

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERDE, PREFABRİKE ELEMANLARLA BURKULMASI
SINIRLANDIRILMIŞ ÇAPRAZLARIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Mohammad Bagher MAHDİZADEH

EYLÜL 2010

TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

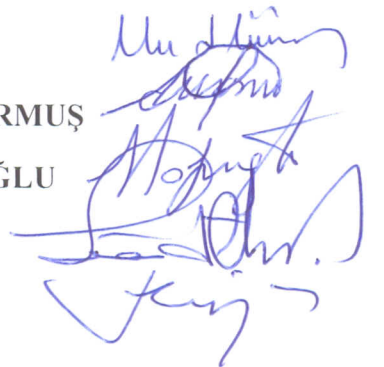
ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERDE, PREFABRİKE ELEMANLARLA BURKULMASI
SINIRLANDIRILMIŞ ÇAPRAZLARIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

İnş.Yük. Müh. Mohammad Bagher MAHDİZADEH

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsünde
“Doktor(İnşaat Mühendisliği)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18/08/2010
Tezin Savunma Tarihi : 23/09/2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin HÜSEM
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Sinan ALTIN
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Selim PUL



Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

“Çelik Çerçeve Sistemlerde, Prefabrike Elemanlarla Burkulması Sınırlandırılmış Çaprazların Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı, çalışmanın başlangıcından sonuna kadar sürekli takip eden, araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılama için uğraş veren, tezimin bütün aşamalarında bilgi ve tecrübesinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof.Dr. Metin HÜSEM'e şükranlarımı sunmak isterim.

Çalışma esnasında görüş ve yorumlarından yararlandığım doktora tez izleme komitesi ve aynı zamanda juri üyesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ ve Sayın Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU ile değerli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren hocalarım Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN 'e ve Sayın Yrd.Doç. Dr. Selim PUL' e teşekkür ederim.

Çalışmalarında ilgi ve yardımlarını gördüğüm, Yapı ve Malzeme laboratuvarı çalışanlarından başta hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Selim PUL, çalışma arkadaşlarım, Yrd. Doç. Dr Selçuk. E. GÖRKEM, Öğr. Gör. Ercan YOZGAT, Arş. Gör. M. Emin ARSLAN, doktora öğrencileri sayın Y. ZANDI, E. SALAMI 'a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölüm arkadaşlarım, Mostafa MOGHANIYAN, Mohammad M. NASERİ ve arkadaşım Akif TÜRK'e özellikle teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Çalışmalarımın bir kısmında, bana yol gösteren Yrd. Doç. Dr. Ali DAVARAN 'a da teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca beni sabır ve şefkatle destekleyen anne ve babama özellikle eşime ve çocuklarımdan teşekkür ederim.

Mohammad Bagher MAHDİZADEH

Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çelik Yapılarda Kullanılan Taşıyıcı Sistemler.....	3
1.2.1. Merkezi Çaprazlı Çerçeve Sistemler.....	4
1.2.2. Dışmerkez Çaprazlı Çerçeve Sistemler.....	9
1.2.3. Yeni Merkezi Çaprazlı Çerçeve Sistemler.....	9
1.2.3.1. Korkuluk Payandası (Dizli Çaprazlı Çerçeveler).....	9
1.2.3.2. Sürtünme Merkezi Çaprazlı Çerçeveler.....	11
1.2.3.3. Sigortalı çaprazlı Çerçeveler.....	13
1.3. Burkulması Sınırlandırılmış Çaprazların Davranış ve Tasarımı.....	15

1.3.1.	Burkulması Sınırlandırılmış Çaprazlar.....	15
1.3.2.	Burkulması Sınırlandırılmış Çaprazların Davranışı.....	16
1.3.2.1.	Burkulması Sınırlandırılmış Çaprazların Tekrarlı Yük Etkisindeki Davranışı.....	18
1.3.2.2.	Genel Burkulma Kriteri.....	28
1.3.2.3.	Burulma Burkulması.....	35
1.3.2.4.	Çaprazlarda Akma Birim Uzamasının Hesabı.....	35
1.4.	Çelik Lifli Betonların Üretimi ve Davranışları.....	37
1.5.	Polypropilen Liflerin Özellikleri.....	43
1.6.	Lirefa Özellikleri.....	46
1.7.	Polyetilen Özellikleri.....	48
1.8.	Polyamid Özellikleri.....	50
1.9.	Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	50
1.10.	BRB lerde Prefabrikasyon İşlemleri.....	56
1.11.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	57
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	58
2.1.	Deneyleerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	58
2.1.1.	Agrega Özellikleri.....	58
2.1.2.	Çimento Özellikleri	59
2.1.3.	Karma Suyu Özellikleri.....	59
2.1.4.	Katkı Maddesi Özellikleri.....	59

2.1.5.	Donatı Özellikleri.....	60
2.1.6.	Çelik Lif Özellikleri.....	61
2.1.7.	Polypropilen Liflerin Özellikleri.....	61
2.1.8.	Lirefa (DDS) Özellikleri.....	62
2.1.9.	Polyetilen Levhaların Özellikleri.....	63
2.1.10.	Polyamid Levhaların Özellikleri.....	64
2.1.11.	Kullanılan Çelik Profillerin Özellikleri.....	65
2.1.12.	Beton Üretimi, Yerleştirilmesi ve Bakımı.....	65
2.2.	Üretilen Betonların Mekanik Özellikleri.....	67
2.3.	Deney Numuneleri ve Deney Planı.....	74
2.4.	Deney Düzeneği ve Ölçüm Sistemleri	84
2.4.1.	Deney Düzeneği	84
2.4.2.	Ölçüm Sistemi ve Kullanılan Aletler.....	85
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	87
3.1.	Prefabrike Elemanların Üretiminde Kullanılan Betonların Özellikleri.....	87
3.2.	Burkulmaları Sınırlanmamış Çelik Çaprazlar.....	90
3.3.	Burkulmaları Sınırlanmış Çelik Çaprazlar.....	95
3.3.1.	Betonarme Prefabrike Elemanlarla Burkulmaları Sınırlanmış Çelik Çaprazlar.....	97
3.3.2.	Çelik Lifli Prefabrike Elemanlarla Burkulmaları Sınırlanmış Çaprazlar.....	103

3.3.3.	Lirefali Sargılı Çelik Lifli Prefabrike Elemanlarla Burkulmaları Sınırlanırılmış Çaprazlar.....	108
3.3.4.	Polypropilen Lifli Prefabrike Elemanlarla Burkulmaları Sınırlanırılmış Çaprazlar.....	111
3.3.5.	Polyetilen ve Polyamid Levhalarla Burkulmaları Sınırlanırılmış Çaprazlar.....	118
3.4.	Burkulmaları Sınırlanırılmış Çelik Çaprazların Enerji Yutma Kapasiteleri	133
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	142
5.	KAYNAKLAR.....	146

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Bu çalışmada, çelik çerçeve sistemlerde, prefabrike elemanlarla burkulması sınırlandırılmış çaprazların davranışlarını deneysel olarak incelenmiştir. Burkulmayı sınırlandıran prefabrike elemanların üretiminde, çeşitli malzemeler, betonarme, çelik lifli beton, polypropilen lifli beton, polyetilen ve polyamid levhalar kullanılmıştır. Deneylerde çelik çapraz olarak pratikte kullanılan profiller seçilmiştir. Çelik lifli, polypropilen lifli beton, prefabrike elemanı sarmak için lirefa malzemesi, polyetilen ve polyamid levhaları, burkulmayı sınırlandıran eleman olarak ilk defa bu araştırmada kullanılmıştır.

Bu araştırmanın sonuçları, deprem bölgelerinde yapılan binaların tasarımında ve yapımında, mevcut yapıların güçlendirilmesinde ve özellikle sağlık merkezleri gibi depremden sonra hemen kullanılacak yapıların güçlendirilmesinde de kullanılabilir.

Bu amaçlarla gerçekleştirilen çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bilgiler, ikinci bölümde yapılan deneysel çalışmalar, üçüncü bölümde deney bulguları ve irdelemeler verilmiş, dördüncü bölümde ise çalışmadan çıkarılabilecek bazı sonuçlar özetlenmiş ve bazı öneriler yapılmıştır. Beşinci bölümü çalışmanın son bölümü olan yararlanılan kaynaklar dizini takip etmektedir.

Elde edilen sonuçlar, çelik lifli beton, betonarme, polyetilen ve polyamid levhalar, çelik lifli beton ve lirefa sargılı çelik lifli beton prefabrike elemanlarının, çelik çaprazların burkulmasını sınırlandırdığı, sünekliği dolayısıyla da enerji yutma kapasitesini artırdığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlar, prefabrike elemanlar, çelik lifli beton , polyetilen levhalar, polyamid levhalar.

SUMMARY

Investigation of Buckling Restrained Braces with Precast Elements

In this experimental study, the behavior of buckling restrained braces with precast elements has been contemplated. Many different materials like reinforced concrete, steel fiber reinforced, polypropylene fiber reinforced concretes, polyethylene and polyamide sheets as buckling restraining materials have been used. Popular and marketable steel profiles as braces were used. In this study, at buckling restrained braces, steel fiber reinforced, polypropylene fiber reinforced concretes, polyethylene and polyamide sheets and lirefa materials as a state of the art were used.

The results of this research can be used at construction and designing of steel structures at earthquake areas, also for strengthening and rehabilitation of existing structures specially hospitals and necessary buildings after major earthquakes.

The work consists of five chapters. General information associated with the study is given in the first chapter. Experimental works are given in the second and test results along with discussions presented in the third chapter. Conclusions obtained from the study were outlined in the fourth chapter. This is followed by the final chapter containing a reference list.

The results obtained indicated that the application of steel fiber reinforced, polypropylene fiber reinforced concretes, and polyethylene and polyamide sheets as precast buckling restraining members can increase the ductility and energy absorbing capacity of steel structures.

Key Words: Buckling Restrained Braces, Precast, Steel Fiber Reinforced Concrete, Polyethylene and Polyamide sheets

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Çelik yapılarda kullanılan taşıyıcı sistemler.....4
Şekil 1.2.	Burkulması sınırlandırılmış çelik çaprazlı çerçeve sistemli bir bina.....5
Şekil 1.3.	Yaygın olarak kullanılan merkezi çaprazlı çerçeveler.....6
Şekil 1.4.	Diyagonal çapraz tipleri.....8
Şekil 1.5.	Diyagonal olmayan çapraz tipleri.....8
Şekil 1.6.	Mega çaprazlı çerçeve.....8
Şekil 1.7.	Dışmerkez çaprazlı çerçeve sistemler.....9
Şekil 1.8.	Dizli çaprazlı çerçeve ve detayı.....10
Şekil 1.9.	Dizli çaprazların tipleri.....11
Şekil1.10.	FCBF sistemde bağlantı detayı12
Şekil 1.11.	Çapraz elemanda sigorta düzenlemesi.....13
Şekil 1.12.	Sigorta deneyinden bir numune.....14
Şekil 1.13.	Sigortalı elemanda aksenal yük- yerdeğiştirme eliptikli.....14
Şekil 1.14.	Normal çapraz ve burkulması sınırlandırılmış çaprazın davranışı.....16
Şekil 1.15.	Şematik olarak burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların bazı tipleri.....17
Şekil 1.16.	Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlara ait bazı uygulamalar17
Şekil 1.17.	İki ucu mafsallı kolonun burkulması.....18
Şekil 1.18.	Tekrarlı yük etkisindeki ideal bir malzemenin davranışı.....19

Şekil 1.19.	İdeal burkulma kontrolunun mekanizması.....	20
Şekil 1.20.	Çelik bir malzemenin tekrarlı yük altında davranışı.....	21
Şekil 1.21.	Burkulması sınırlandırılmış çaprazın ana elemanları.....	23
Şekil 1.22.	Burkulması sınırlandırılmış çapraz, tüp ve çekirdek.....	24
Şekil 1.23.	Çaprazlarının burkulması sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış çerçevenin davranışı.....	25
Şekil 1.24.	Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların bazı enkesit tipleri.....	27
Şekil 1.25.	BRB rijitliğinin histeretik diyagramına etkisi.....	28
Şekil 1.26.	Betonla sınırlandırılmış çaprazın analizi.....	29
Şekil 1.27.	Burkulması sınırlandırılmış çaprazda yük ve şekildeğiştirme	32
Şekil 1.28.	Burkulmanı sınırlandırmak kriteri	33
Şekil 1.29.	İki hatlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi.....	36
Şekil 1.30.	Lifli betonlarda gerilme – şekildeğiştirme diyagramı.....	40
Şekil 1.31.	Yarma deneyine tabi bir lifli silindir betondan görünüm.....	41
Şekil 1.32.	Yüksek dayanımlı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerde yük- sehim eğrileri	42
Şekil 1.33.	Japonya’ da, Osaka şehrindeki uluslararası Ticaret Merkezi projesi	52
Şekil 1.34.	Prefabrike BRB lerden bir numune.....	56
Şekil 2.1.	Agrega granülometrisi.....	58
Şekil 2.2.	Üniversal deney aleti.....	60
Şekil 2.3.	Kullanılan çelik lifler.....	61
Şekil 2.4.	Deneylerde kullanılan F19 polipropilen liflerin görünümü.....	62

Şekil 2.5.	Deneyslerde kullanılan lirefa kumaşı.....	62
Şekil 2.6.	Polyetilen levhalardan bir görünüm.....	63
Şekil 2.7.	Polyamid levhalardan bir görünüm.....	64
Şekil 2.8.	Betonların karılmasında kullanılan betoniye.....	66
Şekil 2.9.	Silindir ve prizmatik numunelerin üretimi	67
Şekil 2.10.	Beton numunesinin başlıklama işleml.....	68
Şekil 2.11.	2500 KN kapasiteli otomatik yükleme makinesi.....	68
Şekil 2.12.	Birim şekildeğiştirme ölçerleri (strain gauge) yapıştırılmış numune.....	69
Şekil 2.13.	Merkezi basınç deneyine hazırlanan beton numuneler.....	69
Şekil 2.14.	Merkezi basınç deneyinde kırılan lifli ve lifsiz beton numuneler.....	70
Şekil 2.15.	Beton numunelerin yarmada çekme deneyinden bir görünüm	71
Şekil 2.16.	Yarmada çekme deneyinde lifsiz, çelik lifli ve polypropilen lifli beton numunelerin kırılma şekli.....	71
Şekil 2.17.	Eğilmede çekme deneyinden bir görünüm.....	72
Şekil 2.18.	Eğilmede çekme deneyinde lifsiz ve polypropilen lifli beton numunelerinin kırılma şekli	73
Şekil 2.19.	Eğilmede çekme deneyinde çelik lifli ve lirefa kumaşlı beton numunelerinin kırılma şekli	73
Şekil 2.20.	Polyamid ve polyetilen levhaların hazırlanması.....	77
Şekil 2.21.	Deneye hazır olan 2L60×60×6 ve U65 profillerinden oluşan çapraz numuneleri.....	78
Şekil 2.22.	Deneyslerde kullanılan çapraz kesitlerinin şeması.....	79
Şekil 2.23.	Çaprazların uç plakalara kaynaklanması.....	80
Şekil 2.24.	Rijitleştirici levhaların detayları.....	80

Şekil 2.25.	Deneelerde kullanılan uç plakalar ve rijitleştiriciler.....	81
Şekil 2.26.	Deneelerde kullanılan kalıplardan bir görünüm.....	81
Şekil 2. 27.	2L60×60×6 çaprazı için kullanılan betonarme prefabrike elemanların enkesit detayı	82
Şekil 2. 28.	U65 çaprazı için kullanılan betonarme prefabrike elemanların enkesit detayı.....	82
Şekil 2.29.	Lirefa malzemesi ile prefabrike elemanların sarılması.....	83
Şekil 2.30.	Deneye hazırlanmış lirefa ile sarılmış çelik lifli prefabrike BRB numunesi..	83
Şekil 2.31.	Deneelerde kullanılan alt ve üst mesnet.....	84
Şekil 2.32.	Deneelerde sehim ölçüm yerleri.....	85
Şekil 2.33.	Yük hücresi.....	86
Şekil 2.34.	Sehim ölçümünde kullanılan LPDT.....	86
Şekil 2.35.	Veri toplama sistemi.....	86
Şekil 3.1.	Geneleksel betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.....	88
Şekil 3.2.	Çelik lifli betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.....	89
Şekil 3.3.	Polypropilen lifli betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.....	89
Şekil 3.4.	U65 çaprazına ait burkulmaları sınırlandırılmamış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm	91
Şekil 3.5.	2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları sınırlandırılmamış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm	91
Şekil 3.6.	100×10 levha çaprazına ait burkulmaları sınırlandırılmamış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm	92
Şekil 3.7.	Burkulmaları sınırlandırılmamış U65 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	93
Şekil 3.8.	Burkulmaları sınırlandırılmamış 2L60×60×6 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı	94

Şekil 3.9.	Burkulmaları sınırlandırılmamış 100×10 levha çaprazın yük – yerdeğiştirme diyagramı	94
Şekil 3.10.	2L60×60×6 çaprazına ait olan prefabrike elemanların boyutları.....	96
Şekil 3.11.	U65 çaprazına ait olan prefabrike elemanların boyutları.....	96
Şekil 3.12.	2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları donatılı betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm	98
Şekil 3.13.	U65 çaprazına ait burkulmaları donatılı betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm	98
Şekil 3.14.	Çelik çekirdekte yüksek burkulma modları.....	99
Şekil 3.15.	Bağlantı korniyerlerin burkulmanı sınırlandıran elemanlarda etkisi.....	100
Şekil 3.16.	2L60×60×6 çaprazına ait olan donatılı prefabrike elemanların, şekildeğiştirmelerinin geri donmesi.....	100
Şekil 3.17.	Burkulmaları betonarme prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı	102
Şekil 3.18.	Burkulmaları betonarme prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış U65 çaprazın yük– yerdeğiştirme diyagramı	103
Şekil 3.19.	2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları çelik lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm	104
Şekil 3.20.	U65 çaprazına ait burkulmaları çelik lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm.....	104
Şekil 3.21.	Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	105
Şekil 3.22.	Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış U65 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı	107
Şekil 3.23.	2L60×60×6 çaprazında, çelik lifli prefabrike elemanlarda çatlak oluşumu.....	107
Şekil 3.24.	2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları lirefa sargılı çelik lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm.....	109
Şekil 3.25.	U65 çaprazına ait burkulmaları lirefa sargılı çelik lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm.....	109

Şekil 3.26.	Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla ve lirefa sarılmasıyla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	110
Şekil 3.27.	Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla ve lirefa sarılmasıyla sınırlandırılmış U65 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	111
Şekil 3.28.	2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları polypropilen lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm.....	112
Şekil 3.29.	U65 çaprazına ait burkulmaları polypropilen lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm	113
Şekil 3.30.	Burkulmaları polypropilen lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	114
Şekil 3.31.	Burkulmaları polypropilen lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış U65 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	115
Şekil 3.32.	2L60×60×6 çelik çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramları.....	117
Şekil 3.33.	U65 çelik çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramları.....	117
Şekil 3.34.	100×10 levha çaprazına ait Polyamid levhaların zayıf ekseninde yapımı.....	120
Şekil 3.35.	100×10 levha çaprazına ait burkulmaları polyamid levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm.....	121
Şekil 3.36.	Burkulmaları polyamid levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	122
Şekil 3.37.	100×10 levha çaprazına ait Polyamid levhaların güçlü ekseninde yapımı.....	123
Şekil 3.38.	100×10 levha çaprazına ait burkulmaları polyamid levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm.....	123
Şekil 3.39.	Burkulmaları polyamid levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	124
Şekil 3.40.	100×10 levha çaprazına ait HDPE levhaların zayıf ekseninde yapımı.....	125
Şekil 3.41.	100×10 levha çaprazına ait burkulmaları HDPE levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm.....	126
Şekil 3.42.	Burkulmaları HDPE levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	127
Şekil 3.43.	100×10 levha çaprazına ait HDPE levhaların güçlü ekseninde yapımı.....	127

Şekil 3.44.	100×10 levha çaprazına ait burkulmaları HDPE levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm.....	128
Şekil 3.45.	Burkulmaları HDPE levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı.....	129
Şekil 3.46.	100×10 çelik çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramları.....	132
Şekil 3.47.	HDPE ve PA malzemelerinden önerilen enkesitler.....	132
Şekil 3.48.	Burkulması betonarme elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	133
Şekil 3.49.	Burkulması çelik lifli beton elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	134
Şekil 3.50.	Burkulması çelik lifli beton ve lirefa kumaşlı elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	134
Şekil 3.51.	Burkulması polypropilen lifli beton elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	135
Şekil 3.52.	Burkulması betonarme elemanlarla sınırlandırılmış U65 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	136
Şekil 3.53.	Burkulması çelik lifli beton elemanlarla sınırlandırılmış U65 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	137
Şekil 3.54.	Burkulması çelik lifli beton ve lirefa kumaşlı elemanlarla sınırlandırılmış U65 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	137
Şekil 3.55.	Burkulması polypropilen lifli beton elemanlarla sınırlandırılmış U65 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	138
Şekil 3.56.	Burkulması polyamid levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış 100×10 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	139
Şekil 3.57.	Burkulması polyamid levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış 100×10 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	140
Şekil 3.58.	Burkulması HDPE levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış 100×10 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	140
Şekil 3.59.	Burkulması HDPE levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış 100×10 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı.....	141

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Farklı çelik lif tipleri ve üretim şekilleri.....	38
Tablo 1.2. Polipropilen liflerin özellikleri.....	45
Tablo 1.3. DDS(lirefa) kumaşının teknik özellikleri.....	48
Tablo 1.4. Yüksek yoğunluklu polyetilenin (HDPE) özellikleri	49
Tablo 2.1. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri	59
Tablo 2.2. Kullanılan donatıların mekanik özellikleri	60
Tablo 2.3. Beton üretimlerinde kullanılan çelik lifin özellikleri	61
Tablo 2.4. Kullanılan polyetilen levhaların özellikleri	63
Tablo 2.5. Kullanılan polyamid levhaların özellikleri	64
Tablo 2.6. Çelik çaprazların özellikleri	65
Tablo 2.7. Beton karışım oranları	66
Tablo 2.8. Beton numunelerinin basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımları	74
Tablo 2.9. Deney numunelerinin özellikleri	76
Tablo 2.10. Kullanılan çaprazların özellikleri	79
Tablo 3.1. Silindir numunelerin ortalama basınç dayanımları	87
Tablo 3.2. Betonlara ait malzeme özellikleri	90
Tablo 3.3. 2L60×60×6 ve U65 çaprazlarına ait deneylerin sonuçları	116

Tablo 3.4.	100×10 levhasından oluşan çaprazlara ait deneylerin özellikleri ve sonuçlar özeti	130
Tablo 3.5.	2L60×60×6 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramlarının sonuçları	135
Tablo 3.6.	U65 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramlarının sonuçları.....	138
Tablo 3.7.	100×10 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramlarının Sonuçları.....	141

SEMBOLLER DİZİNİ

BRB	; Buckling Restrained Brace, Burkulması sınırlandırılmış çapraz
BRBF	; Buckling Restrained Braced Frame, çaprazının burkulması sınırlandırılmış çerçeve
CBF	; Centrally Braced Frame, Merkezi çaprazlı çerçeve
DKB	; Disposal Knee Bracing, Tek kullanımlı dizli çapraz
DDS	; Destriction Defence System, Depreme Dayanıklı Duvar Kaplama Sistemi
FCBF	; Friction Concentrically Braced Frame, Sürtülmeli merkezi çaprazlı çerçeve
HDPE	; High Density PolyEthylene, Yüksek yoğunluklu polyetilen
HSS	; Hollow Structural Section, Kutu kesitler
KBF	; Knee Brace Frame, Dizli çaprazlı çerçeve
MBF	; Mega Braced Frames, (Mega çaprazlı çerçeveler)
MRF	; Moment Resisting Frames, (Moment aktaran çerçeveler)
PA	; PolyAmide, Polyamid
A	; Enkesit alan
E	; Elastisite modülü
E_D	; Deprem enerjisi
E_e	; Elastik deformasyon enerjisi
E_H	; Harcanan plastik enerji

E_K	; Kinetik enerji
f_c	; Betonun Basınç Dayanımı
f_{ck}	; Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_e	; Betonun eğilme dayanımı
f_y	; Akma dayanımı
$f_{yç}$; Numunelerin yarmada çekme dayanımı
I_{min}	; Minimum atalet momenti
L	; Çubuğun burkulma boyu, uzunluk
N	; Merkezi yük
P	; Tekil yük
P_{cr}	; Euler burkulma yükü
R	; Reaksiyon
σ_{cr}	; Euler burkulma gerilmesi
σ_p	; Plastik gerilme
δ	; Yerdeğiştirme
ϵ	; Birim şekildeğiştirme
Δ	; Maksimum yerdeğiştirme
μ	; Süneklik oranı
v	; Çaprazın sehimi
λ	; Narinlik oranı
v_0	; Çelik çapraz elemanın ilksel sehimi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Deprem ve rüzgar gibi yatay yük etkilerinden meydana gelen yanal yerdeğiştirme, mühendislerin en önemli problemlerinden biri olagelmıştır. Yapılarda yanal yerdeğiştirmenin sınırlandırılması amacıyla birçok teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerden bazıları, perde duvarlar, çaprazlar, rijit çerçeveler veya moment aktaran çerçeveler, vb. sayılabilir. Bu tekniklerin enerji yutma kapasiteleri aynı olmamakla beraber, tasarım yöntemleri de her ülkenin standartlarına göre farklılık göstermektedir.

Çelik yapıların davranışı büyük depremler karşısında, genellikle, diğer malzemelerle inşa edilen yapılara göre daha iyi olmaktadır. Çelik yapıların üstünlükleri, çeliğin durabilitesi, sünekliği, dayanımı ve rijitliği sayılmaktadır. Bununla birlikte, hasar görmüş veya bazı elemanlarının yetersiz olması durumunda bu elemanların değiştirilmesine imkan tanınması da çelik yapıların bir üstünlüğüdür.

Çaprazların kullanım ve montaj basitliği ile iyi performans göstermeleri, çelik yapıların, yanal yüklere karşı rijitliğini artırmaktadır. Bu elemanlar, yapının rijitliğini ve enerji kaybını artırmakta ve görelî kat ötelenmelerini de kontrol etmektedirler. Böylece yapının, yatay yükler etkisi altında, aşırı derecede hasar görmesini önleyerek yapının davranışlarını iyileştirmektedirler.

Eğer çelik çaprazların burkulması tutulur ve yük çekme ve basınçta aynı olursa, çaprazda enerji yutma kapasitesinin önemli derecede artacağı ve histeresis etkisinin çekme ve basınçta aynı olacağı beklenmektedir. Bu problemlerin üstesinden gelmek için burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlar (Buckling Restrained Brace, BRB) geliştirilmiştir. BRB den amaç çaprazın burkulmasını sınırlandırmak, onun çekmede ve basınçta aynı davranış göstermesini sağlamaktır [1].

Merkezi çaprazlı çerçeveler sınıfına giren BRB'li çerçevelerin, merkezi çaprazlı çerçevelerin diğer tiplerine göre süneklikleri, dolayısıyla da enerji yutma kapasiteleri daha iyi olmakta ve elastik yatay rijitliği de artmaktadır [2].

BRB'ler son yıllarda dünyanın birçok yerinde depreme karşı, ekonomik bir yöntem olarak, çelik yapılarda kullanılmaktadır.

Günümüzde mevcut yapıların birçoğu, deprem yönetmelikleri yenilenmeden önce yapılmış olmaları nedeni ile yeni yönetmeliklerde verilen koşulları sağlayamaz duruma düşmüşlerdir. Bu yapıların bir kısmı oluşabilecek depremden kolayca hasar görebilecek durumdadır. Bu nedenle bu tür binaların yıkılıp yeniden yapılması yerine takviyesi daha ekonomik olmaktadır. Başka bir deyişle, mevcut çelik yapıların takviyesinde BRB'lerin kullanılması önemli derecede rol oynamaktadırlar. Japonya'da bu yöntemle (BRB) Minato köprüsü takviye edilmiştir [3]. Burkulması sınırlandırılmış çaprazların kullanım felsefeleri aşağıda verilmektedir.

Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların en önemli kullanım felsefesi, basınç dayanımını artırmakla beraber onların basınç kapasitelerini burkulma olmaksızın çekme kapasitesine eşit düzeye getirilmesidir. Başka bir deyişle, çapraz eleman çekme etkisinde, ne kadar yük taşıyabilirse, basınçta da aynı yükü taşıyabilsin. Narinlik problemine göre, çaprazların enkesit alanları büyük ve güçlü seçilmektedir. Ancak, BRB tekniğiyle çaprazların enkesit alanlarının daha küçük olması sağlanmakta, dolayısıyla da çözüm daha ekonomik olmaktadır.

BRB'lerin ikinci kullanım amacı, hesaplama ve tasarım hataları olmaktadır. Zira bazen hem tasarımcı ve hem de kontrol eden mühendis projelendirmede hata yapabilmekte ve yapıdaki çaprazlar doğru olmayan tasarımla inşa edilmektedir. Bu durumda da çaprazların takviyesi kaçınılmaz olmaktadır.

Bilindiği gibi tasarım standartları ve şartnameleri, teorik ve deneysel çalışmalardan alınan sonuçlardan ve önceki tecrübelerle göre oluşturulmaktadır. Bu teorik ve deneysel çalışmalar devam ederken bazı şartların ve standartların değişmesi de gerekli olmaktadır. Bir kaç yılda bir standartlar yeniden revize edilmektedir. Eski standartlara göre yapılan yapılar, yeni standartlara göre gerekli olan güvenliğe, dayanıma ve sünekliğe sahip olmadığından, bu yapıların takviye edilmesi gerekmektedir.

BRB'lerin ortaya çıkması ve geliştirilmesine en önemli neden, BRB'lerin stabil tersinir tekrarlanan yükleme (histerizis) altındaki davranışları, yeterli süneklik ve büyük enerji yutma kapasiteleridir. Zira merkezi çaprazlı çerçeveler BRB'lere göre daha az sünekliğe ve enerji yutma kapasitesine sahiptirler.

BRB'li sistemlerin başka sistemlere göre üstünlüklerinden biri de, hasar, zarar ve hasar ihtimalini kontrol etmesidir. Eğer BRB'li çerçeveler dikkatli ve özenle tasarlanırsa, elastik davranış önce çaprazlarda meydana gelmektedir ve diğer elemanlar yani kolonlar, kirişler ve birleşim bölgeleri elastik davranış göstermekte, yapı en az hasarı görmektedir. Bu davranış diğer sistemlerin tam tersidir. Örneğin, moment aktaran çerçevelerde (Moment Resisting Frames, MRFs) ya da dış merkez çaprazlı çerçevelerde enerjinin yutulması, kirişlerin elastik olmayan davranışlarıyla ve plastik mafsalların kirişlerde meydana gelmesiyle oluşmaktadır. Ancak, BRB'li çerçevelerde, kirişlerde mafsal teşkiline gerek olmadığı gibi, kirişler de kolonlar gibi elastik kalmaktadır.

Moment aktaran çerçevelerde ya da dış merkez çaprazlı çerçevelerde plastik mafsalların teşkili nedeniyle hasarlar tüm çerçeveye yayılmaktadır. Dolayısıyla da bu tür hasarların onarımı ve güçlendirilmesi zordur. Ancak, BRB'li çerçevelerde hasarlar çaprazlarda toplandığından, bu elemanların onarım ve güçlendirilmesi ise oldukça kolaydır.

Bugün BRB'lerin ortaya çıkması ve yaygınlaşması yaklaşık 30 yıllık bir geçmişe sahiptir. Ancak bu teknik dünyanın birçok ülkesinde depreme karşı yeni bir sistem olarak yapılarda kullanılmaktadır. Buna ilave olarak, mevcut çelik yapıların onarım ve güçlendirilmesinde de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2. Çelik Yapılarda Kullanılan Taşıyıcı Sistemler

Çelik yapılarda kullanılan taşıyıcı sistemler, genellikle iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar moment aktaran ya da rijit çerçeveli, perdeli veya çaprazlı çerçeveli sistemlerdir. Moment aktaran sistemlerde kolon ve kiriş bağlantı noktaları rijit kabul edilir (moment aktarabilen düğüm noktaları) ve buna göre boyutlandırılır. Çerçeve sistemler daha fazla yatay rijitlik sağlamak için, çelik çaprazlı perde sistemler ile karma olarak kullanılabilirlerdir.

Kolon ve kiriş rijitlikleri doğru oranlarda tasarlandığında yani “kiriş mekanizması” tercih edildiğinde ve bağlantıların kapasitesi eleman kapasitesinden fazla olması durumunda, yatay yük taşıyıcı sistemler içerisinde sünekliliği en yüksek sistemdir.

Çerçeve sistemlerde sünekliliğin fazla olabilmesine karşın, yeterli rijitlik sağlanamaz ise yanal ötelenmeler, kolonlarda ikinci derece momentleri oluştururlar. Dolayısıyla sistemin yanal ötelenmesi sınırlandırılmaktadır.

Çelik yapılarda çoğunlukla rijit kolon-kiriş birleşimleri yerine mafsallı bağlantılar kullanılmaktadır. Bu durumda sistemin yatay kuvvetleri karşılaması için çapraz bağlantı elemanları kullanılır. Bu tür bağlantılar, çaprazı oluşturan kiriş-kolon diyagonal elemanların akslarının çakışması (merkezi) ya da çakışmaması (dış merkezli) durumuna göre değişebilir. Şekil 1.1.'de yaygın olarak kullanılan çelik yapı çerçeveleri görülmektedir.



Moment aktaran çerçeve



Çaprazlı çerçeve

Şekil 1.1. Çelik yapılarda kullanılan taşıyıcı sistemler

1.2.1. Merkezi Çaprazlı Çerçeve Sistemler

Burkulması sınırlandırılmış çelik çaprazlı çerçeveler (Buckling Restrained Braced Frames, BRBF) merkezi çaprazlı çerçevelerin özel hali olduğundan, bu bölümde, merkezi çaprazlı çerçevelerin tanımı ve bu konuda bazı bilgiler verilmektedir. Şekil 1.2.'de burkulması sınırlandırılmış çelik çaprazlı çerçeve sistemden bir görünüm verilmektedir.



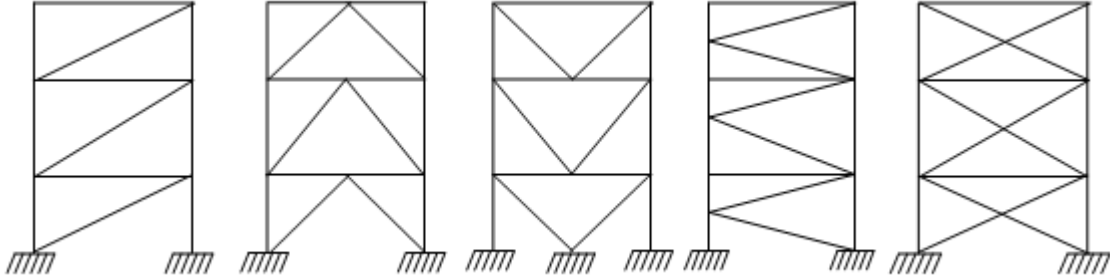
Şekil 1.2. Burkulması sınırlandırılmış çelik çaprazlı çerçeve sistemli bir bina

Çelik çerçevesel yapılar, yüksek dayanımlı ve rölatif olarak hafiftir. Bu özellik, depreme dayanıklı yapıların çelik ile daha güvenilir ve ekonomik olarak yapımını sağlayabilmektedir. Yapısal çelik elastik olmayan sınıra kadar tekrarlanan yüklere karşı değişmeyen bir davranış gösterir. Dolayısıyla da düşey ve yatay yüklere karşı büyük deformasyonlar yaparak yapının ağır hasar görmesine engel olur. Ancak, çelik çerçevelerde kullanılan çaprazlar, çekme etkisine göre boyutlandırıldığından, bu elemanlar, basınç etkisinde burkulma nedeniyle emniyetsiz duruma gelebilmektedir.

Çelik yapıların çoğu çerçeve sistem olarak inşa edilmektedir. Bu yapılarda, genellikle rijitlik veya stabilitesini sağlayacak çaprazlar kullanılmaktadır. Bu çerçeveler; merkezi çaprazlı çerçeveler ve dışmerkez çaprazlı çerçeveler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Çerçevenin burkulma yükünün artışı, çaprazlı kolonun rijitliği ve katın yüksekliğinin çarpımına lineer olarak bağlıdır.

Merkezi çaprazlı çerçeveler (Centrically Braced Frames, CBF) de, kiriş, kolon ve çapraz elemanlarının aksları bir noktada çakışmakta ve aks hatları kiriş kolon birleşim yerlerinde kafes sistemi düşmektedir. Bu tip sistemlerin, çaprazsız sistemlere göre oldukça büyük elastik yatay rijitliği vardır. Diyagonal elemanlar ve bunların birleşimleri, bu grubun ana unsurlarını

oluştururlar. Merkezi çaprazlı çerçeveler, genelde deprem gibi yatay yükler için kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu sistemler Şekil 1.3 'te verilmektedir.



Şekil 1.3. Yaygın olarak kullanılan merkezi çaprazlı çerçeveler

Merkezi çaprazlı çelik yapı sistemleri, yanal yükleri doğrusal elastik bölgede kalarak taşıyabilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu tip çapraz elemanlı sistemlerde çapraz elemanlarının narinliği oldukça yüksektir. Bu özellikteki çapraz elemanlar genellikle korniyer, yuvarlak çubuk veya lama gibi elemanlardır. Her ne kadar bu tür sistemler deprem yüklerine karşı koymak üzere kullanılmış olsa da, bu elemanların elastik ötesi çevrimsel cevapları yeterli değildir. Öte yandan narinlik azaldıkça elastik ötesi çevrimsel davranışlar iyileşmeye, yani enerji yutma kapasitesi artmaya başlar. Bu tip sistemlerin, çaprazsız sistemlere göre oldukça büyük elastik yatay rijitliği vardır.

Merkezi çapraz elemanları olan çerçevelerin tasarım amacı, çekme altındaki çaprazlarda enerji tüketim bölgeleri oluşturmak, kirişlerde ve kolonlarda göçme veya burkulmadan kaçınmayı sağlamaktır. Basınç altındaki çaprazlar ise burkulma yüklerine göre tasarlanmaktadır.

Merkezi çaprazlı çerçeveler çeşitli şekillerde yapılmaktadır. X, V ve Λ çaprazları olan çerçeveli sistemler çok kullanılan sistemlerden sayılmaktadır. K şeklindeki çaprazlı çerçevelerde çaprazdan meydana gelen yük, kolonun ortasına etkimekte dolayısıyla da büyük bir moment oluşturmaktadır. Bu nedenle bu tür sistemlerin kullanılmasına izin verilmemektedir

Genellikle deprem gibi yatay yüklere dayanıklı yapı tasarımında dayanım, yeterli rijitlik ve yeterli süneklik ve stabilite gibi dört koşulun sağlanması gerekmektedir. Taşıyıcı Sistemi

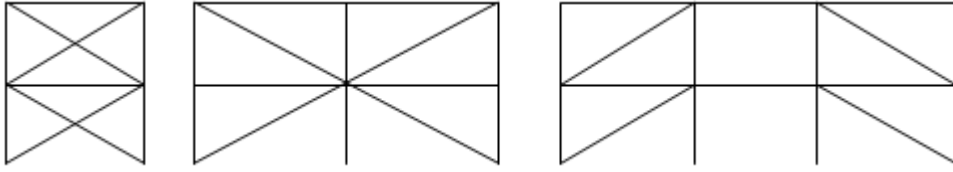
oluşturan elemanların ve bunların malzemeleri ile ilgili olarak da aynı koşulların sağlanabilmesi gerekmektedir.

Moment aktaran çerçeveler, güçlü kolon, zayıf kiriş oluşturulacak şekilde tasarlanmaktadır. Buna göre, kirişler kolonlardan önce akma dayanımına ulaşmakta, kesit mafsallaşarak deprem enerjisini yutmaktadır. Ancak, merkezi çaprazlı çerçeveler, deprem karşısında rijitlik, dayanım ve yanal yerdeğiştirme açısından elastik bölgede çok uygun davranışlar göstermekte, plastik bölgede ise çaprazların yanal rijitliği nedeniyle, enerji yutma kapasiteleri, diğer bir deyişle sünekliği daha az olmaktadır.

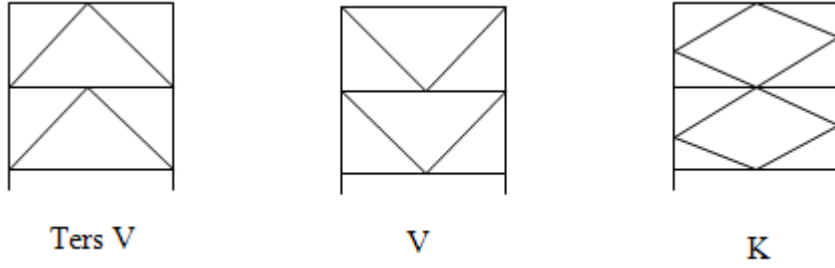
Deprem yönetimlerinde, büyük depremlerde yapının göçmesinin önlenmesi, yönetmeliğin en önemli hedeflerindedir. Bu yönetmeliklere göre merkezi çaprazlı çerçevelerin nispeten elastik kalmaları beklenmektedir.

İki simetri eksenli olan kesitlerin bir simetrik eksenli olan kesitlere göre daha iyi davranış gösterdiği bilinmektedir. Dörtgen ya da kutu gibi kesitler (Hollow Structural Section, HSS) yerel burkulma karşısında, çok hasar görebilmektedir. Bununla birlikte, deneysel çalışmalar kısa çaprazların uzun çaprazlara göre daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Merkezi çaprazlı çerçeveler iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlardan birincisinde diyagonal çaprazların birleşim noktası kolon–kiriş birleşim noktası ile aynıdır (Şekil 1.4). İkincisinde ise kolon-kiriş-çapraz birleşim noktası aynı değildir. Bunlar Şekil 1.5.'te görüldüğü gibi V, Δ ve K çaprazları adını almaktadır. Bu sistemler mimari bakımdan genellikle tercih edilmektedir. Zira pencere boşlukları gibi boşluklar bırakılabilmektedir. Ancak bunların davranışlarında bazı riskler bulunmaktadır. V ve Δ çaprazlarında, elemanın yükü kirişin ortasına etki etmektedir. Dolayısıyla da çapraz akmaya ulaşmadan kirişte plastik mafsal meydana gelmektedir. Ancak K çaprazlarında çapraz yükü kolonun ortasına etki etmektedir. Mevcut yapıların onarımında V şeklindeki çaprazların kullanılması, hasarın kirişte oluşması nedeniyle, önerilmemektedir. Çaprazın birleşim yerinin gevrek kırılmayı önleyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

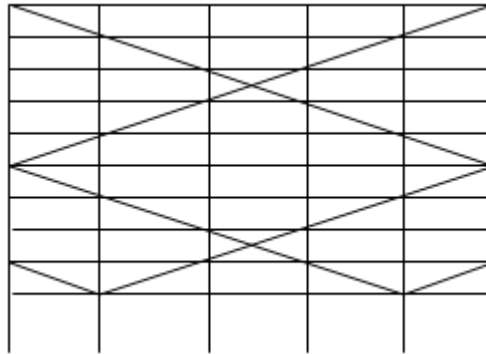


Şekil 1.4. Diyagonal çapraz tipleri



Şekil 1.5. Diyagonal olmayan çapraz tipleri

Merkezi çaprazlı çerçevelere benzeyen sistemlerden biri de yüksek yapıların onarımında kullanılan, daha fazla rijitlik ve süneklilik sağlayan, 'mega' çaprazlardır (Mega Braced Frames, MBF). Bu sistemler çelik yapıların dayanımını ve rijitliğini artırmaktadır. Bu çaprazlar Şekil 1.6.'da görülmektedir.

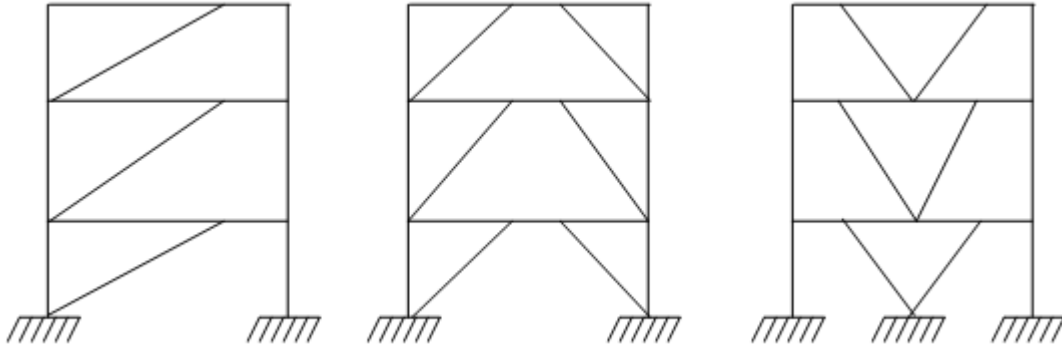


Şekil 1.6. Mega çaprazlı çerçeve

Mega çaprazlı çerçevelerin, başka sistemlere, özellikle burkulması sınırlandırılmış sistemlere göre, rijitlik ve dayanımları daha etkilidir[4].

1.2.2. Dışmerkez Çaprazlı Çerçeve Sistemler

Dışmerkez çaprazlı çerçeve sistemler, çeşitli geometrik şekillerde oluşturulabilmektedir. Ancak bunların süneklik düzeyi yüksek çelik çaprazlı çerçeveler olarak değerlendirilebilmeleri için, çaprazlı elemanları kiriş-kolon birleşim noktasından belirli uzaklıkta, dışmerkez bir noktaya bağlanmaları gerekmektedir. Çok kullanılan bu sistemler Şekil 1.7. de verilmektedir.



Şekil 1.7. Dışmerkez çaprazlı çerçeve sistemler

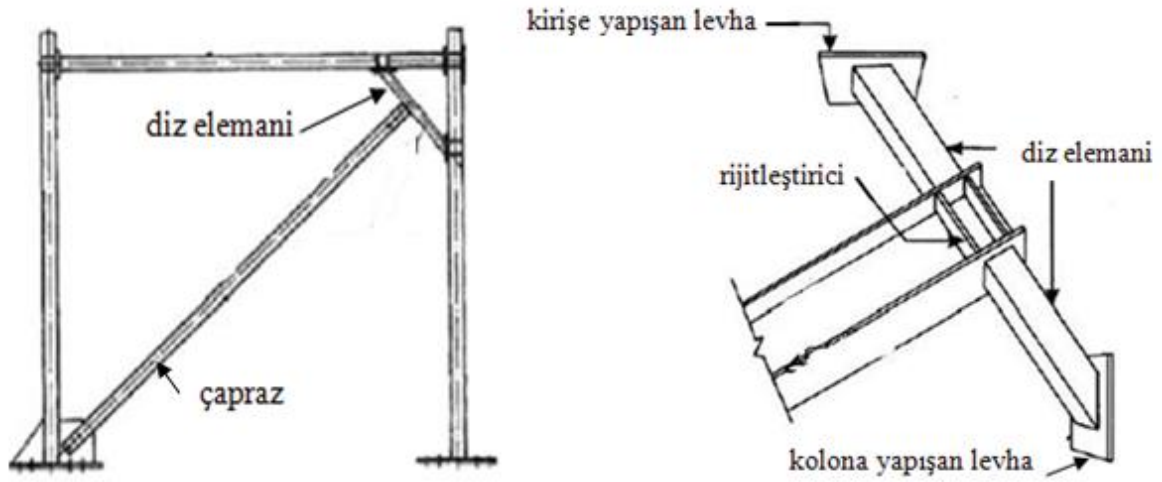
1.2.3. Yeni Merkezi Çaprazlı Çerçeve Sistemler

Yanal yükler etkisinden meydana gelen elastik olmayan davranışların önlenmesi için, çok geniş çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yeni tip merkezi çaprazlı çerçeve sistemleri aşağıda verilmektedir.

1.2.3.1. Korkuluk Payandası (Dizli Çaprazlı Çerçeveler)

Yanal çaprazlı çerçeve sistemi, bir katlı ve çok katlı çelik yapılarda uygulanmaktadır[5]. Tek kullanımlı dizli çapraz (Disposal Knee Bracing, DKB) olarak adlandırılmaktadır. Bu sistem, merkezi çaprazlı çerçeve sistemlerinin eksikliklerini ortadan kaldırmıştır. Ancak, günümüzde bunlar dizli çaprazlı çerçeveler (Knee Brace Frame, KBF) şeklinde

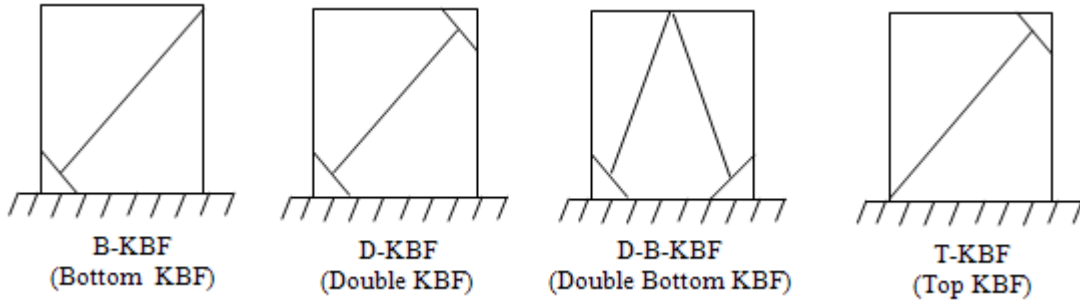
adlandırılmaktadır. Dizli çaprazlı çerçevelerde diyagonal çaprazın bir ucu kolon-kiriş birleşim noktasına, diğer ucu ise diz elemanına bağlanmaktadır. Dizli bağlantının performansı bir 'sigorta' ya benzemektedir. Öyle ki, çapraz eleman eğilme etkisinde akma durumuna gelmekte ve yüksek yanal yükler karşısında enerjiyi absorbe etmektedir. Bu durumda çaprazın diyagonal elemanları yeterli yanal rijitliği sağlamakta ve elastik halde kalmaktadırlar. Diz elemanı, enerji tüketme kapasitesine ulaştıktan sonra değiştirilebilen bir mafsalsı gibi davranmaktadır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Dizli çaprazlı çerçeve ve detayı

Genellikle, dizli çaprazlı çerçevelerde, rijitlik diyagonal elemanla, süneklik ise diz elemanın akması ile kazandırılmaktadır. Bu sistemin uygun lineer olmayan davranışı diz elemanın davranışına bağlıdır. Dolayısıyla da deprem esnasında bu eleman bir sigorta gibi davranmakta ve enerji dizin eğilmesi ile yutulmaktadır.

Şekil 1.9 da dizli çaprazlı çerçeve sistemlerinin tiplerini görülmektedir. Dizin yerine göre sistemlerin adları farklı olmaktadır. Zira diz çaprazın altında (Bottom KBF=BKBF), çaprazın üstünde (Top KBF=TKBF) veya hem üstünde ve hem altında (Double KBF=DKBF) ve Δ çaprazlarda her iki diz altta (Double Bottom KBF=D-BKF) olarak kullanılabilir.



Şekil 1.9. Dizli çaprazların tipleri

Dizli çaprazlı çerçevelerin yanal rijitliği, dış merkez çaprazlı çerçevelerin yanal rijitliğinden, aynı koşullarda yüksek, merkezi çaprazlı çerçevelerin yanal rijitliğinden ise aynı koşullarda daha küçük olmaktadır. Bundan dolayı dizli çaprazlı çerçeveler yanal rijitlik bakımından dış merkez çaprazlı çerçevelere göre uygun davranış göstermektedirler. Aynı zamanda, TKBF çaprazların yanal yerdeğiştirmeleri, dış merkez çaprazlı çerçevelere göre küçük ve merkezi çaprazlı çerçevelere göre büyüktür. Bundan dolayı, TKBF çerçeveleri deprem etkisinde yanal yerdeğiştirme bakımından, dış merkez çaprazlı çerçevelerle aynı davranışı göstermektedirler.

1.2.3.2. Sürtünme Merkezi Çaprazlı Çerçeveler

Çaprazlı çerçevelerde sürtünme teçhizatlarının (sürtünme sönümleyicileri) kullanımı, onların depreme karşı dayanımlarını ve hasar kontrol etme kapasitelerini oldukça iyileştirmektedir. Depremden dolayı oluşan titreşim esnasında, bu teçhizatlar kaymaya başlamakta ve yapının ana taşıyıcı elemanlarının akma dayanımına ulaşması yerine, titreşim enerjisinin çoğunu mekanik olarak sürtünmeden dolayı yutmaktadırlar. Doğrusal olmayan dinamik analizler, sürtünme sönümleyicisi olan çelik çaprazlı çerçevelerin davranışını diğer çerçevelere göre daha iyi göstermektedir[6].

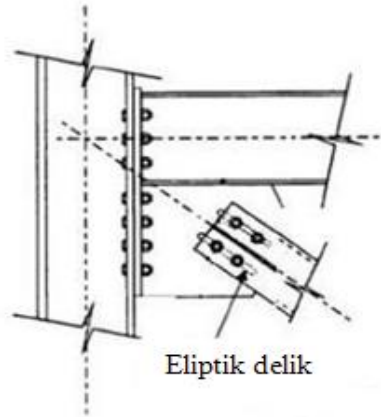
Sürtünme tipi merkezi çaprazlı çerçeve sistemi ilk defa Pall [7] tarafından 1979 yılında önerilmiştir. Sürtünme sistemi genellikle, X çaprazlı çerçevelerin birleşim noktalarında yapılmaktadır. Bu sönümleyicilerin tasarımında, küçük ya da hafif depremlerde veya rüzgarda

kayma olmamakta, ancak büyük depremlerde önceden belirlenmiş bir değerden sonra kayma başlamaktadır. Bu kayma enerjisi mekanik olarak yutmakta ve çaprazın ya da başka yapı elemanlarının hasar görmesine engel olmakta, bu nedenle yapı kendi performansına depremden sonra da devam edebilmektedir.

Sürtünme sönümleyicisinin yapımı basit ve ucuzdur. Sürtünme sönümleyicisi birkaç oluklu delik çelik levhalardan teşkil edilmektedir. Levhalar yüksek dayanımlı civatalarla birbirine çapraz elemanların içinde bağlanmaktadır.

Yapının sismik tepkisi, yapıya etkiyen enerji ve yutulan enerjisi ile belirlenmektedir. İyi sismik tepki, gelen enerji ve yutulan enerjinin farklarının minimum olmasıdır. Gelen enerji yapının doğal periyotuna ve yer hareketinin dinamik karakterlerine bağlıdır.

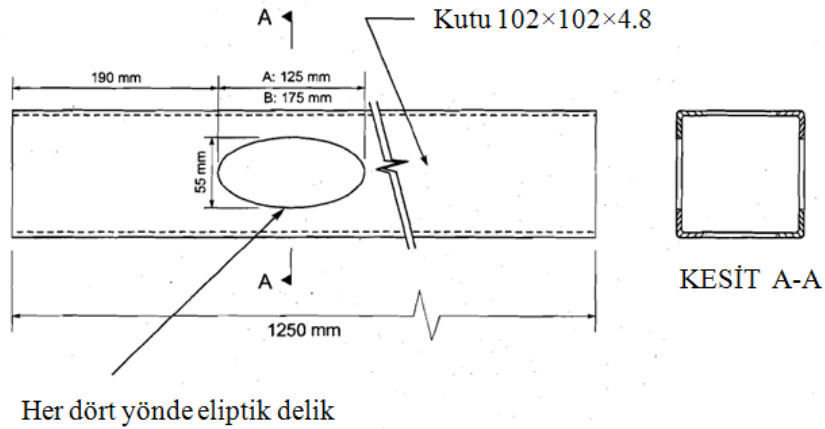
Çeşitli deneysel çalışmalarda sürtünmeli merkezi çaprazlı çerçevelerin verimliliğini incelenmiştir[8]. Bu çerçevelerde çaprazların birleşim yerlerinde sürtünme, elemana açılan yuva içindeki vida bağlantılarıyla (slotted bolted connections) sağlanmıştır. Dolayısıyla bu sistemler sürtünmeli merkezi çaprazlı çerçeveler (Friction Concentrically Braced Frames, FCBF) adıyla anılmıştır. Çaprazın bir tarafında yapılan bu bağlantı belli bir yük uygulandığında kaymaya başlamaktadır. Bu deneysel çalışmalara göre FCBF sistemlerin enerji yutma kapasiteleri çok yüksektir. Bu sistem yeni yapılan ve mevcut binalara uygulanabilmektedir. Şekil 1.10 da bu bağlantılara bir örnek gösterilmektedir[8].



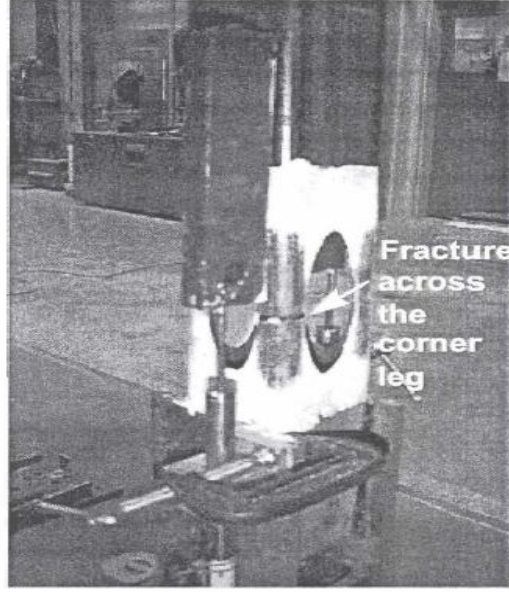
Şekil 1.10. FCBF sistemde bağlantı detayı

1.2.3.3. Sigortalı Çaprazlı Çerçevesler

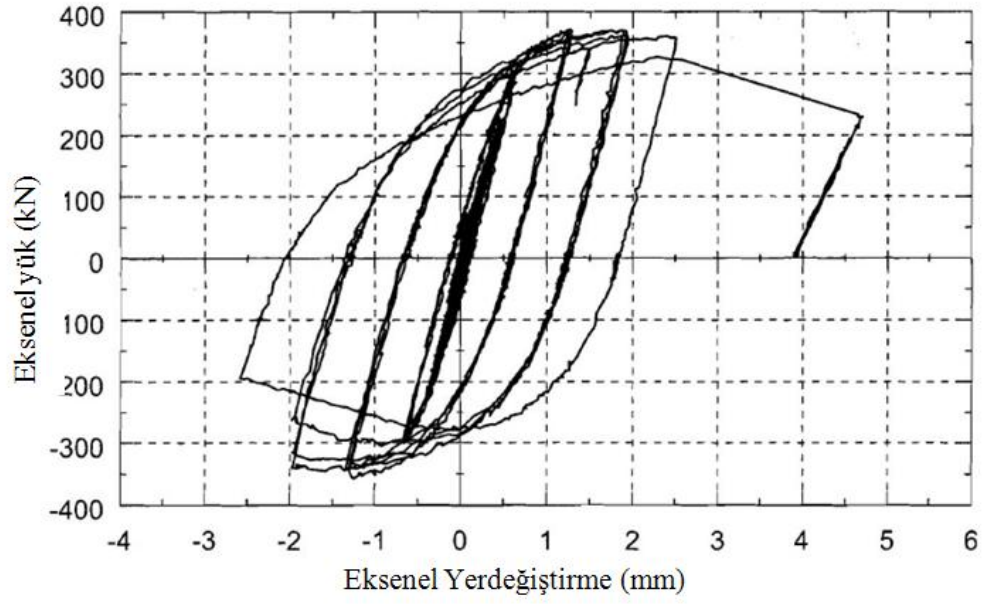
Sigortalı çaprazlı çerçevesler, genellikle kutu kesitlerle tasarlanmaktadır[9]. Bu çaprazlar için, çeşitli kutu kesitler (Hollow Structural Section, HSS) ve sigorta detayı olan çaprazlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalarda, yük-şekildeğiştirme histeretik eğrileri elde edilmiştir. Araştırmacılar merkezi çaprazlı çerçeveslerde birçok deney gerçekleştirmiş ve çaprazların çekme ve basınç kapasitelerini karşılaştırmıştır. Çapraz elemanlar HSS kesitlerle ve çeşitli sigorta detaylarıyla yapılmıştır. Deney elemanları $102 \times 102 \times 4.8$ kutu profilinden hazırlanmıştır. Bu elemanlarda küçük çapı 55 mm olan eliptik şeklinde delik açılarak enkesit zayıflamış ve böylece sigorta oluşturulmuştur. Eliptikin kesme yerleri gerilme yığılması ve büyük şekildeğiştirmelerin, dörtgenin köşelerinde oluşmayacağı şekilde seçilmiştir. Eliptikin büyük çapı 125 mm ve 175 mm olarak seçilmiştir. Bu sigortanın boyutları Şekil 1.11 de, detayı ise Şekil 1.12. de verilmektedir[9]. Numunelerin yük-şekildeğiştirme davranışı Şekil 1.13'te gösterilmektedir.



Şekil 1.11 Çapraz elemanda sigorta düzenlemesi [9].



Şekil 1.12. Sigorta deneyinden bir numune[9].



Şekil 1.13. Sigortalı elemanda aksenal yük- yerdeğiştirme eliptikli [9].

Deneylerin sonuçlarına göre, gerilmenin zayıf bölgenin (eliptikin) tüm boyunda dağılmasına rağmen, ancak plastik şekildeğişiklikler sigortanın kısa boyunda (sigortanın boyunun ortasının etrafında) yığılmakta ve beklenen kırılma sigortanın en dar yerinde meydana gelmektedir. Buna göre, çaprazların büyük yerdeğişikliklerinin oluşması durumunda kırılmamasını sağlamak için, deprem etkisinde yerdeğişiklikleri yüksek olan katlarda, sigorta detaylarının uzunluğunun artırılması gerekmektedir.

1.3. Burkulması Sınırlanmış Çaprazların Davranış ve Tasarımı

1.3.1. Burkulması Sınırlanmış Çaprazlar

Yapılarda meydana gelen yanal yerdeğişiklikler mühendislerin en önemli problemlerinden biri olagelmıştır. Yanal yerdeğişiklikler, genellikle yatay yüklerden meydana gelmekte, yapılara büyük hasarlar vermekte ve stabiliteyi tehlikeye sokmaktadır. Yanal yerdeğişikliklerin azaltılması için birçok yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri, çaprazlı çerçevelerin kullanılmasıdır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan merkezi çaprazlı çerçeve sistemlerde, sınırlı süneklik ve enerji yutma kapasitelerinin az olması nedeni ile birçok araştırmalar adı geçen sistemlerin daha iyi davranış gösterebilmesi için yapılmaktadır. Bu araştırmaların en önemli amacı, stabil histeretik davranış, yüksek süneklik ve en çok enerji yutma kapasitesini oluşturmaktır. Bu sistemlerden biri, çaprazlarının burkulmaları sınırlanmış çerçeve sistemlerdir. Araştırmalarda, bu sistemler BRBF (Buckling Restrained Braced Frames) adında kullanılmaktadır.

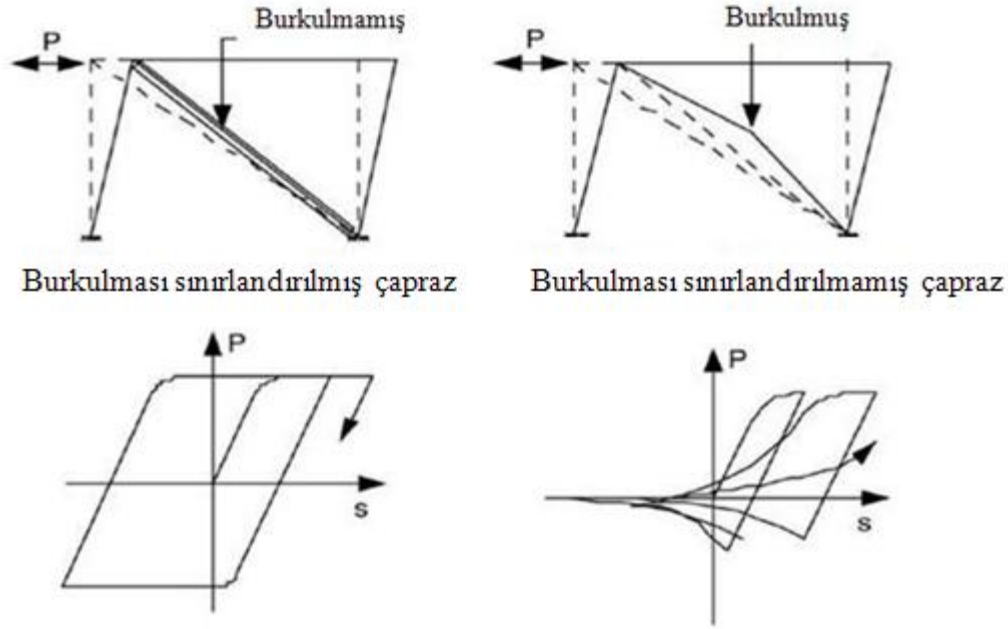
Bu çaprazların önemli üstünlüklerden biri depreme karşı sistemlerde hasar kontrolüdür. Uygun tasarlanmış BRBF sistemlerde elastik olmayan davranış önce çaprazlarda meydana gelmekte ve kiriş, kolon ve birleşim bölgeleri gibi diğer elemanlar elastik sınırlar içinde kalarak en az hasar görmektedirler.

BRBF sistemlerde hasar çaprazlarda toplanmakta ve bu nedenle de tamiri ve yenilenmesi nispeten kolay olmaktadır. Ancak moment aktaran çerçeveler ya da diğer çaprazlı çerçevelerde (BRBF olanlar hariç) hasar, kirişlerde meydana gelmekte ve tamirleri çok zor olmaktadır.

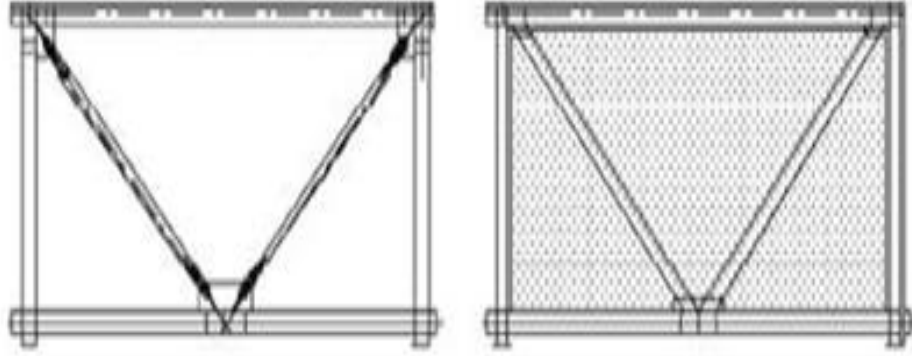
1.3.2. Burkulması Sınırlandırılmış Çaprazların Davranışı

Çaprazlar basınç yükleri altında burkulup simetrik olmayan histeretik davranış göstermektedir ve Şekil 1.14'te görüldüğü gibi dayanım azalması elemanın kendisinde oluşmaktadır. Bir çelik çaprazın burkulmasının tutulması durumunda, çekmede ve basınçta aynı dayanım sözkonusu ise, çaprazın enerji yutma kapasitesi oldukça artmakta ve histeretik özeliği de basit hale gelmektedir.

Şekil 1.14'te görüldüğü gibi, burkulması sınırlandırılmış çaprazın çalışma şekli, basınçta ve çekmede aynı davranış göstermesi ve çapraz elemanın burkulmasının sınırlandırılmasıdır.



Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlar çelik çerçevelerde yerleştirilmesi bakımından Şekil 1.15 ve Şekil 1.16 da görüldüğü gibi iki gruba ayrılmaktadır. Birinci grupta burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlar, betonarme elemanın içine yerleştirilmiştir ve ikinci grupta çelik levha çekirdek, prefabrike veya yerinde dökülmüş betonarme panellerin içine yerleştirilmektedir.



(a) Normal BRB

(b) Panelli BRB

Şekil 1.15 Şematik olarak burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların bazı tipleri[1].



(a) Normal BRB



(b) Panelli BRB

Şekil 1.16. Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlara ait bazı uygulamalar

1.3.2.1. Burkulması Sınırlandırılmış Çaprazların Tekrarlı Yük Etkisindeki Davranışı

Basınç çubuklarında emniyet yüklerinin saptanmasında burkulma olayı esas olduğundan, stabilite problemi için, yönetmeliklerde hesap esasları verilmektedir. Merkezi basınç etkisinde, Şekil 1.17. de görüldüğü gibi, malzemesi Hooke kanununa uyan, iki ucu mafsallı, prizmatik bir çubuk için, Euler formülü, aşağıdaki şekildedir.



Şekil 1.17. İki ucu mafsallı kolonun burkulması

$$P_{cr} = (\pi^2 EI_{\min}) / L^2 \quad (1.1)$$

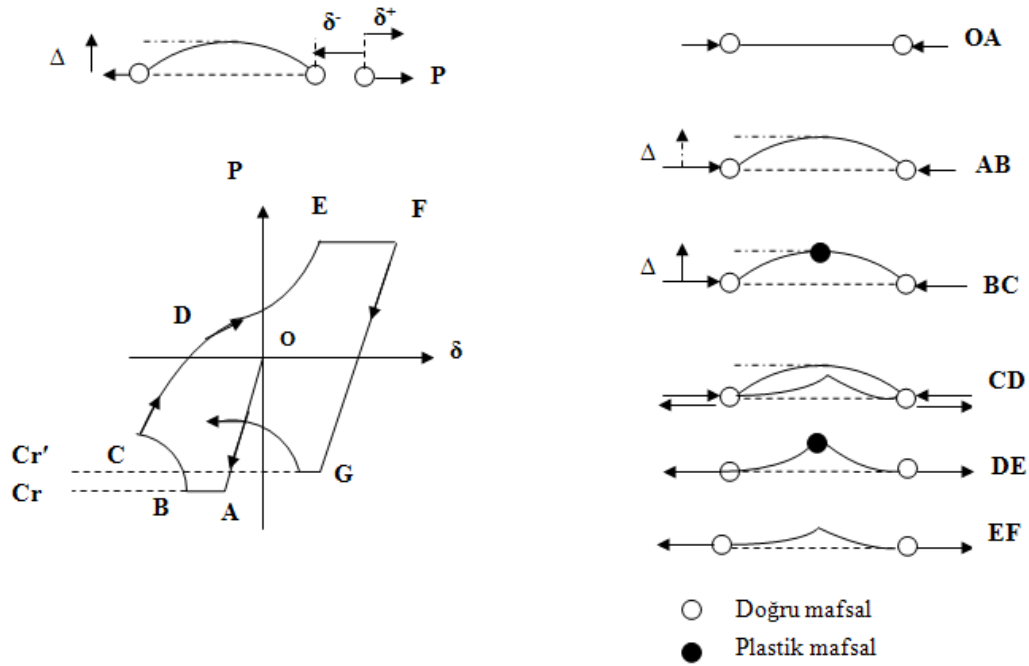
$$\sigma_{cr} = P_{cr} / A = \pi^2 E / \lambda^2 \quad (1.2)$$

Çelik malzeme, $\sigma < \sigma_p$ (orantılı sınır gerilmesi) olması halinde Hooke kanununa uyan bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Euler burkulma gerilmesi formülünden görüldüğü gibi narinlik yüksek olursa, gerilme çok düşük olmaktadır. Başka bir deyişle, Euler burkulma gerilmesi, narinliğin karesinin tersiyle orantılıdır.

Bir deprem durumunda çaprazlı çerçevenin arzu edilen davranışını anlamak için, onun histeretik davranışını anlamak gereklidir. Bir basit tanımla, tekrarlı yükler etkisinde kalan çaprazın, (P- δ) diyagramının altındaki alan, elemanın yutabileceği histeretik enerjinin miktarını göstermektedir.

Tekrarlı yük etkisindeki ideal bir malzemedan üretilmiş elemanın davranışı, Şekil 1.18. de verilmektedir. Bu şekilde P aksenal yük, δ aksenal şekildeğiştirme ve Δ eleman uzunluğunun ortasının yanal şekildeğiştirmesidir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, ideal çubuk eleman O noktasından A ya kadar basınç yükü altında elastik davranış gösterir. Burkulma olayı A noktasında başlar ve narinlik oranı yeterli olduğunda, çubuk uzun süreli yüklemeye

yanal sehim yaparak eğilir (AB arası). B noktasında, çubuk, maksimum deplasman ve plastik momente sahip olması nedeniyle, çubukta bir plastik mafsal meydana gelir. Eksenel deplasmanın artması sonucunda, Δ da artar ve plastik mafsal döner (BC parçası). Yük kaldırılırken eksenel şekil değiştirme, elemanda kalıcı olmaktadır (C noktasından $P=0$ a kadar, eğrinin yatay eksenle sol tarafta çakışan yeri). Daha sonra çubuk, elastik halde çekme yükü altında, D noktasına kadar yüklenir. D noktasından E ye kadar, plastik mafsalın geri dönmesi ile meydana gelen dönme şekil değiştirmesi bir miktar azalmaktadır [10].



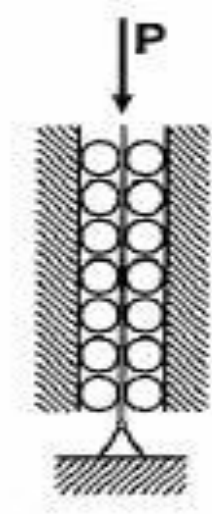
Şekil 1.18. Tekrarlı yük etkisindeki ideal bir malzemenin davranışı [10].

Çubuk yeniden basınca çalıştığında, kalıcı yanal deplasman (Δ), burkulma kapasitesinin azalmasına neden olur (G noktası). Bu durumda çaprazın kalan burkulma kapasitesi (1.3) bağıntısı ile hesaplanabilir [10].

$$C_r' = \frac{C_r}{1 + 0.5 \left(\frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{0.5 F_y}{E}} \right)} \quad (1.3)$$

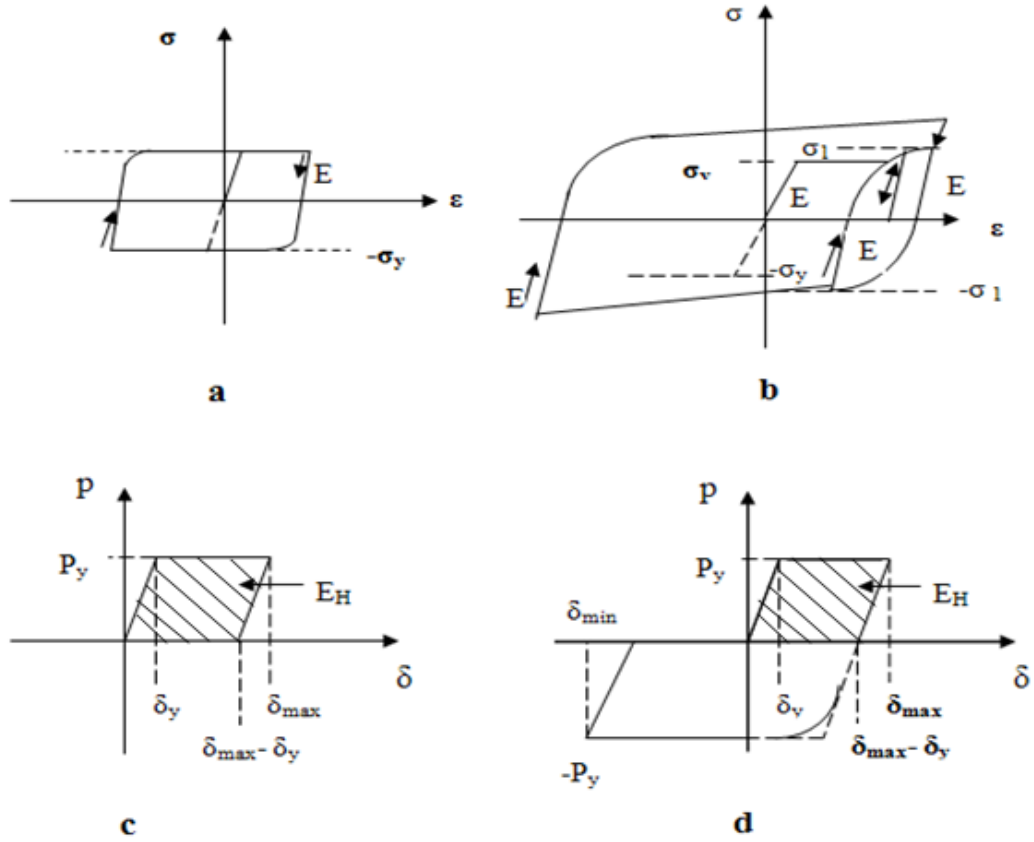
Bu bağlantıda C_r çapraz elemanda birinci burkulma yükünü (Şekil 1.18 de A noktası), KL/r çaprazın narinlik oranını, F_y akma dayanımını ve E çaprazın elastisite modülünü göstermektedir. Sonraki elastik olmayan histeretik davranışta, maksimum basınç yükü azalmaktadır. Bağıntı (1.3) narinlik oranına bağlı olmasına rağmen, çaprazların histeretik davranışları, çaprazın sınır koşullarına ve kesit şekline de bağlı oldmaktadır.

Eğer bir elemanda burkulmaya imkan verilmiyorsa, bu elemanın eksenel yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Burkulmaya imkan vermemek için, Şekil 1.19 da görüldüğü gibi, kolonun etrafını tutmak gerekmektedir.



Şekil 1.19. İdeal burkulma kontrolünün mekanizması

Çelik malzeme, plastik bölgede, tekrarlı yükleme ve boşaltma esnasında çeşitli özellikler göstermektedir. $\sigma = 0$ seviyesine yükleme ve boşaltma halinde Şekil 1.20.a da görüldüğü gibi davranış elastiktir. Gerilmenin boşalıp ters işaretli olması halinde ($\sigma = -\sigma_y$), akma noktasındaki keskin köşe kaybolmakta, akma daha çabuk başlamaktadır. Eğer gerilmenin geriye dönüşü, gerilme pekleşmesi bölgesine geçilmeden önce başlarsa Şekil 1.20.a da görüldüğü gibi geri yükleme halinde de akma platosuna rastlanır. Öte yandan Şekil 1.20.b den görüldüğü gibi, gerilme pekleşmesi bölgesine girildikten sonra, takip eden çevrimlerde akma platosu kaybolur[11].



Şekil 1.20. Çelik bir malzemenin tekrarlı yük altında davranışı[11].

Çeliğin en önemli iki özelliği, sünekliliği ve tekrarlı inelastik yükleme altında enerji yutma kapasitesidir. Bir çelik elemanın plastik uzaması veya kısalması için ihtiyaç duyulan enerji, plastik kuvvet ile plastik deformasyonun çarpımı olarak hesaplanır ve histerik enerji olarak adlandırılır. Kinematik ve elastik deformasyon enerjisinin tersine, histerik enerji geriye dönüşü olmayan, sarf edilmiş enerjidir. Şekil 1.20.c. den görüldüğü gibi, artan ve daha sonra boşalan yükleme halinde, E_H olarak gösterilen histerik enerji,

$$E_H = P_y(\delta_{\max} - \delta_y) \quad (1.4)$$

şeklinde hesaplanır. Bu değer şekildeki gölgeli alana karşılık gelmektedir. Süneklilik oranı ise aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mu = \delta_{\max} / \delta_y \quad (1.5)$$

Tam çevrim bir yükleme-boşaltma halinde, Şekil 1.20.d. den görüldüğü gibi histerik enerji, yük-deformasyon eğrisi tarafından çevrelenen alandır ve yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$E_H = P_Y((\delta_{\max} - \delta_y) + (\delta_{\max} - \delta_{\min} - 2\delta_y)) \quad (1.6)$$

Histerik enerjinin daha hassas hesabı için, Bauschinger etkisi nedeniyle meydana gelen enerji kaybının da hesaba sokulması gerekmektedir. Tekrarlı yükleme halinde harcanan toplam enerjinin hesabı için her bir tekrarda, yutulan veya harcanan enerji, toplanmaktadır.

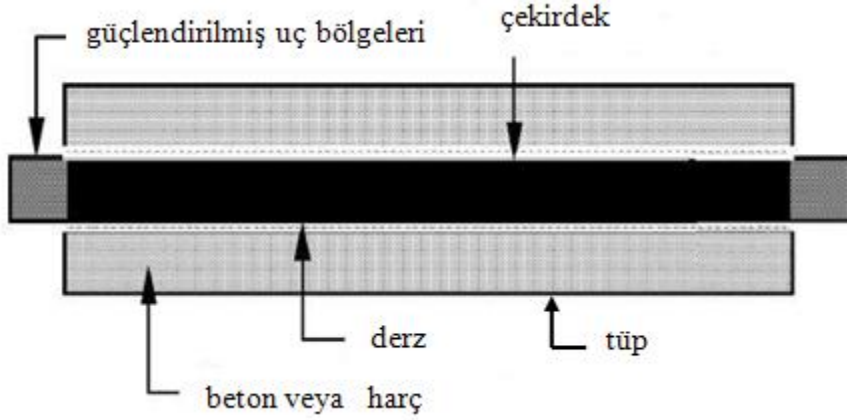
Bir taşıyıcı sisteme etkiyen deprem yükü, bu sisteme bir dış enerji uygular. Bu enerjinin karşılığı ise, sistemde harcanan plastik enerji ile depolanan deformasyon enerjisi ve kinetik enerjinin toplamıdır[11].

$$E_D = E_H + E_e + E_K \quad (1.7)$$

Şekil 1.21. de görüldüğü gibi burkulması sınırlandırılmış çapraz eleman, genellikle dört elemandan meydana gelmektedir.

1. Aksel yükü taşıyan eleman ya da çekirdek
2. Güçlendirilmiş uç bölgeleri (çekirdeğin yükünü birleşim bölgesine taşımaktadır).
3. Burkulmayı önleyen (tüp) eleman

4. Çekirdek ve tüp arasındaki derz. Bu derz çekirdeğin tüpün içinde rahatça hareket etmesine ve çekirdeğin basınç yükü altında akması halinde, çekirdeğin enine genleşebilmesine de imkan vermektedir. Bazen bu derz içinde, çekirdek ve tüpün rahat çalışması için, sürtünme azaltıcı bir malzeme kullanılmaktadır.



Şekil 1.21. Burkulması sınırlandırılmış çaprazın ana elemanları[1].

Çelik çerçevelerde çaprazlar hem çekme yükü ve hem basınç yüküne göre tasarlanıp boyutlandırılmaktadır. Çeliğin çekme dayanımı basınç dayanımına göre burkulma nedeniyle çok yüksektir. Çekme yüküne göre hesaplanan enkesit alanı çok küçük, basınç yüküne göre hesaplanan enkesit alan ise burkulma nedeniyle çok büyüktür. Burkulma etkisi veya narinlik problemi kolonlarda ve çaprazlarda enkesit alanlarını büyütme gerektirir.

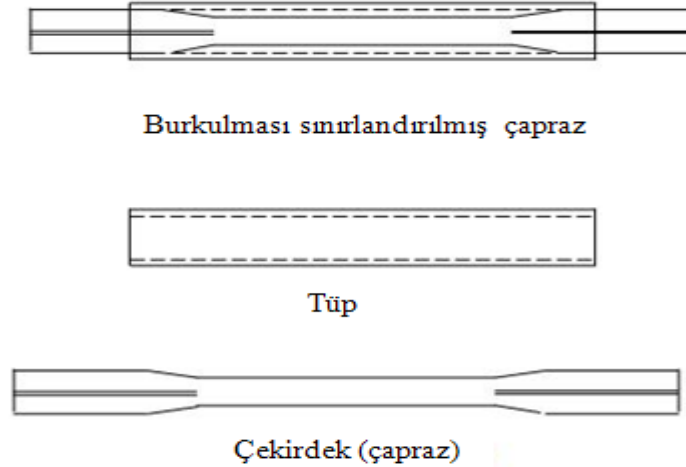
Büyük depremlerden sonra bazen standartlarda ve şartnamelerde önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler şartnamelerde yapıya gelen deprem etkisinin artırılması sonucunda yeniden tasarlanmakta ve mevcut yapıların bir kısmı yeni şartnameye göre zayıf kalmaktadır. Böylece bu yapıların güçlendirilmesi de gerekmektedir.

Betonarme yapıların güçlendirilmesinde çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Çelik yapılarda ise kolonlar ve çaprazlar için ya elemanı daha güçlüsü ile komple değiştirerek, ya da mevcut elemanı çeşitli malzemelerle (levha, profil, vb.) enkesitini büyütme suretiyle güçlendirme yapılmaktadır. Bazen de çelik yapılarda kolonlar ve çaprazların tasarımında ve yapımında hata yapılmakta ve bu nedenle yine güçlendirme gerekli olmaktadır.

Bugüne kadar meydana gelmiş olan depremler mevcut yapıların deprem performanslarının oldukça yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. Bu sebeple mevcut yapıların güçlendirilmesi konusu oldukça önemli bir hale gelmiştir. Mevcut çelik çaprazların güçlendirilmesi de günümüzde ekonomik ve deprem performansının artırılması açısından önemini koruyan bir yöntemdir.

Çelik yapılarda, tekrarlı yükler altında hasar gören veya yönetmeliklerin yenilenmesi nedeniyle öngörülen deprem yüklerini taşıyamayacak olan çaprazların güçlendirilmesi gerekli olmaktadır. Bunun için, son yıllarda geliştirilmiş, nispeten yeni sayılabilecek, çelik çaprazların burkulma yükünün artırılması ilkesine dayanan ve detayları daha önce belirtilmiş olan BRB yöntemi uygulanmaktadır.

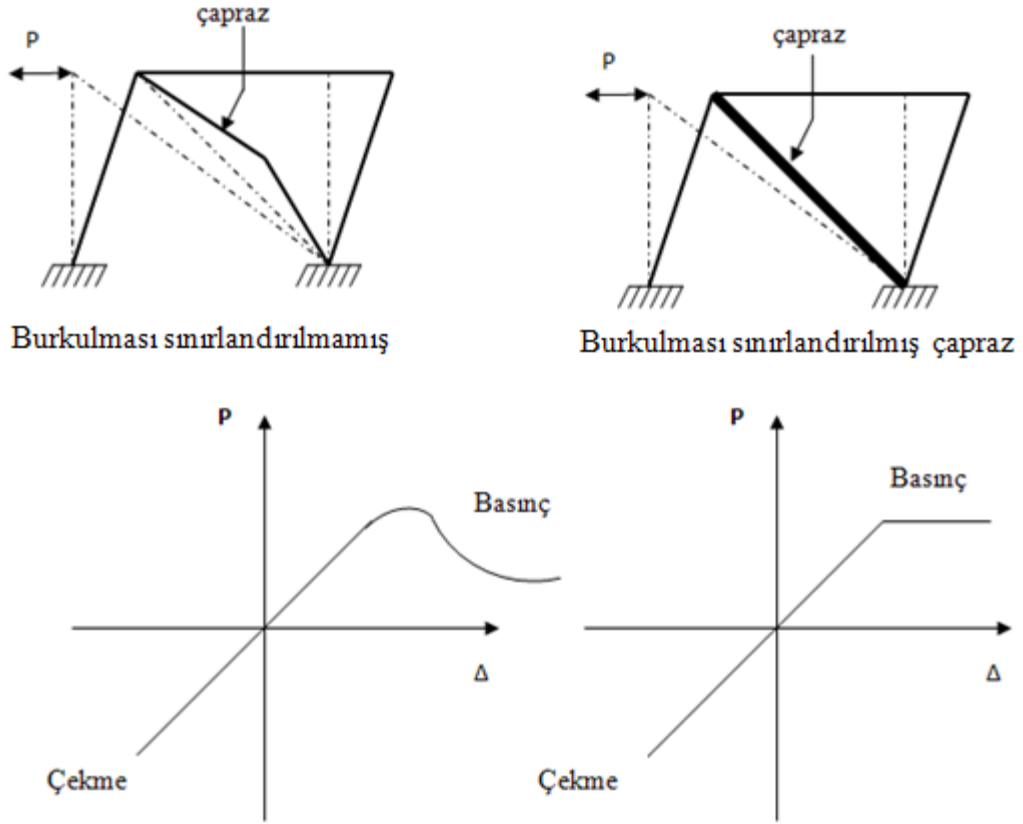
Bu yöntemde, çaprazların basınç kapasitesi artmakta ve çekme kapasiteleri ile çevrimsel eğriler (histeretikler) simetrik olmaktadır. Bu yöntem, “Burkulması Sınırlanmış çaprazlı çerçeveler” (Buckling Restrained Braced Frames) olarak adlandırılmaktadır. Genellikle, merkezi çaprazlı çerçeveler için kullanılmaktadır. Yeni bir sistem olmasına rağmen, (BRBF) geliştirilmiş ülkelerde birçok yöntemin analitik ve deneysel çalışmalarına konu olmuştur. Bu yöntemde, burkulması sınırlanmış çaprazlar (BRB), çelik bir tüpün içine yerleştirilmiş ve tüpün içi harç veya beton ile doldurulmuştur. Harç ya da beton basınç durumunda, çaprazın burkulmasını sınırlandırmakta ve taşıma kapasitesini artırmaktadır [12,13]. Burkulması sınırlanmış çaprazların oluşturulması Şekil 1.22. de gösterilmektedir [1,14].



Şekil 1.22. Burkulması sınırlanmış çapraz, tüp ve çekirdek

Yapılan deneyler, çevrimsel yükleme durumunda, kritik elemanların BRB elemanlarla değiştirildiğinde, deplasman ve enerji tüketme kapasitesini artırdığını göstermiştir [14].

Burkulması sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış iki çerçevenin tekrarlı yük etkisindeki davranışı Şekil 1.23'te verilmektedir [1,10,15].



Şekil 1.23. Çaprazlarının burkulması sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış çerçevenin davranışı

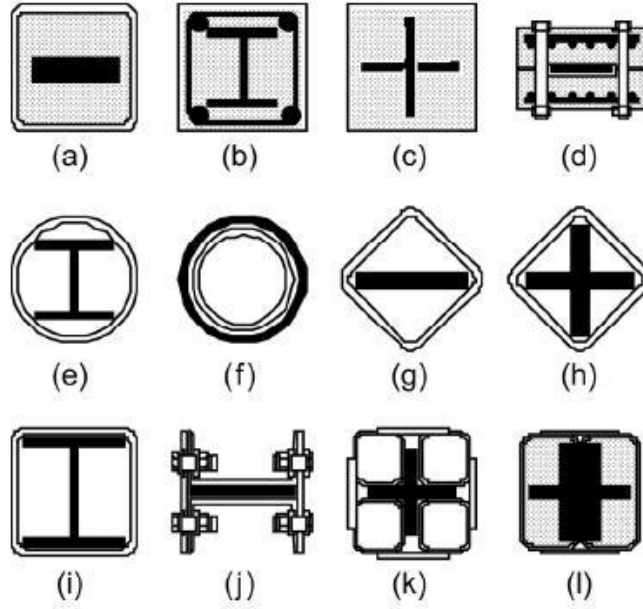
Geleneksel çerçeve sistemlerine göre, BRB'nın avantajları aşağıda verilmektedir.

- Burkulma yükleri çok yüksektir.
- Çekmede ve basınçta simetrik davranışları vardır.
- Çekme ve basınç akmaları tahmin edilebilir.
- Guse levhalarında burkulma ve akma meydana gelmez.
- Analiz için kolayca modellenebilir.

f) Daha uzun çaprazlar, enkesit alanı büyümeden artırılabilir.

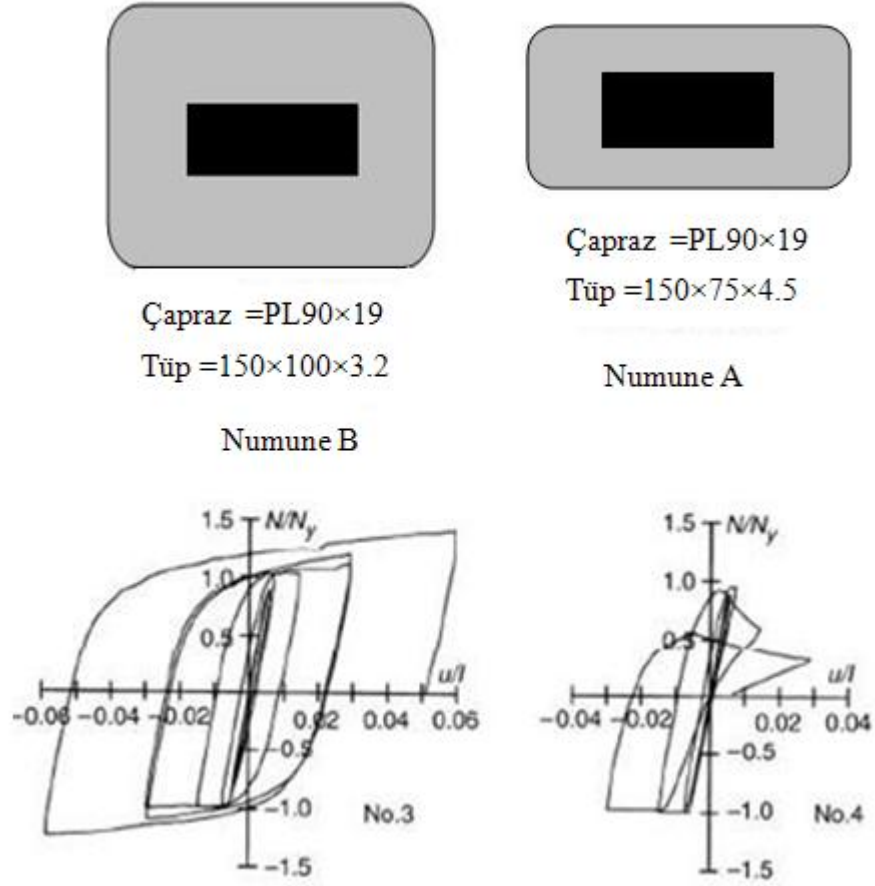
g) Gerektiğinde, çerçeveler sökölüp değiştirilebilir.

BRB'lerin çeşitli kesitleri Şekil 1.24'te görölmektedir. Bu kesitler araştırmacılar tarafından önerilmekte ve yaygın olarak kullanılabilir[1]. Şekil 1.24(a), bir harçla berkitilmiş çelik levhayı bir çelik tüpün içinde göstermektedir. Şekil 1.24(b) H kesitinde olan ve betonarme ile kaplanmış çaprazı göstermektedir. Şekil 1.24(c), bir çelik lifli betonarme ile kaplanmış çapraz kesitini göstermektedir. Şekil 1.24 (d), bir çelik çapraz levhasını, iki adet prifabrike betonarme panelle berkitilmiş olarak göstermektedir. Şekil 1.24(e) de göröldüğü gibi, dış taraftan çelik tüple yerel burkulma karşısında dayanan geniş flanşlı bir kesit olabilmektedir. Şekil 1.24(f), iki dairesel çelik tüpten oluşan bir BRB kesitini göstermektedir. Bu düzenlemede, içerideki tüp, yanal şekildeğiştirmeyi önlemekte, dışarıdaki tüp ise aksnel yükü taşıyan bir eleman olmaktadır. Şekil 1.24(g), bir kare çelik tüple berkitilmiş çelik bir levhayı BRB olarak göstermektedir. Şekil 1.24(h) da göröldüğü gibi çelik kare tüp, bir haç biçiminde olan çelik kesitinin burkulmasını sınırlandıran eleman olarak kullanılmıştır. Şekil 1.24(i) de göröldüğü gibi H şeklinde olan çaprazın burkulmasını kare çelik tüplere tutulması ise ayrı bir öneridir. Şekil 1.24(j) bir levha ve cıvatalanmış kanal kesitlerle, çelik levhayı göstermektedir. Şekil 1.24(k) iki T şeklinde olan bir çaprazı dört kare çelik tüple tutulmasını göstermektedir. Bağlantılarının basit olması nedeni ile iki T den oluşan BRB kesiti Şekil 1.24(l) de görölmektedir. Bunlardan başka enkesitleri de farklı araştırmacılar tarafından önerilmektedir[1].



Şekil 1.24. Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların bazı enkesit tipleri[1].

BRB'lerin tasarımında, tüpün rijitliğinin çok önemli rolü vardır. Şekil 1.25 burkulması sınırlandırılmış bir çaprazın enkesitini göstermektedir. Her iki numunede çekirdek, 90 mm eninde ve 19 mm kalınlıkta bir çelik levhadan oluşmaktadır. Ancak, B numunesinin tüpü 100 mm eninde ve A numunesinin eni ise 75 mm olmaktadır. B numunesinin kalınlığı az olmakla beraber, rijitliğinin yüksek olması nedeniyle, B numunesinin histeretik davranışı düzgün olmaktadır. Başka bir deyişle, B numunesi büyük şekildeğişirmelerin altında burkulmadan, histeretik eğrileri hem çekmede ve hem basınçta oluşmaktadır. Ancak A numunesinin rijitliğinin yeterli olmaması nedeniyle, yükün akma miktarına ulaşmadan, genel burkulma meydana gelmekle beraber, histeretik davranış normal çaprazlarınkine benzemektedir[1].

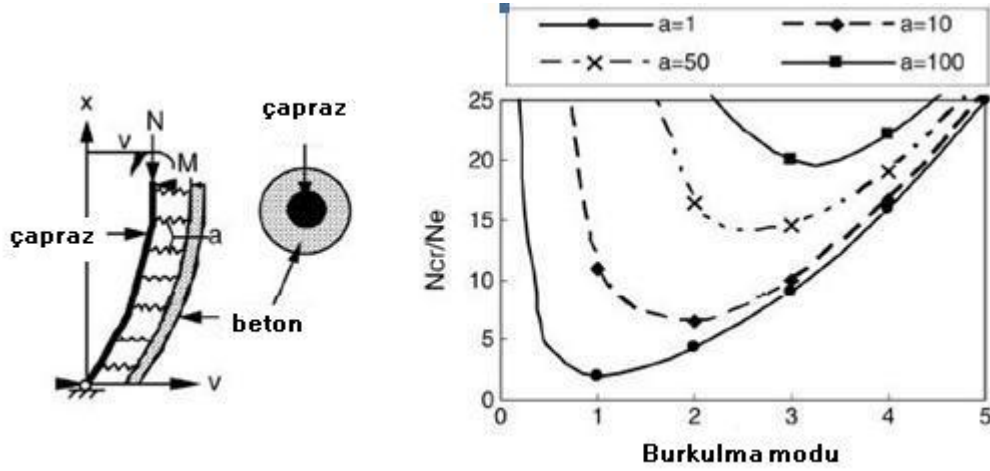


Şekil 1.25. BRB rijitliğinin histeretik diyagramına etkisi [1].

1.3.2.2. Genel Burkulma Kriteri

Bir betonarme elemanla etrafı sarılmış çelik çaprazda elastik burkulma analizi, ilk defa Tani ve Kihara tarafından gerçekleştirilmiştir[1,16]. Şekil 1.26 da görüldüğü gibi, etrafı betonla sarılmış çaprazın yerdeğiştirmesi (1.8) bağıntısıyla hesaplanabilmektedir.

$$v = \delta \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (1.8)$$



Şekil 1.26 Betonla sınırlandırılmış çaprazın analizi[1].

Bu bağıntıda v herhangi bir x mesafesindeki sehim, δ ise ortadaki sehim göstermektedir. Burada betonun ve çelik çaprazın deformasyonlarının aynı olduğu kabul edilmektedir. Betona etkiyen yanal yayılı yük (1.8) nolu bağıntıdan;

$$p = \frac{n^4 \pi^4}{l^4} \delta E_c I_c \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (1.9)$$

olarak hesaplanabilmektedir. Bu bağıntıda $E_c I_c$ betonun eğilme rijitliğini göstermektedir. Eğer (1.8) ve (1.9) bağıntılarından, p , yayılı yanal yük, v ye bölünürse, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\alpha = \frac{p}{v} = \frac{n^4 \pi^4}{l^4} E_c I_c \quad (1.10)$$

Burada, α , dayanım katsayısı olarak adlandırılmakta ve birim sehime düşen yayılı yükü göstermektedir. Diğer bir deyişle, yay sabitine benzeyen dayanım katsayısı tüpün içindeki betonda birim sehim için gerekli yayılı yükün şiddetini ifade etmektedir. Çelik çaprazda sehim betonla tutulduğu zaman, eğilme momenti aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$M(x) = -Rx + \int_0^x \alpha v \cdot x \cdot dx + Nv \quad (1.11)$$

Bağıntı (1.11) de, $M(x)$ enkesitte eğilme momentini, R mafsalda reaksiyonu, x mafsaldan hesaplanan enkesite kadar olan mesafeyi, N ise eksenel yükü göstermektedir. Euler diferansiyel denklemi bağıntı (1.11) den;

$$\frac{d^4v}{dx^4} + k^2 \frac{d^2v}{dx^2} + \beta v = 0 \quad (1.12)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu bağıntıdaki k^2 ve β aşağıda verildiği gibi belirlenmektedir.

$$k^2 = N/E_s I_s, \quad \beta = \alpha/E_s I_s$$

İki ucu mafsal varsayılmasıyla ve denklem(1.12) in çözülmesiyle kritik burkulma yükü;

$$N^2 = 4\alpha E_s I_s \quad (1.13a)$$

$$N_{cr} = \frac{2n^2 \pi^2 E_s I_s}{l^2} \quad (1.13b)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu bağıntılar yardımıyla burkulma mod uzunluğu;

$$\frac{l}{n} = \pi \sqrt{\frac{E_s I_s}{\alpha}} \quad (1.14)$$

şeklinde belirlenmektedir. Buna göre bağıntı (1.13a) ve bağıntı (1.14) kullanılarak

N_{cr} , aşağıda verildiği gibi, iki parçaya bölünebilmektedir.

$$N_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 E_s I_s}{l^2} + \frac{E_s I_s}{\frac{l^4}{n^4 \pi^4} n^2 \pi^2} l^2 = \frac{n^2 \pi^2 E_s I_s}{l^2} + \frac{l^2 \alpha}{\pi^2 n^2} \quad (1.15)$$

Bu bağıntıda ikinci parça burkulmanın sınırlandırılmasında, beton tüpünün katkısını göstermektedir. Genel burkulma yükü, bağıntı (1.10) ve bağıntı (1.15) yardımı ile;

$$N_{cr} = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \{E_s I_s + E_c I_c\} \quad (1.16)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir[1]. Yukarıdaki (1.16) nolu bağıntıdan görüldüğü gibi, kompozit çaprazda, elastik burkulma kapasitesi iki ayrı terimin toplamı ile hesaba katılmaktadır.

Mochizuki [1,17,18,19] vd. burkulmaları sınırlandırılmış panelli çaprazları araştırmışlardır. Onların araştırmalarında, kompozit sistemin burkulma limiti (1.17) bağıntısı ile gösterilmektedir:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2} \{E_s I_s + k E_B I_B\} \quad (1.17)$$

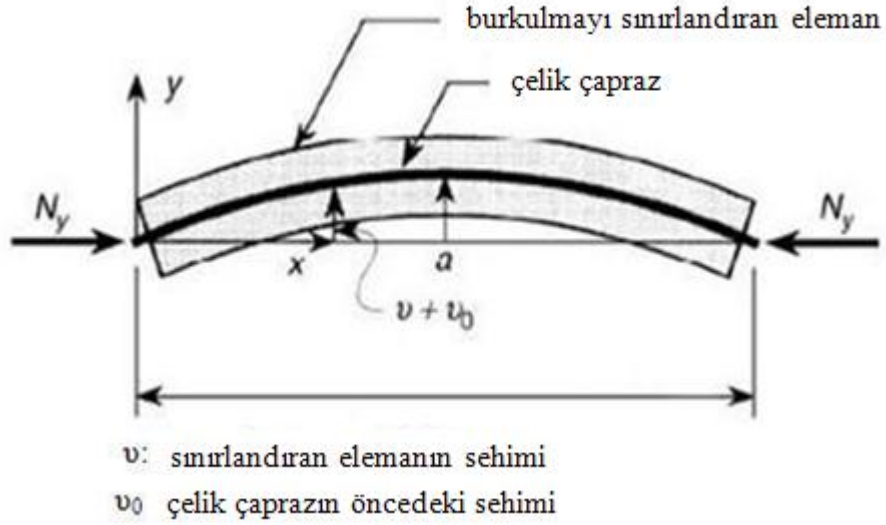
Bu bağıntıda, $E_B I_B$ betonun eğilme rijitliği ve k betonun eğilme rijitliğinin azalmasına bağlı, 0 ile 1 arasında bir katsayısıdır ($0 < k < 1$). Çelik çekirdek eksenel N yükü altında aktıktan sonra, $E_s = 0$ olarak kabul edilmekte ve böylece (1.17) bağıntısı, aşağıdaki (1.18) bağıntısına dönüşmektedir. Dış elemana (betona) gerekli olan rijitlik de yine (1.18) bağıntısından hesaplanabilmektedir.

$$\frac{\pi^2}{l^2} k E_B I_B \geq N_y \quad (1.18)$$

Burkulmayı önleyen yükün betonun ortasına etkileyen bir tekil yük olduğu varsayımı ile Nagao vd.[20] dış elemana (betona) gerekli olan rijitliği belirlemişlerdir. Çaprazda, önceki şekildeğiştirme esasına göre, dış elemana gerekli olan dayanım hesaplanmıştır. Onların deneylerinde dış elemanları beton olduğundan, betonda çatlama etkileri de dikkate alınmıştır. Ancak, sınırlandırılmış çaprazda çekme ve basınçta aynı akma ve plastik şekildeğiştirmesini elde etmek için, rijitlik ve dayanım kriterinin sınırlandıran elemanda (tüpte) da sağlanması gerekli olmaktadır. Sınırlandıran elemanın rijitliği yüksek, dayanımı düşük ise, bu eleman hasar gördüğünde rijitlik etkisi belirlenmemektedir. Tersine durumda, dayanım yüksek ve rijitlik düşük ise, sınırlandıran eleman burkulma şekildeğiştirmesini tutabilmemektedir. Böylece, sınırlandıran elemanın da rijitlik ve dayanımı birlikte dikkate alınmaktadır.

Burkulmayı sınırlandıran eleman olarak, harçla doldurulmuş çelik bir tüp kullanılması durumunda, çekirdeğin yaptığı ön şekildeğiştirme esasına göre, Fujimoto vd.[21,22] gerekli dayanım ve rijitlik ifadelerini belirlemişlerdir. Buna göre, bir çapraz elemanın eksenel basınç yükü altında burkulmadan aktığı varsayılın. Şekil 1.27 de görüldüğü gibi, çaprazda ön şekildeğiştirme, v_0 , sinüsoidal bir eğri şeklinde oluşmaktadır ve α çapraz elemanın ortasında meydana gelen ön şekildeğiştirme olmaktadır.

$$v_0 = a \sin \frac{\pi x}{l} \quad (1.19)$$



Şekil 1.27. Burkulması sınırlanmış çaprazda yük ve şekildeğiştirme

Bu noktada, BRB aşağıdaki denge şartını sağlamaktadır:

$$E_B I_B \frac{d^2 v}{dx^2} + (v + v_0) N_y = 0 \quad (1.20)$$

Bu denklemde, $E_B I_B$, sınırlayan elemanın eğrilik rijitliği olmaktadır. Sınırlayan elemanın enine defleksiyonu, (1.20) denklemin genel çözülmesi ile aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$v + v_0 = \frac{a}{1 - N_y / N_E^B} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (1.21)$$

$$N_E^B = \frac{\pi^2 E_B I_B}{L^2} \quad (1.22)$$

Burada, N_E^B , sınırlayan elemanın burkulma yükünü göstermektedir. (1.22) denkleminden, M_C^B , sınırlayan elemanın ortasındaki eğilme momenti, aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$M_C^B = \frac{N_y a}{1 - N_y / N_E^B} \quad (1.23)$$

Bir çelik kare tüp sınırlandırıcı eleman yerine kullanılırsa, maksimum gerilme, σ_k , tüpün en dışındaki lifinde aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

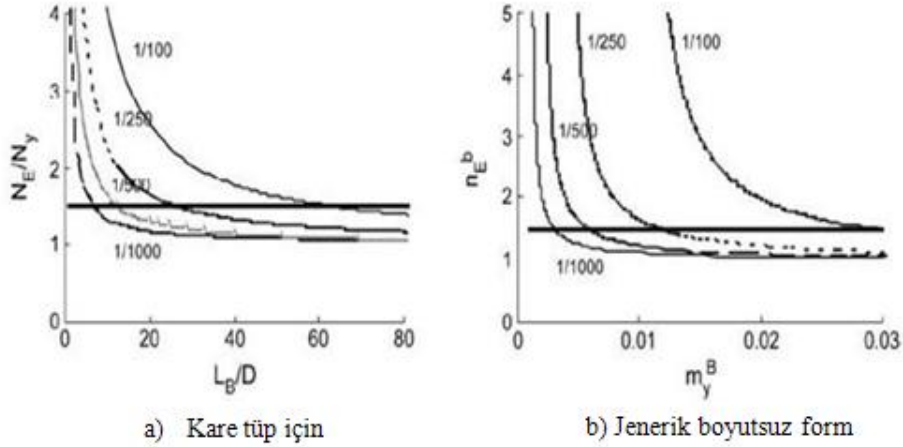
$$\sigma_k = \frac{N_E^B \cdot N_y}{N_E^B - N_y} \cdot a \cdot \frac{D}{2I_B} \quad (1.24)$$

Burada, D , I_B sırası ile çelik tüpün derinliği ve atalet momentidir.

Dayanım açısından, maksimum gerilme akma gerilmesinden küçük olması gerekmektedir, yani, $\sigma_k < \sigma_{ky}$. Bu yüzden, çelik tüpün rijitlik ve dayanım şartı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{N_E^B}{N_y} > 1 + \frac{\pi^2 E_B \times \frac{a}{l_B}}{2 \sigma_{ky} \frac{l_B}{D}} \quad (1.25)$$

Burada, σ_{ky} ve l_B sırası ile çelik tüpün akma gerilmesi ve uzunluğu olmaktadır. Bu formül, BRB'lerin tasarımında ilk formül olarak, dayanım ve rijitlik şartlarını başarılı biçimde harçla doldurulmuş çelik tüpün içindeki çapraza uygulanmıştır. Şekil 1.28a de başlangıç sehimine göre, çelik kare tüplerin rijitliklerine ve dayanımına göstermektedir.



Şekil 1.28 Burkulmayı sınırlandırma kriteri[1].

Çok jenerik formda, sınırlandırıcı elemanın akma momentini, M_y^B , rijitlik kriteri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$M_C^B < M_y^B \quad (1.26)$$

(1.23) ve (1.26) bağıntılarından, genel burkulma kriteri aşağıdaki Şekilde yazılabilir:

$$\left(1 - \frac{1}{n_E^B}\right) m_y^B > \frac{a}{l} \quad (1.27)$$

Bu bağıntıda,

$$n_E^B = \frac{N_E^B}{N_y} \quad , \quad m_y^B = \frac{M_y^B}{N_y l} \quad (1.28)$$

Burada, n_E^B , m_y^B boyutsuz ve sırası ile eğilme momentine($E_B I_B$) ve sınırlandırıcı elemanın mukavemet momentine bağlı parametreler olmaktadır. Çeşitli başlangıç şekildeğiştirmelere göre, burkulması tutma kriteri Şekil 1.28b. de görülmektedir.

Daha önce verilen enkesitlere (bkz Şekil 1.24-e-i) çekirdek ve sınırlandırıcı eleman arasında derz yerleştirmek gerekmektedir. Bu kesitlerde rijitlik kriteri yani (1.27) Bağıntısı aşağıdaki Şekilde yazılır:

$$\left(1 - \frac{1}{n_E^B}\right) m_y^B > \frac{a+s}{l} \quad (1.29)$$

Bu bağıntıda, s, derz miktarı, 0.7 – 3.5 mm arasında olabilir. Bu durumda, başlangıç şekildeğiştirmesi, α , sınırlandırıcı elemanın kusurunu göstermektedir. Genellikle, başlangıç şekildeğiştirme panelli BRB'lerde fabrikasında 2mm altında kontrol edilmesi gerekmektedir. Yapışmayan maddeler, boya ve ince poliester levhalar gibi malzemelerin kullanılması halinde, (s) değeri azalabilir[1].

Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların tasarımında, çelik tüpün aksenal yük taşıması gerekmemektedir ve yeterli eğilme momentine göre tasarlanması gerekmektedir. Çelik tüp için aşağıdaki ifadeyi önermişler[23]:

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1.0 \quad (1.30)$$

Bu bağıntıda, P_y çekirdeğin akma dayanımı ve P_e çelik tüpün burkulma elastik dayanımıdır.

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_{sc}}{L_{sc}^2} \quad (1.31)$$

Burada, E, elastisite modülü, I_{sc} çelik tüpün atalet momenti, L_{sc} , çelik tüpün uzunluğu olmaktadır.

Denklem (1.30) da histeretik şekildeğiştirmede rijitlenme etkisi dikkate alınmamaktadır. Eğer adı geçen rijitlenme, çaprazın basınç dayanımını yüzde 30 artırırsa ve ω dayanım katsayısı 0.85 kesirin payında dikkate alınırsa:

$$\frac{\omega P_e}{1.3 P_y} \geq 1.0 \quad \text{veya} \quad \frac{P_e}{P_y} \geq 1.5 \quad (1.32)$$

Elde edilen sonuçlara göre, burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlar, çekme ve basınçta yük-şekildeğiştirme davranışları aynı olmakla beraber enerji yutma kapasiteleri yüksek olmaktadır ve dış elemanın tasarımında rijitlik ve dayanım şartları aynı zamanda dikkate alınması gerekmektedir.

1.3.2.3. Burulma Burkulması

Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlarda muhtemel olabilen başka bir burkulma ise, burulma burkulmasıdır. Burulma burkulması, çekirdeğin tüpten dışarıda kalan kısmında meydana gelebilmektedir. Burulma burkulması genel çaprazlarda ve araştırmacıların deneylerinde görülmemiştir. Dolayısıyla da bu durum genellikle tasarımlarda dikkate alınmamaktadır.

1.3.2.4. aprazlarda Akma Birim Uzamasının Hesabı

aprazın akma yerdeğiştirme ile maksimum yerdeğiştirme arasında bağıntı oluşturabilmesi için iki hatlı basit yük-yerdeğiştirme şekli kullanılmaktadır. Şekil 1.29'dan görüldüğü gibi, F_{max} , akma ve maksimum yerdeğiştirmeye göre, u_y , akma yüküne karşılık gelen yerdeğiştirmesi, u_{max} , maksimum yüke karşı gelen yerdeğiştirmeyi göstermek üzere,

$$F_{max} = k u_y + k_2 (u_{max} - u_y) \quad (1.33)$$

şeklindedir. Elastik yerdeğiştirme bağıntısı kullanması ile ikinci denklemi,

$$F_{max} = k(u_y + \Delta u_y) \quad (1.34)$$

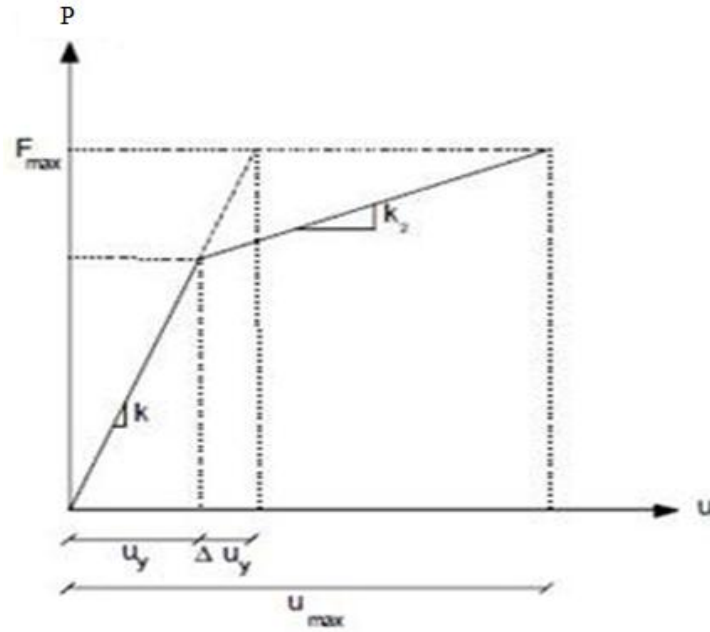
şeklinde yazabiliriz. Bu iki bağıntıyı eşitlendirilmesi ile Δu_y :

$$\Delta u_y = \frac{k_2}{k} (u_{max} - u_y) \quad (1.35)$$

olarak elde edilmektedir. Bu bağıntı, u_y bölünmesi ile akma yerdeğiştirmenin varyansı maksimum sehime göre, μ_{max} ,

$$\frac{\Delta u_y}{u_y} = \frac{k_2}{k} (\mu_{max} - 1) = \alpha (\mu_{max} - 1), \quad \mu_{max} = \frac{u_{max}}{u_y}, \quad \alpha = \frac{k_2}{k} \quad (1.36)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu bağıntıda, α , üst hattın akma katsayısı elastik rijitliğine bağlı olmaktadır.



Şekil 1.29 İki hatlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi

1.4. Çelik Lifli Betonların Üretimi ve Davranışları

Çelik lifler, günümüzde betonda kullanılan lif türleri içinde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Birçok lif türü mevcut olup bunların üstünlükleri kullanılış amaçları ile ilgili olmaktadır.










Çimento, agrega ve su karışımı olarak bilinen betonda oluşan büzülme (rötre) çatlaklarının nedeninin beton prizi esnasında oluşacak içsel gerilmelerin karşılanamaması olduğu bilinmektedir. Yapılan araştırmalara göre bu çatlaklar, betonun küründe alınan bazı önlemlerle kılcal düzeyde kalmalarına rağmen, yük altında ortaya çıkıp genişlemektedirler. Çelik lifler bu çatlakları azaltıp dayanımı artırmaktadır. Çeşitli amaçlarla beton ve/ya da betonarme elemanlarda kullanılan çelik liflerin geometrik özellikleri, imalat şekli ve kullanılış amacına göre farklı olabilmektedir. 70'li yıllarda yalnızca düz çelik lifler kullanılırken sonraları uçları kıvrık, çengelli ve özel Şekilli çelik liflerin kullanımı ve üretimi de giderek yaygınlaşmıştır.

Çelik lifli betonları daha ekonomik hale getirmek için yarım daire, dikdörtgen ve simetrik olmayan geometrilerde de lifler üretilmiş olmasına rağmen betonda istenen iyileşmeyi sağlayan lif türlerinin düz çelik lifler ve uçları çengelli çelik lifler olduğu belirtilmektedir.

Beton bileşiminde kullanılan çelik lifler, genellikle soğuk çekilmiş düşük karbonlu çelik olan C1008'den üretilmektedir. Çelik liflerin elastik limitleri %0.2'nin altındadır. Lifli beton üretiminde kullanılan çelik liflerin çapları genellikle 0.13-1.0 mm arasında olup, görünüm oranı adı verilen uzunluk/çap oranları ise 30-150 arasında değişmektedir. Lif boyları 13 mm'den 70 mm'ye kadar olan çelik lifler üretilmektedir[24].

Betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla taze beton içine çeşitli yöntemlerle ve çeşitli miktarlarda eklenen çelik lifler değişik boyutlarda ve kesitlerde üretilmektedir. Bunlar, soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi yöntemi, çelik plakların kesilmesi yöntemi, sıcak çekme yöntemi, çelik tellerin öğütülmesi yöntemidir. Çelik tellerin biçim ve üretim yöntemleri Tablo 1.1'de verilmektedir.

Tablo 1.1. Farklı çelik lif tipleri ve üretim şekilleri [24].

Biçim	Üretim Şekli
	Haddeleme Haddeleme
	Kesme
	Haddeleme
	Haddeleme
	Yumuşatma
	Öğütme
	Haddeleme
	Haddeleme
	Kesme İnceltme

Kullanılacak olan lif tipi ve miktarlarına, bu betonun yapıda kullanılacağı amaç ve yere göre karar vermek gerekmektedir. Lif tipi, boyutu ve görünüm oranı (boy/çap) betonun maruz kalacağı etkiler dikkate alınarak seçilmelidir. Teorik olarak betonda, liflerin görünüm oranı ve miktarı arttıkça, darbe sönümlenme, tokluk ve süneklik gibi özelliklerinin olumlu etkilendiği düşünülse de, lif miktarı standartlarca sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırmaların nedenleri arasında artan miktarlarda lif kullanımı ile liflerin karışımda homojen biçimde yer almayıp topaklanmaları, karıştırma sırasında eğilmeleri ve deforme olmaları sayılabilir.

Lifli betonlarla ilgili yapılan çalışmalarda liflerin beton karışımına katılma oranı hacimsel olarak %0.5-2.5 arasında sınırlandırılmaktadır. Çelik lifli betonlarda karışım

hazırlanması esnasında oluşabilecek problemleri önlemek için TS 10514 [25]'e göre aşağıdaki önlemlerin alınması öngörülmektedir.

- Homojen bir beton karışımı elde etmek için lifsiz betonlarda dikkat edilmesi gereken yürürlükteki ilgili standartlarda belirtilen kurallara uyulmalıdır. (TS 1247[26])

- İşlenebilirliği artırmak için akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmalıdır.

- Çelik lifli betonlarda karılmayı kolaylaştırmak ve gerektiğinde lif içeriğini artırabilmek için karışımda ince agrega miktarı fazla olmalıdır.

- Taze betonda homojen lif dağılımı gözle kontrol edilmelidir. Birbirine yapışık lif demetleri tek tek ayrılana kadar karıştırma işlemi devam ettirilip mümkün olduğunca üniform bir dağılım sağlanmaya çalışılmalıdır.

- Kritik çelik tel miktarı aşılmamalıdır.

- Betonun nakli transmikserle yapıldığında transmikserin dönüş hızı geleneksel betondaki dönüş hızına göre azaltılmalıdır.

- Çimento miktarı en az 320 kg/m³ ve kum (0-4 mm), toplam agrega miktarının ağırlıkça %40-45'i olmalıdır.

- Agrega maksimum tane boyutu kırma taş için 32 mm olmalı, 14 mm'den büyük agrega oranı en fazla %15-20 civarında olmalıdır.

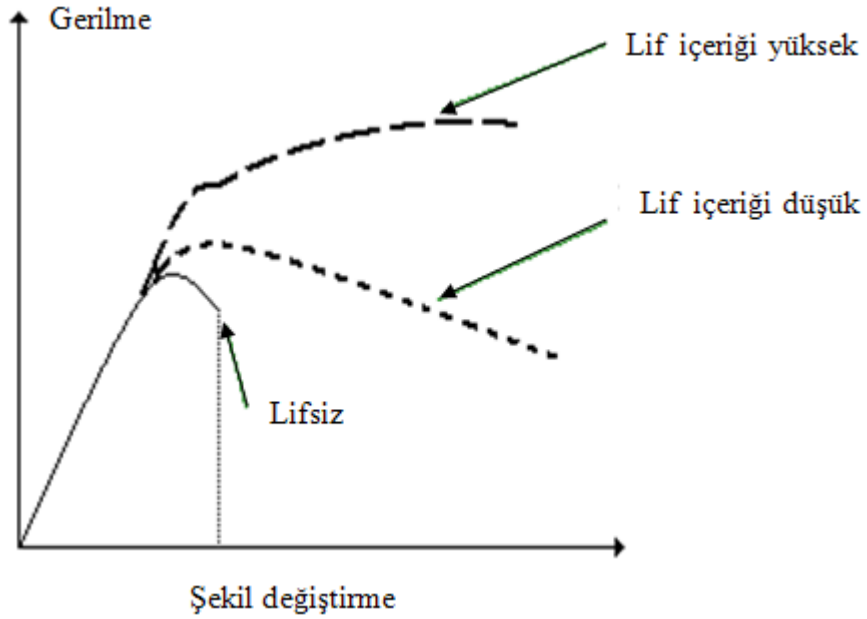
Ayrıca betonda kullanılacak çelik lifler TS 10513 [27]'a göre;

- Yüzeyleri kir, pas ve yağdan arınmış olmalıdır

- Minimum çekme dayanımları 310 MPa olmalıdır

- 16 °C'lik bir ortamda 3.18 mm çaplı silindir çevresinde 90° kırılmadan kıvrılacak kadar esnek olmalıdır.

Şekil 1.30 da görüldüğü gibi beton üretiminde çelik lif kullanımı betonun Şekildeğiştirme kapasitesini artırmaktadır. Diğer bir deyişle lifsiz betonların lifli betonlara göre daha az sünek davrandığını göstermektedir.



Şekil 1.30. Lifli betonlarda gerilme – şekil değiştirme diyagramı[24].

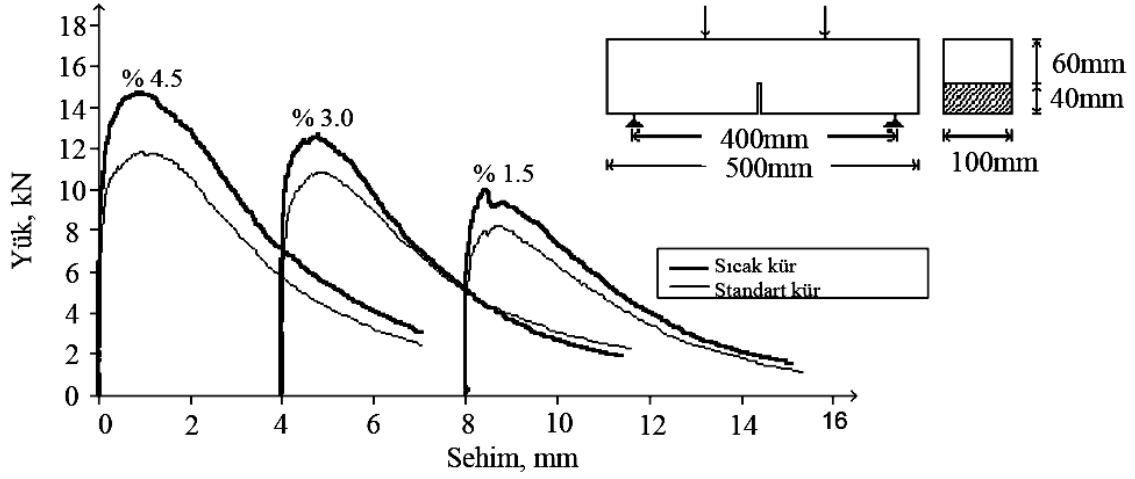
Lif kullanımı ile birlikte betonun tokluğu önemli oranda artmaktadır. Tokluğa ek olarak, lif kullanımıyla çarpma dayanımı, ilk çatlak dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, şekil değiştirme kapasitesi, basınç dayanımı, elastisite modülü yükselmektedir. Direkt çekme dayanımının belirlenmesi konusunda hiçbir standart deney mevcut olmayıp bu etki genellikle eğilmede çekme, yarmada çekme gibi dolaylı yollarla araştırılmaktadır. Direkt çekmeye maruz lifli beton numuneler, lifsiz olanlara oranla %20-25 daha fazla dayanım değerlerine ulaşabilmektedir. Çelik liflerin yönleri, yapı elemanının çekmedeki taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Çekme deneyleri sonucunda yükte aynı yönde uzanan çelik liflerde kopma görülmemektedir [28]. Bu duruma bir örnek, K.T.Ü. Yapı ve Malzeme laboratuvarında gerçekleştirilen bir çalışmaya ait deney numunesinden de görülmektedir, Şekil 1.31.



Şekil 1.31. Yarma deneyine tabi bir lifli silindir betondan görünüm

Geleneksel betonda gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin alçalan kolu oldukça kısa olup, bu kol lif içeriğine bağlı olarak uzamaktadır. Çelik lif dayanımının betonun dayanımından yüksek olması nedeniyle, beton dayanımını kaybettikten sonra çelik liflerin devreye girmesiyle maksimum yük değerini bir miktar daha artırmaktadır. Maksimum yükten sonra lifli betonlarda artan Şekildeğiştirme sonucunda yükün azalma hızı, normal betonlara göre, çok daha yavaş olmaktadır Bu hız 3–4 mm şekildeğiştirmeye kadar maksimum yükün %70-80'i arasındadır [29-31].

Çelik lifler betonun eğilme etkisindeki davranışına da olumlu katkıda bulunmaktadır. Bu iyileşme, lif oranına ve lif tipine bağlı olarak değişkenlikler gösterebilmektedir. Şekil 1.32 'de 3 farklı lif oranında üretilen çentikli eğilme numunelerine ait yük-sehim eğrileri verilmektedir. Lif oranı arttıkça elemanların taşıma gücü ve enerji yutma kapasiteleri yükselmektedir.



Şekil 1.32. Yüksek dayanımlı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerinde yük-sehimeğrileri [32].

Erken yaşlarda eğilme etkisinde denenen bazı kiriş numuneler üzerinde, çatlak genişliği ve deplasmanlar azalmış, taşıma gücü ve çekme dayanımları yükselmiştir [33].

Çelik lifli betonun oldukça geniş bir uygulama sahası mevcuttur. Tünellerde, tekrarlı yükler gibi dinamik yüke maruz yapı elemanlarında, madencilikte, kuyular açarken, prefabrike yapı elemanlarında, şev stabilizasyonlarında, onarım ve güçlendirmede, hazne duvarlarında, hava alanı iniş pistlerinde, kabuk yapılarda, kıyı boyunca inşa edilen dalga kırıcılarda ve daha birçok yerde kullanılmaktadır. Uygulanması donatı ile beraber ya da donatısız olarak yapılabilmektedir. Donatısız uygulamalar özellikle kaplama betonlarında tercih edilmektedir. Çelik lif, beton kaplamalı su kanallarında da kullanılabilir. Islak örtü altı (su iletiminin yapıldığı yüzeyin altında) çelik lif uygulamalarında, cam lifli betona göre %7 oranında yüksek dayanım sağlamaktadır. Ayrıca kür amacıyla ölçülen su işleme derinliği parametresi, cam lifli betona göre %7 oranında fazla olup, kür açısından avantajlı bir durum oluşturmaktadır [34].

Burulmaya maruz yapı elemanlarında çelik lif takviyesi olumlu sonuçlar vermektedir. Çelik lif kullanımıyla çatlak sayısı artmakta ancak çatlak genişlikleri azalmaktadır. Betonarme elemanlarda çatlak kontrolünde kullanılabileceği fikrini doğurmaktadır. Lif kullanımı, burulmaya maruz yapı elemanlarında sünekliği artırmaktadır [35]. Kompozit döşeme sistemlerinde de lif kullanımının faydalı etkileri vardır. Döşemelerde farklı uzunluklarda çelik

lifler kullanıldığında lif uzunluğu arttıkça taşıma gücünde de artışlar görülmektedir. Ayrıca lif kullanımını ilk çatlak dayanımını artırmakta, sehimleri düşürmektedir [36].

1.5. Polypropilen Liflerin Özellikleri

Polipropilenden üretilen lifler, inşaat işlerinde kullanılan mühendislik ürünüdür. Beton, sıva, şap, alçı, bitüm, prekast uygulamaları için bir mikro donatı sistemdir. Saha betonları, yürüyüş yolları, garaj, otopark ve şaplar için bir tali donatı sistemi olarak hasır donatının ikamesinde kullanılabilir.

Polipropilen petrol türevi bir polimerdir. Polypropilenden iki tip lif, Multifilament ve Fibrile adlı olarak üretilmektedir. Multifilament ya da M tipi, birbirinden bağımsız, 18-50 mikron kalınlığında, dairesel kesitli birçok liflerden oluşur. Fibrile ya da F denilen lifler, birbirine bağlı(balık ağı gibi), 50 mikron ve üstü, karesel kesitli(bant şeklinde) liflerden oluşmaktadır. Bu özellikler iki lif tipini birbirinden ayıran belirgin özelliklerdir[37].

Bu gün, polipropilen elyaflar, en çok prefabrik endüstrilerinde kullanılmaktadır. Bu endüstride, yapısal elemanlar, kolon, kiriş, boşluklu döşeme, cephe paneli, soket, aşık, oluk, makas gibi elemanlarda ortaya çıkan kılcal çatlamlar, kalıptan çıkarma hasarları, yoğun donatı bölgelerinde oluşan çöküntüleri engellemek için kullanılmaktadırlar.

Polyfiber M/F ASTM-C 1116 standartlarında polipropilen liflerden üretilen bir mühendislik ürünüdür. Polipropilen liflerin özellikleri aşağıda verilmektedir[37].

- İdeal bir tali donatı sistemdir, yapısal olmayan hasır donatının yerine kullanılabilir.
- Hafif olduğundan yapıya ölü ağırlık vermez (birim ağırlığı 0.9 kg/m^3).
- Paslanmaz, çürümez, süresiz depolanabilir.
- Pompalanabilir, makine aksamına zarar vermez.
- Depremde betonun patlamasını ve yapıların çökmesini engeller.
- Nakliye ve lojistik sorunu yoktur.
- En ekonomik tali donatı sistemdir.
- Taşıyıcı metal, demir ana donatı sisteminin korozyonunu geciktirir.
- Donatı işçiliği ve paspayı gerektirmez.

- İşçilik gerektirmeden kullanılabilen PolyPropilen lifler beton içinde dağılır.



Polipropilen liflerin betonda kullanılması halinde, aşağıdaki özellikler meydana gelmektedir:

- Betonun ilk dökümünden sonra ortaya çıkan kılcal rötre çatlakları azalır.
- Betonun enerji emme yeteneğini artırır.
- Betonun tokluk değerini yükseltir. Sünek davranış kazandırır.
- Kılcal çatlakların büyümesini frenler. Makro çatlakları mikro çatlak düzeyinde tutar.
- Stoklama, depolama, hurda, bindirme payı, pas payı gibi sorular yoktur.
- Narinlik değeri (boy/çap) 1100 ila 600 arasındadır.
- Beton taşıyıcı sistemleri için yangın dayanımı sağlar.
- Üç boyutta donatı sağlar.
- Yüksek kotlara ve yatayda uzak mesafelerde betonun pompalanmasını kolaylaştırır.
- Segregasyonu azaltır.
- Betonu geçirimsizleştirir.
- Betonun darbeye karşı dayanımını artırır.
- Betonun aşınma dayanımını artırır.
- Asit ve bazlardan etkilenmez.
- Donatının korozyonunu ve paslanmasını geciktirir.
- Betonun dağılmasını önler. Yapılar depremde az hasar görür ve çökme riski azalır.
- Betonun yorulma dayanımını kazandırır ve beton hizmet ömrünü artırır.
- Yüzey tozmasını ve pullanmasını engeller.

Polipropilen liflerin en ideal kullanım yeri saha betonlarıdır. Demir hasırı kullanım gereğini ortadan kaldırır, yüzey rötre çatlaklarını % 80- 100 oranında engeller. Köşe ve derz kırılmalarına izin vermez. Polipropilen lifler şap betonlarında yapıya ölü donatı ağırlığı getirmediği (demir hasır 3 kg, metal lifler 1.5 kg olmasına rağmen metrekaşe yükü polipropilen lifler için sadece 0.09 kg dur) için tesviye, koruma ve eğim şapları için idealdir. Su yapılarında, polipropilen lifleri antibakteriyel özellikler de taşımaktadır. Bu nedenle polipropilen lifler ile mikro donatılandırılmış betonlarda mantar, küf, yosun, bakteri oluşumu ya hiç gözlenmez ya da geciktirilmektedir[37].

Polipropilen lifler dört grupta yer almaktadırlar. Bunlar M tipi, F tipi, PF tipi ve kompozit sistemlerdir. Saha ve prefabrike betonlarında M ve F tipleri en çok kullanılan liflerdendir. Bu liflerin fiziksel özellikleri Tablo 1.2 de verilmektedir[37].

Tablo 1.2. Polipropilen liflerin özellikleri[37]

	M tipi	F tipi
İçerik	100% saf polipropilen	100% saf polipropilen
Lif tipi	Multifilament	Fibrile
Görünüm	Tel lifler 	Fibrile ağ biçimli lifler 
Standart	ASTM C-1116-1997 Type III	ASTM C-1116-1997 Type III
Lif uzunluğu	3-6-9-12-15-19-25-31-37-46-51 veya karışık uzunluk	3-6-9-12-15-19-25-31-37-46-51 veya karışık uzunluk
Çekme dayanımı	700 N/mm ²	400 N/mm ²
Young modülü	3500 N/mm ²	2600 N/mm ²
Uzama	%20	%15
yoğunluk	0.91 g/cm ³	0.91 g/cm ³
Renk	Transparan	Transparan
Yumuşama noktası	150 °C	150 °C
Erime noktası	160 °C	160 °C
Asit etkisi	stabil	stabil

Polipropilen lifler otopark, garajlarda ve ağır trafik altında hizmet veren zeminlerin aşınmasını azaltan bir faktördür. Beton içerisinde üç boyutta yayılarak, betonun tüm kesiti boyunca mikro donatı sağlar. Betonun homojen olmasını sağlar ve süneklik kazandırır. Polipropilen lifler prefabrike elemanlarda, kalıptan çıkarma esnasında oluşan kırılmaları azaltır. Elemanın detay parçalarında mikro donatı sağlar[38-42].

Genellikle polypropilen ve çelik lifler kolonların yangın dayanımını artırmaktadır. Polypropilen lifler betonun kabuk olmasını önler ve sünekliğini artırır.[43]

1 m³ beton, sıva harcı veya şap için ASTM C-1116 standardına göre hacimce % 0.1 oranında 0.9 kg polipropilen lifler kullanılmalıdır.

Polipropilen lifler aşağıdaki amaçlar için kullanılamaz:

- Dış yüklerin açtığı yapısal çatlakların önlenmesi
- Yapıların taşıma gücünün artırılması
- Sünmenin azaltılması
- Taşıyıcı donatının miktarının azaltılması
- Kiriş, kolon ve döşemelerin kesitlerinin inceltilmesi, beton bakımı ve kür maddesi kullanımı yerine.

1.6. Lirefa Özellikleri

DDS (destruction defence system) Lirefa ürünlerinden biridir. Deprem durumu dikkate alındığında bu sistem için “ Depreme Dayanıklı Duvar Kaplama Sistemi” tanımlaması yapılabilir. Bazen buna deprem kumaşı adıyla da anılmaktadır. DDS, deprem gibi binaların yıkılmasına neden olan afetlerde insanların can güvenliğini sağlamak ve mal kayıplarını azaltmak amacıyla geliştirilen bir savunma sistemidir[44].

Bu savunma sisteminin kumaş ve yapıştırıcı olmak üzere iki ana ögesi bulunmaktadır. Deprem kumaşı betonarme, yığma ve çelik yapıların duvarlarında rahatlıkla tercih edilebilir ve kolaylıkla uygulanabilir. Deprem kumaşı, konutlarda kullanımı aksatmayacak şekilde kısa sürede rahatlıkla uygulanabilmektedir. Diğer taraftan Deprem Yönetmeliği’nde belirtilen önem sırasına göre aşağıdaki beş grup yapıda da duvarların deprem dayanıklılığını arttırmak amacıyla kullanılabilir.

1. Grup yapılar: Deprem sonrası kullanımı gereken yapılar (Hasteneler, Dispanserler, Sağlık Ocakları, İtfaiye Bina ve Tesisleri, PTT ve diğer haberleşme Tesisleri, Enerji Üretim ve Dağıtım Tesisleri, Vilayet, kaymakamlık ve belediye binaları, Yönetim binaları, İlk yardım ve afet planlama istasyonları v.b)

2. Grup Yapılar: Tehlikeli Madde İçeren Binalar (Toksik maddelerin bulunduğu binalar, Patlayıcı maddelerin bulunduğu binalar)

3. Grup yapılar: İnsanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu, değerli eşyaların saklandığı yapılar (Okullar, Dershaneler, Yurt ve yatakhaneler, Askeri kışlalar, Ceza evleri, Müzeler v.b)

4. Grup yapılar: İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar (Spor tesisleri, Sinema, Tiyatro ve konser salonları v.b)

5. Grup yapılar: Diğer binalar (Konutlar, İşyerleri, Oteller, Endüstri yapıları v.b)

DDS ya da deprem kumaşı Betonarme yapıların dolgu duvarlarında, Çelik yapıların bölme duvarlarında, Yığma yapıların taşıyıcı duvarlarında, Çatılarda kalkan duvarlarında, Parapetlerde, uygulanabilmektedir.

Binalarda farklı oturmalarından ve sıcaklık değişimlerinden oluşan çatlakların açılmasını engelleyici savunma yapması, duvarlarda bakteri ve mantar oluşumunu engellemesi, Depremde duvar bütünlüğünü uzun süre koruyabilmesi, insanların deprem sırasında binadan çıkışına olanak tanıyacak şekilde kaçış yollarının kapanmasını engellemesi, ve yeni yapılacak yapılarda uygulanmasına karar verilirse, duvarda 1 cm sıva yeterli olacağından gereksiz sıva ağırlığından yapıyı kurtarması, çatılarda kalkan duvarlarına DDS'nin üstünlüklerinden sayılabilir.

DDS, çelik malzemeler gibi yorulma probleminin bulunmaması, yapının sadece merdiven boşlukları ve koridorlarında kullanılması durumunda bile deprem sırasında can güvenliği açısından avantaj sağlanmaktadır.

DDS, Alman teknolojisi ile geliştirilmiştir. Cam elyaf lif içermektedir. Alev almaz. Isıya dayanıklıdır (Sürekli 500 °C; kısa süreli 660 °C). Çekme dayanımı çok yüksektir. Üstün esneklik özelliğine sahiptir. Lif hammaddeleri çevre dostudur. Zehirlenme riski yoktur. Cam elyaf için uygun olan genel kesici aletlerle işlem yapılabilir. Kanserojen değildir. Dünya Sağlık Örgütü'nden (WHO) onaylıdır. DDS kumaşının teknik özellikleri tablo 1.3'te verilmektedir.

Tablo 1.3. DDS(Lirefa) kumaşının teknik özellikleri[44].

Özellik	Miktar
Yoğunluk	2600 kg/m ³
Metrekare kütlesi	510g/m ²
Kopma Gücü	~ 1000 N/cm
Çekme Dayanımı	3400 MPa
Elastisite Modülü	73000 MPa
Kopmada Uzama	% 3
Genişlik	2750–5200 mm

DDS uygulanacak duvar yüzeyine önce özel bir yapıştırıcı sürülmekte, daha sonra bunun üzerine deprem kumaşı yapıştırılmaktadır. Deprem kumaşının en önemli özelliklerinden biri duvar kağıdı kadar kolay ve hızlı uygulanabilmesidir. Temiz, kokusuz, hızlı kuruyan özelliği sayesinde birkaç saatliğine boşaltılan odalara uygulanabilmektedir.

Oda yüksekliğine göre ayarlanarak tek parça halinde duvara uygulanabilir. Kapı ve pencere boşlukları uygulama esnasında kesilebilmektedir. Reçine esaslı özel elastik yapıştırıcısıyla kaba sıva üzerine de uygulanabilir. Kullanımda olan yapıların duvarlarında herhangi bir kırım işi gerektirmeden mevcut son kat kaplamaların üzerine uygulanabilir. Eğer uygulanacak zemin bozuksa önce onarım yapıp, sonra yine DDS uygulanabilir.

Birkaç saat içinde tamamlanan işlem sonunda DDS uygulanan mekan kullanılabilir duruma gelmektedir. Tam kuruması için 24 saat gerekmektedir. Üstüne boya türü bir işlem yapılacaksa 48 saat sonra yapılabilir[44].

1.7. Polyetilen Özellikleri

Polyetilen, PE, polimerize olan etilenden üretilmektedir. PE iki gruba ayrılabilir. Biri aşırı derecede yüksek basınç altında ve diğeri ise orta dereceli basınç altında üretilmektedir. Onlar LD- Polyetilen (low density, LDPE) ve HD- Polyetilen (High density, HDPE) adıyla anılmaktadır. PE, genellikle çok kullanılmış, termoplastik olarak iyi özellikleriyle beraber ucuz bir malzemedir.

Polyetilenlerin yoğunlukları $0.91\sim 0.96 \text{ g/cm}^3$ civarında ve düşük sıcaklıklarda bile iyi darbe direncine sahiptir. HDPE sert ve sağlam bir malzemedir. PE, özellikle HDPE, düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma dayanımı vardır. Rengi beyaz ya da renksizdir. PE, kimyasal maddelere karşı dayanıklılık özellikleri vardır. PE, su emmeyen bir malzemedir.

PE, standart kesici takımlarla tercihen çelik ve ağaç kesicilerle işlenmeye müsaittir. Normal olarak, işlenmede soğutma işlemine gerek yoktur. Polyetilenler, başka termoplastiklerden özellikle polyamiten daha ucuzdur.

PE higroskopik olmayan ve su tanklarında, borularda, bağlantılarında, folyo ve plastik torbalarda kullanılan bir malzemedir. Bu malzemelerin iyi bir elektrik yalıtım özellikleri sebebiyle elektrik sanayisinde yalıtım v.b. yerlerde kullanılmaktadır[45,46]. HDPE yüksek sıcaklığa (120 derece küçük periyotta, 110 derece sürekli olarak) dayanımlıdır. Yüksek yoğunluklu polyetilenin (HDPE) özellikleri Tablo 1.4'te verilmektedir.

Tablo 1.4. Yüksek yoğunluklu polyetilenin (HDPE) özellikleri[45,46].

Özellik	Birim	Nominal miktarı
Su emmesi (24 saat)	%	0.03
Çekme dayanımı (akma)	MPa	32
Eğilme dayanımı	MPa	25
Basınç dayanımı (10% sehim)	MPa	32
Kesme dayanımı	MPa	23
Maksimum sıcaklık	°C	120
Minimum sıcaklık	°C	-100
Eğilme modülü	MPa	1379
Yoğunluk	g/cc	0.955
Lineer ısı genleşme katsayısı	$1/^\circ\text{F}$	1.25×10^{-4}
Ergime noktası	°C	130

1.8. Polyamid Özellikleri

Polyamid ya da PA bir diyamin ve bir dikarbolik asitten yapılmaktadır. Polyamidin rengi beyaz ya da açık sarı, sürtünme katsayısı düşük, aşınma dayanımı, ısıya karşı dayanımı darbe dayanımı yüksektir. PA su emme özelliğine sahiptir ve bu durum onun izolasyon, çekme dayanımı ve rijitliği gibi bazı özelliklerini değiştirmektedir. Emilen suyun miktarı arttıkça darbe dayanımı da artmaktadır. Polyamid delinebilen, torna tezgâhı ve testere ile kesilebilen, cıvatalanabilen bir malzemedir. Kesme işleminde soğutmak iyi sonuçlar verebilmektedir.

Polyamid kendisine çözücü yapıştırıcı ile yapışabilmektedir. Epoksi esaslı yapıştırıcılarla organik olmayan maddelere yapıştırabilme özeliği vardır. Yüzeylerin yapıştırmadan önce temizlenmesi, yağ, kir vb. maddelerden arındırılarak pürüzlendirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte Polyamidler sıcak ya da sürtünmeyle birleştirilirse daha iyi sonuçlar vermektedir. Polyamid sanayide boşluklu cıvatalarda, dişli tekerleklerde, bağlantılarda v.b. ve yüksek aşınma dayanımı gerekli olan yerlerde iyi özelliklerle kullanılmaktadır[47,48].

Polyamidler Polyetilenlerden daha pahalı malzemedir ve bu nedenle de BRB işlerinde tavsiye edilmemesi nedeniyle burada polyamidlerin özellikleri üzerinde durulmamış ancak BRB'lerin burkulmalarının sınırlandırılmasındaki etkinliğinin araştırılması amacıyla deneylerde kullanılmıştır.

Bu araştırmada, HDPE ve PA burkulmayı sınırlandıran elemanlar olarak kullanılmıştır. PA levhaları polietilene göre elastisite modülünün yüksek olması nedeniyle iyi sonuçlar vermekte ancak ekonomik olmadığından özel yerler dışında kullanımı önerilmemektedir.

1.9. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Geçmişte, çeliğin ve çelik elemanların duktilitesi nedeniyle, onların mükemmel performansı, deprem yükleri karşısında dikkate alınıp hesaba katılmıştır. Ancak, çelik yapıların davranışlarının büyük depremlerden (1985 Mexico City, 1994 Northridge, 1995 Kobe, ve büyük geçmiş depremler) sonra yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu büyük depremlerin

esnasında, çelik yapılarda büyük hasarlar meydana gelmiştir. Bu yıkılmalardan sonra, çaprazlı çerçevelerin yapımı, bir alternatif sistem olarak hızlandırılmıştır[10,15].

Çaprazlı çerçeveler başlangıçta rüzgar yükü için tasarlanmıştır. Tipik olarak, bu çerçeveler yatay yükler için kullanılmaktadır. 1970 den sonra çaprazlı çerçeveler deprem yükü için yaygın olarak kullanılmaktadır[15].

Çaprazlı çerçevelerin araştırmalarında, merkezi ve dışmerkez çerçeveler olmak üzere, iki tip çerçeve önerilmiştir. Her iki tipte, burkulma etkisi veya narinlik problemi birçok deneysel ve teorik araştırmalara konu olmuştur. Bu araştırmalar, narinlik oranı, mesnet durumları, kesit şekilleri olmak üzere, üç büyük parametreye bağlı olmaktadır [10,15].

Bir ince çapraz, yüksek narinlik oranı ile yüksek basınç gerilmesine sahip olmaktadır. İnce çaprazlar, az miktarda enerji yutmaktadır. Elastik olmayan deformasyon yerel burkulmasını artırır ve tekrarlı yükler altında çaprazın ömrünü azaltmaktadır (Goel, 1998).[10,49].

Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlarla ilgili ilk araştırma Yoshino [1, 50] vd. (1971) tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar betonarme panellerin içinde sınırlandırılmış, aderanssız malzemelerle ayrılmış çelik düz levhaları deneye tabi tutmuşlardır. Yoshino bu araştırmadan, enerji tüketme kapasitesinin büyük miktarda arttığını belirtmektedir.

Wakabayashi vd. [51], 1976 yılında birçok deney sistemleri geliştirmişlerdir. Çaprazın yapışmaması durumunda daha iyi sonuç aldıklarını belirtmişlerdir.

Normal BRB'ler için, ilk deneyler ve araştırmalar Kimura vd. tarafından 1976 yıllarında yapılmıştır. Kimura [52] ve arkadaşları 1976 yılında tarafından yapılan çalışmada çelik çaprazları, çelik tüplerin içine yerleştirerek deneye tabi tutmuşlardır. Deneylerde çelik çaprazların başlangıç burkulmalarının tutulduğunu görmüştür.

Mochizuki vd. [17], 1979 yılında kare kesitli betonarme elemanların içine yerleştirilmiş çelik çaprazları araştırdı. Bu araştırma, tekrarlanan yüklerin altında olan beton, önemli miktarda kendi kapasitesini çatladıktan sonra kaybettiğini göstermektedir.

1980 yılında Black[53] vd. birçok eksenel yüklenmiş çelik desteklerin histeretik davranışını incelemiştirler. Bu araştırmada Narinlik oranı, mesnet durumları, kesit Şekilleri farklı olarak alınmış ve deneyler yapılmıştır. Narinlik oranları, 40 dan 120 ye kadar ve kesit Şekilleri; U ve çift U profilleri, korniyer ve çift korniyer, I profilleri, yuvarlak ve kare tüp

seçilmiştir. Mesnet durumları iki ucu mafsallı, bir ucu mafsallı ve bir ucu ankastre olarak tasarlanmıştır. Bütün numuneler tekrarlı ve eksenel yüklenmişlerdir.

1988 yılında, Fujimoto, burkulmayı sınırlandıran elemanınlar için bir tasarım metodu önermiştir. Bu yöntem, çelik tüpün içine yerleştirilmiş çaprazlar için yapılmıştır [22].

Nagao vd., 1990 yılında, Japonya’ da, bir geniş başlıklı çelik kirişi, dörtgen kesitli bir betonarme elemanın içine yerleştirerek denemişlerdir. Bu tasarımda çelik donatılar burkulmayı sınırlandıran eleman olarak kullanılmıştır. Betonun dayanımı ve rijitliği ve donatıları Nagao tarafından araştırılmıştır[54].

Deneysel ve teorik araştırmalarla birlikte, BRB işlemleri pratikte ve gerçek projelerde de yapılmaktadır. Arup (1996), burkulmaları sınırlandırılmış çaprazları, Japonya’ da birçok projelerde kullanmıştır. Onlardan biri, Osaka şehrindeki uluslararası Ticaret Merkezi projesi, ilk proje olarak, 1996 yılında yapılmıştır (Şekil 1.33)[55].



Şekil 1.33. Japonya’ da, Osaka şehrindeki uluslararası Ticaret Merkezi projesi[55].

Arup (1996), doğrusal olmayan itme (pushover) analizleri tekniklerini kullanarak, BRB'li çerçevelerin üstünlüklerini araştırmıştır. Yapılan analizlerde, üç tip sistemin davranışı, CBF(centrically braced frames), EBF(eccentrically braced frame) ve BRB'li sistem olarak karşılaştırılmıştır. Buna göre BRB'li çerçeve sistemlerin daha fazla yük taşıdığı görülmüştür [55].

1999 yılında, Wada ve İsa Kimura, Nippon Steel Corporation şirketinin başmühendisleri Japonya' da yapı teknolojisinde BRB sistemleri yaygınlaştırmıştır. Bu mühendisler hem geleneksel BRB'leri ve hem de panelli BRB'leri büyük projelerde kullanmışlardır[56].

BRBF sistemlerin, analitik analizlerinden biri, ve en erken olanı Amerika'da, Kaliforniya üniversitesinde, Bitki ve Çevre İlimleri Fakültesi yerinde düzenlenen yapıdır. Bu bina Amerika'da BRBF sistemli ilk yapıdır. Bu yapının tasarımı ve analizi için, 1999 yılında, Clark vd., bir üç katlı BRBF sistemi olan yapının çeşitli doğrusal olmayan analizlerini yapmışlardır. Analizlerde kiriş-kolon birleşim noktalarının momentleri dikkate alınmıştır. O zaman, BRBF sistemleri için, standart koşullarının mevcut olmadığı nedeniyle, 1994 UBC yöntemi, BRB'lerin ebatlarını hesaplaması için kullanmıştır. Araştırmacılar, yük faktörünü, R_w , 10 olarak kabul etmişlerdir[57].

Amerika'nın yapı standartları, 2005 e kadar, BRBF sistemlerinin tasarımı için, yeterli değildir. Ancak tasarım için sadece deneylere bağlı olarak bazı koşullar önerilmiştir. 2005 yılında AISC standardında, bazı Çatı yerdeğiştirmesi (inç) 'BF sistemlerin tasarımı için 16. konu olarak eklenmiştir.

2000 yılında, Sabelli [58] bir araştırma grubunun rehberi olarak, büyük çalışmalar, BRB'li sistemlerin davranışlarını anlamak ve onların tasarımında kullanılabilen parametrelerini belirlemek için deneysel ve teorik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmalarda, 3 katlı ve 6 katlı yapılarda, çeşitli çaprazlar kullanmasıyla doğrusal olmayan dinamik analiz (SNAP-2DX) programı ile yapılmıştır. Bu araştırmalar, BRBF sistemlerine ilgili, AISC ve SEAOC standartlarında sonradan gelen koşulların temel kaynağı olmuştur. Öyle ki 2001 yılında yayınlanan, AISC[59] ve SEAOC standartlarında burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlara göre ilk defa olarak koşullar yazılmıştır. Adı gelen standartlar, bir kaç defa değişimden sonra, 2005 yılında, AISC 2005[60] standardı adıyla kullanılmaktadır.

2002 yılında, Higgins ve Newell [61] yeni bir BRBF tiplerini önermişlerdir. Onlar çekirdek ve tüp arasında olan sertleşmiş betonun yerine yapışmayan agrega, özellikle kum malzemesi kullanmışlardır. Kum iki uçta olan çelik kapaklarla aksel olarak basılmıştır. Bu deneylerin sonucu, tüpünün çekirdek arasını betonla doldurulmuş sonuçlarla aynı olmuştur.

2003 yılında, Fahnstock, Sause ve Ricles, Lehigh üniversitesinde BRBF sistemlerin üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, AISC 2001 standardının tavsiyeleri dikkate alınarak dört katlı yapı dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın amacı, BRBF standartlarını pratik bir numunede karşılaştırması olmakta, çekirdeğin akma türü, çekirdeğin kırılma türü, maksimum süneklik ve kalıcı süneklik incelenmesi olmuştur. Elde ettikleri sonuçlara göre, standart koşulları ile düzeltilmiş BRBF yapının davranışı, kolayca tüm istekleri karşılanmıştır. Böyle ki BRB elemanları gerekli sünekliğe sahip olmakla, yük etkisinden sonra kendi servislerine devam etmişler ve genellikle BRBF sistemin davranışı beklendiğinden çok iyi olmuştur[62].

Sabelli vd, (2003), bir teorik çalışmada, BRB'lı çerçevelerin deprem enerjisinin absorbe etmesini incelemişlerdir[13].

2004 de Xie tarafından, çekirdek ile harcın arasında aderans olmaması esasına dayanan deneyler yapılmıştır [1].

Black vd.(2004) [63], BRB tasarımı için, bazı önerilerde bulunmuştur. Black vd.'ne göre, BRB sistemlerde üç belirgin burkulma modunun bulunduğunu belirtmişlerdir. Bunlar: çaprazın tamamının eğilmesi, yüksek modlarda çekirdeğin burkulması tüpün dışında, çelik çekirdeğin çıkıntısının plastik burkulmasıdır.

Kim ve Choi (2004) [64] parametrik olarak yaptıkları çalışmada, BRB sistemlerini modelleyerek, lineer olmayan statik ve dinamik analizlerini yapmıştır. Çalışmada, BRB yapılarına sönüm eşdeğerliği için bir bağıntı ve öneri getirmişlerdir.

Carden (2006) vd. [65], tek korniyerli X çaprazlı çerçeve sistemi bir köprünün, çelik ana kirişin sismik performansını araştırmışlardır. Bu raporda, tek korniyerler, tekrarlanan yükler altında denenmiştir. Sonuçlar, tek korniyerin iyi bağlanması durumunda tekrarlanan yüklerle karşı performansı ve aksel Şekildeğiştirmesinin % 6 iyileştiğini göstermektedir.

Tremblay vd.(2006) [66], yaptıkları deneylerde, tüp içindeki çekirdeğin alanının azalmasını araştırmışlardır.

Hyunhoon Choi vd, (2006) da BRB'lı çerçevelerin tasarımı için enerji metodunu kullanmışlardır. Bu yöntemde, histeretik enerji spektromu, kullanılmasıyla, depreme karşı çerçevelerde gerekli BRB'leri hesaplamışlardır[67].

Ravi Kumar (2007) vd., BRB'lı çerçevelerin davranışlarını incelemişlerdir. Bunlar kendi araştırmalarında, deprem yükünün etkisini BRBlı elemanlarda ve genellikle çerçevelerde incelemişlerdir[68].

Aydına (2008), mevcut yapıların depreme karşı güçlendirmesi için, çelik çaprazların uygun yerlerini, araştırıp ve uygun sönümleyicilerle karşılaştırmıştır[69].

Chung vd., (2008) BRB'lı çerçevelerde, ortadaki levha üzerinde basınç yükünün etkisini araştırmıştır[70].

Young vd., (2009) bir deneysel çalışmada, BRB elemanları teşkil eden elemanların etkisini incelemiştir[71].

Asgarian ve arkadaşı (2009) da yapıkları araştırmalarda, dört tip BRB'lı çerçevelerde aşırı dayanım, süneklik, modifikasyon tepki faktörlerini değerlendirmişlerdir. Bu BRB tipleri, diyagonal, X, V ve ters V çaprazlarıdır. Aşırı dayanım faktörü V, ters V, X ve diyagonal çaprazlar için sırası ile 1.64, 1.76, 1.76 ve 1.51 hesaplanmıştır. Süneklik faktörü V, ters V, X ve diyagonal çaprazlar için sırası ile 4.96, 5.2, 4.98 ve 4.82 ele getirilmiştir. Modifikasyon tepki faktörü V, ters V, X ve diyagonal çaprazlar için izin verilen gerilme metodunda sırası ile 11.72, 13.16, 12.58 ve 10.51 olarak elde edilmiştir. Bu faktör nihai dayanım metodunda sırası ile, 8.14, 9.4, 8.73 ve 7 olarak hesaplanmıştır[72].

Di sarno ve arkadaşı (2009) rijitliği yeterli olmayan moment aktaran çerçevelerde diyagonal çaprazların kullanımını araştırdı. Bu araştırmada, üç muhtelif çaprazlı sistemler, SCBFs , BRBFs, MBFs olarak incelenmiştir. Sonuçlar, MBF çerçevesi en etkili ve ekonomik çözüm seçilmiştir. BRBF sistemler de MBF sistemler gibi çok iyi sonuç vermiş ancak ekonomi bakımından önerilmemiştir[4]

Oguz c. Celik ve arkadaşı (2009) BRB metodunu köprülerin onarımı için teorik bir çalışmada incelemişlerdir. Bunlar BRB'leri düktil sigorta olarak kullanmışlardır ve BRB metodunun işlenebilirliğini göstermişlerdir[3].

Fadi Farhat vd, (2009) burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların işlemini, mevcut yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde, kullanılıp kullanılmayacağını genetik algoritme yöntemi kullanarak teorik bir çalışma ile araştırmıştır[73].

1.10. BRB'lerde Prefabrikasyon İşlemleri

Burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların tasarım ve yapımı prefabrike halinde yapılmaktadır. Mevcut yapıların çaprazlarını BRB metotlarla güçlendirmek ve yeni yapılan çaprazlarda, prefabrikasyon önemli bir rol oynamaktadır.

Gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılan prefabrike yapı sistemleri son yirmi yıldan beri çoğu ülkelerde de kullanılmaktadır. Prefabrikasyon tekniği ile inşa edilen yapılara prefabrike adı verilmektedir. Herhangi bir inşaat malzemesi, yapı elemanı, yapı bileşeni , makine veya teçhizatının atölye veya fabrikalarda seri olarak imal edildikten sonra her türlü yapı inşaatının şantiyesinde, sadece yerleştirme ve montaj işlerine tabi tutulmasına prefabrikasyon adı verilmektedir. Günümüzde hızlı nüfus artışına paralel olarak ortaya çıkan barınma ve diğer ihtiyaçların karşılanmasında kullanılan prefabrike yapılar inşaat süresini kısaltmakta dolayısıyla da ihtiyaçların karşılanmasına da hız kazandırmaktadır.

Prefabrike elemanlara dayalı teknolojilerin gelişmesi ve yaygınlaşması bazı ön şartların varlığına bağlıdır. Bunlar:

- Büyük ölçekte bir yapı açığının süratle giderilmesi isteği
- El emeğinin pahalılığı
- Vasıflı iş gücünün azlığı
- Teknik gelişme düzeyinin yeterliliği

şeklinde sıralanabilmektedir. Şekil 1.34'te montaja hazırlanmış BRB'ler görünmektedir.



Şekil 1.34. Prefabrike BRB'lerden bir numune[1].

1.11. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora çalışması olarak gerçekleştirilen bu çalışmanın temel amacı burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlarda prefabrike elemanların kullanımını ve davranışını deneysel olarak incelemektir. Bu amaçla farklı prefabrike elemanlar; polyetilen ve polyamid levhalar, donatılı beton, çelik lifli beton, polypropilen lifli beton ve çelik lifle lirefa kumaşlı beton prefabrike eleman olarak hazırlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, günümüzde, çelik yapılarda, yaygın olarak kullanılan üç tip çelik çaprazın, burkulmasının sınırlandırılması incelenmektedir. Bunlar; U65 ve 2L60×60×6 profillerinden ve 100×10 levhasından oluşturulmuştur. Burkulmayı sınırlandıran prefabrike elemanlar ise; betonarme, çelik lifli beton, polypropilen lifli beton ve lirefa sarılmış çelik lifli betonla polyetilen ve polyamid levhalardan oluşturulmuştur.

Deneyle, çelik çaprazların burkulmalarının sınırlandırılması amacıyla merkezi basınç yükü uygulanarak yapılmıştır. Deneyle sonucunda bu yeni metotla burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların sonuçları birbiri ile karşılaştırılmakta, burkulma şekilleri ve davranışları incelenmekte, bu yöntemin uygulanabilirliği maliyeti de dikkate alınarak araştırılmaktadır.

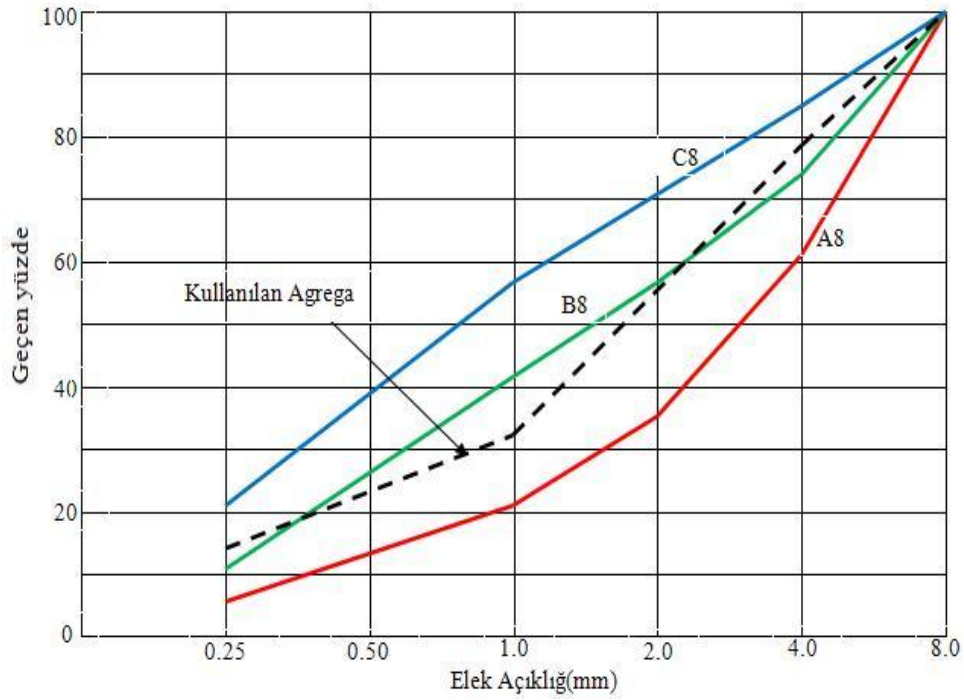
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çelik çerçeve sistemlerde, prefabrike elemanlarla burkulması sınırlandırılmış çaprazların deneysel olarak incelenmesi için gerçekleştirilen çalışmanın bu bölümünde deneylerde kullanılan malzemenin özellikleri ve gerçekleştirilen deneylerle ilgili bilgiler verilmektedir.

2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

2.1.1. Agregat Özellikleri

Çalışmanın amacına uygun olarak, çelik çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için hazırlanan prefabrike elemanların üretiminde kullanılan agreganın granülometrisi Şekil 2.1. de verilmektedir.



Şekil 2.1. Agregat granülometrisi

Maksimum tane boyutu, kalıpların boyutları küçük olması nedeni ile, 8 mm olarak alınmıştır. Gerek çelik lifli, polipropilen lifli ve gerekse geleneksel betonlarda aynı tür agrega, aynı granülometride kullanılmıştır. Betonların üretiminde kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Tablo 2.1 de verilmektedir.

Tablo 2.1. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Agrega Boyutu	Gevşek birim ağırlık (kg/m^3)	Özgül ağırlık (kg/m^3)		Su emme (%)
		Kuru	Doygun	
İri (>4mm)	1435	2712	2692	0.49
İnce (<4mm)	1486	2668	2685	0.55

2.1.2. Çimento Özellikleri

Geleneksel ve lifli betonların üretiminde, Aşkale Çimento Fabrikası'nda üretilen CEM II 32.5 tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimento çeşidi 28 günlük karakteristik basınç dayanımı 32.5 MPa olan Portland çimentosudur.

2.1.3. Karma Suyu Özellikleri

Betonların üretiminde karma suyu olarak Yapı ve Malzeme laboratuvarında mevcut olan içme suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Katkı Maddesi Özellikleri

Geleneksel ve lifli betonların üretiminde kimyasal katkı maddesi olarak süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Üretimlerde kullanılan süper akışkanlaştırıcı, karışıma çimento

ağırlığının %1 si oranında katılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi karışım suyuna ilave edilerek betoniyerde bulunan malzemelere ilave edilmiştir.

2.1.5. Donatı Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan donatılar 8 mm çaplı, nervürlü inşaat çeliği olarak seçilmiştir. Kullanılan çelik üzerinde 600 kN kapasiteli deney aleti ile (Şekil 2.2) TS 138 EN 10002-1 [74] ve TS 708 [75]'e uygun olarak merkezi çekme deneyi gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar Tablo 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Üniversal deney aleti

Tablo 2.2. Kullanılan donatıların mekanik özellikleri

Çap (mm)	Ortalama çekme dayanımı (MPa)	Ortalama akma dayanımı (MPa)	Kopma uzaması(%)
8	619	430	21

2.1.6. Çelik Lif Özellikleri

Bu deneysel çalışma kapsamında betonlarda kullanılan çelik lifler, BEKAERT-BEKSA firmasının üretmiş olduğu TS10513' e uygun Dramix marka (RC 65/35) kodlu çelik liftir. Bu lifler bir birlerine beton içerisinde homojen dağılımı sağlayan, suda kolayca çözünebilen özel tutkallar yapıştırılmış demetler halinde standart torbalarda satılmaktadır. Bu lifler soğukta çekilmiş, düşük karbonlu ve yüksek çekme dayanımına sahiptirler. Çalışmada yalnızca bir tip lif kullanılmıştır. Çelik lifin özellikleri Tablo 2.3.'de, biçimleri ise Şekil 2.3. 'de verilmektedir.

Tablo 2.3. Beton üretimlerinde kullanılan çelik lifin özellikleri

Lif tipi	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Görünüm oranı (boy/çap)	Birim ağırlık (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)
RC 65/35	35	0.55	64	7.85	1100



Şekil 2.3. Kullanılan çelik lifler

2.1.7. Polypropilen Liflerin Özellikleri

Tez konusu deneylerde, F19 adıyla anılan polypropilen lifler kullanılmıştır. Şekil 2.4'te F19 polypropilen liflerin şekli gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Deneylerde kullanılan F19 polypropilen liflerin görünümü

2.1.8. Lirefa (DDS) Özellikleri

Tez konusu deneylerde yoğunluğu 2600 kg/m^3 , çekme dayanımı 3400 MPa ve kopmada uzaması 3% olan lirefa (DDS-Destruction Defence System) kumaşı kullanılmıştır. Şekil 2.5'te, lirefa kumaşından bir görünüm verilmektedir.



Şekil. 2.5. Deneylerde kullanılan lirefa kumaşı

2.1.9. Polyetilen Levhaların Özellikleri

Çalışma kapsamında çelik çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için kullanılan polyetilen levhalar İran da Tebriz ilinden temin edilmiştir. Polyetilen levhalar HDPE, (High Density PolyEthylene), aşırı derecede yüksek basınç altında üretilmiştir. Polyetilen levhalar, dünyada ilk defa, çelik çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için bu çalışmada kullanılmıştır. Polyetilen levhaları 4 mm den 120 mm kalınlığına kadar üretilmektedir. Bu levhalar büyük boyutlarda örneğin 1.5 x 2 m üretilmekte ve satılmaktadır. Bu levhalar çelik kesicilerle kesilip ve istenilen boyutlarda hazırlanmaktadır. Kullanılan polyetilen levhaların birim ağırlığı 960 kg/m^3 ve elastisite modülü 1379 MPa dır. deneylerde bu levhaların kalınlığı 45 mm olarak seçilmiştir. Kullanılan HDPE levhaların özellikleri Tablo 2.4.'de ve bir görünüm ise şekil 2.6.da verilmektedir.

Tablo 2.4. kullanılan polyetilen levhaların özellikleri

Polyetilen tipi	Uzunluk (mm)	Kalınlığı (mm)	Birim ağırlık (g/cm^3)	Elastisite modülü (MPa)
HDPE	850	45	0.960	1379



Şekil 2.6. Polyetilen levhalardan bir görünüm

2.1.10. Polyamid Levhaların Özellikleri

Çalışmanın amacına uygun olarak gerçekleştirilen deneylerde, çelik çaprazların burkulmalarının sınırlandırılmasında, Polyamid(PA) levhalar kullanılmıştır. Bu levhalarda İran – Tebriz'den temin edilmiştir. Polyamid levhalar da polyetilen levhalar gibi dünyada ilk defa BRB (Buckling Restrained Braces) işlemlerinde bu çalışmada kullanılmıştır. Polyamid levhaları 2 mm den 120 mm kalınlığına kadar üretilmektedir. Polyamid boru şeklinde de üretilmektedir. Bu levhalar büyük boyutlarda örneğin 1.5 × 2 m üretilmekte ve pazarlanmaktadır. Bu levhalar çelik kesicilerle kesilip ve istediği boyutlarda hazırlanmaktadır. Polyamid delinebilen, torna tezgâhı ve testere ile kesilebilen, cıvatalanabilen bir malzemedir. Kesme işleminde soğutmak iyi sonuçlar verebilmektedir. Kullanılan polyamid levhaların birim ağırlığı 1100 kg/m³ ve elastisite modülü 2500 MPa dır. Deneylerde levhaların kalınlığı 50 mm olarak seçilmiştir. Bu levhaların yüksek dayanımı ve dayanıklılığı nedeniyle polyetilen levhalardan daha pahalı bir üründür. Kullanılan polyamid levhaların özellikleri Tablo 2.5.'de verilmektedir. Şekil 2.7. de polyamid levhalarından bir görünüm verilmektedir.

Tablo 2.5. Kullanılan polyamid levhaların özellikleri

Polyamid tipi	Uzunluk (mm)	Kalınlığı (mm)	Birim ağırlık (g/cm ³)	Elastisite modülü (MPa)
PA	850	50	1.1	2500



Şekil 2.7. Polyamid levhalardan bir görünüm

2.1.11. Kullanılan Çelik Profillerin Özellikleri

Bu çalışma kapsamında, levha (100×10), L60 ve U65 profilleri çelik çapraz olarak deneylerde kullanılmıştır. Bu profillerin mekanik özelliklerini belirlemek için KTU yapı ve malzeme laboratuvarında çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo 2.6. da verilmektedir.

Tablo 2.6. Çelik çaprazların özellikleri

Çelik profil türü	Akma dayanımı (MPa)	Maksimum çekme dayanımı (MPa)	Kopma birim uzaması (%)
Levha	247	370	
L60×60×6	285	411	31.4
U65	310	454	20.6

2.1.12. Beton Üretimi, Yerleştirilmesi ve Bakımı

Üretilen betonların bileşim hesabı TS 802 [76]'de belirtilen mutlak hacim yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Agrega oranları, çimento dozu, mineral katkı maddesi ilavesi, S/Ç oranı gibi birçok parametre değiştirilerek, hedeflenen basınç dayanımı kriterine göre deneme karışımları yapılarak, Tablo 2.7.'de verilen karışım oranlarına karar verilmiştir. Beton üretiminde S/Ç oranı 0.50, kimyasal katkı malzemesi (süper akışkanlaştırıcı) ise çimento kütlelerinin %1' i olarak sabit alınmıştır.

Tablo 2.7. Beton karışım oranları

Beton tipi	Çimento dozajı (kg/m ³)	Agrega (kg/m ³)			Doyma suyu (kg/m ³)	Karma suyu (kg/m ³)	Lif (kg/m ³)
		0-2 (mm)	2-4 (mm)	4-8 (mm)			
Geleneksel beton	460	400	400	814	29.143	198	---
Çelik lifli beton	460	400	400	814	29.143	198	1%
Polypropilen lifli beton	460	400	400	814	29.143	198	1 kg

Deney numunelerinin üretiminde 120 litre kapasiteli eğik eksenli betoniyer kullanılmıştır (Şekil 2.8.). Önceden 3 sınıfa ayrılarak istiflenen agregalar, bileşimde öngörülen ağırlıkça yüzde miktarlarına göre tartılarak betoniyere yerleştirilmiş ve 2-3 dakika boyunca herhangi bir ilave yapılmadan karıştırılmıştır.



Şekil 2.8. Betonların karılmasında kullanılan betoniyer

Karıştırma işlemi devam ederken agrega doyma suyu ilave edilmiştir. Bundan sonra da çimento ve karma suyu ilave edilmiştir. Karışımda kimyasal katkı maddesi olarak kullanılan

süperakışkanlaştırıcı (Sikament-FFN) karma suyuna ilave edilmiştir. Lifli beton üretimlerinde çelik yada polypropilen lif betoniye çalışırken karışıma ilave edilmiştir.

İstenen beton tipi için bütün malzemelerin betoniyere yerleştirilmesi bittiğinde ise ilave olarak bir 3 dakika daha karıştırılma sağlanmış, bundan sonra hazırlanan beton, uygun şekilde yağlanmış standart boyutlarında silindir (150 mm çap, 300 mm yükseklik) ve boyutları 100 mm. × 100 mm. × 400 mm.lik prizmatik kalıplara 3 aşamada, her bir aşamada 2800 d/dk frekanslı sarsma tablasında 15 saniye titreşime tâbi tutularak yerleştirilmiştir (şekil 2.9). Döküldükten 24 saat sonra kalıplarından çıkarılan numuneler 28 gün boyunca kür havuzunda, sıcaklığı 21 ± 3 °C olan su içinde bekletilmiş, daha sonra bağıl nemi $\%60 \pm 5$ ve sıcaklığı 20 ± 3 °C olan laboratuvar ortamında deney anına kadar bekletilmiştir. Deney anında numuneler 45 günlük ve üzeri olmuştur.



Şekil 2.9. Silindir ve prizmatik numunelerin üretimi

2.2. Üretilen Betonların Mekanik Özellikleri

Çalışmanın amacına uygun olarak, merkezi basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Merkezi basınç deneyinden önce standart silindir numunelere yükün bütün alana üniform olarak yayılmasını sağlamak amacıyla, başlık yapılmıştır.

Başlıklama işleminde kükürt kullanılmıştır (Şekil 2.10). Başlıklama işlemi bittikten sonra basınç deneyi yapılmıştır.



Şekil 2.10. Beton numunesinin başlıklama işlemi

Tüm numuneler Dinç Makine marka, 2500 KN kapasiteli otomatik yükleme yapabilen bilgisayar kontrollü hidrolik pres (Şekil 2.11) kullanılarak, 0.15 MPa sabit bir yükleme hızı altında deneye tabi tutulmuşlardır. Basınç deneyine tabi tutulan numuneler üzerinde aktif boyu 90 mm olan birim şekildeğiştirme ölçerleri yapııştırılarak (strain gauge), betonların elastisite modülleri de belirlenmiştir.(şekil 2.12).



Şekil 2.11. 2500 KN kapasiteli otomatik yükleme makinesi



Şekil 2.12. Birim şekildeğiştirme ölçerleri (strain gauge) yapıştırılmış numune

Beton silindir numuneler göçme anına kadar yüklenerek kırılmıştır. Şekil 2.13'te beton basınç deneyine hazırlanmış lifsiz, çelik lifli ve polypropilen lifli silindir numuneler görülmektedir. Şekil 2.14. de aynı numuneler deneyden sonra, kırılmış ve çatlakmış halde görülmektedir. Kırılma şekli, çatlak boyutları ve çatlaklar tipi her üç numunede onların basınç altında davranışlarını ve sünek olup olmadıklarını göstermektedir. Gerçekleştirilen merkezi basınç deneyinden elde edilen ortalama basınç dayanımı değeri Tablo 2.8 de verilmektedir.



Şekil 2.13. Merkezi basınç deneyine hazırlanan beton numuneler



Şekil 2.14. Merkezi basınç deneyinde kırılan lifli ve lifsiz beton numuneler

Prefabrike elemanların üretiminde kullanılan betonların çekme dayanımı belirlenmesi için her bir grup üretimden üç silindir numune üzerinde, TS 3129' a (1978) uygun olarak, yarmada çekme deneyi yapılmıştır [77]. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi silindir numuneler pres makinesine yatay olarak konulmuş ve yarma deneyi yapılmıştır. Numuneler kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilmiş ve kırılma yükü presten okunarak, (2.1) bağlantısıyla, numunelerin yarmada çekme dayanımları hesaplanmıştır. Yarmada çekme deneyinden bir görünüm şekil 2.15'te verilmektedir.

$$f_{yç} = \frac{2P}{\pi dh} \quad (2.1)$$

$f_{yç}$; Numunelerin yarmada çekme dayanımı (N/mm²)

P; Kırılma anındaki maksimum yük (N)

d; Silindirin ölçülen çapı (mm)

h; Silindirin ölçülen uzunluğu (mm)



Şekil 2.15. Beton numunelerin yarmada çekme deneyinden bir görünüm

Üretilen betonlara ait yarma deneyi sonucunda oluşan kırılma tipleri, lifsiz, çelik ve polypropilen lifli betonlar için şekil 2.16 da verilmektedir.

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ortalama yarmada çekme dayanım değerleri Tablo 2.8. de her üç tip beton için verilmektedir.



Şekil 2.16. Yarmada çekme deneyinde lifsiz, çelik lifli ve polypropilen lifli beton numunelerin kırılma şekli

Prefabrike elemanların üretiminde kullanılan betonların çekme dayanımlarının belirlenmesi için prizmatik numuneler üzerinde eğilme deneyi yapılmıştır. Geleneksel ve lifli betonların eğilmede çekme dayanımları, 100mm×100mm×400mm boyutlarında daha önceden hazırlanan her birinden 3'er adet prizmatik numuneler üzerinde TS 3285'e (1979) uygun olarak gerçekleştirilmiştir[78]. Numuneler deney makinesine, Şekil 2.17. de görüldüğü gibi, basit mesnetli olacak şekilde yerleştirilmiş ve orta noktasından tekil yük uygulanmıştır. Mesnetler arasındaki mesafe 300 mm dir. Yükleme dijital ortamda yapılmış olup, kesitin taşıyabileceği maksimum yük yine dijital ortamda kaydedilmiştir. Numunelerin eğilmede çekme dayanımı, (2.2) bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f_e = 3PL/2bh^2 \quad (2.2)$$

f_e ; Eğilme dayanımı, MPa

P; Kırılma anındaki maksimum yük (N)

L; Deney numunesinin iki mesnet arasındaki uzunluk (mm)

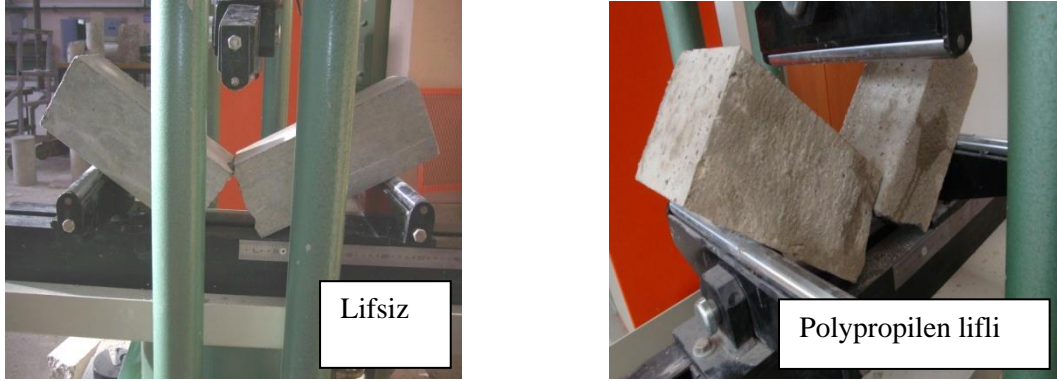
h; Deney numunesinin yüksekliği (mm)

b; Deney numunesinin kesit boyutları (mm)

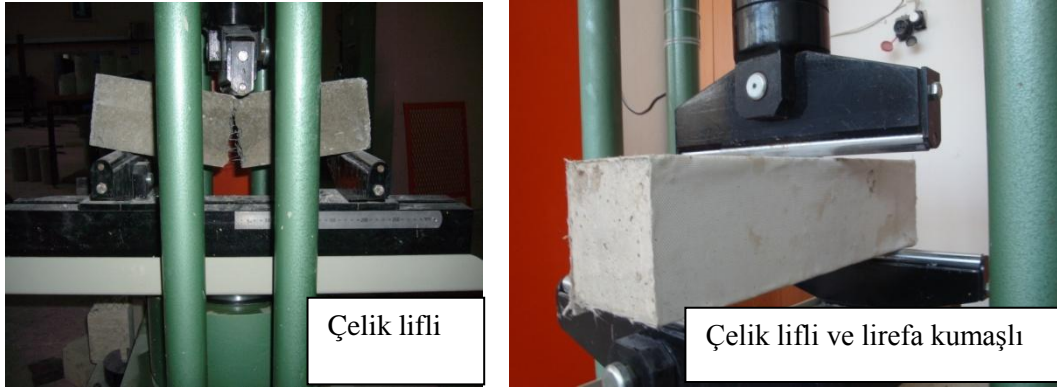


Şekil 2.17. Eğilmede çekme deneyinden bir görünüm

Eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerde, numunelerin kırılma tipleri, lifsiz ve polypropilen lifli betonlar için şekil 2.18 de, çelik lifli ve lirefa kumaşlı betonlar için şekil 2.19 da verilmektedir.



Şekil 2.18. Eğilmede çekme deneyinde lifsiz ve polypropilen lifli beton numunelerinin kırılma şekli



Şekil 2.19. Eğilmede çekme deneyinde çelik lifli ve lirefa kumaşlı beton numunelerinin kırılma şekli

Şekil 2.19 da görüldüğü gibi, lirefa kumaşlı numunede sehimler çok küçük miktarda meydana gelmektedir ve bu nedenle bu kumaşla sarılmış betonlar, sünek davranışları olmaktadır. Prizmatik numuneler üzerinde yapılmış olan deneylerden elde edilen ortalama eğilmede çekme dayanımı değerleri Tablo 2.8 de basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları ile birlikte verilmektedir.

Tablo 2.8. Beton numunelerinin basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımları

Beton türü	Lifsiz beton	Polypropylen lifli beton	Çelik lifli beton	Çelik lifli ve lirefalı beton
Basınç dayanımı (MPa)	28.6	29.7	30.8	-----
Yarmada çekme (MPa)	4.18	4.28	5.24	-----
Eğilmede çekme (MPa)	5.11	5.18	7.35	9.66

Tablo 2.8'deki değerler incelendiğinde, her iki tip lifli betonların merkezi basınç dayanımı, lifsiz beton basınç dayanımına göre önemli denebilecek düzeyde bir artış olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte lirefalı betonun eğilmede çekme dayanımı, lifsiz ve lifli betonlara göre de daha yüksektir. Dolayısıyla da lirefa ile sarılmış betonun davranışı sarılmamış betonlara göre daha sünektir.

2.3. Deney Numuneleri ve Deney Planı

Burkulmaları sınırlandırılmış çelik çaprazlar, (BRB), merkezi çaprazlı çerçevelerin yatay yük etkisindeki davranışlarının kontrol edilmesinde en başarılı çözüm olarak kabul edilmektedir. Esasen BRB'lerde amaç, çok narin olan çelik çaprazların çekme ve basınçta aynı davranışı göstermesini sağlamaktır. Narin çelik çaprazların, burkulmalarının sınırlandırılması için, uygulanan yöntemlerden birisi içi boş olan çelik dikdörtgen veya kare şeklinde bir profilin içine bu çelik çaprazları yerleştirilmesidir. Çoğu uygulamalarda çelik çaprazların burkulmalarının sınırlandırılması, bu çaprazlar, çelik boru içine yerleştirilmekte ve beton dökülmektedir. Çelik çapraz ile betonun yapışmaması için gerekli önlemler alınarak

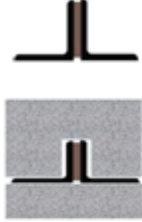
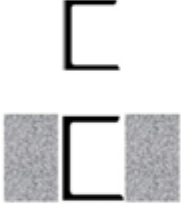

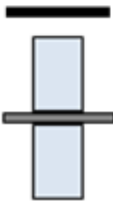
(yağlama, vb), beton dökülmektedir. Bu güne kadar deneyler ve uygulamalar burkulmayı sınırlandıran elemanın davranışına göre, beton, betonarme yada harç malzemesi bir çelik boru içine doldurulmasıyla yapılmıştır. Uygulamalarda, bunlardan başka herhangi bir yeni malzeme kullanılmamıştır. Yerinde dökme beton ve harç ile yapılan bu işlemlerde bazı problem ve zorluklar meydana gelmektedir. Bunlardan bazıları, betonun hazırlaması, kalıp yapılması, betonun kürünün yapılması, ortaya çıkan zorluklardır.

Bu çalışma kapsamında, çelik çaprazların burkulmalarını sınırlandıran elemanlar, prefabrike eleman olarak üç tür çapraz için tasarlanmış ve yapılmıştır. Çapraz türleri, uygulamada yaygın olarak kullanılan 2L60×60×6 , U65 profilleri ve 100×10 (mm) levhası olarak seçilmiştir. 2L60×60×6 ve U65 profilinden oluşan çapraz elemanların burkulmasını sınırlandırmak için dört farklı tipte prefabrike eleman hazırlanmıştır. Bu prefabrike elemanlar, betonarme, çelik lifli beton, polypropilen lifli beton ve lüfafa sarılmış çelik lifli betonla hazırlanmıştır.

Betonarme prefabrike elemanlarda, boyuna donatı 2Ø8 ve enine donatı Ø8/150 olarak seçilmiştir. Çelik lifli betonla üretilen prefabrike elemanlarda lif oranı beton hacminin % 1 i olarak alınmıştır. Polypropilen lifli betonla üretilen prefabrike elemanlarda ise lif oranı 1kg/m³ alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında, prefabrike elemanlarla burkulması sınırlandırılmış çelik çaprazların deney numuneleri üzerinde deneysel incelemesi için, aşağıda özellikleri verilen çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Tablo 2.9).

Tablo 2.9. Deney numunelerinin özellikleri

Çapraz Tipi	Çapraz uzunluğu (mm)	BRB uzunluğu (mm)	BRB Türleri
2L60×60×6 	2000	1800	Betonarme
			Çelik Lifli Beton
			Polypropilen Lifli Beton
			Çelik Lifli Beton ve Lirefa Kumaşlı
U65 	2000	1800	Betonarme
			Çelik Lifli Beton
			Polypropilen Lifli Beton
			Çelik Lifli Beton Ve Lirefa Kumaşlı
100×10 Levha 	1000	850	Polyamide Levhalı
			Polyetilen Levhalı
100×10 Levha 	1000	850	Polyamide Levhalı
			Polyetilen Levhalı

Çelik levhalar ile oluşturulan çapraz elemanların burkulmasını sınırlandırmak için polyetilen ve polyamid levhalar, prefabrike elemanlar olarak hazırlanmıştır (Şekil 2.20). Hazırlanan bu polyetilen ve polyamid levhalar, çelik levhalarla oluşturan çapraz elemanlarda eğilme doğrultusundaki rijitliğinin (EI) etkisini incelemek için, bu levhalar hem zayıf hem de güçlü ekseninde kullanılmıştır (bkz Tablo 2.8). Başka bir deyişle, levhanın enkesit alanı

değişmeden, atalet momentini artırmak için, polyetilen ve polyamid levhaların eksenleri değiştirilmiştir.

Prefabrike polyetilen ve polyamid levhalara ait deney programını toplam beş çelik çapraz numunesi oluşturmaktadır. Bunlardan ikisi HDPE (High Density PolyEthylene), ikisi PA (PolyAmide) levhalarla, ve bir numune ise sadece çelik çapraz (burkulması tutulmamış) olarak denenmiştir. HDPE levhalarla sınırlandırılan numunelerin birinde, HDPE levhaları güçlü eksen doğrultusunda ve biriside zayıf eksen doğrultusunda yerleştirilmiştir (bkz Tablo 2.9). Aynı işlem PA numunelerinde de yapılmıştır. Çelik çaprazın enkesit boyutları 100×10 mm ve uzunluğu 980 mm seçilmiştir. Çapraz iki ucundan 120×120×10 mm çelik plakalara kaynaklanmıştır. Yerel burkulmayı önlemek için iki rijitleştirici çelik levhalar her uçta 100 mm yüksekliğinde kaynaklanmıştır. Çaprazın toplam uzunluğu 1000 mm.'dir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 Polyamid ve polyetilen levhaların hazırlanması

Betonarme prefabrike ve lifli beton prefabrike elemanlarda yapılan deneylerde toplam on çelik çapraz numunesi kullanılmıştır. Bunlardan beşi 2L60×60×6 profili ve diğer beşi de U65 üzerinde yapılmıştır. 2L60×60×6 profiline ait deneylerde, bir numune sadece çelik çapraz olarak (burkulması sınırlandırılmamış), diğerleri betonarme, çelik lifli beton, polypropilen lifli

beton ve lifli kumaşı sarılmış çelik lifli beton prefabrike elemanlar burkulmayı sınırlandırmak için kullanılmıştır. Bu deneylerde, çaprazın uzunluğu 2000 mm seçilmiştir. Basınç yükünün çaprazlara aktarılması amacı ile, çaprazın her ucu 200×200×20 mm boyutlarında bir plakaya kaynaklanmıştır. Yerel burkulmayı önlemek için, her uçta 70×50×8 mm boyutlarında iki rijitleştirici çelik levha kaynaklanmıştır. Deneye hazır olan numunenin toplam uzunluğu 204 cm.'dir. Şekil 2.21 de deneye hazır olan 2L60×60×6 ve U65 profillerinden oluşan çapraz numuneleri görülmektedir.



U65

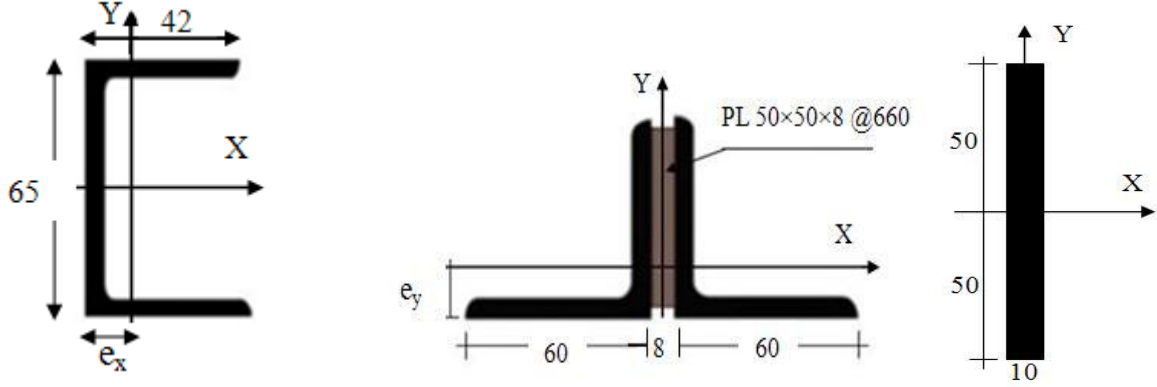


2L60×60×6

Şekil 2.21. Deneye hazır olan 2L60×60×6 ve U65 profillerinden oluşan çapraz numuneleri

Bu deneysel çalışmada, L ve U profillerinin seçilmesinin nedeni, daha önce de belirtildiği gibi, onların pratikte çelik çaprazlı çerçevelerde sık kullanılmasıdır. Uygulamada L profilleri ile oluşturulan çelik çaprazlar 2L olarak kullanılmaktadır. Ancak U profili uygulamalarda hem tek U ve hem çift U olarak kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan

2L60×60×6 , U65 profillerinin ve 100×10 levhanın özellikleri Şekil 2.22 de ve Tablo 2.10 da verilmektedir.

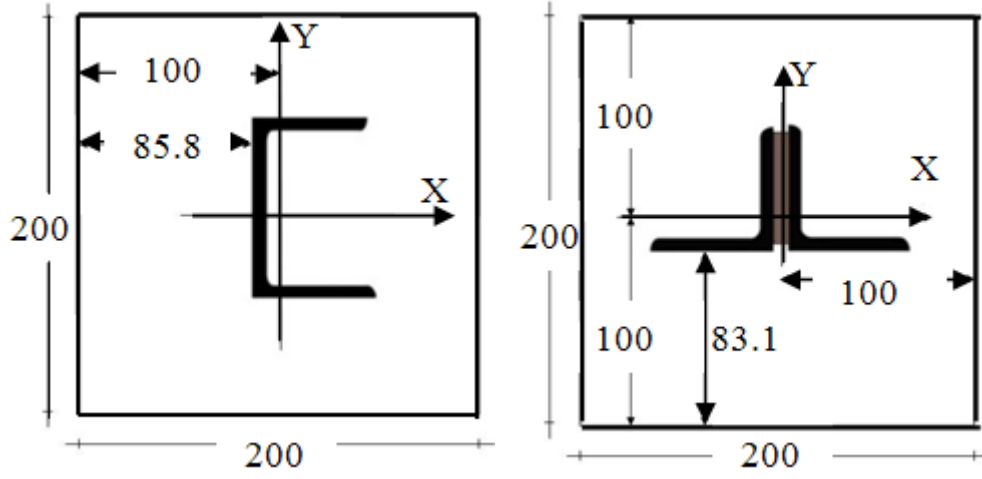


Şekil 2.22. Deneysel olarak kullanılan çapraz kesitlerinin şeması

Tablo 2.10. Kullanılan çaprazların özellikleri

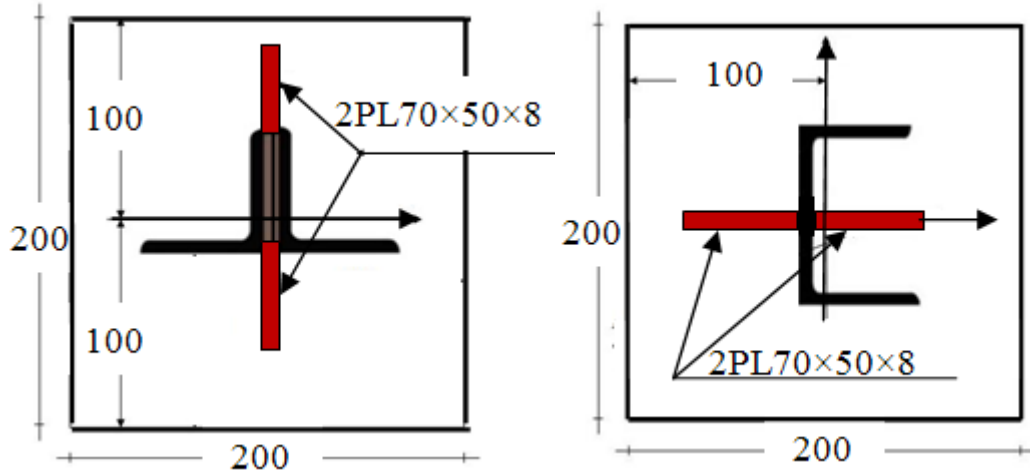
Profilin türü	A(cm ²)	G(kg/m)	e _x (mm)	e _y (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)
U65	9.03	7.09	14.2	0	57.5	14.01
100×10 levha	10	7.85	0	0	83.3	0.83
2L60×60×6	13.82	10.84	0	16.9	45.6	105.97

Deneysel olarak, çelik çaprazlar sadece basınç yükü altında deneye tabi tutulmuştur. Basınç yükünün dışmerkez olarak aktarılması ve momentin meydana gelmemesi için, çaprazın gelen yükünü, çaprazın merkezine aktarılması gerekmektedir. Yükün çaprazın enkesitinin merkezine aktarılması için Plakanın ve çaprazın merkezleri çakıştırılarak kaynaklanmıştır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Çaprazların uç plakalara kaynaklanması

Yerel burkulmanı önlemek için çaprazın iki ucunda ve plakaya kaynaklanan yerde rijitleştirici levhaları $70 \times 50 \times 8$ mm boyutlarında kullanılmıştır. Uygulamada da bu rijitleştiriciler kullanılmaktadır (Şekil 2.24 ve Şekil 2.25).



Şekil 2.24. Rijitleştirici levhaların detayları



Şekil 2.25. Deneysel çalışmalarda kullanılan uç plakalar ve rijitleştiriciler

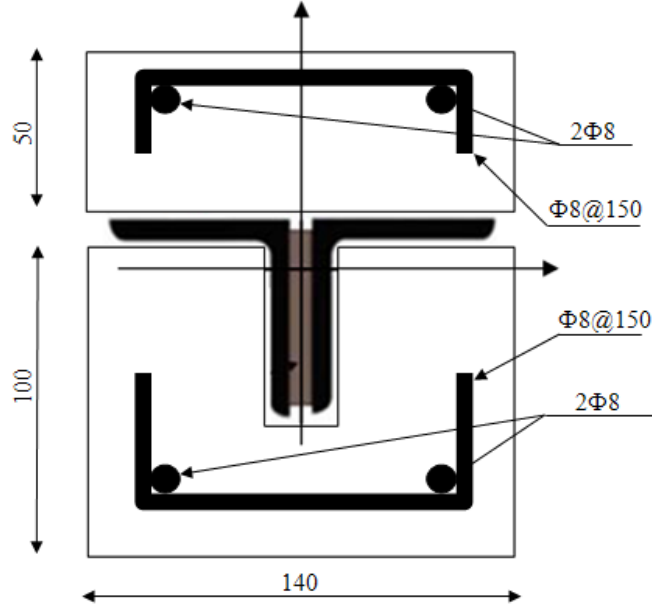
Daha öncede belirtildiği gibi, bu deneysel çalışmada, çeşitli prefabrike elemanlar, çelik çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için kullanılmıştır. Bu prefabrike elemanların enkesitleri ve boyutları, her tip çaprazla aynı seçilmiş ve aynı kalıp yapılmıştır. Kalıplar, her tür prefabrike elemanlar için (betonarme, çelik lifli beton ve polypropilen lifli beton) Şekil 2.26 da görülmektedir.



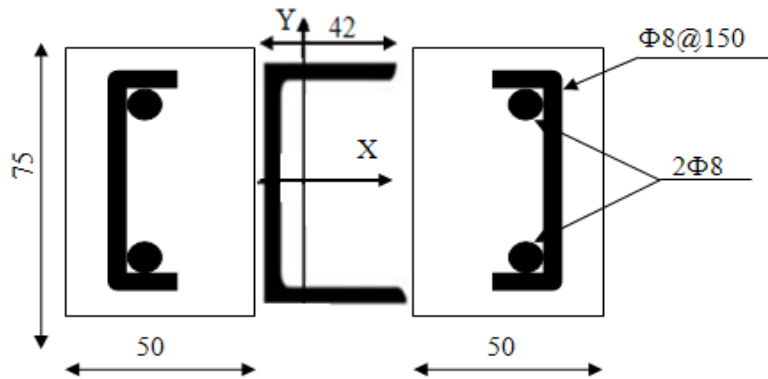
Şekil 2.26. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıplardan bir görünüm

Betondan oluşan prefabrike elemanların boyutlandırılmasında, tasarım ve yapımında, iş yerinde kullanılabilmesi, ağırlığı, donatı yerleştirilmesi, uzunluğu v.b. parametreler dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, pratiğe uygun olabilmesi nedeni ile, prefabrike elemanlarının kalınlığı bu çalışma için, 50 mm seçilmiştir.

Deneylerde kullanılan betonarme prefabrike elemanların enkesit boyutları ve detayları, 2L60×60×6 çaprazı için Şekil 2.27 de ve U65 çaprazı için Şekil 2.28 de verilmektedir. Çelik veya polypropilen liften kullanılan prefabrike elemanların enkesit boyutları, betonarme ye ait olan detay gibidir, ancak donatısı olmamaktadır.



Şekil 2. 27. 2L60×60×6 çaprazı için kullanılan betonarme prefabrike elemanların enkesit detayı



Şekil 2. 28. U65 çaprazı için kullanılan betonarme prefabrike elemanların enkesit detayı

Bu deneysel çalışmada, lirefa kumaşı (DDS, Destriktion Defence System) ilk defa olarak çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için prefabrike elemanların sarılmasında kullanılmıştır. Lirefa kumaşı, çekme dayanımı yüksek olan bir üründür. Deneyleerde, önceden hazırlanan çelik lifli beton prefabrike elemanlara lirefa kumaşının özel yapıştırıcısı kullanılarak Şekil 2. 29 da görüldüğü gibi, yapılmıştır. Deneye hazırlanmış lirefali numune Şekil 2.30 da örnek olarak görülmektedir.



Şekil 2.29. Lirefa malzemesi ile prefabrike elemanların sarılması



Şekil 2.30. Deneye hazırlanmış lirefa ile sarılmış çelik lifli prefabrike BRB numunesi

2.4. Deney Düzeneği ve Ölçüm Sistemleri

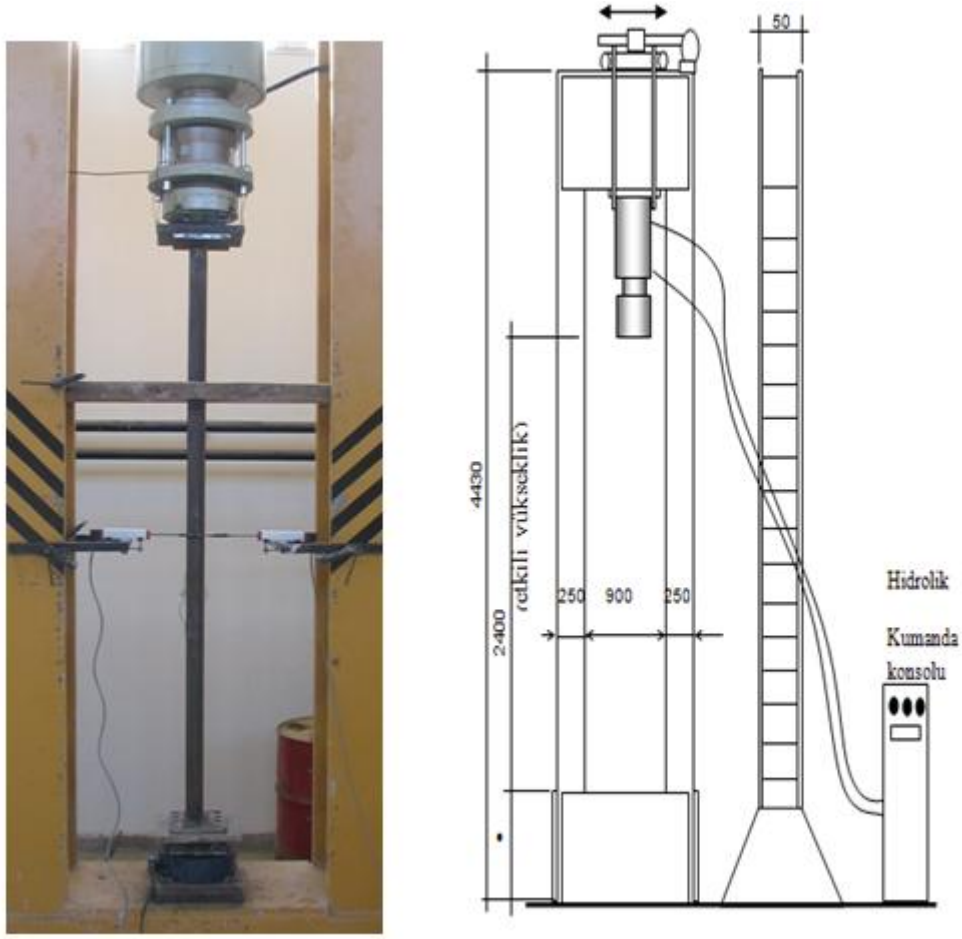
2.4.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmada, çalışma kapsamında üretilen burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların deneylerinde alt ve üstte mafsallı mesnet kullanılmıştır. Deneyler iki ucu mafsallı kolon gibi tasarlanıp yapılmıştır. Zira uygulamada ve çaprazların tasarımında da çaprazın iki ucu mafsallı kabul edilmektedir. Şekil 2.31 de verildiği gibi çelik çapraz basınç yükü altında alttan ve üstten mafsallı olarak bağlanmıştır.



Şekil 2.31. Deneylerde kullanılan alt ve üst mesnet

Bu çalışma kapsamında aksel basınç altında deneye tabi tutulan çelik çaprazlar (burkulmaları sınırlandırılmamış) ve BRB'lerin ortasında sehmin oluşması için iki ucu mafsallı sistem seçilmiştir. Burkulması sınırlandırılmış ve burkulması sınırlandırılmamış çelik çaprazlar KTU Yapı ve Malzeme Laboratuvarında bulunan 6000 kN basınç kapasitesine sahip bir yükleme düzeneğine yerleştirilmiştir (Şekil 2.32). Bu şekilde hazırlanan deney numunelerinin alt mesnedinde bir yük hücresi, ve elemanın ortasında oluşacak sehmin ölçümü için ölçüm aletleri yerleştirilmiştir.



Şekil 2.32. deneylerde sehım ölçüm yerleri

2.4.2. Ölçüm Sistemi ve Kullanılan Aletler

Bu çalışma kapsamında yürütölen deneylerde yük okumaları 500 kN çekme ve basınç kapasiteli yük hücresi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan ölçüm sistemi üzerinde, belirlenen noktalara 100mm ölçüm kapasiteli ve 0.036 mm hassasiyete sahip lineer deplasman ölçerler (LPDT) yerleştirilerek basınç altında meydana gelen sehım ölçümleri yapılmıştır. Yük hücresi Şekil 2.33 da, LPDT'ler ise Şekil 2.34 de verilmektedir.

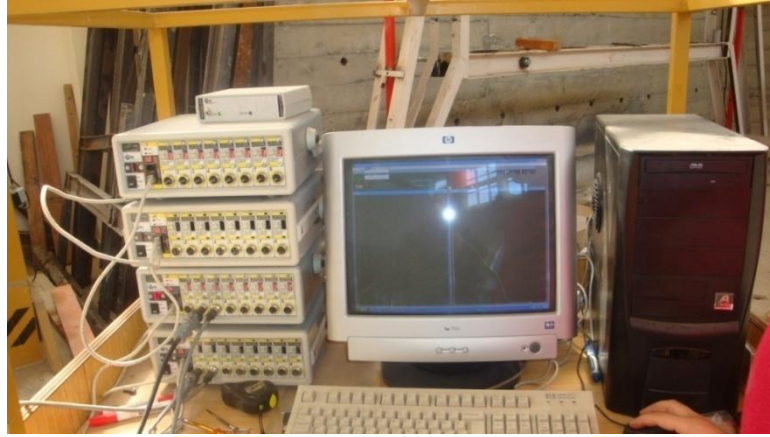


Şekil 2.33. Yük hücresi



Şekil 2.34. Sehim ölçümünde kullanılan LPDT

LPDT ve yük hücresi, K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme laboratuvarında mevcut 32 kanallı veri toplama sistemine bağlanarak deney boyunca basınç yükü ve elemanların orta noktasında oluşan sehimler kaydedilmiştir. Söz konusu sistem Şekil 2.35'te görülmektedir.



Şekil 2.35. Veri toplama sistemi

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Prefabrike Elemanların Üretiminde Kullanılan Betonların Özellikleri

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme laboratuvarında gerçekleştirilen bu çalışmada üretilen bütün deney numuneleri, hazır beton kullanmaksızın, laboratuvar imkanları dahilinde üretilmiştir. Üretilmiş olan her bir prefabrike BRB betonlarından alınan betonun özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 6'şar adet şahit numuneler şartnamelerde belirtildiği şekilde küre tabi tutulmuş ve beton dayanımları belirlenmiştir. Buna ek olarak prefabrike deney elemanları da üzerleri sürekli ıslak kalacak şekilde kapatılıp muhafaza edilerek deney gününe kadar küre tabi tutulmuştur.

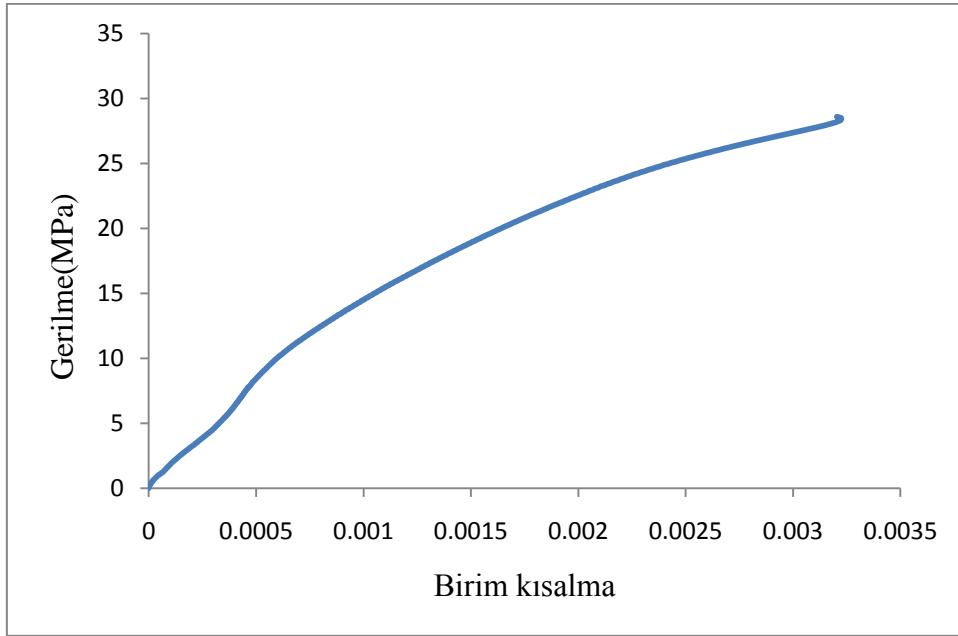
Çalışmada hedeflenen basınç dayanımları geleneksel ve lifli beton için 25 MPa ve üzeri olarak öngörülmüştür. Bu amaçla birçok deneme karışımı hazırlanmış, yapılan deneyler sonucunda kullanılacak olan beton karışım oranının nasıl olacağına karar verilmiş ve betonlar üretilmiştir. Deney numunelerinin üretiminden alınan şahit numunelerin basınç dayanımları belirlenmiş (bkz. Şekil 2.12 ve 2.13) ve her bir seri için Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Silindir numunelerin ortalama basınç dayanımları

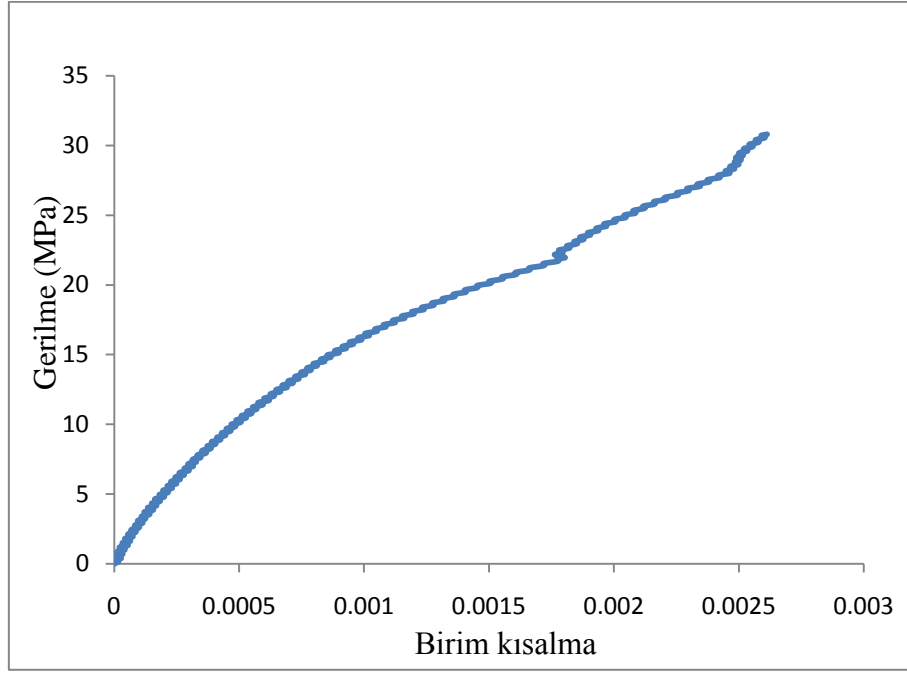
Prefabrike eleman	f_{cm} (MPa)	Std. Sapma(MPa)	f_{ck} (MPa)
Geleneksel beton	29	2.7	25.54
Çelik lifli beton	31	1.7	28.82
Polypropilen lifli beton	29.7	3.42	25.32

Bu tablodan görüldüğü gibi deney numunelerinin üretiminde kullanılan lifli betonların basınç dayanımları geleneksel betonlara göre az miktarda artmaktadır. Çelik lifli betonlarda hacmen %1 oranlarında ve polypropilen lifli betonlarda ise 1 kg/m³ oranında lif kullanılmıştır. Çelik lifli ve polypropilen lifli betonların basınç dayanımlarındaki artışı geleneksel

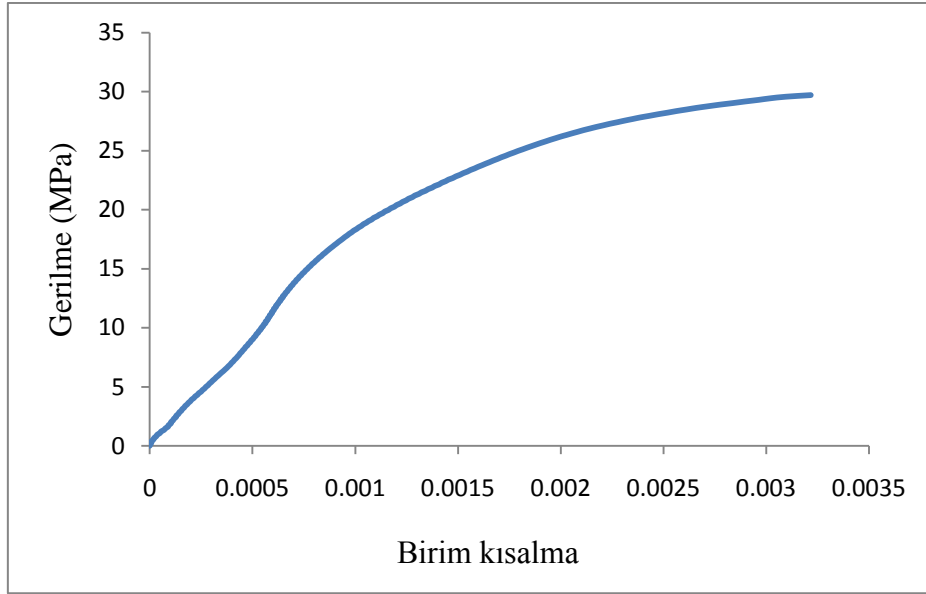
betonlarınkine göre sırasıyla %7 ve %3 olmuştur. Gerçekleştirilen basınç deneylerinde, numunelere yapıştirılan (dört adet) birim şekildeğiştirme ölçerleri yardımıyla (bkz. Şekil 2.12) belirlenen dirençlerden, betonların birim şekildeğiştirmeleri, ölçüm sisteminde verilen dönüşüm ifadesi kullanılarak elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, geleneksel betonlar için Şekil 3.1 'de, çelik lifli betonlar için Şekil 3.2 'de ve polypropilen lifli betonlar için Şekil 3.3 'de verilmiştir. Bu şekiller yardımıyla beton dayanımının %40'ına karşılık gelen elastisite modülü belirlenmiş ve her bir beton türü için Tablo 3.2 'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Geleneksel betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı



Şekil 3.2. Çelik lifli betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı



Şekil 3.3. Polypropilen lifli betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı

Tablo 3.2. Betonlara ait malzeme özellikleri

Beton	Elastisite modülü (MPa)
Geleneksel beton	16000
Çelik lifli beton	19200
Polypropilen lifli beton	18300

3.2. Burkulmaları Sınırlanmamış Çelik Çaprazlar

Bu deneysel çalışmada, çeşitli prefabrike elemanlar çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için kullanılmıştır. Toplam 16 adet deneyden 12 tanesi prefabrike elemanlı ve 4 adet sadece çelik çapraz olmaktadır. Bu 12 prefabrikeli deneylerin 2 tanesi polyetilen ve 2 tanesi poliamid levhalar ve 8 tanesi betondan üretilmiş prefabrike elemanlardır. Bu elemanlar üzerinde yapılan yükleme, mümkün olduğunca merkezi olacak şekilde yapılmaya çalışılmıştır.

Deneyler, burkulmaları sınırlanmış çelik çaprazların artık yük almamaya başladıkları ana kadar devam ettirilmiştir. Numunelerin burkulmasından sonra, maksimum yükün % 40'na kadar yükte bir kayıp oluşunca sonlaştırılmıştır. Yerdeğiştirmeler, daha önce de belirtildiği gibi, tüm deneylerde numunelerin orta noktalarında ölçülmüştür.

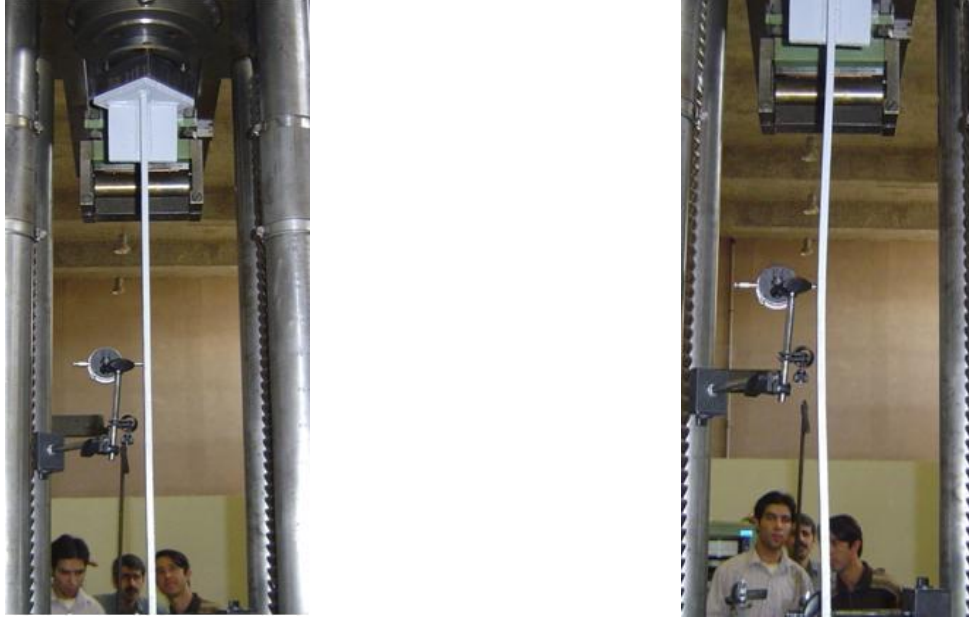
Daha önce belirtildiği gibi, bu çalışma kapsamında, enkesit boyutları U65, 2L60×60×6 ve 100×10 levha çelik çapraz olarak, burkulmalarını sınırlandırmak amacı için kullanılmıştır. Bu amaç için, önceden adı gelen çelik çaprazlar, burkulmaları sınırlanmamış halinde deneye tabi tutulmuştur. Deney numunesinin deneyden önce ve deneyden sonraki durumları U65 çaprazı için Şekil 3.4 de, 2L60×60×6 çaprazı için Şekil 3.5'te ve 100×10 çaprazı ise Şekil 3.6 da verilmektedir.



Şekil 3.4. U65 çaprazına ait burkulmaları sınırlandırılmamış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm



Şekil 3.5. 2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları sınırlandırılmamış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

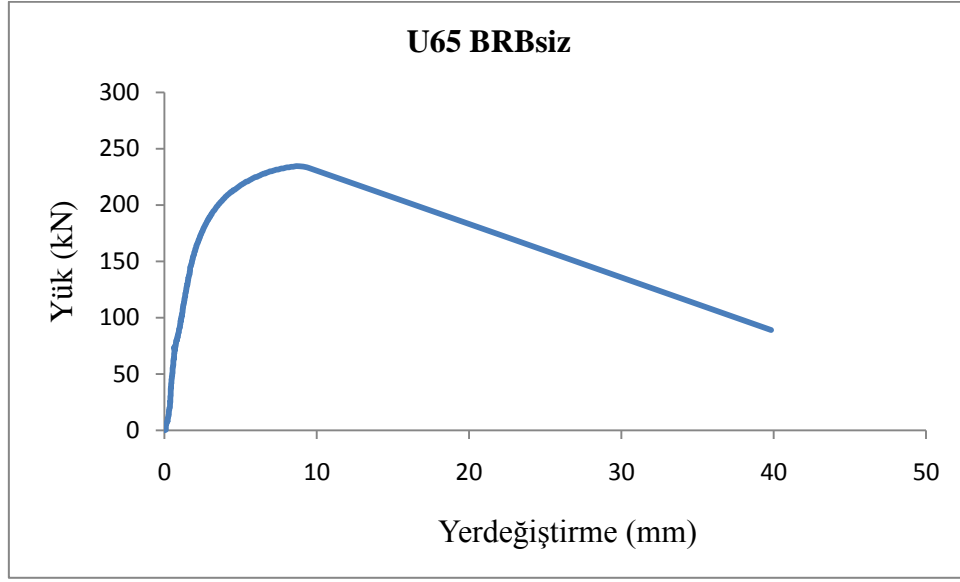


Şekil 3.6. 100×10 levha çaprazına ait burkulmaları sınırlandırılmamış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

Bu deneylerin sonuçları, (burkulmaları sınırlandırılmamış çaprazlar) burkulmaları prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış çaprazların sonuçları ile karşılaştırılması nedeni ile çok önemli olmaktadır. Bu nedenle, tüm deneylerde mesnet koşulları, deney düzeneği, çelik çapraz boyutlar, rijitleştirici levhaların boyutları ve sehim ölçüm yerleri aynı tutulmuştur.

Burkulmaları sınırlandırılmamış çelik çaprazlarda, çaprazın en büyük taşıyıcı yükünü ve bu yüke karşılık gelen eleman ortasındaki yerdeğiştirme miktarları, ikinci bölümde verildiği gibi ölçülmüştür. Bu bölümde burkulmaları sınırlandırılmamış çelik çaprazlar üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar her bir deney için Tablo 3.3'te sırayla verilmektedir. U65, 2L60×60×6 ve 100×10 levhası çaprazlarına ait yük–yerdeğiştirme diyagramları sırası ile Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da görülmektedir.

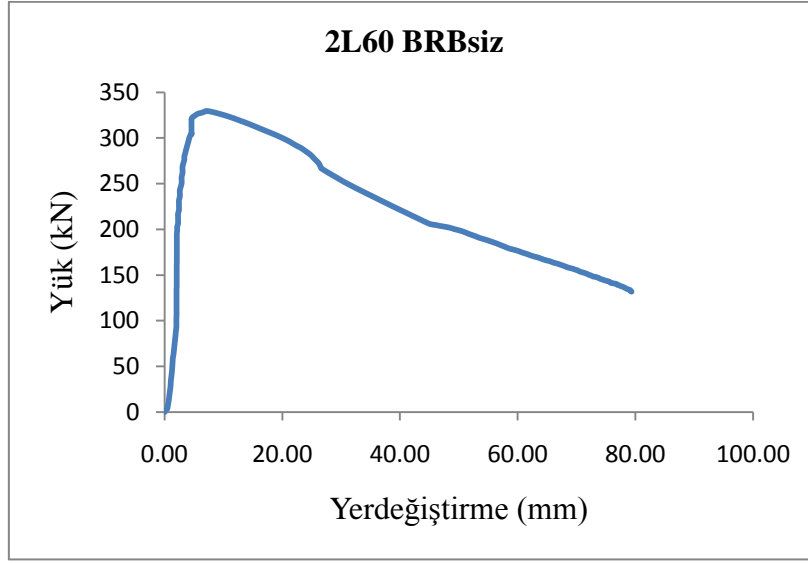
U65 çaprazına ait olan diyagramda (Şekil.3.7), yaklaşık maksimum yükünün %66'na kadar, yük–yerdeğiştirme ilişkisi lineer görülmektedir. Bu aşamadan sonra, Hooke kanunu geçerli olmadığından, yerdeğiştirmeler daha da büyümektedir ve tepe noktasından sonra, yük artmamakla beraber yerdeğiştirme hızla artmaktadır. Bu çaprazın narinlik oranı 160 ve Euler burkulma yükü 73 kN olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Burkulmaları sınırlandırılmamış U65 çaprazın Yük – yerdeğiştirme diyagramı

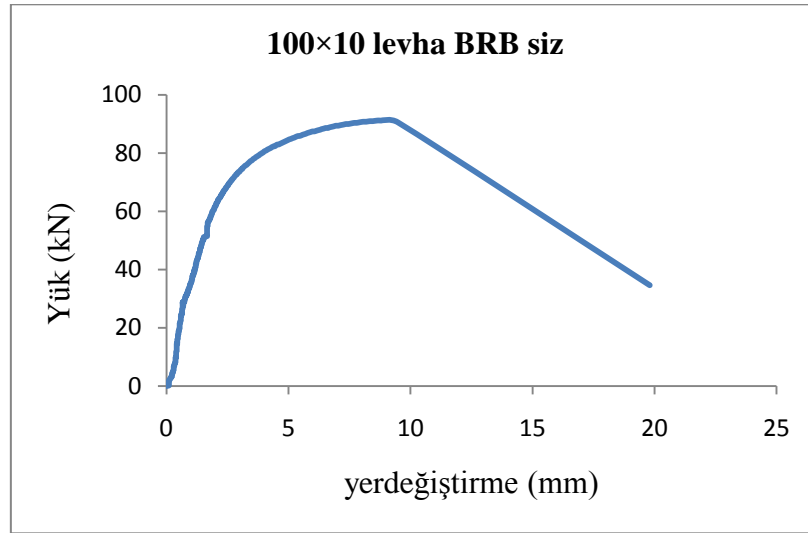
2L60×60×6 çaprazına ait olan diyagramdan da görüldüğü gibi (Şekil 3.8), yükün yaklaşık maksimum noktasında, yerdeğiştirme miktarı sadece 4 mm olmuştur ve bu noktadan sonra yerdeğiştirme miktarı artmakta ve maksimum yüke karşılık gelen noktada 7 mm olmuştur. Çapraz, maksimum yüke (329 kN) ulaştıktan sonra, hızla yerdeğiştirmeye başlamıştır. Bu çaprazda X eksenindeki atalet momenti 45.6 cm^4 ve Y eksenindeki atalet momenti ise 105.97 cm^4 olarak hesaplanmıştır. Başka bir deyişle, X eksenini bu çaprazda, zayıf eksen olduğundan, burkulma da bu eksen beklenmektedir. Yapılan deneylerde de bu davranış gözlemlenmiştir.

2L60×60×6 çaprazın narinlik oranı 110 ve Euler burkulma yükü 237 kN elde edilmiştir. Bu çaprazın Euler burkulma yükü ve deneylerde aldığı yük, U65 çaprazına göre çok yüksektir. Zira, 2L60×60×6 çaprazın narinlik oranı, U65 çaprazın narinlik oranına göre çok düşük olmasına rağmen 2L60×60×6 kesit alanı U65 çaprazının kesit alanından büyüktür.



Şekil 3.8. Burkulmaları sınırlandırılmamış 2L60×60×6 çaprazın yük – yerdeğiştirme diyagramı

100×10 levhasından oluşan çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramından görüldüğü gibi (Şekil 3.9), tepe noktasının yükü diğer çaprazlara göre çok küçüktür. Bu çaprazın narinlik oranının yüksek olması nedeniyle ($\lambda=339$) hem Euler burkulma yükünün hem de deneyden elde edilen yükün daha küçük elde edilmesine neden olmuştur. Bu çaprazın maksimum yükü 91 kN ve Euler burkulma yükü ise 18 kN olmuştur.



Şekil 3.9. Burkulmaları sınırlandırılmamış 100×10 levha çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı

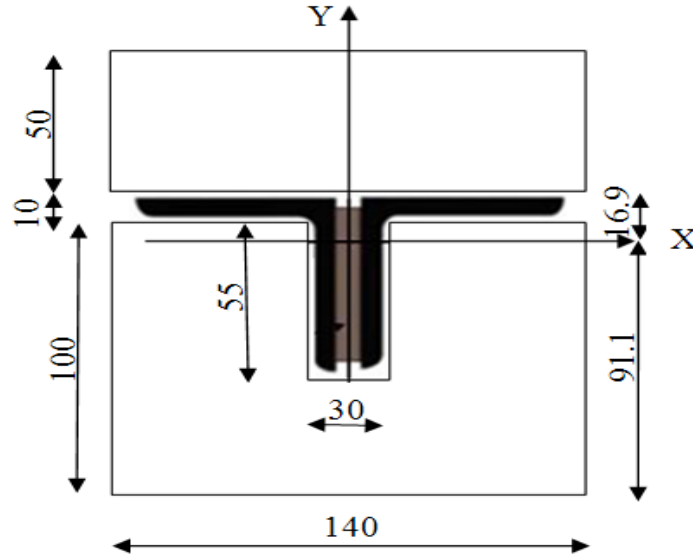
3.3. Burkulmaları Sınırlandırılmış Çelik Çaprazlar

Bu deneysel çalışma kapsamında, üç tip çelik çaprazın burkulmasının sınırlandırılması incelenmiştir. Bunlar, U65 ve 2L60×60×6 profillerinden ve 100×10 levhasından oluşturulmuştur. Burkulmayı sınırlandıran prefabrike elemanlar ise, altı tip malzemeden oluşturulmuştur. Bu malzemeler aşağıda verilmektedir :

- Betonarme
- Çelik lifli beton
- Çelik lifli beton ve lifafa sargılı
- Polypropilen lifli beton
- Polyamid levhalar
- Polyetilen levhalar

Çelik çaprazların burkulmasını sınırlandırmak amacı ile, burkulmaları sınırlandıran elemanların eğilme rijitliği, en önemli rol oynamaktadır. Basınç yükü çaprazda geldiğinde, çaprazı burkulmaya getirip ve başka bir deyişle, çaprazı eğilmeye zorlamaktadır, bu eğilme etkisini önlemek için, eğilme rijitliğinin yeterli olması gerekmektedir. Bilindiği gibi eğilme rijitliği, iki parametreden oluşmaktadır. Biri elastisite modülü ve diğeri ise atalet momentidir. Kullanılan betonların elastisite modülleri bu çalışmada deneysel olarak hesaplanmıştır. Kullanılan betonarme prefabrike elemanların, atalet momenti her iki tip çaprazlarda, 2L60×60×6 için, Şekil 3.10 da ve U65 çaprazı için Şekil 3.11 de görülen enkesitler yardımıyla hesaplanmış ve aşağıda verilmiştir.

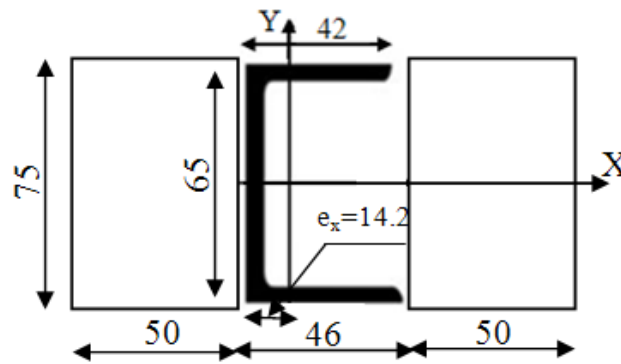
Şekil 3.10 da görüldüğü gibi, 2L60×60×6 çaprazının X ve Y eksenlerinde atalet momenti aynı olmamakla birlikte zayıf eksen X eksenidir. Başka bir deyişle, bu çapraz Y ekseninin etrafında burkulmaması beklenmektedir. Bu nedenle burkulmayı sınırlandıran prefabrike elemanlar X eksenini doğrultusunda yerleştirilmektedir. Basınç yükü 2. bölümde belirtildiği gibi çaprazın merkezine, diğeri bir deyişle Şekil 3.10 da görüldüğü gibi, X ve Y eksenlerinin çakışan yerine aktarılmaktadır. Bu işlem eğilme momentinin meydana gelmemesi nedeniyle yapılmıştır. Zira, öncede belirtildiği gibi, çaprazlar sadece basınç ve çekme yükü için tasarlanıp kullanılmaktadırlar.



Şekil 3.10. 2L60×60×6 çaprazına ait olan prefabrike elemanların boyutları

$$2L60 \times 60 \times 6 \begin{cases} I_x = 45.6 \text{ cm}^4 \\ I_y = 105.97 \text{ cm}^4 \end{cases}, \text{ Burkulmayı sınırlandıran elemanların } \begin{cases} I_x = 4928 \text{ cm}^4 \\ I_y = 3418 \text{ cm}^4 \end{cases}$$

Şekil 3.11 de U65 çaprazına ait kullanılan prefabrike elemanların boyutları ve eksenleri görülmektedir. Bu çaprazda da X eksenini güçlü eksen (atalet momenti Y eksenine göre büyük) olduğundan burkulma X ekseninin etrafında beklenmektedir. Bu nedenle burkulmayı sınırlandıran prefabrike elemanlar Y eksenini doğrultusunda yerleştirilmektedir.



Şekil 3.11. U65 çaprazına ait olan prefabrike elemanların boyutları

$$U65 \begin{cases} I_x = 57.5 \text{ cm}^4 \\ I_y = 14.01 \text{ cm}^4 \end{cases}, \text{ Burkulmayı sınırlandıran elemanların } \begin{cases} I_x = 352 \text{ cm}^4 \\ I_y = 1919 \text{ cm}^4 \end{cases}$$

3.3.1. Betonarme Prefabrike Elemanlarla Burkulmaları Sınırlanmış Çelik Çaprazlar

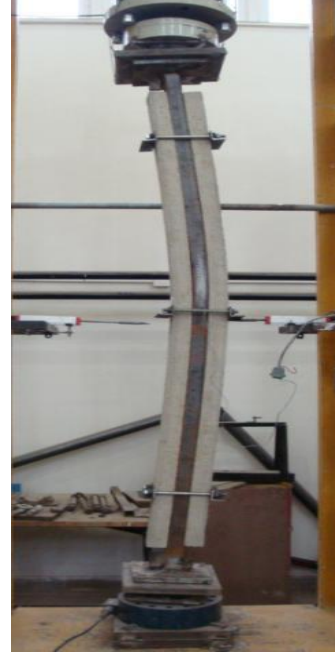
Burkulmaları betonarme prefabrike elemanlarla sınırlanmış çelik çaprazların davranışlarının deneysel olarak incelenmesini amaçlayan bu çalışmada aynı çelik çaprazlar, aynı enkesitler kullanılmıştır. Bu bölümde aynı çaprazların etrafına, betonarme prefabrike elemanlar, BRB olarak, kullanılmıştır. Bu elemanların enine ve boyuna donatıların özellikleri ikinci bölümde verilmişti.

Şekil 3.12 de, 2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları betonarme elemanlarla sınırlanmış deney öncesi ve deney sonrasında bir görünüm verilmektedir. İkinci bölümde belirtildiği gibi, betonarme elemanların üretiminde, 8 mm çapında boyuna ve enine donatılar kullanılmıştır. Bu donatılar veya betonarme prefabrike elemanların görevleri, burkulmadan meydana gelen eğilmede elemanın dayanımının artırılmasıdır.

Prefabrike elemanların boyutları, özellikle kalınlıkları, bazen eğilme yükünden veya burada, basınç yükünden bağımsız olmaktadır. Böyle ki, tasarımda ve dizaynda, elemanın kalınlığı için, çok küçük miktar gerekmektedir, ancak prefabrike elemanın taşınması ve yerleştirilmesi için, kırılma ve hasar nedeniyle, kalınlığının belli bir değerden daha az olması istenmemektedir. Bu çalışmada söz konusu kalınlık daha önce de belirtildiği gibi 50 mm seçilmiştir.



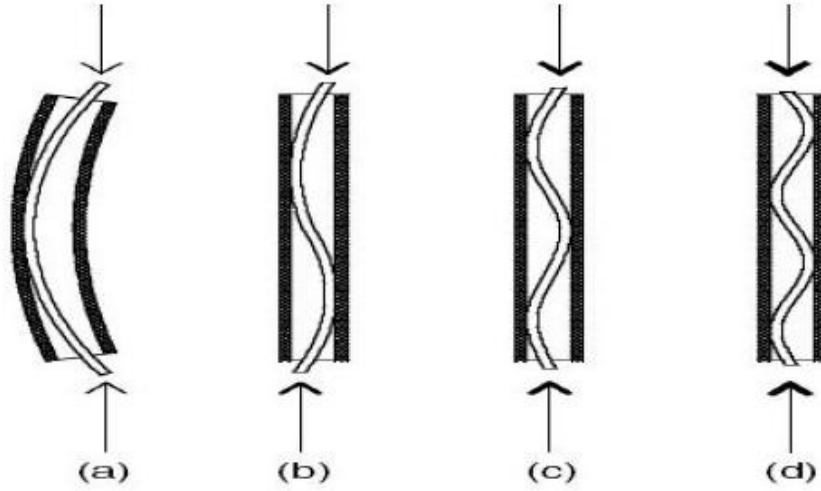
Şekil 3.12. Burkulması betonarme prefabrike elemanla sınırlandırılmış çaprazların deney öncesi ve deney sonrasında görünüm (2L60×60×6).



Şekil 3.13. Burkulması betonarme prefabrike elemanla sınırlandırılmış çaprazların deney öncesi ve deney sonrasında görünüm (U65).

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'den de, görüldüğü gibi, betonarme prefabrike elemanlar, burkulmayı sınırlandıran eleman olarak, üç yerde L30×30×3 kullanması ile biri birine bağlanmaktadır. Bu korniyerler, iki taraftaki elemanları birlikte çalışmasına imkan vermektedir.

Şekil 3.14'te çelik çekirdeğin burkulmasının etkili modları verilmektedir. Birinci mod, Şekil 3.14.a da görüldüğü gibi, daha etkili ve en önemli mod olarak, kolon burkulmaları ve tasarımlarında kullanılmaktadır. Bu modda, yerdeğiştirme miktarı, büyük olduğundan modun şekli, adı geçen korniyerlerin kullanmasının yerlerini belirlemektedir. Dolayısıyla da, yapılan tüm deneylerde, iki ucu mafsallı kolon gibi davranış beklenmiş ve bu davranış deneylerde mümkün olduğu kadar gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle, prefabrike elemanların çaprazlara bağlanması için kullanılan L30×30×3 bağlantı elemanlarının yerleri ve sayısı, çaprazın uzunluğuna ve burkulmayı sınırlandıran elemanın eğilme rijitliğine bağlı olmaktadır.



Şekil 3.14. Çelik çekirdekte yüksek burkulma modları

L30×30×3 etkisi ve yeri Şekil 3.15'te görülmektedir. Çaprazın burkulmasından sonra, bağlantı korniyerin mesafesinin BRB elemanının uc kısmına yakın olmaması sebebi ile prefabrike elemanda, deney sonunda, ayrılma gözlemlenmiştir .



Şekil 3.15. Bağlantı korniyerinin, çaprazın burkulmasından sonra, ayrılması

Bu deneysel çalışmada, bir yapı mühendisi için, betonarme prefabrike elemanların kullanımı enerji yutma kapasitesi açısından çok önemlidir. 2L60×60×6 çaprazına ait olan betonarme prefabrike elemanların, deneyden ve burkulmadan sonra görünümü Şekil 3. 16 verilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi, prefabrike elemanlarda, meydana gelen eğilme, yük azaldıktan sonra bir miktarı geri dönmektedir.



Şekil 3.16. 2L60×60×6 çaprazına ait olan betonarme prefabrike elemanların, şekildeğişimlerinin geri dönmesi

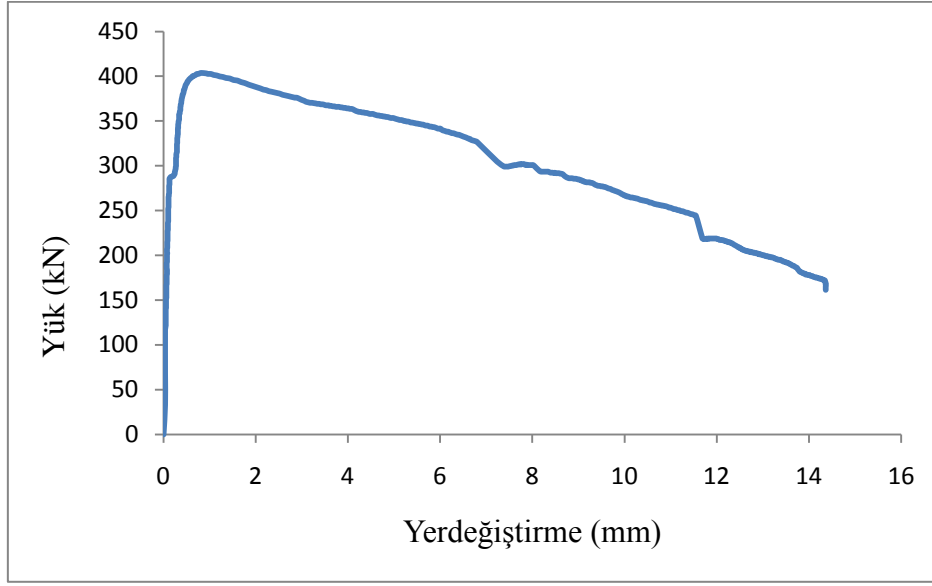
Betonarme prefabrike elemanlarla burkulmaları sınırlandırılmış çaprazların yük-yerdeğiştirme diyagramları, 2L60×60×6 çaprazı için, Şekil 3.17'de ve U65 çaprazına ise Şekil 3.18'de verilmektedir. 2L60×60×6 çaprazına ait olan diyagramdan da (Şekil 3.17), görüldüğü gibi, burkulma olayı meydana gelene kadar, daha rijit bir davranış olmuştur. Deneyde elde edilen yükün 274 kN' a ulaşmasıyla diğer bir deyişle maksimum yükün % 68'ine ulaştığında 0.12 mm lik bir yerdeğiştirme meydana gelmiştir. Bu noktadan sonra, yükün artması devam ettiğinde, maksimum yük 403.82 kN ulaşmış, bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme ise 0.816 mm olmuştur.

Öncede belirtildiği gibi, BRB yönteminde amaç, çaprazların basınç dayanımını çekme dayanımına eşit olmasını sağlamaktır. Böyle ki, çapraz, çekmede ne kadar yük taşıyabilirse, basınçta da aynı yükü taşıyabilsin ve burkulma oluşumu kesitin taşıma kapasitesini azaltmasın. Buna göre, 2L60×60×6 oluşan çaprazın çekme yükü, emniyet gerilme yöntemine göre,

$$\sigma_{em} = 0.60 \times f_y = 0.6 \times 285 = 171 \text{ MPa}$$

$$P_{\zeta} = \sigma_{em} \times A = 171 \times 1382 / 1000 = 236 \text{ kN}$$

olmaktadır. Başka bir deyişle, bu çapraz çekme yükü için tasarlanırsa, proje yükü en fazla 236 kN olması gerekmektedir. Yapılan deneylerde betonarme prefabrike elemanların kullanımı ile, Şekil 3.17 den görüldüğü gibi çaprazın burkulması kolaylıkla sınırlandırılmaktadır. Böyle ki, bu elemanların kullanımı ile, çelik çapraz maksimum 403 kN' luk basınç yükünü taşımaktadır. Çaprazın çekme yüküne karşılık gelen yerdeğiştirme 0.5 mm olmuştur. Özetle, tasarlandığı ve denendiği betonarme prefabrike elemanların boyutları ve detayları, BRB işlemleri için yeterli olmakla birlikte, eğilme rijitliği büyüktür. Öyle ki bu elemanlar çekme ve basınç etkisinde 236 kN için tasarlanmış olsaydı, daha küçük bir eğilme rijitliğine sahip olan prefabrike eleman yeterli olabilirdi. Ancak önceden belirtildiği gibi, prefabrike elemanların kalınlıkları belirli bir miktardan daha az olmamaktadır.



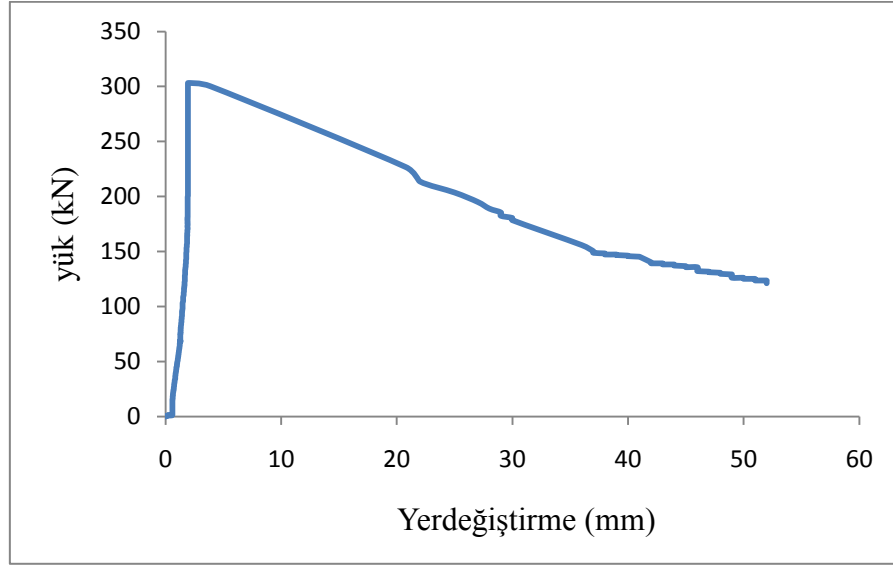
Şekil 3.17. Burkulmaları betonarme prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazın yük – yerdeğiştirme diyagramı

U65 çaprazı için, burkulmaları betonarme prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış yük – yerdeğiştirme diyagramı Şekil 3.18 de verilmektedir. Bu diyagramdan da görüldüğü gibi, davranış rijit olmuştur. Diğer bir deyişle 303 kN'luk yük değerine kadar eğri yaklaşık 90 derece eğimle devam etmiştir. Tepe noktasında, maksimum yük 303 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme 1.9 mm'dir. U65 profilinden oluşan çaprazın, çekme yükü, emniyet gerilme yönteminde, 168 kN olmaktadır.

$$\sigma_{em} = 0.60 \times f_y = 0.6 \times 310 = 186 \text{ MPa}$$

$$P_{\check{c}} = \sigma_{em} \times A = 186 \times 903 / 1000 = 168 \text{ kN}$$

Bu çaprazın burkulmaları betonarme prefabrike elemanlarla sınırlandırılması durumunda, Şekil 3.18 de görüldüğü gibi, 168 kN'luk basınç yükü çok kolaylıkla taşınmaktadır. Bu elemanda da deneyden elde edilen maksimum yüke karşılık gelen yerdeğiştirme 1.90 mm olmuştur. Bu da çaprazın uzunluğunun % 0.095 olmaktadır. Bu çaprazda yerdeğiştirmenin miktarı 2L60×60×6 çaprazına göre daha fazla olmuştur. Zira, U65 çaprazının narinlik oranı, 2L60×60×6 çaprazına göre daha büyüktür.



Şekil 3.18. Burkulmaları betonarme prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış U65 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı

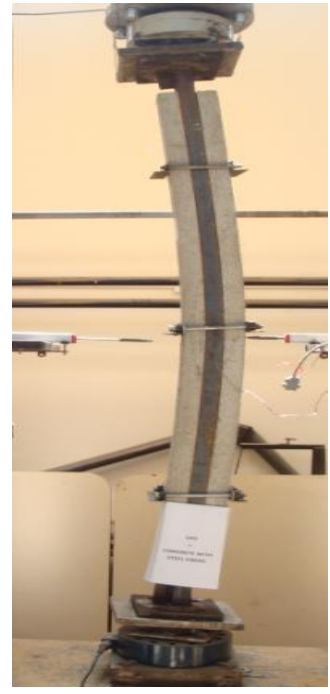
3.3.2. Çelik Lifli Prefabrike Elemanlarla Burkulmaları Sınırlandırılmış Çaprazlar

BRB işlemlerinde, çelik lifli betonlar, burkulmayı sınırlandıran prefabrike eleman olarak, ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Lifli beton prefabrike elemanların kullanılması durumunda, donatı işçiliği çok miktarda azalmaktadır. Önceden de belirtildiği gibi, eğilme rijitliği, BRB işlemlerinde en önemli faktör olarak, burkulmaları sınırlandıran elemanların tasarımında gerekli olmaktadır. Bu nedenle, 2L60×60×6 ve U65 çaprazları için, lifli betonlardan prefabrike elemanlar burkulmayı sınırlandırmak amacı ile kullanılmıştır. Bu elemanların boyutları da, donatılı elemanların boyutları ile, sonuçları karşılaştırmak için, aynı seçilmiştir.

Şekil 3.19 da, 2L60×60×6 çaprazına ve Şekil 3.20 de U65 çaprazına ait burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında bir görünüm verilmektedir.

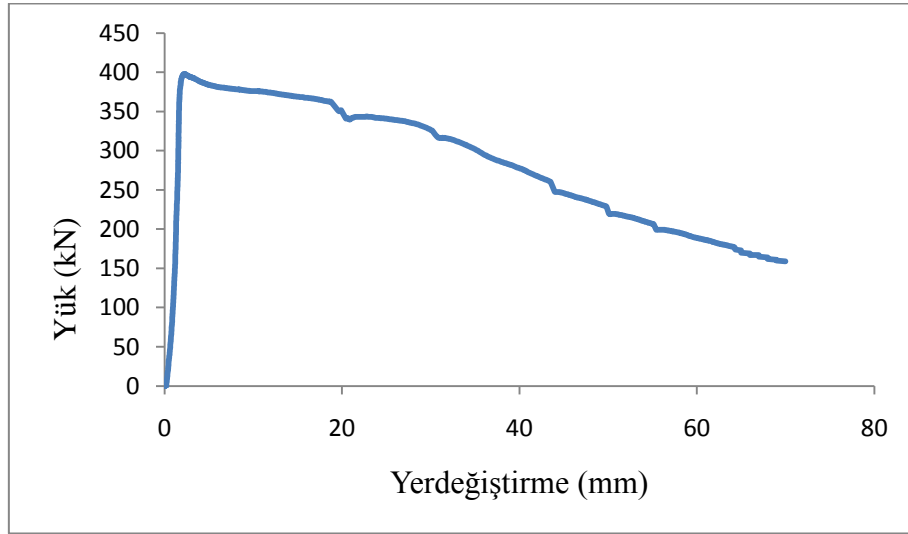


Şekil 3.19. 2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları çelik lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm



Şekil 3.20. U65 çaprazına ait burkulmaları çelik lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

Çelik lifli betonların kullanılması durumunda 2L60×60×6 çaprazında burkulma yükü 398 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme 2.24 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 3.21). Daha önceden de belirtildiği gibi, 2L60×60×6 çaprazı için, gerekli çekme yükü, emniyet gerilme yönteminde, 236 kN olmaktadır. Bu deneyden elde edilen 236 kN' luk yüküne karşılık gelen yerdeğiştirme ise 1.5 mm dir. Bu da çaprazın uzunluğunun % 0.075 civarındadır. Buradan da görüldüğü gibi çelik lifli beton prefabrike elemanlar da çelik çaprazın burkulmasını başarıyla sınırlandırmaktadır. Çelik liflerin kullanılması ile birlikte betonun enerji yutma kapasitesi önemli oranda artmaktadır.



Şekil 3.21. Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı

Şekil 3.22 de burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış U65 çaprazının yük–yerdeğiştirme diyagramı görülmektedir. Bu diyagramda, basınç yükünün 240 kN'luk değerine kadar çelik çaprazda herhangi bir yerdeğiştirme gözlenmemiştir. Basınç yükünün 240 kN 'luk değerinden sonra yerdeğiştirmeler çok az miktarda artmaya başlamaktadır. Öyle ki basınç yükü maksimum 288.7 kN a ulaştığında yerdeğiştirme de 3.98 mm olmaktadır. Bu deneyde de çelik liflerin etkisi kolayca görülmektedir. Bu deneyin maksimum basınç yükünü, betonarme prefabrike elemanlı U65 çaprazın sonuçları ile karşılaştırıldığında (bkz. Şekil 3. 18), basınç yükünün sadece 15 kN azalması görülmektedir.

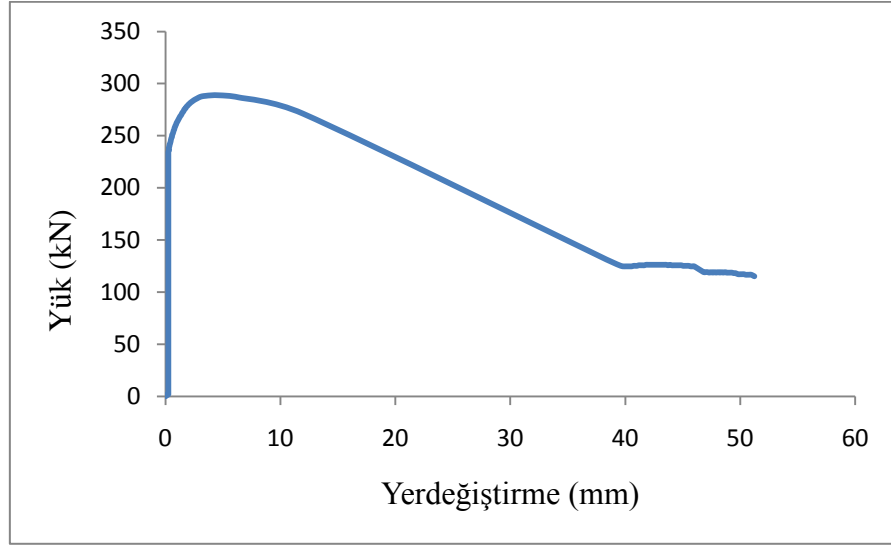
Başka bir deyişle, U65 çaprazında, BRB elemanları betonarme prefabrike yerine çelik lifli beton prefabrike eleman kullanılması halinde sadece 15 kN'luk bir basınç yükü azalması olmaktadır. Ancak betonarme elemanların hazırlanmasındaki donatı işçiliği ve zaman kayıpları meydana gelmemektedir.

BRB elemanları, çelik lifli prefabrike elemanlarla yapılması durumunda da süneklik daha yükselmekte dolayısıyla da BRB'lı çerçevelerin deprem etkisindeki davranışlarında enerji yutma kapasiteleri de artmaktadır.

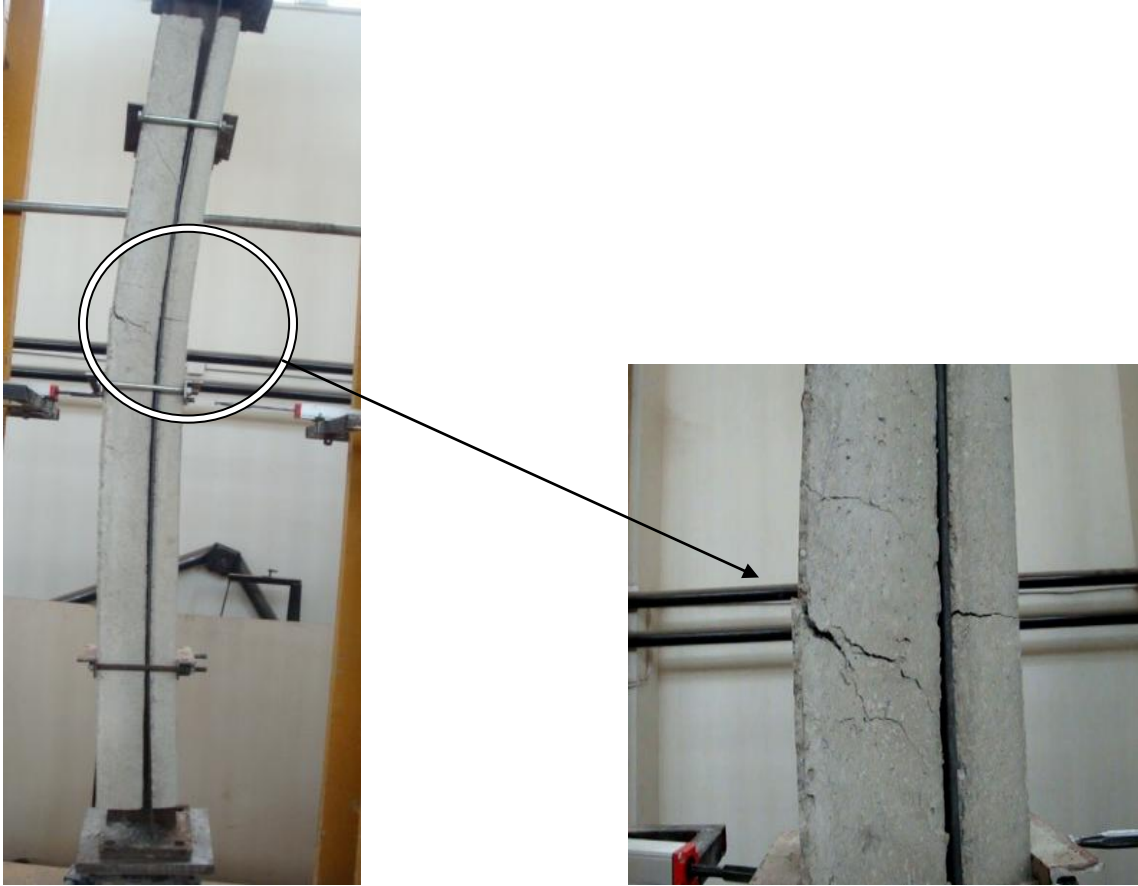
Öncede belirtildiği gibi, yapılan çelik lifli prefabrike elemanlarda, lif oranı, beton hacminin % 1 seçilmektedir. Lif oranının değişimi sonuçları değişebilmektedir. Zira, geleneksel betonda gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin alçalan kolu oldukça kısa olup, bu kol lif içeriğine bağlı olarak uzamaktadır. Çelik lif dayanımının betonun dayanımından yüksek olması nedeniyle, beton dayanımını kaybettikten sonra çelik liflerin devreye girmesiyle maksimum yük değerini bir miktar daha artırmaktadır. Maksimum yükten sonra lifli betonlarda artan şekildeğiştirme sonucunda yükün azalma hızı, normal betonlara göre, çok daha yavaş olmaktadır.

Çelik lifler betonun eğilme etkisindeki davranışına da olumlu katkıda bulunmaktadır. Bu iyileşme, lif oranına ve lif tipine bağlı olarak değişkenlikler olabilmektedir. Lif oranı arttıkça elemanların taşıma gücü ve enerji yutma kapasiteleri yükselmektedir.

Yapılan çelik lifli prefabrike elemanlarında, çatlak türleri ve çelik liflerin etkisi Şekil 3.23'te görülmektedir.



Şekil 3.22. Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış U65 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3.23. 2L60×60×6 çaprazında, çelik lifli prefabrike elemanlarda çatlak oluşumu

Şekilden de görüldüğü gibi, çelik lifli prefabrike elemanda burkulmadan dolayı çatlaklar meydana gelmiş ancak lifler elemanın parçalanmasına engel olmuş dolayısıyla da daha fazla yer değiştirmesini sağlamıştır.

3.3.3. Lirefaalı Sargılı Çelik Lifli Prefabrike Elemanlarla Burkulmaları Sınırlandırılmış Çaprazlar

Bu deneysel çalışmada, Lirefa ile deneylerde yalnızca prefabrike elemanların birbirine bağlanmaları ve bu malzemenin elemanların eğilme rijitliği üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Lirefa kumaşının etkisi, ilk defa olarak, BRB işlemlerinde incelenmektedir. Lirefa kumaşı, burkulmayı sınırlandıran prefabrike elemanlarını birbirine bağlamakla birlikte, bu elemanların sünekliğini de artırmaktadır.

Lirefa sargılı çelik lifli beton prefabrike elemanların, deneyden önce ve deneyden sonraki görünüşleri 2L60×60×6 çaprazına ait Şekil 3.24' de ve U65 çaprazına ait ise Şekil 3.25' de verilmektedir. Bu deneylerde bağlantı korniyer, yani L30×30×3 kullanmamış, prefabrike elemanlar tüm uzunluğu boyunca lirefa ile sarılmıştır. Dolayısıyla da her iki taraftaki prefabrike elemanlar mükemmel çalışmaktadırlar.

Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanların lirefa sarılmasıyla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazına ait yük–yerdeğiştirme diyagramı, Şekil 3.26 da verilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi, davranış oldukça rijit olmuştur (eğrinin eğimi yaklaşık 90 derece). Yükün artması, yaklaşık tepe noktasına kadar devam etmiştir. Bu noktada maksimum basınç yükü 442 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme ise 3.25 mm olmuştur. Maksimum yükten sonra, eleman burkulmuş ve sabit eğimle yerdeğiştirme artarak, taşıma gücünü kaybetmiştir.

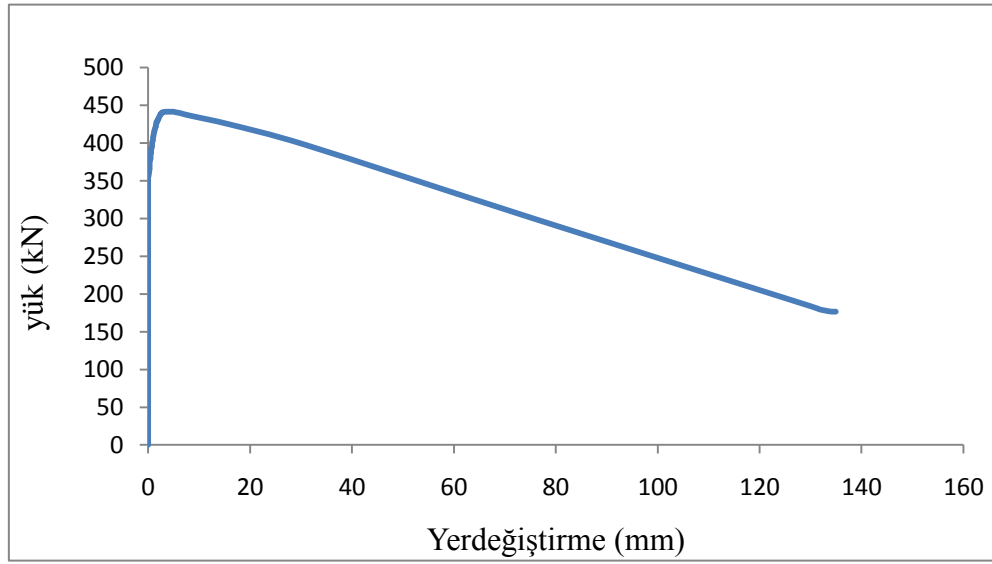


Şekil 3.24. 2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları lirefa sargılı çelik lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm



Şekil 3.25. U65 çaprazına ait burkulmaları lirefa sargılı çelik lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

Daha önce de belirtildiği gibi, 2L60×60×6 çaprazının, emniyet gerilme yönteminde, maksimum tasarım çekme yükü, 236 kN'dur. Şekil 3.26 da görüldüğü gibi, söz konusu deney elemanı herhangi bir yerdeğiştirme yapmadan 236 kN'luk basınç yükünü, deneysel burkulma yüküne göre, yaklaşık %87 bir emniyetle taşıyabilmektedir. Çelik lifli prefabrike beton elemanların çelik çaprazlarda, üç yerinden korniyerler yardımıyla bir birine bağlanması durumunda taşınabilen maksimum basınç yükü 398 kN olmasına rağmen bu elemanların tüm uzunluğu boyunca lirefa ile sarılması durumunda söz konusu yük 442 kN' a ulaşmıştır. Dolayısıyla da burkulmayı sınırlandırmak için, özellikle tasarım çekme yükü dikkate alındığında, bu elemanların lirefa ile sarılması durumunda daha fazla yük taşınmasına rağmen her iki yöntemin de kullanılabilmesi görülmektedir.

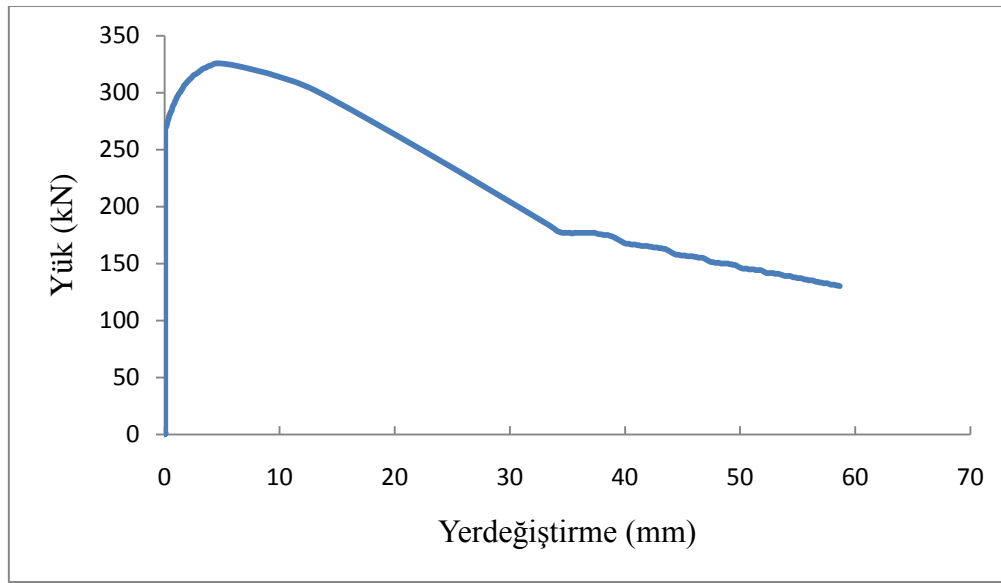


Şekil 3.26. Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla ve lirefa sarılmasıyla sınırlanmış 2L60×60×6 çaprazın yük – yerdeğiştirme diyagramı

Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla ve lirefa sarılmasıyla sınırlanmış U65 çaprazına ait yük–yerdeğiştirme diyagramı, Şekil 3.27 de verilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi, basınç yükü altında davranış oldukça rijit olmuştur. Yükün artması, lineer olarak 275 kN yüküne kadar devam etmiştir. Bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme ise 0.2 mm dir. Bu da çapraz uzunluğunun % 0.01 dir. Bu deneyde maksimum

basınç yükü 326 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme ise 4.59 mm olmuştur (Şekil 3.27). Buradan da, U65 profili ile oluşturulan çelik çapraz elemanda da L-profili ile oluşturulan çelik çaprazdaki davranış gözlemlenmiş dolayısıyla da burkulmayı sınırlandırmak için kullanılan prefabrike elemanların bağlantı şeklinin lirefa ile yapılmasının sünekliği ve maksimum basınç yükünü artırması yanında, tasarım çekme yüküne eşit bir basınç yükünü burkulmadan taşıyabilmesi için korniyerli bağlantının da yeterli olduğu görülmüştür.

Lirefa kumaşının çekme dayanımının yüksek olduğu nedeniyle, yapılan deneylerde, bu kumaşa, hiç bir kırılma veya kopma görülmemektedir.

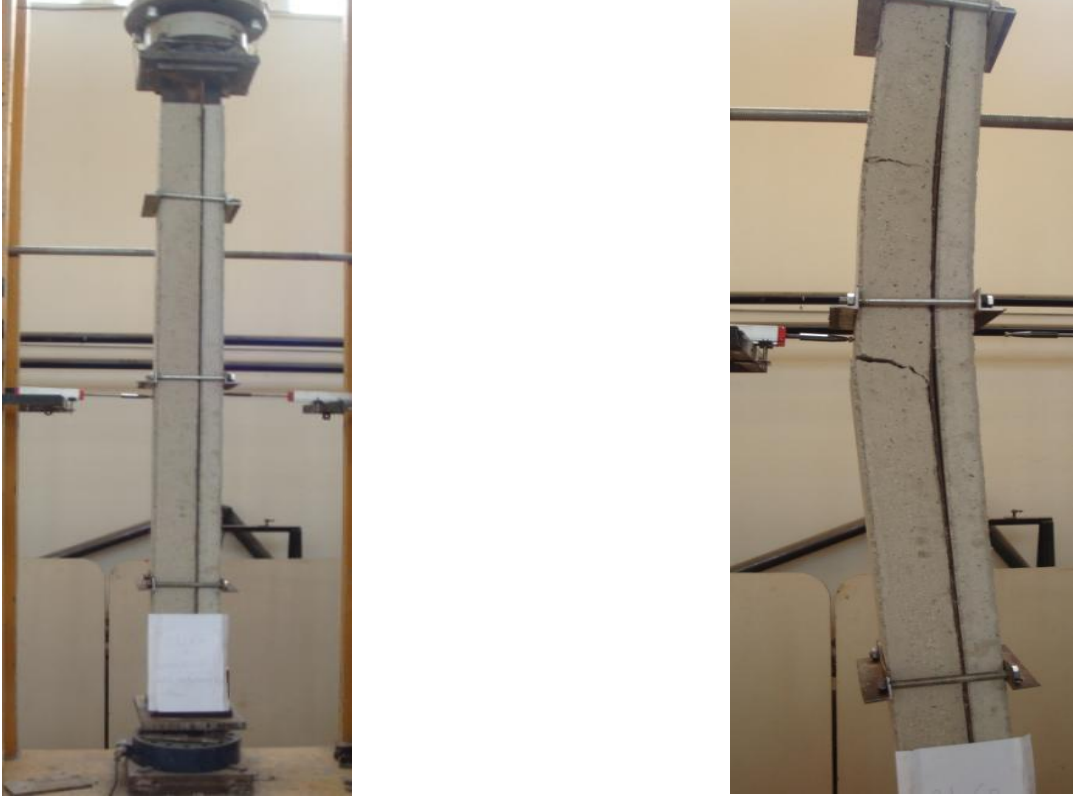


Şekil 3.27. Burkulmaları çelik lifli beton prefabrike elemanlarla ve lirefa sarılmasıyla sınırlandırılmış U65 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı

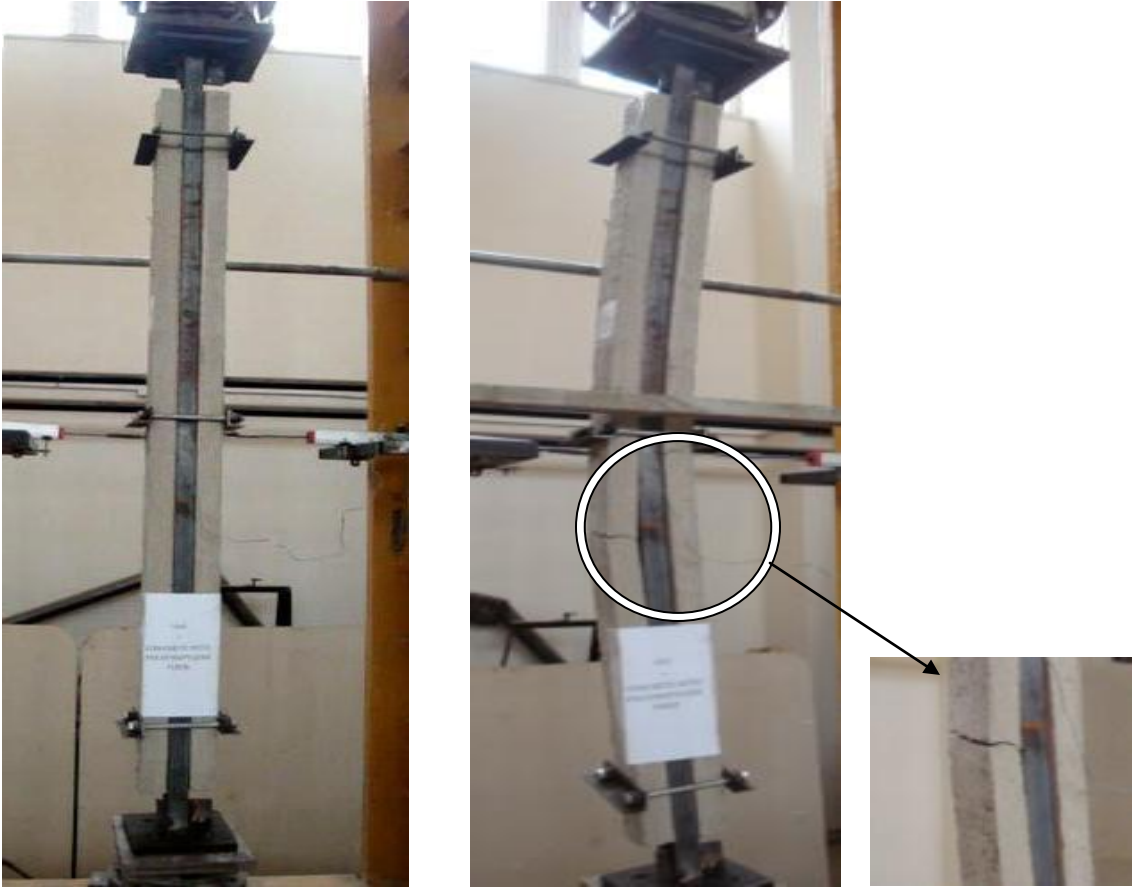
3.3.4. Polypropilen Lifli Prefabrike Elemanlarla Burkulmaları Sınırlandırılmış Çaprazlar

Bu çalışmada, polypropilen liflerin BRB elemanları olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. 2L60×60×6 ve U65 çaprazlarına ait burkulmalarını sınırlandıran elemanlarda, F19 tipinde polypropilen lifleri kullanılmıştır. 2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları polypropilen lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında bir görünüm, Şekil 3.28 de, ve U65 çaprazı için, Şekil 3.29 da verilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi,

burkulandan sonra meydana gelen eğilme çatlakları, bu deneylerde çok geniş olmaktadır. Ayrıca, deney esnasında, bu çatlaklar veya kırılmalar ani ve gevrek olarak meydana gelmiştir.

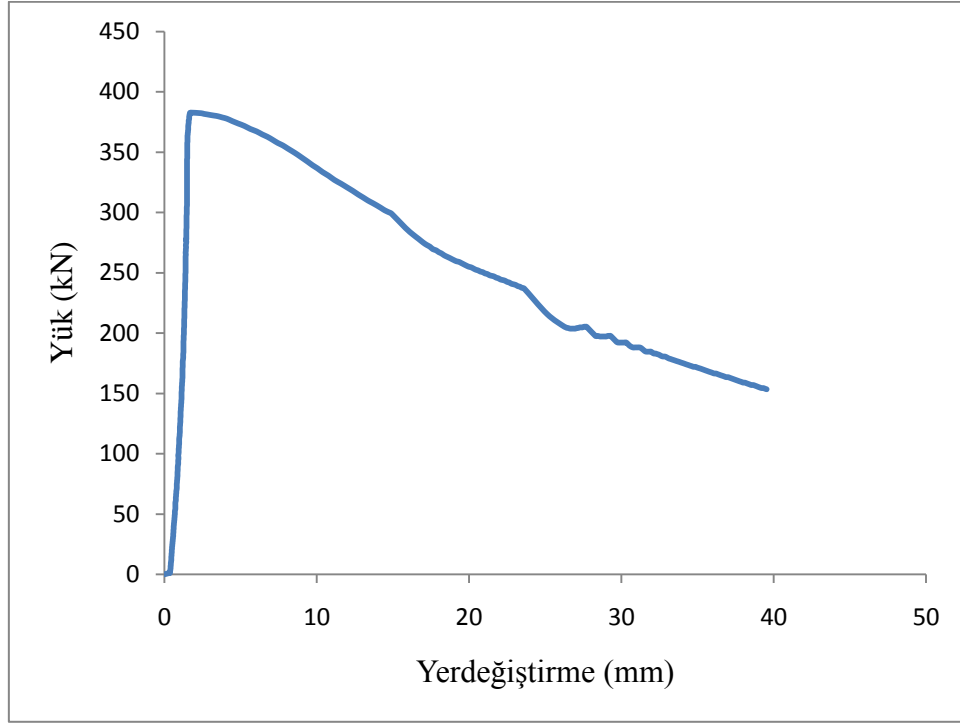


Şekil 3.28. 2L60×60×6 çaprazına ait burkulmaları polypropilen lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm



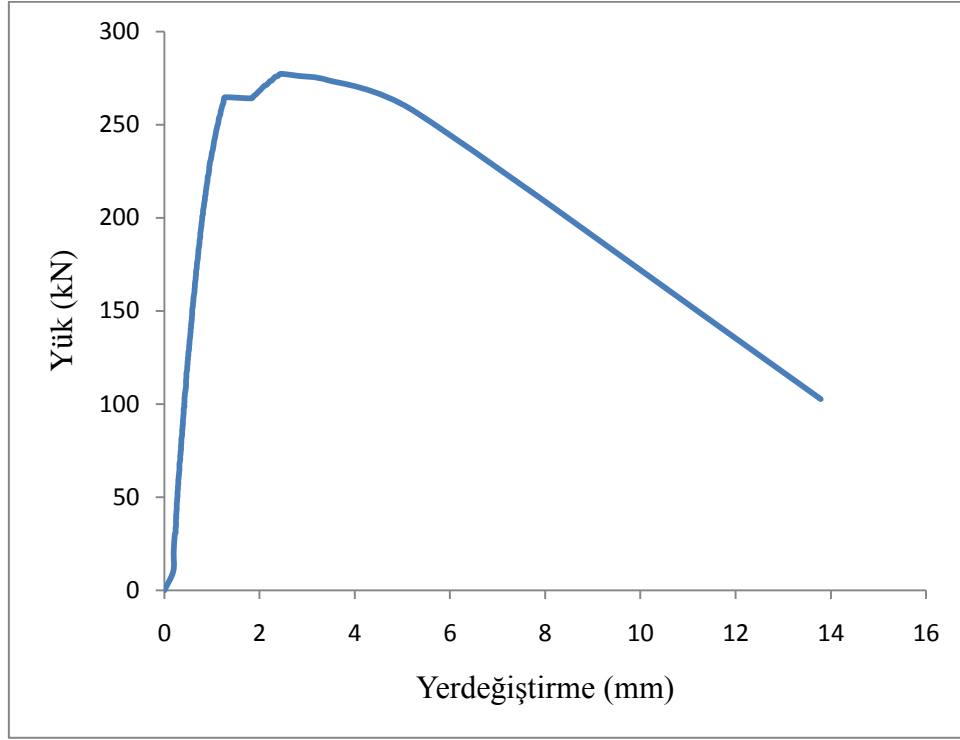
Şekil 3.29. U65 çaprazına ait burkulmaları polypropilen lifli betonla sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

Burkulmaları polypropilen lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramı, Şekil 3.30 da görülmektedir. Bu diyagramda da, yük doğrusal olarak, nihai taşıma kapasitesine kadar artmıştır. Deneylerde, maksimum basınç yükü 382 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme 1.7 mm olarak elde edilmiştir. Yapılan deneylerden, polypropilen lifler kullanılarak üretilen beton prefabrike elemanlar, birdenbire çatladığı ve ani bir şekilde kırıldığı görülmüştür. Diğer bir deyişle bu tür elemanlar yeterli bir süneklikte davranış sergilememiştir. Bu nedenle BRB işlemlerinde, burkulmayı sınırlandırmasına rağmen, tercih edilmemesi tarafımızdan önerilmektedir. .



Şekil 3.30. Burkulmaları polypropilen lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış 2L60×60×6 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı

Burkulmaları polypropilen lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış U65 çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramı, Şekil 3.31 de görülmektedir. Bu deneyde, maksimum basınç yükü 277 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme 2.45 mm olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, basınç yükü 260 kN ulaştığında, büyük bir yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme meydana gelmiştir. Bu noktada ani çatlama ve kırılma oluşmaktadır. Bu noktadan sonra, yükün artması düşük hızla devam etmektedir. Ancak bu artma miktarı çok büyük değildir. Başka bir deyişle, adı geçen noktada, polypropilen lifler devreye girip eğilmeden meydana gelen çekmeyi tutmaktadırlar. Ancak dayanımları düşük olması nedeniyle, artış çok fazla olmamıştır. Bu deneyde de görüldüğü gibi, BRB işlemlerinde, polypropilen liflerin, burkulmanı sınırlandıran eleman olarak, kullanılması tavsiye edilmemektedir.

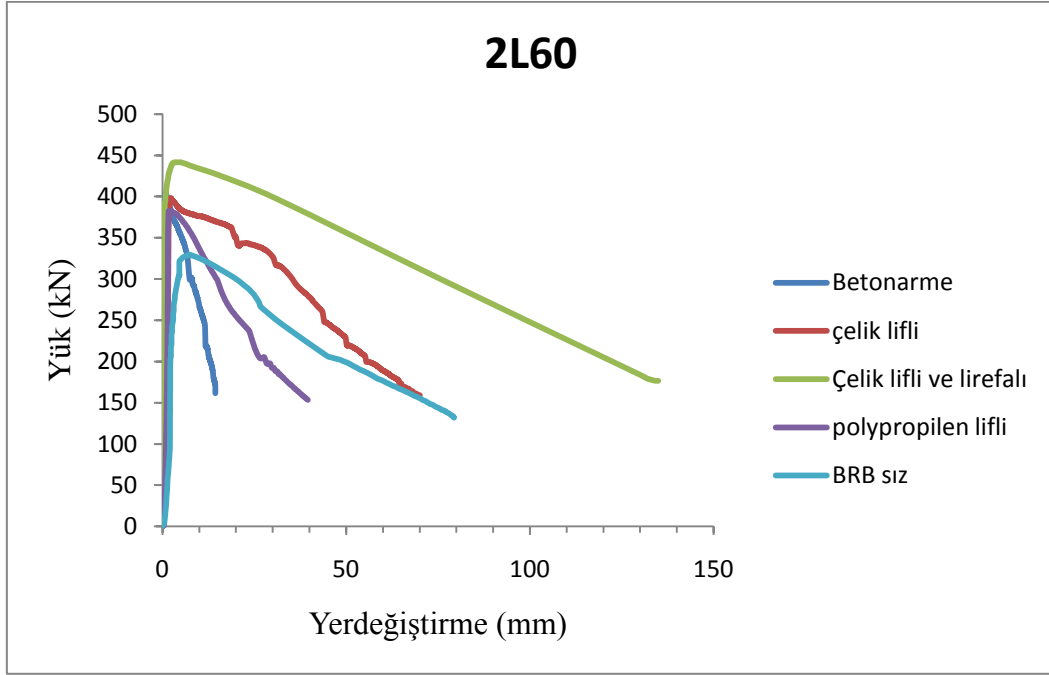


Şekil 3.31. Burkulmaları polypropilen lifli beton prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış U65 çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı

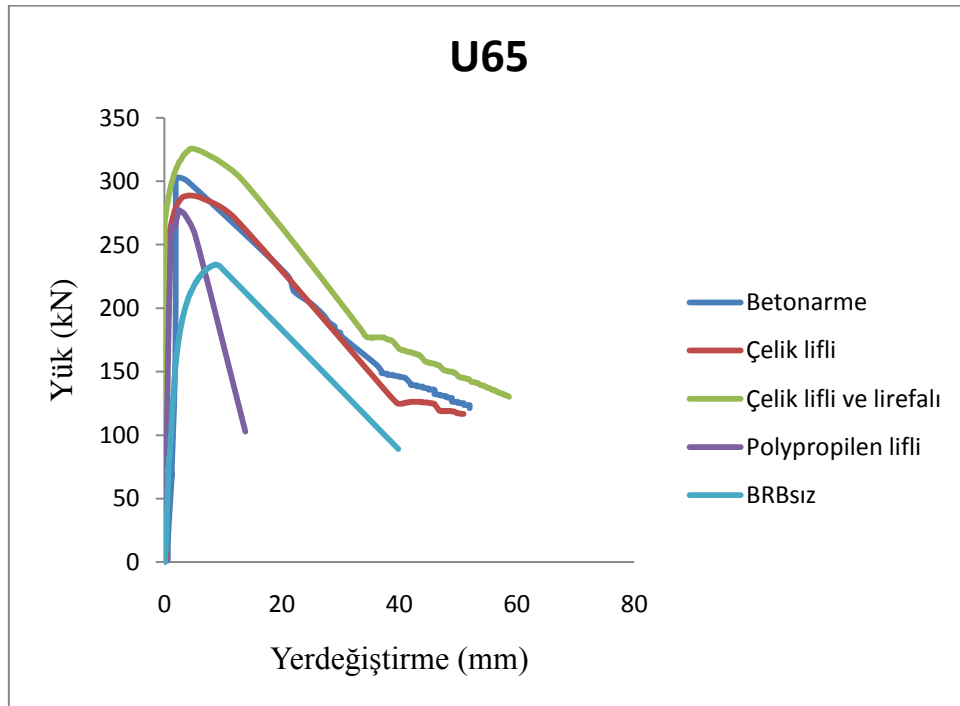
Çelik çerçeve sistemlerde, prefabrike elemanlarla burkulması sınırlandırılmış çaprazların davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada 2L60×60×6 ve U65 çaprazlarına ait deneylerin sonuçları Tablo 3.3'te verilmektedir. Bu tabloda, her çaprazın maksimum yükü ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme, burkulmayı sınırlandıran prefabrike elemanların kullanılması veya kullanılmaması tartışılmaktadır. Bununla birlikte, 2L60×60×6 ve U65 çaprazlarına ait yük-yerdeğiştirme diyagramları Şekil 3.32 ve Şeki 3.33'te verilmiştir.

Tablo 3.3. 2L60×60×6 ve U65 çaprazlarına ait deneylerin sonuçları

Çapraz Tipi	BRB	Kesit alanı (mm ²)	Maksimum yük(kN)	Yerdeğiştirme (mm) (maksimum yüke karşılık gelen)	Çeliğin akma dayanımı (MPa)
2L60×60×6	-----	1382	329	7.148	285
2L60×60×6	Betonarme	1382	403.82	0.816	285
2L60×60×6	Çelik lifli	1382	398.05	2.247	285
2L60×60×6	Çelik lifli + Lirefa	1382	442	3.25	285
2L60×60×6	Polypropilen lifli	1382	382.7	1.704	285
U65	-----	903	234.35	8.62	310
U65	Betonarme	903	303.24	1.929	310
U65	Çelik lifli	903	288.659	3.98	310
U65	Çelik lifli + Lirefa	903	326	4.59	310
U65	Polypropilen lifli	903	277.32	2.45	310



Şekil 3.32. 2L60×60×6 çelik çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramları



Şekil 3.33. U65 çelik çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramları

Tablo 3.3 ve şekillerden görüldüğü gibi, çelik çaprazların burkulmalarını sınırlandırmak için kullanılan prefabrike elemanlar, çelik çaprazın burkulmadan taşıma kapasitelerini artırmıştır. Çelik lifli ve lirefa sargılı elemanlarda taşıma kapasitesi diğerlerine göre daha fazla olmuştur. Bu da burkulmanın olmasıyla çelik çaprazın çelik lifli beton prefabrike elemanlara verdiği hasarın ve/ya da betonun parçalanmasının lirefa yardımıyla engellenmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bunla birlikte prefabrike elemanların çelik çaprazların etrafına yerleştirilmesi lirefa türü bir malzeme ile yapılması durumunda süneklik de artmaktadır. Ancak çelik lifli prefabrike elemanların üç noktadan bağlanması ile lirefa gibi malzemeler yardımıyla sürekli bağlanması arasında, çelik çaprazların tasarımının emniyet gerilmeleri yönteminde çekme yüküne göre yapıldığı dikkate alınırca, çok büyük bir farkın olmadığı görülmektedir. Lirefa gibi zahmetli ve ekonomik olmayan bir bağlantı ancak yüksek basınç kuvveti ve süneklik gerektiren işlerde kullanılmasının uygun olabileceği anlaşılmaktadır.

3.3.5. Polyeten ve Polyamid Levhalarla Burkulmaları Sınırlandırılmış Çaprazlar

Bu deneysel çalışmada, 2L60×60×6 ve U65 profillerinden oluşan çaprazlara ilave, 100×10 çelik levha üzerinde de, çeşitli deneyler yapılmıştır. Pratikte, çelik çaprazlı çerçeve sistemlerde, çelik levhalar çapraz olarak kullanılmamaktadır. Zira bu levhaların zayıf eksenindeki atalet momenti, güçlü ekseninkine göre çok düşüktür. Bilindiği gibi çaprazlar hem çekme ve hem de basınç yükü için tasarlanıp ve yapılmaktadır. Bu nedenle çelik levhalardan, çapraz tasarlanırsa çok büyük ve ağır olmaktadır. Ancak geçen 20 yılda BRB üzerinde yapılan araştırmalarda, çelik levhaların, basit ve rahat kullanılmaları hatta istenilen boyutlarda şantiyelerde kesilip hazırlanması kolaylıkları nedeniyle, kullanılabilmesi onaylanmaktadır.

Çelik levhaların çelik çapraz olarak kullanılması, ancak bu çaprazın çelik bir tüp içine, yerleştirilmesi (BRB) ile mümkün olabilmektedir. Diğer bir deyişle, burkulmayı sınırlandıran eleman olarak çelik tüpün içine yerleştirilen beton veya betonarme olmaktadır. Beton ve betonarme işlemlerinin zahmetli ve zaman alıcı olması nedeniyle, bu araştırmada, çaprazların

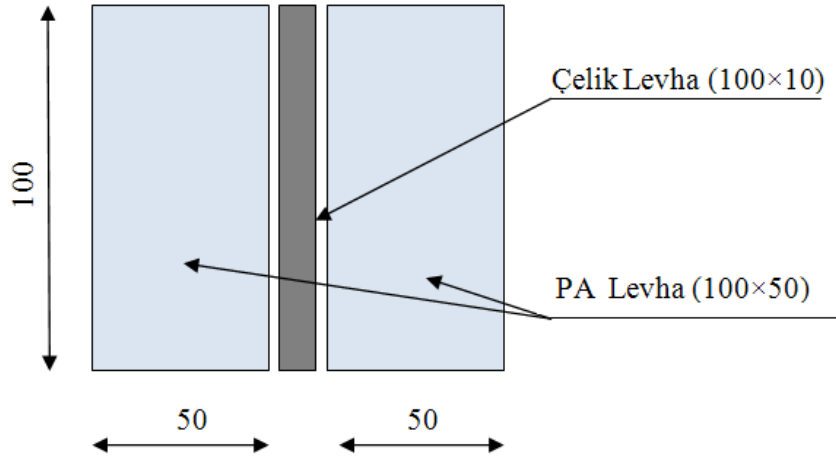
burkulmasını sınırlandıran eleman olarak, çelik levhanın üzerinde yerleştirilen, polyetilen ve polyamid levhaların davranışı araştırılmıştır.

100×10 çelik levha çaprazının, burkulmasının sınırlandırılması için, HDPE (High Density PolyEtilen) ve PA (PolyAmide) levhaları, ilk defa, bu çalışmada kullanılmıştır. Kullanılan HDPE ve PA levhaların eni 100 mm ve enkesit boyutları ve mesnetlenme koşulları aynı seçilmiştir. Ancak HDPE levhaların kalınlığı 45mm ve PA levhaların kalınlığı ise 50 mm seçilmiştir. Üretilen levhalar çelik çaprazların iki tarafına koyulmuştur. Numunelerin hepsi basınç yükü altında test edilmiştir. Basınç yükü numunelerde akma noktasına ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. 100 ×10 çelik çaprazına ait olan narinlik oranı zayıf ekseninde tüm numunelerde 339 ve burkulma katsayısı $k=1$ tutulmuştur (alt ve üstten basit mesnetli kabulü).

Bu deneylerin sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla, ilk önce çelik çapraz, burkulması sınırlandırılmamış halinde deneye tabi tutulmuştur. Bu numunenin şekli, burkulmaları sınırlandırılmamış numunelerle birlikte, Şekil 3.6 da, deneyden önce ve deneyden sonra görülmektedir. Bu deneye ait yük-yerdeğiştirme diyagramı da, Şekil 3.9 da verilmektedir.

Burkulması sınırlandırılmamış deneyden sonra, dört numune HDPE ve PA levhalarla denenmiştir. Bu numunelerden ikisi HDPE levhası üzerinde, ve ikisi de, polyamid levhası üzerinde deneye tabi tutulmuştur. HDPE ve PA levhaların uzunluğu, tüm numunelerde, 850 mm olarak, çelik çapraz uzunluğundan daha kısa seçilmiştir. HDPE ve PA levhaları 6 cıvata ile 3 noktada 30×30×3 korniyerlerle çelik çapraza bağlanmıştır.

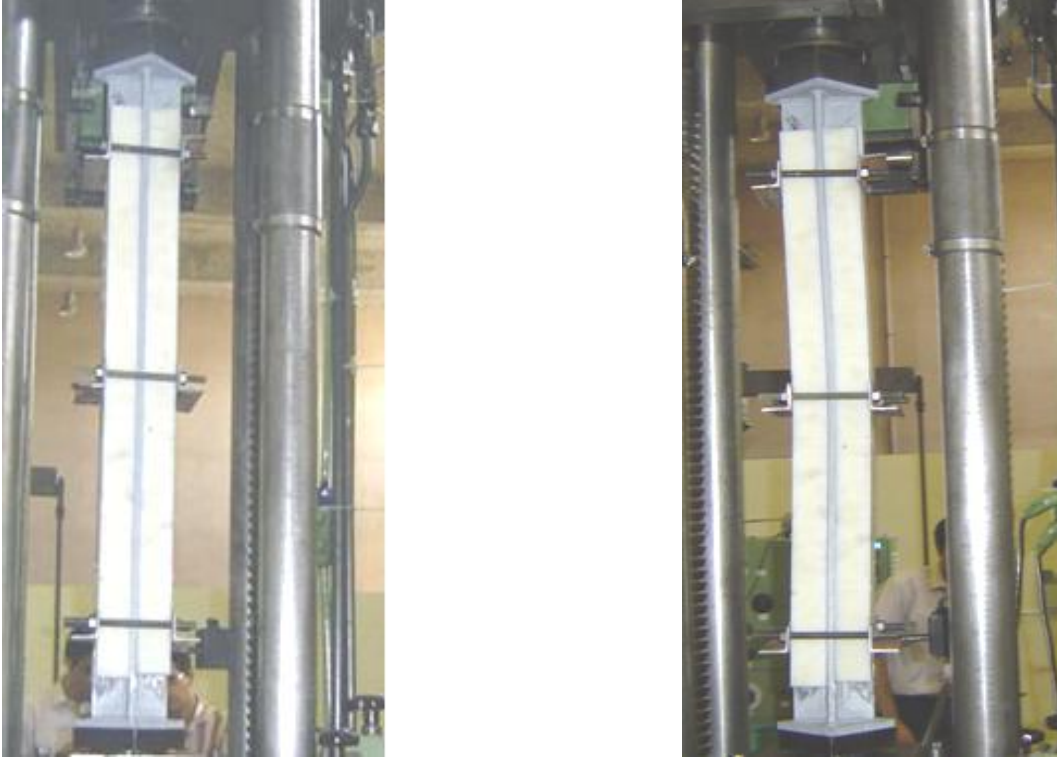
Polyamid ve HDPE levhaları, hem zayıf ve hem de güçlü ekseninde kullanılmıştır. Şekil 3.34'te, kullanılan polyamid levhalarının nasıl çapraza bağlandığı, boyutlarıyla birlikte, zayıf eksen yönünde, şematik olarak verilmektedir. Bu levhaların güçlü veya zayıf ekseninde denenmesi nedeni, bu levhaların atalet momentinin etkisini BRB işlemlerinde araştırılmasıdır.



Şekil 3.34. 100×10 levha çaprazına ait Polyamid levhaların zayıf ekseninde yapımı

$$100 \times 10 \text{ çelik levha} \begin{cases} I_x = 83.3 \text{ cm}^4 \\ I_y = 0.83 \text{ cm}^4 \end{cases}, \text{ Burkulmayı sınırlandıran elemanların} \begin{cases} I_x = 833 \text{ cm}^4 \\ I_y = 1232 \text{ cm}^4 \end{cases}$$

100×10 levha çaprazına ait, burkulmaları Polyamid levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında bir görünüm, Şekil 3.35'te görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi, çapraz ve onu tutan elemanlar, basınç yükü arttıktan sonra, genel burkulma durumuna gelmektedirler. Polyamid levhaların atalet momentinin az olması nedeniyle, bu levhalar, çapraza gelen basınç yükünü tamamen tutmasına imkan vermemektedir. Bu çapraza ait, yük-yerdeğiştirme diyagramı Şekil 3. 36'da verilmektedir.



Şekil 3.35. 100×10 levha çaprazına ait burkulmaları polyamid levhalarla zayıf eksende sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

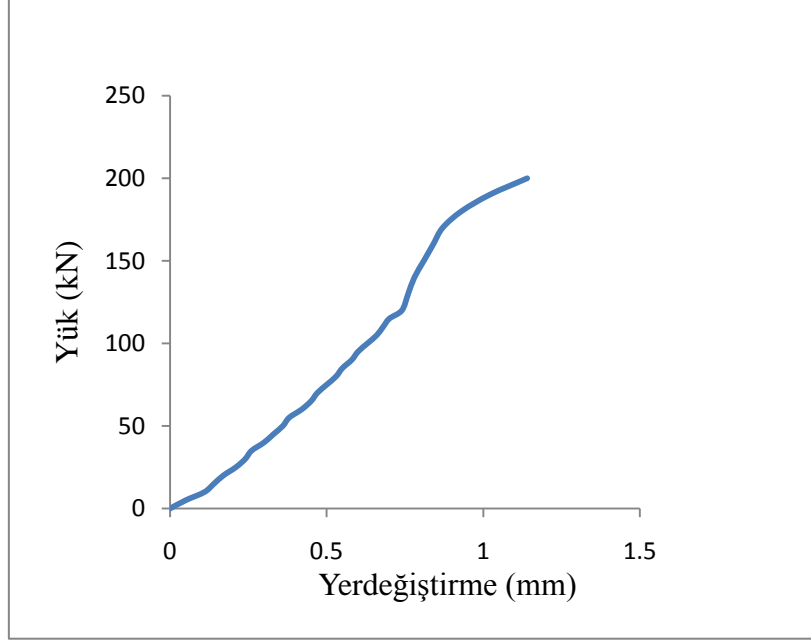
Şekil 3.36 dan görüldüğü gibi, basınç yükünün 122 kN'a ulaşmasıyla, küçük bir yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Bu yerdeğiştirmenin miktarı, 0.7 mm olmaktadır. Yükün artması devam ettiğinde, yerdeğiştirme 1.14 mm ve buna karşılık gelen basınç yükü 196 kN olmuştur. Bu deneylerde çelik çaprazın, çekme dayanımı, akma aşamasında, 247 kN ve emniyet gerilme yönteminde göre tasarım çekme kuvveti,

$$\sigma_{em} = 0.60 \times f_y = 0.6 \times 247 = 148 \text{ MPa}$$

$$P_{\zeta} = \sigma_{em} \times A = 148 \times 1000 / 1000 = 148 \text{ kN} \quad \text{olarak hesaplanmaktadır.}$$

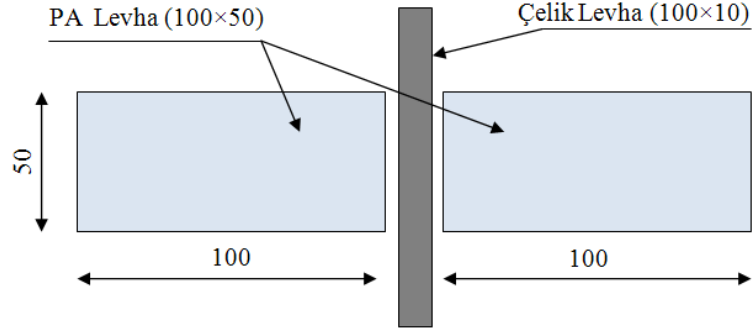
Polyamid levhaların zayıf eksende kullanılması durumunda, çelik çaprazın burkulması sınırlandırılmaktadır. Öyle ki, en fazla taşıdığı basınç yükü (196 kN), çekmede taşıdığı tasarım yükünden büyüktür. Ancak, bu basınç yükü, akma dayanımı dikkate alınarak hesaplanan çekme yükünden (247 kN) düşüktür. Basınç yükünün akmada çekme yükünden büyük olması

için, eğilme rijitliğinin artırılması gerekmektedir. Bu nedenle, polyamid levhaların ekseni değiştirilip yeniden deney yapılmıştır.



Şekil 3.36. Burkulmaları polyamid levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı

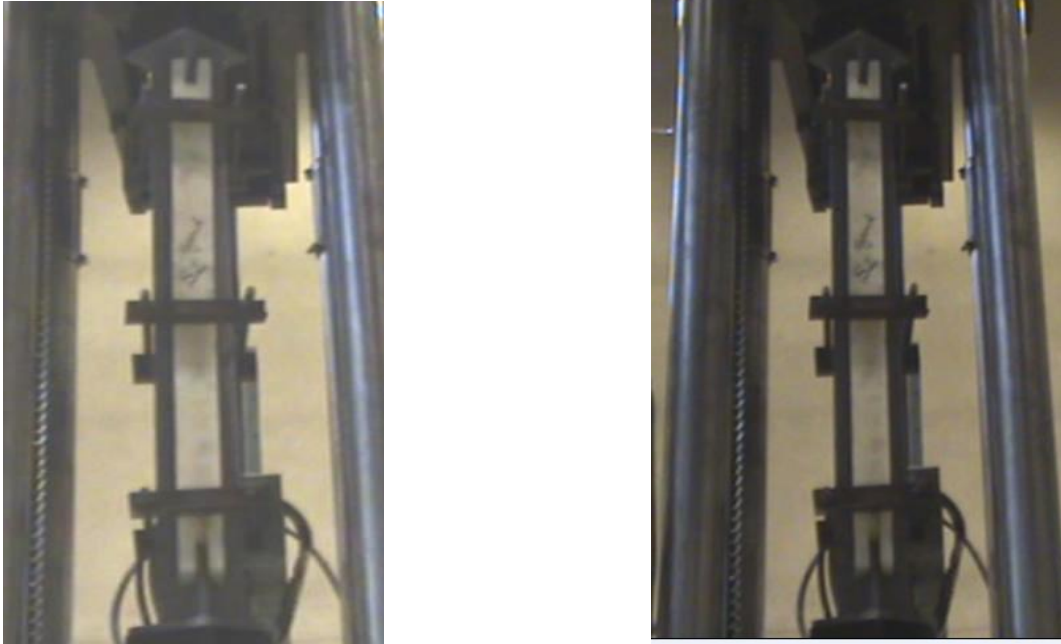
Daha önceden de belirtildiği gibi, söz konusu levhaların güçlü ekseninde kullanılmasının nedeni, onların atalet momentinin artırılması ve sonuçta, eğilme rijitliğinin yükseltilmesidir. Bu nedenle, Şekil 3.37'de görüldüğü gibi, polyamid levhaların ekseni değiştirilmiş ve güçlü ekseninde deneye hazırlanmıştır. Bu durumda, kesit alanının atalet momenti, zayıf eksene göre, 9.4 katıdır.



Şekil 3.37. 100×10 levha çaprazına ait Polyamid levhaların güçlü ekseninde yapımı

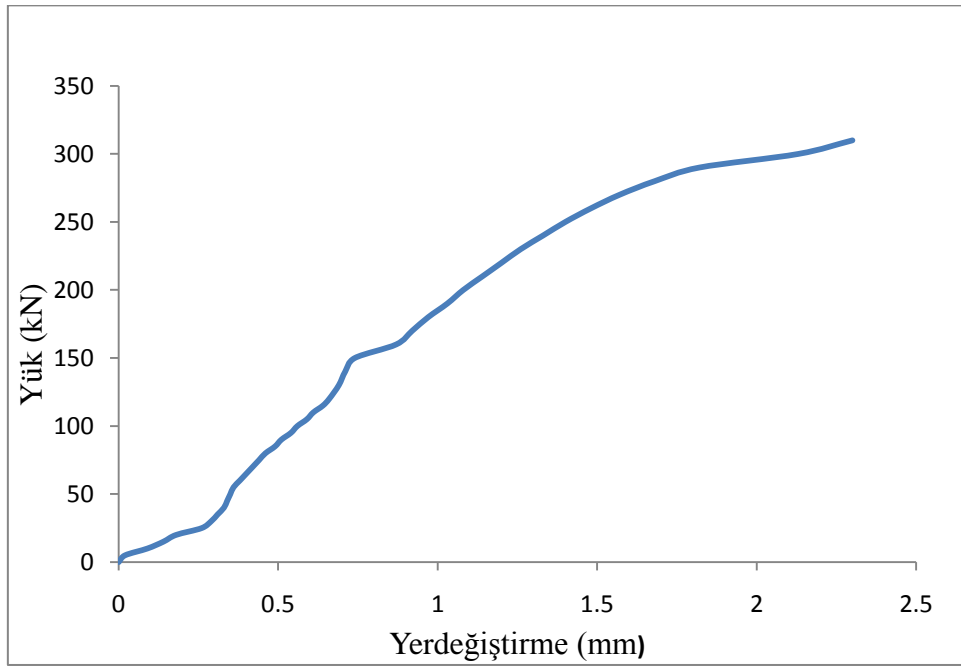
$$100 \times 10 \text{ çelik levha} \begin{cases} I_x = 83.3 \text{ cm}^4 \\ I_y = 0.83 \text{ cm}^4 \end{cases}, \text{Burkulmayı sınırlandıran elemanların} \begin{cases} I_x = 208 \text{ cm}^4 \\ I_y = 4082 \text{ cm}^4 \end{cases}$$

100×10 levha çaprazına ait, burkulmaları Polyamid levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında bir görünüm, Şekil 3.38 de görülmektedir.



Şekil 3.38. 100×10 levha çaprazına ait burkulmaları polyamid levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

Bu şekilden görüldüğü gibi, burkulmadan önce meydana gelen yerdeğiştirme çok küçüktür. Dolayısıyla da, polyamid levhalar, basınç yükü altında kolayca, burkulmayı sınırlandırmaktadır. Şekil 3.39 da görüldüğü gibi, yutulan enerji, zayıf eksene göre yapılan deneye göre çok yüksektir. Şekil 3.39 da, bu çaprazda ait, yük-yerdeğiştirme diyagramı verilmektedir. Bu deneyde, maksimum yük 308 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme 2.3 mm olmuştur. Bu çaprazda, maksimum basınç yükü, yani 308 kN, çaprazın akmadaki çekme yükünden (247 kN) fazla olmaktadır. Bu sonuç polyamid levhaların etkisini burkulmayı sınırlandırmak işlemlerinde kolaylık göstermektedir.

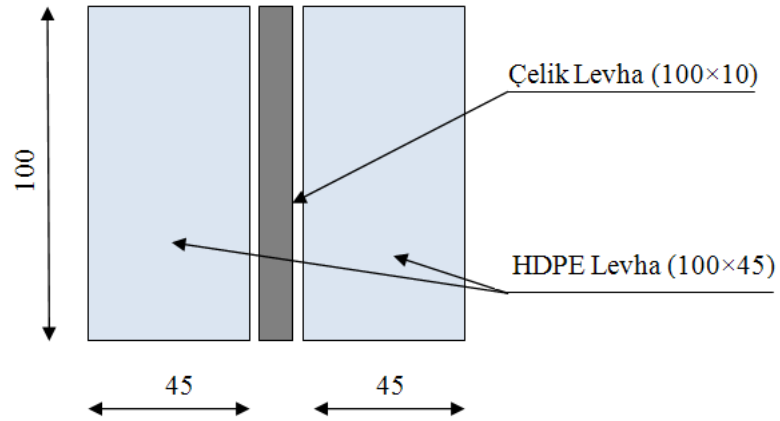


Şekil 3.39 Burkulmaları polyamid levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük –yerdeğiştirme diyagramı

Polyamid levhaların pahalı olması nedeniyle, bu levhaların yerine, başka bir deneylerde, HDPE levhaları kullanılmıştır. HDPE levhaların fiyatı, polyamid levhalara göre beşte biri civarında olmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi, BRB işlemlerinde, en önemli faktör, eğilme rijitliğidir. Eğilme rijitliği, atalet momentine ve elastisite modülüne bağlı olmaktadır.

HDPE levhaların elastisite modülleri, 1379 MPa ve bu modül, polyamid levhalar için 2500 MPa olmaktadır. Bu nedenle, ekonomi bakımından HDPE levhaları, hem zayıf eksen ve hem de güçlü eksen deney için hazırlanmıştır.

100×10 levha çaprazına ait, burkulmayı sınırlandırmak için HDPE levhaların zayıf eksen yapımı, Şekil 3.40 da görülmektedir.



Şekil 3.40. 100×10 levha çaprazına ait HDPE levhaların zayıf eksen yapımı

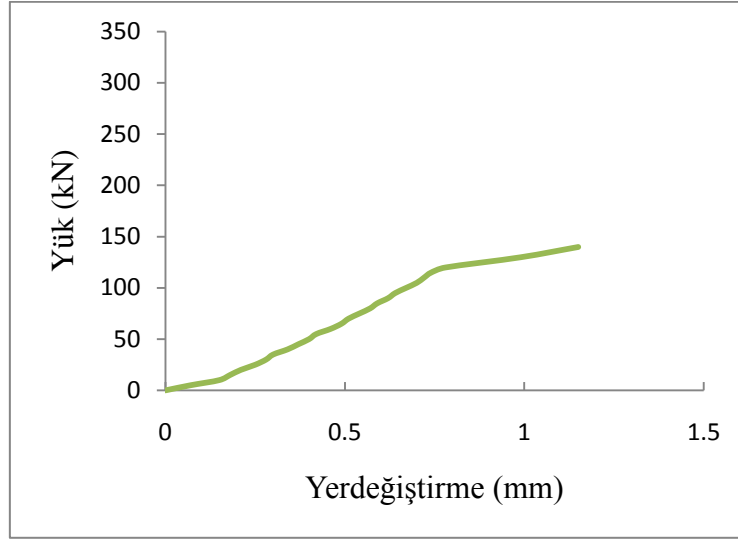
$$100 \times 10 \text{ çelik levha} \begin{cases} I_x = 83.3 \text{ cm}^4 \\ I_y = 0.83 \text{ cm}^4 \end{cases}, \text{Burkulmayı sınırlandıran elemanların} \begin{cases} I_x = 750 \text{ cm}^4 \\ I_y = 935 \text{ cm}^4 \end{cases}$$

Beklendiği gibi, zayıf eksen kullandığı polyetilen levhaların BRB etkisi, burkulmanın sınırlandırılmasında, çok etkili değildir. 100×10 levha çaprazına ait burkulmaları HDPE levhalarla zayıf eksen sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında bir görünüm, Şekil 3.41 de görülmektedir.



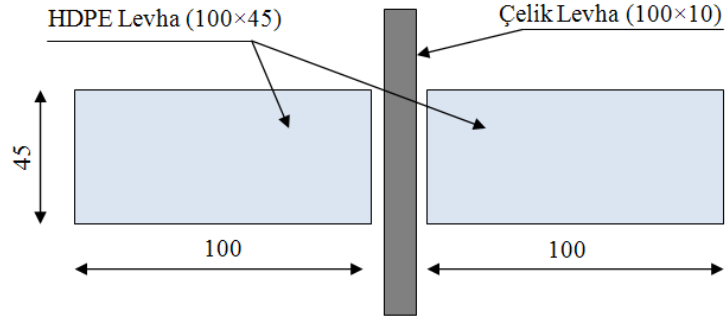
Şekil 3.41. 100×10 levha çaprazına ait burkulmaları HDPE levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

HDPE levhaları, zayıf ekseninde kullanıldığında, meydana gelen yük-yerdeğiştirme diyagramı, Şekil 3.42 de verilmektedir. Bu diyagramdan görüldüğü gibi, basınç yükünün 120 kN' a ulaşmasıyla büyük yerdeğiştirmeler başlamaktadır. Bu aşamadan sonra, yükün maksimum miktarı, 149 kN, ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme 1.45 mm olmuştur.



Şekil 3.42. Burkulmaları HDPE levhalarla zayıf eksende sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük –yerdeğiştirme diyagramı

HDPE levhaların güçlü ekseninde kullandığı enkesit detayı Şekil 3.43'te verilmektedir. Bu levhaların atalet momentinin yüksek olması nedeniyle, burkulmayı sınırlandırmada büyük etkisi olmaktadır. Bu levhalarla yapılan deneylerden bir görünüm Şekil 3.44'te görülmektedir.



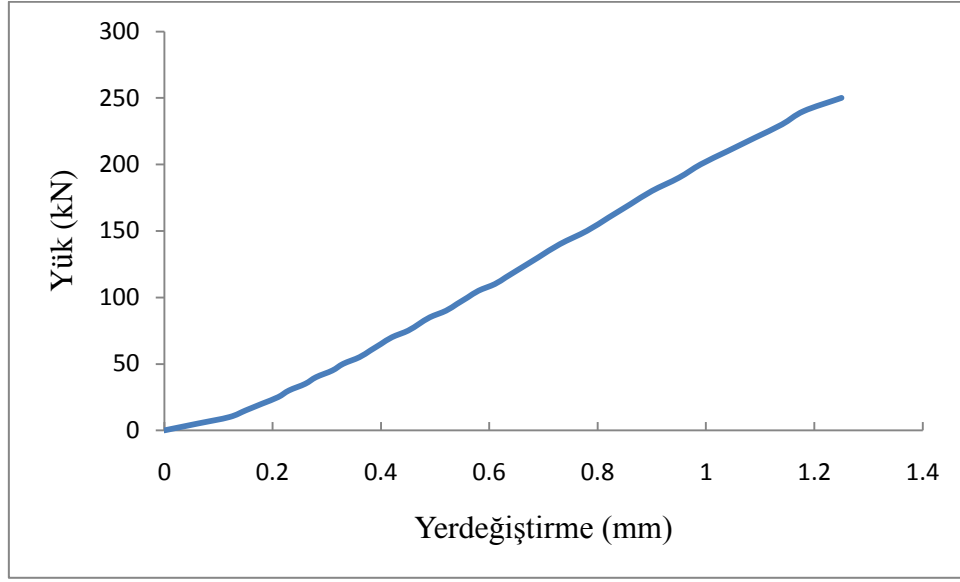
Şekil 3.43. 100×10 levha çaprazına ait HDPE levhaların güçlü ekseninde yapımı

$$100 \times 10 \text{ çelik levha} \begin{cases} I_x = 83.3 \text{ cm}^4 \\ I_y = 0.83 \text{ cm}^4 \end{cases}, \text{Burkulmayı sınırlandıran elemanların} \begin{cases} I_x = 152 \text{ cm}^4 \\ I_y = 3674 \text{ cm}^4 \end{cases}$$



Şekil 3.44. 100×10 levha çaprazına ait burkulmaları HDPE levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış deney öncesi ve deney sonrasında görünüm

Burkulmaları HDPE levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı, Şekil 3.45'te verilmektedir. Bu deneyde, maksimum basınç yükü, 254 kN ve bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme 1.26 mm olmuştur.





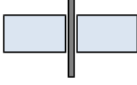

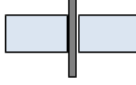
Şekil 3.45. Burkulmaları HDPE levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış 100×10 levha çaprazın yük–yerdeğiştirme diyagramı

100×10 levhasında oluşan çaprazlara ait deneylerde, boyutları ve başka özellikler ve gerçekleştirilen deneylerden elde edilen burkulma yükü ve bu yüke karşılık gelen çaprazın ortası sehimleri Tablo 3.4 te verilmektedir. Bu tabloda verilen yük değerleri çaprazın en büyük taşıyıcı yükü olmaktadır.

Daha öncede belirtildiği gibi, BRB işlemlerinde iki tip burkulma beklenmektedir. Bunlardan biri yerel burkulma ve diğeri ise genel burkulmasıdır. 100×10 levhasından oluşan çaprazda, atalet momentinin Y ekseninde çok düşük olması nedeni ile yerel burkulmayı önlemek için, çaprazın iki ucunda rijitleştirici kaynaklanmıştır. Bu nedenle deneylerin hiç birinde yerel burkulma meydana gelmemiştir. İkinci bölümde, adı gelen rijitleştiricilerin boyutları verilmiştir.

Tablo 3.4 te görüldüğü gibi, 100×10 levhasından oluşan çaprazda, akma noktasında çekme yükü, 247 kN olarak hesaplanmıştır. Bu çelik levha emniyet gerilmesi yönteminde, çekme yükü için tasarlanırsa, en fazla taşıyabileceği tasarım çekme yükü, 148 kN olmalıdır.

Tablo 3.4. 100×10 levhasından oluşan çaprazlara ait deneylerin özellikleri ve sonuçlar özeti

BRB tipi	BRB sız Çelik çapraz	BRB-PA Zayıf eksen	BRB-PA Güçlü eksen	BRB-HDPE Zayıf eksen	BRB-HDPE Güçlü eksen
Numunenin şekli					
Çekirdek boyutları (mm×mm)	100×10	100×10	100×10	100×10	100×10
Dışsal boyutları (mm×mm)	0	100×50	100×50	100×45	100×45
Çelik Çaprazın elastisite modülü (Mpa)	200000	200000	200000	200000	200000
Dışsal elemanın elastisite modülü (Mpa)	-----	2500	2500	1379	1379
Çekirdeğin rijitliği zayıf eksende (EI) (Nm ²)	1667	1667	1667	1667	1667
Çekme yükü akma noktasında (KN)	247	247	247	247	247
Basınç yükü (kN)	91	196	308	149	254
Maksimum deplasman (mm)	8.62	1.14	2.30	1.45	1.26

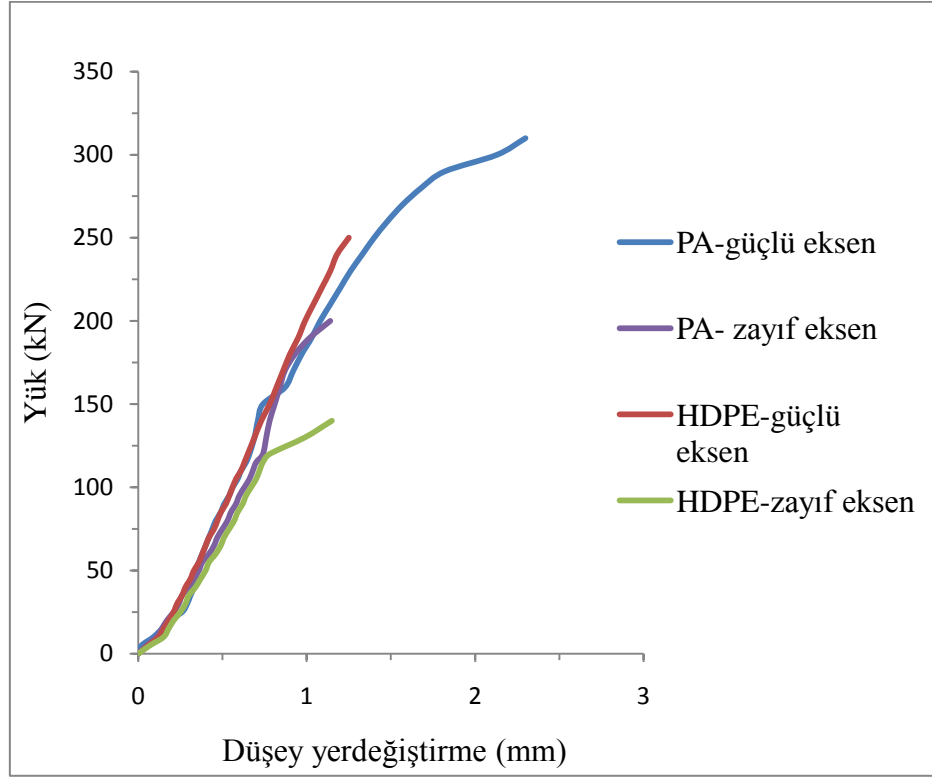
Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, 100×10 levhasından oluşan çaprazın burkulması tutulmamış durumunda, maksimum basınç yükü 91 kN olmuştur. Bu çapraza ait BRB'li deneylerin hepsinde, çapraza gelen basınç yükü 91 kN dan fazla olmaktadır. Başka bir deyişle, her dört deneyde de BRB etkisi meydana gelmektedir. Ancak HDPE levhasında zayıf eksende kullandığı deneyde, taşınan basınç yükünün miktarı, (149 kN), bu çaprazın emniyet gerilmesi yönteminde göre belirlenen çekme yüküne yaklaşık eşittir. Bu nedenle, bu durumu damper veya sönümleyici olarak kabul edebiliriz.

HDPE ve polyamid levhaların hazırlanması ve kullanımı, başka burkulmayı sınırlandıran elemanlara göre, çok az zaman almaktadır. Oysa betonun hazırlanması, karıştırılması, kalıpta yerleştirmesi, boşaltması, kuru ve dışarıdaki çeliğin kaynaklanması, oldukça fazla zaman alıcıdır. Buna göre söz konusu maddeler, özellikle HDPE daha ekonomik olmaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre; HDPE ve PA maddeleri BRB'lerde hem burkulmayı sınırlandırmak hem de damper etkisi için kullanılabilirler.

BRB'ler gibi ya da kesme plakalı damper gibi elasto – plastik yada histeretik damperler, yapıların sismik performansını artırmak için kullanılmaktadır. Böyle histeretik damperler sismik enerjinin çoğunu absorbe edip büyük hasarları önlemektedirler. Histeretik damperlerin yeterliliği, başka sismik performans artırıcı metotlara göre, fiyatının düşük ve kullanımının basit olmasına bağlıdır. Bununla birlikte, BRB'ler, kullanılmış teknoloji ve malzeme üretimi, izolasyon tertibatı ve başka damper tiplerine (viskoz damperler gibi) göre nispeten basittir. Histeretik damperlerin çoğunun başka üstünlüklerinden biri de, yapının yanal elastik rijitliğini artırmasıdır. Gerçekten, standart BRB'ler normal çaprazlara göre basınç kapasiteleri yüksektir. Histeretik damperlerin bir dezavantajı viskoz damperlere göre bir deprem olayından sonra gerilmelerin ve sehimlerin kalıcılığıdır. Bu eksikliğin üstesinden gelmek için, histeretik damperleri değiştirilebilir tasarlanmaktadır[73]. Ayrıca, bir BRB'li yapıda BRB'lerin rijitlikleri artırılırken, eşdeğerlik sönümü (damping) genelde artmakta ve maksimum deplasmanlar hemen hemen azalmaktadır[64].

100×10 çelik çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramları, her dört numune için Şekil 3.46 da verilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi, güçlü ekseninde yapıldığı polyamid levhalarının basınç yükünün maksimum olmasıyla birlikte, o diyagramın altındaki alan veya, onun enerji yutma kapasitesi de diğer numunelere göre yüksektir.



Şekil 3.46. 100×10 çelik çaprazına ait, yük–yerdeğiştirme diyagramları

Daha önceden de belirtildiği gibi, BRB'li sistemlerin tasarımında, gerekli parametrelerden biri elemanların atalet momentidir. Atalet momentini artırmak ve eleman ağırlığını azaltmak için HDPE ve PA maddelerinden Şekil 3.47 de verildiği gibi enkesitler oluşturmak mümkün olmaktadır.

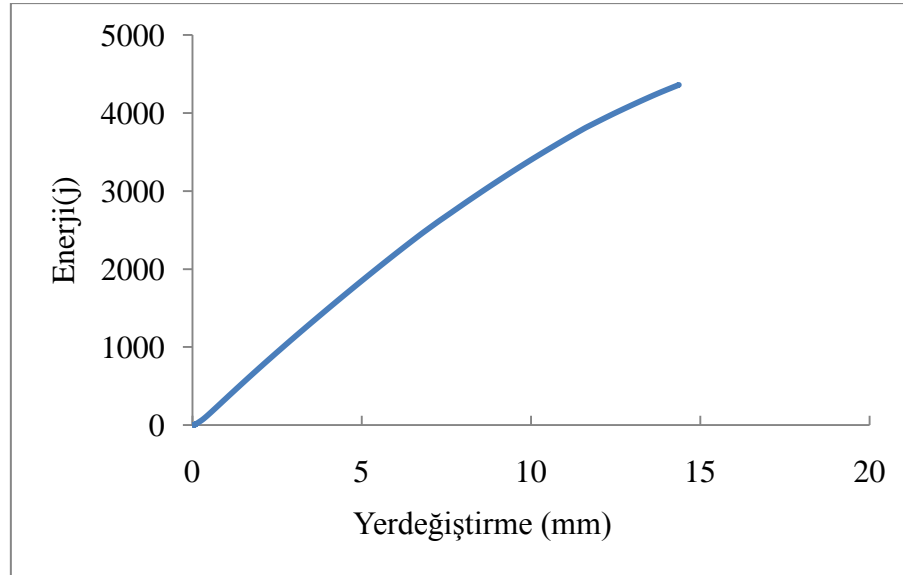


Şekil 3.47. HDPE ve PA malzemelerinden önerilen enkesitler

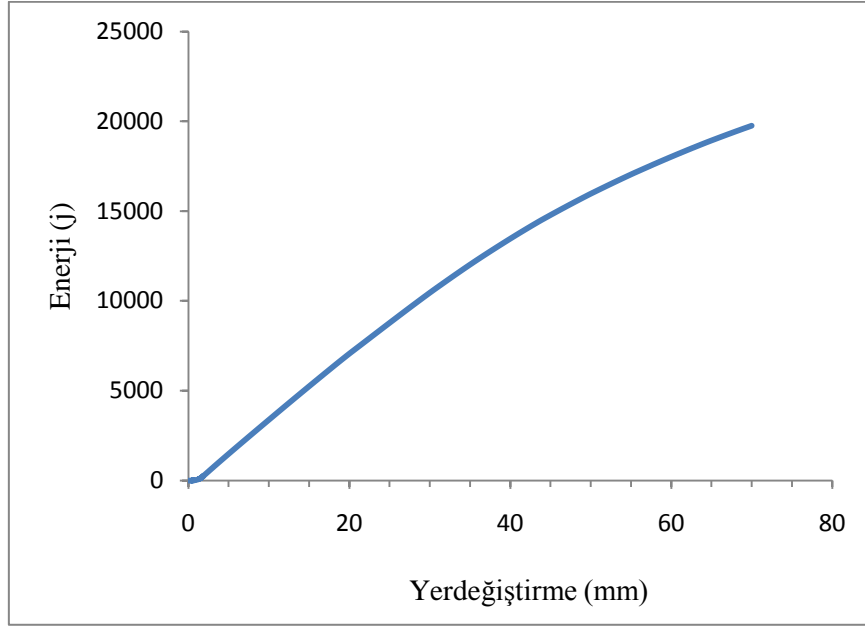
3.4. Burkulmaları Sınırlandırılmış Çelik Çaprazların Enerji Yutma Kapasiteleri

Enerji yutma kapasitesi, genellikle tek yönlü yüklemde azami deplasmana kadar tüketilen enerji miktarıdır. Enerji yutma kabiliyeti, yapıların tasarımında, özellikle depreme karşı tasarlanan yapılarda, en önemli faktör olmaktadır. Yapı elemanlarının enerji yutma kapasiteleri süneklik oranlarının büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Deprem veya rüzgar etkisindeki yapılarda büyük hasarın önlenmesi, taşıyıcı sistemin enerji yutma kapasitesi ile ilgilidir. Basınç yüklerin altındaki elemanların narinliği azaldıkça inelastik çevrimsel davranış iyileşmektedir. Yani tekrarlı yükler altında çapraz elemanın enerji yutma kapasitesi narinliğin azalması ile artmaktadır. Enerji yutma kapasitesi diyagramları, her burkulması sınırlandırılan elemanda, o elemanın sünekliğini ve genellikle kabiliyetini göstermektedir.

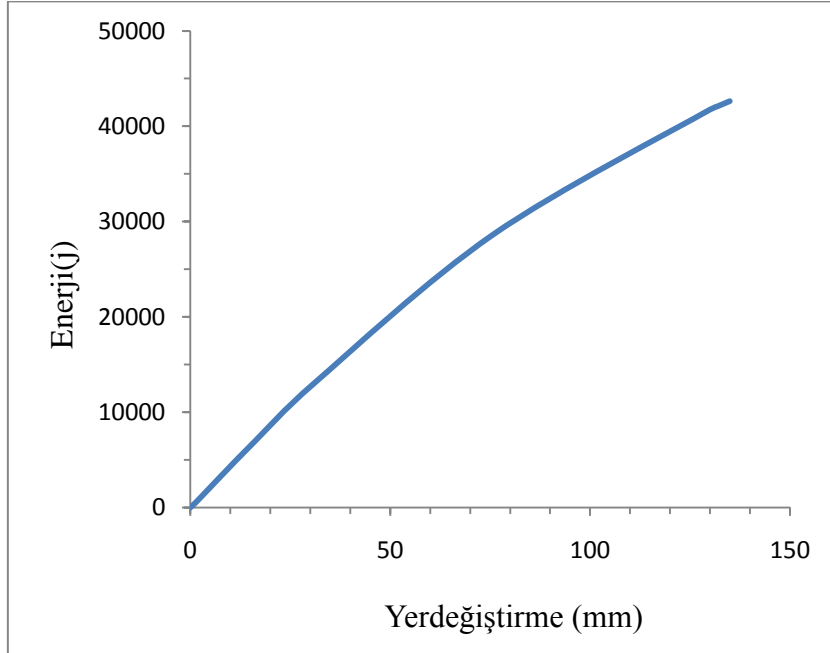
2L60×60×6 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramları, kullandığı BRB türüne göre Şekil 3.48, Şekil 3.49, Şekil 3.50, Şekil 3.51 ve Şekil 3.52 de verilmektedir. Her şeklin kenarında, maksimum yüke karşılık gelen yutulmuş enerji ve toplam yutulmuş enerji verilmektedir. Ayrıca, Tablo 3.5'te, 2L60×60×6 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramlarının sonuçları, birbiri ile karşılaştırmak için verilmektedir.



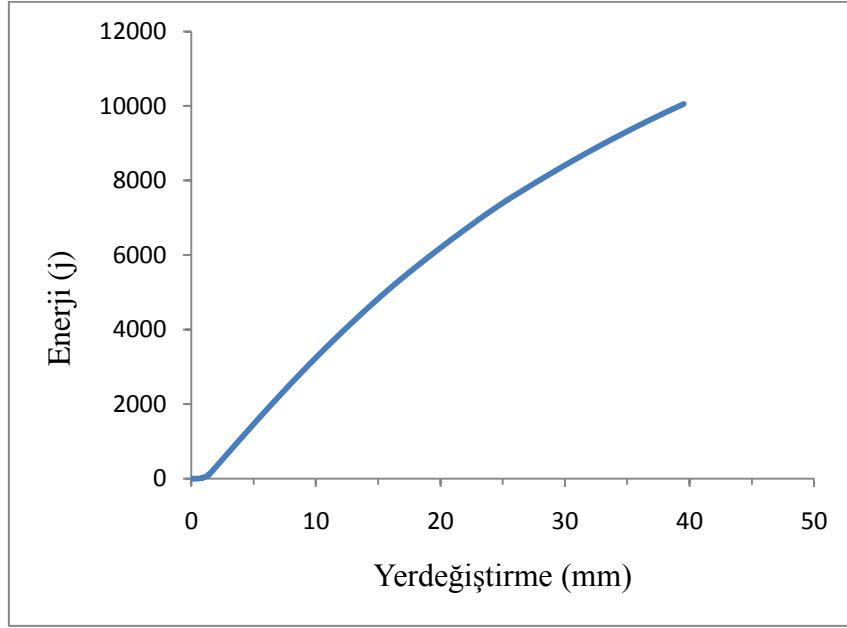
Şekil 3. 48. Burkulması betonarme elemanlarla sınırlandırılmış 2L60 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 49. Burkulması çelik lifli beton elemanlarla sınırlandırılmış 2L60 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 50. Burkulması çelik lifli beton ve lirefa kumaşla sınırlandırılmış 2L60 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 51. Burkulması polypropilen lifli beton elemanlarla sınırlandırılmış 2L60 çelik çaprazla ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı

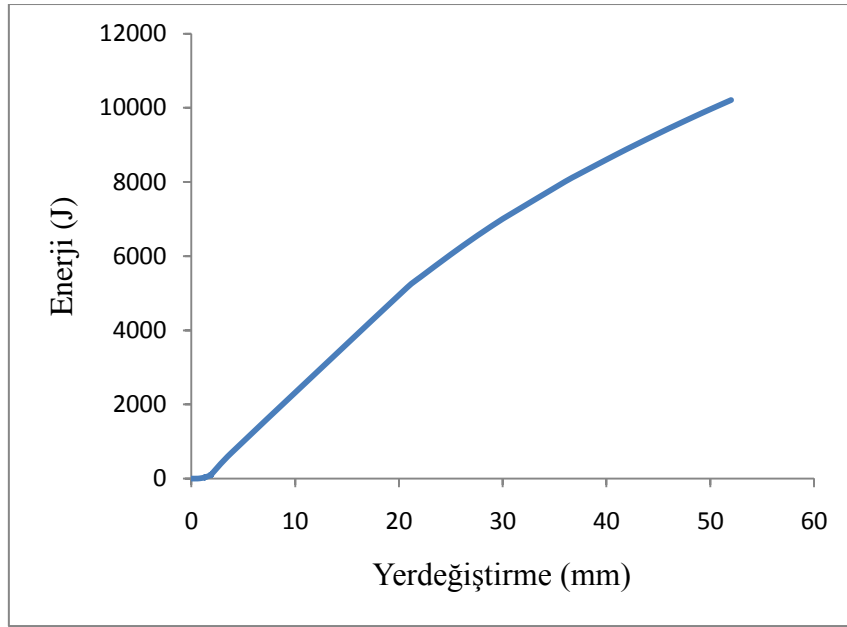
Tablo 3.5. 2L60×60×6 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramlarının sonuçları

Çapraz ve BRB türü	Maksimum yüke karşılık gelen yutulan enerji(j)	Toplam yutulan enerji (j)
2L60×60×6 + Betonarme	271	4358
2L60×60×6 + Çelik lifli beton	414	19751
2L60×60×6 + Çelik lifli beton ve lirefalı	1353	42645
2L60×60×6 + Polypropilen lifli beton	211	10054

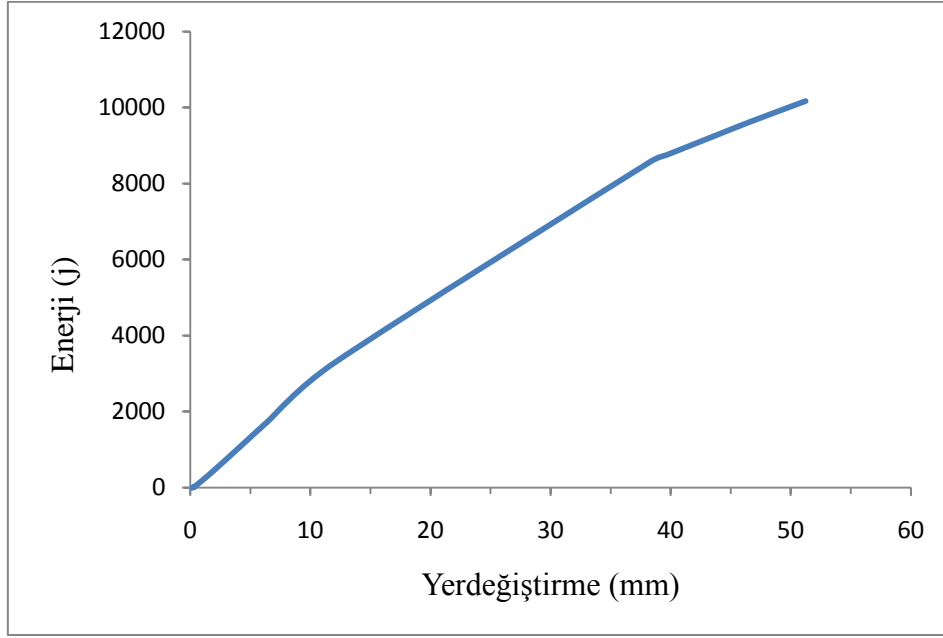
Yukarıda verilen şekiller ve tablodan da görüldüğü gibi, L-profilinden oluşturulan bir çelik çaprazın burkulmasını sınırlandırmak için kullanılan prefabrike elemanlardan, çelik lifli betonun, enerji yutma kapasitesi, betonarme ve polypropilen lifli beton prefabrike elemanlarınkine göre yaklaşık iki katı kadar yüksektir. Bu çelik lifli beton prefabrike elemanın, çelik çapraz etrafına lirefa türü malzeme ile boydan boya sarılması durumunda

sözkonusu enerji yutma kapasitesi, çelik lifli betonun üç nokta bağlanmasına göre, yaklaşık üç kat daha büyük olmaktadır. Bu da deprem gibi tekrarlı yükler etkisinde bu tür elemanların daha sünek davranış göstermesine ve büyük oranda enerji yutarak yapının diğer taşıyıcı elemanlarının zarar görmesini engelleyebilecektir.

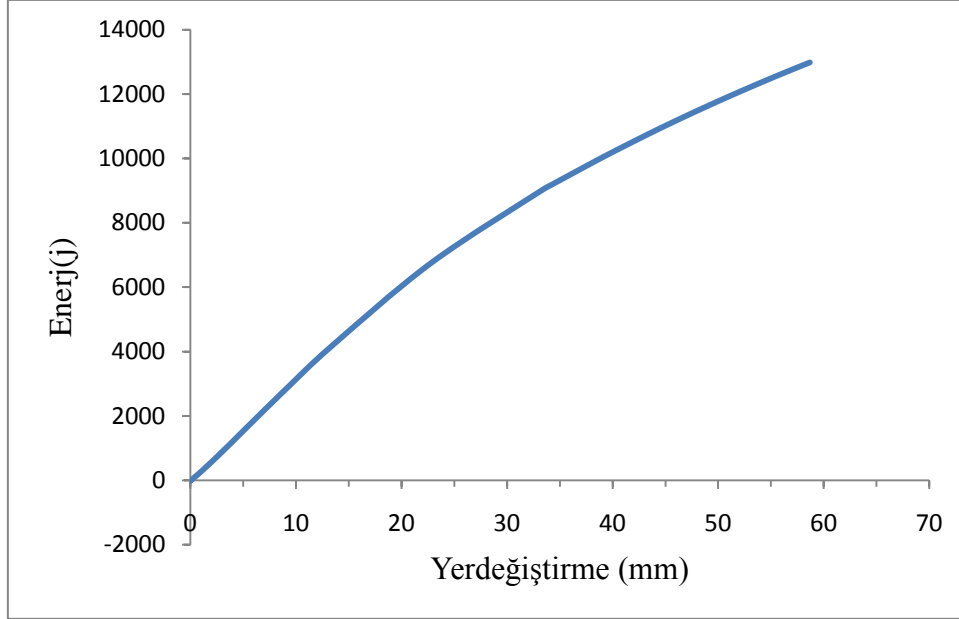
U65 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramları, BRB türüne göre Şekil 3.52, Şekil 3.53, Şekil 3.54 ve Şekil 3.55 de verilmektedir. Tablo 3.6' da ise U65 çelik çaprazlara ait enerji-yerdeğiştirme diyagramlarının sonuçları, birbiri ile karşılaştırmak için, verilmektedir.



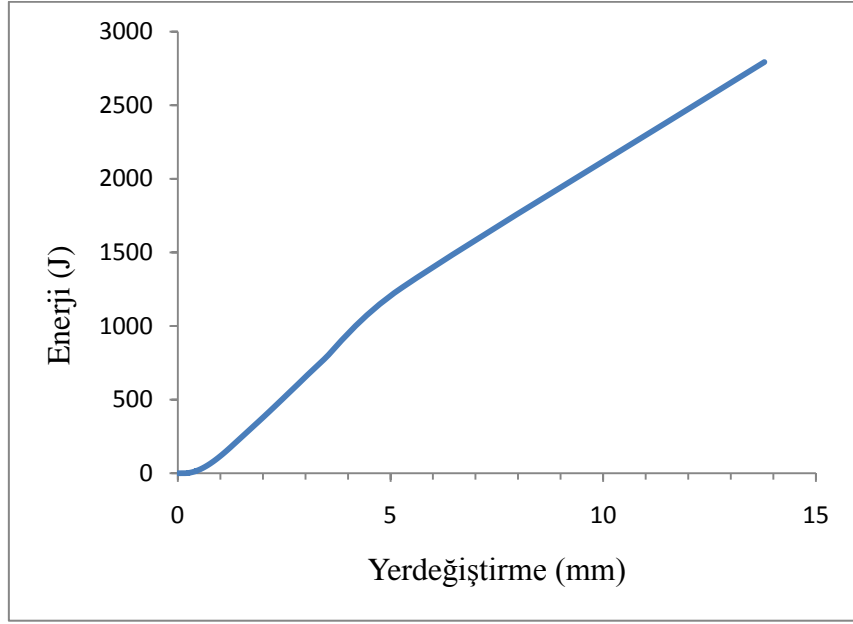
Şekil 3. 52. Burkulması betonarme elemanlarla sınırlandırılmış U65 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 53. Burkulması çelik lifli beton elemanlarla sınırlandırılmış U65 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 54. Burkulması çelik lifli beton ve lifli kumaşlı elemanlarla sınırlandırılmış U65 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 55. Burkulması polypropilen lifli beton elemanlarla sınırlandırılmış U65 çelik çaprazla ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı

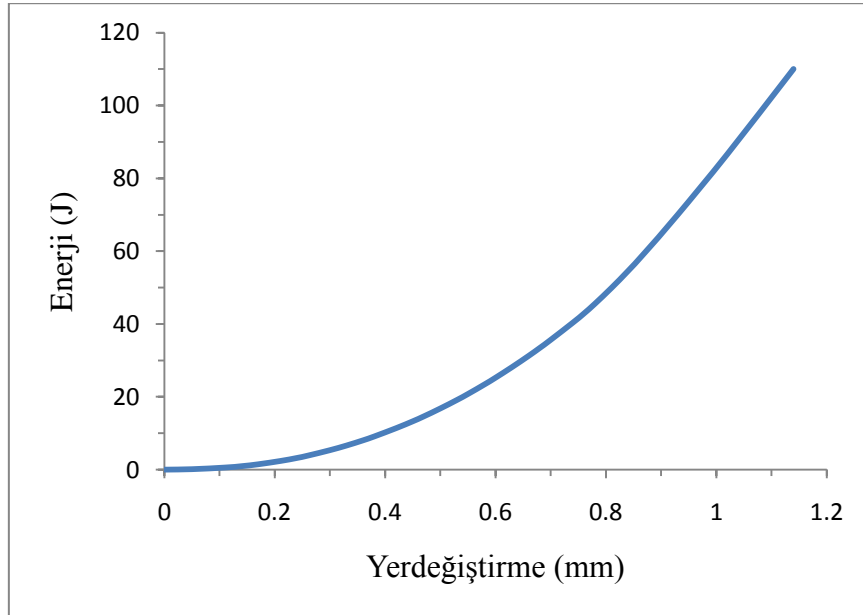
Tablo 3.6. U65 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramlarının sonuçları

Çapraz ve BRB türü	Maksimum yüke karşılık gelen yutulan enerji(j)	Toplam yutulan enerji (j)
U65 + Betonarme	110	10212
U65+ Çelik lifli beton	1029	10171
U65+ Çelik lifli beton ve lirefali	1398	12978
U65+ Polypropilen lifli beton	501	2792

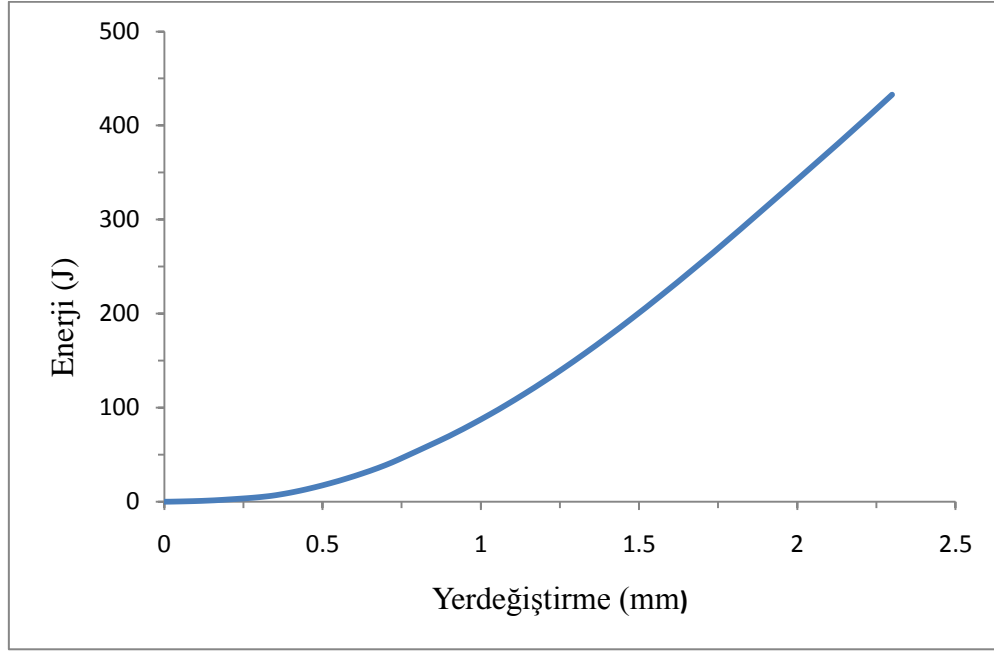
Bu tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi, U-profilleri ile yapılan çaprazların burkulmalarını sınırlandırmak için kullanılan çelik lifli beton prefabrike elemanlar, enerji yutma kapasitelerini betonarme prefabrike elemana göre yaklaşık 10 kat, polypropilen lifli beton prefabrike elemanlara göre ise yaklaşık iki kat artırmıştır. Burkulmayı sınırlandırmak için kullanılan çelik lifli prefabrike elemanın lirefa ile sarılması durumunda ise, enerji yutma

kapasiteleri, sarılmamış olaninkine göre %30 civarında bir artış sağlamıştır. U-profillerindeki bu artışın L-profillerine göre azlığı, çelik çapraz olarak kullanılan U-profilinin narinlik oranına bağlıdır. Zira U-profilinin narinliği L-profiline göre daha %45 oranında daha büyüktür. Diğer bir deyişle, lrefa türü malzeme kullanılarak prefabrike elemanın tamamen sarılması durumunda, narinliği az olan çelik çaprazlarda, enerji yutma kapasitelerine bu malzemenin etkisi daha fazla olmaktadır.

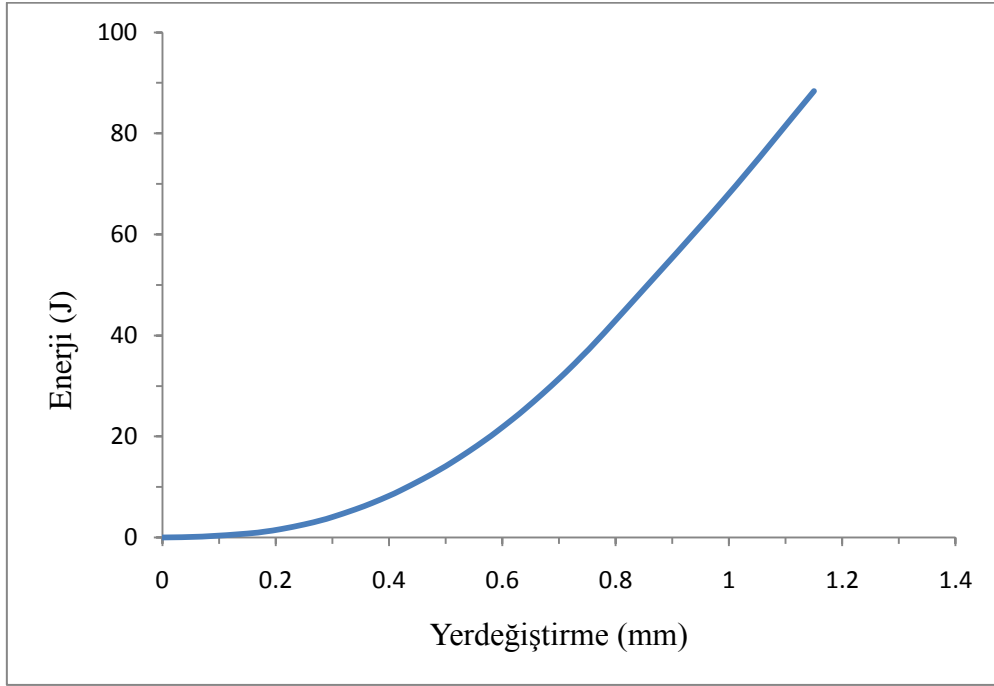
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen 100×10 çelik çaprazlara ait deneylerden elde edilen enerji-yerdeğiştirme diyagramları Şekil 3.56, Şekil 3.57, Şekil 3.58 ve Şekil 3.59 da verilmektedir.



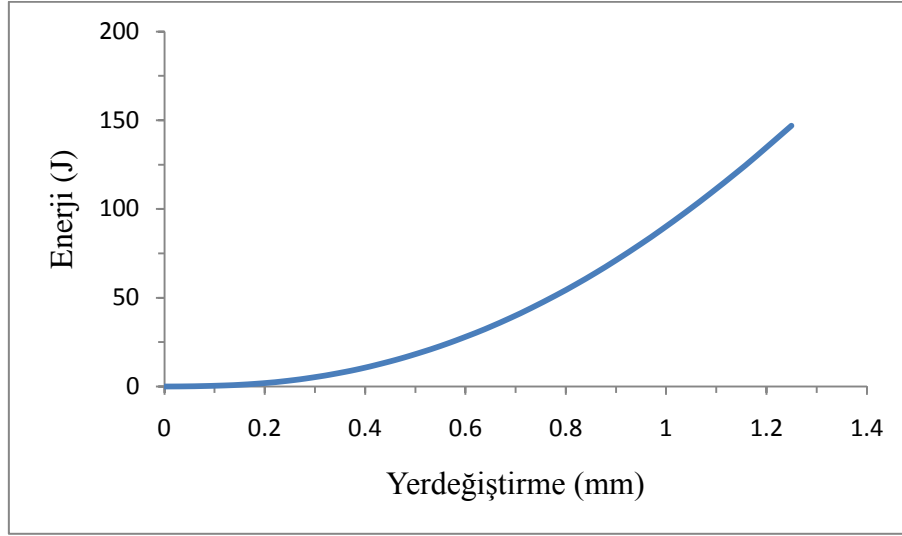
Şekil 3. 56. Burkulması polyamid levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış 100×10 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 57. Burkulması polyamid levhalarla güçlü ekseninde sınırlandırılmış 100×10 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 58. Burkulması HDPE levhalarla zayıf ekseninde sınırlandırılmış 100×10 çelik çapraza ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 3. 59. Burkulması HDPE levhalarla güçlü eksende sınırlandırılmış 100×10 çelik çaprazla ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramı

Tablo 3.7. 100×10 çelik çaprazlara ait, enerji-yerdeğiştirme diyagramlarının sonuçları

Çapraz ve BRB türü	Toplam yutulan enerji (j)
100×10 + PA –zayıf eksen	110
100×10 + PA –güçlü eksen	433
100×10 + HDPE –zayıf eksen	88
100×10 + HDPE –güçlü eksen	147

Bu tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi, polyamid levhalarla yapılan prefabrik elemanların güçlü eksen doğrultusunda, diğerlerine göre enerji yutma kapasiteleri daha büyüktür. Dolayısıyla da eğer bu tür elemanların kullanılması tercih edilir ise polyamid levhaları güçlü eksen doğrultusunda kullanmak gerekmektedir. Diğerlerinin tercih edilmesinin, bu çalışma kapsamında yürütölen tüm deneyler dikkate alındığında, büyük bir fayda sağlamayacağı görölmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, çelik çerçeve sistemlerde prefabrike elemanlarla burkulması sınırlandırılmış çelik çaprazların (BRB) davranışlarının deneysel olarak incelemektir. Bu amaçla farklı malzemeler kullanılarak, farklı tipteki çelik çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için, prefabrike elemanlar üretilmiş ve bu elemanların davranışları incelenmiştir. Çelik çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için tasarlanan prefabrike elemanlar; betonarme, çelik lifli beton, polypropilen lifli beton, polyamid levha ve polyetilen levha olarak dikkate alınmıştır. Deneysel prefabrike elemanlar üç noktadan korniyer ve civata yardımıyla, çelik çaprazların dış kısmına bağlanmıştır. Bununla birlikte bağlantının sürekliliğini sağlamak ve deprem etkilerine karşı güçlendirme amacıyla kullanılan lirefa gibi kumaşların da etkinliğini incelemek amacıyla çelik lifli beton prefabrike eleman bu tür malzeme ile sarılarak denenmiştir. Bu deneysel çalışmada, pratikte çelik çapraz olarak kullanılan profiller tercih edilmiştir.

Deneysel uygulanan basınç yükü, mümkün olduğu kadar, çelik çaprazların enkesitlerinin ağırlık merkezlerine gelecek şekilde uygulanmaya çalışılmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmanın tümünden çıkarılabilecek başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmektedir.

- 1- Kullanılan çelik lifli betonların, aksel basınç dayanımları, geleneksel ve polypropilen lifli betonların dayanımlarına göre, sırasıyla %7 ve %2 yüksektir.
- 2- Deneysel kullanılan çelik lifli betonların, eğilmede çekme dayanımları geleneksel ve polypropilen lifli betonların dayanımlarına göre, sırasıyla %30 ve %29 yüksektir. Bu nedenle çelik lifli betonların kullanımı, BRB prefabrike olarak kullanılması diğerlerine göre daha uygun olmaktadır.
- 3- Polypropilen lifli betonlardan kullanılan prefabrike elemanların eğilmede çekme dayanımları, geleneksel betonlara göre çok artmamıştır (sadece %1). Bu nedenle, bu malzemedeki düzenlenen BRB elemanları, eğilme aşamasında iyi davranış göstermemektedirler. Bu elemanların çatlaması ve kırılması arasında çok fark görülmemiştir. Dolayısıyla da, polypropilen liflerden üretilen elemanlar, burkulmayı sınırlandıran eleman olarak tavsiye edilmemektedir.

- 4- Çelik lifli beton elemanlara lirefa gibi çekme dayanımı yüksek olan malzemelerin sarılması durumunda bu betonların eğilmede çekme dayanımları, daha yükseklenmektedir. Böyleki lirefa kumaşla sarılmış çelik lifli betonların eğilmede çekme dayanımları, geleneksel betonlara göre %47 ve çelik lifli (lirefa kumaşsız) betonlara göre %24 yükseklenmiştir.
- 5- Bu çalışmada, prefabrike elemanların (betonarme, çelik lifli beton, çelik lifli beton ve lirefa sargılı, polypropilen lifli beton, polyamid ve polyetilen levhalar) çelik çaprazlarda burkulmayı sınırlandırdığı görülmüştür.
- 6- Burkulmaları çelik lifli ve lirefa sargılı prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış çaprazlar, en yüksek merkezi basınç yüküne ve sünekliğe sahip olmuştur. Öyleki 2L60×60×6 çaprazının burkulması çelik lifli ve lirefa sargılı prefabrike elemanların kullanılması durumunda, maksimum taşıdığı yük, bu çaprazın burkulması sınırlandırılmaması durumuna göre % 25 artmıştır. Bu artış U65 çaprazında, %28 olmuştur. Bu durumda bu tür çelik çaprazın deprem gibi tekrarlı yükler altında daha iyi bir performans göstermesini sağlayacak, dolayısıyla da yapının diğer taşıyıcı sisteminin daha az hasar görmesine neden olacaktır.
- 7- Burkulmaları çelik lifli prefabrike elemanlarla sınırlandırılmış çaprazların, maksimum taşıdığı yük, bu çaprazın burkulması sınırlandırılmaması durumuna göre, 2L60×60×6 çaprazında % 17 , U65 çaprazına ise % 19 artmıştır.
- 8- Merkezi basınç yükü altında meydana gelen maksimum gerilme, burkulması sınırlandırılmış çaprazlarda (polypropilen lifli beton haric), çaprazın akma dayanımından fazla olmuştur. Başka bir deyişle, burkulması sınırlandırılmış çapraz, burkulduktan ve akma noktasından sonra yük taşımaya devam etmiştir.
- 9- Yapılan deneyler, polyamid levhaların kullanılabilmesini burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlarda, göstermiştir. Böyleki, yeterli rijitlikte kullanılan polyamid levha, çelik çaprazın taşıdığı basınç yükünü %20 artırmakla birlikte maksimum basınç gerilmesi çeliğin akma dayanımından fazla olmuştur.
- 10- Yeterli rijitlikte yüksek yoğunluklu polyetilen (HDPE) levhaların kullanılabilmesi, burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlarda, ispat edilmiştir. Bu levhaların kullanılması durumunda, çelik çaprazın maksimum merkezi basınç gerilmesi, çaprazın akma gerilmesinden fazla olmuştur.

- 11- Polyamid ve yüksek yoğunluklu polyetilen (HDPE) levhaların, düşük birim ağırlık nedeniyle, bu malzemelerin burkulmayı sınırlandırmış çaprazlarda kullanılabilmesi durumunda, yapının ağırlığı azalmakla birlikte, deprem yükü de azalabilmektedir.
- 12- Polyamid ve yüksek yoğunluklu polyetilen(HDPE) levhaların, çaprazların burkulmasını sınırlandırmasında, yeni bir yöntem olarak, zaman kazanmak, ekonomiklik, basitlik ve hızlı montaj yanında inşaat problemlerini azaltması, kalıba ve küre ihtiyacı olmaması gibi üstünlükleri nedeniyle, yeterli rijitliği sağlayacak boyutlar dikkate alınarak, özellikle enerji yutma kapasitesi daha büyük olan polyamid levhalı prefabrike elemanların, tercih edilebileceğini göstermiştir.
- 13- Yapılan deneyler, polyamid (PA) ve yüksek yoğunluklu polyetilen (HDPE) levhaların burkulmanın sınırlandırılmasında beton veya harç yerine kullanılabilceğini göstermiştir.
- 14- Tüm deneylerde, burkulmayı sınırlandıran elemanların kullanılmasıyla, maksimum basınç yükü, çaprazın Euler basınç yükünden fazla olmuştur. Başka bir deyişle, kullanılan prefabrike elemanların tümü, burkulmayı sınırlandırma yanında sönümleyici etkileri de olabilmektedirler.
- 15- Çaprazın burkulması sınırlandırılması durumunda, enerji yutma kapasitesi artmaktadır. Çelik lifli beton ve lifli sargılı prefabrike elemanlarla burkulmaları sınırlandırılmış çaprazlarda, enerji yutma kapasiteleri diğer prefabrike elemanlara göre daha fazla olmuştur. 2L60×60×6 çaprazında, çelik lifli beton ve lifli sargılı prefabrike eleman kullanılması durumunda, yutulan enerji betonarme ve çelik lifli prefabrike elemanlara göre sırasıyla 5 kat ve 3.3 katı olmuştur. Buna göre, bu elemanların tekrarlı yükler altında da enerji yutma kapasitelerinin büyük olması beklenmektedir.
- 16- Mevcut binaların yetersiz olarak tasarlanmış veya yenilenen yönetmelikler nedeniyle yetersiz kalmış çapraz elemanların, dayanım ve sünekliğini artırmak için, mevcut elemanları değiştirmeden, bu çalışma kapsamında kullanılan prefabrike elemanların, özellikle çelik lifli beton prefabrike elemanların, söz konusu çaprazların burkulmasını sınırlandırmak için kullanılması iyi bir çözüm olmaktadır.
- 17- Bu çalışmada kullanılan prefabrike elemanların kullanılması durumunda, özellikle çelik lifli betonlar, Polyamid ve yüksek yoğunluklu polyetilen (HDPE) levhaların

kullanılması ve çaprazlarının burkulmaları sınırlandırılmış çerçeve sistemlerinin enerji yutma kapasitesinin yüksek olması nedeniyle, bugün deprem riski bulunan ülkelerde, depremden sonra hemen kullanılması gereken yapılar BRBF sistem olarak yapılması gerekmektedir. Zira bu yapıların sünekliği diğer taşıyıcı sistemlere göre, yüksektir. Ayrıca, mevcut çaprazlı hastaneler, sağlık merkezleri ve depremden sonra çok kullanılan yapıların, çelik çaprazlarının burkulmaları, prefabrike elemanlarla sınırlandırılması önerilmektedir. Bu konuda, çelik lifli betonlardan üretilmiş prefabrike elemanlar çok etkili olmaktadır.

- 18- Eski çelik köprülerin basınç çalışan elemanları, bu çalışmada kullanılan prefabrike elemanlar yardımıyla güçlendirilebilmektedir.
- 19- Bu deneysel çalışmada, deneyler sadece merkezi basınç yükü altında denenmiştir. Sonraki araştırmalarda, farklı tipte olan numuneler, tekrarlı (hem çekme ve hem de basınç) yükü altında yapılabilir.
- 20- Çaprazın uzunluğunun etkisi onun narinlik oranında dikkate alınmaktadır. Ancak farklı uzunluktaki prefabrike elemanlar, özellikle farklı narinlik oranlarına sahip elemanların davranışları da araştırılabilir.
- 21- Deneyler bir katlı ve ya iki katlı çerçeve sistemi üzerinde yapılabilir. Bu durumda, prefabrike elemanların çelik çapraz üzerindeki etkisi incelemekle beraber, çerçevenin genel davranışına etkisi de incelenebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Qiang, X., State of the art of buckling-restrained braces in Asia, Journal of Constructional Steel Research, 61 (2005) 727–748.
2. Frederick, F., Tajirian, Ian, D. Aiken, Isao Kimura. Application of Buckling-Restrained Braces in the United States. 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Yerevan, Armenia, October 6-10, 2003.
3. Oguz, C., Celik, Michel Bruneau, Seismic behavior of bidirectional-resistant ductile end diaphragms with buckling restrained braces in straight steel bridges. Engineering Structures 31 (2009) 380-393.
4. Di Sarno, L., ve Elnashai, AS., Bracing systems for seismic retrofitting of steel frames. Journal of Constructional Steel Research 65 (2009) 452–465.
5. Daneshjoo, F. ve Asgari, J.,R., Nonlinear analysis of knee-braced frames under earthquake loadings, Journal of esteghlal, year 23, No. 2, 2004.
6. Filiatrault, A. ve Cherry, S., Performance Evaluation of Friction Damping Devices for Use in Aseismic Design, ATC-17 Seminar and Workshop on Base isolation and Passive Energy Dissipation, San Francisco, CA, 261-270. 1986.
7. PALL, A.S. ve MARSH, C., "Response of friction damped braced frame," ASCE, Journal of Structural Division, 108, ST6 June 1982, 1313-1323.
8. Yaomin, Fu. ve Sheldon Cherry., "Simplified seismic code design procedure for friction-damped steel frames,"1998.
9. Santiago Bonetti, Ductile Fuses for Special Concentrically Braced Frames, Ph.D. theses, University of Kansas, USA, 2009.
10. Abraham, E., J., Conceptual investigation of partially buckling restrained braces, Master thesis, University of Pittsburgh, 2006.
11. Hilmi D., Erdoğan, U. ve Piroğlu, F., “ Çelik Yapılar “, 2002.
12. Sarno, D., Elnashai, A., S., Bracing systems for seismic retrofitting of steel frames, Science Direct, Journal of Constructional Steel Research , 2008.

13. Sabelli, R., Mahin, S. ve Chang, C., Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling restrained braces, Science Direct, Engineering Structures, 25(2003), 655-666.
14. Okouch, Y., Takeuchi, T., Uchyama, T., Suzuki, K., Sugiyama, T., Ogawa, T., Kato, S., “Experimental studies of tower structures with hysteretic dampers”, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures : IASS , 2005.
15. Tanaka, T., Katayama, T., Shimano, Y., “ Structural Design of a High- rise Building with Structural Control System for Various Lateral Forces”, Steel Structures, 7(2007), 139-146.
16. Tani, Y., Kihara, K., Fundamental study on steel buckling in steel concrete structures, Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, 72,1-6 [in Japanese], 1962.
17. Mochizuki, S., Murata, Y., Andou, N., Takahashi, S., Experimental study on buckling of unbonded braces under axial forces, Parts 1 and 2., Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, 6 [in Japanese], 1979.
18. Mochizuki, S., Murata, Y., Andou, N., Takahashi, S., Experimental study on buckling of unbonded braces under axial forces, Part 3, Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, 4 [in Japanese], 1980.
19. Mochizuki, S., Murata, Y., Andou, N., Takahashi, S., Experimental study on buckling of unbonded braces under axial forces, Part 4. Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, 4 [in Japanese], 1982.
20. Nagao, T., Takahashi, S., A study on the elasto-plastic behavior of unbonded composite bracing (part 2 analytical studies). Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, 45-56 [in Japanese], 1991.
21. Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A., Fujimoto, M., Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube, In: Proc. of ninth world conf. on earthquake eng, vol. IV., P. 719-24, 1988.
22. Fujimoto, M., Wada, A., Saeki, E., Watanabe, A., ve Hitomi, Y., A Study on the Unbonded Brace Encased in Buckling Restraining Concrete and Steel Tube, Journal of Structural Engineering, Architectural Institute of Japan. (034B), 249-258 ,1988.
23. Bozorgnia, Bertero, Earthquake Engineering Handbook, Chapter 16, Steel Buckling Restrained Braced Frames, 2005.

24. Görkem, S., Yüksek Dayanımlı Betonarme Döşeme Davranışlarının Plastik Mafsallı Çizgileri Yöntemine Göre İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
25. TS 10514, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, TSE, Ankara, Aralık 1992.
26. TS 1247, Beton Yapım Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında), TSE, Ankara, Mart 1984.
27. TS 10513, Çelik Teller- Beton Takviyesinde Kullanılan, TSE, Ankara 1992.
28. Çivici, F. ve Eren, İ., Çelik Lifli Betonun Direkt Çekme Dayanımlının Olçlmesi zerine Deneysel Bir Çalışma, Türkiye Mühendislik Haberleri, 434 (2004) 6.
29. Bentur, A. ve Mindness, S., Fibre Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, 1990.
30. ACI Committee 544, State of the art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544-1R- 96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1997.
31. Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F., itüdergisi/d mühendislik, 1, 2 (2002) 125- 144.
32. Uğurlu, A., Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı D.S.İ. Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Yayın No: MLZ-878, İkinci Baskı, Ankara, 1999.
33. Arslan, A. ve Ulucan Z.Ç., Çelik Liflerin Erken Yaştaki Betonarme Kirişlerin Gçmesine Etkisi, Kısa Bildiri, İMO Teknik Dergi , 8 (1997).
34. Yaprak, H., Beton Kaplamalı Kanallarda Malzeme Dayanımlılığını Artırma Olanakları, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
35. Okay, F., zden, ř. ve Engin, S., Çelik Lif Katkılı Normal Dayanımlı Beton ile üretilmiş Betonarme Kirişlerin Burulma Davranışı, BAPB : Proje No: 2004/18.
36. Yelgin N.A. ve Yalman, N.Y., Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Hazır Betonarme Plaklı Kompozit Kirişlerin Negatif Moment Bölgesinde Yapısal Davranışı, 12.Prefabrike Yapılar Sempozyumu, İstanbul, 2007.
37. www.polyfibers.com. ,29 Mart 2009.

38. Behnood, A., Ghandehari, M., Comparison of compressive and splitting tensile strength of high strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures, Fire Safety Journal 44 (2009), 1015–1022.
39. Song, P.S., Hwang, S., Sheu, B.C., Strength properties of nylon and polypropylene fiber reinforced concretes, Cement and Concrete Research 35 (2005) 1546– 1550.
40. Zengzhi Sun, Qinwu Xu, Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete, Materials Science and Engineering A 527 (2009), 198–204.
41. Sivakumar, A., Santhanam, M., Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres, Cement & Concrete Composites 29 (2007) 603–608.
42. Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., Swamy, R.N., Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties, Composites: Part B, 41 (2010), 17–24.
43. João Paulo C. Rodrigues, Luís Laím, António Moura Correia, Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire, Composite Structures 92 (2010) 1263–1268.
44. www.lirefa.com.tr., 25 Mart 2009.
45. Vasile, C. ve Pascu, M., Practical Guide to Polyethylene, 2005.
46. James L. White, David D. Choi. Polyolefines – Processing, Structure Development and properties, First edition, 2004.
47. Marc JM Abadie, Practical Guide to Polyamides, Smithers Rapra Technology, 2007.
48. Page I. B., Polyamides as Engineering Thermoplastic Material, 2000.
49. Goel, S.C., A Commentary on Seismic Provisions for Special Concentrically Braced Frames and Special Truss Moment Frames, Proceedings of the 76th Annual AISC Meeting, Paper #17, 12pp, 1998.
50. Yoshino, T., Karino, Y., Experimental study on shear wall with braces: Part 2. Summaries of technical papers of annual meeting, vol. 11. Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section, P. 403–4 [in Japanese], 1971.
51. Wakabayashi, M., Nakamura, T., Katagihara, A., Yogoyama, H., Morisono, T., Experimental study on the elastoplastic behavior of braces enclosed by precast concrete panels under horizontal cyclic loading, Parts 1 & 2. Summaries of technical

- papers of annual meeting, vol. 10. Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section, P. 1041–4 [in Japanese], 1973.
52. Kimura, K., Yoshioka, K., Takeda, T., Fukuya, Z., Takemoto, K., Tests on braces encased by mortar in-filled steel tubes, Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan; P. 1041– 2 [in Japanese], 1976.
 53. Black, G.R., Wenger, W.A., and E.P. Popov., Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversals, Report No. UCB/EERC-80/40, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1980.
 54. Nagao, N. ve Takahashi, S., A Study on the Elasto-Plasto Behavior of Unbonded Composite Bracing, Journal of Structural Engineering. Architectural Institute of Japan. Tokyo, Japan, 415, 105-115., 1990.
 55. Eric Ko, Arup, The Unbonded Brace, From research to Californian practice, San Francisco, 1996.
 56. Ove Arup, Tests of Nippon Steel Corporation Unbonded Braces, A Report to: Ove Arup & Partners California, Ltd submitted by Nippon Steel Corporation, Tokyo, Japan, prepared by SIE Corporation, July 2, 1999.
 57. Clark, P., Aiken, I., Kasai, K., Ko, E., and Kimura, I. “ Design Procedures for Buildings Incorporating Hysteretic Damping Devices.” Proceedings, 68th Annual Convention. Structural Engineers Association of California (SEAOC)., 1999.
 58. Sabelli, R. “ Research on Improving the Design and Analysis of Earthquake Resistant Steel Braced Frames.” EERI/FEMA NEHRP Fellowship Report. EERI. Okland, CA., 2001
 59. American Institute of Steel Construction (AISC) / Structural Engineers Association of California (SEAOC). (2001). “Recommended Provisions for Buckling Restrained Braced Frames” October 2001. Revised July, 2003.
 60. American Institute of Steel Construction (AISC). (2005). “ ANSI/AISC 341-05, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Including Supplement No. 1 dated November 16, 2005”.
 61. Higgins, C. and Newell, J. “ Development of Two New Hysteretic Dampers.” Proceeding, 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Engineering Research Institute. Okland, CA., 2002.
 62. Fahnestock, L., Sause, R. and Ricles, J. “Analytical and Experimental Studies on Buckling Restrained Braced Composite Frames.” Proceeding, International Workshop on Steel and Concrete Composite Constructions. Taipei, Taiwan., 2003.

63. Black, C. J., Makris, N., and Aiken, I. D., "Component Testing, Seismic Evaluation and Characterization of Buckling-Restrained Braces." Journal of Structural Engineering, 130(6), 880-894., 2004.
64. Kim, J., Choi, H., Behavior and design of structures with buckling-restrained braces, Engineering Structures 26 (2004) 693–706.
65. Carden, L.P., Ahmad, M.I., and Buckle, I. G., "Seismic Performance of Steel Girder Bridges with Ductile Cross Frames Using Buckling-Restrained Braces." Journal of Structural Engineering, 132(3), 338-345, 2006.
66. Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R. and DeVall, R., "Seismic Testing and Performance of Buckling-Restrained Bracing Systems." Canadian Journal of Civil Engineering, 33, pp 183-198., 2006.
67. Choi, H., Kim, J., Energy-based seismic design of buckling-restrained braced frames using hysteretic energy spectrum, Engineering Structures 28 (2006) 304–311.
68. Ravi Kumar, G., Satish Kumar, S. R., Kalyanaraman, V., Behaviour of frames with Non-Buckling bracings under earthquake loading, Journal of Constructional Steel Research 63 (2007) 254–262.
69. Aydina, E., Boduroglu, M.H., Optimal placement of steel diagonal braces for upgrading the seismic capacity of existing structures and its comparison with optimal dampers. Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 72–86.
70. Chung-Che Chou, Pei-Jin Chen, Compressive behavior of central gusset plate connections for a buckling restrained braced frame, Journal of Constructional Steel Research 2008.
71. Young, K., Ju, Kim, M.H., Kim, J., Kim, S.D., Component tests of buckling- restrained braces with unconstrained length. Engineering structures 31 (2009) 507-516.
72. Asgarian, B., Shokrgozar, HR., BRBF response modification factor, Journal of Constructional Steel Research 65 (2009) 290-298.
73. Farhat, F., Nakamura, S., Takahashi, K., Application of genetic algorithm to optimization of buckling restrained braces for seismic upgrading of existing structures. Computers and Structures 87 (2009) 110–119.
74. TS 138 EN 10002-1, Metalik Malzemeler-Çekme Deneyi-Bölüm 1: Ortam sıcaklığında Deney Metodu, TSE, Ankara, Nisan 2004.
75. TS 708, Beton Çelik Çubukları, TSE, Mart 1996, Ankara.

76. TS 802, Beton Karışımı Hesap Esasları, TSE, Ocak 1985, Ankara.
77. TS 3129, Betonda Yarmada Çekme Dayanımı Tayini Deneyi, Silindir Yarma Metodu, T.S.E., 1978, Ankara.
78. TS 3285, Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini Deneyi, Orta Noktasından yüklenmiş, Basit kiriş Metodu, T.S.E., 1979, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Mohammad Bagher MAHDİZADEH, 1962 yılında İRAN ın TABRİZ şehri Sardroud kasabasında doğdu. İlk öğrenimine Sardroud da başladıktan sonra Tabrizin Ferdowsi Lisesinden mezun oldu. 1973 yılında matematik öğretmeni olarak okullarda ders vermeğe başladı. Öğretmenliğine devam ettiği süre içinde, 1986 yılında Tabriz Üniversitesinin İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 1991 de bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Tabriz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisansını bitirenden sonra Tabriz Teknik Kolej' inde ders vermeye başladı.

Mahdizadeh, 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora öğrenimine başladı. Evli ve üç çocuk babası olan Mahdizadeh iyi derecede İngilizce, Türkçe ve Farsça bilmektedir.