



**YÜKSEK KATLI MODÜLER ÇELİK YAPILAR İÇİN
MODÜL-MODÜL BAĞLANTILARIN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Betül KARACALI

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Merve MAALI**

**2022
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK KATLI MODÜLER ÇELİK YAPILAR İÇİN MODÜL-MODÜL
BAĞLANTILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Betül KARACALI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Merve MAALI

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

06 / 07 / 2022

Betül KARACALI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK KATLI MODÜLER ÇELİK YAPILAR İÇİN MODÜL-MODÜL BAĞLANTILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Betül KARACALI

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Merve MAALI

Modüler binalar, son yıllarda, pek çok avantajları sayesinde inşaat sektörünün dikkatini çekmiş ve yüksek katlı binalarda ve daha kompleksli binalarda dahi uygulanmaya başlamıştır. Ancak, geleneksel binaların aksine, modüler yapılardaki her modülün kendine özgü zemin levhası olduğundan süreksizdirler. Bu yüzden yapısal bütünlüğünün sağlanması ve modüler arasında yük aktarımının oluşması için modüllerin birbirlerine, modüler arası bağlantılar vasıtasıyla bağlanması gerekir. Ayrıca, yükseklikle beraber yatay yükler de arttığından yapısal bütünlüğün, genel stabilitenin ve dayanıklılığın sağlanması için modüler arası bağlantıların davranışlarının detaylı şekilde araştırılmasını gerektirir. Bu tezde, modüler arası bağlantıların yatay yük altındaki davranışlarını araştırmak için hem deneysel hem de nümerik yöntem kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, dört tane 150*150*5 SHS modüler kolonların, iki tanesi yatay iki tanesi dikey şekilde bağlanarak, statik eğilme testine tabi tutulmuştur. Deneyden elde edilen karakteristik özellikler sunulmuştur. Ek olarak, birleşimleri multilineer link eleman olarak tanımlanan 6, 9 ve 12 katlı bina modellerine; birleşimlerin mevcut deneylerden elde edilen kesmedeki ötelenme ve dönme rijitlikleri entegre edilerek yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Eksenel yöndeki rijitlikler için deney yapılmamış, gerekli değerler literatürden alınmıştır. Referans çalışmasında birleşimlerin rijitlikleri tam rijit kabul edildiğinden ve incelenen birleşimlerin de rijit olduğu görüldüğünden sonuçlar benzer çıkmıştır.

2022, 114 sayfa

Anahtar Kelimeler: Modüler çelik yapılar, Modüler arası bağlantılar, Statik Eğilme Deneyi, Yapısal Analiz

ABSTRACT

MS. Thesis

EVALUATING MODULE-MODULE CONNECTIONS FOR HIGH-RISE MODULAR STEEL STRUCTURES

Betül KARACALI

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Merve MAALI

Modular buildings have attracted the attention of the construction industry in recent years, thanks to their many advantages and have begun to be applied even in high-rise buildings and more complex buildings. However, unlike traditional buildings, they are discontinuous as each module in modular structures has its own unique floor slab. Therefore, the modules must be connected to each other by means of inter-modular connections in order to ensure structural integrity and load transfer between the modules. In addition, since horizontal loads increase with height, it requires a detailed investigation of the behaviour of inter-modular connections to ensure structural integrity, overall stability and durability. In this thesis, both experimental and numerical methods are used to investigate the behaviour of inter-modular connections under lateral load. In the experimental study, four 150*150*5 SHS modular columns were subjected to static bending test by connecting two horizontally and two vertically. The characteristic features obtained from the experiment are presented. In addition, 6,9 and 12 storey building models whose combinations are defined as multilinear link elements, structural analysis of the joints was carried out by integrating the translational and rotational stiffnesses at shear obtained from the existing tests. No tests were made for stiffness in the axial direction, the required values were taken from the literature. The results were similar since the stiffnesses of the joints were assumed to be perfectly rigid in the reference study and the examined joints were also rigid.

2022, 114 page

Keywords: Modular steel structures, Module-module connection, Static Bending Test, Structural Analyses

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve tezimde desteğini, hoşgörüsünü ve sabrını ve tecrübelerini esirgemeyen, tez danışmanım, çok kıymetli hocam Doç. Dr. Merve MAALI'ye saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecinde bilgi ve deneyimlerini paylaşan sayın Doç. Dr. Mahyar MAALI'ye teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Betül KARACALI

Haziran 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Modüler Yapıların Tarihçesi	2
1.2. Modüler Yapıların Yapım Süreci.....	6
1.2.1. Tasarım ve plan	6
1.2.2. Fabrika imalatı	7
1.2.3. Ulaşım	8
1.2.4. Sahada montaj	9
1.3. Modüler Yapıların Avantajları ve Dezavantajları	9
1.4. Modüler Binalarda Yapısal Sistemler	11
1.4.1. 2D sistem.....	11
1.4.2. 3D sistem.....	12
1.4.2.1. Taşıyıcı duvar sistemler	12
1.4.2.2. Köşe destekli sistemler	13
1.4.3. Açık bina sistem	14
1.4.4. Hibrit çekirdekli modüler sistem.....	14
1.4.5. Hibrit podyum sistem	15
1.4.6. Çerçeve birim sistem.....	16
1.4.7. Çelik çapraz destekli modüler sistem.....	17
1.5. Yüksek Katlı Modüler Binalar	17
1.5.1. 2D sistemli yüksek katlı modüler binalar	18
1.5.2. 3D sistemli yüksek katlı modüler binalar	19
1.5.3. Hibrit çekirdekli yüksek katlı modüler binalar	19
1.5.4. Hibrit podyum sistemli yüksek katlı binalar	21
1.6. Bağlantılar	24

1.6.1. Temel-Modül Bağlantılar.....	25
1.6.2. Modül içi Bağlantılar	26
1.6.3. Modüller arası Bağlantılar.....	26
1.6.3.1. Yatay modüler arası bağlantılar	29
1.6.3.2. Dikey modüler arası bağlantılar	29
1.6.3.3. Hem dikey hem yatay modüler arası bağlantılar.....	34
1.7. Modüler Binalarda Yapısal Konular	43
1.8. Tasarım Kriterleri.....	45
1.9. Amaç ve Kapsam	46
2. KAYNAK ÖZETLERİ	48
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	55
3.1. Deneysel Çalışmalar.....	55
3.1.1. Deneylerde kullanılan cihaz ve ekipmanlar	55
3.1.1.1. Deformasyon ölçüm cihazı (LVDT) ve Doğrusal yer değiştirme sensörleri (Potansiyometre)	55
3.1.1.2. Hidrolik pompa, yükleme hücreleri (Loadcell).....	56
3.1.1.3. Veri toplama sistemi (Data Logger).....	57
3.1.2. Deney düzeneği.....	58
3.1.3. Deneysel verilerin formüller kullanılarak verilere aktarılması	58
3.1.4. Eurocode-3 yönetmeliği tasarımlarda moment-dönme özellikleri.....	60
3.2. SAP2000 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Çalışma.....	61
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	65
4.1. Deneysel Çalışma.....	66
4.1.1. Dikey modüler arası birleşim tipi	66
4.1.2. Dikey modüler arası bağlantıların deney düzeneği	67
4.1.3. Yatay modüler arası bağlantıların birleşim tipi	70
4.1.4. Yatay modüler arası bağlantıların deney düzeneği	72
4.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	75
4.2.1. Numunelerin moment dönme eğrileri ve göçme modları	75
4.2.2. Deney sonuçlarının referans çalışmayla karşılaştırılması	82
4.3. Nümerik Çalışma	87
4.3.1. Tezde kullanılan referans çalışmalar.....	87
4.3.2. Yapısal analiz	94
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	104

KAYNAKLAR	105
EKLER.....	111
EK 1.....	111
EK 2.....	112
EK 3.....	113
EK 4.....	114



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

cm	Santimetre
HC	Horizontal Connection
kN	KiloNewton
kNm	KiloNewton metre
KNm/rad	KiloNewton/radyan
kPa	Basınç
m	Metre
mm	Milimetre
N	Newton
POT	Potansiyometre
rad	Radyan
VC	Vertical Connection

Kısaltmalar

LVDT	Deformasyon Ölçme Cihazı
M	Moment
$M_{j,Rd}$	Eğilme Momenti
M- θ	Moment-Dönme
$M_{\theta Cd}$	Eğilme Momenti Kapasitesi
$M_{j, Rd}$	Eğilme moment dayanımı
RHS	İçi boş dikdörtgen kesit
$S_{j,ini}$	Elastik Bölgenin Eğimi
SHS	İçi boş kare kesit
θ	Dönme
$\theta_{Mj,max}$	Eğilme Momentine Karşılık Gelen Dönme
$\theta_{M,Rd}$	Bu momente karşılık gelen dönme
θ_{Cd}	Dönme kapasitesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kristal saray.	2
Şekil 1.2. Renkioi Hospital	3
Şekil 1.3. Sears Roebuck and Co. Kataloğundan bir ev	3
Şekil 1.4. Quonset hut	4
Şekil 1.5. Hilton Palacio del Rio Hotel	4
Şekil 1.6. Nakagin Capsule Tower	5
Şekil 1.7. Lloyd binası	5
Şekil 1.8. Modüler binaların yapım süreci	6
Şekil 1.9. Modüler evin zemin kat planı	7
Şekil 1.10. Modüllerin fabrikadaki imalat süreci	8
Şekil 1.11. Modüler ünitelerin sahaya taşınması	8
Şekil 1.12. Modüllerin sahada montajı	9
Şekil 1.13. (a) T30 otelin zemin kaset sistemi (b) T30 otelin çerçeve sistemi	12
Şekil 1.14. Taşıyıcı duvar sistemi	13
Şekil 1.15. Köşe destekli sistem	13
Şekil 1.16. Açık bina sistemi	14
Şekil 1.17. Beton çekirdekli modüler sistem	15
Şekil 1.18. Modüler yapının altındaki 2 katlı podyum sistem	16
Şekil 1.19. Disneyland’da bulunan tatil otelinin yapım aşaması	17
Şekil 1.20. Çelik çapraz destekli modüler sistem	17
Şekil 1.21. J57 Mini Sky Tower (a) yapım aşaması (b) son hali	18
Şekil 1.22. Clement Canopy Tower (a) 3D modül (b) yapım aşaması	19
Şekil 1.23. Croydon Tower’ın yapım aşaması	20
Şekil 1.24. Yapım aşamasındaki Apex House	20
Şekil 1.25. T30 Tower (a) yapım aşaması (b) son hali	21
Şekil 1.26. HBS modül	21
Şekil 1.27. Collins House	22
Şekil 1.28. La Trobe Tower	22
Şekil 1.29. SOHO Tower (a) tamamlanmış hali (b) modül detayları	23
Şekil 1.30. B2 Tower’ın detayları	24
Şekil 1.31. (a) B2 Tower’ın yapım aşaması (b) son hali.	24

Şekil 1.32. Modül bağlantıları	25
Şekil 1.33. Dikey ve yatay modüler arası bağlantılar	26
Şekil 1.34. Modüler binalarda düşey yük transferi	27
Şekil 1.35. Klips köşebentli yatay bağlantının detayları	29
Şekil 1.36. Cıvatalı ve uç plakalı yatay modüler arası bağlantı.....	29
Şekil 1.37. Öngerilmeli bağlantının detayları.	30
Şekil 1.38. Ardgerilmeli bağlantının detayları.....	31
Şekil 1.39. Önerilen ardgerilmeli bağlantının detayları.....	32
Şekil 1.40. Önerilen bağlantının konnektör mekanizması.	32
Şekil 1.41. Kendiliğinden kilitlenmeli bağlantının detayları.	33
Şekil 1.42. Döner konnektörlü bağlantının detayları.	34
Şekil 1.43. Önerilen bağlantı mekanizmasının detayları	34
Şekil 1.44. Vectorblock konnektörün detayları	35
Şekil 1.45. Önerilen küp bağlantının detayları.	36
Şekil 1.46. Ek geçirmeli bileşene sahip modüler arası bağlantı.	36
Şekil 1.47. Haç biçimli köşebent bağlantının detayları	37
Şekil 1.48. Önerilen bağlantının kullanıldığı çerçeve modül.	38
Şekil 1.49. Önerilen kör cıvatalı ve yüksek gerilimli bağlantının detayları	38
Şekil 1.50. Birbirine kenetlenen modüler arası bağlantı.....	39
Şekil 1.51. Plakalı ve yerleştirme pimli bağlantı.	40
Şekil 1.52. (a) C1 bağlantısı (b) C2 bağlantısı, (c) C3 bağlantısı.	41
Şekil 1.53. Cıvatalı çelik bağlantı	42
Şekil 1.54. Plakalı ve cıvatalı bağlantı.....	42
Şekil 3.1. Dijital deformasyon ölçme cihazı (LVDT) ve Doğrusal yerdeğiştirme sensörleri (Potansiyometre).....	56
Şekil 3.2. Hidrolik pompa, piston ve yük hücresi.....	57
Şekil 3.3. Veri Toplama Sistemi (Datalogger).....	58
Şekil 3.4. Dikey bağlantı için LVDT, potansiyometre ve yük konumlarının şematik gösterimi.....	59
Şekil 3.5. Yatay bağlantı için LVDT, potansiyometre ve yük konumlarının şematik gösterimi.....	59
Şekil 3.6. Moment-dönme eğrisi.....	61
Şekil 3.7. Link eleman local eksen ve global eksen	62
Şekil 3.8. 1-2 düzleminde eksenel, kesme ve eğilme yayları	63

Şekil 3.9. Multilinear link eleman özellik.....	64
Şekil 4.1. Dikey bağlantılı numunenin birleşim tipi.....	67
Şekil 4.2. (a) ve (b) numunelerin, (c) birleşim tipinin detayları şematik görseli.....	67
Şekil 4.3. MV1 numunesinin deney düzeneği	69
Şekil 4.4. MV2 numunesinin deney düzeneği	69
Şekil 4.5. (a) MV1 (b) MV2 numunelerinin LVDT, potansiyometre ve yükün konumları ve mesafeleri	70
Şekil 4.6. Yatay bağlantılı numunenin yandan görünüşleri	71
Şekil 4.7. Yatay bağlantının detayları.....	71
Şekil 4.8. Yatay bağlantılı numune.....	72
Şekil 4.9. MH1 numunesinin deney düzeneği	73
Şekil 4.10. MH3 numunesinin deney düzeneği	73
Şekil 4.11. MH1 adlı numunenin LVDT, potansiyometre ve yükün konumları ve mesafeleri	74
Şekil 4.12. MH3 adlı numunenin LVDT, potansiyometre ve yükün konumları ve mesafeleri	74
Şekil 4.13. MV1 numunesinin F-d eğrisi.....	76
Şekil 4.14. MV1 numunesinin M- Θ eğrisi	76
Şekil 4.15. MV1 numunesinin göçme modları (a) plakada açılma ve üst kolonda kaynak yırtılması (b) alt kolonda kaynak yırtılması	77
Şekil 4.16. MV2 numunesinin F-d eğrisi.....	77
Şekil 4.17. MV2 numunesinin M- Θ eğrisi	78
Şekil 4.18. MV2 numunesinin göçme modları (a) plakada açılma ve üst kolonda kaynak yırtılması (b) alt kolonda kaynak yırtılması	78
Şekil 4.19. MH1 numunesinin F-d eğrisi.....	79
Şekil 4.20. MH1 numunesinin M- Θ eğrisi	79
Şekil 4.21. MH1 numunesinin göçme modları (a) ezilme, (b) burkulma, (c) yırtılma...	80
Şekil 4.22. MH3 numunesinin F-d eğrisi.....	81
Şekil 4.23. MH3 numunesinin M- Θ eğrisi	81
Şekil 4.24. (a) ve (b) MH3 numunesinin deney sonrası görüntüleri.....	82
Şekil 4.25. MV1 numunesinin karşılaştırmalı F-d eğrisi.....	83
Şekil 4.26. MV2 numunesinin karşılaştırmalı F-d eğrisi.....	83
Şekil 4.27. MV1 numunesinin karşılaştırmalı M- Θ eğrisi.....	84
Şekil 4.28. MV2 numunesinin karşılaştırmalı M- Θ eğrisi.....	84

Şekil 4.29. MH1 numunesinin karşılaştırmalı F-d eğrisi.....	85
Şekil 4.30. MH3 numunesinin karşılaştırmalı F-d eğrisi.....	85
Şekil 4.31. MH1 numunesinin karşılaştırmalı M- Θ eğrisi.....	86
Şekil 4.32. MH3 numunesinin karşılaştırmalı M- Θ eğrisi.....	86
Şekil 4.33. (a) Dikey bağlantı detayları (b) yatay bağlantı detayları	87
Şekil 4.34. Modüler binanın y-z eksen görüntüsü.	88
Şekil 4.35. X ve Y yönündeki M- Θ diyagramları.....	88
Şekil 4.36. Modüler binanın ayrıntıları.....	89
Şekil 4.37. Dikey ve yatay bağlantıların F-d ve M- Θ . eğrileri	91
Şekil 4.38. Dikey bağlantılı numunenin karşılaştırılmalı F-d grafiği	91
Şekil 4.39. Yatay bağlantılı numunenin karşılaştırılmalı F-d grafiği.	92
Şekil 4.40. Karlson'ın modeli.	92
Şekil 4.41. Teorik çalışmada yatay bağlantılı numune için M- Θ grafiği.....	93
Şekil 4.42. DeneySEL, Nümerik, Teorik karşılaştırmalı çalışma	94
Şekil 4.43. Modülü oluşturan elemanların konumu.....	95
Şekil 4.44. Modüler binanın Y-Z düzlemi	96
Şekil 4.45. Modüler binanın X-Y düzlemi	96
Şekil 4.46. Y-Z düzlemindeki link elemanların detayları.....	98
Şekil 4.47. X-Z düzlemindeki link elemanların detayları.....	99
Şekil 4.48. Modellenen 6 katlı modüler binanın görüntüleri.....	100
Şekil 4.49. Modellenen 9 katlı modüler binanın görüntüleri	100
Şekil 4.50. Modellenen 12 katlı modüler binanın görüntüleri	101
Şekil 4.51. Karşılaştırılmalı Moment Grafiği	102
Şekil 4.52. Karşılaştırılmalı Kuvvet Grafiği.....	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Numunelerin M- Θ eğrilerinin karakteristik özellikleri.....	82
Çizelge 4.2. Dikey bağlantıların başlangıç rijitliği.	89
Çizelge 4.3. Yatay bağlantıların başlangıç rijitliği.	90
Çizelge 4.4. Modül elemanlarının detayları.....	95



1. GİRİŞ

Modüler, tanım olarak, kullanımda esneklik ve çeşitlilik için yeniden düzenlenebilen, değiştirilebilen veya kolayca sökülüp takılabilen ve standartlaştırılmış boyutlarla oluşturulmuş ayrı parçalardan oluşan anlamına gelir (Anonymous 2022a). Modüler bina, yeni yapı yöntemi gibi gözükebilir ancak yaklaşık iki yüzyıldır varlığını sürdürmüş ve 1830'lardan bu yana olağanüstü bir dönüşüm geçirmiştir. Nihayetinde, günümüzün önde gelen yaklaşımlarından biri haline gelmiştir (Anonymous 2019a).

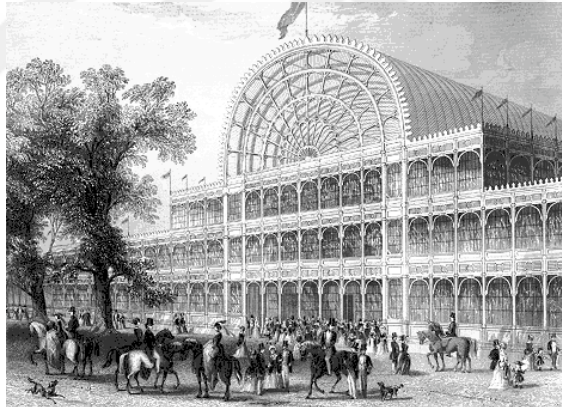
Tarihsel olarak, modüler yapılar genellikle az katlı, geçici veya taşınabilir binalarda kullanılmıştır. Ancak bu yapılar, geleneksel sahada yapılan binalara göre daha hızlı inşaat, daha güvenli üretim, daha iyi kalite ve kontrol ve daha az çevreye rahatsızlık gibi avantajlarıyla inşaat sektörünün dikkatini çekmiştir. Son birkaç yılda popüler olan bu yapılar, yüksek katlı binalarda ve hastaneler, okullar, oteller gibi daha kompleks bina tiplerinde uygulanmaya başlamıştır. Geleneksel binalarda, kat seviyesinde döşemeler tüm zemin boyunca sürekli ve böylece yapının bütünlüğü sağlanır. Ancak modüler yapılarda bu durumun aksine, her modülün kendine özgü zemin levhası olduğundan süreksizdirler. Bu yüzden yapısal bütünlüğünün sağlanması ve modüller arasında yük aktarımının oluşması ve yükleri temele etkili bir şekilde aktarabilmek için modüllerin birbirlerine, modüler arası bağlantılar vasıtasıyla bağlanması gerekir. Bu bağlantılar modüler yapıları geleneksel yapılardan ayıran en önemli unsurdur. Ancak bu bağlantılar literatürde son zamanlarda araştırılmaya başlanmıştır. Bu nedenle, bu bağlantıların yapısal performansının net bilinmemesi, dünya genelinde çoğunlukla az katlı modüler binalar inşa edilmesine sebep olmuştur. Ancak yükseklikle beraber yatay yüklerin de artması ve yapısal bütünlüğün, genel stabilitenin ve dayanıklılığın sağlanması için güçlü bağlantıların olmaması, tamamen modüler sistemden oluşan yüksek katlı binalarda yapısal zorluklar meydana getirir. Bu yüzden genellikle geleneksel inşaat yöntemleri uygulanan yanal stabilite sistemleri (hibrit çekirdek veya çapraz destek sistemler vb. gibi) kullanılarak yüksek katlı modüler binalar inşa edilir. Ancak bu tip binalarda geleneksel yöntemlerin kullanılması, ekonomik ve zaman açısından modüler yapıların avantajlarını sınırlandırdığından bu tezde tamamen modüllerden oluşan modüler çelik binalar üzerinde durulmuştur. Herhangi bir yanal stabilite destek olmadan yüksek katlı

modüler bina inşa etmek için modüler arası bağlantıların gerçek davranışının bilinmesi ve yapısal gerekliliği karşılanması için yenilikçi birleşim tiplerine ihtiyaç vardır.

1.1. Modüler Yapıların Tarihçesi

Kayıtlara geçen en eski prefabrik evlerden biri, oğlunun 1837’de Avustralya’ya göç etmesi beklentisiyle Londralı marangoz Henry Manning tarafından tasarlanmıştır ve inşa edilmiştir (Anonymous 2014).

1851 yılında iki haftadan kısa bir sürede tasarlanan Kristal Saray, demir, ahşap ve cam gibi hafif ve ucuz malzemeler kullanılarak sadece birkaç ayda inşa edilmiştir. Daha sonra saray sökülmüş, taşınmış ve başka bir yerde yeniden inşa edilmiştir (Anonymous 2019a). Şekil 1.1’de gösterilen prefabrik modüler birimlerden yapılan ilk büyük bina Kristal Saray’dır (Kihlstedt 1984).



Şekil 1.1. Kristal saray (Anonim 2020a)

Florence Nightingale’in 1854’te cephedeki hastanelerin korkunç şartlarını bildiren mektubu, mühendis Isambard Kingdom Brunel’in, Boğaz’ın Asya kıyısındaki büyük bir köy olan Scutari’de prefabrik modüler bir hastane oluşturmak için görevlendirilmesine yol açmıştır. Brunel, projeyi beş ay içinde tasarlamıştır (Anonymous 2014) ve dünyanın ilk prefabrik hastanesini (Renkioi Hospital) inşa etmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Renkioi Hospital (Anonymous 2020b)

1908 yılında Sears Roebuck and Co. kataloğu aracılığıyla prefabrik ev satılmaya başlanmıştır. 500.000’den fazla satılan ev, o zamanlarda, geleneksel olarak inşa edilmiş evlerin üçte ikisinden daha azına mal olmuştur ve birçoğu hâlâ Amerika Birleşik Devletleri’nde mevcuttur (Anonymous 2019a). Şekil 1.3’de Sears Roebuck and Co. Kataloğundan bir evin görseli verilmiştir.



Şekil 1.3. Sears Roebuck and Co. Kataloğundan bir ev (Anonim 2022b)

İkinci Dünya Savaşı'nda, askerlerin montajı kolay ve hızlı olan konut ve depolama ihtiyacına karşılık, yarı dairesel kesitli oluklu çelikten yapılmış hafif bir prefabrik yapı olan Quonset kulübesi inşa edilmiştir (Anonim 2022c). Şekil 1.4’de Quonset kulübesi gösterilmiştir. İkinci Dünya Savaşı’ndan sonra Amerika’da, milyonlarca askerin geri dönmesi üzerine büyük nüfus patlaması yaşanmıştır ve bu, muazzam sayıda konut gerektirmiştir. Bu tür konutlar ancak prefabriğe, modüler yapı yoluyla sağlanabilmiştir (Anonymous 2019b).



Şekil 1.4. Quonset hut (Anonymous 2022c)

1968'de geliştirilen Hilton Palacio del Rio Hotel projesi, 22 katlı beton modüler yüksek bina olarak tanıtılmıştır ve yüksek katlı modüler binanın öncüsü olmuştur. 500 modüler oda için ön dökümlü hafif yapısal beton kullanılarak 202 günde tamamlanmıştır (Anonymous 2022d). Şekil 1.5’de Hilton Palacio del Rio Hotel’in görseli verilmiştir.



Şekil 1.5. Hilton Palacio del Rio Hotel (Anonymous 2022e)

İnşası 1970’de başlayıp 1972’ye kadar süren ve Kurokawa tarafından tasarlanan Nakagin Kapsül Kulesi, kalıcı ve pratik kullanım için inşa edilmiştir ve dünyanın ilk kapsül mimarisi örneğidir. Bina halen ayakta olsa da çoğunlukla terk edilmiş haldedir. Ekim 2012 itibarıyla, 140 kapsülün yaklaşık 30’u apartman olarak kullanılmaya devam ederken, diğerleri depo veya ofis olarak kullanılmakta veya terk edilmiştir. Ağustos 2017’ tarihi itibarıyla kapsüller hala kiralanabilmektedir (Anonymous 2022f). Şekil 1.6’de Nakagin Capsule Tower görseli verilmiştir.



Şekil 1.6. Nakagin Capsule Tower (Anonymous 2022f)

1978-1986 yılları arasında Richard Rogers tarafından inşa edilen Lloyd binası, 14 katlı olup, 88 metre yüksekliğindedir (çatıya kadar). Çatı üzerindeki dekoratif yapı ile binanın toplam yüksekliği 95.10 metreye ulaşmaktadır. Bu bina modüler görünüme sahiptir ancak modüler taşıyıcı sisteme sahip değildir. Ayrıca her kattaki iç mekân duvarlarının ihtiyaca göre eklemeler veya çıkarmalar yapmak mümkündür (Anonymous 2022g). Şekil 1.7’de Lloyd binasının görseli verilmiştir.

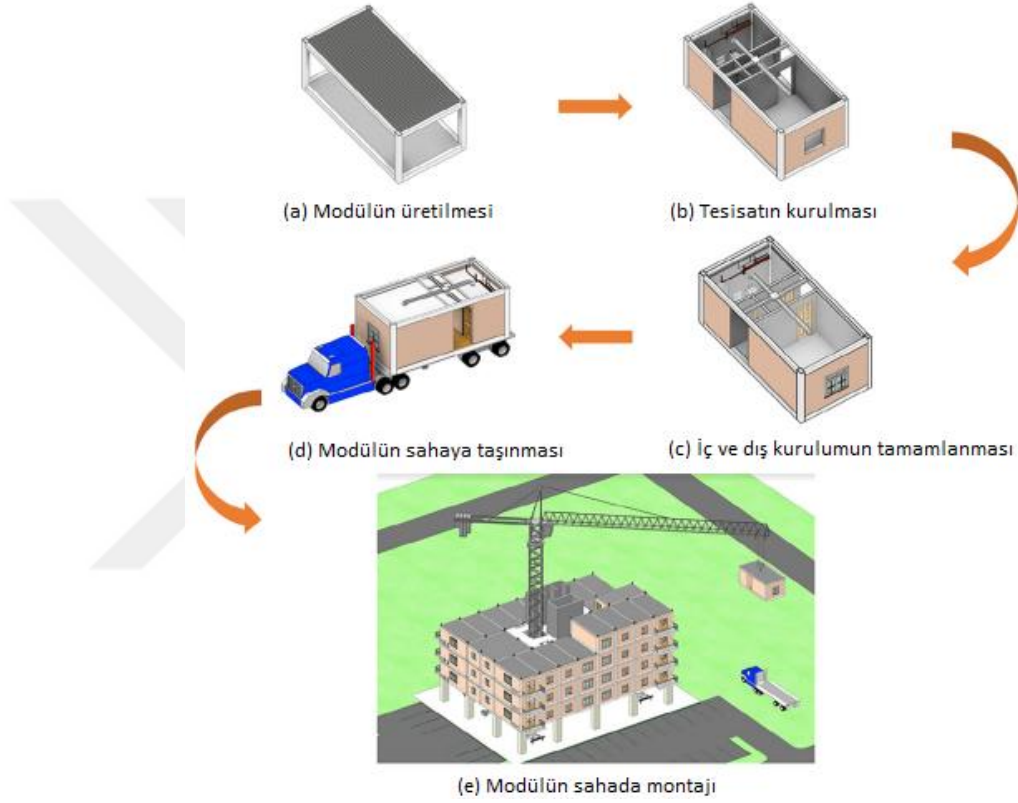


Şekil 1.7. Lloyd binası (Anonymous 2022g)

1970’lerde, geleneksel inşaatın ziyade, modüler yapı, işletmeler arasında, daha sık tercih edilmeye başlanmıştır. Geçici modüler yapıya ek olarak ofisler, okullar ve tıbbi binalar gibi kalıcı modüler yapılar da popüler hâle gelmiştir (Anonymous 2019). Nihayetinde, modüler yapılar, bilgisayar destekli mimari modellemenin ortaya çıkışı ve endüstrinin daha büyük modüler binaları daha büyük ölçekte yönetme kapasitesi sayesinde, günümüzün yüksek düzeyde karmaşıklık ve gelişmişliğe ulaşan modüler yapılar geliştirilmiştir (Ferrer 2019).

1.2. Modüler Yapıların Yapım Süreci

Modüler bir yapı projesinin işleyişi dört ana aşamadan oluşur. İlki, projenin tasarımı ve planlaması ile ilgilidir; ikincisi, fabrikadaki üretim süreci; üçüncüsü, modüllerin sahaya taşınması ve son olarak, binayı oluşturmak için modüllerin yerinde yerleştirilmesidir (Rostek 2018). Modüler binaların yapım süreci Şekil 1.8’de verilmiştir.



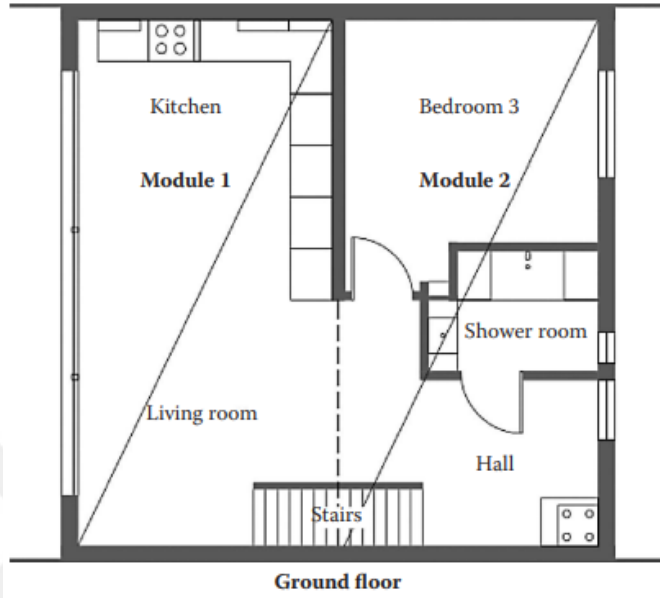
Şekil 1.8. Modüler binaların yapım süreci (Liew et al. 2019)

1.2.1. Tasarım ve plan

Geleneksel yerinde inşaat ile karşılaştırıldığında, inşaatın sonraki aşamalarına başlamadan önce modüllerin tasarım ve mühendisliğinin daha fazla koordinasyonu gerekir (Ferrer 2019). Modüler ünitelerin tasarımı, fabrikada, gelecekteki üretim sürecinin fizibilitesini hesaba katmak için mimarlar ve endüstri ile ilgili mühendisler tarafından gerçekleştirilir. Bilgi paylaşımı ve koordinasyon tekniklerinin ilerlemesi ile daha güvenilir bir planlama ve koordinasyon mümkün hale gelmiştir. Gelecekteki tüm inşaat planlarının bu bölümde geliştirilmesi gerektiğinden, aşamaların planlaması,

1. GİRİŞ

modüllerin nakliyesi ve yerinde yerleştirilmesi için modüler yapının getirdiği sınırlayıcı faktörler dikkate alınarak yapılmalıdır. Şekil 1.9’da modüler teknoloji kullanılarak yapılan evin zemin katı gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Modüler evin zemin kat planı (Lawson et al. 2014)

1.2.2. Fabrika imalatı

Tasarım, bir mimar ve mühendis ile tamamlandıktan sonra, inşaat planları binanın büyük bir kısmının inşa edildiği bir fabrikaya gönderilir. İmalat, öncelikle, sert hava koşullarından uzakta, bina malzemelerinin zarar görmesini önleyen ve inşaatçıların rahat koşullarda çalışmasına olanak tanıyan iç mekânlarda gerçekleşir. Temel yapısal elemanların yanı sıra mekanik, elektrik ve sıhhi tesisat (MEP) sistemlerinden boya, halı, mobilya vb. her şey montaj hattında tamamlanabilir (Ferrer 2019). Modüler bina fabrikaları, her istasyonda yapılan denetimlerle yüksek düzeyde kalite kontrolü sağlayarak sahada oluşabilecek beklenmedik komplikasyonları ortadan kaldırır. Şekil 1.10’da modüllerin fabrikadaki üretiminin görseli verilmiştir.



Şekil 1.10. Modüllerin fabrikadaki imalat süreci (Anonymous 2022h)

1.2.3. Ulaşım

Fabrika ile şantiye arasındaki mesafeler nakliye maliyetlerinde en önemli faktördür. Tipik olarak, yol ve yük kısıtlamaları nedeniyle modülleri çok uzak mesafelere göndermek mümkün değildir. Normalde teslimatlar karayolu üzerinden kamyonlarla yapılır. Modüler teslimatlarının çoğu otoyol üzerinden yapılır. Küçük modül üniteleri söz konusu olduğunda (3 metreden daha az genişlik), karayollarında ulaşım açısından neredeyse kısıtlama yoktur, ancak boyut arttığında, yasal kısıtlamaların dışında, birçok yolun kullanımı imkansız hale gelir ve çoğu zaman bir polis refakatçisi zorunludur. Ünitelerin nakliye durumuna ilişkin olarak, hava olayları için, polietilen levhalar veya membran gibi geçici koruma kullanılır. Ünitelerin kamyon üzerine yüklenmesi ve boşaltılması sırasında oluşabilecek olası kuvvetler için çelik yayılmış teçhizatlar kullanılır (Ferrer 2019). Şekil 1.11’de modüler ünitelerin taşınması verilmiştir.



Şekil 1.11. Modüler ünitelerin sahaya taşınması (Anonymous 2022ı)

1.2.4. Sahada montaj

Modüller sahaya ulaştığında, son montajdan önce bağlantılar gözden geçirilir. Bağlantıların denetlenmesinden sonra modüller plandaki yerlerine yerleştirilir. Modülleri kaldırmak ve yerleştirmek için çeşitli tiplerde gergi çubuklar veya halatlar kullanılabilir. Son inşaat aşaması genellikle kaplama ve çatı gibi dış sistemlerin ve lobiler, merdiven boşlukları ve asansör boşlukları gibi iç boşlukların tamamlanmasını içerir (Ferrer 2019). Kaplama, fabrikada veya sahada uygulanabilir ve en yaygın olarak, kaplamanın bazı kısımlarının genellikle bağlantının tamamlanmasından önce uygulanamaması nedeniyle her ikisinin bir kombinasyonudur (Smith 2010). Şekil 1.12’de modül yerleşiminin görseli verilmiştir.



Şekil 1.12. Modüllerin sahada montajı (Anonymous 2022i)

1.3. Modüler Yapıların Avantajları ve Dezavantajları

Modüler yapıların avantajları; maliyet, zaman ve kalite açısından değerlendirilebilir. Modüler yapılar zaman verimliliği açısından önemli avantajlara sahiptir. Mesela; modüler binaların yapım sürecinin bir kısmı fabrikada bir kısmı sahada gerçekleştiğinden, bazı yapım aşamaları aynı anda gerçekleştirilebilir. Örneğin, temel çalışmaları sahada yapılırken imalatçılar aynı zamanda fabrikada modüller üretilerek inşaat süreci hızlandırabilir. Bu, özellikle büyük projelerde gereklidir. Bu eşzamanlı aşamalar, modüler projelerin planlama ve koordinasyonu için çok önemlidir. Ek olarak, geleneksel binada aynı anda sadece bir kat inşa edilebilirken, modüler bir binanın birkaç

katı aynı anda fabrikada üretilbilir. Tüm bu durumlar inşaat iş programının kısılmasına neden olur.

Modüler yapılar ayrıca maliyetin düşmesine neden olabilecek birçok faktöre sahiptir. Örneğin, inşaat programının kısılması inşaat sırasında kullanılan vinçler yük asansörleri gibi büyük harcamalara neden olan araçların kullanım süresini azaltır. Dolayısıyla bu durum zamandan tasarruf sağlarken aynı zamanda modüler inşaat sistemi için büyük maliyet tasarrufu sağlar. Ayrıca, iş gücünün sabit olduğu ve sahada çalışmayla kıyasla rutin protokollerin yaygın olduğu fabrikada iş planlarının uygulanması ve takip edilmesi daha kolaydır. Fabrika organizasyonu ve görevlerin tekrarı modüllerin üretimini ucuz hale getirirken, aynı zamanda iş gücünde daha az uzmanlaşmaya neden olur. Dolayısıyla bu, işçilik miktarını ve ödenen saatleri düşürmeye de yardımcı olur. Öte yandan, modüler yapılar genel olarak daha düşük taşıma talebine sahip olduğundan klasik nakliyeyle kıyasla daha düşük maliyete neden olur.

Modüllerin fabrika ortamında üretilmesi, yüksek kalitenin oluşmasındaki en önemli faktördür. Kontrollü bir ortama sahip bir fabrika içinde çalışma süreci, hava koşullarındaki değişikliklere maruz kalmadığından su olaylarından etkilenmeyecektir. Ek olarak, fabrika ortamında hava kalitesi kontrol edilebildiğinden yapı malzemelerinin nem tutma potansiyeli oldukça azdır. Ayrıca fabrika ortamında üretim boyunca, yüksek kaliteli montaj sağlamak için kalite denetimleri yapılır. Ayrıca, modüler birimler atölyeden ayrılmadan önce elektrik, mekanik ve sıhhi tesisat sistemler test edilir ve kalitesi sağlanır ve onaylanır. Bu da oluşabilecek tüm hataları ortadan kaldırır.

Fabrikadaki yapım sürecinin başka birçok faydası daha vardır. Örneğin, montaj, kontrollü ve sahadaki çalışma ortamından çok daha az tehlikeli ortamda gerçekleştiği için yaralanma olasılığı büyük ölçüde azdır. Bundan başka, fabrikadaki üretim, şehir lojistiği gibi sorunlar yüzünden kesintiye uğramadan verimli bir şekilde devam ederken, aynı zamanda akustik kirlilik açısından çevreye daha az zarar verir. Öte yandan, sahadaki israf en aza indirilirken, inşaat malzemesi alımlarını ve kullanımını optimize etmeyi mümkün kılar ve daha fazla geri dönüşüm fırsatı sunar (Ferrer 2019).

Modüler yapıların bir diğer önemli avantajı, modüllerin başka bir yerde yeniden kullanılması, binanın sökülümünün kolay olması ve modüllerin kendi değerinden bir şey kaybetmemesidir. Ayrıca modüllerin doğası gereği her modül kendi zemin, duvar ve tabanına sahip olduğundan modüller yan yana veya üst üste yerleştirildiğinde zemin, duvar ve tavanlar, bir sonraki modüle karşılık geldiği yönde çift katmana neden olur. Bu da ses ve ısı yalıtımı açısından fayda sağlar (Lawson et al. 2014).

Modüler yapıların dezavantajlarına gelinecek olursa, modüler binalar geleneksel olarak inşa edilmiş binalara kıyasla birçok fayda sağlasa da fabrika üretimi için gereken alt yapı ve üretim tesisleri bir miktar yatırım gerektirir. Ayrıca prefabrike bileşenlerin tasarlanması ve üretilmesi için teslim süresi, geleneksel inşaat yöntemlerine göre uzar (Lawson et al. 2014). Bununla birlikte modüler yapının bir diğer dezavantajı iç alana genişliğine getirilen sınırlamadır. Modülün boyutu genellikle taşıma kısıtlamaları tarafından sınırlandırılır. Ancak izin alınırsa daha büyük modüller kullanılabilir ancak bunun için refakatçi gerekir. Modüler yapılarda mevcut kod veya kılavuz olmadığından, belli bir tasarım kriterlerinin olmaması bu yapıların en büyük dezavantajıdır. Ayrıyeten, çoğu uygulayıcı mimar ve yapı mühendisi modüler yapıları tasarlama konusunda çok az deneyime sahiptir. Bu yüzden modüler binaların tasarım gereksinimleri ve yapısal performansı hakkında daha fazla bilgiye ihtiyaç vardır (Rostek 2018).

1.4. Modüler Binalarda Yapısal Sistemler

Modüler binalar yapısal açıdan değerlendirildiğinde yedi kategoriye ayrılabilir: 2D panelli sistemler ve 3D hacimsel sistemler, Açık Bina Sistemler, Hibrit Çekirdekli, Hibrit Podyum, Çerçeve ve Çelik Çapraz Destekli Modüler Sistemler.

1.4.1. 2D sistem

Bu sistemde önce her katın duvar ve kolonları kurulur daha sonra zemin kaset onların üstüne yerleştirilir. 15 günde dikilen Çin'deki 30 katlı otel, bu sistem için iyi bir örnektir. Şekil 1.13 (a)'da taban/tavan kaseti ve kolonlardan oluşan sistem, (b)'de otelin çerçeve sisteminin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.13. (a) T30 otelin zamin kaset sistemi (b) T30 otelin çerçeve sistemi

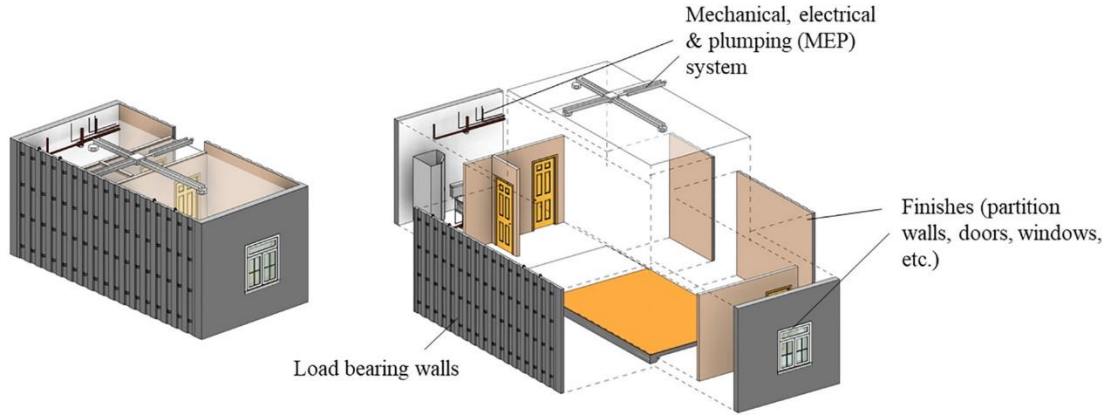
2D panel arasındaki bağlantının ana fonksiyonu panelleri birleştirmektir ve paneller arasında yük transferi yapmaktır. Bağlantılar paneller arasında yatay ve dikey yükleri transfer edebilmek için yeterli dayanıma sahip olmalıdır. Şekil 1.13’de görüldüğü gibi 2D sistemin bağlantıları rijit cıvatalardan oluşmuştur. Ek olarak, kolonların ucundaki kesme anahtarı, kat seviyesindeki bağlantıların üniform hareket etmesine neden olur. Dahası, kolonların iki kenarındaki kanatlar sayesinde, kolon ve kasetler arasında rijit bağlantı sağlanmıştır (Ramaji and Memari 2013).

1.4.2. 3D sistem

Bu modüler sistemde yapılar, 3D modüllerin yatay ve dikey olarak istiflenmesinden oluşur (Ramaji and Memari 2013). 3D modüller, yük aktarma şekline göre ikiye ayrılır. Bunlar taşıyıcı duvar sistemleri ve köşe destekli çerçevelerdir.

1.4.2.1. Taşıyıcı duvar sistemler

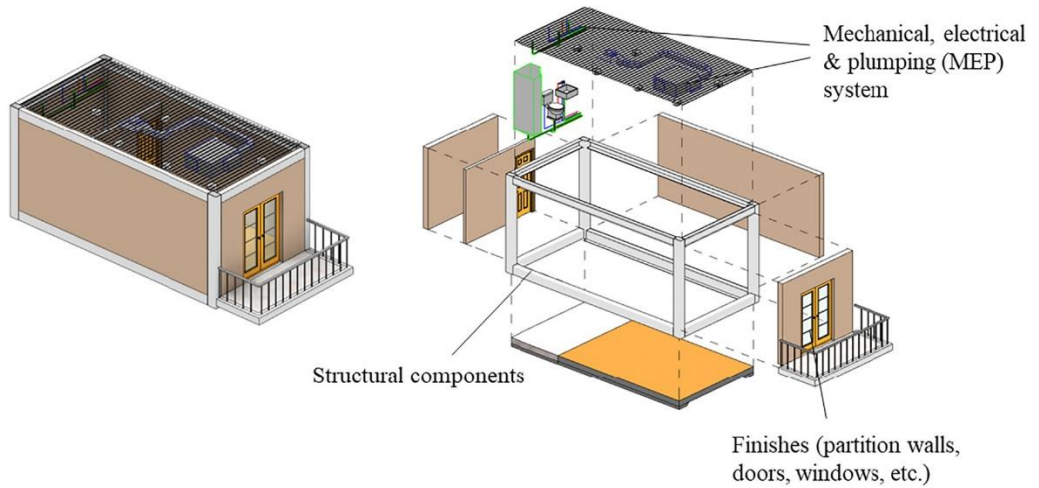
Taşıyıcı duvar sistemlerde düşey yükler (ölü ve hareketli yük), duvarlara, duvarlardan temele aktarılır. Bu modüllerin yük taşıyan elementleri duvarlardır. Duvarlar genellikle hafif çelik C profil kesitlerden oluşur. Rüzgar ve depremden kaynaklanan yanal yükler, taşıyıcı duvar modülünün yan duvarlarının yanı sıra, tavanlar ve zeminler aracılığıyla (varsa) perde duvar çekirdeklerine ve/veya çaprazlama sistemlerine aktarılır (Lawson and Richards 2010). Şekil 1.14’de taşıyıcı duvar sistemlerinin ayrıntıları verilmiştir.



Şekil 1.14. Taşıyıcı duvar sistemi (Liew et al. 2019)

1.4.2.2. Köşe destekli sistemler

Sadece köşelerinde ve bazen ara noktalarında kolonlar bulunan ve açık kenarlara sahip modüllere köşe destekli modül denir. Bu sistemde modüllerin köşe kolonları, kenar kirişlerden gelen düşey yükleri karşılarken destek elemanları ya da kaplamalar yanal yükleri karşılar. Çelik içi boş kare kesit (SHS), köşe kolonda en çok kullanılan kesittir (Ramaji and Memari 2013). Köşe destekli modüller, açık tarafları nedeniyle bir iç mekanı tasarlarken daha fazla esneklik sunar (Lacey et al. 2019a). Şekil 1.15’de köşe destekli sistemin görseli verilmiştir.



Şekil 1.15. Köşe destekli sistem (Liew et al. 2019)

1.4.3. Açık bina sistem

Açık bina sistemi mekan planlama esnekliğini artırmak için geliştirilmiştir ve çeşitli modül ve çerçeve sistemlerinin kombinasyonlarından oluşabilir. Açık bina sisteminin bir türü olan açık ev sisteminin prosedürü 3 ana adımdan oluşur. İlk adımda, şantiyede kolonlar dikilir. İkinci aşamada, ilk adımda kurulan kolonların arasına modüller yerleştirilir. Son aşamada hem çatı monte edilir hem de tüm modüller ve kolonlar birleştirilir. Şekil 1.16'da açık bina sisteminin iki farklı yapım aşaması gösterilmiştir (Birgersson 2004).



Şekil 1.16. Açık bina sistemi (Birgersson 2004)

1.4.4. Hibrit çekirdekli modüler sistem

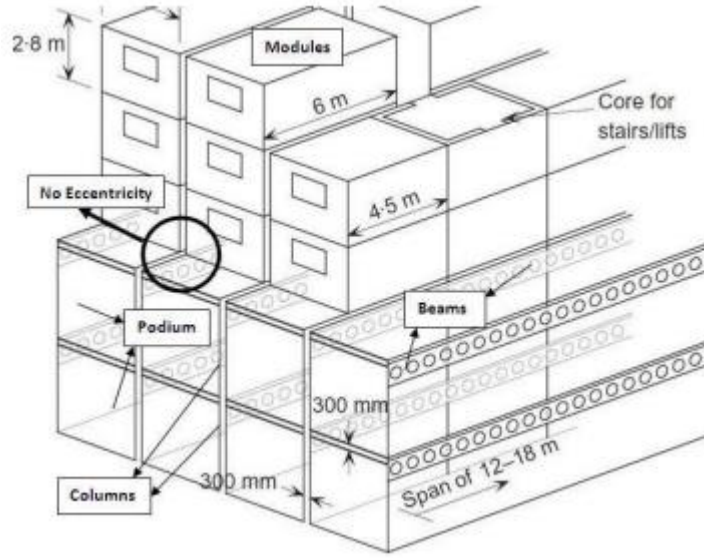
Yapının yüksekliği arttıkça toplam düşey ve yatay yüklerin büyüklüğü de artar. Bu yüzden daha alt modüllerdeki yük taşıyan kesitlerin boyutu daha büyük olmak zorundadır. Bu sistemde bu elemanların boyutu yapının çekirdeği sayesinde sınırlandırılır. Yatay yükler altında, kat seviyesindeki diyagramlar, yatay yüklerin çoğunu yapının çekirdek kısmına iletilir. Bu yüzden modüller ve çekirdek yapı arasındaki bağlantı, bu iki yapı arasındaki dikey, basınç ve çekme yüklerini transfer edebilmek için yeterince güçlü olmalıdır (Ramaji and Memari 2013). Şekil 1.17'de hibrit çekirdekli modüler sistem örneği verilmiştir.



Şekil 1.17. Beton çekirdekli modüler sistem (Anonymous 2022j)

1.4.5. Hibrit podyum sistem

Modüler binaların kısa açıklıklı olmasından dolayı hibrit podyum modüler sistem, genellikle alt katlarda daha uzun açıklıklara ihtiyaç duyan yapılar için (park alanı, parkende satış) kullanılır. Bu sistemde alt katlar (genellikle iki kat) uzun açıklıklı beton çerçeve veya geleneksel çelik çerçeve kullanılarak inşa edilir. Daha sonra binanın modüler kısmı podyumun üzerine inşa edilir. Başka bir deyişle, podyum, modüler kısmın temeli gibidir. Modüller, yüklerini podyumun kirişlerine aktarırlar. 2 katlı podyum sistemin şematik çizimi şekilde gösterilmektedir. Şekil 1.18’de görüldüğü gibi modüllerin kenarları, podyum kiriş ve kolonların üzerindeki yükün eksantriğini yok etmek için, podyum kirişlerinin merkezine sıralanmıştır (Ramaji and Memari 2013).



Şekil 1.18. Modüler yapının altındaki 2 katlı podyum sistem (Lawson et al. 2011)

1.4.6. Çerçeve birim sistem

Bu sistemde binanın ana yapısı modüler olmayıp Şekil 1.19’da gösterildiği gibi bu tip binanın ana yapısı geleneksel yapısal çerçevedir. Ana yapı çerçevesi kurulduktan sonra modüler üniteler yapısal çerçevesinin kirişleri ve kolonları arasına yerleştirilir. Şekil 1.19’da Disneyland’da bulunan bir tatil otelinin kurulum aşaması gösterilmiştir. Ana yapısal çerçeve, destekli çelik çerçevedir ve bu yapının modülleri ahşaptan yapılmıştır. Bu nedenle çelik çerçevenin dayandığı gibi büyük deformasyonlara dayanamaz. Desteklenmiş çerçevenin kullanılmasının bir nedeni yapının rijitliğini artırmaktır ve yanal yükler altında çerçevenin deformasyonunu kontrol altına almaktır. Bu sistemin en önemli yararlarından biri, modül özellikleri; plan şekline, kat sayısına, rüzgar ve deprem yüklerine bağlı değildir. Ana yapısal çerçeve yüklere dayandığı için tüm modüller aynıdır. Ek olarak modüllerin elemanları sadece kendi yüklerini taşıyacak şekilde dizayn edilir. Ana yapısal çerçeve yatay yüklerini taşımasına rağmen modüller ve çerçeve arasındaki bağlantılar deprem yükleri ve düşey yükleri transfer edilebilmesi için yeterince dayanıklı olmalıdır (Ramaji and Memari 2013).



Şekil 1.19. Disneyland’da bulunan tatil otelinin yapım aşaması (Anonymous 2021)

1.4.7. Çelik çapraz destekli modüler sistem

Çapraz destekli çelik çerçeveler, modüller ile karşılaştırılınca daha yüksek yanal rijitliğe sahiptir. Modüllerin yanal yüklere dayanması çapraz kuşaklarla sağlanır. Şekil 1.20’de bu sistemin örneği verilmiştir.



Şekil 1.20. Çelik çapraz destekli modüler sistem (Lawson and Ogden 2005)

1.5. Yüksek Katlı Modüler Binalar

Sadece modüllerden oluşan modüler yapılar, yanal yüklere dayanan herhangi bir sisteme sahip olmadığından, genellikle bir veya iki katlıdır. Bu sistemlerde, tek ailelik ev veya geçici binalar için kullanılan hafif çelik çerçeveler kullanılmaktadır. Hafif malzemelerin kullanılması, kurulum sürecindeki binanın, taşınmasını ve kaldırılmasını kolaylaştırır ancak çok katlı yapılar için belli sınırlamalara sahiptir. Bu yüzden çok katlı modüler binalar için, RHS, SHS veya I kesit gibi daha ağır malzemeler kullanılır bu da yatay yükler daha önemli hale gelir. Modüler binaların yüksekliği arttıkça sadece

modüllerden oluşan taşıyıcı sistem bir seçenek olmaktan çıkar ve yanal yüklere dayanmak için betonarme çekirdek, çelik çapraz destekli sistem, çerçeve sistem veya hibrit sistem gibi daha geleneksel yollar kullanılır. Bu sistemler, daha yüksek yanal rijitliğe sahiptir ve bu sistemlerin modüler binalarda kullanılması tüm yapının yanal deformasyonunu azaltabilir. Ancak bu sistemlerle modüler birimlerin arasındaki bağlantılar, mevcut yükleri aktarabilecek kadar sağlam olmalıdır. Fakat, bu sistemlerin kullanılması, tamamen modüllerden oluşan yapıların avantajlarını önemli derecede azaltır. Ancak, tamamen modüllerden oluşan teknolojinin teknik zorluklarının olması, bu yapının davranışının tam olarak bilinmemesi ve literatürde bu konuyla alakalı çok sınırlı sayıda çalışmanın olması, bu binaların yüksek katlı binalarda kullanılamamasına neden olmuştur. Dünya genelindeki yüksek katlı modüler binaların genellikle Avustralya’da, Çin’de, Singapur’da, Amerika’da ve İngiltere’de olduğu görülmüştür ve bu bölümde bu binalar yapısal sistemlere göre sınıflandırılarak verilmiştir.

1.5.1. 2D sistemli yüksek katlı modüler binalar

Çin’de yüksek katlı modüler bina uygulamasına öncülük eden Broad Sustainable Building (BSB), son on yılda çelik binalar için 2D panel tekniğini geliştirmiştir. Bu metotla zemin kaset, çerçeve sistem gibi yapısal elemanlar dahil, çelik binanın bileşenlerin yüzde 90’ından fazlası sahaya gelmeden önce BSB merkez fabrikasında üretilir. Apartman dairelerinden oluşan 57 katlı, J57 Mini Sky Tower’ın yapım aşaması ve son hali Şekil 1.21’de verilmiştir. Bu kule dünyada en hızlı inşa edilen binalardan biridir. J57 Mini Sky Tower 19 günde tamamlanmıştır. J57 Mini Sky Tower’ı inşa etmek için toplam 2736 modül kullanılmıştır. Bu modülü oluşturan yapısal elemanlar BSB merkez fabrikası tarafından 4 buçuk ayda üretilmiştir (Anonymous 2016).



Şekil 1.21. J57 Mini Sky Tower (a) yapım aşaması (b) son hali (Anonymous 2022r)

1.5.2. 3D sistemli yüksek katlı modüler binalar

40 katlı Clement Canopy Tower, Singapur'un en uzun modüler binasıdır. Bu kule PPVC metot kullanılarak yapılmış beton binadır. The Clement Canopy projesi iki kuleden oluşur ve toplam 1899 ppvc modülden yapılmıştır. Bu proje, ppvc metotunun yararını zaman ve kalite açısından göstermiştir (Anonymous 2020c). Şekil 1.22'de Clement Canopy Tower'ın görseli verilmiştir.



Şekil 1.22. Clement Canopy Tower (a) 3D modül (b) yapım aşaması (Anonymous 2019c).

1.5.3. Hibrit çekirdekli yüksek katlı modüler binalar

İngiltere'de bulunan Croydon Tower projesi toplam 546 daireli 44 katlı ve 38 katlı binalardan oluşmuştur. Kule geleneksel şekilde hem çekirdek hem de podyum metot ile inşa edilmiştir. Kulenin her modülü 60 mm kalınlıklı SHS köşe destekli çelik çerçeveden oluşmuştur. Çelik modüllerin SHS kolonunun boyutları 300 mm (binanın temel modülünde) ile 150 mm (binanın en üst modülünde) arasında değişmiştir. Şekil 1.23'de Croydon Tower'ın yapım aşamasındayken görseli verilmiştir (Anonymous 2019d).



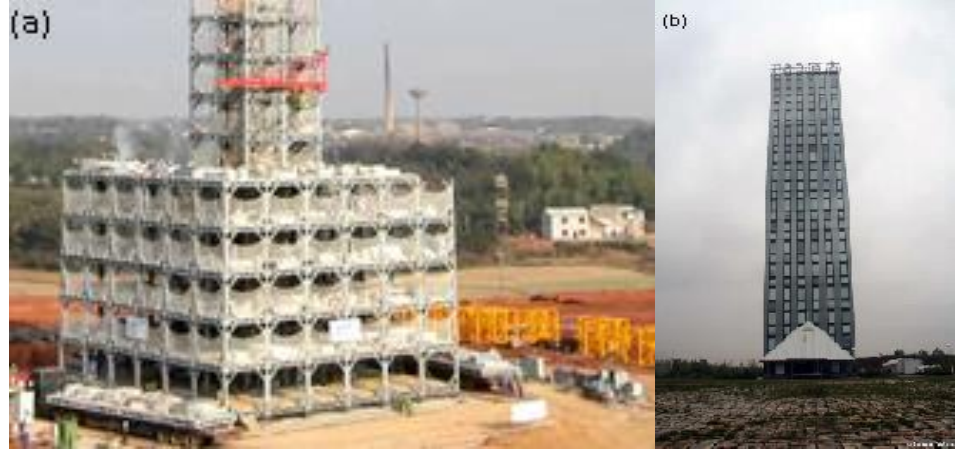
Şekil 1.23. Croydon Tower'ın yapım aşaması (Anonymous 2019d)

İngiltere'de başka uzun modüler yapılardan biri London'daki Apex House'dır. Beton çekirdek tarafından yanıl destek sağlanan 29 katlı öğrenci konaklama yeri, iki tarafında sekiz katlı binalara sahiptir. Yapıyı oluşturan her modül temele düşey yükü aktaracak kalın köşe direkler içerir ve binayı oluşturan 679 çelik modül, sahada kaynak yapılarak bağlanmıştır. Şekil 1.24'de Apex House'ın yapım aşamasındaki görüntüsü verilmiştir (Anonymous 2017).



Şekil 1.24. Yapım aşamasındaki Apex House (Anonymous 2022s)

Çin'de yapılmış hibrit çekirdekli modüler bina olan 30 katlı T30 Tower'ın yapım aşaması ve son hali Şekil 1.25'de verilmiştir. T30 Tower 15 günde tamamlanmıştır. Bu kule ayrıca 2D panel sistemle inşa edilmiştir ve bu binanın yapılmasına (BSB) öncülük etmiştir (Anonymous 2016).



Şekil 1.25. T30 Tower (a) yapım aşaması (Anonymouse 2012a) (b) son hali (Anonymouse 2022p).

1.5.4. Hibrit podyum sistemli yüksek katlı binalar

Dünyada yapılan en uzun modüler binadan üçü, Avustralya’da modüler binanın öncüsü olan Hickory grup tarafından geliştirilmiştir ve Hickory bina sistemi (HBS) olarak adlandırılan özel bina modülleri kullanılmıştır. Çekirdek ve perde duvar kombinasyonundan oluşan modern HBS sisteminin kullanımı, sadece zamanı azaltmadığı, ayrıca enerji ve malzeme israfını en aza indirirken, kalite ve güvenliği de optimize ettiği belirtilmiştir (Anonymouse 2021). Şekil1.26’de, 17 m uzunluğunda ve 26 ton ağırlığındaki tipik bir HBS modülü gösterilmiştir.



Şekil 1.26. HBS modül (Kumar 2016)

Şekil 1.27’de gösterilen 60 katlı Collins Hause projesi podyum sistem kullanılarak 2019’da tamamlanmıştır. Geleneksel metot kullanılarak inşa edilen podyum yapısı, 14 kata kadar betonla inşa edilmiştir. Geriye kalan katlar HBS sistemi kullanılarak inşa

1. GİRİŞ

edilmiştir. Proje 29 ayda tamamlanarak geleneksel metottan yüzde 30 daha hızlı olduğu belirtilmiştir (Anonymous 2022m).



Şekil 1.27. Collins House (Anonymous 2022n)

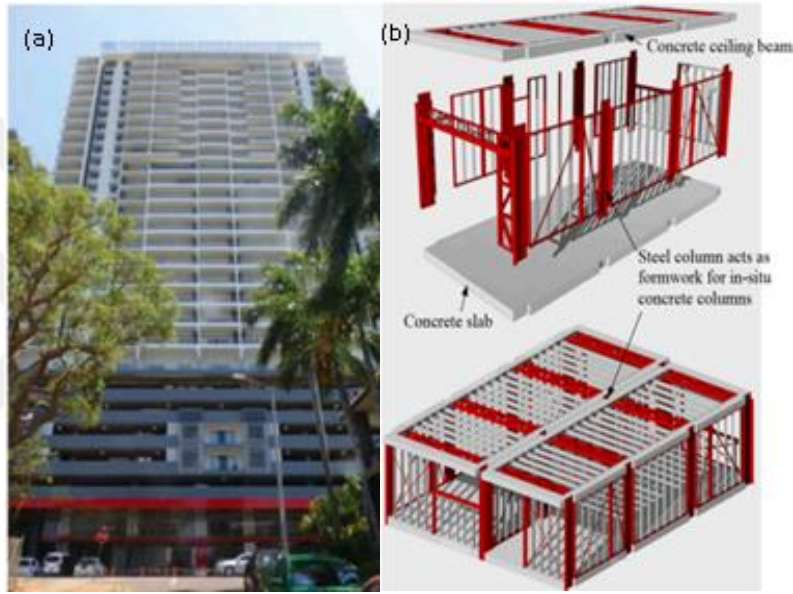
Avustralya'daki HBS sistemi kullanılan bir başka modüler yapı La Trobe Tower'dır. 44 katlı La Trobe Tower projesi 19 ayda tamamlanmıştır. (Anonymous 2022o). Binanın ilk üç katı geleneksel yöntemlerle inşa edilirken, geriye kalan katlar, 17*4.5*3 boyutlarda ve 22 ton ağırlığındaki modüllerden oluşan, Hbs sistemiyle inşa edilmiştir (Kumar 2016). Şekil 1.28'de La Trobe Tower binasının görseli verilmiştir.



Şekil 1.28. La Trobe Tower (Anonymous 2022o)

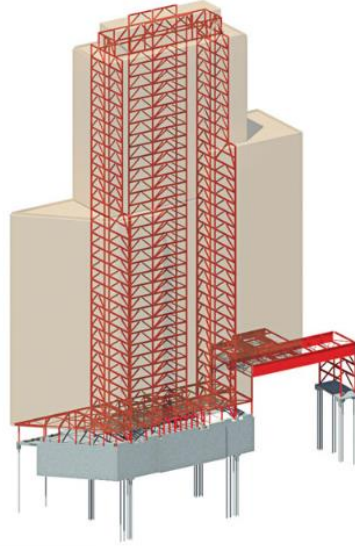
1. GİRİŞ

Avustralya’da ki diğer modüler yapılardan biri olan SOHO Tower, 2014 yılında tamamlanmıştır. 29 katlı olan SOHO Tower, PPVC podyum metodu kullanılarak inşa edilmiştir. Bodrum ve 8 katı podyum yapı olan kule, geleneksel yöntemler kullanılarak betonla inşa edilmiştir. Geriye kalan katlarda çelik modüller, podyumun üzerine inşa edilmiştir. Bu modüller 10*4,2*3,9 m uzunluğa ve 22 ton ağırlığa sahiptir ve hafif beton plaka, beton tavan kiriş ve içi betonla doldurulmuş çelik kolonlardan oluşmuştur (Gardiner 2015). Şekil 1.29’da SOHO Tower binasının tamamlanmış hali ve modül detayları verilmiştir.



Şekil 1.29. SOHO Tower (a) tamamlanmış hali (Gardiner 2015). (b) modül detayları (Anonymous 2022ö).

Amerika’nın Newyork şehrinde bulunan 32 katlı B2 Tower, dünyanın en uzun modüler yapılarından biridir. 363 daireden oluşan bina podyum sisteme sahip bina 930 çelik modülden oluşmuştur. Şekil1.30’da görüldüğü gibi bina geleneksel beton temel tabaka, beton çevre duvarı ve çelik çerçeveden oluşmuştur. Yatay yüklere karşı birtakım destekli çelik modül kullanılmıştır (Farnsworth and Principal 2014). Çelik modülün çerçevesi, SHS kolonları (150*150 mm), RHS (dikdörtgen içi boş kesit) taban kiriş (200*100 mm), RHS tavan kiriş (100*100), RHS orta direklerden (50*75) oluşurken, modülün taban ve çatısı çelikten yapılmıştır (Kim 2019). Şekil 1.31 (a) ve (b)’de binanın yapım aşaması ve son hali verilmiştir.



Şekil 1.30. B2 Tower'ın detayları (Anonymous 2012b)



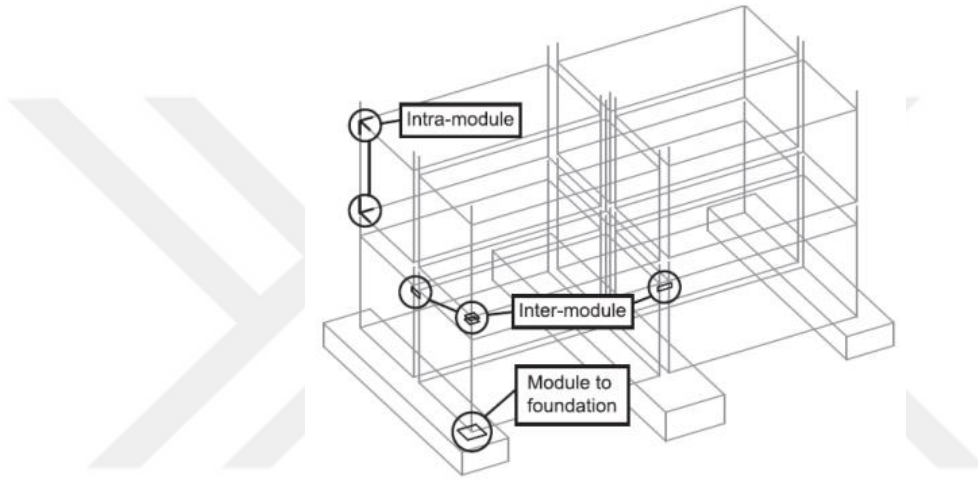
Şekil 1.31. (a) B2 Tower'ın yapım aşaması (b) son hali (Anonymous 2022ş)

1.6. Bağlantılar

Bağlantıların rijitlik, dayanıklılık, süneklilik gibi mekanik özelliklerinin, yapılarının hizmet verebilirliği, sağlamlığı, güvenliği ve stabilitesi üzerinde önemli etkileri olduğu bilinmektedir (Srisangeerthanan et al. 2020). Bu yüzden, bağlantıların herhangi bir aksilik karşısında fonksiyonunu sürdürebilmesi, işlev kaybı olduğunda bileşenlerin iyileştirme sürecini başlatabilmek için basit olması, iyileştirmenin hızlı olması ve kayıpların az olması için kolayca değiştirilebilir olması istenir.

Modüler çelik binalarda hem modülü oluşturan kolon ve kirişler arası bağlantılar hem modülleri birleştirmek için kullanılan bağlantılar hem de temel ile modüller arasındaki bağlantılardan dolayı, geleneksel binalarla karşılaştırılınca çok daha fazla bağlantılara sahiptir (Lacey et al. 2019b).

Modüler yapıların bağlantıları; modül-temel bağlantılar, modül içi bağlantılar ve modüller arası bağlantılar olarak gruplandırılabilir. Şekil 1.32’de bu bağlantıların konumları gösterilmiştir. Modül içi bağlantılar fabrika koşulları altında saha dışında tamamlanacağından ve temel bağlantılarının montajı, düzgün bir şekilde yapılırsa, sahada yalnızca bir kere yapıldığından, modül içi ve temel bağlantılarının modüler binaların performansını etkileme olasılığı daha düşüktür. Öte yandan, modüller arası bağlantıların her katta sahada montajı gerektiğinden yapı üzerinde büyük etkisi olması muhtemeldir (Srisangeerthanan et al. 2020).



Şekil 1.32. Modül bağlantıları (Ferrer 2019)

1.6.1. Temel-Modül Bağlantılar

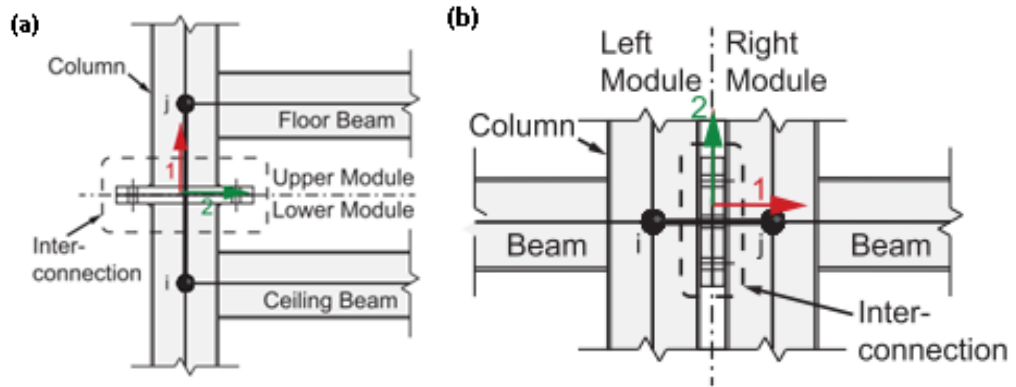
Temeller, prekast beton temellerden, fore beton kazıklardan, burgulu çelik kazıklardan veya bazı kombinasyonlarından oluşabilir. Bina modülleri, beton veya çelik yığılara veya büyük kütleli beton temellere genellikle zincirler, kablolar, plaka tutucularıyla yerleştirilir ve daha sonra bağlanır (Lacey et al. 2018). Temel bağlantılar, yükleri zemine transfer eder ve geleneksel bağlantı tiplerinden oluşur (Srisangeerthanan et al. 2020). Yüksek yanal yüklemeye sahip alanlarda bulunan modüler binalar, temele doğru bir şekilde bağlanmaz ise, devrilme ve kayma kırılmalarına karşı savunmasız olabilir.

1.6.2. Modül içi bağlantılar

Modül içi bağlantılar, yani modülün yapısal çerçevesini oluşturan bağlantılar, genellikle basit geleneksel bağlantı tiplerinden oluşur. Modül içi bağlantıların modül bütünlüğünü sağlaması ve gerekli modül rijitliğine ulaşılmasında katkıda bulunması beklenir (Srisangeerthan et al. 2020). Modüler çelik yapının modül içi bağlantılarında hem cıvatalı hem de kaynaklı bağlantılar kullanılır. Cıvatalı bağlantıların, yeniden kullanılması için sökülmesi kolaydır ancak nispeten düşük moment kapasitesi, dönme kapasitesi ve süneklik sunarlar. Kaynaklı birleşimler modül üniformluğunu sağlamak için daha iyidir ve fabrikada üretim için uygundur ancak dönmeye izin vermezler (Lacey et al. 2018).

1.6.3. Modüler arası bağlantılar

Modüler arası bağlantılar, yatay düzlemde bitişik modüller arasında yatay bağlantı, üst üste gelen modüller arasında dikey bağlantı sağlar. Şekil 1.33’de dikey ve yatay bağlantılar gösterilmiştir. Aynı zamanda bu bağlantıların bazı türleri hem yatay hem de dikey yönde modülleri bağlayabilir.

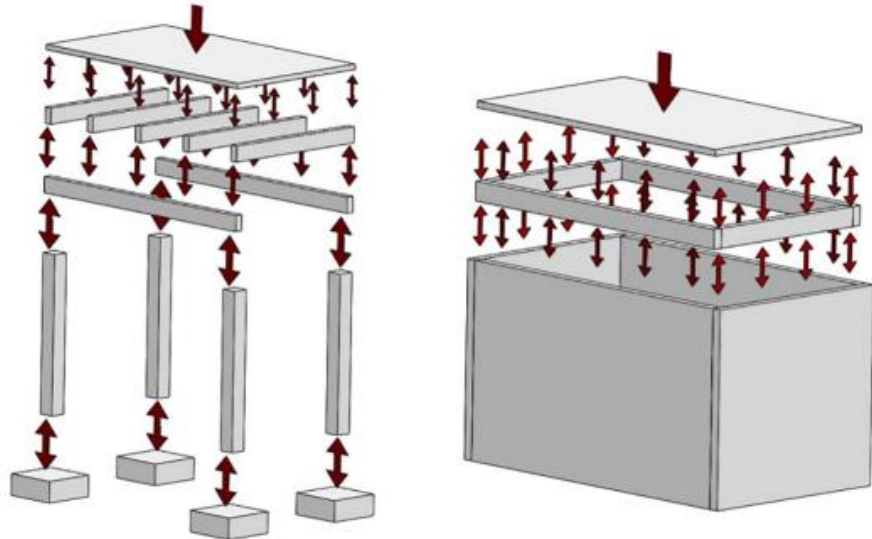


Şekil 1.33. Dikey ve yatay modüler arası bağlantılar (Lacey et al. 2019b)

Bu bağlantılarda, genellikle, cıvatalı, kaynaklı ve kompozit beton-çelik birleşim tipleri kullanılır. Cıvatalı bağlantıların kaynaklı bağlantılara göre daha çok tercih edildiği bilinmektedir. Bunun nedeni sahada daha az çalıştırma gerektirmesi ve demontaj işlemindeki basitliktir. Ancak modüller arasında üç yönde de bağlantı noktasının olması cıvatalı bağlantılar için karmaşık olabilir. Öte yandan kaynaklı bağlantılar, modüllerin

daha rijit olmasını ve hizalanmasını sağlar ve daha az alan kaplar ancak daha fazla şantiyede çalışma gerektirir ve yüksek maliyetle demonte edilir. Bazı durumlarda bağlantıyı yerinde sabitlemek için beton veya harç kullanılır ve kompozit beton-çelik bağlantısı oluşturulur. Bu bağlantı kaymaz, kompaktır ancak sahada montaj gerektirir ve sökümü kolay değildir (Lacey et al. 2018). Dolayısıyla bu bağlantılar için kullanılacak birleşim tipinin türü, inşaat süresini kısaltabilir, güvenliği artırabilir ve maliyeti azaltabilir.

Modüler arası bağlantılar, çok katlı modüler binaların yapısal performansının anahtarıdır. Bu bağlantılar, yapı toleransı, yapısal stabilite ve bütünlük, yük transfer mekanizmaları ve belirli bir yük yolunda yükleri transfer edememesi durumunda alternatif yük yolları sağlama gibi yapısal konularda önemli rol oynarlar. Modüler binaların tasarımında, yükleri aktarmak için esas olarak iki mekanizma vardır. Normal düşey yükler, Şekil 1.34’de gösterildiği gibi üst üste yerleştirilmiş modüllerin yan duvarları veya köşe kolonları vasıtasıyla aktarılır. Yani modüller, yukarıdan gelen düşey yüklere ara bağlantılardan yardım almadan dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak, modüllere gelen yatay kuvvetler, ara bağlantılar aracılığıyla diğer modüllere veya yanal yüke dayanıklı sistemlere iletilir (Sharafi et al. 2018).



Şekil 1.34. Modüler binalarda düşey yük transferi (Sharafi et al. 2018)

Modüller, normal düşey yüklere dayanabilen performansa sahip olmasına rağmen, yanal yük transfer mekanizmasının kalitesi ve genel diyafram hareketi ara bağlantıların

dayanıklılığına bağlıdır. Yani modüler bir binanın bütünlüğü ve genel yanal performansı, ara bağlantıların davranışına bağlı olan bir dizi ayrı yatay ve dikey diyaframlardan oluşur.

Ancak her modül kendi yapısal elemana sahip olduğundan (döşeme,kolon,kiriş vb.) geleneksel binaların aksine modüler binaların diyagramları süreksizdir. Diyagram süreksizliği esnek diyagramlara yol açabilir ve deprem yükleri altında yüksek katlı modüler binalarda esnek diyagram oluşursa, yatay yük aktarılamaz ve aşırı salınım ve çökme meydana gelebilir (Srisangeerthanan et al. 2020). Bu nedenle ara bağlantılar, esasen, rüzgar veya depremden kaynaklanan yatay ve kaldırma kuvvetlerini ve ayrıca patlama ve destek kaybı gibi kazara olaylar nedeniyle oluşacak aşırı kuvvetleri aktarabilmelidir.

Ayrıca yapısal elemanlarda kazara hasar oluşması durumunda, alternatif yük yolları sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır (Formisano et al. 2015). Dolayısıyla bu bağlantıların ana işlevi, modüler yapıların ayrık doğası nedeniyle modüllerin entegrasyonunu ve modüller arasında uygun yük transferini sağlamaktır. Ara bağlantılar tarafından sağlanması gereken bu modüler bütünlük, tüm sistemin genel stabilitesinin yanı sıra her katta modüllerin beraber yer değiştirmesini sağladığı için bu sistemler çok önemlidir.

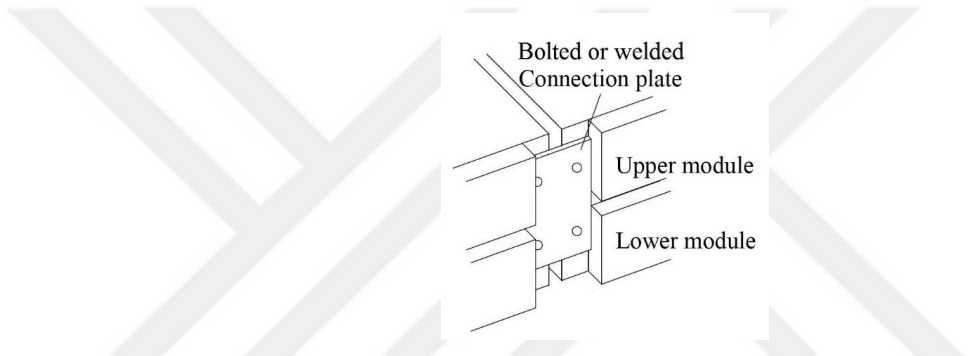
Modüler yapıda ara bağlantıların oynayabileceği bir diğer önemli rol, yapı toleransını kontrol altında tutmaktır. Her modülde, saha dışındaki üretim sürecinin neden olduğu, örneğin nakliye, kurulum sırasında bileşenlerin deformasyonu, modüllerin yerleştirirken hizalaması gibi durumlar söz konusu olduğunda, belli bir boyutsal değişiklik meydana gelebilir. Bu nedenle meydana gelecek tolerans, çok katlı modüler binanın tüm stabilitesini etkileyen, hem dikey hem de yatay eksantrikliğin neden olduğu süreksizlik ve modüller arasında ek gerilme oluşturabilir. Bu yüzden, modüler yapılarda toleransı kontrol etmek için ayarlanabilir ara bağlantılar tasarlanmalıdır (Sharafi et al. 2018).

Bu nedenle yapısal talepleri karşılamak için yeterli mukavemet, rijitlik ve süneklilik sağlamanın yanı sıra belirli üretim ve yapısal/fonksiyonel ihtiyaçları da karşılayacak yenilikçi bağlantı tiplerine ihtiyaç vardır (Srisangeerthanan et al. 2020). Bu

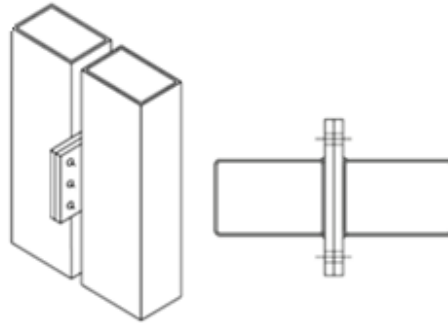
bölümde, literatürde mevcut bulunan yenilikçi dikey modüler arası bağlantılar, yatay modüler arası bağlantılar ve hem dikey hem de yatay modüler arası bağlantılar verilmiştir.

1.6.3.1. Yatay modüler arası bağlantılar

Sadece yatay bağlantılara sahip modüler arası bağlantılar literatürde yok denecek kadar azdır. Bu bölümde sadece iki tane yatay modüler arası bağlantılardan örnek verilebilmiştir. Şekil 1.35'deki bağlantı, modüllerin köşelerine çelik plakaların cıvatalanmasıyla veya klips köşebentlerin kaynaklanmasıyla sağlanırken, Şekil 1.36'deki bağlantı, civatarla ve kolonlara plakaların kaynaklanmasıyla sağlanmıştır.



Şekil 1.35. Klips köşebentli yatay bağlantının detayları (Fathieh and Mercan 2016)

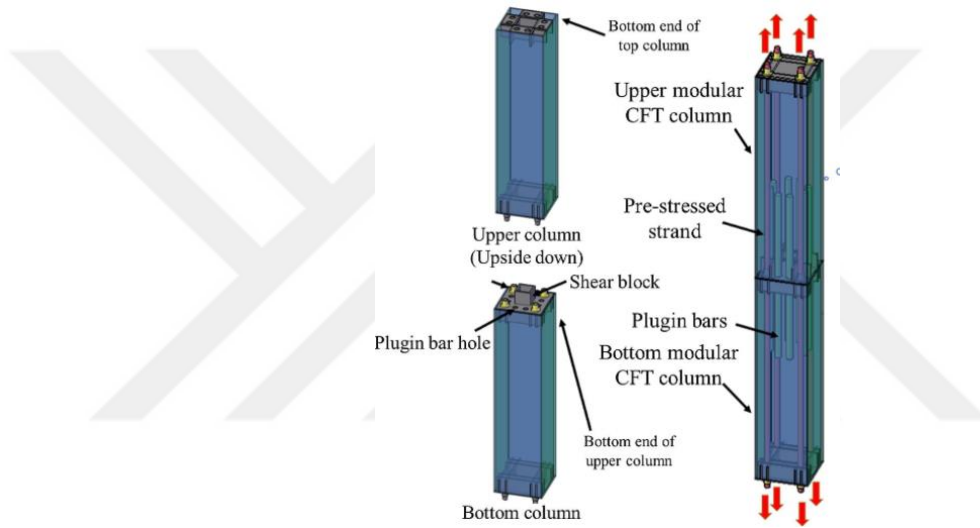


Şekil 1.36. Cıvatalı ve uç plakalı yatay modüler arası bağlantı (Styles et al. 2016)

1.6.3.2. Dikey modüler arası bağlantılar

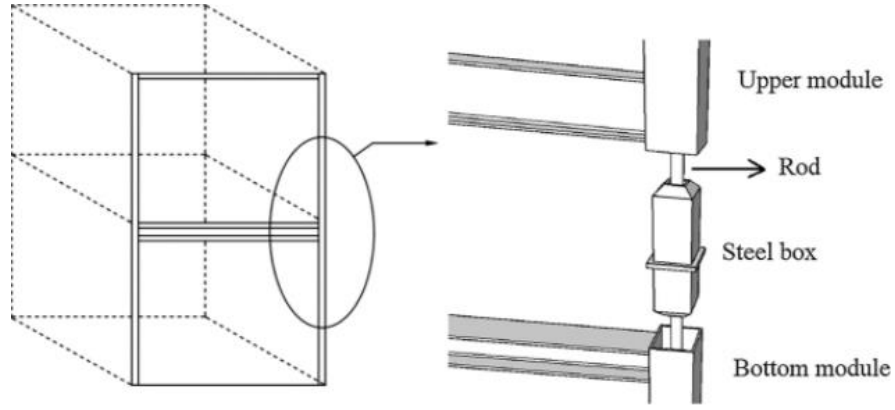
Şekil 1.37'de önerilmeli modüler bağlantının detayları verilmiştir. Her kolonun ucunda, önerilmeli telleri ve ek çubukları yerleştirmek için açıklıklar bulunur. Kolonun ucundaki bağlantı bölgesinde yerleştirilen telli konnektör sayesinde önerilme seviyesi ölçülebilir ve kolon içindeki tellerden biri zarar görürse diğer kolonlar bu durumdan

etkilenmez. Ek olarak kolonun ucunda kesme kuvvetine direnmesi için kesme anahtarı bulunmaktadır. Betonun çatlamasını önlemek ve düktiliteyi artırmak için ek çubuklar bağlantı bölgesine yerleştirilmiştir ve bu çubuklar kolon boyunca uzatılmıştır. Sahada montaj sırasında, üst modül alt modülün üzerine gelecek şekilde hizalanır ve çubuklar ve teller, açıklıklardan geçirilir. Daha sonra teller, arzu edilen gerilme seviyesine getirildikten sonra konnektörle sabitlenir. Son olarak modül kolonlarına bırakılan açıklıklardan, eksenel kuvvete dayanması ve kolonun yerel burkulmasını önlemesi için beton dökülür (Chen et al. 2017a).



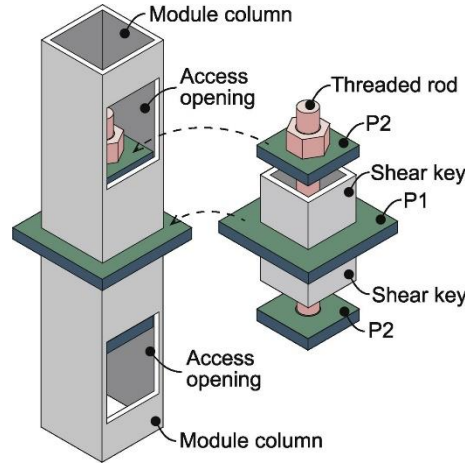
Şekil 1.37. Öngerilmeli bağlantının detayları (Chen et al. 2017a)

Şekil 1.38’de detayları verilen bağlantı, alt ve üst kolonları dikey olarak birbirine bağlamak için ardgerilmeli dişli çubuk ve kenarları eğimli bir çelik kutudan oluşur. Dişli çubuk, modüler kolonlar boyunca geçirilir ve kolon uçlarındaki plakalara sabitlenir. Üst ve alt kenarları eğimli olan kutu yarısı alt modül kolonunda yarısı üst modül kolonunda olacak şekilde yerleştirilir ve sabitlenir. Eğimli kenarları hem kutunun ortasından çubuğun rahat geçmesine hem de kutunun kolonlara rahat geçirilmesine yardımcı olur. Kirişler W profilden yapılmıştır ve kolonlara saha dışında kaynaklanmıştır. Bu bağlantı birkaç modülün birbirine bağlanmasını sağlamak için kullanılabilir (Sanches et al. 2018).



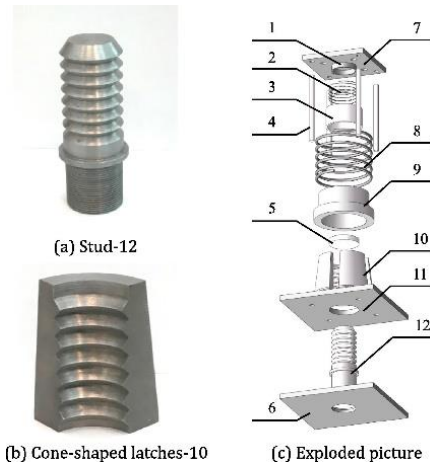
Şekil 1.38. Ardgerilmeli bağlantının detayları (Sanches et al. 2018)

Şekil 1.39’da verilen bağlantı, HSS kesitli kolonların içinde ardgerilmeli bağlantı çubuğu ve kesme anahtarından oluşur. Kare içi boş kesitli kesme anahtarı P1 plakasına atölyede kaynaklanır. P1 plakası dişli çubuğun geçmesine izin vermek için merkezinde bir açıklığa sahiptir. Modül kolonlarında erişim açıklığı sağlanmıştır ve P2 plakası kolonların her birinin içine atölyede kaynaklanmıştır. Sahada montaj sırasında, kesme anahtar bileşeni alt modül kolonuna yerleştirilir ve alt modül kaldırılıp genel yapıdaki konumuna yerleştirilir. Daha sonra üst modül kaldırılır ve alt modülünün üzerine yerleştirilirken kesme anahtarı üst modülün yerine yerleştirmesine yardımcı olur. Üst modül yerleştirildikten sonra, HSS kesitli kolonlardaki açıklık, bağlantı çubuğunun modüllerin içinden takılmasını ve gerilimin sağlanmasına yardımcı olur. Bu bağlantıda bileşenlerin çoğu, kolon kesitinin içine gizlendiğinden çekici sayılabilecek hoş bir görüntü sunar. Ayrıca kolondaki erişim açıklığı, şantiyedeki montaj sırasında yüksekte çalışma ihtiyacını azaltacak şekilde bağlantı çubuğunun modülün içinden takılmasına izin verir. Yapının sökülmesi düşünülürse de , bağlantı çubuğu çıkarıldıktan sonra modüller tekrardan kullanılabilir (Lacey et al. 2019c).



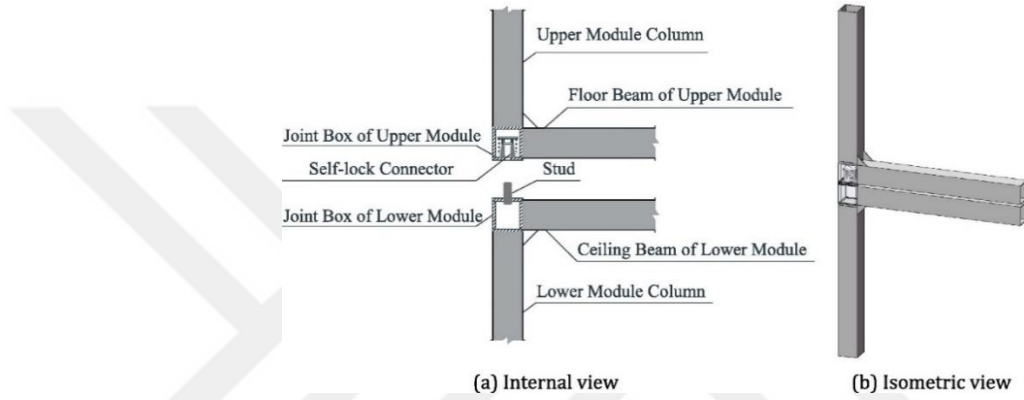
Şekil 1.39. Önerilen ardgerilmeli bağlantının detayları (Lacey et al. 2019c)

Şekil 1.40’da, geçmeli ve kendiliğinden kilitlenmeli konektörlerin mekanizması gösterilmektedir . Konektör, saplama(12), koni biçimli mandallar(10), manşon(9), tetik bloğu(5), hareket yayı(8), emniyet yay(2) vb. dahil olmak üzere on iki parçadan oluşur. Saplamanın yan yüzleri halka dişlere sahiptir ve bu saplama alt modül kolonunun üst yüzeyine sabitlenir. Mandallar iç yüzeyinde halka dişleri bulunur ve çeyrek koni biçimindedir. Saplamadaki halka dişler ile koni şeklindeki mandallar birbirlerine kilitlenir. Manşon, koni şeklindeki mandalların dış yüzeyine sığabilen daire şeklindedir. Koni mandalların arasına mandalların kapanma eğilimini engellemek için tetik plakası yerleştirilmiştir. Bağlantı montajlanmadan önce hareket ve emniyet yayına manşona ve tetik plakasına basınç uygulayarak sıkıştırılır. Bağlantının montaj işlemi yapılır ve son olarak mandallar ve saplama sıkıca kenetlenir (Dai et al. 2019).



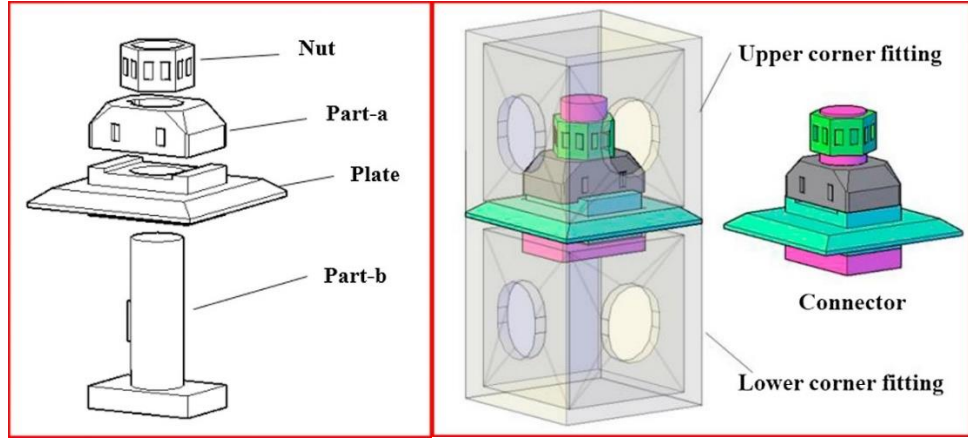
Şekil 1.40. Önerilen bağlantının konektör mekanizması (Dai et al. 2019)

Bu birleşim tipi, iki tane bağlantı kutusu ve geçmeli ve kendinden kilitlenmeli konnektöre sahiptir. Modül köşelerine yerleştirilen bağlantı kutuları, modül kolonlarına ve kirişlerine kaynaklanmıştır. Saplama alt modülün üst kısmına yerleştirilirken, konnektörlerin diğer parçaları, üst modüldeki bağlantı kutularının içine yerleştirilir. Üst modüldeki bağlantı kutusunun alt yüzeyine açıklık bırakılmıştır. Montaj sırasında üst modül alt modülün üzerine hizalanır ve saplama, üst modüldeki bağlantı kutusunun erişim açıklığına geçirildiğinde bağlantı otomatik olarak kilitlenir. Şekil 1.41’de bu bağlantının detayları verilmiştir (Dai et al. 2019).



Şekil 1.41. Kendiliğinden kilitlenmeli bağlantının detayları (Dai et al. 2019)

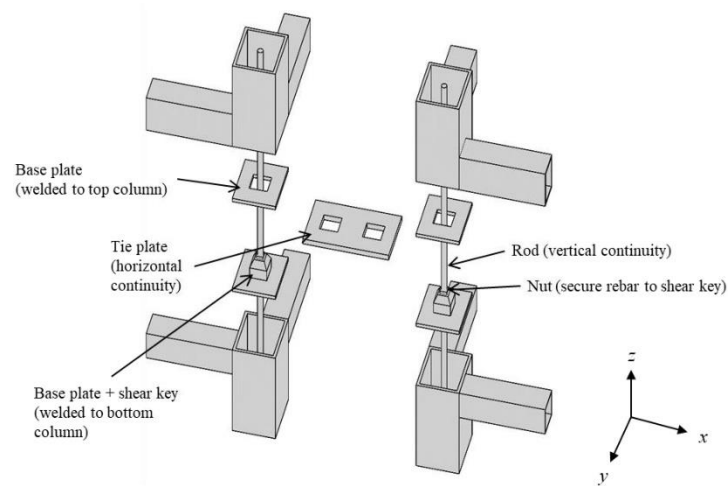
Şekil 1.42’de detayları verilen bağlantı, köşe bağlantı kutularından ve konektörlerden oluşur ve Tianjin Jinghai bölgesinde modüler yatakhane binasında uygulanmıştır. Bağlantı elemanlarının geçişi için üst köşedeki bağlantı kutusunun alt kısmına ve alt köşe bağlantı kutusunun üst kısmına açıklık sağlanmıştır. Bu açıklıklar sayesinde modülün kaldırma ve taşıma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, üst ve alt köşe bağlantı kutuları bir konnektör aracılığıyla bağlanmıştır. Konnektör, bir bağlantı plakası, üst (a) ve alt (b) döner parça ve bir somundan oluşur. Tamamlanmış alt modül istenilen konuma kaldırılır daha sonra alt modülün köşe bağlantı kutusuna konnektör yerleştirilir ve üst modülün köşe bağlantı kutusu ve konnektör birleştirilir. Son olarak, bağlantı kutusundaki deliklerden özel çubuk yardımıyla part a kısmı döndürülerek ve somun civatalanarak üst ve alt modüller birbirine bağlanır (Chen et al. 2019).



Şekil 1.42. Döner konnektörlü bağlantının detayları (Chen et al. 2019)

1.6.3.3. Hem dikey hem yatay modüler arası bağlantılar

Şekil 1.43’de üst modülü alt modüle, hem dikey hem de yatay yönde bağlayan bağlantının detayları verilmiştir. Modüller, her kat seviyesinde, kolonların içine gizlenen ve somun ile sabitlenen dişli çelik çubuk ile dikey şekilde bağlanır. Bu, kolonların dikey sürekliliğini sağlar ve momentlerin ve kesme kuvvetlerinin temele aktarılmasına izin verir. Kesme kuvvetleri, kolona kaynaklanan taban plakasına sabitlenmiş kesme anahtarı vasıtasıyla, dikey olarak istiflenmiş modüller arasında aktarılır. Basınç kuvvetleri (varsa) dikey çubuk tarafından karşılanır. Modüller, bitişik kolonların kesme anahtarlarını birleştiren bir çelik bağlantı plakasıyla yatay olarak bağlanmıştır (Chua et al. 2020).

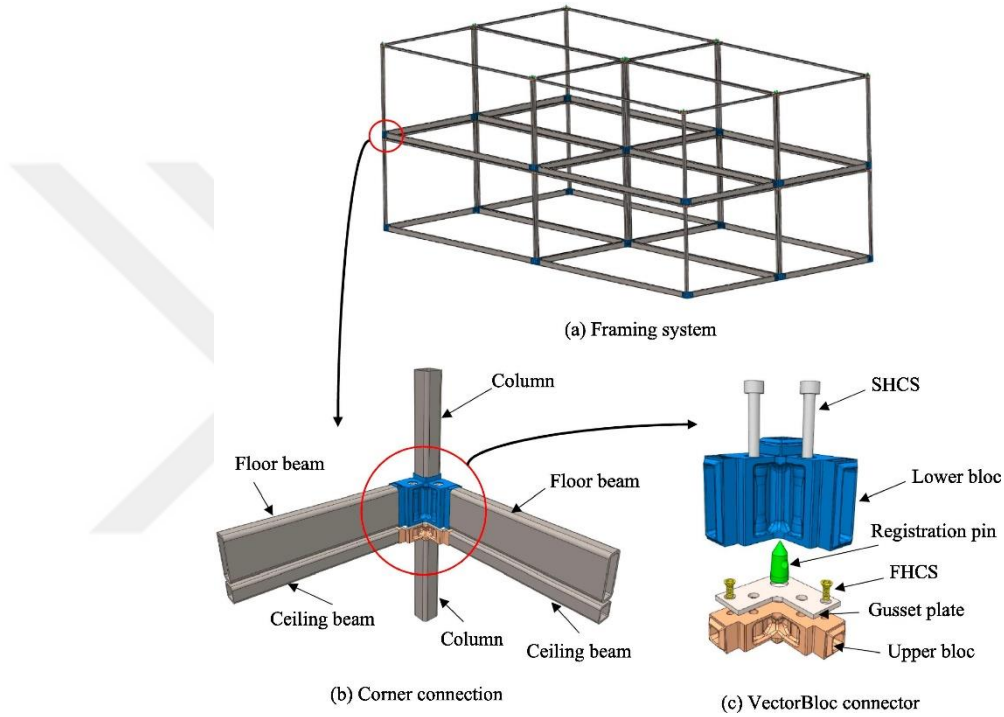


Şekil 1.43. Önerilen bağlantı mekanizmasının detayları (Chua et al. 2020)

Vectorblock Corp. tarafından geliştirilen bağlantının detayları Şekil 1.44’de verilmiştir. Bu sistemde modüller yatay ve dikey olarak istiflenir ve modüller vectorblock

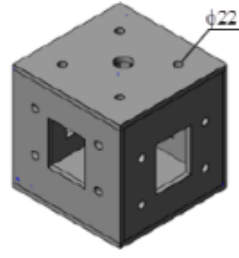
1. GİRİŞ

konektör aracılığıyla köşelerden bağlanır. Tüm kolon, tavan ve döşeme kirişleri HSS kesitlerinden yapılmıştır ve konnektöre kaynak yapılarak bağlanmıştır. Sahada montaj aşamasında, üst bloğa düz başlı vidalar (FHCS) kullanılarak köşebent plakası takılır böylece modüller arasında yatay bağlantı sağlanmış olur. Daha sonra üst bloğa kayıt pimi bağlanır ve bu pim, modüllerin dikey yönde doğru hizalanıp yerleştirilmesine yardımcı olur. Son olarak, üst ve alt bloklar, iki yüksek mukavemetli soket başlı vida (SHCS) vasıtasıyla bağlanır. Böylece dikey bağlantı da kurulmuş olur (Dhanapal et al. 2019).



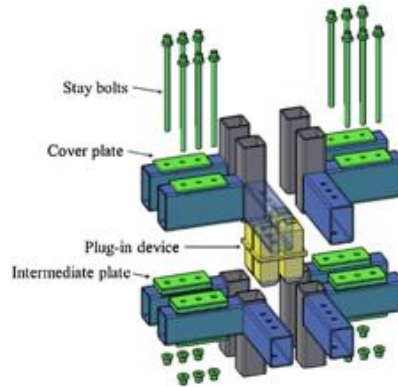
Şekil 1.44. Vectorblock konnektörün detayları (Dhanapal et al. 2019)

Çin’de kullanılan küp şeklindeki bağlantı altı farklı yüzden oluşur. Bir yüzü düzken, iki yüzü montaj aletlerinin kullanımı için dikdörtgen oyuklara sahiptir. Diğer iki yüzü, 24 mm çapında civatalar için dört deliğe sahipken, öbür yüzünde erişim için dikdörtgen bir oyuk bulunmaktadır. Bu küp bağlantılar modül içinde kolon ve kirişleri bağlayabiliyorken, iki küp bağlantı da birbirine bağlanabilir. Böylece hem dikey hem de yatay bağlantı sağlanmış olur. Şekil 1.45’de bu bağlantının detayları verilmiştir (Doh et al. 2016).



Şekil 1.45. Önerilen küp bağlantının detayları (Doh et al. 2016)

Şekil 1.46’da gösterilen bağlantı, dışarıdan kaynaklanmış plaka ve civatalardan oluşur. Yatay yöndeki modüller, ek geçirmeli bileşenle, dikey yöndeki modüller ise yüksek çekme dayanımlı uzun civatalarla birleştirilmiştir. Tüm modüler kiriş ve kolonlar soğuk şekillendirilmiş RHS kesitten yapılmıştır. Bağlantı, üst döşeme kirişine kaynaklanmış bir kapak plakasına ve civataların çekme kuvveti altında, kiriş plakalarının yerel burkulmasını önlemek için alt tavan kirişine kaynaklanmış bir ara plaka ve kapak plakasına sahiptir. Ek geçirmeli bileşen, dört kare türden oluşur. Montaj sırasında, modüler kolonlar hizalama için ek geçirmeli bileşene yerleştirilecektir. Yatay olarak bitişik modüller, kolonlar yerlerine yerleştirildiğinde otomatik kenetlenme etkisiyle yatay olarak birbirlerine bağlanacaktır. Son olarak, uzun civatalar, modüler kirişlerdeki deliklerden geçirilecek ve üst kat kirişi ile alt tavan kirişini birbirine bağlayarak sabitleyecektir (Chen et al. 2017b).

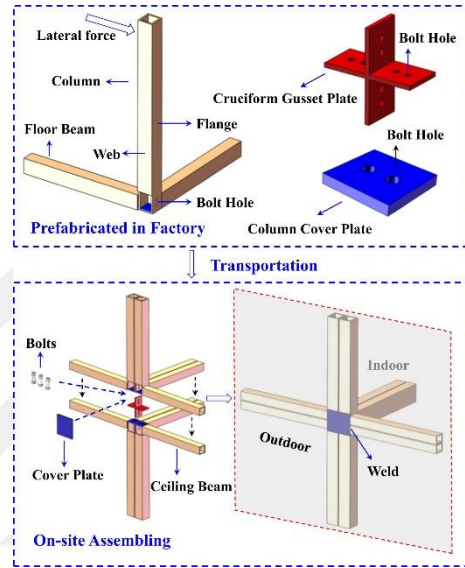


Şekil 1.46. Ek geçirmeli bileşene sahip modüler arası bağlantı (Chen et al. 2017b)

Şekil 1.47’da yenilikçi bağlantının ayrıntıları verilmiştir. Fabrikada dışa doğru kolon ağı kısmen kesilir ve kolonun altına bir kapak plakası kaynaklanır. Kolon kapak

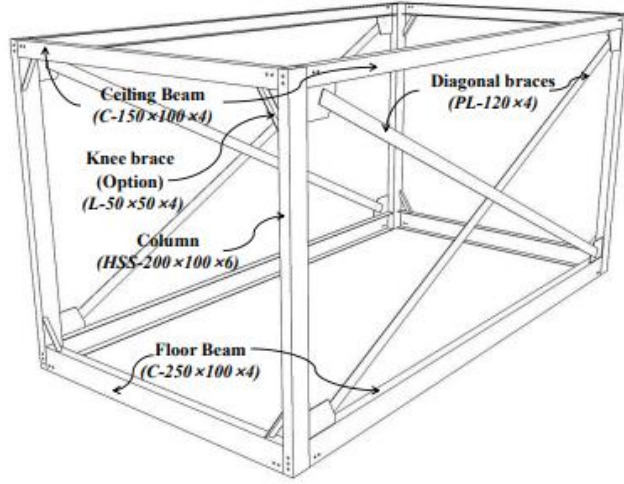
1. GİRİŞ

plakasına ve dışa doğru kolon yüzeyine, köşebent plakaları ile eşleşecek cıvata delikleri hazırlanır. Sahada montaj sırasında, önce iki alt modül arasındaki boşluğa haç biçimindeki köşebent yerleştirilir ve daha sonra iki üst modül yukarı kaldırılır ve dört modül dışarıdan civatalarla bağlanır. Son olarak kolonların kesilmiş kısımlarına kapak plakası kaynaklanır. Bu bağlantı kolay montaja izin vererek, aynı modüllerin tamamen binanın dışına bağlanmasını mümkün kılar ve mimari açıdan dikkat çeker (Deng et al. 2018).



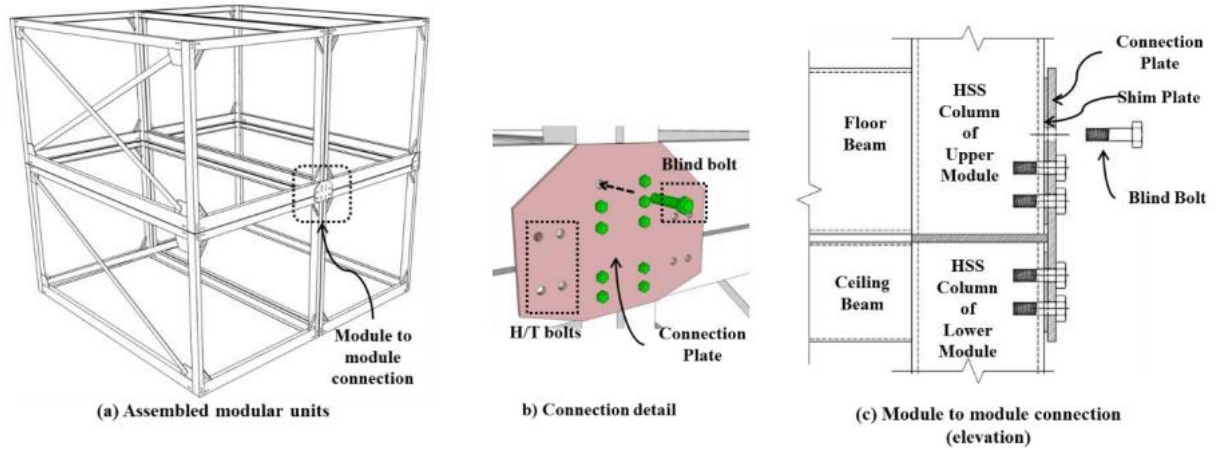
Şekil 1.47. Haç biçimli köşebent bağlantının detayları (Deng et al. 2018)

Önerilen bir başka modül-modül bağlantısının ayrıntıları Şekil 1.49’da verilmiştir. Bu bağlantı, esasen dört kolon, dört tavan kirişi, dört döşeme kirişi ve iki çift çapraz elemandan oluşan çerçeve modülleri birleştirmek için kullanılmıştır. Kolon elemanları HSS kesitlerden oluşurken, hem tavan hem de döşeme kirişleri soğukta şekilendirilmiş C profillerden oluşmuştur. Yanal yüklere dayanmak için çapraz elemanlar modülün uzun kenar açıklığına eklenmiştir ve modülün kısa kenar açıklığını güçlendirmek için kolon-kiriş bağlantılara küçük çapraz elemanlar yerleştirilmiştir. Şekil 1.48’de bu modülün ayrıntıları verilmiştir (Cho et al. 2019).



Şekil 1.48. Önerilen bağlantının kullanıldığı çerçeve modül (Cho et al. 2019)

Dört modül arasında etkili bağlantı oluşturmak için çelik bağlantı plakası eklenmiş ve yüksek gerilmeli ve kör civatalarla bağlanmıştır. Kör civatalar HSS kolon kesitlerine bağlı bağlantı plakasında kullanılmıştır. Bu, kesitin içinde sınırlı erişime izin verir. Aksine yüksek gerilmeli civatalar, C şeklinde taban ve tavan kiriş kesitine bağlı kısımda kullanılırdı. Toplamda 10 kör civata ve 8 yüksek gerilmeli civata bu bağlantı için kullanılmıştır (Cho et al. 2019).

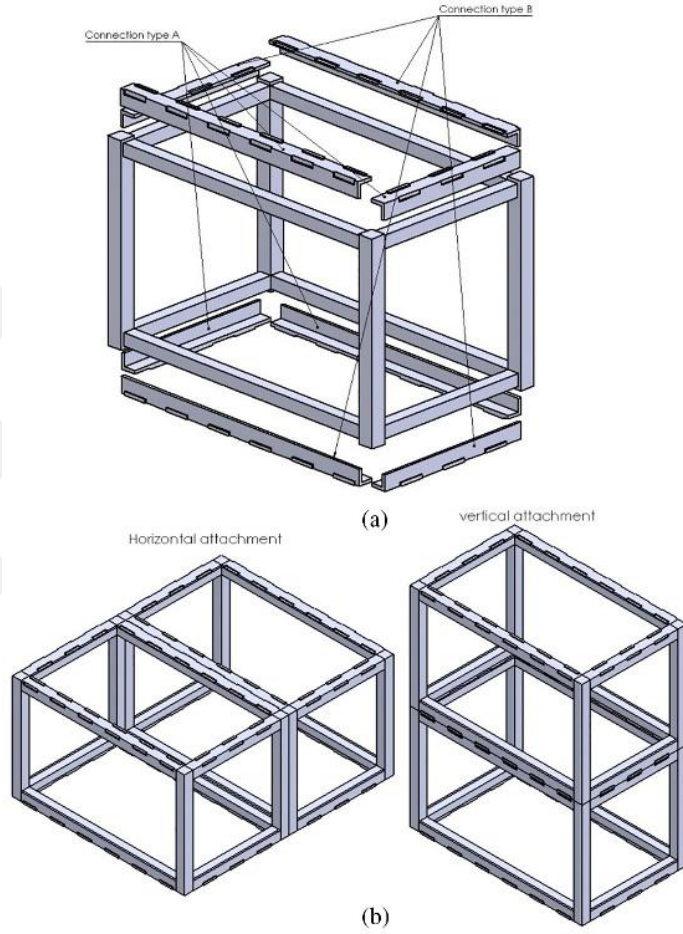


Şekil 1.49. Önerilen kör civatalı ve yüksek gerilmeli bağlantının detayları (Cho et al. 2019).

Önerilen birbirine kenetlenen bağlantıların uygulanması, çoğu bağlantı sisteminden daha kolaydır. Bu sistem, hacimsel modüler yapıda yeterli bütünlüğü sağlamak için geliştirilmiş, kolay takılan, kendiliğinden kilitlenen mekanik bağlantı sistemi sayesinde kurulumunun basit, hızlı ve güvenli olmasıdır. Biri oluklu diğeri

1. GİRİŞ

dışarıya doğru çıkıntılı iki şerit birbirine temas ettiğinde herhangi bir yönde dönme ve istenmeyen ayrılmayı önlemek için tamamen birbirine kenetlenir. Şekil 1.50’de gösterildiği gibi şeritler, modüllerin dört üst ve alt tarafına bağlanır. İki bitişik modülleri yerinde monte etmek için bağlantının eşleşen çiftleri, uzunluklarına dik olacak şekilde uygulanan basit itme hareketiyle monte edilir (Sharafi et al. 2018).

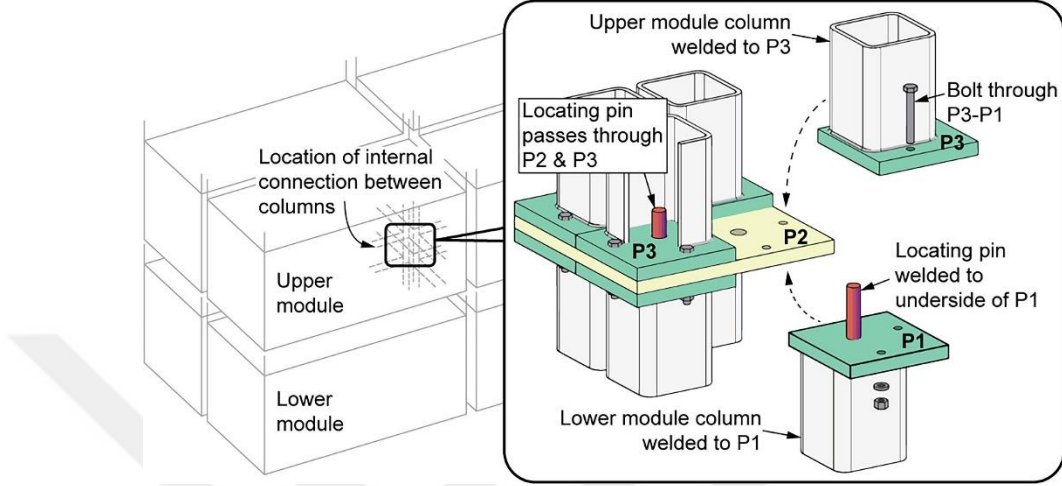


Şekil 1.50. Birbirine kenetlenen modüler arası bağlantı (Sharafi et al. 2018)

Çelik kolonlu modüler binalar için bir diğer önerilen yenilikçi bağlantının detayları Şekil 1.51’de verilmiştir. Bu bağlantıda, P2 levhası yatay bağlantı sağlarken, cıvatalar dikey bağlantı ve yerleştirme pimleri de sahadaki montajı kolaylaştırdı ve kesme rijitliğini iyileştirdi. Yerleştirme pimleri P1 plakasının altına kaynaklanır ve daha sonra P1 plakası alt kolonun üst ucuna kaynaklanır. Alt modüllerin sahaya yerleştirilmesinden sonra, P2 plakası, P1 plakasının üzerine, yerleştirme pimleri devam edecek şekilde yerleştirilir. Daha sonra üst modüller, üst modül kolonlarının alt ucuna P3 plakası kaynaklanıp yerleştirme pimleri devam edecek şekilde yerleştirilir. Son olarak cıvatalar,

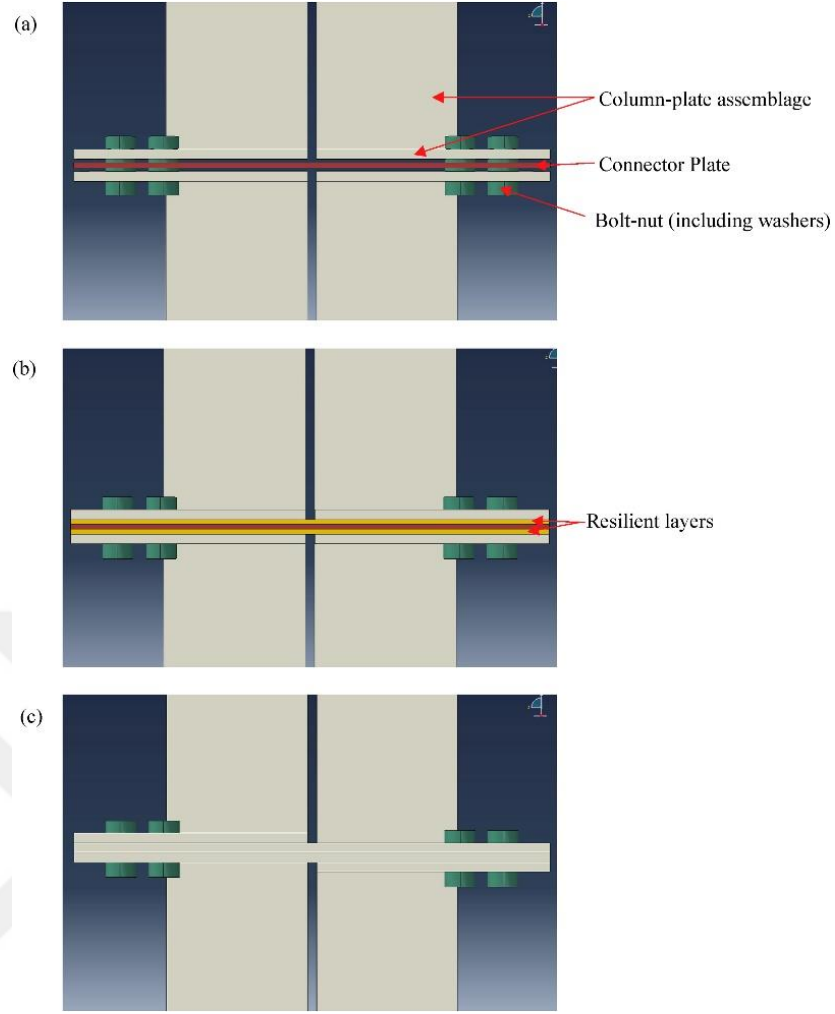
1. GİRİŞ

P1, P2, P3 plakalarının kalınlığı boyunca devam edecek şekilde yerleştirilir. Bu bağlantı, sekiz modüle kadar, yani dört alt, dört üst modül arasında bağlantı sağlama yeteneğine sahiptir. Bu bağlantı inşaat sırasındagüvenlik sağlarken p2 plakasının sahada montajı ve cıvataların sahada montajı ve gerdirilmesi gerekir (Lacey et al. 2019a).



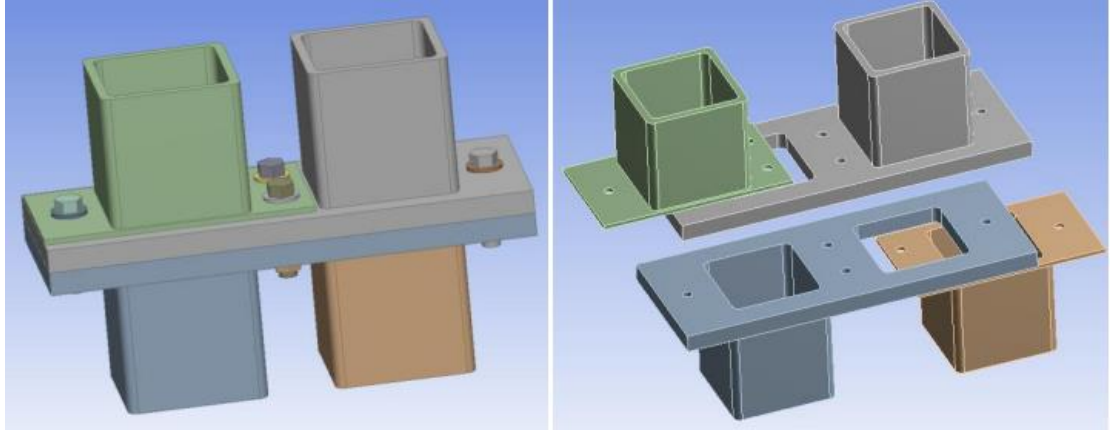
Şekil 1.51. Plakalı ve yerleştirme pimli bağlantı (Lacey et al. 2019a)

Bu bağlantıda, yeni bir modüler arası bağlantı sunulmakta ve bu bağlantının da iki varyasyonu bulunmaktadır. Üç bağlantıda da asıl bileşenler; kolonlar, kolonların uçlarına kaynaklı plakalar ve M20 cıvatalardır. Kolonlar kare içi boş kesitlerden oluşurken, kirişler kolonlara kaynaklanmıştır. Geleneksel cıvata plakalı bağlantılarla karşılaştırıldığında, C1 bağlantı tipi, merkezinde ek bir çelik bağlantı plakası içerir. C2 de kauçuk esnek bir malzeme çelik kolon plakaları ve çelik bağlantı plakası arasına yerleştirilmiştir. Esnek katman, aşırı bağlantı plakası deformasyonunu azaltacak ve modüler yapının tüm bileşenlerini daha da koruyarak sisteme ek sönümleme sağlayacaktır. C3 bağlantısı, C1 ve C2 ile aynı boyutlarda olan kolon, kolon plakaları ve cıvatalardan oluşur. Önerilen bağlantılar, sekiz veya dört bitişik modül için kullanılabilir. Önerilen bağlantı tipi modüler yapıların artan enerji kaybıyla daha büyük dinamik yüklere dayanmasına izin verdiğinden C1 ve C2 dir. C3 deki bağlantı karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Şekil 1.52 (a)'da C1 bağlantısı gösterilirken, (b)'de C2 bağlantısı, (c)'de C3 bağlantısı gösterilmiştir (Sendanayake et al. 2019).



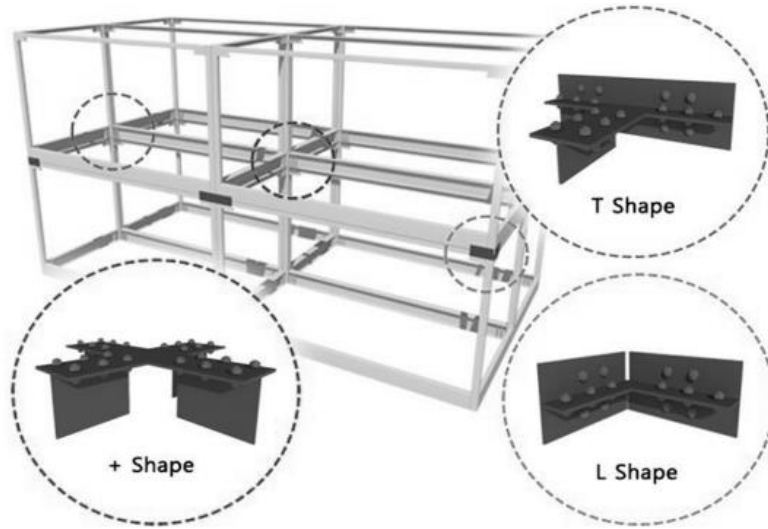
Şekil 1.52. (a) C1 bağlantısı (b) C2 bağlantısı, (c) C3 bağlantısı (Sendanayake et al. 2019)

Şekil 1.53’de verilen bağlantı, iki komşu modülün iki bitişik köşe kolonunu birbirine bağlayan civatalı çelik bağlantılardır. Bağlantının yapısı, herhangi bir mühendisin bu çalışma bulgularını ve tavsiyelerini takip edebilmesi ve kendi benzersiz bağlantısını oluşturabilmesi için mümkün olduğunca genel olması amaçlanmıştır. Bağlantı, hem dikey hem de yatay yükleri aktarmak için tasarlanmıştır. Bağlantı dört komşu modülü hem dikey hem de yatay olarak bağlayacaktır. Cıvataların boyutu ve cıvata deliklerinin tipi ve boyutu farklı olan varyasyonları da oluşturulmuştur (Gunawardena 2016).



Şekil 1.53. Cıvatalı çelik bağlantı (Gunawardena 2016)

Şekil 1.54’de verilen bağlantının kullanıldığı modüller, kare deliksiz çelik kolon, döşeme kirişi, tavan kirişi ve tavan braketini kullanarak modül oluşturulmuştur. Modüller arası bağlantı için bir bağlantı plakası ve yüksek mukavemetli cıvata ile oluşan yeni bir bağlantı önerilmiştir. Önerilen bağlantıda kesit kolon kaybı yoktur ve yüksek mukavemetli cıvatası sahada kolayca monte edilebilir. Şekil 2’de görüldüğü gibi, modül montajına bağlı olarak, L-T ve haç şeklindeki bağlantı cihazları standart hale getirilebilir. Bu standartlaştırılmış bağlantı cihazları, modülleri kolayca bağlayabilir, bağlantıları sökülebilir ve yeniden kullanabilir hale getirir (Lee et al. 2017).



Şekil 1.54. Plakalı ve cıvatalı bağlantı (Lee et al. 2017)

Mevcut modüler arası bağlantı sistemlerinin yapısal davranışına yönelik araştırmalar sınırlıdır. Bağlantı analizi ve tasarımı ayrıntılı sayısal ve deneysel araştırmaların bir kombinasyonunu gerektirir. Bu bağlantıların yapısal davranışına ilişkin daha fazla araştırma yapılmaya ihtiyaç vardır (Lacey et al. 2019b). Bu nedenle bu tez, rijitlik özelliklerini tahmin etmek için mevcut teorik model çalışmalarına vurgu yaparak modüller arası çelik bağlantıların incelenmesini sunmaktadır.

1.7. Modüler Binalarda Yapısal Konular

Çok katlı modüler binaların her bir yapısal sistemlerinin kendi içerisinde zorluğu olmasına ek olarak, modüler yapılardaki bütün sistemlerde ele alınması gereken bazı ortak sorunlar vardır.

Geleneksel çelik yapılar sürekli bağlantılara sahipken, modüler birimler sadece köşelerinden dikey ve yatay yönde bağlanırlar. Dolayısıyla yapısal arayüzlerin geri kalan kısımları süreksizdir. Bağlantılar, modüller arasındaki süreksizlik nedeniyle birimlerin birbirinden bağımsız olarak dönmesine ve deforme olmasına izin vermekte, böylece dikey ve yatay bağlantılarda yüksek gerilimler oluşturmakta ve katlar arası ötelenmeleri arttırmaktadır. Bu durum, rezonansın etkili olduğu sismik olaylar eklendiğinde iyice artmaktadır.

Modüler binaların avantajlarından dolayı, yüksek sismik bölgelerde kullanımı artmasına rağmen, bu yapılar nispeten yeni bir bina türü olduğundan sismik performansları yeterince bilinmemektedir. Genellikle dinamik (zamana bağlı) deprem yükleri altında yapının performansı, depremin karakteristik özelliklerine, yapının doğal periyodu, rijitliği, kütlesi gibi yapının özelliklerine bağlı olduğundan modüler binalar geleneksel binalarla aynı şekilde tasarlanamaz ve analiz edilemez. Geleneksel yapının doğrusal olmayan tasarımında, birleşim bölgelerine yakın noktalarda oluşan plastik mafsallar sismik enerjiyi dağıtmaya yardımcı olur. Ancak modüler yapıda, sistemdeki çeşitli esnek bağlantıların varlığından dolayı elemanlarda bu tür plastik menteşelerin oluşması beklenmediğinden modüler arası bağlantılarının çoğu yetersiz ve sınırlı enerji dağıtma kapasitesine sahiptir. Sünek bir şekilde deforme olamaması tüm yapıyı tehdit edebilecek elverişsiz kırılma mekanizmalarına yol açar. Ayrıca bu, modüler çerçevedeki

yapısal kiriş ve kolonların kritik kırılma noktalarına sahip olmasına neden olabilir. Bu nedenle tasarımcı, enerjiyi dağıtacak uygun modüler arası bağlantılar geliştirmeli ve aynı zamanda bu bağlantıların deprem sırasında yapısal bütünlüğü sürdürebilmesi için sağlam ve dayanıklı olması gerekmektedir.

Modüler sistemlerin süreksizliği nedeniyle genel yapısal bütünlüğü, kararlılığı ve dayanıklılığı sağlamada büyük rol oynayan ara bağlantılar, ayrıca, yangın, patlamalar ve darbeler gibi ekstrem olayların neden olduğu kademeli çökmeyi önlemek için ekstra kuvvetleri aktarabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca yapısal elemanlarda kazara hasar oluşması durumunda ara bağlantıların alternatif yük yolları sağlaması gerekir.

Çelik modüler binanın inşası tipik çelik binalar için benimsenen yöntemlerden davranış, detaylandırma koşulları ve yapım yöntemi açısından farklıdır (Fathieh and Mercan 2014). Bu nedenle modüler binalar geleneksel binalarla aynı şekilde tasarlanamaz ve analiz edilemez. 3D hacimsel modüler, taşıma, yerleştirme ve montaj açısından kendi doğası gereği sağlam ve rijittir. Ancak genellikle plakalar, kaynaklar ve cıvatalardan oluşan modüler arası bağlantılar, önemli ölçüde daha zayıf, daha esnektir ve kaynak kırılması, cıvataların kayma kırılması gibi gevrek kırılmalar gözlemlenebilir. Bu nedenle yanal yüklere dayanıklı sistemler olmaksızın sadece modülerden oluşan binanın yanal yüklere dayanması, esas olarak modüler arası bağlantılara dayanır (Sendanayake et al. 2021).

1.8. Tasarım Kriterleri

Modüler binalarda, birimlerin imalat ve montaj sürecinden dolayı yük transfer mekanizması açısından ve modüllerin kurulum toleransları yani hizalama problemleri nedeniyle oluşacak eksantriklikler nedeniyle geleneksel binalardan farklıdır. Bu nedenle geleneksel tasarım kılavuzları kullanamamakla birlikte modüler binaların tasarımı literatüre dayanarak yapılmaktadır. Ancak modüler binalar için çok sınırlı sayıda, modüler tasarım yönergeleri çalışmaları bulunur. Literatürde modüler binaların global davranışının anlaşılması için birkaç deneysel ve nümerik metotlar kullanılarak çalışmalar yapılmıştır.

Deneyler, incelenecek olan tasarımın performansının gereksinimlere uygunluğunu göstermek ya da tasarımın kapasitelerini araştırmak için yapılır. Modüler binaların yapısal tasarımında, standartlaştırılmış veya önceden onaylanmış prosedüre uymak yerine son zamanlarda, yeni gelişen uygulama olarak, prototip modüllerden oluşan deneylere daha fazla önem verilmektedir. Prototip modüller oluşturularak, kaplama dahil olmak üzere genel rijitliği elde etmek, taşıma ve kaldırma sırasında hizalama sorununu ele almak ve bağlantı sistemlerinin uyumunu ve toleransları test etmek kolaylaşabilir. Modüler binalar için test yöntemleri oldukça sınırlı olmakla birlikte bu yöntemlere, döngüsel sismik test, statik test, vs. örnek verilebilir.

Nümerik olarak, modüler binaların süreksizliğinden dolayı, tüm binaların global davranışını doğru bir şekilde elde etmek için modüler arası bağlantıların davranışı, modüler binaların modellenmesine dahil edilmelidir. Bağlantılar ve bina sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenir ve analizde ortaya çıkan davranışlar incelenir. Sonlu elemanlar yönteminde yaygın olarak, ABAQUS, ANSYS, SAP2000, ETABS gibi çeşitli ticari yazılım paketleri kullanılır. Depremdeki davranışları incelemek amacıyla genellikle kademeli dinamik analiz ve itme analizi için, RUAUMOKO 3D, OpenSees, SeismoStruct kullanılır.

Son olarak, modüler yapı üzerine kapsamlı bir tasarım kılavuzu geliştirilebilir. Bu kılavuz, tüm standartlaştırılmış modüler bağlantıların tasarım metodolojisini, hafif ve yüksek mukavemetli malzemeler kullanılan modüler birimlerin kompozit tasarımını,

yüksek katlı modüler binaların stabilite analizini, yangın, deprem, rüzgar, yapısal bütünlük, taşımadaki ve nakliyedeki kusurluklar, güvenlik, bakım açısından tüm parametreleri içermelidir.

1.9. Amaç ve Kapsam

Tarihsel olarak, modüler yapılar genellikle az katlı, geçici veya taşınabilir binalarda kullanılmasına rağmen modüler yapıların birçok avantajlarından dolayı son yıllarda inşaat sektörünün dikkatini çekmiştir. Son birkaç yılda popüler olan bu yapılar, yüksek katlı binalar ve daha kompleksli bina tiplerinde uygulanmaya başlamıştır. Geleneksel binaların aksine her modülün kendine özgü zemin levhası olduğundan süreksizdirler. Bu yüzden yapısal bütünlüğünün sağlanması ve modüller arasında yük aktarımının oluşması ve yükleri temele etkili bir şekilde aktarabilmek için modüllerin birbirlerine, modüler arası bağlantılar vasıtasıyla bağlanması gerekir. Ancak bu bağlantılar literatürde son zamanlarda araştırılmaya başlanmıştır. Bu nedenle, bu bağlantıların yapısal performansının net bilinmemesi, dünya genelinde çoğunlukla az katlı modüler binalar inşa edilmesine sebep olmuştur. Ancak yükseklikle beraber yatay yüklerin de artması ve yapısal bütünlüğün, genel stabilitenin ve dayanıklılığın sağlanması için güçlü bağlantıların olmaması, tamamen modüler sistemden oluşan yüksek katlı binalarda yapısal zorluklar meydana getirir. Bu yüzden genellikle yanal stabilite sistemleri kullanılarak yüksek katlı modüler binalar inşa edilir. Ancak bu tip binalarda geleneksel yöntemlerin kullanılması, modüler yapıların avantajlarını sınırlandırdığından bu tezde tamamen modüllerden oluşan modüler çelik binalar üzerinde durulmuştur. Herhangi bir yanal stabilite destek olmadan yüksek katlı modüler bina inşa etmek için modüler arası bağlantıların gerçek davranışının bilinmesi gerekir. Dolayısıyla bu tezde, asıl amaç modüler arası bağlantıların gerçek davranışlarını belirleyerek modüler bina üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda, modüler arası yatay ve dikey bağlantıların davranışları deney yapılarak araştırılmış, herhangi bir yanal destek kullanılmadan sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen binaya bu davranışlar entegre edilmiştir. Nihayetinde, çok katlı modüler binalarda bağlantıların rolünü araştırmak için modelin kat sayısı artırılarak, yük aktarım mekanizmaları incelenmiştir.

Deneyde 150*150*5 SHS kesitli dört kolon numune kullanılmıştır. Bu deneyde, aynı birleşim ve kolon özelliklerine sahip, MV1 ve MV2 dikey bağlantılı numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler hazırlanırken, 150*150*5 SHS kesitli kolonların ucuna alın levhalar kaynaklanmış ve bu levhalar dikey yönde bulonlanmıştır. Ek olarak bu deney kapsamında MH1 ve MH3 aynı yatay bağlantılı numuneler, 150*150*5 SHS kesitli kolonların kenarlarına alın levhalar kaynaklanarak ve bu levhalar yatay yönde bulonlanarak hazırlanmıştır. Literatürde daha önce sonlu elemanlar yöntemiyle çalışılmış Styles et al. (2016) olan hem yatay hem de dikey birleşim tipli numunelere farklı yönde yatay kuvvetler uygulanarak, her bir bağlantının F-d ve M- Θ eğrileri çizilmiş ve bu eğrilere dayanarak, kesmedeki yer değiştirme ve dönme davranışları incelenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle tasarlanan 6 katlı bina, modellenirken 2.5 m genişliğindeki orta koridorun her iki yanına 4,95*11,885*2,95 boyutlu rijit modüller yerleştirilmiş ve dikey(VC) ve yatay(HC) modüller arası bağlantılar için, doğrusal olmayan link eleman kullanılmıştır. Nihayetinde, 21,15 m yüksekliğinde altı katlı bina tasarlanmış ve gerekli düşey ve yanal yüklemeler modele atanmıştır. Bu model Lacey et al. (2020) tarafından referans alınmış olup, yatay ve dikey bağlantıların her biri için deneyden elde edilen kesmedeki ötelenme ve dönme rijitliklikleri, bu modele atanırken, eksenel yöndeki ötelenme ve dönme rijitlik değerleri literatürden Styles et al. (2016) referans alınmıştır. Literatürden referans alınan çalışmalarda Lacey et al. (2020), dikey bağlantılarda kullanılmış olan başlangıç rijitlik değerleri, tamamen kolon özelliklerine yani sürekliliğe dayalı olduğundan, tam rijit olduğu varsayılmıştır. Ek olarak, bu çalışmada Lacey et al. (2020) yatay bağlantılarda kullanılmış olan başlangıç öteleme rijitlik değerleri, basit formüllere dayanarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu tezde dikey ve yatay bağlantıların her birine deney yapılarak gerçek davranış belirlenmiş ve modele bu davranışlar entegre edilmiştir. Bu modelin analizi yapıp ve mevcut referans çalışmasıyla karşılaştırıldıktan sonra kat sayısı artırılarak link elemanın yük aktarım mekanizması incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Doh ve arkadaşları (2016), bitişik modüller arasında hem yatay hem de dikey bağlantı sağlayan birleşim tipi önermişlerdir. Bu bağlantının kirişlere takılabilir olduğunu göstermişlerdir. Çin’de kullanılan bu küp şeklindeki bağlantının cıvata montajı için tüm yüzeylerinde delikler açılmıştır. Bağlantının kesme ve çekmedeki davranışı, göçme modu ve yükleme kapasitesi deneysel yöntemlerle analiz edilmiştir. Test sonuçlarında cıvataların çekme kapasitesini aşması nedeniyle bağlantıların başarısız olduğu gözlemlenmiştir. Bağlantının yapısal performansı sonlu elemanlar yöntemiyle de incelenmiştir. Strand7 yazılımı kullanılarak oluşturulan modellerin, ilerideki çalışmalara da referans olabileceği belirtilmiştir. Gelecekteki kapsamlı araştırmalarda, çelik braket bağlantısının, cıvata deliği boyutu, cıvata deliği aralığı ve ayrıca çelik raketin duvar kalınlığı gibi birden çok parametreye dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Gunawardena (2016) çalışmasında, hem dikey hem de yatay bağlantılar sağlayan bağlantı tasarlamıştır. Bağlantı yük aktarımının, bitişik modüler kolonların cıvatalanmasıyla gerçekleştiğini savunulmuştur. Cıvatanın boyutuna ve cıvata deliğinin tipine bağlı olarak üç tip bağlantı incelenmiştir. Bağlantının yanal yükler altındaki davranışı hem deneysel hem de sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Büyük yanal kuvvetler altında cıvataların kayma davranışı gösterdiği belirtilmiştir.

Chen ve arkadaşları (2017a), ön gerilmeli yenilikçi modüler arası bağlantı önermişlerdir. Bağlantının montajı için her kolonun ucunda, ön gerilmeli teller veya eklenti çubukları için delikler bulundurulmuştur. Yerinde montaj sırasında üst modül alt modül üzerine hizalandıktan sonra deliklerden teller ve çubuklar geçirilmiştir. Teller istenilen gerilme noktasına getirilerek bağlantı elemanları ile sabitlenmiş ve son olarak modül kolonlarına deliklerden beton dökülmüştür. Betonun ezilmesini önlemek ve sünekliği artırmak için bağlantı bölgesine eklenti çubukları yerleştirilmiştir ve bu çubuklar kolon boyunca uzatılarak montaj tamamlanmıştır. Bu modüler arası bağlantılara sahip çerçeveli bir modüler sistemin sismik performansı, yarı statik bir yükleme testi yapılarak araştırılmıştır. Daha sonra yanal yükler altında çerçevenin çalışma mekanizmasını ve iç gerilme durumunu anlamak için modelleme yöntemi önerilmiş ve sonuçlar test verileriyle doğrulanmıştır. Modüler çerçevenin, güçlendirilmiş şiddetli

sarsıntı deprem seviyeleri içinde kabul edilebilir bir dayanıma ve rijitliğe sahip olduğunu ve fazla yapısal bozulma olmadan süneklik gereksinimlerini karşıladığı gözlemlenmiştir. Ancak beton, eklenti çubukları ve halatlar arasında yük transfer direnci aşıldığında açıklık meydana gelmiştir. Bu, mukavemet ve rijitlikte azalmaya ve betonun ezilmesine neden olmuştur.

Chen ve arkadaşları (2017b), geçirmeli cihaz ve cıvatalara sahip birleşim tipi önermişlerdir. Önerdikleri modüler arası bağlantıda, yatay bağlantıyı dört tüplü geçirmeli cihazın, dikey bağlantıyı, yüksek mukavemetli cıvataların sağladığını belirtmişlerdir. Modüllerin kirişlerinin ara ve kapak plakalarına kaynak yapılmasıyla kiriş plakasının cıvatanın çekme kuvvetine karşı lokal burkulması önlemiştir. Montaj sırasında modülün kolonları geçirmeli cihaza takılmıştır. Kolonlar yerleştirildiğinde, kenetlenme etkisi ile otomatik olarak yatay bir bağlantı sağlanmıştır. Son olarak modüllerin kirişlerindeki deliklerinden uzun cıvatalar geçirilerek bağlantı tamamlanmıştır. Bu bağlamda, numuneler, rijitleştirilip rijitleştirilmemesine ve boyutlarına göre statik monotonik yükleme testi, yarı statik döngüsel yükleme testi ve sayısal analize tabii tutulmuştur. Sonuçlarda, modüllerin kolonları ile geçirmeli cihaz arasında boşluk oluşturulduğunu ve yanal kuvvet arttıkça boşluğun arttığını belirtmişlerdir. Yanal yer değiştirme kritik bir değere ulaşır ulaşmaz kiriş-kolon birleşim bölgesinde çatlaklar gözlemlenmiştir. Ayrıca kolonlarda lokal burkulma gözlemlenmiştir.

Lee ve arkadaşları (2017), perçin ve bağlantı plakası içeren yenilikçi modüler arası bağlantı tipi önermişlerdir. Çalışmalarındaki L,T ve çapraz tipteki bağlantıların, modül montajına göre standart hale getirilebilir, kolaylıkla monte edilebilir, demonte edilebilir ve tekrar kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Bağlantının sismik davranışını analiz etmek için döngüsel yükleme testi yapılmış ve bağlantının yapısal performansı araştırılmıştır. Farklı şekil ve farklı kesit boyutuna sahip üç numune deneysel ve sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Ayrıca bu numunelerle karşılaştırmak için bir de kaynaklı numune üretilmiştir. Kaynaklı numunenin, cıvatalı numunelerden daha büyük bir başlangıç rijitliği ve daha büyük maksimum moment sergilediğini vurgulamışlardır. Ek olarak kesit boyutu küçüldükçe rijitliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sonuçların, deneyden elde edilen başlangıç rijitliğinin teorik değerini ve sonlu elemanlar analizini

doğru bir şekilde tahmin ettiğini vurgulamışlardır. Ayrıca, deneyden elde edilen maksimum direnç kuvvetinin teorik değeri aştığını göstermişlerdir.

Deng ve arkadaşları (2018), hem yatay hem de dikey bağlantı sağlayan haç biçiminde yenilikçi modüler arası bağlantı tipi önermişlerdir. Bağlantının montajı için fabrikada kolonların bir kısmı kesilmiştir. Montaj için cıvatanın kolon kapak plakasına ve kolonun dış yüzeyine ve ayrıca bu deliklere karşılık gelen haç şekilli köşebent plakasına delikler açılmıştır. Sahada ilk olarak iki alt modül arasına haç biçimli köşebent levha yerleştirilmiştir. Daha sonra üst modüller alt modüllerin üzerine yerleştirilmiştir. Son olarak kolonun kesilen kısmı kapak sacına kaynak yapılarak kapatılmıştır. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş dört farklı numune çevrimsel yük altında incelenmiştir. Sonuçlar, donatısız bağlantıların moment direnç kapasitesinin, kirişin ucundaki gevrek kaynak kırılması nedeniyle sınırlı olduğunu, takviyeli bağlantıların ise hem dış kapak plakası hem de üçgen şekilli takviyelerle arzu edilen sismik dirence ulaşabilecek şekilde arttırıldığını göstermiştir.

Sanches ve arkadaşları (2018), çalışmalarında, yenilikçi modüler arası bağlantı sunmuştur. Alt ve üst modüllerin kolonlarını dikey olarak birleştiren bu bağlantı, eğimli üst ve alt kenarları olan bir çelik kutuya ve çelik kutunun ortasında ardgermeli bir çubuğa sahiptir. Modülün kirişleri, saha dışında kolonlara kaynaklanmıştır. Farklı kalınlıklara sahip çelik kutulu numuneler ve farklı başlangıç art-germe yüklerine sahip numuneler, yarı statik döngüsel yükleme testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, biri tamamen kaynaklı ve biri kısmen kaynaklı olmak üzere iki numune, ardgermeli bağlantılarla karşılaştırmak için kullanılmıştır. Sonuçlar, ardgermeli bağlantının yeterli yanal dirence sahip olduğunu ve daha iyi kümülatif enerji yayılımı göstermiştir. En ince çelik kutuya sahip ve başlangıç ardgerme yükü olmayan numunenin maksimum yer değiştirmesinin daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Sharafi ve arkadaşları (2018), yüksek düzeyde bütünlük sağlayan, birbirine geçmeli bağlantı sistemine sahip patentli bir birleşim tipi tasarlamışlardır. Bağlantıya aşırı yükleme meydana gelmesi durumunda, bu birleşim tipinin, bağlantı noktalarında kazara oluşabilecek demontajı ve gerilim yığılmalarını önleyeceğini belirtmişlerdir. Bu bağlantı kombinasyonunun hem yatay hem de dikey bağlantı sağladığını göstermişlerdir.

Bağlantıdaki şeritler, dönmeyi ve herhangi bir ayrılmayı önlemek için iç içe geçirilmiştir. Bu sisteminin kurulumu gereği, kendi kendine oturmasının ve kendi kendine kilitlenme mekanizmasının, modüler binaların otomatik olarak montajını sağladığını vurgulamışlardır. Bu bağlantının yapısal performansı, statik ve dinamik yatay yükleme ile belirlenmiştir. Modüler binaların tesadüfi yüklere karşı yapısal bütünlüğü, mesnetlerin kavramsal olarak kaldırılmasıyla belirlenmiştir. Sayısal ve deneysel analizler, bu bağlantının, tüm modülleri, ağır yükleme koşullarına karşı bir araya getirerek çok katlı modüler binaların bütünlüğünü önemli ölçüde sağladığını göstermiştir.

Chen ve arkadaşları (2019), bağlantı plakası ve somundan oluşan köşe konektörlü bağlantı önermişlerdir. Modülü kaldırmak ve somunu döndürmek için köşe bağlantısının her iki tarafında erişim açıklıkları bulundurulmuştur. Bağlantının montaj aşamasında önce alt ve üst köşe bağlantılar hizalanmıştır ve erişim açıklıklarından somun özel bir çubuk yardımıyla sıkılmıştır. Önerilen modüler arası bağlantının performansını araştırmak için eğilme direnci testi, sonlu elemanlar yöntemi ve sayısal yöntemler kullanılmış ve modüller arası bağlantının tasarım yöntemi, dönme rijitliği dikkate alınarak geliştirilmiştir. Sonuçlar nihai göçme modunun, alt köşe bağlantılarının üst plakasının burkulma arızasından kaynaklandığını göstermiştir. Başlangıç dönme rijitliğinin teorik formülü, test ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile türetilmiş ve doğrulanmıştır. Bağlantı bölgesinin iç kuvvet dağılımını etkileyen iki parametre (modüler arası bağlantının dönme rijitliği ve akma momenti), modüler arası bağlantının eğilme momenti-dönme eğrisi temel alınarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, orta yükseklikteki modüler çelik binaların tasarımı için bu bağlantı tipinin referans olabileceği görülmüştür.

Cho ve arkadaşları (2019) kör ve yüksek gerilime sahip birleşim tipi önermişlerdir. Bağlantılarında, dört bitişik modülü bağlamak için kör cıvatalı ve yüksek gerilimli cıvatalı bağlantı plakası kullanılmıştır. Kiriş-kolon bağlantısının yapısal performansı, deneysel ve analitik çalışmalarla değerlendirilmiştir. Ek olarak, yeni modüler sistem, güçlü kolon-zayıf kiriş konseptini uygulamak için kiriş elemanlarının mukavemeti kolon elemanlarından önemli ölçüde daha düşük olacak şekilde tasarlanmıştır. İki tip numune tasarlanmıştır ve eğilme rijitliğini anlamak için iki numuneden biri dört eğik desteklere sahipken diğerinde bu bileşen kullanılmamıştır.

Uygulanan yüke karşı yer değiştirme eğrileri, iki numune için çizilmiştir ve göçme modları tanımlanmıştır. Son olarak, modüler kiriş-kolon bağlantısı için basitleştirilmiş bir analitik model önerilmiştir ve etkinliği, itme analizi gerçekleştirilerek ve sonuçları, test sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Test sonuçlarında kiriş elemanlarının göçmesi, kolon elemanından önce meydana gelmiştir ve bunun önerilen modüler sistemde güçlü kolon-zayıf kiriş kavramının başarıyla uygulandığını göstermişlerdir. Test sonuçlarıyla, desteli numunenin, desteksiz olana göre yaklaşık iki kat daha yüksek rijitlik ve 1,6 kat daha yüksek mukavemet koruduğunu gösterilmiştir.

Dai ve arkadaşları (2019), bağlantı kutularına sahip modüler arası bağlantı tipi sunmuşlardır. Bu bağlantı kutuları, modül köşelerine yerleştirilmiştir ve modül kolon ve kirişlerine kaynaklanmıştır. Saplama, alt modülün üst kısmına eklenmiştir. Konektörün diğer parçaları üst modüldeki bağlantı kutusunun içine yerleştirilmiştir. Montaj aşamasında üst modül alt modül üzerine hizalanmıştır. Üst modüldeki bağlantı kutusunun montaj deliğine saplama takıldığında bağlantı otomatik olarak kilitlenmiştir. Bağlantının yapısal performansını analiz etmek için döngüsel testler ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testinin sonunda, bağlantının iyi bir çekme davranışı gösterdiğini ve çekme mukavemetinin temel olarak saplama çapına ve malzeme özelliklerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Göçme modunun kaymadan değil, saplamanın en zayıf kısmındaki kırılmadan kaynaklandığı belirtilmiştir. Aynı zamanda, bağlantının mükemmel sismik performansı gösterdiği belirtilmiştir.

Dhanapal ve arkadaşları (2019), konektör bloğuna sahip yenilikçi modüler arası önermişlerdir. Bu bağlantıda, HSS kesitlerinden oluşan kolon ve döşeme kirişleri, köşelerden konektör bloğuna kaynaklanmıştır. Alt modüle düz başlı vidalar kullanılarak bağlanan köşebent plakası, modüler arasında yatay bir bağlantı kurmuştur. Daha sonra üst modül pin ile alt modüle takılmıştır. Son olarak, soket başlı vida (SHCS) montajı ile modüller dikey olarak birleştirilmiştir. Bağlantının yapısal performansını araştırmak için eksenel basınç ve eksenel çekme testleri yapılmıştır. Sonuçlarda, SHCS vidalarının konumunun önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Eksenel çekme yükü artırıldıkça SHCS vidalarında ani kırılma gözlenmiştir. Son olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve iki önemli tasarım önerilmiştir.

Lacey ve arkadaşları (2019a) çalışmalarında, dört modül üstte ve dört modül altta olmak üzere toplam sekiz modülün birleştirilmesine izin veren bağlantı tipi önermişlerdir. P2 plakasının yatay bağlantı, cıvataların ise dikey bağlantı sağladığını belirtmişlerdir. Pimler fabrikada P1 plakasına kaynaklanırken, modül kolonlarının uçlarına P1 ve P3 plakaları kaynaklanmıştır. Sonrasında, P2 plakası P1 plakasına ve P3 plakası P2 plakasına yerleştirilmiştir. Son olarak, plakalar ön gerilimli cıvatalarla sabitlenmiştir. Bağlantının F-d davranışını anlamak için hem deneysel testler hem de sayısal yöntemler kullanılmıştır. Bağlantıda hem pimlerinin hem de cıvataların varlığı, kesme direncinin artmasına yol açtığını belirtilmiştir. Ayrıca cıvatanın ön yükü değiştikçe kayma direncinin değiştiğini ve delik toleransının kayma direnci üzerinde çok az etkisi olduğunu vurgulamışlardır.

Lacey ve arkadaşları (2019c), dişli bir çubuk ve bir kesme anahtarına sahip yenilikçi modüler arası bağlantı sunmuşlardır. Önerdikleri bağlantıda, içi boş çelik kesitin içinde dişli çubuğun geçmesine izin vermek için ortasında açıklık bulunan P1 plakası, kesme anahtarına; P2 plakası da kolonlara kaynaklanmıştır. Modül kolonlarında sağlanan erişim açıklığı, bağlantı çubuğunun montajının yapılmasına izin vermiştir. Öte yandan, bu tasarım sayesinde dikey bir bağlantı sağlanırken, yatay bağlantı dikkate alınmamıştır. Kesme kuvveti- yer değiştirme ve yük-kayma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca sayısal simülasyon yapılarak ön yük ve kayma faktörünün, yük-kayma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kaplama yüzeylerinin kumlanması, kayma faktörünü artırdığını ve bunun da daha büyük bir kayma direncine neden olduğunu göstermişlerdir. Cıvata ön yükünün artırılması, kayma yükünün de artmasına, temas alanındaki artışın kesme yükünde hafif bir artışa neden olduğunu sunmuşlardır.

Sendanayake ve arkadaşları (2019), hem dikey hem de yatay yükleri aktarabilen üç tip bağlantı tipi önermişlerdir. Birinci bağlantıda kolon plakaları arasına çelik bir plaka yerleştirilmiştir. Bu çelik levhanın, modüler tarafından üretilen sismik enerjiyi azalttığını ve bağlantının enerji tüketimine yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. İkinci bağlantıda hem çelik levha hem de kauçuk malzemeden yapılmış esnek levha kullanılmıştır. Bu esnek plakanın ek sönümleme sağladığı vurgulanmıştır. Üçüncü bağlantının sadece kolon plakalarından ve cıvatalardan oluştuğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, monotonik ve döngüsel yükler altında bağlantı türlerinin performansını değerlendirmek için

yayınlanmış araştırmalardan elde edilen deneysel verilerle kalibre edilmiş sayısal teknikler kullanılmıştır. Sonrasında, bu bağlantı türleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak enerji kaybı ve sismik performans açısından karşılaştırılmıştır. Birinci ve ikinci tip bağlantının, üçüncü tip bağlantıdan daha iyi süneklik ve daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Ek olarak, ikinci tip bağlantının süneklik, enerji ve sismik direnç açısından çelik modüler yapılarda kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. DeneySEL Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında, modüler arası yatay ve dikey çelik bağlantıların gerçek davranışı üzerinde çalışmak için literatürde bulunan bağlantılar incelenmiştir. Bazı çalışmalarda, bağlantıların tamamen rijit varsayıldığı, sadece kolon özelliklerinin dikkate alındığı formülleri kullanarak, kesmedeki ötelenme ve dönme davranışlarını inceledikleri görülmüştür. Bu tezde, modüler arası dikey ve yatay bağlantıların gerçek davranışlarının sadece kolon özelliklerine bağlı olmadığı, aynı zamanda kolonları birleştiren elemanlara (uç plaka, bulon vs.) da bağlı olduğu ileri sürülerek, eğilme deneyi yapılmıştır. 2 tane modüler arası yatay bağlantılı, 2 tane modüler arası dikey bağlantılı toplam 4 numuneye, farklı yönde yatay yükleme yaparak, bağlantıların kesmedeki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonrasında bağlantıların moment-dönme eğrileri çizilmiştir ve bu eğrilerden; bağlantının rijitliği, moment dayanımı, dönme kapasitesi, tokluğu gibi karakteristik özellikler belirlenmiştir ve bağlantının göçme moduna etkisi incelenmiştir. Böylece, bu çalışmada, modüler arası yatay ve dikey bağlantıların gerçek davranışı belirlenmesiyle, ileride yapılacak olan yenilikçi modüler arası bağlantıların tasarımlarının ve ilgili analiz modellerinin geliştirilmesine referans olması amaçlanmıştır.

3.1.1. Deneylerde kullanılan cihaz ve ekipmanlar

Bu deneyde, piyasadakilere göre daha üstün özelliklere sahip ekipmanlar kullanılmakla birlikte, deneydeki fiziksel anlık hareketler sayısal verilere dönüştürülürken, bilgisayar ortamında kalibrasyonlar, büyük bir titizlikle yapılmıştır.

3.1.1.1. Deformasyon ölçüm cihazı (LVDT) ve Doğrusal yer değiştirme sensörleri (Potansiyometre)

LVDT'ler (Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler); belirli bir yük altındaki yatay veya düşey olarak deformasyonları ve eğilmeleri ölçmek için kullanılan konum sensörleridir. LVDT'nin tabanındaki mıknatıs vasıtasıyla sabit bir yere kilitlenir ve LVDT çubuğunun ucu, ileri-geri şekilde hareket edecek olan nesneye sabitlenir.

Deneylerde tercih edilen LVDT 300 mm ölçüm kapasitelidir ve 0,001 mm hata oranı ile ölçüm yapabilmektedirler. Doğrusal yer değiştirme sensörleri (potansiyometreler), her türlü doğrusal yer değiştirme ölçümü için kullanılır. Bu deneyde kullanılan potansiyometreler, kısa strok SLPS modeldir. Bu cihaz, dar alan uygulamalarında kullanılır ve 100 mm ye kadar ölçebilir. Deplasman sensörlerinin yer değiştirmesiyle oluşan sinyaller kablolar yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılır. Şekil 3.1’de LVDT ve potansiyometre gözükmektedir.



Şekil 3.1. Dijital deformasyon ölçme cihazı (LVDT) ve Doğrusal yer değiştirme sensörleri (Potansiyometre).

3.1.1.2 Hidrolik pompa, yükleme hücreleri (Loadcell)

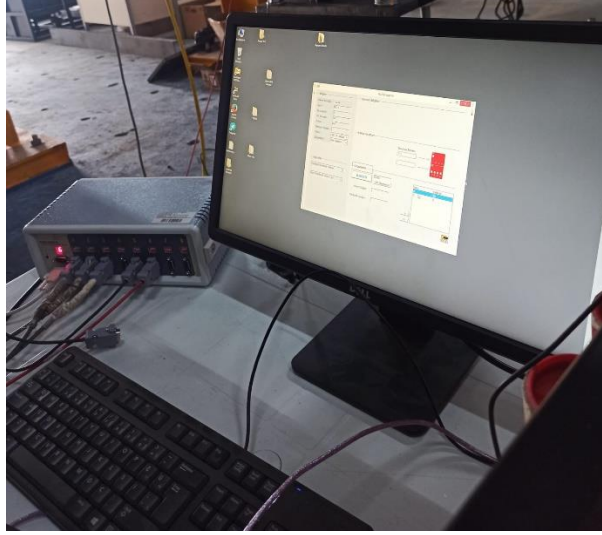
Hidrolik pompa, mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştüren ekipmandır. Bu deneylerde kullanılan Enerpac markalı, kontrolü kumanda vasıtasıyla yapılan, hidrolik pompaya, akışkanı emmeye ve sisteme basmaya yarayan iki dayanıklı hortum bağlıdır. Aynı zamanda hidrolik pistonu da bağlı bu hortumlar, pistonun harekete geçmesine ve istenilen yükü uygulamasına yardımcı olur. Deneylerde Enerpac RC-258 markalı 25 ton kapasiteye sahip hidrolik pistonun kullanılmıştır. Hedeflenen yükü numunelere uygulamak için pistonu bağlanan yük hücresi, kuvveti elektronik sinyal haline dönüştüren bir sensördür. Deneylerde kullanılan yük hücresi FUTEK markadır. Şekil 3.2’de hidrolik pompa, piston ve yük hücresi görülmektedir.



Şekil 3.2. Hidrolik pompa, piston ve yük hücresi

3.1.1.3. Veri toplama sistemi (Data Logger)

Bu cihazlar, farklı fiziksel verileri anlık olarak izlerler ve milisaniyeden saatlere kadar istenilen süre boyunca verileri kayıt altına alırlar. Bir anahtar vasıtasıyla başlatılır ve insan müdahalesine gerek kalmadan çok fazla sayıda veri sağlar. Bir veya birden fazla sensör girişine sahiptir ve bir ara yüz aracılığıyla sensörün ölçtüğü verileri bilgisayara kaydedebilir. Deneylerde kullanılan veri toplama cihazının TESTBOX 1001 modeldir ve 8 kanal girişine sahiptir. Giriş voltaj aralıkları ± 10 mV ile ± 10 V aralığındadır. Testlab programı aracılığıyla kaydedilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Testlab programına, loadcell LVDT ve potansiyometreler entegre edilmiştir. Son olarak da sonuç verileri Testlab programı vasıtasıyla excell ortamına aktarılmıştır. Şekil 3.3. 'de veri toplama sisteminin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.3. Veri Toplama Sistemi (Datalogger)

3.1.2. Deney düzeneği

Deneyleri yapmak için Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Laboratuvar'ında çerçeve sistem kuruldu. Bu çerçeve sistem zemine tam rijit şekilde kilitlendi. Ek olarak bu sisteme bulon ve kaynaklarla hidrolik piston sabitlendi. Hidrolik pistonla numunelere, bağlantının davranışının anlaşılması için yatay yük uygulandı. Doğru ve hassas ölçüm yapabilmek için, LVDT'ler çerçeve sistem kurularak sabitlenirken, potansiyometreler ölçüm yapılacak yerlere yapıştırıcılarla sabitlendi.

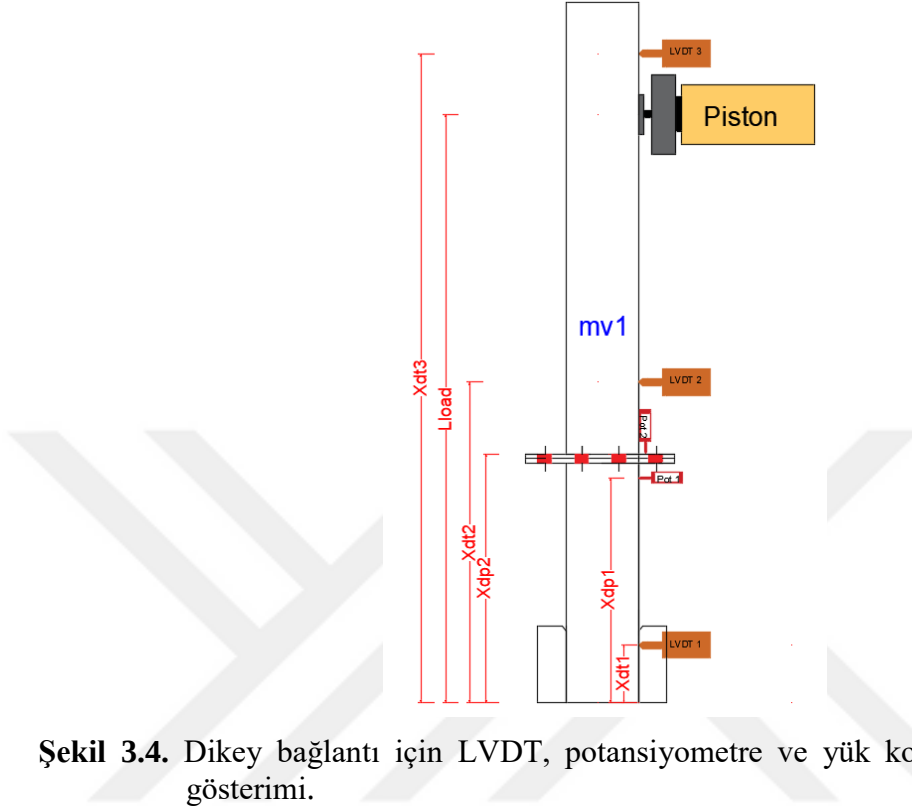
3.1.3. Deneysel verilerin formüller kullanılarak verilere aktarılması

Deneylerden elde edilen veriler çeşitli sayısal yöntemlerle moment ve dönme değerlerine dönüştürülmüş, gerekli moment-dönme eğrileri çizdirilmiş ve moment-dönme eğrisinin temsil ettiği, rijitlik, dönme kapasitesi ve moment dayanımı ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda amaç, dikey ve yatay modüler arası bağlantıların moment-dönme davranışlarının analiz edilmesidir. Dolayısıyla, kolonlar, yatayda deplasman yapmayacak şekilde deney düzeneğine ankastre bağlandı ve oluşacak mesnet momentleri Formül (3.1) kullanılarak ifade edildi.

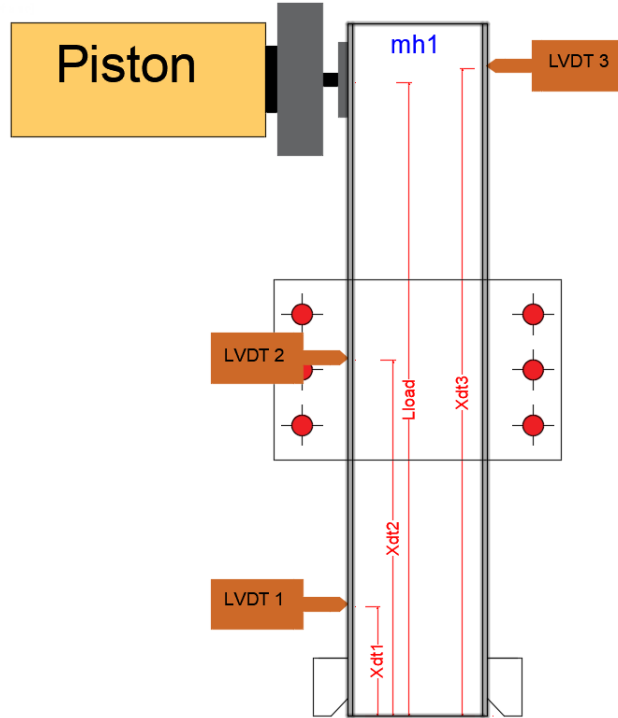
$$M = PL_{load} \quad (3.1)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Formül (3.1)'de; P , uygulanan kuvvet ve L_{load} , uygulanan kuvvet noktasının kolon ucuna olan uzaklığıdır.



Şekil 3.4. Dikey bağlantı için LVDT, potansiyometre ve yük konumlarının şematik gösterimi.



Şekil 3.5. Yatay bağlantı için LVDT, potansiyometre ve yük konumlarının şematik gösterimi.

LVDT ve potansiyometrelerin yaptığı ölçümlerden, uygulanan yükten ve LVDT, potansiyometre ve yük hücresinin aralarındaki mesafelerden (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6) yararlanarak Formül (3.2) ile modüler arası yatay ve dikey bağlantıların dönme hesabı yapılmıştır.

$$\theta = \frac{\arctan(\delta_{DT3} - \delta_{DT1} - \left(\left(-\frac{P}{EI} \right) \left(\frac{x_{DT1}^3}{6} - \frac{L_{load} x_{DT1}^2}{2} \right) \right))}{L_1} \quad (3.2)$$

I= Kirişin atalet momenti

E= Elastisite modülü

θ =Kirişin dönme değeri

δ =Kirişin dönme deplasmanı

P=Uygulanan Kuvvet

x_{dt} =LVDT'nin ve potansiyometrenin kolon ucuna uzaklığı

L_{load} =Uygulanan yükün kolon ucuna uzaklığı

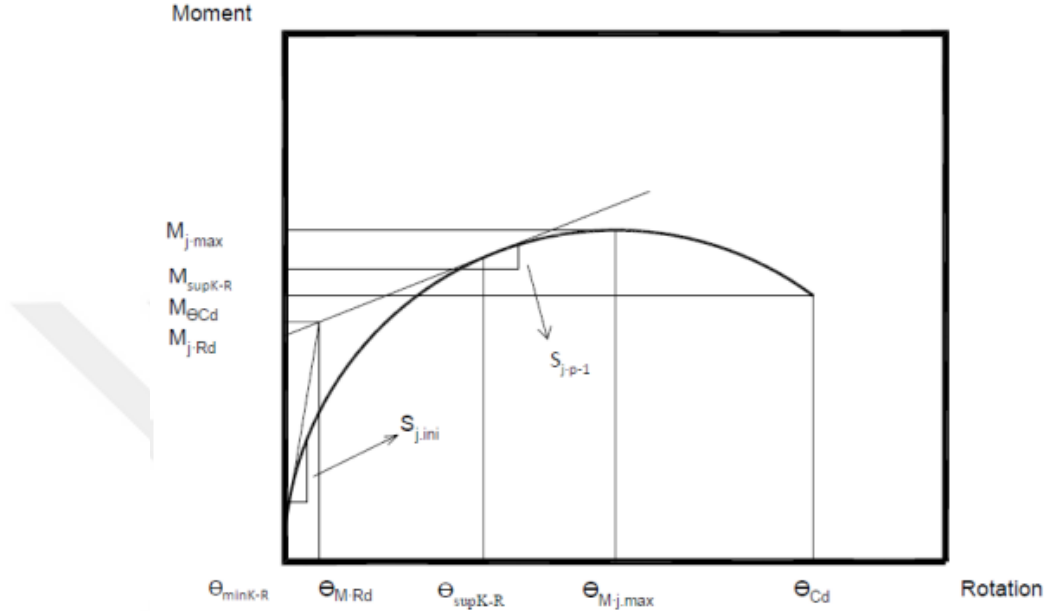
L_1 =Hesaba katılan Xdtlerin uzaklığı

3.1.4. Eurocode-3 yönetmeliği tasarımlarda moment-dönme özellikleri

Şekil 3.6'da görülen moment-dönme eğrisi, eğilme momenti ($M_j.Rd$) ile bu momente tekabül eden dönme ($\theta_j.Rd$), maksimum moment ($M_j.max$) ile bu momente tekabül eden dönme ($\theta M_j.max$) ve eğilme moment kapasitesi ($M\theta.Cd$) ile bu momente tekabül eden dönme (θcd) arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Bir moment-dönme eğrisinden öne çıkan özellikler:

1. Maksimum moment dayanımı ($M_j.max$); moment-dönme eğrisindeki maksimum momente eşittir.
2. Moment dayanımı ($M_j.Rd$); moment-dönme eğrisinde elastik bölgeden çizilen teğet ile plastik bölgeden çizilen teğetin kesişim noktasındaki moment değeridir.
3. Dönme rijitliği (S_{ij}); sekant rijitliğidir. Elastik bölgenin eğiminin (başlangıç rijitliği) plastik bölgenin eğimine oranıdır. ($S_{ij} = S_{j,ini}/S_{jp}-1$).
4. Dönme kapasitesi (θcd); moment-dönme eğrisindeki maksimum dönmeye eşittir.
5. Birleşim duktilitesi (Ψ_j); dönme kapasitesinin dönme moment dayanımındaki dönmeye oranına eşittir ($\Psi_j = \theta cd / \theta_j.Rd$).

6. Birleşim maksimum yük duktilitesi (Ψ_{jmax}); maksimum momentteki dönmenin moment dayanımındaki dönmeye oranına eşittir ($\Psi_{jmax} = \Theta_c M_{j,max} / \Theta_j \cdot R_d$).
7. Knee bölgesi; elastik bölge sınırına çizilen teğet ile plastik bölge sınırına çizilen teğet noktasının arasında kalan mesafeye denir.



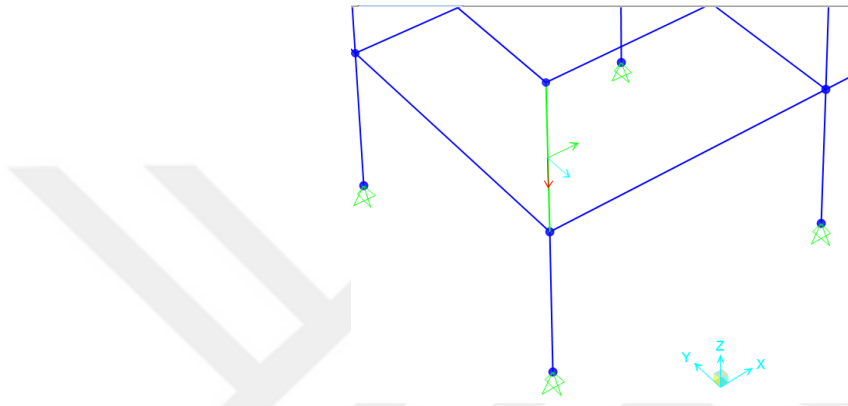
Şekil 3.6. Moment-dönme eğrisi

3.2. SAP2000 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Çalışma

Amaca uygun şekilde yapıları tasarlamak için taşıyıcı sistemin doğru seçilmesi, kullanım amacına uygun yüklerin belirlenmesi, ekonomik tasarım gibi görevlerin yerine getirilebilmesi için yazılım kullanılması gereklidir. Yapı modellerinin geliştirilmesi, analizi, boyutlandırılması için kullanılan, çok amaçlı bir paket program olan SAP2000, yaygın olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir yapıyı SAP2000 programı ile tasarlamak için öncelikle sistem modelleri oluşturulur. Daha sonra malzeme ve kesit özellikleri tanımlanır ve gerekli elemanlara özellikler atanır. Yük tipleri, yükleme durumları ve yük birleşimlerinin tanımlanıp atanmasından sonra sistem analiz edilir.

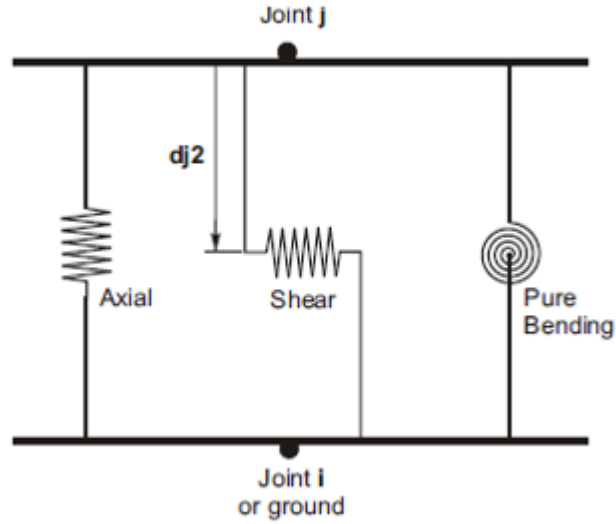
Model oluştururken ilk olarak, düğüm noktalarına sahip yapısal elemanlar çizilir. Düğüm noktaları, yapısal elemanlar arasındaki bağlantı noktalarını temsil eder. Link eleman iki ayrı düğüm noktasının (i ve j) uzayda aynı lokasyonu paylaşmasına izin veren bağlantı elemanıdır. Her link elemanın, kuvvet-deformasyon özelliklerini tanımlamak için

kullanılan kendi lokal koordinat sistemine sahiptir. Bu lokal sistemin eksenleri 1,2,3 olarak adlandırılır. İlk eksenin yönü, elemanın uzunluğu doğrultusundadır ve eksenel ve burulma deformasyonlarına karşılık gelir. Geriye kalan iki yön, elemanın dik düzlem yönündedir, kişinin belirttiği oryantasyona sahiptir ve bu yönler kesme ve eğilme deformasyonlarına karşılık gelir. Elemanın local koordinat sistemleriyle (1,2,3) global (x,y,z) koordinat sistemleri karıştırılmamalıdır. Şekil 3.7’de link elemanın local eksenleri ve global eksenleri verilmiştir.



Şekil 3.7. Link eleman local eksen ve global eksen

Bu elemanların altı ayrı yaydan oluştuğu ve bu yayların altı deformasyonel serbestlik derecesine (eksenel, kesme, burulma, eğilme) sahip olduğu varsayılır. Deformasyonların üçü için (1-2 düzleminde eksenel, kesme ve eğilme) yaylar bulunurken, 1-3 düzleminde ise kesme, eğilme ve burulma yayları bulunur. Şekil 3.8’de 1-2 düzleminde kesme yayının j düğüm noktasından d_{j2} mesafe kadar uzakta olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8. 1-2 düzleminde eksenel, kesme ve eğilme yayları

Bütün öteleme, dönme ve deformasyonlar elemanın lokal koordinat sistemi açısından ifade edilir ve her link elemanın, altı iç deformasyonu için kuvvet-deformasyon ilişkisi tanımlanır. Bu eleman, atanılan özellik türüne göre ve yapılacak analizin türüne göre doğrusal, doğrusal olmayan ve frekansa bağlı olmak üzere üç farklı türde davranış gösterebilir. Her link eleman için linear/nonlinear özellik tanımlamak zorunludur fakat frekansa bağlı özellik tanımlamak isteğe bağlıdır. Gap, hook, wen plasticity, multi lineer elastik, multi lineer plastik, rubber izolatör gibi türler için doğrusal olmayan özellik tanımlanmalıdır. Nonlinear analiz sırasında, nonlinear özelliklerin tanımlandığı tüm serbestlik dereceleri için nonlinear kuvvet-deformasyon ilişkileri kullanılabilir. Şekilde bu durum gözükmemektedir. Her nonlinear kuvvet-deformasyon ilişkisi ve moment-dönme ilişkisi rijitlik katsayısı (k) içerir. Elemanın serbestlik derecelerinin rijitliğe katkısı elemana atanılan özelliklere bağlıdır. Hiçbir rijitlik almayan serbestlik derecesi elde etmek için sınırlama (fixed) kullanılmalıdır. Şekil 3.9’da nonlinear-multilinear elastik özelliği tanımlanan link elemanın kuvvet-deformasyon ve moment-dönme eğrileri için serbestlik derecelerinin sınırlandırılıp sınırlandırılmamasına göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

S Link/Support Property Data X

Link/Support Type: MultiLinear Elastic

Property Name: LINK Set Default Name

Property Notes Modify/Show...

P-Delta Parameters

☒ Shear Couple

☐ Equal End Moments

☐ Advanced Modify/Show

Total Mass and Weight

Mass: 0,

Weight: 0,

Rotational Inertia 1: 0,

Rotational Inertia 2: 0,

Rotational Inertia 3: 0,

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1,

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1,

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
☒ U1	☒	☐	Modify/Show for U1...	☒ R1	☐	☒	Modify/Show for R1...
☒ U2	☒	☐	Modify/Show for U2...	☒ R2	☒	☐	Modify/Show for R2...
☒ U3	☐	☒	Modify/Show for U3...	☒ R3	☐	☒	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

Şekil 3.9. Multilinear link eleman özellik

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Modüler arası bağlantılar, modüler yapının genel stabilitesini, dayanıklılığını, yapısal bütünlüğünü etkilediğinden bu tezde hem dikey hem de yatay bağlantıların gerçek davranışını belirlemek için hem deneysel çalışmalar yapılmış, daha sonra sayısal analiz için modellenen binaya bu davranışlar entegre edilmiştir. Nihayetinde, çok katlı modüler binalarda bağlantıların rolünü araştırmak için modelin kat sayısı artırılarak, yük aktarım mekanizmaları incelenmiştir.

Deneyde 150*150*5 SHS kesitli dört kolon numune kullanılmıştır. Bu deneyde, aynı birleşim ve kolon özelliklerine sahip, MV1 ve MV2 isimli iki tane dikey bağlantılı numune kullanılmıştır. Bu numuneler hazırlanırken, 150*150*5 SHS kesitli kolonların ucuna alın levhalar kaynaklanmış ve bu levhalar dikey yönde bulonlanmıştır. Ek olarak bu deney kapsamında MH1 ve MH3 isimli, iki tane aynı yatay bağlantılı numune, 150*150*5 SHS kesitli kolonların kenarlarına alın levhalar kaynaklanarak ve bu levhalar yatay yönde bulonlanarak hazırlanmıştır. Hem dikey hem de yatay bağlantılı numunelere sırasıyla farklı iki yönde yatay kuvvetler uygulanarak, her bir bağlantının F-d ve M- Θ eğrileri çizilmiş ve bu eğrilere dayanarak, kesmedeki yer değiştirme ve dönme davranışları incelenmiştir. Bu birleşim tipleri literatürde daha önce teorik olarak davranışları çıkarılıp sayısal analizleri gerçekleştirilen bir çalışma Styles et al. (2016) referans alınmıştır.

Sayısal analizi gerçekleştirilmek üzere tasarlanan 6 katlı bina, modellenirken 2,5 m genişliğindeki orta koridorun her iki yanına 4,95*11,885*2,95 boyutlu rijit modüller yerleştirilmiş ve dikey (VC-Vertical Connection) ve yatay (HC-Horizontal Connection) modüler arası bağlantılar için, doğrusal olmayan link eleman kullanılmıştır. Nihayetinde, 21,15 m yüksekliğinde altı katlı bina tasarlanmış ve gerekli düşey ve yanal yüklemeler modele atanmıştır. Bu model Lacey et al. (2020) tarafından referans alınmış olup, yatay ve dikey bağlantıların her biri için deneyden elde edilen kesmedeki ötelenme ve dönme rijitliklikleri, bu modele atanırken, eksenel yöndeki ötelenme ve dönme rijitlik değerleri literatürden Styles et al. (2016) referans alınmıştır. Literatürden referans alınan çalışmalarda Lacey et al. (2020), dikey bağlantılarda kullanılmış olan başlangıç rijitlik değerleri, tamamen kolon özelliklerine yani sürekliliğe dayalı olduğundan, tam rijit

olduğu varsayılmıştır. Ek olarak, bu çalışmada Lacey et al. (2020) yatay bağlantılarda kullanılmış olan başlangıç öteleme rijitlik değerleri, basit formüllere dayanarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu tezde dikey ve yatay bağlantıların her birine deney yapılarak gerçek davranış belirlenmiş ve modele bu davranışlar entegre edilmiştir. Bu modelin analizi yapıp ve mevcut referans çalışmasıyla karşılaştırıldıktan sonra kat sayısı artırılarak link eleman ile modellenen modüller arası birleşim boşluklarının yük aktarımına etkisi incelenmiştir.

4.1. Deneysel Çalışma

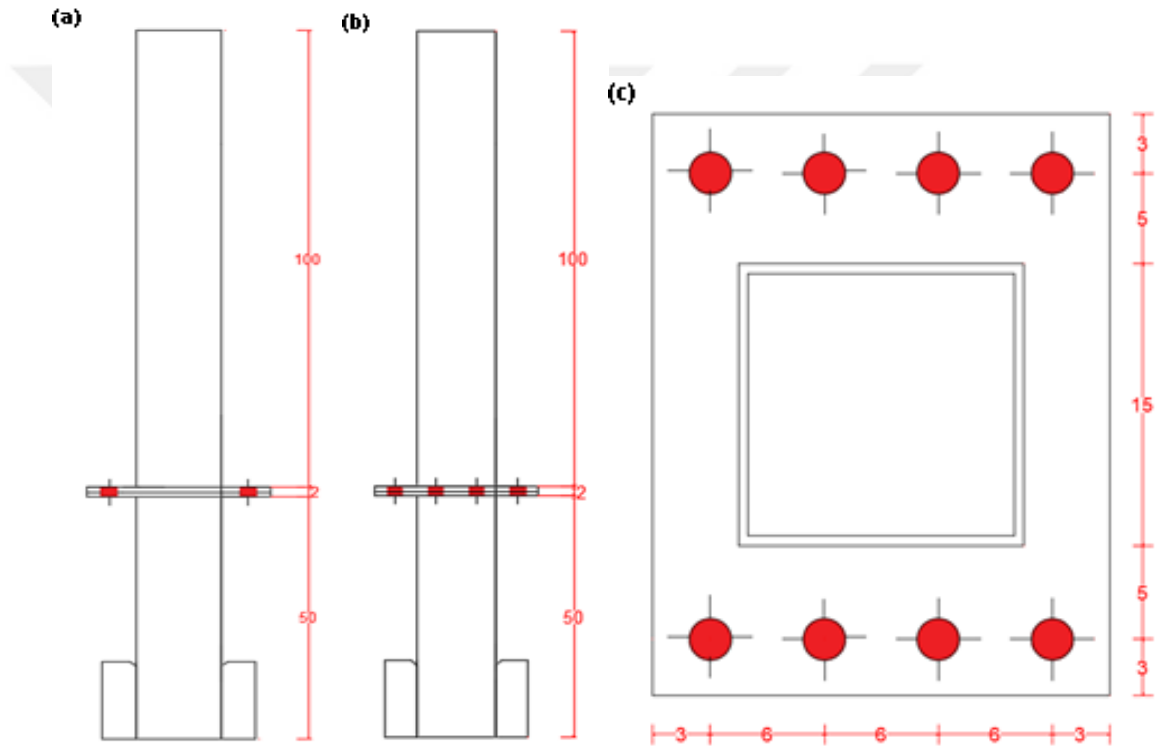
Bu çalışmada, MV1 ve MV2 isimli iki tane dikey modüler arası bağlantılı, MH1 ve MH3 isimli iki tane yatay modüler arası bağlantılı olmak üzere toplam dört numune hazırlanmış ve statik eğilme testine tabi tutulmuştur.

4.1.1. Dikey modüler arası birleşim tipi

Bu çalışmada, alt ve üst modüller üst üste yerleştirildiğinde alt ve üst modülün kolonlarını birleştirmek amacıyla kullanılan dikey bağlantıların davranışlarının modellemek için Şekil 4.1.'de detayları verilen birleşim modeli kullanılmıştır. Bu birleşim modelinden iki farklı yönde yükleme yapmak amacıyla 2 numune hazırlanmış; bu numuneler MV1 ve MV2 olarak adlandırılmıştır. Üst ve alt modüler kolonlar sırasıyla 1 m ve 0.5 m yüksekliğindedir ve S235 sınıf, 150*150*5 SHS kesitinden oluşmuştur. Üst kolon, 1 cm kalınlığında, 310*240*10 boyutlara sahip üst uç plakaya kaynaklanırken alt kolon da aynı boyuta sahip alt uç plakaya kaynaklanmıştır ve bu plakalar 8 tane M20, 8.8 sınıf bulonlarla birbirlerine bağlanmıştır. Şekil 4.2 (a) ve (b)'de numunelerin, (c)'de birleşim tipinin detayları şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. Dikey bağlantılı numunenin birleşim tipi



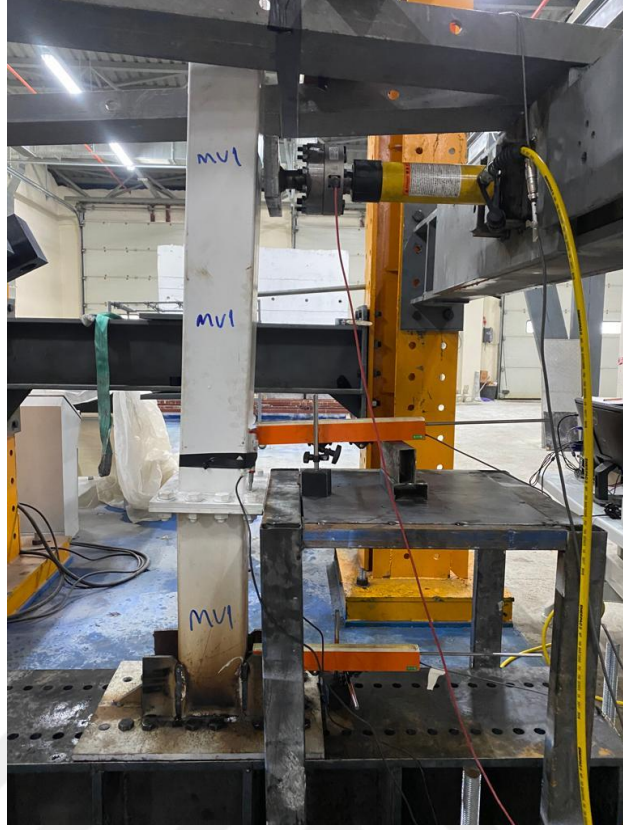
Şekil 4.2. (a) ve (b) numunelerin, (c) birleşim tipinin detayları şematik görseli

4.1.2. Dikey modüler arası bağlantıların deney düzeneği

Deney düzeneği hazırlanırken, öncelikle rijit çerçeve sistem zemine kilitlenmiştir. Daha sonra hidrolik pistonun çerçeve sisteme sabitlenmesiyle statik eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında rölatif yer değiştirmeleri ölçmek için alt kolona LVDT1 yerleştirilirken, üst kolona LVDT2 ve LVDT3 yerleştirilmiş ve potansiyometre1 bağlantısının alt plakasından 1-2 cm aşağıya yerleştirilirken, potansiyometre2 bağlantısının tam üzerine yerleştirilmiştir. Hassas ve doğru ölçüm yapılabilmesi amacıyla, LVDT1,

LVDT2 ve LVDT3 olarak numaralandırılmış LVDT'ler için çerçeve sistem veya sehpa kurulurken, POT1 ve POT2 olarak numaralandırılmış potansiyometreler için silikon yapıştırıcıyla ölçüm yapılacak yere yapıştırılmıştır. Dikey bağlantıların her iki yöndeki kesme davranışını belirlemek için; MV1 ve MV2 numunelerine farklı yönde yatay kuvvet uygulanmıştır. Bu numunelere yatay yük uygulandığında, numunelerin deney düzeneğine bağlandığı yerde göçme olmaması için kolonların her iki ucuna, berkitmeler, gazaltı kaynağıyla kaynaklanmıştır. Ek olarak, bu tez kapsamında kullanılan birleşim tipi için eksenel yönde literatürde deneysel çalışmalar var olduğundan Aalberg and Karlsen (2012) ve bu çalışmaların verilerine ulaşılabilindiğinden Styles et al. (2016) bu birleşim tipi için çekme deneyi yapılmamıştır.

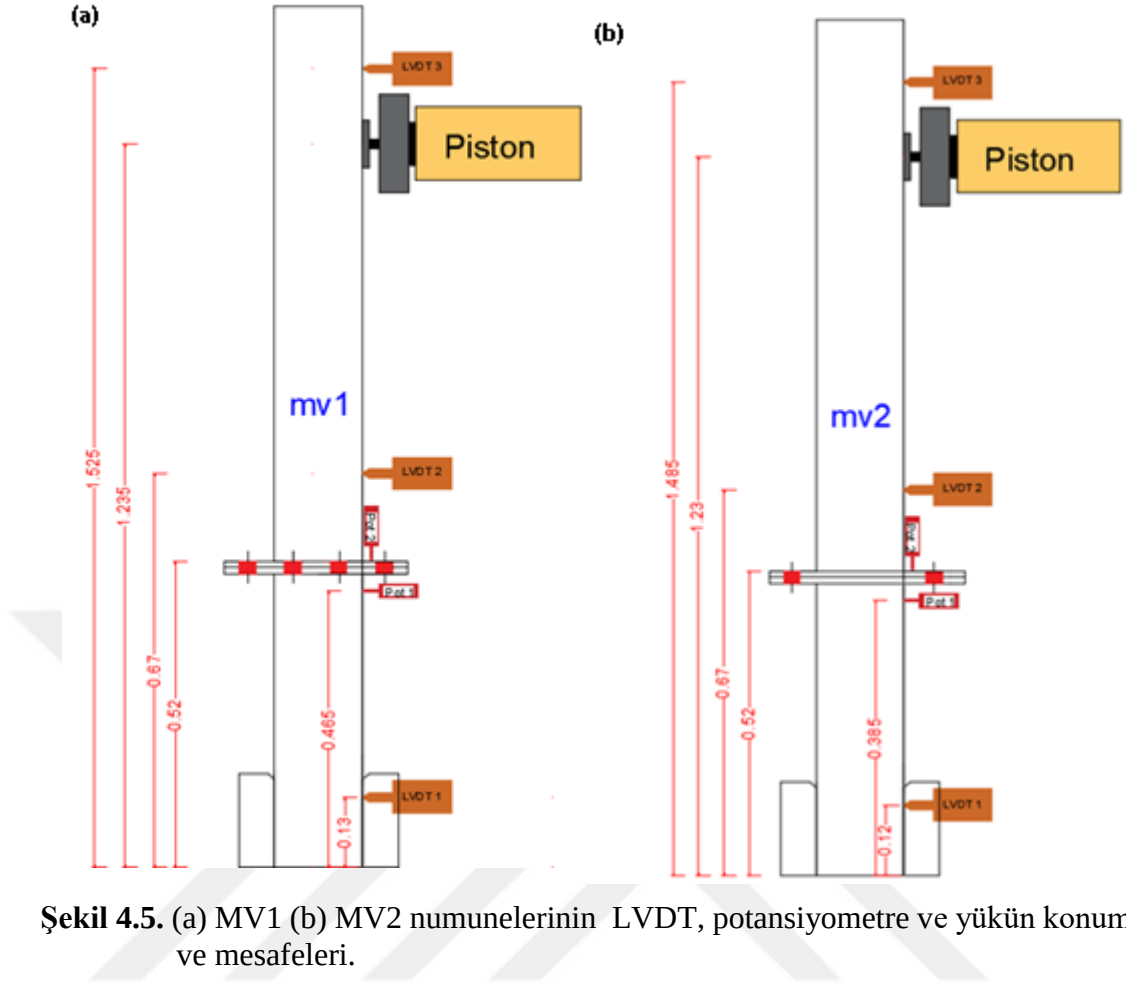
Deney sonucunda uygulanan yatay yüklere karşılık gelen deformasyonlarla kuvvet-deformasyon (F-d) eğrileri çizilmiş, bu kuvvet ve deformasyonlar formüller aracılığıyla momente ve dönme açlarına dönüştürülerek moment- dönme (M-Q) eğrileri çizilmiştir. Şekil 4.3'de MV1 numunesinin deney düzeneği, Şekil 4.4'de MV2 numunesinin deney düzeneği verilmiştir. Şekil 4.5 (a)'da MV1 numunesinin, (b)'de MV2 numunesinin deformasyon ölçüm aletlerinin ve yükleme cihazının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.3. MV1 numunesinin deney düzeneği



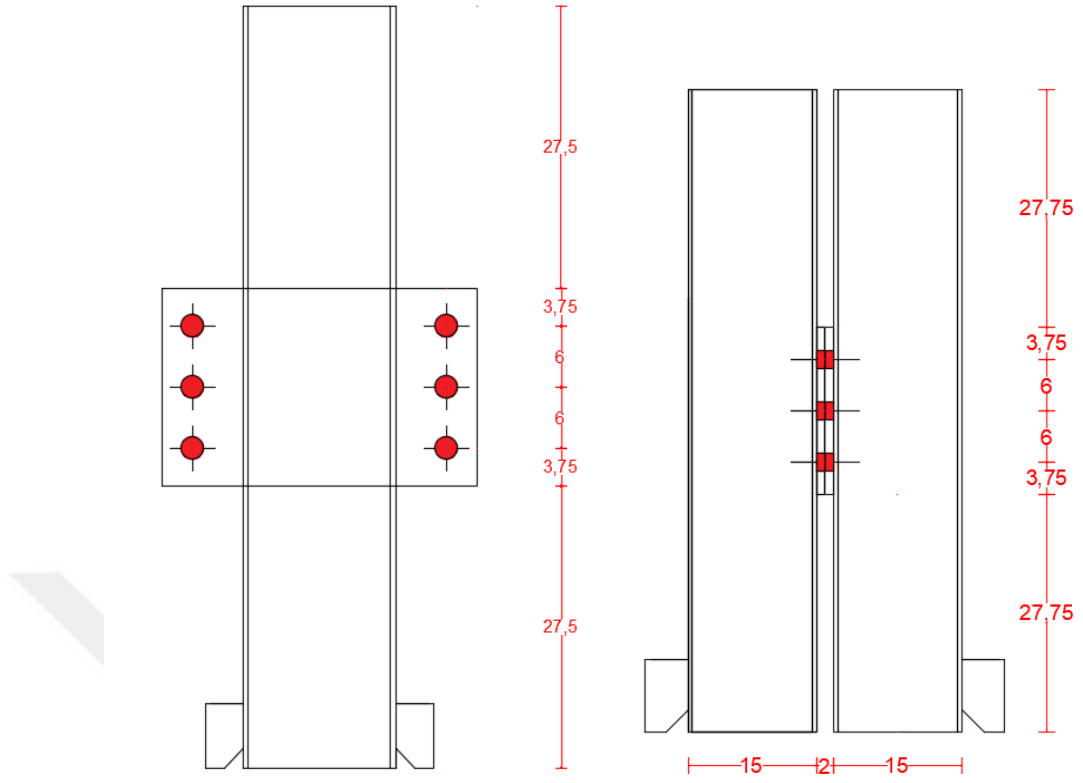
Şekil 4.4. MV2 numunesinin deney düzeneği



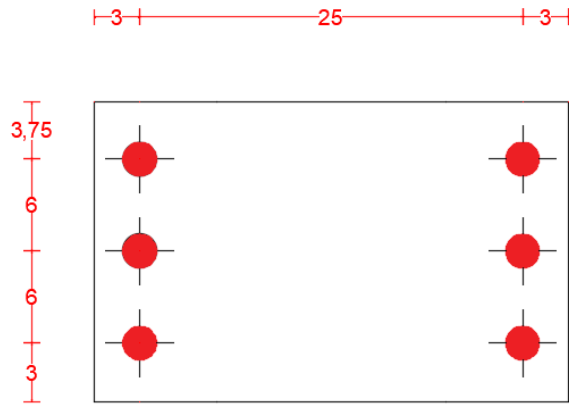
Şekil 4.5. (a) MV1 (b) MV2 numunelerinin LVDT, potansiyometre ve yükün konumları ve mesafeleri.

4.1.3. Yatay modüler arası bağlantıların birleşim tipi

Deneyde kullanılan yatay modüler arası bağlantılar, S235 sınıf, 150*150*5 SHS kesitli iki bitişik modüler kolonu birbirine bağlamıştır. Modüler kolonlar 270*200*10 boyutlara sahip 1 cm kalınlığındaki plakalara kaynaklanmıştır ve bu plakalar 6 tane M20, 8.8 sınıf bulonlarla bağlanmıştır. Farklı yönlerden yatay kuvvet uygulayarak, iki yönde kesmedeki davranışını incelemek için aynı birleşimden MH1 ve MH3 isimli 2 numune üretilmiştir. Bu numunelere yatay yük uygulandığında, numunelerin deney düzeneğine bağlandığı yerde göçme olmaması için kolon ucuna, berkitmeler gazaltı kaynağıyla kaynaklanmıştır. Şekil 4.6’da numunelerin ve Şekil 4.7’de birleşim tipinin detayları şematik olarak verilmiştir. Şekil 4.8’de deneyde kullanılan yatay bağlantılı numunenin birleşim detayı verilmiştir.



Şekil 4.6. Yatay bağlantılı numunenin yandan görünüşleri



Şekil 4.7. Yatay bağlantının detayları



Şekil 4.8. Yatay bağlantılı numune

4.1.4. Yatay modüler arası bağlantıların deney düzeneği

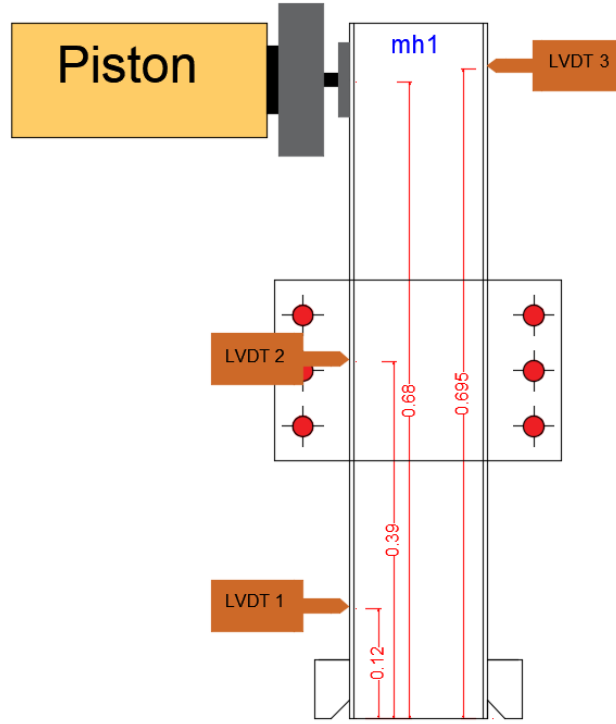
Yatay bağlantılı numunelerin statik eğilme testi sırasında rölatif yer değiştirmeleri ölçmek için bitişik kolonlardan birine LVDT1 ve LVDT3 yerleştirilirken, diğer kolona LVDT2 yerleştirilmiştir. Yatay yükler modüler kolonun ucuna yüklenmiştir. Deney sonucunda hem uygulanan yatay yüklere karşılık gelen deformasyonlarla, kuvvet-deformasyon (F-d) eğrileri çizilmiştir, hem de formüller aracılığıyla bu kuvvet ve deformasyon değerlerinden moment ve dönme açıları elde edilmiş, moment- dönme (M-Q) eğrileri çizilmiştir. Şekil 4.9’da ve Şekil 4.10’da sırasıyla MH1 ve MH3 numunelerinin deney düzeneği verilmiştir. Şekil 4.11’de ve Şekil 4.12’de sırasıyla MH1 ve MH3 numunesindeki deformasyon ölçüm aletlerinin ve yükleme cihazının konumu şematik olarak verilmiştir.



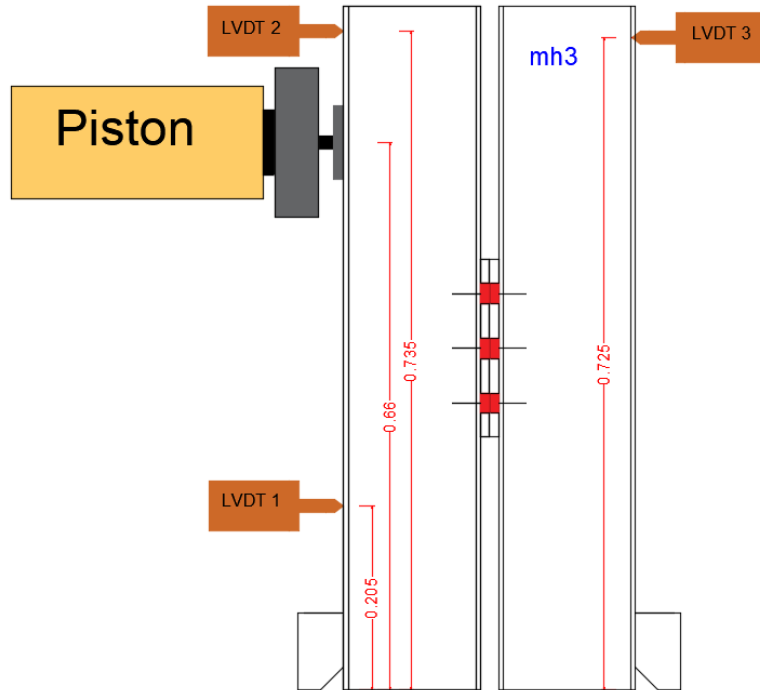
Şekil 4.9. MH1 numunesinin deney düzeneği



Şekil 4.10. MH3 numunesinin deney düzeneği



Şekil 4.11. MH1 adlı numunenin LVDT, potansiyometre ve yükün konumları ve mesafeleri.



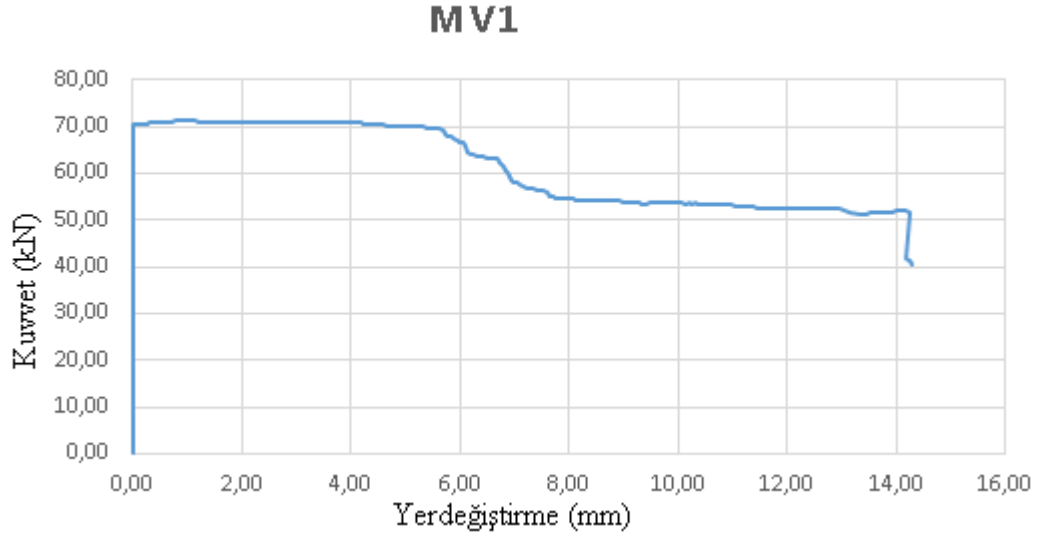
Şekil 4.12. MH3 adlı numunenin LVDT, potansiyometre ve yükün konumları ve mesafeleri.

4.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

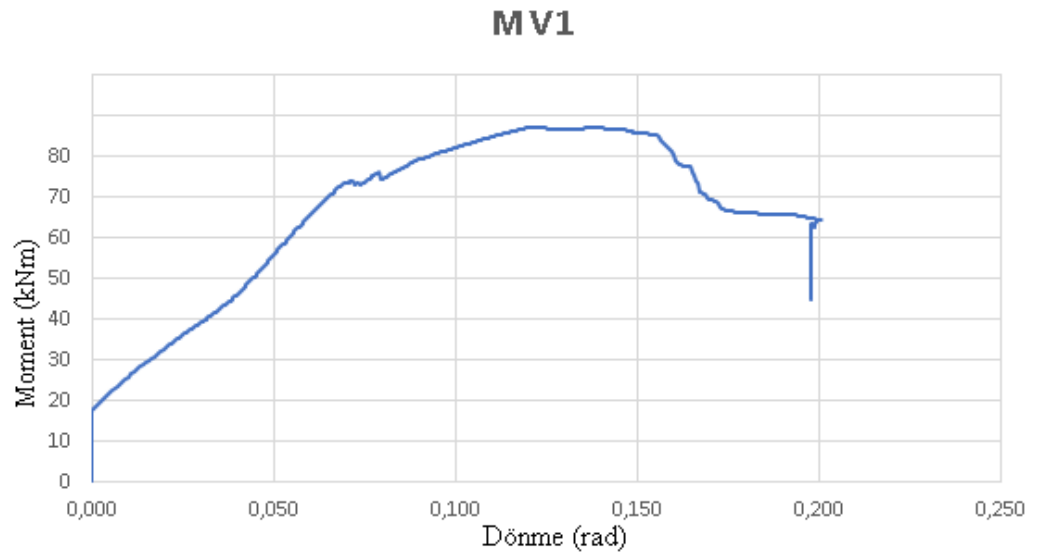
4.2.1. Numunelerin moment dönme eğrileri ve göçme modları

Yapılan bu çalışmada 2 adet dikey modüler arası birleşim, 2 adet yatay modüler arası birleşim statik eğilme testine tabii tutulmuştur. Deneylerden elde edilen verilerle kuvvet-deformasyon ve moment-dönme eğrileri çizilmiş ve moment-dönme eğrilerinden elde edilen dönme kapasitesi, moment dayanımı ve rijitlik gibi karakteristik özellikler belirlenmiştir. Bu özellikler Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Ayrıca, yapılan deneyler sonucunda oluşan birleşimlerin göçme modları değerlendirilmiştir.

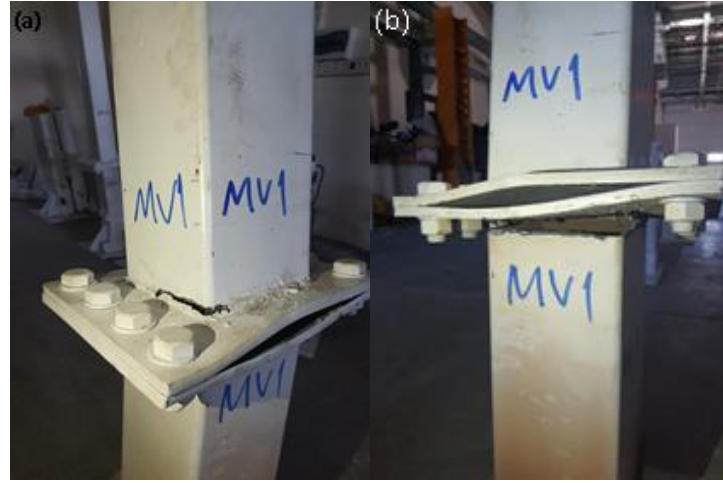
MV1 numunesi için yük-deformasyon (birleşime en yakın olan LVDT2'den ölçülen deformasyonlar), moment-dönme eğrisi ve göçme modları sırasıyla Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de verilmiştir. MV2 numunesi için yük-deformasyon (birleşime en yakın olan LVDT2'den ölçülen deformasyonlar), moment-dönme eğrisi ve göçme modları sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. MV1 numunesinde maximum yük 71,2 kN ölçülürken, maximum yerdeğiştirme 14,3 mm ölçülmüştür. Maximum moment 87,2 kNm hesaplanırken; maximum dönme 0,121 rad olarak hesaplanmıştır. MV2 numunesinde maximum yük 131,6 kN ölçülürken, maximum yerdeğiştirme 30,6 mm ölçülmüştür. Maximum moment 162,5 kNm hesaplanırken; maximum dönme 0,278 rad olarak hesaplanmıştır. Bu eğrilerden de anlaşıldığı gibi MV1 ve MV2 numuneler bir süre rijit davranış göstermiş, deformasyon gözlenmemiştir. Daha sonra yük artmaya devam ettikçe deformasyon başlamış ve göçme moduna kadar çeşitli noktalarda deformasyonlar gözlenmiştir. Şekil 4.15 (a)'da ve Şekil 4.18 (a)'da görüldüğü gibi birbirine bulonlarla bağlı iki uç plak deforme olarak plakaların arasını açılmıştır ve üst kolonun alt ucunda kaynakların bitim hizasında kaynak yırtılması meydana gelmiştir. Şekil 4.15 (b)'de ve Şekil 4.18 (b)'de görüldüğü gibi alt kolonun üst ucunda kaynakların bitim hizasında da kaynak yırtılması meydana gelmiştir. MV1 ve MV2 numunelerinde deneyler, eğrilerde de görüldüğü gibi numune göçmeye uğradığında yani deneyde yük düşüşe geçtiğinde durdurulmuştur.



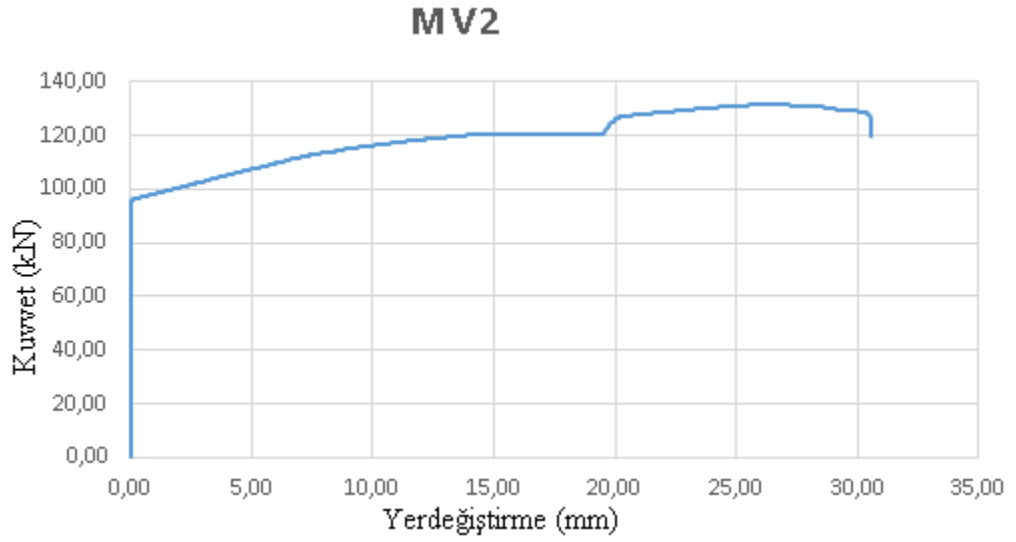
Şekil 4.13. MV1 numunesinin F-d eğrisi



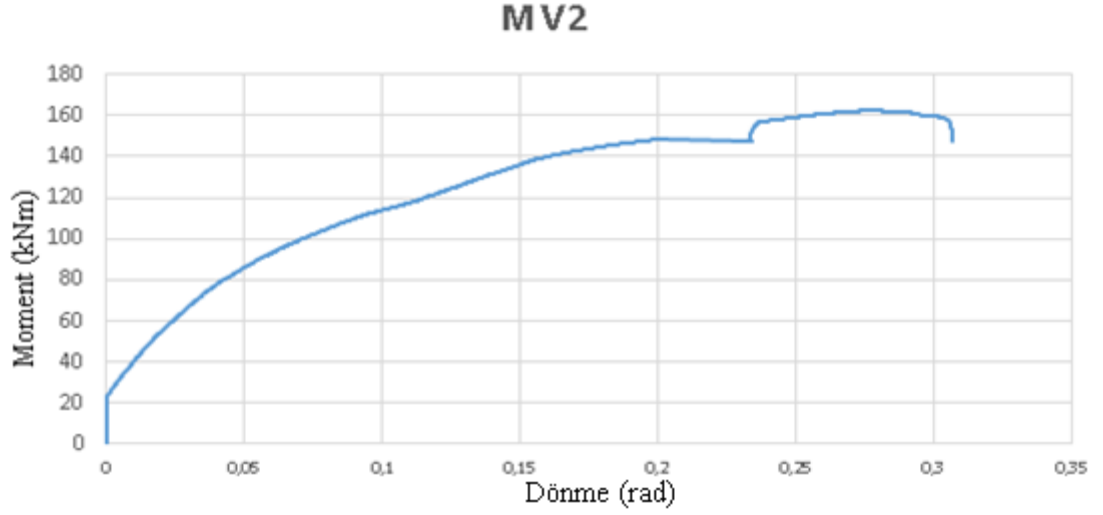
Şekil 4.14. MV1 numunesinin M- Θ eğrisi



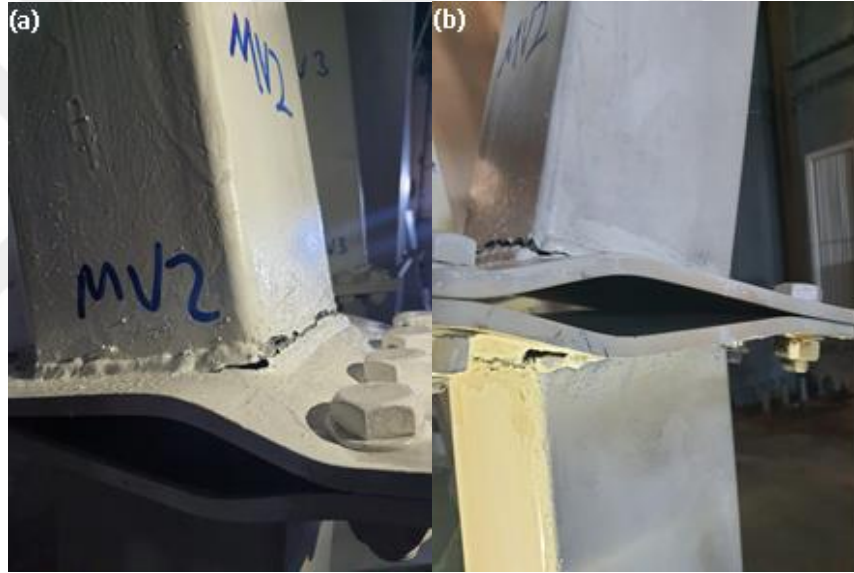
Şekil 4.15. MV1 numunesinin göçme modları (a) plakada açılma ve üst kolonda kaynak yırtılması (b) alt kolonda yırtılması.



Şekil 4.16. MV2 numunesinin F-d eğrisi



Şekil 4.17. MV2 numunesinin M- Θ eğrisi

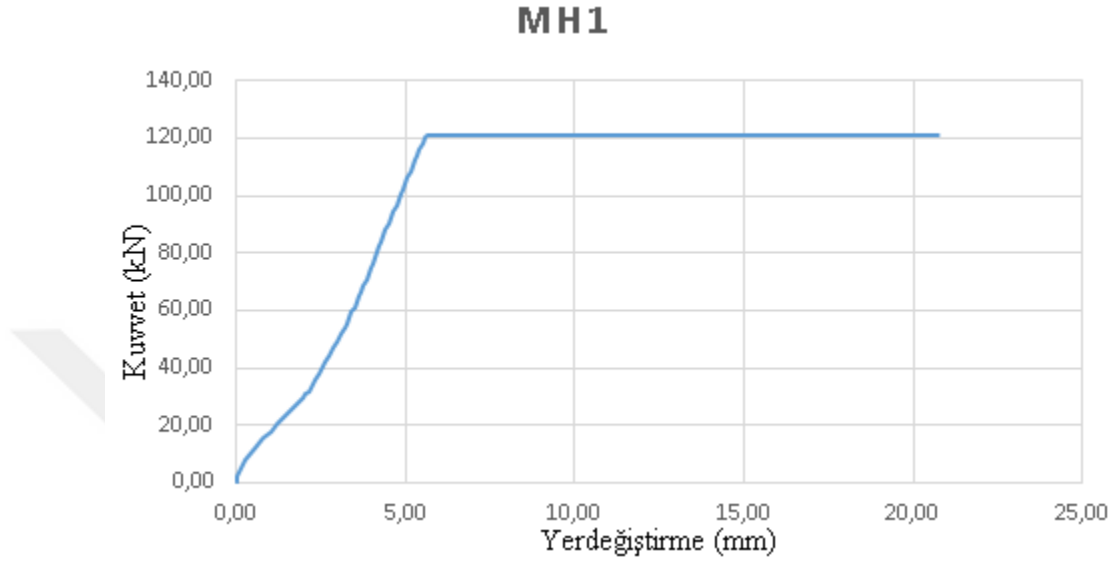


Şekil 4.18. MV2 numunesinin göçme modları (a) plakada açılma ve üst kolonda kaynak yırtılması (b) alt kolonda kaynak yırtılması.

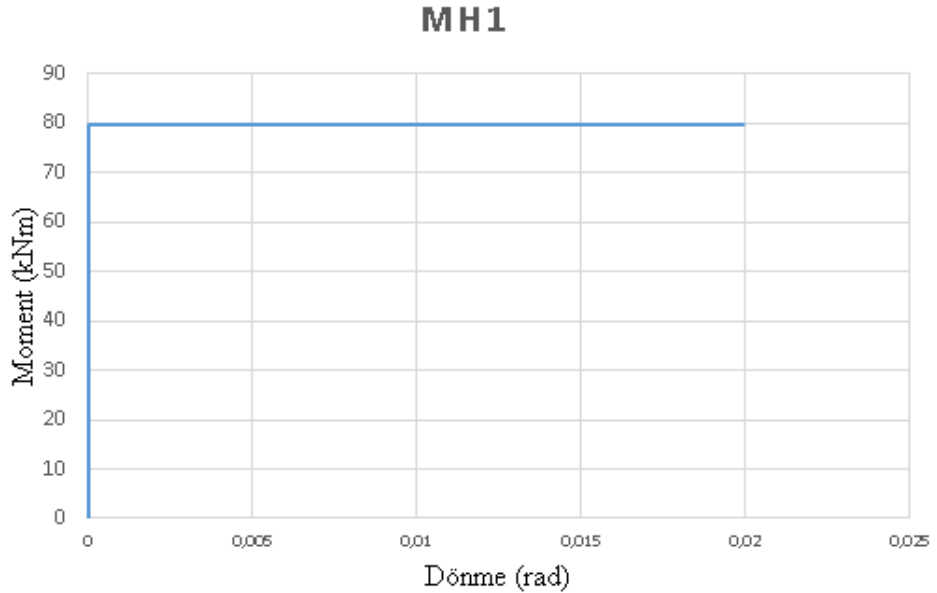
MH1 numunesi için yük-deformasyon (birleşime en yakın olan LVDT2'den ölçülen deformasyonlar), moment-dönme eğrisi ve göçme modları sırasıyla Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 'de verilmiştir. Eğrilerden de anlaşıldığı gibi bu numunede yük maksimum momente ulaşana dek LVDT'lerden hiçbir değer okunmamış yani deformasyon gözlenmemiştir. Yük maksimum yüke ulaştıktan sonra yük sabit kalarak kolon uçlarında deplasman/deformasyon artmaya devam etmiştir. Yani birleşim tam rijit davranış göstermiştir. Maximum kuvvet 120,89 kN ölçülürken; maximum yerdeğiştirme 20,7 mm ölçülmüştür. Maximum moment 79,8 kNm hesaplanırken; maximum dönme 0 rad hesaplanmıştır. Birleşim bölgesinde hiçbir deformasyon gözlenmemiş, yük

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

uygulandığı bölgede kolonda ezilme ve kolon ankraj bölgesinde berkiltme plakasının üzerinden kolon profillerinde yırtılma gözlenmiştir. Şekil 22 (a)'da; kolonun, yük uygulanan kısmında ezilme, (b)'de kolonun berkitme bölgesinde burkulma; (c)'de, kolon kesitiyle berkitme levhasının birleşiminde yırtılmalar görülmektedir.



Şekil 4.19. MH1 numunesinin F-d eğrisi

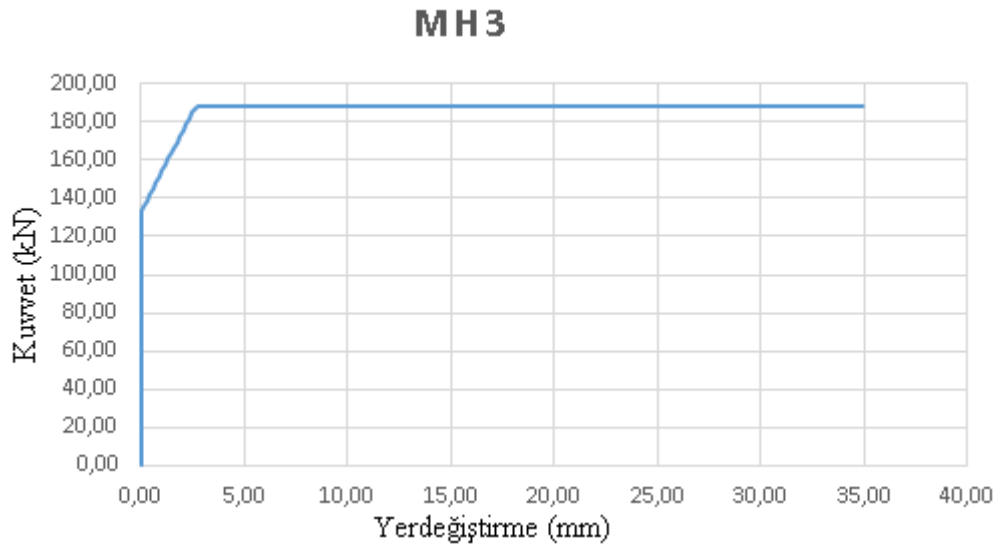


Şekil 4.20. MH1 numunesinin M- Θ eğrisi

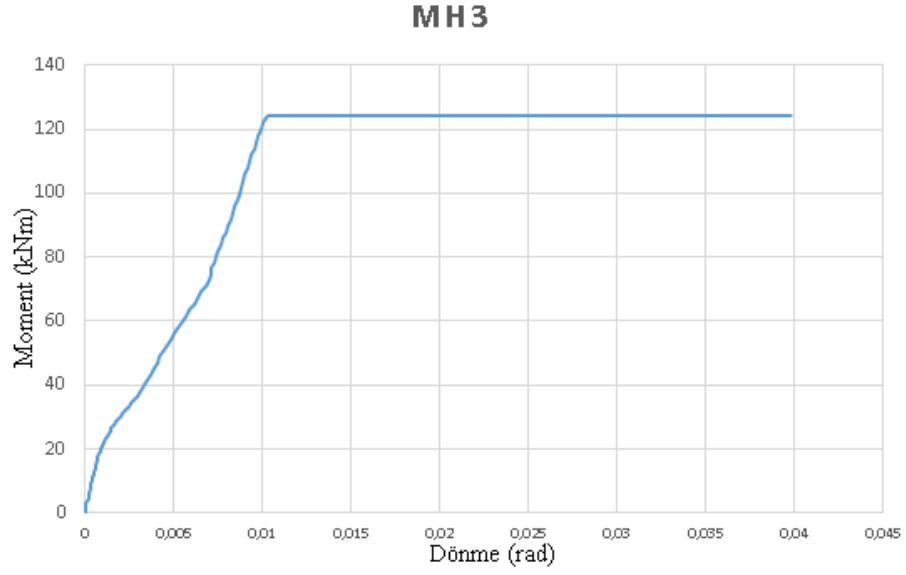


Şekil 4.21. MH1 numunesinin göçme modları (a) ezilme, (b) burkulma, (c) yırılma

MH3 numunesi için yük-deformasyon (birleşime en yakın olan LVDT2'den ölçülen deformasyonlar) ve moment-dönme eğrisi sırasıyla Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de verilmiştir. Şekil 4.24'de MH3 numunesinin deney sonrası hâli verilmiştir. Eğrilerden de anlaşıldığı gibi bu numunede devamlı yük artmaya devam etmesine rağmen LVDT'lerden hiçbir değer okunmamış yani deformasyon gözlenmemiştir. Maximum yük 188,3 kNm ölçülürken; maximum yerdeğiştirme 34,85 mm ölçülmüştür. Maximum moment 124,45 kNm hesaplanırken, maximum dönme 0 rad hesaplanmıştır. Yük maksimum yüke yaklaştıktan sonra yük sabit kalarak kolon uçlarında deplasman/deformasyon 3,5 cm gibi çok az miktarda görülmüştür. Birleşim bölgesinde hiçbir deformasyon gözlenmemiş, yük uygulandığı bölgede kolonda ezilme gözlenmiştir. Deney göçme görülemeden durdurulmuştur.



Şekil 4.22. MH3 numunesinin F-d eğrisi



Şekil 4.23. MH3 numunesinin M- Θ eğrisi



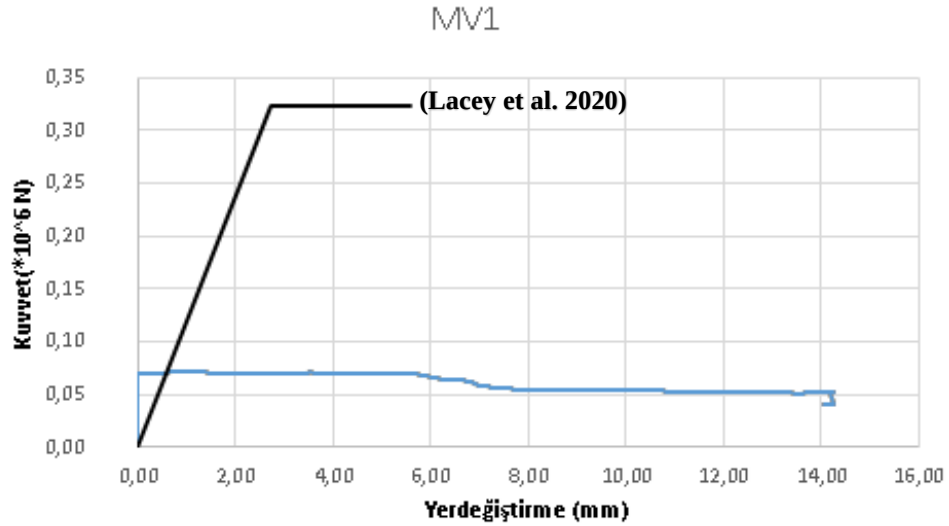
Şekil 4.24. (a) ve (b) MH3 numunesinin deney sonrası görüntüleri

Çizelge 4.1. Numunelerin M- Θ eğrilerinin karakteristik özellikleri

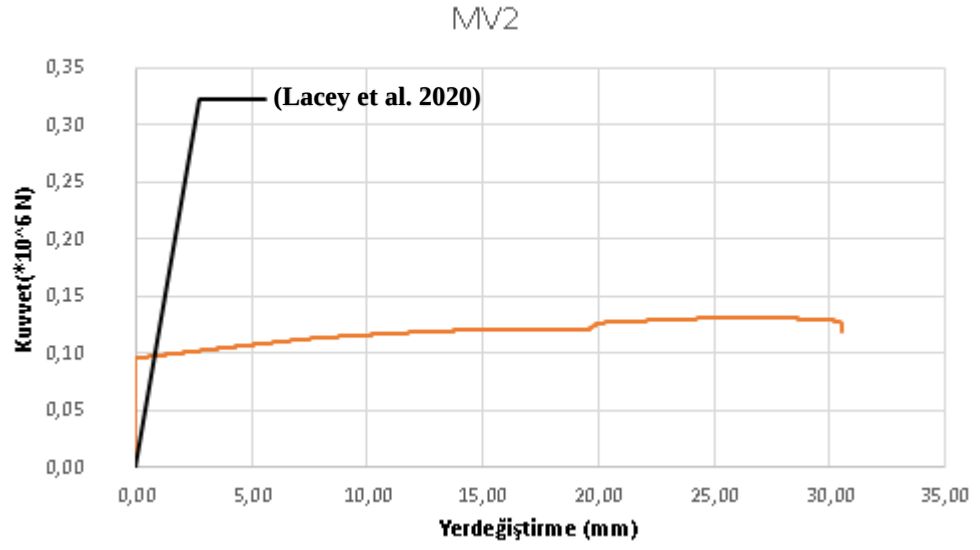
Deney No	Mukavemet(kN.m)			Rijitlik(kN.m/rad)			Dönme(rad)				
	M(j.Rd)	M(j.max)	M(Θ Cd)	S(j.ini)	S(j.p-1)	S(j.ini)/S(j.p-1)	Θ (M.Rd)	Θ (Min.K.R)	Θ (Msup.K.R)	Θ (Mj.max)	Θ (Cd)
MV1	77,78	87,2	64,2	993,7	174,037	5,71	0,067	0	0,0112	0,121	0,2
MV2	143,89	162,5	147,8	1988,4	85,964	23,13	0,061	0	0,263	0,278	0,31
MH1	79,79	79,8	79,8	1	0	-	0	0	-	-2,35E-09	0,02
MH3	124,45	124,45	124,45	28941,9	0	-	0,0043	0	-	0,0103	0,04

4.2.2. Deney sonuçlarının referans çalışmayla karşılaştırılması

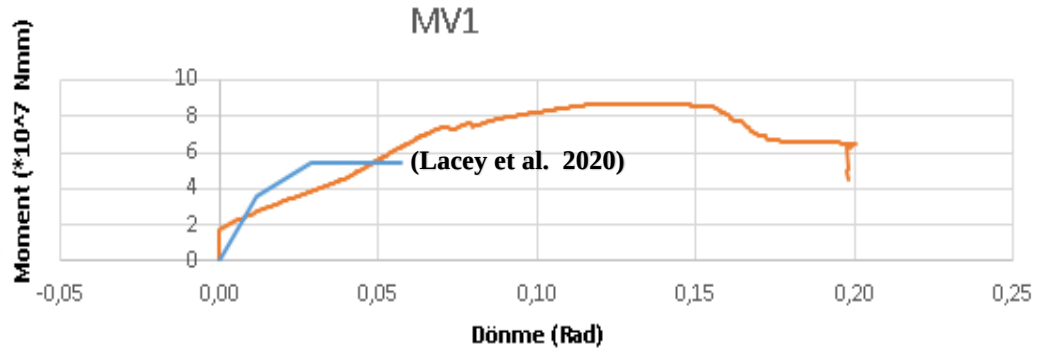
Bu tez kapsamında incelenen dört numunenin, deneyden elde edilen verilere dayanılarak çizilen F-d eğrileri ile Bölüm 1.9’da detayları verilen referans çalışmasının F-d eğrilerinin karakteristik değerleri karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Şekil 4.25’de MV1 ve Şekil 4.26’da MV2 numunelerinin kuvvet deformasyon eğrileri ve Şekil 4.27’de MV1 ve Şekil 4.28’de MV2 moment-dönme eğrileri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Değerler arasında ve eğriler arasındaki farklılığı yorumlamak gerekirse; referans çalışmada dikey modüler birleşimin kuvvet-deformasyon ve moment-dönme eğrileri teorik olarak hesaplanırken göçme dikkate alınmadığından sadece maksimum yüke göre bilineer eğri çizilmiştir. Ayrıca teorik formüllere göre kolon-kolon birleşim noktasını birleşim tam rijit kabul eden kolon kesitinin özelliklerine dayanan rijitlik hesaplamaları ve sadece kolon kesitinin dayanımına göre maksimum yük hesaplanmıştır (Şekil 1.59). Oysaki MV1 ve M2 numunesinin deforme olmuş şekillerinden de görüldüğü gibi göçme profillerden değil birleşimlerden kaynaklanmaktadır bu sebeple birleşim rijitliği belirleyen bir faktördür. Fakat bu numunelerde birleşim tam rijit olmamasına rağmen rijitlik sınıflandırılmasına göre rijit sayılan bölgeye düşmektedir.



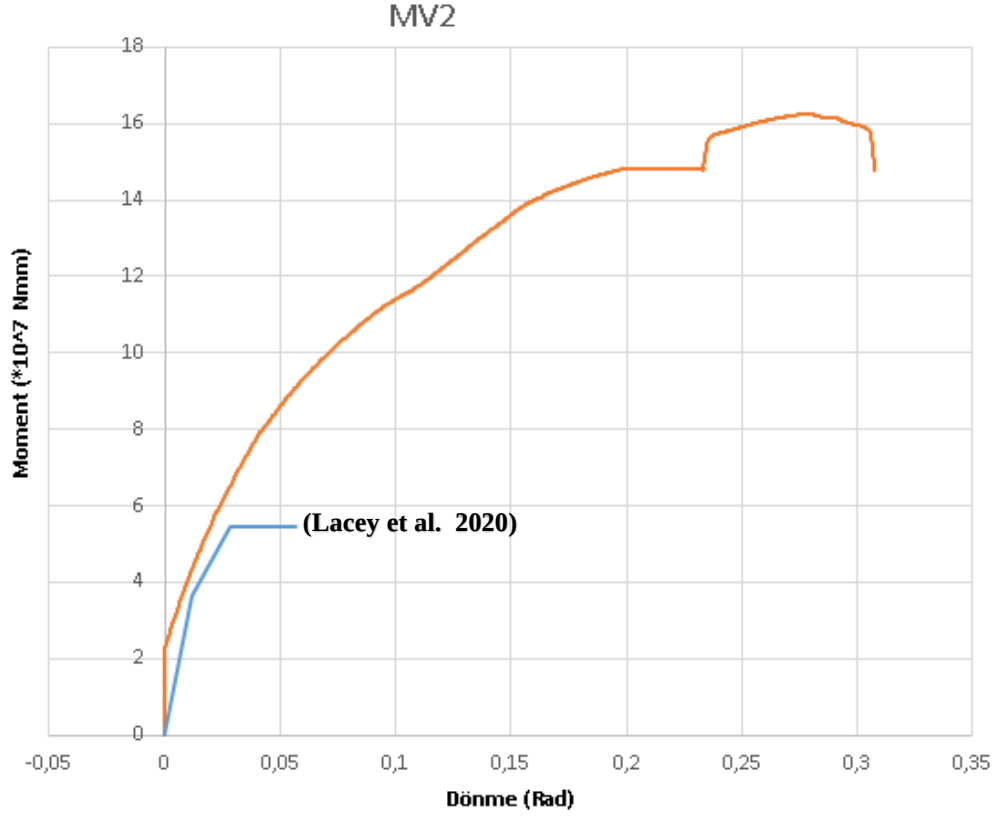
Şekil 4.25. MV1 numunesinin karşılaştırmalı F-d eğrisi



Şekil 4.26. MV2 numunesinin karşılaştırmalı F-d eğrisi

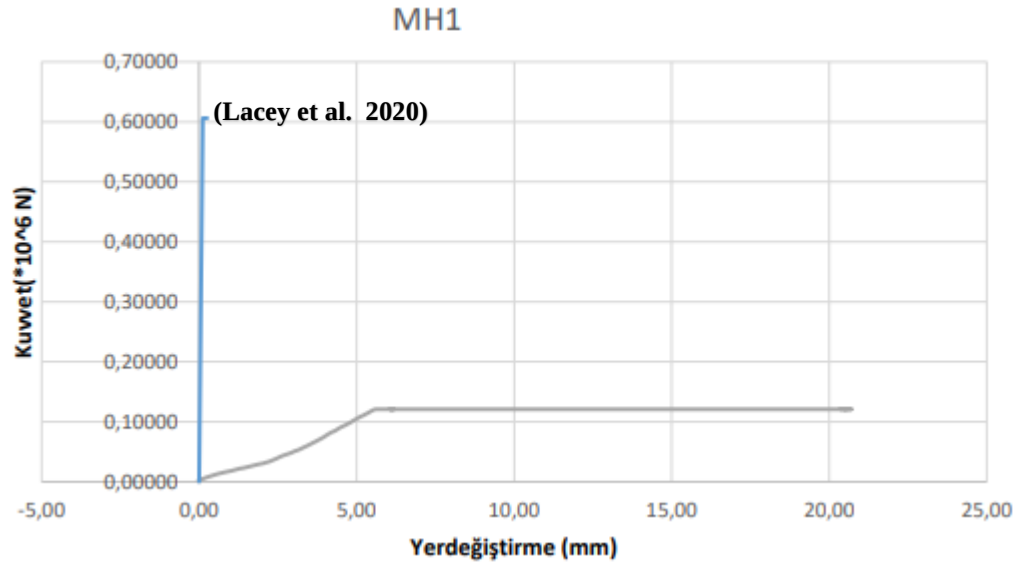


Şekil 4.27. MV1 numunesinin karşılaştırmalı M- Θ eğrisi

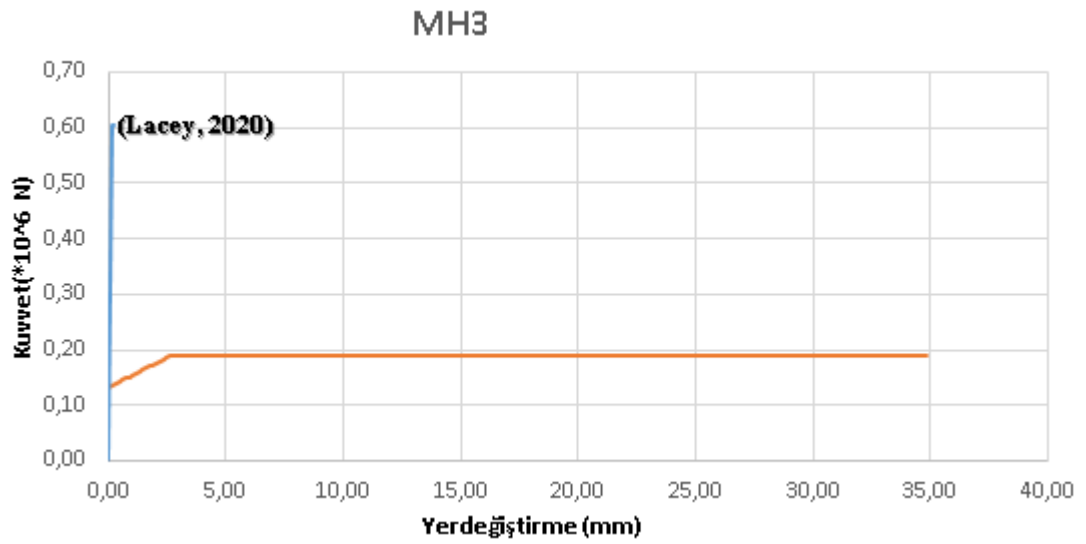


Şekil 4.28. MV2 numunesinin karşılaştırmalı M- Θ eğrisi

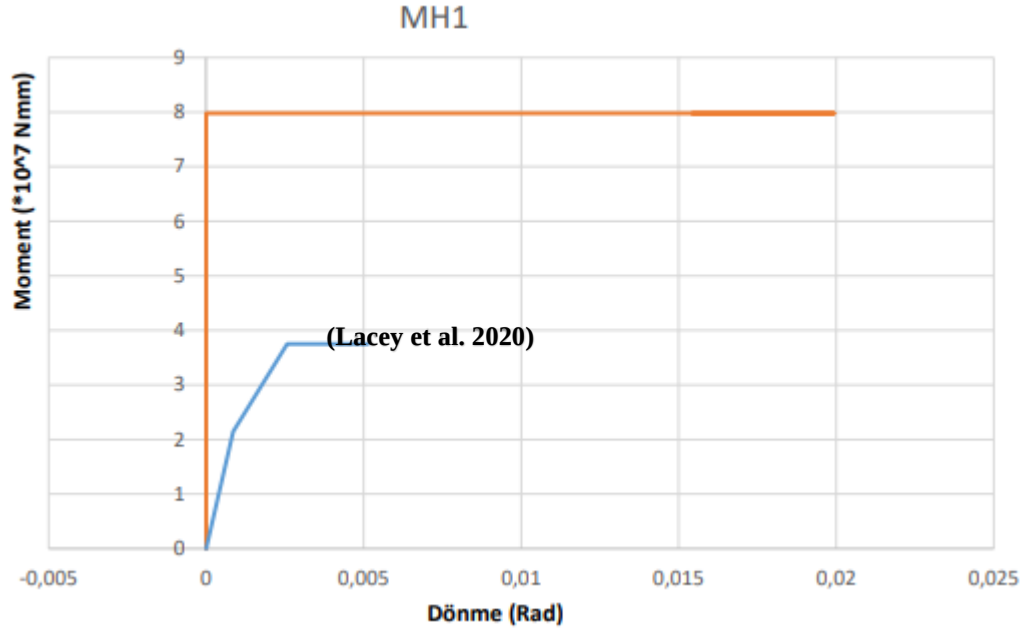
Şekil 4.29’da MH1 ve Şekil 4.30’da MH3 numunelerinin kuvvet deformasyon eğrileri ve Şekil 4.31’de MH1 ve Şekil 4.32’de MV3 moment-dönme eğrileri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Değerler arasında ve eğriler arasındaki farklılığı yorumlamak gerekirse; referans çalışmada yatay modüler birleşimin kuvvet-deformasyon eğrileri teorik olarak hesaplanırken göçme dikkate alınmadığından sadece kaymada bulonların kesme kuvvetini dikkate alarak maksimum yük hesaplanan teoriye dayanarak bilineer eğri çizilmiştir. Moment-dönme eğrileri ise Styles et al. (2016) tarafından deneysel olarak doğrulanmamış sonlu eleman modellemelerinden çıkarılan nonlineer eğri, trilineer olarak modellenerek kullanılmıştır. Deney yapılarak MH1 ve MH3 birleşim noktalarında hiç deforme olmayacak kadar rijit oldukları görülmüştür. Eğriler farklı olmasına rağmen toplamda eğrilerden okunan deformasyon miktarı 2-4 cm civarındadır. Teorik eğrinin deforme olmadan kırılması da bulonun makaslamaya uğrayarak kırılması varsayımına dayanmaktadır.



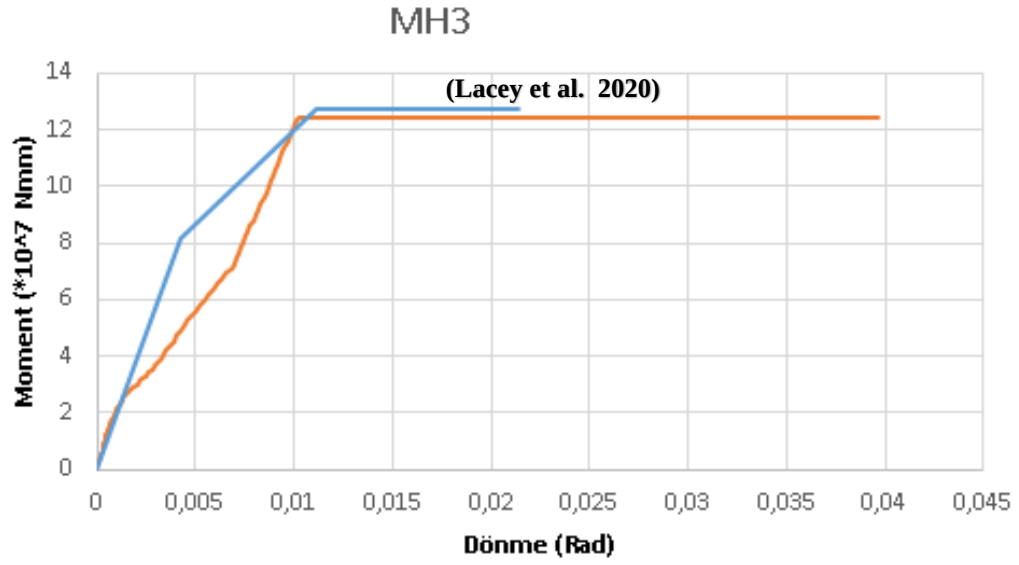
Şekil 4.29. MH1 numunesinin karşılaştırmalı F-d eğrisi



Şekil 4.30. MH3 numunesinin karşılaştırmalı F-d eğrisi



Şekil 4.31. MH1 numunesinin karşılaştırmalı M- Θ eğrisi

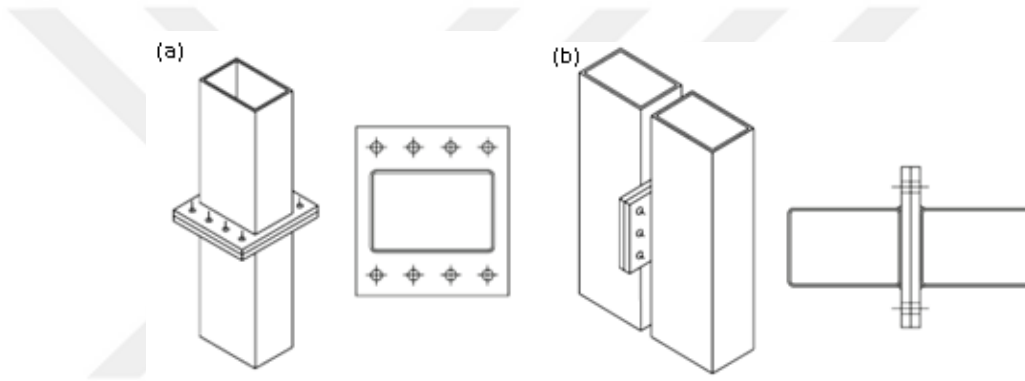


Şekil 4.32. MH3 numunesinin karşılaştırmalı M- Θ eğrisi

4.3. Nümerik Çalışma

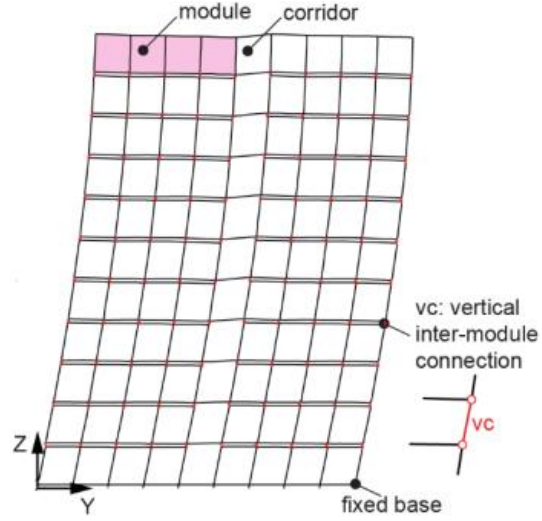
4.3.1. Tezde kullanılan referans çalışmalar

Styles et al. (2016)'ın önerdiği dikey bağlantıda, 300x200x6 RHS kesite sahip kolonların ucuna 370*410*25 boyutlarında uç plaka kaynaklanmış ve bu plakalar M24, 10.9 Sınıf bulonlarla bağlanmıştır. Şekil 4.33 (a)'da dikey bağlantının detayları verilmiştir. Yatay bağlantı için 300x200x6 RHS kolonlar; M24, 10.9 sınıf bulonlarla birleştirilmiş ve bağlantının detayları AS4100 bölüm 8'e göre belirlenmiştir. Şekil 4.33 (b)'de yatay bağlantıların detayları verilmiştir (Styles et al. 2016).

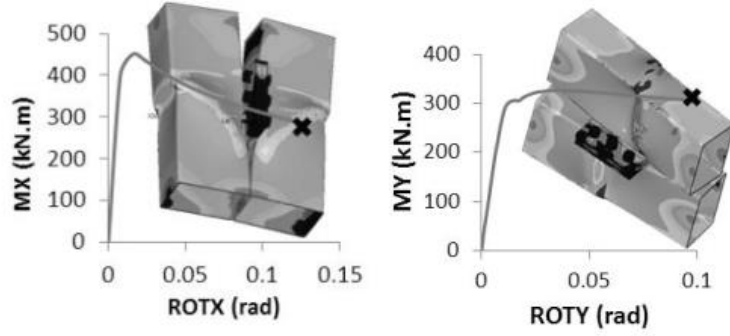


Şekil 4.33. (a) Dikey bağlantı detayları (b) yatay bağlantı detayları (Styles et al. 2016)

Bu bağlantıların davranışlarını araştırmak için sonlu elemanlar yöntemiyle modüler bina modellenmiştir. Bu binayı oluşturan modüller; 4*12*3,5 boyutlarındadır ve her bir modülün uzun kenarında beşer tane 300*200*6 RHS kesitli kolonlar, 200UB25 kesitli alt döşeme kiriş, 200UB22 kesitli üst döşeme kiriş bulunur. Modül içi bağlantılar yarı rijittir ve dikey modüller arasında 300 mm bırakılarak, Şekil 4.34'de görüldüğü gibi toplam 11 katlı model tasarlanmıştır. Bu bağlantıların F-d ve M- Θ davranışları sadece numerik analize dayanarak incelenmiştir ve sonuçlar ANSYS programından elde edilmiştir. Şekil 4.35'de x ve y yönündeki M- Θ diyagramları gösterilmiştir (Styles et al. 2016).

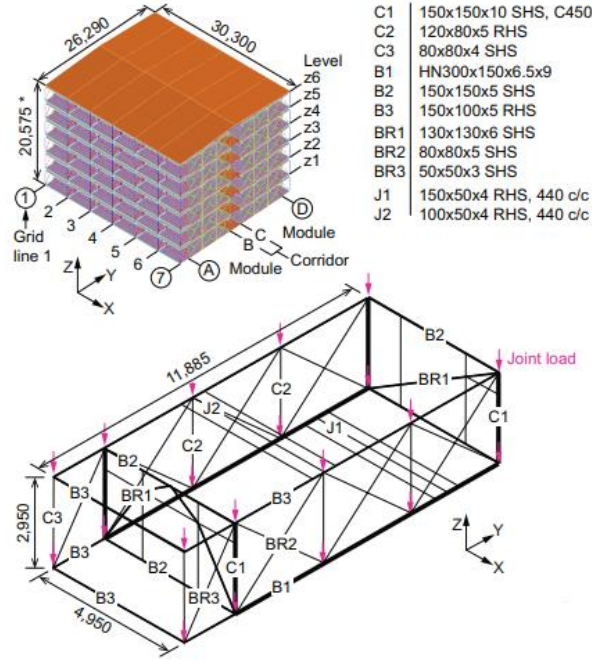


Şekil 4.34. Modüler binanın y-z eksen görüntüsü (Styles et al. 2016)



Şekil 4.35. X ve Y yönündeki M-Θ diyagramları (Styles et al. 2016)

Lacey et al. (2019b), Styles et al. (2016) tarafından incelenen binayı tasarlayıp, F-d ve M- Θ davranışlarını, basitleştirilmiş bilinear ve trilinear modellerin kullanıldığı sayısal modelleme tekniğiyle incelemiştir. Sayısal modellerin davranışları, Styles et al. (2016)'ın çalışmasındaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve doğrulanmıştır. Doğrulan sayısal modelleme tekniği daha sonra sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen altı katlı binaya entegre edilmiştir. Şekil 4.36'da modellenen 6 katlı modüler bina ve modül detayları verilmiştir.



Şekil 4.36. Modüler binanın ayrıntıları (Lacey et al. 2020)

Lacey et al. (2020)'in çalışmasında, modüler arası bağlantı rijitliğinin, modüler bina üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dikey bağlantıların başlangıç yay rijitliği, bağlantının 575 mm uzunluğunda iki ucu da sabitlenmiş 150*150*5 SHS kesitli prizmatik kirişten oluştuğu varsayılarak hesaplandığından tamamen rijit bir bağlantıyı temsil etmektedir. Hesaplanan rijitlik değerleri ve değerlerin hesaplandığı formüller Çizelge 4.2'de verilmiştir (Lacey et al. 2020).

Çizelge 4.2. Dikey bağlantıların başlangıç rijitliği (Lacey et al. 2020)

Link DoF	Description	Equation	Value
u1	Axial	$EA \times L^{-1}$	$9,8 \times 10^5 \text{ N} \times \text{mm}^{-1}$
u2	Shear	$12EI \times L^{-3}$	$1,2 \times 10^5 \text{ N} \times \text{mm}^{-1}$
u3	Shear	$12EI \times L^{-3}$	$1,2 \times 10^5 \text{ N} \times \text{mm}^{-1}$
r1	Torsion	$GJ \times L^{-1}$	$2,2 \times 10^9 \text{ N} \times \text{mm} \times \text{rad}^{-1}$
r2	Bending	$EI \times L^{-1}$	$3,4 \times 10^9 \text{ N} \times \text{mm} \times \text{rad}^{-1}$
r3	Bending	$EI \times L^{-1}$	$3,4 \times 10^9 \text{ N} \times \text{mm} \times \text{rad}^{-1}$

Yatay bağlantıların başlangıç yay rijitliği için Styles et al. (2016)'ın çalışmasındaki r1,r2 ve r3 ile aynı başlangıç rijitliği değerler kullanılmıştır. Bu değerler, dikey bağlantılar için benimsenen dönme rijitliğinden farklıdır çünkü dikey bağlantıların başlangıç rijitliği kolon özelliklerine dayanarak belirlenmiştir. Yatay bağlantılar için ötelenme rijitliği, Gunawardena (2016) tarafından sunulan cıvatalı bağlantıların kesme ve

çekme rijitlikleri için uygulanan Formül (1.1) kullanılarak belirlenmiştir. Yatay bağlantılar için rijitlik değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yatay bağlantıların başlangıç rijitliği (Lacey et al. 2020)

Link DoF	Description	Equation	Value
u1	Axial	$EA \times L^{-1}$	$3,0 \times 10^6 \text{N} \times \text{mm}^{-1}$
u2	Shear	$12EI \times L^{-3}$	$5,4 \times 10^6 \text{N} \times \text{mm}^{-1}$
u3	Shear	$12EI \times L^{-3}$	$5,4 \times 10^6 \text{N} \times \text{mm}^{-1}$
r1	Torsion	$GJ \times L^{-1}$	$2,0 \times 10^{10} \text{N} \times \text{mm} \times \text{rad}^{-1}$
r2	Bending	$EI \times L^{-1}$	$2,0 \times 10^{10} \text{N} \times \text{mm} \times \text{rad}^{-1}$
r3	Bending	$EI \times L^{-1}$	$2,0 \times 10^{10} \text{N} \times \text{mm} \times \text{rad}^{-1}$

$$k_{\text{bolt,shear}} = \frac{G \times A}{L} \quad (1.1.)$$

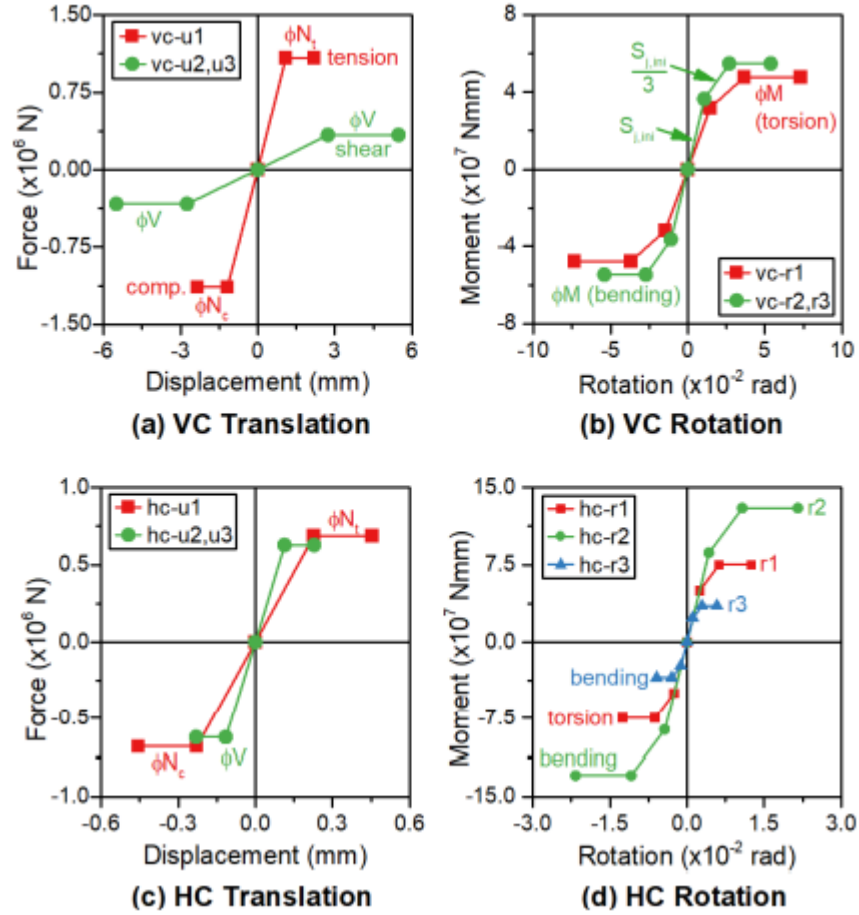
G: Cıvatanın kesme modülü

A: Cıvatanın çekme gerilme alanı

L: Plakalar arasındaki saplanmış uzunluk

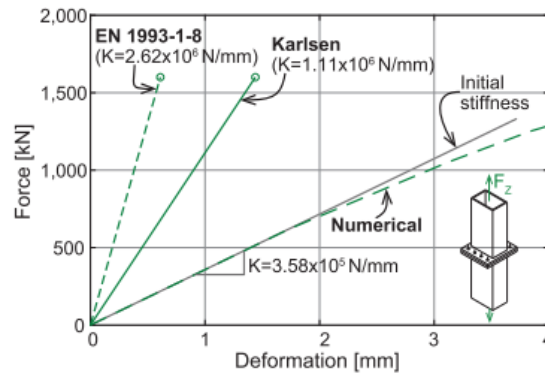
$k_{\text{bolt,shear}}$: Cıvatanın kesme rijitliği

Bu çalışmada, nonlinear elastik analiz için, SAP2000 modelde nonlinear link elemanın multilinear elastik özelliği tanımlanmıştır. Dikey bağlantılar için, 150x150x5 SHS kesitinin nihai kapasitesi Australian standardı AS4100’a göre belirlenmiştir. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’de verilen rijitlik değerlerine dayanarak F-d ve M- Θ davranışları için bi-lineer ve tri-lineer ilişkiler benimsenmiştir. F-d davranış için bi-lineer davranışta, kesit, faktörlü nihai kapasiteye ulaşınca kadar sabit başlangıç rijitliğine sahiptir. Dönme davranış için EN1993-1-8’e göre trilinear davranış benimsenmiştir. Başlangıç rijitliği, uygulanan momentin, faktörlü moment kapasitesinin üçte ikisine ulaşınca kadar devam ettirilmiştir ve ardından üçte biri kadar başlangıç rijitliği azaltılmıştır. Daha sonra rijitlik, faktörlü nihai kapasiteye ulaşınca kadar sabit tutulmuştur. Yatay bağlantılar için F-D ve M- Θ eğrileri benzer şekilde yapılmıştır. Dikey ve yatay bağlantıların F-d ve M- Θ eğrileri Şekil 4.37’de verilmiştir (Lacey et al. 2020).

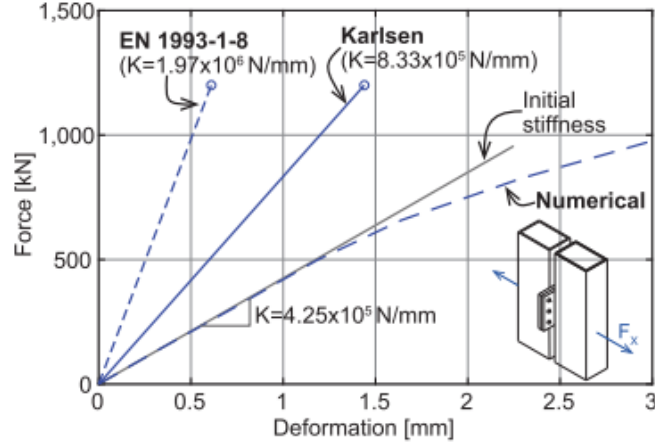


Şekil 4.37. Dikey ve yatay bağlantıların F-d ve M- Θ eğrileri (Lacey et al. 2020)

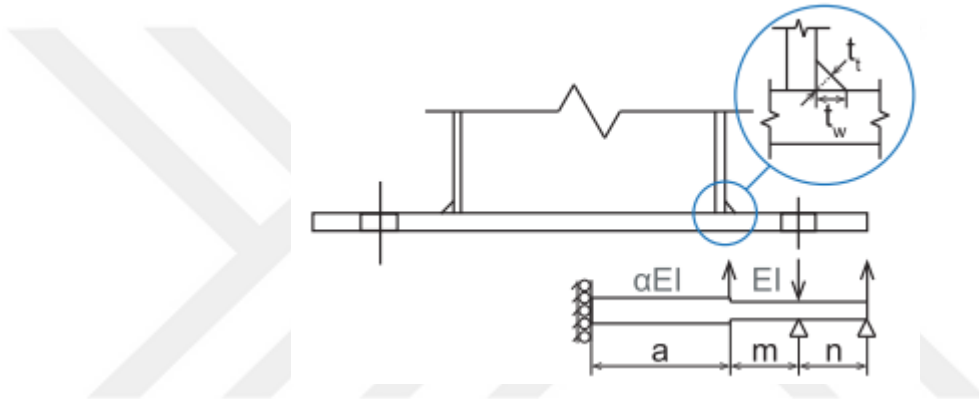
Styles et al. (2016)'ın nümerik çalışmasından elde edilen hem dikey hem de yatay bağlantıların eksenel öteleme rijitlikleri, hem EN 1993-1-8'e göre hem de Aalberg and Karlsten (2012)'in çalışmasıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.38'de dikey bağlantılı numunenin, Şekil 4.39'da yatay bağlantılı numunenin karşılaştırılmalı F-d eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.38. Dikey bağlantılı numunenin karşılaştırılmalı F-d grafiği (Lacey et al. 2019b)



Şekil 4.39. Yatay bağlantılı numunenin karşılaştırılmalı F-d grafiği (Lacey et al. 2019b)



Şekil 4.40. Karlsen'in modeli (Aalberg and Karlsen 2012)

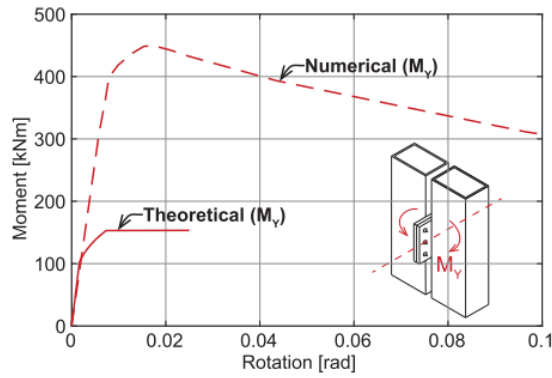
Aalberg and Karlsen (2012), SHS kesit kullanıldığı modelde (Şekil 4.40) yük, kaynak tarafından uç plakaya aktarılır. Bu, uç plakasının dönmesine ve dikey yönde yer değiştirmesine neden olur. Eksenel öteleme rijitliği için Aalberg and Karlsen (2012)'in önerdiği Formül (1.2) doğruluğu Aalberg and Karlsen (2012)'in çalışmalarıyla kanıtlanmıştır. Şekil 4.40'da a, m ve n mesafeleri gösterilmiş ve $\alpha;1$ alınmıştır. Eurocode ile hesaplanan bağlantının rijitliği tam doğru sonuçlar vermediğinden, Aalberg and Karlsen (2012)'in çalışmasında uç plakanın davranışı daha doğru tahmin edildiğinden, bu tez kapsamında hem yatay hem de dikey modüler arası bağlantıların eksenel ötelenme rijitlikleri için Aalberg and Karlsen (2012)'in önerdiği rijitlik değeri alınmıştır.

$$k_p = \frac{2(3\alpha + 3m\alpha + n\alpha)l_{eff,ini}t_p^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nm\alpha + 12\alpha m + 12\alpha n)} \quad l_{eff,ini} = \frac{13l_{eff}}{15} \quad (1.2)$$

k_p :Eğilmede uç plaka için rijitlik değeri

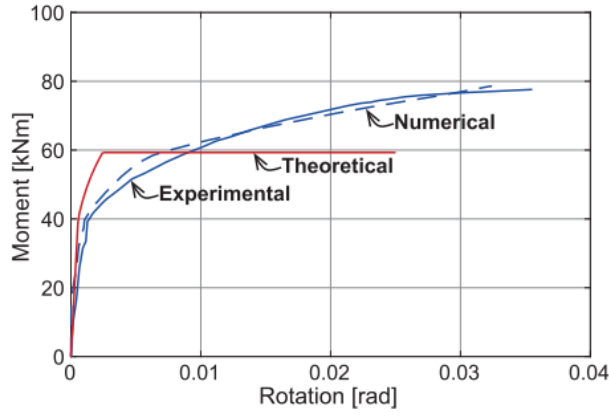
l_{eff} :Alternatif Rijitlik

Yatay bağlantılı numune için gibi Styles et al. (2016)'in numerik çalışmasının ve teorik çalışmanın M-dönme eğrileri Şekil 4.41'de verilmiştir. Bu tez kapsamında yatay modüler arası bağlantının dönme rijitlik değeri bu grafikten alınmıştır.



Şekil 4.41. Teorik çalışmada yatay bağlantılı numune için M- Θ grafiği (Styles et al. 2016).

Sultana and Youssef (2020), 150*150*9 SHS kolonlara ve 4 yüksek mukavemetli M20 bulonlara sahip, uç plakalı ve cıvatalı dikey bağlantı önermiş, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapmış ve Wheeler et al. (1998) deneysel çalışmasıyla karşılaştırmıştır EN 1993-1-8 (CEN 2005) baz alınarak teorik, Sultana and Youssef (2020) nümerik ve Wheeler et al. (1998) deneysel çalışması Şekil 4.42'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu tez kapsamında dikey bağlantının eksenel dönme rijitlik değerleri için Şekil 4.42'de verilen Sultana and Youssef (2020) nümerik çalışmasının değerleri kullanılmıştır.

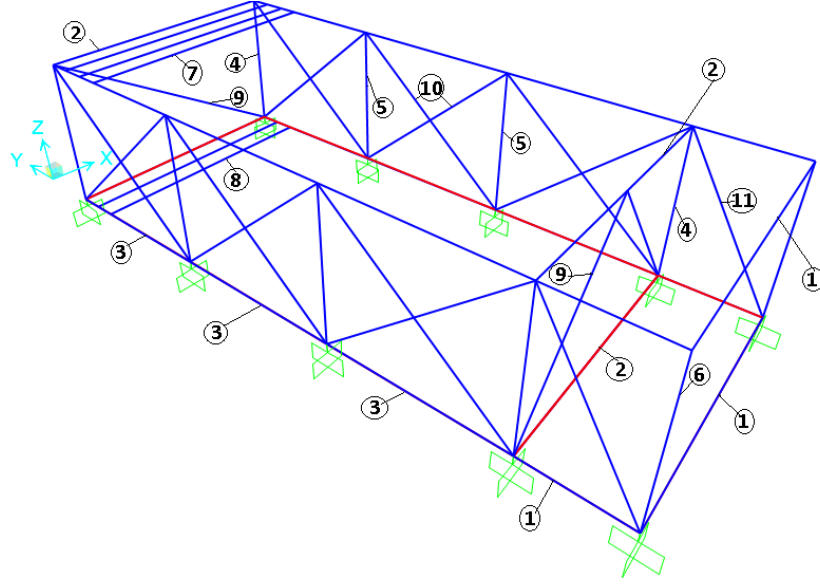


Şekil 4.42. Deneysel (Wheeler et al. 1998), Nümerik (Sultana and Youssef 2020), Teorik (CEN 2005) karşılaştırmalı çalışma.

4.3.2. Yapısal analiz

Bu çalışmada, modüler arası bağlantıların davranışının genel bina üzerindeki etkisini anlamak için Lacey et al. (2020)'in SAP2000 ile modellediği altı katlı bina referans alınmıştır. Bu 6 katlı binaya Bölüm 4.1.'de gerçekleştirilen deney sonuçlarından elde edilen birleşim davranışları SAP2000 programı yardımıyla entegre edilerek birleşimin gerçek davranışını dikkate alan analiz gerçekleştirilmiştir.

Analizi gerçekleştirilen bina 4.95 x 11.885 x 2.95 m boyutlara sahip modüllerden oluşmuştur. Modüller uzun kenarlarında beşer tane kolonlara sahiptir ve modülleri oluşturan kolon ve kirişlerin rijit bağlanıldığı varsayılmıştır. Şekil 4.43'de modül ve modülü oluşturan elemanların konumları verilmiştir. Çizelge 4.4' de modülü oluşturan elemanların detayları verilmiştir. Modüllerin kısa ve uzun kenarlarına destek elemanları yerleştirilmiştir. 2,5 m genişliğindeki merkezi koridorun, her iki yanına modüller yerleştirilerek 30,3*26.2,*21,15 m boyutlarında altı katlı bina modellenmiştir. Koridor, 450 mm aralıklarla kirişler yerleştirilerek oluşturulmuştur ve bu kirişler modelde pinlenerek bağlanmıştır. Bitişik modüller birbirlerine bağlayan link elemanlara nonlineer elastik özelliklerinden biri olan multilinear elastik özellik atanmıştır.

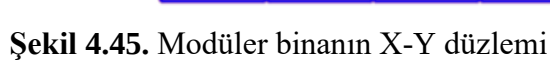
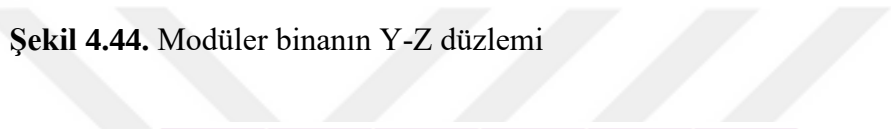


Şekil 4.43. Modülü oluşturan elemanların konumu

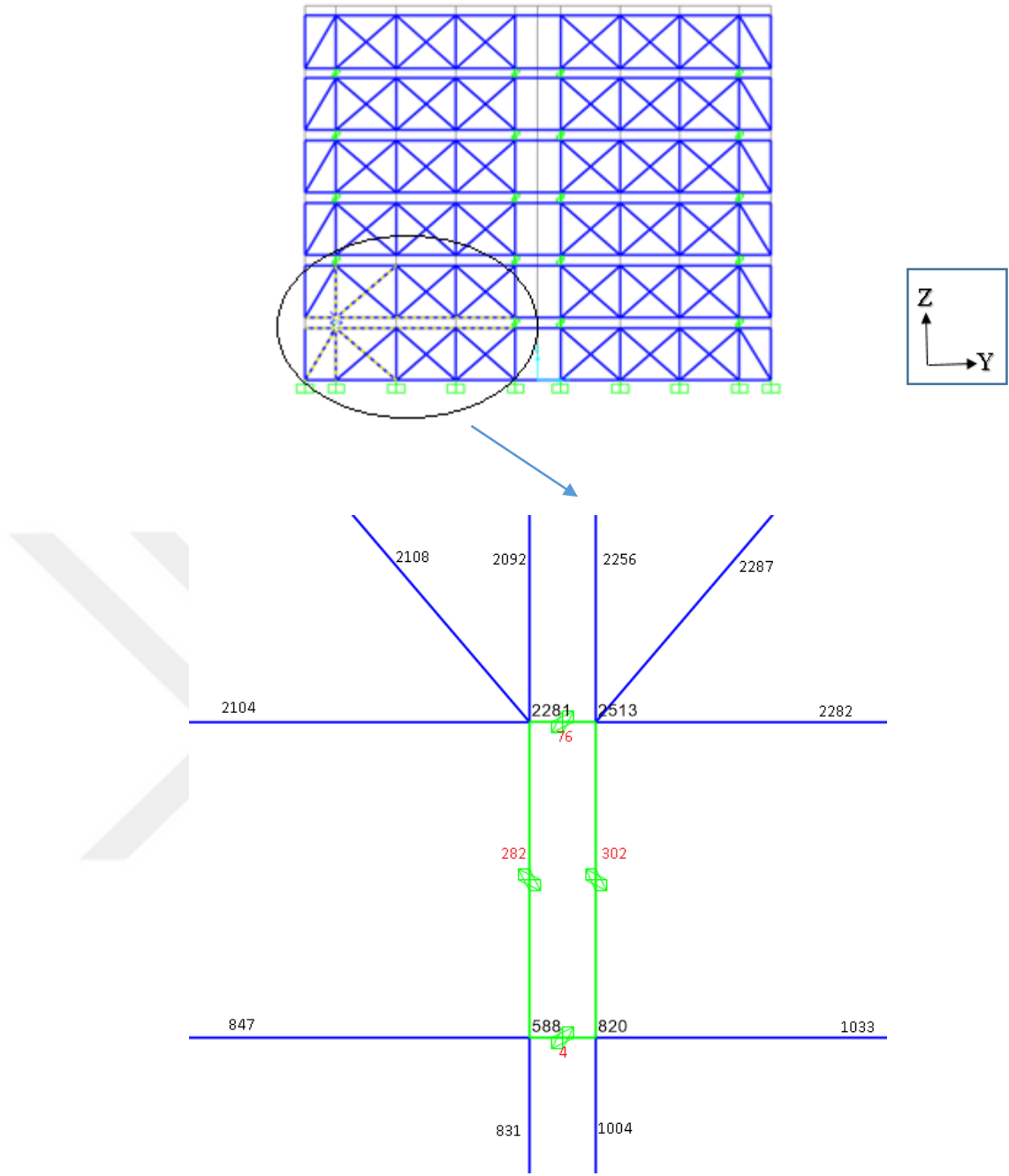
Çizelge 4.4. Modül elemanlarının detayları

Elemanın numarası	Elemanın Boyutları	Eleman Kesiti
1	150*100*5	RHS
2	150*150*5	SHS
3	300*150*6,5*9	HN
4	150*150*10	SHS
5	120*80*5	RHS
6	80*80*4	SHS
7	100*50*4	RHS
8	150*50*4	RHS
9	130*130*6	SHS
10	80*80*5	SHS
11	50*50*3	SHS

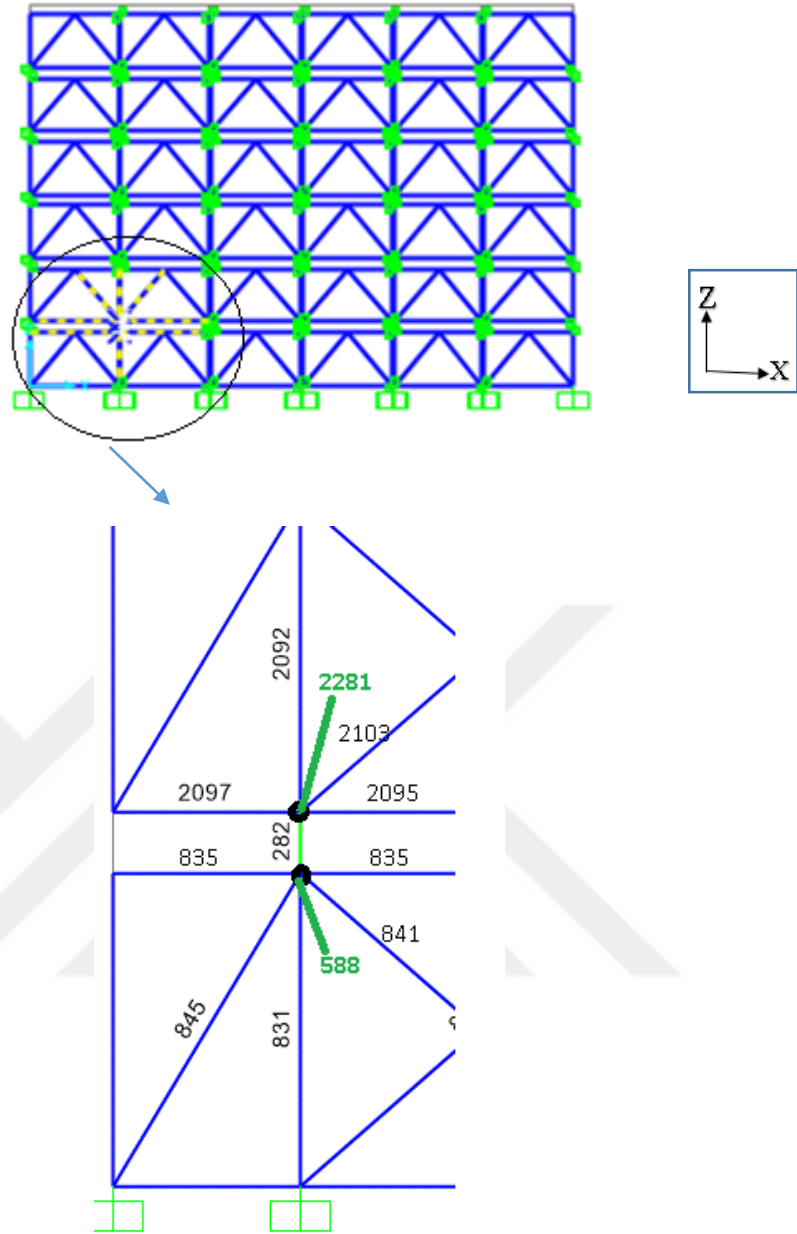
Şekil 4.34’de binanın y-z düzleminin görüntüsü, Şekil 4.45’de binanın x-y düzleminin görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.44’de görüldüğü gibi üst üste dizilen modüller Z yönünde dikey link elemanla bağlandığı gösterilmiştir fakat yatay bağlantılar y-z düzleminde gözükmemektedir. Şekil 4.45’de bitişik modülleri x yönünde bağlayan yatay link elemanlar gösterilmiştir.



Modüler arası bağlantı rijitliğinin bina üzerindeki etkisini araştırmak için bu tez kapsamında, önce karşılaştırma yapabilmek için verilen referans çalışmanın dikkate aldığı teorik eğrilerle de binanın analizi yapılmıştır. Daha sonra birleşim davranışını belirlemek için statik eğilme deneyi yapılan bağlantılardan elde edilen veriler SAP2000 programıyla modellenen binaya entegre edilerek analizi gerçekleştirilmiştir. Bu entegrasyon bitişik modüller birbirlerine bağlayan link elemanlara nonlinear elastik özelliklerinden biri olan multilinear elastik özellik atanarak gerçekleştirilmiştir. Multilinear elastik özellikli link eleman olarak modellenen birleşimlerin U1-U2-U3 ve R1-R2-R3 yönleri nonlinear seçilmiş ve rijitlik değerleri deneysel sonuçlardan elde edilen veriler girilerek SAP2000 de multilinear eğriler oluşturulmuştur. Bu dikey ve yatay nonlinear link elemanların aksel ötelenme ve dönme rijitlik değerleri (Şekil 4.41) ve (Şekil 4.42) daha önce literatürde çalışılmış olduğundan doğrudan literatürden alınmıştır (Styles et al. 2016). Kesmedeki ötelenme ve dönme rijitlik değerleri için deneyden elde edilen kuvvet - yerdeğiştirme (Şekil 4.13, Şekil 4.16, Şekil 4.19, Şekil 4.22) ve moment-dönme verileri (Şekil 4.14, Şekil 4.17, Şekil 4.20, Şekil 4.23) girilmiştir. Bu modüler binaların kuvvet aktarma mekanizmalarını incelemek ve karşılaştırmak için 76 numaralı yatay link eleman ve 282 numaralı dikey link eleman seçilmiştir (Şekil 4.46 ve Şekil 4.47). Bu link elemanların bağlı olduğu düğüm noktaları, çubuk elemanlar ve bu elemanların ölü yükleri ve x-y yönlerindeki rüzgar yükleri EK 1’de referans çalışma Lacey et al. (2020) , EK 2’de modellenen 6 katlı bina, EK 3’de modellenen 9 katlı bina, EK 4’de modellenen 12 katlı bina verilmiştir.

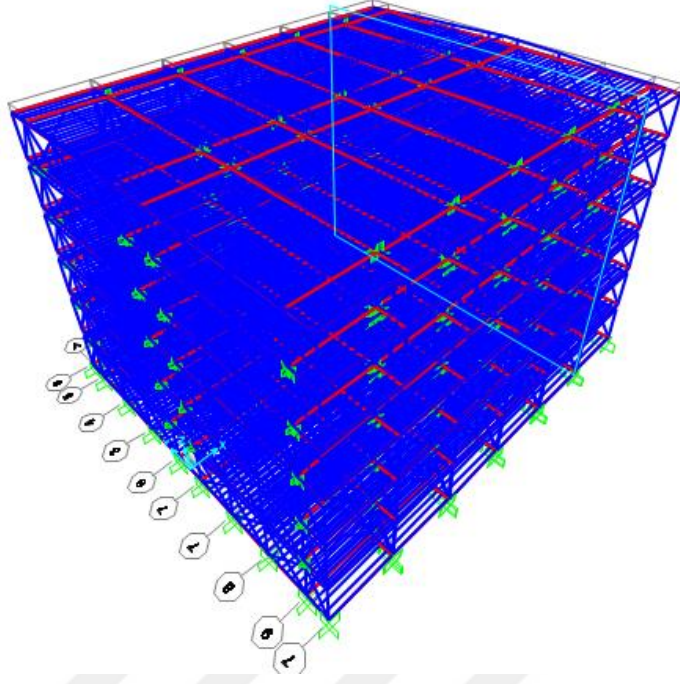


Şekil 4.46. Y-Z düzlemindeki link elemanların detayları

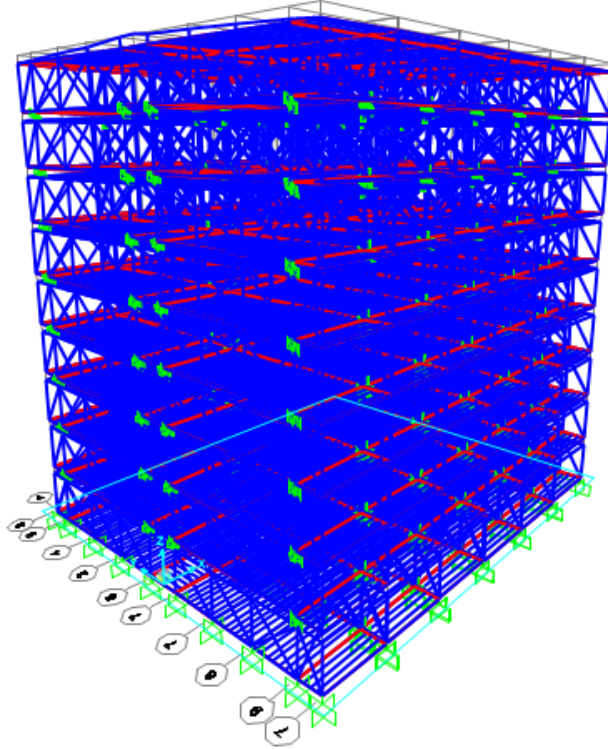


Şekil 4.47. X-Z düzlemindeki link elemanların detayları

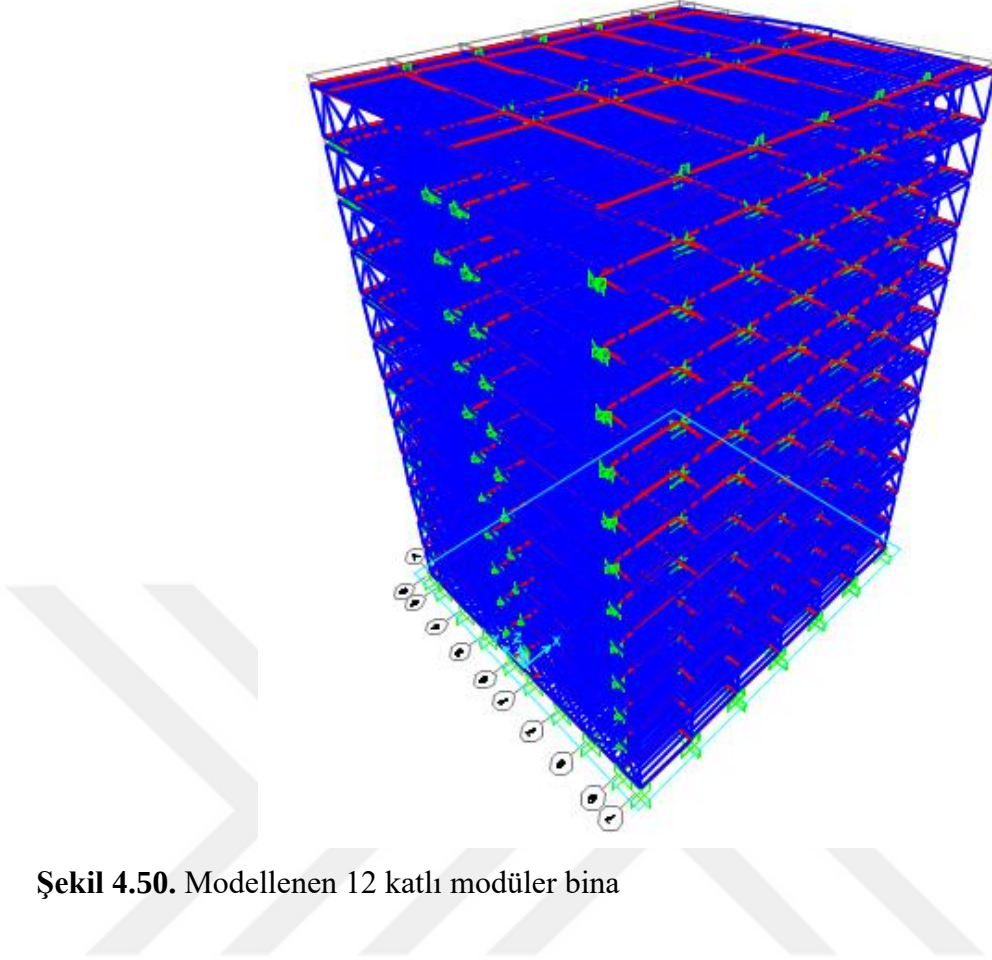
Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de görüldüğü gibi 282 numaralı dikey link eleman 588 ve 2281 numaralı düğüm noktalarına bağlıdır. Modellenen 6,9 ve 12 katlı binaların (Şekil 4.48, Şekil 4.49, Şekil 4.50) ölü, x ve y yönündeki rüzgar yüklerinden dolayı birleşimin aktardığı düğüm uç kuvvet ve moment durumunu incelemek için 2281 numaralı düğüm noktasına bağlı 2092 numaralı çubuk seçilmiştir. Bu elemanlar için kat sayısı ve yük durumuna göre değişen sonuçlar, moment ve kuvvet için sırasıyla Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de grafik halinde özetlenmiştir.



şekil 4.48. Modellenen 6 katlı modüler binanın görüntüleri

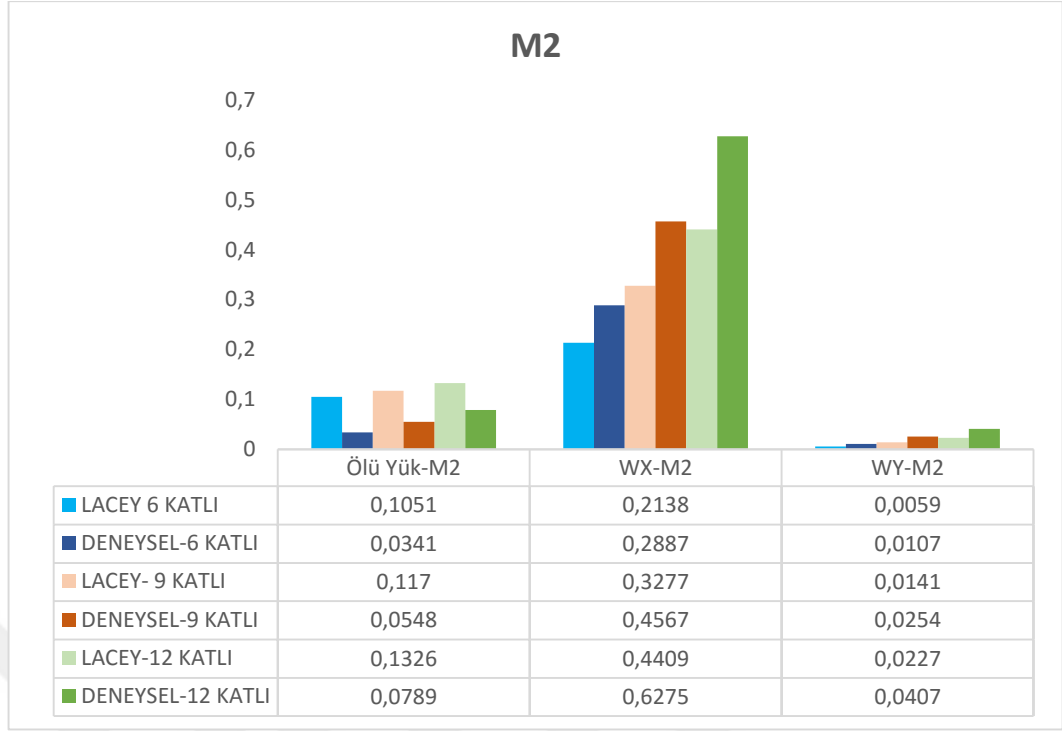


şekil 4.49. Modellenen 9 katlı modüler bina

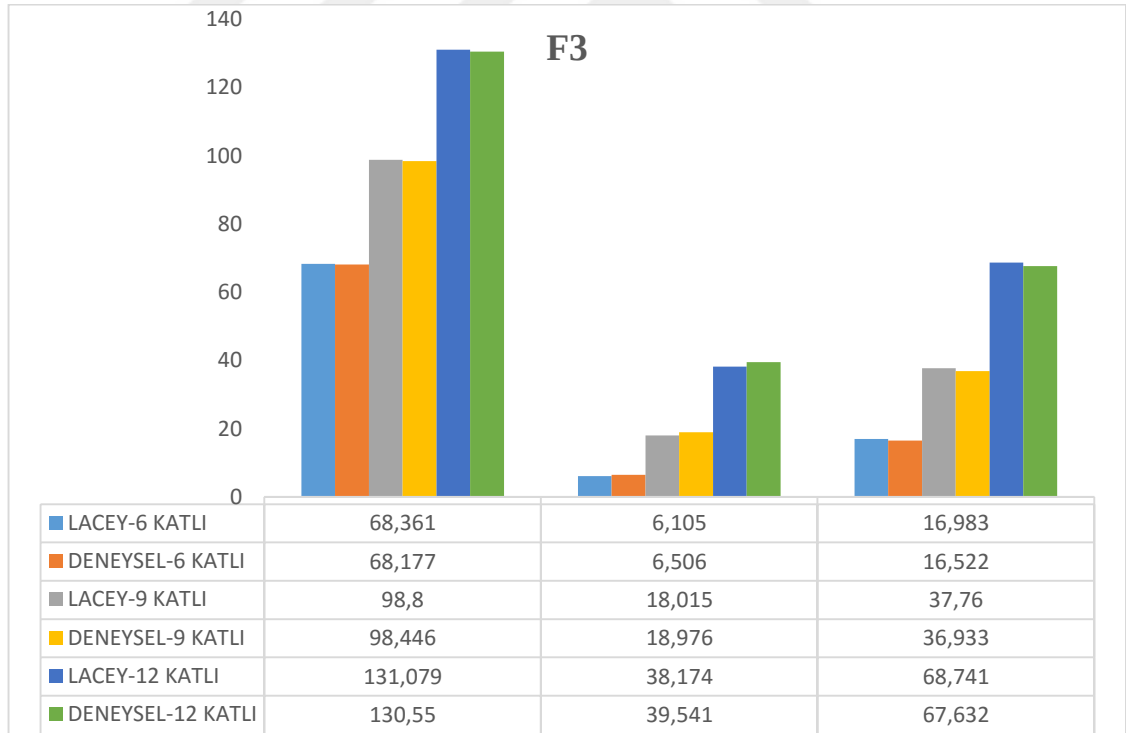


Şekil 4.50. Modellenen 12 katlı modüler bina

6 katlı modellenen binada 2092 numaralı çubukta gerçek davranışı dikkate alan deneysel çalışma ile elde edilen moment değerleri, referans çalışmanın analiz sonuçlarına göre ölü yüklemelerde %67 azalırken, x yönündeki rüzgar ve y yönündeki rüzgar yüklemelerinde sırasıyla %35 ve %45 artış göstermiştir. Deneysel çalışma verileri girilerek elde edilen birleşimin aktardığı kuvvet değerleri ise, referans çalışmanın analiz sonuçlarına göre x yönündeki rüzgar %0,6 atarken, ölü yüklemelerde ve y yönündeki rüzgar yüklemelerinde sırasıyla %0,3 ve %2,7 azalış göstermiştir. 9 ve 12 katlı deneysel çalışma ile elde edilen moment ve kuvvet değerleri ile referans çalışmanın analiz sonuçlarından elde edilen değerler Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de verilmiştir.



Şekil 4.51. Karşılaştırmalı Moment Grafiği



Şekil 4.52. Karşılaştırmalı Kuvvet Grafiği

Sonuç olarak Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de görüldüğü gibi Lacey et al. (2020)’in ürettiği ve deneysel verilerle link eleman olarak simule edilen birleşimlerin yük aktarım değerlerini analiz sonuçlarında karşılaştırdığımızda kuvvet değerlerinde çok az bir

farklılık varken moment değerlerinde daha gözle görülür bir farklılık oluşmuştur. Bu sebeple Lacey et al. (2020)'in yapmış olduğu tam rijitlik kabulleri moment aktarımlarında da görülmektedir. Bu tez kapsamında deneysel sonuçlarla yapılan analiz sonuçlarına göre de daha rijit kabuller yapıldığı görülmektedir. Bu rijitlik kabulü ile gerçek davranış arasındaki farklılık kat sayısı arttıkça artmaktadır. Bu da çok katlı yapılarda şiddetli rüzgârlarda ötelemeyi öngörememeye sebep olacaktır.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Geleneksel binalara göre ek modüler arası birleşimlere sahip olan yüksek katlı modüler binalarda modüler arası yatay ve dikey bağlantıların davranışları deneysel çalışma ile belirlenmiş, herhangi bir yanal destek kullanılmadan sadece modüllerden oluşan çok katlı binaların birleşimleri gerçek deneysel davranışı entegre edilerek yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, literatürde var olan varsayımlara dayanan teorik birleşim davranışı ile modellenen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca çok katlı modüler binalarda bağlantıların rolünü araştırmak için modelin kat sayısı artırılarak, yük aktarım mekanizmaları incelenmiştir.

Referans çalışmasında teorik formüllere dayanarak dikey modüler arası bağlantının, tamamen kolon kesitinin özelliklerine dayanan rijitlik hesaplamaları yapılmış ve tam rijit kabul edilmiştir. Bu tezde birleşimlerin gerçek davranışlarını incelemek için yapılan deneyde, MV1 ve MV2 numunesinin deforme olmuş halinden de anlaşılabileceği gibi, göçme modu profillerden değil birleşimlerden kaynaklanmasına rağmen rijit sınıfındadır. Bu sebeple modüler binalarda asıl davranışı belirleyen faktör birleşimin rijitliğidir. Referans çalışmasında, yatay modüler birleşimin davranışı, birleşimin göçme modu dikkate alınmadan sadece kaymada bulonların kesme kuvveti dikkate alınarak hesaplanmıştır. Yatay birleşimlerin gerçek davranışları için yapılan deneyde MH1 ve MH3 numunelerinin birleşimleri hiç deforme olmayacak kadar rijit oldukları görülmüştür.

Referans çalışmasında bağlantılar tam rijit kabul edildiğinden ve deneyde kullanılan birleşim tiplerinin de rijit olmasından dolayı yapılan sayısal çalışmada da hem dikey hem de yatay bağlantıların analizi referans çalışmasıyla çok benzer çıkmıştır. Ayrıca sayısal modellemede kat sayısını artırarak bağlantının davranışı incelenmiş ve kat sayısı arttıkça moment dağılımı arasındaki artış görülmüştür. Birleşimlerin rijit olması daha çok kuvvet karşıladığı manasına gelir. Ancak kat sayısı arttıkça yatay kuvvetlerin artmasıyla oluşacak enerjinin sönmelenmesi için birleşimler tam rijit değil yarı rijit olacak şekilde tasarlanmalıdır. Bunun için modüler arası bağlantılar üzerinde daha fazla araştırma yapılmalı ve modüler binaların stabilitesi ve bütünlüğü için bağlantıların gerçek davranışı bulunmalıdır.

KAYNAKLAR

- Anonymous, 2012a. Web Sitesi: <https://inhabitat.com/200-chinese-workers-erect-a-30-storey-prefabricated-hotel-in-just-15-days-video/>, Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2012b. Web Sitesi: <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/areditorial/paradigm-shift/2>, Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2014. Web Sitesi: [http:// A History of Modular Buildings - Reds10](http://AHistoryofModularBuildings-Reds10), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2016. Web Sitesi: [http://www. bdcnetwork.com/asias-modular-miracle](http://www.bdcnetwork.com/asias-modular-miracle), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2017. Web Sitesi: [https:// constructionmanagement.co.uk/modular-h6its-heig5hts-nor4th-london/](https://constructionmanagement.co.uk/modular-h6its-heig5hts-nor4th-london/), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2019a. Web Sitesi: [http:// A Brief History of Modular Construction | by Deluxe Modular | Deluxe Modular News & Updates | Medium](http://ABriefHistoryofModularConstruction|byDeluxeModular|DeluxeModularNews&Updates|Medium), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2019b. Web Sitesi: [http:// The History of Modular Construction - Satellite Shelters \(satelliteco.com\)](http://TheHistoryofModularConstruction-SatelliteShelters(satelliteco.com)), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2019c. Web Sitesi: [http: The Clement Canopy | Dragages Singapore](http://TheClementCanopy|DragagesSingapore), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2019d. Web Sitesi: [https://www. building.co.uk/buildings/the-skys-the-limit-see-the-worlds-tallest-modular-tower-in-croydon/5101741.article](https://www.building.co.uk/buildings/the-skys-the-limit-see-the-worlds-tallest-modular-tower-in-croydon/5101741.article), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonim, 2020a. Web Sitesi: [http:// Kristal Saray / Joseph Paxton \(1851\) - Arkitektuel](http://KristalSaray/JosephPaxton(1851)-Arkitektuel), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2020b. Web Sitesi: [http:// World's First Prefabricated Hospital — Akerlof | MMC Consultants](http://WorldsFirstPrefabricatedHospital—Akerlof|MMCConsultants), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2020c. Web Sitesi: [http://www. constructionworld.in/latest-construction-news/real-estate-news/all-about-the-worlds-tallest-modular-building/23967](http://www.constructionworld.in/latest-construction-news/real-estate-news/all-about-the-worlds-tallest-modular-building/23967), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2021. Web Sitesi: [http:// allears.net/2021/10/03/the-history-behind-walt-disney-worlds-original-resort-hotels](http://allears.net/2021/10/03/the-history-behind-walt-disney-worlds-original-resort-hotels), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022a. Web Sitesi: [http:// Modular Definition & Meaning - Merriam-Webster](http://ModularDefinition&Meaning-Merriam-Webster), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022b. Web Sitesi: [http:// tr.amerisitestorage.com/2037-when-the-sears-catalog-sold-everything-from-houses-to.html](http://tr.amerisitestorage.com/2037-when-the-sears-catalog-sold-everything-from-houses-to.html), Erişim Tarihi: 18.04.2022.

- Anonim, 2022c. Web Sitesi: [http:// Quonset Hut Nedir? - 2022 \(history-hub.com\)](http://QuonsetHutNedir?), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022d. Web Sitesi: [http:// Get Details on Zachry Construction's Hilton Palacio del Rio Project \(zachryconstructioncorp.com\)](http://GetDetailsonZachryConstruction'sHiltonPalaciodelRioProject), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022e. Web Sitesi: [http:// Hilton Palacio del Rio - Wikipedia](http://HiltonPalaciodelRio-Wikipedia), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022f. Web Sitesi: http://en.wikipedia.org/wiki/Nakagin_Capsule_Tower, Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022g. Web Sitesi: http://en.wikipedia.org/wiki/Lloyd%27s_building, Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022h. Web Sitesi: [http:// www.modular.org](http://www.modular.org), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022i. Web Sitesi: [http:// www.potteriesheavyhaulage.com/2020/09/23/out-of-gauge-containers-and-modular-building-transport](http://www.potteriesheavyhaulage.com/2020/09/23/out-of-gauge-containers-and-modular-building-transport), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022i. Web Sitesi: [http:// news.cision.com/metsa-wood/r/estonia-s-harmet-manufactures-prefabricated-housing-modules-at-speed,c3249944](http://news.cision.com/metsa-wood/r/estonia-s-harmet-manufactures-prefabricated-housing-modules-at-speed,c3249944), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022j. Web Sitesi: [http:// builtoffsite.com.au/emag/issue-04/new-29-storey-modular-build-towers-london](http://builtoffsite.com.au/emag/issue-04/new-29-storey-modular-build-towers-london), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022k. Web Sitesi: [http:// Best practice for light steel framing – newsteelconstruction.com](http://Bestpracticeforlightsteelframing-newsteelconstruction.com), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022l. Web Sitesi: [http:// www.hickory.com.au/wp-content/uploads/2021/11/hickory-building-systems-overview.pdf](http://www.hickory.com.au/wp-content/uploads/2021/11/hickory-building-systems-overview.pdf), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022m. Web Sitesi: [http:// www.hickory.com.au/project/collins-house](http://www.hickory.com.au/project/collins-house), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022n. Web Sitesi: [http:// www. collinshousemelbourne.com.au/main-site](http://www.collinshousemelbourne.com.au/main-site), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022o. Web Sitesi: <http://www.hickory.com.au/project/la-trobe-tower>, Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022ö. Web Sitesi: [http://www. irwinconsult.com.au/case_studies/soho-apartments-case-study](http://www.irwinconsult.com.au/case_studies/soho-apartments-case-study), Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022p. Web Sitesi: [http://www. skyscrapercenter.com/building/t30-hotel/14432](http://www.skyscrapercenter.com/building/t30-hotel/14432), Erişim Tarihi: 18.04.2022.

- Anonymous, 2022r. Web Sitesi: <http://www.skyscrapercenter.com/building/j57-mini-sky-city/19743>, Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022s. Web Sitesi: <https://bmce.ie/portfolio/apex-house>, Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Anonymous, 2022ş. Web Sitesi: <https://www.shoparc.com/projects/b2>, Erişim Tarihi: 18.04.2022.
- Aalberg, A. and Torp, F. 2012. Bolted RHS end-plate joints in axial tension. Nordic Steel Construction Conference, 5-7 September, 12, Oslo, Norway.
- Arrieta Ferrer, M. 2019. Multi-storey buildings in modular construction. Master's Thesis, Universidad del Pais Vasco, Euskal Herriko Unibertsitatea, 103, Spain.
- Birgersson, B. 2004. The Open House 3D Modulus System. The Swedish Institute of Steel Construction, 229(3), 1-96.
- CEN, E. 2005. 1-8 Eurocode 3: Design of Steel Structures–Part 1–8: Design of Joints. European Committee for Standardization, Brussels.
- Chen, Z., Li, H., Chen, A., Yu, Y., Wang, H. 2017a. Research on pretensioned modular frame test and simulations. *Engineering Structures*, 151, 774-787.
- Chen, Z., Liu, J., Yu, Y. 2017b. Experimental study on interior connections in modular steel buildings. *Engineering Structures*, 147, 625-638.
- Chen, Z., Liu, Y., Zhong, X., Liu, J. 2019. Rotational stiffness of inter-module connection in mid-rise modular steel buildings. *Engineering Structures*, 196, 109273.
- Cho, B. H., Lee, J. S., Kim, H., Kim, D.-J. 2019. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading. *Applied Sciences*, 9(9), 1929.
- Chua, Y., Liew, J. R., Pang, S. 2020. Modelling of connections and lateral behavior of high-rise modular steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 166, 105901.
- Dai, X. M., Zong, L., Ding, Y., Li, Z. X. 2019. Experimental study on seismic behavior of a novel plug-in self-lock joint for modular steel construction. *Engineering Structures*, 181, 143-164.
- Deng, E. F., Zong, L., Ding, Y., Luo, Y. B. 2018. Seismic behavior and design of cruciform bolted module-to-module connection with various reinforcing details. *Thin-Walled Structures*, 133, 106-119.
- Dhanapal, J., Ghaednia, H., Das, S., Velocci, J. 2019. Structural performance of state-of-the-art VectorBloc modular connector under axial loads. *Engineering Structures*, 183, 496-509.

- Doh, J. H., Ho, N. M., Miller, D., Peters, T., Carlson, D., Lai, P. 2016. Steel bracket connection on modular buildings. *J Steel Structure Construction*, 121, 2472-0437.
- Farnsworth, D., Principal, A. 2014. Modular tall building design at Atlantic Yards B2. *Proceedings of CTBUH 2014 International Conference*, 492-499, Shanghai, China.
- Fathieh, A. and Mercan, O. 2014. Three-dimensional, nonlinear, dynamic analysis of modular steel buildings. *Structures Congress 2014*, 3-5 April, 2466-2477, Boston, Massachusetts, United States.
- Fathieh, A. and Mercan, O. 2016. Seismic evaluation of modular steel buildings. *Engineering Structures*, 122, 83-92.
- Formisano, A., Landolfo, R., Mazzolani, F. 2015. Robustness assessment approaches for steel framed structures under catastrophic events. *Computers & Structures*, 147, 216-228.
- Gardiner, P. 2015. The construction of a high-rise development using volumetric modular methodology. *Proceedings of Council on Tall Buildings Urban Habitat (CTBUH) Conference, The Future of Tall*, 136-143, New York, USA.
- Gunawardena, T. 2016. Behaviour of prefabricated modular buildings subjected to lateral loads. PhD Thesis. The University of Melbourne, Department of Infrastructure Engineering, 248, Melbourne, Australia.
- Kihlstedt, F. T. 1984. The crystal palace. *Scientific American*, 251(4), 132-143.
- Kim, J. 2019. Development of modular building systems made of innovative steel sections and wall configurations. PhD Thesis. Queensland University of Technology, Faculty of Science & Engineering, School of Civil Engineering and Built Environment, 186, Australia.
- Kumar, S. 2016. Hickory building system (HBS) innovation and successful application in a 44 storey building in Melbourne. *Australian Structural Engineering Conference*, 1 January, ASEC 2016, 465, Australia.
- Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., Bi, K. 2018. Structural response of modular buildings—an overview. *Journal of Building Engineering*, 16, 45-56.
- Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., Bi, K. 2019a. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies. *Engineering Structures*, 198, 109465.
- Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., Bi, K. 2019b. Review of bolted inter-module connections in modular steel buildings. *Journal of Building Engineering*, 23, 207-219.

- Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., Bi, K., Tallowin, F. J. 2019c. Shear behaviour of post-tensioned inter-module connection for modular steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105707.
- Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., & Bi, K. 2020. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*, 213, 110628.
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., Pedreschi, R. and Popo-Ola, S. O. 2005. Development in prefabricated systems in light steel and modular construction, *The Structural Engineer*, 83(6), 28-35.
- Lawson, M., Ogden, R., Goodier, C. I. 2014. *Design in modular construction*. CRC Press Boca Raton, FL, 280, Florida.
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., Popo-Ola, S. 2011. Design considerations for modular open building systems. *Open house international*, 36(1), 44-53.
- Lawson, R. M. ve Richards, J. 2010. Modular design for high-rise buildings. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers Structures and Buildings*, 163(3), 151-164.
- Lee, S., Park, J., Kwak, E., Shon, S., Kang, C., Choi, H. 2017. Verification of the seismic performance of a rigidly connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket. *Materials*, 10(3), 263.
- Liew, J., Chua, Y., Dai, Z. 2019. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings. *Structures*, 21, 135-149.
- Ramaji, I. J., Memari, A. M. 2013. Identification of Structural Issues in Design and Construction of Multi-Story Modular Buildings, *Proceedings of The 1st Residential Building Design and Construction Conference*, 20-21 February, 294-303, Bethlehem, PA, USA.
- Rostek, M. 2018. *Constructing steel modular buildings with varying interconnections*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 88, USA.
- Sanches, R., Mercan, O., Roberts, B. 2018. Experimental investigations of vertical post-tensioned connection for modular steel structures. *Engineering Structures*, 175, 776-789.
- Sendanayake, S., Thambiratnam, D., Perera, N., Chan, T., Aghdamy, S. 2021. Enhancing the lateral performance of modular buildings through innovative inter-modular connections. *Structures*, 29, 167-184.
- Sendanayake, S. V., Thambiratnam, D. P., Perera, N., Chan, T., Aghdamy, S. 2019. Seismic mitigation of steel modular building structures through innovative inter-modular connections. *Heliyon*, 5(11), e02751.

- Sharafi, P., Mortazavi, M., Samali, B., Ronagh, H. 2018. Interlocking system for enhancing the integrity of multi-storey modular buildings. *Automation in Construction*, 85, 263-272.
- Smith, R. E. 2010. *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*. John Wiley & Sons, 400, Hoboken, New Jersey, USA.
- Srisangeerthanan, S., Hashemi, M. J., Rajeev, P., Gad, E., Fernando, S. 2020. Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings. *Journal of Building Engineering*, 28, 101087.
- Styles, A., Luo, F., Bai, Y., Murray-Parkes, J. 2016. Effects of joint rotational stiffness on structural responses of multi-story modular buildings. *Transforming the Future of Infrastructure through Smarter Information: Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction*, 27–29 June, ICE Publishing, 457-462, London.
- Sultana, P. and Youssef, M. A. 2020. Seismic performance of modular steel-braced frames utilizing superelastic shape memory alloy bolts in the vertical module connections. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(4), 628-652.

EKLER

EK-1

Çubuk Elemanlar	Düğüm Noktaları	ÖLÜ YÜK (DEAD)		WX		WY	
		F3	M2	F3	M2	F3	M2
		KN	KN-m	KN	KN-m	KN	KN-m
831	588	-74,672	-0,0203	8,829	-0,1896	20,167	-0,0079
835	588	0,452	0,3547	0,014	-0,0191	-0,969	0,000724
835	588	0,916	0,4474	0,029	-0,0474	-0,052	0,00078
841	588	-5,198	0,0099	0,585	0,0528	-3,332	-0,00026
845	588	-4,805	- 0,00017	0,595	- 0,00028	3,342	-6,50E- 05
847	588	-0,067	-0,3136	0,225	0,3204	0,077	0,0964
2092	2281	68,361	-0,1051	-6,105	0,2138	-16,983	0,0059
2095	2281	1,443	0,0108	-0,231	0,0018	-0,811	2,35E-07
2097	2281	0,633	0,2512	0,001429	0,0959	0,03	0,000933
2103	2281	4,964	-0,0115	0,341	0,0089	-2,767	0,000307
2104	2281	0,087	-0,0304	0,399	0,4551	0,055	0,0458
2108	2281	-0,168	0,1511	9,99	0,1086	-0,096	0,0014
2256	2513	68,517	0,0434	-7,441	0,2705	-17,094	0,0133
2259	2513	1,382	-0,0113	0,197	0,0023	-0,807	5,74E-05
2261	2513	0,632	-0,277	0,000439	0,1099	0,03	0,0021
2263	2513	4,962	0,0089	-0,266	0,0103	-2,776	0,000368
2282	2513	0,192	-0,0918	-0,441	0,5133	0,043	-0,0321
2287	2513	3,157	-0,1842	-12,559	0,1226	-0,056	0,0035

EK-2

Çubuk Elemanlar	Düğüm Noktaları	ÖLÜ YÜK (DEAD)		WX		WY	
		F3	M2	F3	M2	F3	M2
		KN	KN-m	KN	KN-m	KN	KN-m
831	588	-74,409	0,0114	10,137	-0,0239	19,758	0,0014
835	588	0,389	0,3525	0,03	0,0112	-0,996	0,0012
835	588	0,939	0,4448	0,043	-0,0154	-0,043	0,0012
841	588	-5,426	0,0112	0,818	0,0641	-2,859	0,000172
845	588	-4,68	5,47E-05	0,62	0,000196	3,103	-3,30E-06
847	588	-0,053	-0,299	0,249	0,4054	0,081	0,1019
2092	2281	68,177	-0,0341	-6,506	0,2887	-16,522	0,0107
2095	2281	1,326	0,0109	-0,23	0,0018	-0,719	1,11E-05
2097	2281	0,639	0,2569	0,002309	0,0911	0,026	0,0012
2103	2281	4,858	-0,009	0,298	0,0138	-2,883	0,000421
2104	2281	0,115	0,000669	0,383	0,4392	0,049	0,0422
2108	2281	-0,809	0,1724	10,325	0,0908	-0,08	0,0027
2256	2513	68,277	-0,0339	-7,701	0,2916	-16,611	0,0105
2259	2513	1,266	-0,0115	0,196	0,0021	-0,728	5,99E-05
2261	2513	0,638	-0,284	-0,00218	0,1024	0,027	0,0025
2263	2513	4,865	0,0065	-0,253	0,012	-2,835	0,0003
2282	2513	0,226	-0,13	-0,409	0,4759	0,036	-0,0261
2287	2513	3,676	-0,197	-12,849	0,093	-0,091	0,0036

EK-3

Çubuk Elemanlar	Düğüm Noktaları	ÖLÜ YÜK (DEAD)		WX		WY	
		F3	M2	F3	M2	F3	M2
		KN	KN-m	KN	KN-m	KN	KN-m
831	588	-103,025	0,008	24,349	0,0088	41,09	0,0025
835	588	0,306	0,3483	0,076	0,0471	-0,857	0,0039
835	588	0,92	0,4407	0,062	0,0191	-0,058	0,0037
841	588	-7,659	0,0111	1,88	0,0653	-3,043	0,000335
845	588	-6,463	1,68E-05	1,526	0,00055	5,218	-6,9E-06
847	588	-0,179	-0,4625	0,43	0,6899	0,172	0,2196
2092	2281	98,446	-0,0548	-18,976	0,4567	-36,933	0,0254
2092	2281	98,446	-0,0548	-18,976	0,4567	-36,933	0,0254
2095	2281	1,535	0,0108	-0,46	0,0028	-1,176	7,29E-05
2097	2281	0,656	0,2516	-0,00206	0,1421	0,023	0,0054
2103	2281	5,62	-0,0099	-0,032	0,0204	-4,688	0,0011
2104	2281	0,084	-0,0322	0,595	0,6834	0,09	0,0799
2108	2281	-1,446	0,1674	16,977	0,1355	0,232	0,006
2256	2513	98,559	-0,0546	-20,065	0,4605	-37,071	0,0251
2259	2513	1,444	-0,0117	0,264	0,0033	-1,171	0,00016
2261	2513	0,655	-0,2907	-0,00871	0,162	0,023	0,0071
2263	2513	5,631	0,0058	-0,584	0,0188	-4,628	0,000813
2282	2513	0,244	-0,1543	-0,647	0,7525	0,043	-0,0257
2287	2513	4,588	-0,2032	-21,597	0,1379	-0,675	0,0082

EK-4

Çubuk Elemanlar	Düğüm Noktaları	ÖLÜ YÜK (DEAD)		WX		WY	
		F3	M2	F3	M2	F3	M2
		KN	KN-m	KN	KN-m	KN	KN-m
831	588	-133,356	0,0016	46,092	0,05	72,097	0,0045
835	588	0,218	0,3438	0,143	0,0837	-0,684	0,0066
835	588	0,899	0,4364	0,085	0,0541	-0,07	0,0063
841	588	-10,023	0,0108	3,533	0,0668	-2,538	0,000541
845	588	-8,354	-4,4E-05	2,9	0,000968	7,963	-4,9E-06
847	588	-0,315	-0,6374	0,647	1,0192	0,302	0,3849
2092	2281	130,55	-0,0789	-39,541	0,6275	-67,632	0,0407
2095	2281	1,758	0,0107	-0,743	0,0038	-1,703	0,000132
2097	2281	0,674	0,2462	-0,01	0,1928	0,013	0,0092
2103	2281	6,445	-0,011	-0,561	0,027	-6,757	0,0019
2104	2281	0,053	-0,0661	0,809	0,9295	0,132	0,1191
2108	2281	-2,024	0,1614	23,711	0,1802	0,484	0,0093
2256	2513	130,674	-0,0788	-40,411	0,6322	-67,816	0,0403
2259	2513	1,635	-0,0118	0,282	0,0045	-1,686	0,000256
2261	2513	0,674	-0,2969	-0,02	0,2211	0,013	0,0116
2263	2513	6,459	0,005	-1,109	0,0255	-6,687	0,0013
2282	2513	0,261	-0,1767	-0,881	1,0264	0,055	-0,0285
2287	2513	5,358	-0,2105	-30,367	0,1834	-1,227	0,0133