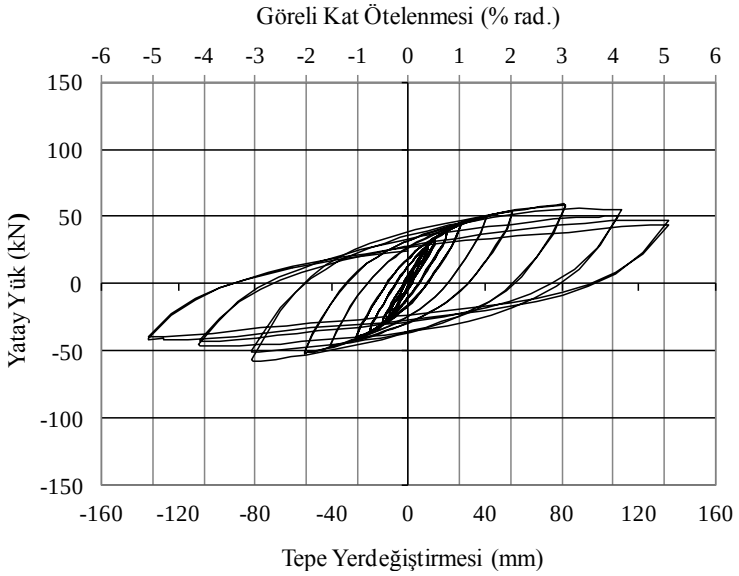
başlıkları birleştiren kaynak dikişlerinde ayrılmalar meydana gelmiştir. 135.82 mm'lik yerdeğiştirme çevriminde itmede 43.15 kN, çekmede ise 39.17 kN'luk yatay yük dayanımları oluşmuştur. Bu eşiğe ait son çevrimin tamamlanmasıyla birlikte numunenin hasar durumu fotoğraflanmış ve Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25 : EEPC-B numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

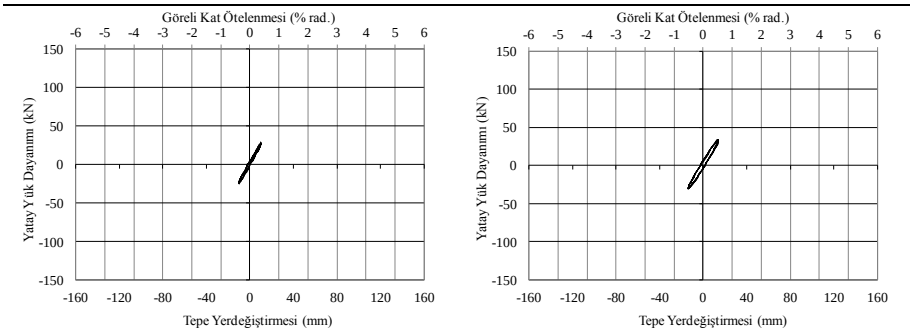
Her etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, itme ve çekme yönlerinde oluşan yatay yük dayanımları birbirlerine yakın çıkmıştır.

32 yerdeğiştirme çevriminin tamamlanması ile elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.26'da verilmiştir.

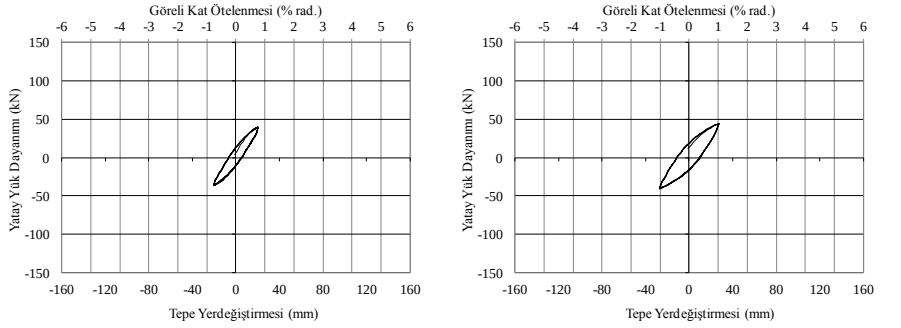


Şekil 3.26 : EEPC-B numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

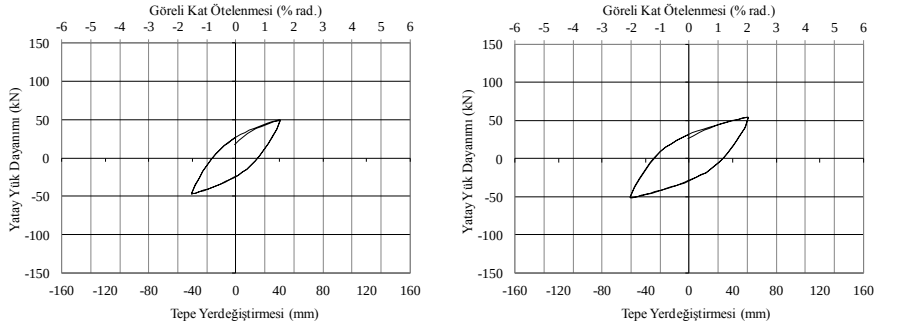
Yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi her bir göreli kat ötelenme eşik değeri için ayrıklaştırılarak Şekil 3.27'de verilmiştir. Grafiklerden, elastik ötesi davranışın 0.0075 rad. - 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde başladığı anlaşılmaktadır.



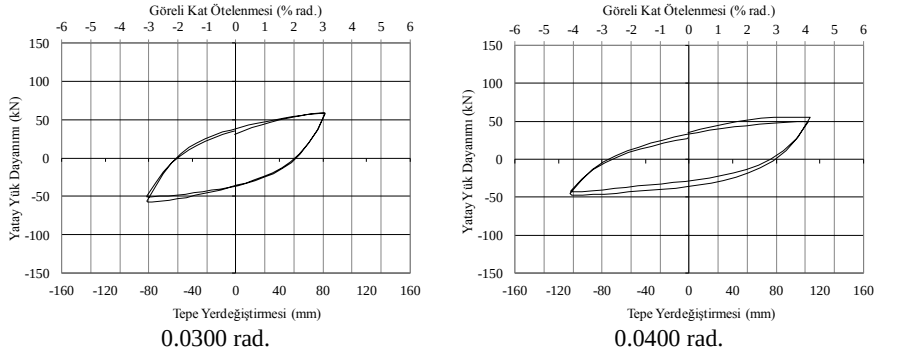
0.00375 rad. 0.00500 rad.



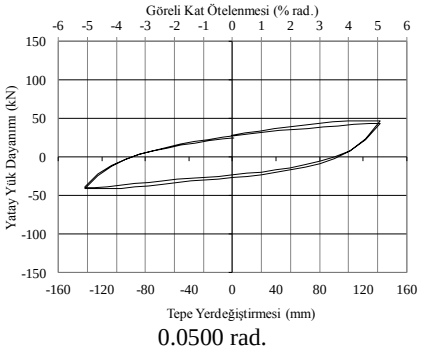
0.00750 rad. 0.0100 rad.



0.0150 rad. 0.0200 rad.



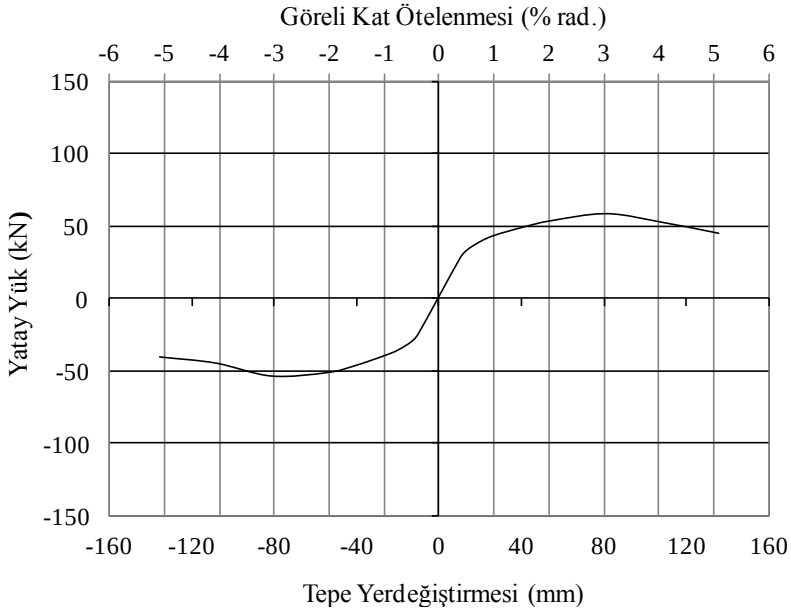
0.0300 rad. 0.0400 rad.



0.0500 rad.

Şekil 3.27 : EEPC-B numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

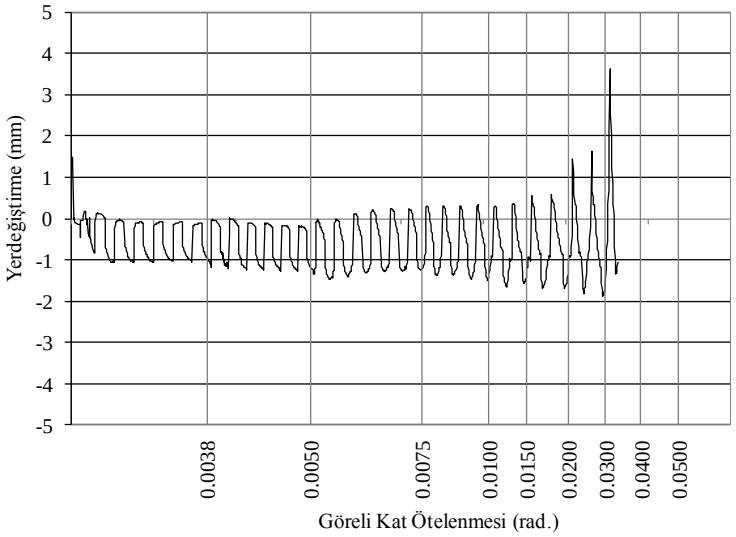
Yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi çevrimlerinin zarf eğrisi Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.28 : EEPC-B numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi.

Numunede 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde en yüksek değerine erişen yatay yük dayanımı, bu seviyede panel bölgesindeki sinüs formun bozulmaya başlaması nedeni ile azalmaya başlamıştır.

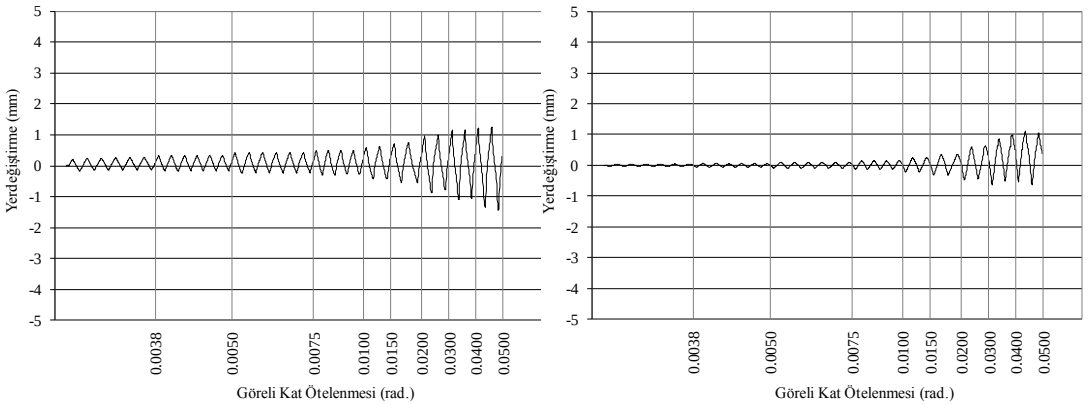
Deney esnasında gerçekleşen düzlem dışı hareketi ve mesnet bölgelerindeki düşey hareketi izlemek amacı ile kullanılan yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen yerdeğiştirmelerin göreli kat ötelenmesine bağlı değişimleri Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.29 : EEPC-B numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde numunenin panel bölgesi formunun bozulması nedeni ile numunede düzlem dışı hareket büyümüş ve düzlem dışı yerdeğiştirmeyi ölçen şekildeğiştirme ölçer, 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerini yaparken çıkarılmak zorunda kalınmıştır.

Panel bölgesi içinde kalan sinüzoidal gövdenin formunun bozulduğu 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde kaydedilen en büyük düzlem dışı hareket 1.78 mm'dir. Bu seviyede sisteme etkitilen yatay yerdeğiştirme ise 81.50 mm'dir. Buna göre panel bölgesi içindeki gövde plakasının sinüs formunun bozulmaya başladığı seviyede düzlem dışı yerdeğiştirmenin düzlem içi yerdeğiştirmeye oranı 1/46 olmuştur.



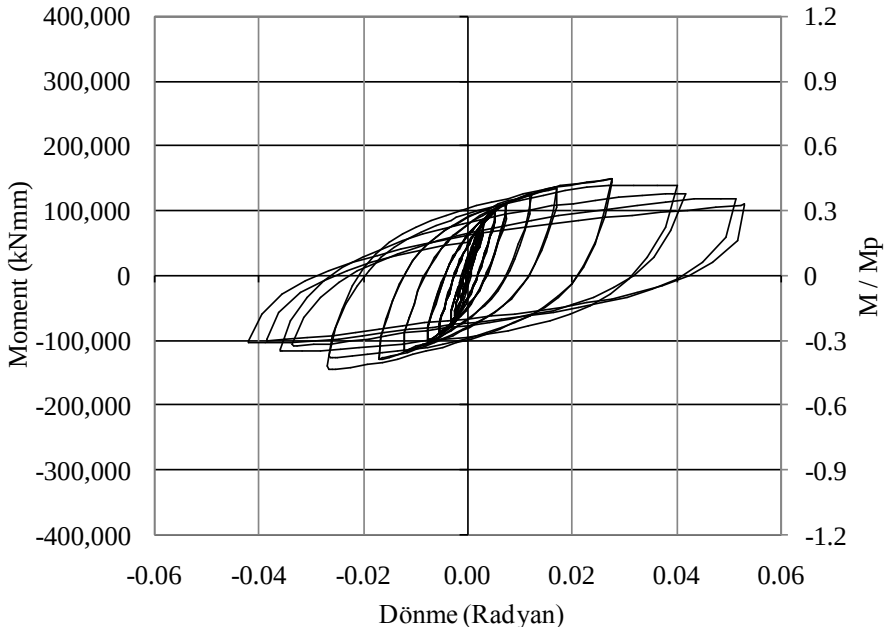
a. Sol mesnet *b. Sağ mesnet*

Şekil 3.30 : EEPC-B numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi açısına karşı gelen yerdeğiştirme durumunda kolonun basit olarak mesnetlendiği silindirik çubuklarda meydana gelen düşey hareket sol mesnette 0.99 mm, sağ mesnette ise 0.50 mm olarak kaydedilmiştir. Panel bölgesi içinde kalan sinüs formunda bozulmanın başladığı seviyede sol mesnetin hareketinin yatay yerdeğiştirmeye oranı 1/82, sağ mesnetin hareketinin yatay yerdeğiştirmeye oranı da 1/163 olmuştur. Ancak burada kaydedilen mesnet düşey hareketinin, büyük ölçüde silindirik çubukların açıklık ortası sehimine karşı geldiği unutulmamalıdır.

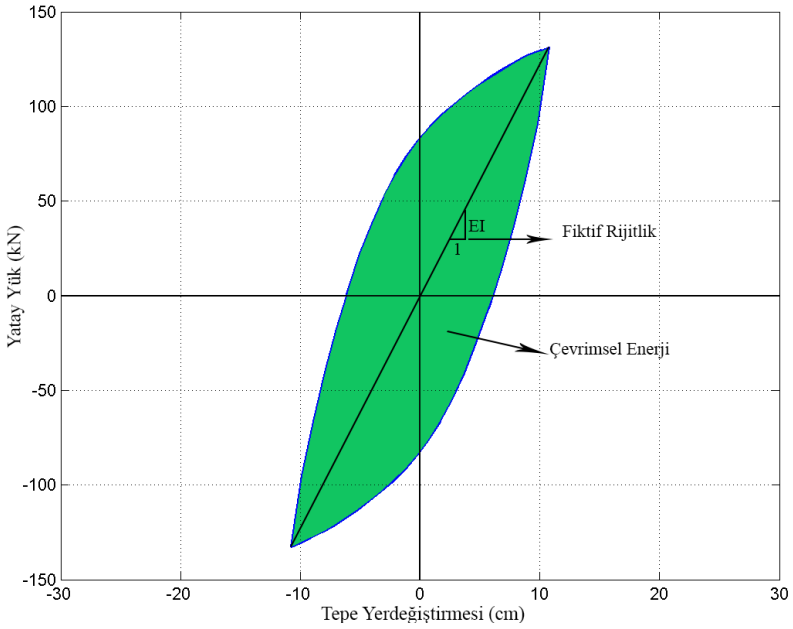
Alın plakasına düşey olarak yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerin göreli hareketlerinden faydalanarak elde edilen moment - dönme ilişkisi Şekil 3.31'de verilmiştir. Düşey aksta yer alan moment büyüklüğü, hidrolik verenden okunan

kuvvetin, hidrolik verenin merkezinden alın plakasına kadar olan mesafe ile çarpılmasıyla bulunmuştur.



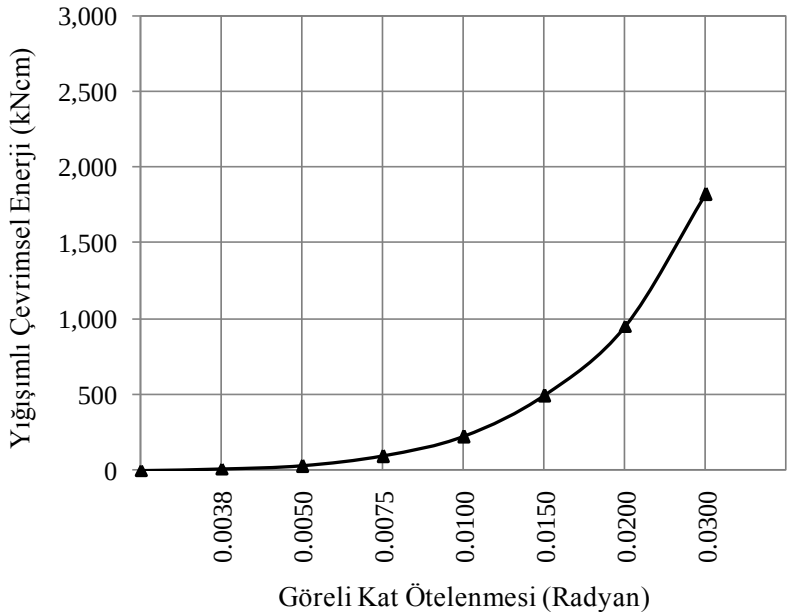
Şekil 3.31 : EEPC-B numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi.

Mevcut bir Matlab yazılımı (AAD Loop Discretization, Ver. 4.0) kullanılarak yatay yük - yerdeğiştirme çevrimleri ayrıklaştırılmıştır. Ayrık çevrimlerin kapadığı alanlar çevrimsel enerji ve pik noktalarını birleştiren doğrunun eğimi de fiktif rijitlik olarak tanımlanmıştır, Şekil 3.32.



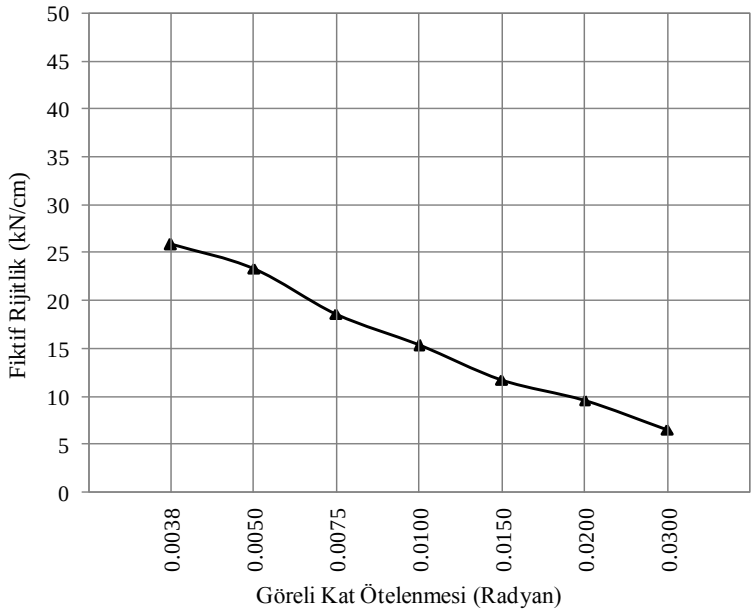
Şekil 3.32 : Çevrimsel enerji ve fiktif rijitlik tanımı.

Bu hesaplar sonucu elde edilen göreli kat ötelenmesi - yığışımlı çevrimsel enerji grafiği Şekil 3.33'te verilmiştir.



Şekil 3.33 : EEPC-B numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjinin değişimi.

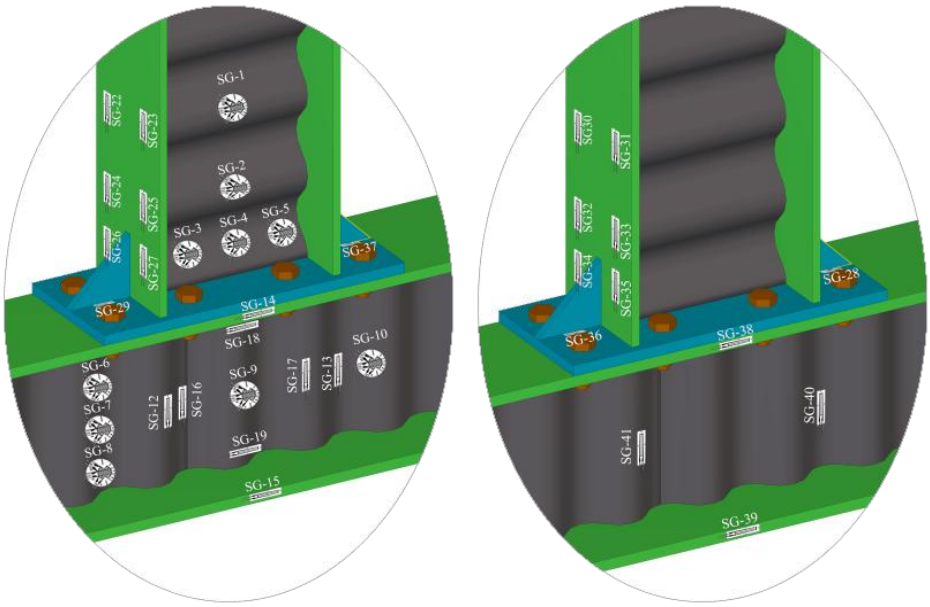
Fiktif rijitliğin panel bölgesi içinde kalan gövde formunun bozulduğu 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesine kadar değişimi Şekil 3.34'te verilmiştir.



Şekil 3.34 : EEPC-B numunesinde rijitlik değişimi.

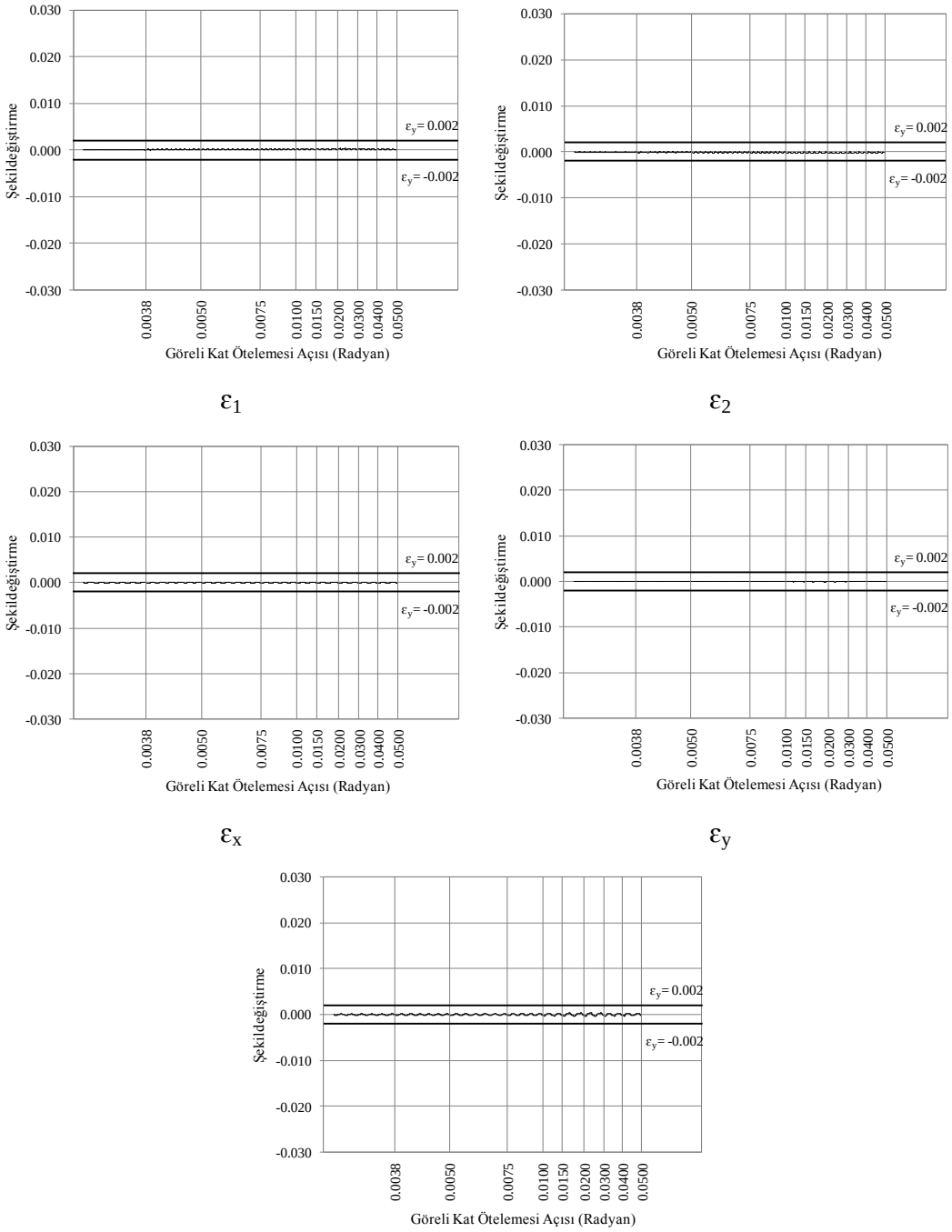
İlk çevrimlerde 26 kN/cm olan fiktif yatay rijitliğin, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi sonunda 6 kN/cm'ye düştüğü görülmektedir.

Panel bölgesi ve yakın çevresine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlere ait konumlar ve isimleri Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.35 : EEPC-B numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler.

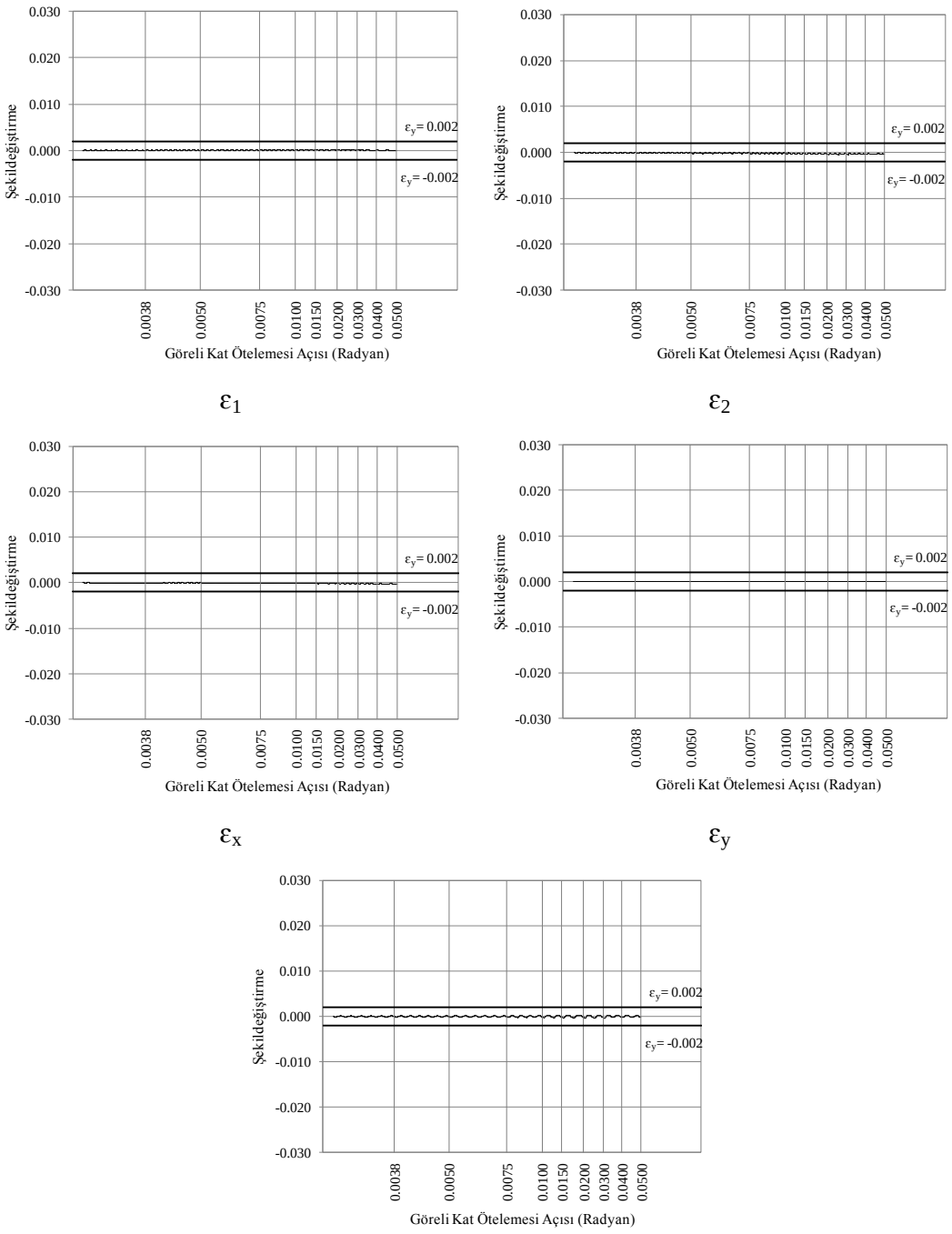
Kiriş gövdesinde yer alan ve panel bölgesinden kiriş yüksekliği kadar uzakta bulunan SG-1 isimli rozet tip şekildeğiştirme ölçerden alınan ε_1, ε_2 asal şekildeğiştirmeleri ile genel eksenlere dönüştürülmüş ε_x, ε_y ve ε_{xy} şekildeğiştirmelerine ait değişimler Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.36 : EEPC-B / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-1 şekildeğiştirme ölçerinden alınan sonuçlar, numunenin bu bölgesinin akma sınır şekildeğiştirmesinden oldukça uzakta olduğunu göstermiştir.

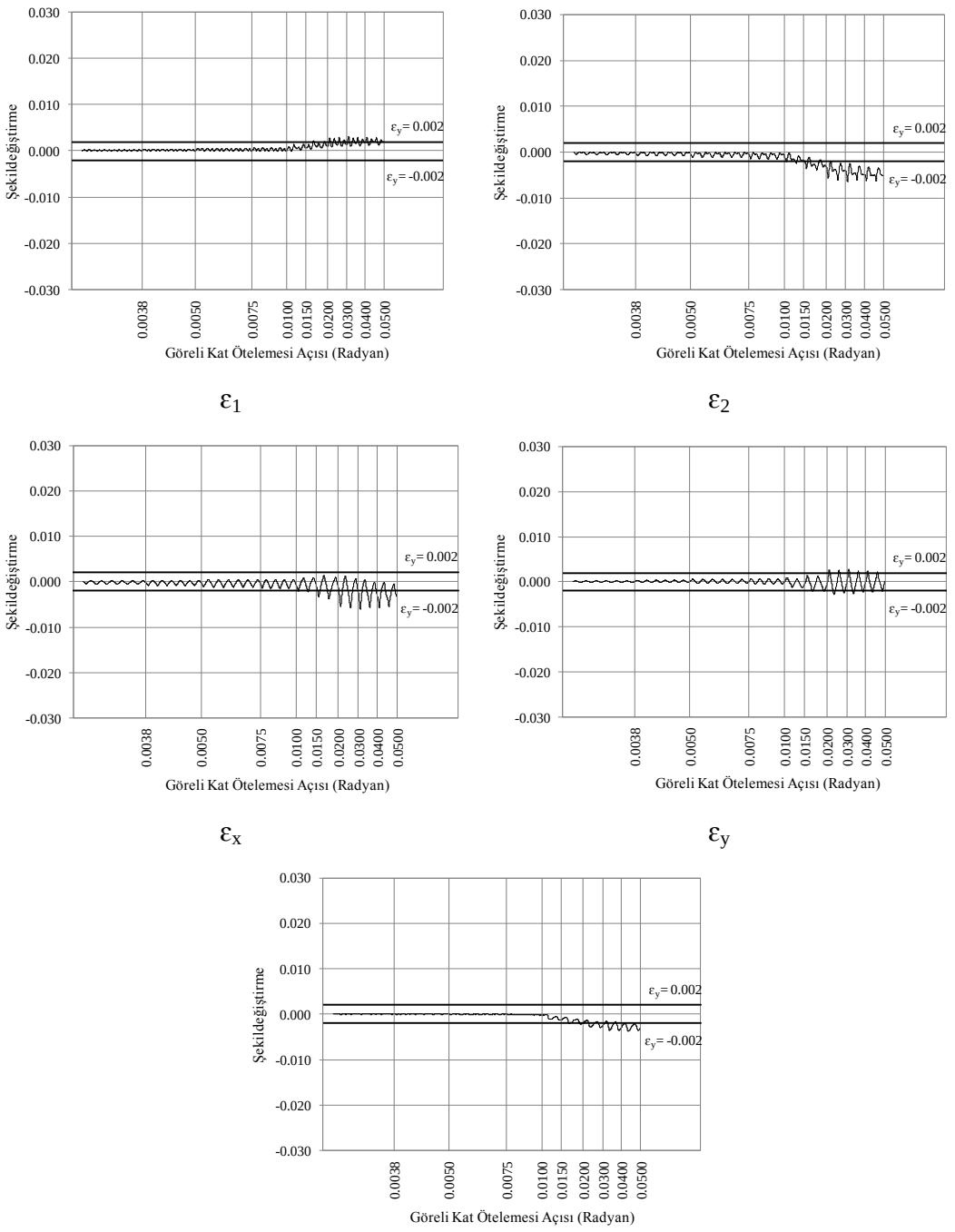
Alın plakasından kiriş yüksekliğinin yarısı kadar ötede, kiriş gövdesinde bulunan SG-2 isimli şekildeğiştirme ölçerden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.37'de gösterilmiştir.



Şekil 3.37 : EEPC-B / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-2 şekildeğiştirme ölçerinden alınan sonuçlara göre numunenin bu bölgesinde de akma şekildeğiştirmesine erişilmemiştir.

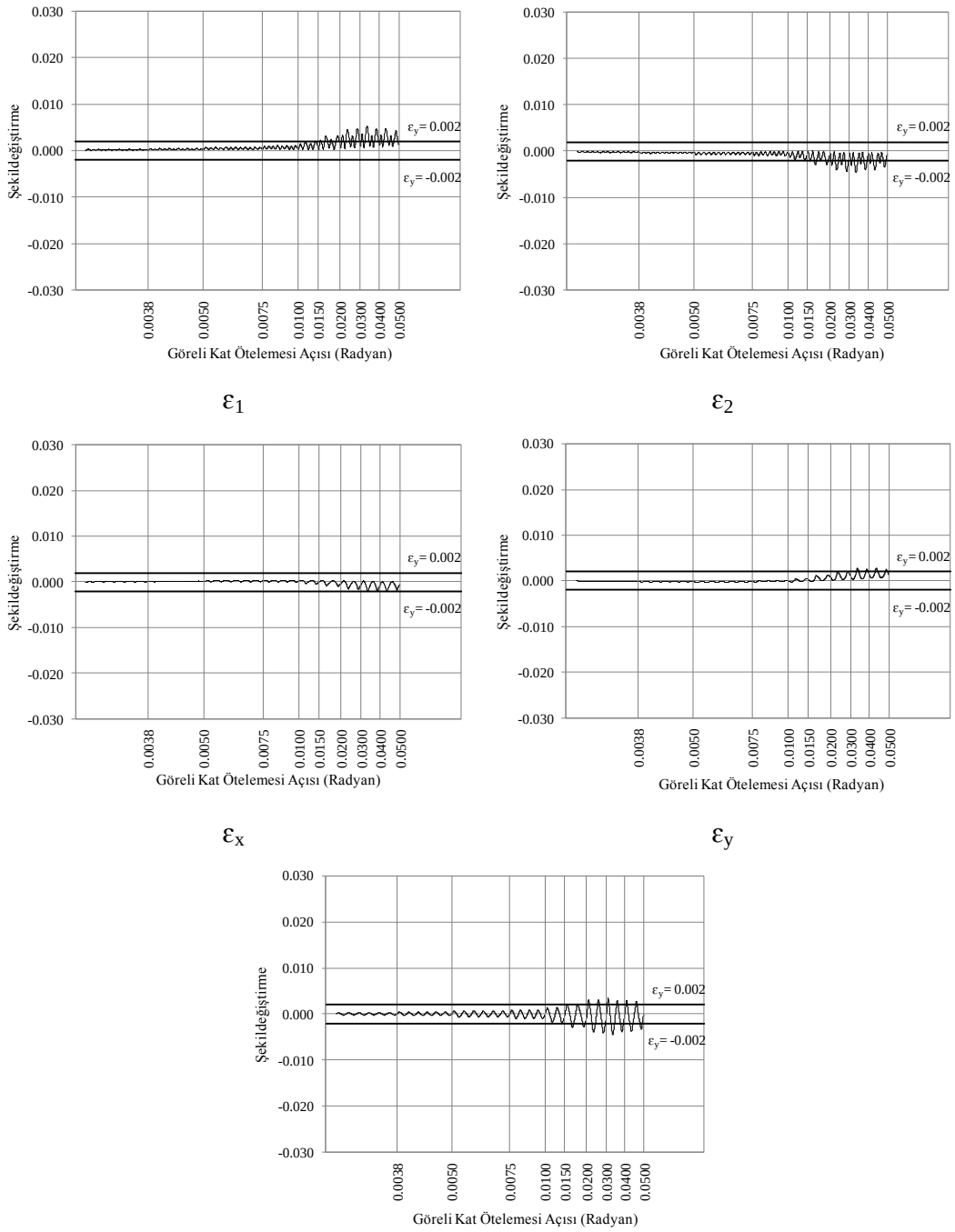
Kiriş gövdesi üzerinde yer alan ve alın plakasına en yakın konumda bulunan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-3'ün vermiş olduğu değerlere dayalı olarak hesaplanan ε_1, ε_2, ε_x, ε_y ve ε_{xy} büyüklükleri Şekil 3.38'de verilmiştir.



Şekil 3.38 : EEPC-B / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-3 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen sonuçlara göre kiriş kesitinin bu bölgesinde 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde plastikleşme başlamıştır.

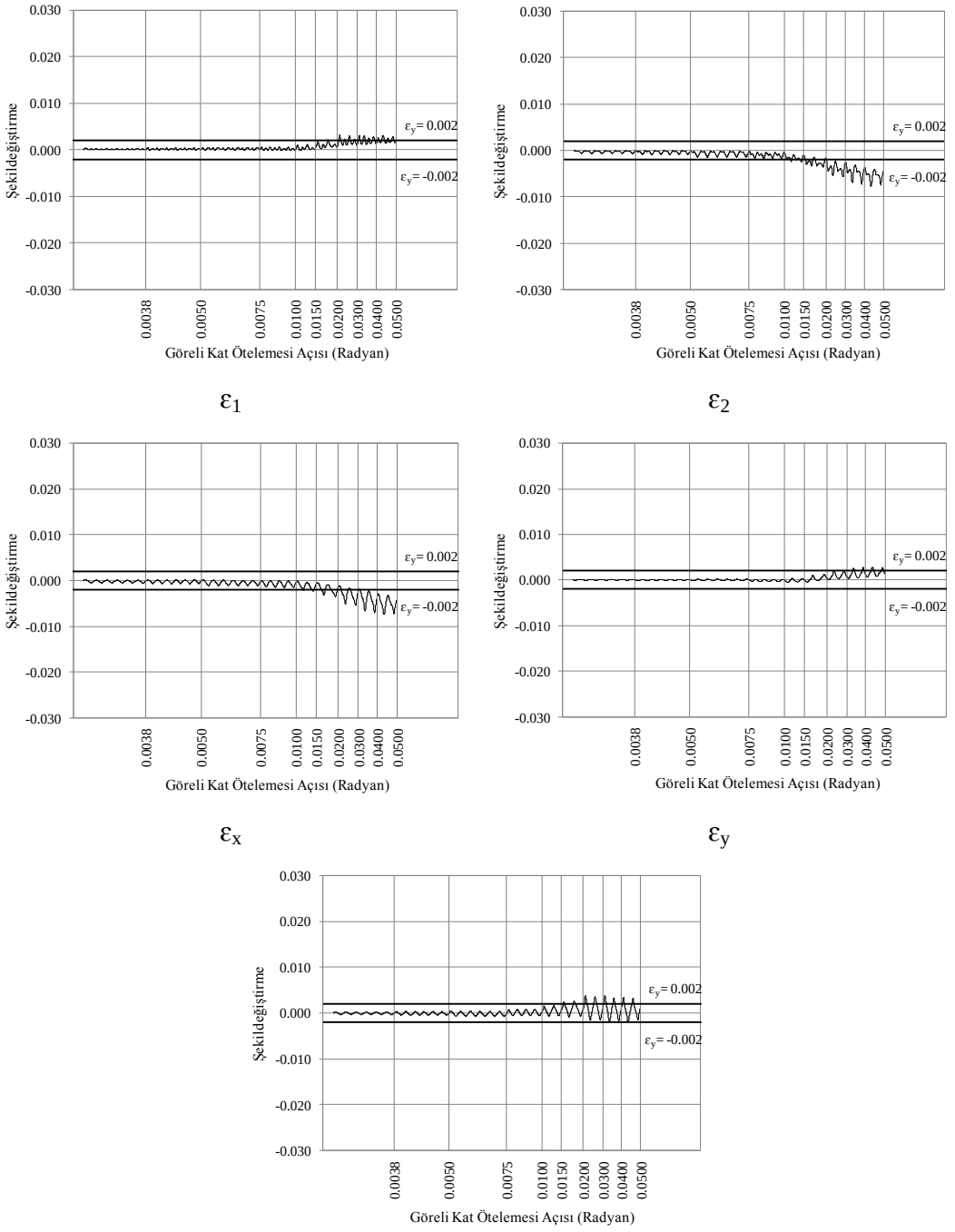
SG-3 şekildeğiştirme ölçerinin yanında bulunan SG-4 şekildeğiştirme ölçerinden alınan kayıtlardan elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri de Şekil 3.39'da verilmiştir.



Şekil 3.39 : EEPC-B / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki plastikleşmeler, SG-3 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede olduğu gibi 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde başlamıştır.

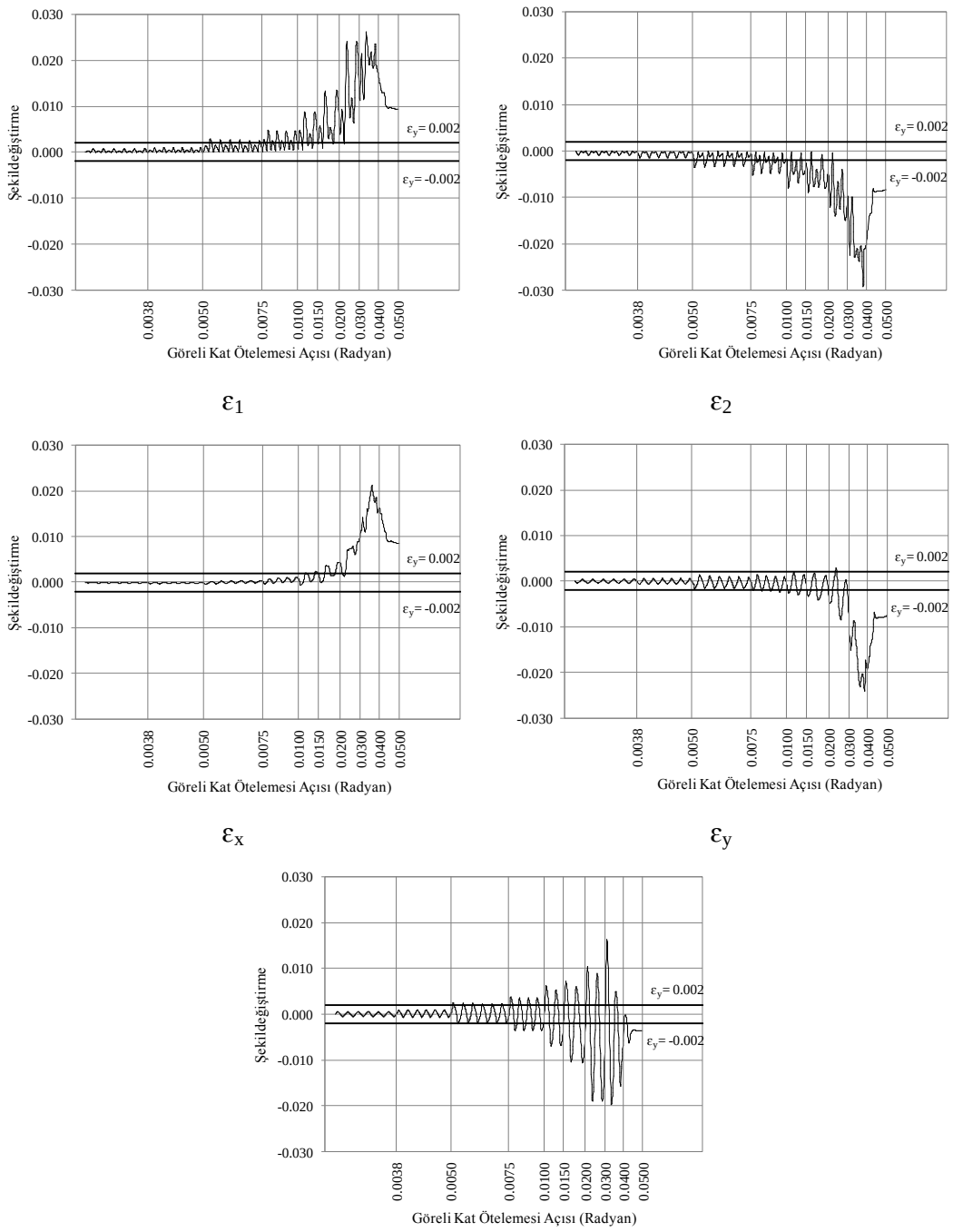
SG-3 şekildeğiştirme ölçeri ile simetrik olan SG-5 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.40'ta verilmiştir.



Şekil 3.40 : EEPC-B / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki plastikleşmeler, bu şekildeğiştirme ölçer ile aynı kesitte bulunan SG-3 ve SG-4 şekildeğiştirme ölçerlerinde olduğu gibi 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamıştır.

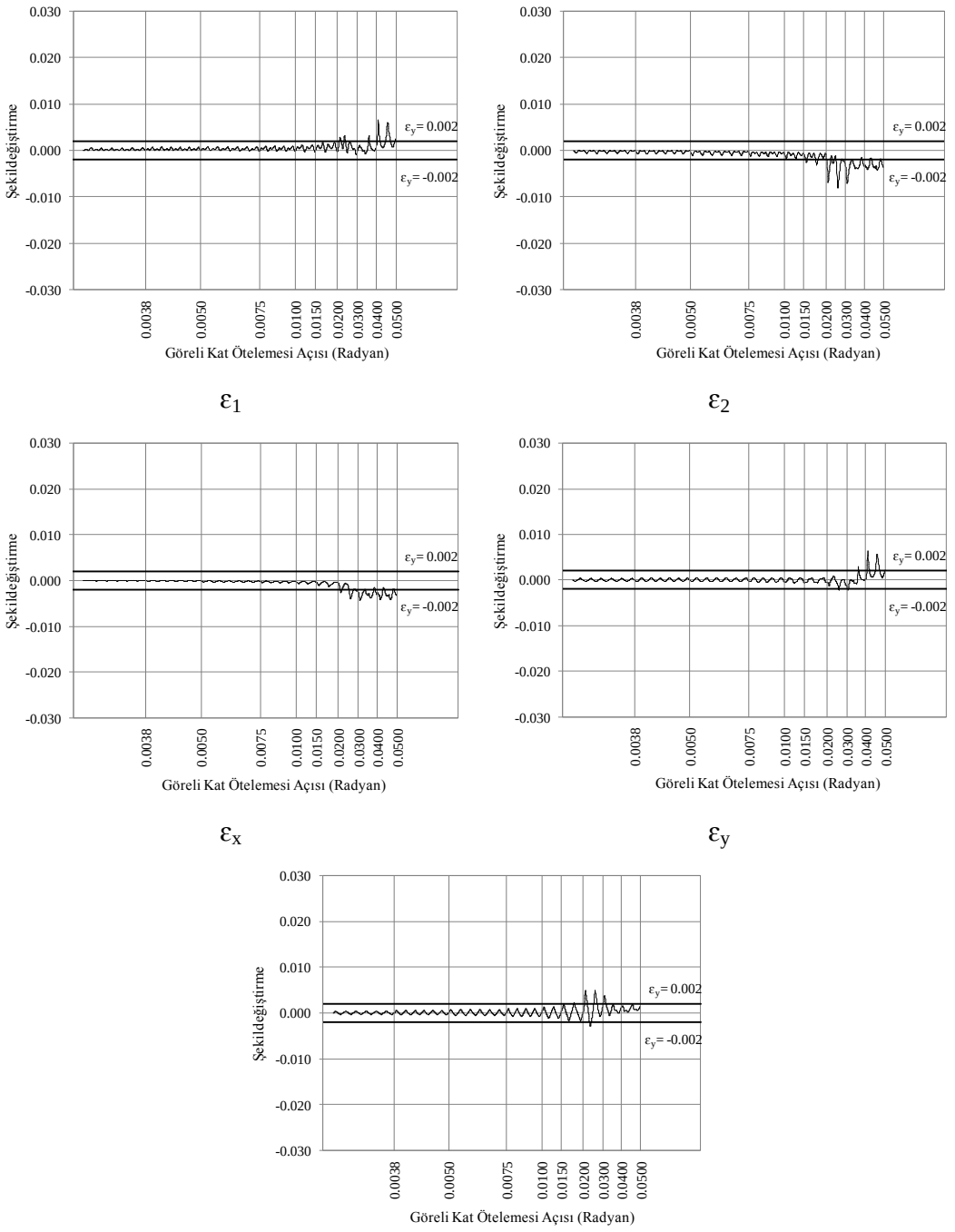
Panel bölgesinin sol tarafında yeralan ve kolon başlığına yakın olan SG-6 isimli şekildeğiştirme ölçerden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.41'de gösterilmiştir.



Şekil 3.41 : EEPC-B / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-6 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede, 13.28 mm'lik tepe yerdeğiştirmesinin etkitildiği 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde akma meydana gelmiştir.

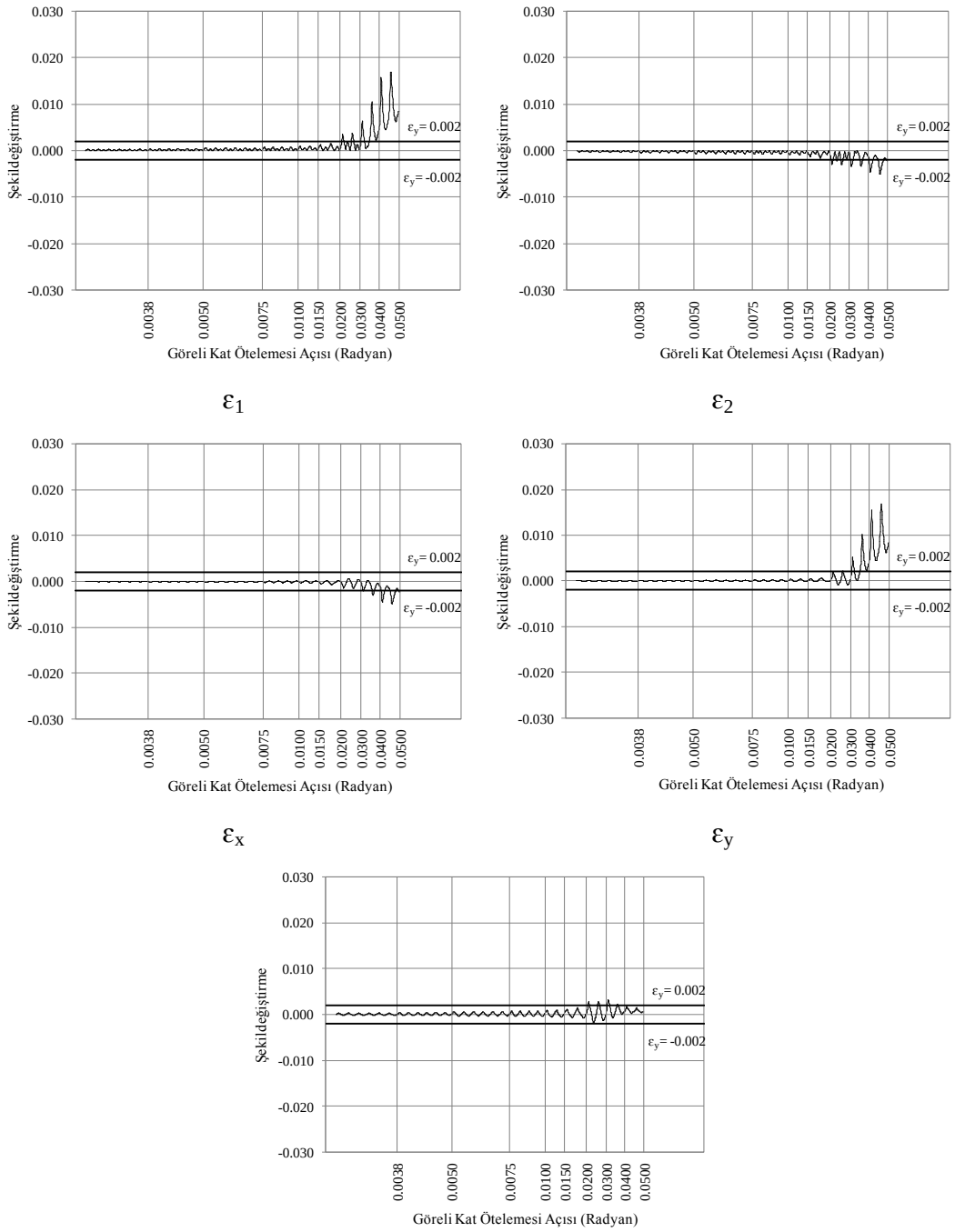
Panel bölgesi sınırında yer alan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-7'den elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.42'de verilmiştir.



Şekil 3.42 : EEPC-B / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-7 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede plastikleşmeler, 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesine ait yerdeğiştirme çevrimleri esnasında başlamıştır.

Panel bölgesi sınırında yer alan ve kolon alt başlığına yakın olan SG-8 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.43'te verilmiştir.

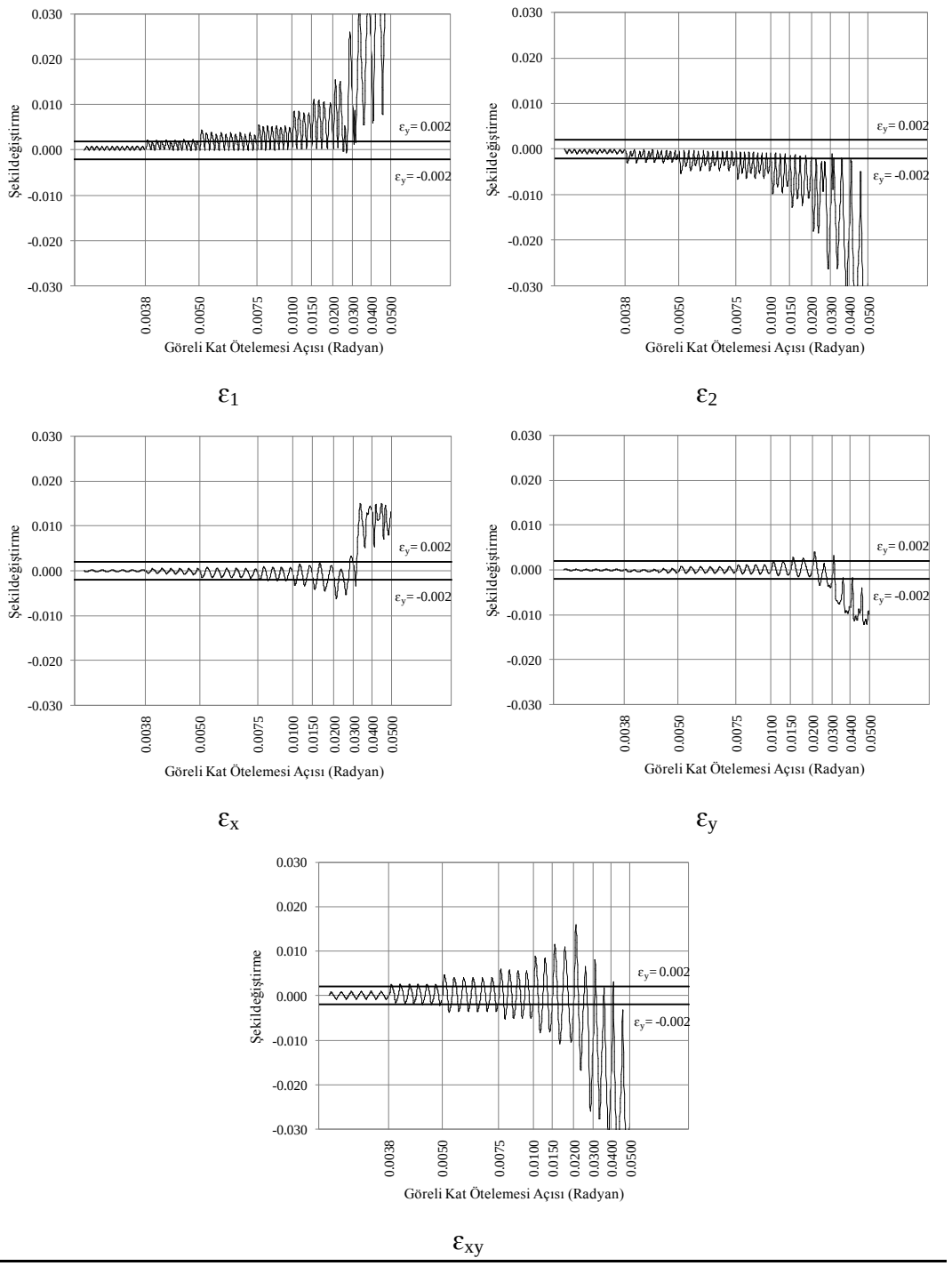


Şekil 3.43 : EEPC-B / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerden alınan kayıtlara göre, plastikleşmeler 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesine ait yerdeğiştirme çevrimleri uygulanırken başlamıştır.

Plastikleşmeler, kiriş gövdesinde aynı yatay kesitte bulunan SG-3, SG-4 ve SG-5 şekildeğiştirme ölçerlerinde aynı etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamasına rağmen, kolon gövdesinde aynı düşey kesitte bulunan SG-6, SG-7 ve SG-8 şekildeğiştirme ölçerlerinde farklı etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamıştır.

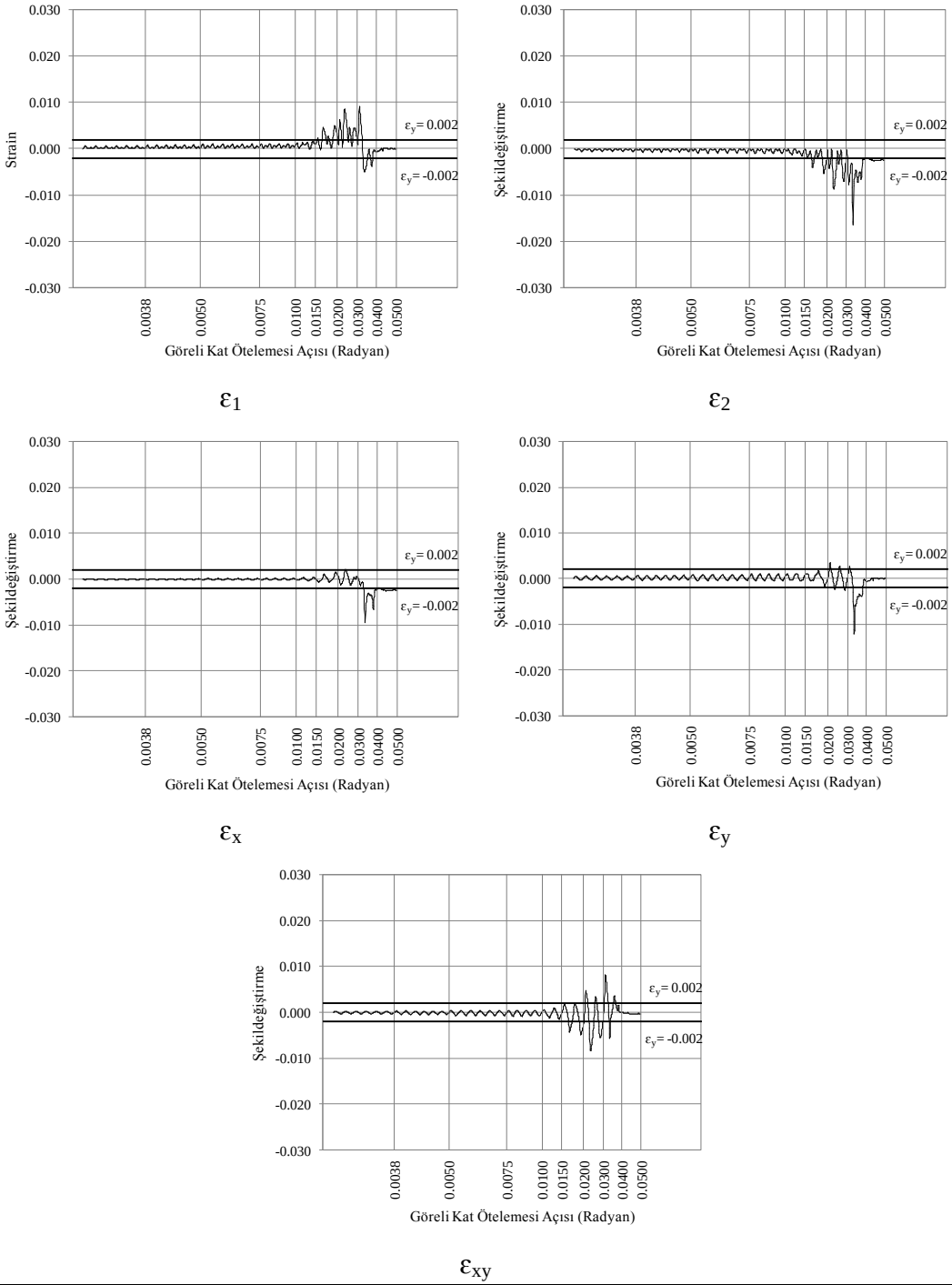
Panel bölgesinin merkezinde yer alan SG-9 isimli üç eksenli şekildeğiştirme ölçerden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.44'te gösterilmiştir.



Şekil 3.44 : EEPC-B / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-9 şekildeğiştirme ölçeri sonuçlarına göre, panel bölgesinde plastikleşmeler 2. yerdeğiştirme çevrim grubu olan 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde başlamıştır.

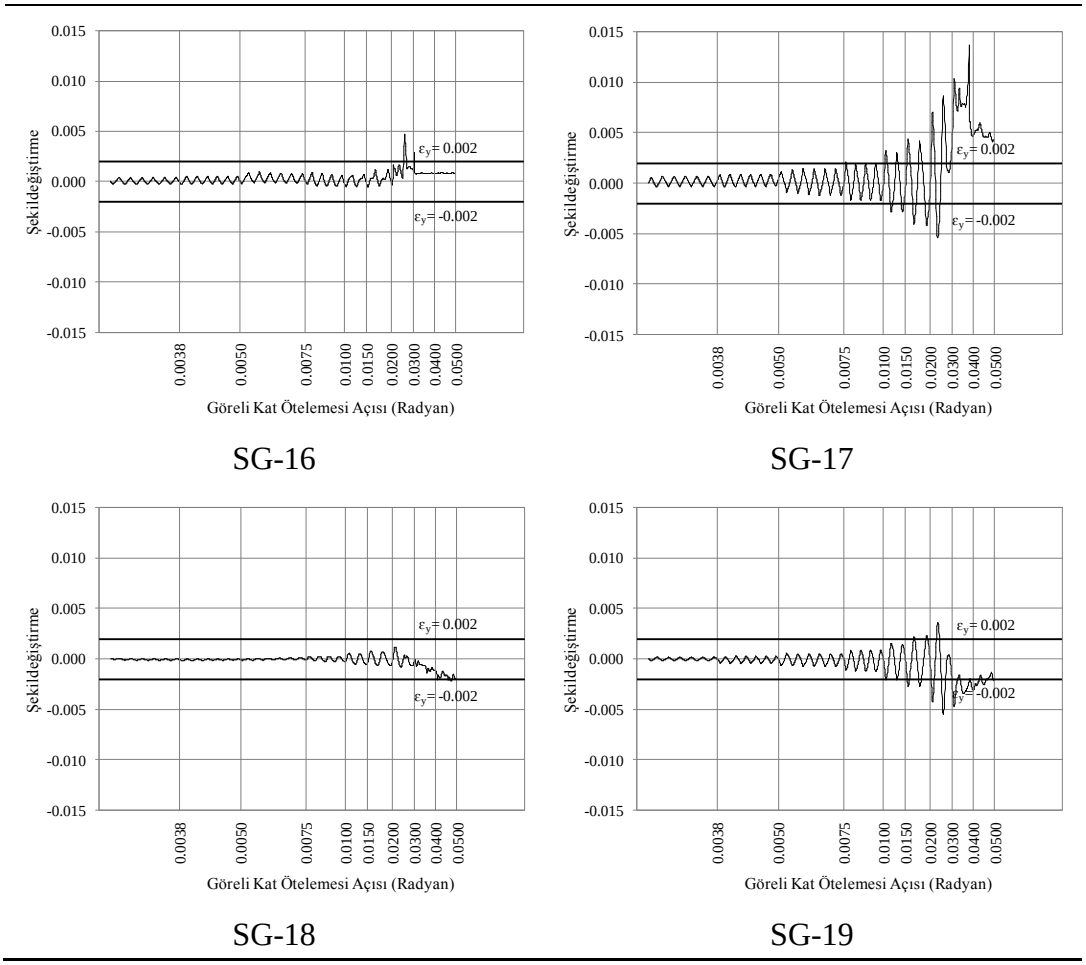
Panel bölgesi dışında kalan ve SG-7 şekildeğiştirme ölçeri ile simetrik olan SG-10 şekildeğiştirme ölçerinin kaydetmiş olduğu sonuçlardan elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.45'te verilmiştir.



Şekil 3.45 : EEPC-B / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-10 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgedeki plastikleşmeler, SG-7 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu simetrik kesitte olduğu gibi 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin yerdeğiştirme çevrimlerinde başlamıştır.

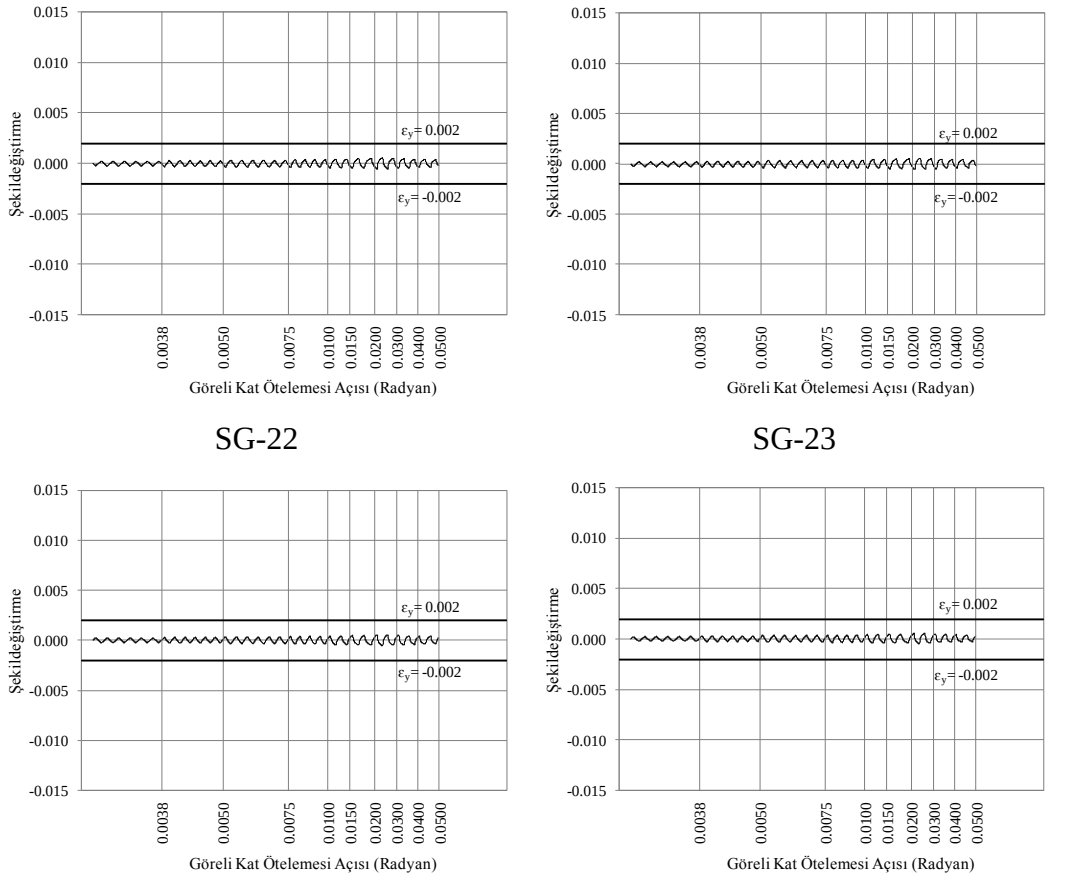
Panel bölgesinin dört kenarında yer alan tek eksenli SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerlerinin kaydetmiş olduğu şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.46'da verilmiştir.



Şekil 3.46 : EEPC-B / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Panel bölgesindeki plastikleşme, bölgenin sol kenar sınırına yakın olan SG-16 şekildeğiştirme ölçeri ile alınan kayıtlara göre 0.02 rad., SG-17 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerinden alınan kayıtlara göre ise 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde başlamıştır. SG-18 numaralı şekildeğiştirme ölçerinin olduğu bölgede ise plastikleşme meydana gelmemiştir.

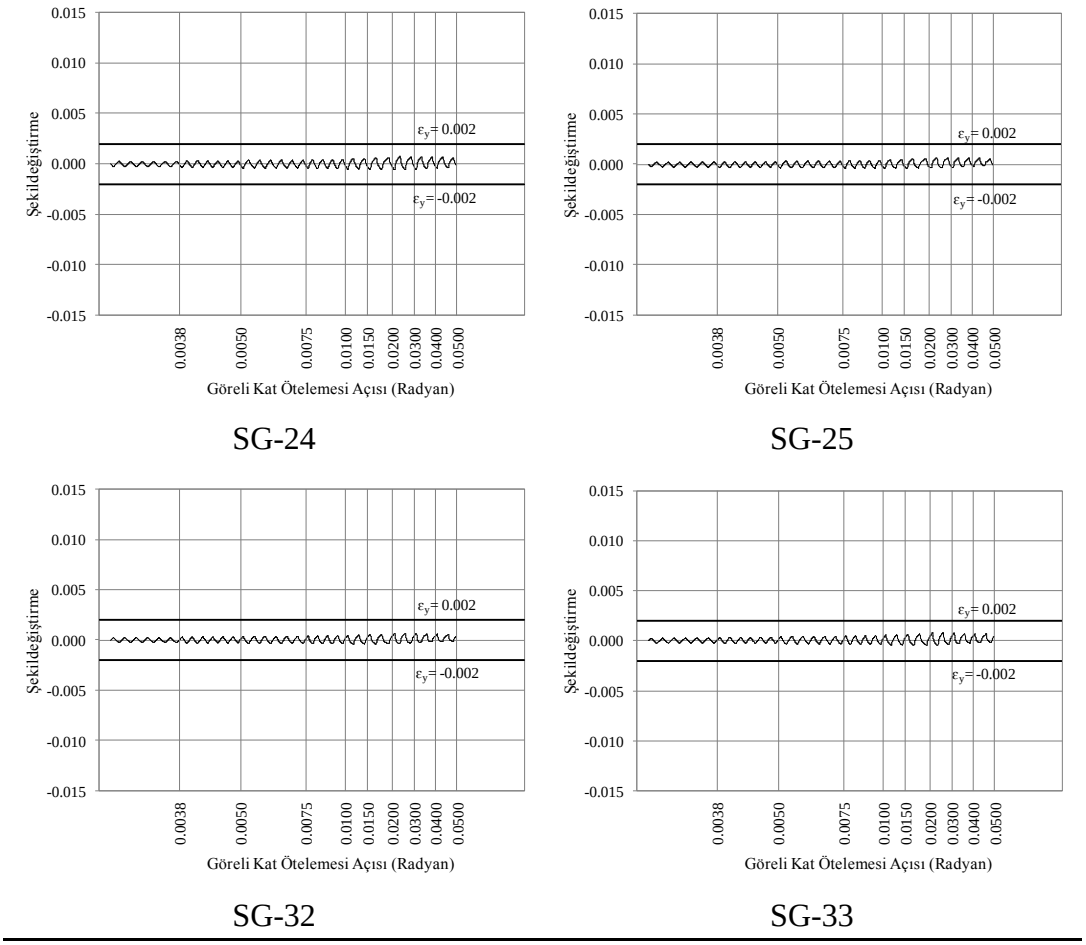
Kiriş başlık plakaları üzerine yapıştırılan ve alın plakasından kiriş yüksekliği kadar ötede bulunan SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 numaralı şekildeğiştirme ölçerlerden alınan şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.47'de gösterilmiştir.



Şekil 3.47 : EEPC-B / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

İlgili şekildeğiştirme ölçerlerden alınan kayıtlar, bu bölgelerdeki şekildeğiştirmelerin plastikleşme sınırının oldukça altında olduğunu göstermiştir.

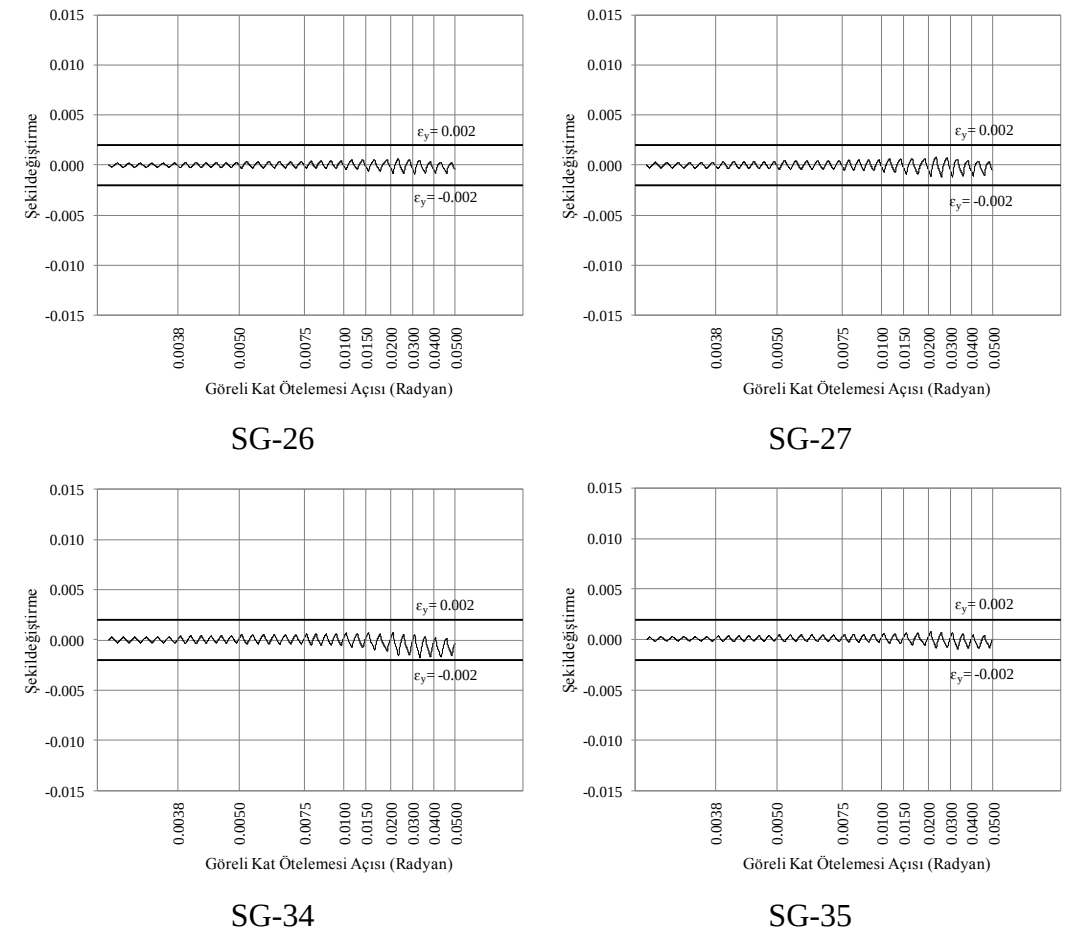
Alın plakasından kiriş yükseliğinin yarısı kadar ötede bulunan SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 numaralı şekildeğiştirme ölçerlerden alınan sonuçlar Şekil 3.48'de verilmiştir.



Şekil 3.48 : EEPC-B / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Bu bölgeden alınan kayıtlar da bir üst sırada yer alan şekildeğiştirme ölçerlerden alınan sonuçlar ile paralellik göstermiş olup, akma sınır şekildeğiştirmesinin altında kalmıştır.

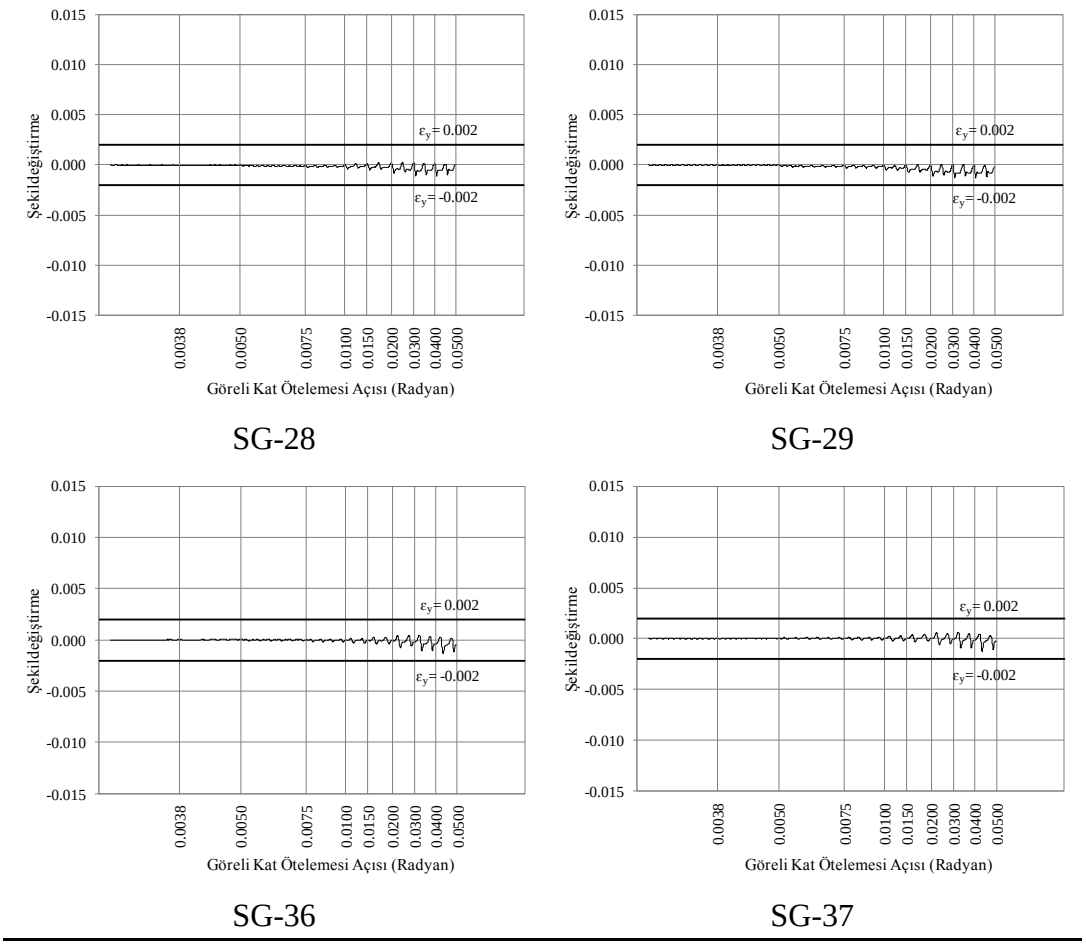
Kiriş başlıklarına yapıştırılan ve alın plakasına en yakın sırada bulunan SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3.49'da gösterilmiştir.



Şekil 3.49 : EEPC-B / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Alın plakasına en yakın sırada yer alan SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme ölçerlerinde de plastik şekildeğiştirme meydana gelmemiştir. Buna karşın aynı kesitin gövde bölümünün plastikleştiği Şekil 3.44'ten anlaşılmaktadır.

Alın plakası üzerinde bulon ve üçgen berkitme plakaları arasına yapıştırılan SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kayıtlar Şekil 3.50'de verilmiştir.



Şekil 3.50 : EEPC-B / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

İlgili şekildeğiştirme ölçerler, alın plakasının bu bölgelerinde akma sınırına erişilmediğini göstermiştir.

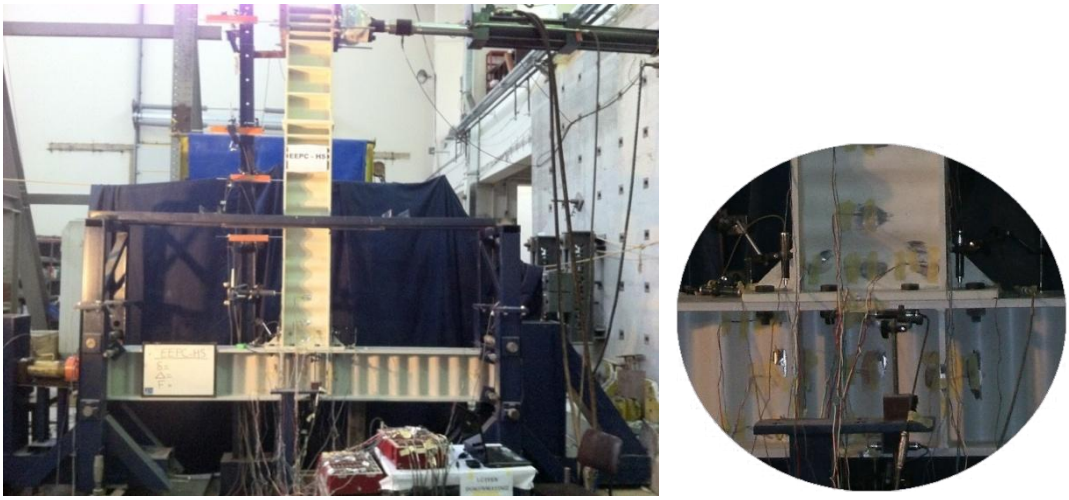
Kiriş başlıklarının kolon gövdesi üzerindeki izdüşümünde yeralan SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 numaralı şekildeğiştirme ölçerlerden, kolon başlıklarına yapıştırılan SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerlerinden ve kolonun mesnet bölgesinde yer alan SG-11, SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kayıtlara ait sonuçlar EK-A'da verilmiştir.

3.5.2 EEPC-HS numunesi deneyi

Bu numunede, panel bölgesi 3 mm kalınlıklı sinüzoidal levhadan oluşturulmuştur. Bu numunenin *EEPC-B* numunesinden farkı, kiriş başlıklarının hizasında, kolon başlıkları arasında devam eden 4 adet süreklilik plakası içermesidir. Süreklilik plakalarının kalınlığı t=15 mm olup, gövdeye temas etmemektedir.

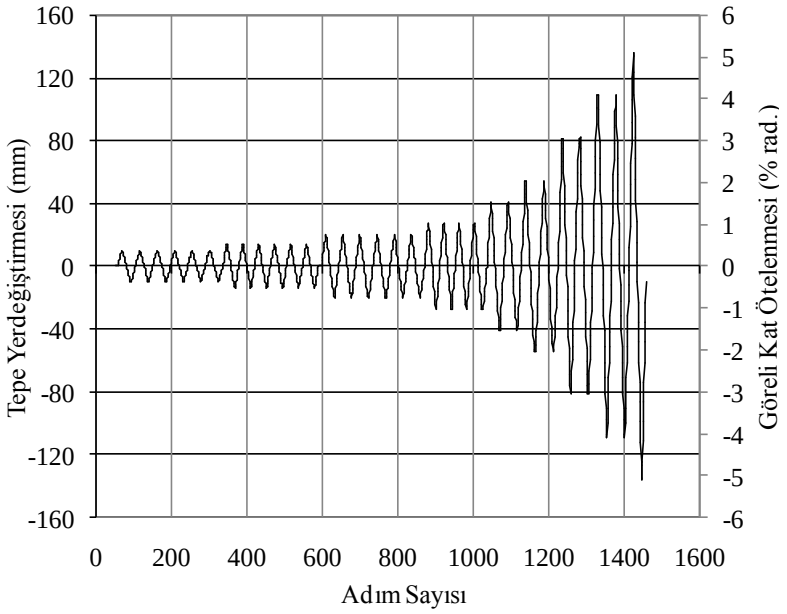
EEPC-HS numunesi, ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların alın plakalı moment aktaran birleşimlerine referans olması amacıyla denenen *EEPC-B* numunesinin süreklilik plakaları ile iyileştirilmiş halidir.

Deney numunesine ait genel görünüş ile panel bölgesi yakın görünüşü Şekil 3.51'de verilmiştir.



Şekil 3.51 : EEPC-HS numunesinin genel ve detay görünüşü.

Deney, yerdeğiştirme kontrollü olarak iki yönlü çevrimsel yükler etkisinde statik olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yerdeğiştirme adımları Şekil 3.52'de verilmiştir.



Şekil 3.52 : EEPC-HS numunesinde yerdeğiştirme adımları.

Veri toplama sisteminde şekildeğiştirme ölçerler için 63 kanal, yerdeğiştirme ölçerler için 16 kanal olmak üzere toplam 79 kanal kullanılmıştır. Deney 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin son çevrimine kadar sorunsuz olarak devam ettirilerek tamamlanmıştır.

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğine kadar numune üzerinde herhangi bir fiziksel hasar gözlenmemiştir.

İlk çevrim grubu olan 0.00375 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde;10.20 mm'ye karşı gelen itme pikinde 28.70 kN, çekme pikinde ise 26.60 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur.

0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde en büyük yerdeğiştirme değeri 13.62 mm'dir. 13.62 mm'lik itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 32.40 kN, çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde ise 30.70 kN yatay yük dayanımı ortaya çıkmıştır.

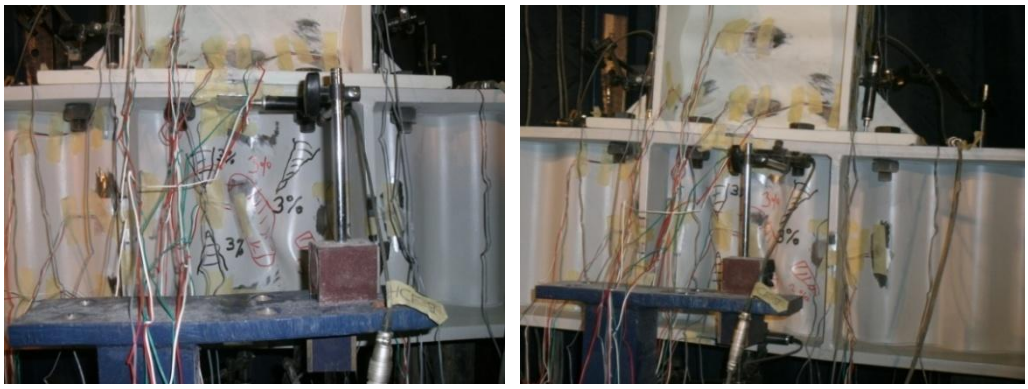
20.41 mm'lik en büyük yerdeğiştirme değerine sahip olan 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde itme pikinde 39.10 kN yatay yük dayanımı oluşurken, çekme pikinde 36.45 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur.

0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde 27.21 mm'lik itme pikinde 43.15 kN, çekme pikinde ise 42.42 kN yatay yük dayanımı ortaya çıkmıştır.

En büyük yerdeğiştirme değeri 40.82 mm'ye karşı gelen 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi durumunda itmede 50.60 kN, çekmede ise 50.20 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur.

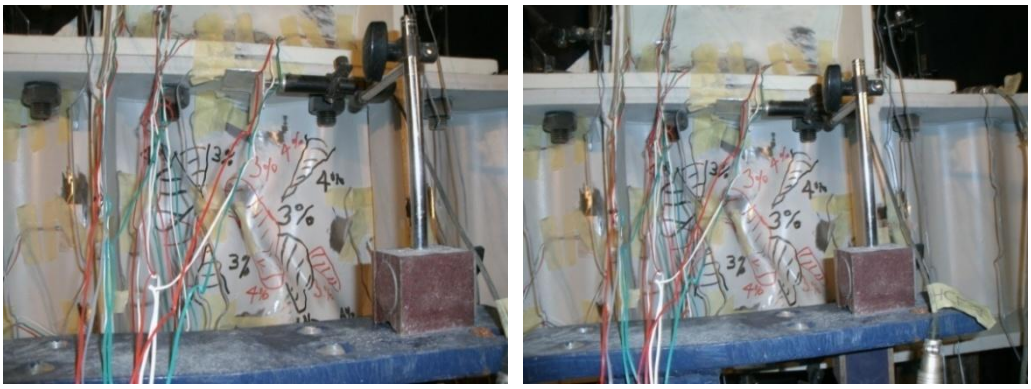
0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin 54.43 mm'lik en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 57.70 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde ise 56.70 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur.

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde, *EEPC-B* numunesinde de olduğu gibi panel bölgesi içindeki gövdenin sinüs formu bozularak numunenin bütünselliği kaybolmuştur. Bu yerdeğiştirme eşiğinin 81.64 mm'ye karşı gelen en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 57.40 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde de 57.50 kN yatay yük dayanımı meydana gelmiştir. Bu yerdeğiştirme eşiğine ait son çevrimin tamamlanmasından sonra çekilen fotoğraflar Şekil 3.53'te verilmiştir.



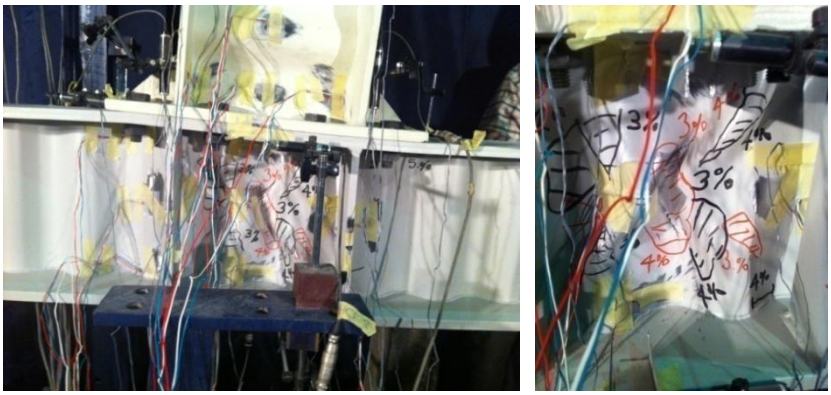
Şekil 3.53 : EEPC-HS numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

En büyük yatay yerdeğiştirme değeri 108.86 mm olan 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, *EEPC-B* numunesine benzer şekilde, panel bölgesi içinde kalan ve bir önceki adımda formu bozulan bölgede hasar artmış ancak *EEPC-B* numunesinden farklı olarak form bozulmasının süreklilik plakaları ile sınırlanan alan içinde kaldığı görülmüştür. *EEPC-B* numunesi ile benzer şekilde panel bölgesinin ortasında yırtık oluşmaya başlamıştır. Bu yerdeğiştirme eşiğinin itme pikinde 58.22 kN, çekme pikinde de 57.55 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur. Bu yerdeğiştirme çevrimin tamamlanmasının ardından gözlenen hasar durumu Şekil 3.54'te verilmiştir.



Şekil 3.54 : EEPC-HS numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

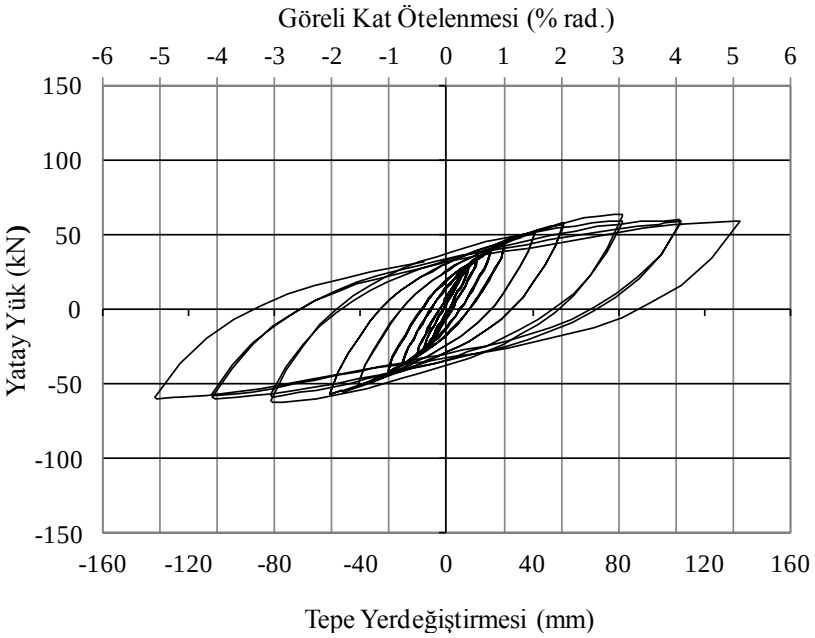
136.07 mm'lik en büyük yatay yerdeğiştirme değerinin etkitildiği 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, form bozulmaları ve kolon gövdesindeki yırtık ilerleyerek büyümüş ancak bu bozulmalar süreklilik plakaları ile sınırlanan alan içinde kalmıştır. İlave olarak panel bölgesi dışında kalan bölgede kolon üst başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişlerinde ayrılmalar gözlenmiştir. İtme pikinde 57.40 kN, çekme pikinde ise 57.90 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur. Son çevrimin tamamlanmasının ardından çekilen fotoğraflar Şekil 3.55'te verilmiştir.



Şekil 3.55 : EEPC-HS numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

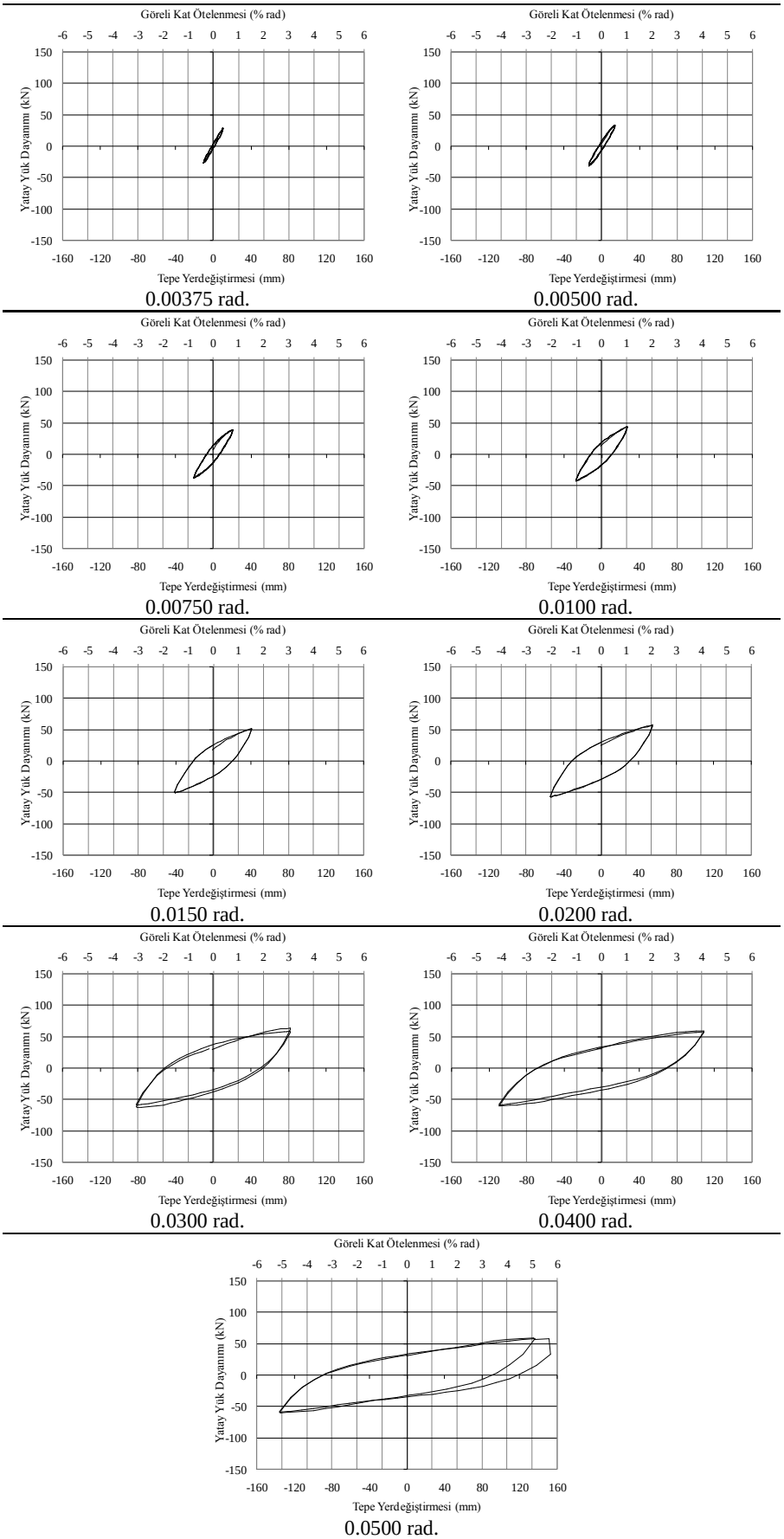
Her göreli kat ötelenmesi seviyesinin son itme ve çekme yerdeğiştirmelerinde oluşan yatay yük dayanımları mutlak değer olarak birbirine yakın çıkmıştır. Bu yaklaşıklık, 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinden sonra daha belirginleşmiştir.

0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesine kadar elde edilen tüm yatay yük - yerdeğiştirme çevrimleri Şekil 3.56'da verilmiştir.



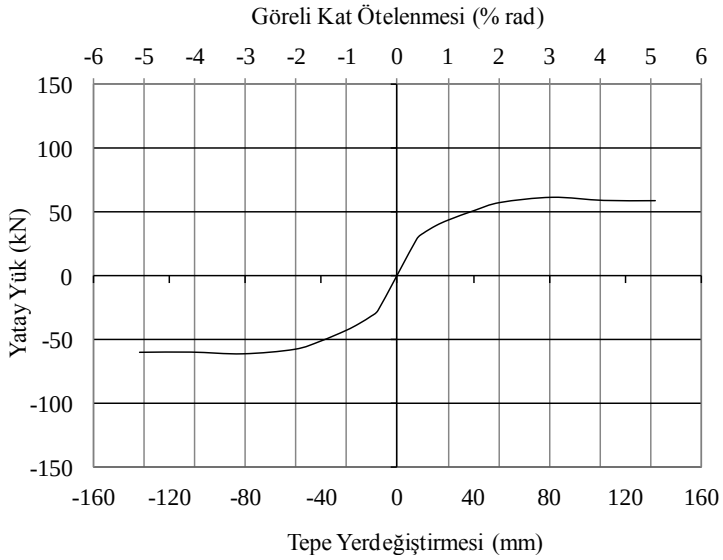
Şekil 3.56 : EEPC-HS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

Her bir göreli kat ötelenme eşik değeri için ayrıklaştırılmış yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil 3.57'de verilmiştir. Buradan elastik ötesi davranışın 0.005 rad. - 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinden itibaren başladığı görülmektedir.



Şekil 3.57 : EEPC-HS numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

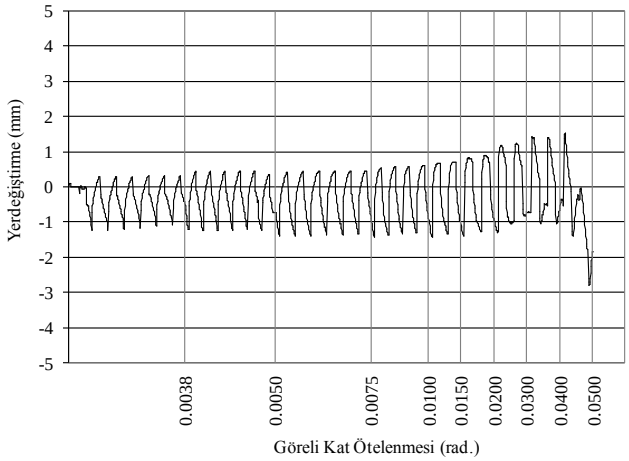
Yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi grafiğinden elde edilen zarf eğrisi Şekil 3.58'de verilmiştir.



Şekil 3.58 : EEPC-HS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi.

EEPC-B numunesi ile benzer şekilde 0.03 rad. göreli kat ötelenmesi düzeyine gelindiğinde en büyük değerine ulaşan yatay yük, panel bölgesindeki gövde levhasının formunun bozulması neticesinde sonraki çevrimlerde küçülmüştür.

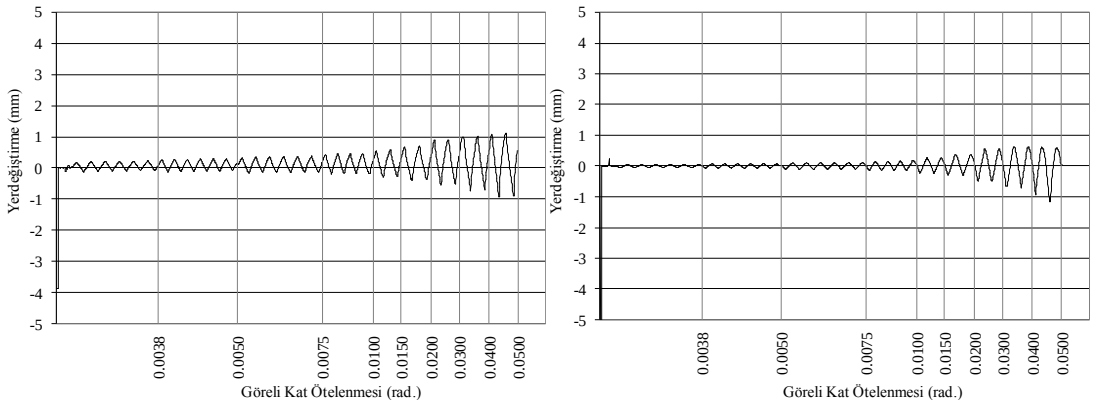
Deney sırasında oluşan düzlem dışı hareketi ve mesnet bölgelerindeki düşey hareketi kaydetmek amacıyla yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerin topladığı veriler Şekil 3.59 ve Şekil 3.60'ta gösterilmiştir.



Şekil 3.59 : EEPC-HS numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Kolon gövdesinin panel bölgesi içinde kalan bölümünde sinüs formunun bozulduğu 81.64 mm'lik tepe yatay yerdeğiştirmesi etkisinde, en büyük düzlem dışı hareket

1.16 mm olarak kaydedilmiştir. Bu aşamada düzlem dışı hareketin yatay yerdeğiştirmeye oranı 1/70 olmuştur.

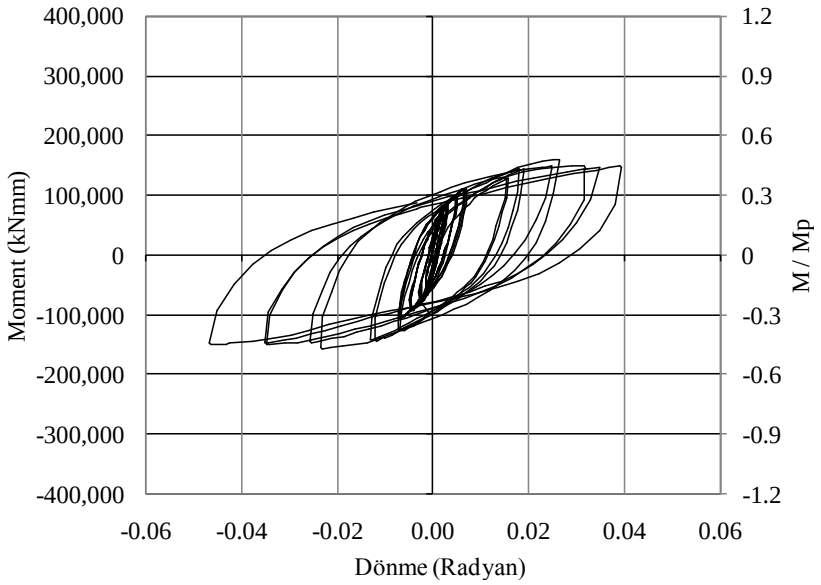


a. Sol mesnet *b. Sağ mesnet*

Şekil 3.60 : EEPC-HS numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

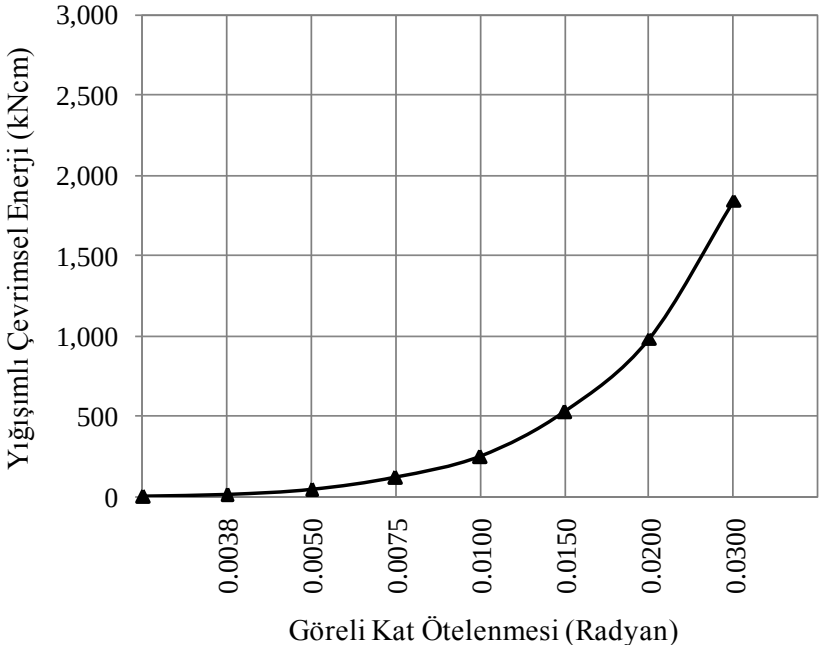
Bu yerdeğiştirme eşiğine kadar, kolon mesnetini oluşturan silindirik mesnet elemanlarında gerçekleşen en büyük düşey hareket, sol mesnette 0.91 mm, sağ mesnette ise 0.42 mm olarak kaydedilmiştir. Bu durumda sol mesnetin en büyük düşey hareketinin yatay yerdeğiştirmeye oranı 1/90, sağ mesnetin en büyük düşey hareketinin yatay yerdeğiştirmeye oranı ise 1/194 olmuştur.

Alın plakasına yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerin göreli hareketlerinden elde edilen moment - dönme ilişkisi Şekil 3.61'de verilmiştir.



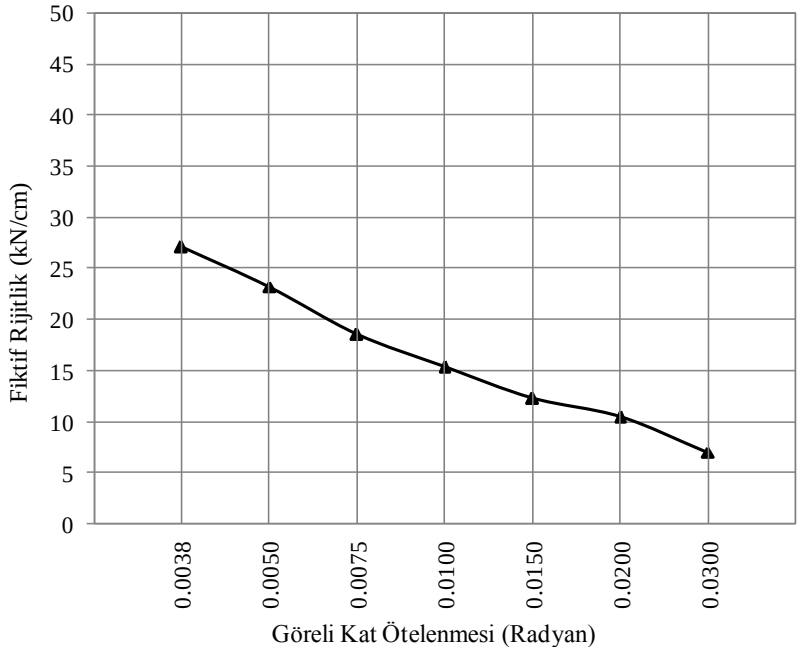
Şekil 3.61 : EEPC-HS numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi.

Tepe yerdeğiştirmesi - yatay yük dayanımı çevrimlerinden elde göreli kat ötelenmesi - yığışımlı çevrimsel enerji grafiği Şekil 3.62'de verilmiştir.



Şekil 3.62 : EEPC-HS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjinin değişimi.

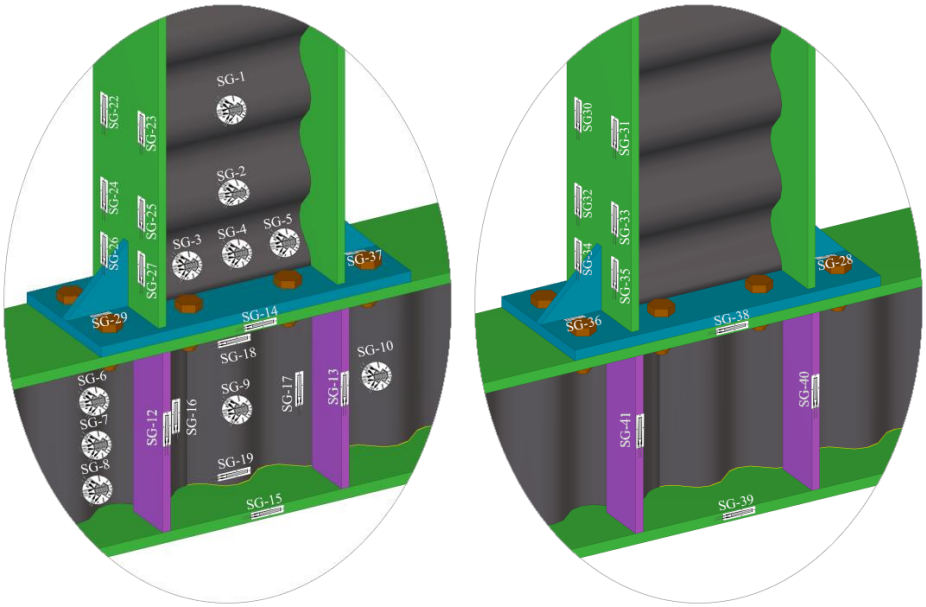
Tepe yerdeğiştirmesi - yatay yük dayanımı çevrimlerinden faydalanılarak hesaplanan göreli kat ötelenmesi - fiktif rijitlik ilişkisi Şekil 3.63'te verilmiştir.



Şekil 3.63 : EEPC-HS numunesinde rijitlik değişimi.

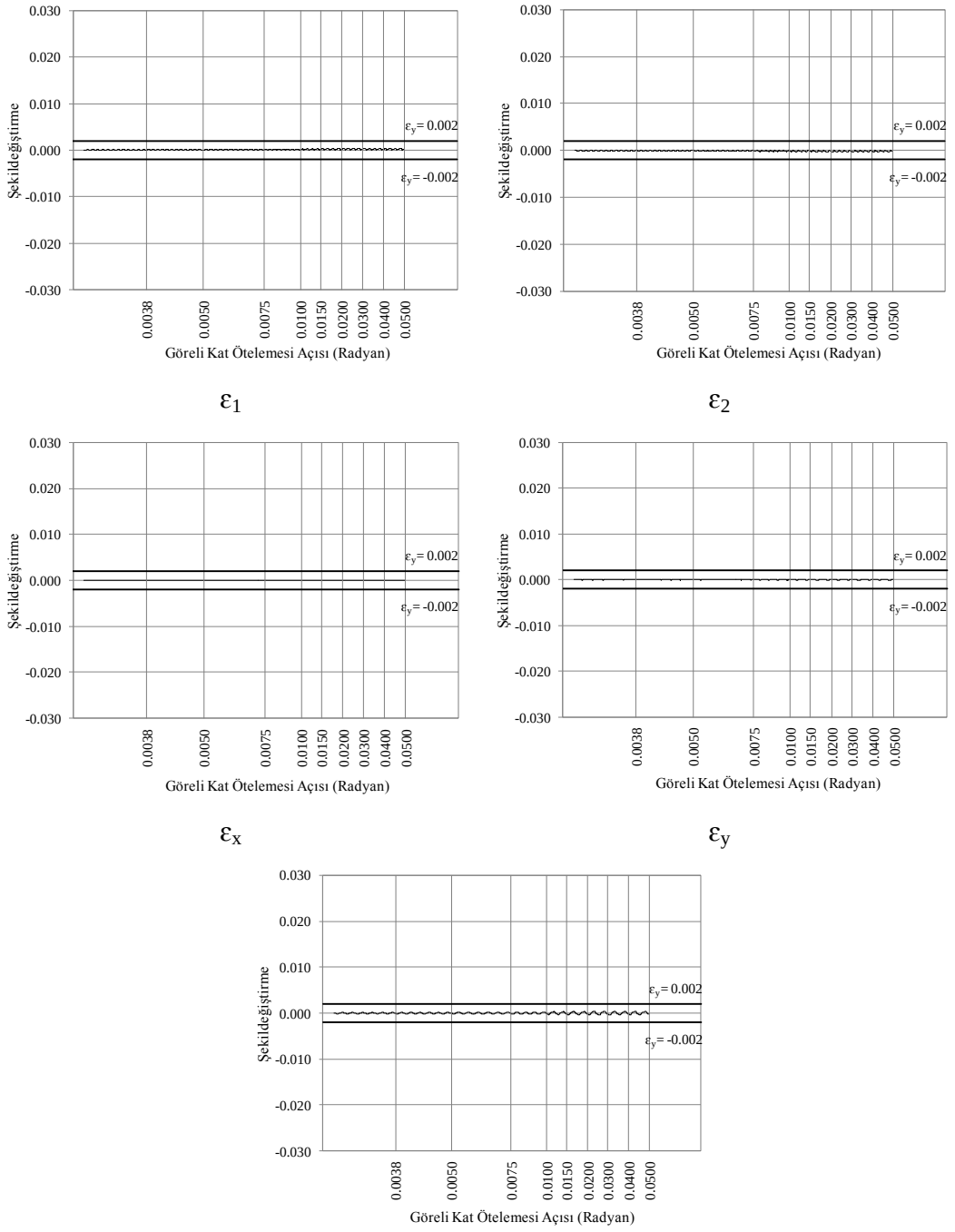
İlk çevrimlerde 27 kN/cm olan fiktif rijitliğin 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenme eşiği sonunda 7 kN/cm'ye kadar düştüğü görülmektedir.

Kritik bölgelere yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerler Şekil 3.64'te gösterilmiştir.



Şekil 3.64 : EEPC-HS numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler.

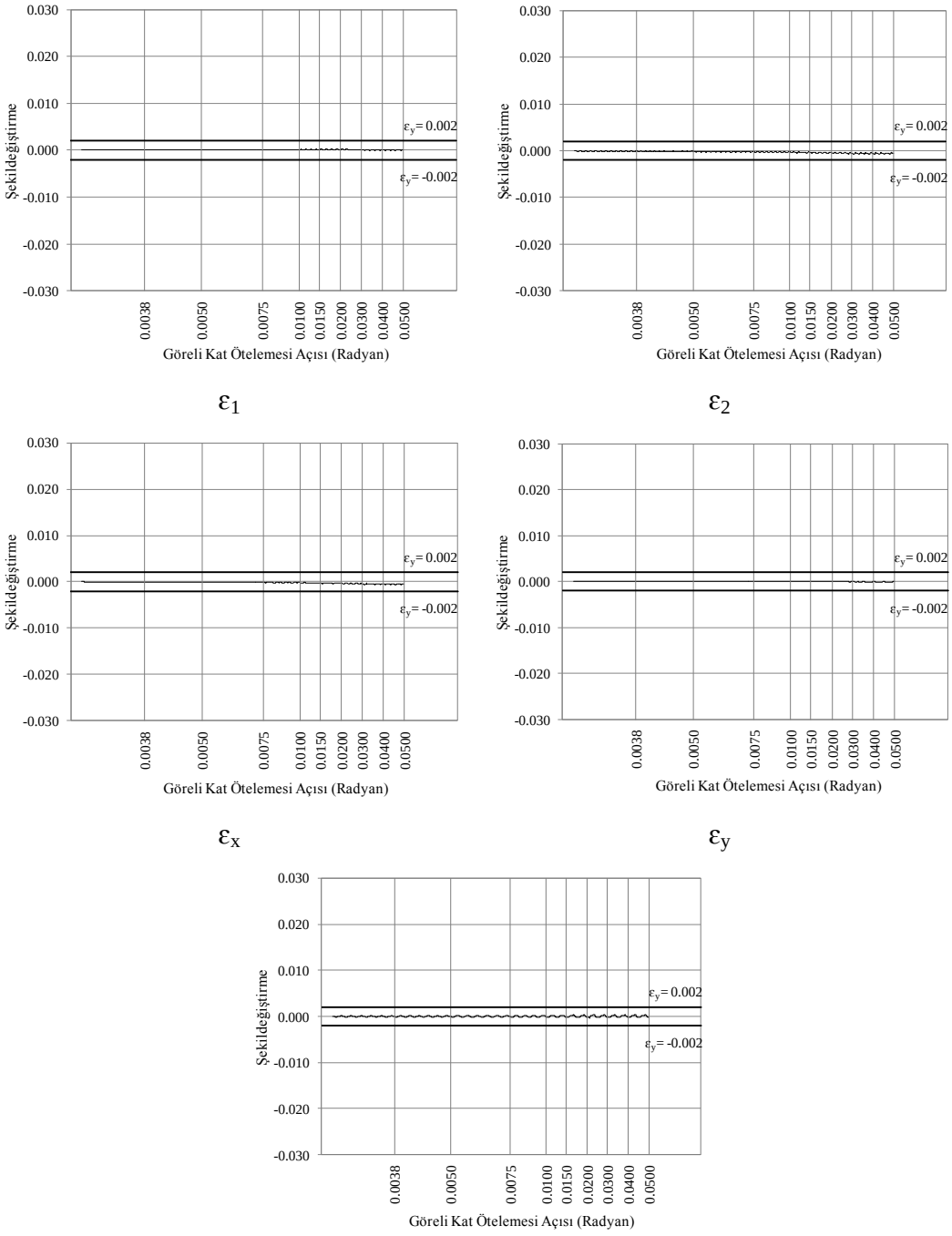
Alın plakasından kiriş yüksekliği kadar yukarıda bulunan ve kiriş gövdesine yapıştırılan SG-1 isimli 3 eksenli şekildeğiştirme ölçerden elde edilen ε_1, ε_2 asal şekildeğiştirmeleri ile ε_x, ε_y ve ε_{xy} şekildeğiştirmelerine ait değişim grafikleri Şekil 3.65'te gösterilmiştir.



Şekil 3.65 : EEPC-HS / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerden alınan sonuçlar, *EEPC-B* numunesindeki SG-1 ile benzer sonuçlar vermiş olup, bu bölgede de akma durumuna erişilemediğini göstermiştir.

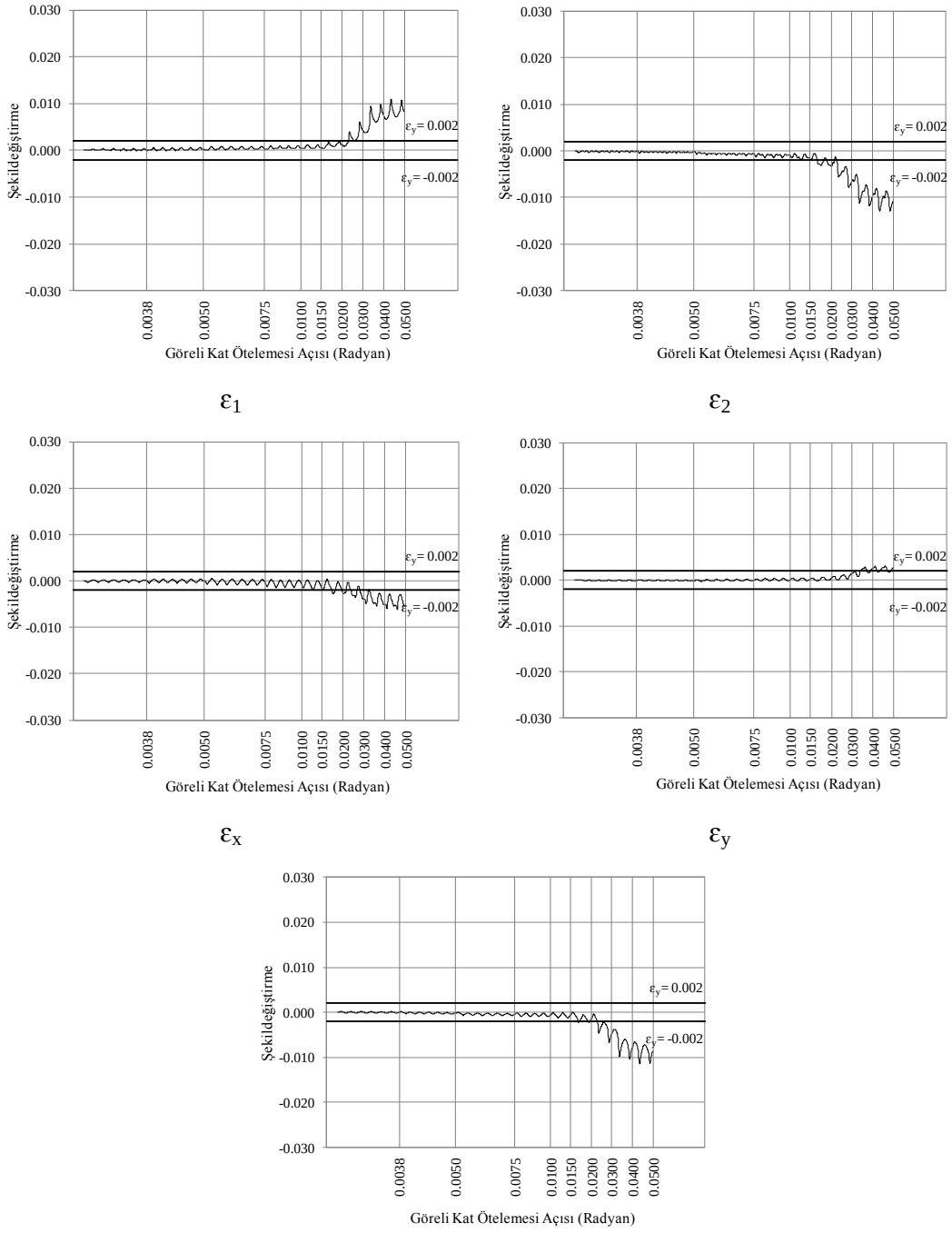
SG-1 şekildeğiştirme ölçerinin altında, alın plakasından kiriş kesit yüksekliğinin yarısı kadar mesafede bulunan SG-2 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri de Şekil 3.66'da verilmiştir.



Şekil 3.66 : EEPC-HS / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgede de akma sınır şekildeğiştirmesine ulaşılamamıştır.

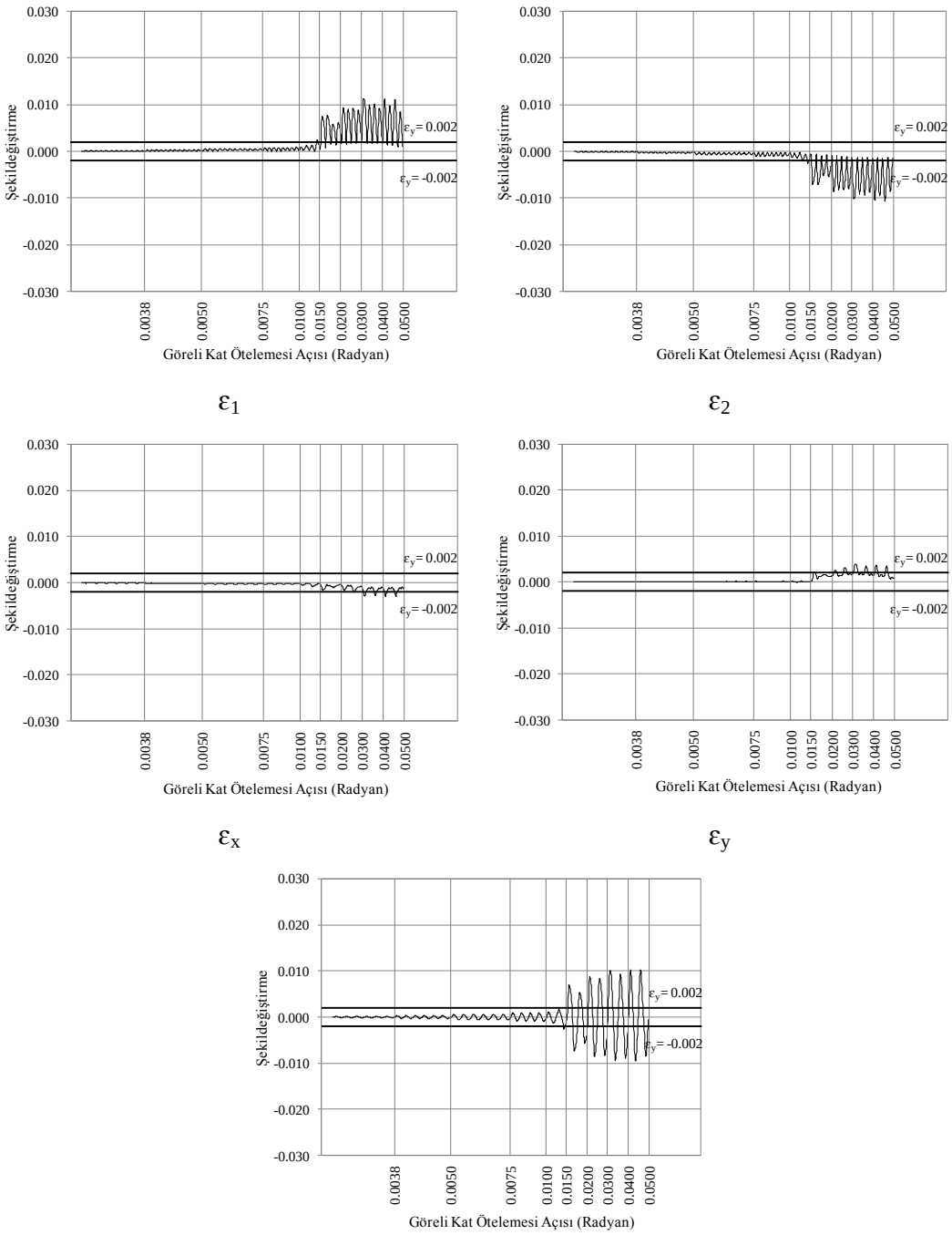
Alın plakasına en yakın konumda bulunan SG-3 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.67'de gösterilmiştir.



Şekil 3.67 : EEPC-HS / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerin olduğu bölgede 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimi sırasında akma sınırı aşılmıştır.

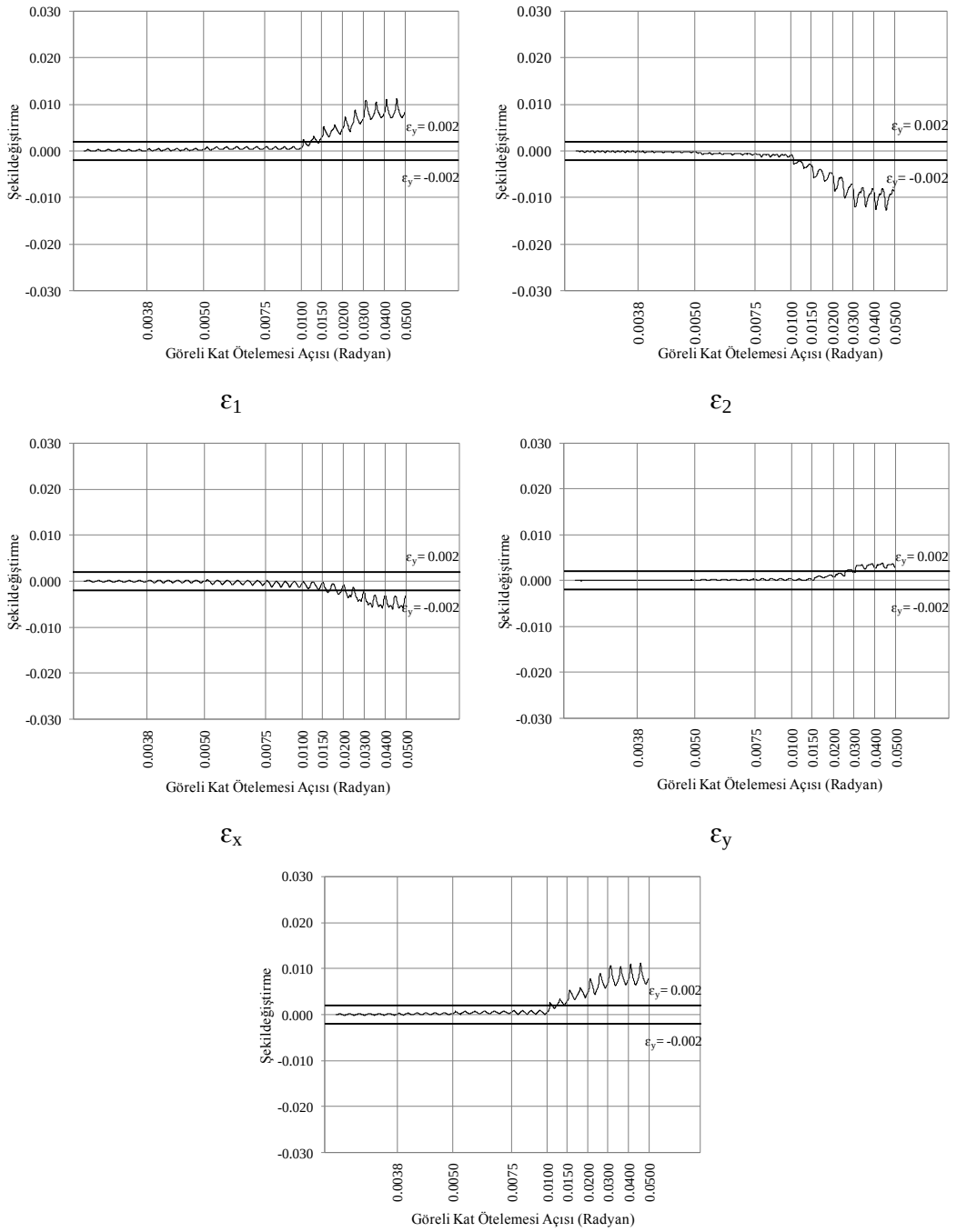
SG-3 şekildeğiştirme ölçerinin yanında bulunan SG-4'ten alınan ölçüm sonuçları da Şekil 3.68'de gösterilmiştir.



Şekil 3.68 : EEPC-HS / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-4 şekildeğiştirme ölçerinden alınan sonuçlar, plastikleşmenin 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başladığını net olarak göstermektedir.

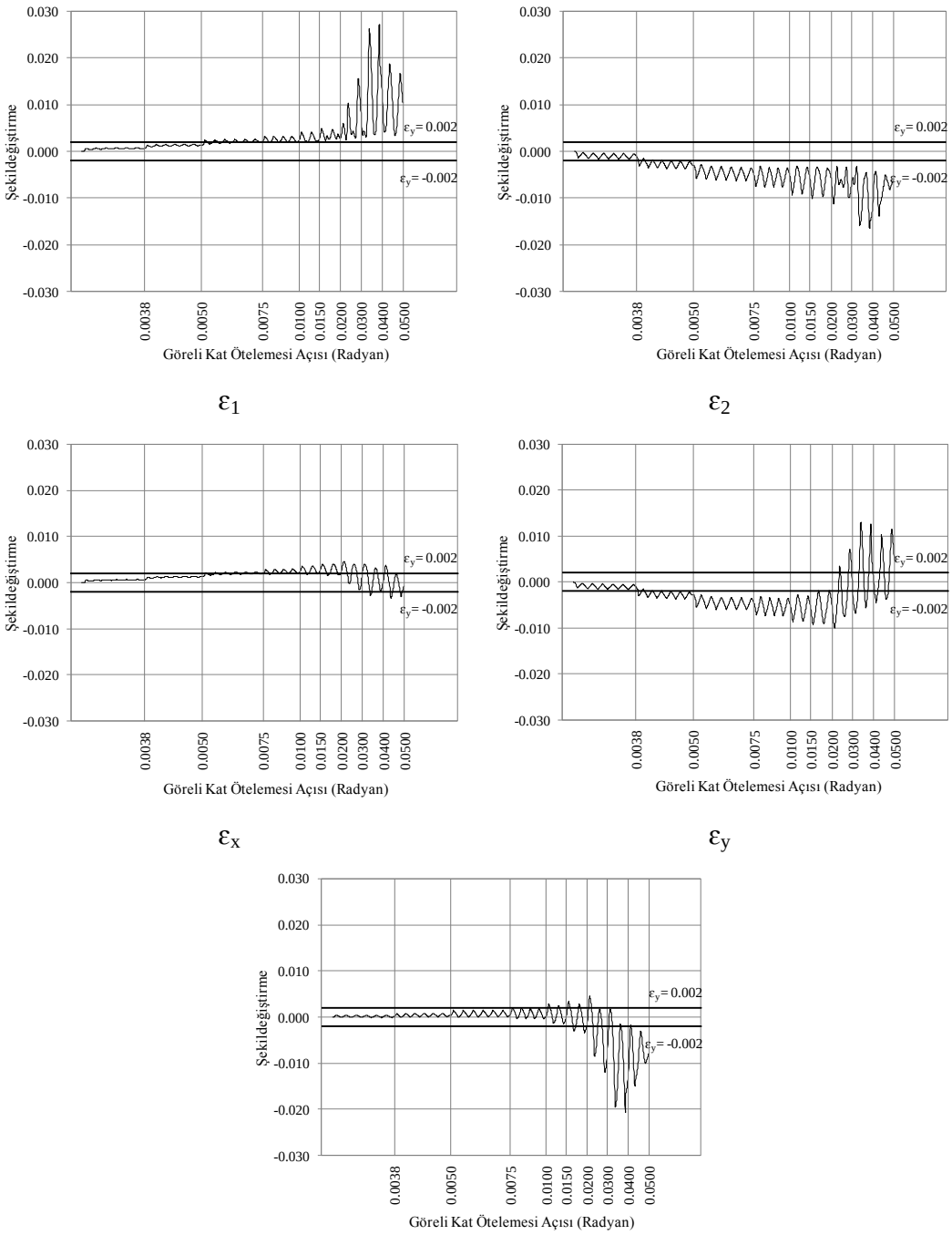
SG-5 isimli şekildeğiştirme ölçerden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.69'da verilmiştir.



Şekil 3.69 : EEPC-HS / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerin vermiş olduğu sonuçlara göre, plastikleşmeler *EEPC-B* numunesine benzer şekilde 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamıştır.

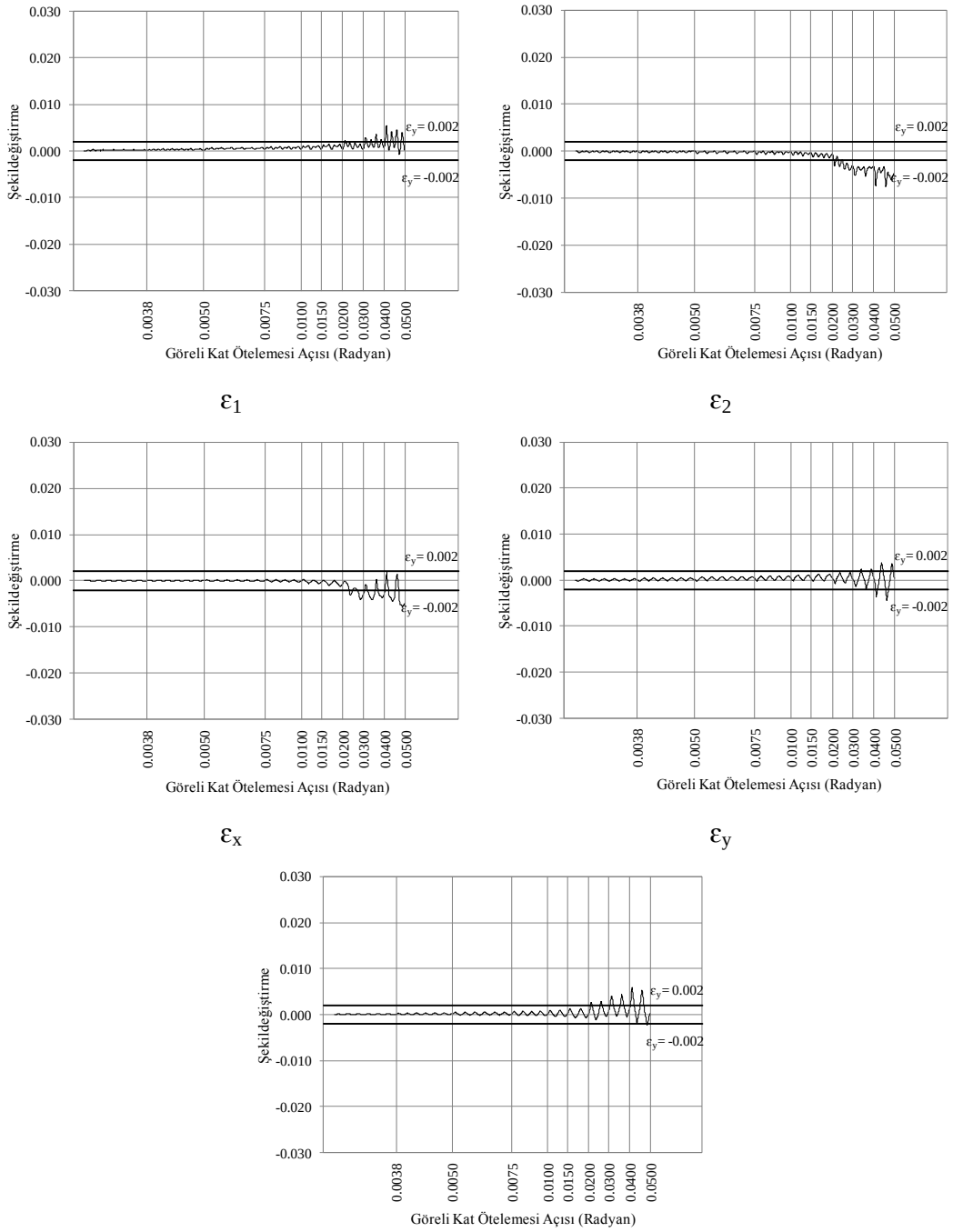
Panel bölgesinin dışında, kolon üst başlığına yakın konumda yer alan SG-6 şekildeğiştirme ölçerinden alınan kayıtlar ile elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.70'te verilmiştir.



Şekil 3.70 : EEPC-HS / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgede akma sınır şekildeğiştirmesi, *EEPC-B* numunesinde olduğu gibi 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde aşılmıştır.

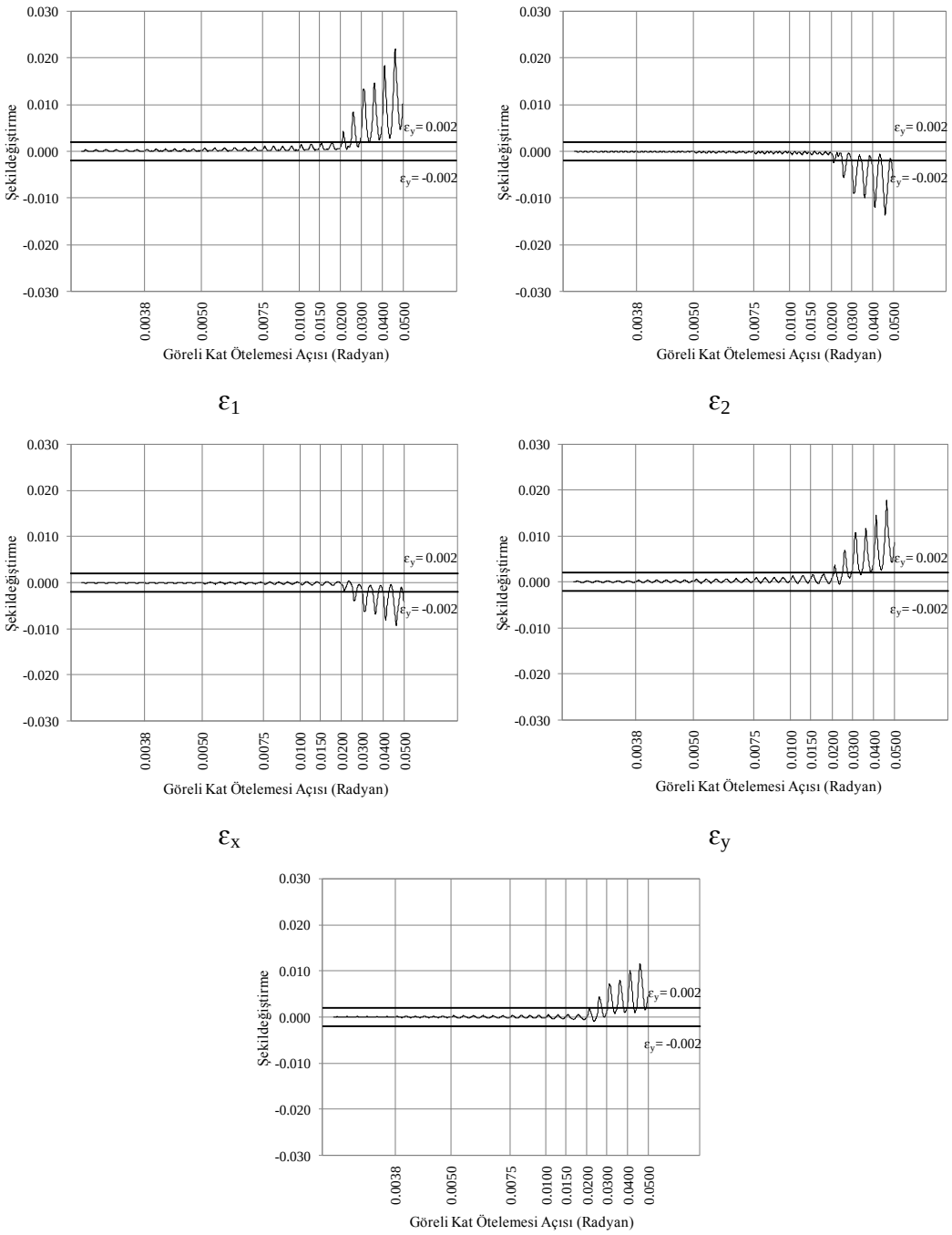
SG-6 şekildeğiştirme ölçeri ile aynı kesitte bulunan SG-7 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.71'de gösterilmiştir.



Şekil 3.71 : EEPC-HS / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-7 şekildeğiştirme ölçerinden alınan sonuçlar, plastikleşmelerin 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinden itibaren başladığını göstermiştir.

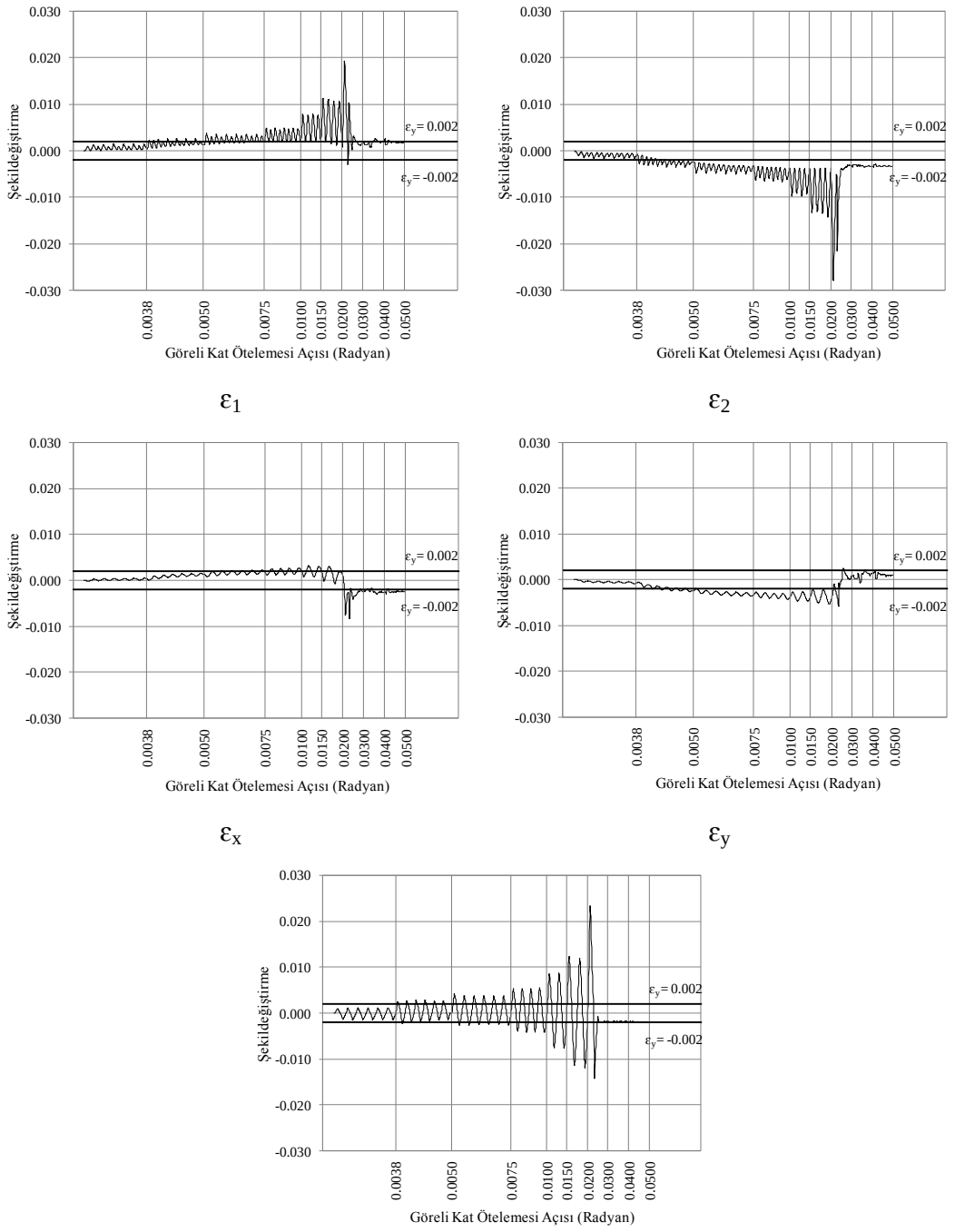
Panel bölgesi dışında yer alan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-8'den kaydedilen veriler Şekil 3.72'de gösterilmiştir.



Şekil 3.72 : EEPC-HS / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerin verdiği sonuçlar, bu bölgedeki plastikleşmelerin SG-7 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgedeki gibi 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başladığını göstermiştir.

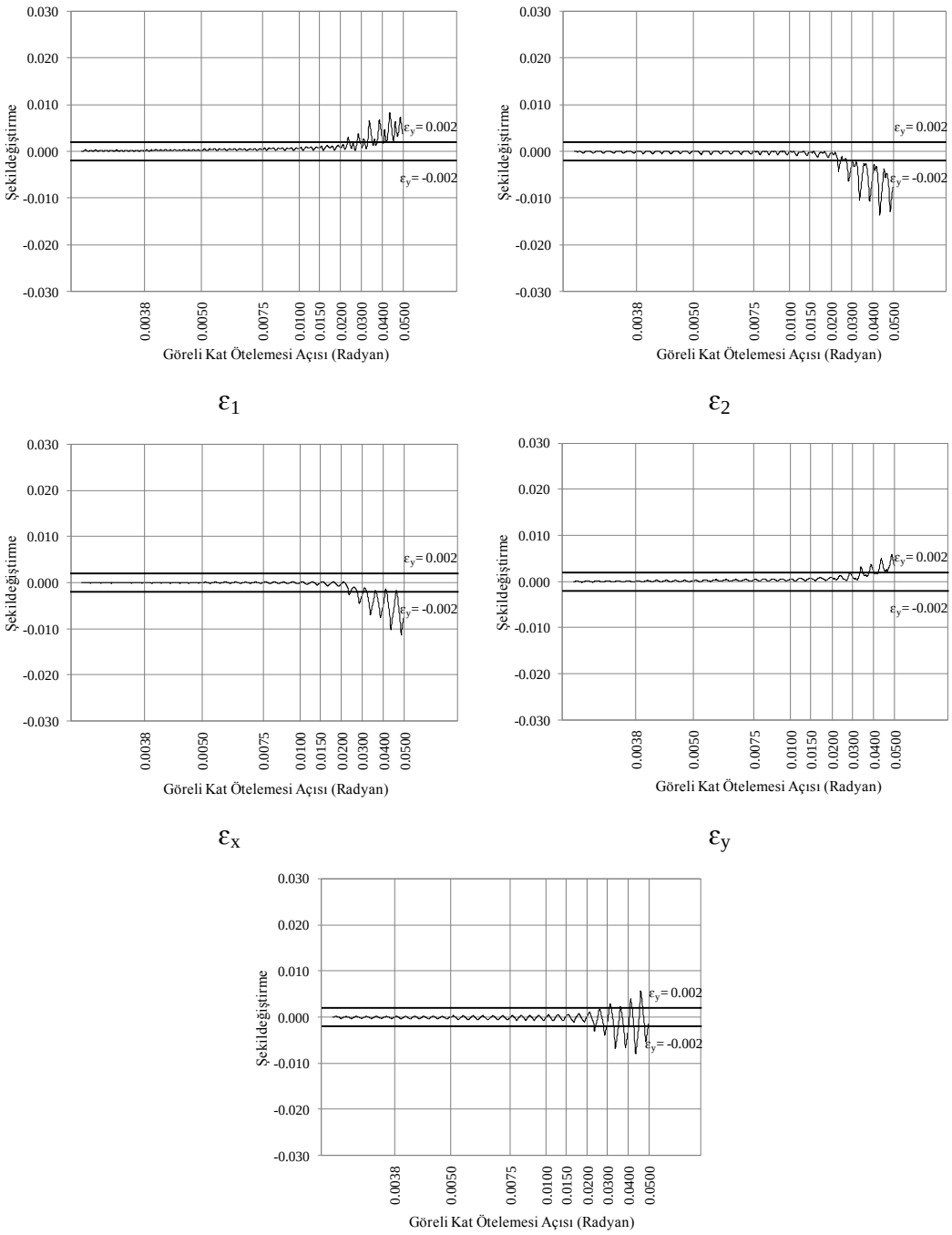
Panel bölgesinin ortasında bulunan SG-9 isimli rozet tip şekildeğiştirme ölçerden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.73'te verilmiştir.



Şekil 3.73 : EEPC-HS / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki plastikleşmeler, *EEPC-B* numunesine benzer olarak ikinci yerdeğiştirme grubu çevrimleri sırasında başlamıştır.

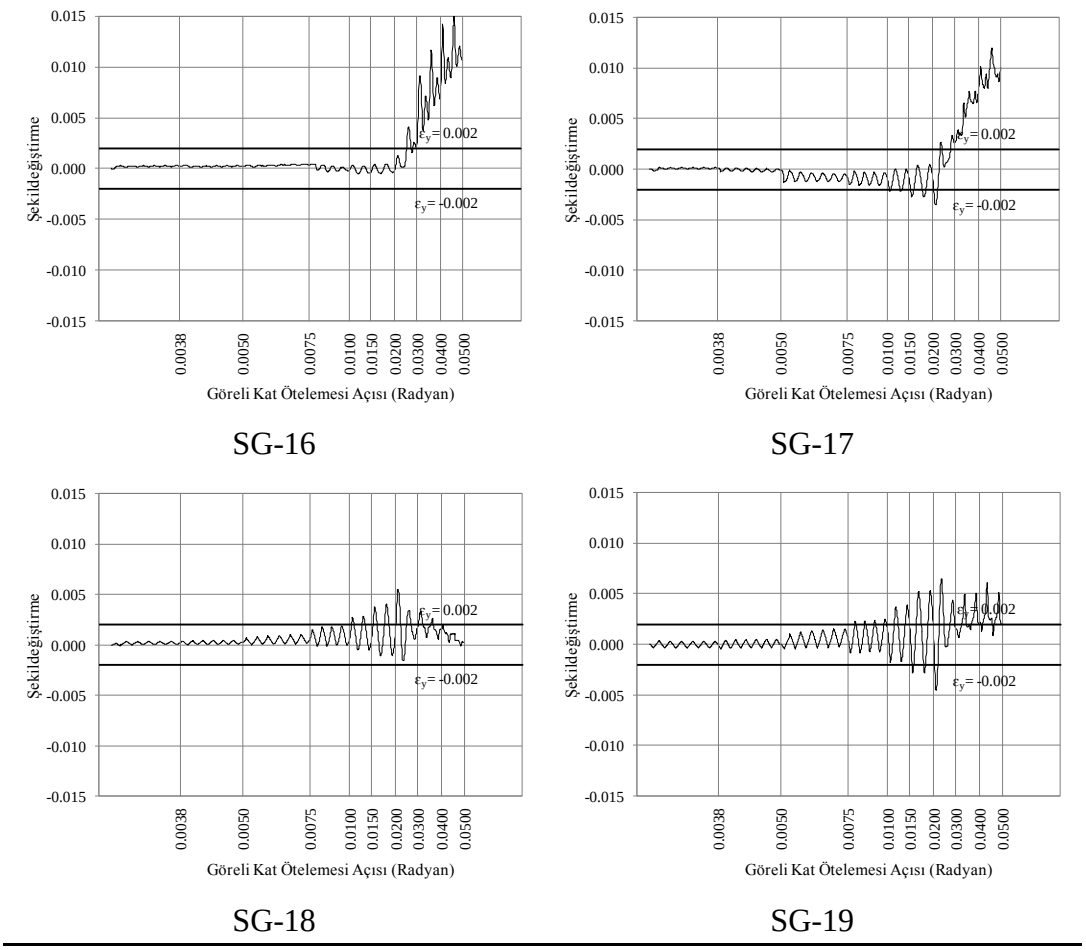
Kolon gövdesinde yer alan SG-10 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen ilişkiler Şekil 3.74'te verilmiştir.



Şekil 3.74 : EEPC-HS / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki plastik şekildeğiştirmeler, SG-7 şekildeğiştirme ölçerinde olduğu gibi 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamıştır.

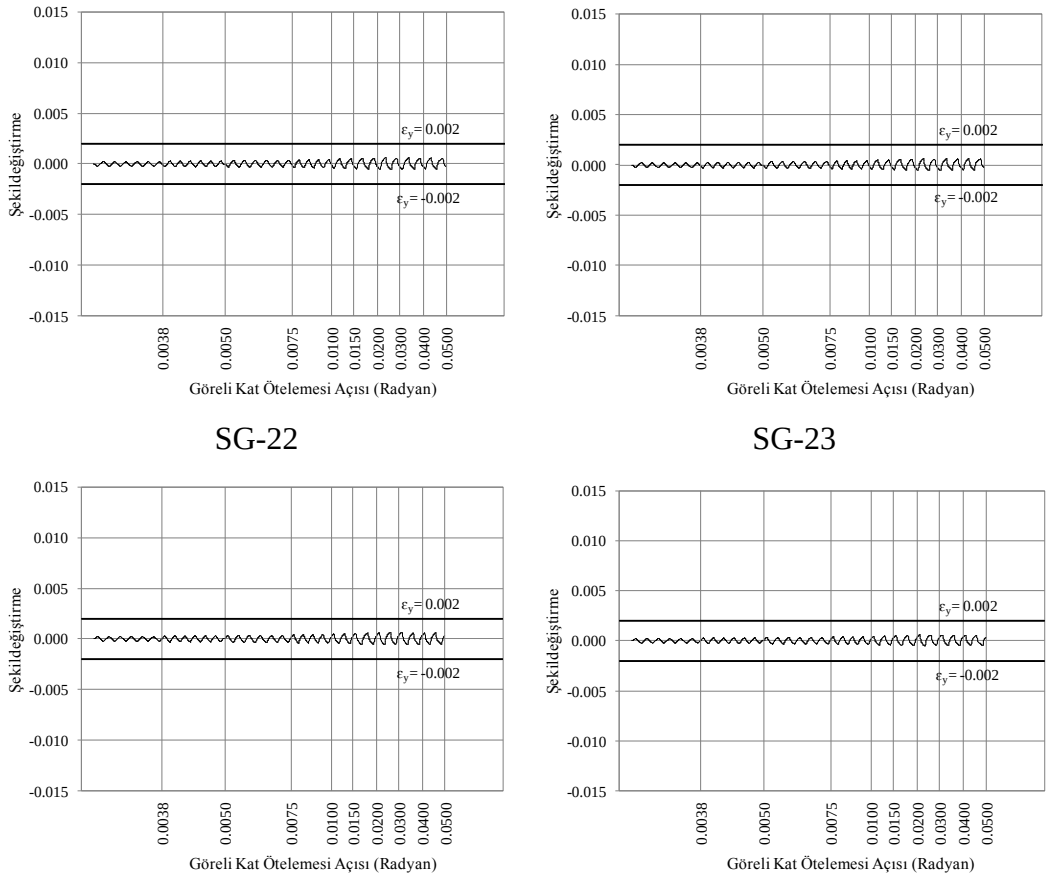
Panel bölgesi içinde kalan tek eksenli SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.75'te verilmiştir.



Şekil 3.75 : EEPC-HS / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Plastikleşmeler, SG-16'nın olduğu bölgede 0.03 rad., SG-17'nin olduğu bölgede 0.02 rad., SG-18'in olduğu bölgede 0.015 rad., SG-19'un bulunduğu bölgede de 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamıştır.

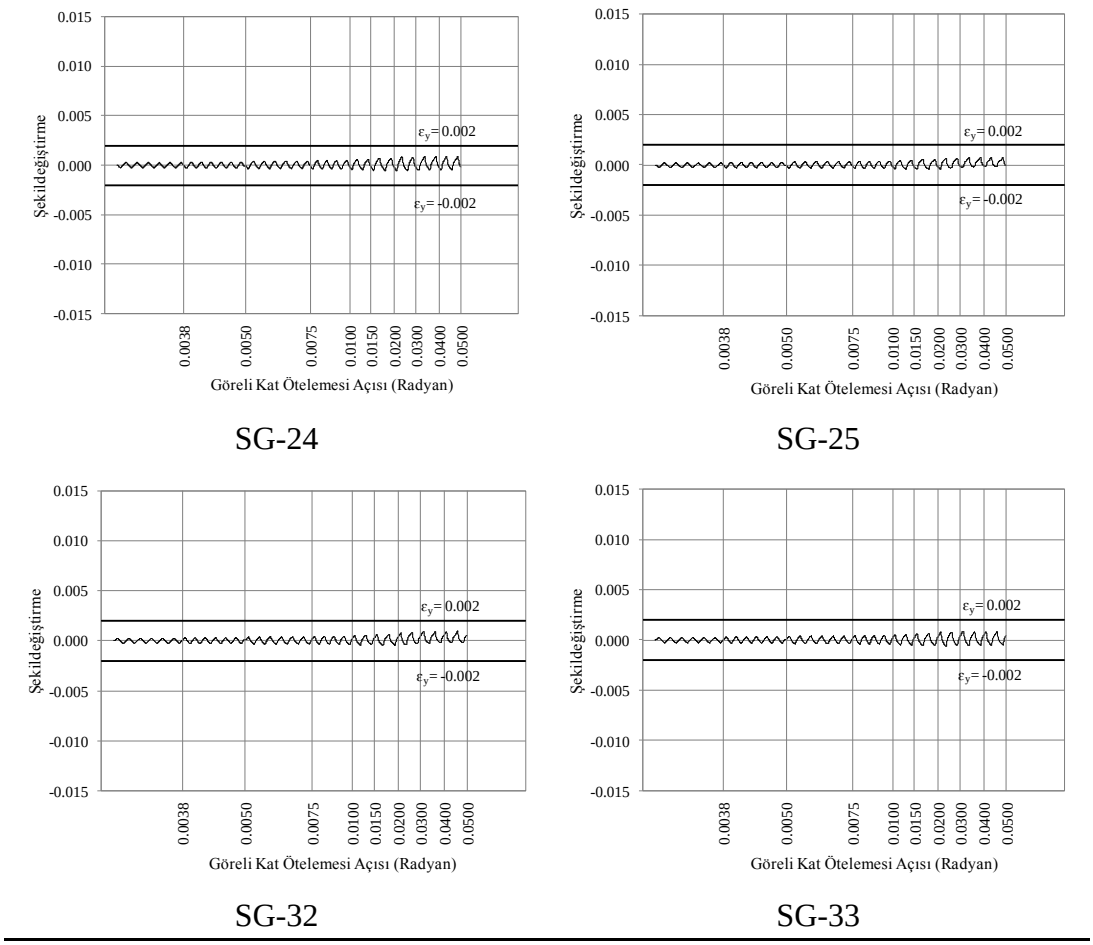
Kiriş alın plakasından kiriş kesit yüksekliği kadar yukarıda ve başlık plakası üzerinde yer alan SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme ölçerlerden alınan sonuçlar Şekil 3.76'da gösterilmiştir.



Şekil 3.76 : EEPC-HS / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Bu bölgedeki şekildeğiştirme ölçerlerin tümünün akmaya ulaşmadığı gözlenmiştir.

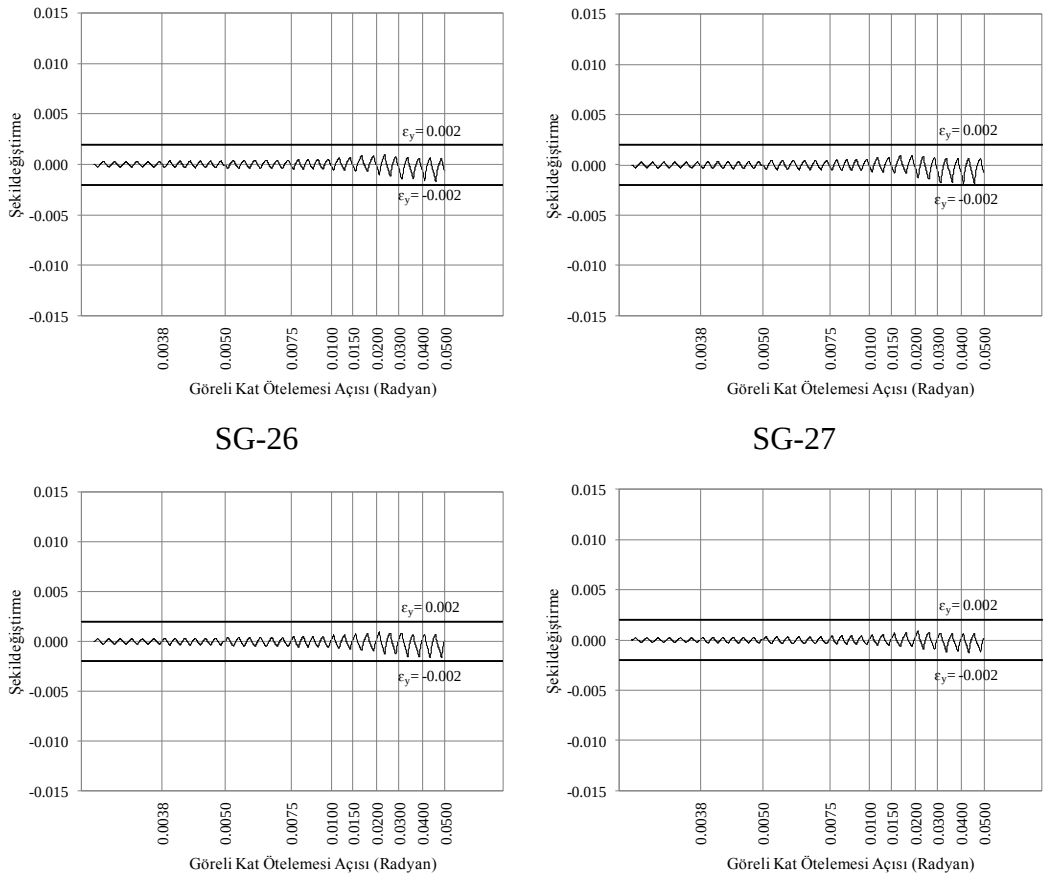
Alın plakasından yarı kiriş yüksekliği yukarıda bulunan SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 tek eksenli şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan sonuçlar Şekil 3.77'de verilmiştir.



Şekil 3.77 : EEPC-HS / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Bu bölgede plastikleşme meydana gelmemiştir.

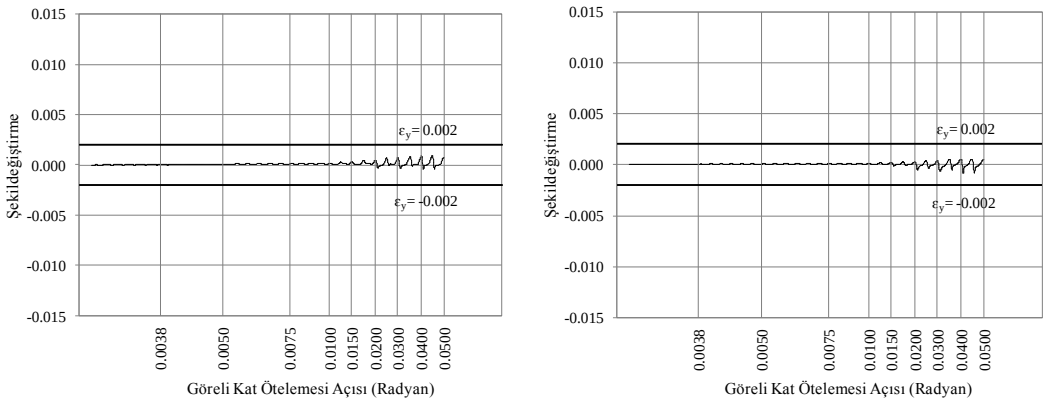
Kiriş başlıklarına yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden alın plakasına en yakın grupta yer alan tek eksenli SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 numaralı şekildeğiştirme ölçerlerden alınan sonuçlar Şekil 3.78'de verilmiştir.



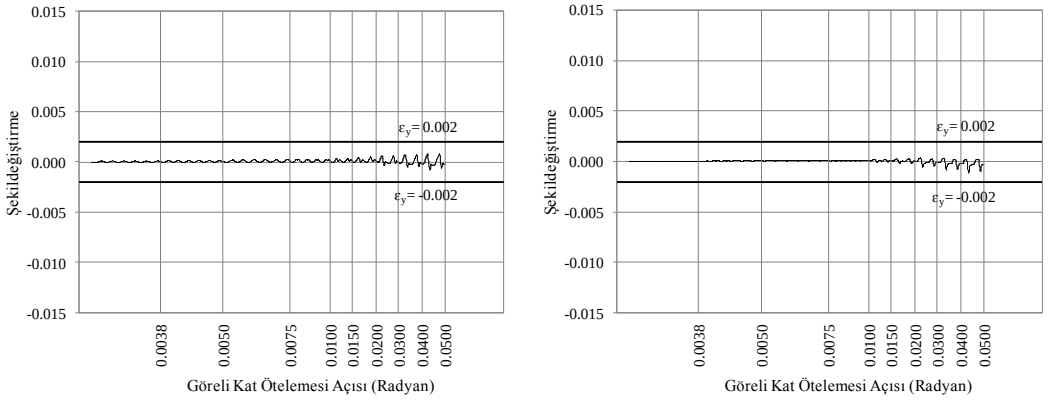
Şekil 3.78 : EEPC-HS / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Bu bölgede de şekildeğiştirmeler akma sınır değerinden küçük kalmaktadır.

Alın plakası üzerinde bulon ve üçgen berkitme elemanlar arasında yer alan SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kayıtlar Şekil 3.79'da verilmiştir.



SG-28 SG-29



SG-36 SG-37

Şekil 3.79 : EEPC-HS / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

EEPC-B numunesinde olduğu gibi, bu numunede de alın plakasında plastikleşme meydana gelmediği şekildeğiştirme okumalarından anlaşılmaktadır.

Süreklilik plakaları üzerinde yer alan SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerlerinden, kolon başlıklarında bulunan SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerlerinden ve kolonun mesnet bölgesinde yer alan SG-11, SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kayıtlar ile çizilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri EK-A'da verilmiştir.

Yerdeğiştirme çevrimleri sonucu ortaya çıkan yatay dayanımlar, şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen sonuçlar ve numune hasar mekanizmaları karşılaştırıldığında, *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinin davranış ve taşıma kapasiteleri arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Bu durum, *EEPC-HS* numunesindeki süreklilik plakalarının kolon gövdesine bağlantılarının olmamasına bağlanabilir.

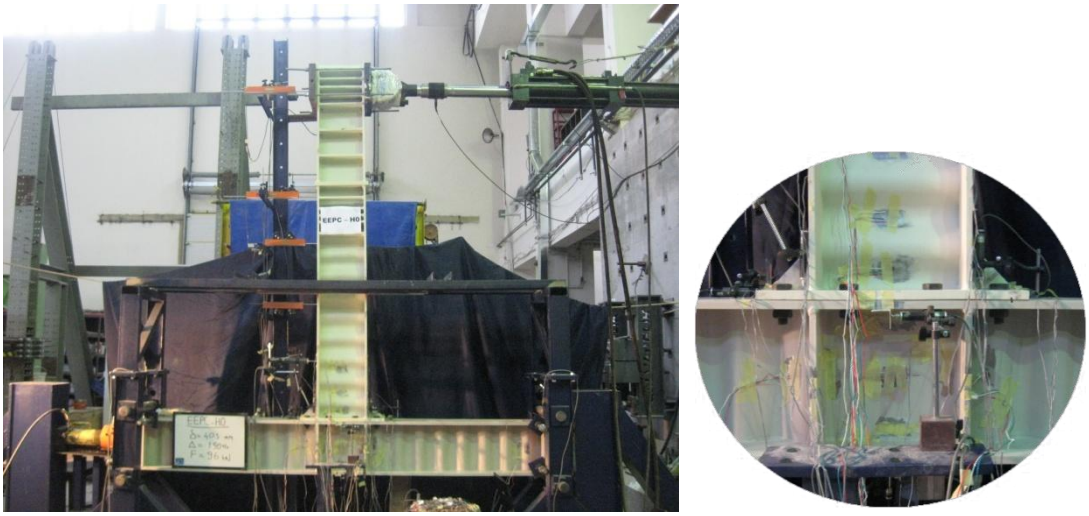
3.5.3 EEPC-H0 numunesi deneyi

EEPC-H0 numunesinde, süreklilik plakaları arasında kalan kolon gövdesi 8 mm kalınlıklı düzlem sac levhadan oluşturulmuştur. 2 adet süreklilik plakası kiriş başlıkları hizasında, kolon başlıkları arasında tek parça olarak devam etmektedir. Bu plakaların kalınlığı, kiriş başlık kalınlığı olan t=15 mm'ye eşit olarak seçilmiştir. Kolon gövdesinin panel bölgesi dışında kalan bölümleri ise sinüzoidal formda 3 mm kalınlıklı sac levhadan yapılmıştır.

Kiriş ise *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinde kullanılan kirişler ile özdeştir.

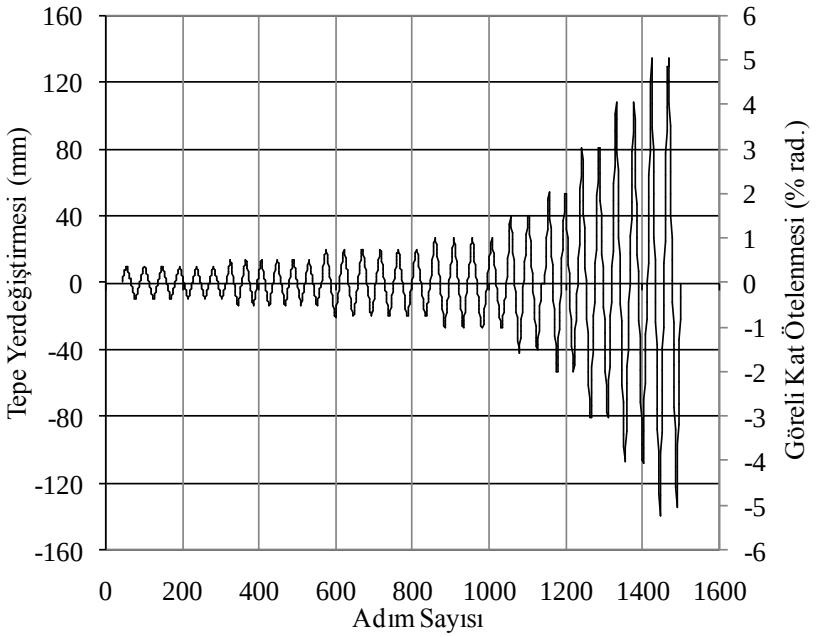
Panel bölgesinin düzlem sac levha ile değiştirilmesi, bu tip profillerden üretilen yapılarda uygulanan bir yöntemdir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, bu uygulama ile ilgili bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Deney numunesine ait genel görünüş ile panel bölgesi yakın görünüşü Şekil 3.80'de verilmiştir.



Şekil 3.80 : EEPC-H0 numunesinin genel ve detay görünüşü.

Deney, 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin sonuna kadar yerdeğiştirme kontrollü olarak iki yönlü çevrimsel statik yükler etkisinde yapılmıştır. Deneyde kullanılan yerdeğiştirme eşikleri Şekil 3.81'de verilmiştir.



Şekil 3.81 : EEPC-H0 numunesinde yerdeğiştirme adımları.

Şekildeğiştirme ölçerler için 51 kanaldan, yerdeğiştirme ölçerler için de 16 kanaldan olmak üzere toplam 67 kanaldan okuma yapılmıştır. Deney sırasında herhangi bir sorun yaşanmamış, 32 yerdeğiştirme çevrimi de numuneye uygulanmıştır.

0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine erişene kadar numune üzerinde gözle görülür herhangi bir hasar oluşmamıştır. Bu seviyeye gelene kadar;

İlk yerdeğiştirme çevrimi grubu olan 0.00375 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin 9.96 mm'lik en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 39.00 kN yatay dayanım, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde ise 39.70 kN'luk yatay dayanım oluşmuştur.

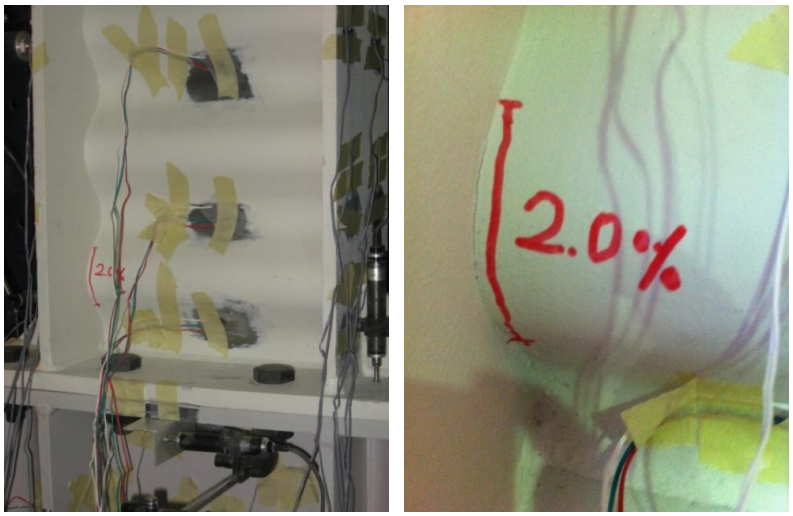
En büyük yerdeğiştirme değeri 13.43 mm olan 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde itme durumunda 51.00 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 52.00 kN'luk yatay dayanım elde edilmiştir.

0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin 20.15 mm'lik en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 70.20 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde de 71.60 kN yatay dayanım elde edilmiştir.

26.80 mm'lik en büyük yerdeğiştirme değerine sahip olan 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde elde edilen en büyük dayanımlar itmede 81.00 kN, çekmede ise 81.00 kN olmuştur.

0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin 40.30 mm'lik en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 96.00 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde ise 97.00 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur.

Numune üzerinde ilk hasarın gözlendiği 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, kiriş gövdesi ile başlıklarını bağlayan kaynak dikişlerinde küçük çatlaklar oluşmaya başlamıştır. 53.73 mm'lik çevrimin en büyük itme yerdeğiştirmesinde 109.00 kN, çekmesinde ise 109.00 kN'luk yatay yük dayanımı oluşmuştur. Bu yerdeğiştirme eşiğine ait son çevrimin tamamlanmasından sonra numunenin genel durumu Şekil 3.82'de gösterildiği gibidir.



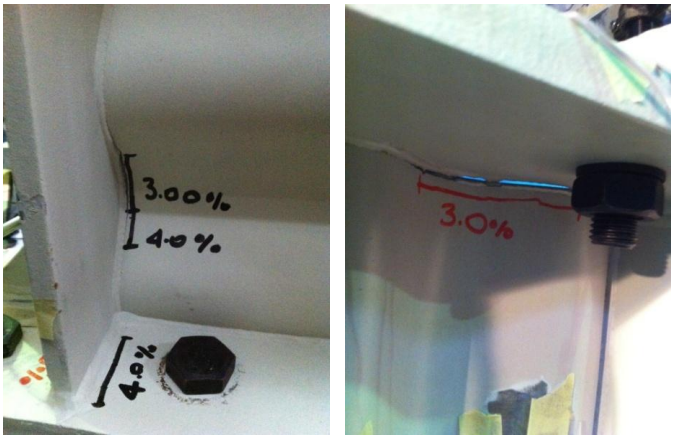
Şekil 3.82 : EEPC-H0 numunesinin 0.02 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

0.03 etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde, kiriş gövdesi ile başlıklarını birbirlerine bağlayan kaynak dikişlerindeki küçük çatlaklar büyümeye başlamıştır. Kolonun panel bölgesi dışında kalan kısmında da gövde ile başlıklar arasındaki kaynaklarda ayrılmalar meydana gelmeye başlamıştır. Ayrıca kiriş ile alın plakasını birleştiren kaynaklarda çok küçük çatlaklar oluşmaya başlamıştır. 80.60 mm'ye karşı gelen itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 122.00 kN, çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde ise 124.00 kN yatay dayanım elde edilmiştir. Bu yerdeğiştirme çevriminin tamamlanmasıyla birlikte numude ortaya çıkan hasar durumu Şekil 3.83'te verildiği gibidir.



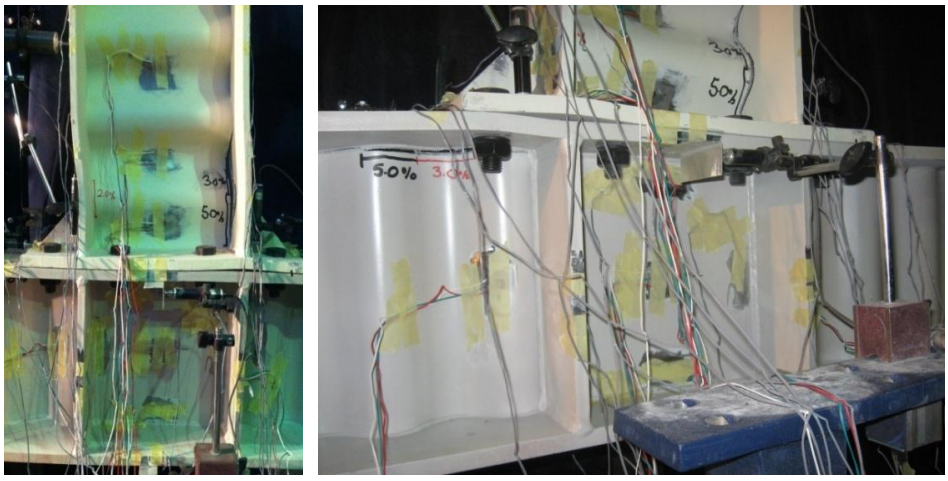
Şekil 3.83 : EEPC-H0 numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

En büyük tepe yerdeğiştirme değeri 107.46 mm olan 0.040 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, kiriş başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişlerinde ve kolon başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişlerinde 0.030 rad. seviyesinde başlayan çatlaklar büyüyerek ilerlemiştir. Büyüyen çatlak sonucunda gövde ve başlık elemanları arasında ayrılmalar başlamıştır. Ayrıca kiriş başlık ve alın plakasını birleştiren kaynak dikişlerinde yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Bu yerdeğiştirme eşiğinde itmede 131.00 kN, çekmede ise 132.80 kN'luk en büyük dayanımlar elde edilmiştir. Son çevrimin de tamamlanmasının ardından çekilen hasar fotoğrafları Şekil 3.84'te verilmiştir.



Şekil 3.84 : EEPC-H0 numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

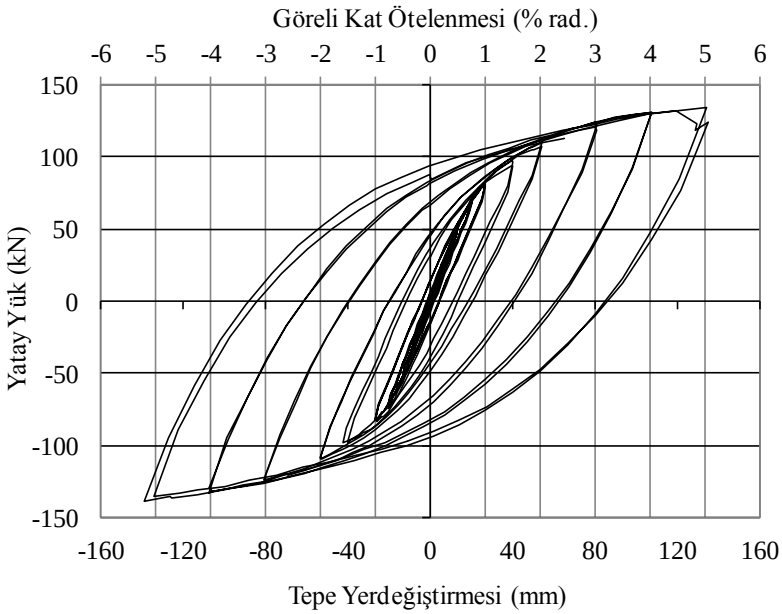
0.05 etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde, bir önceki yerdeğiştirme düzeyinde gözlenen kaynak ayrılmalarının daha da büyüdüğü ve kirişin sinüs gövdesinin formunun bozulduğu gözlenmiştir. Numunenin bütünlüğü önemli ölçüde kaybolmuştur. Bu eşiğin 134.33 mm'ye karşı gelen en büyük yerdeğiştirmesinin itme durumunda 123.50 kN, çekme durumunda ise 135.60 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Deney sonundaki hasar durumu Şekil 3.85'te verilmiştir.



Şekil 3.85 : EEPC-H0 numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

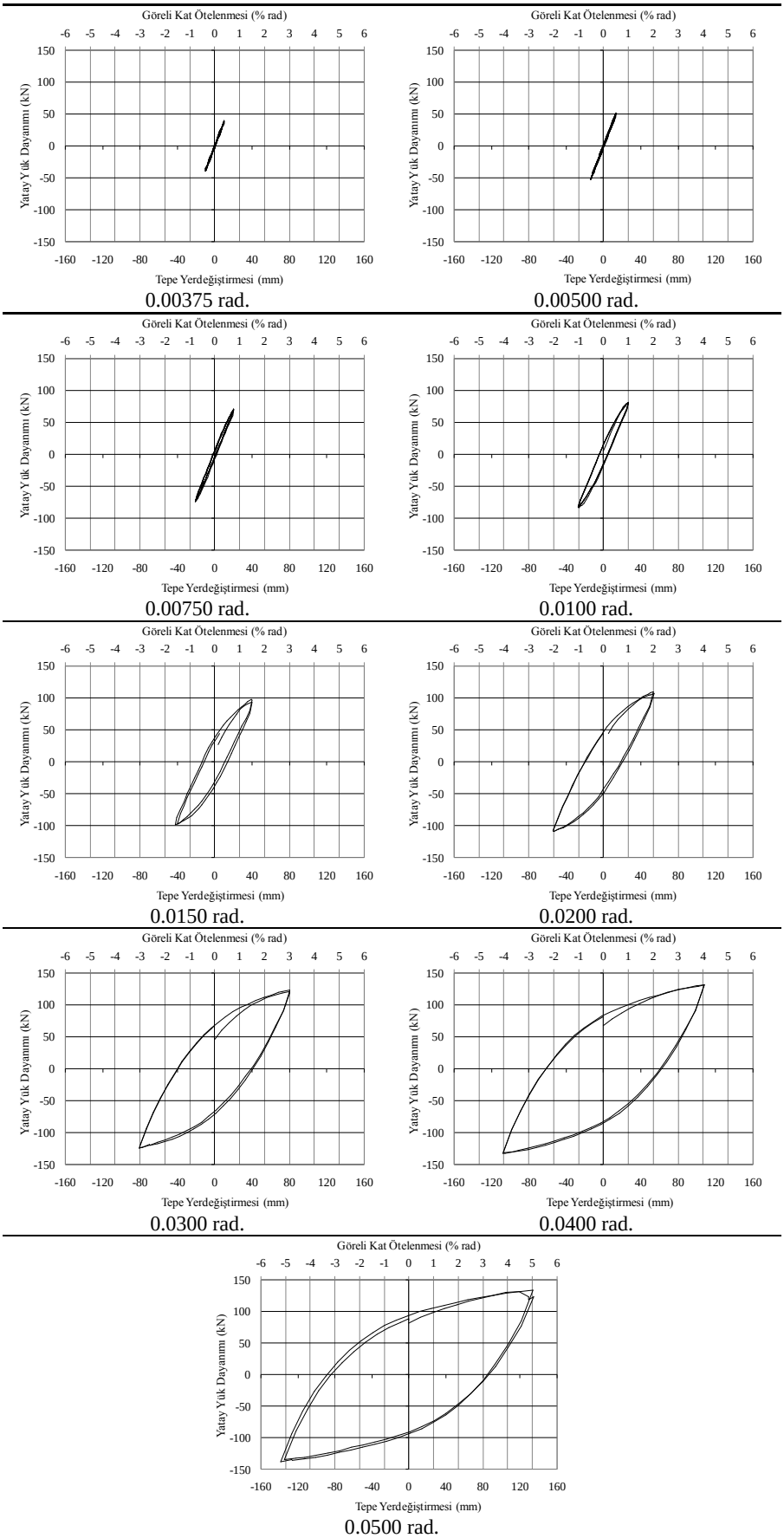
Bu numunede de *EEPC-HS* numunesinde olduğu gibi, farklı göreli kat ötelenme seviyelerinde oluşan yatay yük dayanımları mutlak değer olarak birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Bu yakınlık, 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde kiriş başlık ve gövdesinde meydana gelen ayrılma sonucu gövdenin sinüs formunu yitirmesi ile kaybolmuştur.

Deney sonuna kadar uygulanan tüm yerdeğiştirme çevrimlerinin tamamlanması ile elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.86'da verilmiştir.



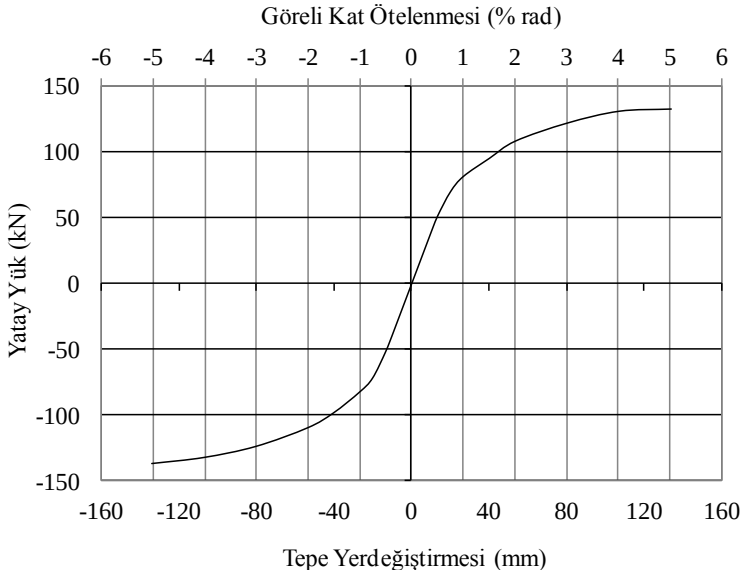
Şekil 3.86 : EEPC-H0 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

Yatay yük - yerdeğiştirme grafiğindeki çevrim grupları ayrıklaştırıldığında, elastik ötesi davranışın Şekil 3.87'de görüldüğü gibi 0.01 rad. - 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde başladığı izlenmektedir.



Şekil 3.87 : EEPC-H0 numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

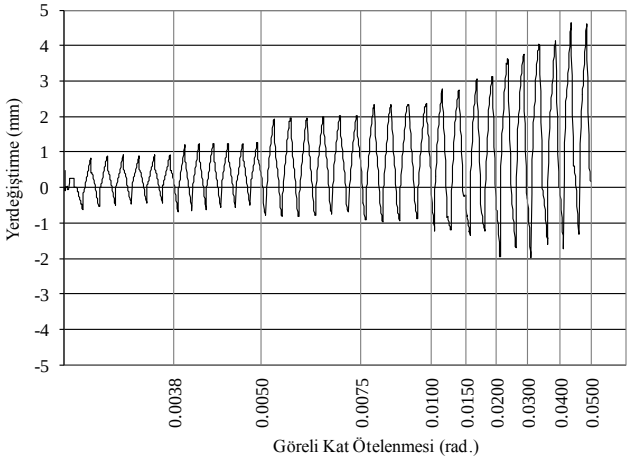
Yatay yük - tepe yerdeğiştirme çevrimlerinin zarf eğrileri Şekil 3.88'de verilmiştir.



Şekil 3.88 : EEPC-H0 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi.

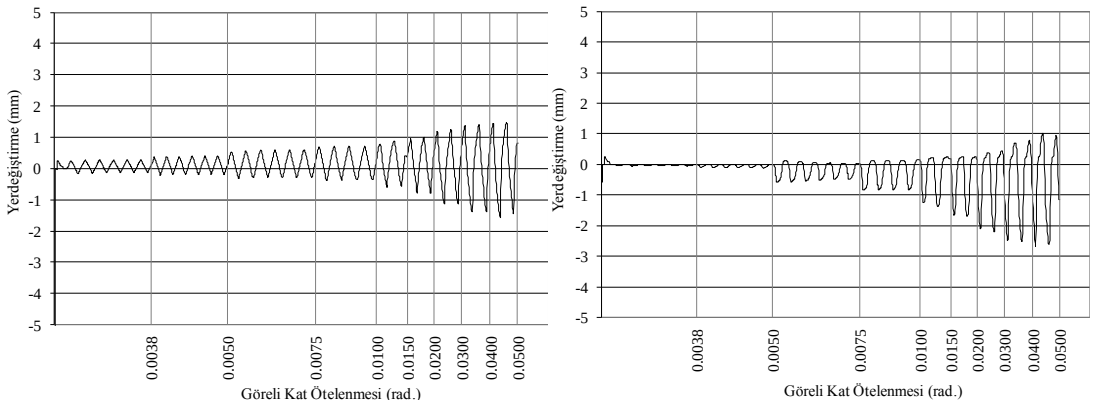
Yatay yük dayanımı, kaynak dikişlerinde yaşanan çatlaklar ve ayrılmalara rağmen 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimine kadar her çevrimde artmıştır. 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimi sırasında kiriş gövdesinde sinüs formun bozulması nedeni ile itmede oluşan yatay yük dayanımı çekmede oluşan değere göre düşük kalmıştır.

Düzlem içi yükleme sırasında kirişte meydana gelen düzlem dışı hareket ve mesnet bölgelerinde oluşan düşey yerdeğiştirmeleri ölçmek amacıyla kullanılan yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen yerdeğiştirme - düzlem içi göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.89 ve Şekil 3.90'da verilmiştir.



Şekil 3.89 : EEPC-H0 numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Kaynak dikişlerinin çatlayarak kiriş gövde ve başlıklarının ayrılmaya başladığı 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi açısına karşı gelen yerdeğiştirme durumunda kaydedilen en büyük düzlem dışı hareket 3.71 mm'dir. Bu seviyede sisteme etkitilen yatay yerdeğiştirme ise 107.46 mm'dir. Bu aşamada düzlem dışı yerdeğiştirmenin düzlem içi yatay yerdeğiştirmeye oranı 1/29 olmuştur.

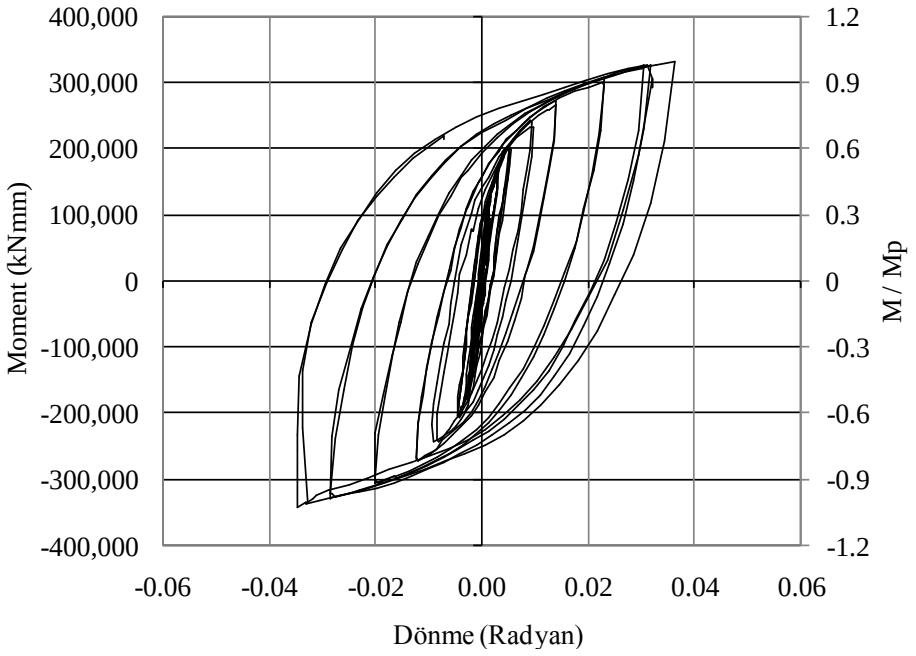


a. Sol mesnet *b. Sağ mesnet*

Şekil 3.90 : EEPC-H0 numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

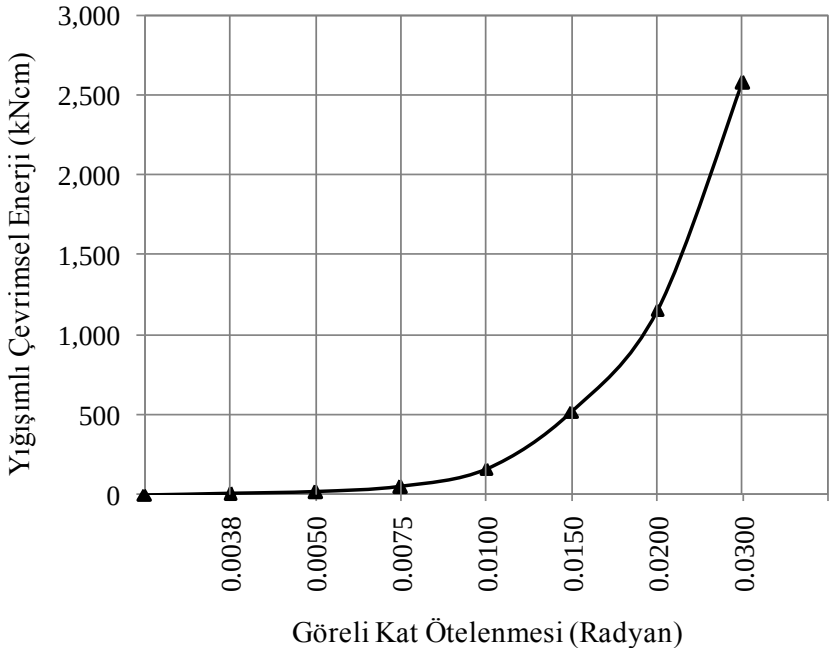
107.46 mm'lik düzlem içi yerdeğiştirme durumunda, kolonun basit olarak mesnetlendiği silindirik rod mesnetlerde meydana gelen en büyük düşey hareket sol tarafta 1.36 mm, sağ tarafta ise 2.61 mm olarak kaydedilmiştir. Bu durumda sol mesnetin düşey hareketinin numune tepe yatay yerdeğiştirmesine oranı 1/79, sağ mesnetin düşey hareketinin numune tepe yatay yerdeğiştirmesine oranı ise 1/42 olmuştur.

Alın plakasının düşey doğrultudaki hareketini ölçmek için yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerin göreli hareketlerinden faydalanılarak elde edilen dönme büyüklüklerinin moment ile ilişkisini gösteren eğri Şekil 3.91'de verilmiştir. Grafiğin sağ düşey aksından izlenebildiği gibi, kiriş taban kesitinde oluşan momentin, kiriş plastik moment kapasitesine oranı %93 seviyesinde çıkmıştır.



Şekil 3.91 : EEPC-H0 numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi.

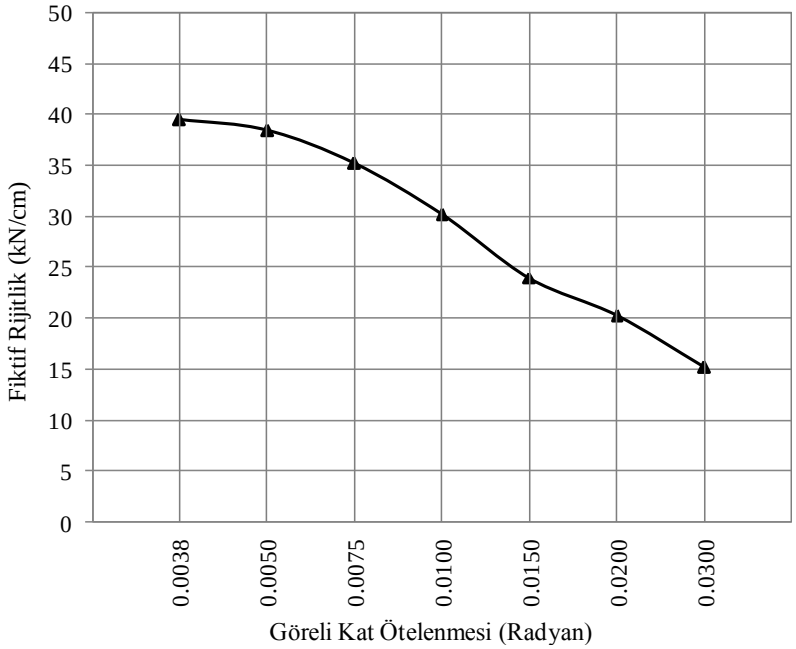
Tepe yerdeğiştirmesi - yatay yük dayanımı çevrimlerinden elde edilen göreli kat ötelenmesi - yığışımlı çevrimsel enerji grafiği Şekil 3.92'de verilmiştir.



Şekil 3.92 : EEPC-H0 numunesinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi.

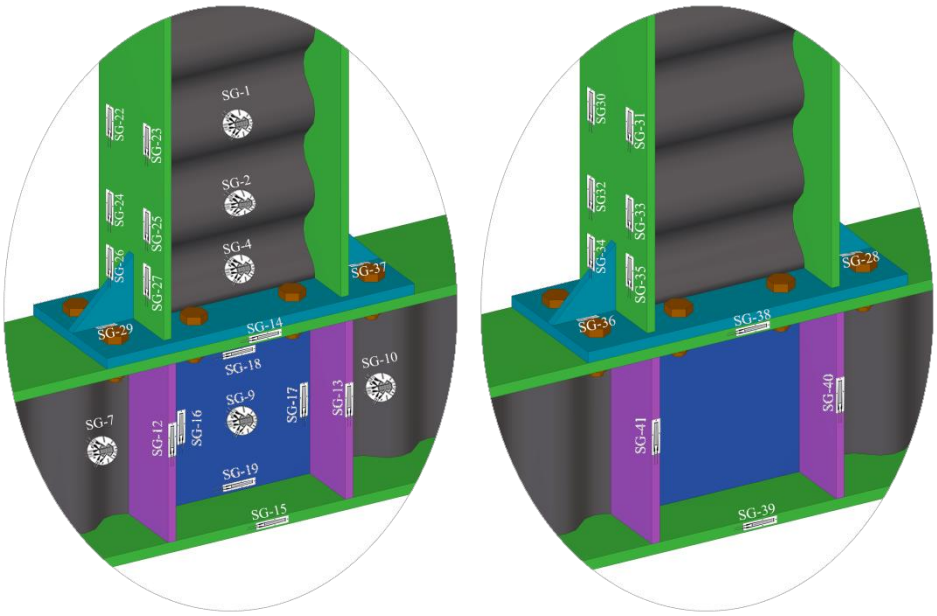
Yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi çevrimlerinden hareketle hesaplanan göreli kat ötelenmesi - fiktif rijitlik ilişkisi Şekil 3.93'te verilmiştir. İlk çevrimlerde yaklaşık 40

kN/cm'lik yatay rijitliğin, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesi sonunda 15 kN/cm'ye düştüğü görülmektedir.



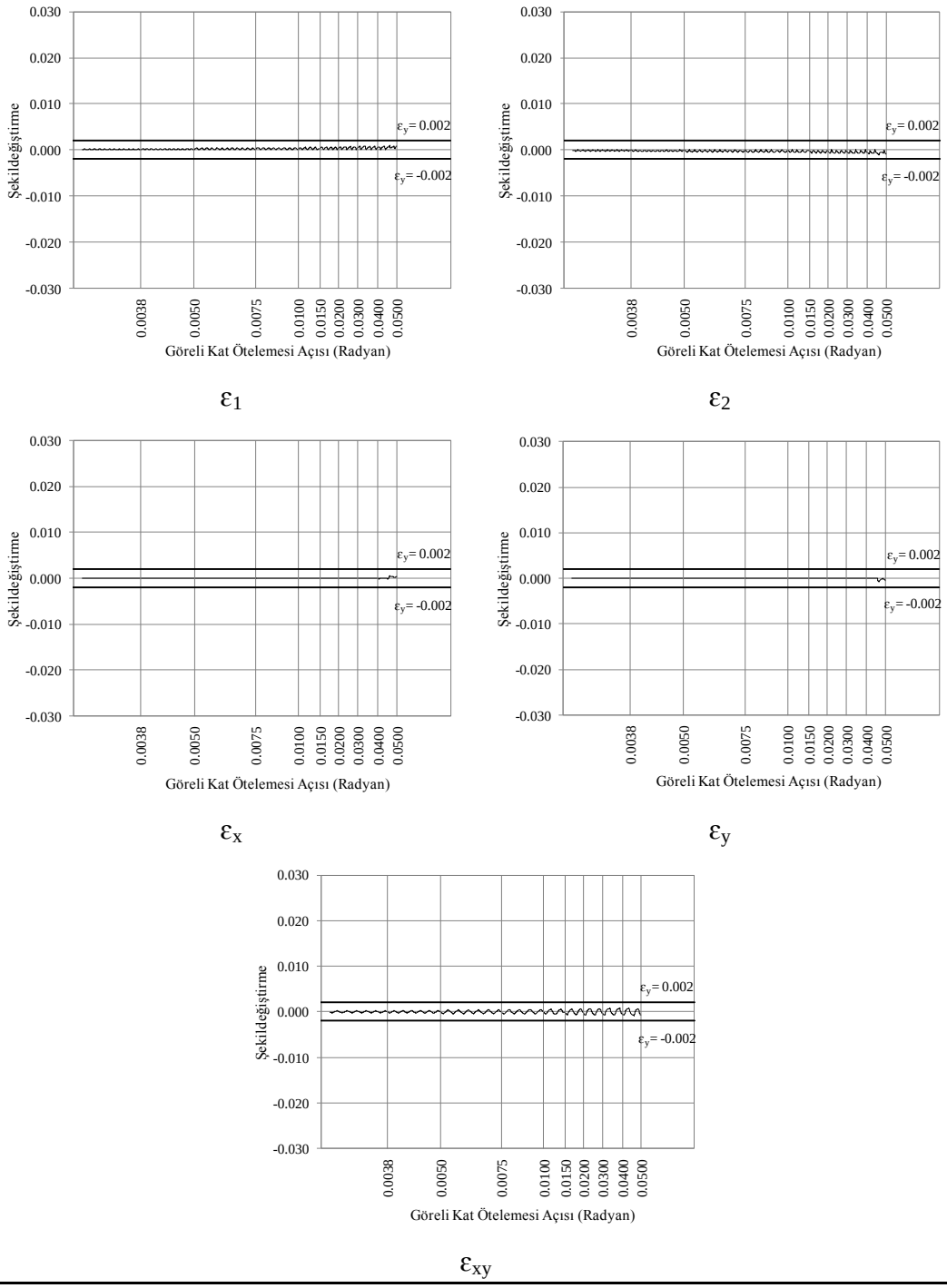
Şekil 3.93 : EEPC-H0 numunesinde rijitlik değişimi.

Panel bölgesi ve yakın çevresine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler ile bu bölgede oluşan şekildeğiştirmeler kaydedilmiştir. Şekildeğiştirme ölçerlerin konumları Şekil 3.94'te gösterilmiştir.



Şekil 3.94 : EEPC-H0 numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler.

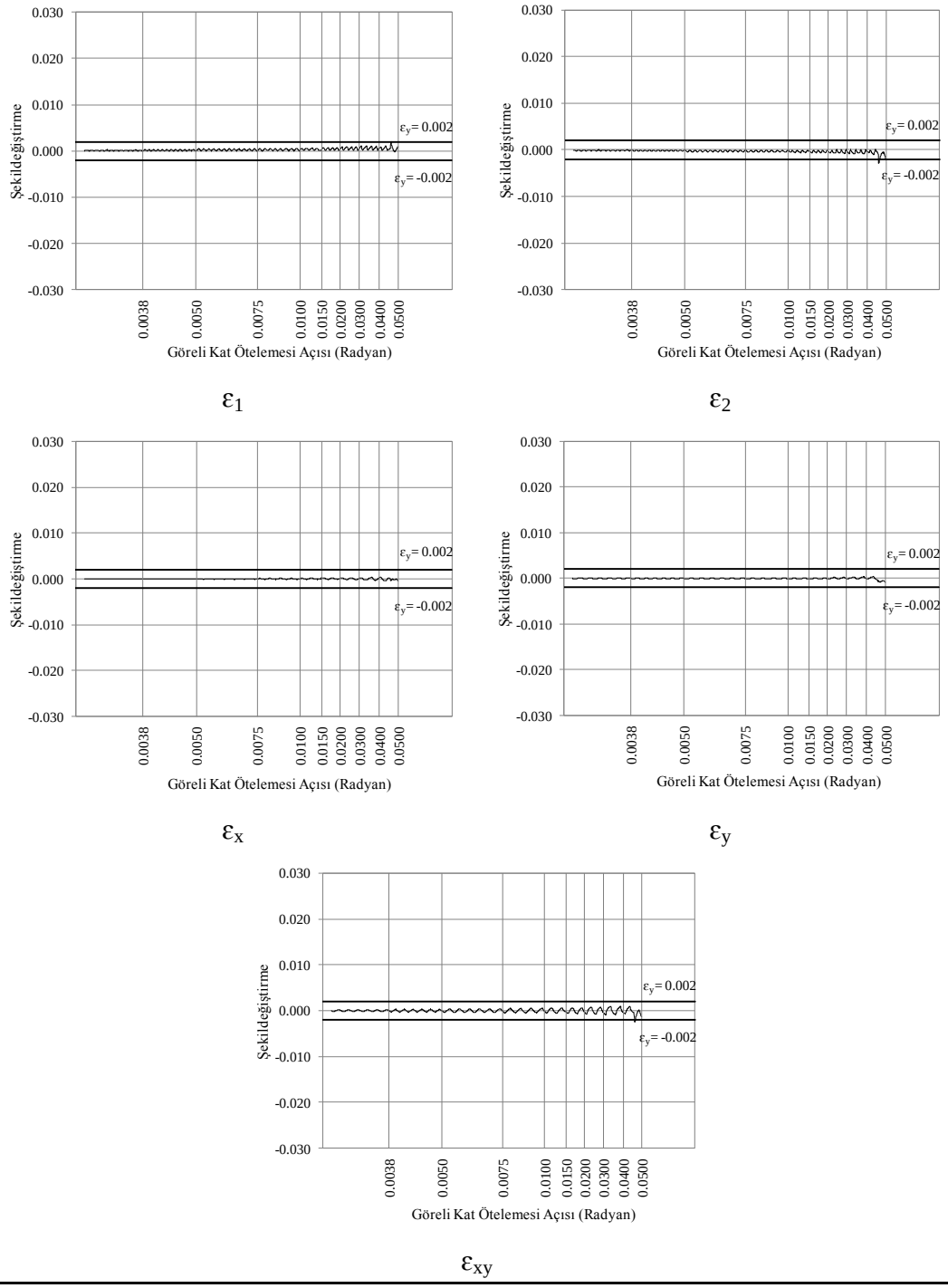
Kiriş gövdesinde bulunan şekildeğiştirme ölçerlerden panel bölgesine en uzak olan SG-1 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme büyüklükleri Şekil 3.95'te verilmiştir.



Şekil 3.95 : EEPC-H0 / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Kiriş gövdesinin bu bölgesinde, akma sınır şekildeğiştirmesi eşiğinden oldukça uzak kalındığı anlaşılmıştır.

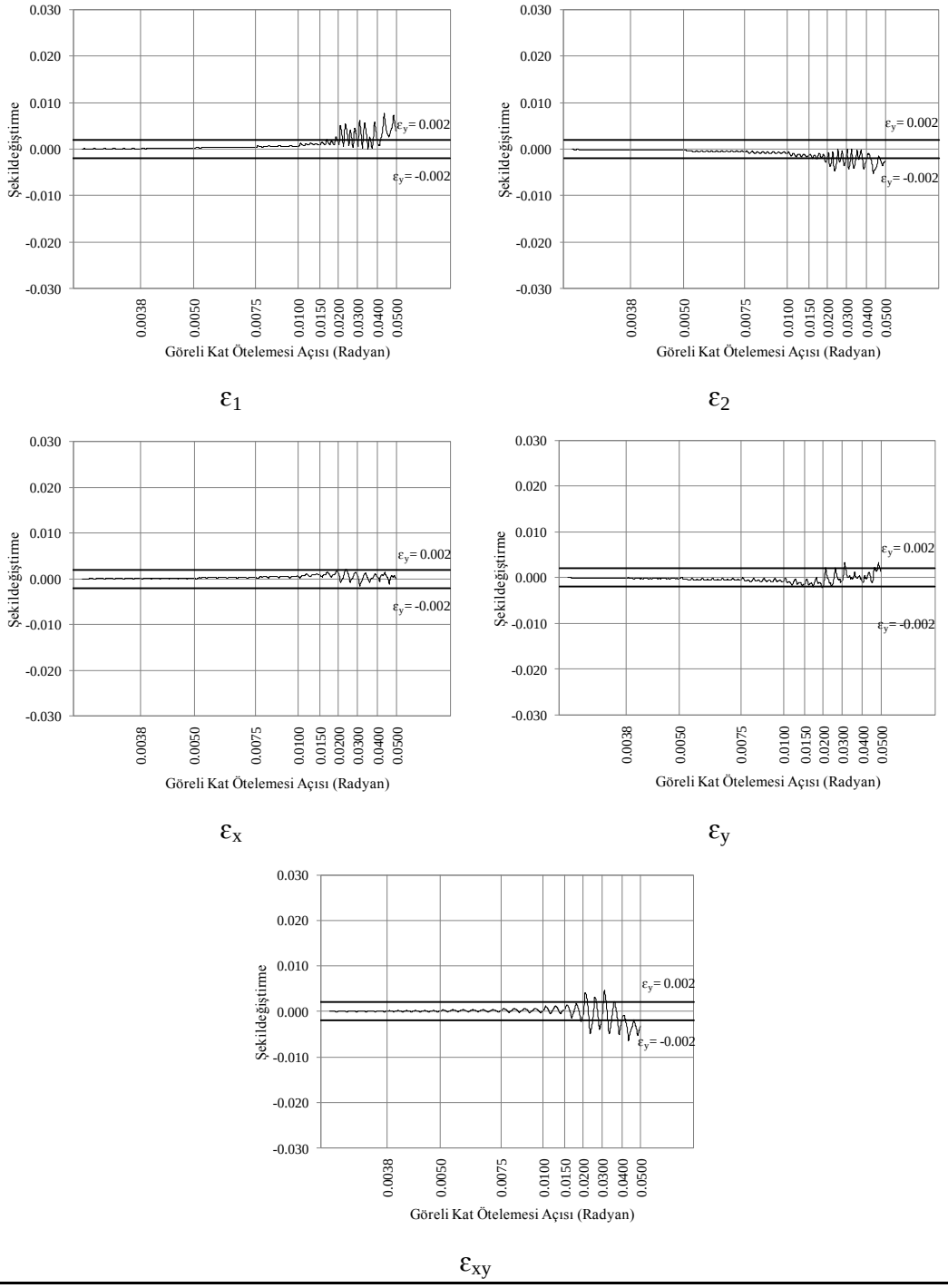
Kiriş gövdesinde bulunan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-2'den elde edilen şekildeğiştirme büyüklükleri Şekil 3.96'da verilmiştir.



Şekil 3.96 : EEPC-H0 / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-2 şekildeğiştirme ölçerinden alınan sonuçlara göre, kirişin bu bölgesinde 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde plastikleşme başlamıştır.

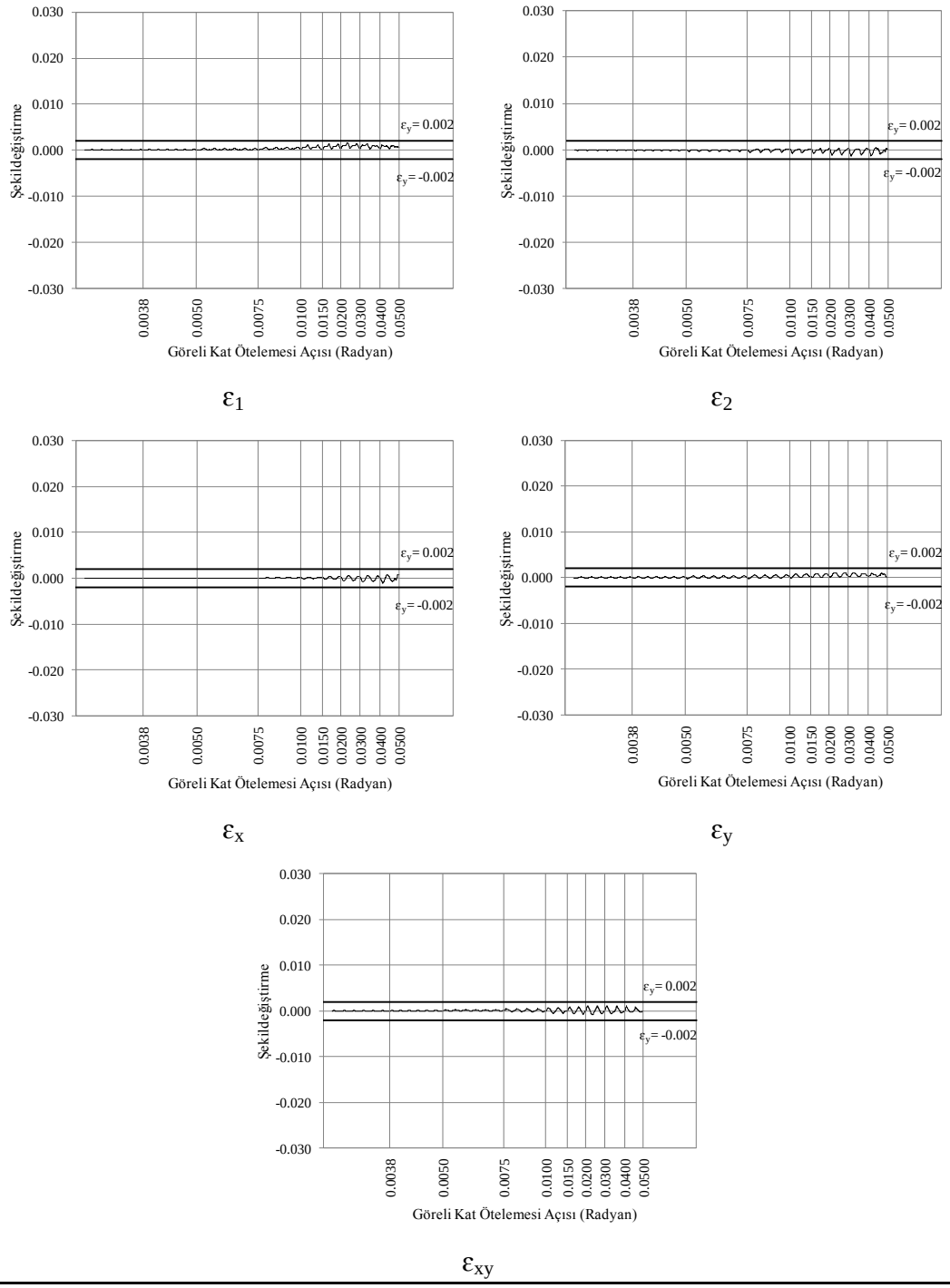
Kiriş gövdesinde yer alan ve panel bölgesine en yakın konumda bulunan SG-4 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen büyüklüklerin göreli kat ötelenmesi ile değişimi Şekil 3.97'de verilmiştir.



Şekil 3.97 : EEPC-H0 / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki plastikleşme, 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamıştır.

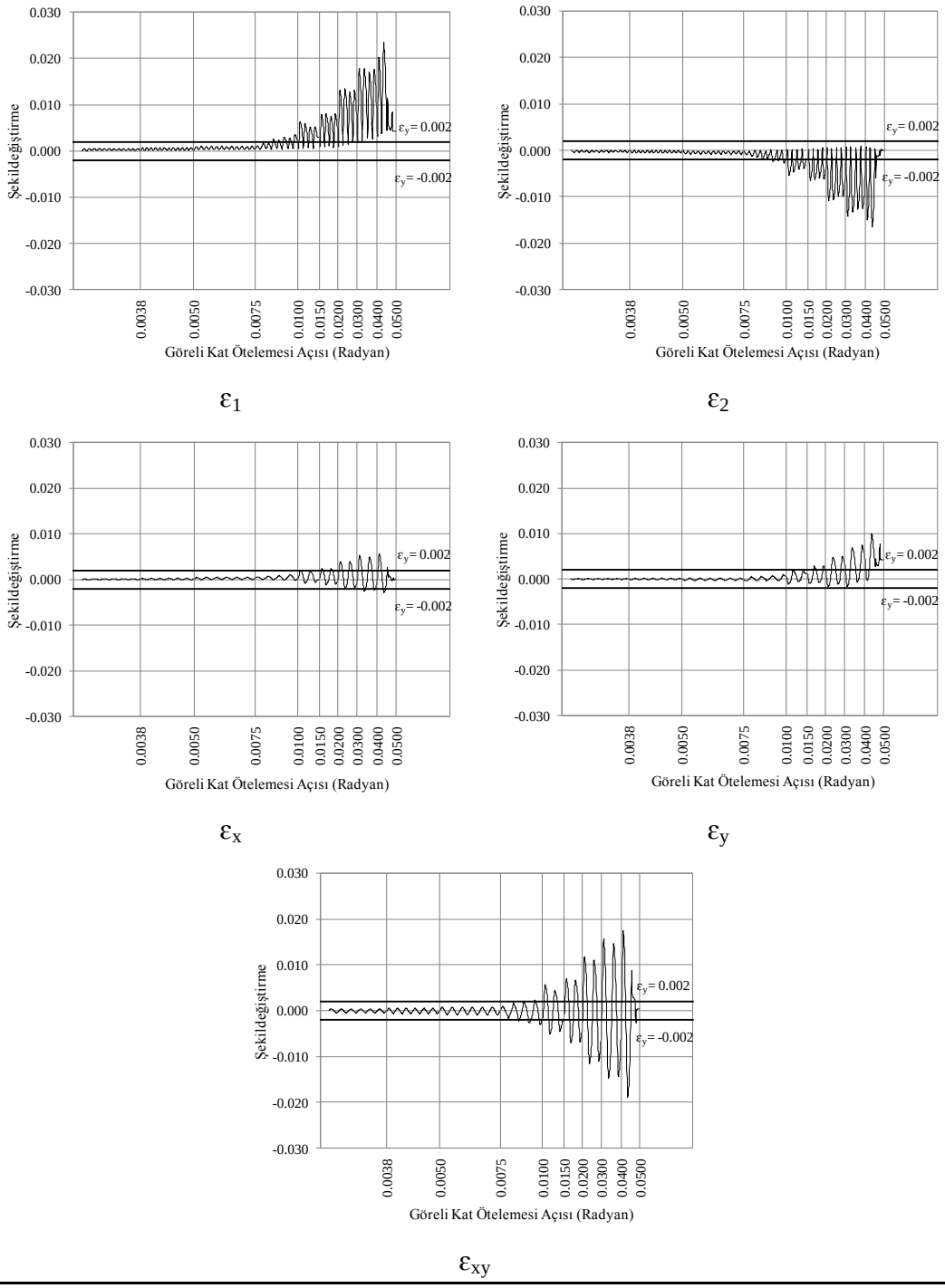
Kolon gövdesinde, panel bölgesinin sol dış tarafında yer alan SG-7 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.98'de gösterilmiştir.



Şekil 3.98 : EEPC-H0 / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-7 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede akma sınır şekildeğiştirmesine erişilememiştir.

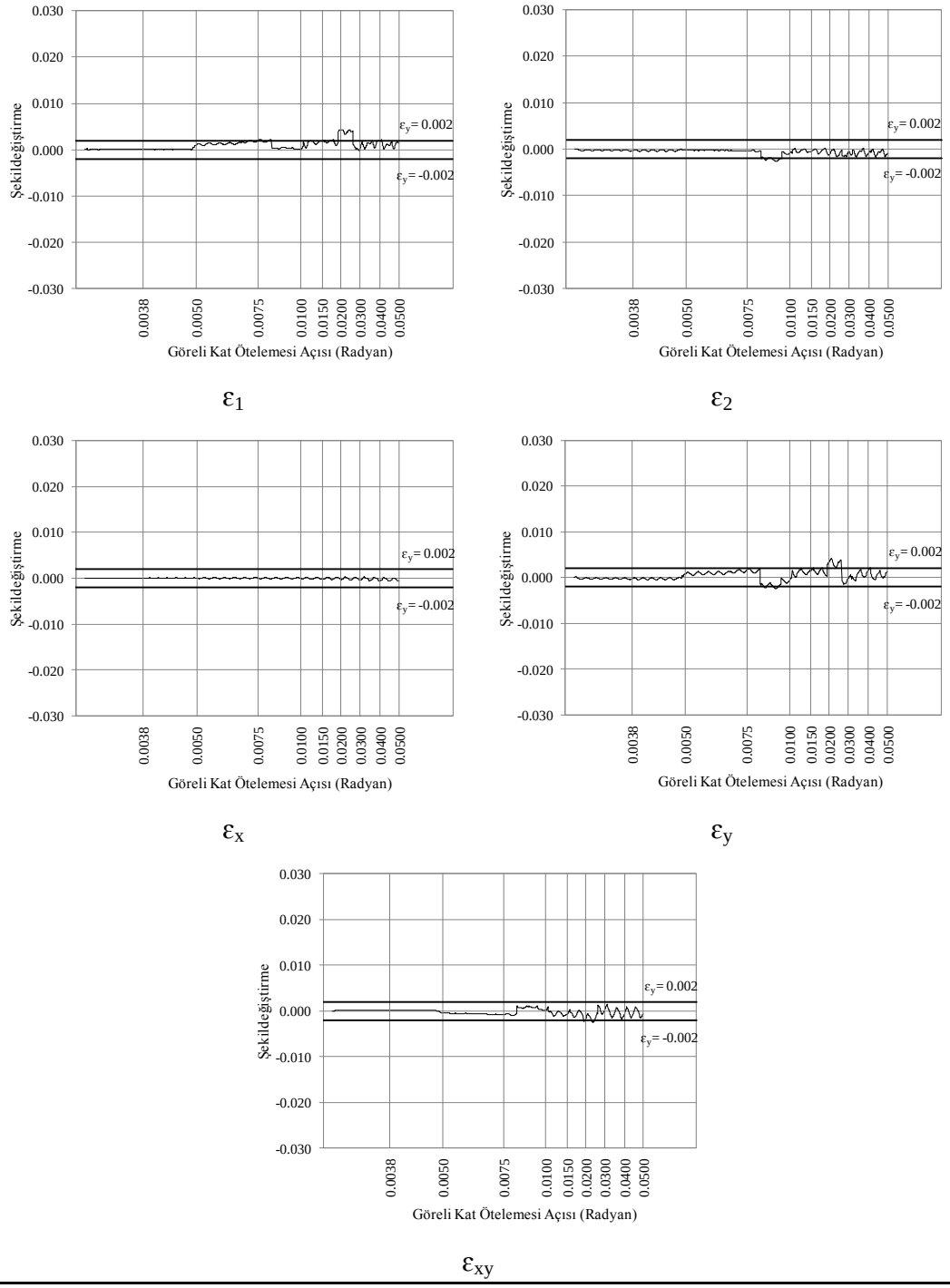
Panel bölgesinin merkezine yapıştırılan SG-9 isimli şekildeğiştirme ölçerden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.99'da verilmiştir.



Şekil 3.99 : EEPC-H0 / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Panel bölgesinin merkezinde, 26.80 mm'lik yerdeğiştirme çevrimi (0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi) uygulanırken plastikleşme başlamıştır.

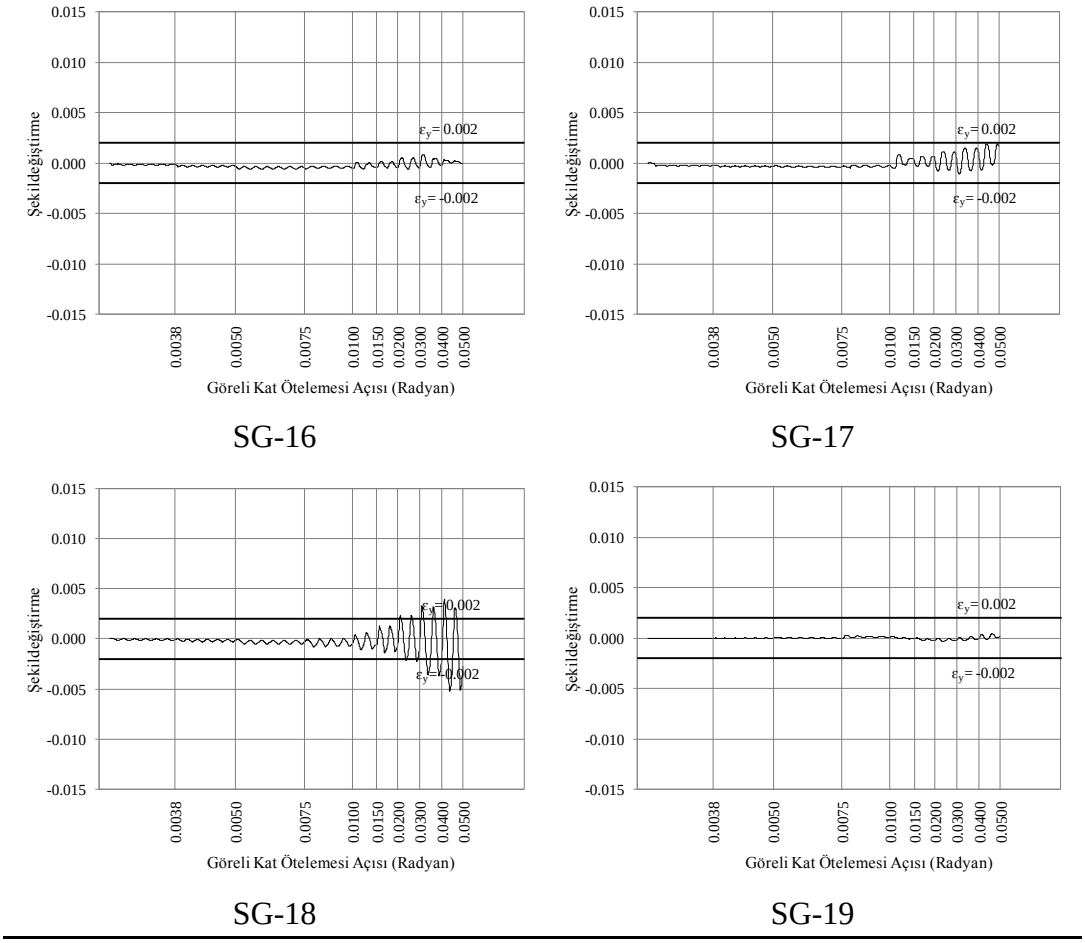
Panel bölgesinin dışında, sağ tarafta yer alan SG-10 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri de Şekil 3.100'de gösterilmiştir.



Şekil 3.100 : EEPC-H0 / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki ilk akma, panel bölgesinin merkezinde yer alan şekildeğiştirme ölçer ile benzer olarak 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde başlamıştır.

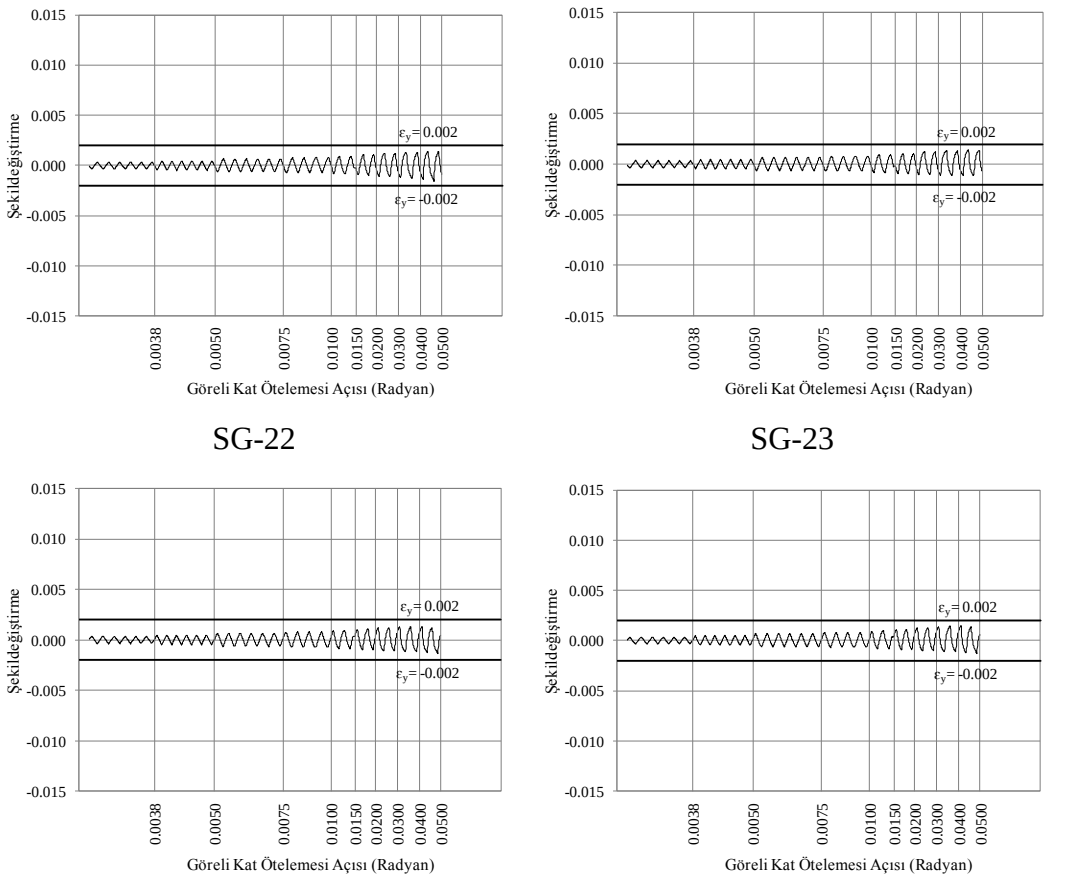
Panel bölgesinin içinde yer alan tek eksenli SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.101'de verilmiştir.



Şekil 3.101 : EEPC-H0 / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

SG-16, SG-17 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu bölgelerde akma sınır şekildeğiştirmesine erişilmezken, SG-18 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde plastikleşme başlamıştır.

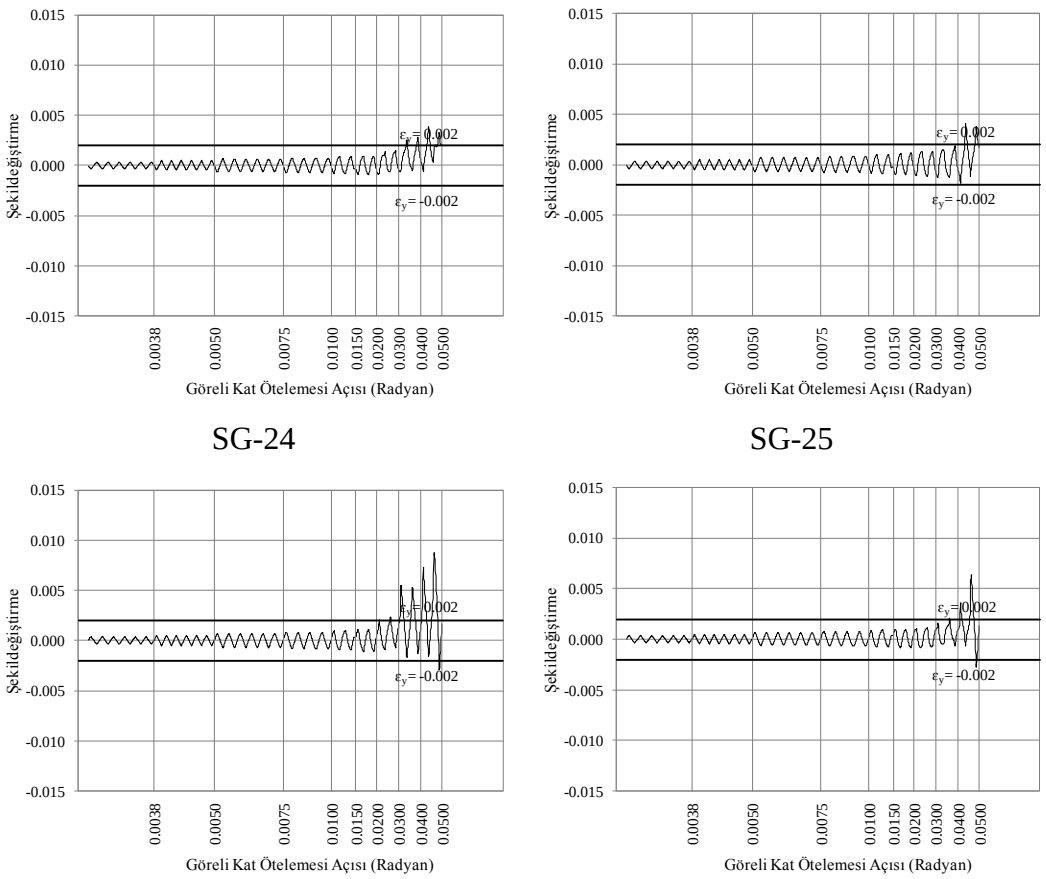
Kiriş başlıklarına yapıştırılan SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3.102'de gösterilmiştir.



Şekil 3.102 : EEPC-H0 / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Şekildeğiştirme ölçerlerden alınan sonuçlara göre bulundukları bölgelerde plastikleşme ortaya çıkmamıştır.

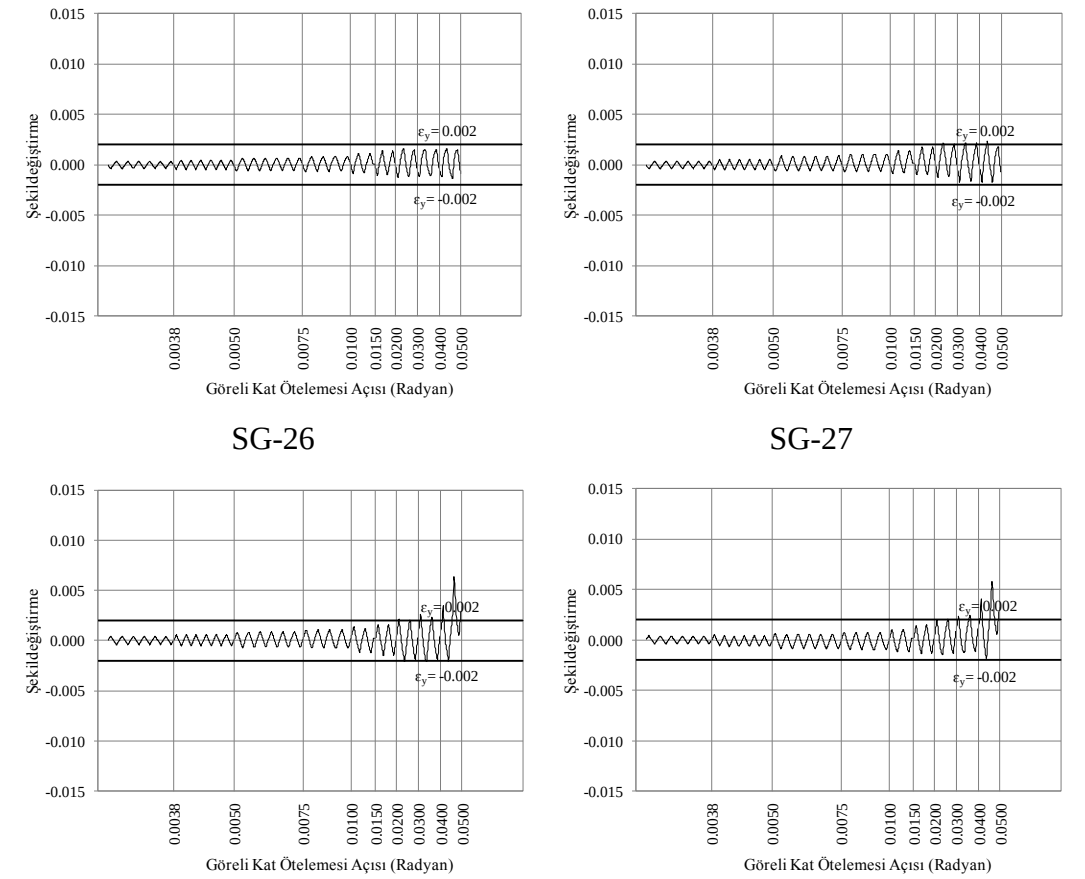
Kiriş başlıkları üzerinde bulunan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33'ten alınan sonuçlar Şekil 3.103'te verilmiştir.



Şekil 3.103 : EEPC-H0 / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Plastikleşmeler, SG-24 ve SG-32 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu kesitlerde 107.46 mm'lik yatay yerdeğiştirme çevriminde (0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiği) SG-25 ve SG-33 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu kesitlerde ise son yerdeğiştirme çevrim grubu olan 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde başlamıştır.

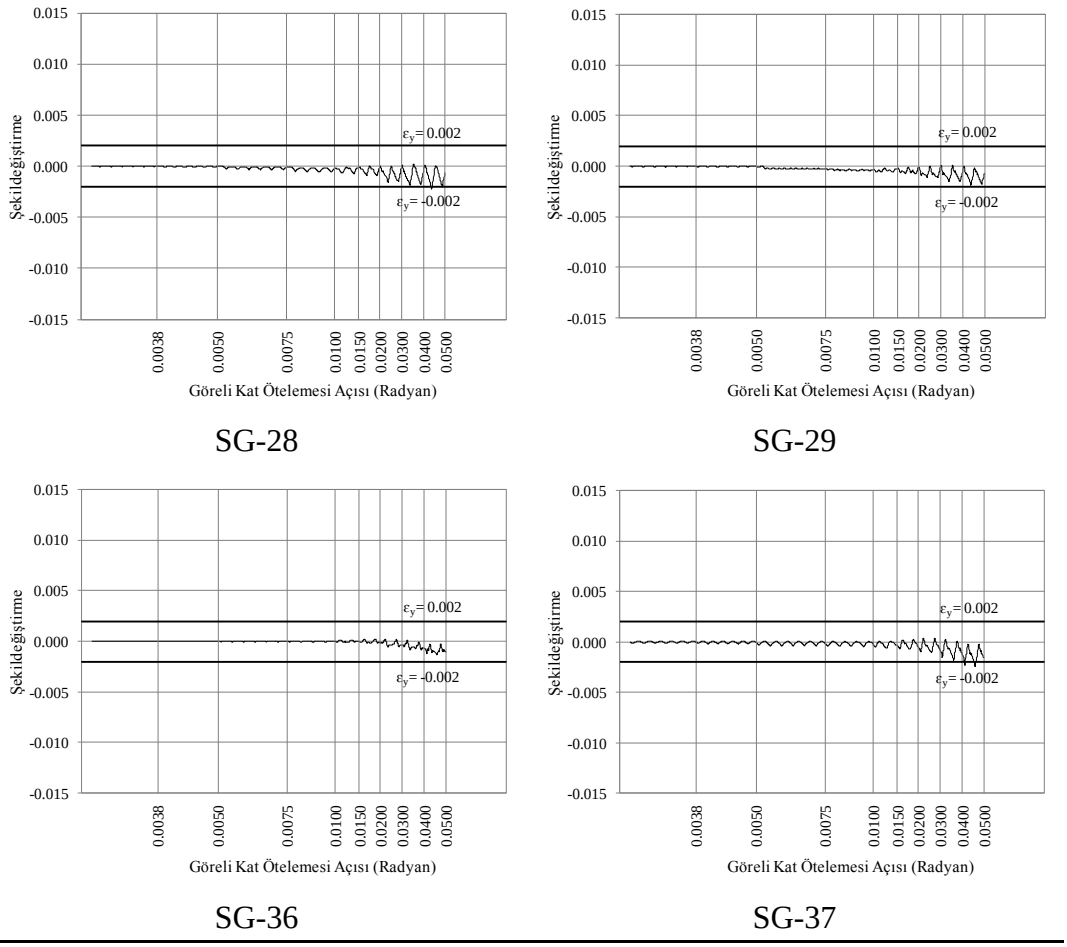
Kiriş başlıkları üzerine yapıştırılan ve panel bölgesine en yakın konumda yer alan SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan sonuçlar Şekil 3.104'te gösterilmiştir.



Şekil 3.104 : EEPC-H0 / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

SG-26 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede plastikleşme meydana gelmezken, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu bölgelerde 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde plastikleşmeler başlamıştır.

Kiriş alın plakası üzerinde, bulon ve üçgen berkitme elemanları arasına yapıştırılan SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kayıtlar da Şekil 3.105'te verilmiştir.



Şekil 3.105 : EEPC-H0 / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Plastikleşmeler, SG-28 ve SG-37 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu kesitlerde 0.050 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde başlamıştır. SG-29 ve SG-36 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu kesitlerde ise plastikleşme meydana gelmemiştir.

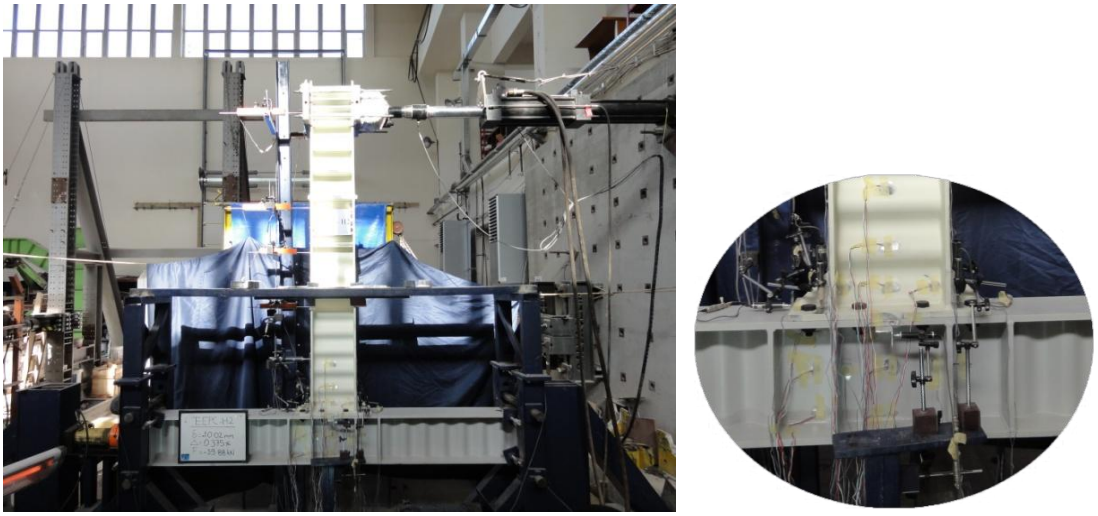
Süreklilik plakaları üzerinde bulunan SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerlerinden, kolon başlıklarının panel bölgesini sınırlayan kısımlarında bulunan SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerlerinden ve sağ mesnet bölgesinde yer alan SG-11, SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri EK-A'da verilmiştir.

3.5.4 EEPC-H2 numunesi deneyi

Panel bölgesinin içi *EEPC-H0* numunesi ile aynı olan bu sistemde, panel bölgesinin sağında ve solunda kolon kesit yüksekliğinin yarısı kadarlık bölgelerde de gövde 8 mm kalınlıklı düzlem sac levhadan oluşturulmuştur. Düzlem gövde ile sinüs formlu ince gövdenin birleştiği kesitte, kolon başlıkları arasında tek parça olarak devam eden 2 adet süreklilik plakası kullanılmıştır. Bu plakaların kalınlığı kiriş başlık kalınlığına (t= 15 mm) eşittir.

Bu numune, düzlem gövdenin panel bölgesi dışında da devam ettirilmesinin *EEPC-H0* numunesine göre sağlayabileceği üstünlüğü tayin etmek için tasarlanmış ve denenmiştir.

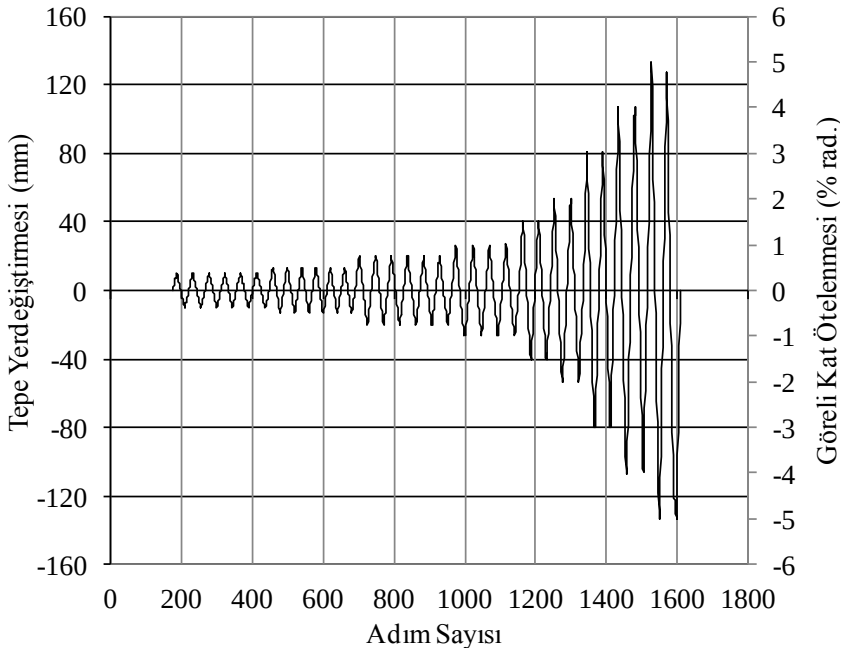
Deney numunesine ait genel görünüş ile panel bölgesi yakın görünüşü Şekil 3.106'da verilmiştir.



Şekil 3.106 : EEPC-H2 numunesinin genel ve detay görünüşü.

Deney, en büyük tepe yerdeğiştirme büyüklüğü 133.60 mm olan 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin sonuna kadar başarı ile uygulanmıştır.

Numuneye etkitilen yatay yerdeğiştirme çevrimleri Şekil 3.107'de gösterilmiştir.



Şekil 3.107 : EEPC-H2 numunesinde yerdeğiştirme adımları.

Deney sırasında, şekildeğiştirme ölçerler için 62 kanaldan, yerdeğiştirme ölçerler için de 16 kanaldan olmak üzere toplam 78 kanaldan okuma alınmıştır. 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin sonuna kadar 32 yerdeğiştirme çevrimi başarı ile uygulanmıştır.

EEPC-H0 numunesi ile benzer şekilde, 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğine kadar numune üzerinde gözle görülür hasar oluşmamıştır. Bu seviyeye erişilene kadar;

0.00375 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde itmede 40.25 kN yatay yük dayanımı, çekmede ise 39.88 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir.

En büyük yerdeğiştirme değeri 13.35 mm olan 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinde, itme durumunda 52.90 kN yatay yük dayanımı, çekme durumunda da 57.60 kN yatay yük dayamımı elde edilmiştir.

20.15 mm'lik en büyük tepe yerdeğiştirmesi değerine sahip 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinde, itmede 74.30 kN, çekmede -75.00 kN yatay yük dayanım değeri meydana gelmiştir.

0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin itme durumunda 84.90 kN, çekme durumunda ise 84.20 kN yatay dayanım elde edilmiştir.

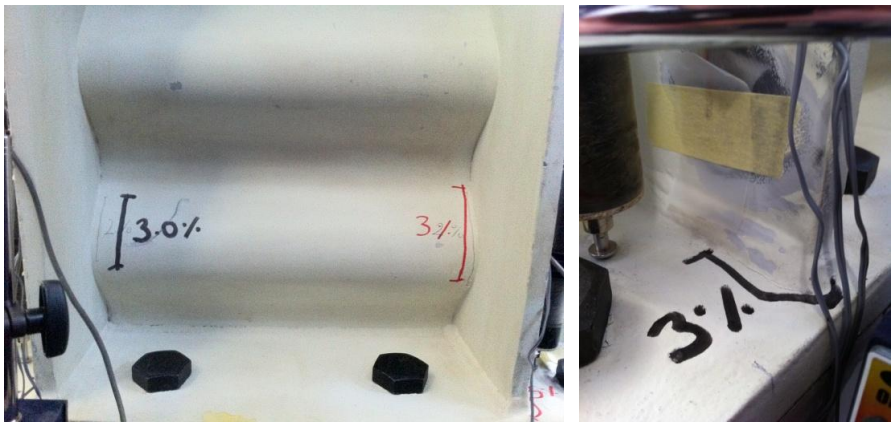
40.10 mm'lik en büyük tepe yerdeğiştirmesi olan 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde itmede 102.33 kN, çekmede ise 101.30 kN yatay yük dayanımı meydana gelmiştir.

Numune üzerinde gözle görülebilen ilk hasar, 53.45 mm tepe yerdeğiştirmesi değerine sahip olan 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinde meydana gelmiştir. Bu seviyede kiriş gövdesi ile başlıklarını bağlayan kaynak dikişlerinde küçük çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Bu çevrimin en büyük itme yerdeğiştirmesinde 115.28 kN yatay yük dayanımı elde edilirken, en büyük çekme yerdeğiştirmesinde 114.10 kN yatay yük dayanım elde edilmiştir. Bu çevrim grubu uygulandıktan sonra numunenin genel görünümü Şekil 3.108'de verilmiştir.



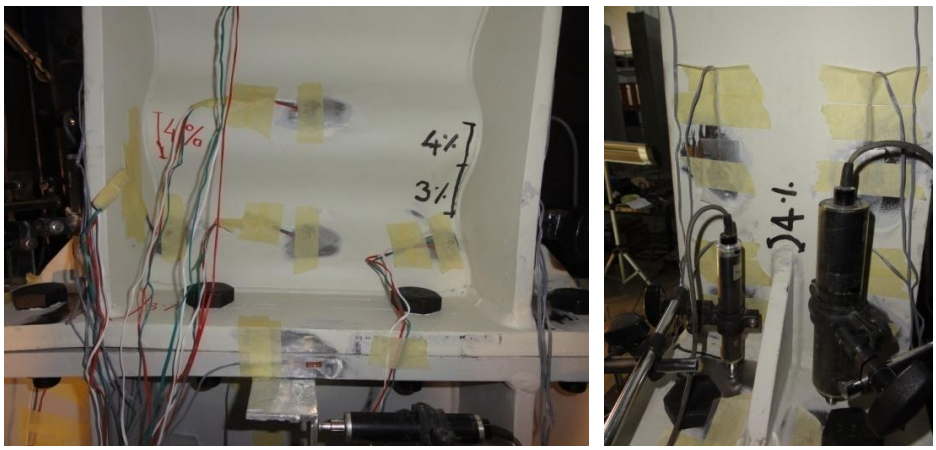
Şekil 3.108 : EEPC-H2 numunesinin 0.02 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğine gelindiğinde, kiriş gövde ile başlıklarını bağlayan kaynak dikişlerinde bir önceki seviyede oluşan küçük çatlaklar büyümeye başlamıştır. Kolonun panel bölgesi dışında kalan bölümünde gövde ile başlıklar arasındaki kaynaklarda da ayrılmalar başlamıştır. Ayrıca kiriş ile alın plakasını birleştiren kaynaklarda çok ince çatlaklar oluşmuştur. 80.50 mm'lik itme yerdeğiştirmesinde 129.20 kN, çekme yerdeğiştirmesinde ise 127.00 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur. Bu yerdeğiştirme çevriminin tamamlanmasının ardından numunede ortaya çıkan hasar durumu Şekil 3.109'da verilmiştir.



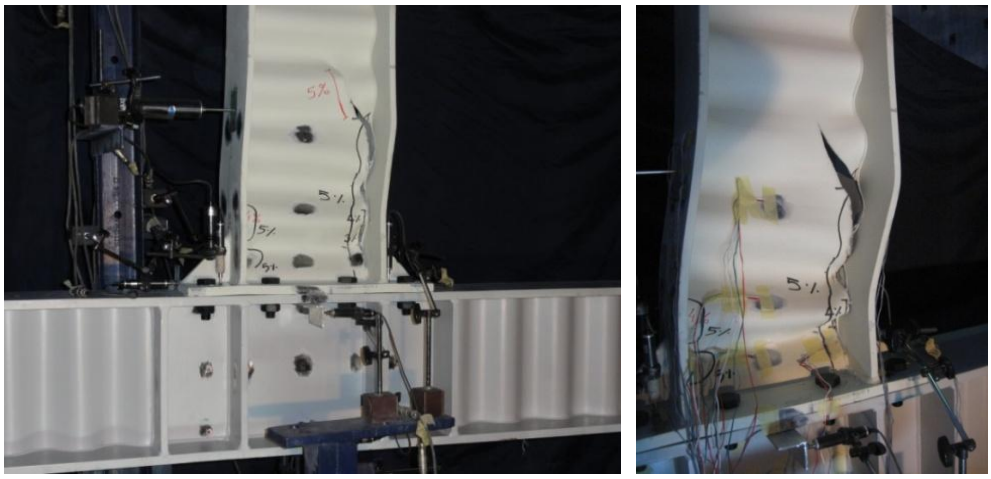
Şekil 3.109 : EEPC-H2 numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

En büyük tepe yerdeğiştirme değeri 106.80 mm olan 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, kiriş ve kolonda başlık ve gövde levhasını birleştiren kaynaklardaki ayrılmalar büyümüş ve ilerlemiştir. Alın plakasını kiriş başlığına birleştiren kaynak dikişlerindeki çatlaklar daha da belirginleşmiştir. Alın plakası ile kiriş başlığı arasında bulunan üçgen berkitme elemanların kiriş başlığı ile birleştiği bölgede kaynak dikişi çatlamıştır. En büyük itme yerdeğiştirmesinde 136.40 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinde ise 106.50 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Çevrimler sonrasında hasar durumu Şekil 3.110'da verilmiştir.



Şekil 3.110 : EEPC-H2 numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

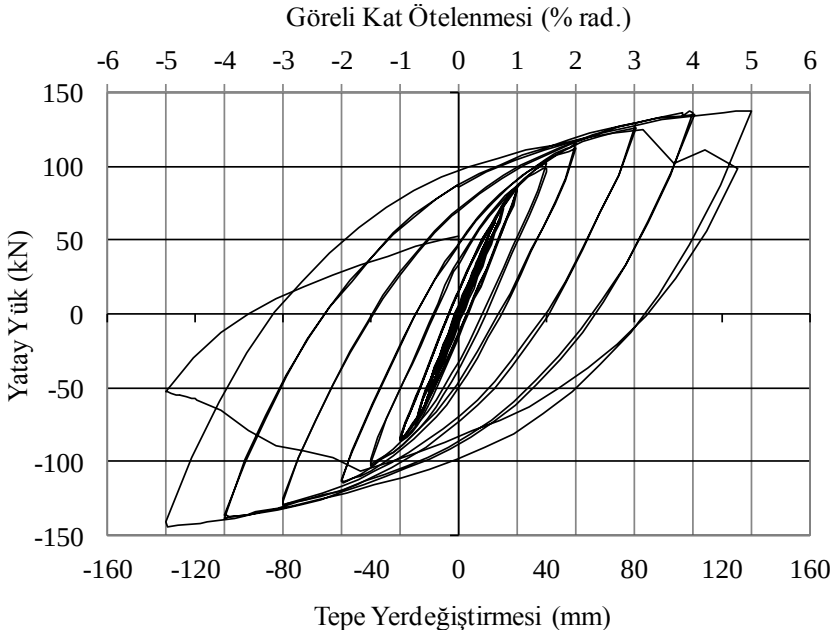
0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde, bir önceki yerdeğiştirme seviyesinde gözlenen kaynak ayrılmalarının daha da büyüdüğü görülmüştür. Kirişte gövde ve başlıkların tamamen ayrıldığı kısımlarda önce sinüs form bozulmuş ardından gövde yırtılmıştır. Numunenin deney sonundaki durumu Şekil 3.111'de gösterilmiştir.



Şekil 3.111 : EEPC-H2 numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

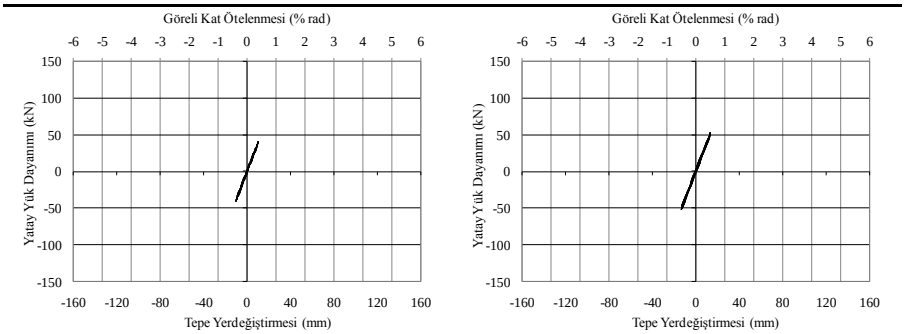
Her göreli kat ötelenmesi eşiğinin itme ve çekme yerdeğiştirmelerinde oluşan yatay yük dayanımları mutlak değer olarak birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Bu yakınlık, gövde ve başlığın ayrılması ile ortadan kalkmıştır.

0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevriminin tamamlanması ile ortaya çıkan yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.112'de gösterilmiştir.

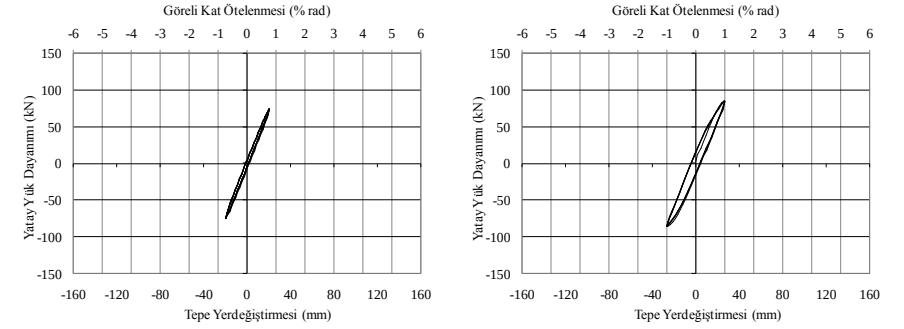


Şekil 3.112 : EEPC-H2 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

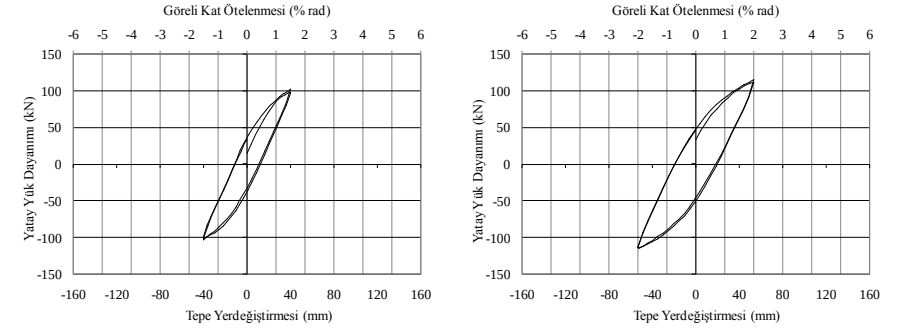
Yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisinin çevrimlerinin ayrıklaştırılmış hali Şekil 3.113 ile verilmiştir. Buna göre inelastik davranışın 0.01 rad. - 0.015 rad. düzeyinde başladığı açıkça görülmektedir.



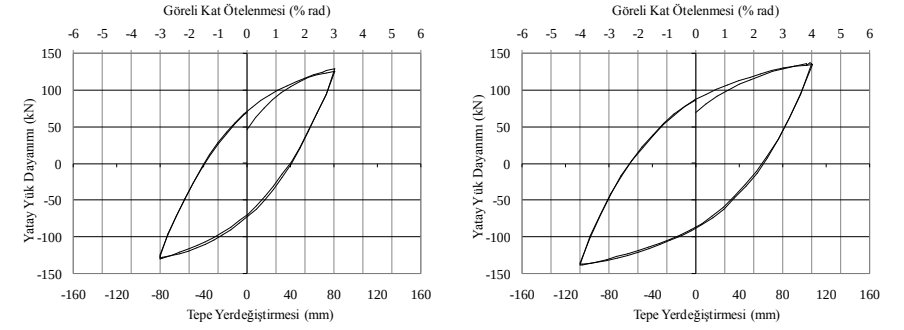
0.00375 rad. 0.00500 rad.



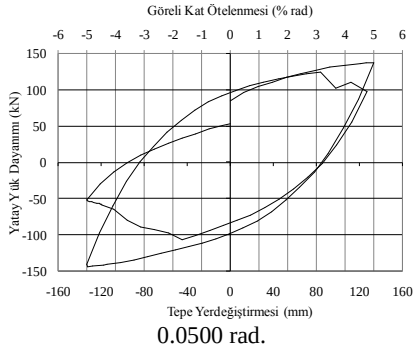
0.00750 rad. 0.0100 rad.



0.0150 rad. 0.0200 rad.



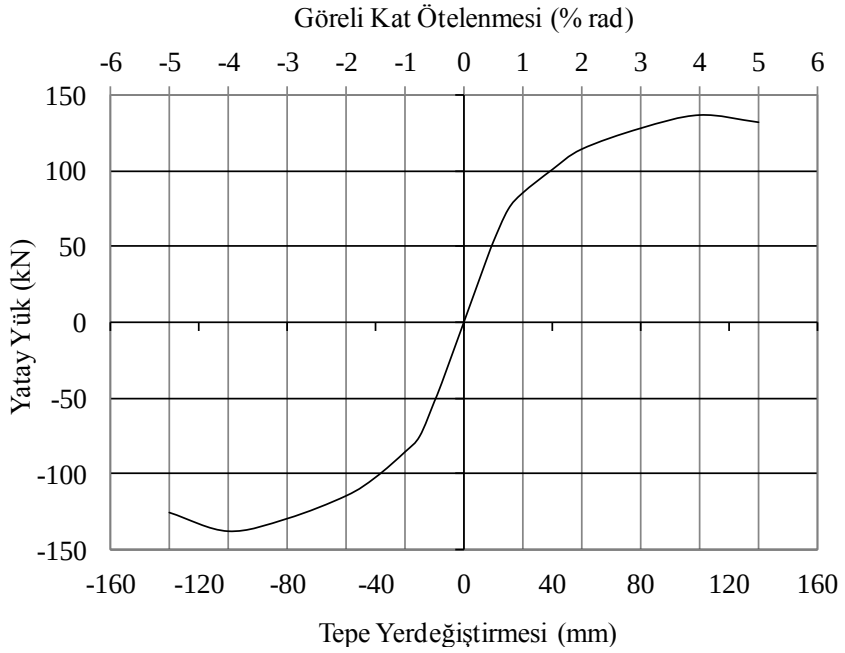
0.0300 rad. 0.0400 rad.



0.0500 rad.

Şekil 3.113 : EEPC-H2 numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi..

Yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi çevrimlerinin zarf eğrisi Şekil 3.114'te verilmiştir.

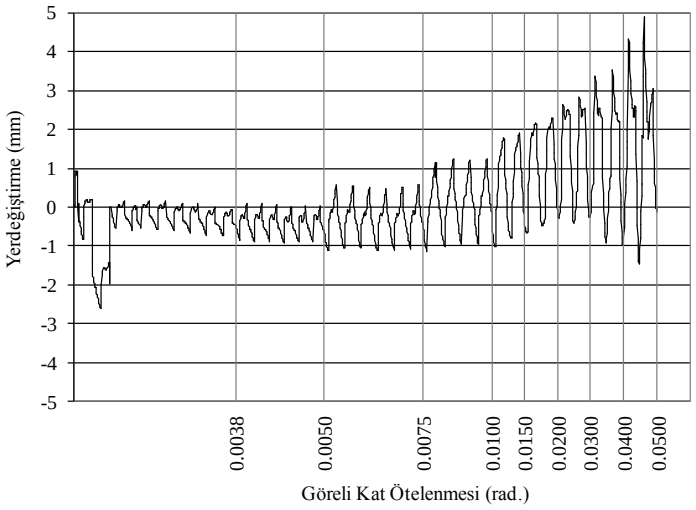


Şekil 3.114 : EEPC-H2 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi.

Yatay yük dayanımı, kaynak dikişlerinde oluşan çatlaklar ve ayrılmalara rağmen *EEPC-H0* numunesi ile benzer şekilde 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimine kadar artmıştır. Bu seviyenin son çevriminde çekme yönünde kiriş başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişindeki ani ayrılma ve gövde yırtılması nedeni ile yatay yük dayanımında ani bir düşüş meydana gelmiştir.

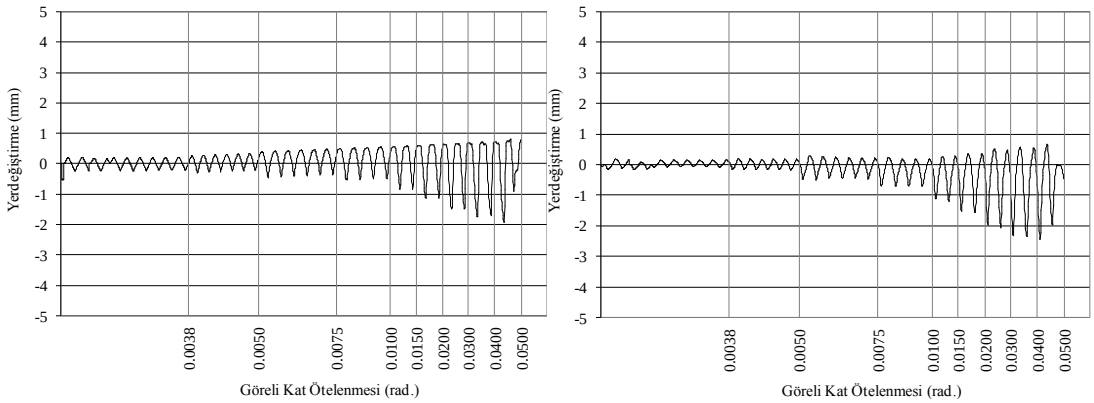
Düzlem gövdenin panel bölgesi dışına taşırıldığı bu numunede taşıma kapasinde bir miktar artış sağlanmıştır.

Yerdeğiştirme protokolünün uygulanması sırasında kirişin düzlem dışı hareketini ve kolon mesnet bölgerinde ortaya çıkan düşey hareketleri izlemek amacıyla yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen veriler Şekil 3.115 ve Şekil 3.116'da verilmiştir.



Şekil 3.115 : EEPC-H2 numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Kaynak dikişlerinin çatlamasıyla kiriş gövde ve başlıklarının ayrılmaya başladığı eşik olan 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde kaydedilen en büyük düzlem dışı hareket 2.65 mm olmuştur. Sisteme etkitilen en büyük yatay yerdeğiştirmenin 80.50 mm olduğu bu durumda düzlem dışı yerdeğiştirmenin düzlem içi yerdeğiştirmeye oranı 1/30 olmuştur.

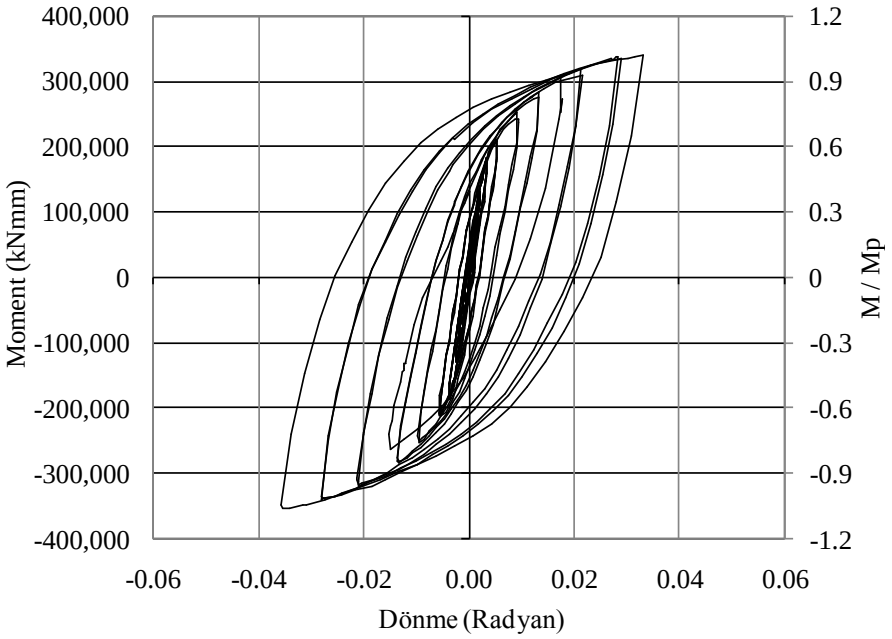


a. Sol mesnet *b. Sağ mesnet*

Şekil 3.116 : EEPC-H2 numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

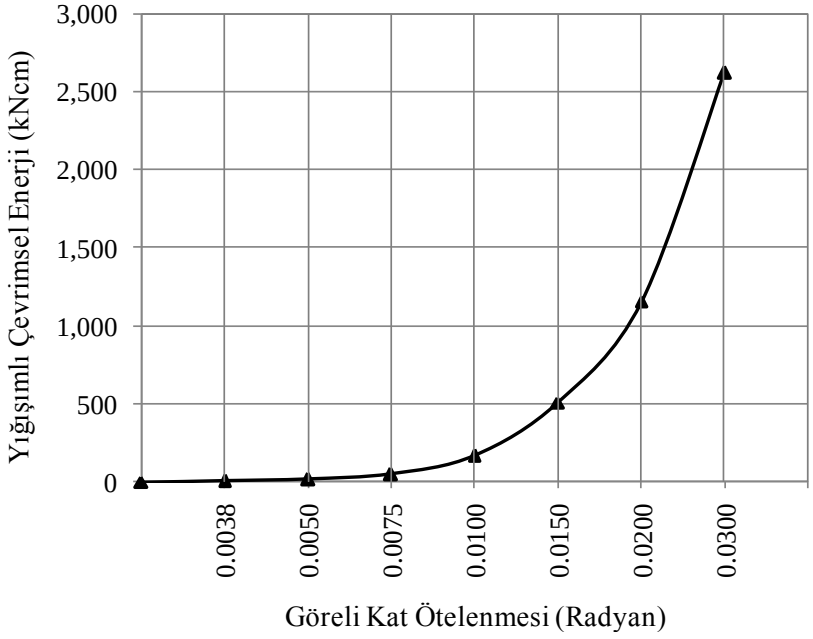
Bu yerdeğiştirme eşiğinde; sol mesnette meydana gelen en büyük düşey yerdeğiştirme 1.39 mm olurken, sağ mesnette meydana gelen en büyük düşey yerdeğiştirme de 2.01 mm olarak kaydedilmiştir. Bu durumda sol mesnetin düşey hareketinin yatay yerdeğiştirmeye oranı 1/58, sağ mesnetin düşey hareketinin yatay yerdeğiştirmeye oranı da 1/40 olmuştur.

Alın plakasına temas eden düşey konumlu yerdeğiştirme ölçerlerin kaydetmiş olduğu yerdeğiştirmelerden faydalanılarak elde edilen moment - dönme ilişkisini gösteren eğri Şekil 3.117'de verilmiştir. Elde edilen en büyük kiriş taban momentinin plastik moment kapasitesine oranı 0.95 olmuştur.



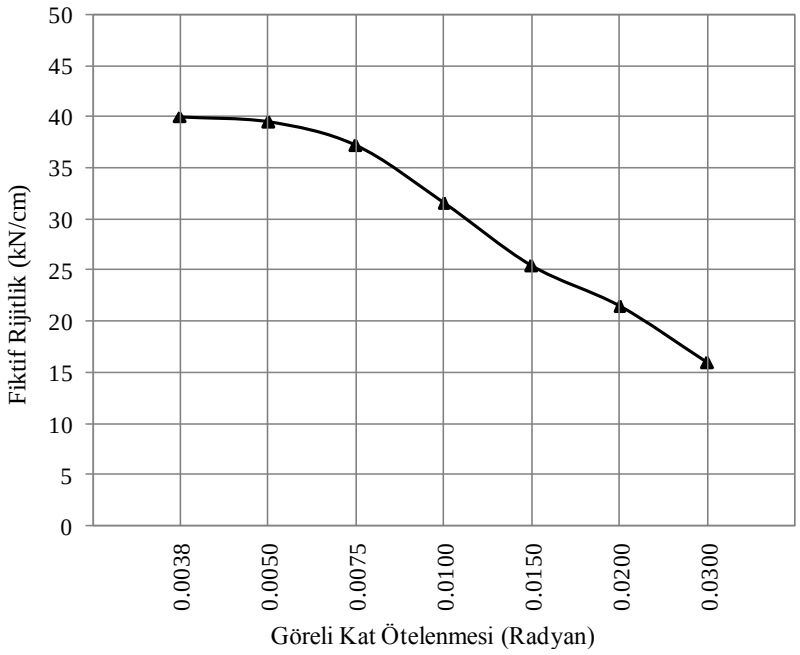
Şekil 3.117 : EEPC-H2 numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi.

Tepe yerdeğiştirmesi - yatay yük dayanımı ilişkisinden hareketle üretilen göreli kat ötelenmesi - yığışımlı çevrimsel enerji grafiği Şekil 3.118'de verilmiştir.



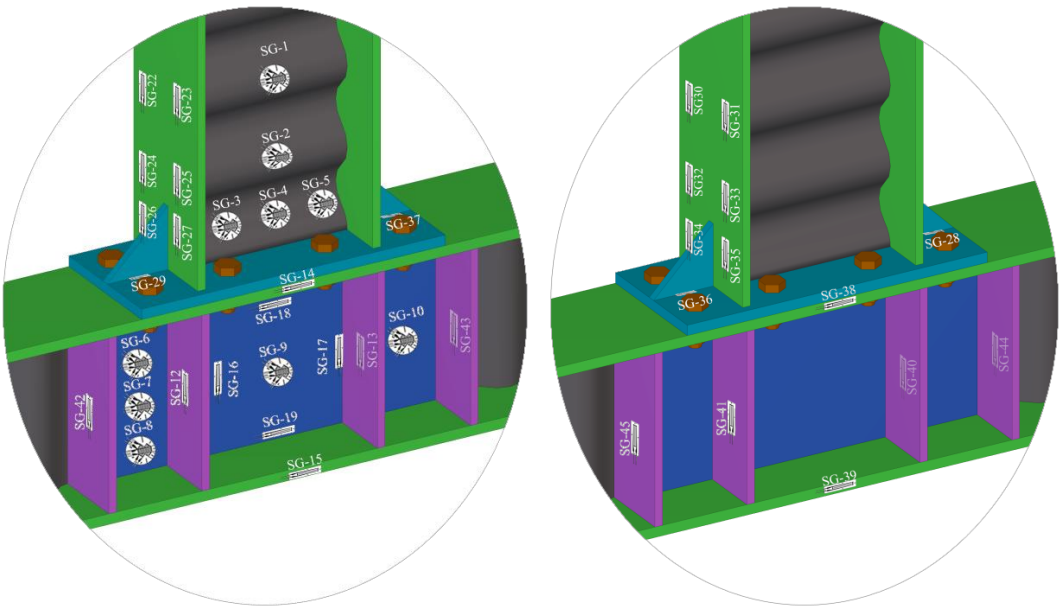
Şekil 3.118 : EEPC-H2 numunesinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi.

Tepe yerdeğiştirmesi - yatay yük dayanımı ilişkisi üzerinden hesaplanan göreli kat ötelenmesi - fiktif rijitlik ilişkisi Şekil 3.119'da verilmiştir. İlk çevrimde 40 kN/cm olan fiktif yatay rijitliğin, 0.03 rad. seviyesi sonunda 11 kN/cm'ye kadar düştüğü görülmektedir.



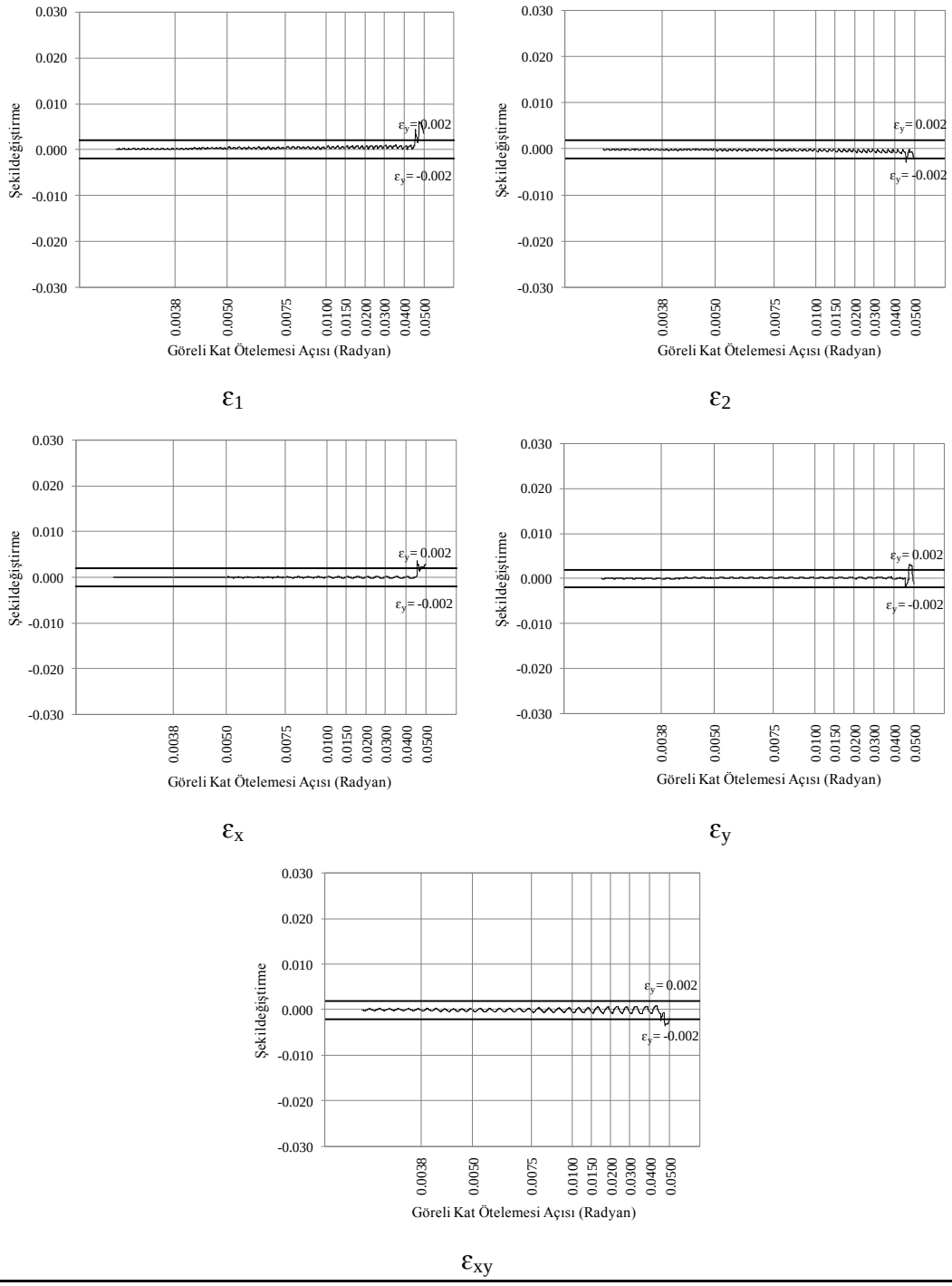
Şekil 3.119 : EEPC-H2 numunesinde rijitlik değişimi.

Numunede kritik olduğu düşünülen bölgelere yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlerin konumları Şekil 3.120'de gösterilmiştir.



Şekil 3.120 : EEPC-H2 numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler.

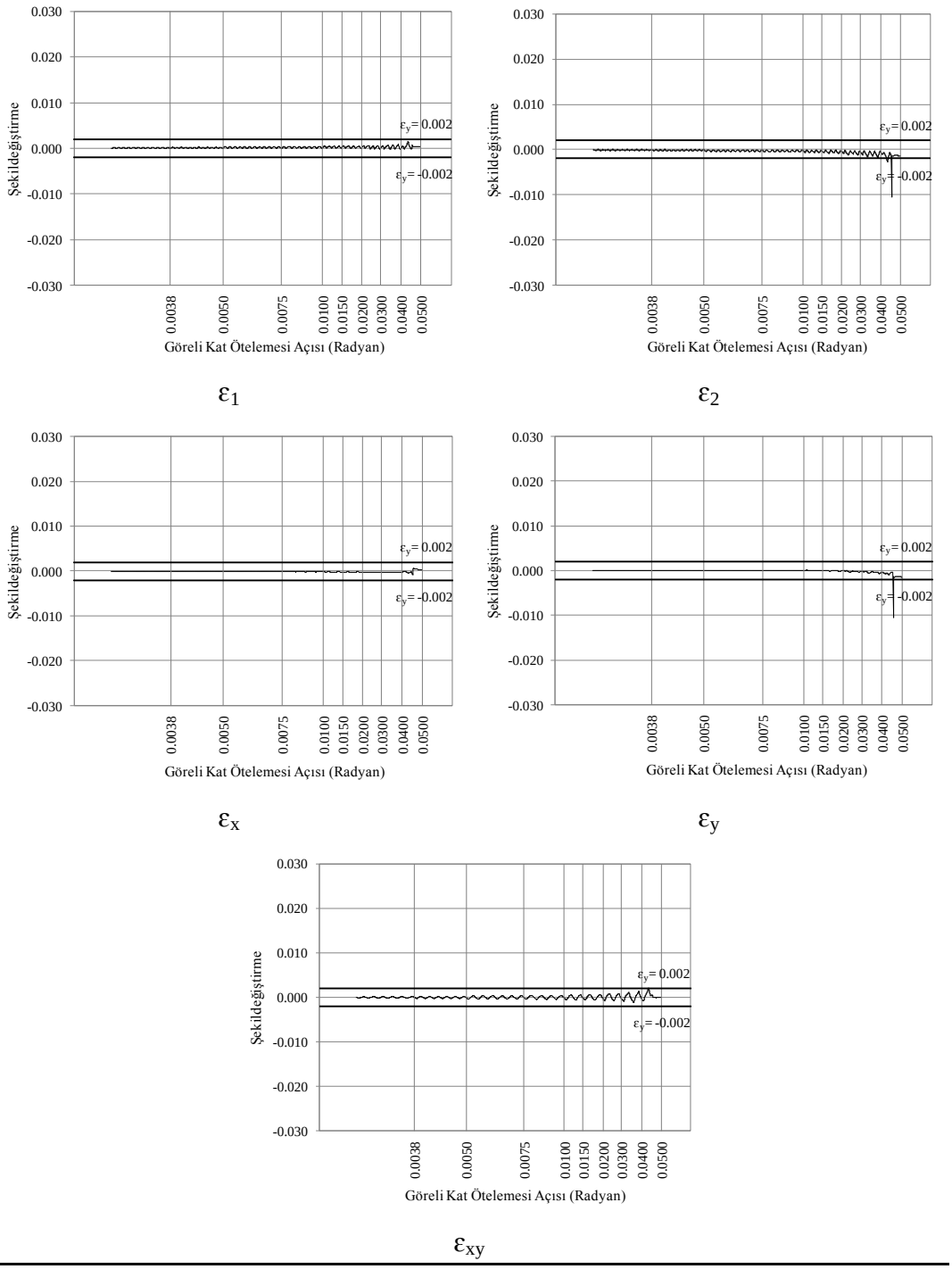
Kiriş gövdesine yapıştırılan SG-1 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen ε_1, ε_2 asal şekildeğiştirmeleri ve ε_x, ε_y ve ε_{xy} şekildeğiştirmelerine ait grafikler Şekil 3.121'de gösterilmiştir.



Şekil 3.121 : EEPC-H2 / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-1 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri esnasında akma gerçekleşmiştir.

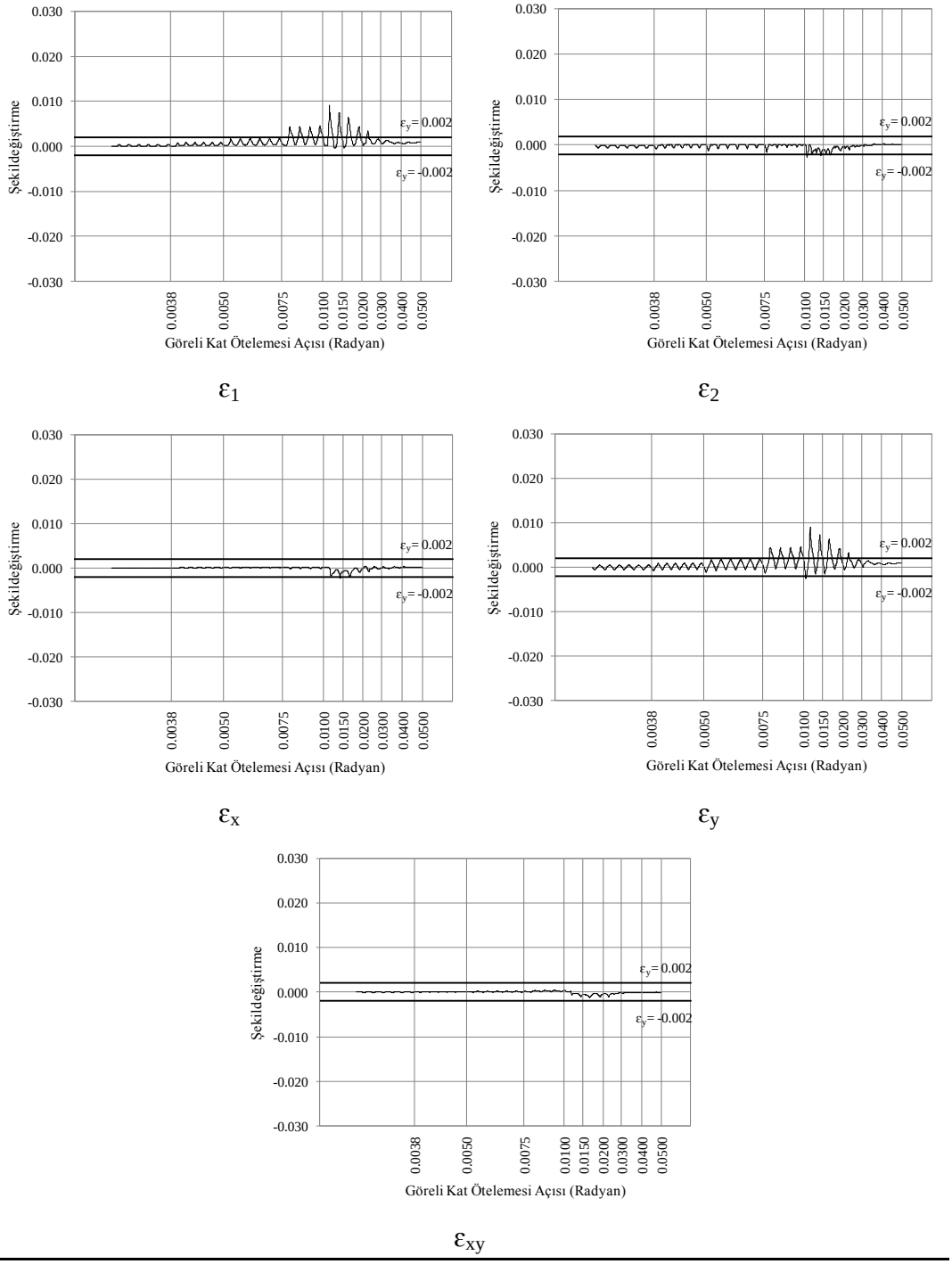
Yine kiriş gövdesinde bulunan SG-2 şekildeğiştirme ölçerinden üretilen büyüklükler Şekil 3.122'de verilmiştir.



Şekil 3.122 : EEPC-H2 / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-2'nin yapıştırıldığı bölgede de SG-1 şekildeğiştirme ölçeri ile benzer şekilde kiriş gövdesi yırtılmadan hemen önce akma meydana gelmiştir.

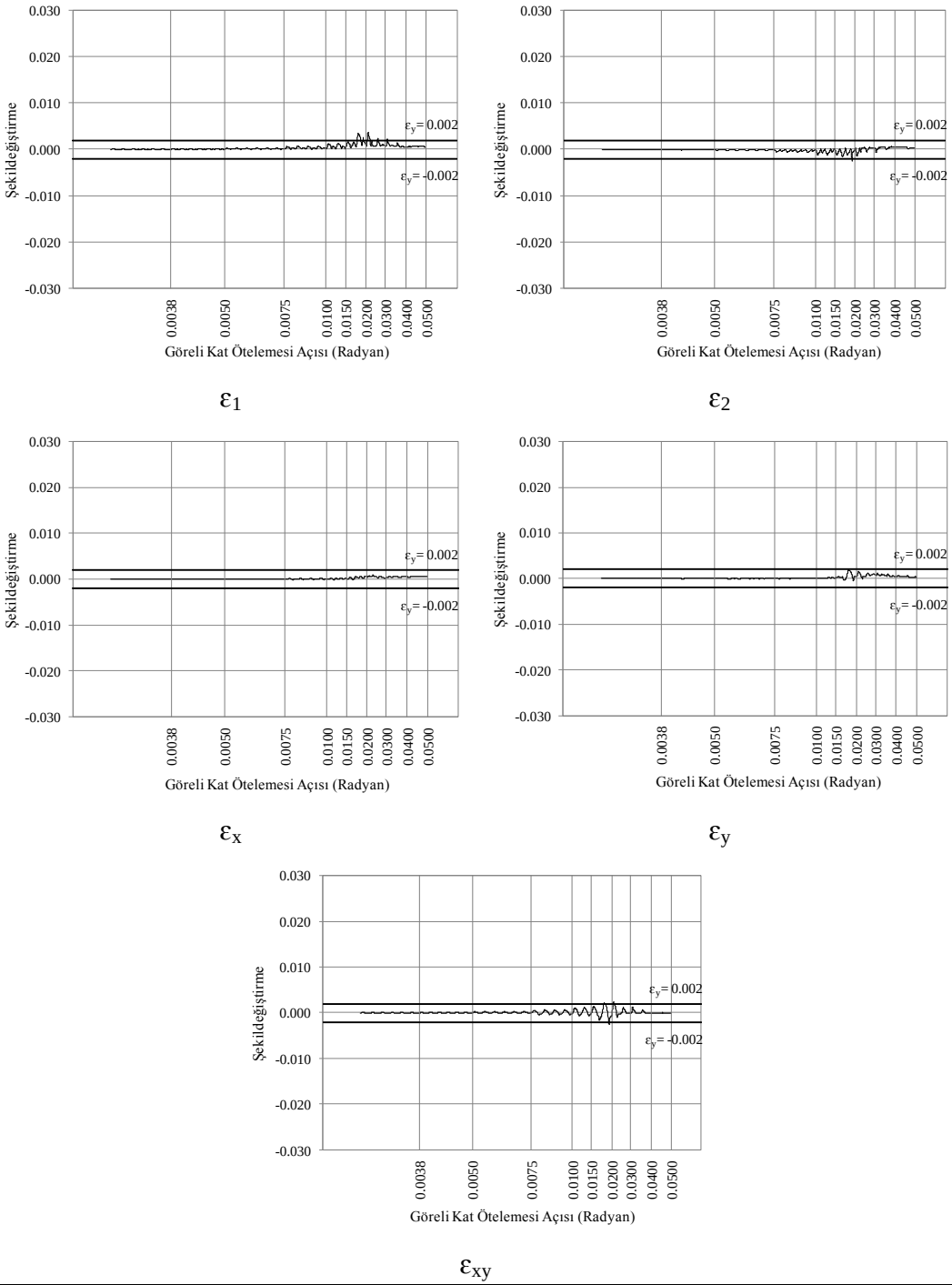
Kiriş gövdesinde, panel bölgesine en yakın konumda yer alan SG-3 şekildeğiştirme ölçerinin vermiş olduğu veriler ile üretilen grafikler Şekil 3.123'te verilmiştir.



Şekil 3.123 : EEPC-H2 / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Kiriş gövdesinin sol başlığa yakın tarafında yer alan bu şekildeğiştirme ölçerden alınan sonuçlara göre ilk plastikleşme 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamıştır.

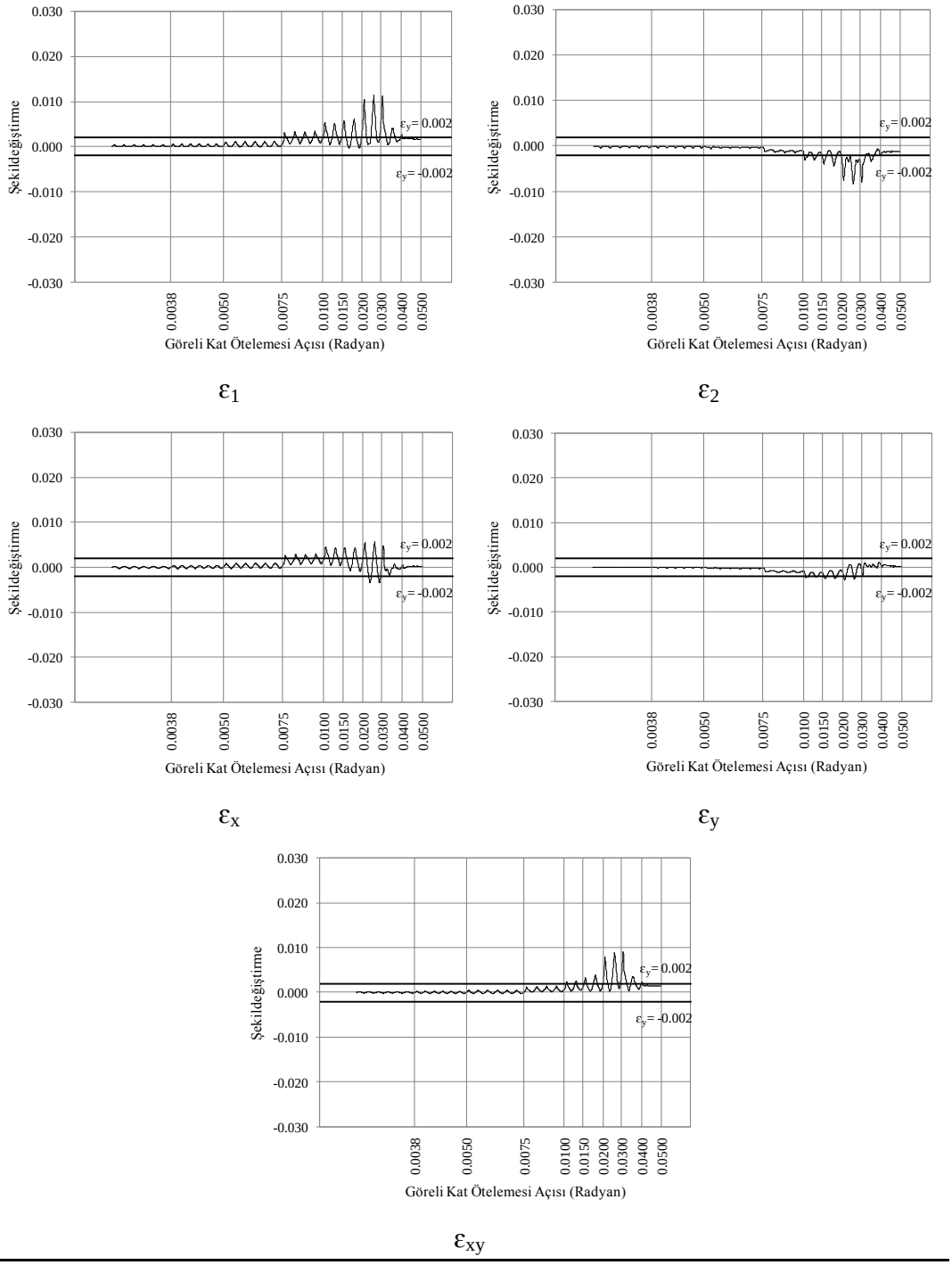
Kiriş gövdesine yapıştırılan SG-3 şekildeğiştirme ölçeri ile aynı yatay kesitte yer alan SG-4 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.124'te gösterilmiştir.



Şekil 3.124 : EEPC-H2 / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki plastikleşme, *EEPC-H0* numunesinde olduğu gibi 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde başlamıştır.

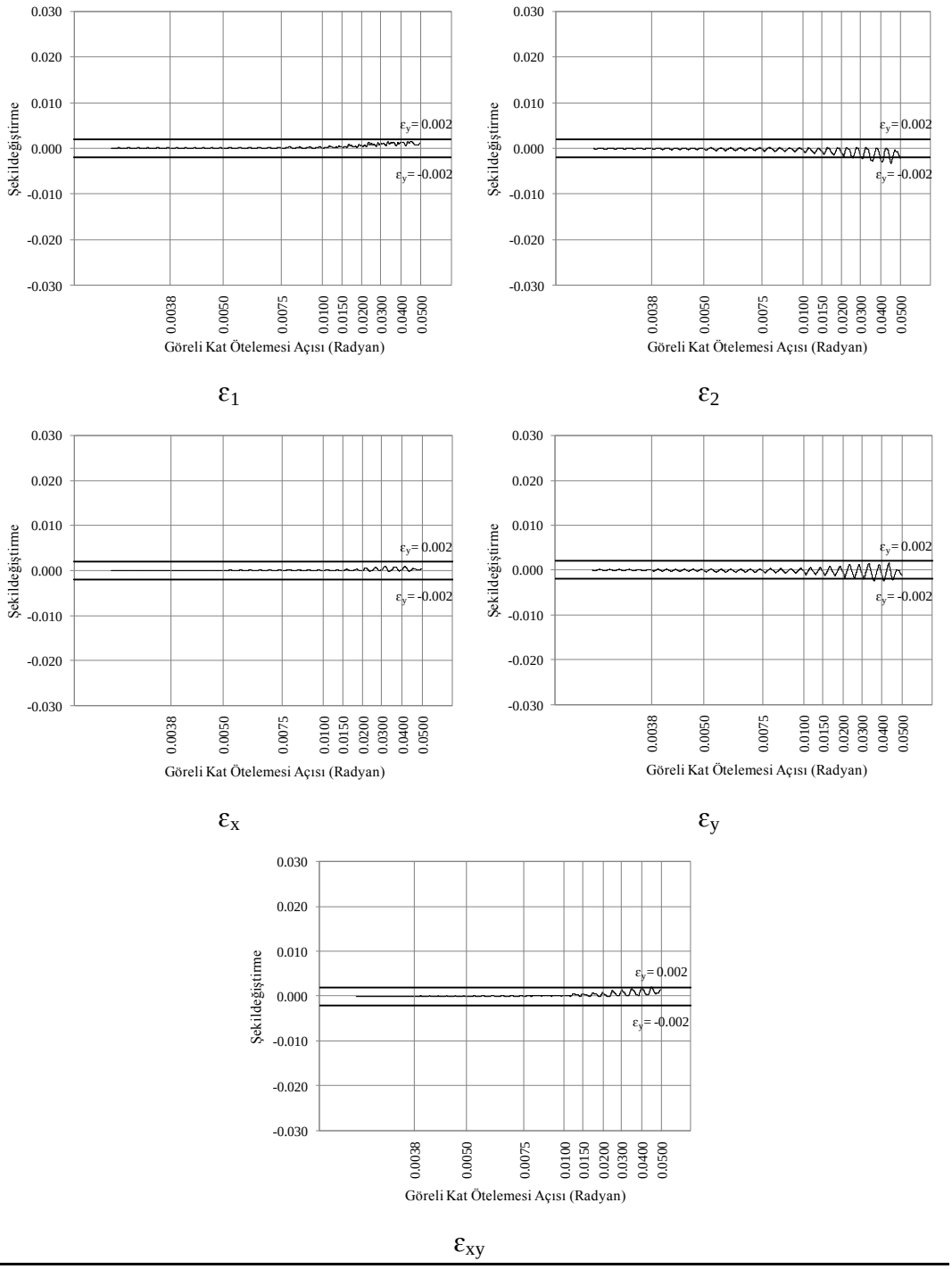
Kiriş gövdesinde panel bölgesine en yakın kesitte yer alan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-5 için oluşturulan grafikler Şekil 3.125'te verilmiştir.



Şekil 3.125 : EEPC-H2 / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-5'in bulunduğu bölgedeki ilk plastikleşme, SG-3 şekildeğiştirme ölçerinde olduğu gibi 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde oluşmaya başlamıştır.

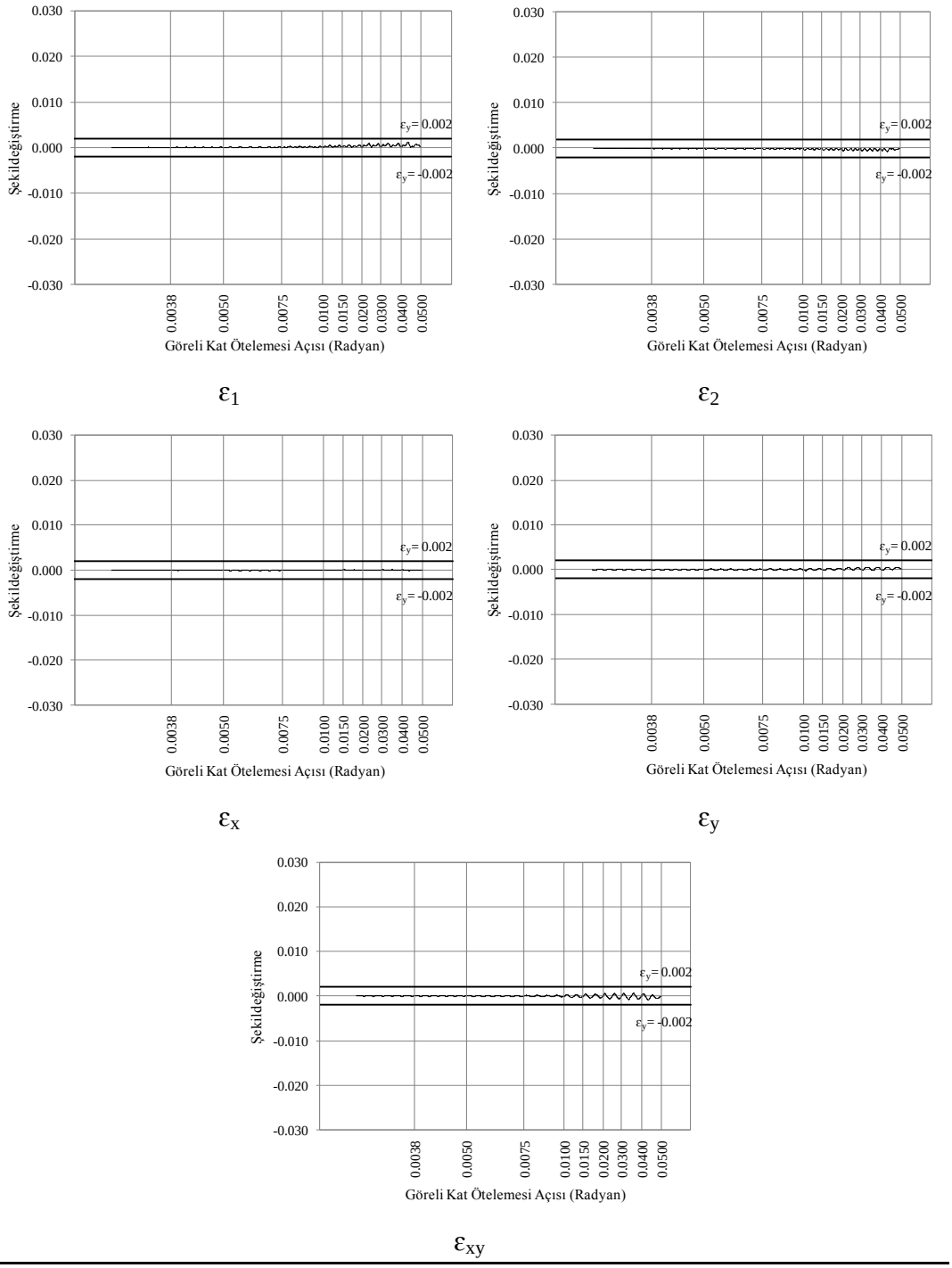
Kolon gövdesinin düzlem sac levha kısmı üzerinde yer alan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-6'dan alınan verilerle hazırlanan grafikler Şekil 3.126'da verilmiştir.



Şekil 3.126 : EEPC-H2 / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-6'nın bulunduğu kesitte 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin çevrimleri sırasında ilk plastikleşme meydana gelmiştir.

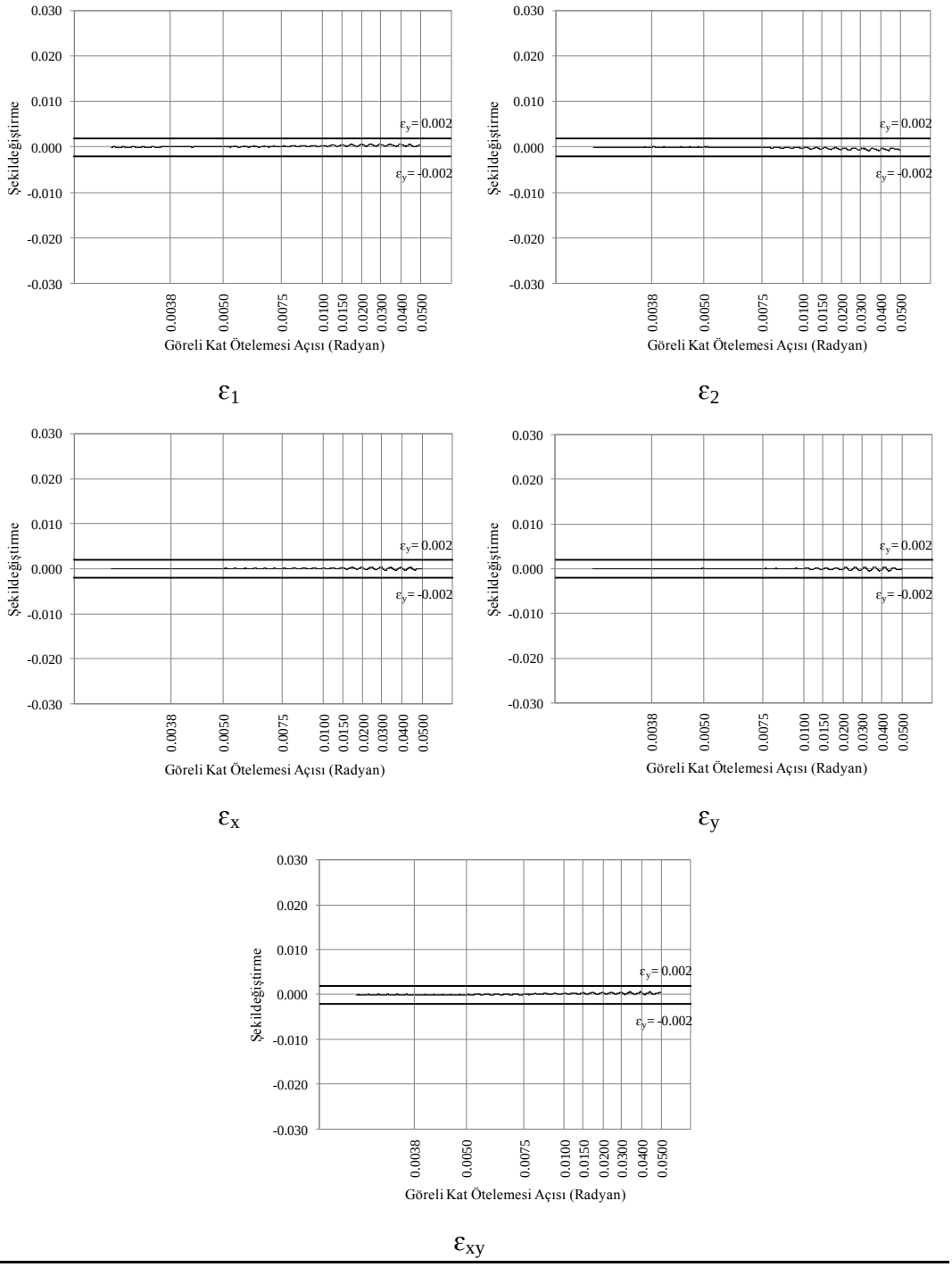
SG-6 şekildeğiştirme ölçeri ile aynı düşey kesitte yer alan SG-7 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen verilerle üretilen grafikler Şekil 3.127'de verilmiştir.



Şekil 3.127 : EEPC-H2 / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Kesitin ağırlık merkezi civarında yer alan bu bölgede, *EEPC-H0* numunesine benzer şekilde, akma sınır değerine ulaşılamamıştır.

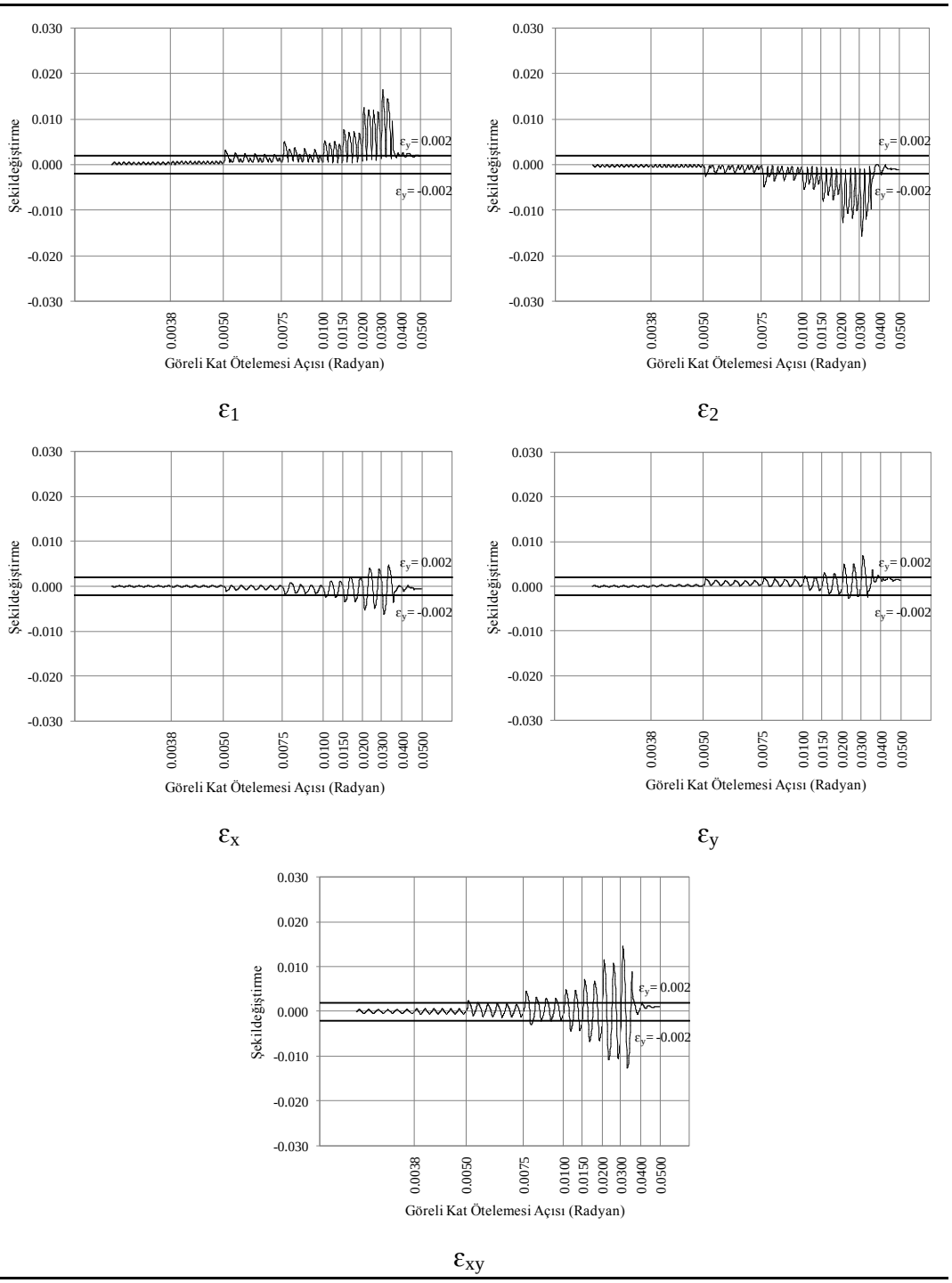
Kolon gövdesi üzerine yapıştırılan ve SG-6 ile SG-7 şekildeğiştirme ölçerleri ile aynı düşey kesitte bulunan SG-8 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen veriler ile oluşturulan grafikler Şekil 3.128'de gösterilmiştir.



Şekil 3.128 : EEPC-H2 / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgede de deney sonuna kadar plastikleşme meydana gelmemiştir.

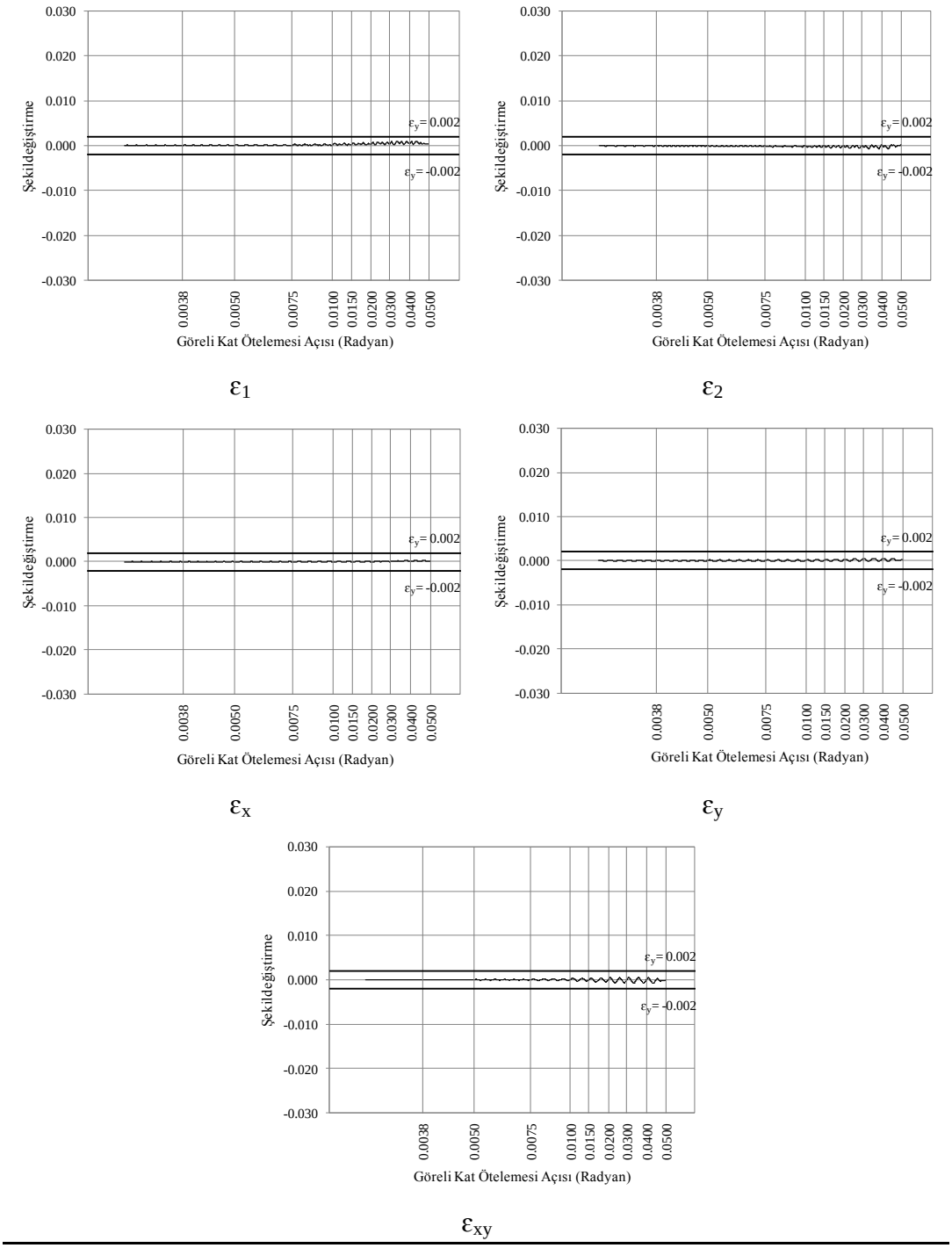
Panel bölgesinin merkezine yapıştırılan SG-9 isimli üç eksenli şekildeğiştirme ölçerden alınan veriler ile oluşturulan grafikler Şekil 3.129'da verilmiştir.



Şekil 3.129 : EEPC-H2 / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-9 şekildeğiştirme ölçerinin yapıştırıldığı bölgede akma, 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde meydana gelmiştir.

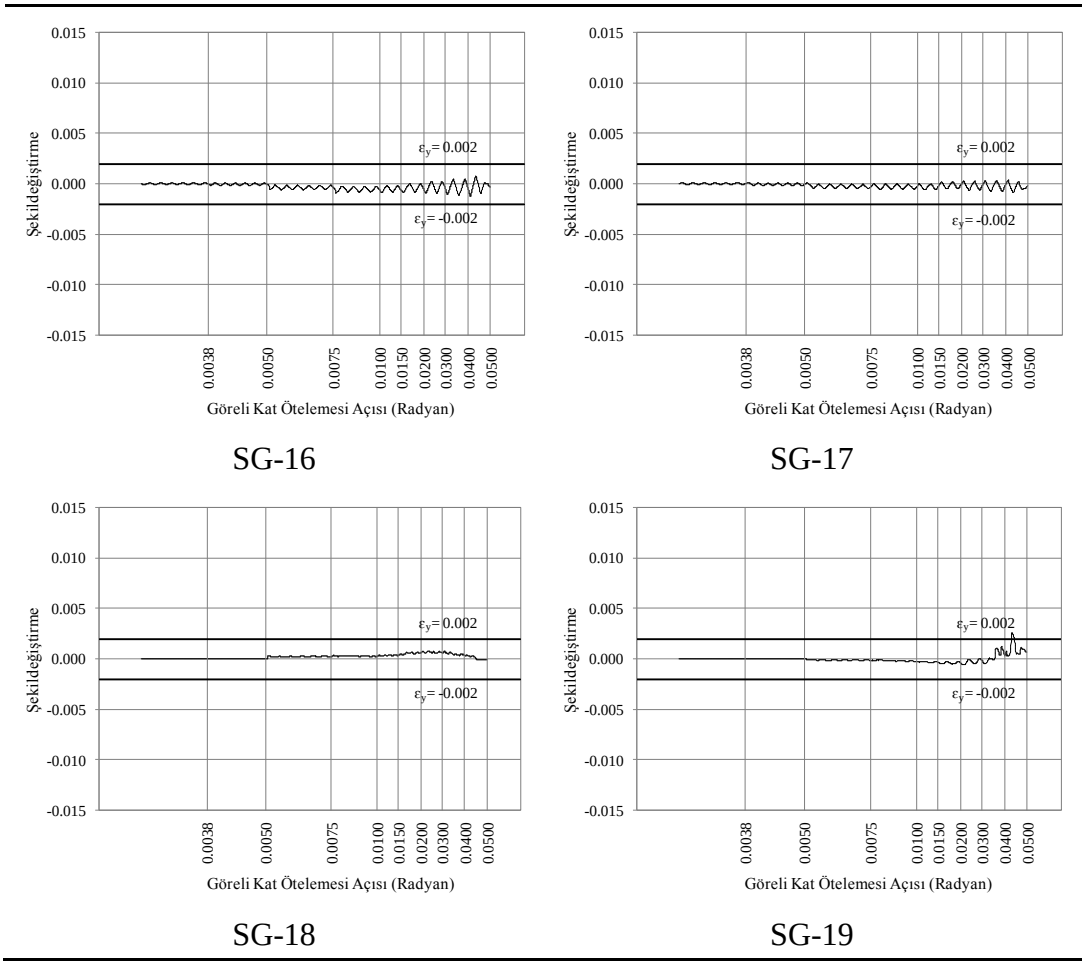
Kolon gövdesinin düz sac levhadan yapılmış bölümünde yer alan SG-10 rozet tip şekildeğiştirme ölçerinden alınan verilerle oluşturulan grafikler Şekil 3.130'da gösterilmiştir.



Şekil 3.130 : EEPC-H2 / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-10 şekildeğiştirme ölçerinin yapıştırıldığı kesitte, simetriği olan SG-7 şekildeğiştirme ölçerinde olduğu gibi deney sonuna kadar akma meydana gelmemiştir.

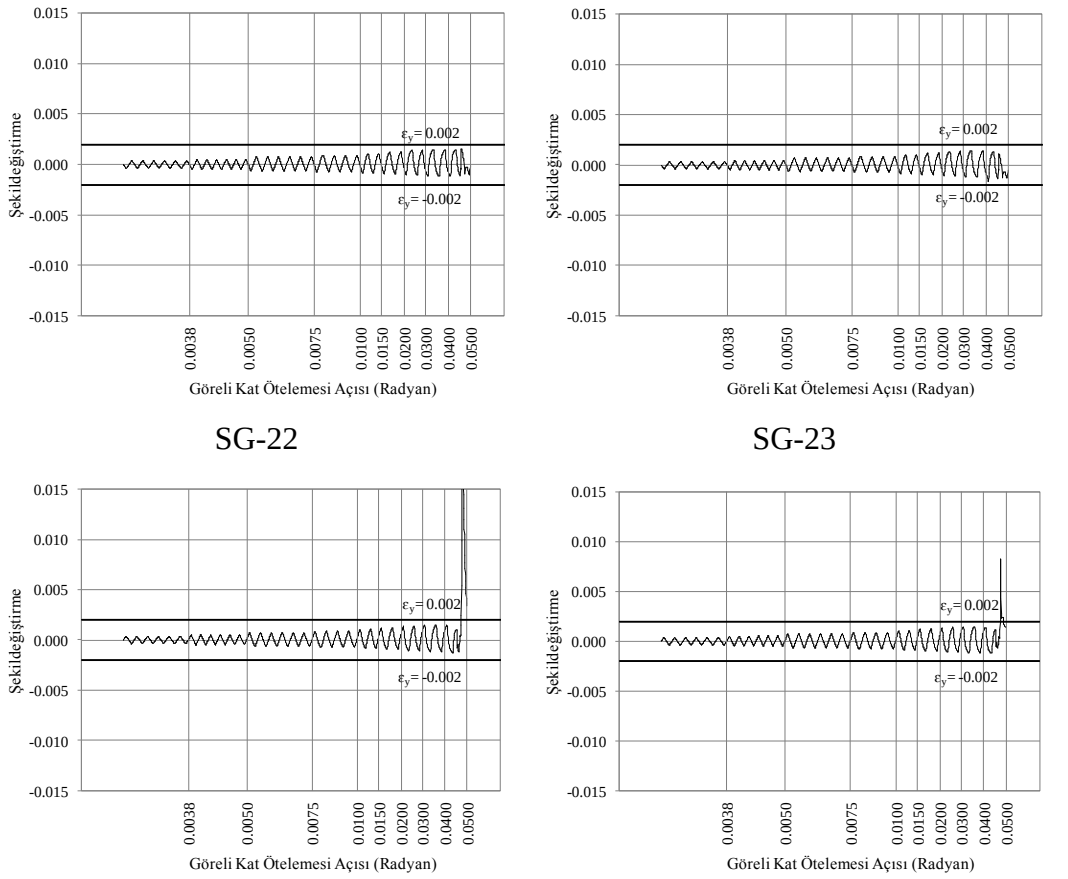
Kolonun panel bölgesi içinde kalan düzlem sac gövde kısmına yapıştırılan tek eksenli SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.131'de gösterilmiştir.



Şekil 3.131 : EEPC-H2 / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Akma sınır değerine SG-16, SG-17 ve SG-18 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu kesitlerde ulaşılamazken, SG-19 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde erişilmiştir.

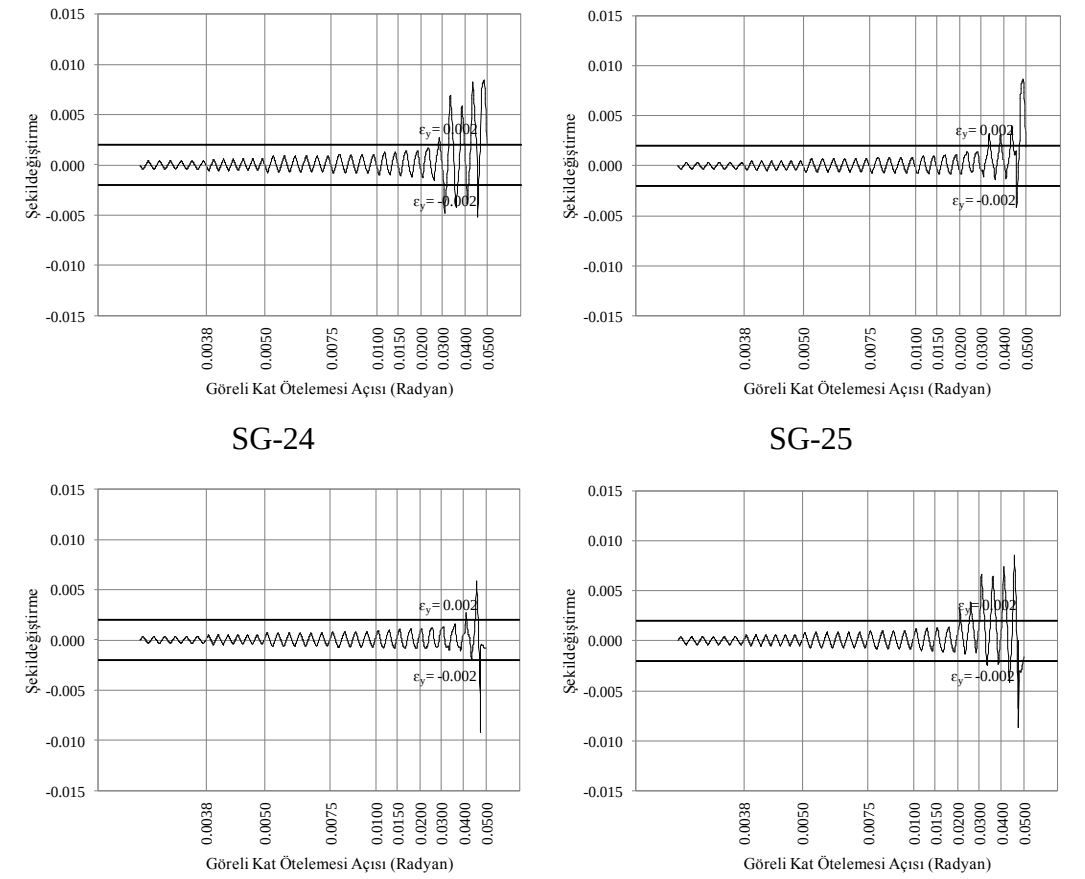
Kiriş başlıklarına yapıştırılan SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 numaralı şekildeğiştirme ölçerlerden alınan sonuçlar Şekil 3.132'de gösterilmiştir.



Şekil 3.132 : EEPC-H2 / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Kiriş başlığında yer alan SG-22 ve SG-23 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu kesitte plastikleşme olmamış, sağ başlık üzerindeki SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme ölçerlerinin olduğu kesitte gövde yırtılmasından hemen sonra plastikleşme meydana gelmiştir.

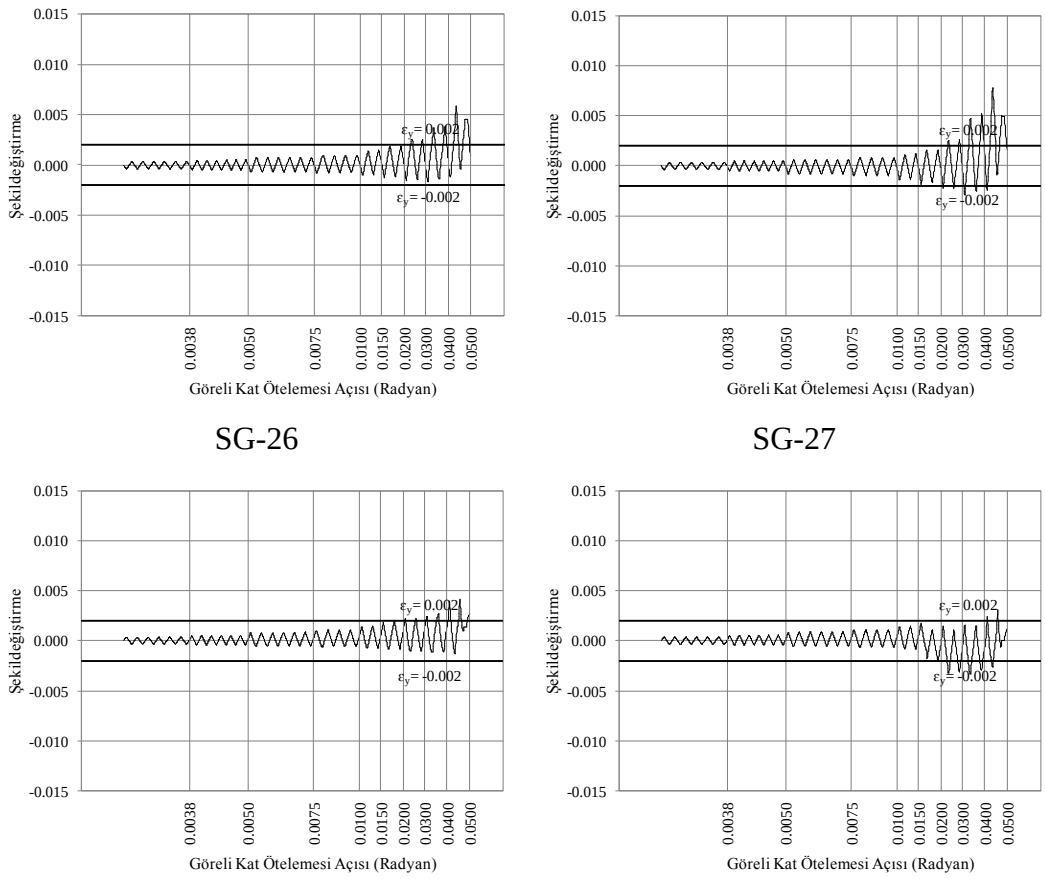
Alın plakasından yarı kiriş kesit yüksekliği kadar mesafede bulunan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33'ten alınan sonuçlar Şekil 3.133'te verilmiştir.



Şekil 3.133 : EEPC-H2 / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Plastikleşmeler, SG-24 ve SG-25 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu kesitlerde 0.03 rad., SG-32'nin bulunduğu konumda 0.05 rad., SG-33'ün bulunduğu yerde ise 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde başlamıştır.

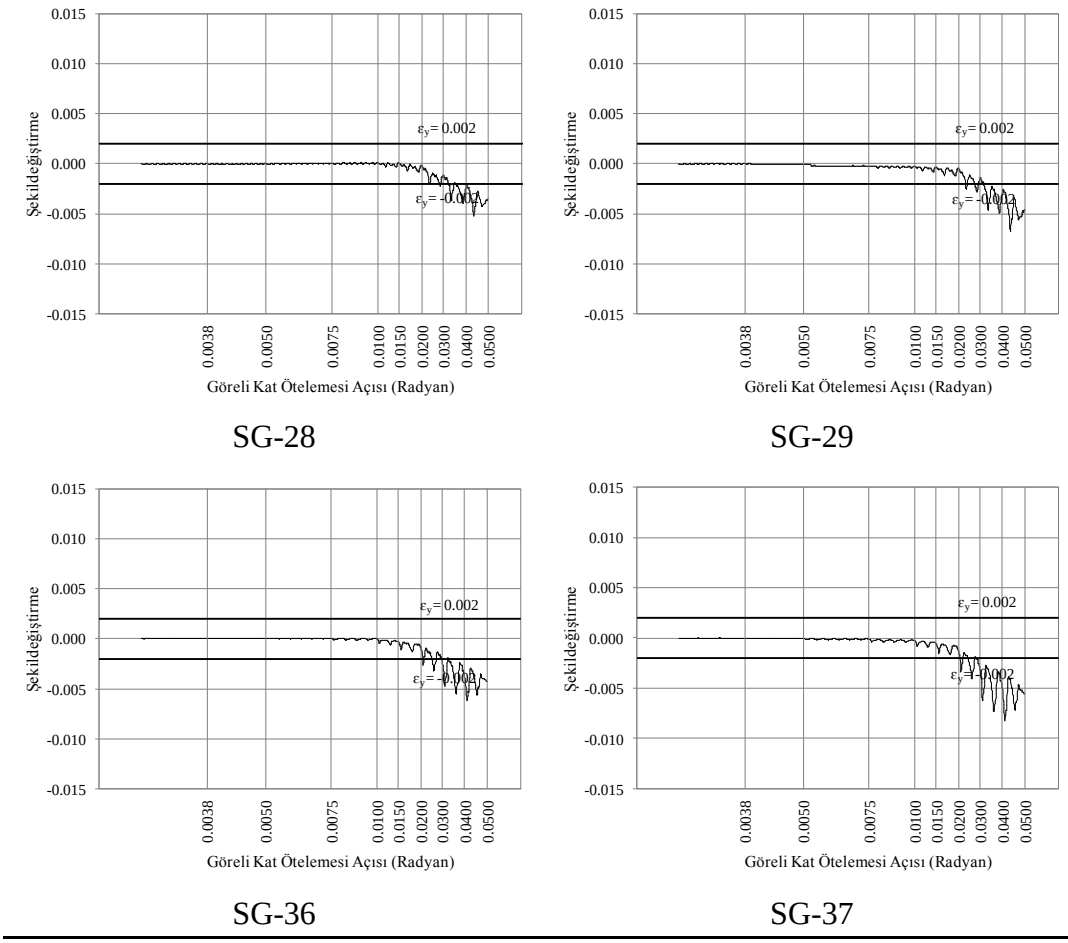
Panel bölgesine en yakın konumda yer alan kiriş başlık levhalarına yapıştırılmış şekildeğiştirme ölçerlerden SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35'ten elde edilen sonuçlar Şekil 3.134'te verilmiştir.



Şekil 3.134 : EEPC-H2 / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme ölçerlerinin yer aldığı ve alın plakasına en yakın olan bu kesitte tüm şekildeğiştirme ölçerler 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde akmaya ulaşmıştır.

Alın plakası üzerinde bulunan ve bulonlar ile üçgen berkitme levhaları arasına yerleştirilen SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kayıtlardan elde edilen sonuçlar Şekil 3.135'te verilmiştir.



Şekil 3.135 : EEPC-H2 / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Alın plakası üzerinde bulunan tüm şekildeğiştirme ölçerlerin 0.03 etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde plastik bölgeye girdikleri tespit edilmiştir.

Süreklilik plakaları üzerinde bulunan SG-12, SG-13, SG-40, SG-41, SG-42, SG-43, SG-44 ve SG-45 şekildeğiştirme ölçerleri ile kolon başlıklarının panel bölgesini sınırlayan kısımlarında yer alan SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri EK-A'da verilmiştir.

3.5.5 EEPC-SDS numunesi deneyi

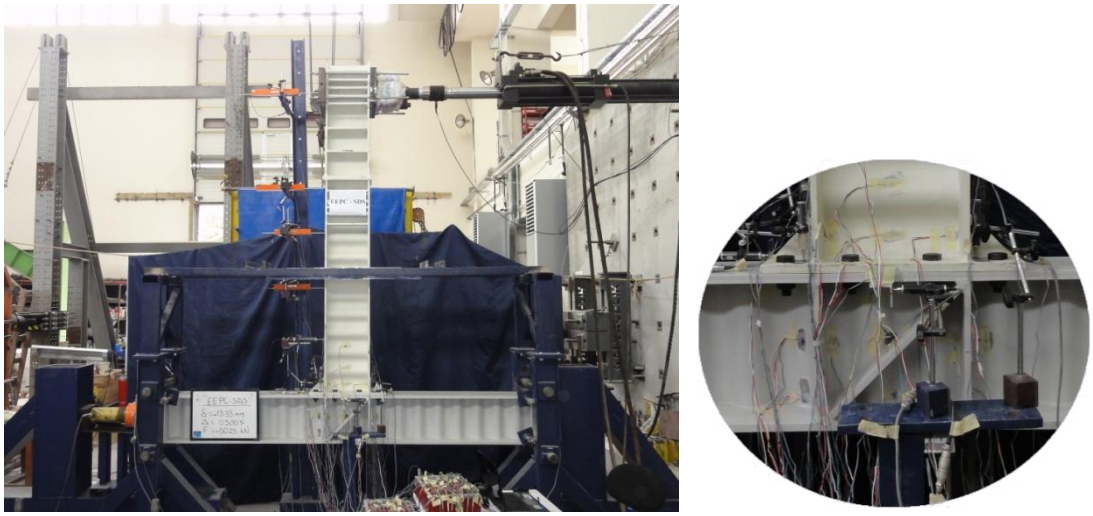
Bu numunede, *EEPC-HS* ve *EEPC-B* numunelerinde de olduğu gibi, panel bölgesi de dahil olmak üzere kolon gövdesinin tamamı 3 mm kalınlıklı sinüzoidal formdaki levhadan oluşturulmuştur. *EEPC-HS* numunesi ile benzer şekilde kiriş başlıklarının hizasında, kolon başlıkları arasında devam eden 4 adet süreklilik plakası bulunmaktadır. İlave olarak süreklilik plakaları arasında bir tanesi ön tarafta, bir

tanesi arka tarafta olmak üzere iki adet çapraz levha eleman kullanılmıştır. Çapraz olarak yerleştirilen elemanların et kalınlığı t=15 mm'dir.

EEPC-SDS numunesi, uygulamayı kolaylaştırmak ve üretimdeki otomasyonu sınırlandırmadan düğüm noktası oluşturmak üzere önerilen birinci detaydır.

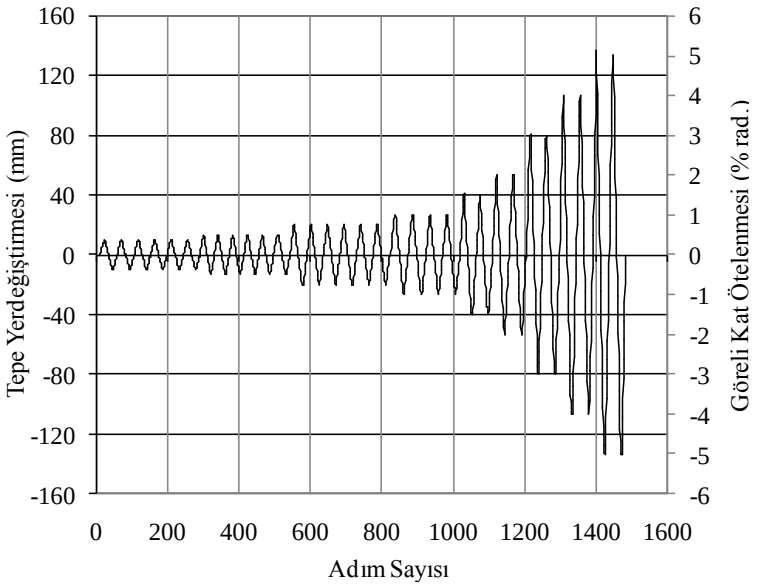
Kiriş özellikleri, daha önceki numuneler ile aynıdır.

Numunenin deney düzeneğine yerleştirilmiş durumu ve panel bölgesinin yakın görünüşü Şekil 3.136'da verilmiştir.



Şekil 3.136 : EEPC-SDS numunesinin genel ve detay görünüşü.

Deneysel çalışmada kullanılan tersinir tekrarlı yerdeğiştirme çevrimleri Şekil 3.137'de verilmiştir.



Şekil 3.137 : EEPC-SDS numunesinde yerdeğiştirme adımları.

Bu deney sırasında toplam 76 kanaldan okuma alınmıştır. Bu kanalların 60 tanesi şekildeğiştirme ölçerler için, 16 tanesi yerdeğiştirme ölçerler için kullanılmıştır. Deney, 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin sonuna kadar başarıyla devam ettirilmiştir.

Numune üzerindeki ilk hasar, en büyük tepe yerdeğiştirme değeri 39.96 mm olan (0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi) yerdeğiştirme çevrimi uygulanırken ortaya çıkmıştır. Bu aşamaya gelinceye kadar;

En büyük tepe yerdeğiştirme değeri 9.99 mm olan 0.00375 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde itme durumunda 38.75 kN, çekme durumunda da 38.10 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir.

0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin 13.33 mm'ye karşı gelen en büyük itme yerdeğiştirmesinde 49.30 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinde ise 50.25 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir.

19.98 mm'lik en büyük tepe yerdeğiştirmesinin etkitildiği 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde itmede 68.83 kN, çekmede 71.88 kN yatay yük dayanımı oluşmuştur.

0.01 rad.'lık etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin 26.65 mm'lik itme pikinde 85.58 kN yatay yük dayanımı oluşurken, çekme pikinde 89.63 kN'luk yatay yük dayanımı oluşmuştur.

Numune üzerinde ilk hasarın gözlenmiş olduğu 0.015 rad.'lık etkin göreli kat ötelenmesi düzeyine gelindiğinde, kiriş başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişinde çok ince bir çatlak gözlenmiştir. 39.96 mm'lik itme pikinde 110.95 kN, çekme pikinde de 114.45 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Bu seviyede numunede oluşan hasar durumu Şekil 3.138'de gösterilmiştir.



Şekil 3.138 : EEPC-SDS numunesinin 0.015 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde yeni bir hasar oluşmamış, bir önceki seviyede oluşan çok ince çatlak durumunu korumuştur. Bu yerdeğiştirme eşiğinin 53.33 mm'lik itme pikinde 124.10 kN, çekme pikinde de 127.78 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir.

En büyük tepe yerdeğiştirme değeri 79.95 mm olan 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde, süreklilik plakaları arasında yer alan çapraz levhaların her ikisi de burkulmuştur. Kiriş başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişleri ile kolon panel bölgesi dışında kalan kısımda başlık ve gövde levhasını birleştiren kaynak dikişlerinde çatlak oluşmuştur. Ayrıca alın plakası ile kiriş başlıkları arasında bulunan üçgen berkitme levhalarından birinin kiriş başlığı ile olan kaynağında çatlak oluşmuştur. Bu yerdeğiştirme seviyesinde, itmede 136.75 kN yatay yük dayanımı elde edilirken, çekmede 99.00 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir.

Panel bölgesi içine yerleştirilen çapraz elemanların burkulma yükü Denklem (3.25) kullanılarak belirlenmiştir. Çapraz elemanların kolon başlık ve berkitme elemanlarına bağlantıları kaynaklı olarak yapılmıştır. Çapraz elemanın uç bağlantılarına karşı gelen sınır koşullarını ifade etmek üzere her iki ucun ankastre ve mafsallı olduğu durumlar ile ikisi arasındaki bir ara durum ayrı ayrı incelenmiştir.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times EI_y}{L_b^2} \qquad \textbf{(3.25)}$$

Bu sınır şartlarına karşı gelmek üzere burkulma boyları gerçek çubuk boyunun; ankastre durumda 0.6 katı, mafsallı durumda 1.0 katı, ara durumda ise 0.8 katı olarak

alınmıştır (TS648, 1980). Çapraz burkulma boyları (3.26), (3.27) ve (3.28) bağıntıları ile hesaplanmıştır.

$$L_{b1} = 0.6 \times L_{ç} \quad \textbf{(3.26)}$$

$$L_{b2} = 0.8 \times L_{ç} \quad \textbf{(3.27)}$$

$$L_{b3} = 1.0 \times L_{ç} \quad \textbf{(3.28)}$$

Panel bölgesinin ön ve arkasında yer alan iki çapraz eleman için hesaplanan toplam kritik burkulma yükü Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Kritik burkulma yükleri.

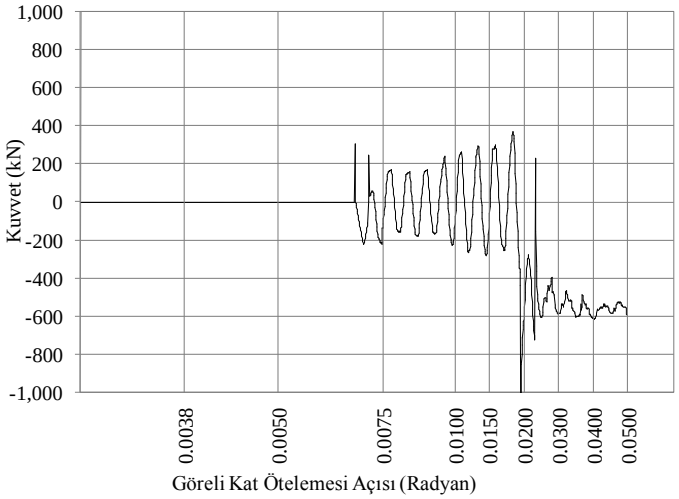
	Burkulma boyu katsayısı	Burkulma boyu (cm)	Bir çapraz için burkulma yükü (kN)	İki çapraz için burkulma yükü (kN)
P_{cr1}	0.6	26.8	810.8	1621.6
P_{cr2}	0.8	35.7	456.9	913.8
P_{cr3}	1.0	44.6	292.7	585.4

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimi uygulanırken çapraz elemanlarda burkulma meydana gelmiştir. Bu aşamada hidrolik verenden okunan yatay yük 130 kN'dur. Kafes analojisi uygulanarak yapılan yaklaşık bir hesapta çapraz elemanlar üzerindeki toplam eksenel kuvvet 1410 kN olarak belirlenmiştir. Bu değer Çizelge 3.70'de ankastre durum için verilen 1621.6 kN değerine yakın düşmektedir.

Panel bölgesi içinde yer alan çapraz elemanlar üzerine yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen değerlerin ortalamaları Denklem (3.29) ve (3.30) ile kuvvete dönüştürülmüş ve çapraz elemanlar üzerindeki göreli kat ötelenmesi açısı - kuvvet ilişkileri çizilmiştir, Şekil 3.139. Grafikten 0.02 rad. göreli kat ötelenmesi seviyesinde eksenel kuvvette ani bir değişme olduğu ve yaklaşık 800 kN düzeyinde kuvvet oluştuğu gözlenmektedir.

$$\sigma_{ç} = \varepsilon_{ç} \times E_{ç} \quad \textbf{(3.29)}$$

$$F_{ç} = \sigma_{ç} \times A_{ç} \quad \textbf{(3.30)}$$



Şekil 3.139 : EEPC-SDS numunesinin çapraz elemanında kuvvet değişimi.

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinin tamamlanmasının ardından numunede oluşan hasar durumu Şekil 3.140'ta verilmiştir.



Şekil 3.140 : EEPC-SDS numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

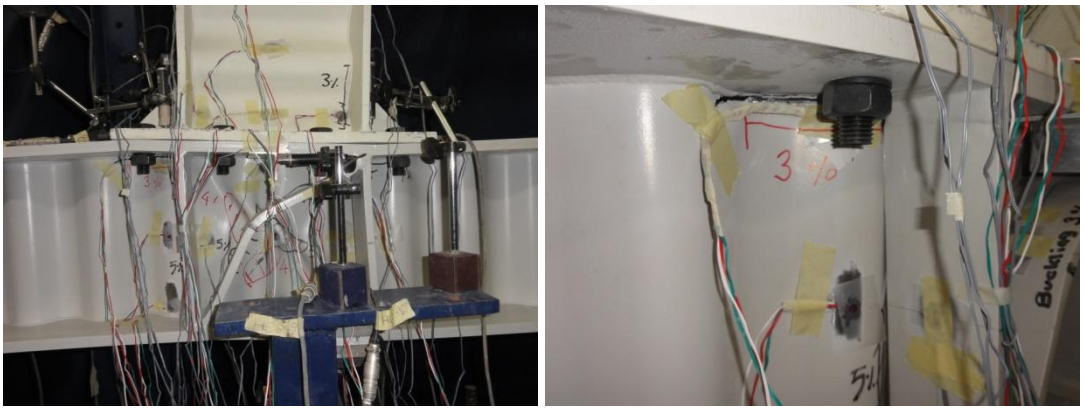
0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde bir önceki seviyede oluşan kaynak çatlakları ve ayrışmalar büyüyerek ilerlemiş, kolonun panel bölgesi

dşında sağ tarafta kalan bölümünde başlık ve gövdeyi birleştiren kaynak dikişlerinde çatlak oluşmuştur. Ayrıca kolonun panel bölgesi içinde kalan bölümünde ince cidarlı sinüzoidal gövdenin formu bozulmuştur. 106.65 mm'lik en büyük itme yerdeğiştirmesine 135.85 kN'luk yatay yük dayanımı karşı gelirken, aynı yerdeğiştirmenin çekme olması durumunda 106.65 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Çevrimler tamamlandıktan sonraki hasar durumu Şekil 3.141'de gösterilmiştir.



Şekil 3.141 : EEPC-SDS numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

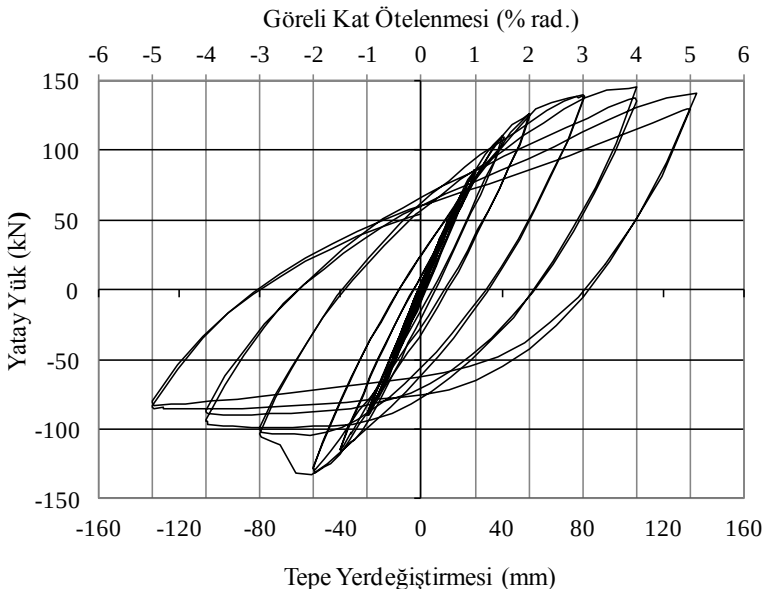
En büyük tepe yerdeğiştirmesi 133.60 mm olan son çevrim grubu 0.05 rad.'lık etkin göreli kat ötelenmesi eşiğine gelindiğinde, kaynak çatlakları ve ayrışmalar iyice büyüyerek ilerlemiş, panel bölgesindeki gövde levhasının form bozukluğu süreklilik plakasının bir miktar dışına kadar taşmıştır. En büyük itme yerdeğiştirmesinde 129.70 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinde ise 80.10 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Çevrimler sonrasında oluşan hasar durumu Şekil 3.142'de verilmiştir.



Şekil 3.142 : EEPC-SDS numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

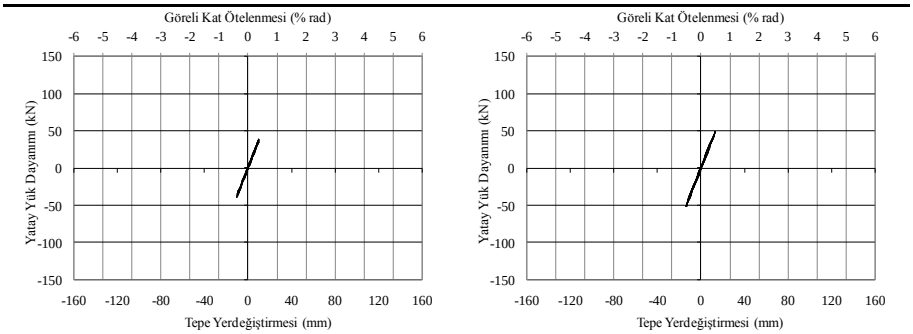
Tüm deneysel veri birlikte değerlendirildiğinde; itme ve çekme yerdeğiştirmelerine karşı gelen yatay yük dayanımları, panel bölgesi içine yerleştirilen çapraz elemanlarda burkulma oluşana kadar birbirlerine oldukça yakın gerçekleşmiştir. Burkulma sonrasında itme ve çekmede de elde edilen dayanımlar birbirinden uzaklaşmıştır.

Deney boyunca uygulanan tüm yerdeğiştirme çevrimlerinden elde edilen yatay yük dayanımları kullanılarak Şekil 3.143'te verilen grafik elde edilmiştir.

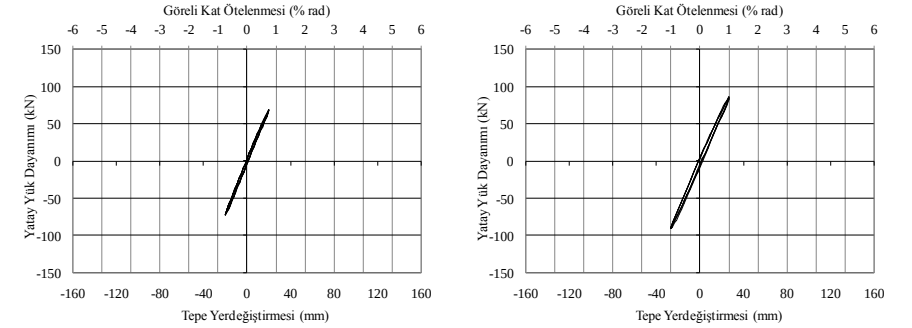


Şekil 3.143 : EEPC-SDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

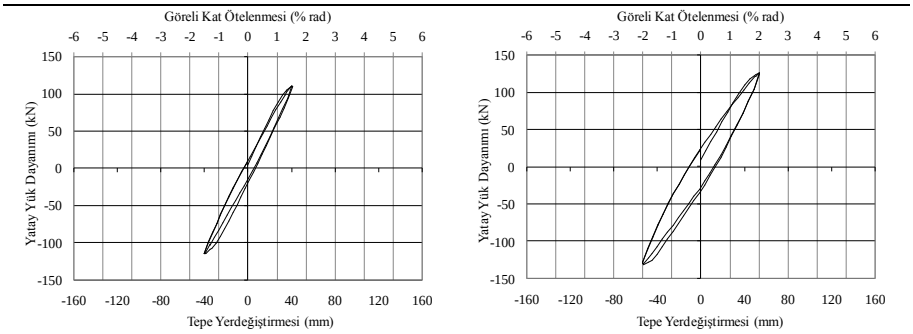
Bu numunenin deney sonucu elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisinin çevrimlerini ayrıklaştırılarak Şekil 3.144'te verilmiştir. Buna göre doğrusal olmayan davranışın 0.015 rad. - 0.02 rad. seviyelerinden itibaren başladığı görülmektedir.



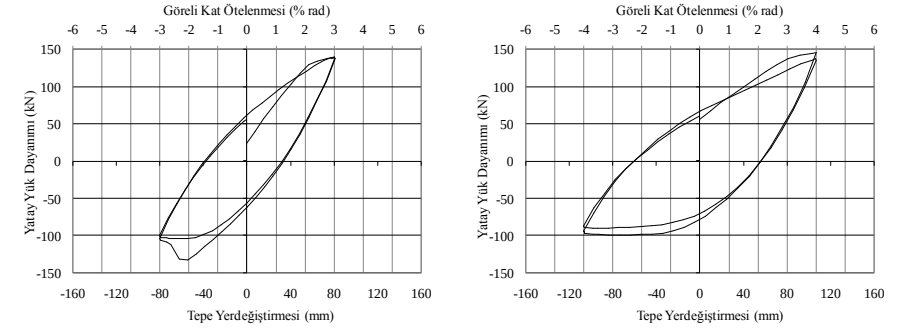
0.00375 rad. 0.00500 rad.



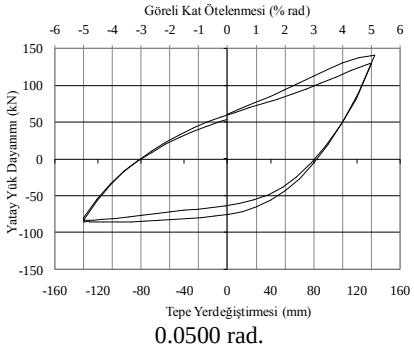
0.0075 rad. 0.0100 rad.



0.0150 rad. 0.0200 rad.



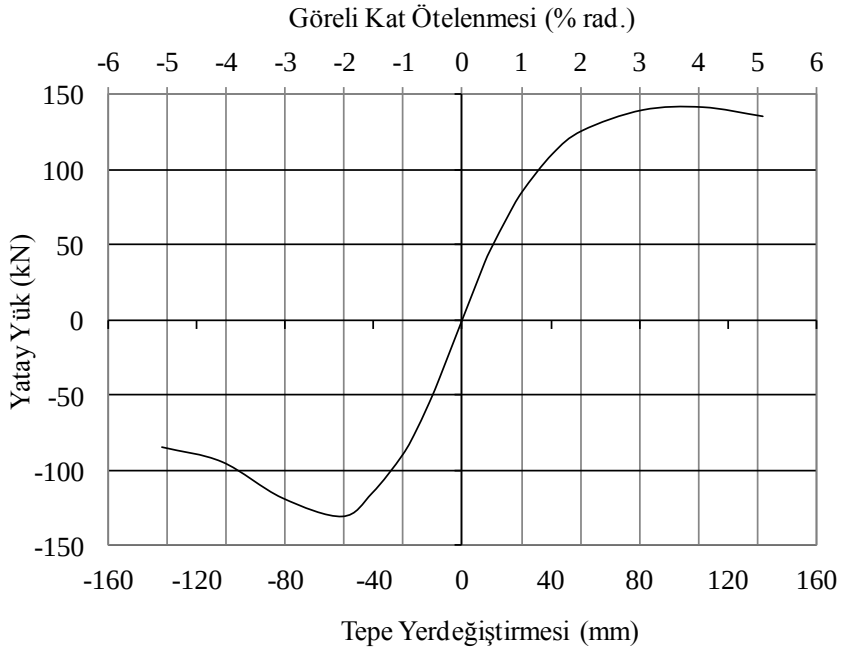
0.0300 rad. 0.0400 rad.



0.0500 rad.

Şekil 3.144 : EEPC-SDS numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

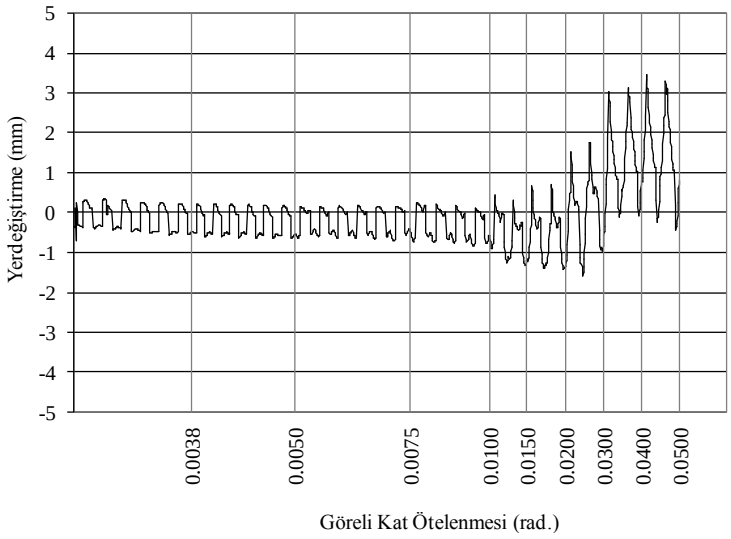
Yatay yük - tepe yerdeğiştirme ilişkisinin zarf eğrisi Şekil 3.145'te gösterilmiştir.



Şekil 3.145 : EEPC-SDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi.

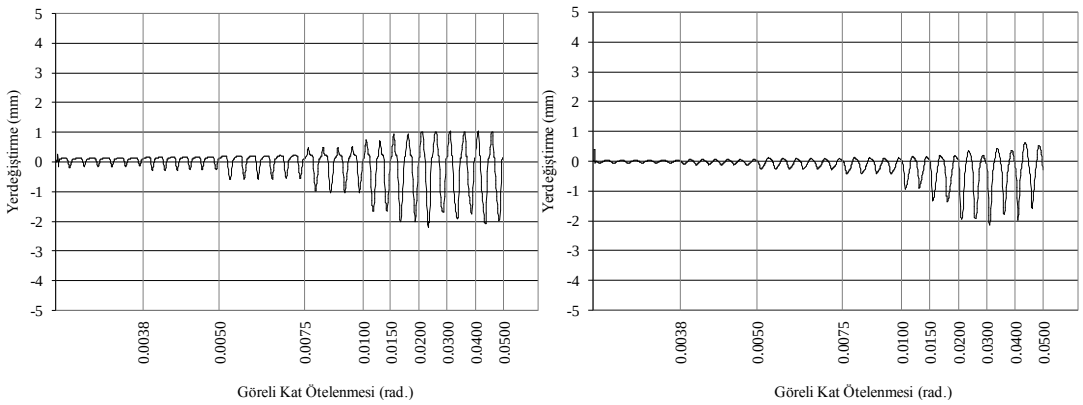
Yatay yük dayanımı, 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin sonuna kadar her çevrimde artmıştır. Bu çevrimde panel bölgesinde bulunan çapraz levhaların burkulması nedeni ile itme ve çekmede elde edilen yatay yük dayanımları arasında farklar oluşmuştur.

Kiriş düzlem dışı hareketi ile mesnetlerde ortaya çıkan düşey doğrultudaki hareketler Şekil 3.146 ve Şekil 3.147'de verilmiştir.



Şekil 3.146 : EEPC-SDS numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Panel bölgesinde yer alan çapraz levha elemanların burkulduğu 0.030 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde oluşan en büyük düzlem dışı hareket 1.70 mm olarak kaydedilmiştir. Bu seviyede sisteme etkitilen en büyük yatay yerdeğiştirme ise 79.95 mm'dir. Buna göre düzlem dışı yerdeğiştirme ile en büyük yatay yerdeğiştirme arasındaki oran 1/47 olmuştur.

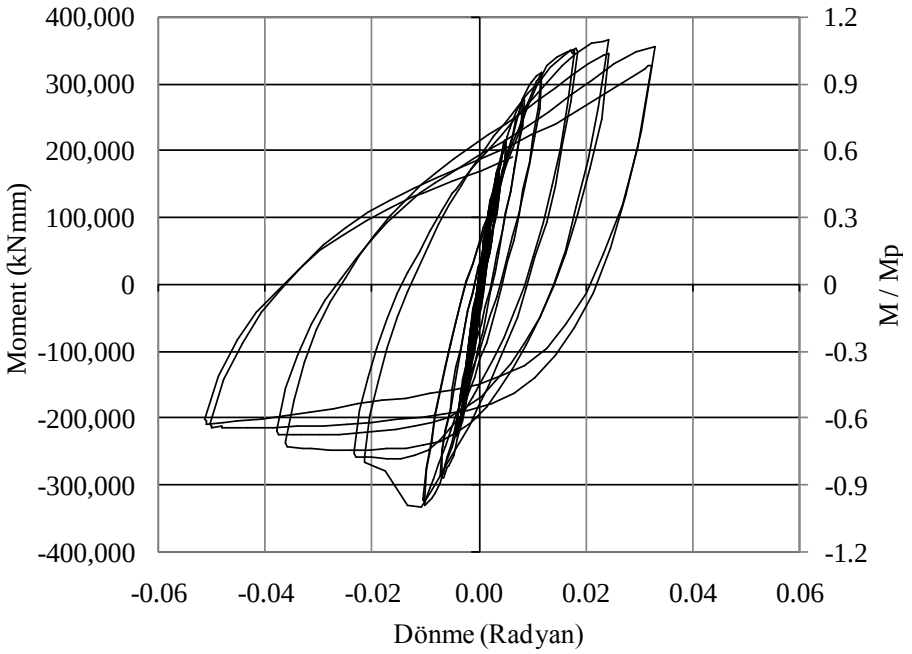


a. Sol mesnet *b. Sağ mesnet*

Şekil 3.147 : EEPC-SDS numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

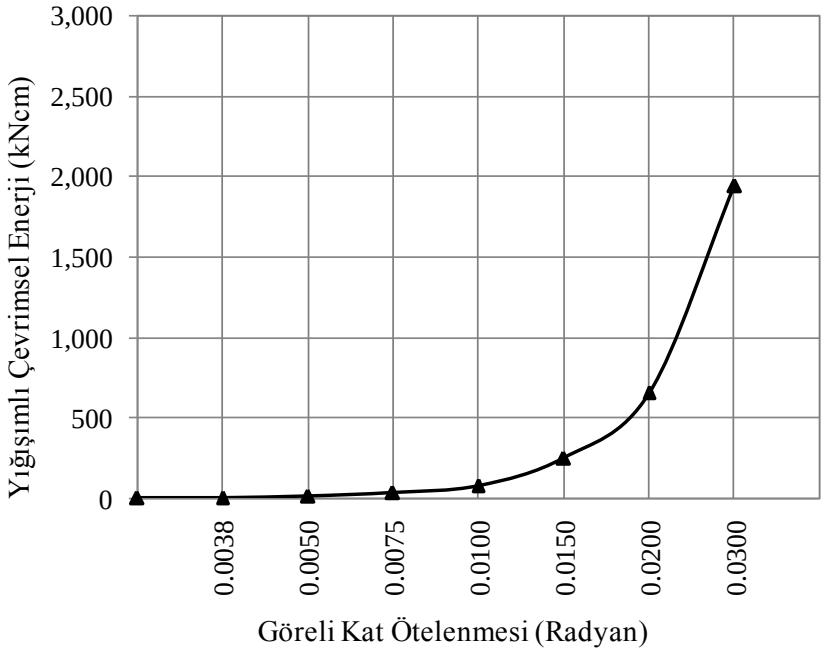
Bu tepe yerdeğiştirmesi durumunda okunan en büyük düşey yerdeğiştirmeler sol mesnette 2.10 mm, sağ mesnette ise 1.90 mm olmuştur. Buna göre sol mesnetin düşey hareketinin tepe yerdeğiştirmesine oranı 1/38, sağ mesnetin düşey hareketinin yatay yerdeğiştirmeye oranı ise 1/42 olmuştur.

Alın plakasına yerleştirilen düşey yerdeğiştirme ölçerlerden yararlanılarak elde edilen dönme ile kiriş taban momenti arasındaki ilişki Şekil 3.148'de verilmiştir. Elde edilen en büyük kiriş taban momentinin plastik moment kapasitesine oranı 0.99 olmuştur.



Şekil 3.148 : EEPC-SDS numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi.

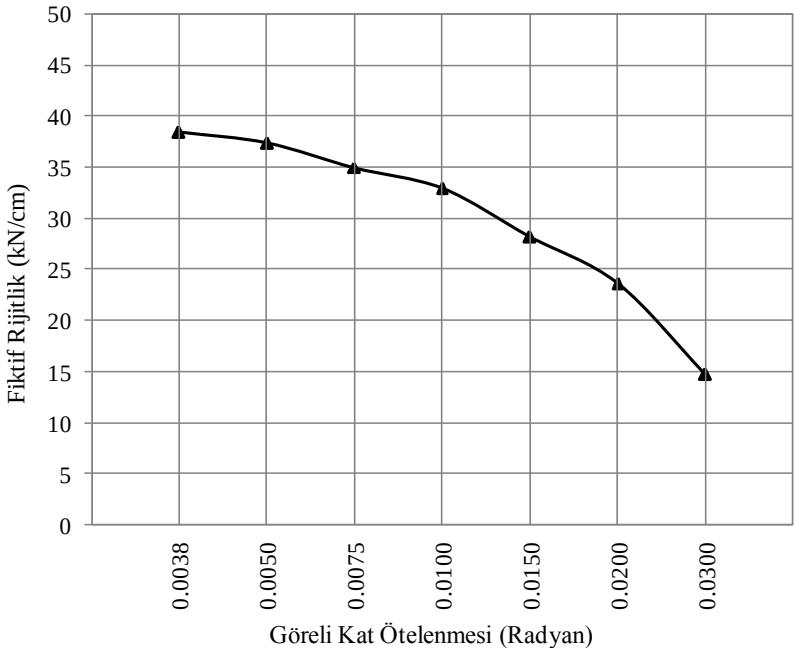
Yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi grafiğinden üretilen yığışımlı çevrimsel enerjinin göreli kat ötelenmesi ile ilişkisi Şekil 3.149'da verilmiştir.



Şekil 3.149 : EEPC-SDS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi.

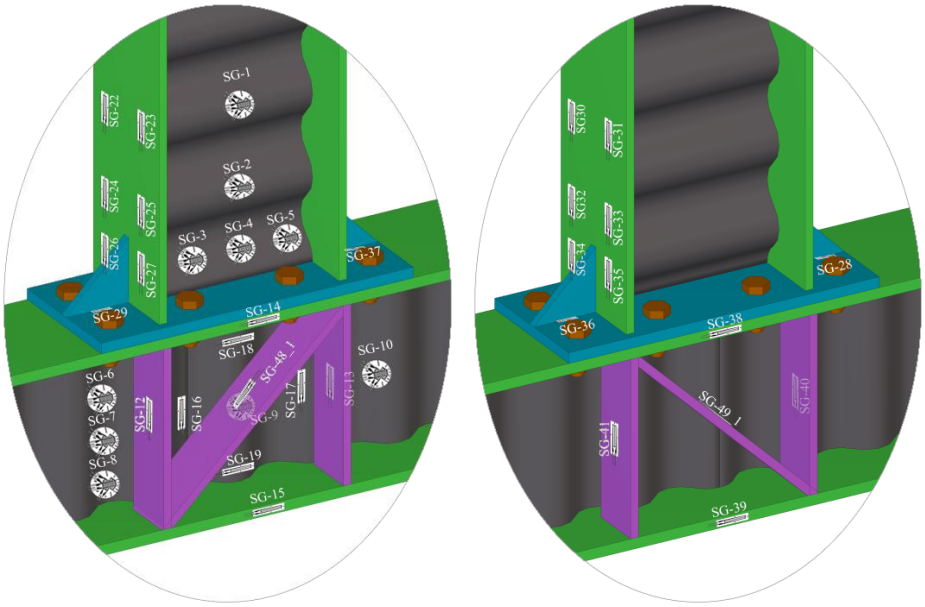
Yatay yük - yerdeğiştirme dayanımı kullanılarak elde edilen göreli kat ötelenmesi - fiktif rijitlik grafiği Şekil 3.150'de gösterilmiştir. İlk çevrimde 38 kN/cm olan fiktif

yatay rijitliğin, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenme eşik değeri sonunda 15 kN/cm'ye kadar düştüğü görülmektedir.



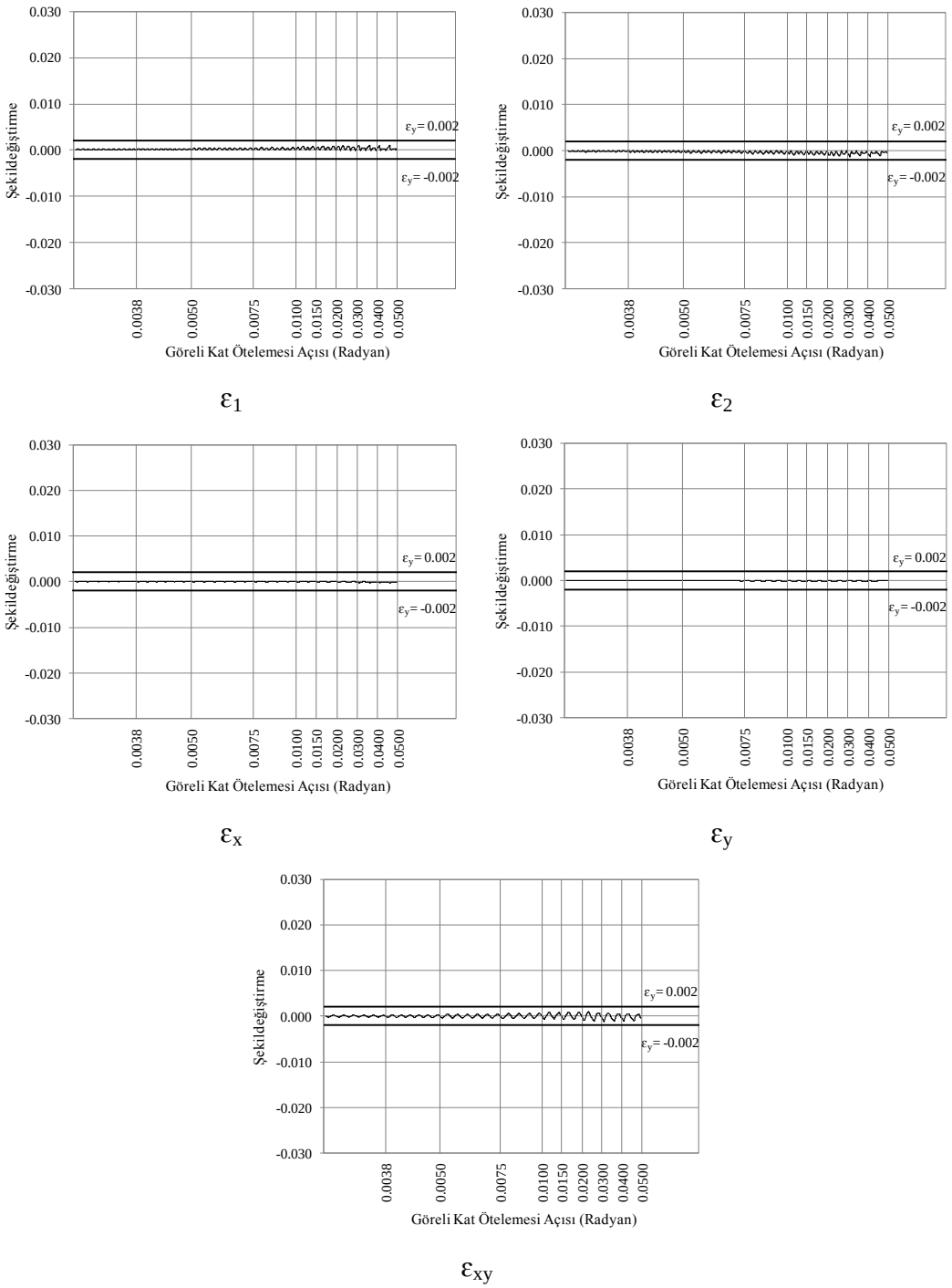
Şekil 3.150 : EEPC-SDS numunesinde rijitlik değişimi.

Panel bölgesi ile yakın çevresine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlerin isimleri ve konumları Şekil 3.151'de gösterilmiştir.



Şekil 3.151 : EEPC-SDS numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler.

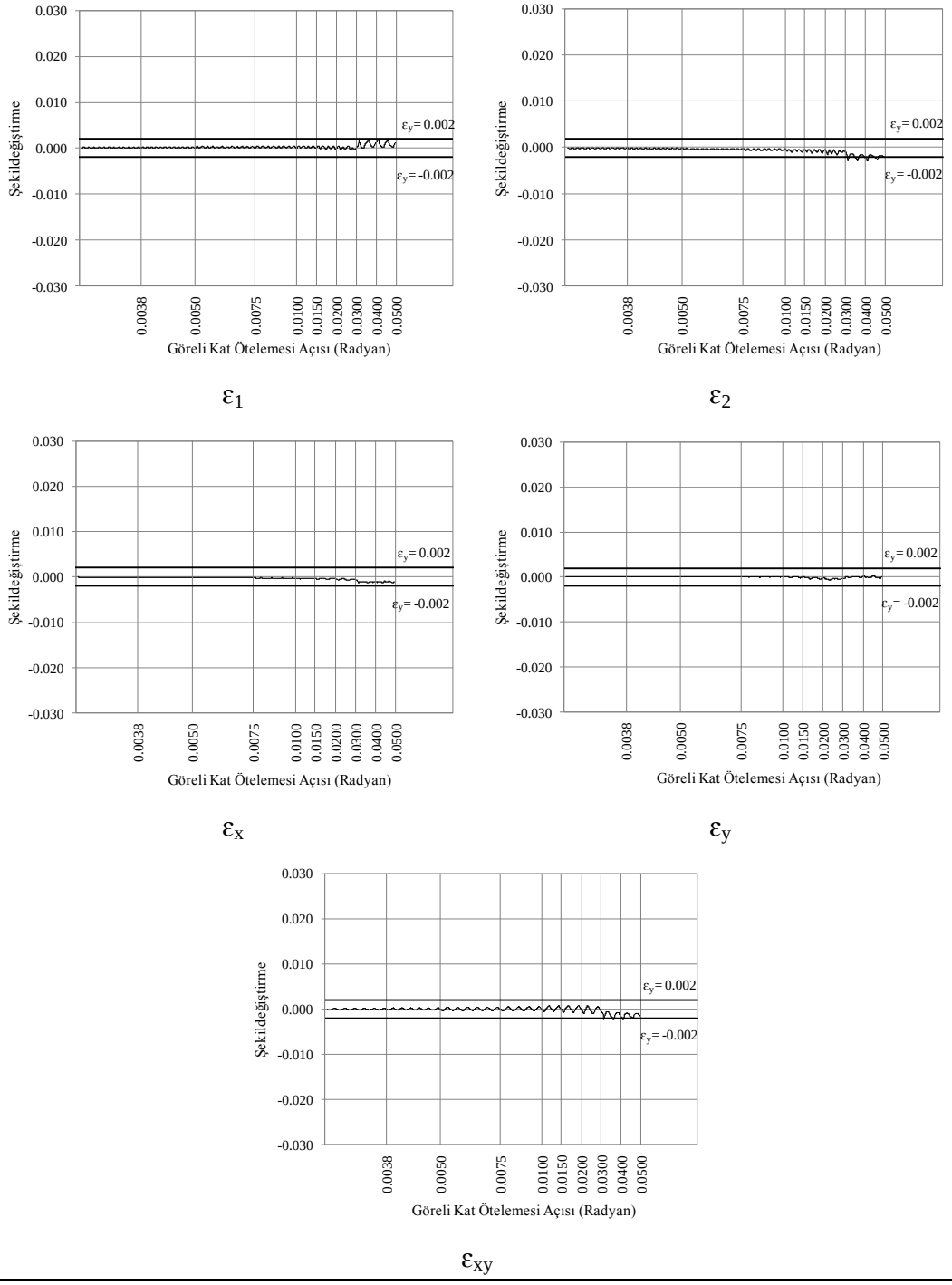
Kiriş gövdesine yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden, alın plakasından bir kiriş yüksekliği kadar yukarıda bulunan SG-1 isimli 3 eksenli şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen ε_1, ε_2 asal şekildeğiştirmeleri ile ε_x, ε_y ve ε_{xy} şekildeğiştirmelerine ait grafikler Şekil 3.152'de verilmiştir.



Şekil 3.152 : EEPC-SDS / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerden alınan sonuçlara göre numunenin bu bölgesinde akma meydana gelmemiştir.

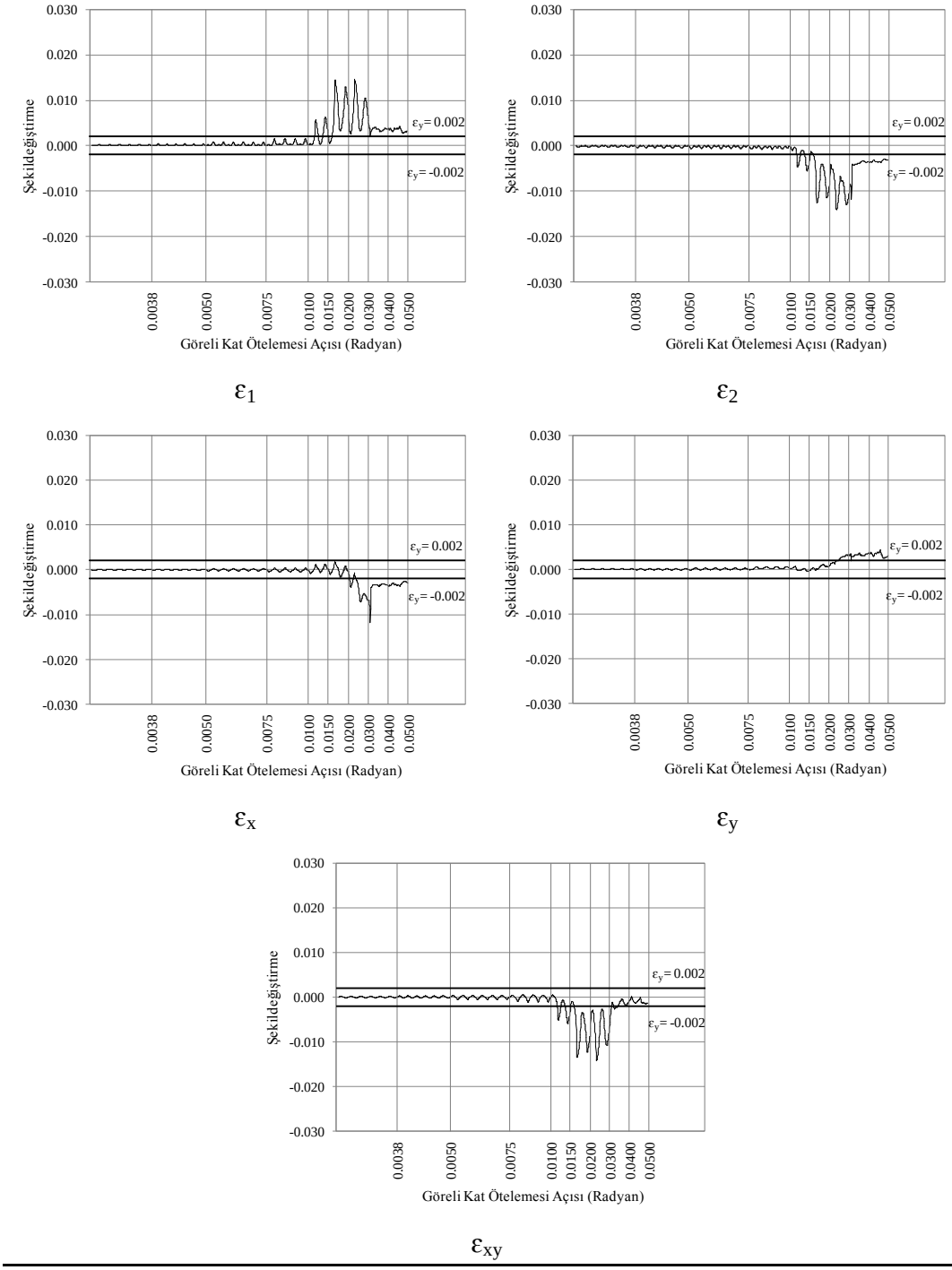
Kiriş gövdesine yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-2'den elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.153'te verilmiştir.



Şekil 3.153 : EEPC-SDS / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-2 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bölgede 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde plastikleşme başlamıştır.

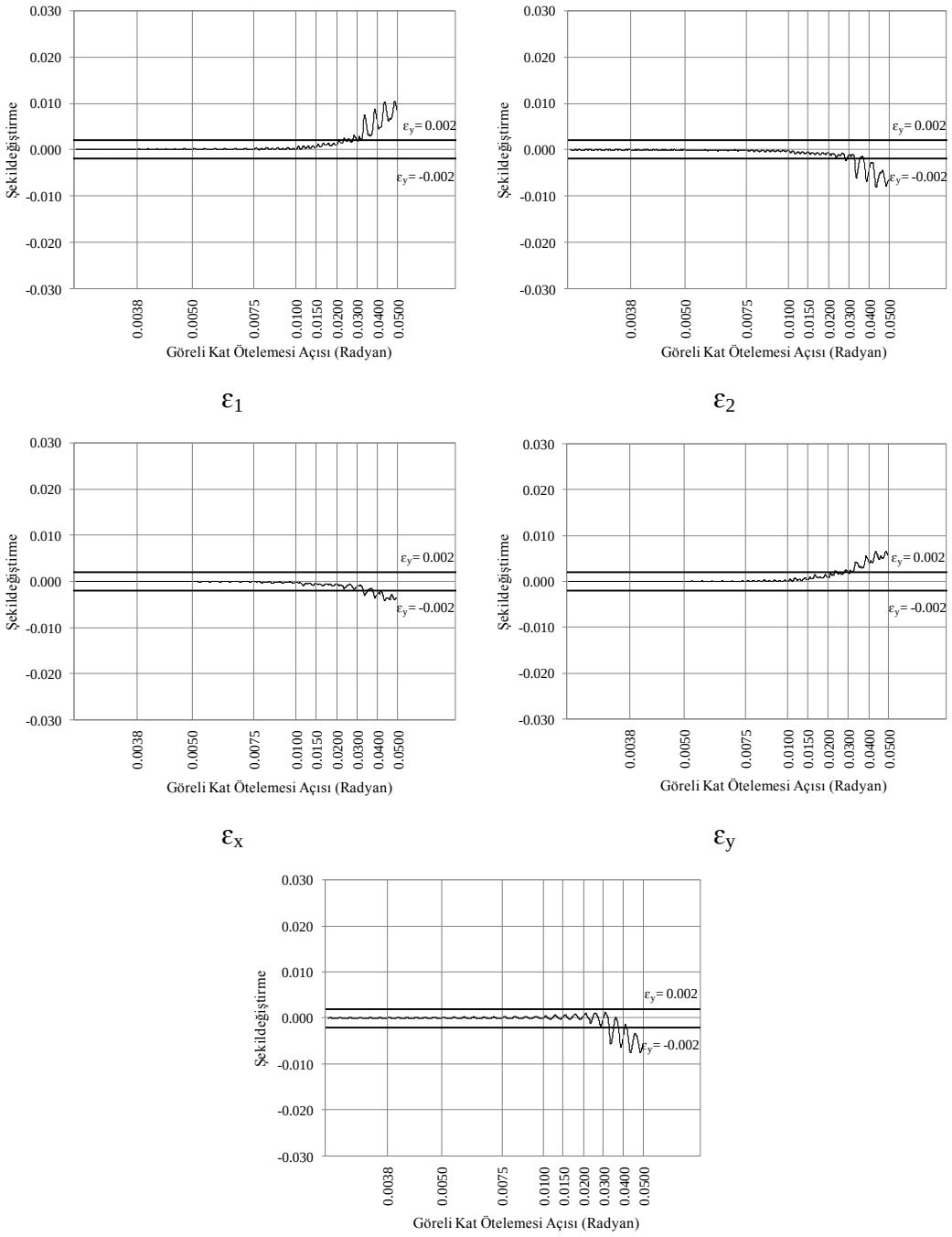
Alın plakasına en yakın konumda yer alan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-3'ten elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.154'te gösterilmiştir.



Şekil 3.154 : EEPC-SDS / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-3'ün yapıştırıldığı bölgede, akma sınır şekildeğiştirmesi 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesine ait yerdeğiştirme çevrimleri uygulanırken aşılmıştır.

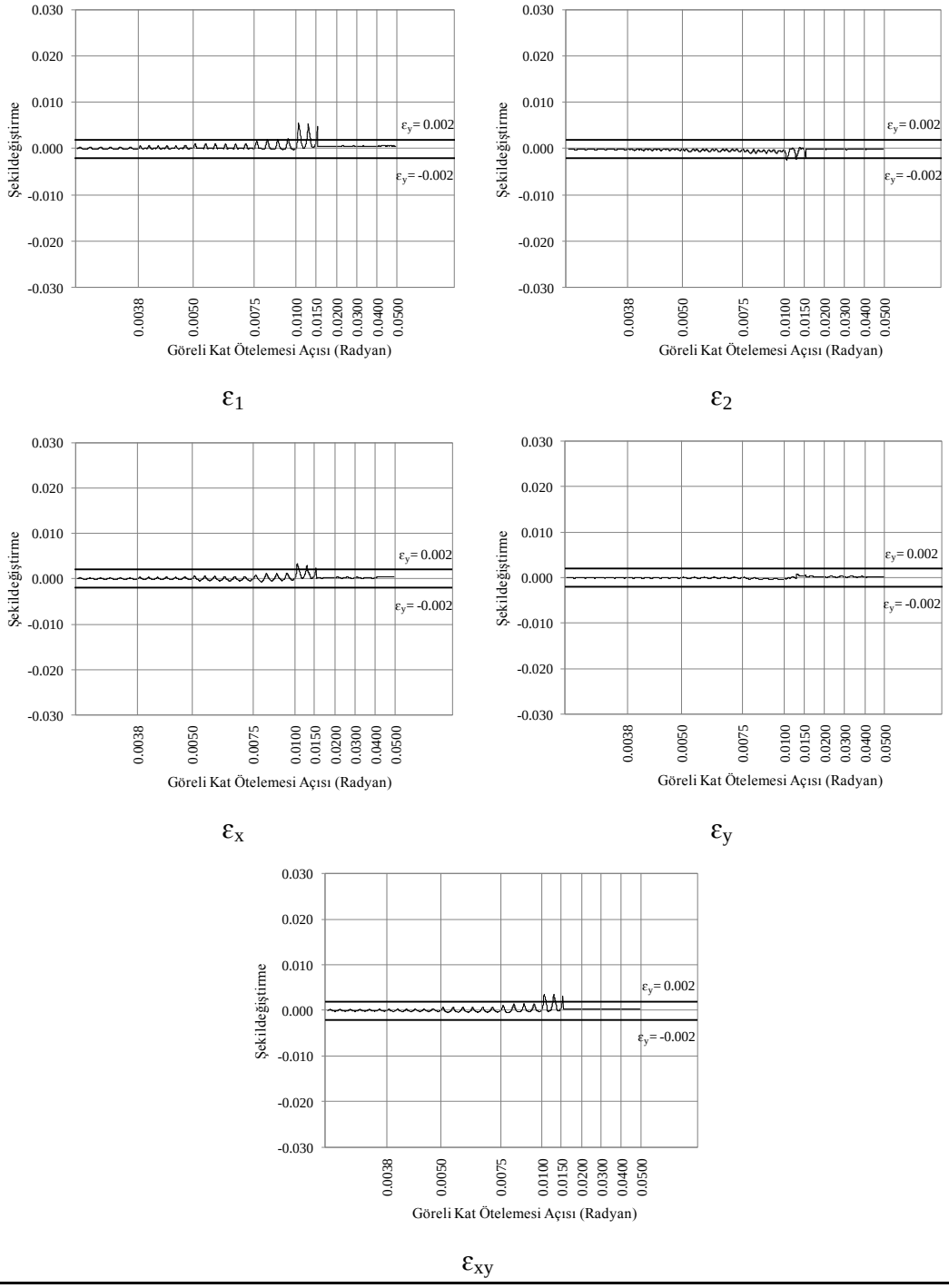
SG-3 şekildeğiştirme ölçeri ile aynı yatay kesitte bulunan SG-4 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.155'te verilmiştir.



Şekil 3.155 : EEPC-SDS / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerden alınan sonuçlara göre plastikleşme 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde başlamıştır.

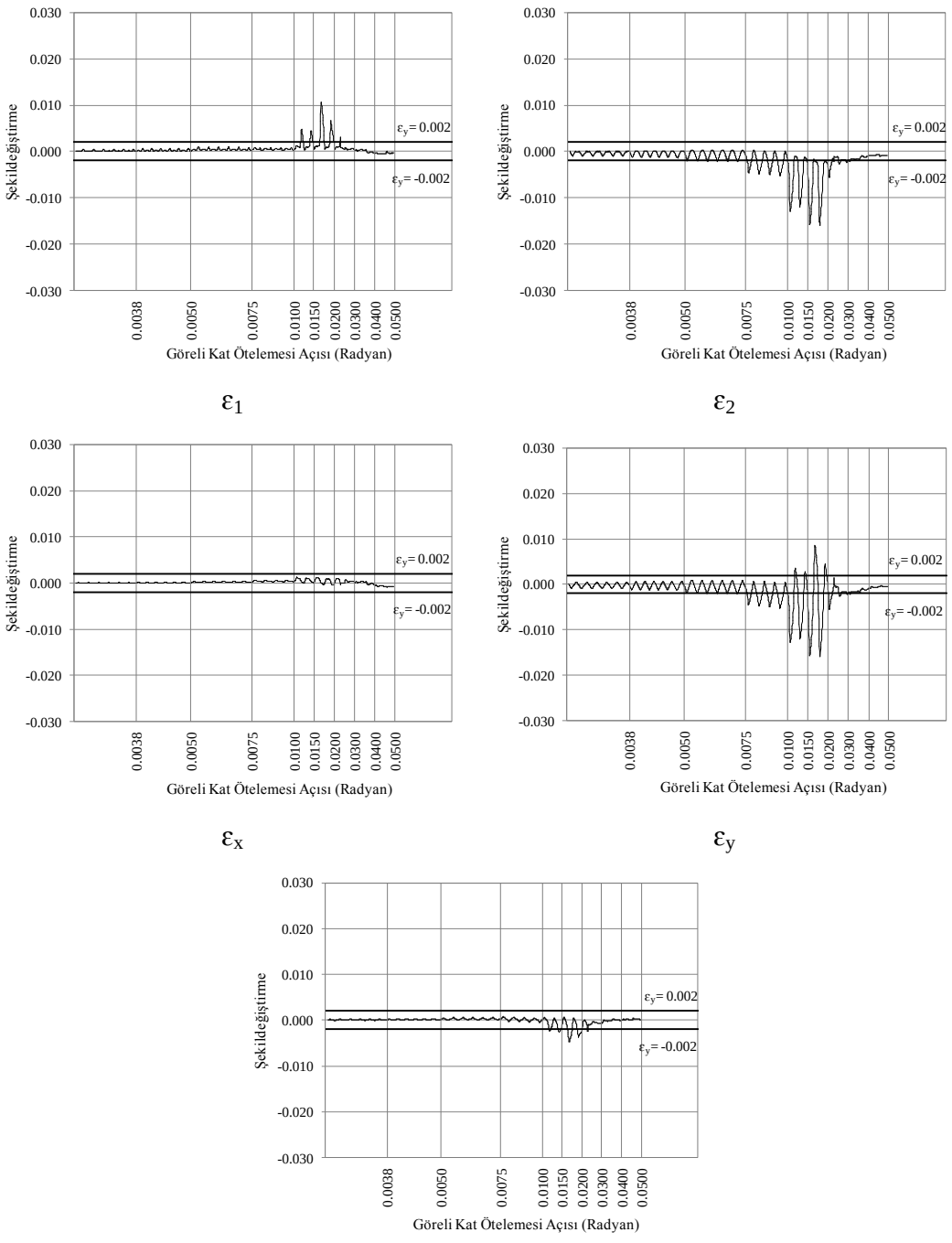
Kiriş gövdesinde yine aynı kesitte bulunan SG-5 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen grafikler Şekil 3.156'da verilmiştir.



Şekil 3.156 : EEPC-SDS / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki plastikleşmeler, SG-3 şekildeğiştirme ölçerinde olduğu gibi 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde başlamıştır.

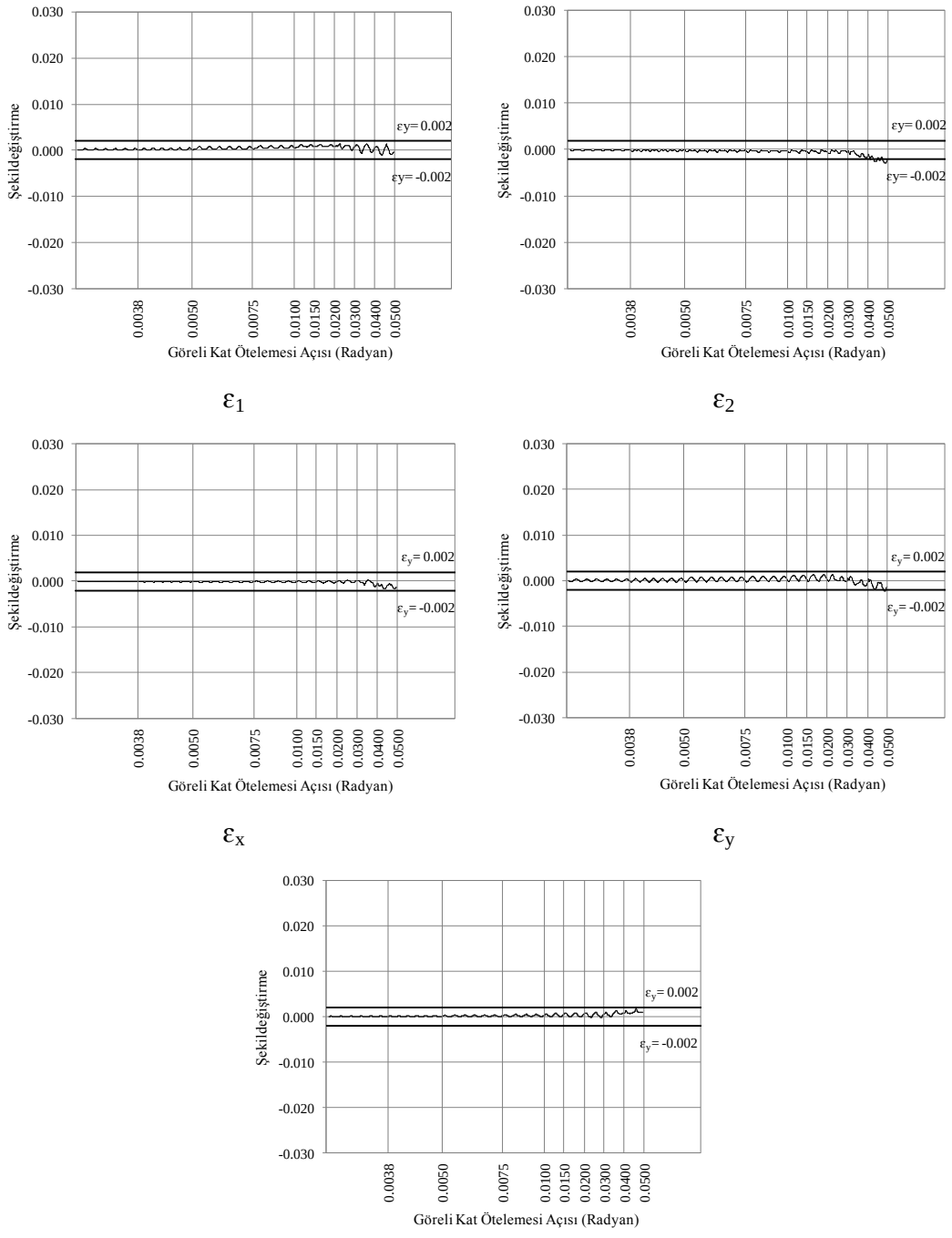
Kolon gövdesinin panel bölgesi dışında kalan kısmına yapıştırılan SG-6 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.157'de verilmiştir.



Şekil 3.157 : EEPC-SDS / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgede 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin yerdeğiştirme çevrimleri uygulanırken akma sınır şekildeğiştirmesi aşılmıştır.

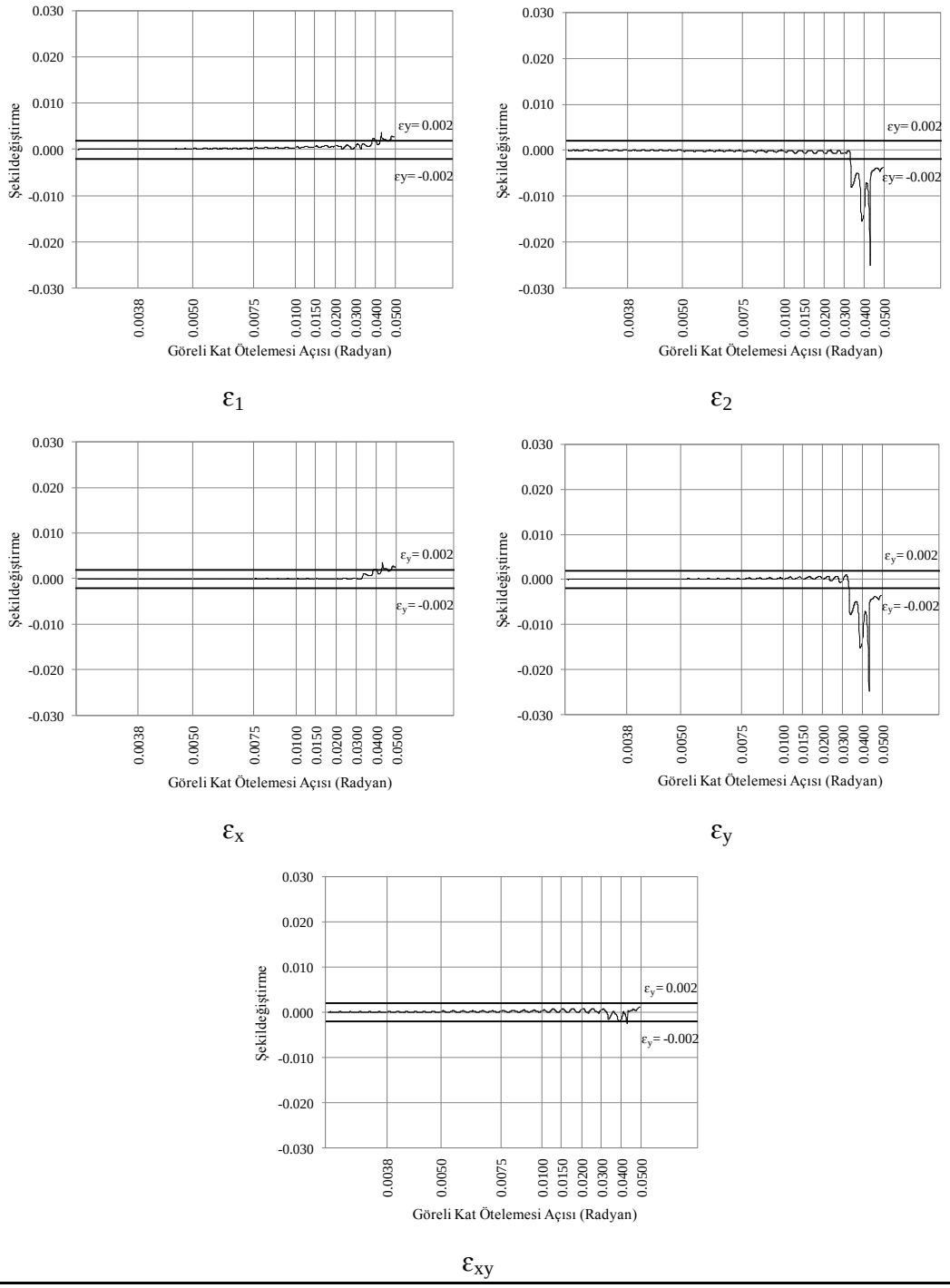
Kolon gövdesinin panel bölgesi dışında kalan kısmındaki şekildeğiştirme ölçerlerden SG-7'den elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.158'de gösterilmiştir.



Şekil 3.158 : EEPC-SDS / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-7 şekildeğiştirme ölçerinin bulunduğu bu bölgede, 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde akma gerçekleşmiştir.

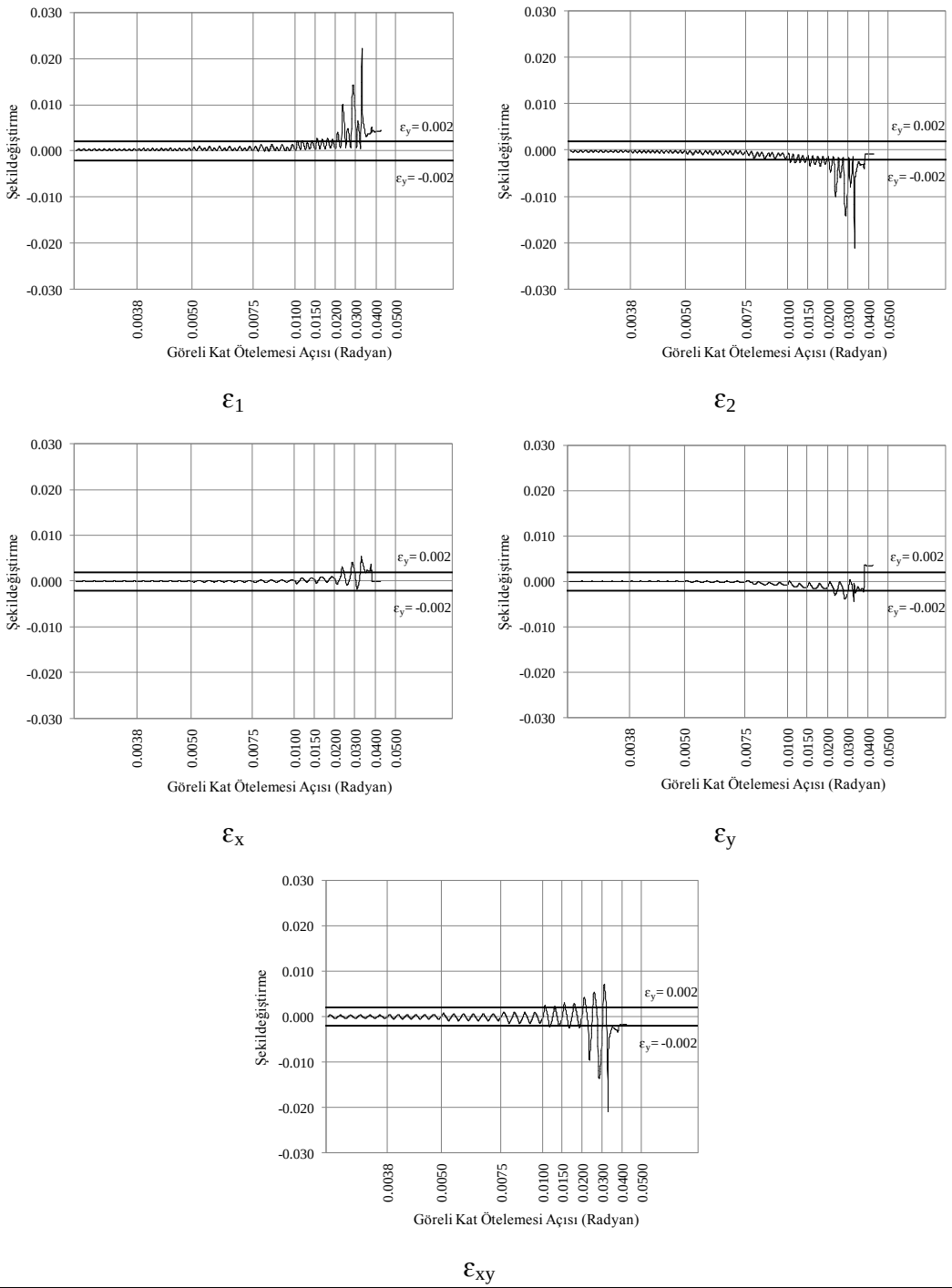
Panel bölgesi dışında bulunan SG-6 ve SG-7 şekildeğiştirme ölçerleriyle aynı düşey kesitte yer alan SG-8 şekildeğiştirme ölçerinden alınan kayıtlar ile elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.159'da verilmiştir.



Şekil 3.159 : EEPC-SDS / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-8'in yapıştırıldığı bölgede, akma sınır şekildeğiştirme değeri 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde aşılmıştır.

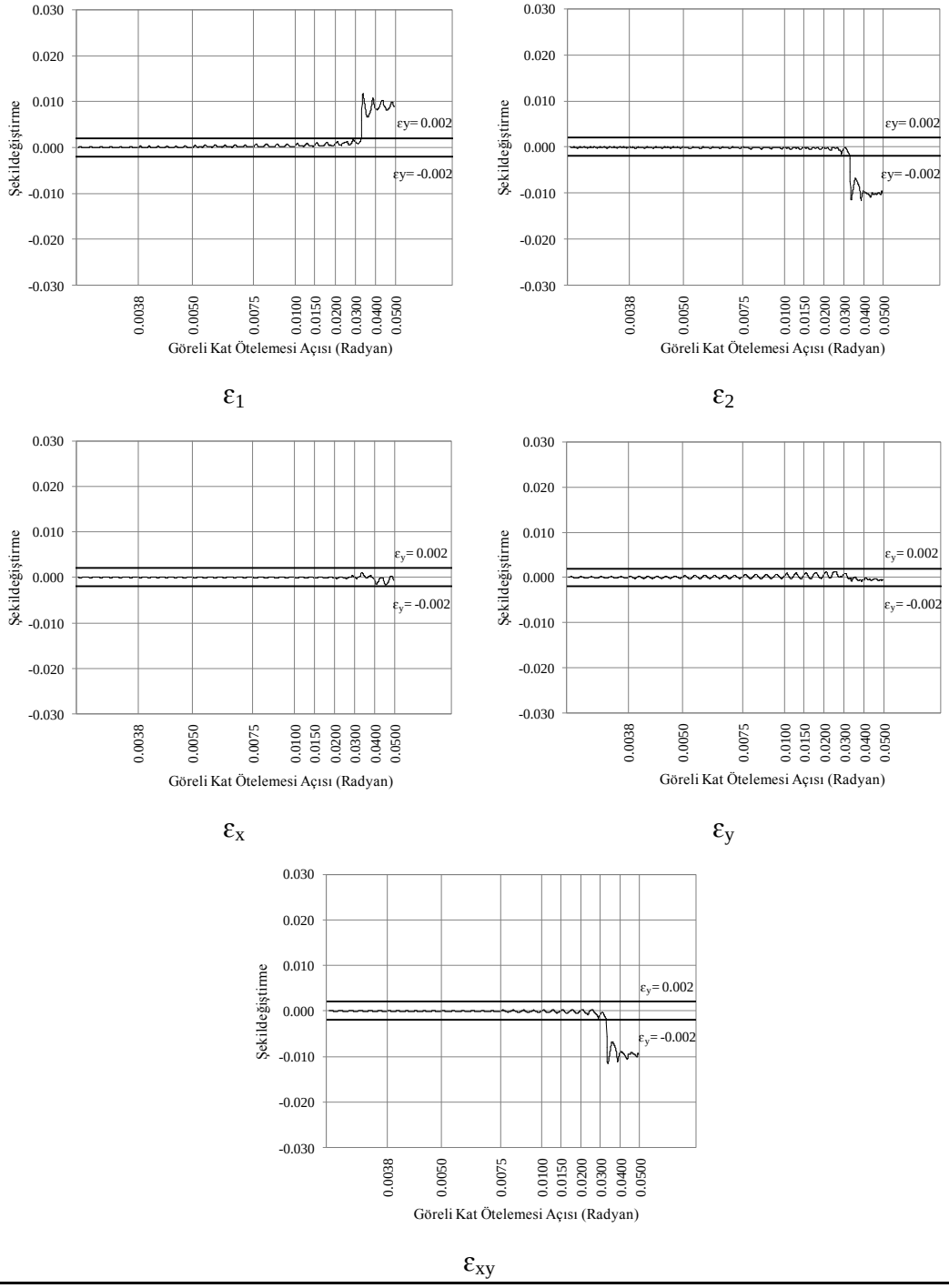
Panel bölgesinin merkezine yapıştırılan SG-9 isimli rozet tip şekildeğiştirme ölçerin vermiş olduğu şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.160'ta gösterilmiştir.



Şekil 3.160 : EEPC-SDS / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Panel bölgesi merkezinde akma şekildeğiştirmesi ilk 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimi uygulanırken aşılmıştır.

Panel bölgesinin dışında, kolon gövdesinin sağ tarafında yer alan SG-10 şekildeğiştirme ölçeri aracılığı ile elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.161'de verilmiştir.



ε_1 ε_2

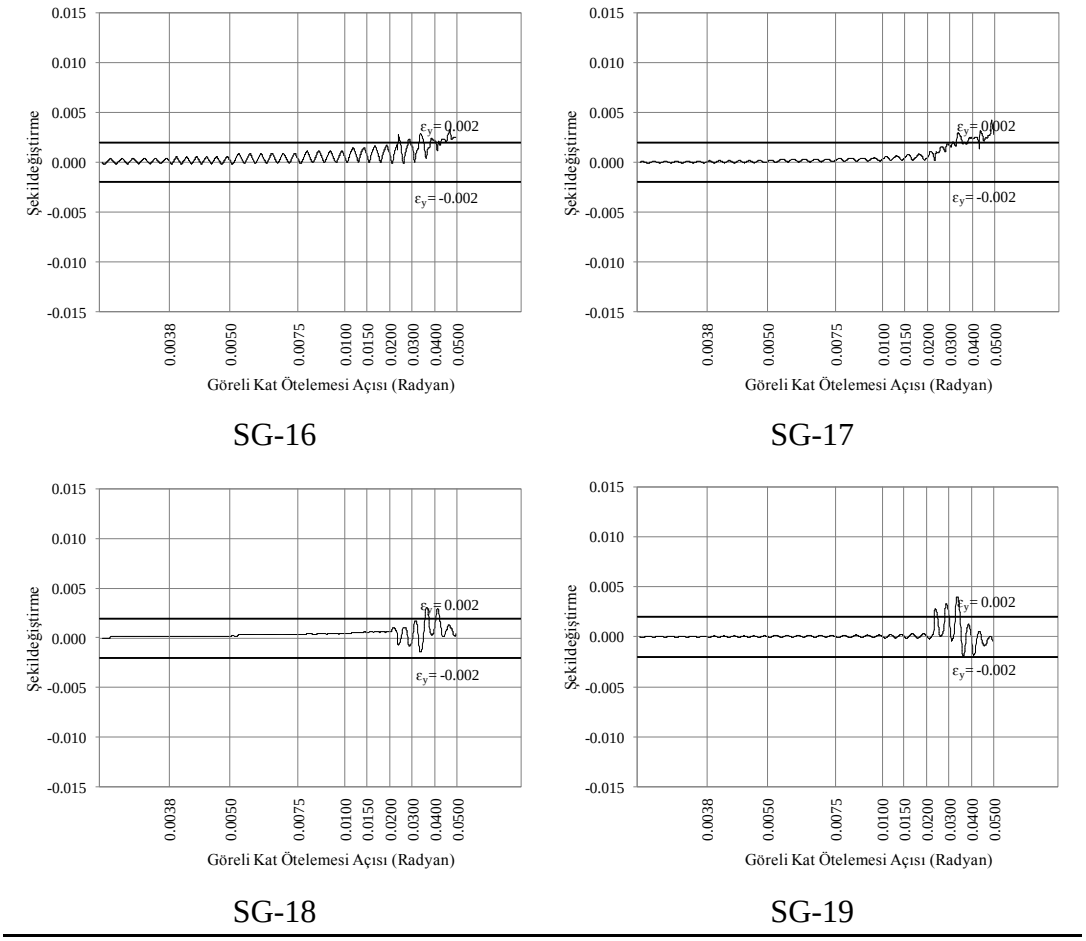
ε_x ε_y

ε_{xy}

Şekil 3.161 : EEPC-SDS / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerin yapıştırıldığı bölgede ilk plastikleşme 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken meydana gelmiştir.

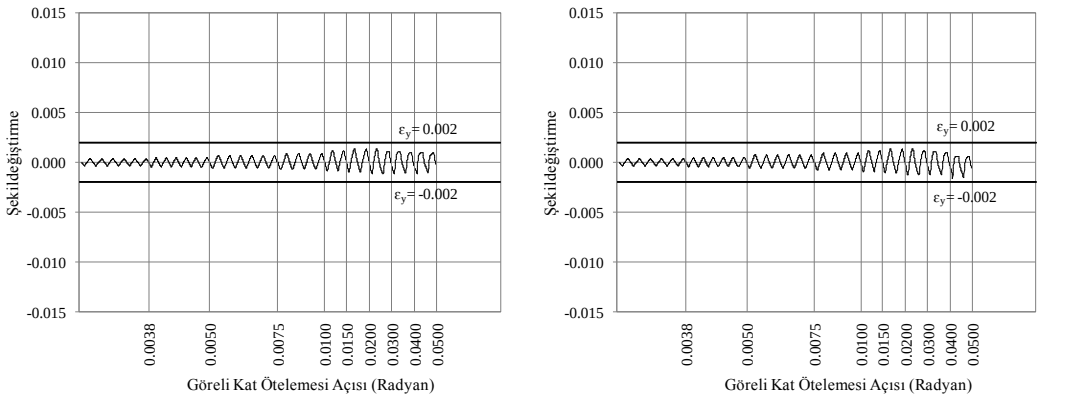
Panel bölgesinin dört kenarına yapıştırılan tek eksenli SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerleinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.162'de verilmiştir.



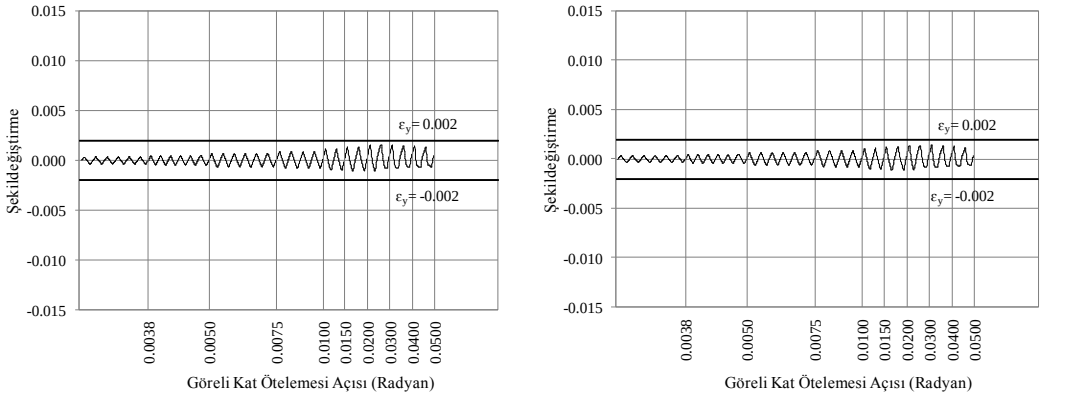
Şekil 3.162 : EEPC-SDS / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

SG-16 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu bölgede 0.03 rad., SG-17 ve SG-18 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu bölgede 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde plastikleşmeler başlamıştır.

Kiriş başlıklarına yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden panel bölgesine en uzak grupta yer alan SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan sonuçlar Şekil 3.163'te gösterilmiştir.



SG-22 SG-23

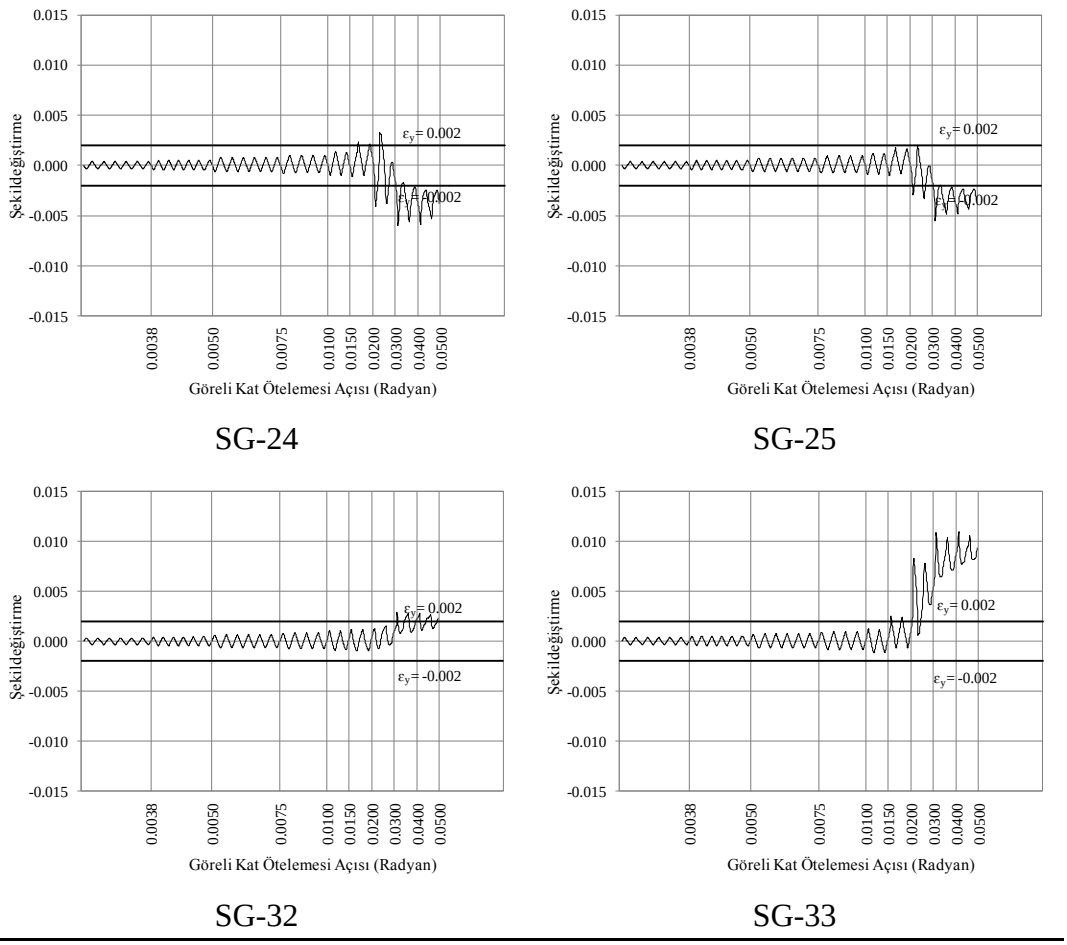


SG-30 SG-31

Şekil 3.163 : EEPC-SDS / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Bu yatay kesite yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden alınan verilere göre akma sınır şekildeğiştirmesi aşılmamıştır.

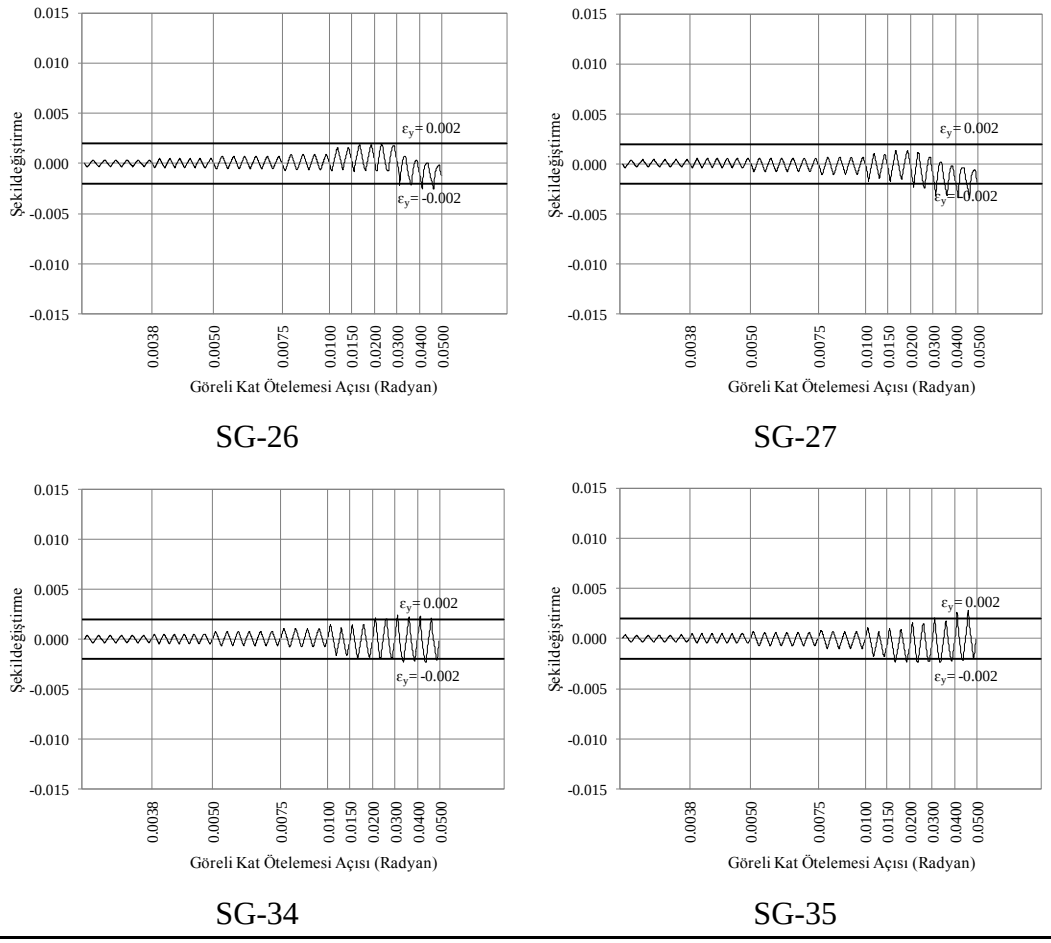
Alın plakasından kiriş yarı yüksekliği kadar mesafedeki kesitte yer alan tek eksenli SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan sonuçlar Şekil 3.164'te verilmiştir.



Şekil 3.164 : EEPC-SDS / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Plastikleşmeler, SG-24 ve SG-33 şekildeğiştirme ölçerlerinde 0.02 rad., SG-25'te 0.03 rad., SG-32'de ise 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde meydana gelmiştir.

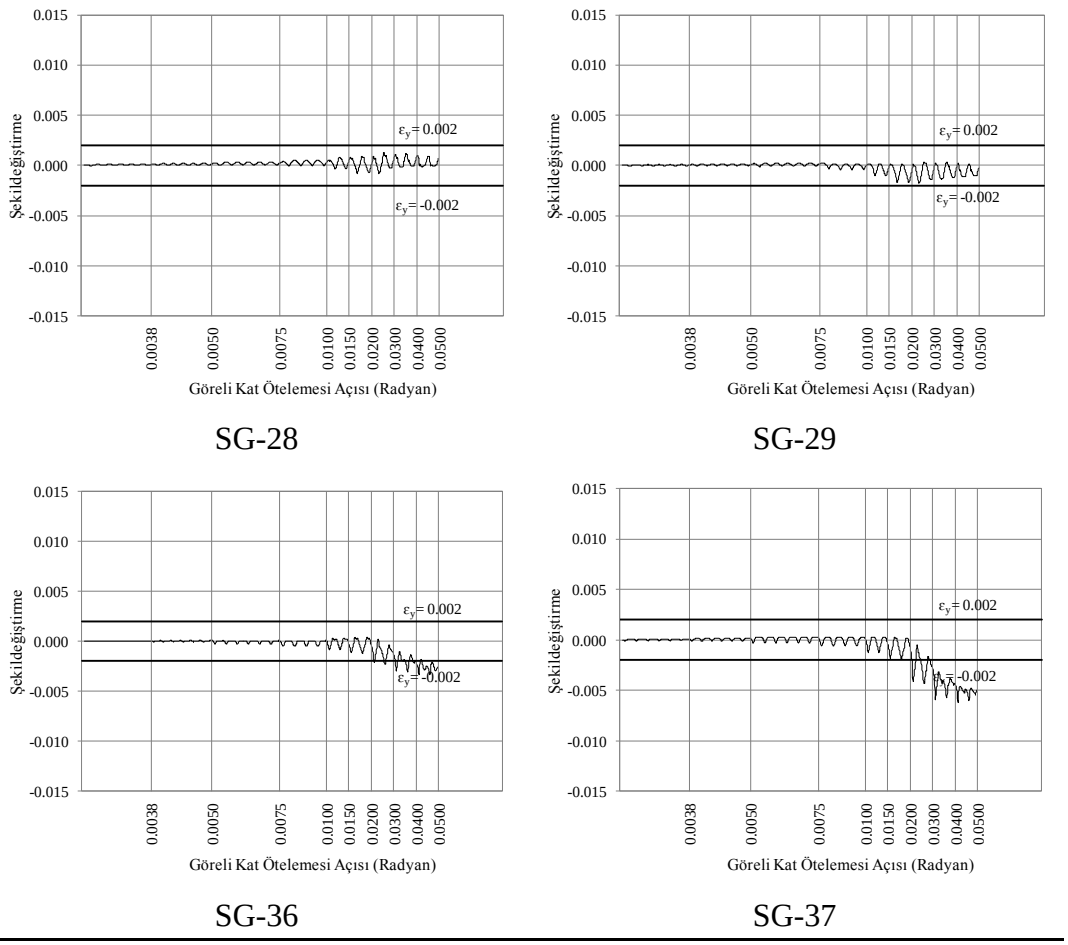
Kiriş başlığında ve alın plakasına en yakın kesitte yer alan tek eksenli SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3.165'te gösterilmiştir.



Şekil 3.165 : EEPC-SDS / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

SG-27 ve SG-35 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu bölgede 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde plastikleşme olmuştur. SG-26 ve SG-34 şekildeğiştirme ölçerlerinde ise ilk plastikleşme 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde gerçekleşmiştir.

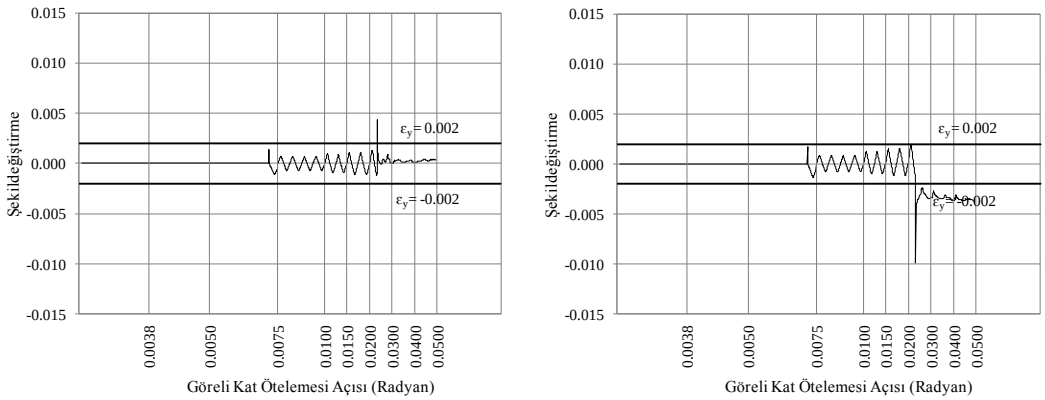
Alın plakası üzerine yapıştırılan SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3.166'da verilmiştir.



Şekil 3.166 : EEPC-SDS / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Alın plakasında, SG-28 ve SG-29 şekildeğiştirme ölçerlerinin yapıştırıldığı bölgelerde plastikleşme meydana gelmezken, SG-36 ve SG-37 isimli şekildeğiştirme ölçerlerinin olduğu bölgede 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesinde plastikleşme başlamıştır.

Panel bölgesinde, çapraz levha elemanlara yapıştırılan SG-48 ve SG-49 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kayıtların değerlendirilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.167'de gösterilmiştir.



Şekil 3.167 : EEPC-SDS / SG-48 ve SG-49 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Çarpraz levha elemanlar üzerindeki şekildeğiştirme ölçerlerden alınan verilere göre akma sınır şekildeğiştirmesi, burkulmanın oluştuğu 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde aşılmıştır. Grafiklerden gözlenen bir husus da, 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyine kadar oluşan şekildeğiştirmelerin çok küçük olmasıdır.

Süreklilik plakaları üzerinde bulunan SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri ile panel bölgesini sınırlayan kolon başlıklarında yer alan SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri EK-A'da verilmiştir.

Önceki numunelerde, mesnet bölgesine yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden alınan sonuçlar çok küçük olduğu için bu numunede mesnet bölgesinde şekildeğiştirme ölçer kullanılmamıştır.

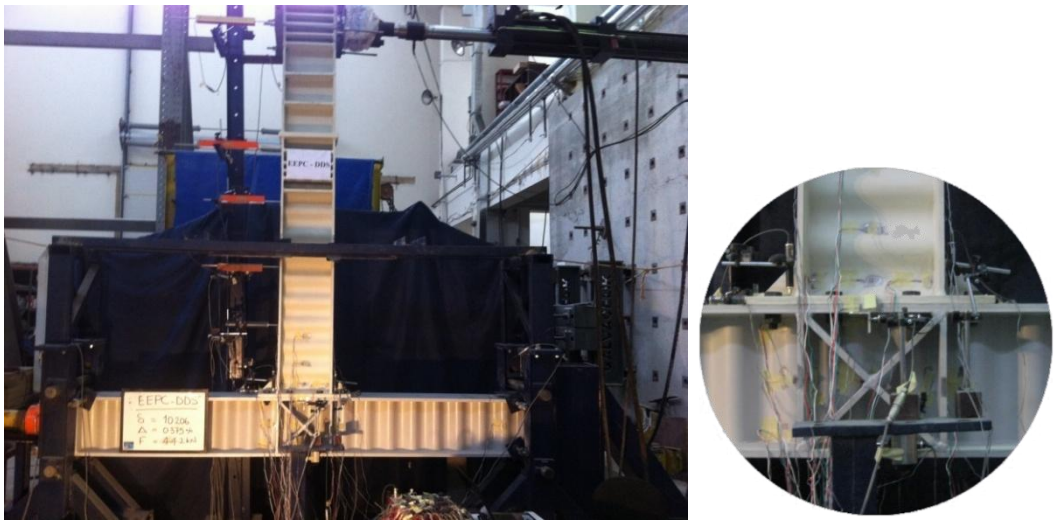
3.5.6 EEPC-DDS numunesi deneyi

Bu numunede kolon gövdesinin tamamı *EEPC-B, EEPC-HS* ve *EEPC-SDS* numunelerinde olduğu gibi 3 mm kalınlıklı sinüzoidal formda levhadan oluşturulmuştur. *EEPC-HS* ve *EEPC-SDS* numuneleri ile benzer şekilde; kiriş başlıklarının hizasında, kolon başlıkları arasında devam eden ve gövdeye temas etmeyen 4 adet süreklilik plakası kullanılmıştır. Bu süreklilik plakaları arasında, iki tanesi ön tarafta, iki tanesi arka tarafta olmak üzere toplam dört adet çapraz levha kullanılmıştır. Tüm levhaların kalınlığı t=15 mm'dir.

EEPC-DDS numunesi, *EEPC-SDS* numunesinde olduğu gibi otomatik eleman üretimine müdahaleye gerek olmadan yeterli performansa sahip bir kolon - kiriş birleşimi oluşturmaya yönelik olarak hazırlanmıştır.

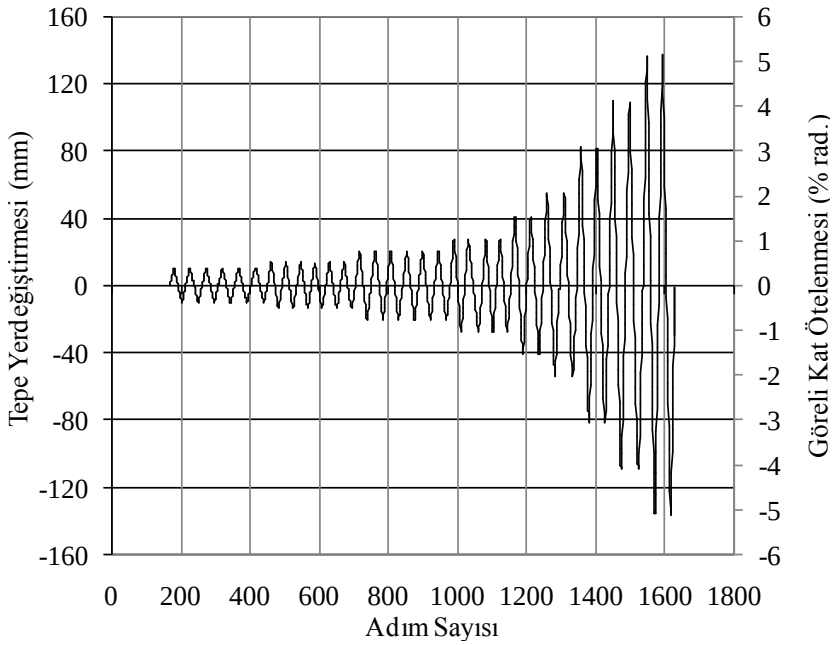
Kiriş diğer numunelerde kullanılan kirişler ile özdeş özelliklere sahiptir.

Numunenin deney düzeneği üzerindeki genel görünümü ve panel bölgesinin yakın görünüşü Şekil 3.168'de gösterilmiştir.



Şekil 3.168 : EEPC-DDS numunesinin genel ve detay görünüşü.

Numuneye etkitilen yerdeğiştirme çevrimleri Şekil 3.169'da gösterilmiştir.



Şekil 3.169 : EEPC-DDS numunesinde yerdeğiştirme adımları.

Deneyde 83 kanaldan okuma yapılmıştır. Bu kanallardan 67 tanesi şekildeğiştirme ölçer, 16 tanesi ise yerdeğiştirme ölçerlerdir.

İlk yerdeğiştirme çevrim grubu, 0.00375 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesidir. Bu eşikte okunan en büyük dayanımlar itmede 44.20 kN, çekmede ise 40.80 kN olmuştur.

0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin 13.68 mm'lik en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 57.10 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde ise 52.60 kN yatay yük dayanımları elde edilmiştir.

20.40 mm en büyük tepe yerdeğiştirmesi değerine karşı gelen 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde itmede 75.70 kN, çekmede ise 73.10 kN dayanım elde edilmiştir.

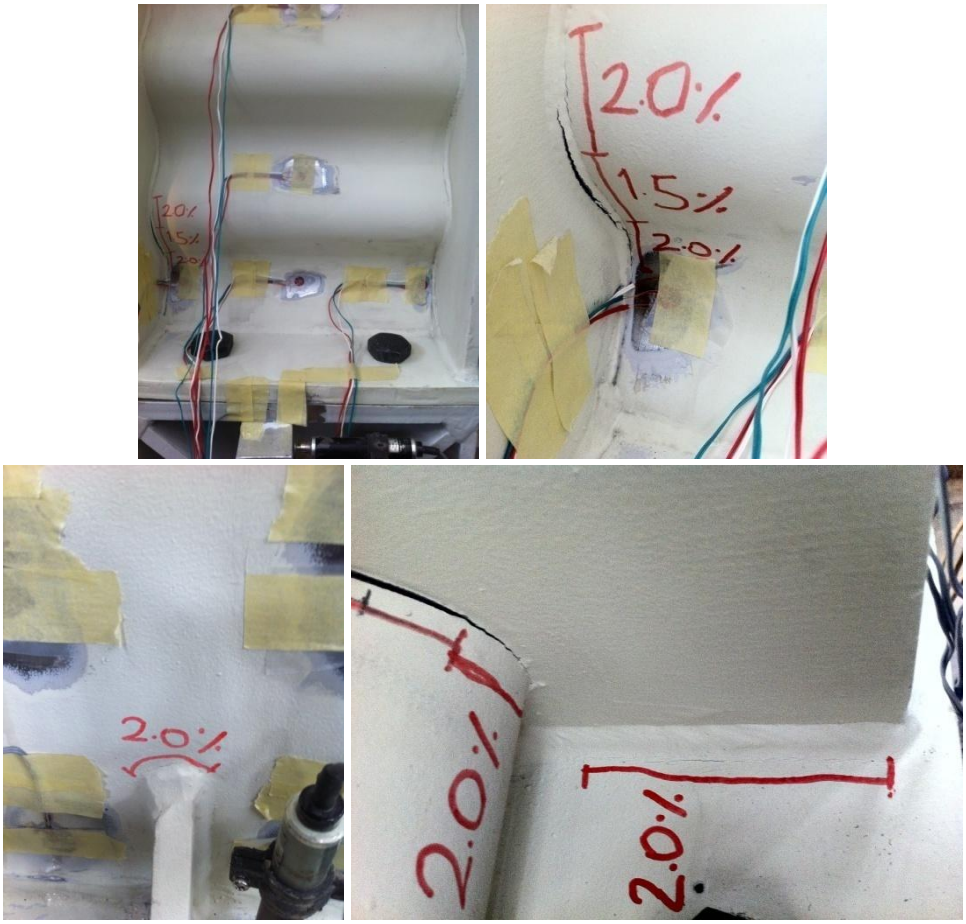
27.27 mm'lik en büyük yerdeğiştirme değerinin etkitildiği 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde itmede 92.60 kN, çekmede ise 91.40 kN yatay yük dayanımı ortaya çıkmıştır.

0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğine gelindiğinde numune üzerinde ilk hasar oluşmuştur. Bu seviyeye ait çevrimler uygulanırken kolonun panel bölgesi dışında kalan bölümünde üst başlık ve gövde arasındaki kaynak dikişinde ve kirişin başlıkları ile gövdesini birleştiren kaynak dikişinde çok ince çatlaklar ortaya çıkmıştır. Bu ötelenme eşiğinin 40.82 mm'lik en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 115.90 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde ise 115.80 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Bu eşiğin sonunda oluşan hasar durumu Şekil 3.170'te verilmiştir.



Şekil 3.170 : EEPC-DDS numunesinin 0.015 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

En büyük tepe yerdeğiştirmesi 54.50 mm olan 0.02 rad.'lık etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin tamamlanmasından sonra kiriş başlıkları ile gövdesi arasındaki kaynak dikişindeki çatlaklar büyümüş ve ayrılmalar başlamıştır. Kolon üst başlığı ile gövdesi arasında bir önceki seviyede oluşan kaynak çatlağı büyümüştür. Kiriş başlığı ile alın plakası arasındaki kaynak dikişinde çatlak oluşmuştur. İlave olarak alın plakası ile kiriş başlıkları arasında bulunan üçgen berkitme levhalarından sol taraftakinin kaynağında çatlak oluşmuştur. Bu eşiğin en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 126.10 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde ise 126.40 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Bu seviyenin tamamlanması sonrasındaki hasar durumu, çekilen fotoğraflarla Şekil 3.171'de gösterilmiştir.



Şekil 3.171 : EEPC-DDS numunesinin 0.02 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

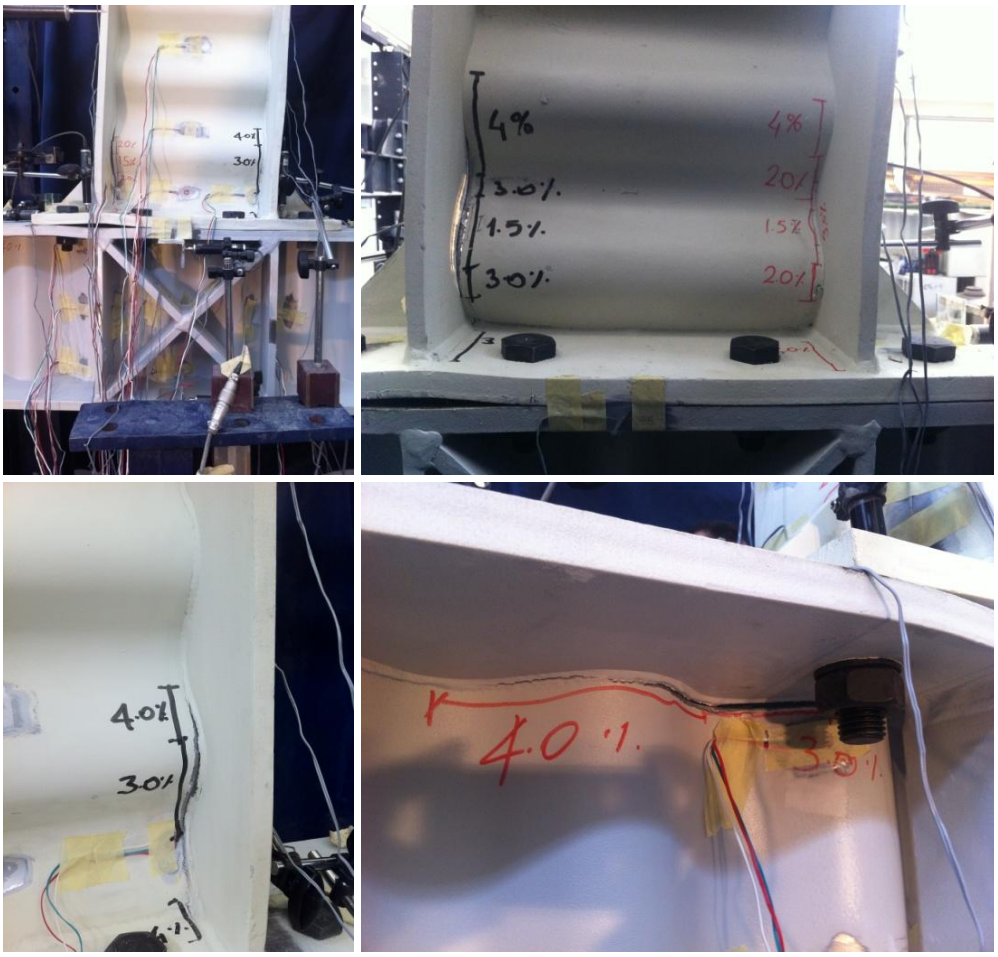
0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde, kiriş başlıkları ile gövdesi arasındaki ayrılmalar büyümüş, çatlaklar ilerlemiştir. Kolon üst başlığı ile gövdesi arasındaki kaynak iyice ayrılmıştır. Kiriş başlıkları ile alın plakasını

birleştiren kaynak dikişlerinde ve sağ taraftaki üçgen berkitme levhanın kiriş başlığı ile olan kaynağında yeni çatlaklar ortaya çıkmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinin 81.60 mm'ye karşı gelen en büyük itme yerdeğiştirmesinin son çevriminde 135.90 kN, en büyük çekme yerdeğiştirmesinin son çevriminde de 136.72 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Çevrim sonunda numunenin hasar durumu Şekil 3.172'deki fotoğraflarda verilmiştir.



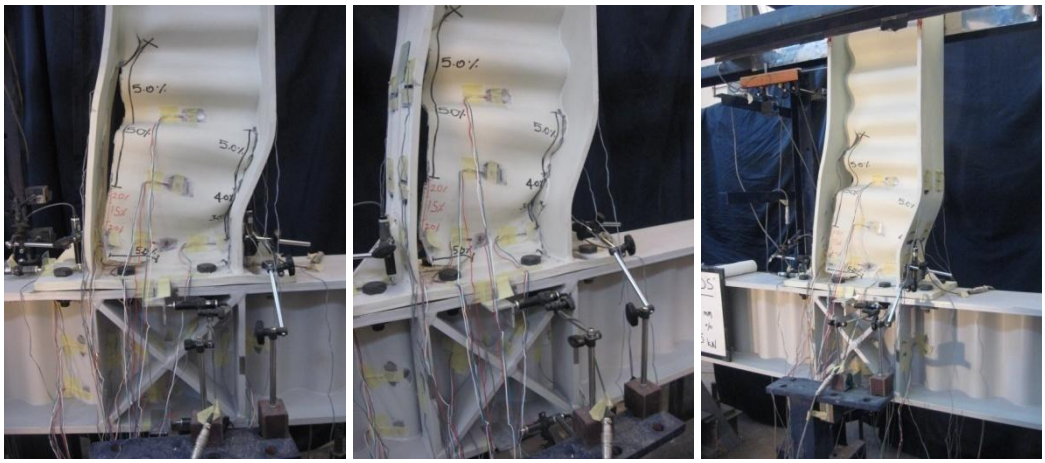
Şekil 3.172 : EEPC-DDS numunesinin 0.03 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

108.90 mm'lik en büyük tepe yerdeğiştirmesinin etkitildiği 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelindiğinde bir önceki seviyede ortaya çıkan hasarlar ve ayrılmalar ilerleyerek büyümüştür. Bu seviyede, itmede ulaşılan en büyük yatay dayanım 144.80 kN, çekmede ulaşılan en büyük yatay dayanım ise 139.50 kN olmuştur. Bu yerdeğiştirme çevriminin sonunda numunede ortaya çıkan hasar durumu Şekil 3.173'te verilmiştir.



Şekil 3.173 : EEPC-DDS numunesinin 0.04 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

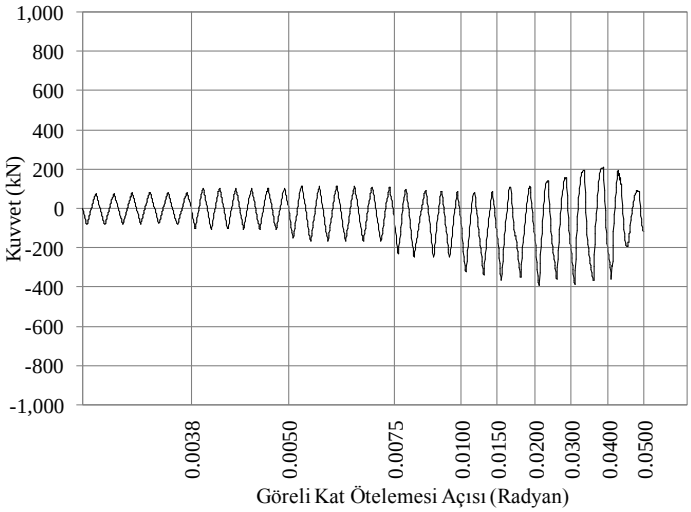
0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin tamamlanması ile kiriş kesitinde başlıklar ve gövde birbirlerinden tamamen ayrılmış, kiriş gövdesi de yırtılarak kiriş elemanın bütünlüğü kaybolmuştur. Ayrıca alın plakası ile kiriş gövdesi arasındaki kaynak dikişlerinin önemli bölümü yırtılmıştır. Bu etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde sisteme etkitilen en büyük tepe yerdeğiştirmesi 136.10 mm'dir. İtme durumunda ulaşılan en büyük dayanım 45.30 kN olurken, çekme durumunda 43.50 kN'luk yatay yük dayanımı elde edilmiştir. Deney sonunda numunenin genel hasar durumu Şekil 3.174'te verilmiştir.



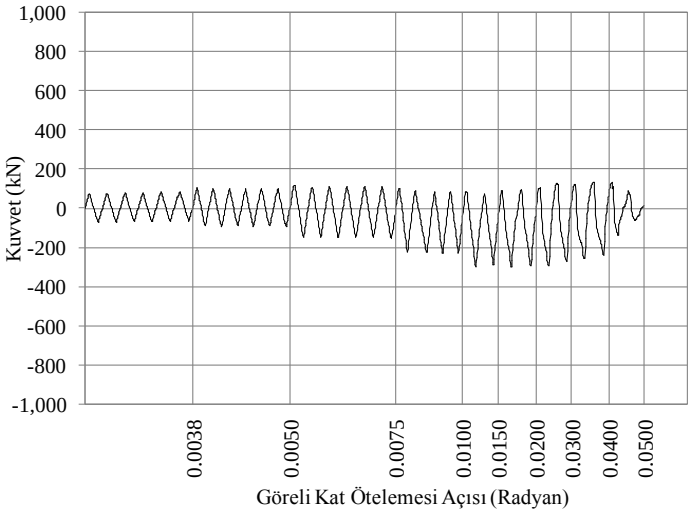
Şekil 3.174 : EEPC-DDS numunesinin 0.05 rad. seviyesi sonunda hasar durumu.

EEPC-DDS numunesinde itme ve çekme durumlarında oluşan yatay yük dayanımları simetriğe yakın çıkmıştır.

Panel bölgesi içinde yer alan çapraz elemanlar üzerine yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen şekildeğiştirmelerin, ön ve arka yüzdeki elemanlardan aynı doğrultuda olanlarının ortalaması alınarak kuvvete dönüştürülmüştür. Çapraz elemanlar için eksenel kuvvet - göreli kat ötelenmesi açısı ilişkisi çizilmiştir, Şekil 3.175 ve Şekil 3.176. Sağ doğrultulu çaprazda 400 kN, sol doğrultulu çaprazda ise 300 kN basınç kuvveti oluşmuştur. Yük deney sonuna kadar kararlı olarak yön değiştirmiş ve burkulma oluşmamıştır.

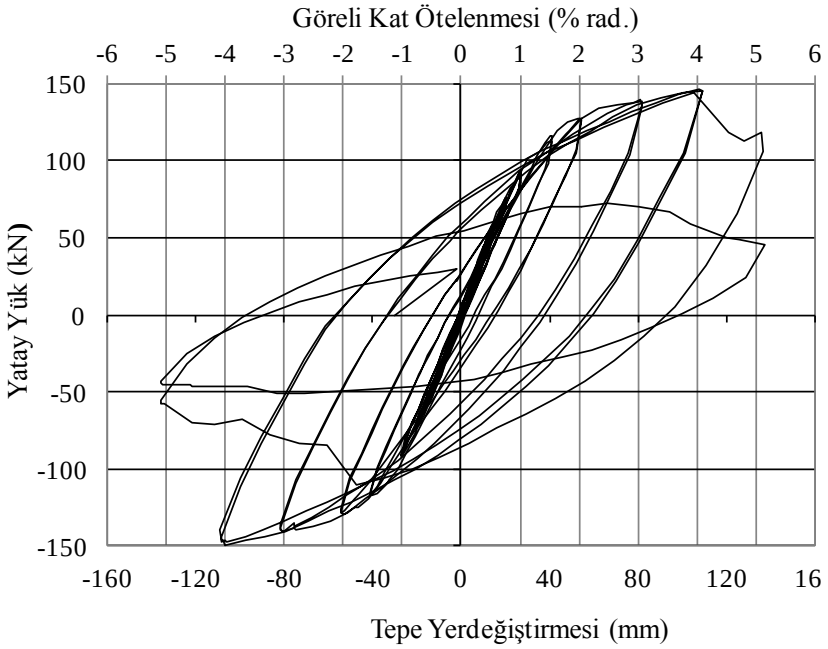


Şekil 3.175 : EEPC-DDS numunesinin sağ doğrultulu diyagonal elemanlarında kuvvet değişimi.



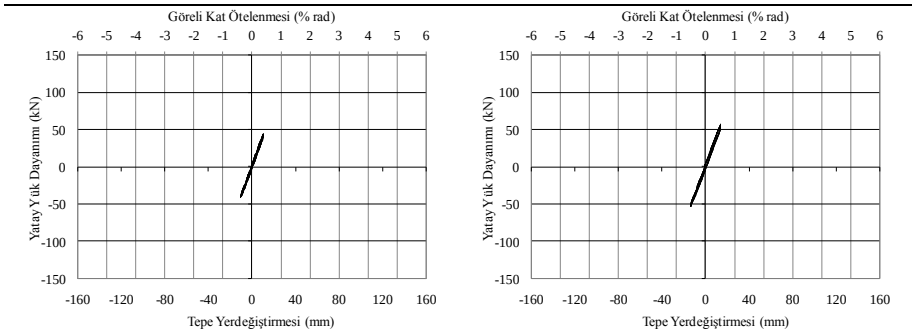
Şekil 3.176 : EEPC-DDS numunesinin sol doğrultulu diyagonal elemanlarında kuvvet değişimi.

EEPC-DDS numunesinde elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme grafiği Şekil 3.177'de verilmiştir.

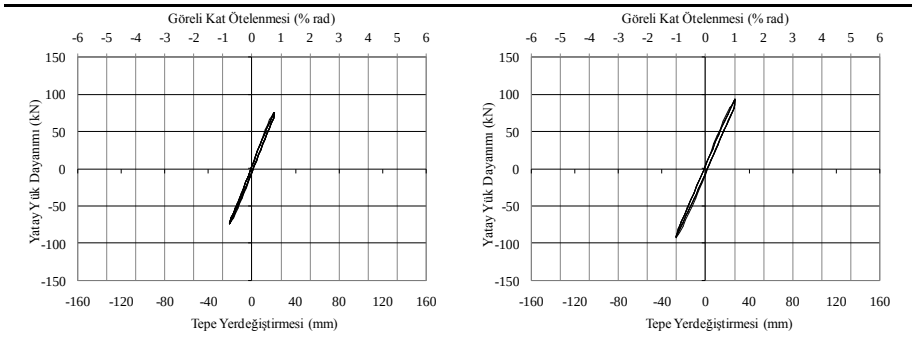


Şekil 3.177 : EEPC-DDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

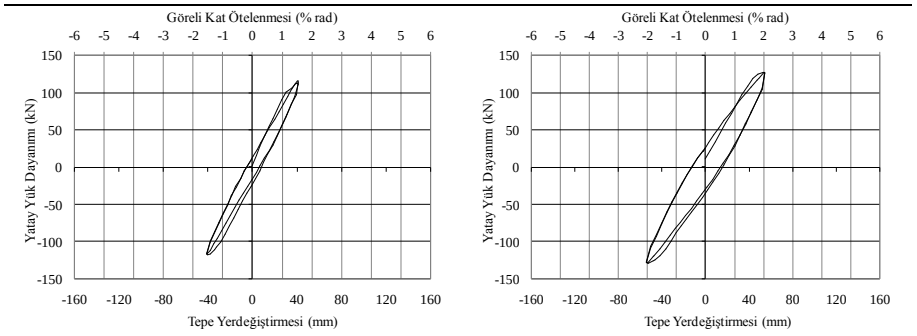
Yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisini oluşturan çevrimler ayrıklaştırıldığında, elastik olmayan davranışın 0.015 rad. - 0.02 rad. düzeyinden itibaren başladığı net olarak izlenmektedir, Şekil 3.178.



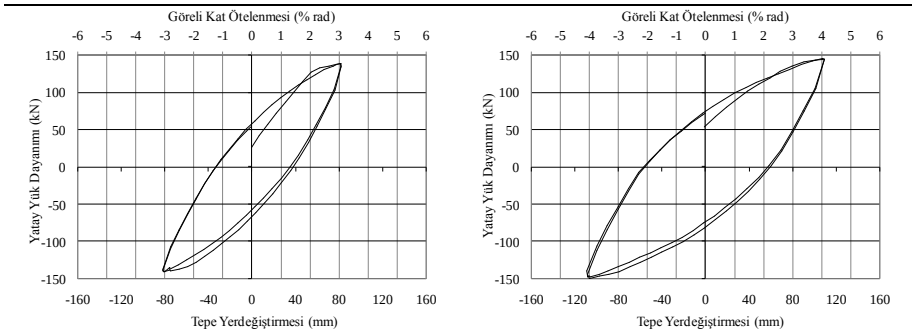
0.00375 rad. 0.00500 rad.



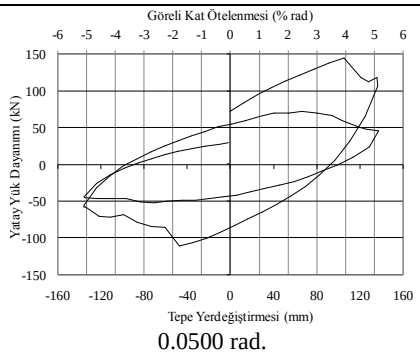
0.00750 rad. 0.0100 rad.



0.0150 rad. 0.0200 rad.



0.0300 rad. 0.0400 rad.

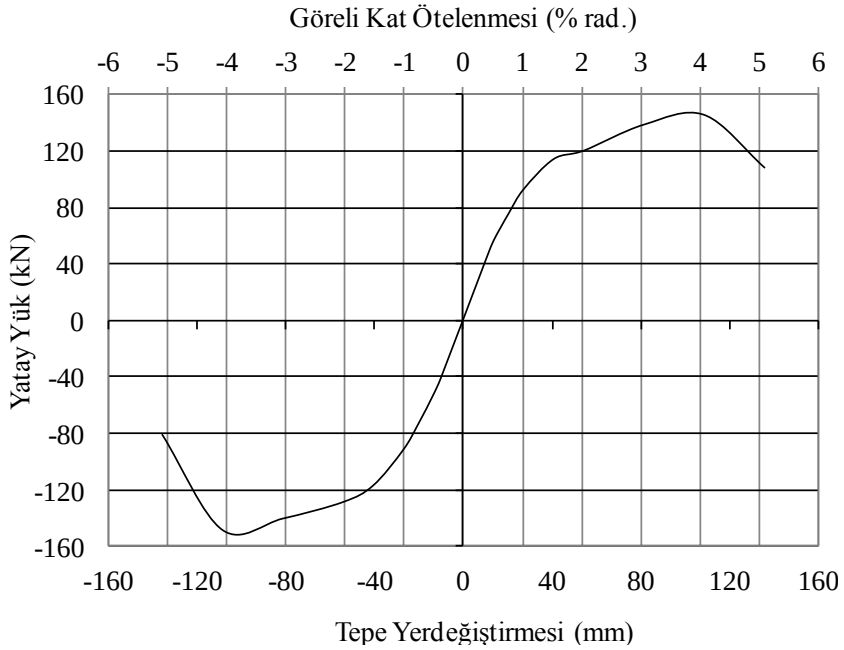


0.0500 rad.

Şekil 3.178 : EEPC-DDS numunesi ayrıklaştırılmış yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde tekrarlanan iki çevrimin benzer sonuç verdiği ancak 0.05 rad. aşamasında yırtılma nedeniyle sistem kararlılığının bozulduğu görülmektedir.

Yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi çevrimlerinin zarf eğrisi Şekil 3.179'da verilmiştir.



Şekil 3.179 : EEPC-DDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrisi.

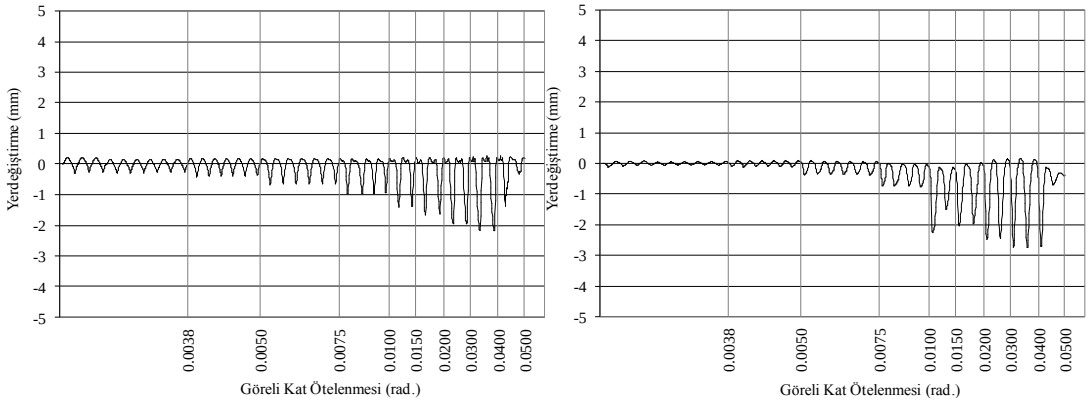
Sisteme etkitilen yerdeğiştirme çevrimleri sonucunda oluşan yatay yük dayanımları, oluşan kaynak çatlakları ve ayrılmalara rağmen 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin sonuna kadar artma eğiliminde olmuştur. 0.05 rad. eşiğine gelindiğinde, kiriş başlık ve gövdesinin tamamen ayrılması ve gövdenin yırtılması ile dayanımda ani düşüş meydana gelmiştir.

Numunede kiriş ucunda ölçülen düzlem dışı hareket ile mesnet bölgelerinde oluşan düşeydeki yerdeğiştirmeleri kontrol etmek amacı ile yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerden alınan veriler Şekil 3.180 ve Şekil 3.181'de gösterilmiştir.



Şekil 3.180 : EEPC-DDS numunesinde düzlem dışı yerdeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Panel bölgesine yakın bölümde kiriş başlıkları ile gövdesi arasındaki kaynakların tamamen çatladığı, panel bölgesi dışında ise kolon üst başlığı ile gövdesi arasındaki kaynak dikişinin ayrıldığı 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde, en büyük düzlem dışı hareket 4.45 mm olarak kaydedilmiştir. Bu aşamada düzlem dışı hareketin düzlem içi tepe yerdeğiştirmesine oranı 1/25 olmuştur.

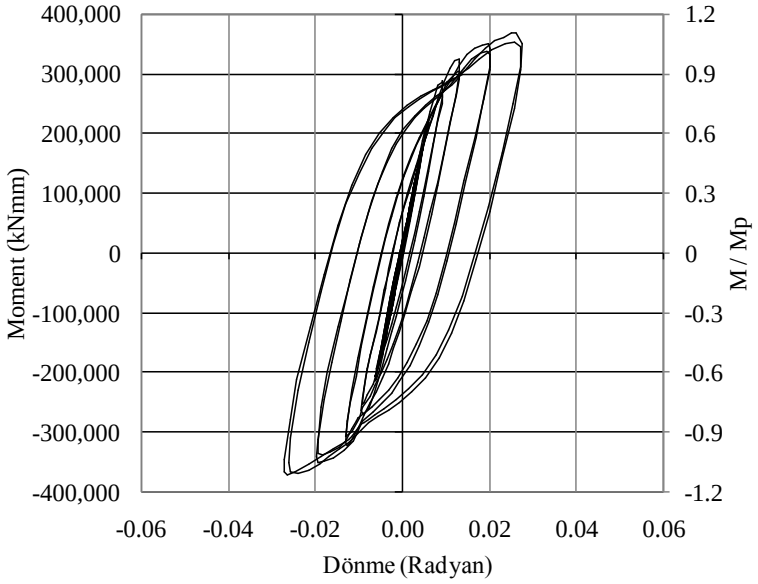


a. Sol mesnet *b. Sağ mesnet*

Şekil 3.181 : EEPC-DDS numunesinde mesnet düşey hareketi - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

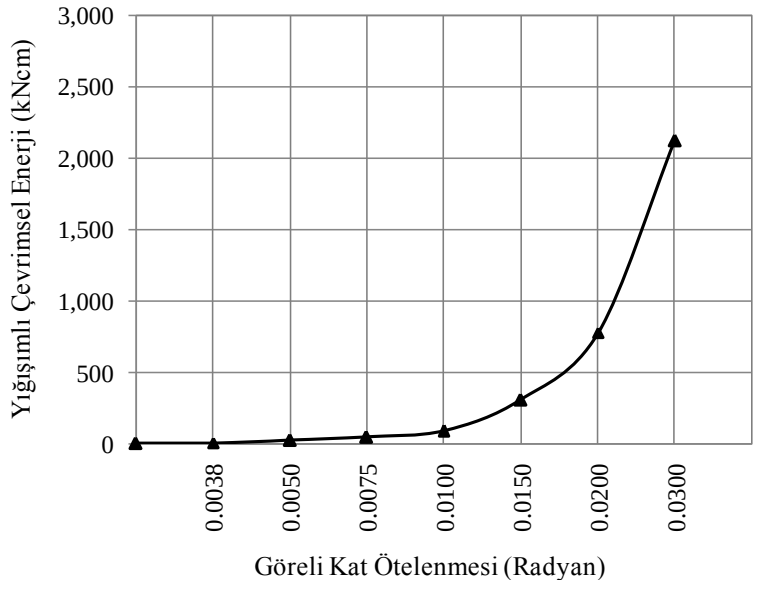
Sisteme 108.90 mm tepe yerdeğiştirmesinin etkitildiği bu aşamada sol mesnetteki düşey hareket 2.05 mm, sağ mesnetteki düşey hareket ise 2.48 mm olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre sol mesnette kaydedilen en büyük düşey hareketin yatay yerdeğiştirmeye oranı 1/53, sağ mesnetin en büyük düşey hareketinin yatay yerdeğiştirmeye oranı ise 1/44 olmuştur.

Alın plakasına değen düşey konumlu yerdeğiştirme ölçerlerin göreli hareketlerinden faydalanılarak elde edilen moment - dönme ilişkisi Şekil 3.182'de verilmiştir. 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenme eşiğinin çevrimleri uygulanırken yerdeğiştirme ölçerlerin konumları bozulduğu için diyagram 0.04 rad. göreli kat hareketine kadar çizilmiştir. Elde edilen en büyük kiriş taban momentinin plastik moment kapasitesine oranı 1.00 olmuştur.



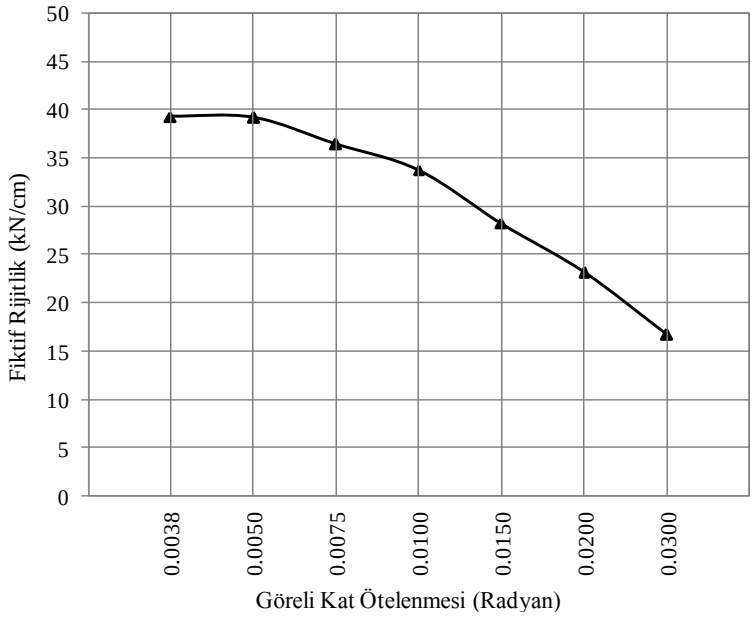
Şekil 3.182 : EEPC-DDS numunesinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkisi.

Yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinden üretilen göreli kat ötelenmesi - yığışımlı çevrimsel enerji grafiği Şekil 3.183'te verilmiştir.



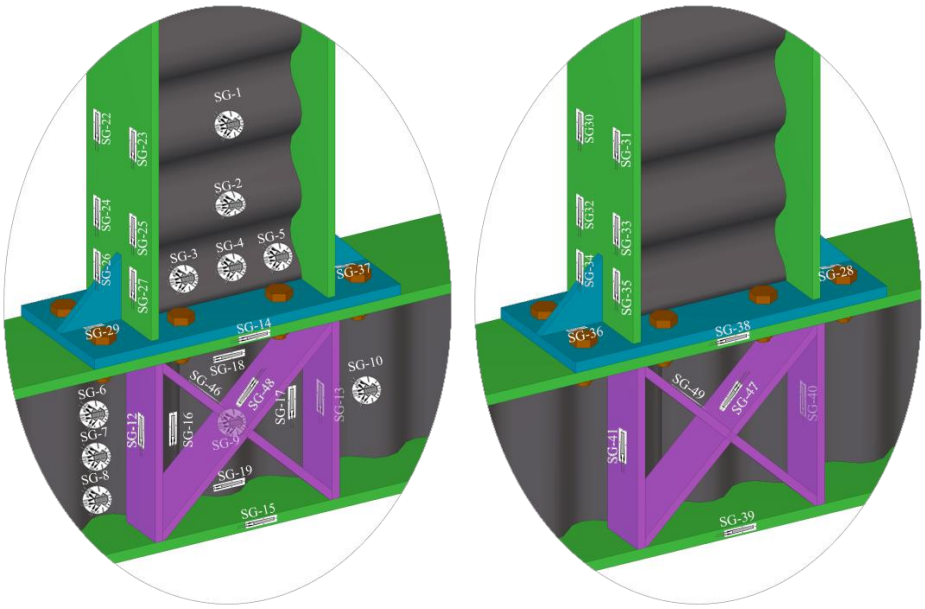
Şekil 3.183 : EEPC-DDS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi.

Yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisinden elde edilen göreli kat ötelenmesi - fiktif rijitlik ilişkisi ise Şekil 3.184'te verilmiştir. Başlangıçta 39 kN/cm olan yatay rijitliğin, 0.03 rad. düzeyi sonunda 16 kN/cm'ye düştüğü görünmektedir.



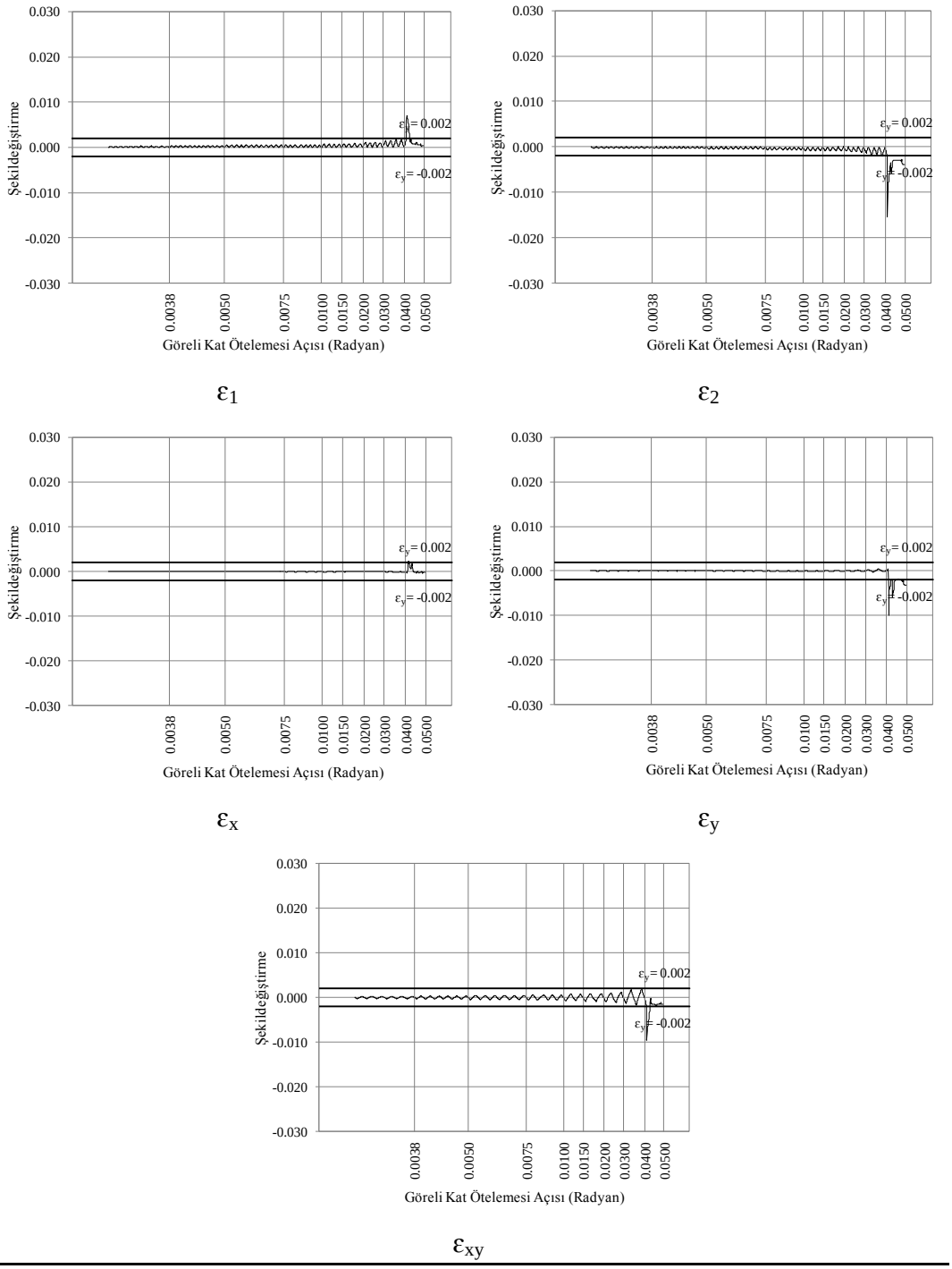
Şekil 3.184 : EEPC-SDS numunesinde rijitlik değişimi.

Panel bölgesi ve yakın çevresine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlerin konumları Şekil 3.185'te verilmiştir.



Şekil 3.185 : EEPC-DDS numunesinin panel bölgesi ve yakın çevresindeki şekildeğiştirme ölçerler.

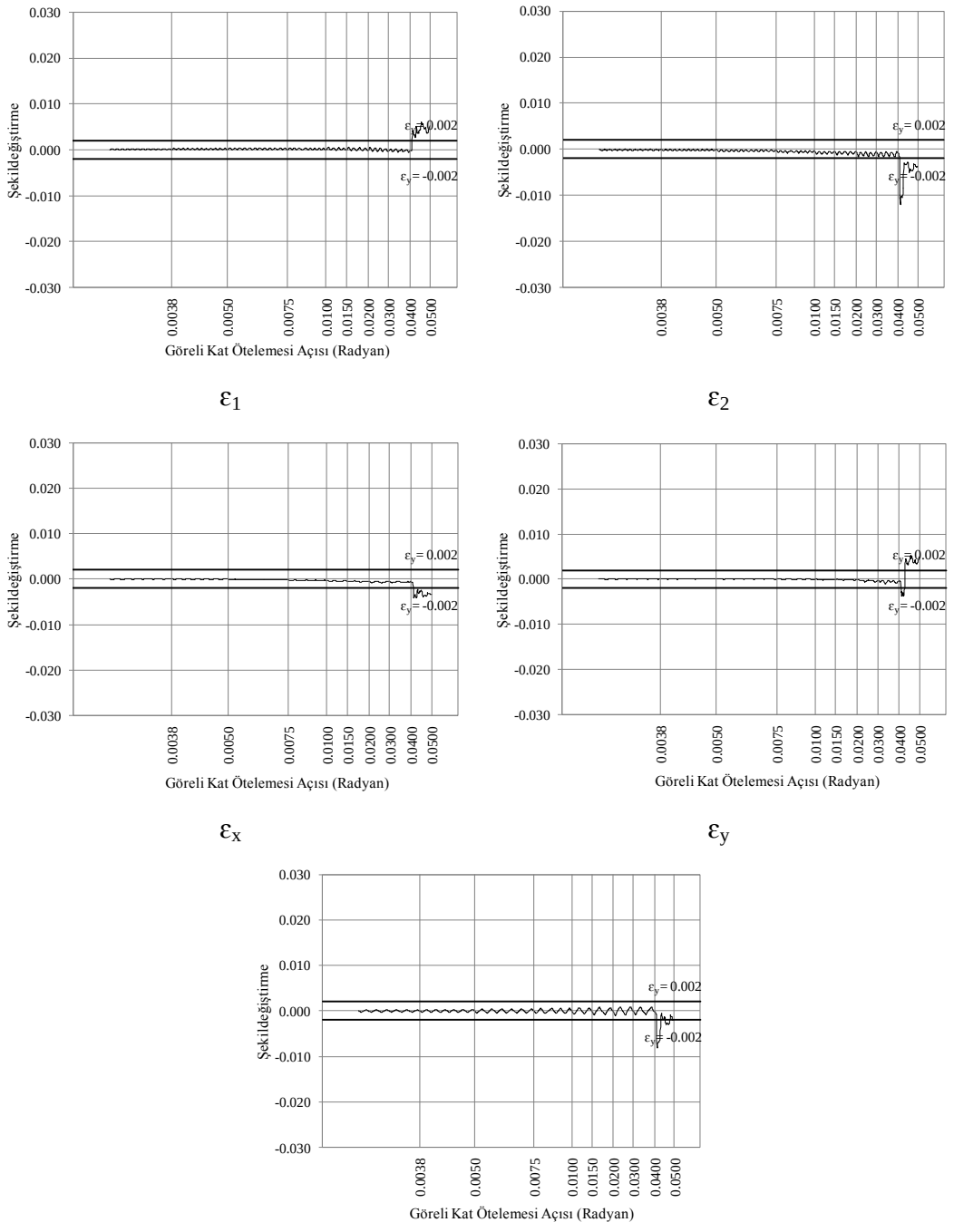
Kiriş gövdesine yapıştırılan SG-1 isimli rozet tipi şekildeğiştirme ölçer aracılığı ile elde edilen ε_1, ε_2 asal şekildeğiştirmeleri ile ε_x, ε_y ve ε_{xy} şekildeğiştirmelerine ait grafikler Şekil 3.186'da verilmiştir.



Şekil 3.186 : EEPC-DDS / SG-1 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

İlgili şekildeğiştirme ölçerden alınan sonuçlara göre; bu bölgede akma 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesine ait yerdeğiştirme çevrimleri uygulanırken, kiriş gövdesi yırtılmadan hemen önce gerçekleşmiştir.

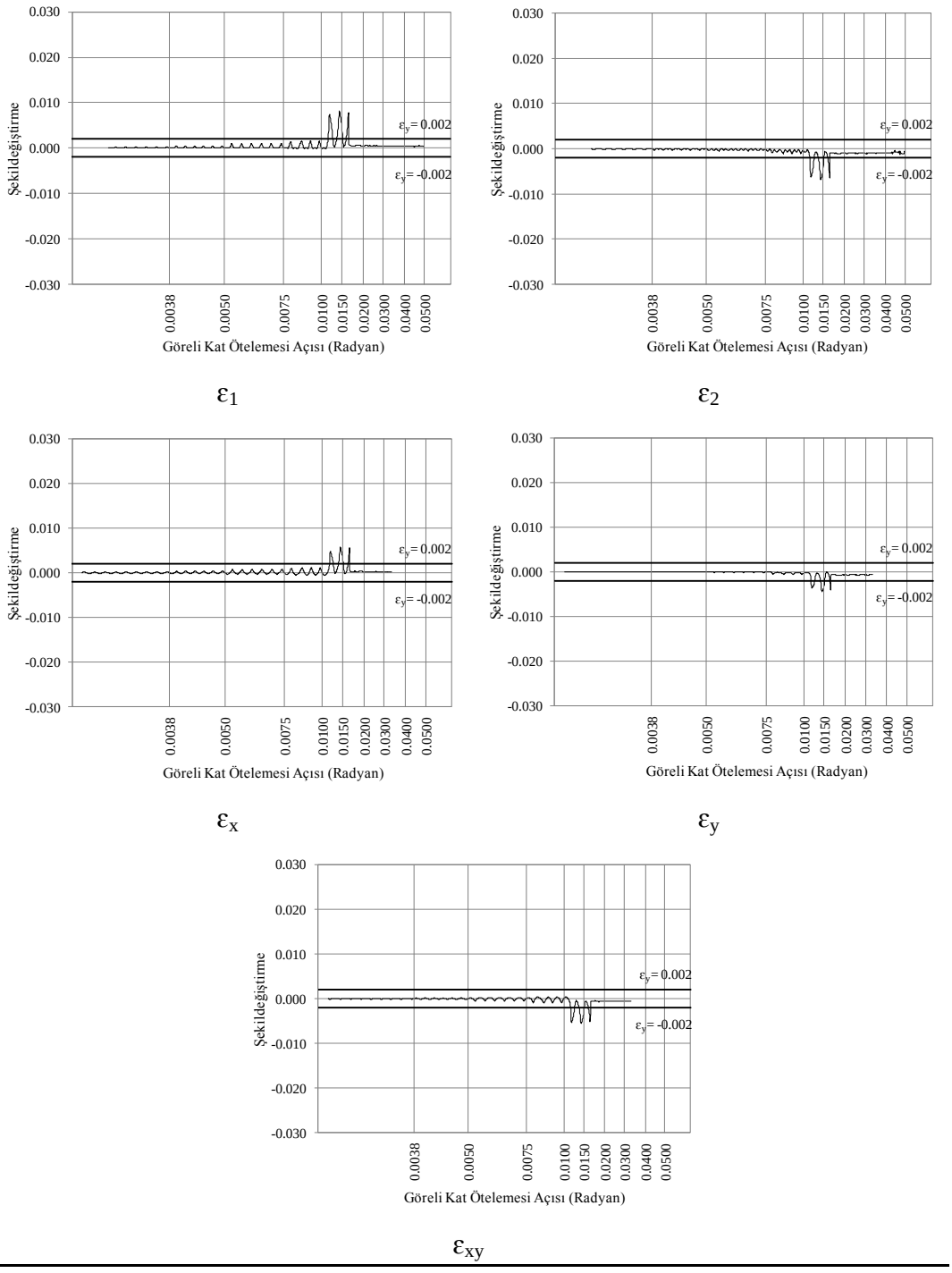
Kiriş gövdesi üzerindeki diğer şekildeğiştirme ölçer SG-2'den alınan verilerle çizilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.187'de verilmiştir.



Şekil 3.187 : EEPC-DDS / SG-2 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Kirişin bu bölgesindeki plastikleşmesi SG-1 şekildeğiştirme ölçerinde de olduğu gibi 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri uygulanırken başlamıştır.

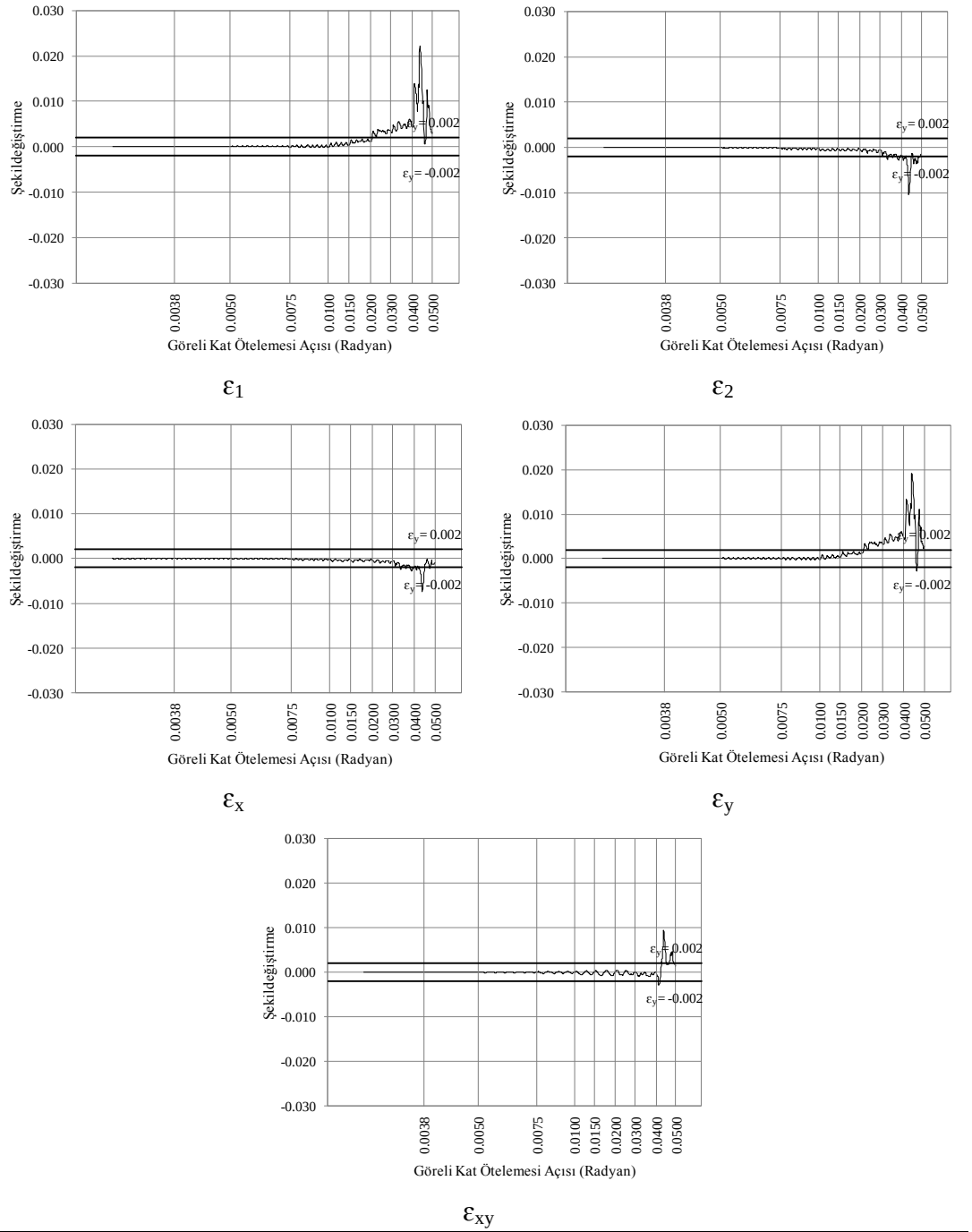
Kiriş gövdesinde, panel bölgesine en yakın konumda yer alan SG-3 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.188'de verilmiştir.



Şekil 3.188 : EEPC-DDS / SG-3 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki ilk plastikleşme, *EEPC-SDS* numunesinde de olduğu gibi, kiriş başlıkları ile gövdesini birleştiren kaynakta ilk çatlağın oluştuğu 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri sırasında meydana gelmiştir.

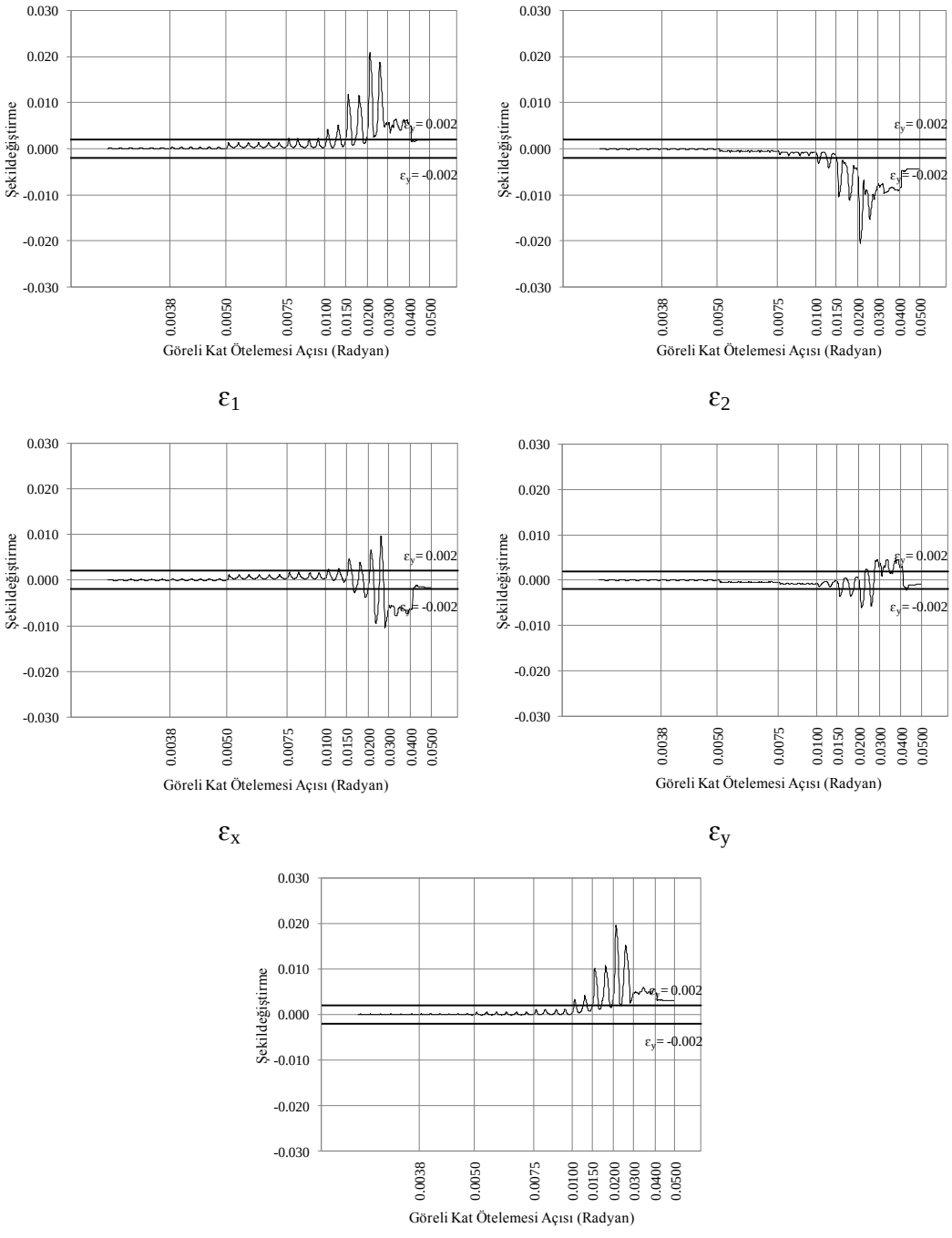
SG-3 şekildeğiştirme ölçeri ile aynı yatay kesitte bulunan SG-4 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.189'da gösterilmiştir.



Şekil 3.189 : EEPC-DDS / SG-4 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki ilk plastikleşme, *EEPC-SDS* numunesine benzer şekilde, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin yerdeğiştirme çevrimleri uygulanırken meydana gelmiştir.

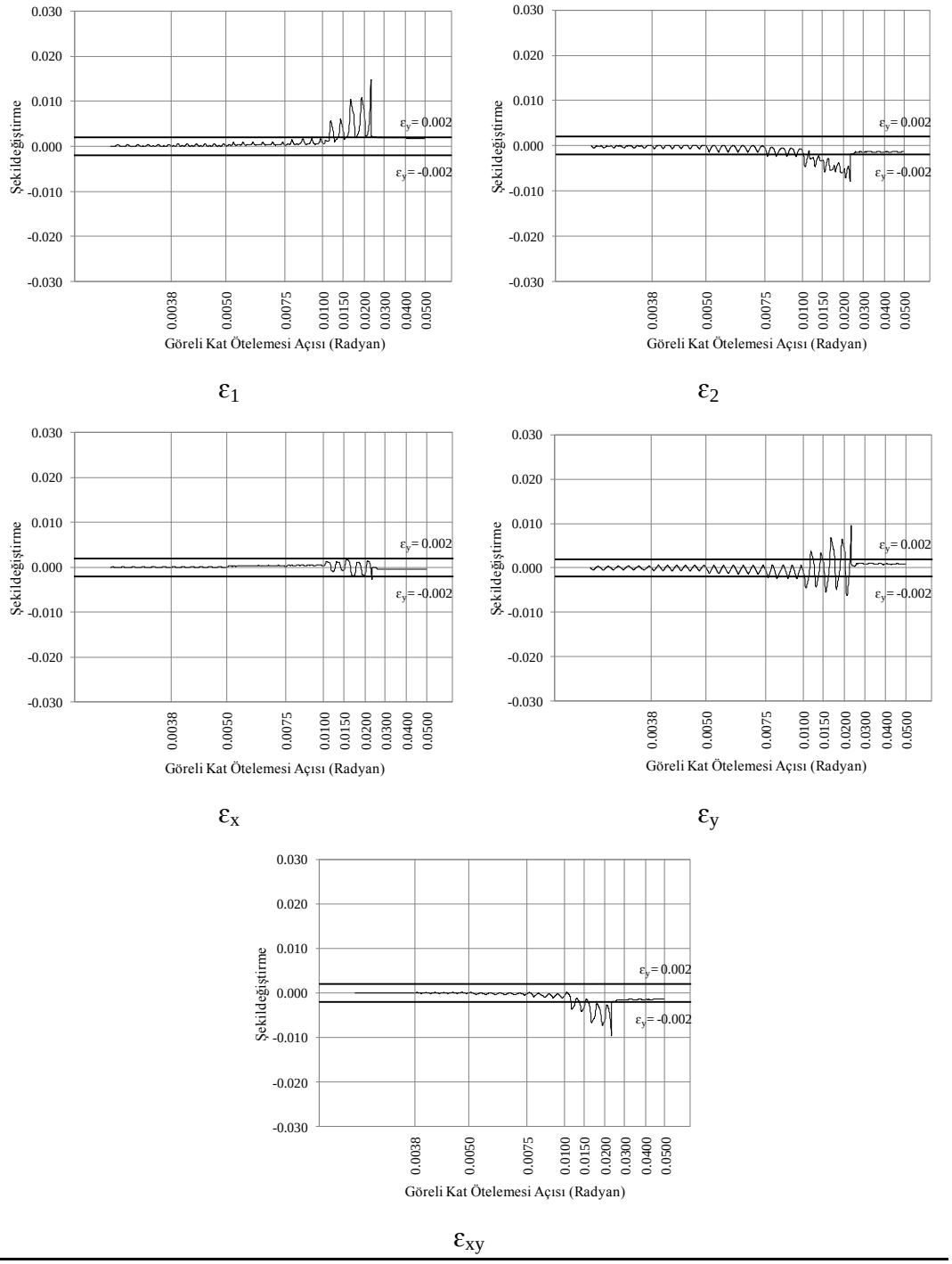
Aynı kesitteki diğer rozet tip şekildeğiştirme ölçer SG-5'ten alınan şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.190'da verilmiştir.



Şekil 3.190 : EEPC-DDS / SG-5 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu bölgedeki ilk plastikleşme, SG-3 şekildeğiştirme ölçeri ile benzer şekilde 0.015 rad. seviyesinin çevrimleri uygulanırken oluşmuştur.

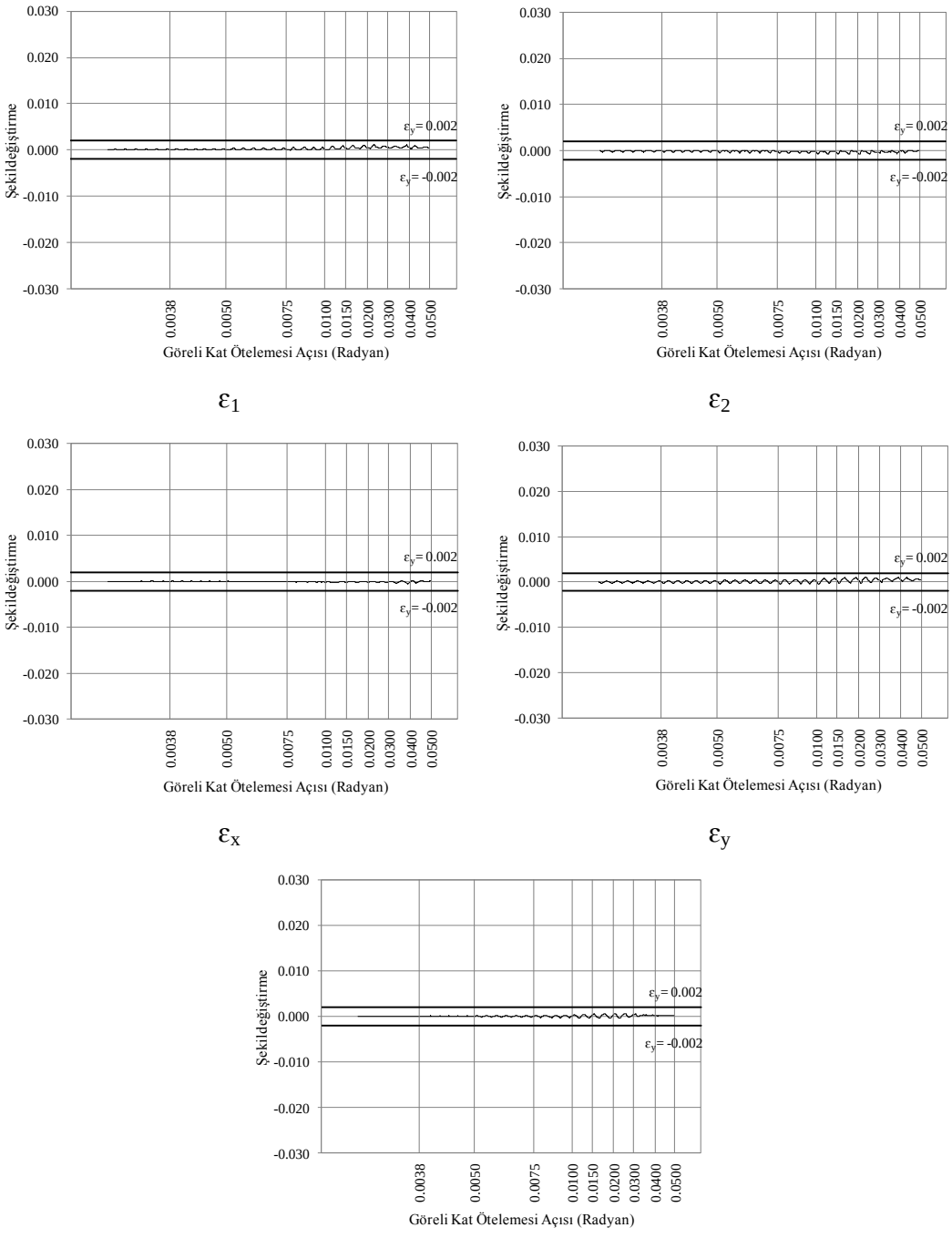
Kolonun panel bölgesi dışına yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden SG-6'dan elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.191'de gösterilmiştir.



Şekil 3.191 : EEPC-DDS / SG-6 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Bu şekildeğiştirme ölçerin vermiş olduğu sonuçlara göre, akma sınırı 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenme eşiğinin çevrimleri sırasında aşılmıştır.

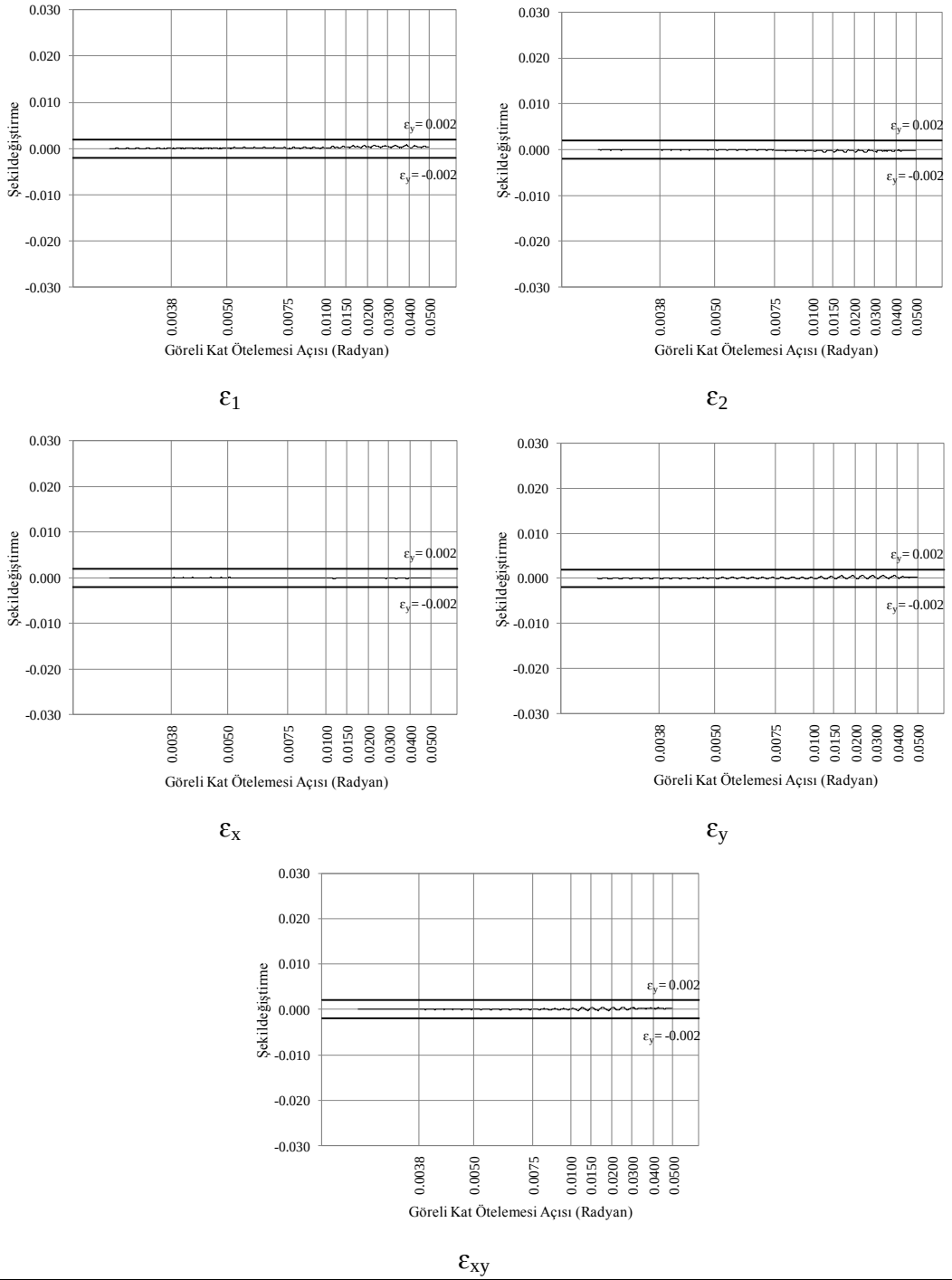
Panel bölgesinin dışında kolonun sol parçası üzerindeki SG-7 şekildeğiştirme ölçerinden alınan şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.192'de verilmiştir.



Şekil 3.192 : EEPC-DDS / SG-7 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

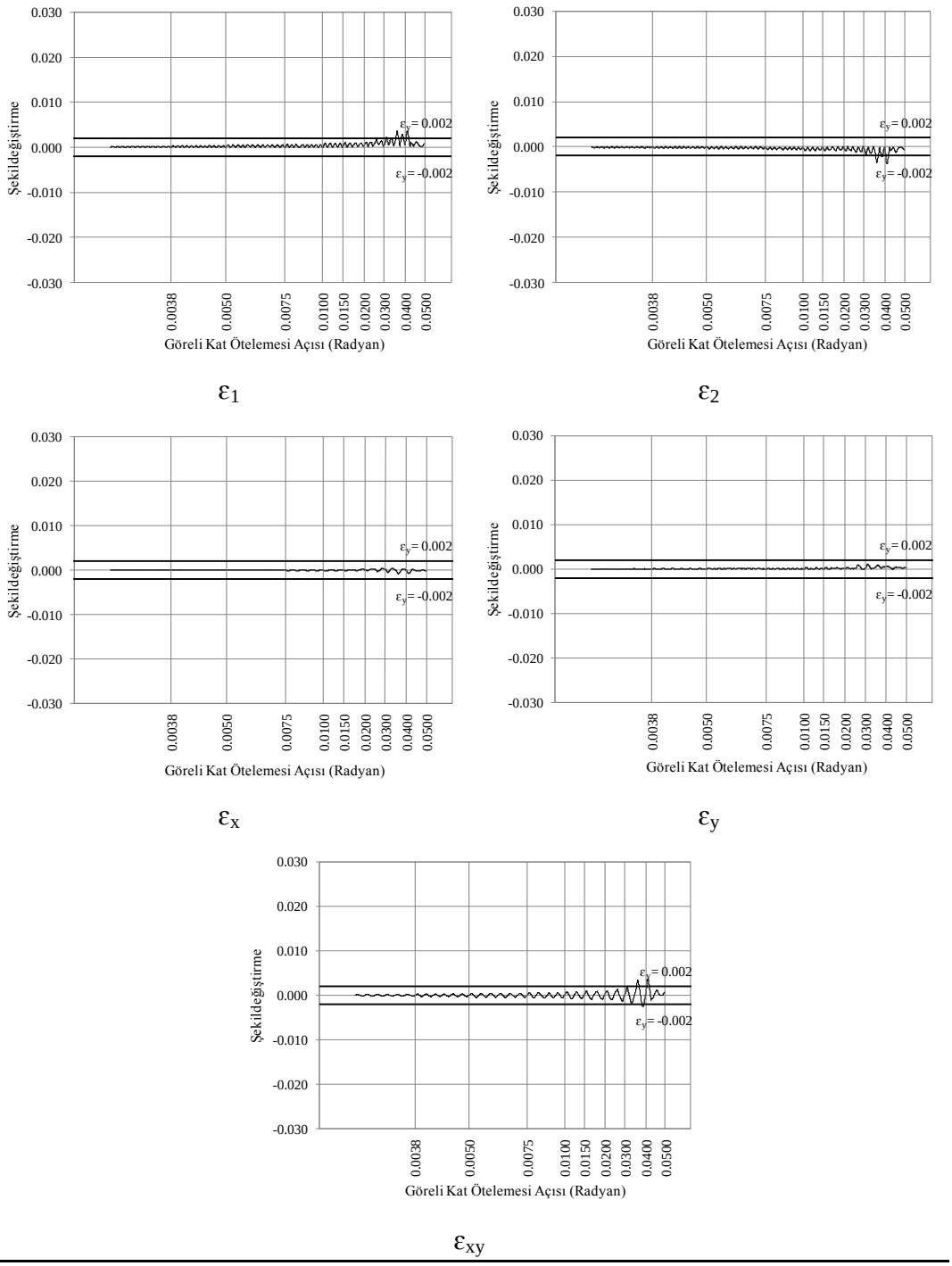
Bu şekildeğiştirme ölçerin bulunduğu bölgede deney sonuna kadar plastikleşme meydana gelmemiştir.

Panel bölgesi dışında kolon alt başlığına en yakın konumdaki SG-8 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.193'te verilmiştir.



Şekil 3.193 : EEPC-DDS / SG-8 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

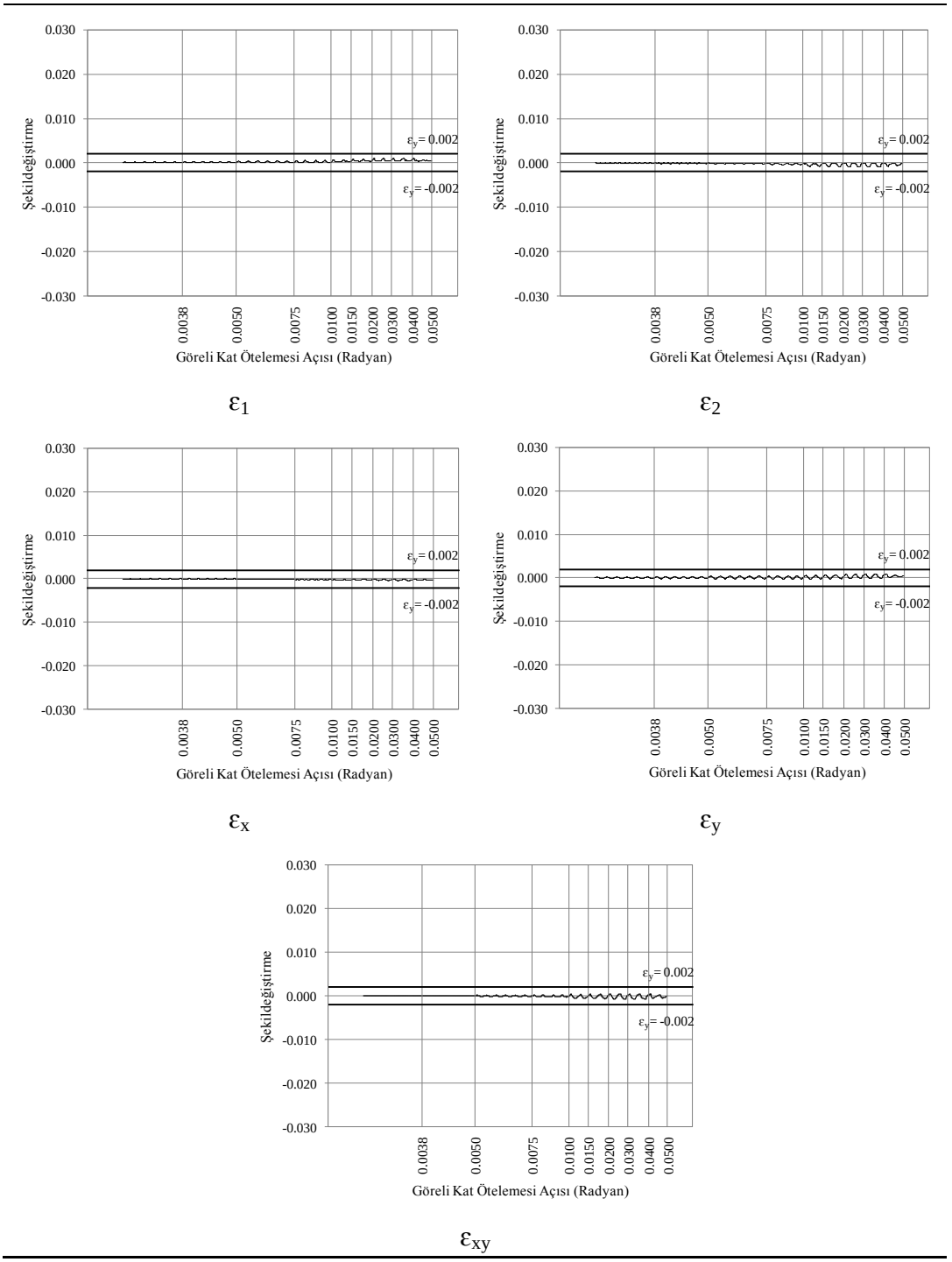
Panel bölgesinin merkezinde yer alan SG-9 isimli rozet tip şekildeğiştirme ölçerin vermiş olduğu şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.194'te gösterilmiştir.



Şekil 3.194 : EEPC-DDS / SG-9 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

Panel bölgesindeki ilk plastikleşme, numuneye 108.90 mm'lik tepe yerdeğiştirmesinin etkitildiği 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimi uygulanırken gerçekleşmiştir.

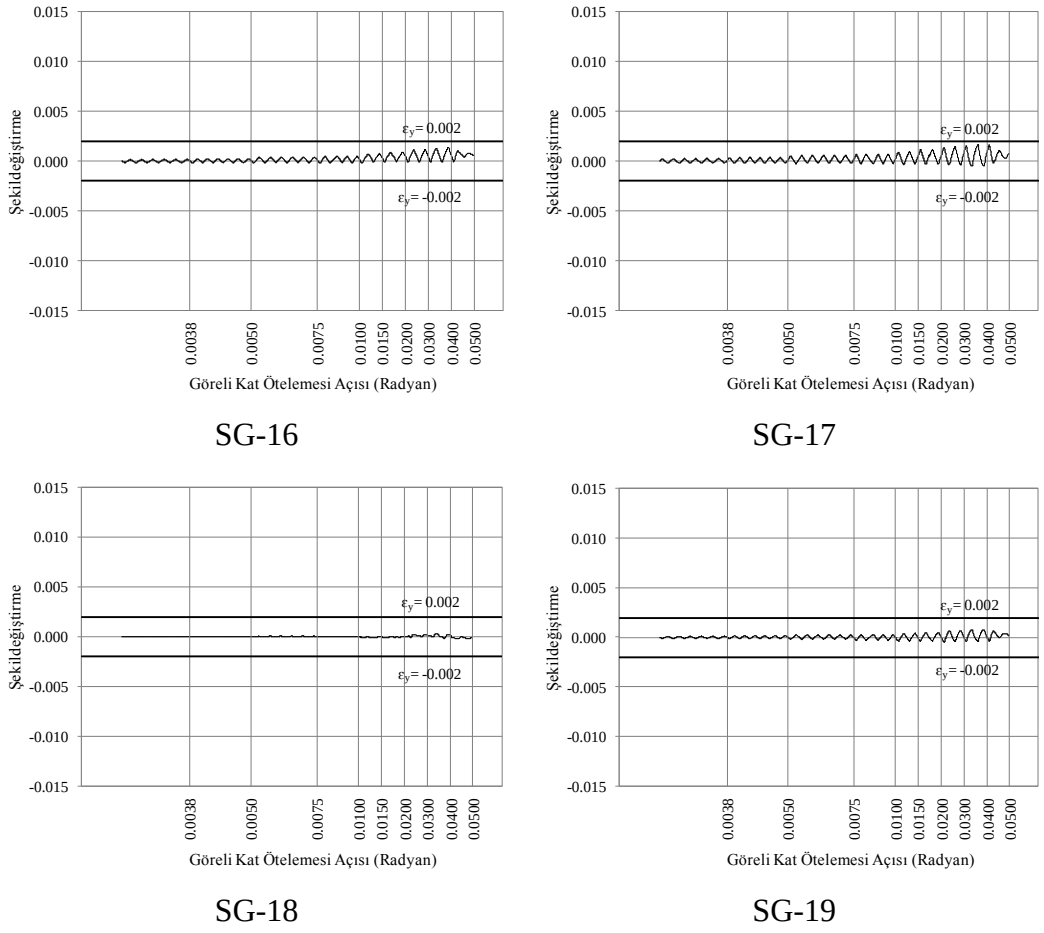
Panel bölgesi dışında yer alan şekildeğiştirme ölçerlerden sonuncusu olan SG-10'dan alınan şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.195'te gösterilmiştir.



Şekil 3.195 : EEPC-DDS / SG-10 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkisi.

SG-10 şekildeğiştirme ölçerinden alınan sonuçlar, bu bölgedeki şekildeğiştirmelerin akma sınır değerinin altında olduğunu göstermiştir.

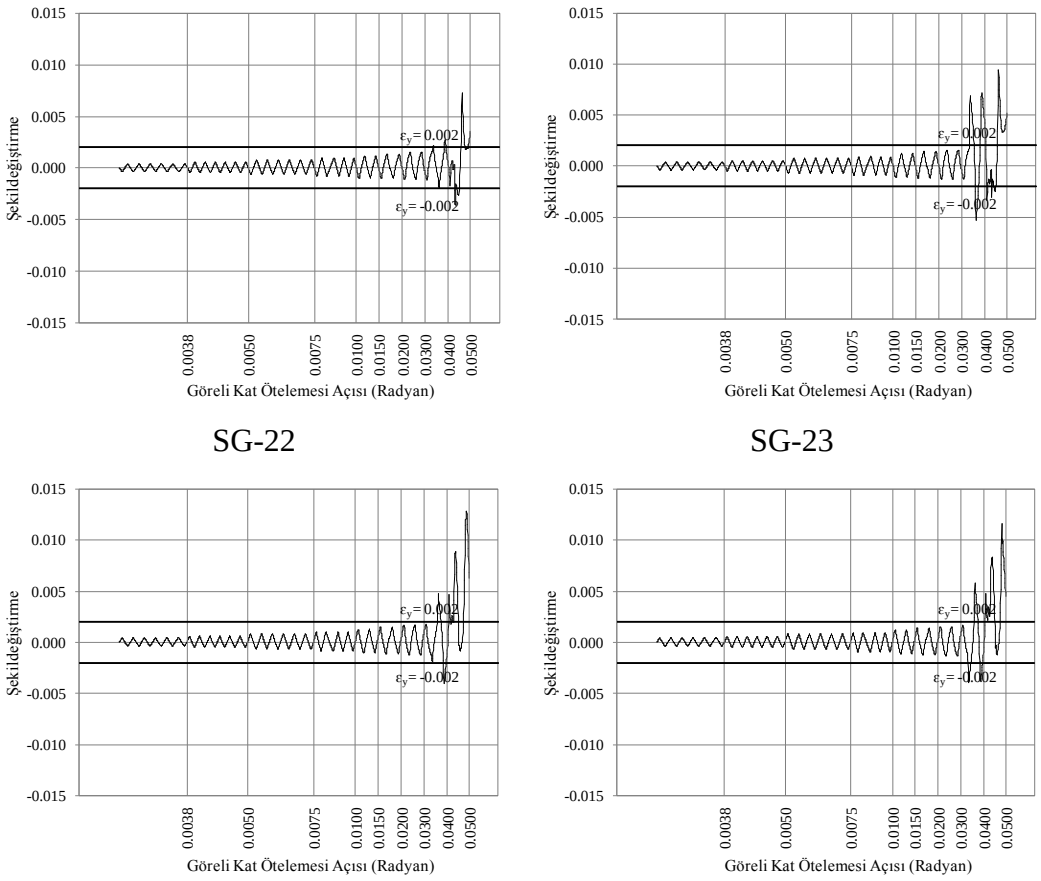
Süreklilik plakaları ve kolon başlıkları ile sınırlanan panel bölgesinin kenarlarına yapıştırılan tek eksenli SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme ölçerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 3.196'da verilmiştir.



Şekil 3.196 : EEPC-DDS / SG-16, SG-17, SG-18 ve SG-19 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Panel bölgesi içindeki tek eksenli şekildeğiştirme ölçerlerin bulunduğu bölgelerde akma meydana gelmemiştir.

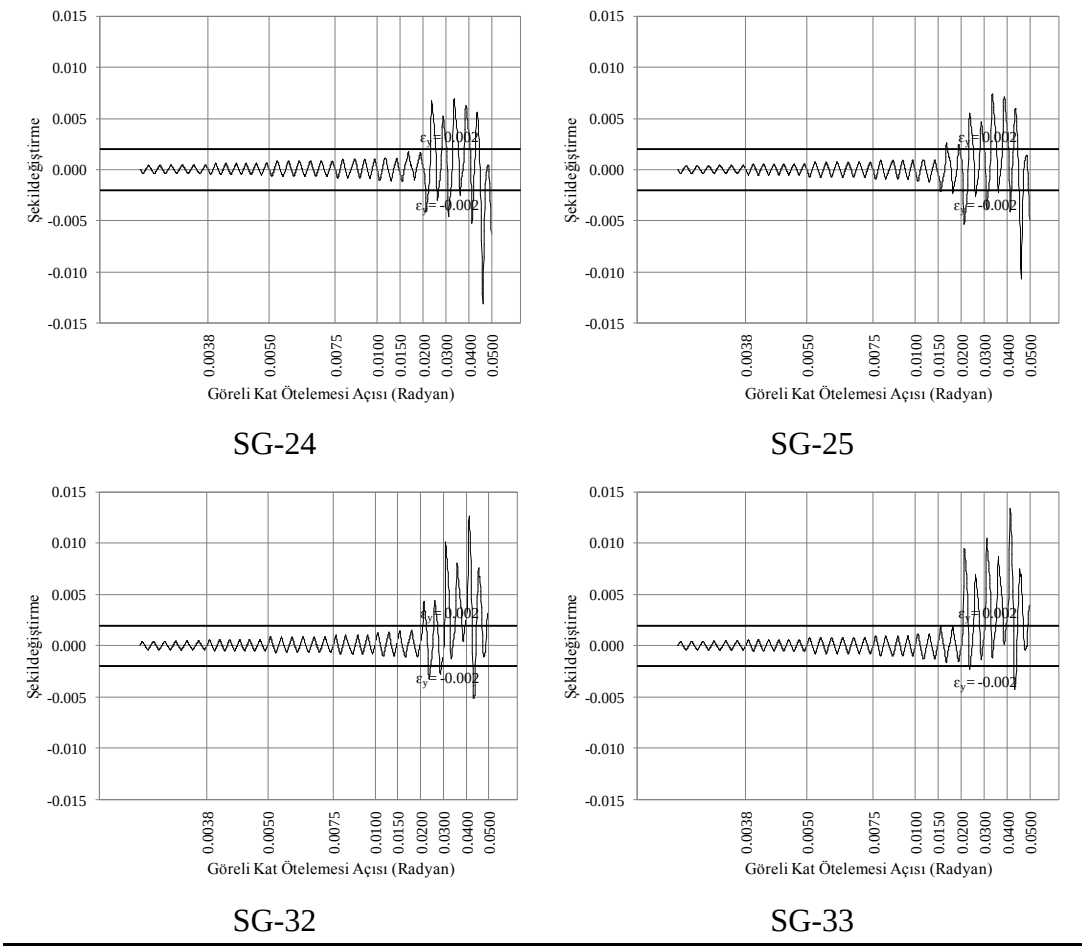
Alın plakasından kiriş kesit yüksekliği kadar ötedeki kesitte, kiriş başlıklarında yer alan SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan sonuçlar Şekil 3.197'de gösterilmiştir.



Şekil 3.197 : EEPC-DDS / SG-22, SG-23, SG-30 ve SG-31 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Bu şekildeğiştirme ölçerlerden alınan verilere göre, söz konusu kesitte 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi yerdeğiştirme çevrimleri uygulanırken plastikleşmeler başlamıştır.

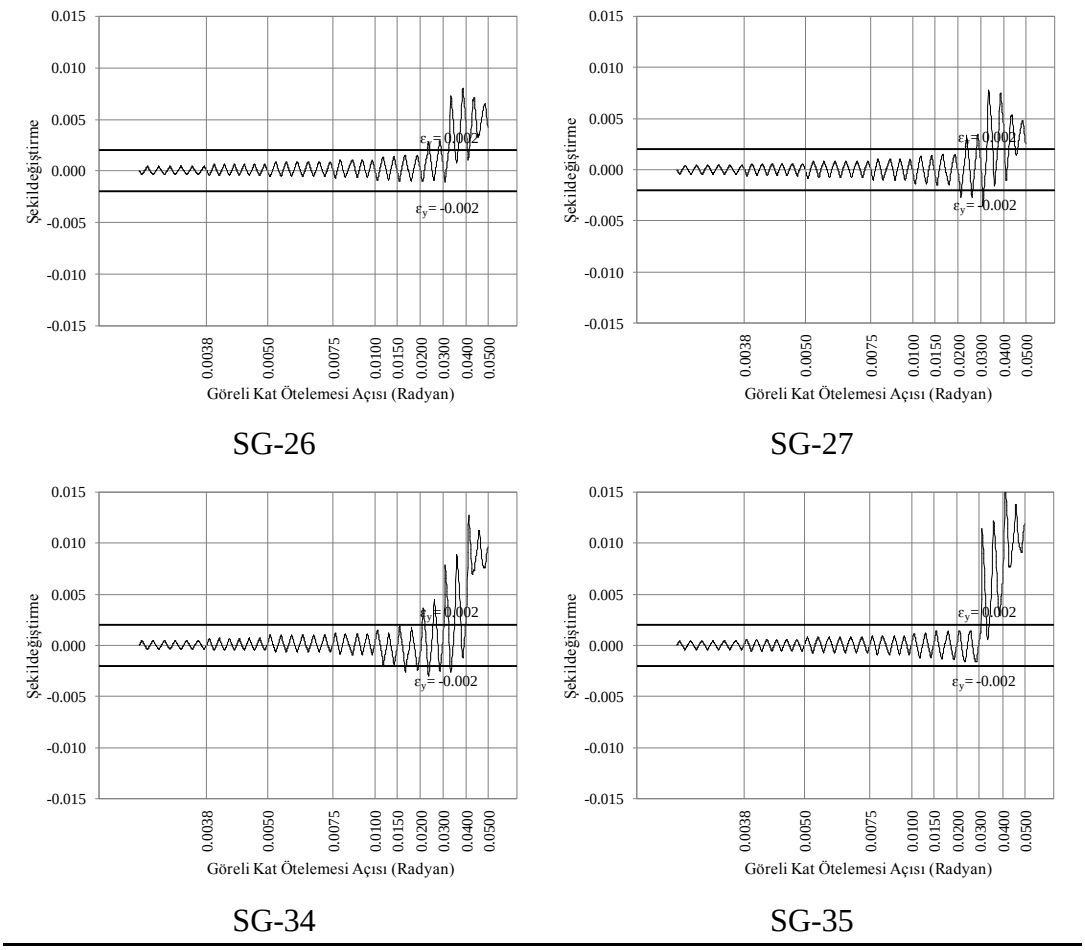
Alın plakasından yarı kiriş yüksekliği mesafede bulunan SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 tek eksenli şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan sonuçlar Şekil 3.198'de verilmiştir.



Şekil 3.198 : EEPC-DDS / SG-24, SG-25, SG-32 ve SG-33 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Akma sınır şekildeğiştirmesi, SG-25 isimli şekildeğiştirme ölçerin yapıştırıldığı bölgede 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde aşılırken, SG-24, SG-32 ve SG-33 isimli şekildeğiştirme ölçerlerin olduğu bölgelerde 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde aşılmıştır.

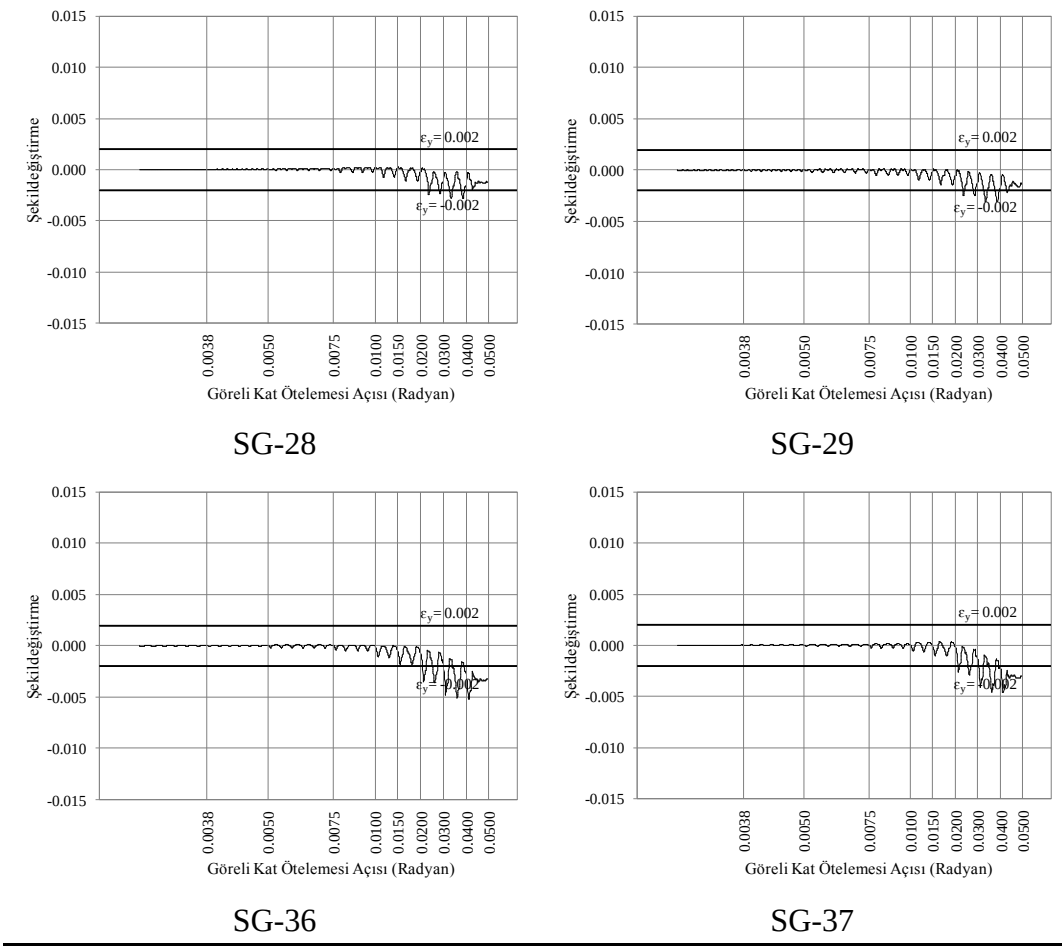
Kiriş başlıkları üzerindeki şekildeğiştirme ölçerlerden panel bölgesine en yakın kesitte yer alan SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan sonuçlar Şekil 3.199'da gösterilmiştir.



Şekil 3.199 : EEPC-DDS / SG-26, SG-27, SG-34 ve SG-35 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Plastikleşmeler, SG-26, SG-27 ve SG-34 şekildeğiştirme ölçerlerinin bulunduğu bölgelerde 0.03 rad., SG-35 şekildeğiştirme ölçerinin olduğu bölgede ise 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri uygulanırken başlamıştır.

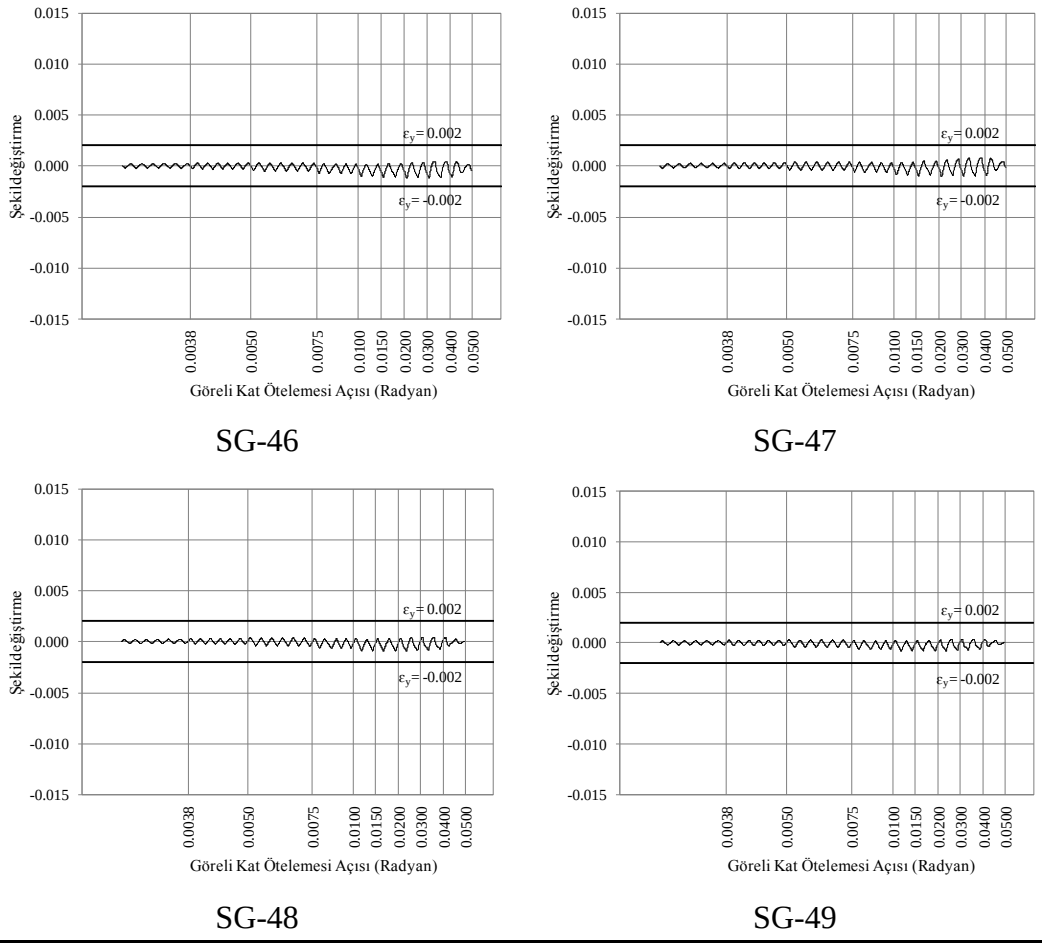
Alın plakası üzerine yapıştırılan SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kayıtlardan elde edilen sonuçlar Şekil 3.200'de gösterilmiştir.



Şekil 3.200 : EEPC-DDS / SG-28, SG-29, SG-36 ve SG-37 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Alın plakası üzerindeki şekildeğiştirme ölçerlerin olduğu bölgelerde, plastikleşmeler 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri sırasında başlamıştır.

Panel bölgesine yerleştirilen çapraz levhaların üzerlerinde yer alan SG-46, SG-47, SG-48 ve SG-49 şekildeğiştirme ölçerlerine ait sonuçlar Şekil 3.201'de gösterilmiştir.



Şekil 3.201 : EEPC-DDS / SG-46, SG-47, SG-48 ve SG-49 şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri.

Deney sonuna gelindiğinde çapraz elemanlarda plastikleşme meydana gelmemiştir.

Süreklilik plakaları üzerinde bulunan SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri, kolon başlıklarının panel bölgesini sınırlayan kısımlarında yer alan SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri ile sağ mesnet bölgesinde yer alan SG-11, SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen şekildeğiştirme - göreli kat ötelenmesi ilişkileri de EK-A'da verilmiştir.

3.6 Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

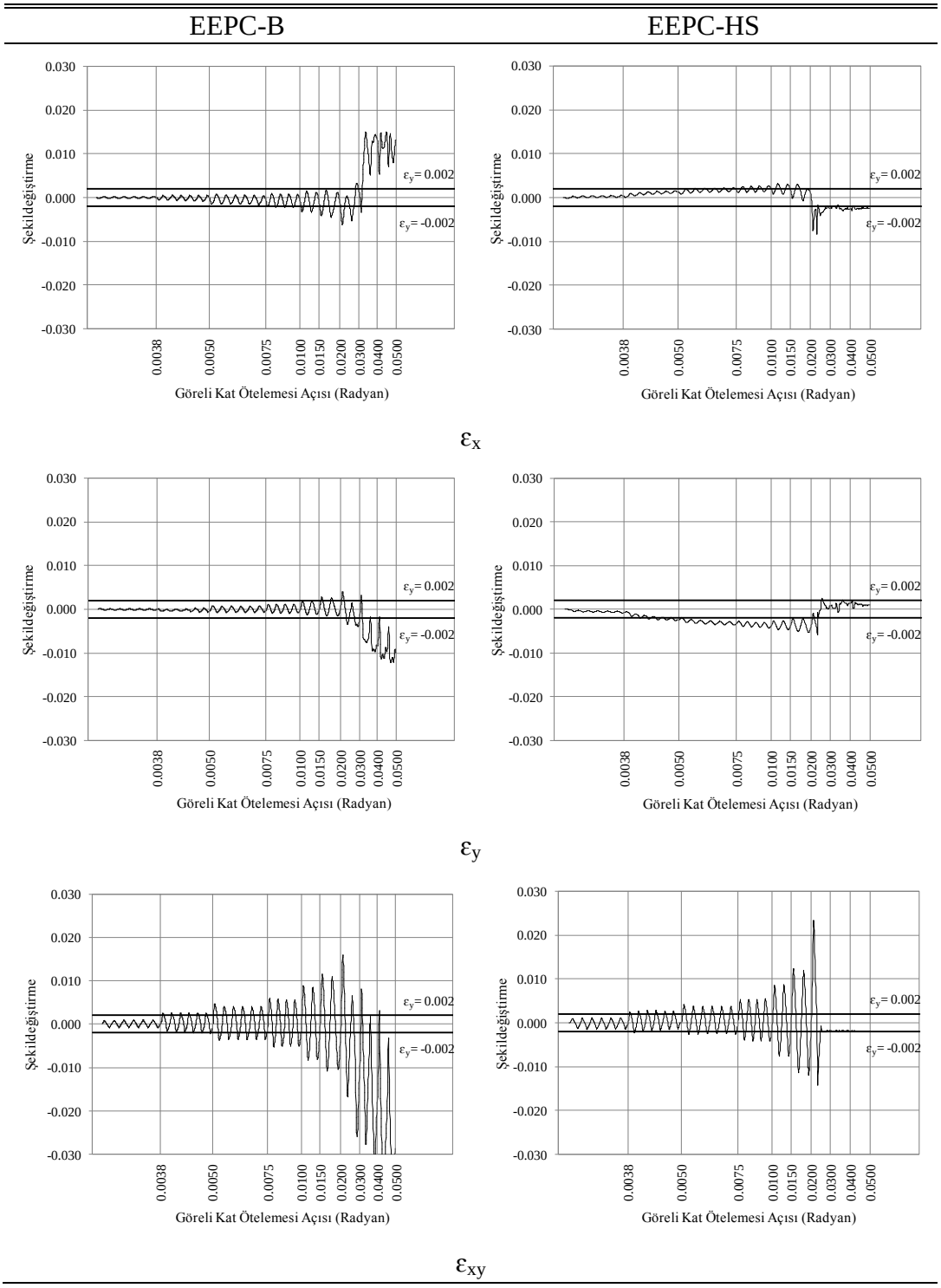
Bu bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek özetlenmiş, numune davranışları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmanın ilk numunesi olan *EEPC-B*, ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I kesitlerin alın plakalı moment aktaran birleşimlerinde olabilecek en zayıf durumu görmek amacı ile denenmiş bir numunedir. Bu numunede gözle görülen ilk hasar,

0.03 rad. etkin göreli kat ötelemesi seviyesinde, panel bölgesi içinde kalan kolon gövdesinin sinüs formu bozulması şeklinde olmuştur. Panel bölgesindeki ilk plastikleşme, panel merkezine yapıştırılan rozet tip şekildeğiştirme ölçerin bulunduğu bölgede ve 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesinin ilk çevrimlerinde başlamıştır. Kolon gövdesinde yer alan ve panel bölgesi dışında bulunan rozet tip şekildeğiştirme ölçerlerde ise ilk plastikleşme, yine 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken kolon üst başlığına yakın konumdaki şekildeğiştirme ölçerde gözlenmiştir. Kiriş gövdesine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlerde kaydedilen ilk plastikleşme ise 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğindedir. Kiriş başlıklarına ve alın plakasına yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerin bulunduğu bölgelerde ise herhangi bir plastikleşme meydana gelmemiştir.

Numunenin yatay yük dayanımı, panel bölgesi içinde erken aşamalarda yaşanan plastikleşmelere rağmen 0.030 rad. etkin göreli kat ötelemesi seviyesinin son çevrimine kadar artma eğiliminde olmuştur. Bu aşamada oluşan yatay yük dayanımları, itme ve çekmede 57.27 kN ve 49.75 kN olarak ortaya çıkmıştır. Ancak bu seviyede gövdenin sinüs formunda gerçekleşen bozulma nedeni ile sonraki çevrim gruplarında dayanım azalmaları meydana gelmiştir. Kiriş alt kesiti için oluşturulan dönme - moment ilişkisi 0.03 rad. etkin göreli kat ötelemesi seviyesinden sonra düşüşe geçmiştir.

İkinci numune *EEPC-HS*, *EEPC-B* numunesinden farklı olarak kolon başlıkları arasında ve gövdeye temas etmeyen dört adet süreklilik plakası içermektedir. Bu numunede de gözle görülür ilk hasar 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken, panel bölgesi içinde kalan kolon gövdesinin sinüs formunun bozulması şeklinde ortaya çıkmıştır. Panel bölgesindeki ilk plastikleşme ise *EEPC-B* numunesinde olduğu gibi 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken gözlenmiştir. Her iki numunede panel bölgesi merkezinde yer alan rozet tip şekildeğiştirme ölçerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.202'de verilmiştir.

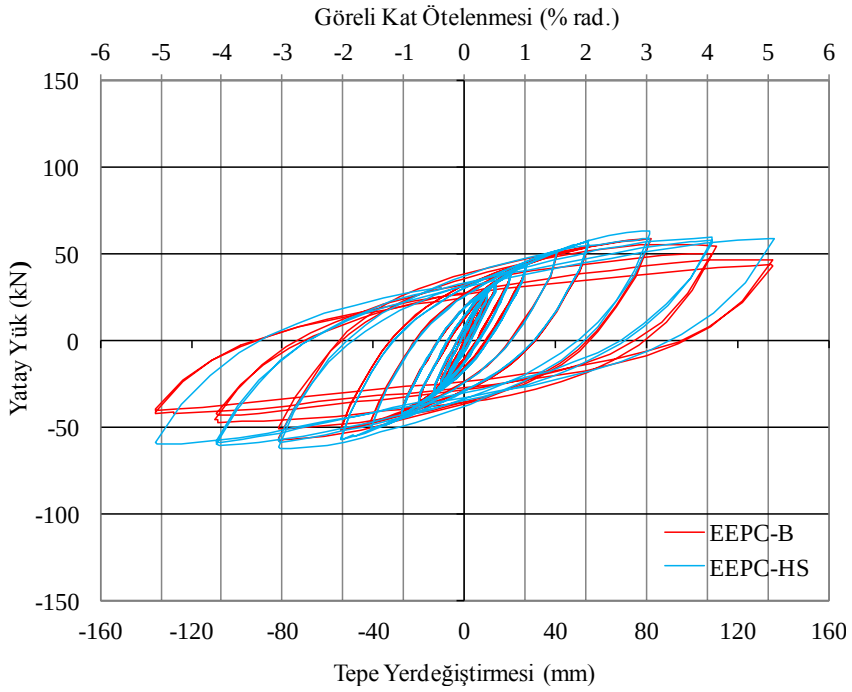


Şekil 3.202 : EEPC-B ve EEPC-HS / SG-9 şekildeğiştirme ölçer grafikleri.

Kolonda panel bölgesi dışındaki şekildeğiştirme ölçerlerde ilk plastikleşme, 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde kolon üst başlığına yakın bölgede gözlenmiştir. Kiriş gövdesindeki rozet tip şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen sonuçlara göre ilk plastikleşme *EEPC-B* numunesi ile aynı şekilde 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde meydana gelmiştir. Kiriş başlıklarında ve alın

plakasında yer alan şekildeğiştirme ölçerlerin bulunduğu konumlarda akma meydana gelmemiştir.

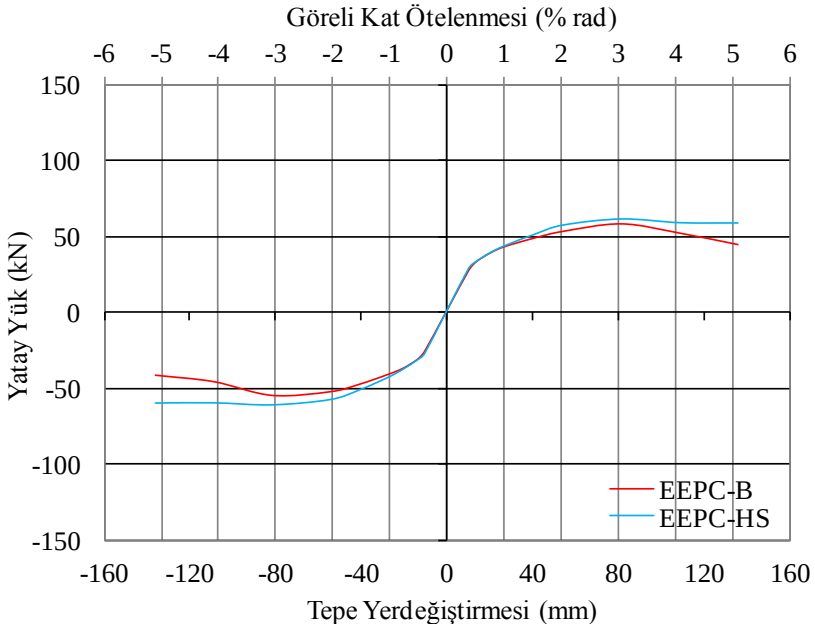
Numunenin yük - yerdeğiştirme ilişkisi *EEPC-B* numunesi ile benzerlik sergilemiştir. Yatay yük dayanımı, kolon gövdesinin panel bölgesi içinde kalan bölümünün sinüs formunun bozulduğu 0.030 rad. etkin göreli kat ötelemesi seviyesinin sonuna kadar artmıştır. Bu yerdeğiştirme eşiğinde ortaya çıkan yatay yük dayanımı itmede 57.40 kN, çekmede ise 57.50 kN olmuştur. Bu aşamadan sonra yatay yük dayanımı azalmıştır. Form bozulmasının yaşandığı eşikte itmede *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinin yatay yük dayanımları birbirine çok yakınken çekmede *EEPC-HS* numunesi, *EEPC-B* numunesine göre daha rijit davranmıştır. Her iki numuneye ait yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.203'te verilmiştir.



Şekil 3.203 : EEPC-B ve EEPC-HS numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

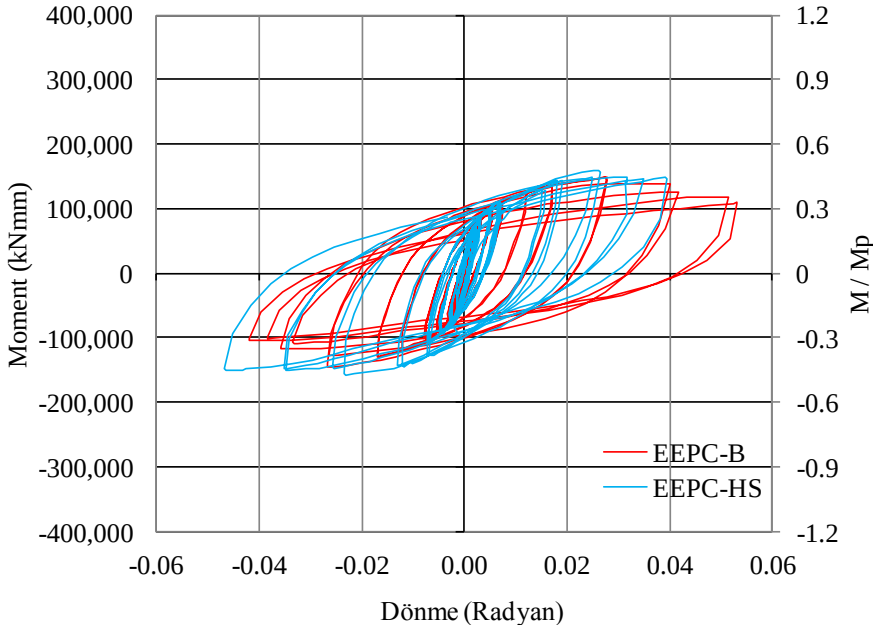
Yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi incelendiğinde, panel bölgesi içinde kalan gövdenin sinüs formunun bozulduğu 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğine kadar her iki numunenin çok benzer davrandıkları gözlenmektedir. Ancak bu seviyeden sonra, *EEPC-HS* numunesi süreklilik plakaları nedeni ile *EEPC-B* numunesine göre daha rijit bir davranış sergilemiştir.

Her iki numuneye ait yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin zarf eğrisi 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin sonuna kadar Şekil 3.204'te verilmiştir.



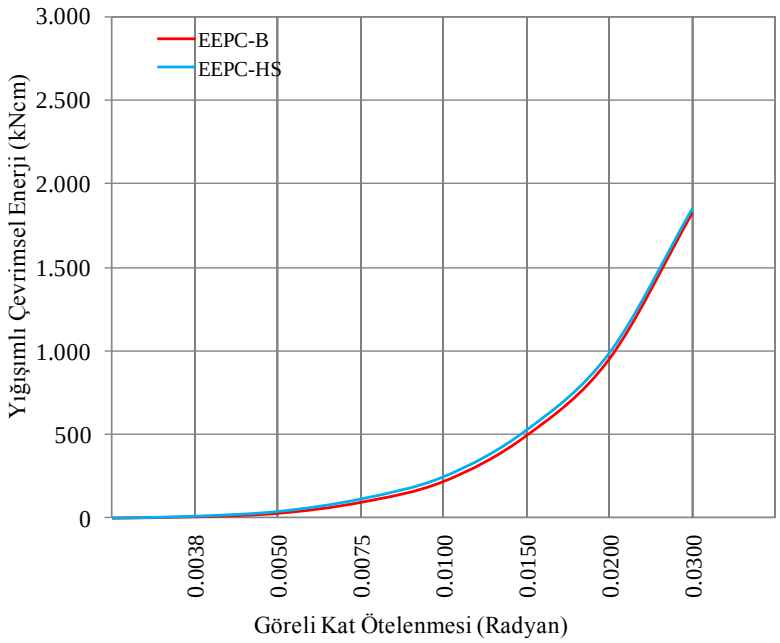
Şekil 3.204 : EEPC-B ve EEPC-HS numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

EEPC-B ve *EEPC-HS* numunelerinde kiriş taban kesiti için oluşturulan moment - dönme ilişkileri Şekil 3.205'te karşılaştırılmıştır. Her iki eğri birbirine benzemekle beraber, *EEPC-HS* eğrisi daha kararlıdır.



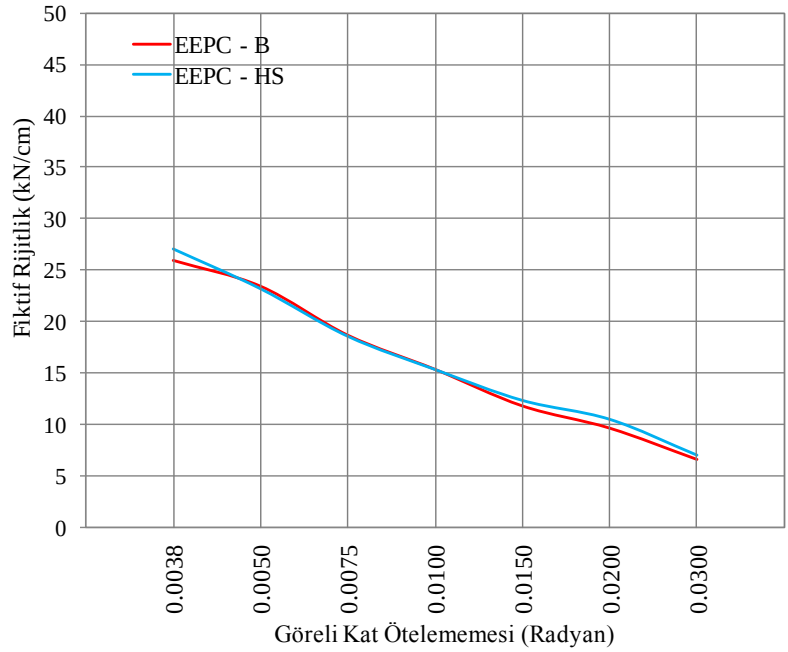
Şekil 3.205 : EEPC-B ve EEPC-HS numunelerinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkileri.

Her iki numune için elde edilen yığışımlı çevrimsel enerjinin değişimi 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinin sonuna kadar karşılaştırılmıştır, Şekil 3.206. Çevrim alanlarının bu sınıra kadar benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 3.206 : EEPC-B ve EEPC- HS numunelerinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi.

Ayrıklaştırılmış çevrimlerde, pozitif ve negatif pik değerlerini birleştirerek elde edilen fiktif yatay rijitlikler Şekil 3.207'de karşılaştırılmıştır. Panel bölgesi içinde kalan gövde formunun bozulduğu 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyine kadar elde edilen rijitlikler her iki numune için benzer gerçekleşmiştir.



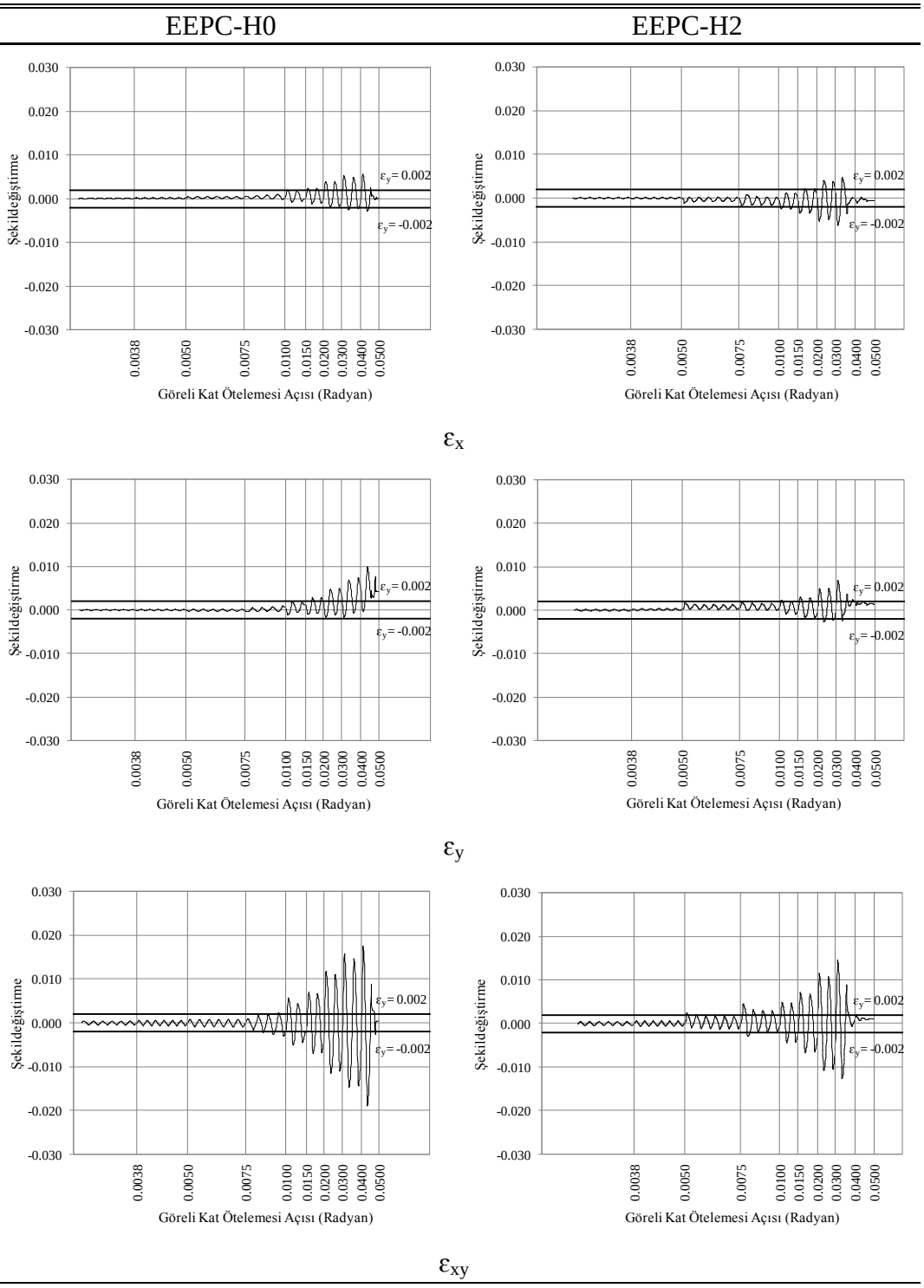
Şekil 3.207 : EEPC-B ve EEPC- HS numunelerinde rijitlik değişimi.

Sonuç olarak her iki numune de birbirine çok yakın davranış sergilemiş olup, *EEPC-HS* numunesinde yer alan süreklilik plakalarının katkısı, kolon gövdesine bağlı olmayışları nedeni ile göz ardı edilebilecek düzeyde kalmıştır (Aydın ve diğ., 2014).

Üçüncü sırada incelenen *EEPC-H0* numunesi, sinüzoidal gövdeli çelik I profillerin alın plakalı moment aktaran birleşimleri için pratikte kullanılan duruma karşı gelmektedir. Bu numunede gözlemlenen ilk hasar, 0.02 rad. etkin göreli kat ötelemesi seviyesinde meydana gelmiştir. Bu seviyede kiriş gövde ile başlıklarını birbirlerine bağlayan kaynak dikişlerinde küçük çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Panel bölgesindeki ilk plastikleşme, 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde meydana gelmiştir. Kolon gövdesinin panel bölgesi dışında kalan bölümlerinde ilk plastikleşme ise 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesinde ortaya çıkmıştır. Kiriş gövdesindeki ilk plastikleşme 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenme eşiğinin çevrimleri sırasında alın plakasına en yakın konumdaki rozet tip şekildeğiştirme ölçerin olduğu bölgede meydana gelmiştir. Kiriş başlıklarında ve alın plakasında bulunan şekildeğiştirme ölçerlerde gözlenen ilk plastikleşme ise 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenme eşiğinde ortaya çıkmıştır.

Yatay yük dayanımı, kolon ve kirişin başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişindeki ayrılmalara rağmen 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesi tamamlanana kadar her çevrimde artmıştır. Bu yerdeğiştirme eşiğinde itmede 123.5 kN, çekmede ise 135.6 kN yatay yük dayanımı elde edilmiştir.

Dördüncü sırada denenen *EEPC-H2* numunesi, *EEPC-H0* numunesinden farklı olarak, panel bölgesi içindeki düzlem çelik plakanın bu bölgenin her iki yanına da taşırıldığı numunedir. Bu numunede gözlenen ilk hasar, *EEPC-H0* numunesinde olduğu gibi, 0.02 rad. etkin göreli kat ötelemesi seviyesinde kirişte gövde ve başlığı birleştiren kaynak dikişinde oluşan küçük çatlaktır. Panel bölgesindeki ilk plastikleşme ise *EEPC-H0* numunesinden daha erken bir aşamada, 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri uygulanırken ortaya çıkmıştır. *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerinin panel bölgelerinin merkezinde yer alan rozet tip şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.208'de gösterilmiştir.

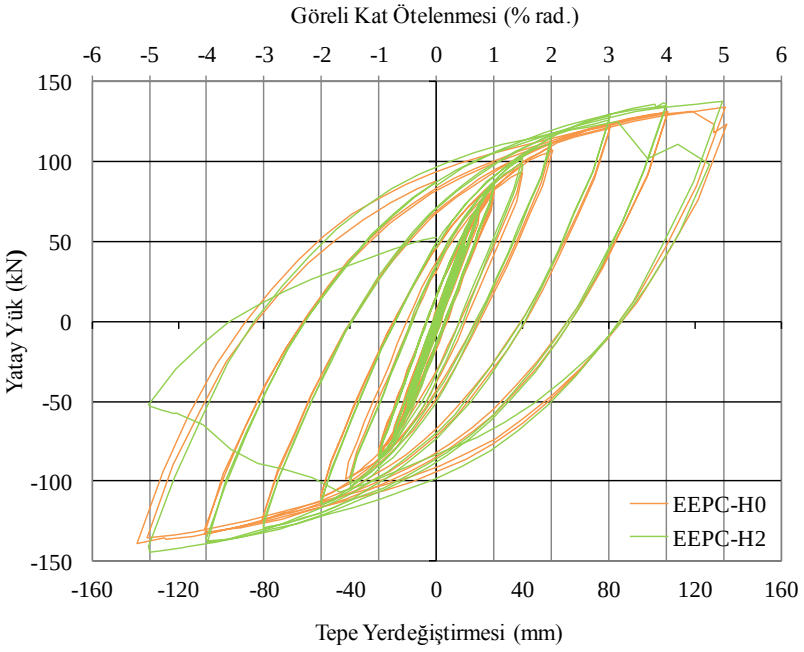


Şekil 3.208 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 / SG-9 şekildeğiştirme ölçer grafikleri.

EEPC-H0 numunesinde 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde kolon gövdesinin panel bölgesi dışında kalan bölümlerinde başlayan plastikleşmeler, *EEPC-H2* numunesinde 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenme seviyesinin çevrimleri uygulanırken başlamıştır. Kiriş gövdesindeki rozet şekildeğiştirme ölçerlerin olduğu bölgede ilk plastikleşme, *EEPC-H0* numunesinden daha erken bir seviyede, 0.01 rad.

etkin göreli kat ötelenme eşiğinin çevrimleri uygulanırken ortaya çıkmıştır. Kiriş başlıklarında ve alın plakasında bulunan şekildeğiştirme ölçerlerdeki ilk akma, *EEPC-H0* numunesinden daha sonraki seviyede, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri sırasında ortaya çıkmıştır.

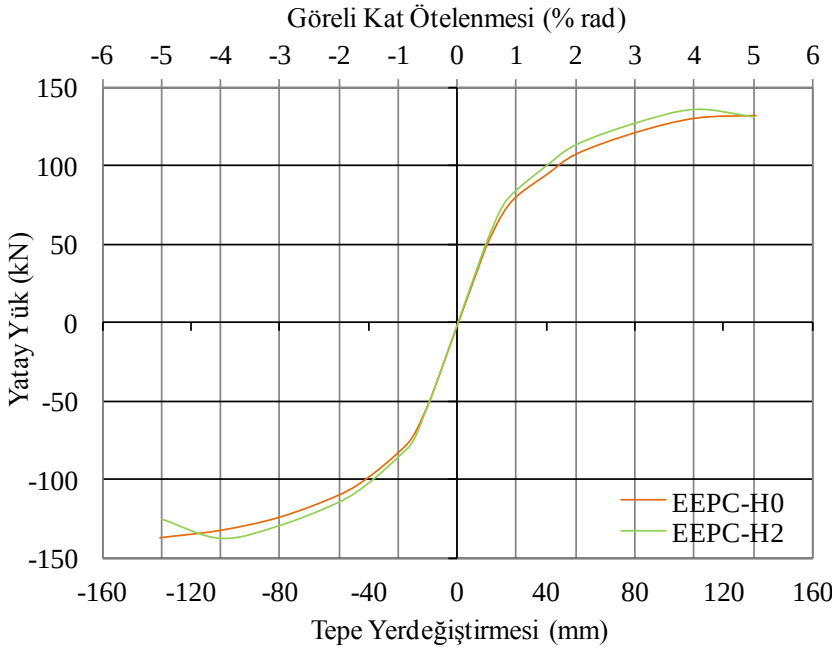
Yerdeğiştirme çevrimlerine karşı gelen yatay yük dayanımları *EEPC-H0* numunesi ile benzer bir davranış sergilemiştir. Yük - yerdeğiştirme çevrimleri, *EEPC-H0* numunesinde de olduğu gibi kirişin başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişindeki bozulmalara karşın artan karakterde gözlenmiştir. 0.05 rad.'lık son çevrimde kiriş gövdesinin ani yırtılması ile dayanımda düşme yaşanmıştır. Gövde yırtılmadan hemen önceki en büyük itme ve çekme yerdeğiştirmeleri için ortaya çıkan yatay yük dayanımları 137.8 kN ve 141.2 kN olmuştur. Her iki numunenin yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.209'da birlikte verilmiştir.



Şekil 3.209 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

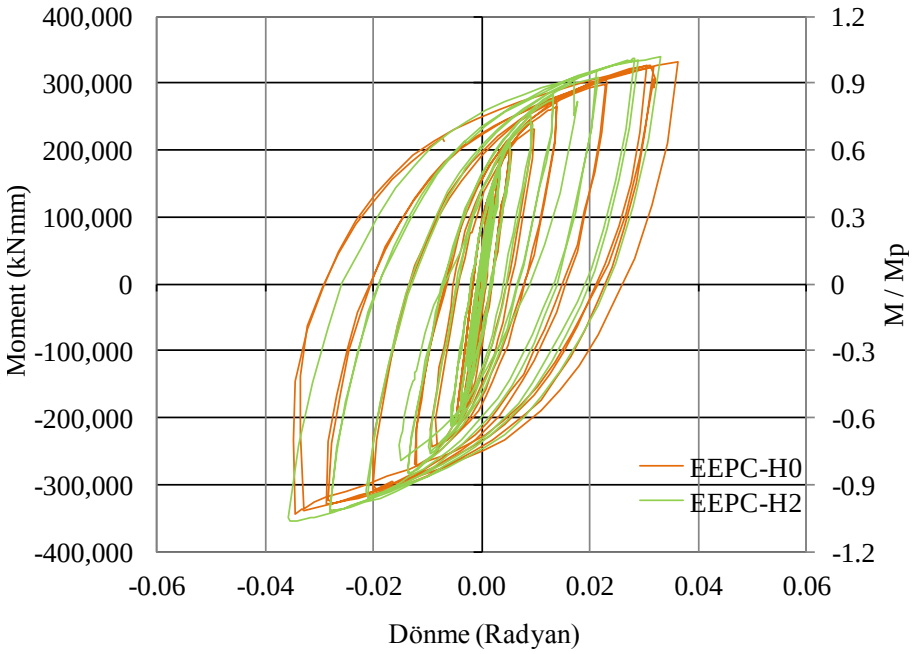
Her iki numunenin yatay yük dayanım değerleri birbirine yakın olarak gerçekleşmiş ancak *EEPC-H2* numunesine ait değerler yaklaşık olarak % 2 kadar daha büyük gerçekleşmiştir.

EEPC-H0 ve *EEPC-H2* numunelerine ait yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin zarf eğrileri 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar Şekil 3.210'da verilmiştir.



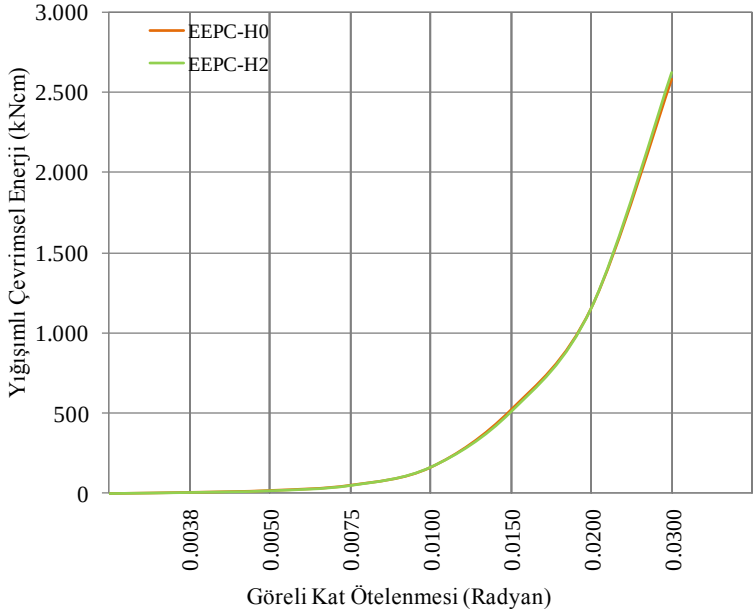
Şekil 3.210 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

Kiriş alt kesiti için üretilen moment - dönme ilişkisi her iki numune için benzer gerçekleşmiştir. Ancak *EEPC-H2* numunesinin davranışının bir miktar daha rijit olduğu gözlenmektedir. Her iki numunede de kiriş akma dayanımının yaklaşık % 95'ine kadar çıkılabilmiştir, Şekil 3.211.



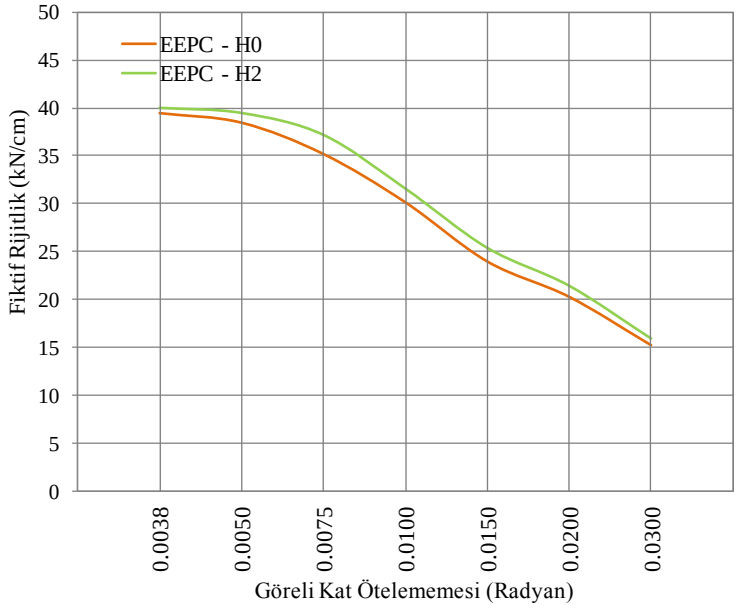
Şekil 3.211 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 numunelerinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkileri.

Her iki numune için üretilen yığışımlı çevrimsel enerjinin göreli kat ötelenmelerine göre değişimi Şekil 3.212'de karşılaştırılmıştır. İki numune için üretilen grafikler üst üste düşmüştür.



Şekil 3.212 : EEPC-H0 ve EEPC- H2 numunelerinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi.

0.03 rad. etkin göreli kat ötelenme eşiğine kadar her iki numuneden elde edilen göreli kat ötelenmesi fiktif rijitlik ilişkileri Şekil 3.213'te karşılaştırılmıştır. Genel davranış benzer olmakla beraber, *EEPC-H2* numunesinin yaklaşık %4 kadar daha rijit olduğu görülmektedir.



Şekil 3.213 : EEPC-H0 ve EEPC-H2 numunelerinde rijitlik değişimi.

EEPC-H0 ve *EEPC-H2* numunelerinin genel davranışlarının çok benzer olduğu tespit edilmiştir. *EEPC-H2* numunesinde uygulanan panel bölgesindeki düz levhanın dışarı taşırılması davranışta önemli bir değişiklik meydana getirmemiştir (Aydın ve diğ., 2014).

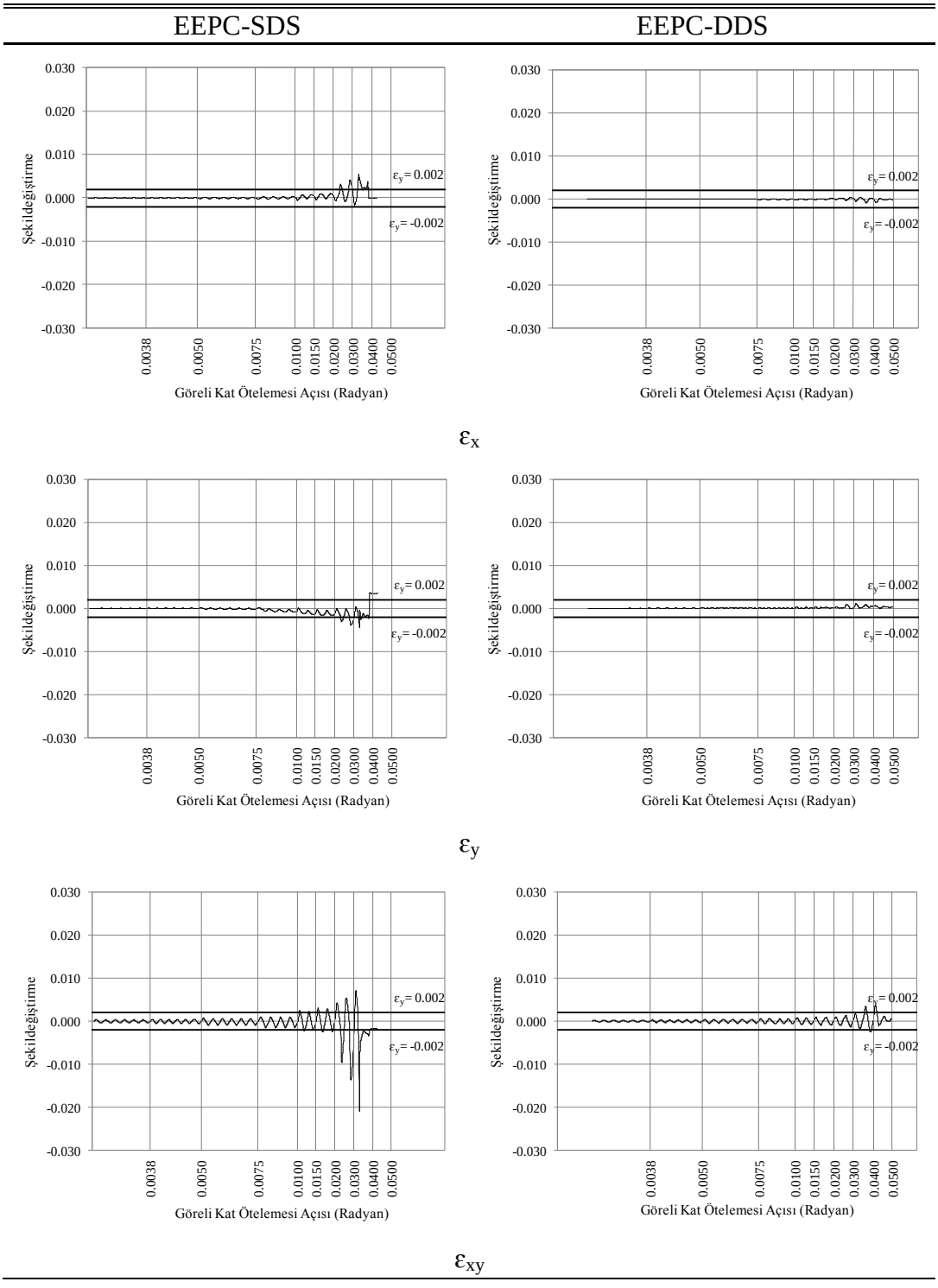
Beşinci sırada denenen *EEPC-SDS* numunesinde ilk hasar 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde kirişin alın plakasına yakın bölümünde başlık ve gövdeyi birleştiren kaynak dikişinde kılcal bir çatlak olarak gözlenmiştir. İlk ciddi hasar ise 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken meydana gelmiştir. Bu seviyede süreklilik plakaları arasında bulunan çapraz elemanların her ikisi de burkulmuş, kiriş başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişlerinde ve kolon panel bölgesi dışında başlık ve gövdeyi birleştiren kaynak dikişlerinde çatlak oluşmuştur. Panel bölgesindeki akma sınır şekildeğiştirmesi ilk kez 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken aşılmıştır. Gövdenin panel bölgesi dışındaki bölümünde ilk plastikleşme 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri esnasında, gövdenin kolon üst başlığına yakın olan bölgesinde meydana gelmiştir. Kiriş gövdesindeki ilk plastikleşme ise 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken, alın plakasına en yakın şekildeğiştirme ölçerlerde kaydedilmiştir. Kirişin başlıklarına ve alın plakasına yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerin olduğu bölgede ise ilk plastikleşme 0.030 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde ortaya çıkmıştır.

Şekil 3.110'da verilen yatay yük - yerdeğiştirme dayanımı ilişkisinden görüldüğü gibi, yatay yük dayanımı, çekmede 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenme eşik değeri sonuna kadar, itmede ise 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenme eşik değeri sonuna kadar artmıştır. 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin çevrimleri uygulanırken çapraz elemanlarda yaşanan burkulma nedeni ile itme dayanımında ani bir düşüş yaşanmıştır. Bu yerdeğiştirme eşiğinin son çevriminin tamamlanması ile ortaya çıkan itme ve çekme dayanımları 99.0 kN ve 136.75 kN olmuştur.

Son deney numunesi olan *EEPC-DDS*'nin panel bölgesinde kullanılan toplam çapraz levha sayısı dörttür. Bu numunedeki ilk hasar *EEPC-SDS* numunesi ile benzer şekilde 0.0150 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Bu aşamada kolonun panel bölgesi dışında kalan bölümünde üst başlık ve gövde arasındaki kaynak dikişinde oluşan çatlağın yanı sıra kirişin başlıkları ile gövdesini birleştiren kaynak dikişinde de çatlak meydana gelmiştir.

Panel bölgesinde akma, *EEPC-DDS* numunesinden daha ileri bir aşamada, 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimi uygulanırken oluşmuştur.

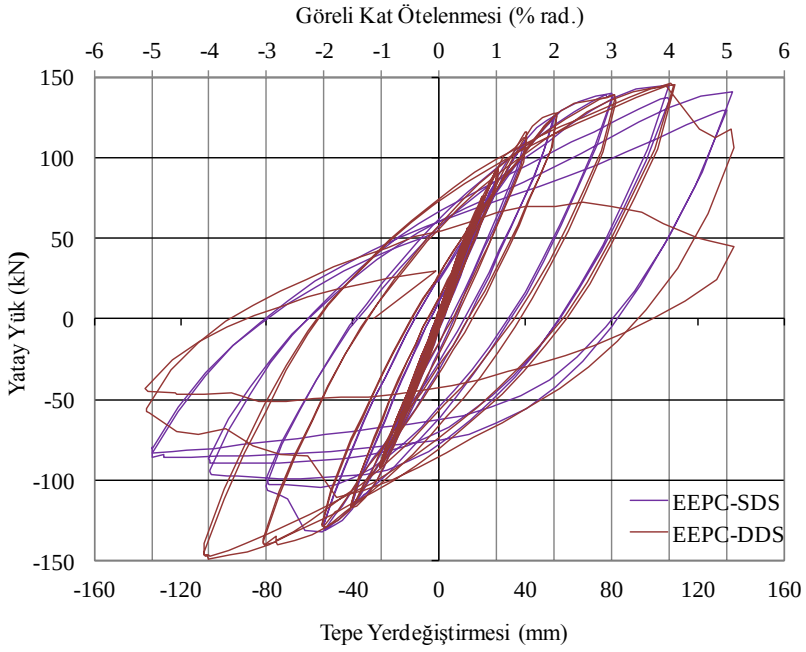
EEPC-SDS ve *EEPC-DDS* numunelerinin panel bölgesinde plastik limite ilk ulaşan şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.214'te gösterilmiştir.



Şekil 3.214 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS / SG-9 şekildeğiştirme ölçer grafikleri.

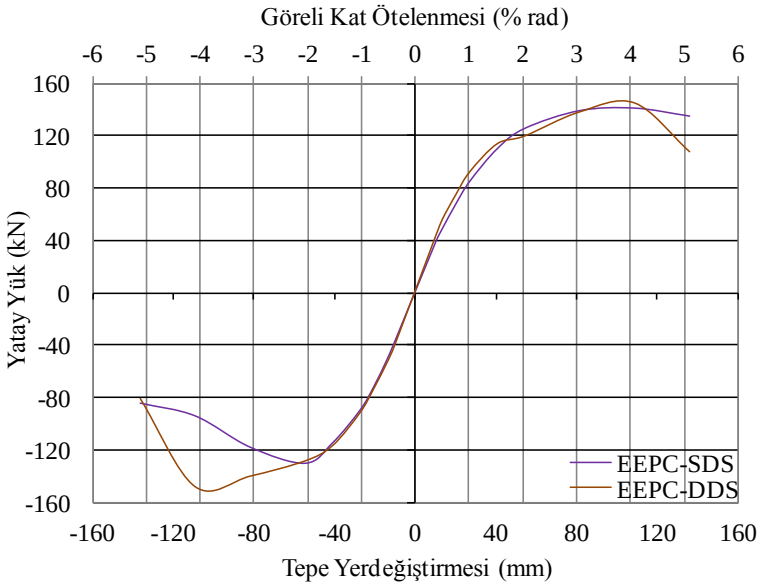
EEPC-SDS numunesinde kolon gövdesinin panel bölgesi dışında kalan bölümünde 0.010 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri uygulanırken meydana gelen ilk plastikleşme, *EEPC-DDS* numunesinde 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimleri uygulanırken oluşmuştur. Kiriş gövdesinde akma sınır şekildeğiştirmesi 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, alın plakasına en yakın şekildeğiştirme ölçerlerin bulunduğu kesitte aşılmıştır. Kiriş başlıkları ile alın plakası üzerinde yer alan şekildeğiştirme ölçerlerdeki ilk plastikleşme, *EEPC-SDS* numunesi ile benzer şekilde 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin yerdeğiştirme çevrimleri uygulanırken ortaya çıkmıştır.

EEPC-DDS ve *EEPC-SDS* numunelerinin yerdeğiştirme çevrimleri uygulanırken oluşan yatay yük - yerdeğiştirme çevrimleri, *EEPC-SDS* numunesinde panel bölgesindeki çapraz elemanların burkulması gerçekleşene kadar benzer gerçekleşmiştir. Bu benzerlik *EEPC-SDS* numunesinde çapraz elemanların burkulması ile itme yönünde ortadan kalkmış, çekme yönü için kiriş gövdesi yırtılana kadar devam etmiştir. Her iki numunenin yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.215'te birlikte verilmiştir.



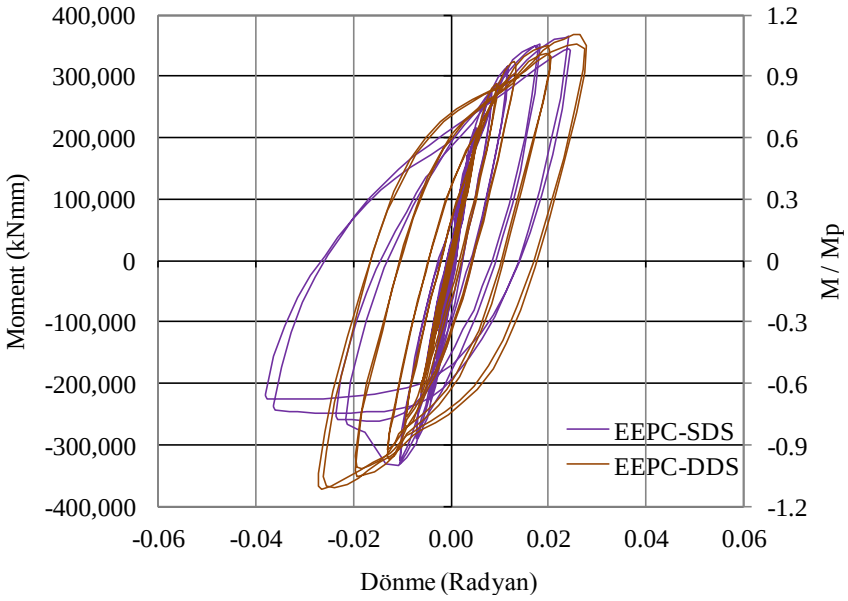
Şekil 3.215 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

İki numunenin yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi çevrimlerinin zarf eğrileri Şekil 3.216'da verilmiştir.



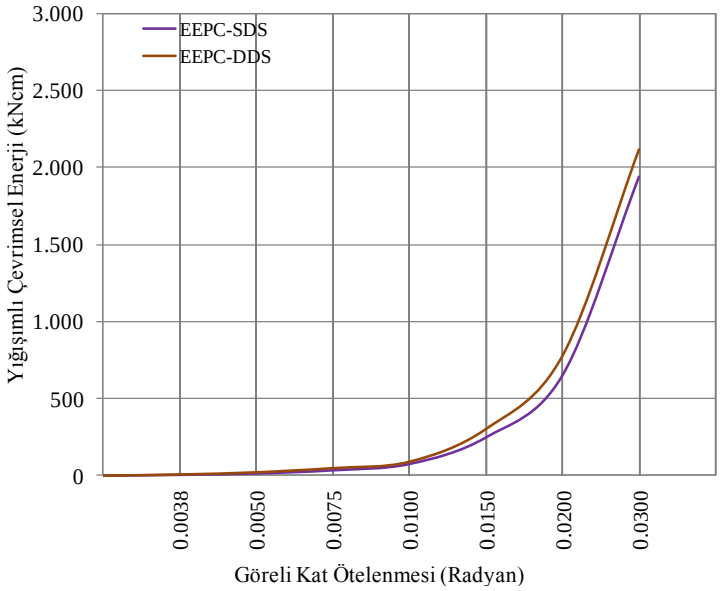
Şekil 3.216 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS numunelerinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

Kiriş alt ucunda elde edilen moment - dönme ilişkileri, *EEPC-DDS* numunesinde yerdeğiştirme ölçerlerin 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin çevrimleri uygulanırken düşeyliğini kaybetmesi nedeni ile her iki numune için 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin sonuna kadar Şekil 3.217'de verilmiştir.



Şekil 3.217 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS numunelerinin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkileri.

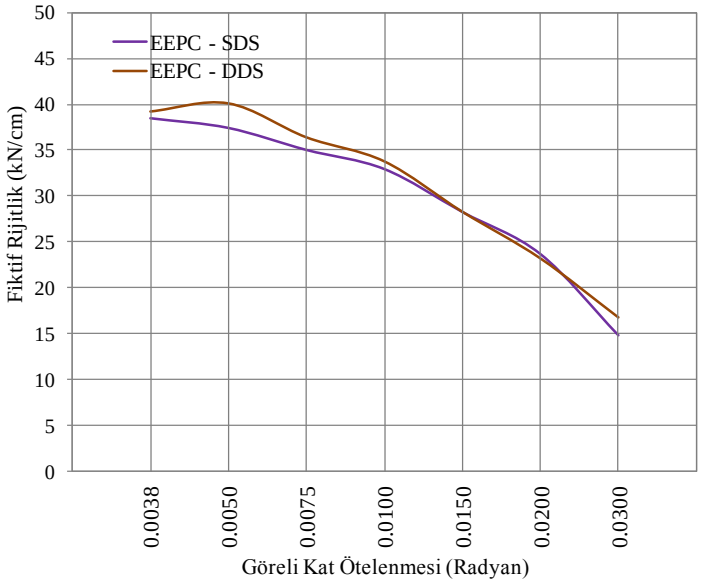
EEPC-SDS ve *EEPC-DDS* numunelerine ait dayanım yerdeğiştirme çevrimleri ayrıklaştırıldıktan sonra kapamış oldukları alanlar hesaplanmış ve yığışımlı çevrimsel enerjinin göreli yerdeğiştirmeye göre değişimi Şekil 3.218'de verilmiştir.



Şekil 3.218 : EEPC-SDS ve EEPC- DDS numunelerinde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi.

İki numuneye ait sonuçlar karşılaştırıldığında, *EEPC-DDS* numunesinin yaklaşık olarak %9 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir.

İki numunenin yatay rijitlikleri, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyine kadar Şekil 3.219'da karşılaştırılmıştır.



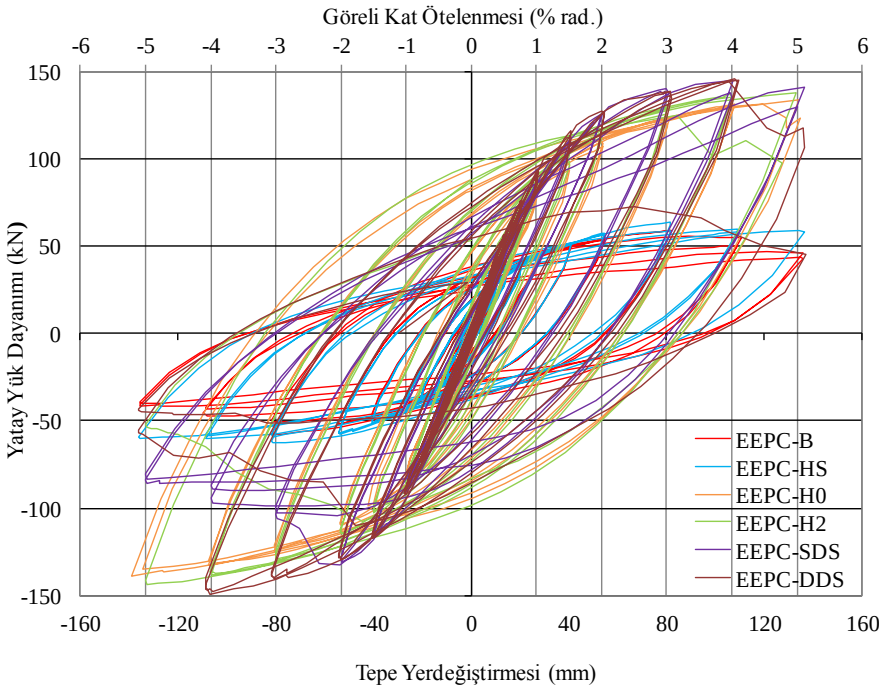
Şekil 3.219 : EEPC-SDS ve EEPC-DDS numunelerinde rijitlik değişimi.

Yatay rijitlikler başlangıçta birbirine yakın iken, 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde *EEPC-DDS* numunesinin rijitliği *EEPC-SDS* numunesinin 1.07 katına kadar çıkmıştır. 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine gelene

kadar aradaki fark kapanmış, 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin çevrimlerinin tamamlanması ile *EEPC-DDS* numunesinin rijitliği *EEPC-SDS*'nin 1.13 katına çıkmıştır.

EEPC-SDS ve *EEPC-DDS* numunelerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, *EEPC-DDS* numunesinin *EEPC-SDS*'ye göre daha fazla enerji sönümlediği, *EEPC-SDS* numunesinde çaprazların burkulduğu yerdeğiştirme eşik değerinden sonra rijitlik farkının arttığı gözlenmiştir.

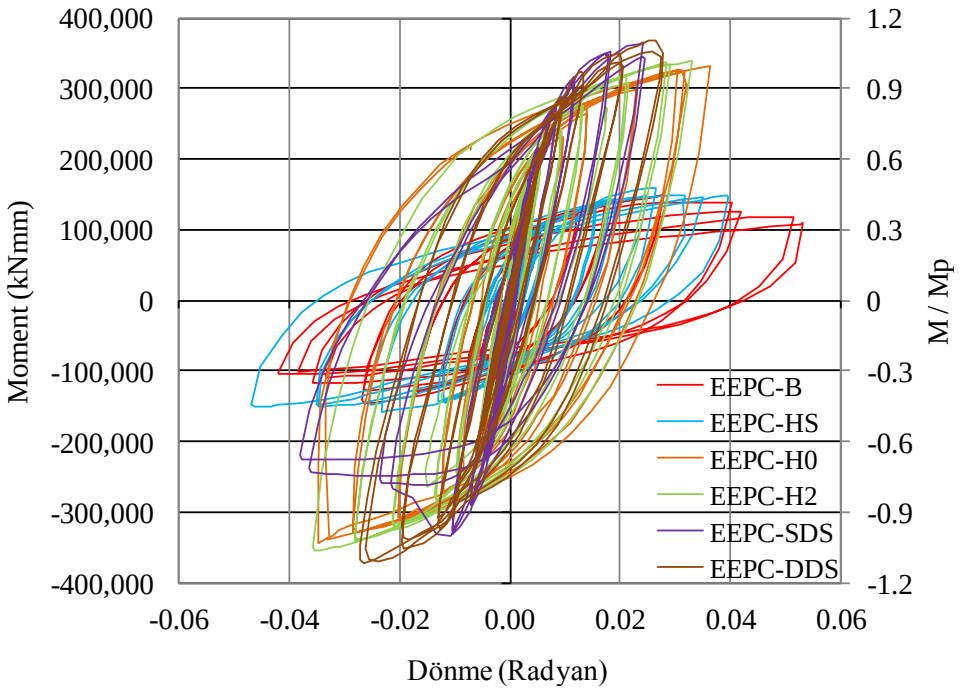
Deneysel olarak incelenen altı numune için ortaya çıkan yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.220'de verilmiştir.



Şekil 3.220 : Tüm numunelerde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

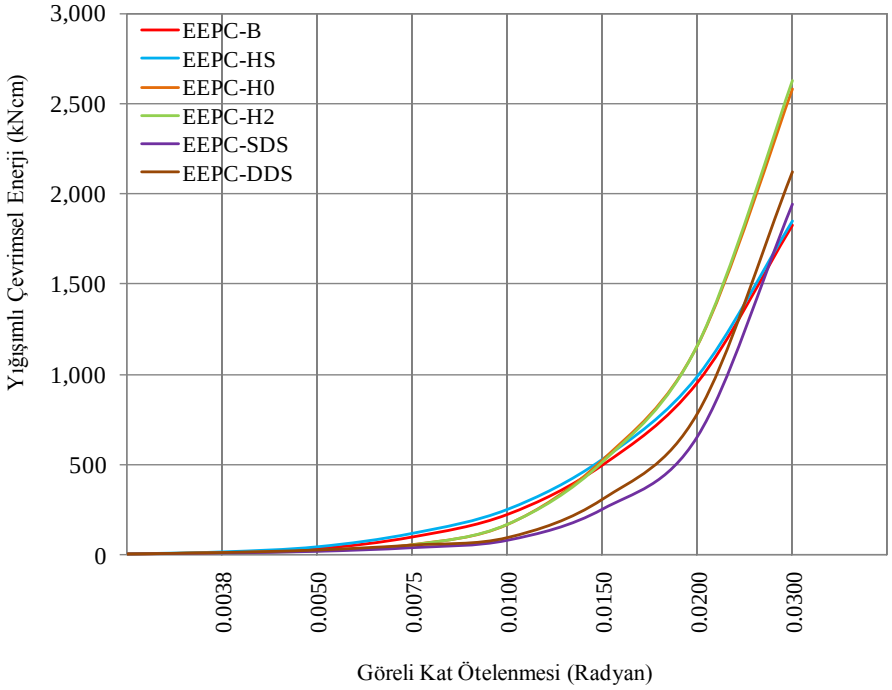
EEPC-B ve *EEPC-HS* numunelerine ait yatay yük dayanımlarının beklenildiği gibi küçük olduğu görülmüştür. *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* türü birleşimlerin, *EEPC-B* ve *EEPC-HS* türü birleşimlere göre oldukça rijit ve kararlı davrandığı gözlenmiştir. *EEPC-SDS* numunesi, panel bölgesi içinde yer alan çapraz levhaların burkulması aşamasına kadar *EEPC-DDS* numunesi ile benzer davranış göstermiştir. Bu numunelerde en büyük yatay yük dayanımları elde edilmiştir.

Kiriş alt ucunda kaydedilen moment - dönme ilişkileri tüm numuneler için topluca Şekil 3.221'de verilmiştir.



Şekil 3.221 : Tüm numunelerin kiriş taban kesitinde moment - dönme ilişkileri.

Tüm numuneler için elde edilen çevrimsel enerji değişim grafikleri Şekil 3.222'de verilmiştir.

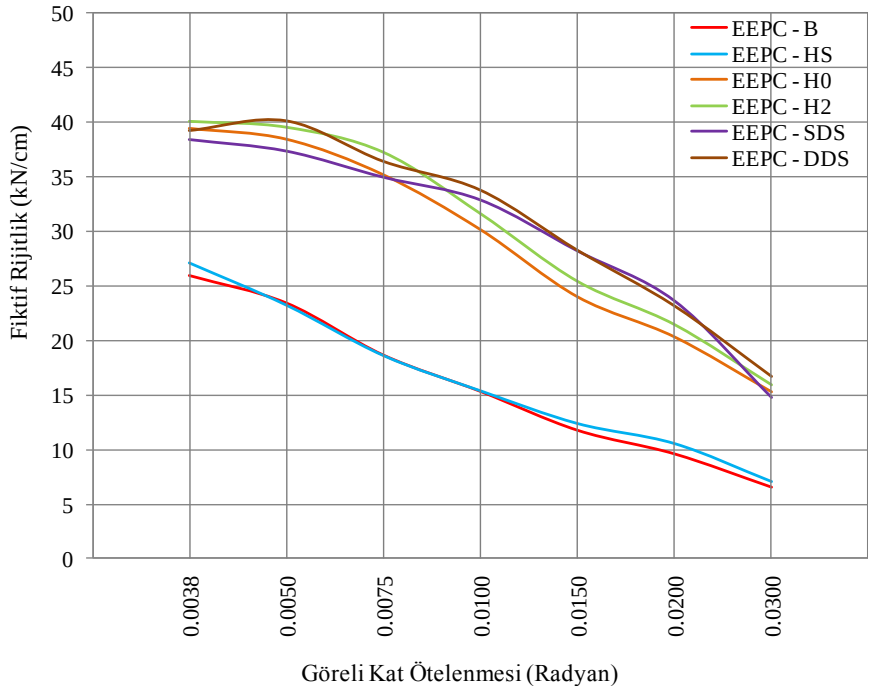


Şekil 3.222 : Tüm numunelerde yığışımlı çevrimsel enerji değişimi.

Numunelerin, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde kapadıkları toplam alanlar karşılaştırıldığında, *EEPC-H2* ve *EEPC-H0* numunelerinin en büyük

değerlere sahip olduğu görülmüştür. En az alan kapatan numuneler ise *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numuneleri olmuştur. *EEPC-DDS* ve *EEPC-SDS* numuneleri, *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerine göre daha az enerji harcamıştır.

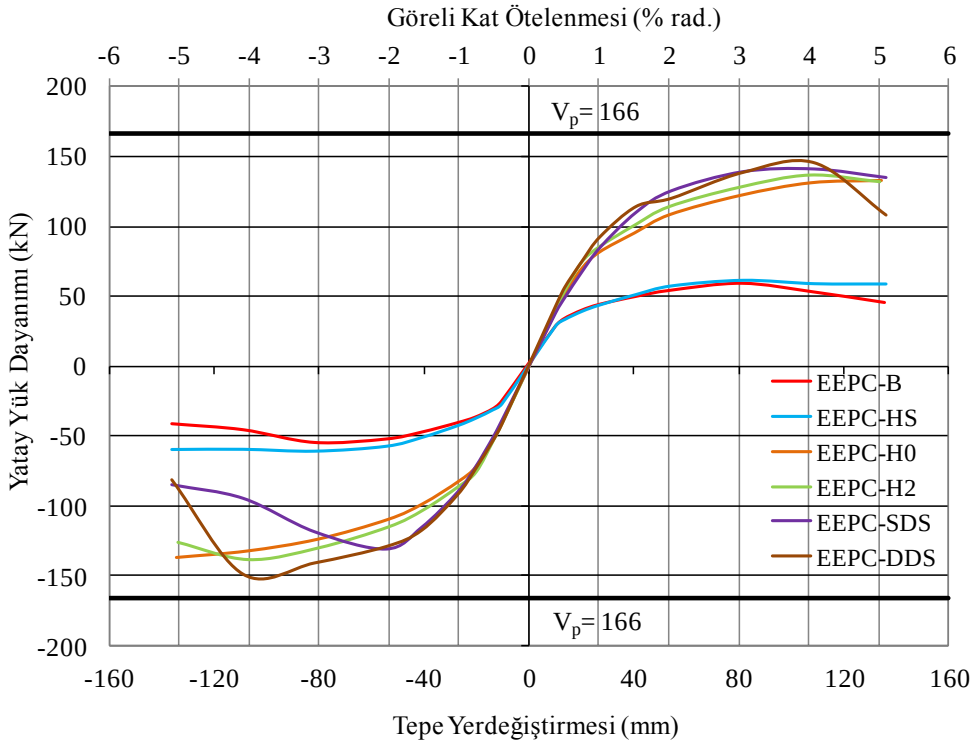
Altı numune için, yatay rijitliklerin göreli kat ötelenmesine bağlı değişimi Şekil 3.223'te gösterilmiştir.



Şekil 3.223 : Tüm numunelerde rijitlik değişimi.

Yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin pik değerlerinin birleştirilmesi ile elde edilen yatay rijitlikler karşılaştırıldığında, *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinin yatay rijitliklerinin, birbirine oldukça yakın ve diğer dört numuneden oldukça küçük gerçekleştiği görülmektedir. *EEPC-H2* ve *EEPC-DDS* numunelerinin 0.0075 rad. seviyesine kadar birbirine yakın rijitliğe sahip olduğu, bu seviyeden sonra ise *EEPC-DDS* ve *EEPC-SDS* numunelerinin en büyük rijitliğe sahip oldukları gözlenmiştir.

Numunelere ait yatay yük - tepe yerdeğiştirmesi çevrimlerinin zarf eğrileri ± 0.05 rad. aralığında üst üste çizilmiştir, Şekil 3.224.



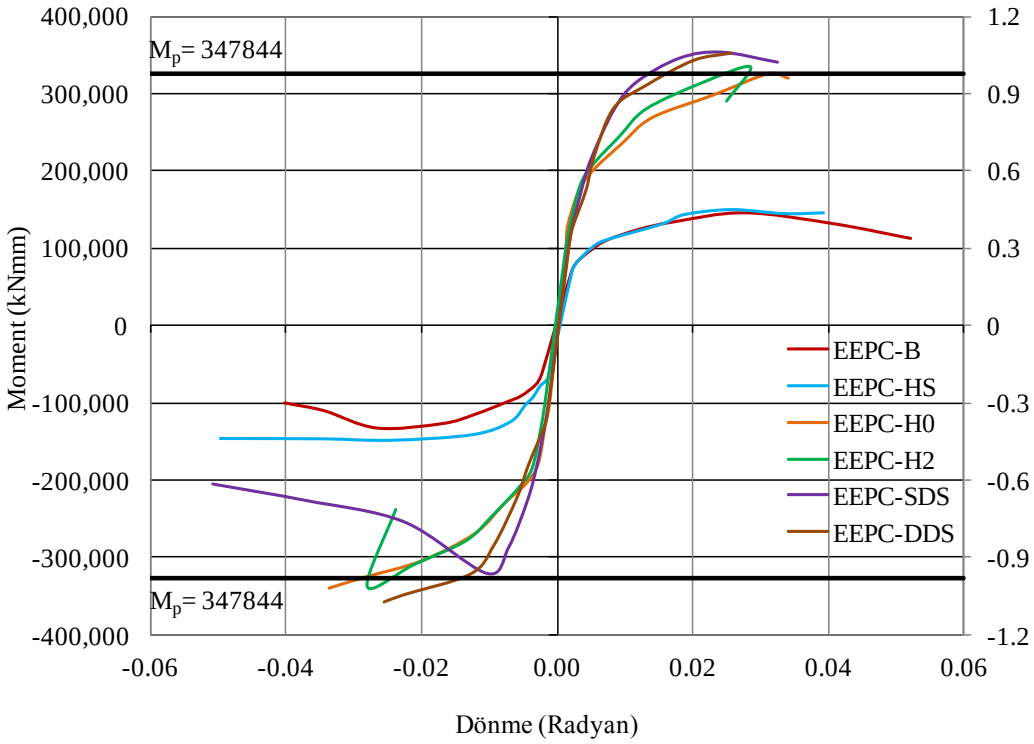
Şekil 3.224 : Tüm numunelerde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

Şekil 3.119'da, kiriş kesiti için hesaplanan kuramsal kesme dayanımı yatay siyah çizgiler ile gösterilmiştir.

Tüm numunelerde kiriş kesme kapasiteleri aşılmamıştır. Göçme durumuna, *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinde panel mekanizması ile, *EEPC-H0*, *EEPC-H2*, ve *EEPC-DDS* numunelerinde kaynak ve gövde yırtılmaları ile, *EEPC-SDS* numunesinde ise panel mekanizması ve kaynak yırtılması ile erişilmiştir.

En büyük yatay kuvvete ulaşılan *EEPC-DDS* numunesinde, itme ve çekmede oluşan en büyük yatay yükler sırasıyla 145.7 ve 148.4 kN'dur. Bu değerler, 166 kN'luk kiriş kesme kapasitesinin yaklaşık % 88'ine karşı gelmektedir.

Kiriş alt ucunda oluşan eğilme momenti ve karşı gelen dönme arasındaki ilişkinin zarf eğrisi de Şekil 3.225'te verilmiştir. Kiriş kesiti için hesaplanan kuramsal moment taşıma kapasitesi aynı şekil üzerinde yatay siyah çizgiler ile gösterilmiştir. Kiriş plastik moment taşıma kapasitesinin hesabında Bölüm 3.2'de verilen bağıntı kullanılmıştır.



Şekil 3.225 : Tüm numunelerin kiriş taban kesitinde moment - dönme zarf eğrileri.

EEPC-B ve *EEPC-HS* numunelerinde, kiriş uç kesitinde plastik moment taşıma kapasitesine erişilememektedir. Bunun sebebi panel bölgesinde gerçekleşen hasar durumudur. Diğer numunelerde ise kiriş uç kesitinde plastikleşme meydana gelmektedir. Bu durum, Şekil 3.225'te verilen şekildeğiştirme grafiklerinden net olarak izlenebilmektedir.

4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

4.1 Genel

Deneysel olarak incelenen numuneler *ABAQUS* yazılımı kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel sonuçlara yakın büyüklükler elde edebilmek için model kalibrasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, *EEPC-DDS* numunesine ait çevrimsel yük - yerdeğiştirme eğrisinin zarfına sayısal olarak ulaşmak için çubuk sistem üzerinde basit bir itme analizi uygulaması gerçekleştirilmiştir.

4.2 ABAQUS Yazılımı İle Sonlu Elemanlar Analizi

Sayısal modellemede *ABAQUS CAE* kullanıcı ara yüzü kullanılmıştır (ABAQUS/CAE, Version 6.9.1 EF).

Kolon ve kirişlerde gövde ve başlıklar bir bütün olarak tanımlanmıştır.

Panel bölgesinden uzakta yer alan mesnet bölgeleri ile kiriş uç bölgesinde yer alan berkitme plakaları kiriş başlıkları ile birleştirilerek tek parça şeklinde tanımlanmıştır. Böylelikle sayısal model için analiz süresinde önemli tasarruf sağlanmıştır.

ABAQUS, sistem elemanlarının *katı eleman (solid), levha eleman (shell) ve (wire elemanlar)* ile modellenmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada kolon, kiriş ve diğer çelik plaka elemanlar *levha elemanlar* ile (Ucak, 2012), bulonlar ise *birleşim elemanı (connector)* ve *kablo elemanlar* ile modellenmiştir.

ABAQUS programı kullanılarak hazırlanan 3 boyutlu sayısal modellerde; her düğüm noktasında üçü doğrusal, üçü açısal olmak üzere altı serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Kolon ve kiriş kesitindeki sinüzoidal formdaki gövde, *levha eleman* modulünün altında, sinüs dalga formunun boyu ve genliği dikkate alınarak işaretlenen yardımcı noktaların eğrisel olarak birleştirilmesi ile elde edilmiştir.

Kiriş gövde ve başlıklarını alın plakasına bağlayan kaynak dikişleri ile, üçgen formdaki berkitme elemanlarını kiriş başlığı ve alın plakasına bağlayan kaynak

dikişleri *ABAQUS* yazılımındaki *bağ elemanı (tie constraint)* özelliği kullanılarak temsil edilmiştir. Bu özellik ile iki farklı yüzey arasında göreli harekete izin verilmemesi sağlanmıştır.

ABAQUS programı ile yapılan tüm çözümlemelerde geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan davranış dikkate alınmıştır. Bu amaçla programda yer alan *Nlgeom* değişkeni aktif hale getirilmiştir.

EEPC-SDS ve *EEPC-DDS* numunelerinde, düğüm noktası içine yerleştirilen çapraz elemanların burkulma davranışı programda yer alan "*automatic stabilization*" özelliği aktif hale getirilerek izlenmiştir. Bu özellik aktif hale getirildiğinde, bölgesel stabilite kayıpları ve burkulma ile malzemeye bağlı kararsızlıklar hesapta dikkate alınabilmektedir.

Deneysel çalışmada kiriş kolon bağlantısını sağlayan bulonlara uygulanan 980 Nm büyüklüğündeki tork momenti (DIN13 normuna göre civata torklama tablosu), sayısal modelde de bu elemanlara etkitilmiştir.

Sonlu eleman analizi iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, kiriş alın plakasını kolona bağlayan bulonlara öngerme kuvvetlerinin uygulanması ve kolona eksenel kuvvetin etkitilmesi işlemleri yapılmıştır. İkinci adımda ise deneysel çalışmada kullanılan tersinir tekrarlı yerdeğiştirme çevrimlerinin etkitilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Malzeme modeli

Ayrıntıları Bölüm 3.3'te yer alan çelik numunelere ait gerilme - şekildeğiştirme ilişkileri; nominal gerilme - nominal şekildeğiştirme boyutundan, gerçek gerilme - gerçek şekildeğiştirme boyutuna dönüştürülmüştür. Bu amaçla aşağıda verilen eşitlikler kullanılmıştır (ABAQUS/CAE User's Manual, Version 6.9.1 EF).

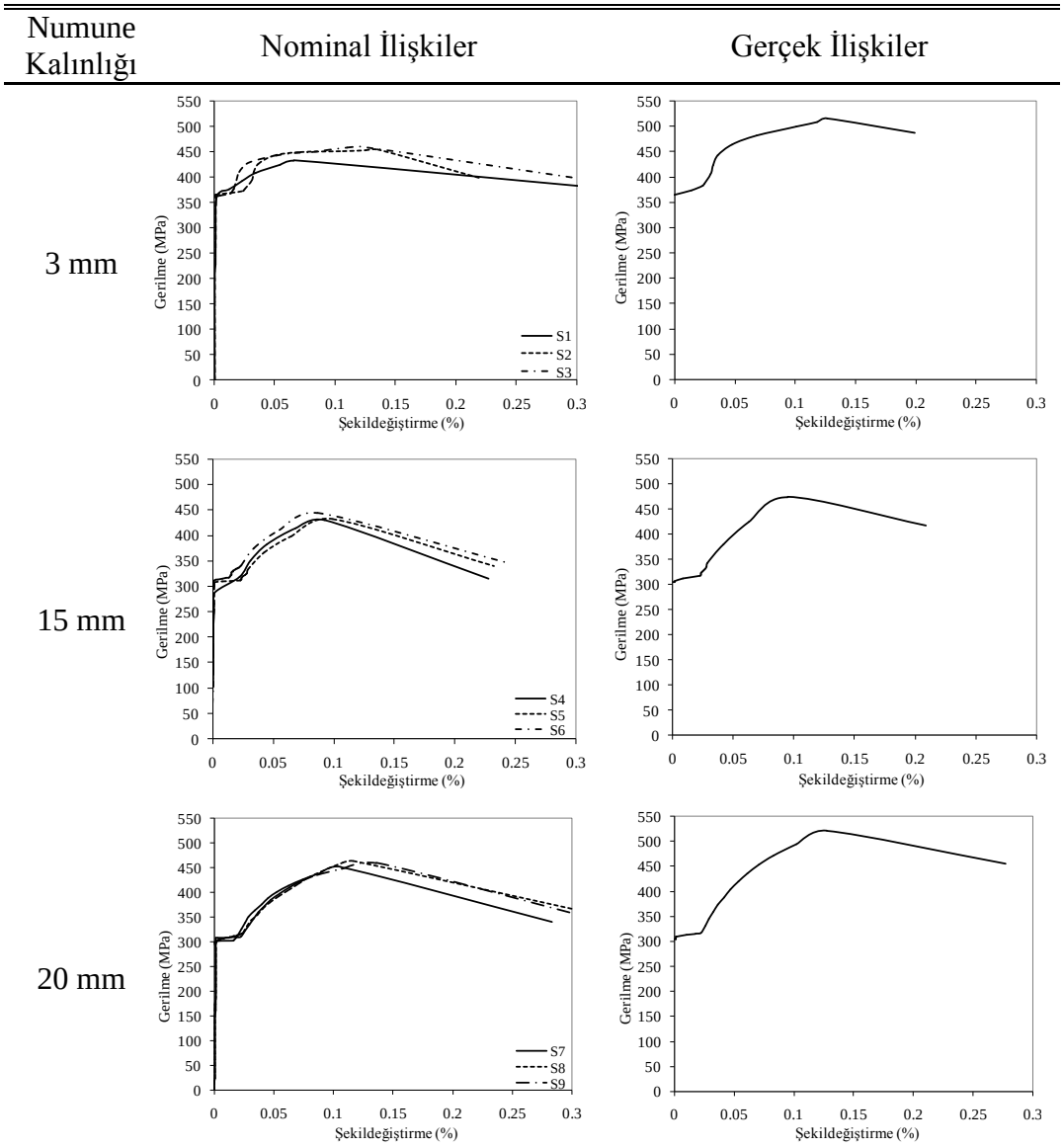
Nominal şekildeğiştirmelerden gerçek şekildeğiştirmelere dönüşüm için (4.1) ifadesi kullanılmıştır:

$$\varepsilon_g = \ln(1+\varepsilon_{nom}) \qquad \textbf{(4.1)}$$

Nominal gerilme değerlerinin gerçek gerilmelere dönüşümü için de (4.2) eşitliği kullanılmıştır:

$$\sigma_g = \sigma_{nom}(1+\varepsilon_{nom}) \quad \textbf{(4.2)}$$

Deneysel sonuçlardan elde edilen nominal şekildeğiştirme-nominal gerilme ilişkileri ile bu sonuçların ortalamalarından dönüşüm formülleri ile elde edilen gerçek şekildeğiştirme - gerçek gerilme ilişkileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Numunelere ait şekildeğiştirme - gerilme ilişkileri.

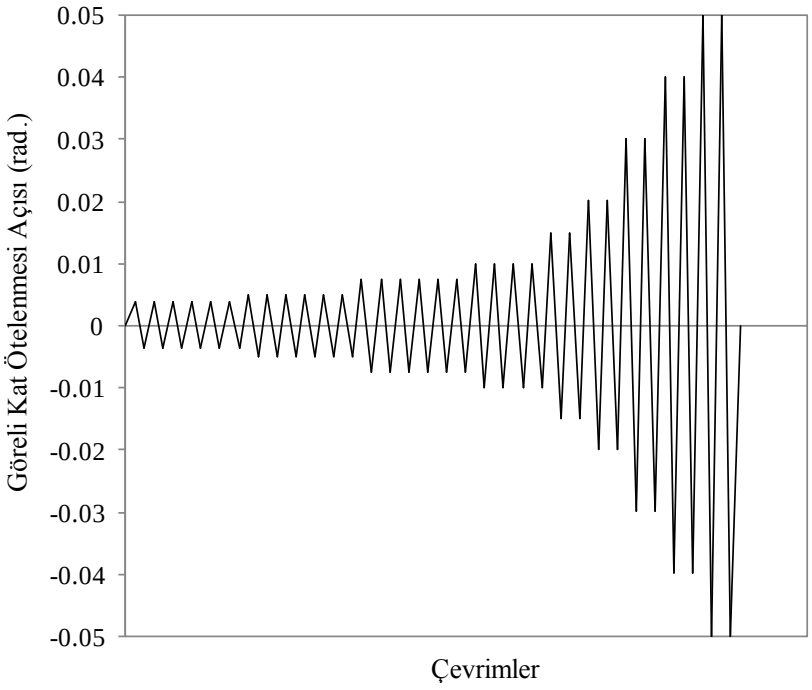
Çeliğin plastik bölgedeki pekleşme davranışının tanımı için, *ABAQUS* yazılımında mevcut olan *kinematik ve izotropik pekleşme* türü kullanılmıştır. Kısaca *kombine pekleşme (combined hardening)* olarak adlandırılan model çevrimsel yükleme durumu için önerilmektedir (ABAQUS Inc., 2005; Ucak, 2012).

4.2.2 Sınır koşulları ve yükleme fonksiyonunun tanımı

Deneysel çalışmada kullanılan yerdeğiştirme protokolü sayısal hesapta uygulanmıştır. Yerdeğiştirme protokolü, sonlu eleman modelinde karşı gelen noktaya mesnet çökmesi fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu amaçla hidrolik verenin bağlandığı kottaki noktaya hareket doğrultusunda bir mesnet atanmıştır.

Deneysel çalışmada numunenin düzlem içinde kalmasını sağlayan kiriş elemanlar sayısal modelde düzleme dik doğrultudaki hareketin mesnetler ile sınırlandırılmasıyla temsil edilmiştir.

Her numune için uygulanan yerdeğiştirme fonksiyonları arasında küçük farklar olabildiğinden, numunelerde ilgili deneysel veri kullanılmıştır. Şekil 4.2'de numunelere etkitilen genel yerdeğiştirme fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 4.2 : Numunelere etkitilen yerdeğiştirme çevrimleri.

Kolonun iki ucunda deneysel çalışmada olduğu gibi basit mesnet sınır koşulları sağlanmıştır. Buna göre, bir uçta üç doğrultudaki doğrusal hareketler engellenmiş, dönmeler serbet bırakılmış; diğer uçta ise düşey ve düzlem dışı doğrusal hareketler engellenirken, yatay hareket ve dönmelere izin verilmiştir. Bu mesnet koşulları berkitme elemanların altında ve üstünde çizgisel olarak tanımlanmıştır. Deneysel çalışmada kolona etkitilen eksenel yük, sayısal modelde yayılı alan yükü olarak kayıcı mesnetin bulunduğu taraftan kolona etkitilmiştir.

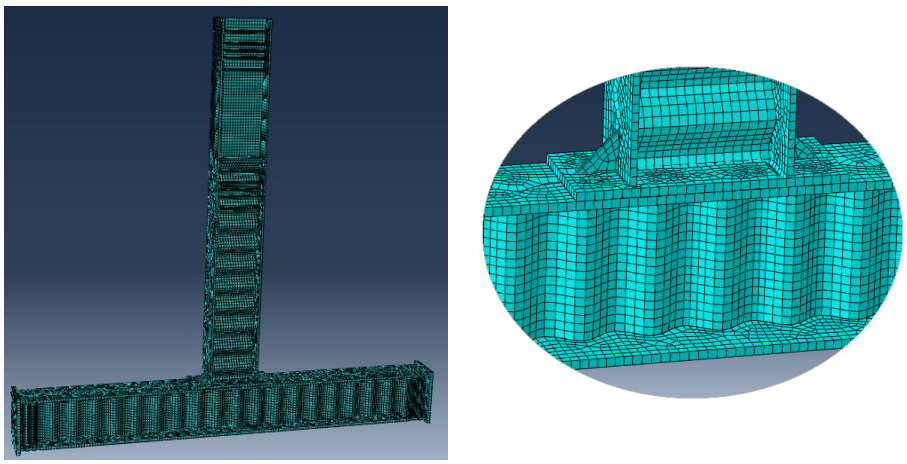
4.2.3 Sonlu elemanlara bölme işlemi

Hazırlanan sayısal modellerde gerilmelerin yoğun olacağı bölgelerde daha küçük boyutlu elemanlar kullanılmasına özen gösterilmiştir. Bu amaçla panel bölgesi ve yakın çevresindeki sonlu eleman boyutları göreli olarak daha küçük seçilmiştir. Sonlu eleman boyutlarının küçülmesi çözümdeki doğruluğu arttırırken, toplam çözüm süresini arttırmakta ve yakınsama hızına etki edebilmektedir. Bu nedenle sonlu eleman boyutları seçilirken bazı denemeler yapılarak bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

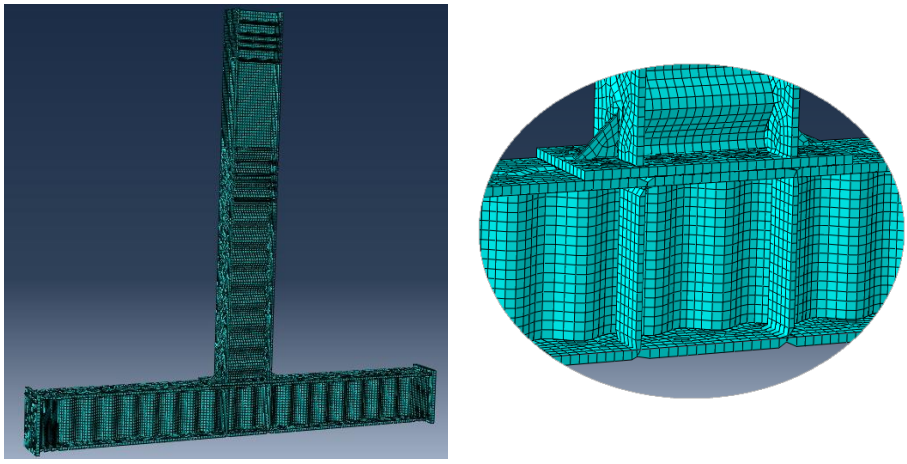
Çelik kesitlerin modellenmesinde, *ABAQUS* programında yer alan *S4R levha elemanı* kullanılmıştır (Ucak, 2012). *S4R*, genel amaçlı bir sonlu eleman olup, dört düğüm noktası içermektedir. Her düğüm noktasında 3 dönme ve 3 ötelenme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır (ABAQUS/CAE User's Manual, Version 6.9.1 EF).

Sayısal modelde kullanılan sonlu eleman sayıları, *EEPC-B* için 18524, *EEPC-HS* için 18885, *EEPC-H0* için 19043, *EEPC-H2* için 19330, *EEPC-SDS* için 19135 ve *EEPC-DDS* için 19385'tir. Bu eleman sayıları ile hesap süreleri, I7 işlemcili ve 6GB Ram'e sahip bir bilgisayarda 30 - 65 saat arasında değişmektedir.

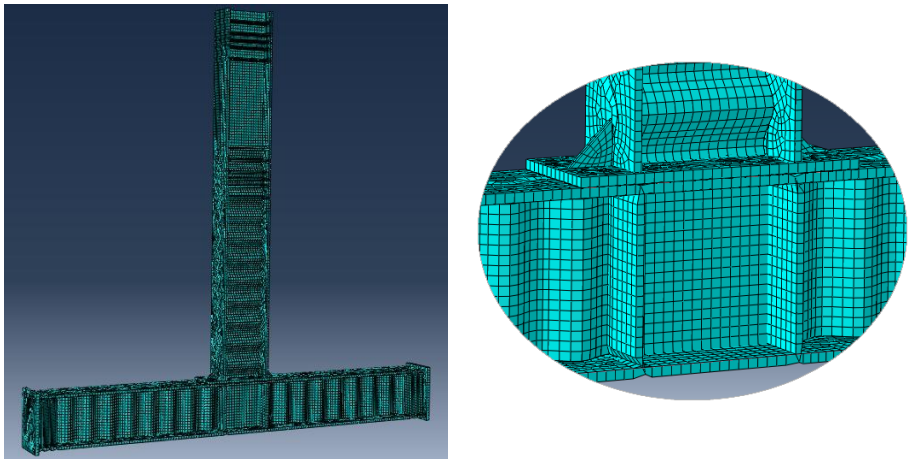
Deney numunelerine ait sonlu eleman ağı görünüşleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



EEPC-B

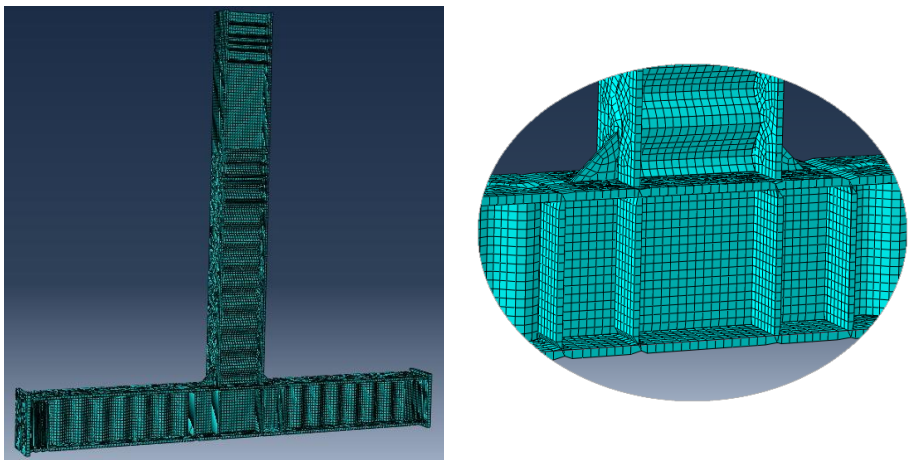


EEPC-HS

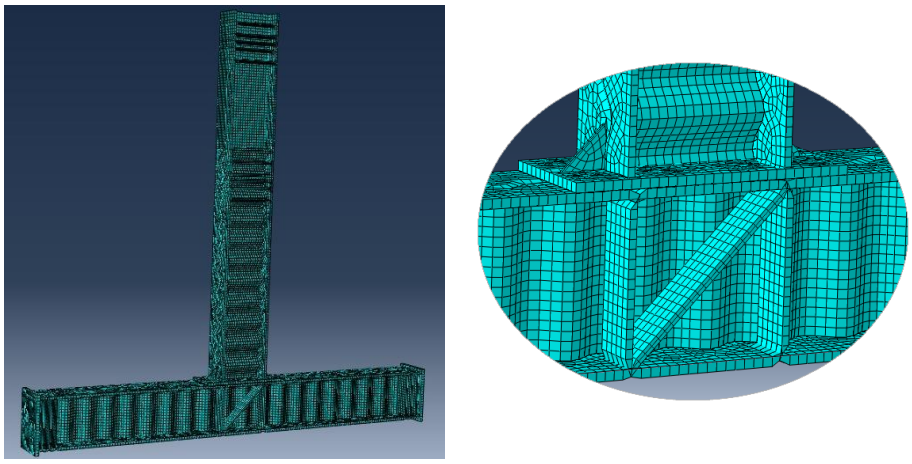


EEPC-H0

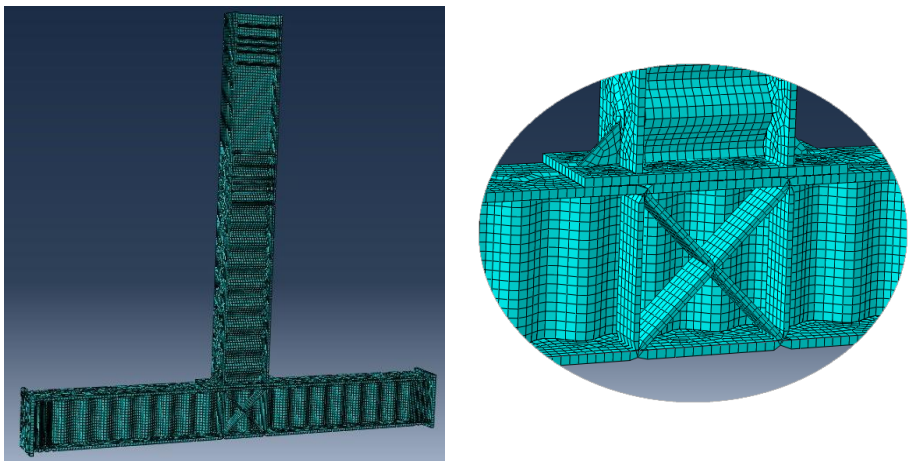
Şekil 4.3 : Numunelere ait sonlu eleman ağları.



EEPC-H2



EEPC-SDS



EEPC-DDS

Şekil 4.3 (devam) : Numunelere ait sonlu eleman ağları.

4.2.4 Temas yüzeyleri

Temas yüzeyleri, elemanlar arasındaki ilişkiyi tanımlayarak yük ve gerilme aktarımını sağlamaktadır.

Kiriş alın plakası ile kolon başlığının teması *ABAQUS* yazılımında yer alan *yüzeyin yüzeye teması (surface to surface contact)* özelliği kullanılarak temsil edilmiştir. İki yüzey arasında kaymayı ifade eden davranış biçimi *küçük kayma türü (small sliding)* şeklinde tanımlanmıştır. *Teğetsel davranış* (*tangential behavior)* menüsü içinde yer alan sürtünme katsayısı 0.35 olarak seçilmiştir (Prabha ve diğ., 2011).

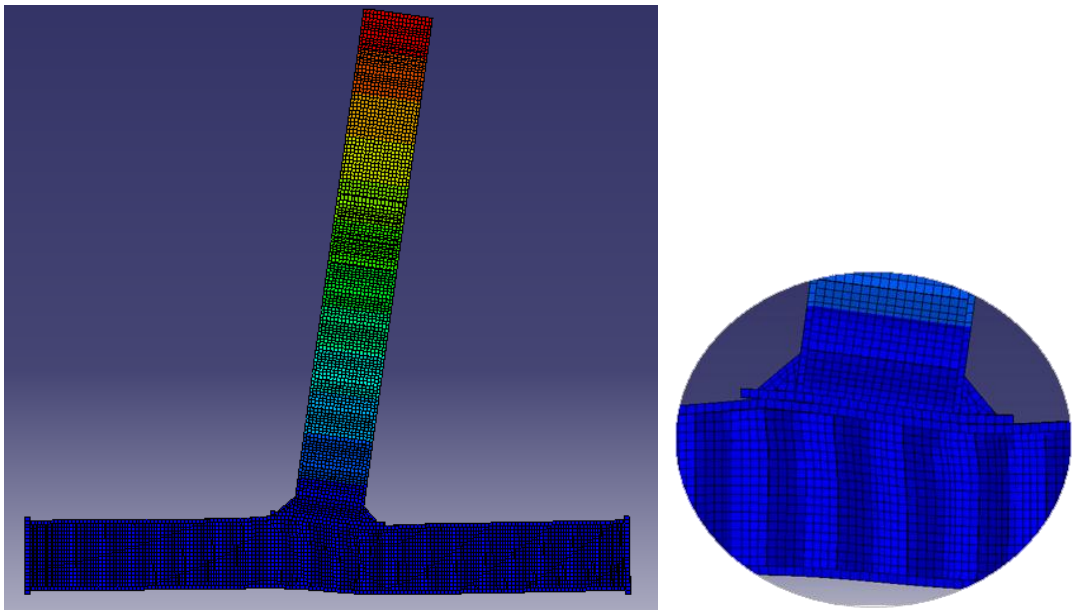
Yük aktarımının sürekli olduğu varsayılmıştır. Bulonları temsilen kullanılan elemanların birbirine bağlandığı referans noktalar delik cidarlarına yazılımdaki *sürekli bağlantı (coupling)* özelliği kullanılarak bağlanmıştır.

Master Surface olarak kolon elemanının başlığı, *Slave Surface* olarak da kiriş alın plakasının yüzeyi seçilmiştir.

4.3 Sayısal Hesap ve Model Kalibrasyonları

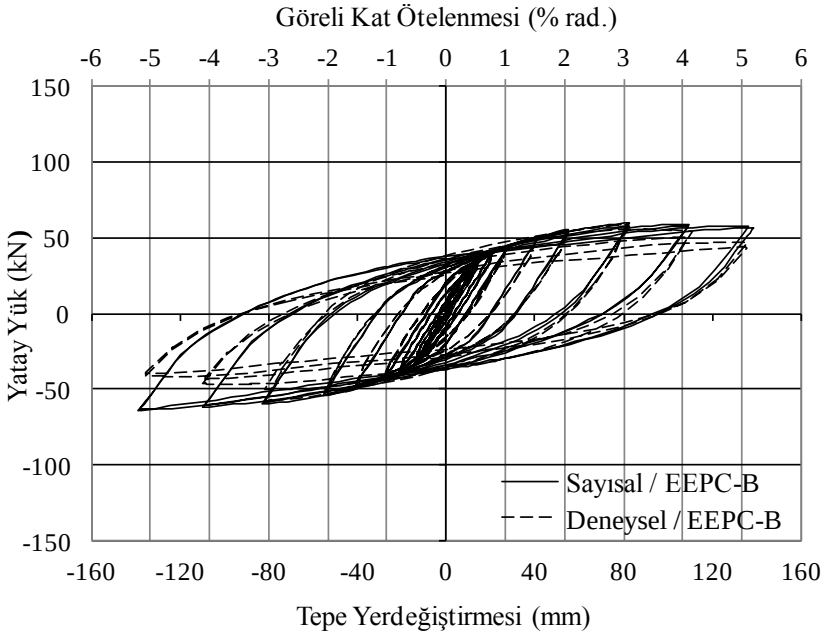
4.3.1 EEPC-B numunesi

EEPC-B numunesinin sonlu eleman analizi 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevriminin sonuna kadar gerçekleştirilmiştir. 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi aşaması sonunda elde edilen deforme olmuş sistem ve panel bölgesi yakın görünüşü Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Deneyde gözlenen panel bölgesi içinde sinüs gövde formunun bozulmasından sonraki gövde yırtılması olayı, sonlu eleman modelinde sinüs formun bozulması şeklinde gözlenmiştir.



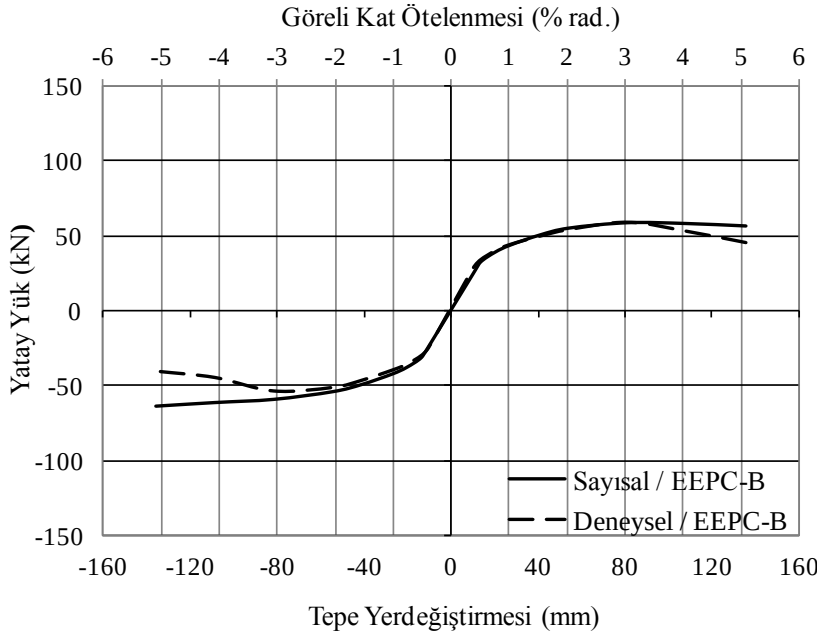
Şekil 4.4 : EEPC-B numunesine ait deforme olmuş görünüş.

Sonlu eleman analizi ile elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi deney sonucu ile birlikte Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 : EEPC-B numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

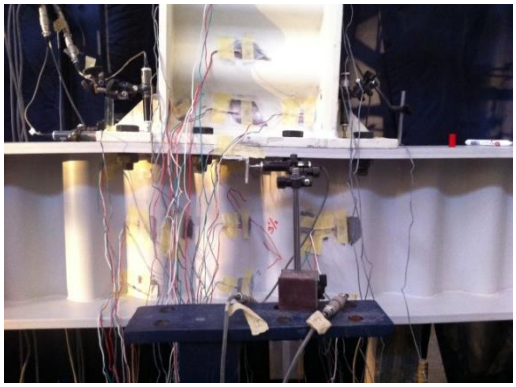
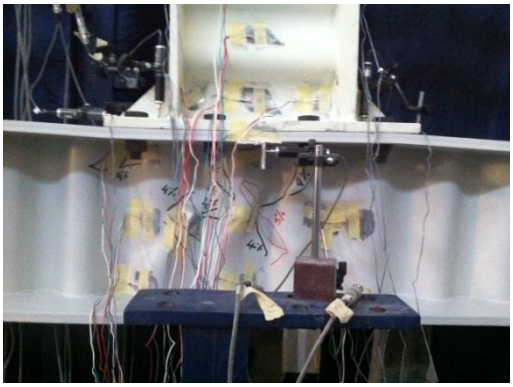
Yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin zarf eğrisi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 : EEPC-B numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

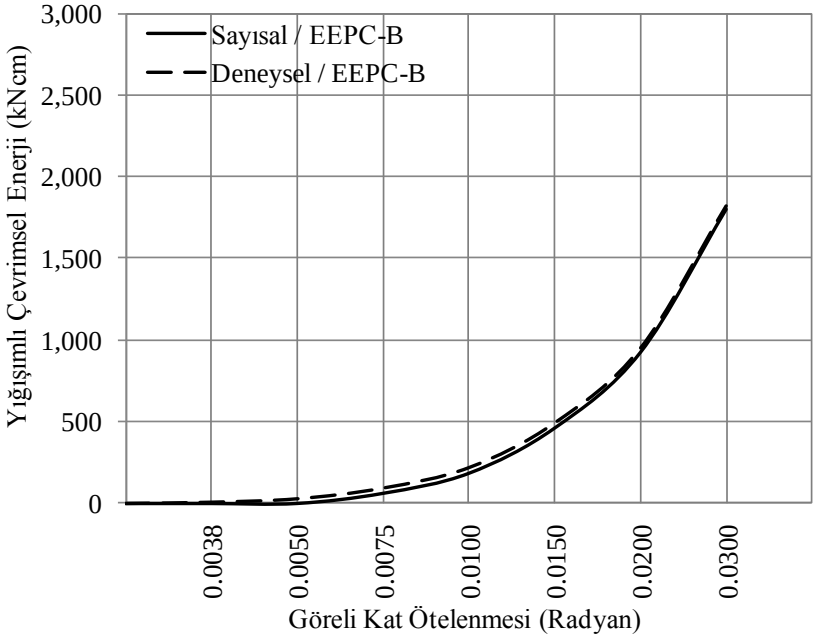
Sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen yerdeğiştirme - yatay yük dayanımı ilişkilerine bakıldığında, sonuçların 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevriminin

sonuna kadar birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu çevrim eşiğinde panel bölgesi içindeki levhanın sinüs formu bozulmuş ve sonraki çevrimlerde deney numunesinde panel bölgesinin ortasında yırtık meydana gelmiş olması nedeni ile sonuçlar arasındaki uyum azalmıştır. Deneysel çalışmada, 0.03 rad. ve 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinin tamamlanmasının ardından panel bölgesinde ortaya çıkan hasar durumu Şekil 4.7'de verilmiştir.

0.030 rad. göreli ötelenme eşiği sonu	0.040 rad. göreli ötelenme eşiği sonu
	

Şekil 4.7 : EEPC-B numunesi hasar durumları.

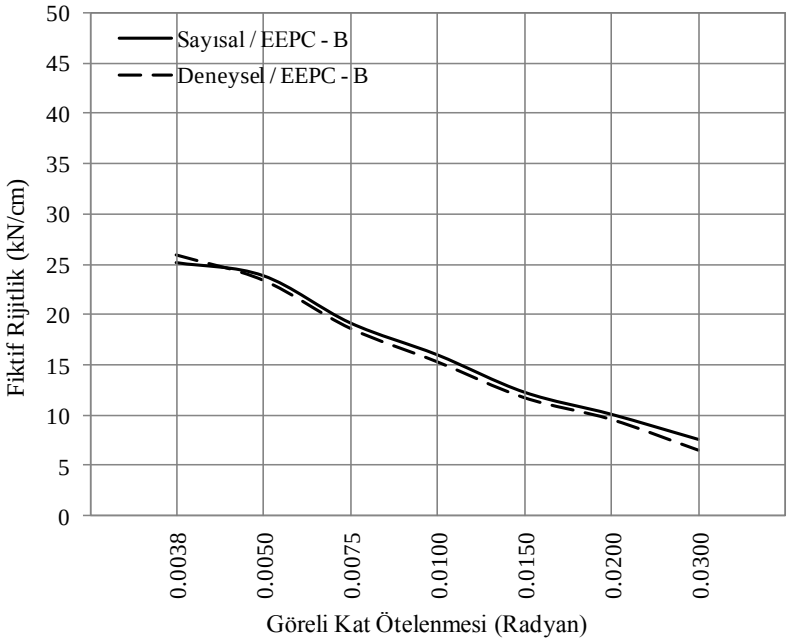
Yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin kapadığı alanlar hesaplanarak sayısal ve deneysel sonuçlar Şekil 4.8'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, panel bölgesinde büyük deformasyon ve yırtılmaların başladığı 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinin sonuna kadar yapılmıştır.



Şekil 4.8 : EEPC-B numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi.

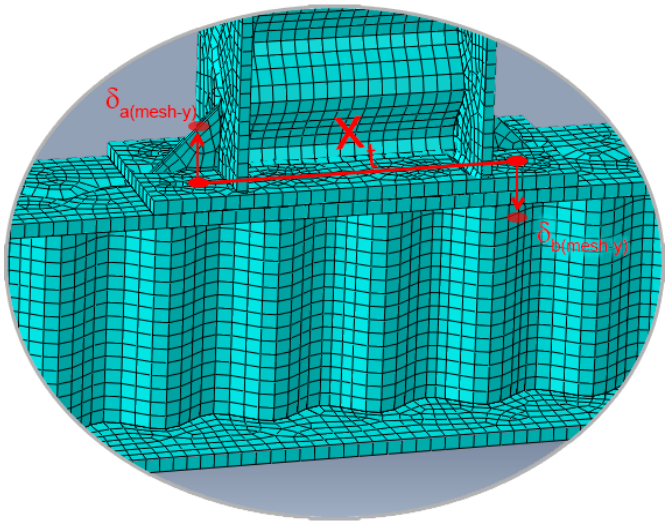
Bu aralıkta sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla çok uyumlu olduğu söylenebilir.

Yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin pikleri birleştirilerek elde edilen yatay rijitlik değişim grafikleri de Şekil 4.9'da karşılaştırılmıştır. Sayısal modeldeki rijitlik değişiminin deneyle uyumlu olduğu görülmektedir.

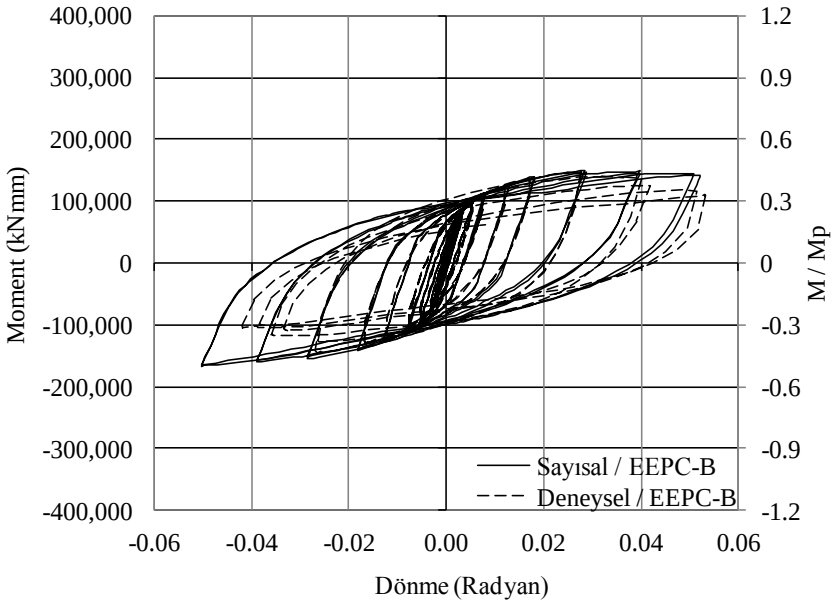


Şekil 4.9 : EEPC-B numunesinde rijitliklerin değişimi.

Sonlu eleman modelinde alın plakası üzerinde seçilen iki noktanın düşey yerdeğiştirmeleri kullanılarak bu iki nokta arasında gerçekleşen dönme büyüklüklerinin değişimine geçilmiştir, Şekil 4.10. Sayısal olarak bulunan moment - dönme ilişkisi deneysel sonuçlarla Şekil 4.11'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.10 : Sayısal modelde kiriş alt ucunda dönme hesabı.

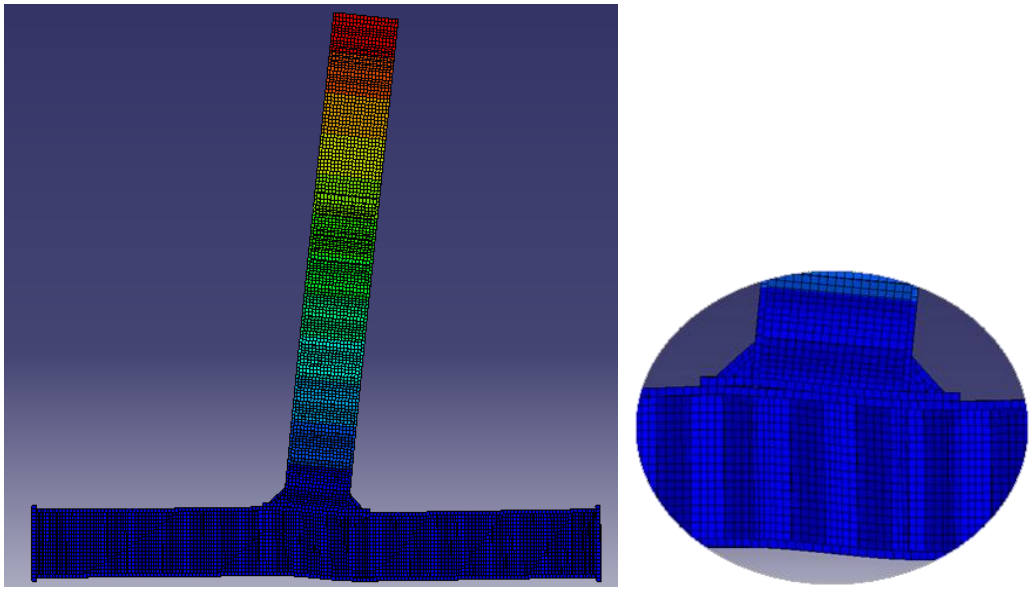


Şekil 4.11 : EEPC-B numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri.

Yük - yerdeğiştirme çevrimlerinde gözlenen duruma benzer olarak; 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyine kadar moment - dönme çevrimlerinin oldukça uyumlu olduğu söylenebilir.

4.3.2 EEPC-HS numunesi

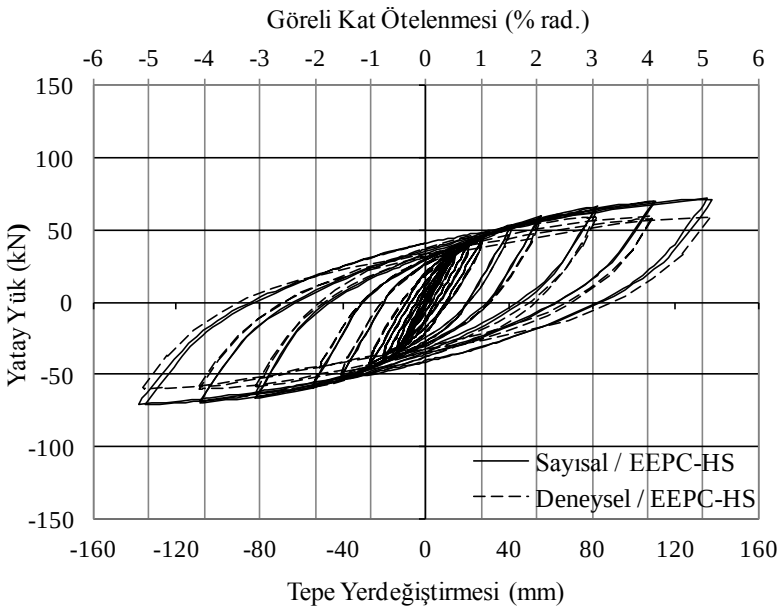
Bu numunenin sonlu eleman analizi 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin sonuna kadar yapılabilmiştir. Sayısal olarak elde edilen genel deformasyon biçimi ve panel bölgesi deformasyonu Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 : EEPC-HS numunesine ait deforme olmuş görünüş.

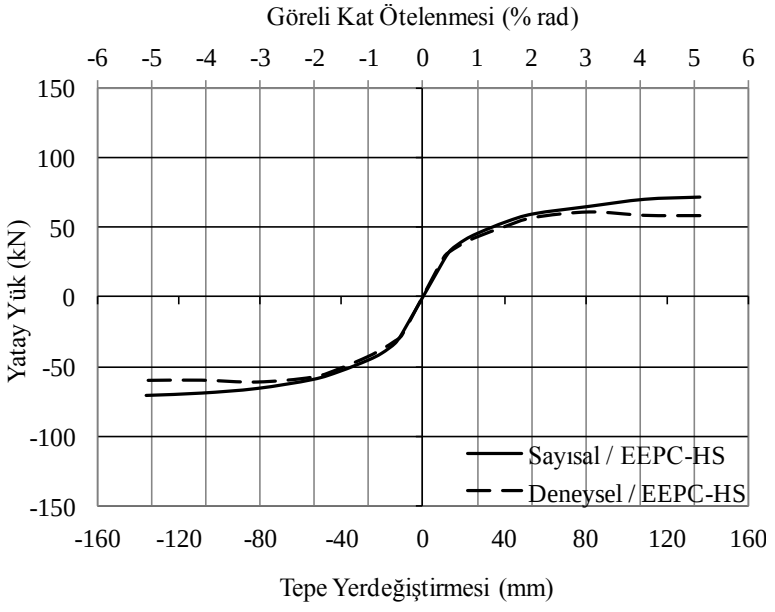
Deneyde, panel bölgesinde sinüs formunun bozulmasını takiben ortaya çıkan yırtılma olayı sayısal modelde temsil edilememektedir.

Deneysel ve sayısal analizde 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesi sonuna kadar elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme çevrimleri karşılaştırılmıştır. Eğrilerin genel olarak uyumlu oldukları gözlenmektedir, Şekil 4.13.



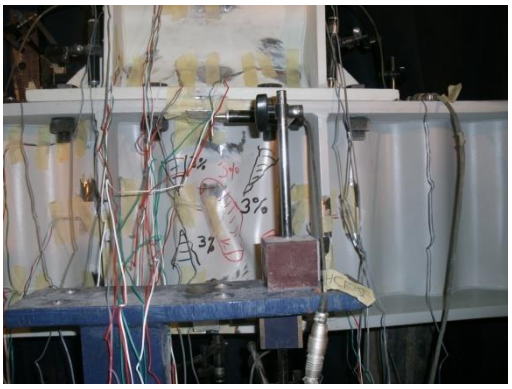
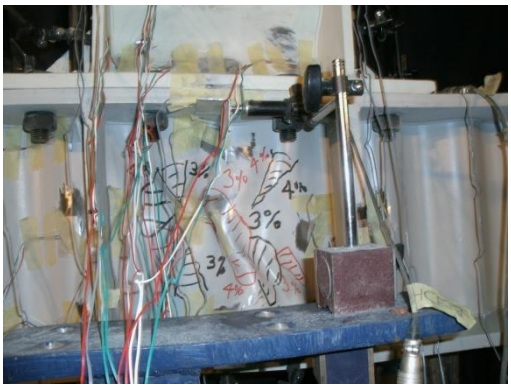
Şekil 4.13 : EEPC-HS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

Yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin zarf eğrileri oluşturularak Şekil 4.14'te verilmiştir.



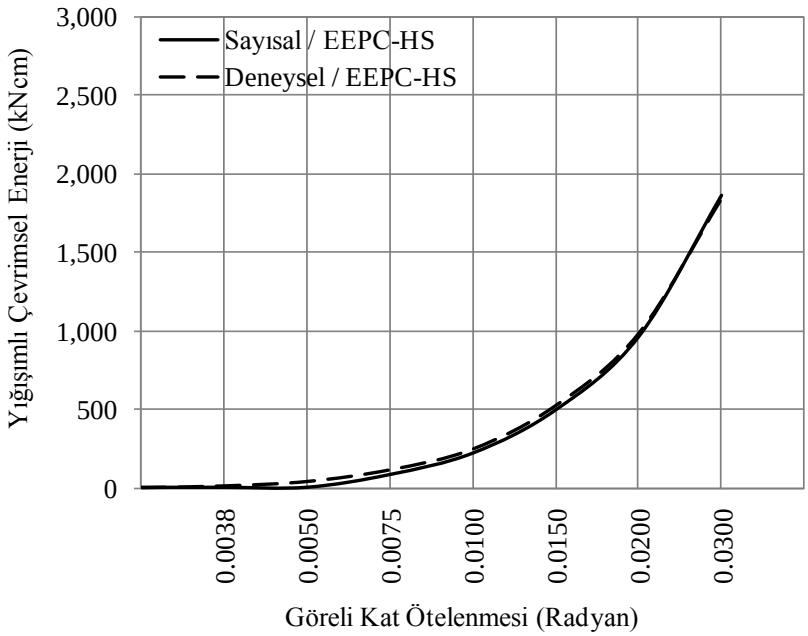
Şekil 4.14 : EEPC-HS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

Zarf eğrilerinin 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevriminin sonuna kadar birbirleri ile oldukca uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. *EEPC-B* numunesinde de olduğu gibi, bu eşikte panel bölgesi içinde kalan gövdenin sinüs formunun bozulması ve sonrasında yırtılmaların oluşması ile deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyum azalmıştır. Deneysel çalışmada, 0.03 ve 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinin uygulanması sonrasında ortaya çıkan hasar durumu Şekil 4.15'te verilmiştir.

0.030 rad. göreli ötelenme eşiği sonu	0.040 rad. göreli ötelenme eşiği sonu
	

Şekil 4.15 : EEPC-HS numunesi hasar durumları.

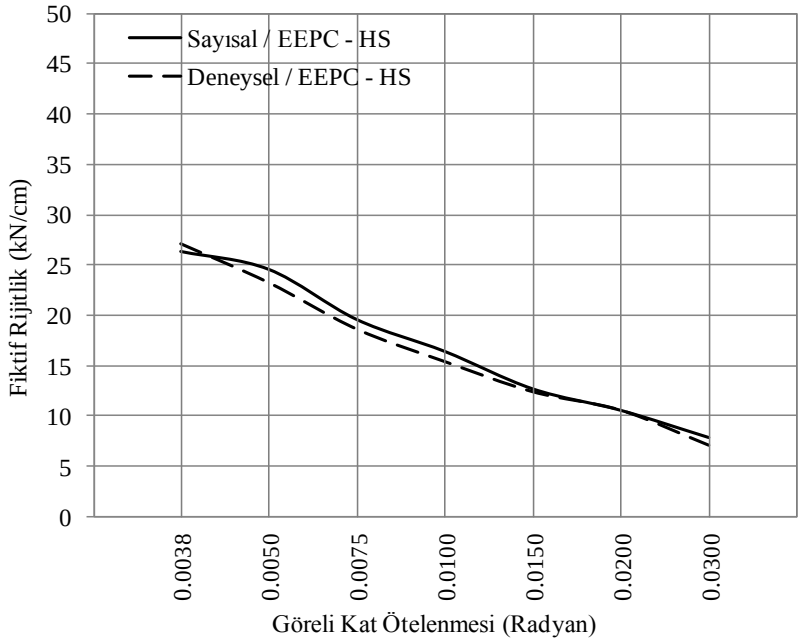
Deneysel ve sayısal yolla elde edilen yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin alanları hesaplanarak yığışımlı çevrimsel enerji - göreli kat ötelenmesi ilişkileri Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 : EEPC-HS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi.

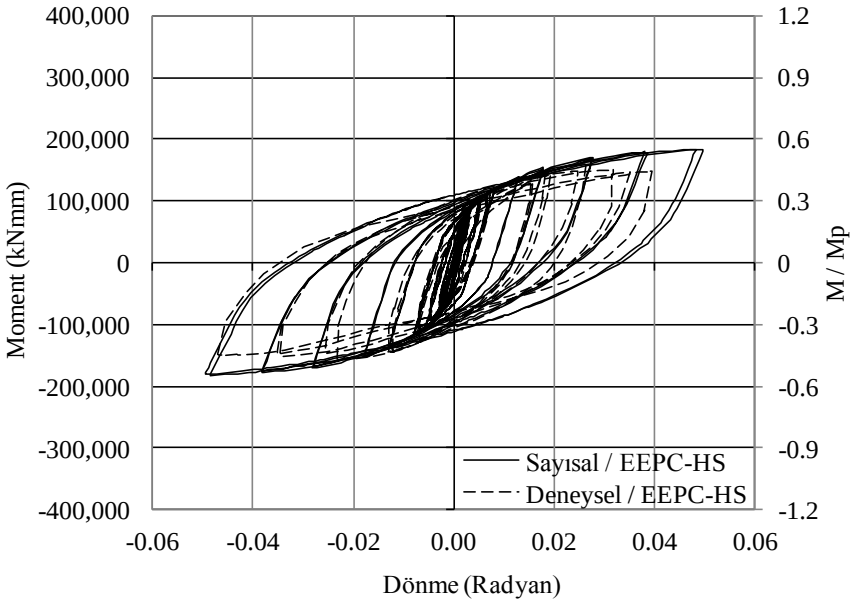
Deneysel ve sayısal sonuçların, 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinden itibaren birbiri ile uyum içinde oldukları gözlenmektedir. 0.01 rad. eşiğinden önce deneysel çalışmada tüketilen enerji bir miktar daha büyük olmaktadır.

Deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin piklerinin doğrusal olarak birleştirilmesiyle elde edilen yatay rijitliklerin göreli kat ötelenmesine göre değişimi Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Yatay rijitlikteki değişimin genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.17 : EEPC-HS numunesinde rijitliklerin değişimi.

Kiriş alt ucu için oluşturulan moment - dönme ilişkilerinin karşılaştırması Şekil 4.18'de verilmiştir.

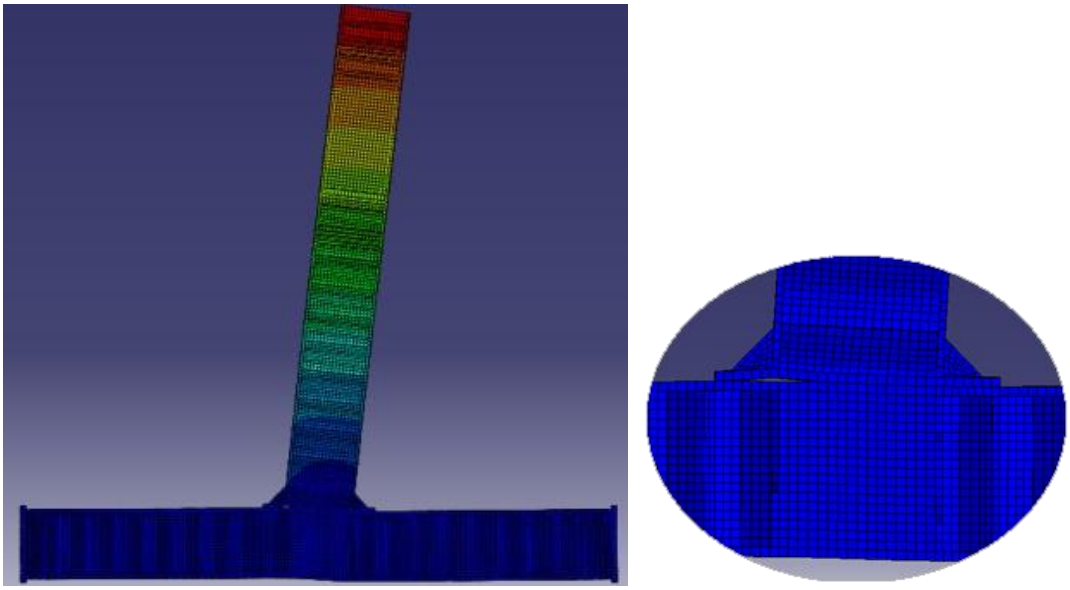


Şekil 4.18 : EEPC-HS numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri.

Diğer sonuçlarda da olduğu gibi sayısal ve deneysel moment - dönme ilişkilerinin de 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevriminin sonuna kadar birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları gözlenmiştir.

4.3.3 EEPC-H0 numunesi

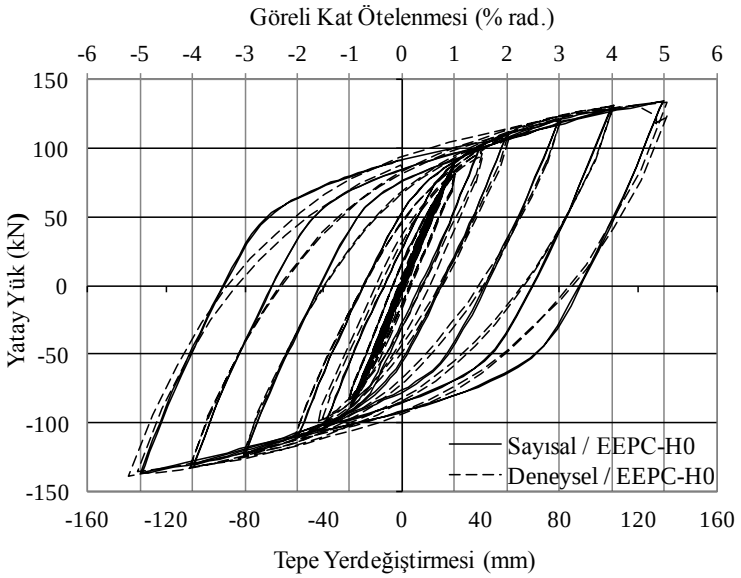
EEPC-H0 numunesi için yapılan sonlu eleman analizi, deneysel çalışma ile paralel şekilde, 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesi tamamlanana kadar devam ettirilmiştir. Numunenin deforme olmuş durumu Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19 : EEPC-H0 numunesine ait deforme olmuş görünüş.

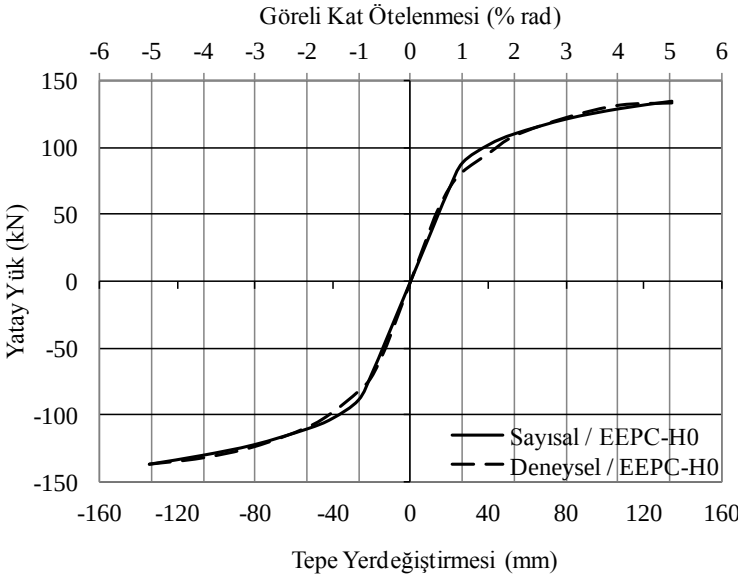
Sonlu eleman analizinden elde edilen deformasyon şekli, deneysel çalışmada ortaya çıkan deformasyon şekli ile genel olarak benzerdir. Deneysel çalışmada 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinden itibaren bazı kesitlerde gözlenen sinüs gövde - başlık ayrılmaları, sonlu eleman modelinde kesitin gövde ve başlıkları bir bütün olarak tanımlandığından gözlemlenememiştir.

Deneysel ve sayısal olarak elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme dayanımı ilişkisi 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20 : EEPC-H0 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

Yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin zarf eğrileri Şekil 4.21'de karşılaştırılmıştır.



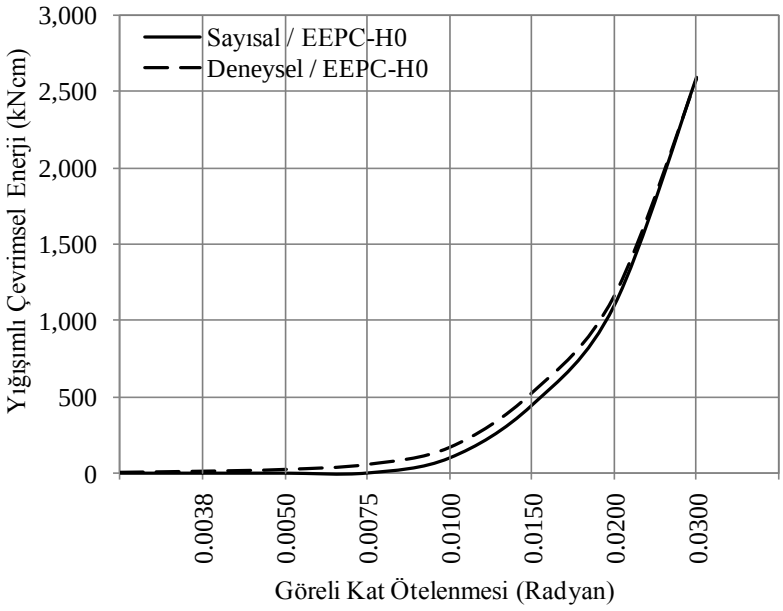
Şekil 4.21 : EEPC-H0 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen zarf eğrilerinin ± 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi aralıklarında birbirleri ile çok uyumlu oldukları görülmüştür. Deneysel çalışmada, 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinin tamamlanmasından sonra ortaya çıkan hasar biçimi Şekil 4.22'de verilmiştir.



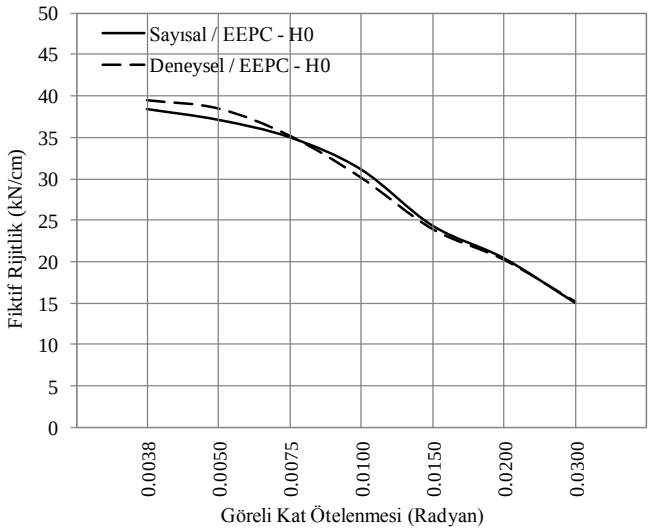
Şekil 4.22 : EEPC-H0 numunesi hasar durumu.

Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük - yerdeğiştirme ilişkilerinin çevrim alanları hesaplanarak elde edilen yığışımlı çevrimsel enerji grafikleri Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23 : EEPC-H0 numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi.

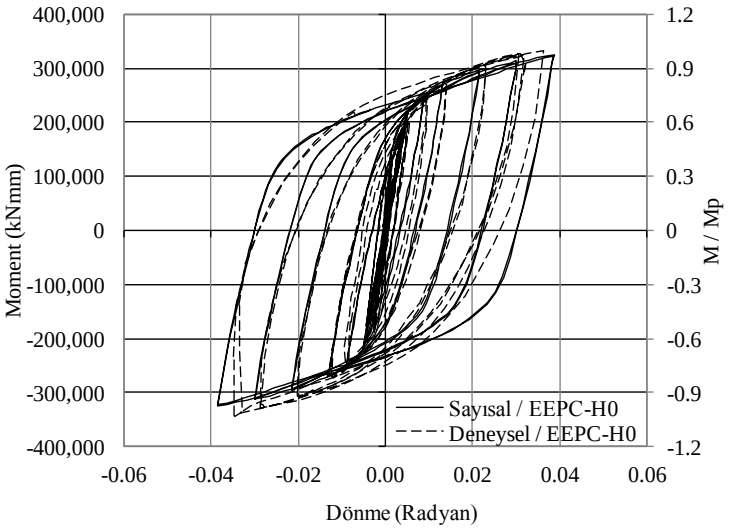
Deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük - yerdeğiştirme çevrimlerinde piklerin birleştirilmesi ile elde edilen rijitliklerin göreli kat ötelenmelerine göre değişimi Şekil 4.24'te verilmiştir. Deneysel ve sayısal rijitlik değişimlerinin 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinden sonra çok uyumlu oldukları görülmüştür.



Şekil 4.24 : EEPC-H0 numunesinde rijitliklerin değişimi.

Deneysel ve sayısal çalışmalarda, kiriş alın plakasının göreli hareketlerinden faydalanılarak elde edilen moment - dönme ilişkileri Şekil 4.25'te verilmiştir.

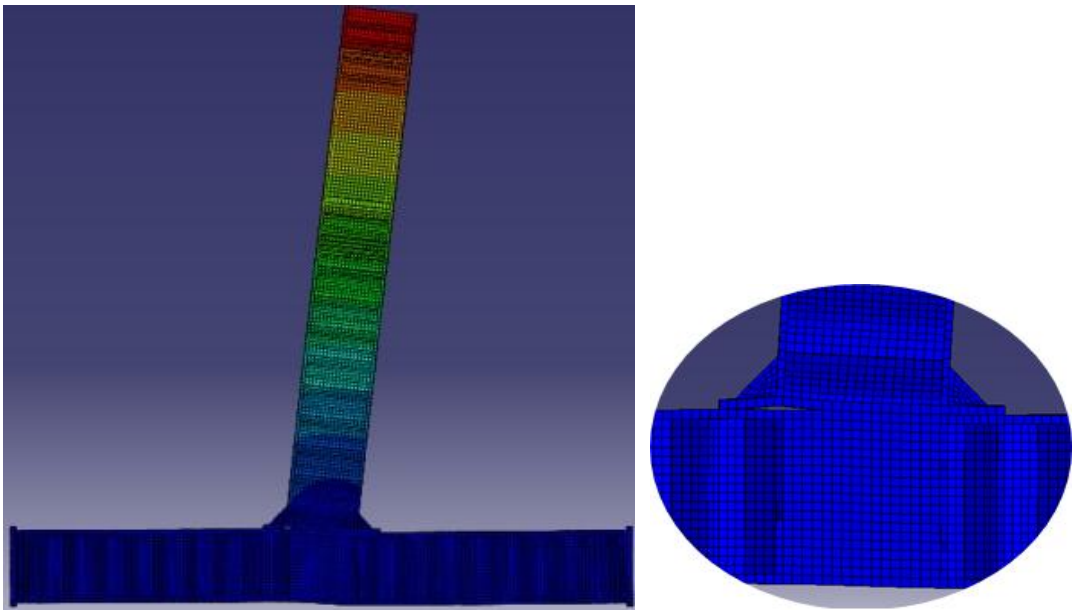
Moment - dönme ilişkilerinin, 0.040 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevriminin sonuna kadar uyum içinde oldukları görülmüştür. Bu aşamadan sonra alın plakasına komşu kesitte kiriş başlık ve gövdesi ayrılmaya başlamıştır.



Şekil 4.25 : EEPC-H0 numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri.

4.3.4 EEPC-H2 numunesi

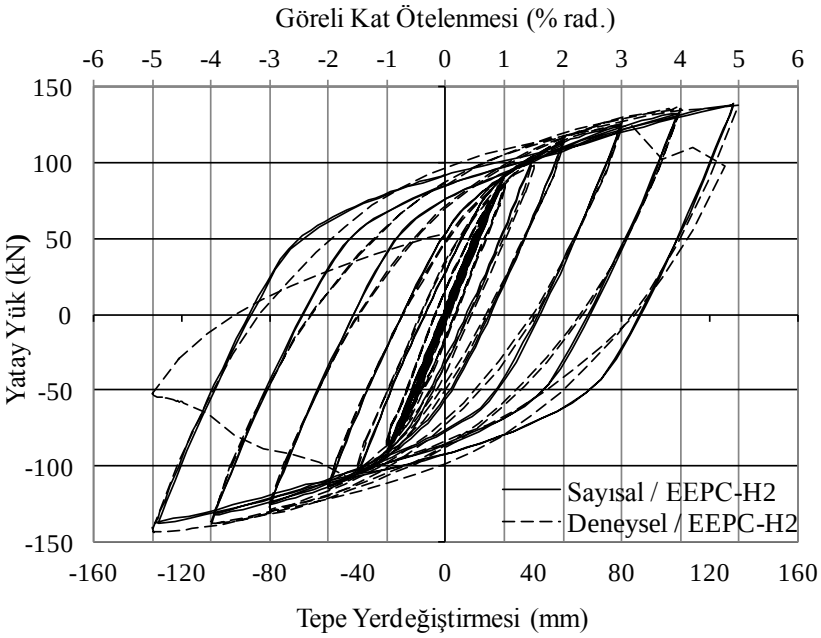
0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar gerçekleştirilen sayısal analizden elde edilen genel ve panel bölgesi şekildeğiştirmiş biçimleri Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 : EEPC-H2 numunesine ait deforme olmuş görünüş.

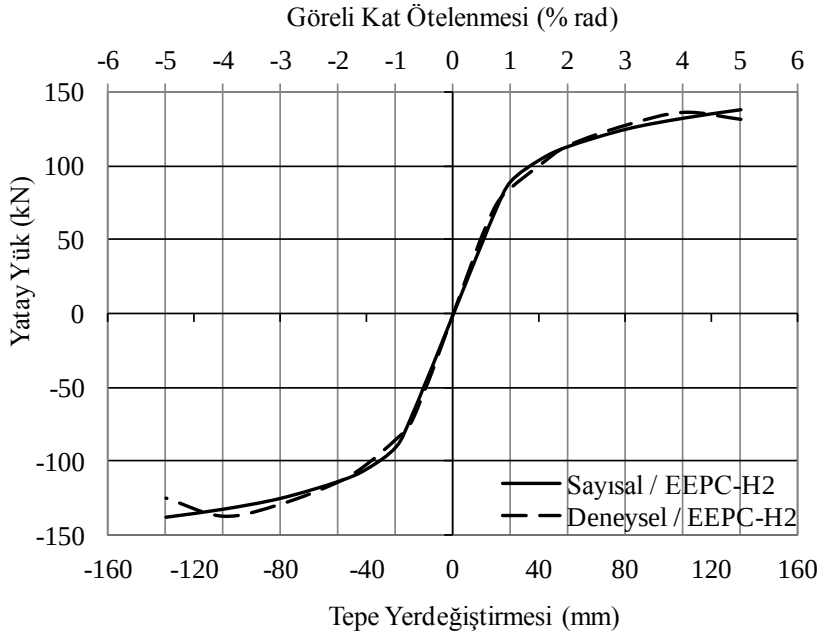
Sayısal olarak elde edilen deformasyon şekilleri, deneysel sonuçlara benzerdir. Deneysel çalışmada, 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin son çevriminde, kirişin alın plakasına yakın bölgesinde sinüs gövde - başlık arasında gözlenen ayrılma, sonlu eleman modelinde temsil edilememiştir.

Sayısal hesapla elde edilen yatay yük - kiriş uç yerdeğiştirmesi çevrimleri deneysel sonuçla 4.27'de karşılaştırılmıştır. ± 0.05 rad. çevriminde kiriş gövdesinde oluşan yırtılma düzensiz bir çevrim olarak deneysel diyagramda görülmektedir.



Şekil 4.27 : EEPC-H2 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

Yatay yük - kiriş uç yerdeğiştirmesi çevrimlerinin zarfları, deneysel ve sayısal durumlar için oluşturularak Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.28 : EEPC-H2 numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

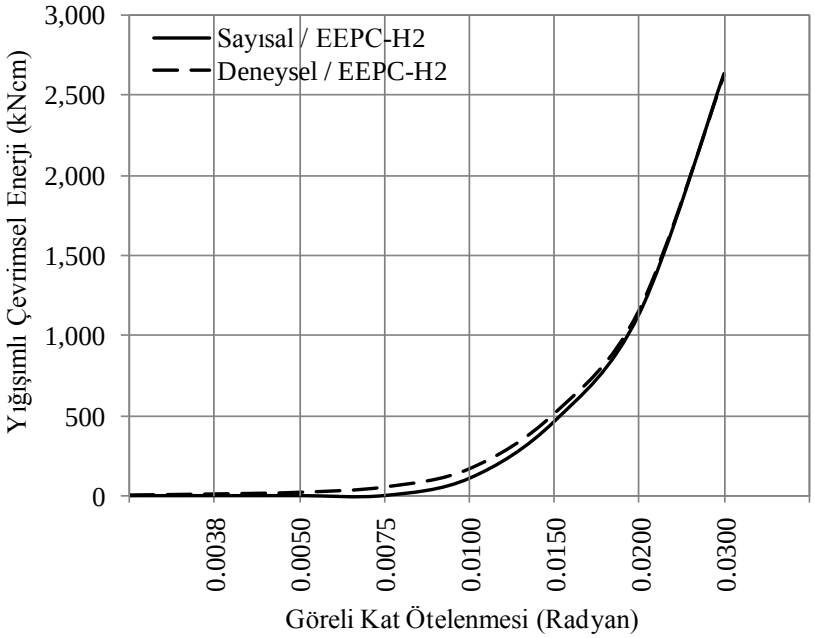
0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin son çevrimine kadar deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük - yerdeğiştirme ilişkilerininin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu aşamada kiriş gövdesinin yırtılması sonucu uyum

kaybolmuştur. 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinin tamamlanmasının ardından ortaya çıkan hasar biçimi Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29 : EEPC-H2 numunesi hasar durumu.

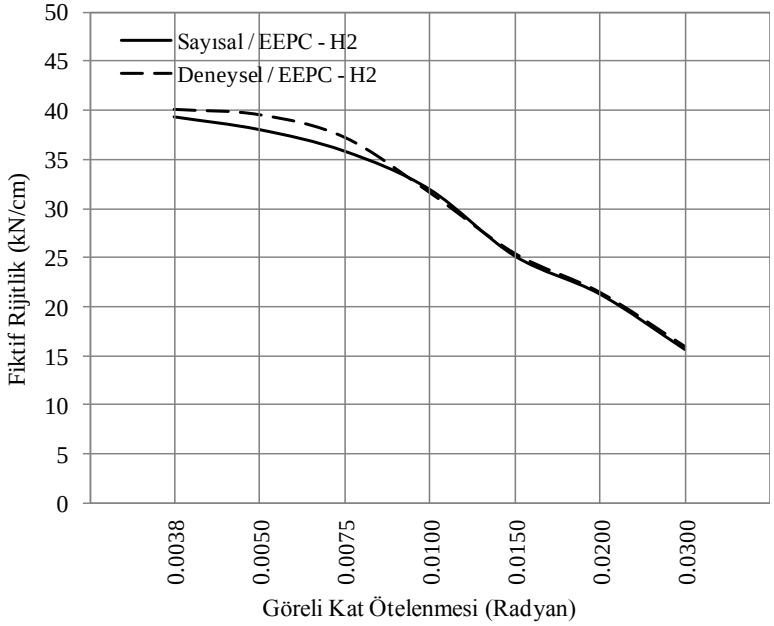
Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yük - yerdeğiştirme ilişkilerini oluşturan çevrimlerin kapladıkları alanlar hesaplanarak yığışımlı çevrimsel enerji - göreli kat ötelenmesi grafikleri çizilmiştir, Şekil 4.30.



Şekil 4.30 : EEPC-H2 numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi.

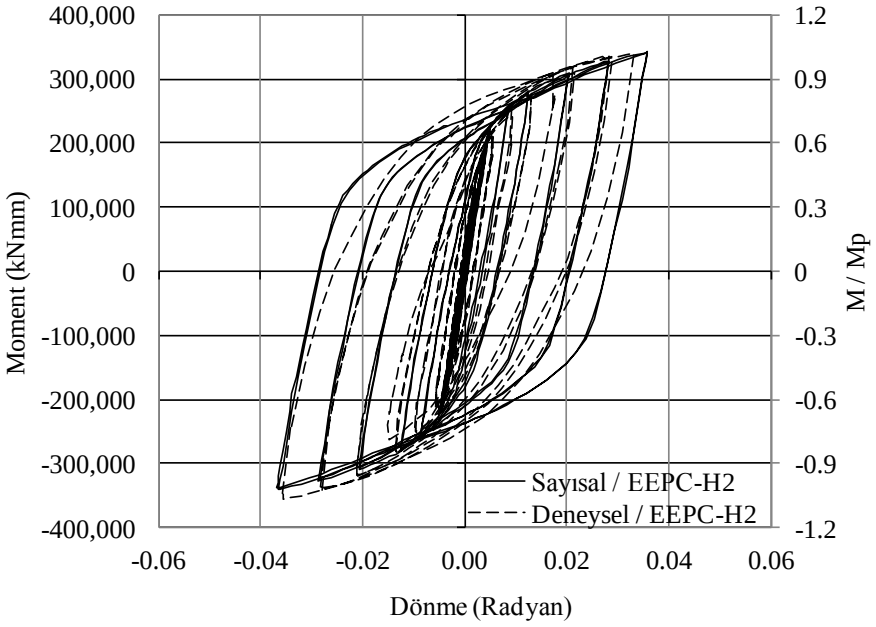
Yığışımlı çevrimsel enerji grafiklerinin uyumlu olduğu görülmüştür.

Yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin piklerinin birleştirilmesiyle elde edilen rijitlik - göreli kat ötelenmesi grafikleri Şekil 4.31'de verilmiştir. 0.01 - 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi aralığında uyumun tam olduğu görülmektedir.



Şekil 4.31 : EEPC-H2 numunesinde rijitliklerin değişimi.

Kiriş alın plakasının göreli hareketlerinden faydalanılarak oluşturulan kiriş alt ucu moment - dönme ilişkileri Şekil 4.32'de karşılaştırılmıştır.

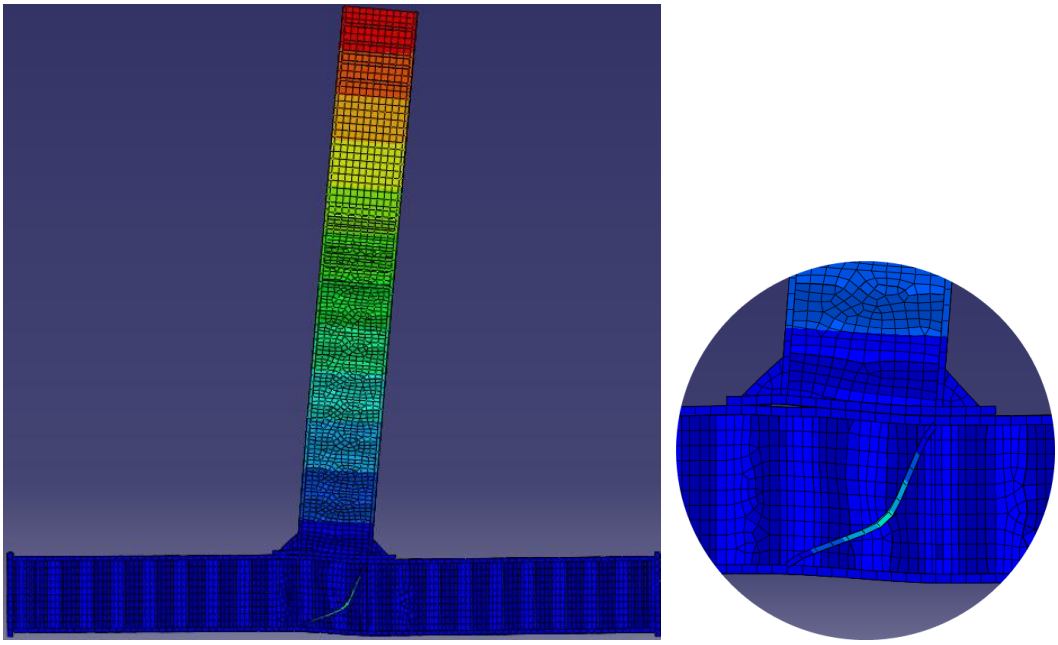


Şekil 4.32 : EEPC-H2 numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri.

Deneysel ve sayısal olarak elde edilen moment - dönme ilişkilerinin, 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimine kadar uyumlu olduğu göülmektedir.

4.3.5 EEPC-SDS numunesi

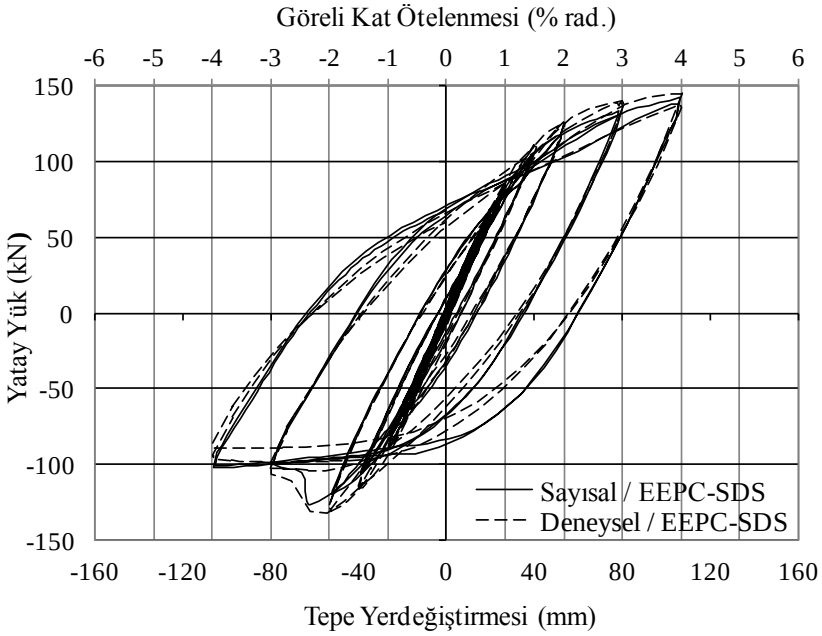
Bu numunede sonlu eleman analizi, 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar gerçekleştirilmiştir. Panel bölgesindeki çapraz elemanların burkulması ve levhanın yırtılması 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinden sonra hızlanmıştır.



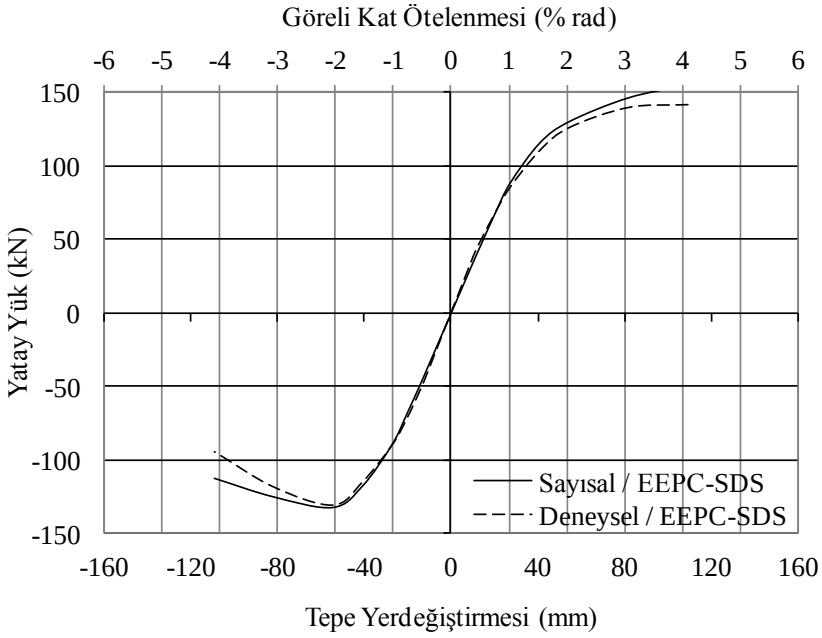
Şekil 4.33 : EEPC-SDS numunesine ait deforme olmuş görünüş.

Sayısal çalışmada elde edilen sisteme ait mekanizma durumu, deneysel çalışmada ortaya çıkan durum ile benzerlik göstermektedir. 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde, panel bölgesindeki çapraz elemanların burkulması sayısal analizde de elde edilmiştir, Şekil 4.33. Yine panel bölgesi içinde, sinüs formunun bozulması, yırtılma oluşana dek sayısal analizinde de izlenebilmiştir.

Deneysel ve sayısal yolla elde edilen yatay yük - kiriş uç yerdeğiştirmesi grafikleri Şekil 4.34'te, çevrimlerin piklerinin birleştirilmesiyle elde edilen zarf eğrileri de Şekil 4.35'te verilmiştir.



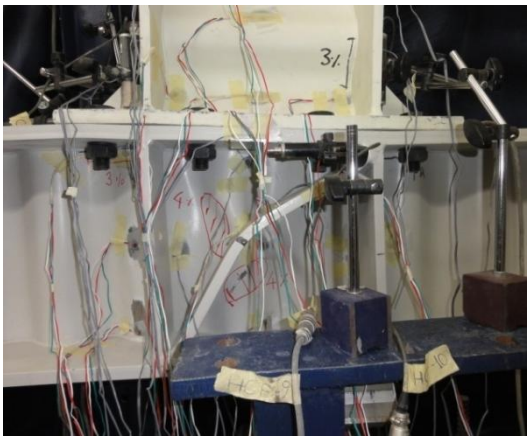
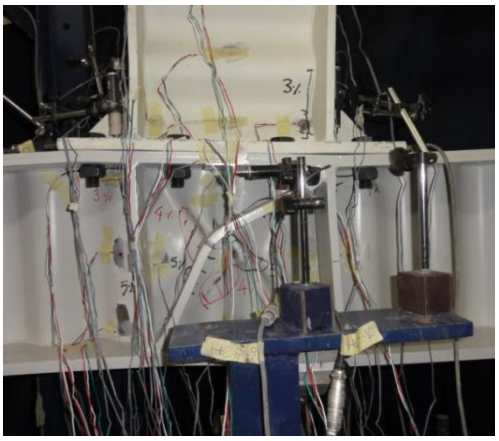
Şekil 4.34 : EEPC-SDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.



Şekil 4.35 : EEPC-SDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

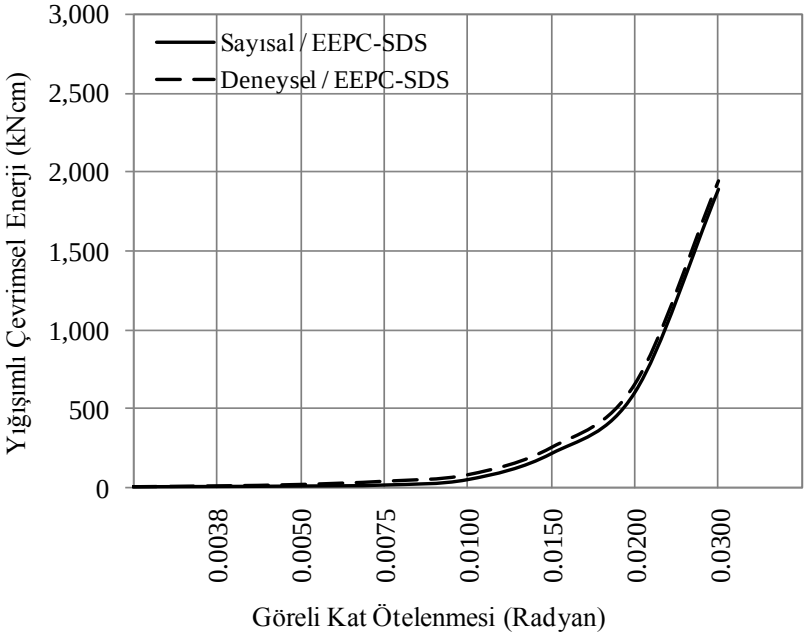
Her iki grafik incelendiğinde, sayısal modelde panel bölgesindeki çapraz elemanların burkulmasının deneyle uyumlu olarak yakalanabildiği görülmektedir.

Deneysel çalışmada, 0.04 rad. ve 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevrimlerinin tamamlanmasının ardından ortaya çıkan hasar durumu Şekil 4.36'da verilmiştir.

0.040 rad. göreli ötelenme eşiği sonu	0.050 rad. göreli ötelenme eşiği sonu
	

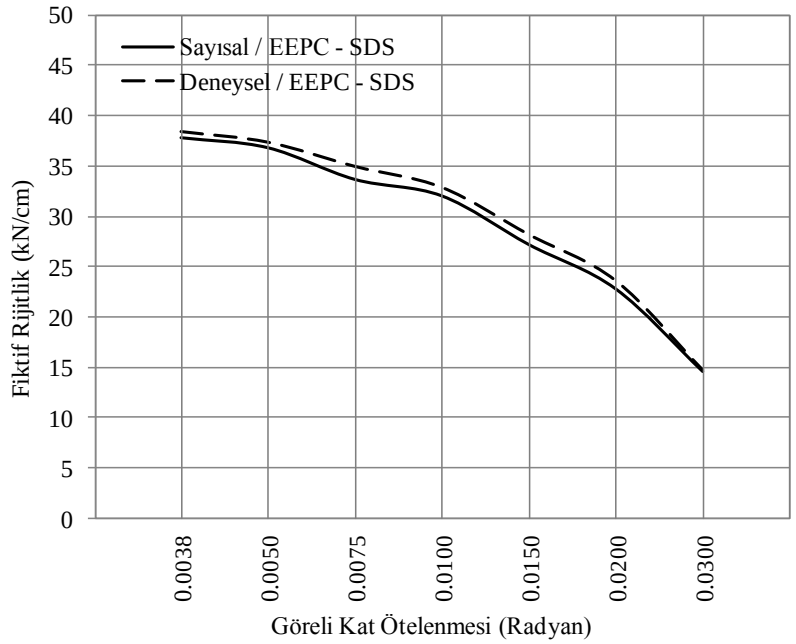
Şekil 4.36 : EEPC-SDS numunesi hasar durumları.

Deneysel ve sayısal yolla elde edilen yığışımlı çevrimsel enerji grafikleri Şekil 4.37'de verilmiştir. Karşılaştırma 0.003 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin sonuna kadar yapılmıştır.



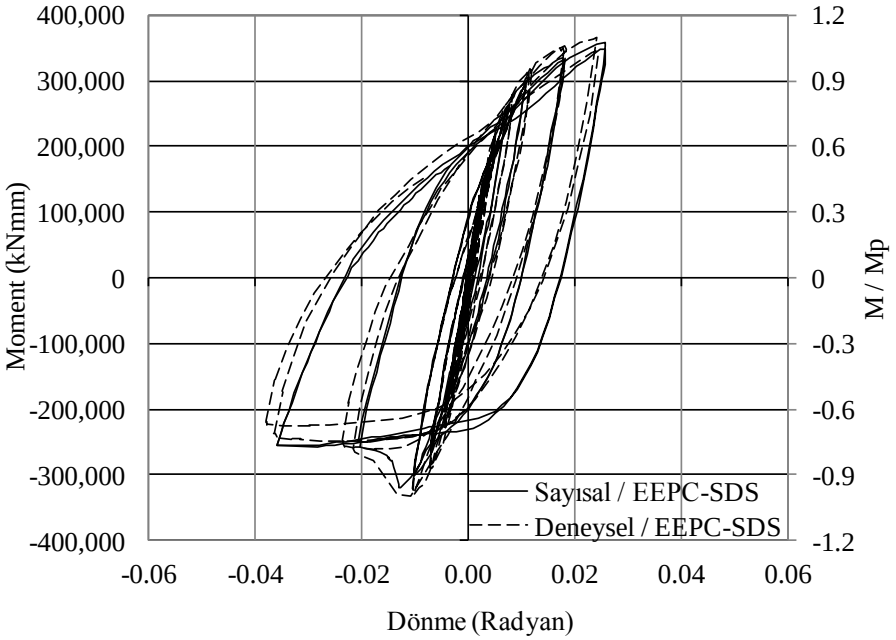
Şekil 4.37 : EEPC-SDS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi.

Deneysel ve sayısal olarak elde edilen çevrimlerin piklerini birleştirerek elde edilen rijitliklerin etkin göreli kat ötelenmesine göre değişimi Şekil 4.38'de verilmiştir. Grafikten deneysel ve sayısal eğrilerin birbirini takip ettiği görülmektedir.



Şekil 4.38 : EEPC-SDS numunesinde rijitliklerin değişimi.

Kiriş alın plakasının göreli hareketlerinden faydalanılarak elde edilen kiriş moment - dönme ilişkileri Şekil 4.39'da karşılaştırılmıştır.



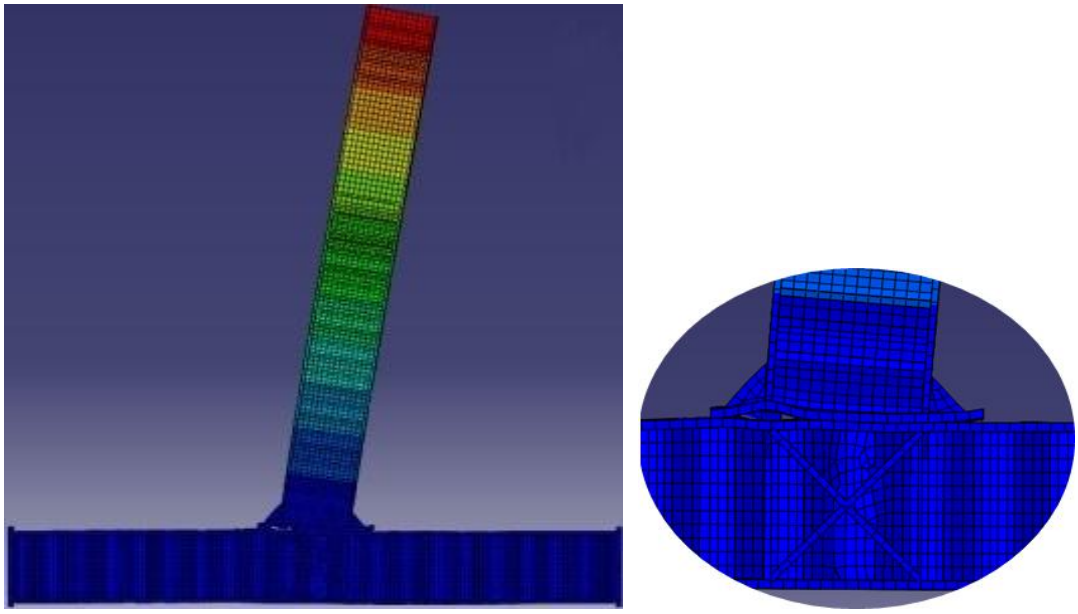
Şekil 4.39 : EEPC-SDS numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri.

Deneysel ve sayısal moment - dönme ilişkilerinin, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi çevriminin sonuna kadar uyumlu oldukları, bu uyumun alın plakasına

yakın bölgede kiriş gövde ve başlığının ayrılması sonucu 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde azaldığı gözlenmiştir.

4.3.6 EEPC-DDS numunesi

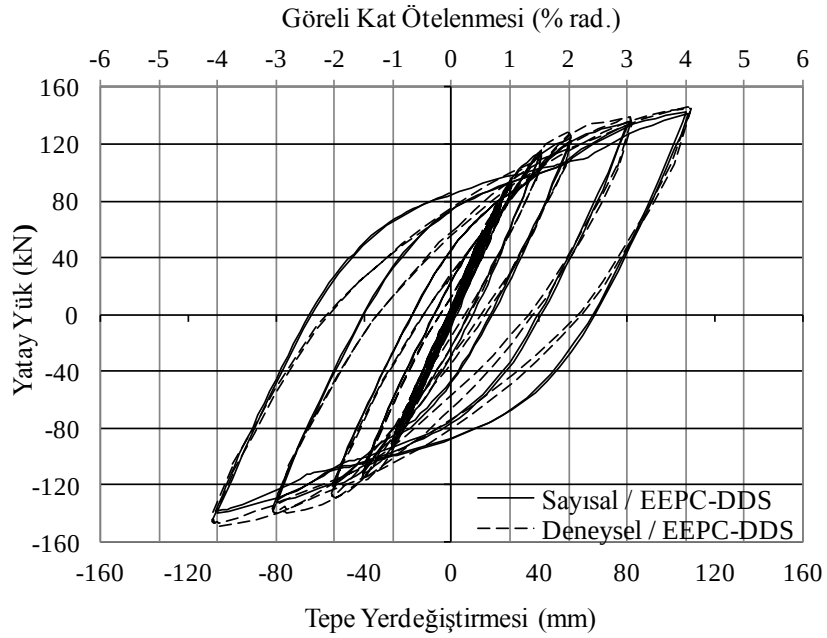
Bu numune için yapılan sonlu eleman analizi 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar sürdürülmüştür. Bu yerdeğiştirme eşiğinde numunenin deformasyon durumu Şekil 4.40'ta verilen resimlerden izlenebilmektedir.



Şekil 4.40 : EEPC-DDS numunesine ait deforme olmuş görünüş.

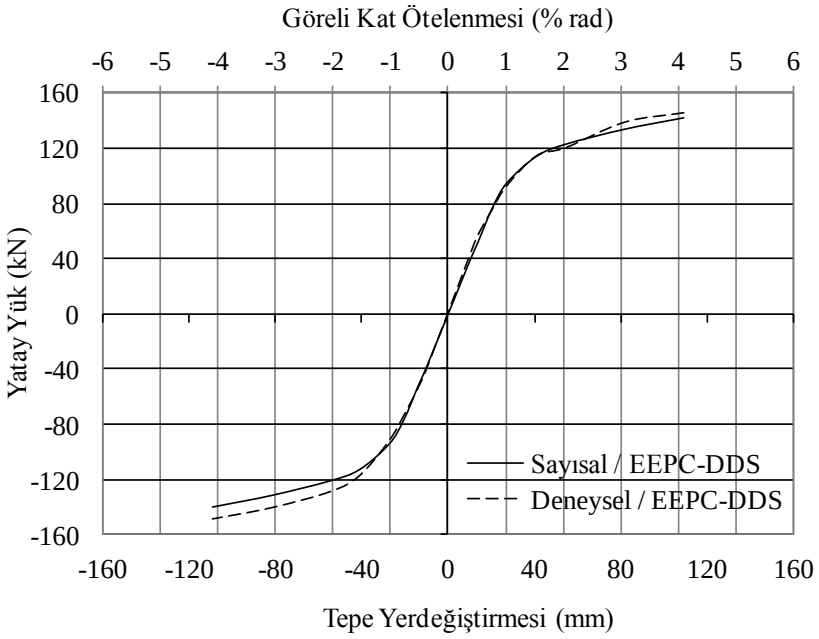
Sayısal olarak elde edilen deformasyon durumu deney sonucuna benzerdir. Sonlu eleman modelinde kesitlerin tanımlanış biçimleri gereği gövde ve başlıklar bütün olduklarından, 0.04 rad. sonrasında deneyde gözlenen gövde - başlık ayrılması sonlu eleman modelinde temsil edilememektedir.

± 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi aralığında elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme dayanımı ilişkisi Şekil 4.41'de verilmiştir.



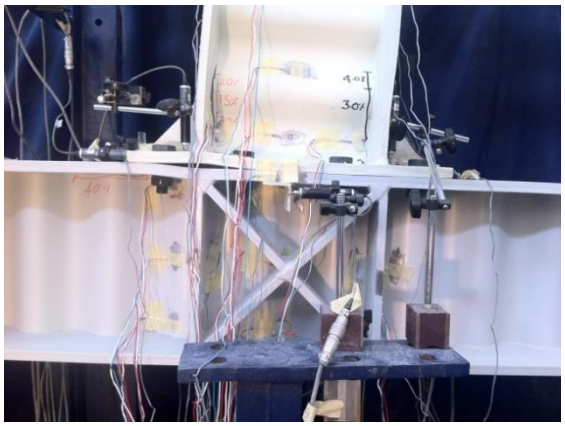
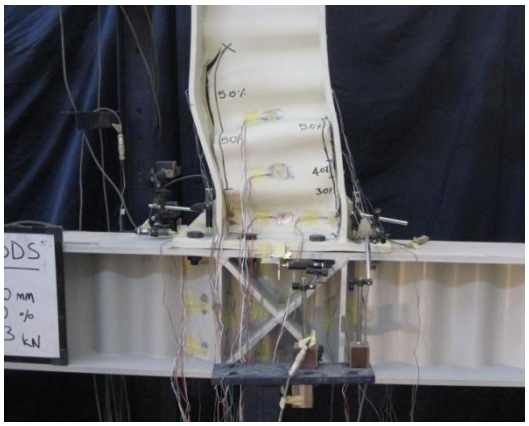
Şekil 4.41 : EEPC-DDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme ilişkileri.

EEPC-DDS numunesinin yatay yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin pik değerlerini birleştiren zarf eğrileri Şekil 4.42'de karşılaştırılmıştır. Zarf eğrilerinin akma sonrası bölgelerinde ayrılmalar gözlenmektedir.



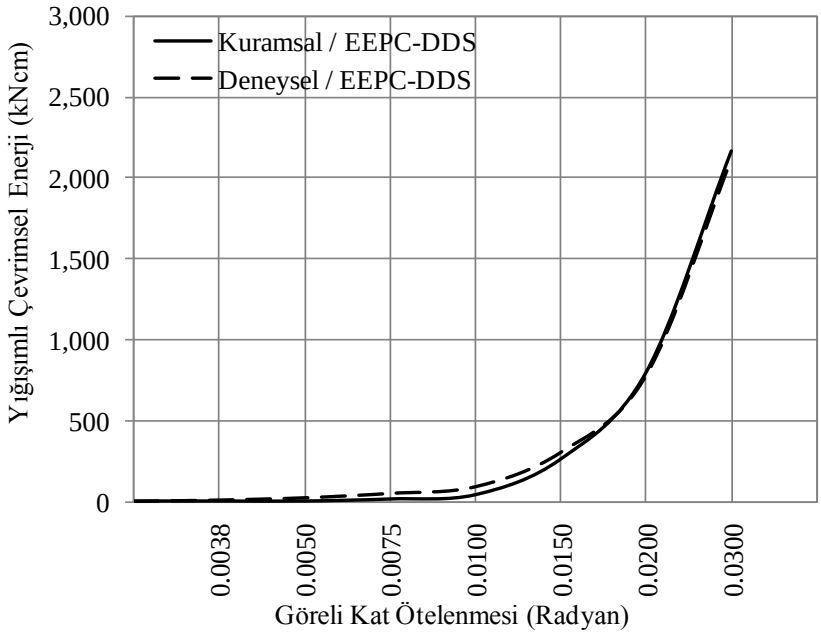
Şekil 4.42 : EEPC-DDS numunesinde yatay yük - yerdeğiştirme zarf eğrileri.

Deneysel çalışmada, 0.04 rad. ve 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmeleri uygulandıktan sonra ortaya çıkan hasar durumu Şekil 4.43'te gösterilmiştir.

0.040 rad. göreli ötelenme eşiği sonu	0.050 rad. göreli ötelenme eşiği sonu
	

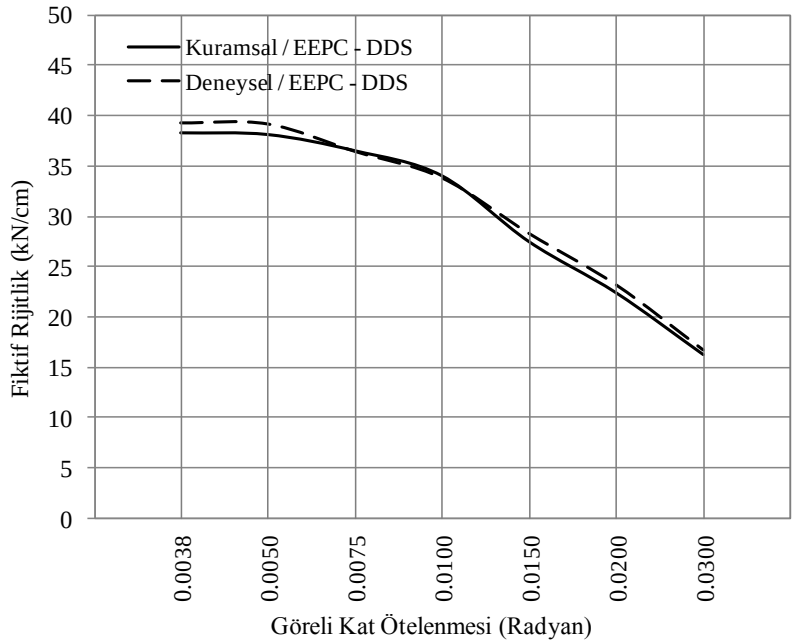
Şekil 4.43 : EEPC-DDS numunesi hasar durumları.

Deneysel ve sayısal yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin, kapladıkları alanlar hesaplanarak Şekil 4.44'te verilen yığışımlı çevrimsel enerji - göreli kat ötelenmesi grafiği oluşturulmuştur. Yığışımlı çevrimsel enerji grafiklerinin 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinden sonra daha yakın oldukları görülmektedir.



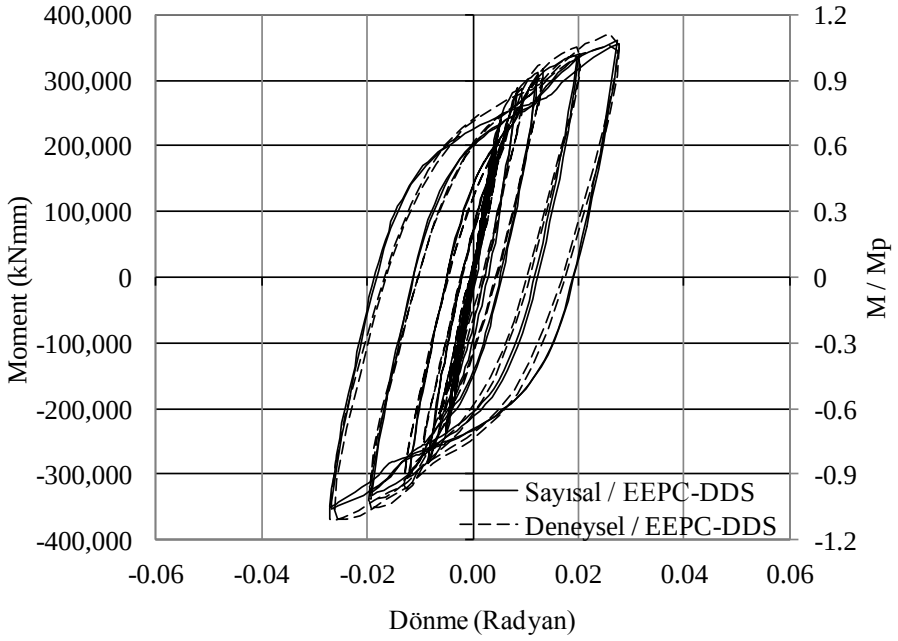
Şekil 4.44 : EEPC-DDS numunesinde yığışımlı çevrimsel enerjilerin değişimi.

Deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük - yerdeğiştirme çevrimlerinde piklerin birleştirilmesi ile elde edilen rijitliklerin göreli kat ötelenmesine göre değişimi Şekil 4.45'te verilmiştir. Uyumun 0.0075 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinden sonra daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.45 : EEPC-DDS numunesinde rijitliklerin değişimi.

Kiriş alın plakasının düşey yerdeğiştirmeleri kullanılarak oluşturulan moment - dönme ilişkisi deneysel ve sayısal durum için hazırlanarak Şekil 4.46'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.46 : EEPC-DDS numunesinin kiriş alın plakasında moment - dönme ilişkileri.

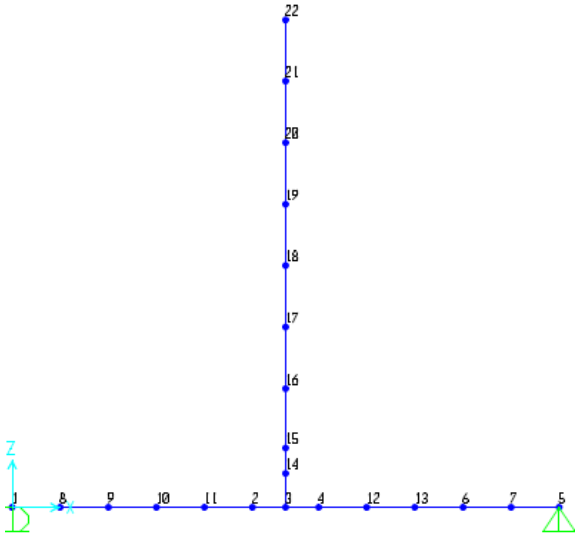
Deneysel ve sayısal çalşmalardan elde edilen moment - dönme ilişkilerinin 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin sonuna kadar uyumlu olduğu görülmüştür.

4.4 Eşdeğer Çubuk Sistem Modeli

Deneysel olarak incelenen kolon - kiriş birleşimlerinden en rijit davranış sergileyen *EEPC-DDS* numunesine ait çevrimsel yük - yerdeğiştirme çevrimlerinin zarf eğrisine ulaşmak için bir itme analizi uygulaması gerçekleştirilmiştir.

İtme analizi, Şekil 4.39'da verilen çubuk sistem modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde SAP2000 (Ver. 15) yazılım paketi kullanılmıştır. Oluşturulan çubuk sistem modelinde 22 adet düğüm noktası ve 21 adet çubuk eleman yer almaktadır. Kolon ve kiriş elemanlar ağırlık merkezlerinden geçen çubuklar ile idealleştirilmiştir. Rijit panel bölgesinin temsil edilebilmesi için sonsuz eğilme rijitlikli çubuk elemanlar kullanılmıştır. Bunlar çubuk modelde (2-3), (3-4) ve (3-14) çubuklarına karşı gelmektedir. Çubuk kesit özellikleri tanımlanırken, gövde plakası olarak 3 mm kalınlıklı sinüs formlu levha yerine 3 mm kalınlıklı düz levha kullanılmıştır.

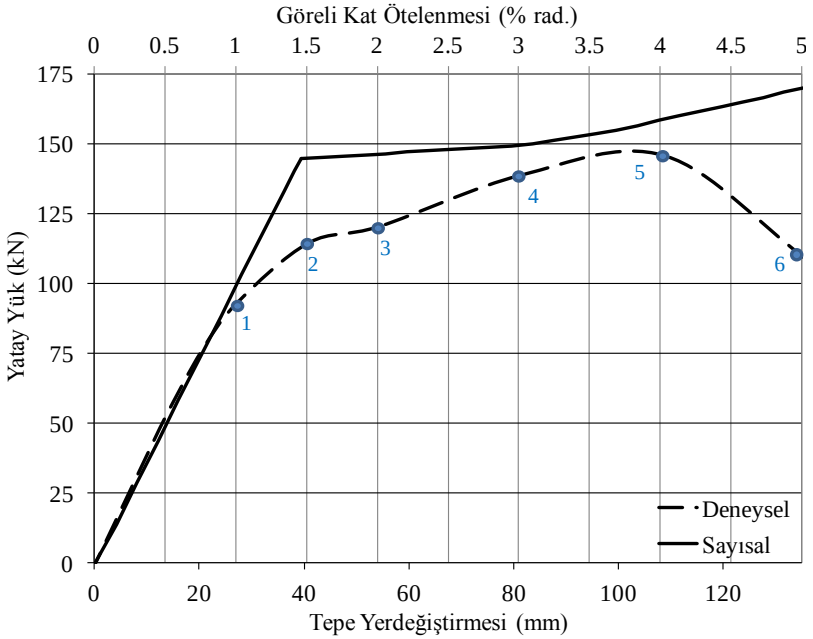
Çubuk sistem model görünüşü Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.47 : EEPC-DDS numunesi çubuk sistem modeli.

Kolon ve kiriş kesitini oluşturan farklı kalınlıktaki çelik plakalar için çekme deneylerinden elde edilen büyüklükler, gerilme - şekildeğiştirme ilişkisi olarak tanımlanmıştır. Analizlerde malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan davranış dikkate alınmıştır. Fiber elemanlar ile idealleştirilen kiriş 33.8 cm uzunluğundaki 8 parçaya, kolon da 26.4 cm uzunluğundaki 10 parçaya bölünmüş ve her bir çubuk elemanın ortasında P - M_2 - M_3 fiber plastik mafsalı tanımlanmıştır.

Böylelikle doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin elemanlar üzerindeki yayılışı çubuk sistem modelinde dikkate alınabilmiştir. Çubuk sistem modelinde, 22 numaralı noktaya etkitilen birim yerdeğiştirme adım adım artırılarak, oluşan yatay kuvvet ve yerdeğiştirme ilişkisi çizilmiştir. Bu ilişki, deneysel çalışmada ilgili numuneden elde edilen kuvvet - yerdeğiştirme çevrimlerinin zarf eğrisi ile üst üste konulmuştur, Şekil 4.48.

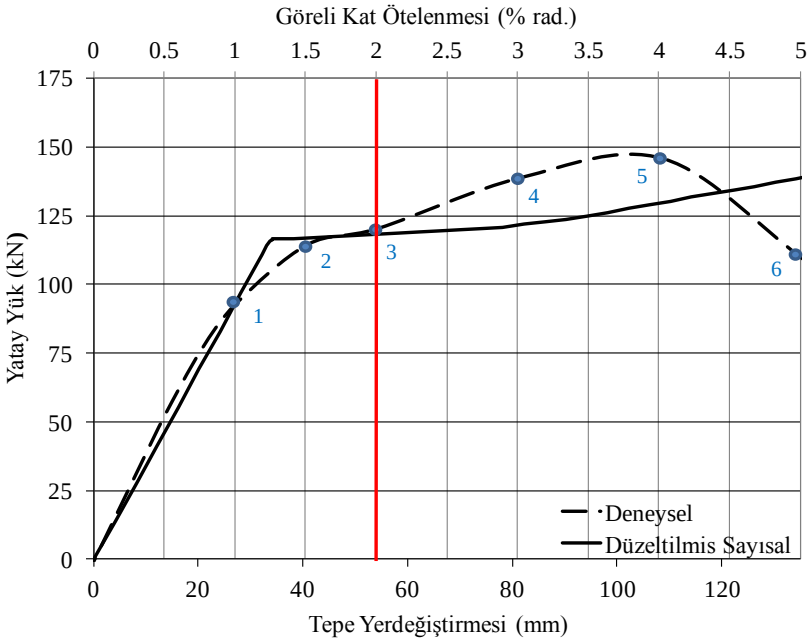


Şekil 4.48 : EEPC-DDS numunesi için deneysel zarf eğrisi ve itme analizi sonucunun karşılaştırılması.

Çubuk sistem modelinde, kolon ve kiriş kesitlerinin ağırlık merkezlerinden geçen çubuklar ile temsil edilmesi, kesitte gövde ve başlıklar arasında oluşan kaynak çatlakları ve yırtılmaların dikkate alınamaması nedeniyle, sayısal olarak elde edilen yük yerdeğiştirme eğrisi deneysel zarf eğrisinin üzerinde kalmıştır. Sıralanan bu etkilerin dolaylı olarak dikkate alınabilmesi için, $\alpha=0.80$ gibi bir *dayanım azaltma çarpanı* tanımlanmıştır. Bu çarpan, çelik gerilme - şekildeğiştirme ilişkilerinin doğrusal olmayan bölümlerinde gerilme büyüklüklerini küçültmek amacıyla kullanılmıştır. *Dayanım azaltma çarpanı* kullanılarak uygulanan itme analizinden elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.49'da verilmiştir.

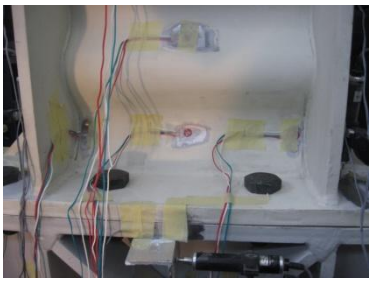
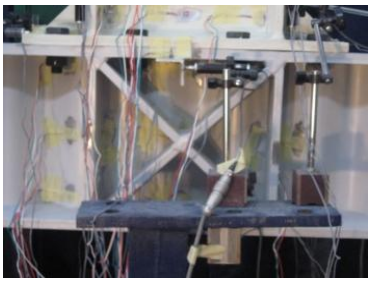
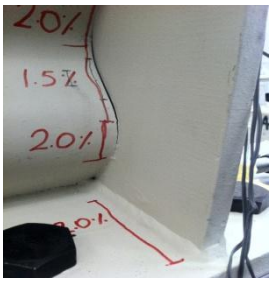
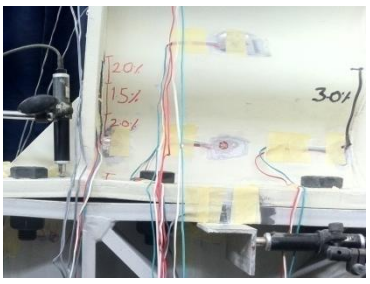
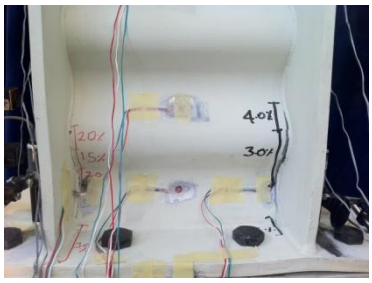
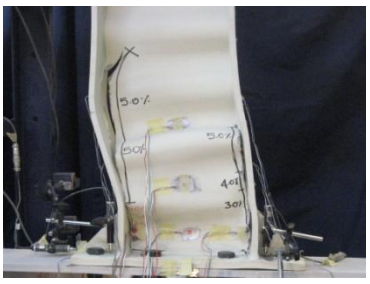
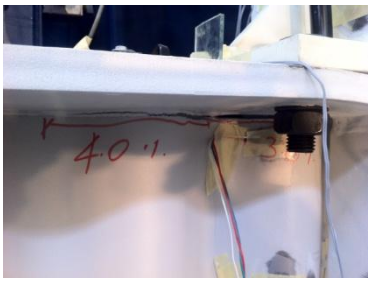
Deneysel ve sayısal sonuçların, numunenin elastik davranış sergilediği 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesine (*Nokta #2*) ait yerdeğiştirme çevrimleri

uygulanırken, kirişin alın plakasına komşu kesitinde gövde ve başlıkları birleştiren kaynak dikişlerinde ve kolonun panel bölgesi dışında kalan kesitinde gövde ve üst başlığı birleştiren kaynak dikişlerinde ilk çatlaklar meydana gelmiştir, Şekil 4.42. Ayrıca bu bölgelere yapıştırılan SG-3, SG-5 ve SG-6 şekildeğiştirme ölçerlerinde akma sınır şekildeğiştirmesi değerinin aşıldığı da gözlenmiştir. Bu nokta *sayısal modelin* boyun yaptığı bölgeye karşı gelmektedir. 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde (*Nokta #3*) deneysel ve sayısal zarf eğrileri kesişmektedir. Bu noktadan sonra deneysel eğride pekleşme başlamasına karşın, sayısal eğrinin pekleşmesi 0.03 rad. etkin kat ötelenmesi düzeyinden sonra oluşmaktadır.



Şekil 4.49 : EEPC-DDS numunesi için deneysel zarf eğrisi ve dayanım azaltma çarpanı kullanılarak elde edilmiş itme analizi sonucunun karşılaştırılması.

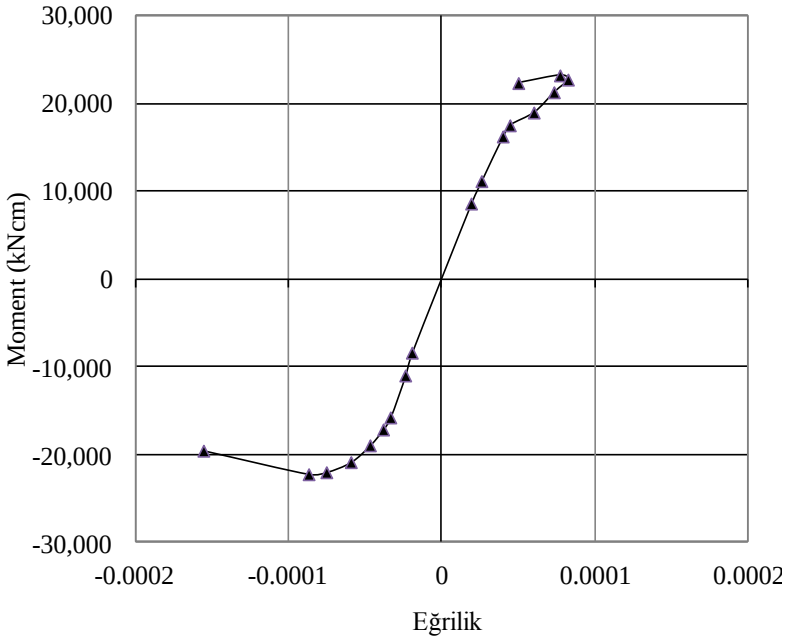
Deneysel zarf eğrisi üzerinde işaretlenmiş olan noktalarda gözlenenen hasar durumları Şekil 4.50'de toplu olarak verilmiştir. *α=0.80* dayanım azaltma çarpanı kullanılarak elde edilen itme analizi eğrisi *#3 nolu noktaya* kadar deneysel zarf eğrisine yakındır. Şekil 4.50'den izlenebileceği gibi bu aşamada kiriş ve kolonun bazı kesitlerinde sinüzoidal gövde levhasını başlıklara bağlayan kaynak dikişlerinde ayrılmalar oluşmuştur. *#4, #5 ve #6 nolu noktalarda* ise deney numunesinde büyük deformasyonlar ve yırtılmalar gözlenmiştir. Bu durumda, oluşturulan çubuk sistem modelinin en fazla 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyine kadar deney sonuçlarını temsil edebildiği söylenebilir.

Nokta No.	Göreli Kat Ötelenmesi	Kiriş	Kolon
1	0.010		
2	0.015		
3	0.020		
4	0.030		
5	0.040		
6	0.050		

Şekil 4.50 : EEPC-DDS numunesi hasar ilerleyişi.

Kiriş elemanın panel bölgesine komşu üç farklı kesitinde başlıklara yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen verilerden hareketle kesit için moment - eğrilik ilişkileri çizilmiştir. Moment - eğrilik ilişkisinin herhangi bir noktasındaki eğimi kesit eğilme rijitliğine karşı gelmektedir. Bu yolla hesaplanan eğilme rijitlikleri, kesit brüt eğilme rijitliği değeri ile karşılaştırılmıştır. Brüt eğilme rijitliği de malzeme deneylerinden elde edilen elastisite modülü (E) ile kesit atalet momenti (I_x) in çarpılmasıyla elde edilmektedir.

Alın plakasından 5 cm yukarıda bulunan, *1. sıra* şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen moment - eğrilik ilişkisi Şekil 4.51'de verilmiştir.



Şekil 4.51 : EEPC-DDS numunesi 1. şekildeğiştirme ölçer sırası için elde edilen moment - eğrilik ilişkisi.

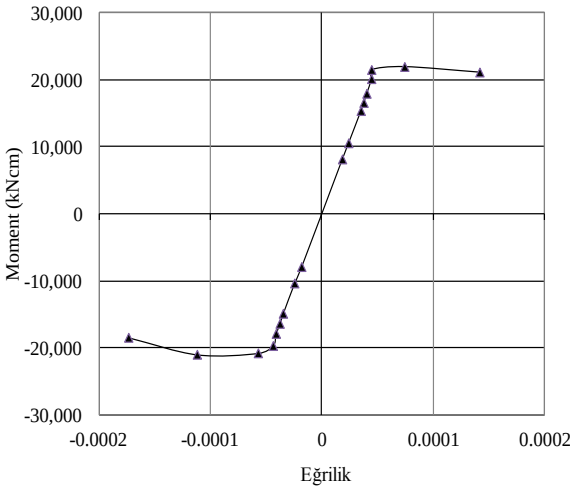
Farklı göreli kat ötelenmesi seviyeleri için, moment - eğrilik ilişkisinden hareketle belirlenen eğilme rijitlikleri kesit brüt eğilme rijitliği ile Çizelge 4.1'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1 : EEPC-DDS numunesi 1. şekildeğiştirme ölçer sırası için eğilme rijitliği.

Göreli kat ötelenmesi (rad.)	EI_{etkin} (kNcm^2)	$EI_{brüt}$ (kNcm^2)	Göreli Fark
0.00375	4.48E+08	4.39E+08	% 1.9
-0.00375	4.30E+08	4.39E+08	% 2.1
0.00500	4.30E+08	4.39E+08	% 2.2
-0.00500	4.61E+08	4.39E+08	% 4.9
0.00750	4.07E+08	4.39E+08	% 7.3
-0.00750	4.70E+08	4.39E+08	% 6.9
0.01000	3.93E+08	4.39E+08	% 10.5
-0.01000	4.48E+08	4.39E+08	% 1.9
0.01500	3.15E+08	4.39E+08	% 28.2
-0.01500	4.04E+08	4.39E+08	% 8.0
0.02000	2.90E+08	4.39E+08	% 33.9
-0.02000	3.51E+08	4.39E+08	% 20.0
0.03000	2.76E+08	4.39E+08	% 37.3
-0.03000	2.92E+08	4.39E+08	% 33.6
0.04000	3.00E+08	4.39E+08	% 31.6
-0.04000	2.56E+08	4.39E+08	% 41.8
0.05000	4.46E+08	4.39E+08	% 1.5
-0.05000	1.26E+08	4.39E+08	% 71.4

Moment - eğrilik ilişkisinden elde edilen eğilme rijitlikleri, 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin sonuna kadar brüt kesit eğilme rijitliği ile çok yakın değerler almıştır. 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, kiriş başlık ve gövdesini birleştiren kaynak dikişlerinde ilk çatlağın oluşması ile kesit etkin eğilme rijitliğinde azalma başlamıştır. Bu seviyeden sonra kaynak dikişlerindeki hasarın büyümesi ve gövde levhasının başlıklardan ayrılması sonucu, etkin kesit eğilme rijitliği adım adım azalmış ve brüt kesit rijitliğiyle olan fark büyümüştür.

Alın plakasından kiriş yarı yüksekliği kadar ötede, başlıklara yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden (*2. sıra*) elde edilen eğrilik değerlerinin, bu kesitteki eğilme moment ile olan ilişkisi Şekil 4.52'de verilmiştir.



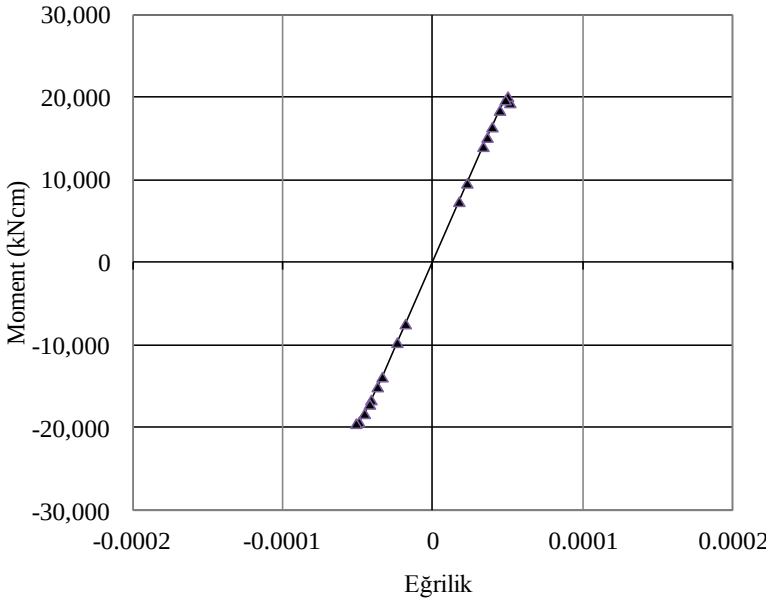
Şekil 4.52 : EEPC-DDS numunesi 2. şekildeğiştirme ölçer sırası için elde edilen moment - eğrilik ilişkisi.

Bu kesitte elde edilen rijitlikler, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin sonuna kadar kesitin brüt eğilme rijitliği ile uyum içinde kalmıştır. Ancak bu aşamadan sonra kiriş başlıkları ile gövdesini birleştiren kaynak dikişlerindeki ayrılmalarının büyüyerek yayılması sonucu kesit rijitliğinde ani düşüş yaşanmıştır, Çizelge 4.2.

Çizelge 4.2 : EEPC-DDS numunesi 2. şekildeğiştirme ölçer sırası için eğilme rijitliği.

Göreli kat ötelenmesi (rad.)	EI_{etkin} (kNcm^2)	$EI_{brüt}$ (kNcm^2)	Göreli Fark
0.00375	4.45E+08	4.39E+08	% 1.2
0.00375	4.33E+08	4.39E+08	% 1.4
0.00500	4.41E+08	4.39E+08	% 0.3
-0.00500	4.22E+08	4.39E+08	% 3.9
0.00750	4.38E+08	4.39E+08	% 0.3
-0.00750	4.28E+08	4.39E+08	% 2.6
0.01000	4.41E+08	4.39E+08	% 0.3
-0.01000	4.34E+08	4.39E+08	% 1.1
0.01500	4.46E+08	4.39E+08	% 1.5
-0.01500	4.35E+08	4.39E+08	% 1.0
0.02000	4.52E+08	4.39E+08	% 2.9
-0.02000	4.50E+08	4.39E+08	% 2.3
0.03000	4.82E+08	4.39E+08	% 9.8
-0.03000	3.63E+08	4.39E+08	% 17.4
0.04000	2.96E+08	4.39E+08	% 32.7
-0.04000	1.87E+08	4.39E+08	% 57.3
0.05000	1.49E+08	4.39E+08	% 66.1
-0.05000	1.06E+08	4.39E+08	% 75.8

Alın plakasından kiriş yüksekliği kadar ötede bulunan *3. sıra* şekildeğiştirme ölçerlerinden elde edilen eğriliklerin, bu kesitteki moment değerleri ile olan ilişkisi Şekil 4.53'te verilmiştir.



Şekil 4.53 : EEPC-DDS numunesi 3. şekildeğiştirme ölçer sırası için elde edilen moment - eğrilik ilişkisi.

Bu bölgedeki etkin kesit eğilme rijitliği, Çizelge 4.3'ten de görüleceği üzere, kiriş gövdesinin yırtıldığı 0.05 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar kesit brüt rijitliği ile uyum içinde kalmaktadır.

Çizelge 4.3 : EEPC-DDS numunesi 3. şekildeğiştirme ölçer sırası için eğilme rijitliği.

Göreli kat ötelenmesi (rad.)	EI_{etkin} ($kNcm^2$)	$EI_{brüt}$ ($kNcm^2$)	Göreli Fark
0.00375	4.30E+08	4.39E+08	% 2.1
0.00375	3.98E+08	4.39E+08	% 9.3
0.00500	4.27E+08	4.39E+08	% 2.8
-0.00500	4.00E+08	4.39E+08	% 8.9
0.00750	4.22E+08	4.39E+08	% 3.9
-0.00750	4.06E+08	4.39E+08	% 7.6
0.01000	4.21E+08	4.39E+08	% 4.1
-0.01000	4.04E+08	4.39E+08	% 8.2
0.01500	4.18E+08	4.39E+08	% 4.8
-0.01500	4.00E+08	4.39E+08	% 8.9
0.02000	4.16E+08	4.39E+08	% 5.4
-0.02000	3.98E+08	4.39E+08	% 9.4
0.03000	4.10E+08	4.39E+08	% 6.8
-0.03000	3.89E+08	4.39E+08	% 11.6
0.04000	4.05E+08	4.39E+08	% 7.8
-0.04000	3.78E+08	4.39E+08	% 14.1
0.05000	3.78E+08	4.39E+08	% 13.9
-0.05000	4.03E+08	4.39E+08	% 8.2

Etkin eğilme rijitliklerinin irdelenmesi sonucunda, en büyük kiriş hasarlarının 1. ve 2. şekildeğiştirme ölçer sıraları arasında yani yaklaşık kiriş yarı yüksekliğine karşı gelen bölgede yoğunlaştığı görülmüştür.

Eşdeğer çubuk sistem modeli kullanılarak gerçekleştirilen itme analizinden elde edilen yük - yerdeğiştirme eğrisinin deneysel zarf eğrisi ile uyumu, kesitlerde gözlemlenen ancak sayısal modele doğrudan yansıtılamayan hasarlar dolayısıyla sınırlı kalmıştır.

4.5 Sayısal Çalışma Sonuçlarının Tartışılması

ABAQUS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde eleman tiplerinin seçimi, malzeme tanımları, temas yüzeylerinin tanımı, temas yüzeylerinin özellikleri, sonlu eleman tipi ve boyutu seçimi başta olmak üzere pek çok konuda literatür araştırması yapılmış olup, alın plakalı moment aktaran kolon kiriş birleşimlerini konu alan makaleler ve *ABAQUS* yazılımının kullanıldığı diğer çalışmalar incelenmiştir. Bu araştırma sonuçlarına dayalı olarak, incelenen numuneler için en uygun tanımlar yapılmaya çalışılmıştır.

Kolon-kiriş birleşim bölgesini oluşturan kolon ve kiriş kesitlerinde başlık ve gövdeler bütünleşik olarak modellenmiştir. Gerçekte, gövde ve başlıkları birleştiren tek taraflı kaynak dikişleri modelde temsil edilememiş, dolayısıyla kaynağın kırılması ve ayrılması sayısal analizlerde dikkate alınamamıştır.

Panel bölgesi göreli olarak daha esnek olan *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinde, kalıcı şekildeğiştirmeler ağırlıklı olarak panel bölgesi içinde kalan ince cidarlı sinüzoidal gövdenin formunu kaybetmesi şeklinde ortaya çıkmıştır. Daha rijit panel bölgesine sahip olan numunelerden *EEPC-SDS* numunesinde hem panel bölgesinin formunun bozulması hem de panel bölgesi içindeki çapraz elemanlarda burkulma gözlenmiştir. *EEPC-H0, EEPC-H2* ve *EEPC-DDS* numunelerinde ise mekanizma durumuna, kolon ve kirişlerde başlık ve gövdeleri birleştiren kaynak dikişlerinde yırtılmalar meydana gelerek erişilmiştir.

EEPC-B ve *EEPC-HS* numunelerinin deneysel çalışmalarında sırasıyla 81.50 ve 81.64 mm kiriş uç yerdeğiştirmesine karşı gelen 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde panel bölgesinde gözlenen form bozulmaları sayısal modelde de gözlemlenmiştir. Bu aşamaya kadar, deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme dayanımı ve moment - dönme ilişkileri birbirleri ile oldukça uyum içinde olmuştur. Ancak bir sonraki yerdeğiştirme çevrim grubu olan 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinde, sinüs formun bozulmaya başladığı panel bölgelesindeki yırtılma, sayısal modelde gözlemlenememiştir. Bu aşamadan sonra deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme ve moment - dönme ilişkileri arasındaki uyum azalmaya başlamıştır.

EEPC-SDS numunesinde, deneyde 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi uygulanırken panel bölgesi içinde yer alan çapraz elemanlarda oluşan burkulma, sayısal modelde de gözlemlenmiştir. 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinden itibaren kolon ve kiriş başlıkları ile gövdesini birleştiren kaynak dikişlerinde gözlenen ayrılmalar sayısal modelde temsil edilememiştir. 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinin sonuna kadar deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme ve moment - dönme ilişkileri birbirleri ile oldukça uyumlu olarak elde edilmiştir.

EEPC-DDS numunesinin deneysel çalışmasında, panel bölgesi içinde kalan ince cidarlı sinüzoidal gövde formunda bozulma ya da bu bölgedeki çapraz elemanlarda

burkulma oluşmamıştır. Bu durum sonlu eleman modelinde de benzer olmuştur. Ancak kiriş ve kolonun gövde ve başlıklarındaki ayrılmalar sayısal modelde temsil edilememiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen yatay yük - yerdeğiştirme çevrimleri ve moment - dönme ilişkileri, deneysel çalışmada oluşan kiriş gövde yırtılması mekanizmasına kadar birbirleri ile oldukça uyumlu olmuştur.

EEPC-H0 ve *EEPC-H2* numunelerinin deneysel çalışmalarında, panel bölgesi içinde gözle görülebilen bir hasar durumu ortaya çıkmamış ancak bu bölgede akma şekildeğiştirme eşik değeri aşılmış olup, bu durum sayısal sonlu eleman modelinde de benzer olarak gerçekleşmiştir. İlerleyen çevrimlerde kolon ve kirişlerin başlık ve gövdelerini birleştiren kaynak dikişlerindeki ayrılmalar bu numunelerde de gözlemlenememiştir.

EEPC-DDS numunesi için kurulan eşdeğer çubuk sistem modelinde, elemanların ağırlık merkezlerinden geçen çubuklar ile idealleştirilmiş olması nedeni ile gövde başlık levhaları arasındaki kaynaklardaki çatlak ve yırtılmayı temsil edememektedir. Bu nedenle, çubuk sistem modelinin kaynak çatlaklarının başlaması ile temsil kabiliyeti azalmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İnce sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların farklı şekillerde oluşturulan alın plakalı moment aktaran birleşimlerinin, tersinir tekrarlı yükler etkisinde deneysel ve sayısal olarak incelendiği bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. İnce sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların kesme kuvveti ve eğilme momenti taşıma kapasiteleri için (3.2) ve (3.15, 3.16, 3.17) denklemleriyle verilen ifadeler, bu tez çalışmasında kullanılan kesit tipleri için deneysel sonuçlara yakın büyüklükler üretmiştir.
2. Deneysel çalışmada kullanılan ince sinüzoidal gövdeli çelik I kesitlerde elde edilen kesit dönme süneklikleri 3 - 5 aralığındadır.
3. Panel bölgesinde düzlem gövde levhası kullanımı ya da çapraz levha uygulamasının rijit düğüm noktası oluşturulmasında etkili olan iki yöntem olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.
4. İncelenen numunelerde mekanizma durumlarına, *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinde panel bölgesi içinde gövde levhasının sinüs formunun bozulması ve yırtılması ile, *EEPC-H0*, *EEPC-H2* ve *EEPC-DDS* numunelerinde kiriş gövde ve başlıklarını birleştiren kaynak dikişlerinin yırtılması ile, *EEPC-SDS* numunesinde ise panel bölgesi içinde yer alan çapraz levhaların burkulması ve panel bölgesi içindeki gövdenin ideal sinüs formunun bozulması ile ulaşılmıştır.
5. *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinin panel bölgelerinde sinüzoidal gövde üzerinde ilk plastikleşme 0.005 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin çevrimleri uygulanırken ortaya çıkmıştır.
6. *EEPC-HS* numunesinde kiriş başlıklarının devamı şeklinde kolon başlıkları arasında yer alan ancak gövdeye temas etmeyen süreklilik plakaları, rijit bir panel bölgesi oluşturmak için yeterli olmamıştır. Bu nedenle *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinin davranışı benzer olarak gerçekleşmiştir. 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde panel bölgesindeki ideal sinüs formun bozulmasından sonra, süreklilik plakaları sisteme bir miktar katkı sağlamıştır. Bu seviyeye kadar

EEPC-HS numunesinin yatay yük dayanımı *EEPC-B* numunesinden ortalama olarak %3 civarında fazla gerçekleşmiştir.

7. *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numuneleri gibi panel bölgesi ince sinüzoidal levha olan ve ilave bir önlemin alınmadığı kolon - kiriş birleşimlerinde 0.02 rad. etkin göreli kat ötelenmesi, kesit bütünlüğünün korunması bakımından bir sınır değer olarak elde edilmiştir.

8. Kirişin alın plakasına komşu kesitinde gerçekleşen eğilme momentinin, kesit plastik moment taşıma kapasitesine oranı *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numuneleri için 0.42 ve 0.48 iken, diğer numunelerde bu oran 1.00'e yakındır.

9. Tersinir tekrarlı yükleme etkisindeki ince sinüzoidal gövdeli çelik I elemanların kolon - kiriş birleşimlerinde, *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerinde olduğu gibi, panel bölgesinde daha kalın levha kullanımı genel sistem davranışını önemli ölçüde iyileştirmekte ve panel bölgesi mekanizma durumunu ortadan kaldırmaktadır.

10. *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerinin genel davranışları arasında önemli farklılık ortaya çıkmamıştır. Dolayısıyla panel bölgesinde kullanılan düzlem plakanın panel bölgesi dışına taşırılmasının sistem genel davranışı üzerinde pratik olarak bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

11. Panel bölgesi ince cidarlı sinüzoidal formlu levhadan oluşan ve süreklilik plakaları arasına biri ön biri de arka tarafta yerleştirilen aynı doğrultulu iki çapraz levha bulunduran *EEPC-SDS* numunesi, çapraz elemanlarda burkulmanın gözlendiği 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar *EEPC-DDS* numunesi ile benzer davranış göstermiştir. *EEPC-SDS* numunesinde, çapraz elemanların burkulmasından sonra *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numuneleri ile benzer şekilde panel bölgesinde hasar ortaya çıkmıştır.

12. *EEPC-DDS* numunesinde ilk plastikleşme 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğinin çevrimleri uygulanırken panel bölgesi dışında meydana gelmiştir. Böylelikle panel bölgesine ilave çapraz elemanlar ekleyerek, plastikleşmenin panel bölgesi dışına taşınması amacı gerçekleştirilmiştir.

13. *EEPC-DDS* numunesinin yatay yük dayanım ve rijitliği *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerinden daha büyük olarak gerçekleşmiştir. Ancak elde edilen yatay yük

- yerdeğiştirme çevrimleri karşılaştırıldığında, *EEPC-H2* ve *EEPC-H0* numunelerine ait grafiklerin daha büyük alanları kapladığı görülmektedir.

14. *EEPC-SDS* numunesinde, 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde panel bölgesindeki çapraz elemanlarda gözlenen burkulma, *EEPC-DDS* numunesinde çapraz levha elemanların burkulma boylarının küçültülmesi ile ortadan kalmıştır. *EEPC-SDS* numunesinde panel bölgesinde kullanılan çapraz elemanların kalınlığının arttırılması da bir çözüm olabilecektir.

15. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında; ulaşılan sonuçların deneysel çalışmada gözlenen kaynak ayrılmalarına rağmen *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numuneleri için birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinde, panel bölgesinde sinüs gövde formunun bozulup, yırtılmanın başladığı eşik olan 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesine kadar deneysel ve sayısal sonuçların birbirleri ile uyumu dikkat çekmiştir. *EEPC-SDS* numunesinde deneysel çalışmada gözlenen burkulma ve kaynak yırtılmalarına rağmen, 0.04 rad. etkin göreli kat ötelenmesi eşiğine kadar deneysel ve sayısal sonuçlar yakın çıkmıştır. *EEPC-DDS* numunesinden elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar, bu numunede kiriş gövdesinin yırtıldığı 0.05 rad. göreli kat ötelenmesi eşiğine kadar birbiri ile uyumludur.

16. *EEPC-B* ve *EEPC-HS* numunelerinde, panel bölgesi mekanizması nedeni ile kiriş kesme ve eğilme momenti kapasitelerine erişilememiştir. Diğer numunelerde ise eğilme momenti taşıma kapasitesine kiriş uç kesitinde erişilmiştir.

17. *EEPC-H0* ve *EEPC-H2* numunelerinin panel bölgesinde kullanılan t=8 mm kalınlığındaki düz levha, panel bölgesi mekanizmasının engellenmesi için yeterli olmuştur. Ancak bu levha üzerinde 0.01 rad. etkin göreli kat ötelenmesi düzeyinde gözlenen akmanın engellenmesi için levha kalınlığının artırılması gerekmektedir. Panel bölgesinde kullanılacak düz levha kalınlığının sinüzoidal gövde kalınlığının yaklaşık 5 katı düzeyinde seçilmesi önerilebilir.

18. Panel bölgesinin göreli olarak daha kalın düz levha ile oluşturulduğu ya da çapraz levhalar ile güçlendirildiği durumda, kiriş uç kesitinde sinüzoidal gövdeyi başlıklara bağlayan kaynak dikişleri 0.015 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde çatlamaya başlamaktadır. 0.015 rad. değeri kaynak hasarı başlangıcı için bir sınır değer olarak önerilebilir.

19. Panel bölgesinin rijit olarak oluşturulduğu numunelerde; 0.03 rad. etkin göreli kat ötelenmesi seviyesinde, kiriş uç kesitinde sinüzoidal gövdeyi başlıklara bağlayan kaynak dikişleri ve gövde levhasında yırtılma oluşmuş ve kesitte bütünlük kaybolmuştur. 0.03 rad. değeri de kiriş kesitinde bütünlüğün kaybolduğu bir sınır değer olarak önerilebilir.

Bu konudaki bilgi birikiminin arttırılması için, aşağıdaki deneysel çalışmaların gelecekte yapılması önerilebilir:

1. Panel bölgesi içinde kullanılacak düzlem levha kalınlığının farklı değerleri için *EEPC-H0* türü birleşimlerin denenmesi.
2. Panel bölgesinde kullanılan aynı doğrultulu iki çaprazın kalınlıklarının değiştirildiği *EEPC-SDS* türü birleşimlerin denenmesi.
3. Farklı kesit boyutlarına sahip kiriş ve kolondan oluşturulan birleşim bölgelerinin denenmesi.

KAYNAKLAR

AAD Loop Discretization (Version 4.0) [Computer software]. Dindar, A.A.

ABAQUS/CAE (Version 6.9.1 EF) [Computer software].

ABAQUS/CAE User's Manual (Version 6.9.1 EF) [Computer software manual]. Retrieved from http://imechanica.org/files/l3-materials.pdf

ABAQUS Inc. (2005). ABAQUS/Explicit: *Advanced Topics, Lecture 3: Materials* [PowerPoint slides].

Abbas, H.H., Sause, R., Driver, R. G. (2006). Behaviour of corrugated web I-girders under in-plane loads. *Journal of Engineering Mechanics, 132* (8), 806-814.

Abbas, H. H., Sause, R., Driver, R. G. (2007). Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane moment and shear. *Engineering Structures, 29*, 2816-2824.

Abbas, H. H., Sause, R., and Driver, R. G. (2002). Shear strength and stability of high performance steel corrugated web girders. *Proc., Structural Stability Research Council Annual Technical Session*, Seattle, 361-387.

Anami, K., Sause, R., Abbas, H. H. (2005). Fatigue life of web-flange weld of corrugated web girders:1. influence of web corrugation geometry and flange geometry on web-flange weld toe stresses. *International Journal of Fatigue,* 27, 373-381.

ANSI/AISC 360-10 (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois.

Aydın, R., Yüksel, E., Yardımcı, N., Kısa, M.H., Gökçe, T. (2014). In-plane behaviour of beam-to-column connections of corrugated web I-sections. *Journal of Constructional Steel Research, 100,* 183-195.

Bedirhanoğlu, I., İlki, A. and Kumbasar, N. (2013). Precast fiber-reinforced cementitious composites for seismic retrofit of deficient rc joints-a pilot study. *Engineering Structures, 52*, 192-206.

Brandenburgische Technische Universität. (1997). Bearing Performance of Corrugated Web Beams. Cottbus.

Calenzani, A. F. G., Fakury, R. H., De Paula, F. A., Rodrigues, F. C., Queiroz, G., Pimenta, R. J. (2012). Rotational stiffness of continuous composite beams with sinusoidal-web profiles for lateral-torsional buckling. *Journal of Constructional Steel Research, 79,* 22-33.

Chan, C. L., Khalid, Y. A., Sahari, B. B., Hamouda A. M. S. (2002). Finite element analysis of corrugated web beams under bending. *Journal of Constructional Steel Research, 58,* 1391-1406.

Clark, P., Frank, K., Krawinkler, H., and Shaw, R. (1997). "Protocol for Fabrication, Inspection, Testing and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens," *SAC Steel Project Background Document.* October, Report No. SAC/BD-97/02.

DBYBHY. 2007. Deprem Bölgerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.

Deren, H. & Uzgider, E. & Piroğlu, F. (2003). *Çelik Yapılar.* Çağlayan Kitabevi, Beyoğlu-İstanbul.

DIN13 normuna göre civata torklama tablosu. (t.y). Erişim: 07 Ekim 2012, http://www.torkaletleri.com/civata-torklama-tablosu/

DIN 18800. (2008). Steel structures. *Deutsches Institut Fur Normung E.V.*

Driver, R. G., Abbas, H. H., Sause, R. (2006). Shear behaviour of corrugated web bridge girders. *Journal of Structural Engineering, 132* (2), 195-203.

Dubina, D., Ungureanu, V. (2006). Steel: A new and traditional Material for Building. Retrieved from http://books.google.com.tr/books?id=jKfMx_aq6CMC&printsec (Original work published 2006)

Eldib, MEA-H. (2009). Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges. *Journal of Constructional Steel Research, 65*, 2129-2139.

Elgaaly, M., Hamilton, R., Seshadri, A. (1996). Shear strength of beams with corrugated webs *Journal of Structural Engineering, 122* (4), 390-398.

Elgaaly, M., Seshadri, A., Hamilton, R. W. (1997). Bending strength of steel beams with corrugated webs. *Journal of Structural Engineering, 123* (6), 772-782.

Elgaaly, M., Seshadri, A. (1997). Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading. *Journal of Structural Engineering, 123* (6), 783-791.

EN 1993-1-1: (2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, *CEN*, Brussels.

EN 1993-1-5: (2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-5: Plated structural elements, *CEN*, Brussels.

FEMA-350. (2000). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel-Moment Frame Buildings. *Program to Reduce the Earthquake Hazards of Steel Moment-Frame Structures.*

Hassanein, M. F., Kharoob, O. F. (2013). Behaviour of bridge girders with corrugated webs: (II) Shear strength and design. *Engineering Structures*.

Ibrahim, S. A., El-Dakhakhni, W. W., Elgaaly, M. (2006). Fatigue of corrugated-web plate girders: experimental study. *Journal of Structural Engineering, 132* (9), 1371.

Ibrahim, S. A., El-Dakhakhni, W. W., Elgaaly, M. (2006). Fatigue of corrugated-web plate girders: analytical study. *Journal of Structural Engineering, 132* (9), 1381.

Kısa, M.H. (2013). *Sinüs gövdeli I profillerden oluşturulmuş dış kolon-kiriş birleşim bölgelerinin davranışının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kiymaz, G., Coskun, E., Cosgun, C., Seckin, E. (2010). Transverse load carrying capacity of sinusoidally corrugated steel web beams with web openings. *Steel and Composite Structures, 10* (1), 439-455.

Khalid, Y. A., Chan, C. L., Sahari, B. B., Hamouda, A. M. S. (2004). Bending behaviour of corrugated web beams. *Journal of Materials Processing Technology, 150,* 242-254.

Kövesdi, B., Braunb, B., Kuhlmannb, U., Dunai, L. (2010). Patch loading resistance of girders with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research, 66,* 1445-1454.

Kövesdi, B., Dunai, L. (2011). Determination of the patch loading resistance of girders with corrugated webs using nonlinear finite element analysis. *Computers and Structures, 89,* 2010-2019.

Li, Y., Zhang, W., Zhou, Q., Qi, X., Widera, GEO. (2000). Buckling strength analysis of the web of a wcw H-beam: Part 2. Development and research on H-beams with wholly corrugated webs(wcw). *Journal of Materials Processing Technology, 101,* 115-118.

Lindner, J. (1990). Lateral torsional buckling of beams with trapezoidally corrugated webs. *Proc., Int. Colloquium of Stability of Steel Structures,* Budapest, Hungary, 79-86.

Machacek, J., Tuma, M. (2002). Fatigue of girders with undulating webs. *Eurosteel ,* (pp.523-532). Coimbra.

Marka Tescil Belgesi. (2005). *Türk Patent Enstitüsü, No. 2005 32694 - Ticaret - Hizmet*

Martins, A. G., Fakury, R. H., Pimenta, R. J., Queiroz, G., Rodrigues, F. C. (2012). Moment resistance of composite steel and concrete connection in sinusoidal-web girders. *Journal of Constructional Steel Research, 76,* 112-120.

Moon, J., Yi, J., Choi, B. H., Lee, H-E. (2009). Lateral-torsional buckling of I-girder with corrugated webs under uniform bending. *Thin-Walled Structures, 47,* 21-30.

Moon, J., Yi J., Choi, B. H., Lee, H-E. (2009). Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs. *Journal of Constructional Steel Research, 65,* 1198-1205.

Nie, J-G., Zhu, L., Tao, M-X., Tang, L. (2013). Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs. *Journal of Constructional Steel Research, 85,* 105-115.

Novak, R., Machacek, J. (2000). Design resistance of undulating webs under patch loading. *Coupled Instabilities In Metal Structures,* (pp.371-378). Lisbon, Portugal, September 21-23.

NZ Çelik Yapı Mühendislik İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2007). *Ondülin Gövdeli Kirişler Teknik Dökümantasyon (R01).* Ankara: NZ Çelik Yapı Mühendislik İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş.

Odabaşı, Y. (2000). *Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları.* Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., Cağaloğlu-İstanbul.

Pasternak, H., Kubieniec, G. (2010). Plate girders with corrugated webs. *Journal of Civil Engineering and Management, 16* (2), 166-171.

Prabha, P., Seetharaman, S., Jayachandran, S.A., Marimuthu, V. (2011). Mimicking expensive experiments by Abaqus. *Structural Engineering Research Centre (SERC),* Chennai, India.

SAP2000 - Structural Analysis Program (Version 15) [Computer software]. Computer and Structures Inc., Berkeley, California.

Sause, R., Abbas, H. H., Driver, R. G., Anami, K., Fisher, J. W. (2006). Fatigue life of girders with trapezoidal corrugated webs. *Journal of Structural Engineering, 132* (7), 1070-1078.

Sayed-Ahmed, E. Y. (2001). Behaviour of steel and/or composite girders with corrugated webs. *Canadian Journal of Civil Engineering, 28-4,* 656-672.

Sayed-Ahmed, E. Y. (2005). Plate girders with corrugated steel webs. *AISC Engineering Journal, 42-1,* 1-13.

Sayed-Ahmed, E. Y. (2007). Design aspects of steel I-girders with corrugated steel webs. *Electronic Journal of Structural Engineering, 7,* 27-40.

SeismoStruct (Version 6.5) [Computer software].

SeismoStruct Kullanım Kılavuzu (Version 6.5) [Computer software manual].

Shahmohammadi, A., Mirhaderi, R., Hajsadeghi, M., Khanmohammadi, M. (2013). Application of corrugated plates as the web of steel coupling beams. *Journal of Constructional Steel Research, 85,* 178-190.

Sin Şekil. (2005). *Patent No. 2005 32694 - Ticaret - Hizmet* . Türk Patent Enstitüsü.

Takesita A, Yoda T, Sato K, Sakurada M. (1997). Fatigue tests of a composite girder with corrugated web. Proceedings of annual conference of the Japan society of civil engineering, *52,* 122-3.

TS 498 (1980). Çelik Yapıların Hesap Ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN ISO 6892-1 (2011). Metalik malzemeler - Çekme deneyi - bölüm 1: Oda sıcaklığında deney metodu, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

Ucak, A. (2012). Modeling the Constitutive Response of Metals Under Complex Loading, *2012 SIMULIA Community Conference,* RI, USA: May 15 - 17.

VUT. (1990). Test report on experiments carried out on I-beams with corrugated web plates. Vienna: Vienna University of Technology, Institute for Steel Construction, Department of Applied Model Statics in Steel Construction.

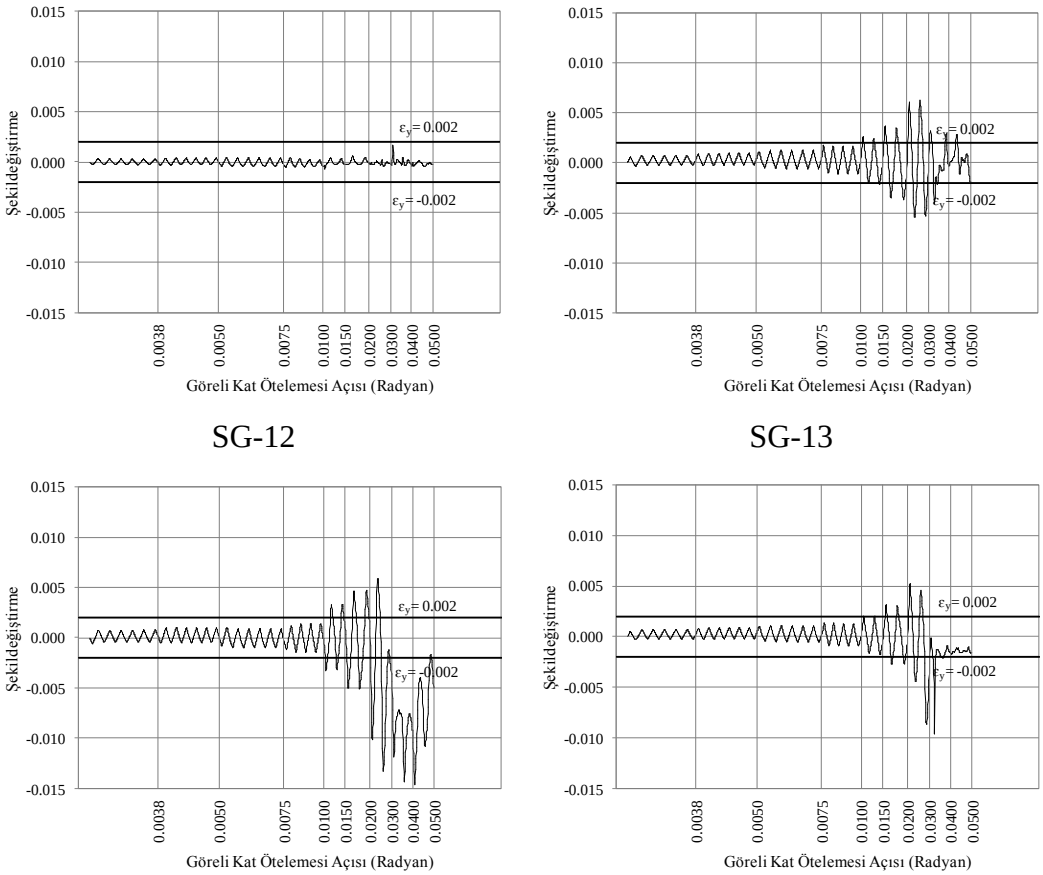
Yan-lin, G., Qing-lin, Z., Siokola, W., Andreas, H. (2008). Flange buckling behavior of the H-shaped member with sinusoidal webs, *Fifth International Conference on Thin-Walled Structures,* Brisbane, Australia.

Zeman & Co Gesellschaft mbH. (2005). *Corrugated web beam, technical documentation*. Austria: Zeman & Co.

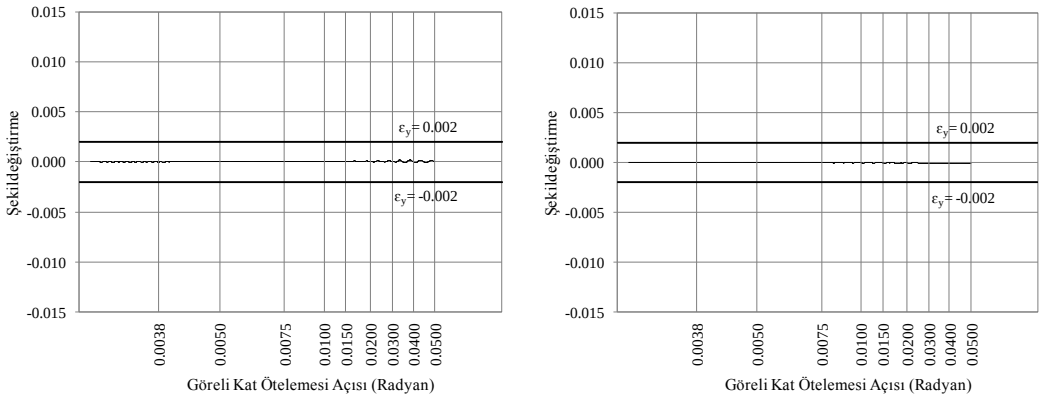
EKLER

EK A: Şekildeğiştirme ölçer grafikleri

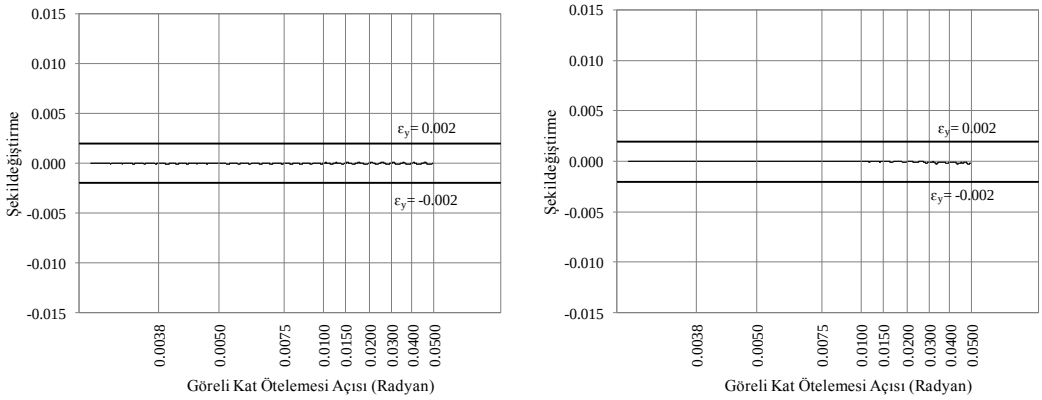
EK A: Şekildeğiştirme ölçer grafikleri



Şekil A.1 : EEPC-B / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri.

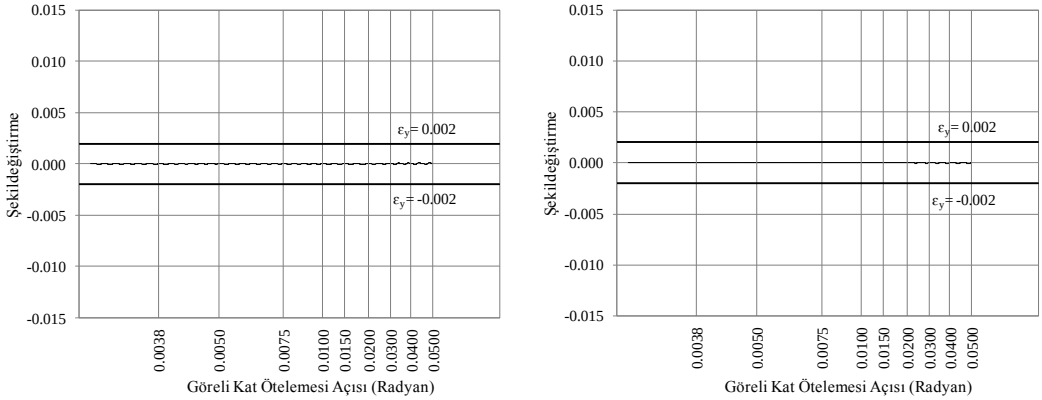


SG-14 SG-15



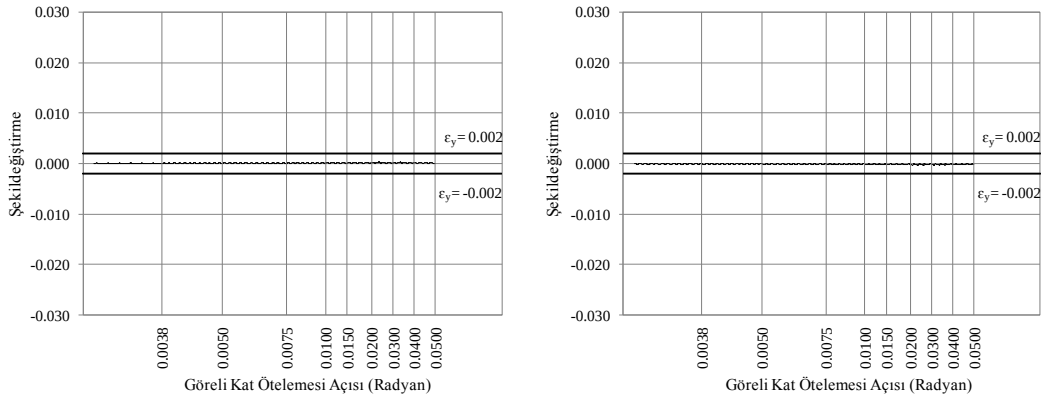
SG-38 SG-39

Şekil A.2 : EEPC-B / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri.

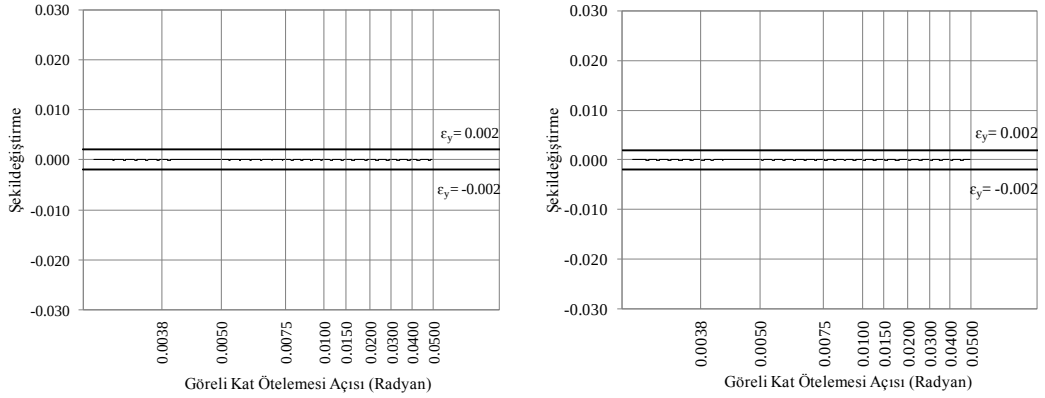


SG-20 SG-21

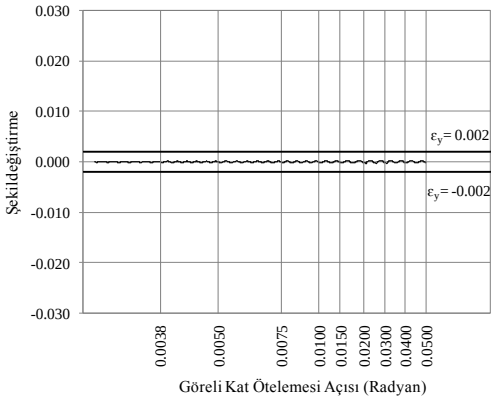
Şekil A.3 : EEPC-B / SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerleri.



ε_1 ε_2

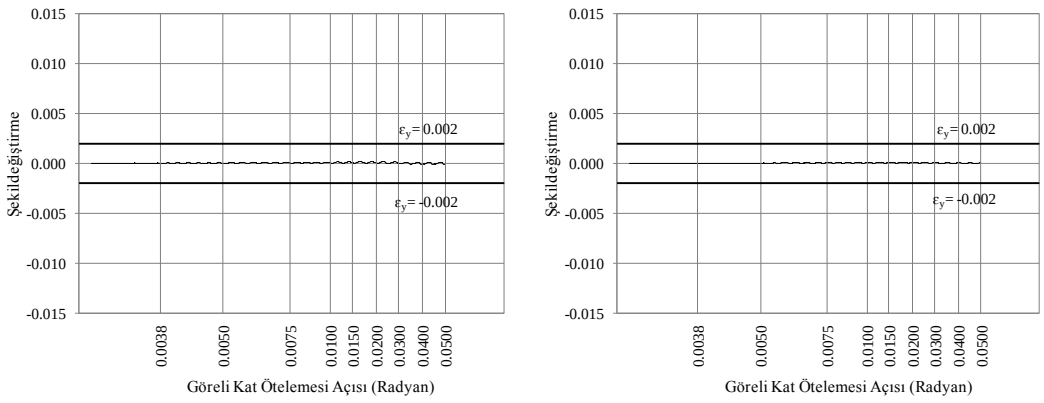


ε_x ε_y

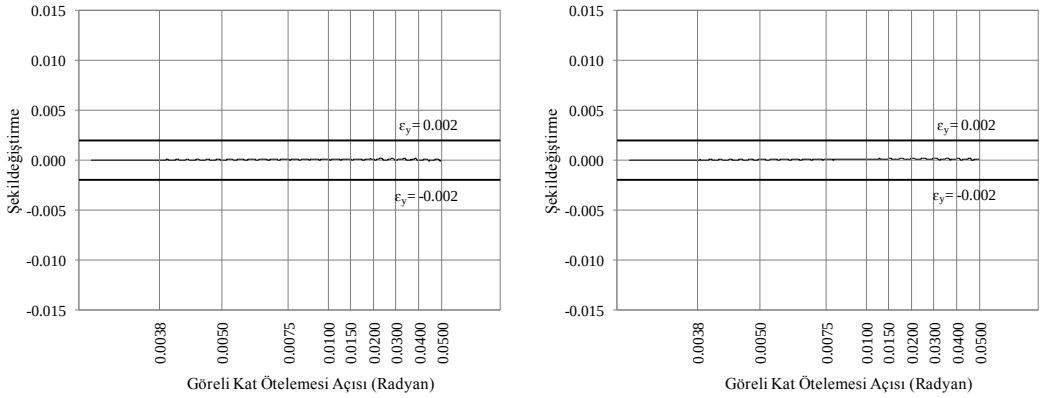


ε_{xy}

Şekil A.4 : EEPC-B / SG-11 şekildeğiştirme ölçeri.

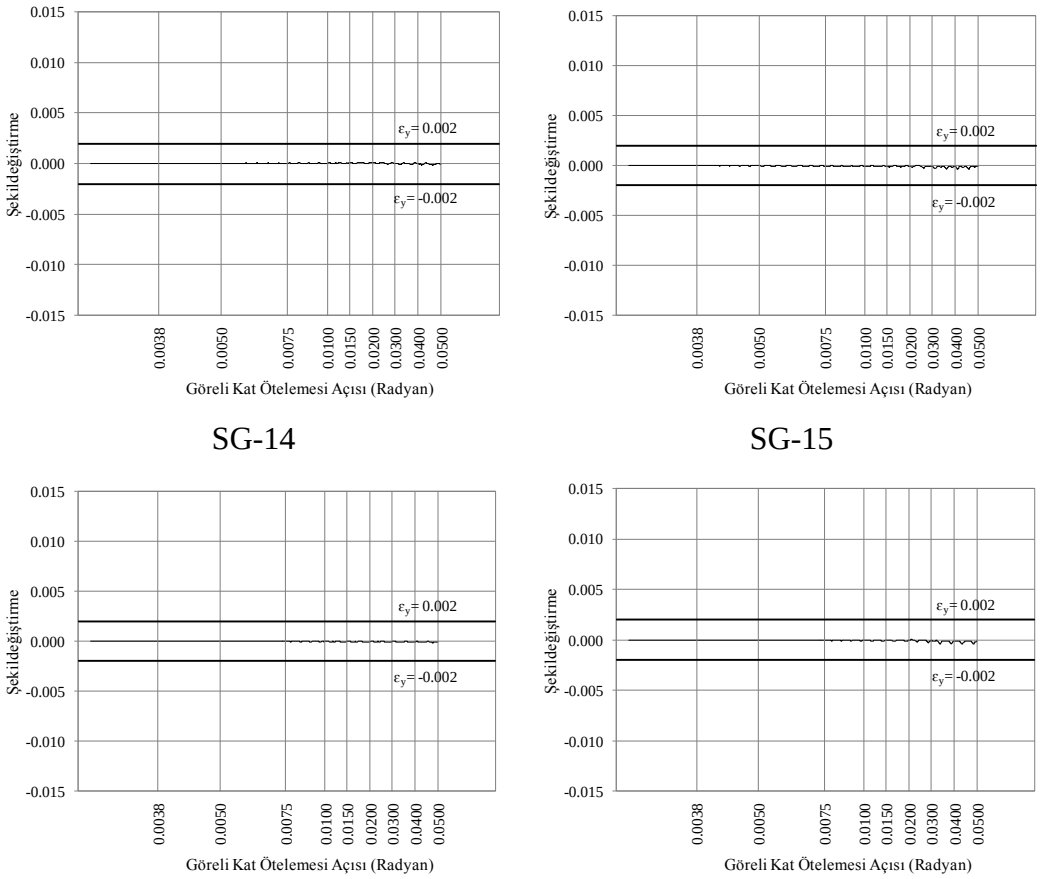


SG-12 SG-13



SG-40 SG-41

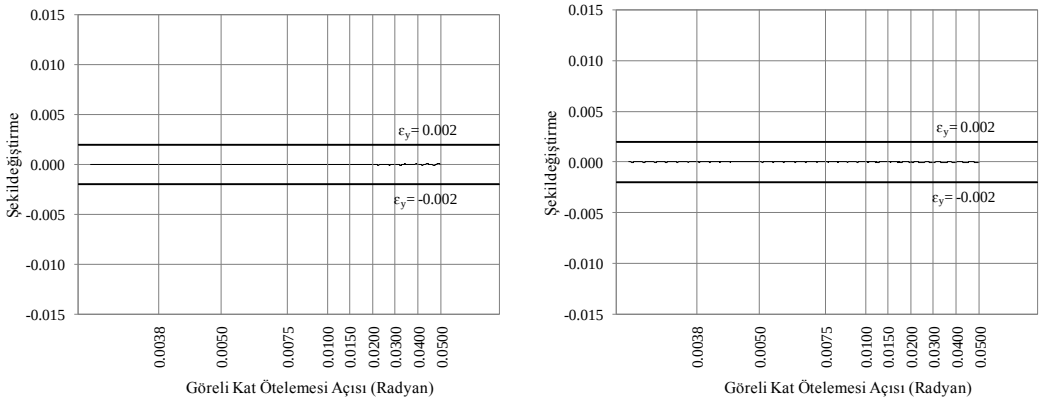
Şekil A.5 : EEPC-HS / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri.



SG-14 SG-15

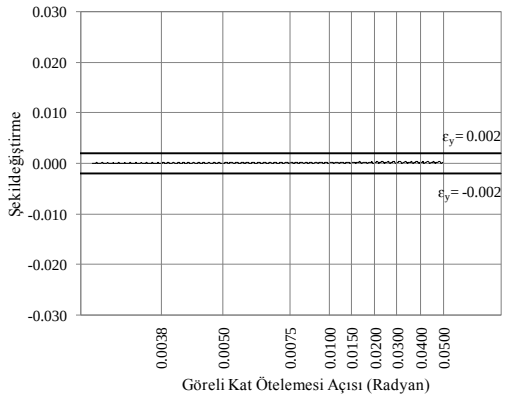
SG-38 SG-39

Şekil A.6 : EEPC-HS / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri.

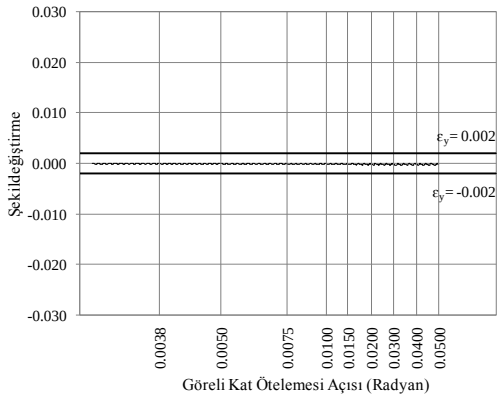


SG-20 SG-21

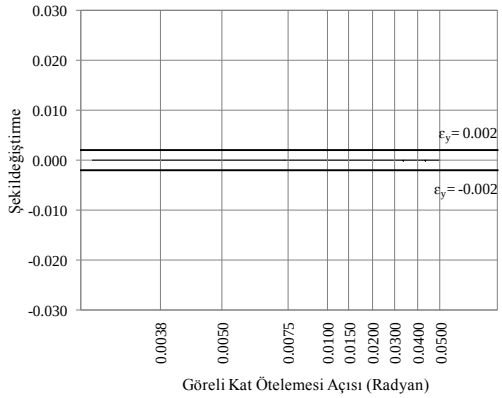
Şekil A.7 : EEPC-HS / SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerleri..



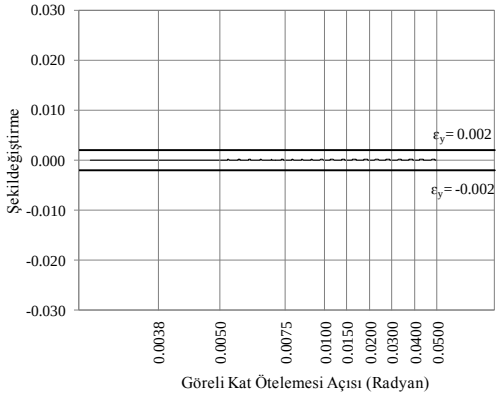
ε_1



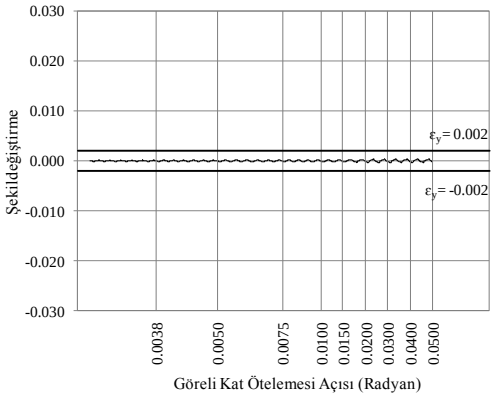
ε_2



ε_x

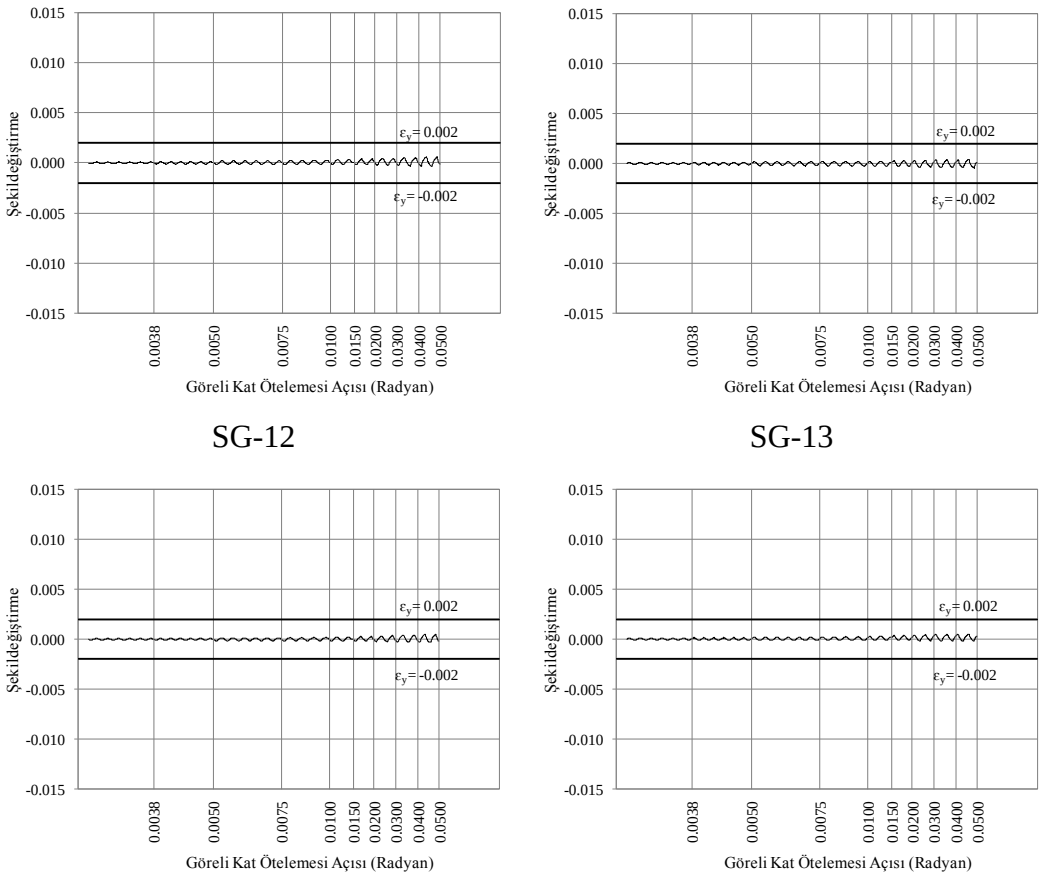


ε_y

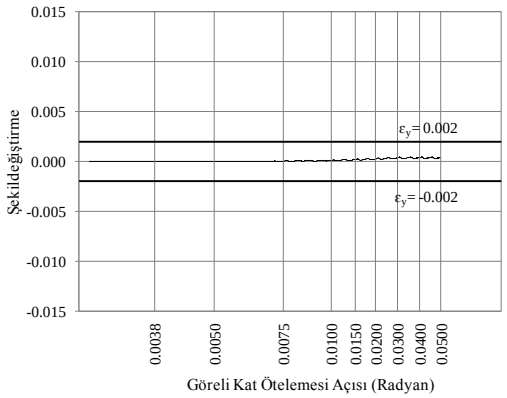


ε_{xy}

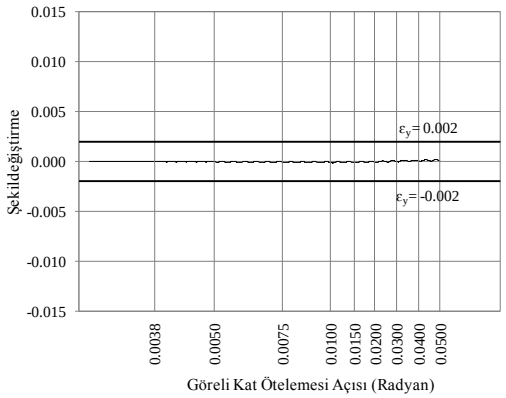
Şekil A.8 : EEPC-HS / SG-11 şekildeğiştirme ölçeri.



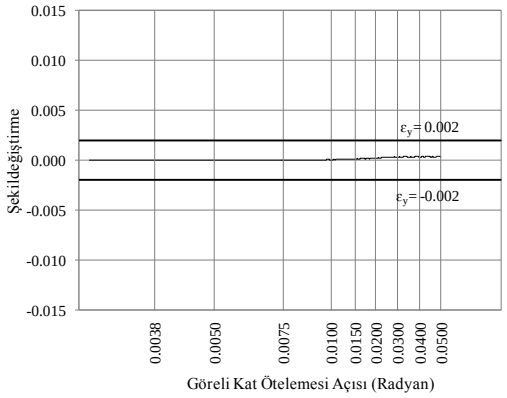
Şekil A.9 : EEPC- H0 / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri.



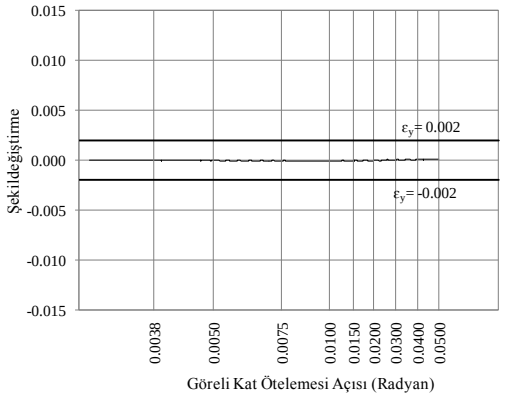
SG-14



SG-15

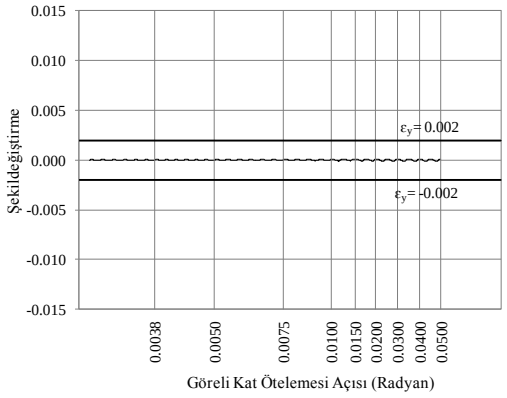


SG-38

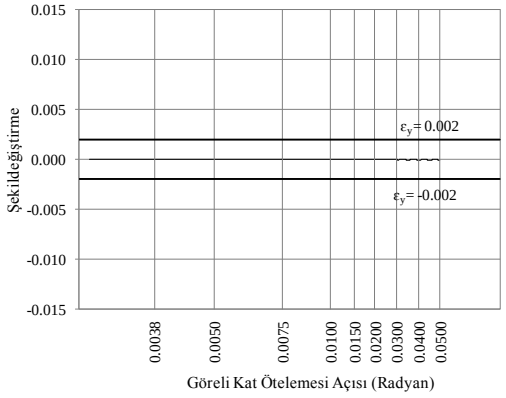


SG-39

Şekil A.10 : EEPC- H0 / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri.

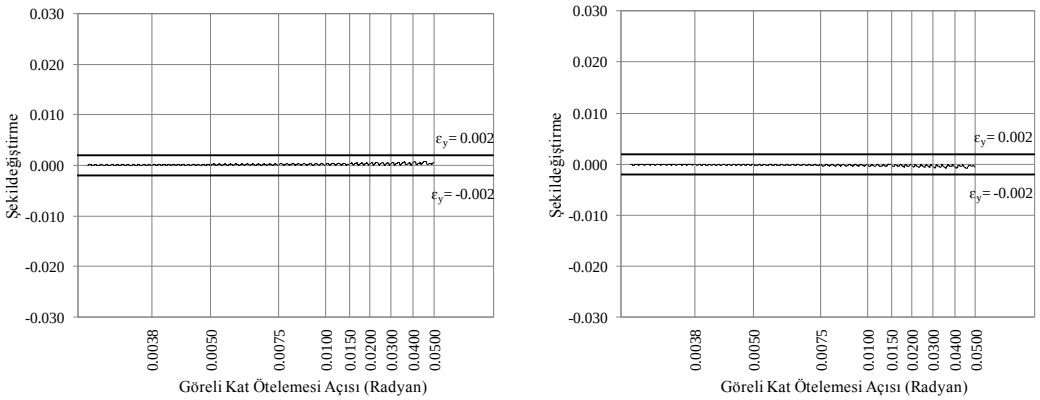


SG-20



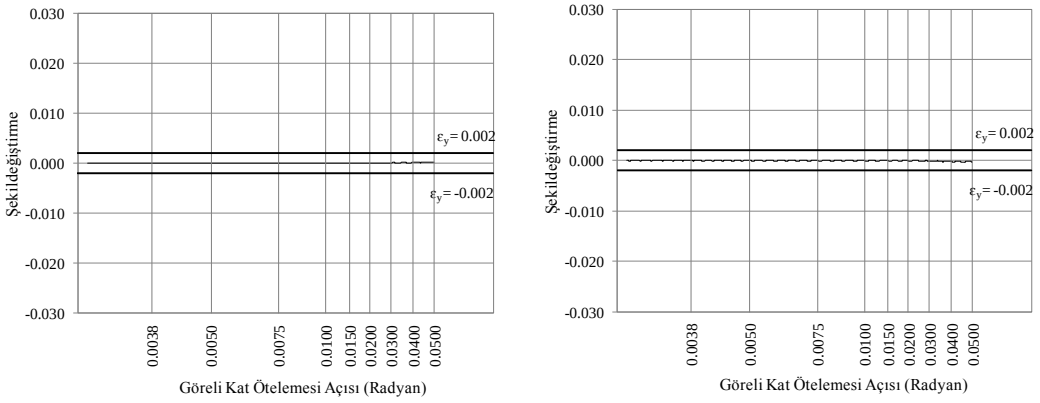
SG-21

Şekil A.11 : EEPC- H0 / SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerleri.



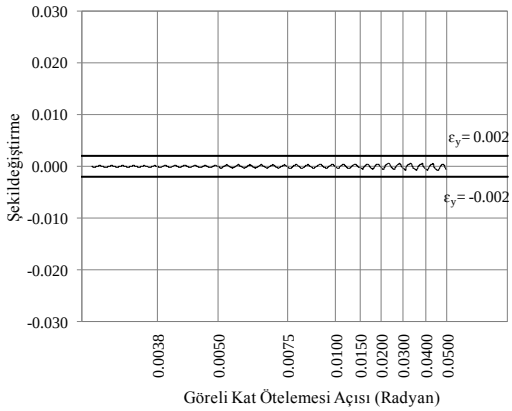
ε_1

ε_2



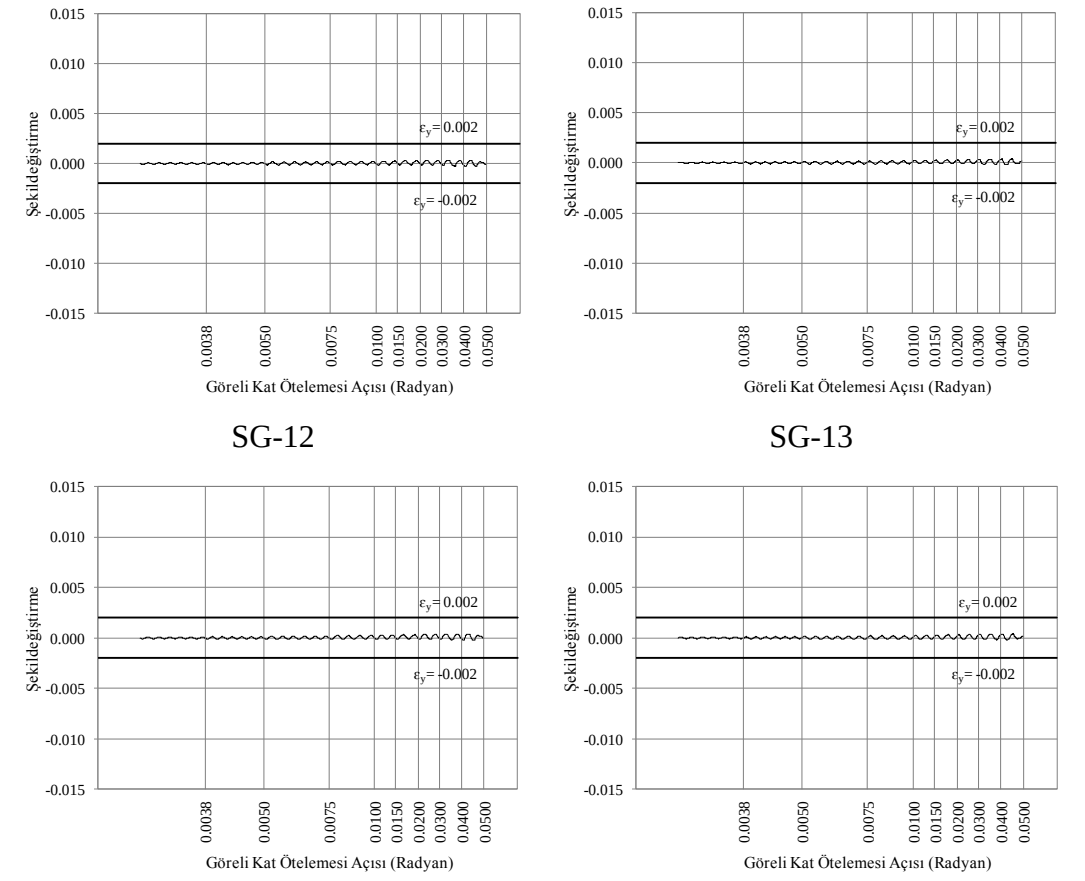
ε_x

ε_y

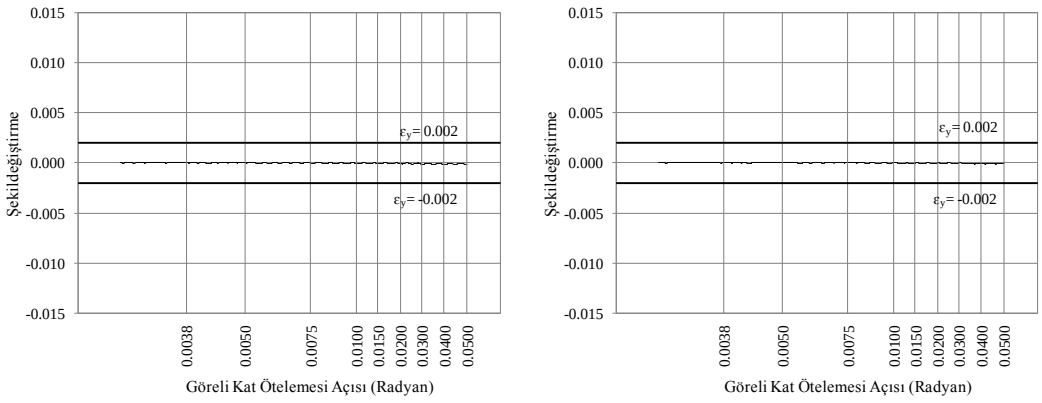


ε_{xy}

Şekil A.12 : EEPC- H0 / SG-11 şekildeğiştirme göreli kat ötelenmesi ilişkisi

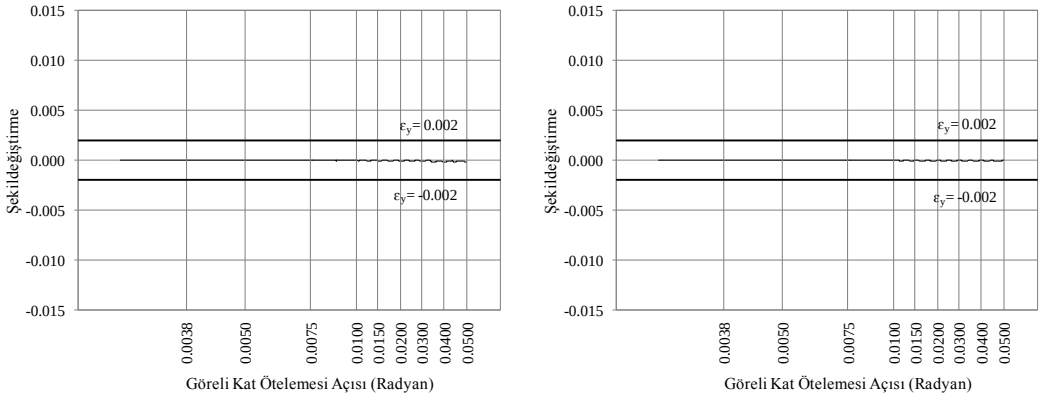


Şekil A.13 : EEPC- H2 / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri.



SG-42

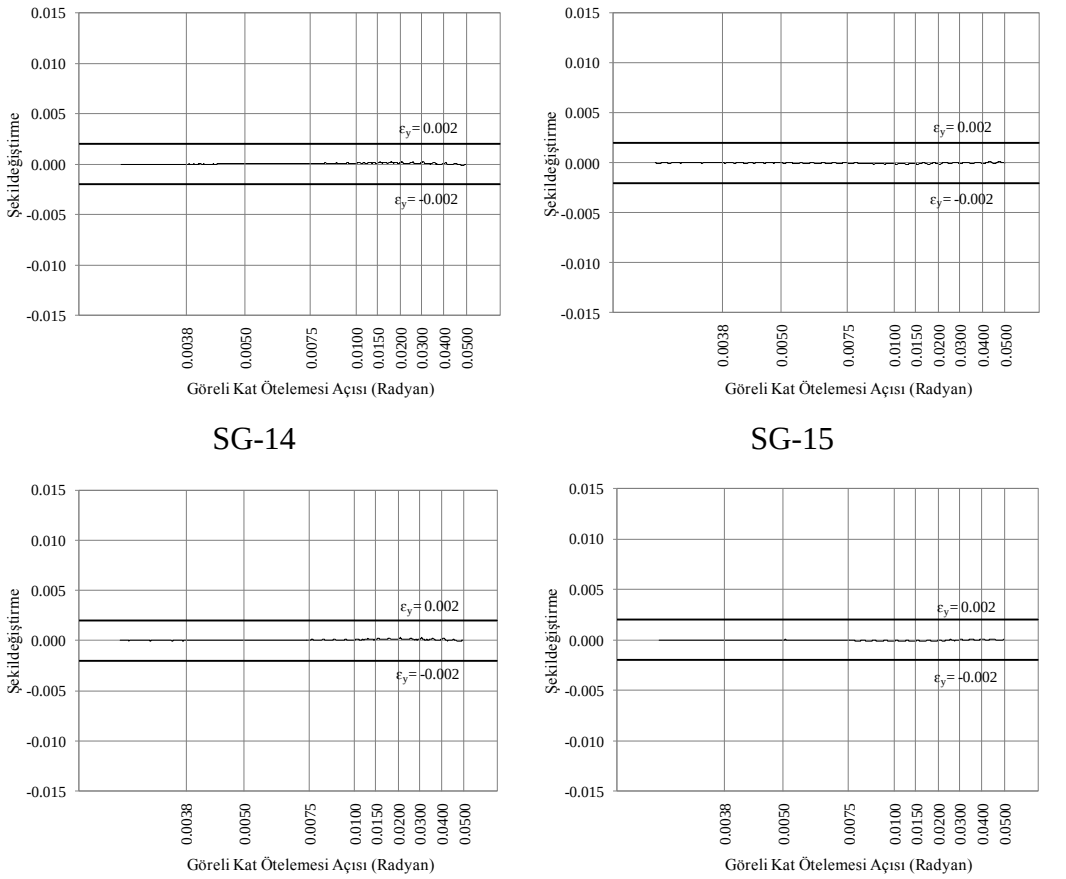
SG-43



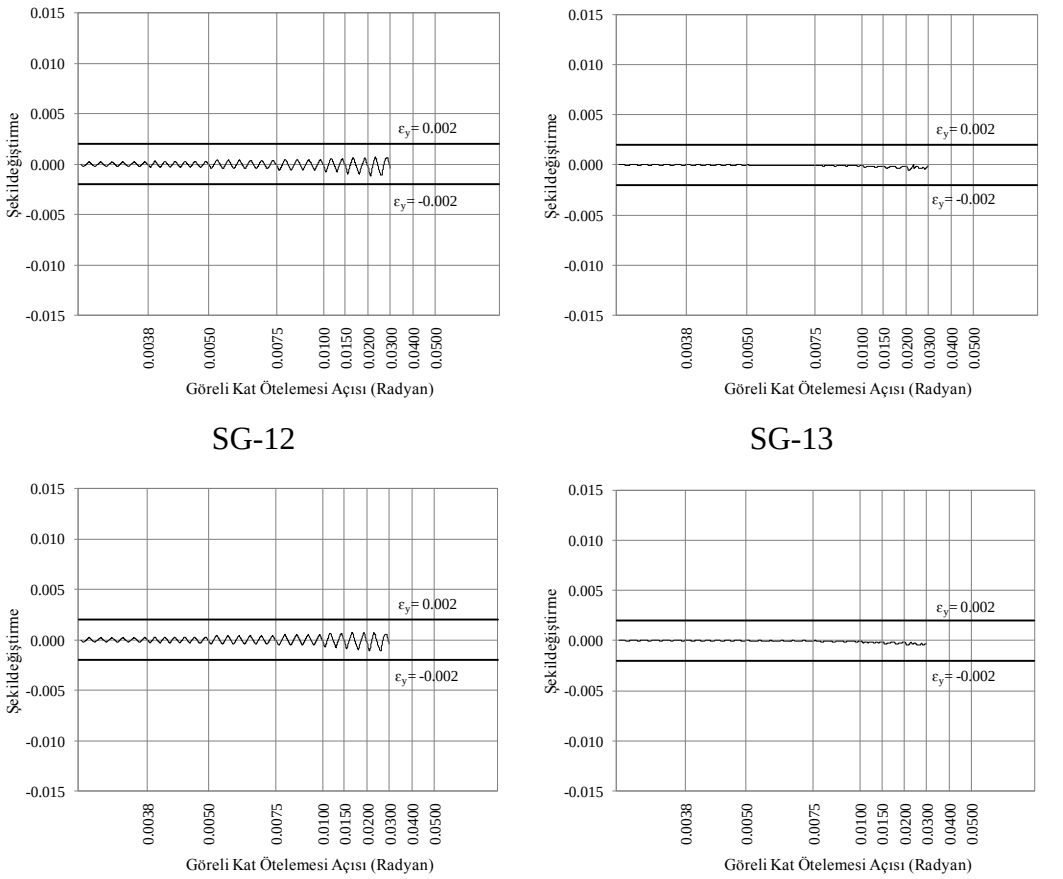
SG-44

SG-45

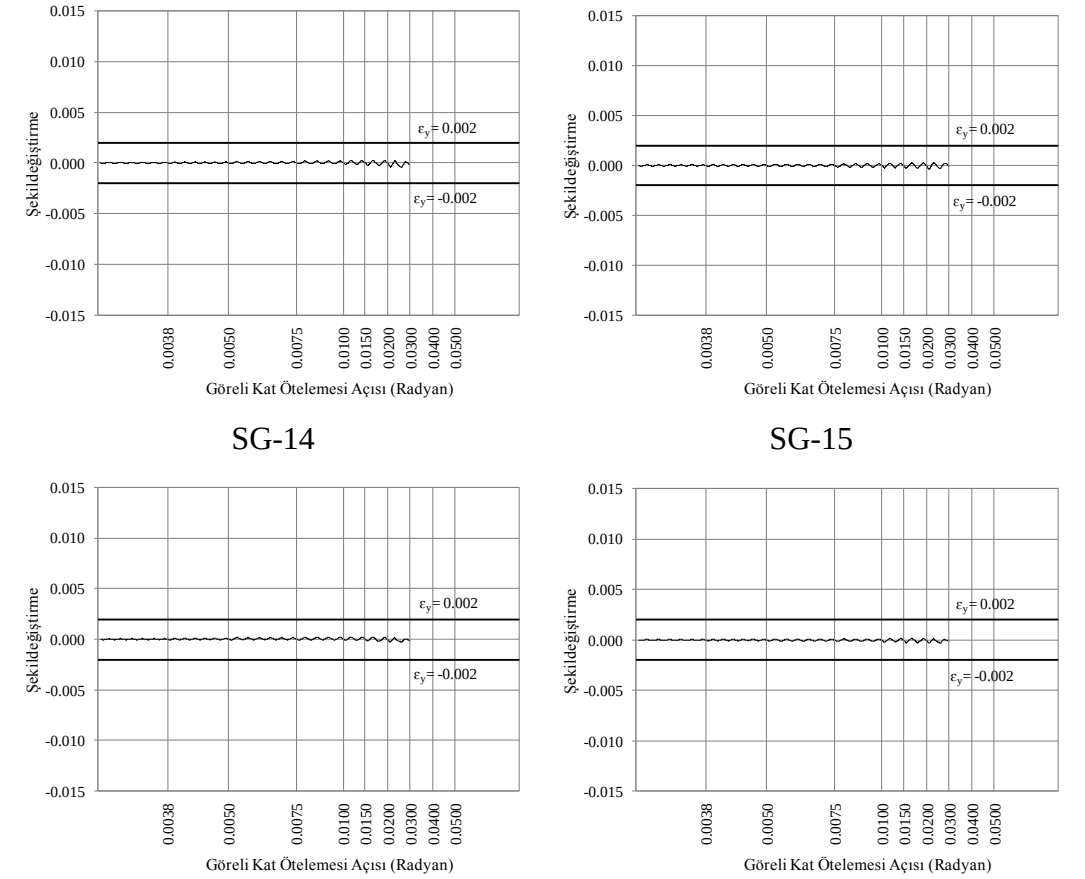
Şekil A.14 : EEPC- H2 / SG-42, SG-43, SG-44 ve SG-45 şekildeğiştirme ölçerleri.



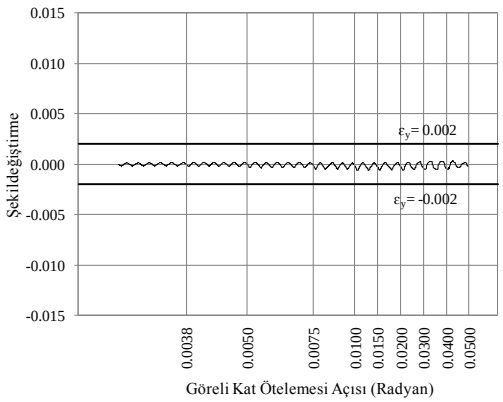
Şekil A.15 : EEPC- H2 / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri.



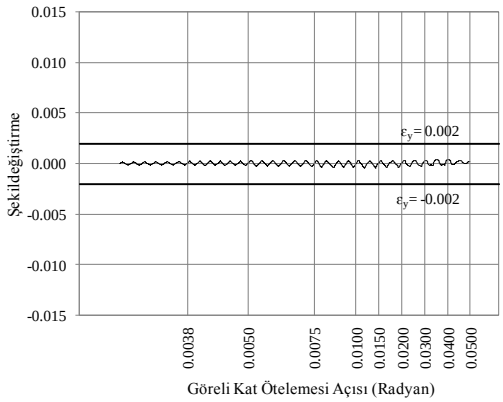
Şekil A.16 : EEPC- SDS / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri.



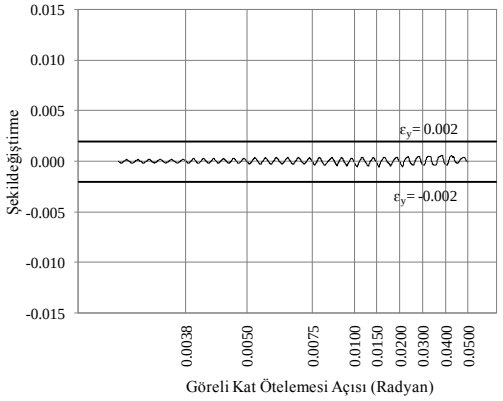
Şekil A.17 : EEPC- SDS / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri.



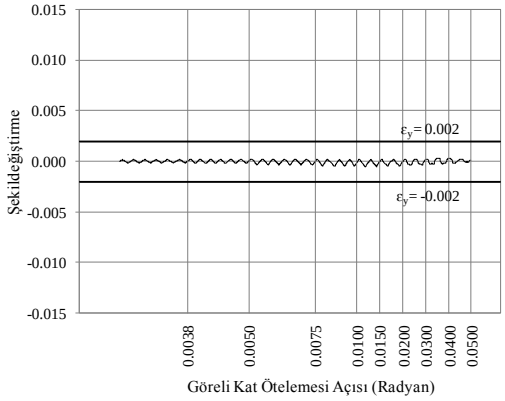
SG-12



SG-13

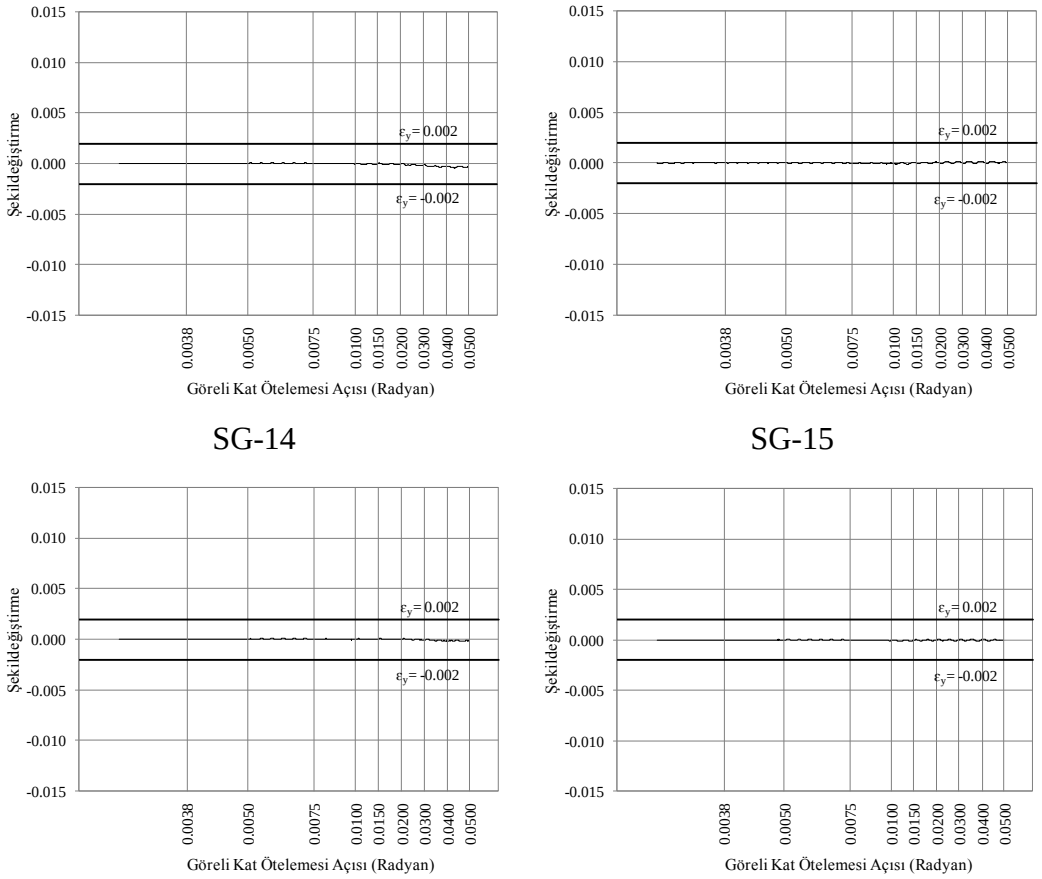


SG-40



SG-41

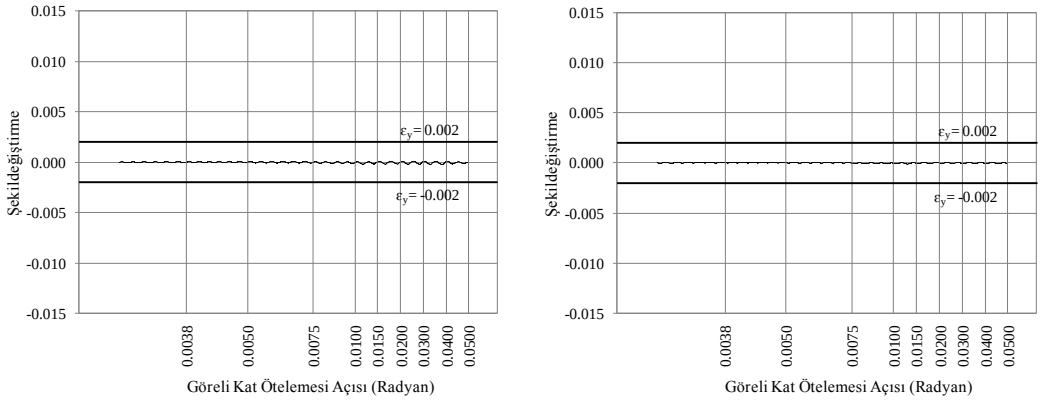
Şekil A.18 : EEPC- DDS / SG-12, SG-13, SG-40 ve SG-41 şekildeğiştirme ölçerleri.



SG-14 SG-15

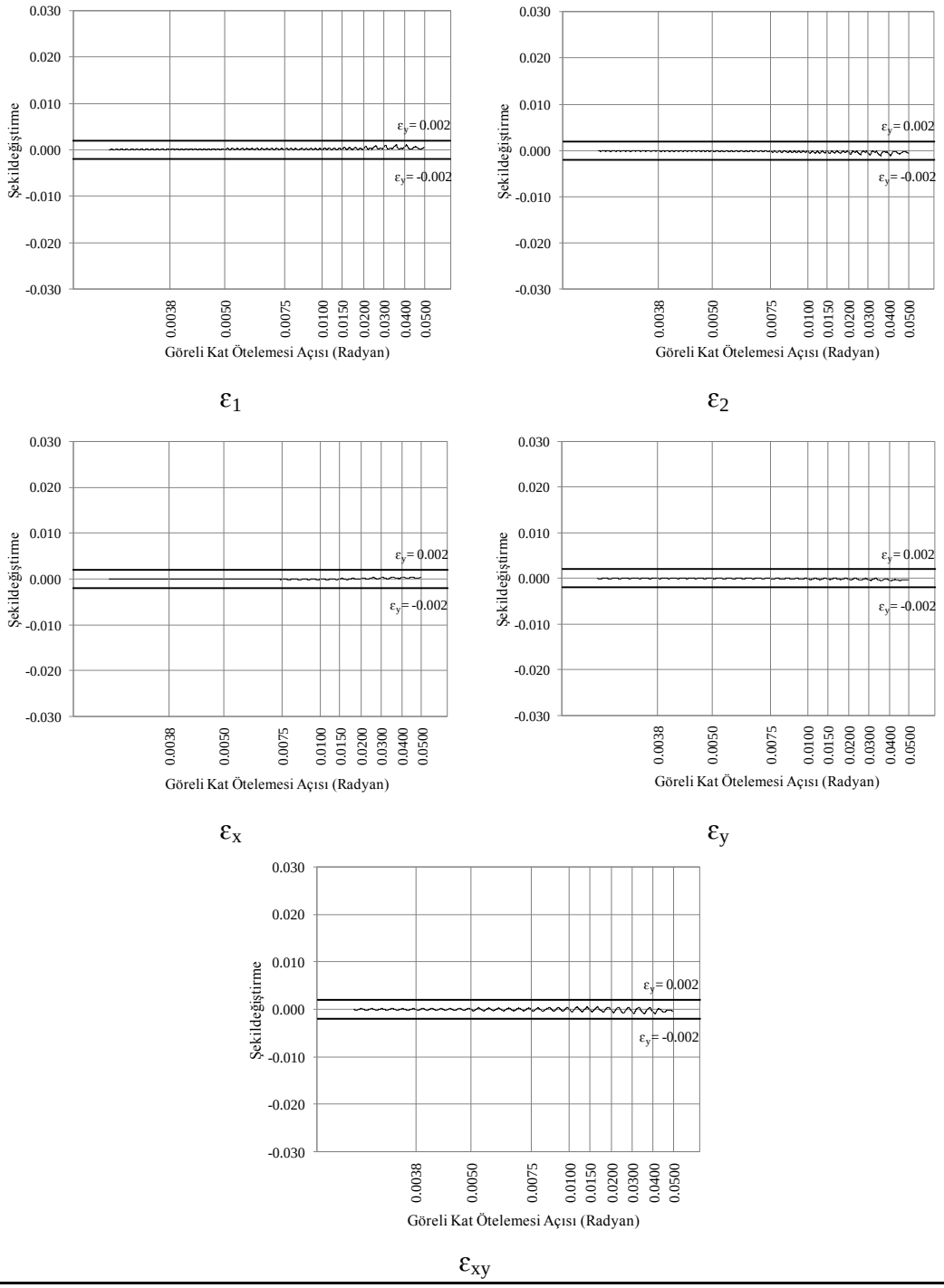
SG-38 SG-39

Şekil A.19 : EEPC- DDS / SG-14, SG-15, SG-38 ve SG-39 şekildeğiştirme ölçerleri.



SG-20 SG-21

Şekil A.20 : EEPC- DDS / SG-20 ve SG-21 şekildeğiştirme ölçerleri.



Şekil A.21 : EEPC- DDS / SG-11 şekildeğiştirme ölçeri.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Recep AYDIN

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara - 1983

E-Posta: recep.aydin@yahoo.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi, 2005

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Firma	Görev	Süre
Aykon Mühendislik	Tasarım ve Proje Mühendisi	2005 - 2007
Zbs Alfaçelik İnşaat	Tasarım ve Proje Mühendisi	2007 - 2010
Zbs Alfaçelik İnşaat	Teklif ve İhale Mühendisi	2010 - 2012
Zbs Alfaçelik İnşaat	Teklif ve İhale Müd. Yard.	2012 -
Aykon Mühendislik	Teknik Müdür	2009 -

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Aydın R.,** Yüksel E., Yardımcı N., Kısa M. H. and Gökce T., 2014: In-plane Behaviour of Beam-to-Column Connections of Corrugated Web I-sections. *Journal of Constructional Steel Research,* 100, 183-195.

- **Aydın R.,** Yüksel E., Yardımcı N. and Gökce T. : Cyclic behavior of diagonally-stiffened beam-to-column connections of corrugated-web I sections. *Engineering Structures, Under review.*

- **Aydın R.,** Yardımcı N., Yüksel E., Kıymaz G., 2011: İnce Cidarlı Sinüzoidal Gövdeli Çelik I Eleman Birleşimlerinin Performansı. *IX. Türkiye Abaqus Kullanıcılar Toplantısı*, Kasım 2009, İstanbul.