

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BERKİTİLMİŞ EŞİT KOLLU KORNİYER
BASINÇ ÇUBUKLARININ OPTİMUM
TASARIMI**

İbrahim GENÇYILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARALIK 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BERKİTİLMİŞ EŞİT KOLLU KORNİYER
BASINÇ ÇUBUKLARININ OPTİMUM
TASARIMI**

İbrahim GENÇYILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARALIK 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BERKİTİLMİŞ EŞİT KOLLU KORNİYER
BASINÇ ÇUBUKLARININ OPTİMUM
TASARIMI**

İbrahim GENÇYILMAZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

ARALIK 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BERKİTİLMİŞ EŞİT KOLLU KORNİYER
BASINÇ ÇUBUKLARININ OPTİMUM
TASARIMI

İbrahim GENÇYILMAZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez / / 202..... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ (Danışman) [imza]

Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK [imza]

Doç. Dr. Yağmur KOPRAMAN [imza]

ÖZET

BERKİTİLMİŞ EŞİT KOLLU KORNIYER BASINÇ ÇUBUKLARININ OPTİMUM TASARIMI

İbrahim GENÇYILMAZ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Aralık 2025; 82 sayfa

Bu tez, basınç kapasitesi yetersiz olan L60.60.6 kesitli çelik köşe elemanlarının güçlendirilmesi amacıyla yerel güçlendirme yöntemlerini incelemektedir. İlave plakaların, elemanın bölgesel rijitliğini artırarak burkulma boyunu dolaylı olarak kısaltması ve burkulma yükünü artırması hedeflenmektedir. İlgili malzeme ve geometrik açıdan doğrusal olmayan analizler ANSYS yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tez kapsamında, farklı boylardaki ($L = 60 \text{ cm}, 80 \text{ cm}, 100 \text{ cm}, 120 \text{ cm}$ ve 150 cm) L60.60.6 kesitli korniyer elemanların orta bölgelerinde, belirli uzunluklarda ilave plakalarla yapılan berkitmeler üzerinde durulmuştur. Yapılan doğrusal olmayan analizler, doğrusal analizler ile belirlenen düzeyde faydanın sağlanamadığını göstermiştir. Analiz sonuçları, eksenel basınç yükü kapasitesi artışının, eleman boyunun üçte biri güçlendirilen elemanlarda, eleman boyunun dörtte biri güçlendirilen elemanlara kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. En yüksek kapasite artışı 120 cm uzunluğundaki elemanlarda, en düşük artış ise 100 cm uzunluğundaki elemanlarda elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Burkulma, Eşit Kollu Korniyer, Lokal Güçlendirme, Sonlu Elemanlar, Takviye Plakalar

JÜRİ: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Doç. Dr. Yağmur KOPRAMAN

ABSTRACT

OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED EQUAL-LEG ANGLE COMPRESSION MEMBERS

İbrahim GENÇYILMAZ

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

December 2025; 82 pages

This thesis examines local strengthening methods aimed at improving L60.60.6 steel angle members with insufficient compressive capacity. The objective is to indirectly shorten the buckling length and increase the buckling load by enhancing the local stiffness of the member through the use of additional plates. Material and geometric nonlinear analyses were carried out using ANSYS software. Within the scope of the thesis, strengthening applications using additional plates of specific lengths placed in the middle regions of L60.60.6 angle members with different lengths ($L = 60$ cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm, and 150 cm) were investigated. The nonlinear analyses showed that the level of benefit predicted by linear analyses could not be achieved. The analysis results revealed that the increase in axial compressive load capacity was higher in members strengthened over one-third of their length compared to those strengthened over one-fourth of their length. The highest capacity increase was obtained in members with a length of 120 cm, while the lowest increase was observed in members with a length of 100 cm.

KEYWORDS: Buckling, Equal-Leg Angle, Local Strengthening, Finite Elements, Reinforcement Plates

COMMITTEE: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Assoc. Prof Dr. Yağmur KOPRAMAN

ÖNSÖZ

Araştırma süreci boyunca bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, akademik katkılarını esirgemeyen danışmanım sayın hocam Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ'a teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimime devam ederken çalıştığım iş yerinde bana gösterdiği tolerans ve desteklerinden dolayı İnş. Müh. Özer GENÇAY'a teşekkür ediyorum. Bu süreç boyunca manevi destekleriyle her zaman yanımda olan değerli aileme teşekkürlerimi sunmak isterim. Hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu çalışmada da sabırları, sevgileri ve bana olan inançları en büyük motivasyon kaynağım olmuştur. Başta annem Mariye GENÇYILMAZ ve babam Cemal GENÇYILMAZ olmak üzere, kardeşim Ali GENÇYILMAZ ve abim Atıf GENÇYILMAZ'a ve desteğini hissettiğim tüm aile bireylerime minnettarım. Zorluklar karşısında yılmadan devam edebilmemde, bana verdikleri güven ve gösterdikleri anlayış belirleyici olmuştur. Varlıkları, bu çalışmanın gerçekleşmesinde en az benim kadar pay sahibidir. Tez yazma sürecinde desteklerini esirgemeyen sınıf arkadaşım Rana Nur ÇAKIRALP'e teşekkür ediyorum.

Onlara duyduğum teşekkür, kelimelere sığmayacak kadar derindir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	2
2.1. Çelik Köşe Elemanlarının Stabilitate Davranışı	2
2.2. Çelik Köşe Elemanlarının Güçlendirilmesi	12
2.3. Mevcut Çalışmalardaki Boşluklar ve Bu Çalışmanın Katkısı	18
3. MATERYAL VE METOT	20
3.1. Berkitilmemiş Elemanlar	20
3.1.1. EC3'e Göre Hesap	20
3.1.2. Trahair'e Göre Eksenel Basınç Kapasitesi	22
3.1.3. ÇYTHYE 2016' ya Göre Eksenel Basınç Kapasitesi	26
3.1.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Doğrusal Olmayan Analiz	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
4.1. Eleman Tipi Seçimi	43
4.2. L/3 Bölgesinden Berkitilmiş Elemanların Analizine Giriş	49
4.3. Modellerin Kurulması;	53
4.4. L/4 Bölgesinden Berkitilmiş Elemanların Analizine Giriş	61
5. SONUÇLAR	71
6. KAYNAKLAR	73
7. EKLER	75
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “BERKİTİLMİŞ EŞİT KOLLU KORNİYER BASINÇ ÇUBUKLARININ OPTİMUM TASARIMI” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../20....

İbrahim GENÇYILMAZ

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ω_c	: GKT katsayısı
I_x	: X eksenine göre atalet momenti
I_y	: Y eksenine göre atalet momenti
I_ω	: Çarpılma atalet momenti
L_{cr}	: Elemanın kritik burkulma boyu
P_{cr}	: Doğrusal eigenvalue buckling analizi sonucu kritik burkulma yükü
P_{lim}	: Doğrusal olmayan analiz sonucu elde edilen eksenel basınç kapasitesi
A_g	: Kayıpsız enkesit alanı
F_c	: Elastik burkulma gerilmesi
F_{cr}	: Kritik burkulma gerilmesi
$N_{b,Rd}$	: Tasarım eksenel basınç dayanımı [kN] veya [N] cinsinden
P_{ft}	: Eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumu (flexural torsional) [N] (Trahair 1993)
P_n	: Eksenel basınç kuvveti altındaki karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı
f_y	: Çelik malzemenin akma gerilmesi [MPa]
K_σ	: Geometrik (yük bağımlı) rijitlik matrisi
ϕ_c	: YDKT katsayısı
$\emptyset$	: Burulma açısı
A	: En kesit alanı [mm ²]
A	: Kesit alanı [mm ²]
b_l	: Uzun kol boyu
b_s	: Kısa kol boyu
cm	: Santimetre

E	: Elastisite modülü
E_e	: Elastik burkulma gerilmesi
G	: Kayma modülü
i	: Atalet yarıçapı (ÇYTHYE)
i_a	: Köşebentin asal eksen etrafındaki atalet yarıçapı
i_z	: Köşebentin zayıf asal eksen etrafındaki atalet yarıçapı
K	: Burkulma boyu katsayısı
$\mathbf{K}$	: Yapının elastik rijitlik matrisi
L	: Desteklenen noktalar arasında kalan eleman uzunluğu
L	: Eleman serbest uzunluğu
L	: Eleman uzunluğu
L_c	: Eleman burkulma boyu (= KL)
L_e	: Burkulma boyu (etkin uzunluk)
m	: Metre
mm	: Milimetre
P	: Elemanın üzerindeki eksenel basınç kuvveti
r	: Atalet yarıçapı
s	: Saniye
$\mathbf{u}$	: Burkulma mod şekli (özvektör)
α	: Kesitin burkulma davranışına bağlı olarak kullanılan katsayıdır
γ_{M1}	: Kısmi güvenlik katsayısı (genellikle 1.0 olarak alınır)
λ	: Burkulma yük katsayısı (özdeğer)
λ	: Narinlik oranı
ν	: Poisson oranı
φ	: χ 'yi belirlemek için ara bir parametre
χ	: Burkulmaya bağlı dayanım azaltma katsayısı

f_y : Yapısal çeliğin akma gerilmesi (MPa)

δ : Deplasman

Tezde ondalık yazım kullanılmıştır, ondalık ayırıcı olarak “,” kullanılmıştır.

Tez içerisinde geçen “Korniyer” ifadeleri ile “Köşebent” ifadeleri aynı anlamda kullanılmıştır.

Kısaltmalar

ANSYS : Sonlu elemanlar tabanlı doğrusal/doğrusal olmayan analiz yazılımı

BEAM : Çubuk eleman

ÇYTHYE : Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları

EC3 : EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures

GKT : Güvenlik Katsayılarıyla Tasarım (ASD)

SAP2000 : Yapısal modelleme ve analiz yazılımı

SF : Scale Factor, doğrusal olmayan geometriyi elde edebilmek için 1. Mod burkulma şeklinin çarpım faktörü

SHELL : Kabuk eleman

SOLID : 3D katı eleman

YDKT : Yük ve Dayanım Katsayılarıyla Tasarım (LRFD)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Deneysel çalışmanın düzeneği, Elgaaly (1991),.....	2
Şekil 2. 2. Deney düzeneğinin idealize edilmiş hali, Elgaaly (1991).....	3
Şekil 2. 3. Deney sonuçları, Elgaaly (1991),.....	4
Şekil 2. 4. Tipik Bir İletim Kulesi Ayağı İçin Analitik Modeller, Kang (2007),.....	5
Şekil 2. 5. Kafes Yapının Göçme Modu (Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tahmin Edilen), Kang (2007)	5
Şekil 2. 6. Kule yapılarının civatalı birleşim konumları Lu (2014)	6
Şekil 2. 7. Deneysel numunenin güçlendirilmesinin düzenlenmesi, Lu (2014).....	6
Şekil 2. 8. Göçme durumu (soldan sağa) — ABAQUS modeli, ABAQUS modeli (yakın çekim) ve deneysel numune, Lu (2014).....	7
Şekil 2. 9. Elemanın göçme modu Daloğlu (2016)	8
Şekil 2. 10. Modelden ve deneyden elde edilen göçme yüklerinin karşılaştırılması Daloğlu (2016).....	8
Şekil 2. 11. Göçme yüküne ulaşıldıktan sonra köşebentlerde etkin gerilme dağılımı ve kırılma şekli, BERNATOWSKA (2021)	9
Şekil 2. 12. Kulenin gözlemlenen ve tahmin edilen çöküşü Köşker (2022).....	9
Şekil 2. 13. Soğukta şekillendirilmiş korniyer elemanın deforme olmuş halinin enkesit görüntüsü, ZHANG (2022)	10
Şekil 2. 14. FEA ile elde edilen tip göçme modları, ZHU (2023).....	10
Şekil 2. 15. Birleşim bölgesi hasarı, ZHU (2023).....	11
Şekil 2. 16. Deney sonucu göçme mod şekli ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ISA notasyonu tezde korniyer anlamına gelmektedir.), CHAKRAVARTHY (2025)..	11
Şekil 2. 17. Deney sonucu göçme mod şekli ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ISA notasyonu tezde korniyer anlamına gelmektedir.), CHAKRAVARTHY (2025) (Devamı)	12
Şekil 2. 18. Güçlendirme stratejisi, DÜĞENCİ (2022)	13
Şekil 2. 19. Eleman adlandırmaları, DÜĞENCİ (2022).....	14
Şekil 2. 20. Deney sonuçları, DÜĞENCİ (2022).....	14
Şekil 2. 21. Güçlendirme stratejisi, LI (2023).....	15
Şekil 2. 22. Güçlendirme stratejileri, SADEGHI (2024).....	16
Şekil 2. 23. Güçlendirilen elemanların burkulma davranışının deney sonuçları, SADEGHI (2024)	16
Şekil 2. 24. Güçlendirilen elemanların burkulma davranışının FEA sonuçları, SADEGHI (2024)	17
Şekil 2. 25. Güçlendirme stratejisi, SATO (2024)	17
Şekil 2. 26. Deney sonuçları, SATO (2024)	18
Şekil 2. 27. Deney sonuçları, SATO (2024)	18
Şekil 3. 1. Eğilmeli ve burulmalı burkulma modları	23
Şekil 3. 2. Eğilmeli burulmalı burkulma davranışı.....	24
Şekil 3. 3. Korniyer kesitli elemanın dönme merkezi	26

Şekil 3. 4. Analizlerde kullanılan sınır şartları.....	32
Şekil 3. 5. ANSYS ortamında mesh menüsü	32
Şekil 3. 6. 150cm uzunluğundaki elemanın lineer eigenvalue buckling analizi sonucu 1. mod şekli	33
Şekil 3. 7. ANSYS çalışma şeması.....	34
Şekil 3. 8. 150cm uzunluğundaki elemanın lineer eigenvalue buckling analizi sonucu oluşan 1. mod burkulma şeklinin scale factor tanımı	34
Şekil 3. 9. 150cm Uzunluğundaki eleman için 5mm kusur genliğinin gösterimi	35
Şekil 3. 10. ANSYS kütüphanesindeki yapısal çeliğin gerilme – birim şekil değiştirme grafığı.....	36
Şekil 3. 11. Sınır şartlarının ANSYS ortamındaki görüntüsü	36
Şekil 4. 1. Problemin idealize edilmiş halleri	39
Şekil 4. 2. Bulon hizasından yükleme durumu için eleman türlerinin karşılaştırılması. 40	
Şekil 4. 3. Kayma merkezinden yükleme durumu için eleman türlerinin karşılaştırılması.....	40
Şekil 4. 4. Ağırlık merkezinden yükleme durumu için eleman türlerinin karşılaştırılması.....	41
Şekil 4. 5. 60cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	43
Şekil 4. 6. 60cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	44
Şekil 4. 7. 80cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	44
Şekil 4. 8. 80cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	45
Şekil 4. 9. 100cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	45
Şekil 4. 10. 100cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	46
Şekil 4. 11. 120cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu ...	46
Şekil 4. 12. 120cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	47
Şekil 4. 13. 150cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu ...	47
Şekil 4. 14. 150cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	48
Şekil 4. 15. Berkitilmiş korniyer elemanların tip kesiti.....	50
Şekil 4. 16. L/3'lük orta bölgesi güçlendirilen farklı uzunluklardaki L60.60.6 elemanların 3 boyutlu görüntüsü	51
Şekil 4. 17. L/4'lük orta bölgesi güçlendirilen farklı uzunluklardaki L60.60.6 elemanların 3 boyutlu görüntüsü	51
Şekil 4. 18. 60cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısmi Berkitilmiş Eleman	52
Şekil 4. 19. 80cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısmi Berkitilmiş Eleman	52
Şekil 4. 20. 100cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısmi Berkitilmiş Eleman.....	52
Şekil 4. 21. 120cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısmi Berkitilmiş Eleman.....	52
Şekil 4. 22. 150cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısmi Berkitilmiş Eleman.....	52

Şekil 4. 23. 60cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman	53
Şekil 4. 24. 80cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman	53
Şekil 4. 25. 100cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman.....	53
Şekil 4. 26. 120cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman.....	53
Şekil 4. 27. 150cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman.....	53
Şekil 4. 28. Berkitilmiş Elemanların Tip Sınır Şartları	54
Şekil 4. 29. 60cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	57
Şekil 4. 30. 60cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	57
Şekil 4. 31. 80cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	58
Şekil 4. 32. 80cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	58
Şekil 4. 33. 100cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	59
Şekil 4. 34. 100cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	59
Şekil 4. 35. 120cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	60
Şekil 4. 36. 120cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	60
Şekil 4. 37. 150cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	61
Şekil 4. 38. 150cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	61
Şekil 4. 39. 2 farklı bölgeden berkitilen elemanların sonuçları	64
Şekil 4. 40. 60cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	66
Şekil 4. 41. 60cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	66
Şekil 4. 42. 80cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	67
Şekil 4. 43. 80cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	67
Şekil 4. 44. 100cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	68
Şekil 4. 45. 100cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	68
Şekil 4. 46. 120cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	69

Şekil 4. 47. 120cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	69
Şekil 4. 48. 150cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu	70
Şekil 4. 49. 150cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi	70



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4. 1. Çubuk eleman eigenvalue buckling analizi sonuçları	41
Çizelge 4. 2. Shell (kabuk) eleman eigenvalue buckling analizi sonuçları	42
Çizelge 4. 3. Solid eleman eigenvalue buckling analizi sonuçları	42
Çizelge 4. 4. ANSYS, ÇYTHYE, EC3, Trahair ve SAP2000 (Linebody) Analiz Sonuçları	48
Çizelge 4. 5. Berkitilmiş ve berkitilmemiş elemanlar üzerinde gerçekleştirilen eigenvalue buckling analizi sonuçları	54
Çizelge 4. 6. L/3 lük kısmı berkitilmiş ve berkitilmemiş elemanların doğrusal olmayan analiz sonuçları	55
Çizelge 4. 7. L/4'lük kısmı berkitilmiş ve berkitilmemiş elemanlar üzerinde gerçekleştirilen eigenvalue buckling analizi sonuçları	62
Çizelge 4. 8. L/4'lük kısmı berkitilmiş ve berkitilmemiş elemanların doğrusal olmayan analiz sonuçları	63

1. GİRİŞ

Türkiye’deki yapı stoğunda yer alan birçok sanayi yapısı, anten kuleleri, elektrik direkleri, telekomünikasyon yapıları, enerji hatları ile aydınlatma ve ulaşım direkleri, inşa edildikleri dönemde geçerli olan yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmış olsa bile günümüzde yürürlükte olan yönetmelikler doğrultusunda, bu yapılar yetersiz olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, zamanla ortaya çıkan ilave yükler, taşıyıcı elemanların eksenel yük kapasitesini aşarak yapısal güvenliği riske atabilmektedir. Bu durum, söz konusu yapıların güçlendirilmesi veya yeniden inşa edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Ancak, yeniden inşa süreci yüksek maliyetler gerektirdiğinden, bu yöntem çoğu durumda ekonomik açıdan uygulanabilir bir seçenek olmaktan çıkmaktadır. Bu bağlamda, güçlendirme yöntemleri maliyet-etkin çözümler sunarak öncelikli tercih haline gelmektedir.

Güçlendirme uygulamaları mevcut yönetmelikler çerçevesinde tanımlanmış olsa da bazı yöntemlerin yeterince detaylandırılmamış olması, bu alanda daha kapsamlı araştırmalar yapılmasını gerektirmektedir. L profilli çelik elemanların burkulma dayanımını plaka takviyesi ile iyileştirmeye yönelik tasarım parametrelerinin etkisi ve güçlendirme performansı literatürde henüz kapsamlı ve sistematik bir çerçevede değerlendirilmemiştir. Bu çalışmada, söz konusu elemanların ortalarına ilave plakalar eklenerek taşıma kapasitelerinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu sayede, burkulma yükünün artırılması öngörülmektedir. Söz konusu yaklaşım, güçlendirme maliyetlerini minimize ederek ekonomik bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

Taşıyıcı elemanlar, üzerlerine etki eden kuvvetlerin büyüklüğüne, konumuna ve kombinasyonlarına bağlı olarak farklı göçme modları sergileyebilmektedir. Basınca maruz kalan narin kolonlar genellikle burkulma sebebiyle göçerler. Elemanların göçmesine neden olan bu hasar türleri; elemanın türü, malzemesi, geometrisi ve üretim sürecinden kaynaklanan kusurlar gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Mevcut yönetmelikler, bu tür kusurları sınırlandırarak tasarım sürecinde belirli güvenlik kriterleri getirmektedir. Ancak, özellikle yerel rijitlik artırımıyla burkulma davranışını iyileştirmeye yönelik detaylı bir güçlendirme yöntemine dair araştırmaların yetersiz olduğu görülmektedir.

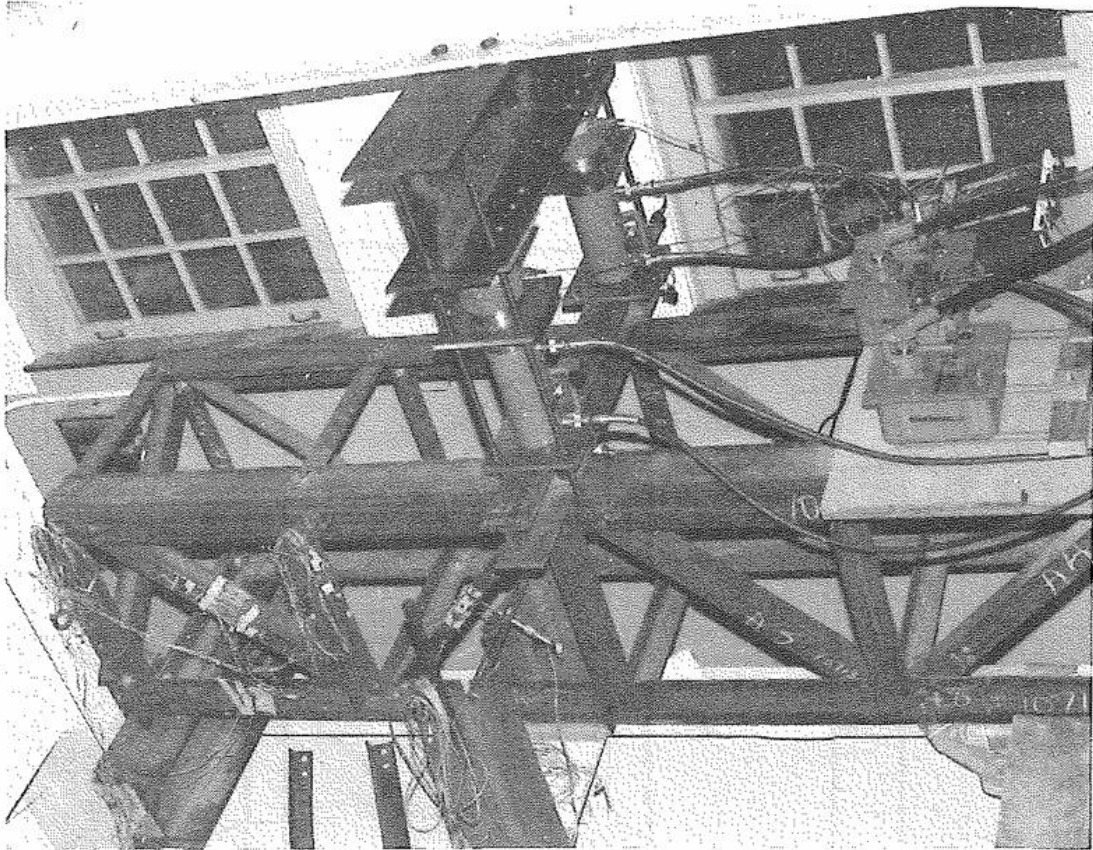
Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı, basınç kapasitesi düşük olan çelik korniyer elemanların burkulma dayanımını artırmaya yönelik plaka takviyesi yöntemini inceleyerek, bu alandaki bilgi eksikliğini gidermektir. Elde edilecek bulguların hem akademik literatüre katkı sağlaması hem de mühendislik uygulamaları için pratik bir rehber oluşturması hedeflenmektedir. Çalışma, mevcut güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini değerlendirerek, daha güvenli ve ekonomik çözümler geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

2. KAYNAK TARAMASI

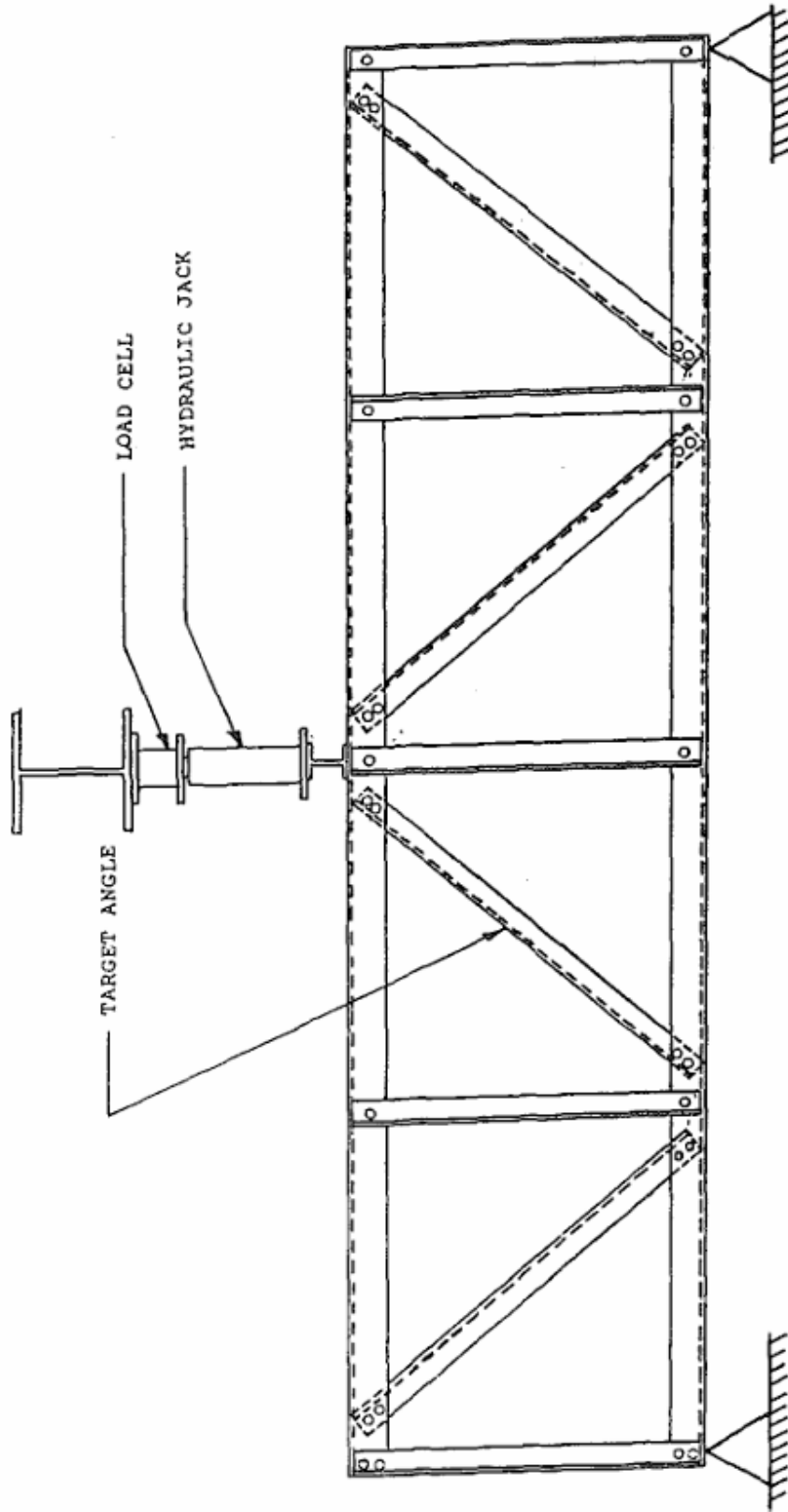
Çelik yapısal elemanlar, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve kolay işlenebilirlikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, burkulma gibi stabilite sorunları, bu elemanların taşıma kapasitelerini sınırlayan en kritik faktörlerden biridir. Özellikle çelik köşe elemanlarının (korniye profillerin) burkulma davranışı ve çeşitli güçlendirme yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar, bu elemanların yapısal performanslarını artırmaya yönelik önemli bulgular ortaya koymuştur. Bu bölümde, çelik elemanların stabilite özellikleri, burkulma dayanımını artırmaya yönelik güçlendirme stratejileri ve mevcut araştırmalardaki boşluklar ele alınmaktadır.

2.1. Çelik Köşe Elemanlarının Stabilite Davranışı

Çelik köşe elemanlarının burkulma davranışı, birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Woolcock (1986), eksantriklik ve burkulmayı dikkate alan bir tasarım yöntemi geliştirmiş ve web elemanlarının düzenlenme şekline göre tasarım kriterlerini belirlemiştir. Elgaaly (1991), düşük narinlik oranına sahip korniye basınç elemanları için deneysel çalışmalar yaparak farklı göçme modlarını tanımlamıştır.



Şekil 2. 1. Deneysel çalışmanın düzeneği, Elgaaly (1991),



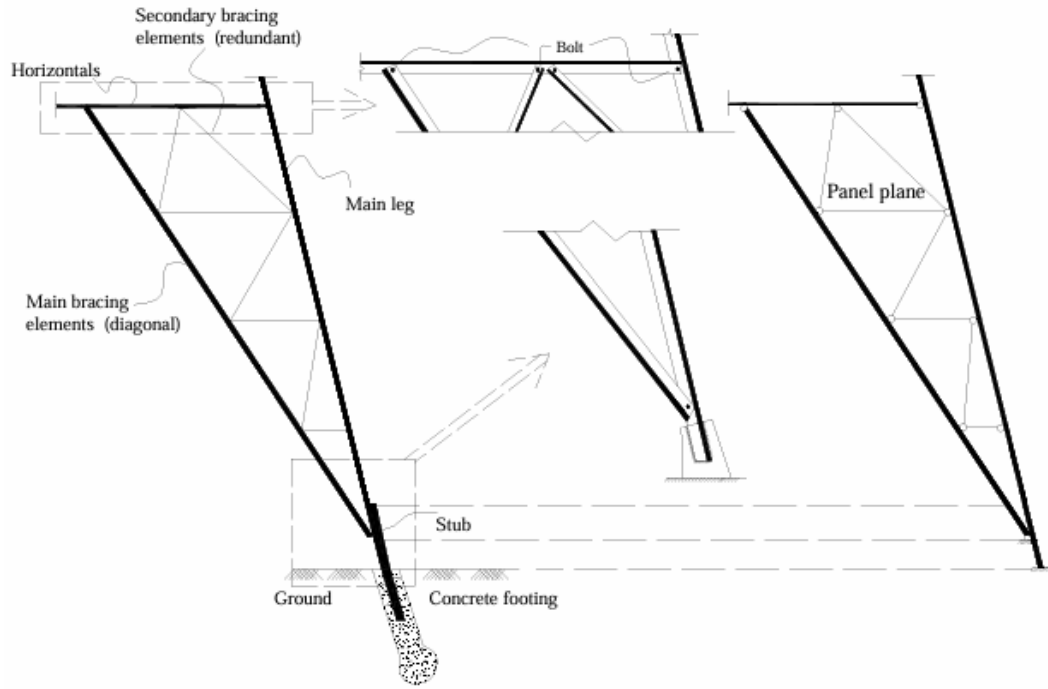
Şekil 2. 2. Deney düzeneğinin idealize edilmiş hali, Elgaaly (1991)

Test (1)	b/t (2)	L/r (3)	Actual failure load (kips) (4)	Predicted Failure Load	
				Manual 52 (kips) (5)	AISC-LRFD (kips) (6)
53	13.15	92	10.80	11.35	5.56
54	13.23	92	9.96	11.25	5.42
55	12.90	92	10.07	11.62	5.70
56	12.96	92	10.42	11.62	5.62
57	12.87	92	9.89	11.64	5.75
23	—	—	—	—	—
24	9.17	93	15.16	16.90	7.62
35	8.76	93	16.96	17.02	7.61
36	8.59	93	17.49	17.57	7.91
37	9.35	93	13.49	16.30	7.50
26	13.88	80	10.26	15.15	7.17
27	14.32	80	8.74	14.46	6.84
28	13.80	80	9.53	15.76	7.52
38	14.15	80	11.21	14.59	7.08
39	—	—	—	—	—
29	—	—	—	—	—
31	9.92	81	19.33	20.83	9.43
40	10.19	81	15.98	20.49	9.07
41	10.13	81	18.22	20.34	9.01
42	10.52	81	18.10	19.67	8.81
45	12.28	65	19.64	29.38	13.28
46	12.32	65	19.49	30.12	13.57
47	12.72	65	20.19	29.29	13.29
48	12.88	65	21.07	28.61	13.04
49	12.54	65	19.94	28.99	13.61

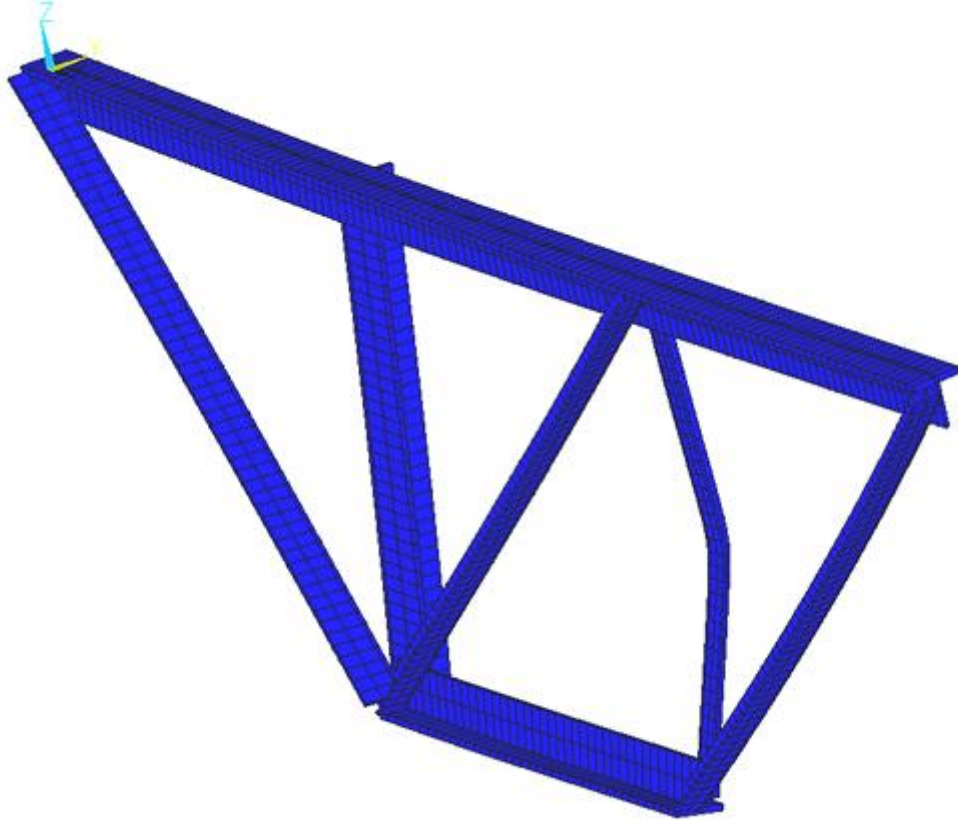
Note: 1 in. = 25.4 mm, 1 kip = 4.448 kN.

Şekil 2. 3. Deney sonuçları, Elgaaly (1991),

Daha yakın dönemde, iletim kuleleri ve çelik kafes sistemler üzerinde yapılan araştırmalar, çelik elemanların gerçek davranışlarını daha iyi anlamak amacıyla geliştirilmiştir. Kang (2007), eksantriklik, asimetrik kesit özellikleri ve doğrusal olmayanlıkları içeren bir sonlu eleman modeli (FEM) önererek, iletim kulelerinin davranışını incelemiştir.



Şekil 2. 4. Tipik Bir İletim Kulesi Ayağı İçin Analitik Modeller, Kang (2007),

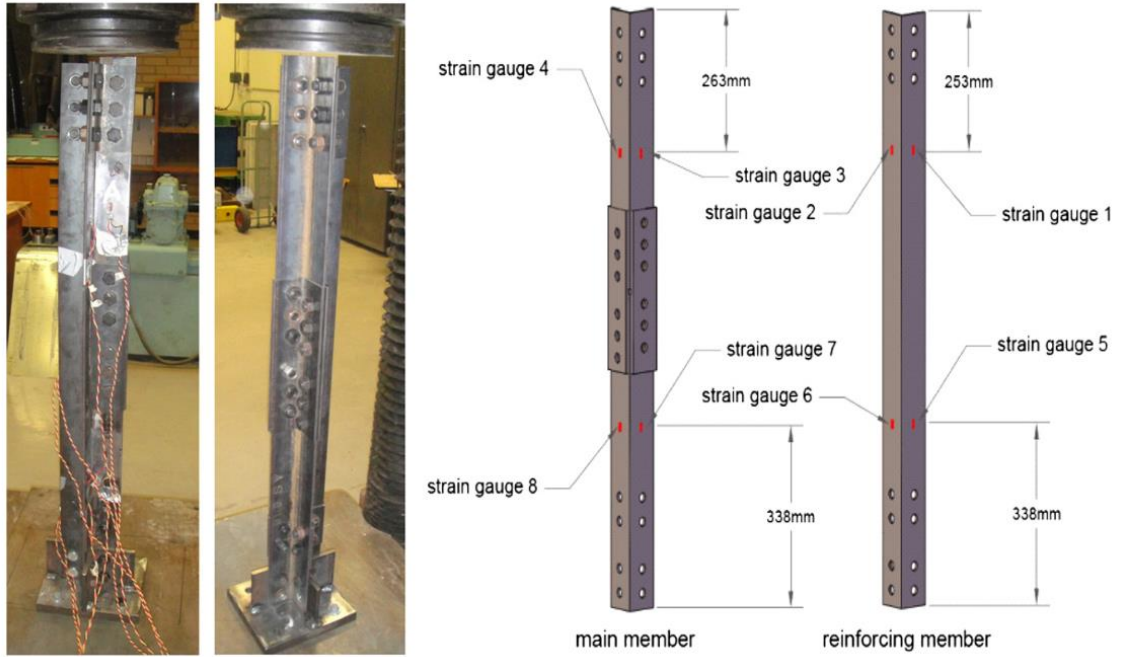


Şekil 2. 5. Kafes Yapının Göçme Modu (Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tahmin Edilen), Kang (2007)

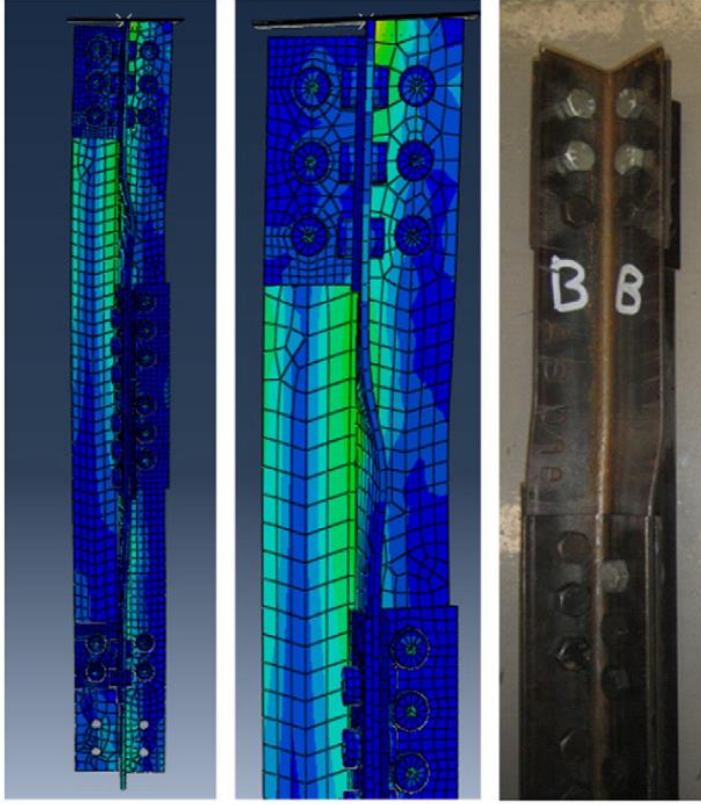
Lu (2014), paralel çelik korniyerler ile güçlendirilmiş bileşik elemanların yapısal performansını deneysel ve sayısal analizlerle ele almıştır.



Şekil 2. 6. Kule yapılarının civatalı birleşim konumları Lu (2014)

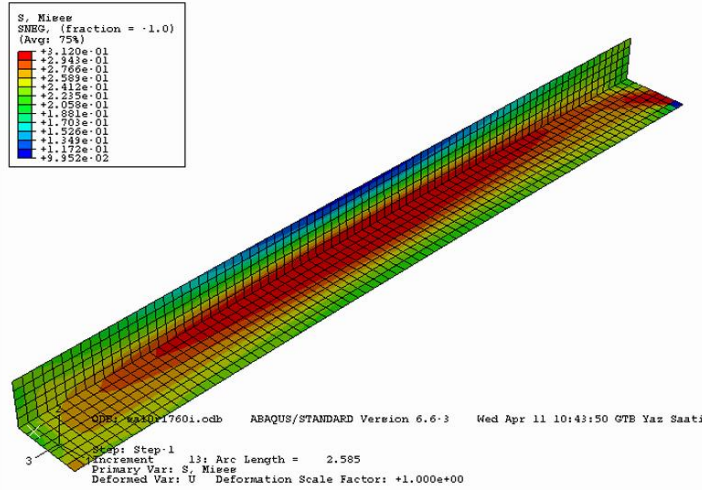


Şekil 2. 7. Deneysel numunenin güçlendirilmesinin düzenlenmesi, Lu (2014)



Şekil 2. 8. Göçme durumu (soldan sağa) — ABAQUS modeli, ABAQUS modeli (yakın çekim) ve deneysel numune, Lu (2014)

Lu (2016) ise çelik iletim kulelerinin karmaşık yükleme koşulları altındaki davranışlarını incelemiş, bağlantı detayları ve yük transfer mekanizmaları üzerine kapsamlı değerlendirmeler yapmıştır. Daloğlu (2016) ise merkezi eksenel yüklere maruz kalan tek parçalı çelik korniyerlerin yük taşıma kapasitelerini doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiş ve TS 648 yönetmeliğinin önerdiği etkileşim denklemlerini değerlendirmiştir.



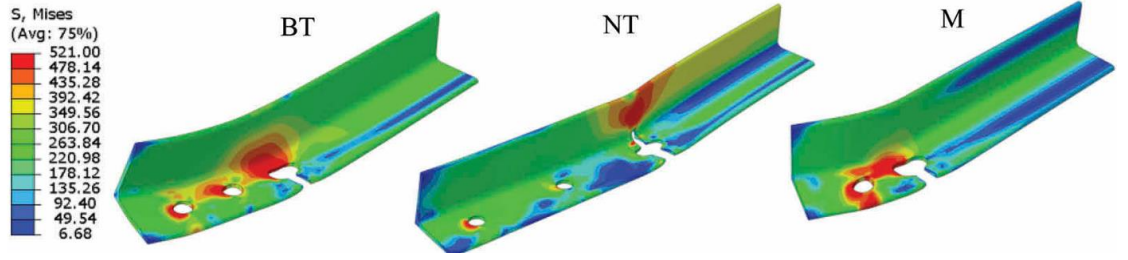
Şekil 2. 9. Elemanın göçme modu Daloğlu (2016)

Numune	P_f (kN)	Deneysel Burkulma Modu	P_f^{AB} (kN)	Sonlu Eleman Burkulma Modu	Boyuna Kısalma, e^{AB} (mm)	P_f / P_f^{AB}
SA1-a,b	163	F	172.4	F	0.85	0.945
SA2-a,b	169	F	167.5	F	0.98	1.009
SA3-a,b	182	F	203.5	F	1.15	0.894
SA4-a,b	167	F	192.5	F	1.32	0.868
SA5-a,b	161	F	181.5	F	1.37	0.887
SA6-a,b	295	F	312.6	F	1.64	0.944
SA7-a,b	283	F	303.5	F	1.70	0.932
SA8-a,b	141	FT	134.4	FT	0.92	1.049
SA9-a,b	135	FT	111.8	FT	1.10	1.208
SA10-a,b	143	FT	142.0	FT	0.93	1.007
SA11-a,b	123	FT	111.9	FT	1.23	1.099
SA12-a,b	277	FT	257.9	FT	1.47	1.074
SA13-a,b	190	FT	207.5	FT	1.74	0.916
Ortalama						0.987
Varyans						0.010

Şekil 2. 10. Modelden ve deneyden elde edilen göçme yüklerinin karşılaştırılması Daloğlu (2016)

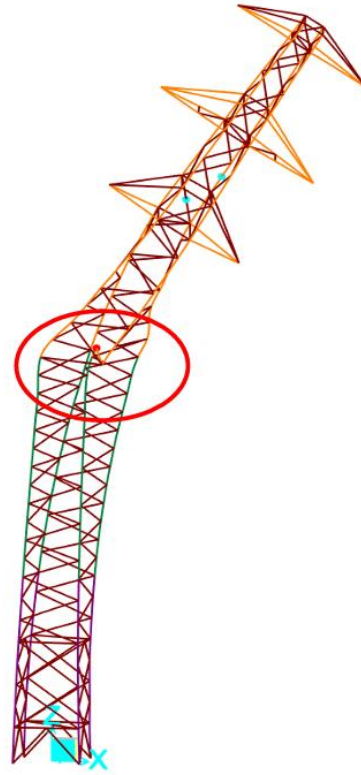
ABDELRAHMAN (2020), Bu tezde, ince cidarlı ve asimetric tek korniyer elemanların yerel, kesitsel ve global burkulma davranışlarını doğru biçimde temsil edebilmek için kabuk esaslı sonlu elemanlara dayalı gelişmiş bir modelleme ve tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, mevcut yönetmelik ve analiz yöntemlerinin yetersizlikleri ortaya konmuş; tek korniyerler için yeni bir elle hesap yöntemi, doğrudan analiz yöntemi (DAM) için etkin bir gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ve bağlantı kaymalarını dikkate alan gelişmiş bir birleşim modeli önerilmiştir.

BERNATOWSKA (2021), tek sıra cıvata ile bağlanan çelik korniyerler için nihai çekme dayanımını belirlemek üzere bir sayısal model geliştirmiş ve farklı göçme modlarını incelemiştir.



Şekil 2. 11. Göçme yüküne ulaşıldıktan sonra köşebentlerde etkin gerilme dağılımı ve kırılma şekli, BERNATOWSKA (2021)

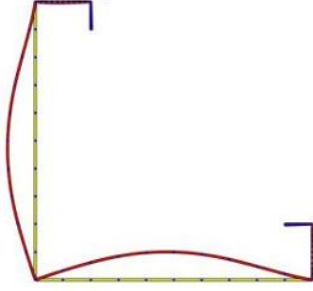
Çelik kafes yapıların güvenliği, özellikle aşırı hava koşulları altında büyük önem taşımaktadır. Köşker (2022), Türkiye’de yaşanan bir fırtına sonucu yıkılan çelik enerji iletim direklerini inceleyerek, farklı modelleme yaklaşımlarını değerlendirmiş ve kritik elemanları belirlemiştir.



Şekil 2. 12. Kulenin gözlemlenen ve tahmin edilen çöküşü Köşker (2022)

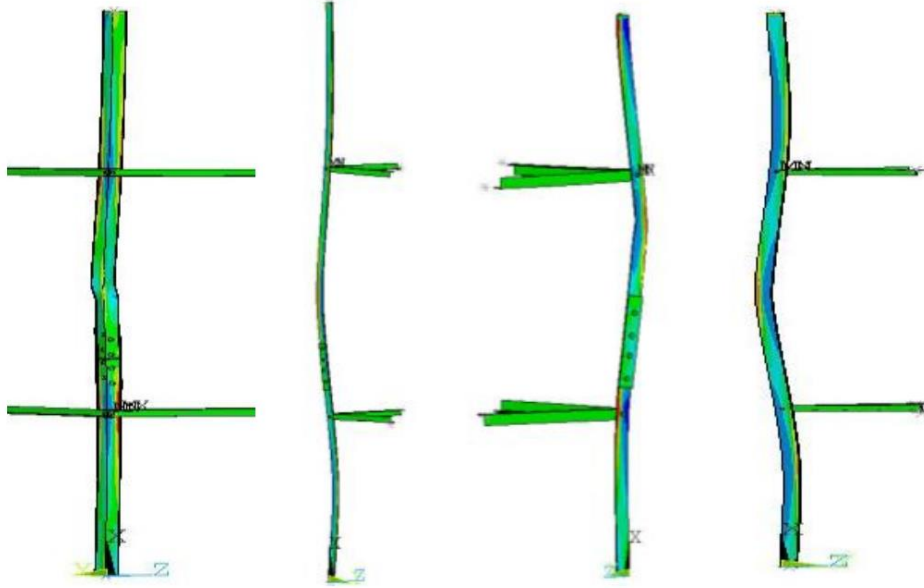
ZHANG (2022), Bu çalışmada, soğuk şekillendirilmiş çelik korniyerlerin aksenal basınç altındaki elastik yerel ve distorsiyonel (Kesit bozulmalı burkulma) burkulma davranışı, CUFSM yazılımı kullanılarak kapsamlı biçimde incelenmiş ve yerel burkulma için yeni bir kritik gerilme tahmin bağıntısı önerilmiştir. Sonuçlar, karmaşık kenarların yerel burkulma kritik gerilmesini önemli ölçüde artırdığını, distorsiyonel burkulma açısından

ise Hancock yönteminin uygunluğunu doğrulayarak tasarıma yönelik faydalı rehberler sunduğunu göstermektedir.

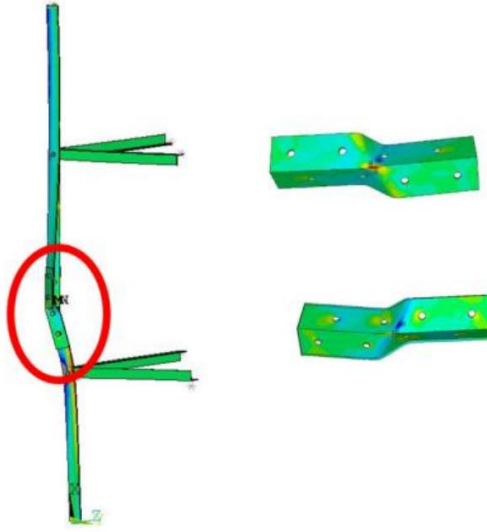


Şekil 2. 13. Soğukta şekillendirilmiş korniyer elemanın deforme olmuş halinin enkesit görüntüsü, ZHANG (2022)

ZHU (2023), Bu çalışmada, kule yapılarında kullanılan Q355 eşit kollu korniyer kolonların aksenal basınç altındaki taşıma kapasitesi deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Sonuçlar, $\lambda < 120$ için yerel burkulmanın, $\lambda \geq 120$ için ise eğilme burkulmasının hâkim olduğunu; bağlantı boyunun kısa kolonlarda taşıma kapasitesini artırdığını ve mevcut yönetmeliklerin orta–yüksek narinliklerde aşırı emniyetli kaldığını göstermiştir.

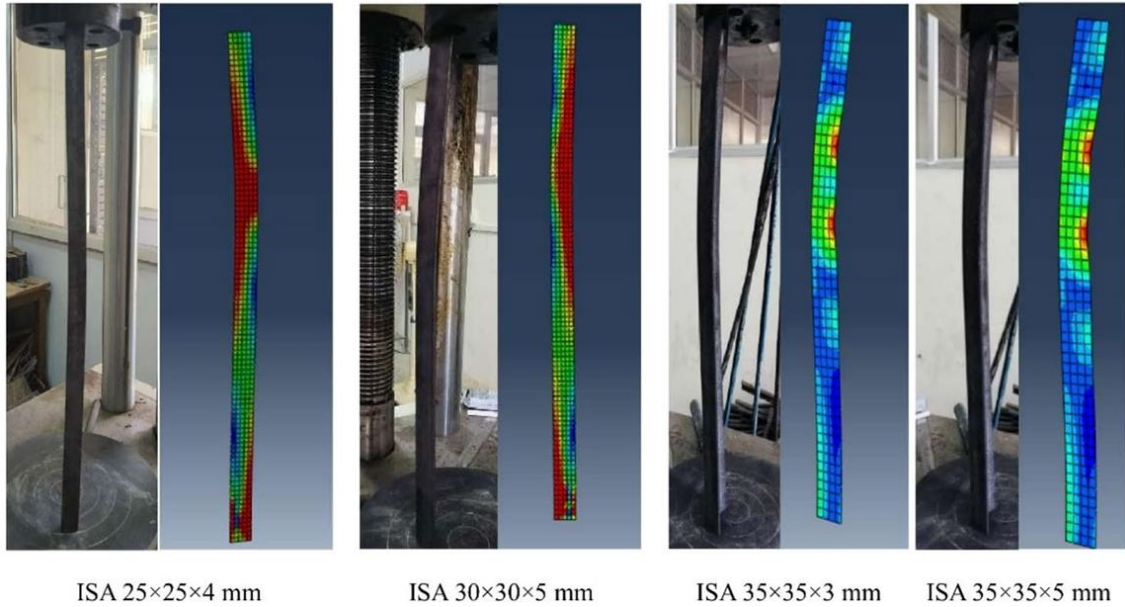


Şekil 2. 14. FEA ile elde edilen tip göçme modları, ZHU (2023)

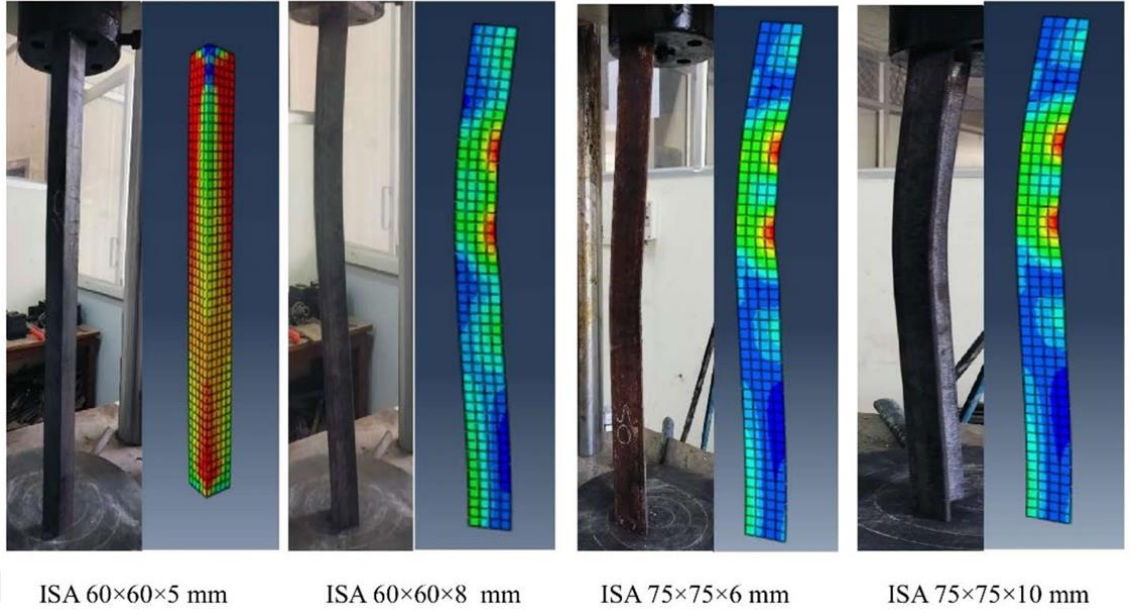


Şekil 2. 15. Birleşim bölgesi hasarı, ZHU (2023)

CHAKRAVARTHY (2025), Bu çalışmada, her iki ucu mafsallı sıcak haddelenmiş eşit kollu korniyerlerin aksenal basınç altındaki nihai taşıma kapasiteleri deneysel ve doğrusal olmayan sonlu eleman analizleriyle incelenmiş ve sonuçlar ilgili yönetmeliklerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, makine öğrenmesi yöntemleri (ANN ve GBR) kullanılarak nihai yük tahmini yapılmış ve bu yöntemlerin yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığı gösterilmiştir.



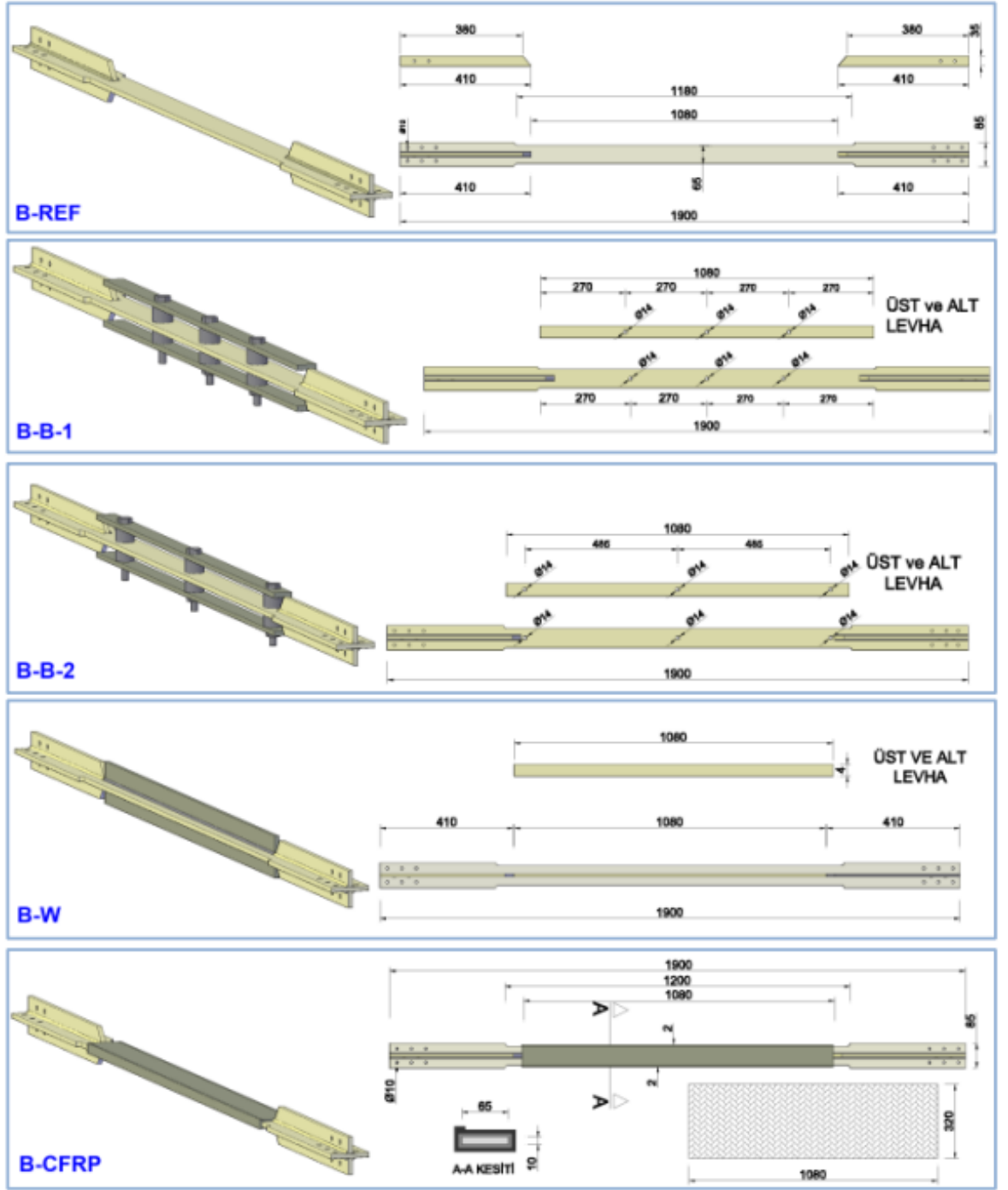
Şekil 2. 16. Deney sonucu göçme mod şekli ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ISA notasyonu tezde korniyer anlamına gelmektedir.), CHAKRAVARTHY (2025)



Şekil 2. 17. Deney sonucu göçme mod şekli ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması (ISA notasyonu tezde korniyer anlamına gelmektedir.), CHAKRAVARTHY (2025) (Devamı)

2.2. Çelik Köşe Elemanlarının Güçlendirilmesi

Çelik elemanların burkulma dayanımlarını artırmak amacıyla çeşitli güçlendirme yöntemleri uygulanmaktadır. DÜĞENCİ (2022), belirli narinlikteki basınç çubukları üzerinde dört farklı güçlendirme yöntemi kullanarak, zayıf eksen ataletini artırmayı amaçlamış; kaynaklı plaka ilavesinin burkulma dayanımında en büyük artışı sağladığını ancak çekme kuvveti altında daha erken göçme olduğunu göstermiştir.



Şekil 2. 18. Güçlendirme stratejisi, DÜĞENCİ (2022)

Numune Adı	Güçlendirme Şekli (Orta bölge Güçlendirmesi)
B-REF	---
B-W	2 adet 40×1080×10 mm levhanın kaynaklı bağlanmasıyla
B-CFRP	Çift yönlü CFRP kumaşının iki kat sarılmasıyla
B-B/1	2 adet 40×1080×10 mm levhanın üç adet bulonla bağlanmasıyla
B-B/2	2 adet 40×1080×10 mm levhanın üç adet bulonla bağlanmasıyla

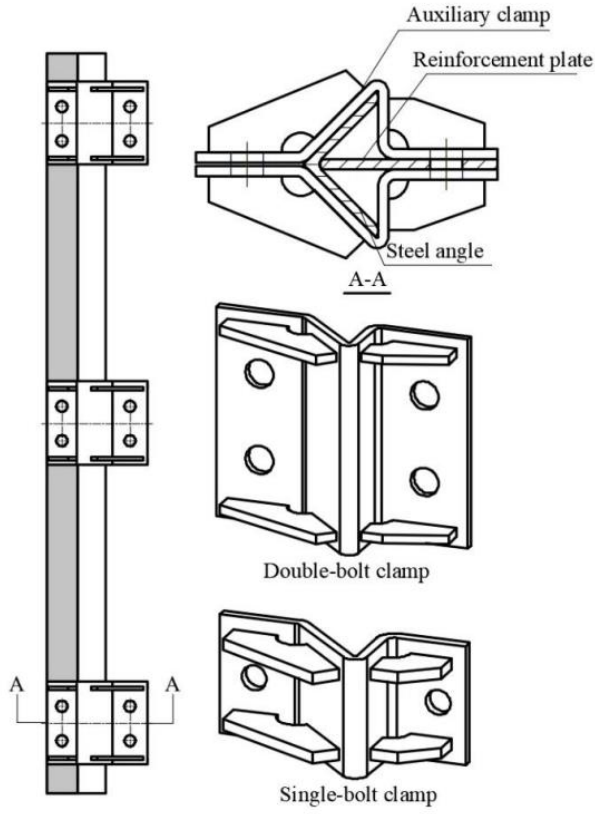
Şekil 2. 19. Eleman adlandırmaları, DÜĞENCİ (2022)

Numune	Çekme		Basınç	
	Maksimum Eksenel yük kN	Referansa göre değişim* %	Maksimum Eksenel yük kN	Referansa göre değişim* %
B-REF*	235.50	0.0	-31.69	0.0
B-CFRP	240.30	2.04	-41.66	31.44
B-W	312.60	32.74	-249.44	687.08
B-B-1	228.44	-3.00	-92.49	191.85
B-B-2	239.50	1.70	-38.05	20.07

Şekil 2. 20. Deney sonuçları, DÜĞENCİ (2022)

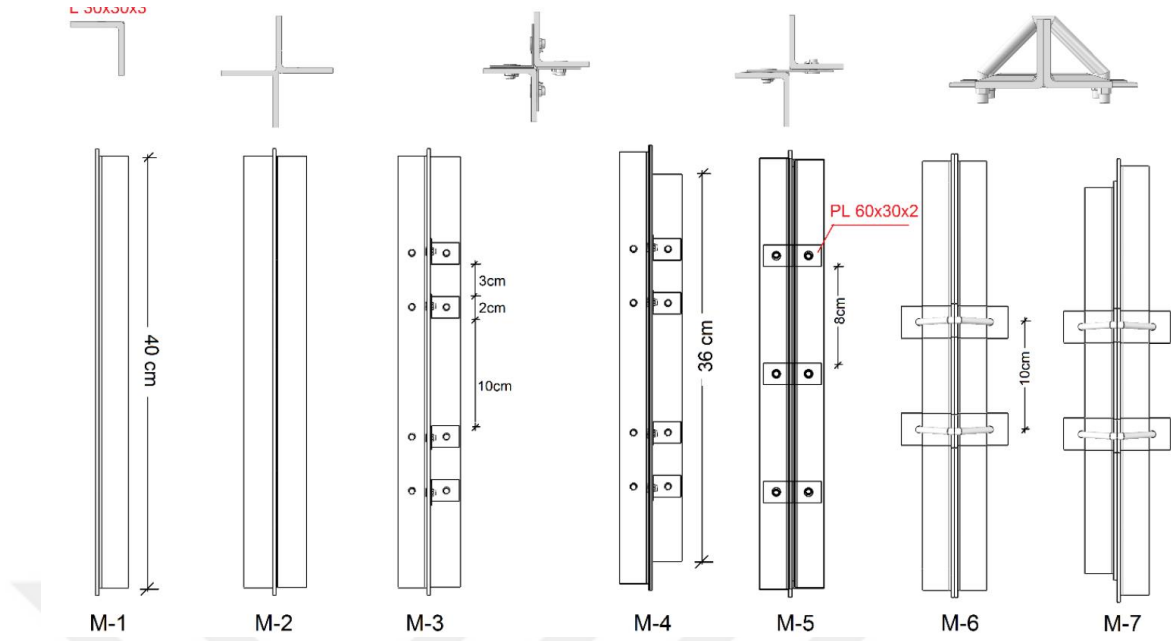
İŞİK (2023), mevcut bir çelik yapıdaki kesit boyutlarının projeye uygun olmadığını belirleyerek, güçlendirme işlemlerinin yapısal dayanımı artırmadaki etkinliğini ortaya koymuştur.

LI (2023), Bu çalışmada, performansı zamanla azalan çelik korniyerli kafes kuleler için yapıya zarar vermeyen (non-destrüktif) bir güçlendirme yöntemi önerilmiş ve eksenel basınç deneyleriyle yöntemin etkinliği incelenmiştir. Sonuçlar, özellikle narin elemanlarda taşıma kapasitesinin %39–174 oranında artırılabilirdiğini ve AISC 360-16’ya dayalı tasarım yaklaşımının bu güçlendirilmiş korniyerlerin burkulma kapasitesini güvenilir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir.

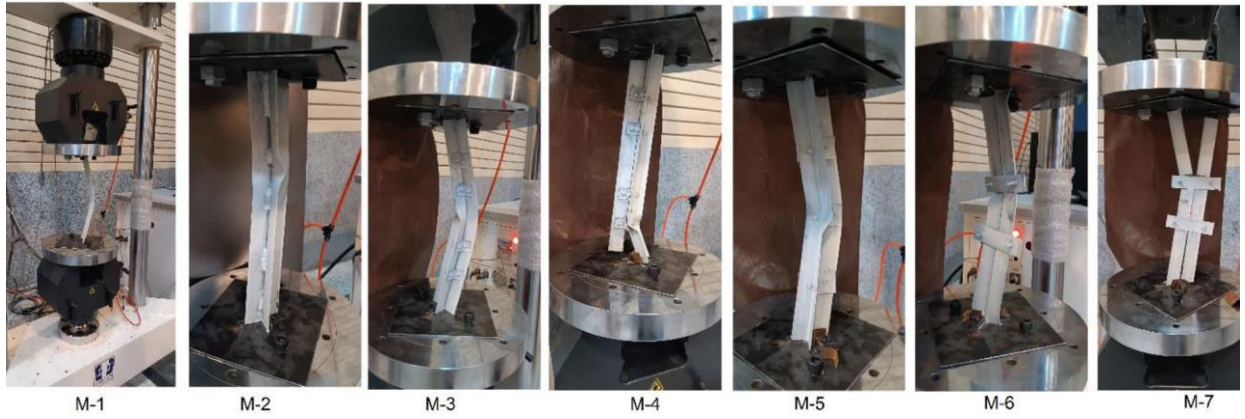


Şekil 2. 21. Güçlendirme stratejisi, LI (2023)

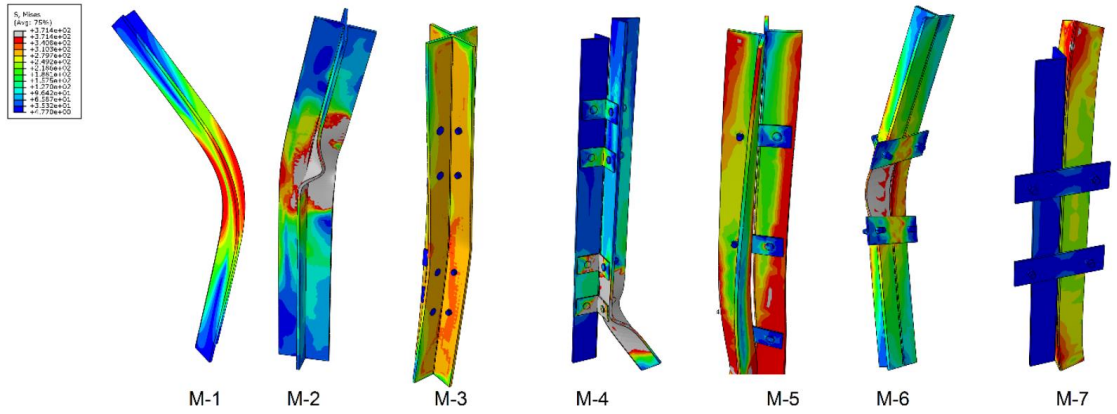
SADEGHI (2024), Bu çalışmada, rüzgâr yüklerine karşı hassas olan civatalı çelik kafes enerji iletim kulelerinde rüzgâr etkisi CFD tabanlı analizlerle incelenmiş ve en olumsuz basınç katsayıları +1 ve -1.2 olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel ve sayısal burkulma analizleri, basınç çubuklarının göçmeyi kontrol ettiğini ve ana eleman boyunca belirli bir uzunlukta korniyer bağlantı eklenmesinin taşıma kapasitesini yaklaşık %38 artırdığını göstermiştir.



Şekil 2. 22. Güçlendirme stratejileri, SADEGHI (2024)

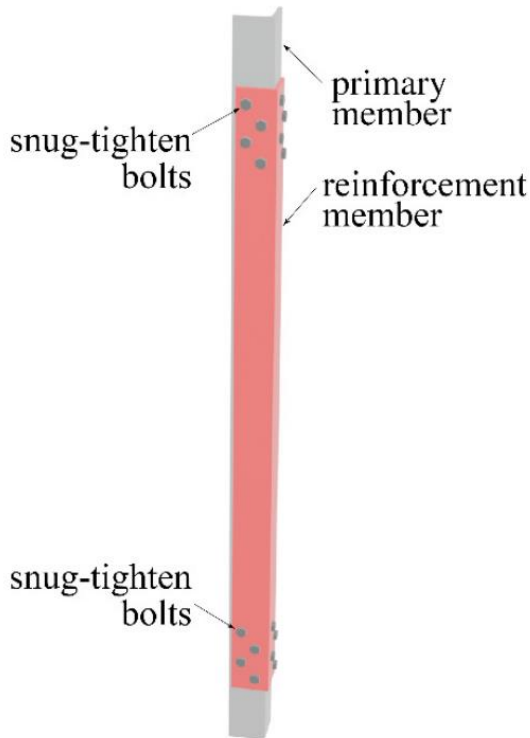


Şekil 2. 23. Güçlendirilen elemanların burkulma davranışının deney sonuçları, SADEGHI (2024)

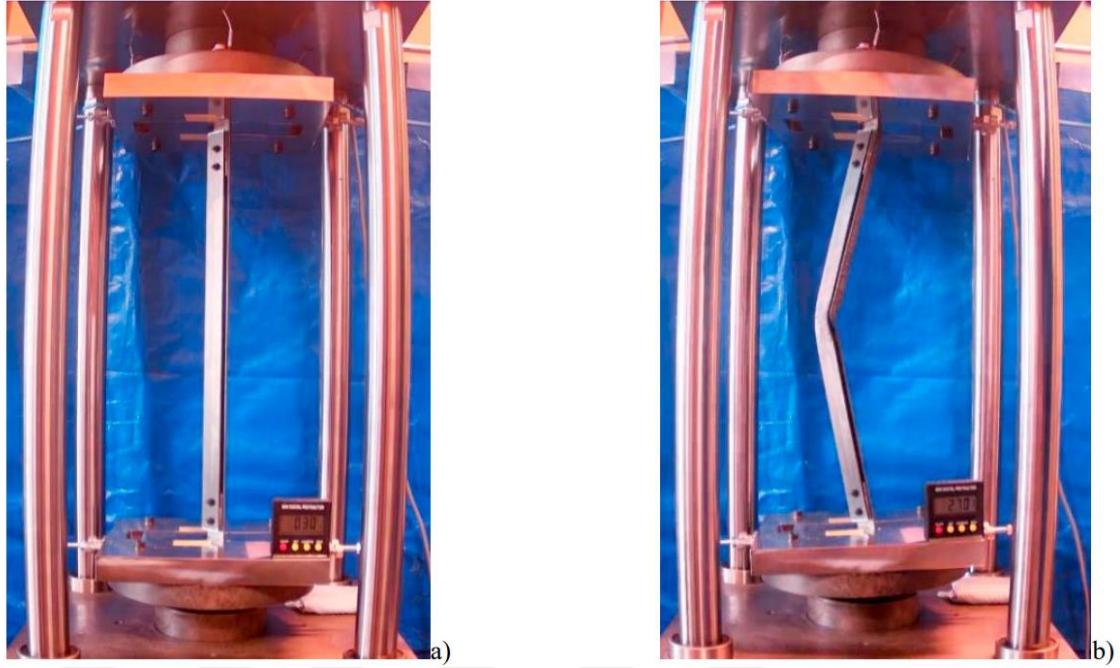


Şekil 2. 24. Güçlendirilen elemanların burkulma davranışının FEA sonuçları, SADEGHI (2024)

SATO (2024), Bu çalışmada, Japonya’da rüzgâr yükleri esas alınarak tasarlanan ve son yıllarda artan rüzgâr şiddeti nedeniyle güçlendirilmesi gereken çelik korniyerli enerji iletim kuleleri için, eksantrik yük altındaki güçlendirilmiş korniyer elemanların eğilme burkulma dayanımını değerlendiren bir yöntem önerilmiştir. Teorik olarak geliştirilen bağıntı, küçük ölçekli deneylerle doğrulanmış ve güçlendirilmiş çelik korniyerlerin taşıma kapasitesini makul doğrulukla tahmin edebildiği gösterilmiştir.



Şekil 2. 25. Güçlendirme stratejisi, SATO (2024)



Şekil 2. 26. Deney sonuçları, SATO (2024)

λ_c (l mm)	Ncr (kN) (N_{cr}/N_y)		Reinforced	
	Single		No.1	No.2
	No.1	No.2	No.1	No.2
0.516 (156)	20.7 (0.573)	-	-	-
0.681 (206)	19.7 (0.546)	20.5 (0.568)	22.3 (0.618)	22.1 (0.612)
1.01 (306)	15.9 (0.440)	17.3 (0.479)	19.8 (0.548)	19.0 (0.526)
1.34 (406)	9.33 (0.258)	9.64 (0.267)	18.4 (0.510)	18.4 (0.510)
1.61 (1.61)	7.61 (0.211)	7.81 (0.216)	18.3 (0.507)	14.8 (0.410)

λ_c (l mm)	Ncr (kN) (N_{cr}/N_y)		Reinforced
	Single		No.1
	No.1	No.2	No.1
0.432 (156)	26.6 (0.518)	30.0 (0.584)	29.4 (0.572)
0.571 (206)	29.0 (0.564)	23.4 (0.455)	-
0.848 (306)	19.1 (0.372)	-	-
1.13 (406)	15.8 (0.307)	15.5 (0.301)	31.6 (0.615)
1.35 (1.61)	12.8 (0.249)	13.3 (0.259)	24.6 (0.479)

Şekil 2. 27. Deney sonuçları, SATO (2024)

2.3. Mevcut Çalışmalardaki Boşluklar ve Bu Çalışmanın Katkısı

Mevcut literatür, çelik köşe elemanlarının stabilite davranışı ve güçlendirme yöntemleri üzerine önemli bulgular sunmaktadır. Ancak, plakalarla güçlendirilmiş çelik korniyer elemanlarının farklı yükleme senaryoları altındaki burkulma performansı

üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. Özellikle, farklı plaka geometrileri, bağlantı detayları ve yük transfer mekanizmalarının etkisi yeterince incelenmemiştir.

Bu çalışma, çelik köşe elemanlarının basınç altında plakalar ile güçlendirilmesi durumunda stabilite performanslarını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Sayısal analizler ile farklı güçlendirme stratejilerinin burkulma dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirilecek ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek öneriler sunulacaktır



3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada kullanılan berkitilmemiş L60.60.6 eşit kollu korniye elemanların aksel basınç altındaki davranışları, farklı hesap yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elemanların taşıma kapasiteleri hem mevcut standartlara dayalı mühendislik hesaplamalarıyla hem de sayısal analiz yöntemleriyle belirlenmiştir. Bu kapsamda, elemanlar öncelikle Eurocode 3 (EN 1993-1-1) ve ÇYTHYE yönetmeliklerine göre hesaplanmış, ardından Trahair (2008) tarafından geliştirilmiş burkulma denklemleri kullanılarak çözümlenmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal olmayan nümerik analizler gerçekleştirilerek elde edilen sonuçların standart hesap yöntemleriyle karşılaştırılması sağlanmıştır.

Her bir hesap yöntemi için elemanların serbest burkulma boyları dikkate alınarak kapasite değerlendirmeleri yapılmış; özellikle burkulma eksenine, kesit inceliğine ve boy/açıklık oranına bağlı kapasite değişimleri analiz edilmiştir. Bu analizler, çalışmanın ilerleyen aşamalarında berkitilmiş elemanlar üzerinde yapılacak değerlendirmeler için referans niteliği taşımaktadır. Hesaplamalar, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm ve 150 cm uzunluğa sahip berkitilmemiş L60.60.6 korniye elemanları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

3.1. Berkitilmemiş Elemanlar

3.1.1. EC3'e Göre Hesap

Bu bölümde, eşit kollu tekil bir korniye kesitin aksel basınç dayanımı, EN 1993-1-1: Eurocode 3 – Design of Steel Structures yönetmeliği esas alınarak hesaplanmıştır. Eurocode 3 kapsamında basınç elemanlarının tasarımı, elemanın burkulma davranışı, kesit sınıfı, burkulma boyu ve geometrik özelliklerine bağlı olarak gerçekleştirilir.

Hesaplamalarda, öncelikle elemanın kesit sınıfı belirlenmiş, ardından burkulma elemanı olarak sınıflandırılması yapılmıştır. Kritik burkulma gerilmesi Euler teorisine dayalı olarak hesaplanmış ve ardından elemanın ait olduğu burkulma eğrisi seçilmiştir. Bu eğriye göre kesitin azaltılmış basınç dayanımı χ katsayısı belirlenmiş ve bu katsayı kullanılarak tasarım aksel basınç dayanımı elde edilmiştir.

Eurocode 3 yönetmeliği, özellikle eksantrik yüklü ve tekil kesitli elemanların tasarımında detaylı yaklaşımlar sunmaktadır. Bu nedenle korniye gibi asimetric kesitlerin burkulma analizinde elemanın bağlandığı yön, rijitlik durumu ve burkulma boyu gibi parametreler dikkatle değerlendirilmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan tüm parametreler, yönetmeliğin ilgili tabloları ve formülleri doğrultusunda seçilmiş olup, elde edilen sonuçlar tasarım kontrolü açısından değerlendirilmiştir. Hesaplamaların detayları aşağıda sunulmuştur.

$$N_{b,Rd} = \frac{x \cdot A \cdot f_y}{\gamma M1} \quad (3.1)$$

Bu formül, kesitin malzeme özellikleri ve geometrik özellikleri göz önüne alınarak elemanın eksenel yük altında ne kadar dayanabileceğini belirlemektedir.

3.1.1.1. Burkulma Etkisi ve Azaltma Katsayısı (χ)

Çelik elemanlarda eksenel yük altında meydana gelebilecek bir diğer önemli durum burkulmadır. Elemanın burkulmaya karşı duyarlılığı, kesitin geometrisi (örneğin atalet yarıçapı) ve elemanın destek koşulları ile ilişkilidir.

3.1.1.2. Burkulma Faktörünün (λ) Hesaplanması

Öncelikle elemanın burkulmaya karşı hassasiyetini belirleyen boyutsuz parametre λ hesaplanır:

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{P_{ft}}} \quad (3.2)$$

3.1.1.3. Burkulma Azaltma Katsayısının (χ) Belirlenmesi

Burkulma etkisini hesaba katmak için EC3, burkulma azaltma katsayısı χ 'yi tanımlamıştır (EK-1). Bu katsayı, elemanın eksenel dayanımını gerçek durumu yansıtacak şekilde düşürür. χ 'yi belirlemek için önce ara bir parametre φ hesaplanır:

$$\varphi = 0.5[1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2] \quad (3.3)$$

Burada α , kesitin burkulma davranışına bağlı olarak kullanılan katsayıdır (EK-2). Köşebent profiller için yaygın olarak b eğrisi ($\alpha=0.34$) kullanılır. (EK-3)

Daha sonra, burkulma azaltma katsayısı χ şu formülle hesaplanır:

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda^2}} \quad (3.4)$$

Bu formüller, elemanın burkulma davranışına göre güvenlik payını ve dayanım düşüşünü hesaba katarak, daha gerçekçi bir tasarım kapasitesi sunar. Ancak, bu formülün uygulanabilmesi için elemanın kritik burkulma boyu L_{cr} gerekmektedir. Burada, kritik burkulma boyu, BS5950 yönetmeliğinde tanımlanan yöntem kullanılarak elde edilmiştir.

3.1.1.4. BS5950'ye Göre Hesap

Korniye, C ve T profillerinden oluşan basınç elemanlarında, normal uç bağlantıların eksantrisitesi göz ardı edilebilir ve korniye elemanlar, 3.1.1.4.1. deki şart sağlandığı sürece eksenel yüklü bir eleman olarak tasarlanabilir.

L uzunluğu, ağırlık merkezi eksenlerinin kesişim noktaları veya cıvataların yerleşim çizgilerinin kesişim noktaları arasında alınmalıdır. r ise ilgili eksene göre atalet yarıçapıdır. Eksenler EK-4'te tanımlanmıştır.

Her bir eksen etrafındaki burkulma için ilgili L uzunluğunun belirlenmesinde, burkulma düzlemine en fazla 45° açıyla yerleştirilmiş ara yanal destekler dikkate alınabilir.

3.1.1.4.1. Tekli Korniye Basınç Elemanları

Bir korniye bir kolu, bir bağlantı plakasına veya doğrudan başka bir elemana aşağıdaki şekillerde bağlandığında:

(a) Her uçta iki veya daha fazla cıvata ile veya eşdeğer bir kaynaklı bağlantı ile:

Narinlik oranı λ , aşağıdakilerden en büyük olan alınmalıdır:

- 1) $0.85L_{vv}/r_{vv}$ ancak $\geq 0.7L_{vv}/r_{vv} + 15$
- 2) $1.0L_{aa}/r_{aa}$ ancak $\geq 0.7L_{aa}/r_{aa} + 30$
- 3) $0.85L_{bb}/r_{bb}$ ancak $\geq 0.7L_{bb}/r_{bb} + 30$

(b) Her uçta tek bir cıvata ile:

Basınç direnci, eksenel yüklü bir elemanın basınç direncinin %80'i alınmalıdır. Narinlik oranı λ , aşağıdakilerden en büyük olan alınmalıdır:

- 1) $1.0L_{vv}/r_{vv}$ ancak $\geq 0.7L_{vv}/r_{vv} + 15$
- 2) $1.0L_{aa}/r_{aa}$ ancak $\geq 0.7L_{aa}/r_{aa} + 30$
- 3) $1.0L_{bb}/r_{bb}$ ancak $\geq 0.7L_{bb}/r_{bb} + 30$

3.1.2. Trahair'e Göre Eksenel Basınç Kapasitesi

Trahair'ın yaklaşımında hem eğilme hem de burulma etkilerinin birlikte incelendiği analitik yöntemler sunulmaktadır.

Bu bölümde, söz konusu yaklaşımlar doğrultusunda yapılan teorik hesaplamalar sunulmuş ve diğer yönetmeliklerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmeye hazır hale getirilmiştir.

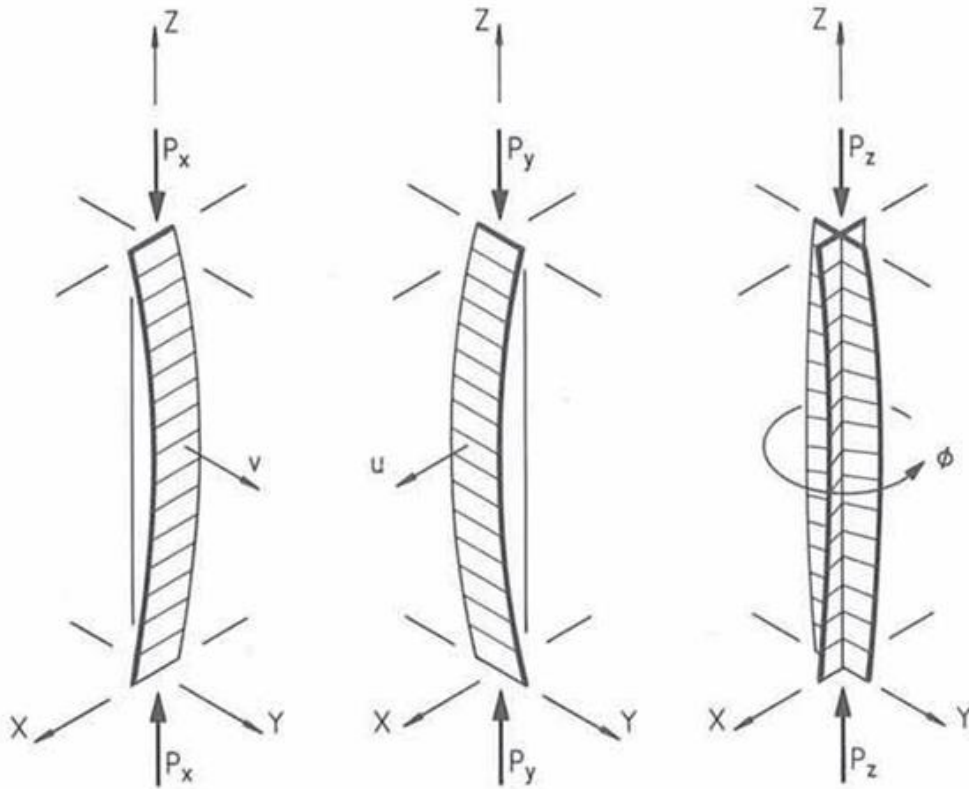
3.1.2.1. Elastik Burkulma Analizi

Eş merkezli yüklenen bir kolon, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi u veya v'yi saptırarak eğilme yönünde burkulabilir veya θ 'yi bükerek burulma yönünde burkulabilir. Bu

burkulma modları, çift simetrik kesitli kolonlar için bağımsızdır ve kolon, bu üç modun her biriyle ilişkili yüklerin en düşük olanında burkulacaktır.

Ancak, asimetrik kesitli kolonlarda modlar birbirine bağımlıdır ve en düşük burkulma yükü, yukarıda açıklanan bağımsız modlarla ilişkili yüklerin her birinden daha düşüktür. Bu durumda, kolon eğilme-burulma modunda burkulmaktadır.

Burkulmaya karşı direnç, kolonun eğilme ve burulma direncine bağlıdır. Bir direnç diğer ikisine kıyasla çok düşük olduğunda, burkulma yükü ve modu bu düşük dirençle güçlü bir şekilde ilişkili olacaktır. Dolayısıyla,



Şekil 3. 1. Eğilmeli ve burulmalı burkulma modları

Şekil 3.1.'de gösterilen aksenal yüklü kolonun uçları basit mesnetlidir, yani:

$$0 = u_{0,L} = v_{0,L} = \phi_{0,L} \quad (3.5)$$

Ve

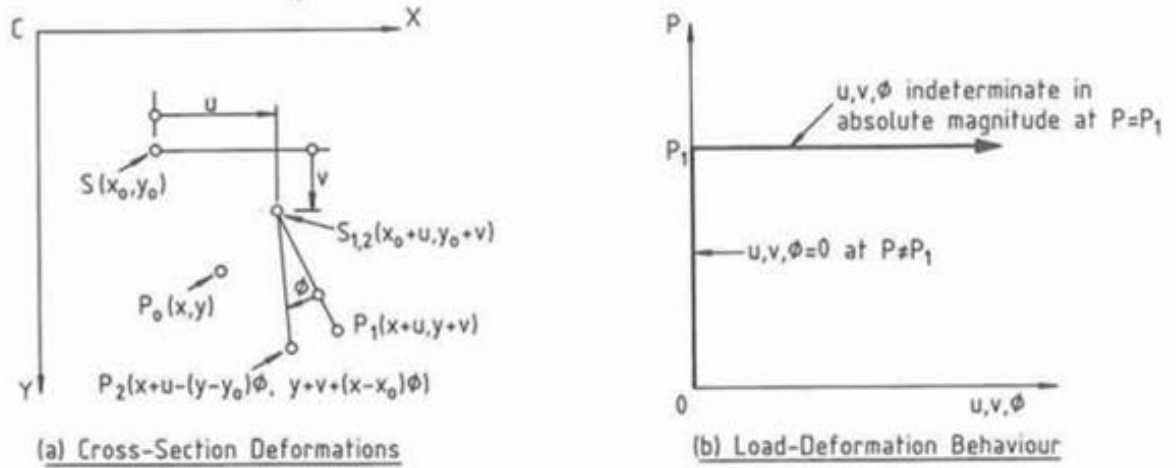
$$0 = u'_{0,L} = v'_{0,L} = \phi'_{0,L} \quad (3.6)$$

Eğer kolon, Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi u, v yönlerinde yer değiştirir ve ϕ açısı etrafında burulursa, denge konumunda diferansiyel denge denklemleri şu şekilde yazılır:

$$(EI_x u'')' = -(Pu')' + (Px_0 \phi')' \quad (3.7)$$

$$(EI_y v'')' = -(Pv')' + (Py_0 \phi')' \quad (3.8)$$

$$(EI_\omega \phi'')' - (GJ \phi')' = -(Pr_2^2 \phi')' + (Px_0 v')' - (Py_0 u')' \quad (3.9)$$



Flexural-torsional buckling behaviour.

Şekil 3. 2. Eğilmeli burulmalı burkulma davranışı

P , basınç halinde pozitif alınır. Denklem 3.7, x eksenini etrafında etki eden eğilme etkileri $-(Pv')$ ve $(Px_0 \phi')$ ile karşılık gelen eğilme direnci $(EI_x v'')$ arasındaki eşitliği temsil ederken, Denklem 3.8 y eksenini etrafında eğilme için benzer bir temsil sağlar. Denklem 3.9, burkulma dirençleri $(EI_\omega \phi'')$ ve $-(GJ \phi')$ ile burulma etkileri $-(Pr_2^2 \phi')$, $(Px_0 v')$ ve $-(Py_0 u')$ arasındaki eşitliği temsil eder.

Denklemler 3.5-3.9'n, burkulma şekilleri

$$u/\delta_x = v/\delta_y = \phi/\theta = \sin \pi z/L \quad (3.10)$$

Tarafından sağlandığı yerine koyma ile doğrulanabilir. Burada δ_x , δ_y ve θ , u , v ve ϕ 'nin orta yükseklikteki değerleridir, ancak aksenal kuvvet P aşağıdaki determinant denklemini sağlamalıdır:

$$\begin{vmatrix} (P_x - P) & 0 & Px_0 \\ 0 & (P_y - P) & -Py_0 \\ Px_0 & -Py_0 & r_2^2(P_x - P) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.11)$$

Burada;

$$P_x = \frac{\pi^2 EI_x}{L^2} \quad (3.12)$$

$$P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \quad (3.13)$$

$$P_z = \frac{GJ + \pi^2 EI_\omega / L^2}{r_2^2} \quad (3.14)$$

x eksenini etrafında eğilme (P_x), y eksenini etrafında eğilme (P_y) ve burulma (P_z) ile ilişkili üç referans burkulma yüküdür.

Denklem (3.11), burkulmuş şekillerin enerji denklemlerine yerleştirilmesiyle de elde edilebilir:

$$\frac{1}{2} \int_0^L (EI_x(u'')^2 + EI_y(v'')^2 + EI_\omega(\phi'')^2 + GJ(\phi')^2) dz \quad (3.15)$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^L P((u')^2 + (v')^2 + r_2^2(\phi')^2 - 2x_0 v' \phi' + 2y_0 u' \phi') dz \quad (3.16)$$

Bu, burkulma sırasında eğilme, burulma ve burulma-burkulma deformasyon enerjisinin, aksenal kuvvet tarafından yapılan işe eşit olduğunu gösterir.

Denklem (3.11), kübik bir denklem şeklinde yazılabilir:

$$f(P) = P^3\{r_2^2 - x_0^2 - y_0^2\} - P^2\{(P_x + P_y + P_z)r_2^2 - P_y x_0^2 - P_x y_0^2\} + P r_2^2\{P_x P_y + P_y P_z + P_z P_x\} - \{P_x P_y P_z r_2^2\} = 0 \quad (3.17)$$

Bu denklemin üç çözümü P_1, P_2, P_3 tür. Bu çözümlerin gerçek olduğu ve en düşük çözümün her zaman üç referans burkulma yükü P_x, P_y, P_z nin en küçüğünden daha az veya eşit olduğu gösterilebilir.

Burkulma şekillerinin (u, v, ϕ) bağıl büyüklükleri, Denklem 3.17'nin çözümünün Denklem 3.7-3.9'da yerine konulmasıyla elde edilir:

$$\delta_x / \theta = P y_0 / (P_y - P) \quad (3.18)$$

$$\delta_y / \theta = P x_0 / (P_x - P) \quad (3.19)$$

Burkulma şekillerinin bağıl büyüklükleri, bir dönme ekseninin belirlenmesini sağlar. Burkulma sırasında, kesitin genel bir $P(x, y)$ noktası, Şekil 3.2.a'da gösterildiği gibi $P(x + u - (y - y_0)\phi, y + v + (x - x_0)\phi)$ konumuna hareket eder. Ancak, $R(x_e, y_e)$ noktasından geçen bu görünür dönme eksenini hareket etmez. Bu nedenle, x_e ve y_e koordinatları:

$$x_e = P_x x_0 / (P_x - P) \quad (3.20)$$

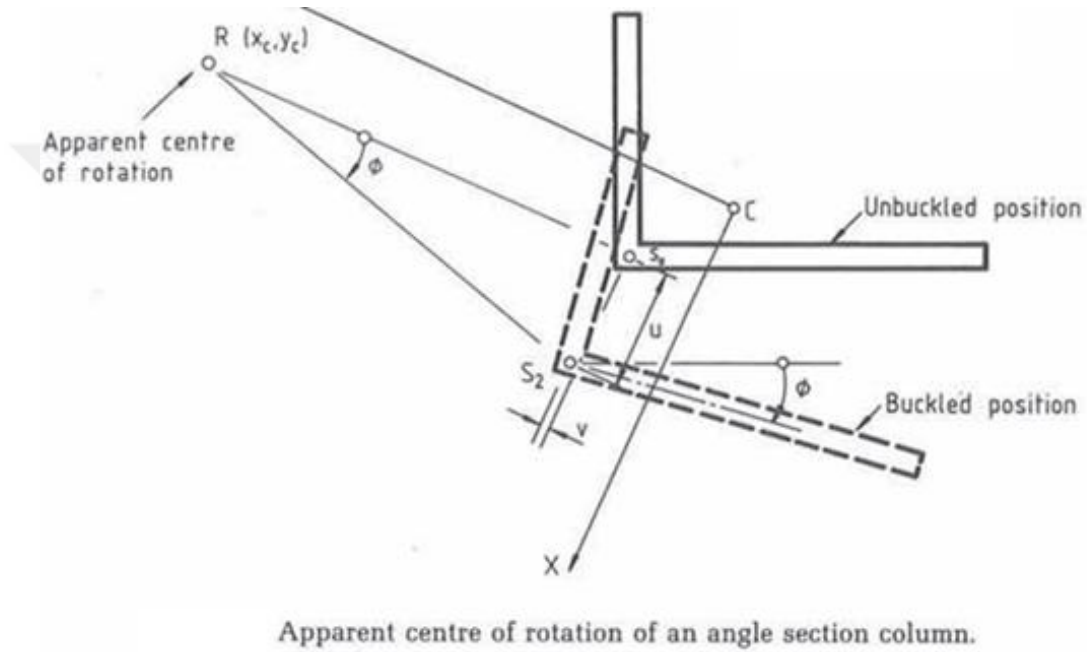
$$y_e = P_y y_0 / (P_y - P) \quad (3.21)$$

denklemlerini sağlamalıdır.

Denklem 3.17'nin P_1 çözümüyle tanımlanan eksenel yük P altında, burkulma deformasyonlarının şekli belirli olmakla birlikte mutlak büyüklükleri belirsizdir (Şekil 3.2.b). Eksenel yük Denklem 3.17'yi sağlamadığında, Denklem 3.5-3.9'un tek çözümü:

$$u = v = \phi = 0 \quad (3.22)$$

şeklindedir.



Şekil 3. 3. Korniyer kesitli elemanın dönme merkezi

Bu durum, kolonun en düşük burkulma yükü P_1 'e kadar düz ve burulmamış halde kaldığını göstermektedir (Şekil 3.2.b). Böylece, denge durumu en düşük burkulma yükü P_1 'de, Denklem 3.22 ile verilen kararlı konumdan, Denklem 3.10 ile tanımlanan nötr denge konumlarına ayrılır.

3.1.3. ÇYTHYE 2016' ya Göre Eksenel Basınç Kapasitesi

3.1.3.1. Narinlik Oranı Sınırı

Basınç elemanlarının, Bölüm 6 veya Bölüm 16'ya göre belirlenen burkulma boyu ($L_c=KL$) kullanılarak hesaplanan narinlik oranı, $L_c/i \leq 200$ olacaktır.

3.1.3.2. Tasarım Esasları

Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı, P_n , eksenel basınç etkisindeki elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve/veya eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumlarına göre hesaplanacak dayanımların en küçüğü olarak alınacaktır.

3.1.3.3. Tasarım Basınç Kuvveti Dayanımı,

$\phi_c * P_n$ (YDKT) veya güvenli basınç kuvveti dayanımı, P_n / Ω (GKT) tüm basınç elemanlarında,

$$\phi_c = 0.90(YDKT) \text{ veya } \Omega_c = 1.67(GKT) \quad (3.23)$$

olmak üzere, bu bölümde tanımlanan kurallara uygun olarak hesaplanacaktır.

3.1.3.4. Karakteristik Basınç Kuvveti Dayanımı

Narin olmayan enkesitli (EK-5'e göre narin enkesit parçası içermeyen) elemanların eksenel basınç kuvveti altındaki karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı, P_n , Denk. (3.24) ile hesaplanacaktır.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (3.24)$$

Burada, kritik burkulma gerilmesi, F_{cr} , Denk. (3.25) veya Denk.(3.26) ile elde edilecektir.

$$\frac{L_c}{i} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{veya } \frac{F_y}{F_e} \leq 2.25) \text{ için}$$

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (3.25)$$

$$\frac{L_c}{i} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{veya } \frac{F_y}{F_e} > 2.25) \text{ için}$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (3.26)$$

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve/veya eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumları için *elastik burkulma gerilmesi*, F_e , aşağıda verilen esaslara göre belirlenecektir.

3.1.3.5. Eğilmeli Burkulma Sınır Durumu

Bu sınır durum, enkesit özelliklerinden bağımsız olarak tüm basınç elemanlarında dikkate alınacaktır. *Eğilmeli burkulma* sınır durumunda karakteristik basınç dayanımı, Denk. (3.24) ile hesaplanacaktır.

Buna göre, Denk. (3.25) veya Denk. (3.26)'daki *elastik burkulma gerilmesi*, F_e , Denk. (3.27) ile belirlenecektir:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i}\right)^2} \quad (3.27)$$

Bu denklem, basınç elemanlarının burkulma dayanımını belirlemek için kullanılır ve elemanın narinlik oranına bağlıdır.

3.1.3.6. Burulmalı ve Eğilmeli-Burulmalı Burkulma Sınır Durumu

Bu bölüm, enkesiti tek simetri eksenli basınç elemanlarını (sırt sırta yerleştirilmiş çift köşebent, T-enkesitler, vb.), enkesiti çift simetri eksenli bazı yapma basınç elemanlarını (+ şekilli yapma enkesitler) ve simetri eksenli bulunmayan basınç elemanlarını kapsar. Ayrıca, burulmaya karşı desteklenmeyen uzunluğu, yanal ötelenmeye karşı desteklenmeyen uzunluğunu aşan enkesiti çift simetri eksenli tüm basınç elemanları ve uzun kol boyunun kalınlığına oranı, $b/t > 0.71E/F_y$ olan tek köşebentten oluşan basınç elemanlarının tasarımında, bu bölümde verilen koşullar göz önüne alınacaktır.

Burulmalı ve eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumlarında karakteristik basınç kuvveti dayanımı, Denk. (3.24) ile hesaplanacaktır. Buna göre, Denk. (3.25) veya Denk. (3.26)'daki elastik burkulma gerilmesi, F_e , ilgili kesit (eşit kollu korniyer) Denk. (3.28) kullanılarak hesaplanacaktır.

(a) Simetri eksenli y-ekseni olmak üzere, y-ekseni etrafında burkulmanın, elemanın eğilmesi ve kayma merkezinden geçen boyuna eksen etrafında dönmesiyle oluştuğu eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumunda (çift köşebentler, T-enkesitler, U-profiller ve eşit kollu tek köşebent gibi tek simetri eksenine sahip enkesitlerden oluşan basınç elemanlarının simetri eksenleri etrafında burkulması) elastik burkulma gerilmesi, F_e , Denk. (3.28) ile hesaplanacaktır.

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}} \right] \quad (3.28)$$

Not: Tek simetri eksenine sahip enkesitlerde simetri eksenine dik olan x-ekseni etrafında burkulmada ise, karakteristik basınç kuvveti dayanımı eğilmeli burkulma sınır durumu esas alınarak Bölüm 3.1.3.4.'e göre belirlenecektir.

3.1.3.7. Tek Korniyerden Oluşan Basınç Elemanları

Tek korniyer oluşan basınç elemanlarında, karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n , eğilmeli burkulma sınır durumu esas alınarak Bölüm 3.1.3.4. veya eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu esas alınarak Bölüm 3.1.3.5.'e göre hesaplanan değerlerin en küçüğü olarak alınacaktır. Kol uzunluğunun kalınlığına oranı,

$$b/t \leq 0.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

olan tek köşebentten oluşan basınç elemanlarında eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumunun esas alınmasına gerek yoktur.

Aşağıda verilen koşulları sağlayan, tek köşebentten oluşan basınç elemanlarında, dışmerkezlik etkisinin ihmal edilmesine ve (1) veya (2)'de tanımlanan etkin narinlik oranları (L_c/i) kullanılarak eksenel basınç kuvveti dayanımının hesaplanmasına izin verilmektedir. Bunun için esas alınacak koşullar aşağıda verilmiştir:

- (a) Köşebent, her iki ucunda aynı kolundan basınç kuvveti etkisinde olmalıdır.
- (b) Köşebent uçları, en az 2 bulon ile veya kaynakla bağlanmalıdır.
- (c) Köşebentin boyuna eksenine dik yük bulunmamalıdır.
- (d) L_c/i oranı 200 sınırını aşmamalıdır.
- (e) Farklı kollu köşebentte, uzun kol boyunun kısa kol boyuna oranı 1.7'yi aşmamalıdır.

Yukarıdaki ve aşağıda (1) veya (2)'de tanımlanan koşulları sağlamayan, tek köşebentten oluşan basınç elemanları, eğilme momenti ve eksenel basınç kuvvetinin ortak etkisi altında ÇYTHYE 2016 Bölüm 11'e göre boyutlandırılacaktır.

(1) Eşit kollu köşebentlerin veya uzun kolları vasıtasıyla bağlanan farklı kollu köşebentlerin, tek veya bir düzlem kafes sistemin örgü elemanı olarak kullanılmaları halinde ve komşu örgü elemanı ile birlikte düğüm noktası levhasının veya başlık elemanının aynı yüzüne (tarafına) bağlanması durumunda, etkin narinlik oranı Denk. (3.29) veya Denk. (3.30) ile hesaplanacaktır:

$$\frac{L}{i_a} \leq 80 \text{ için } \frac{L_c}{i} = 72 + 0.75 \frac{L}{i_a} \quad (3.29)$$

$$\frac{L}{i_a} > 80 \text{ için } \frac{L_c}{i} = 32 + 1.25 \frac{L}{i_a} \quad (3.30)$$

Kısa kolları ile bağlanan farklı kollu köşebentlerde, Denk. (3.29) veya Denk. (3.30) ile hesaplanan etkin narinlik oranı, $4[(b_l/b_s)^2 - 1]$ ile elde edilen değer kadar arttırılacaktır. Ancak, bu narinlik oranı köşebentin zayıf asal eksenine etrafındaki narinliğinin 0.95 katından küçük olamaz:

$$\frac{L_c}{i} \geq 0.95 \frac{L}{i_z}$$

Not: Yukarıdaki koşulları sağlamayan durumlarda, köşebent elemanlarının tasarımı ÇYTHYE Bölüm 11'e göre yapılacaktır.

ÇYTHYE 2016 ya göre hesabı MATLAB ile program haline dönüştürülüp farklı boydaki elemanların eksenel basınç kapasitesi hesabı otomatik olarak yapılmıştır ve EK-6'da paylaşılmıştır.

3.1.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Doğrusal Olmayan Analiz

Bu çalışmada kullanılacak uygun sonlu eleman türünün belirlenebilmesi amacıyla yapılan ön analizlerde, sistemin davranışını temsil edecek şekilde idealize edilmiş farklı sınır şartları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde yapı sistemlerinin modellenmesinde kullanılabilecek farklı tipte elemanlar mevcuttur.

3.1.4.1. Eleman Tiplerinin Tanımı ve Modelleme Yaklaşımı

Bu çalışmada, burkulma davranışı incelenen köşebent (korniye) profillerin sayısal modellemesi için üç farklı eleman tipi kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan eleman tipleri çubuk (BEAM188), kabuk (SHELL181) ve katı (SOLID186) elemanlardır.

3.1.4.1.1. Beam Elemanı

Beam elemanları, uzunluğu kesit boyutlarına göre çok büyük olan yapı elemanları için kullanılır. Temel varsayımlar, Timoshenko kiriş teorilerine dayanmaktadır:

BEAM188, ANSYS sonlu elemanlar yazılımında tanımlı, 3D uzayda çalışan ve 2 düğüm noktasına sahip Timoshenko kiriş teorisine dayanan çubuk elemanıdır. Her düğümde 7 serbestlik derecesi bulunur. Bu eleman tipi ile hem eğilme hem de kayma deformasyonları yaklaşık olarak göz önünde bulundurulur.

3.1.4.1.2. Shell Elemanı

Shell elemanlar, kalınlığı elemanın diğer boyutlarına göre küçük olan, ancak düzlemsel davranışın yanı sıra eğilme etkilerinin de önemli olduğu ince veya orta kalınlıktaki yapıları modellemek için kullanılır. Kabuk teorisi hem membran hem de bending (eğilme) davranışını entegre eder.

SHELL181, 4 düğüm noktalı, her düğümde 6 serbestlik derecesine sahip ve ince cidarlı yapı elemanlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir kabuk elemanıdır. Hem membran (düzlemsel) hem de eğilme davranışlarını temsil edebilir. Kabuk elemanlar sayesinde, köşebent profilin plaka etkileri, lokal burkulma davranışları ve geometrik detayları doğrudan modellenebilir.

Bu çalışmada, özellikle geometrik ve malzeme açısından doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi için tercih edilen eleman tipi SHELL181 olmuştur.

3.1.4.1.3. Solid Elemanı

Solid elemanlar, üç boyutlu sürekli ortamı doğrudan modelleyen elemanlardır. Genellikle tetrahedral veya hexahedral (brick) elemanlar kullanılır.

SOLID186, 20 düğüm noktalı üç boyutlu bir hacimsel elemandır. Karmaşık geometrilere ve çok eksenli gerilme durumlarına sahip yapısal sistemlerde kullanılabilir.

3.1.4.2. Eleman Seçimi İçin Yapılan Ön Analizler

3.1.4.2.1. Eigenvalue Buckling Analizi - Doğrusal burkulma tahkiki

Doğrusal burkulma tahkiki, yapısal bir elemanın eksenel basınç altında stabilitesini kaybettiği teorik burkulma yükünü belirlemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntem yapının burkulma modları ve bu modlara karşılık gelen yük katsayılarını belirlemeyi amaçlar.

Doğrusal burkulma tahkiki için şu özdeğer problemi çözülür;

$$(\mathbf{K} + \lambda \mathbf{K}_\sigma) \mathbf{u} = 0 \quad (3.31)$$

Burada λ , uygulanan başlangıç yükünün hangi katında burkulmanın başlayacağını belirtir. Eğer yapı üzerine P_0 kadar yük uygulanmışsa, teorik kritik burkulma yükü:

$$P_{cr} = \lambda P_0 \quad (3.32)$$

olarak tanımlanır.

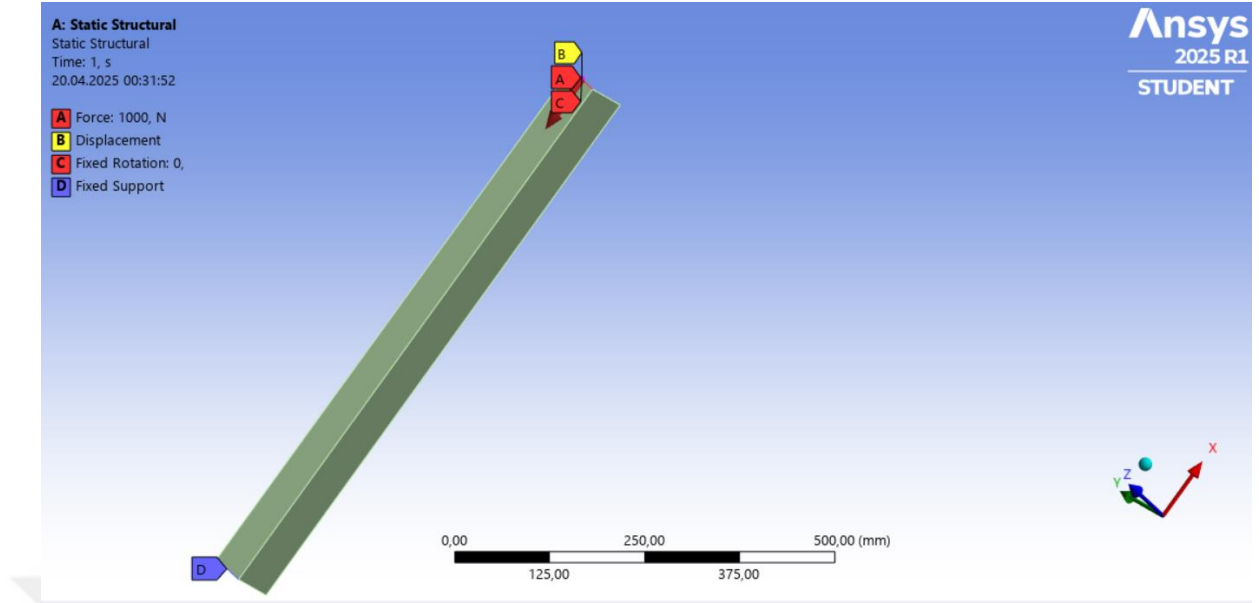
Tekil bir çubuk eleman için Euler burkulma yükü:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(L_{cr})^2} \quad (3.33)$$

şeklinde verilir.

3.1.4.2.2. Sınır Şartları

Eleman tipinin seçiminde yapılacak analizlerde kullanılan sınır şartı olarak, elemanın alt ucu bir kolundan tüm ötelenme (u_x , u_y , u_z) ve dönme (θ_x , θ_y , θ_z) serbestlikleri tutulacak şekilde mesnetlenmiştir. Kuvvetin uygulandığı kolda, yalnızca kuvvet doğrultusundaki ötelenme serbestliği (u_x) serbest bırakılmış; diğer tüm ötelenme ve dönme serbestlikleri sınırlandırılmıştır. Ayrıca kuvvetin uygulanma noktasında gerilme yığılmalarını ve sayısal yakınsama problemini önlemek amacıyla kuvvetin uygulandığı kol ANSYS programında rijit (rigid remote edge) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3. 4. Analizlerde kullanılan sınır şartları

3.1.4.2.3. Mesh Yapısı

Sonlu eleman modelinde ağ (mesh) oluşturulurken ANSYS Mechanical yazılımının Quad Dominant ağ oluşturma yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, sac (sheet body) olarak modellenen köşe elemanlar dörtgen (quadrilateral) ağırlıklı düzenli elemanlarla bölünmüştür. Mesh oluşturma işlemi program kontrollü olarak gerçekleştirilmiş olup, eleman boyutu tüm modeller için 10 mm olarak sabit tutulmuştur. Kullanılan quad-dominant ağ yapısı, elemanlar boyunca daha düzgün bir ağ dağılımı sağlayarak burkulma davranışının ve göçme mekanizmasının sayısal olarak daha sağlıklı temsil edilmesini amaçlamaktadır.

Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
☐ Element Size	10, mm
Sizing	
Quality	
Inflation	
Advanced	
Automatic Methods	
Sheet Body Method	Quad Dominant
Sweepable Body Method	Sweep
Statistics	

Şekil 3. 5. ANSYS ortamında mesh menüsü

3.1.4.3. Doğrusal Olmayan Yapısal Analiz

Bu bölümde, doğrusal olmayan analizlerde izlenen modelleme yaklaşımı, kullanılan eleman tipi, kusur tanımlamaları, malzeme ve geometrik doğrusal olmayanlıklar, sınır şartları konuları açıklanmıştır.

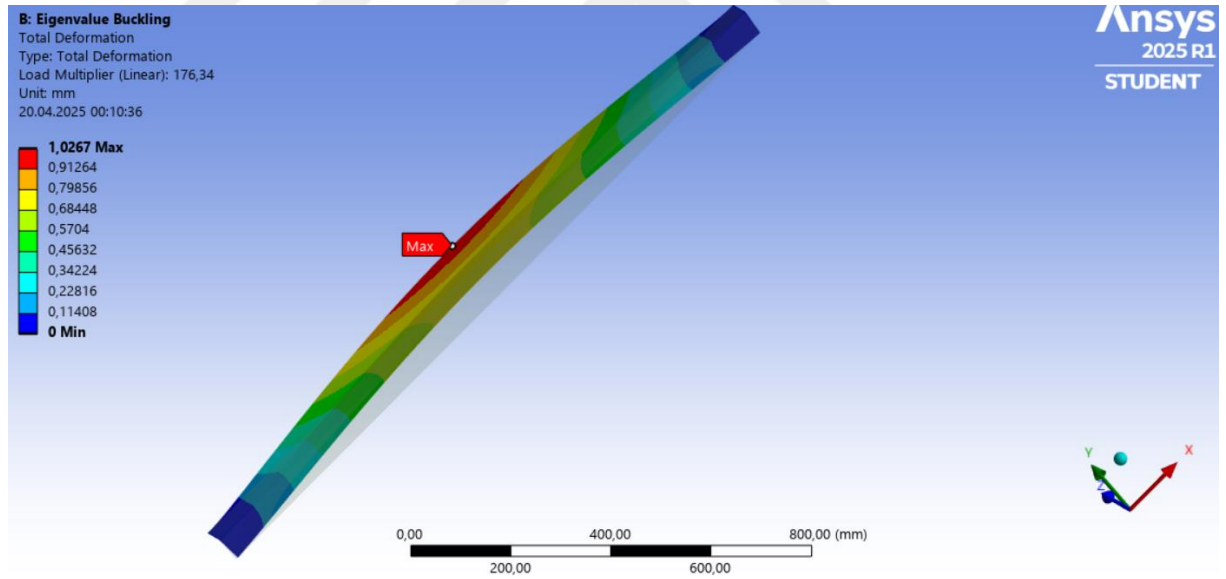
3.1.4.3.1. Geometrik Doğrusal Olmayan Analizler

ANSYS Workbench ortamında büyük deformasyonların hesaba katılacağı analizler “Large Displacement” seçeneği aktif hale getirilerek gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle lineer özdeğer burkulma (eigenvalue buckling) analizi yapılmış ve en küçük özdeğere karşılık gelen 1. burkulma modu şekli elde edilmiştir.

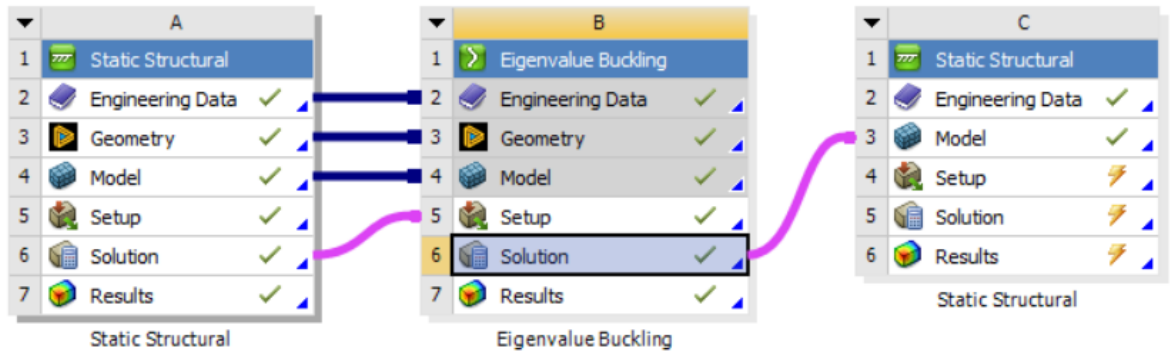
Bu mod şekli, geometrik kusur genliğinin $L/300$ büyüklüğünde olacak şekilde bir Scale Factor (SF) hesaplanmış ve analiz sonucu oluşan geometriyi SF ile çarparak istenilen kusur genliğine sahip geometriyi elde edilmiştir.

Aşağıda Şekil 3.5’te 150cm uzunluğundaki elemanın doğrusal burkulma analizi sonucu gösterilmektedir.



Şekil 3. 6. 150cm uzunluğundaki elemanın lineer eigenvalue buckling analizi sonucu 1. mod şekli

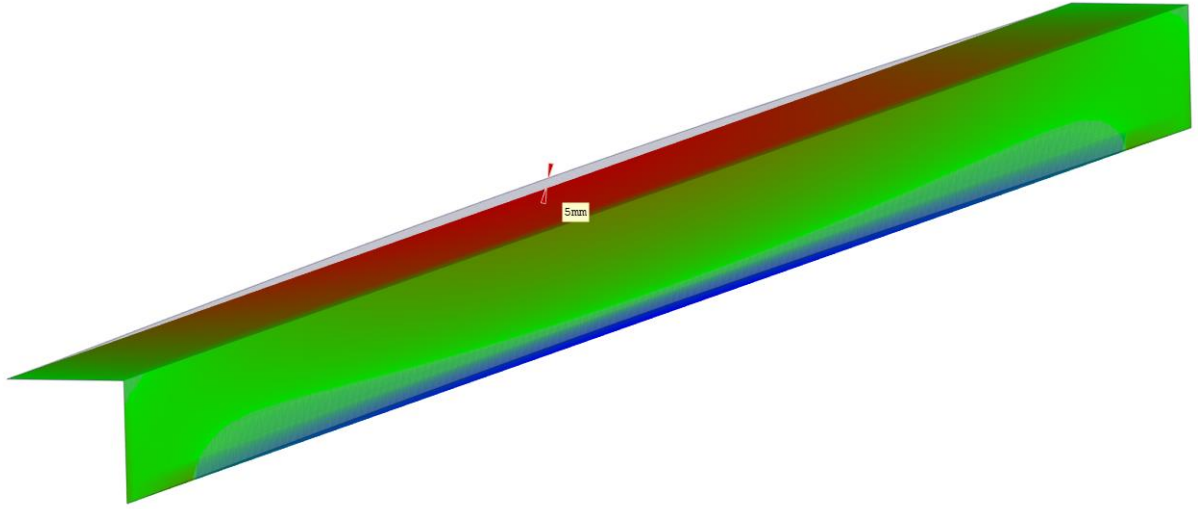
ANSYS ortamında lineer eigenvalue buckling analizi sonucu oluşan 1. Mod şeklinin geometrisinin genlikleri SF ile çarpılarak istenilen kusurlu geometriye sahip elemanlar elde edilmiştir.



Şekil 3. 7. ANSYS çalışma şeması

Properties of Schematic B6: Solution		
	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Component ID	Solution 1
4	Directory Name	SYS-1
5	Notes	
6	Notes	
7	Used Licenses	
8	Last Update Used Licenses	ansys
9	System Information	
10	Physics	Structural
11	Analysis	Eigenvalue Buckling
12	Solver	Mechanical APDL
13	Solution Process	
14	Update Option	Use application default
15	Solve Process Setting	My Computer
16	Update Settings for Static Structural (Component ID: Model 2)	
17	Process Nodal Components	☒
18	Nodal Component Key	
19	Process Element Components	☒
20	Element Component Key	
21	Scale Factor	4,87
22	Mode	1

Şekil 3. 8. 150cm uzunluğundaki elemanın lineer eigenvalue buckling analizi sonucu oluşan 1. mod burkulma şeklinin scale factor tanımı



Şekil 3. 9. 150cm Uzunluğundaki eleman için 5mm kusur genliğinin gösterimi

3.1.4.3.2. Malzeme Doğrusal Olmayanlığı

Doğrusal olmayan analizlerde kullanılan malzeme modeli, yapısal çeliğin elastik-plastik davranışını temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Malzeme modeli olarak bilinear model kullanılmıştır.

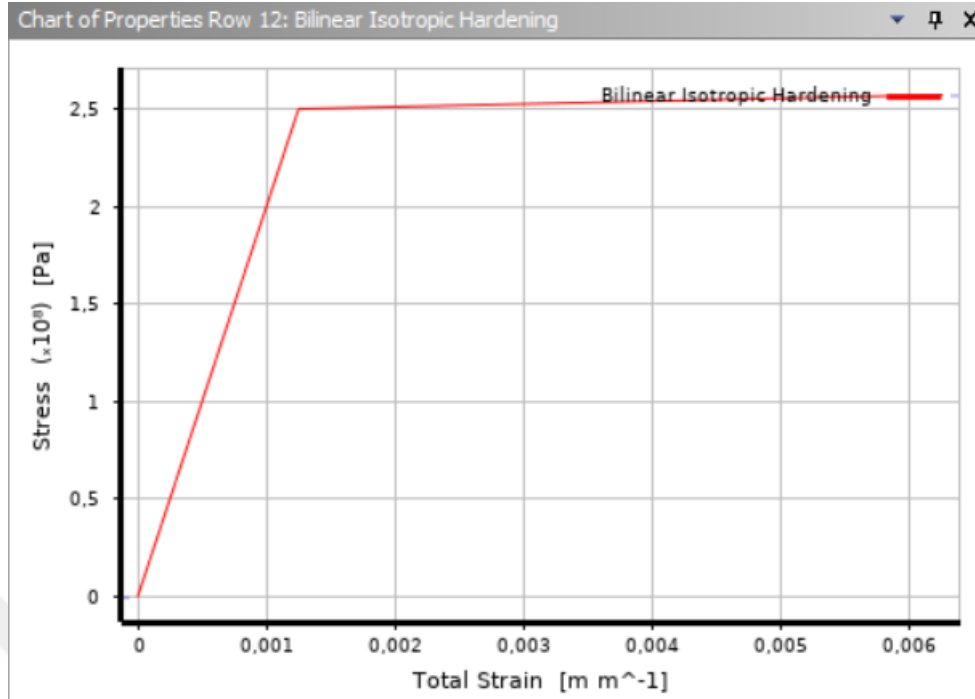
Yapısal çeliğin için malzeme özellikleri:

Elastik modül (E): 210 GPa

Poisson oranı (ν): 0.3

Akma gerilmesi (f_y): 255 MPa

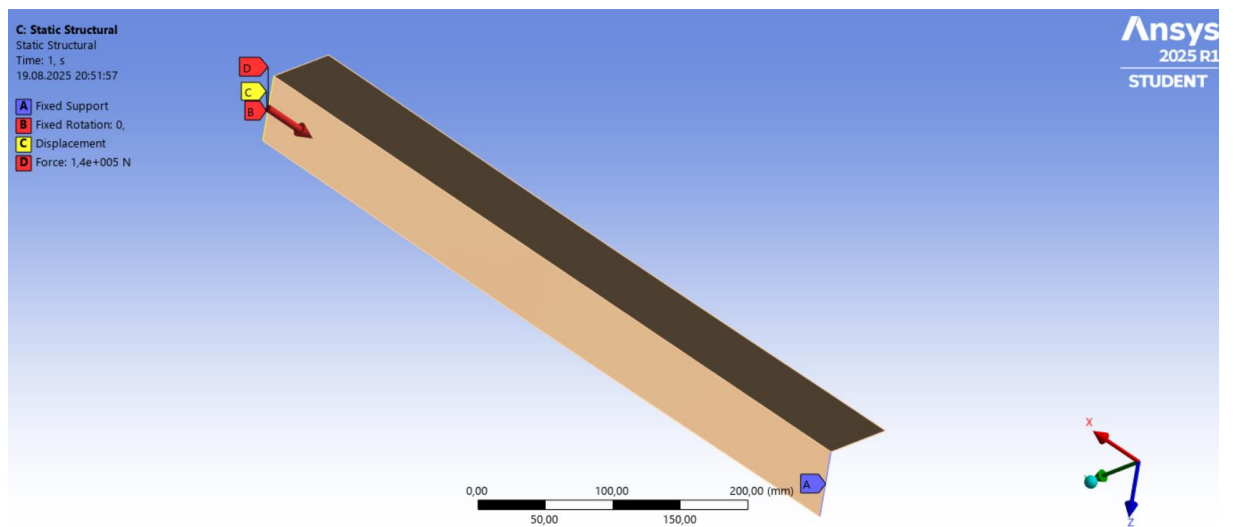
Malzeme yoğunluğu: 7850 kg/m³



Şekil 3. 10. ANSYS kütüphanesindeki yapısal çeliğin gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

3.1.4.4. Sınır Şartları

Doğrusal olmayan analizlerde çalışmanın asıl konusunu temsil edecek sınır şartları Şekil 3.10'da tanımlanmıştır. Yükün uygulandığı kol boyunca θ_x , θ_y , θ_z dönme serbestlikleri tutulu ve o kolda sadece kuvvet yönünde harekete izin verilmiştir. u_y , $u_z = 0$. Korniyerin kuvvetin uygulandığı kolun diğer ucundaki kolda ise $u_x, u_y, u_z = 0$ ve θ_x , θ_y , $\theta_z = 0$, serbestlikler tutuludur.



Şekil 3. 11. Sınır şartlarının ANSYS ortamındaki görüntüsü

3.1.4.5. Analiz Türü ve Yükleme Yöntemi

Bu çalışmada nümerik çözümler doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Analizler hem büyük şekil değiştirmelerin hem de malzeme doğrusal olmayan davranışının hesaba katıldığı *geometrik ve malzeme açısından nonlinear statik analiz* türünde yapılmıştır. Yüklere arc-length yükleme yöntemi kullanılarak artımlı biçimde uygulanmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde doğrusal olmayan analizlerde kullanılacak eleman türünün belirlenmesi için yapılan analiz sonuçları değerlendirilmiştir

Bu kapsamda bulon hizasından yükleme, ağırlık merkezinden yükleme ve kayma merkezinden yükleme durumları için üç farklı eleman tipiyle elde edilen burkulma yükleri sunulmuştur.

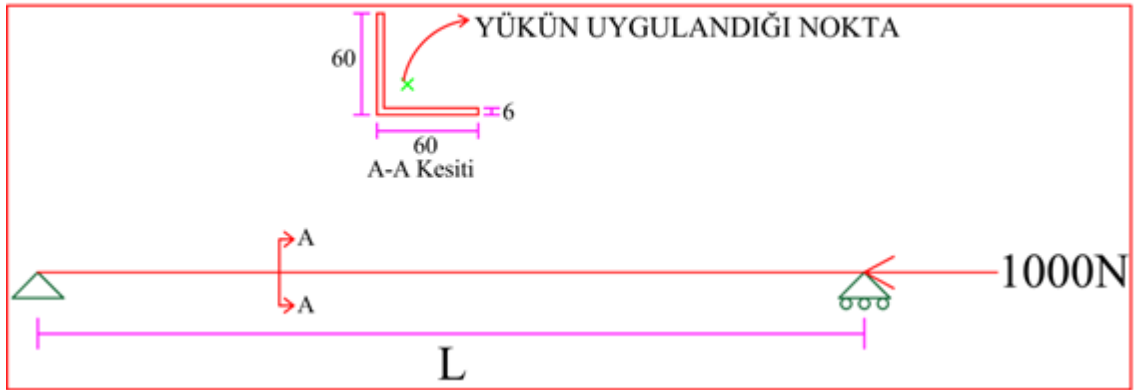
Uygun eleman tipinin belirlenmesi amacıyla, her biri farklı yükleme durumunu temsil eden üç ayrı ön analiz yapılmıştır:

1. Enkesitin ağırlık merkezinden yükleme,
2. Bulon hizasından yükleme (kol boyunun orta noktasından),
3. Kayma merkezinden yükleme.

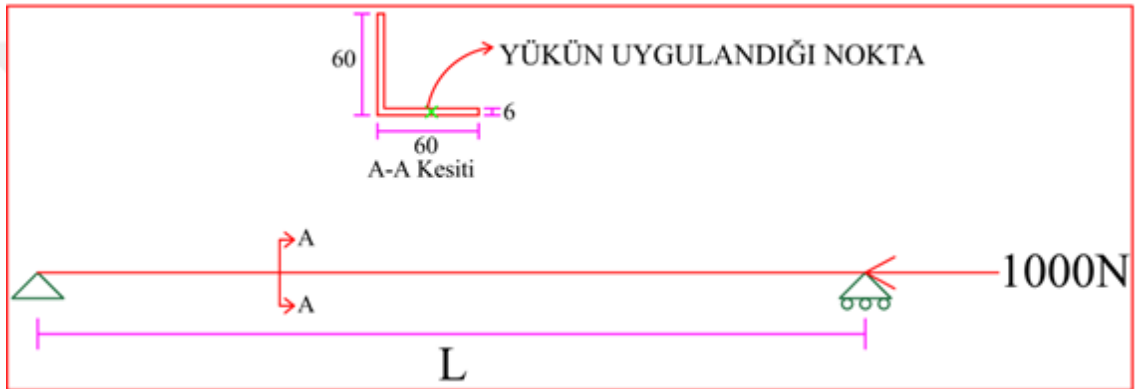
Bu yükleme durumları için, her üç eleman tipi kullanılarak doğrusal özdeğer burkulma (eigenbuckling) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan köşebent profillerin serbest uzunluğu $L=60$ cm ile 150 cm arasında olacak şekilde 10 cm'lik artımlarla değiştirilmiş, böylece her bir yükleme durumu için 10 farklı eleman boyu dikkate alınmıştır.

Toplamda 3 farklı yükleme durumu $\times$ 3 farklı eleman tipi $\times$ 10 farklı eleman boyu olmak üzere 90 farklı model oluşturulmuş ve her biri için kritik burkulma yükü (P_{cr}) hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, her bir yükleme durumu için ayrı ayrı grafiklerle sunulmuştur.

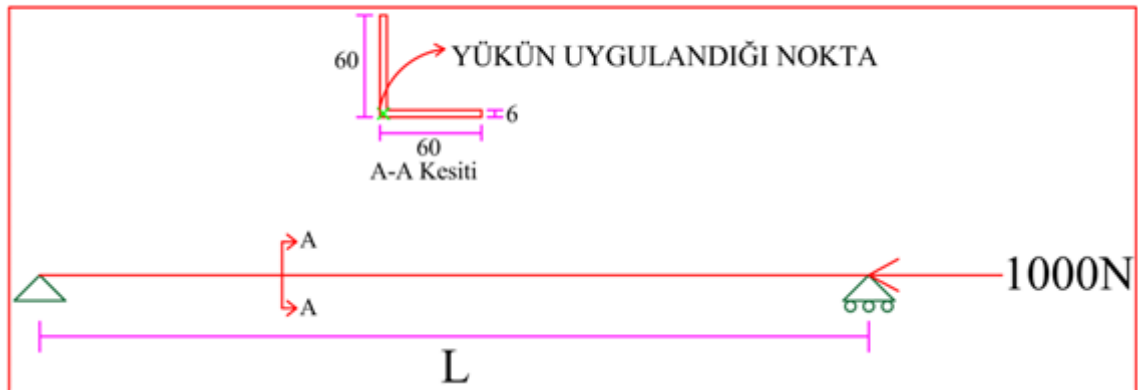
(AĞIRLIK MERKEZİNDEN YÜKLEME)



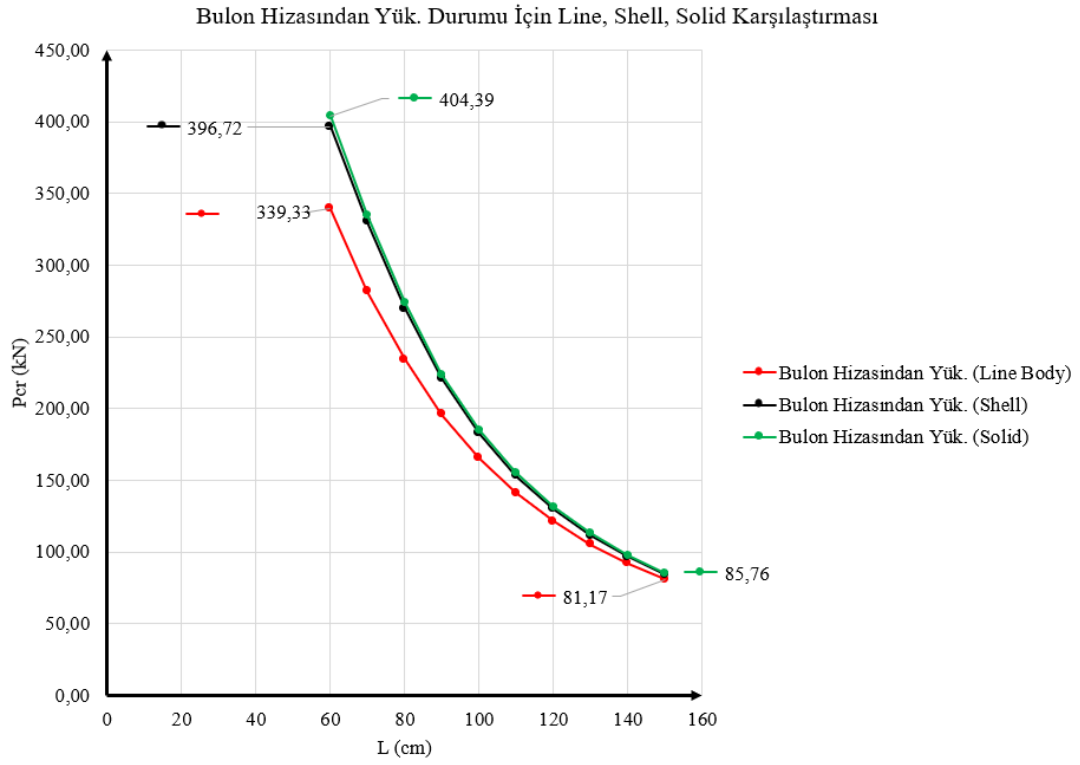
(BULON HİZASINDAN YÜKLEME)



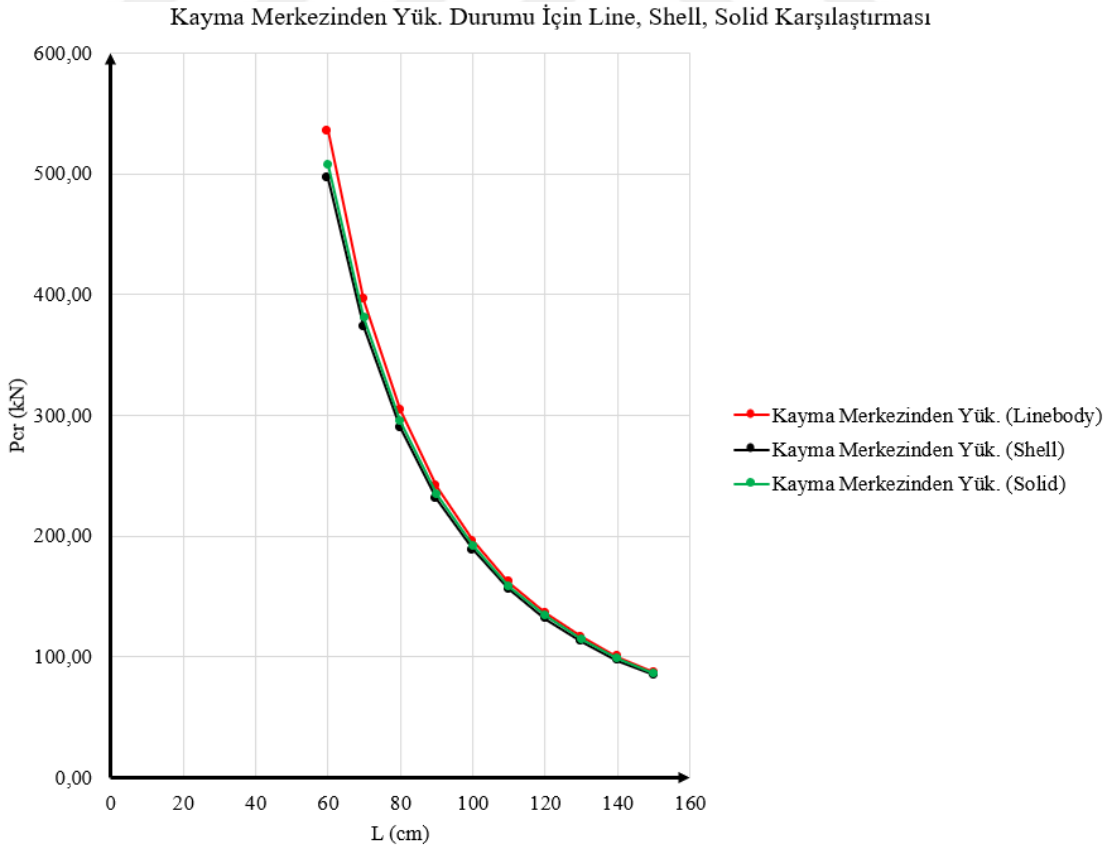
(KAYMA MERKEZİNDEN YÜKLEME)



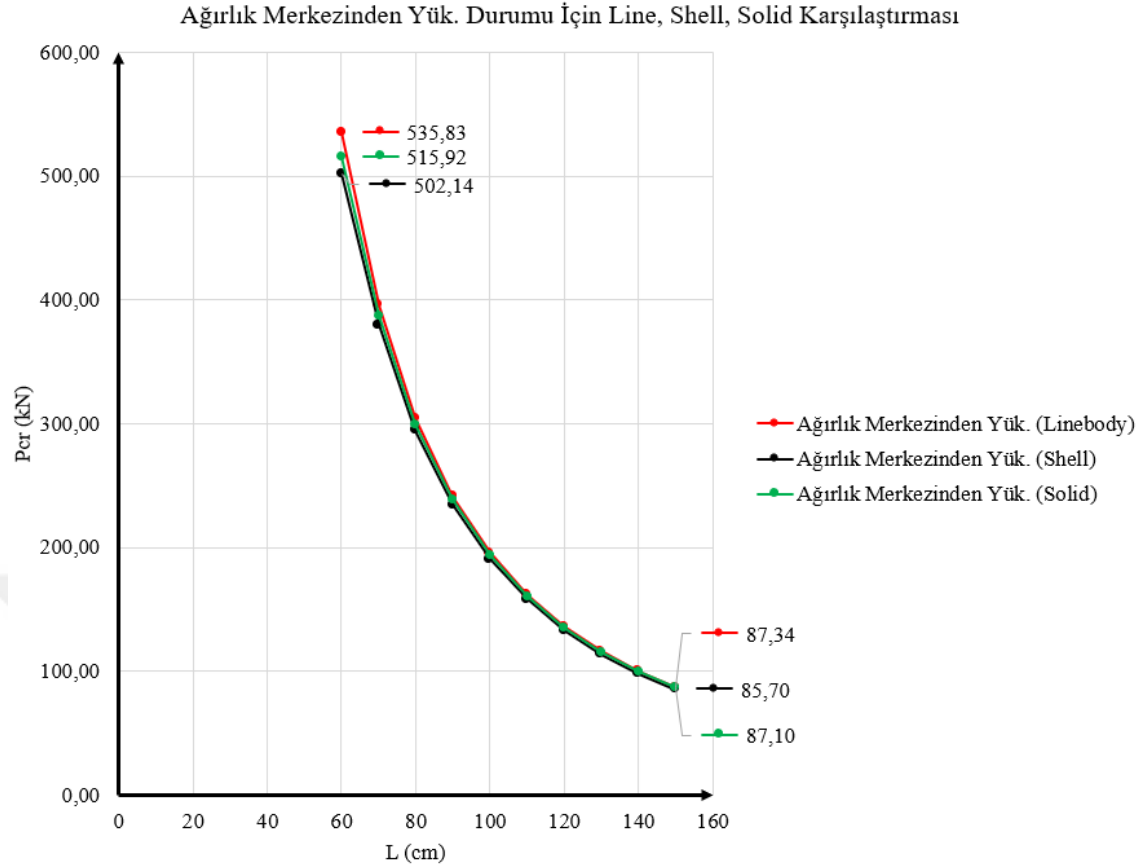
Şekil 4. 1. Problemin idealize edilmiş halleri



Şekil 4. 2. Bulon hizasından yükleme durumu için eleman türlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. 3. Kayma merkezinden yükleme durumu için eleman türlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. 4. Ağırlık merkezinden yükleme durumu için eleman türlerinin karşılaştırılması

Çizelge 4. 1. Çubuk eleman eigenvalue buckling analizi sonuçları

ANSYS APDL (Line body)			
Yük: Ağırlık Merkezi - Bulon Hizası – K. Mrkz			
L (cm)	Pcr (KN)	Pcr (KN)	Pcr (KN)
60	535,83	339,33	535,83
70	395,98	281,69	395,98
80	304,33	234,24	304,33
90	241,09	196,07	241,09
100	195,65	165,56	195,65
110	161,92	141,10	161,92
120	136,20	121,37	136,20
130	116,15	105,31	116,15
140	100,21	92,11	100,21
150	87,34	81,17	87,34

Çizelge 4. 2. Shell (kabuk) eleman eigenvalue buckling analizi sonuçları

ANSYS WorkBench (Shell)			
Yük: Ağırlık Merkezi - Bulon Hizası – K. Mrkz			
L (cm)	Pcr (KN)	Pcr (KN)	Pcr (KN)
60	502,14	396,72	496,36
70	379,65	330,31	373,53
80	294,46	269,88	289,91
90	234,47	220,99	231,06
100	190,88	182,87	188,29
110	158,29	153,24	156,29
120	133,33	129,99	131,76
130	113,82	111,52	112,56
140	98,27	96,64	97,25
150	85,70	84,51	84,86

Çizelge 4. 3. Solid eleman eigenvalue buckling analizi sonuçları

ANSYS WorkBench (Solid)			
Yük: Ağırlık Merkezi - Bulon Hizası – K. Mrkz			
L (cm)	Pcr (KN)	Pcr (KN)	Pcr (KN)
60	515,92	404,39	508,04
70	387,22	335,44	381,04
80	299,91	273,79	295,35
90	238,62	224,10	235,06
100	194,16	185,44	191,56
110	160,97	155,40	158,95
120	135,56	131,85	133,98
130	115,70	113,13	114,43
140	99,89	98,05	98,86
150	87,10	85,76	86,26

Bu grafiklerde, yatay eksen eleman boyu L (cm), dikey eksen ise kritik burkulma yükü Pcr (kN) yer almaktadır. Aynı grafik üzerinde BEAM188, SHELL181 ve SOLID186 elemanlarıyla yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

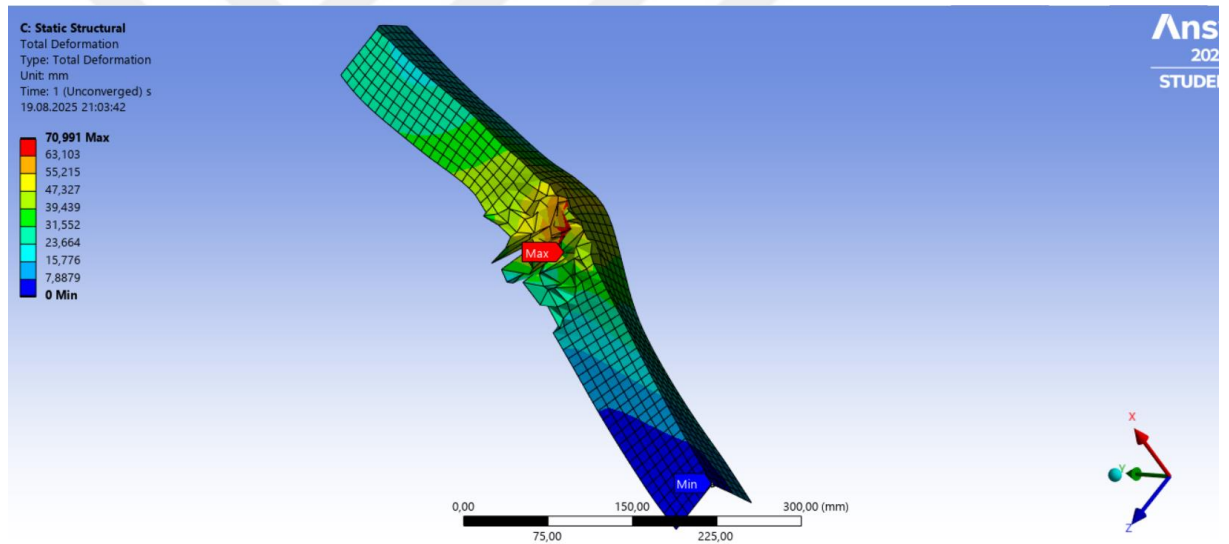
Grafiklerden elde edilen temel bulgular şunlardır:

- Bulon hizasından yükleme durumu için SHELL181 ve SOLID186 elemanları ile elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır.
- BEAM188 ile elde edilen sonuçlar özellikle kısa eleman boylarında belirgin şekilde düşüktür. Örneğin, L=60 cm durumunda, çubuk eleman yaklaşık %16 daha düşük Pcr değeri vermiştir.
- Bu farklar, BEAM188 elemanının kesit içi lokal burkulma ve kabuk etkilerini temsil edememesinden kaynaklıdır.

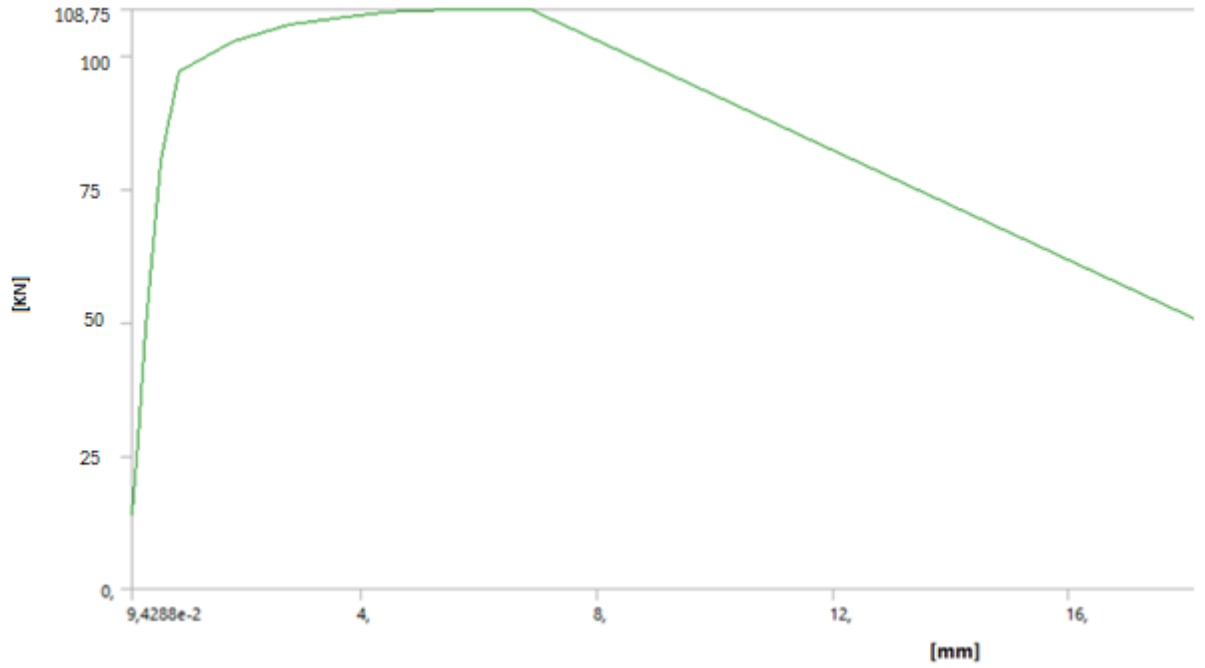
4.1. Eleman Tipi Seçimi

Elde edilen tüm bu veriler ışığında tez kapsamında yapılacak olan doğrusal olmayan analizlerin tamamında, SHELL181 (kabuk) elemanı kullanılmıştır.

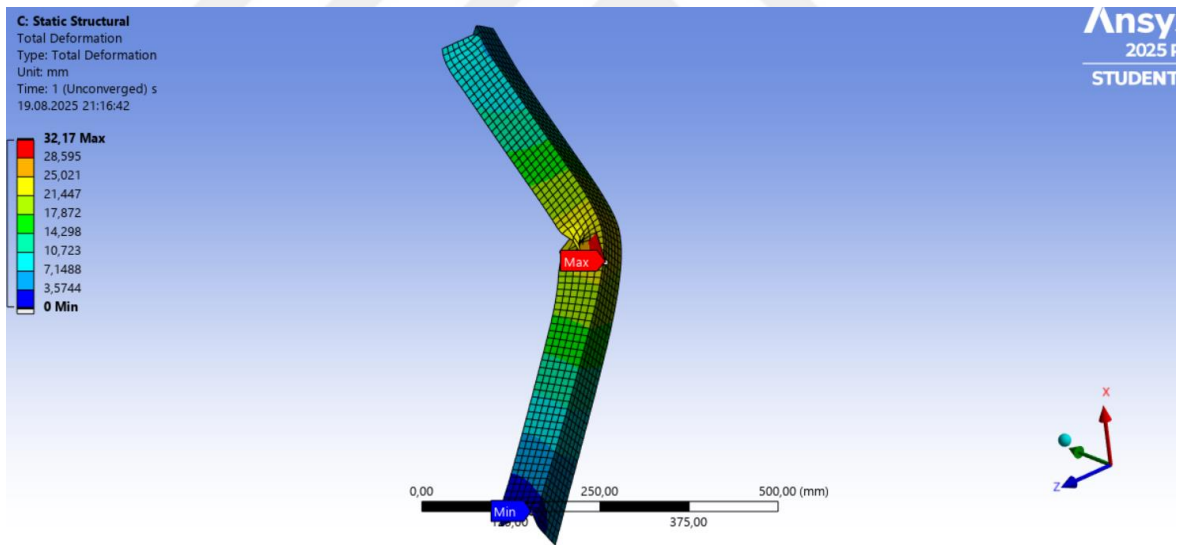
Yükler, bulon hizasından uygulanmıştır. İlgili elemanlar üzerinde 3.1.4.3'te açıklanan doğrusal olmayan statik analiz gerçekleştirilmiştir.



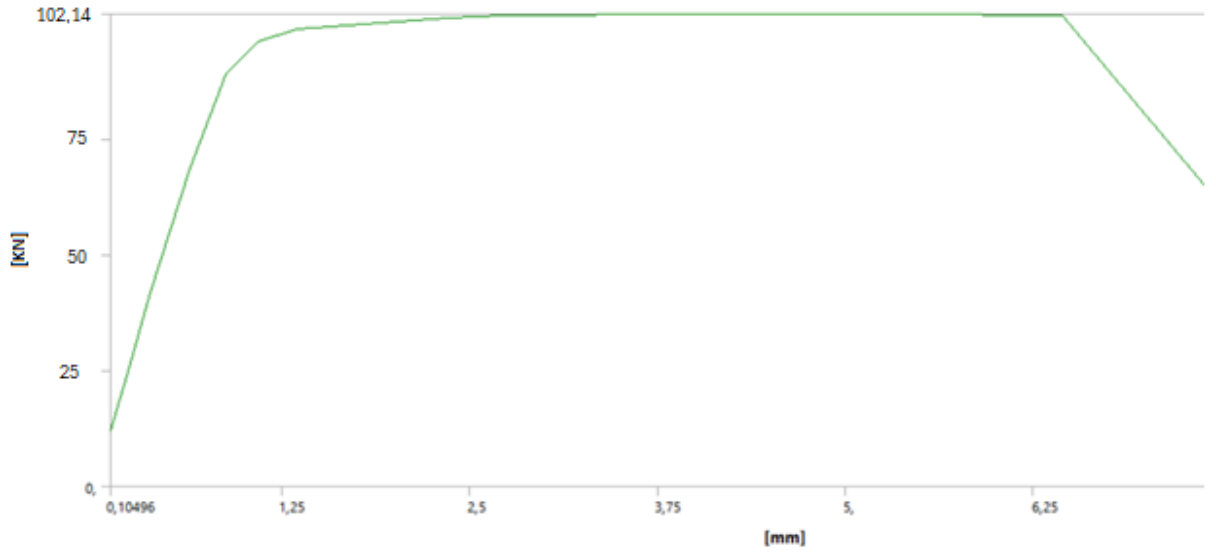
Şekil 4. 5. 60cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



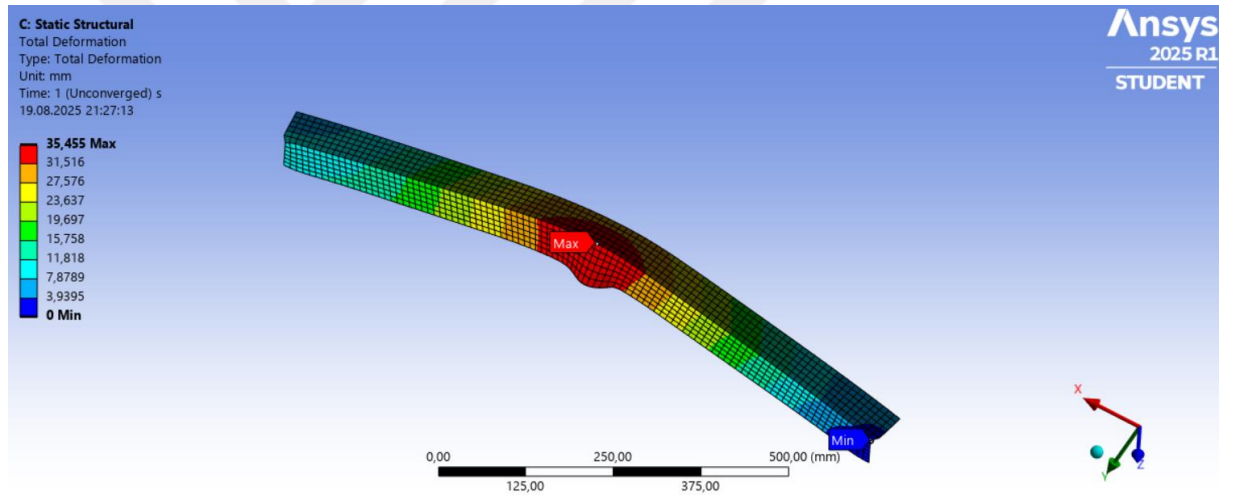
Şekil 4. 6. 60cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



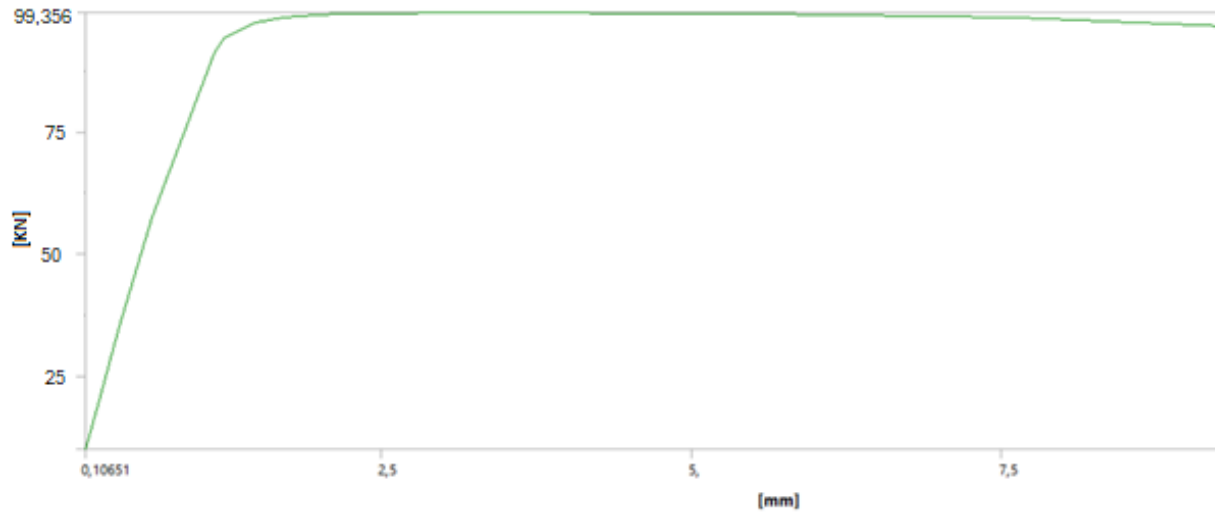
Şekil 4. 7. 80cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



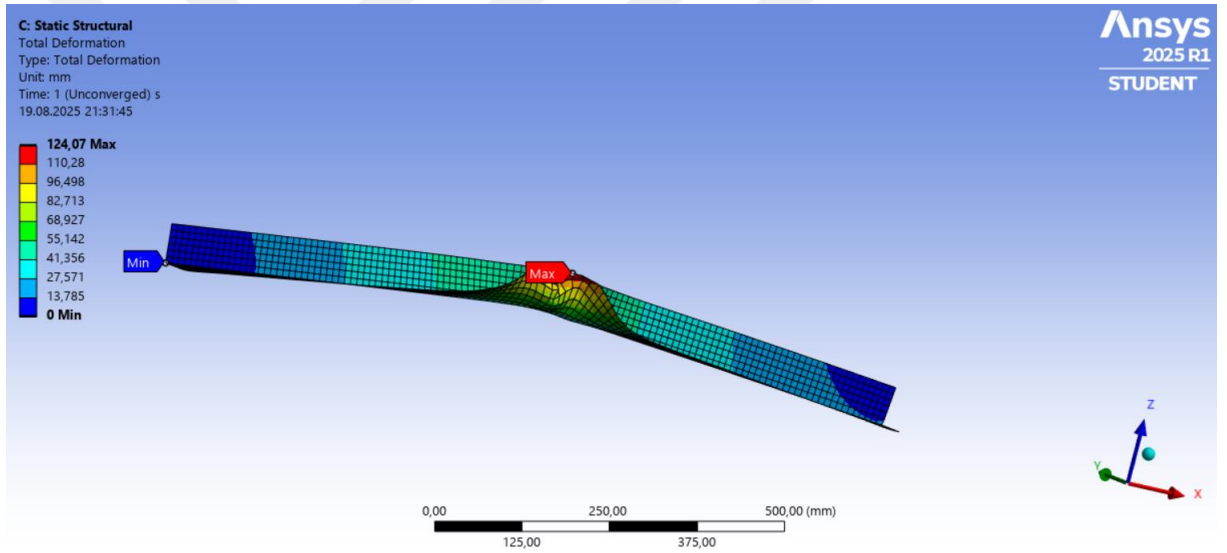
Şekil 4. 8. 80cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



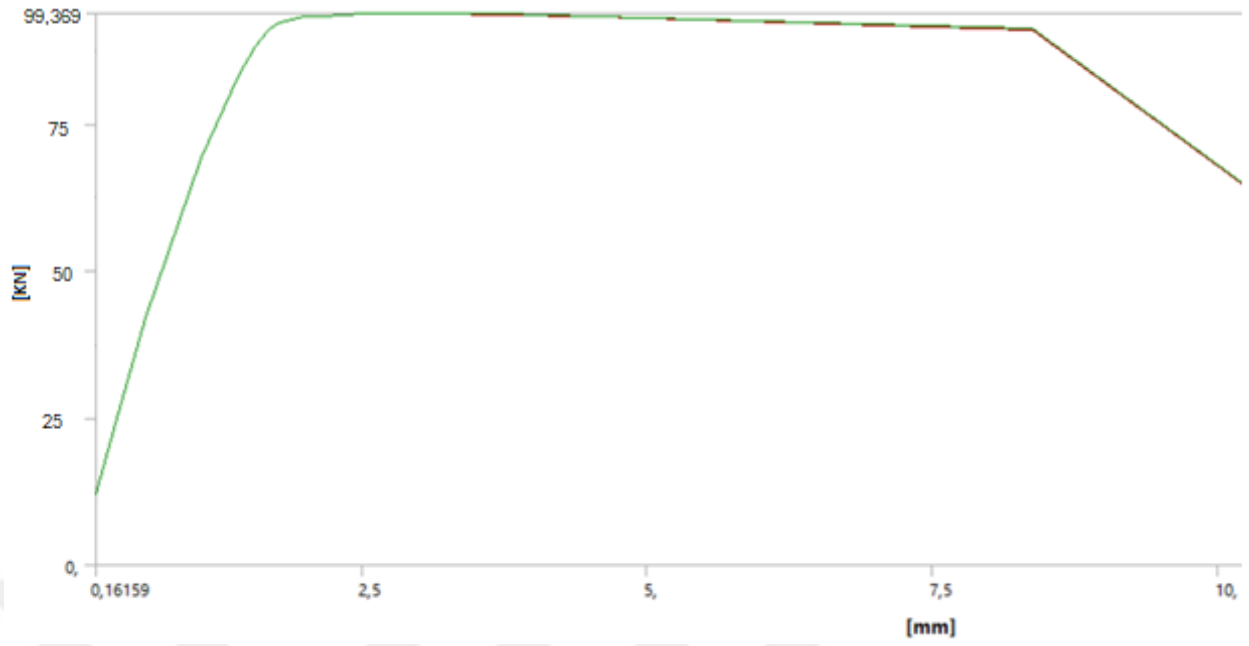
Şekil 4. 9. 100cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



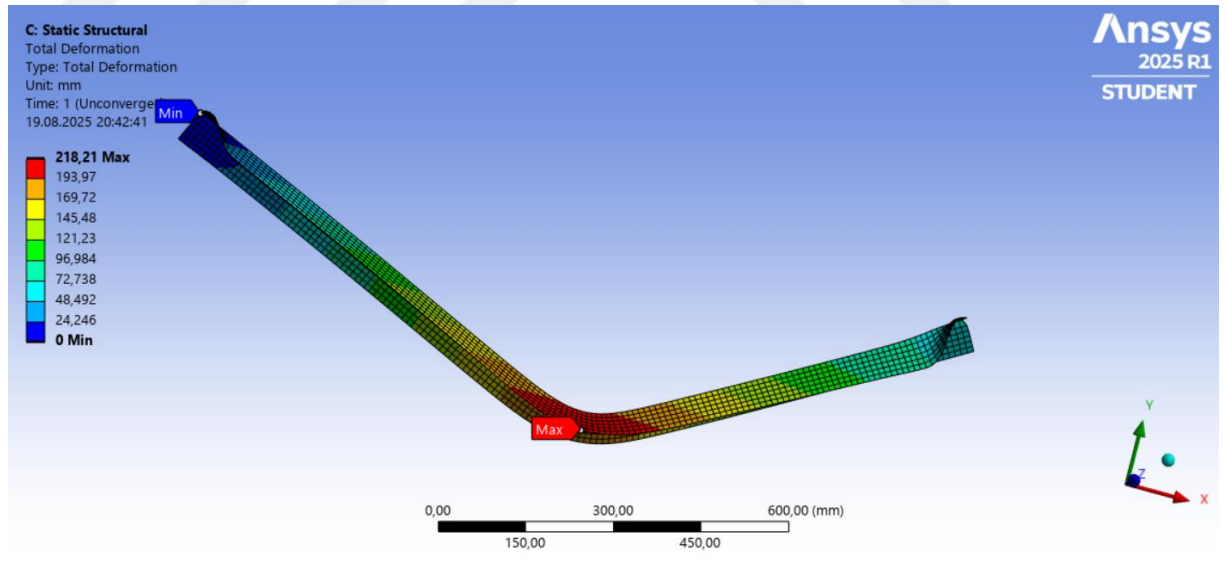
Şekil 4. 10. 100cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



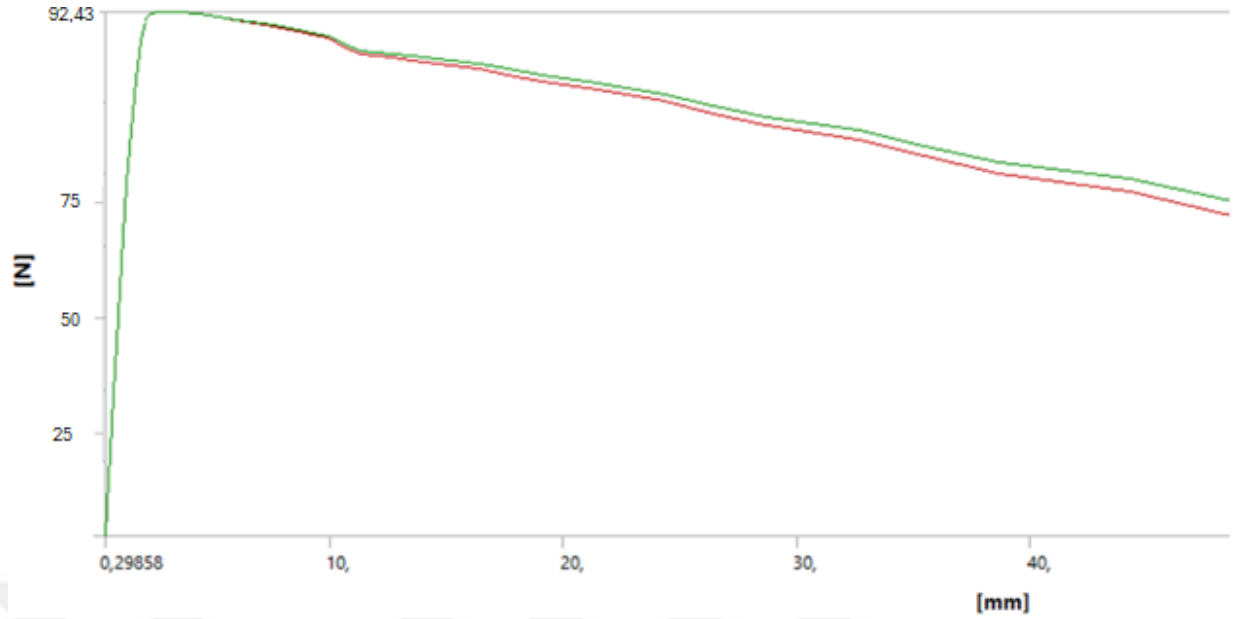
Şekil 4. 11. 120cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



Şekil 4. 12. 120cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



Şekil 4. 13. 150cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



Şekil 4. 14. 150cm uzunluğundaki elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi

Çizelge 4. 4. ANSYS, ÇYTHYE, EC3, Trahair ve SAP2000 (Linebody) Analiz Sonuçları

	ANSYS	ÇYTHYE ye göre	EC3 e göre	Trahair'e göre	ANSYS Shell	Sap2000 Beam
L (cm)	<i>Plim (kN)</i>	<i>Pcr (kN)</i>	<i>Pcr (kN)</i>	<i>Pcr (kN)</i>	<i>Pcr (kN) (eigenbuckling)</i>	<i>Pcr (kN)</i>
60	108,75	115,548	122,678	262,86	451,73	507,9
80	102,14	106,348	114,72	220,29	322,38	290,44
100	99,356	97,1053	106,41	186,49	244,07	186,58
120	93,691	87,96	98,029	159,38	185,74	129,83
150	92,438	73,486	85,934	128,05	121,83	95,5

Tabloda sunulan sonuçlar değerlendirildiğinde, özellikle kısa eleman boylarında ($L = 60$ cm) farklı yöntemler arasında belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Yönetmeliklere göre elde edilen kritik yük değerleri (ÇYTHYE: 115,55 kN; EC3: 122,68 kN) ile ANSYS doğrusal olmayan analiz sonucu (108,75 kN) arasında belirli bir fark bulunsa da sonuçlar genel olarak kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, kısa elemanlarda burkulmadan önce akma ve lokal plastisite etkilerinin belirleyici olduğunu ve yönetmeliklerin öngördüğü muhafazakâr yaklaşımın, ANSYS'te doğrusal olmayan analizle uyumlu olduğunu göstermektedir. Ancak aynı uzunluk için Trahair formülasyonu (262,86 kN), ANSYS eigenvalue analizi (451,73 kN) ve SAP2000 sonucu

(507,9 kN) çok daha yüksek değerler vermiştir. Dolayısıyla eigenvalue analizleri, yalnızca teorik üst sınır niteliğinde değerlendirilmelidir.

Orta uzunluktaki elemanlarda ($L = 80$ cm ve 100 cm) yönetmelik değerleri ile ANSYS doğrusal olmayan analizleri arasındaki uyumun sürdüğü görülmektedir. Bu sonuç, yönetmeliklerin verdiği kapasite tahminlerinin doğrusal olmayan analizlerle kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir. Ancak aynı uzunlukta ANSYS eigenvalue sonucu $244,07$ kN, SAP2000 sonucu ise $186,58$ kN 'dur. Burada dikkat çekici nokta, SAP2000'de beam eleman kullanılarak elde edilen sonucun ANSYS eigenvalue analizine kıyasla daha düşük çıkmasıdır. Bu farklılık, SAP2000'in beam eleman modelinde kesitin lokal burkulma ve şekil değiştirme detaylarının olmasıyla açıklanabilir.

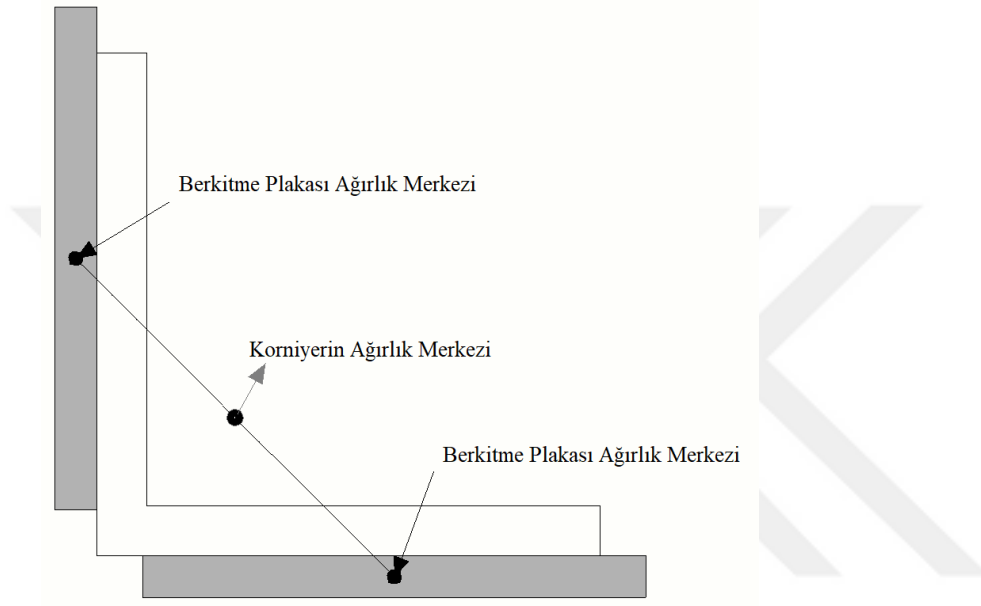
Uzun elemanlarda ($L = 120$ cm ve 150 cm) yönetmelik sonuçlarının ANSYS doğrusal olmayan analizlerine göre daha konservatif kaldığı görülmektedir. $L = 150$ cm için ANSYS doğrusal olmayan analiz sonucu $92,44$ kN iken, ÇYTHYE'ye göre $73,49$ kN ve EC3'e göre $85,93$ kN değerleri elde edilmiştir. Burada ANSYS sonucu, ÇYTHYE değerinden yaklaşık %25 daha yüksek çıkmıştır. Buna karşın SAP2000 beam eleman modeliyle yapılan eigenvalue buckling analizinden elde edilen $95,5$ kN'luk değer, ANSYS doğrusal olmayan analiz sonucuna oldukça yakın çıkmıştır. Bu yakınlık, beam eleman modeliyle yapılan analizlerin uzun elemanlarda gerçeğe daha yakın sonuçlar verebildiğini göstermektedir. Çünkü bu boyutlarda global burkulma davranışı baskın hale gelmektedir.

4.2. L/3 Bölgesinden Berkitilmiş Elemanların Analizine Giriş

Çalışmanın ilk aşamasında, berkitilmemiş L60.60.6 korniyer elemanlarının eksenel basınç kapasiteleri farklı yönetmelik yaklaşımları (ÇYTHYE ve EC3), teorik formülasyonlar (Trahair), SAP2000 beam eleman modeli ve ANSYS sonlu elemanlar analizleri kullanılarak belirlenmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. ANSYS ile elde edilen değerlerin yönetmeliklerden elde edilen sonuçlardan tamamen farklı olmadığı, aksine belirli sınırlar içerisinde uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum, kurulan ANSYS sonlu elemanlar modelinin kabul edilebilir bir doğrulukta olduğu değerlendirilmiştir ve ilerleyen adımlarda yapılacak berkitilmiş eleman analizleri ANSYS ortamında gerçekleştirilecektir.

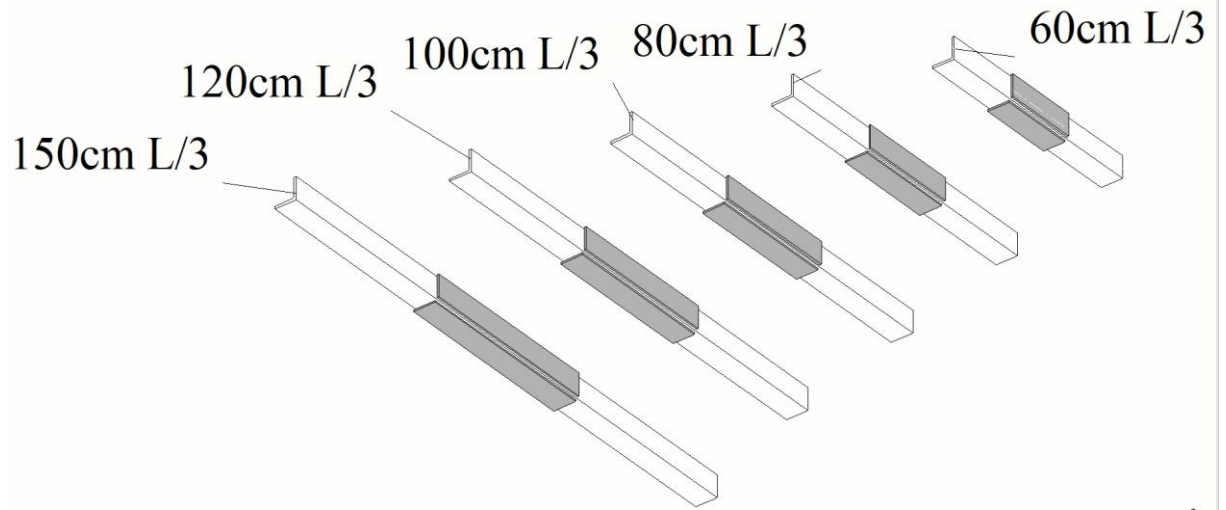
Bu doğrulamanın ardından çalışmanın ikinci aşamasında, korniyer elemanların eksenel basınç kapasitelerinin artırılması amacıyla farklı berkitme senaryoları incelenecektir. Bu kapsamda, elemanların L/3'lük orta bölgesine ve L/4'lük orta bölgesine yerleştirilecek berkitme elemanları modellenerek, eksenel basınç altındaki davranışları analiz edilecektir. Elde edilen kapasite değişimleri yönetmeliklerle elde edilen tahmini değerlerle karşılaştırılarak değerlendirilecektir. Böylece, berkitme uzunluğunun ve konumunun eleman davranışı üzerindeki etkisi sistematik olarak ortaya konulacaktır.

Berkitilmiş elemanların modellemesi sürecinde, öncelikle korniyer elemanlar farklı bir üç boyutlu modelleme yazılımında oluşturulmuş, ardından ANSYS ortamına aktarılmış ve gerekli malzeme tanımlamaları yapılmıştır. Berkitme elemanlarının ağırlık merkezi, eksantrisite ve burulma etkilerinin oluşmasını engellemek amacıyla korniyer elemanının ağırlık merkeziyle çakışacak şekilde stratejik konumlara yerleştirilmiştir. Ayrıca, kaynak uygulamalarına olanak tanıyacak yeterli boşlukların sağlanmasına da özen gösterilmiştir. Bu berkitme plakaları ana eleman olan korniyere kaynaklı birleşimin olup bu birleşim sonsuz rijit (Bonded Contact) olduğu kabul edilmiştir.

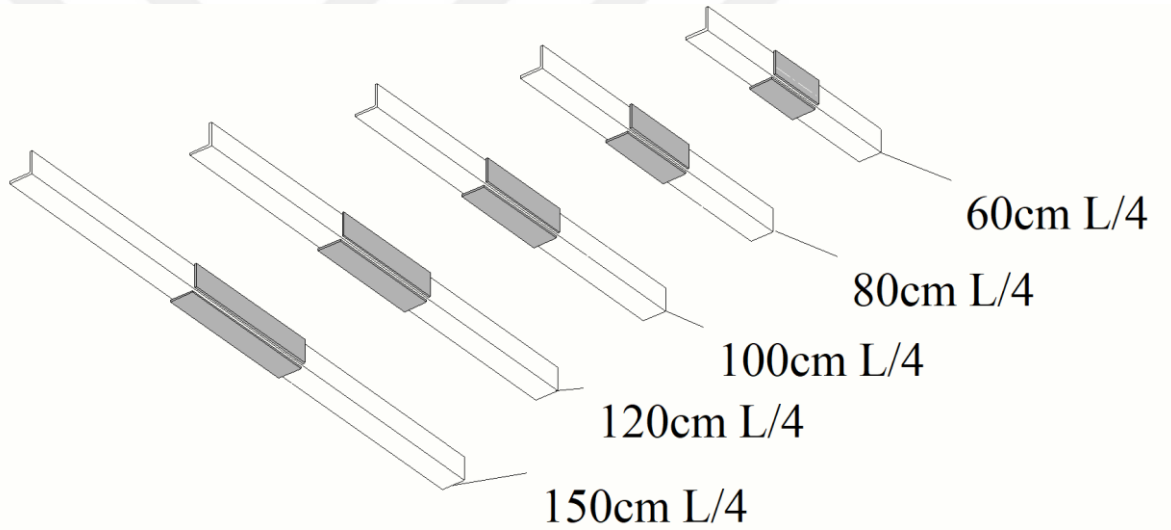


Şekil 4. 15. Berkitilmiş korniyer elemanların tip kesiti

Bu uygulama 60cm, 80cm, 100cm, 120cm ve 150cm boylar için $L/3$ 'lük orta bölge ve $L/4$ 'lük orta bölge için yapılmış ve toplamda 10 farklı model kurulmuştur.

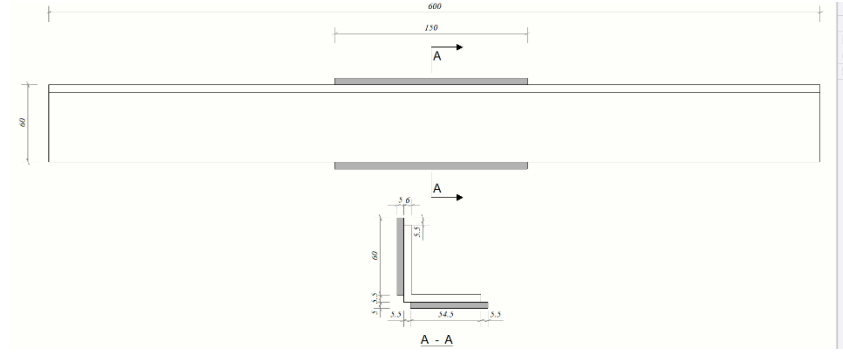


Şekil 4. 16. $L/3$ 'lük orta bölgesi güçlendirilen farklı uzunluklardaki L60.60.6 elemanların 3 boyutlu görüntüsü

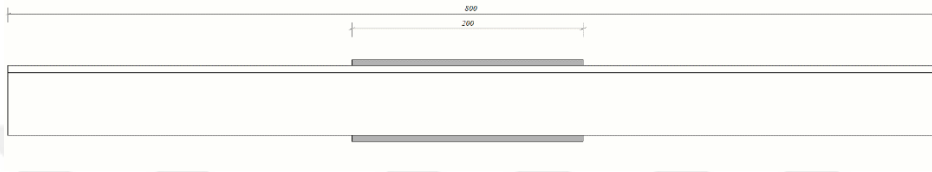


Şekil 4. 17. $L/4$ 'lük orta bölgesi güçlendirilen farklı uzunluklardaki L60.60.6 elemanların 3 boyutlu görüntüsü

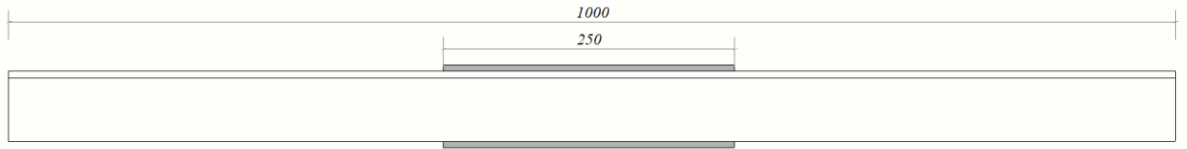
Analiz modelleri yukarıdaki şekilde 3 boyutlu olarak gösterilmiştir. Elemanların orta noktalarından alınan kesitler tiptir.



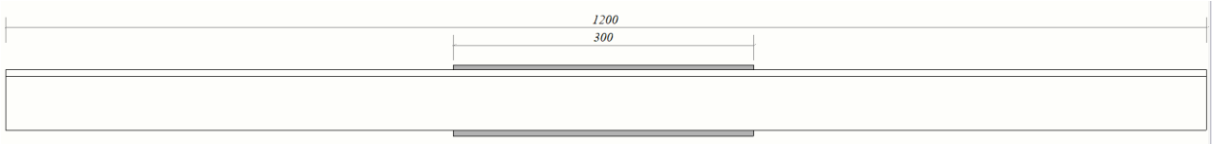
Şekil 4. 18. 60cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısımlı Berktilmiş Eleman



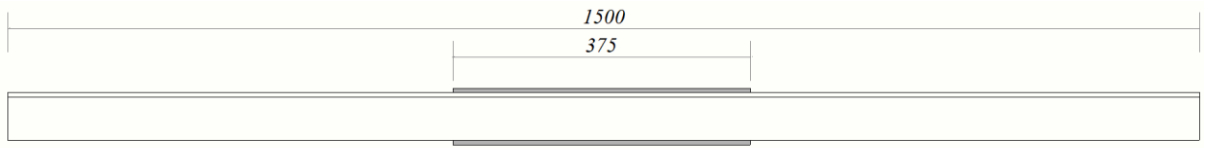
Şekil 4. 19. 80cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısımlı Berktilmiş Eleman



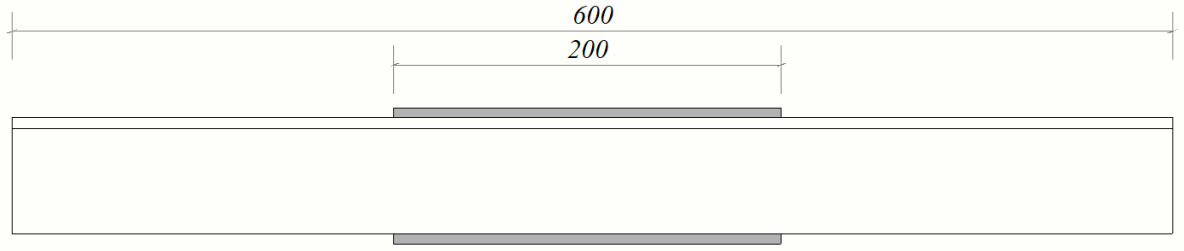
Şekil 4. 20. 100cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısımlı Berktilmiş Eleman



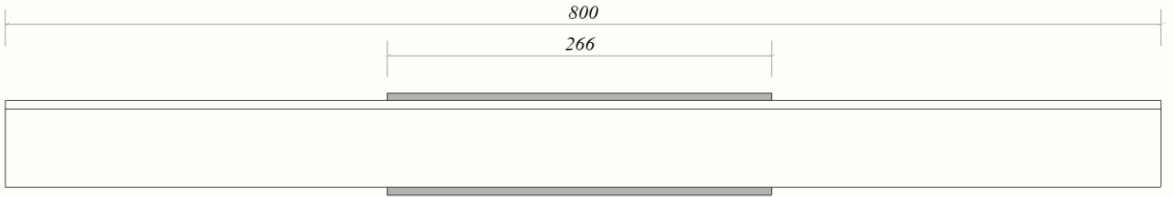
Şekil 4. 21. 120cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısımlı Berktilmiş Eleman



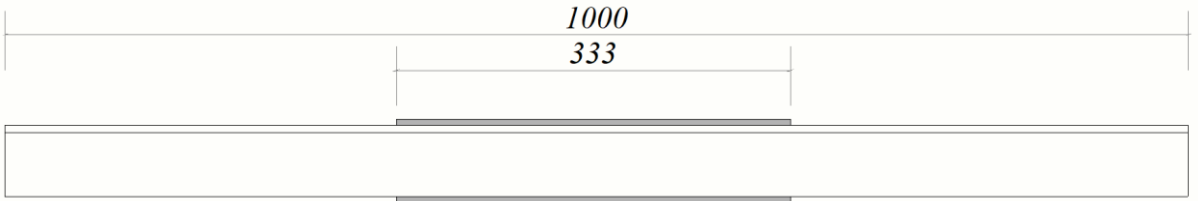
Şekil 4. 22. 150cm Uzunluğundaki L/4'lük Kısımlı Berktilmiş Eleman



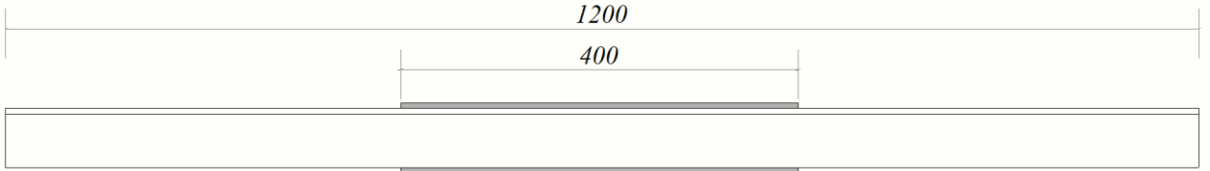
Şekil 4. 23. 60cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman



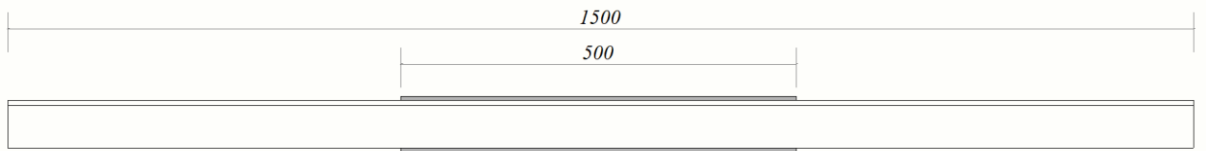
Şekil 4. 24. 80cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman



Şekil 4. 25. 100cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman



Şekil 4. 26. 120cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman

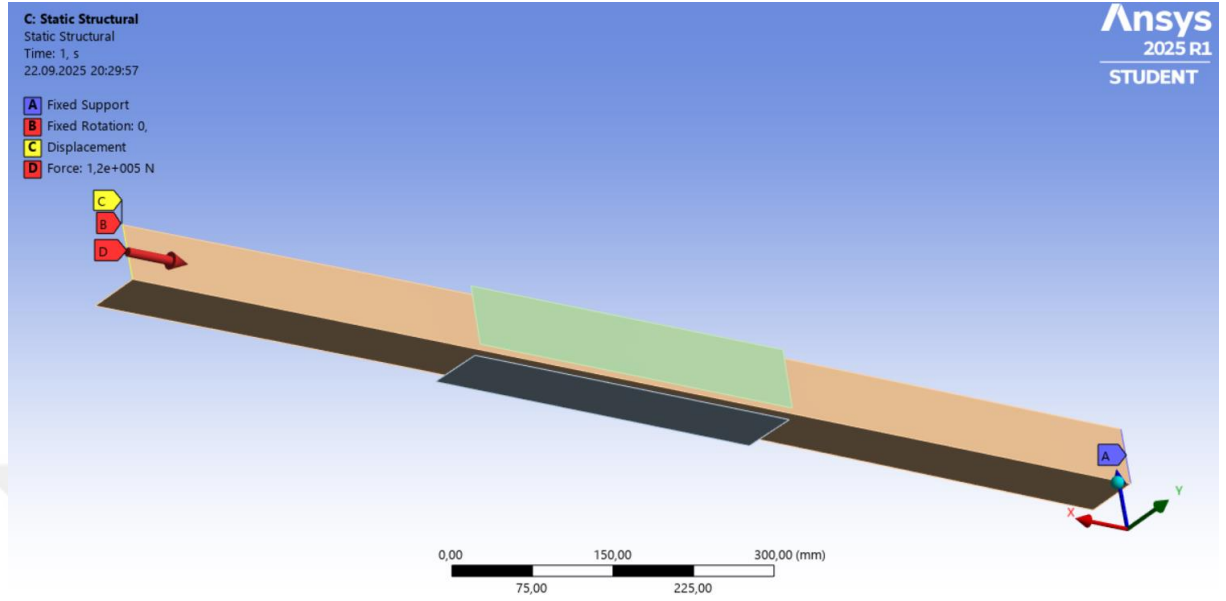


Şekil 4. 27. 150cm Uzunluğundaki L/3'lük Kısmı Berkitilmiş Eleman

4.3.Modellerin Kurulması;

Berkitilmiş elemanların doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri, Bölüm 3.1.4.3.'te açıklanan yöntem esas alınarak oluşturulmuş ve güçlendirilmemiş elemanlarda kullanılan sınır şartlarıyla benzer şekilde tanımlanmıştır. Bu bölümde, söz konusu berkitilmiş

eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar sunulacak ve farklı berkitme uygulamalarının eleman davranışı üzerindeki etkileri tartışılacaktır.



Şekil 4. 28. Berkitilmiş Elemanların Tip Sınır Şartları

Berkitilmiş elemanların modeli oluşturulurken, güçlendirilmemiş elemanlardan farklı olarak berkitme plakaları ile korniyer arasına bonded contact tanımlanmıştır. Ayrıca, berkitme uygulaması elemanların burkulma davranışını değiştirdiğinden, birinci mod şekli güçlendirilmemiş elemanlara kıyasla farklı çıkmış ve buna bağlı olarak kusur tanımlamalarında kullanılan scale factor değerleri de değişmiştir.

Yapılan analizler neticesinde güçlendirilmemiş korniyerlerin lineer elastik eigenvalue buckling burkulma yükleri ve doğrusal olmayan statik analiz sonucu eksenel basınç kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4. 5. Berkitilmiş ve berkitilmemiş elemanlar üzerinde gerçekleştirilen eigenvalue buckling analizi sonuçları

SHELL			
L/3'lük kısma ek			
L (cm)	Güçlendirilmemiş Pcr (eigenbuckling)	Güçlendirilmiş Pcr (eigenbuckling)	Artış %
60	519,11	546,07	5,19
80	413,67	474,59	14,73
100	320,76	368,6	14,91
120	249,42	298,22	19,57
150	176,34	223,8	26,91

L60.60.6 eşit kollu korniyer elemanlar üzerinde yapılan eigenvalue buckling analizleri, berkitilmemiş ve $L/3$ 'lük orta bölgesi berkitilmiş modeller için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.5.'te sunulmuştur. Bulgular, berkitmenin elemanların elastik burkulma kapasiteleri üzerinde anlamlı bir iyileştirme sağladığını ortaya koymaktadır.

Öncelikle kısa elemanlarda ($L = 60$ cm) berkitmenin etkisi sınırlı kalmıştır. Berkitilmemiş elemanda $P_{cr}=519,11$ iken, $L/3$ berkitilmiş durumda bu değer $546,07$ kN olarak hesaplanmıştır. Artış oranı yalnızca %5,19'dur. Bu durum, kısa elemanlarda burkulma davranışının daha çok kesit rijitliği ve malzeme akmasıyla belirlendiğini, dolayısıyla berkitmenin global burkulmaya katkısının sınırlı olduğunu göstermektedir.

Orta uzunluktaki elemanlarda ($L = 80$ cm ve 100 cm) kapasite artışı daha belirgin hale gelmiştir. $L = 80$ cm için berkitilmemiş elemanda $P_{cr}=413,67$ kN, berkitilmiş elemanda $474,59$ kN bulunmuş ve yaklaşık %14,73'lük bir artış sağlanmıştır. Benzer şekilde, $L = 100$ cm için kapasite $320,76$ kN'dan $368,6$ kN'a yükselmiş, artış oranı %14,91 olmuştur. Bu sonuçlar, orta uzunluktaki elemanlarda berkitmenin daha etkin çalıştığını, global burkulma modunun kısmen engellenerek kapasitenin artırılabilindiğini göstermektedir.

Uzun elemanlarda ($L = 120$ cm ve 150 cm) berkitmenin etkisi çok daha belirgin hale gelmiştir. $L = 120$ cm için berkitilmemiş eleman $P_{cr}=249,42$ kN değerine sahipken, berkitilmiş durumda kapasite $298,22$ kN olarak bulunmuş ve %19,57 oranında artış sağlanmıştır. En belirgin sonuç $L = 150$ cm uzunluğundaki elemanda elde edilmiştir. Berkitilmemiş durumda $P_{cr}=176,34$ kN olan kapasite, berkitilmiş durumda $223,8$ kN'a yükselmiş ve yaklaşık %26,91'lik bir artış sağlanmıştır. Bu bulgu, berkitmenin özellikle uzun elemanlarda etkin bir yöntem olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Korniyer elemanların doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4. 6. $L/3$ lük kısmı berkitilmiş ve berkitilmemiş elemanların doğrusal olmayan analiz sonuçları

SHELL				
L/300 Kusur seçildi				
	Kusur	Güçlendirilmiş NL Sonuç	Güçlendirilmeden NL Sonuç	Artış
L (cm)	L/300 (mm)	Plim	Plim	%
60	2	117,38	108,75	7,94
80	2,67	110,27	102,14	7,96

Devamı arkada...

Çizelge 4. 6.'nın devamı

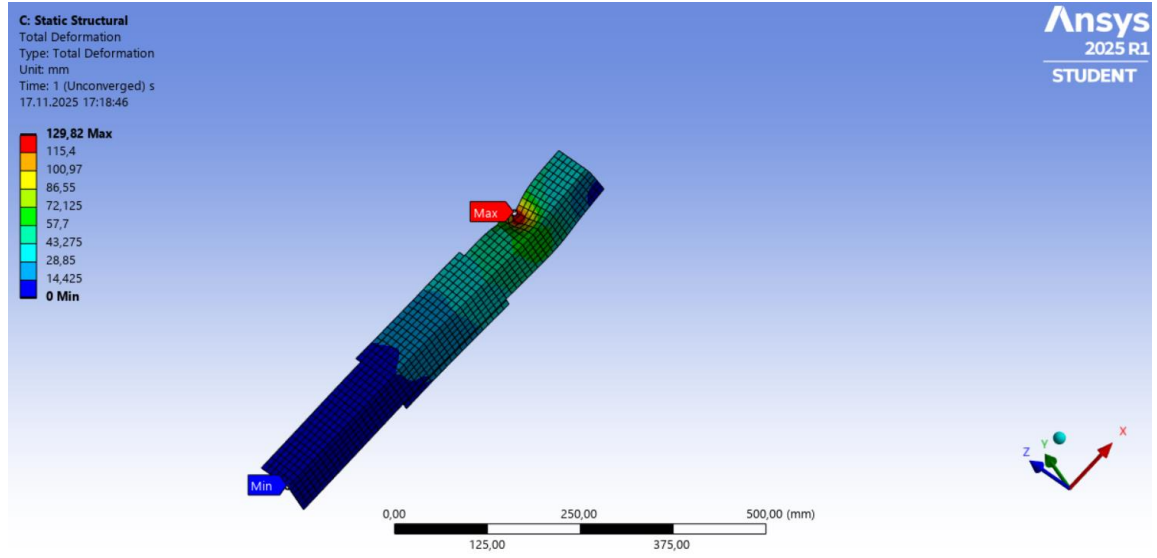
100	3,33	105,61	99,35	6,29
120	4	101,87	93,69	8,73
150	5	99,253	92,43	7,37

Sonuçlar incelendiğinde, kısa elemanda ($L = 60$ cm) berkitilmemiş durumda kapasite $P_{lim}=108,75$ kN iken, berkitilmiş durumda bu değer $117,38$ kN olmuştur. Kapasite artışı %7,94 seviyesindedir. Bu sonuç, kısa elemanlarda berkitmenin sınırlı fakat düzenli bir katkı sağladığını göstermektedir.

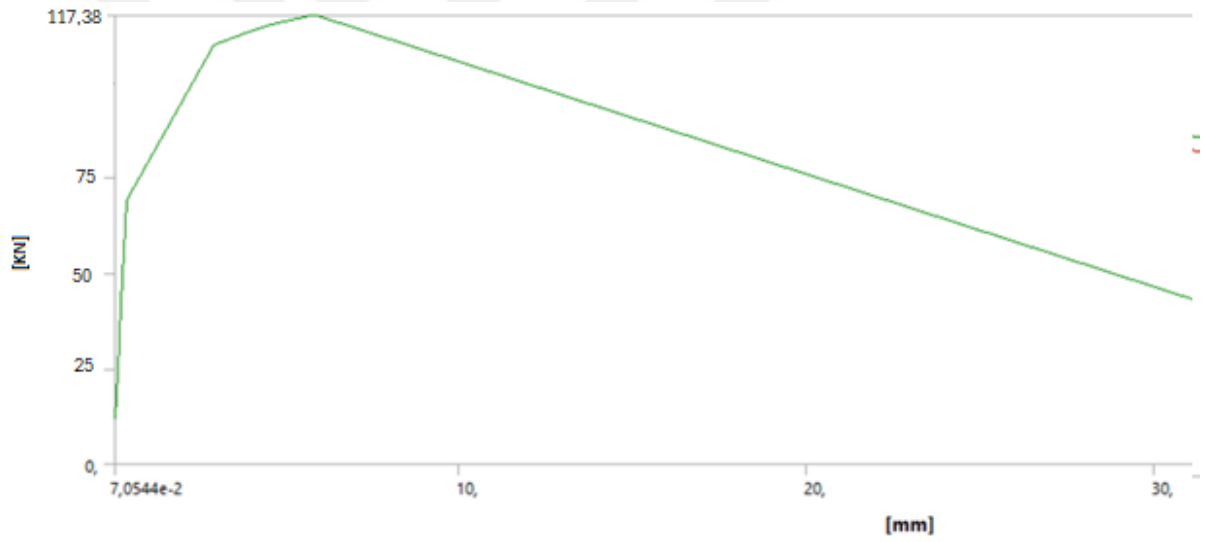
Orta boy elemanlarda ($L = 80-100$ cm) kapasite değerleri sırasıyla $102,14$ kN $\rightarrow$ $110,27$ kN ve $99,36$ kN $\rightarrow$ $105,61$ kN olarak elde edilmiştir. Kapasite artış oranları %7,96 ve %6,29 seviyelerindedir. Burada dikkat çekici nokta, eleman boyunun artmasıyla birlikte hem kapasitenin azaldığı hem de berkitmenin etkisinin görece sabit kaldığıdır.

Daha uzun elemanlarda ($L = 120-150$ cm) kapasite düşüş eğilimi daha belirgindir. $L = 120$ cm uzunluğundaki elemanda berkitilmemiş durumda kapasite $93,69$ kN iken, berkitilmiş durumda $101,87$ kN olarak bulunmuş ve %8,73 oranında artış sağlanmıştır. $L = 150$ cm için ise kapasite $92,44$ kN'dan $99,53$ kN'a yükselmiş ve artış oranı %7,37 olmuştur. Özellikle 120 cm uzunluğunda berkitmenin etkisinin en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir.

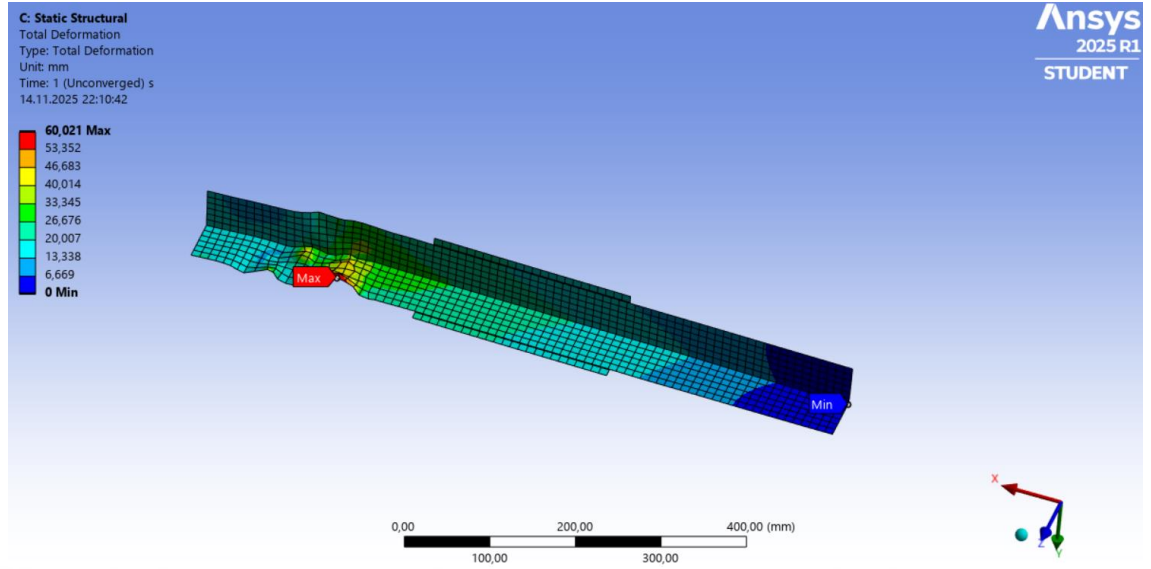
Bu bulgular, berkitmenin kısa elemanlarda sınırlı katkı sunduğunu, ancak eleman boyu arttıkça burkulma etkileri nedeniyle kapasitenin düşmesine rağmen berkitmenin daha etkin bir rol oynadığını göstermektedir. Dolayısıyla, uzun elemanlarda berkitmenin uygulanması tasarım açısından daha kritik bir fayda sağlamaktadır.



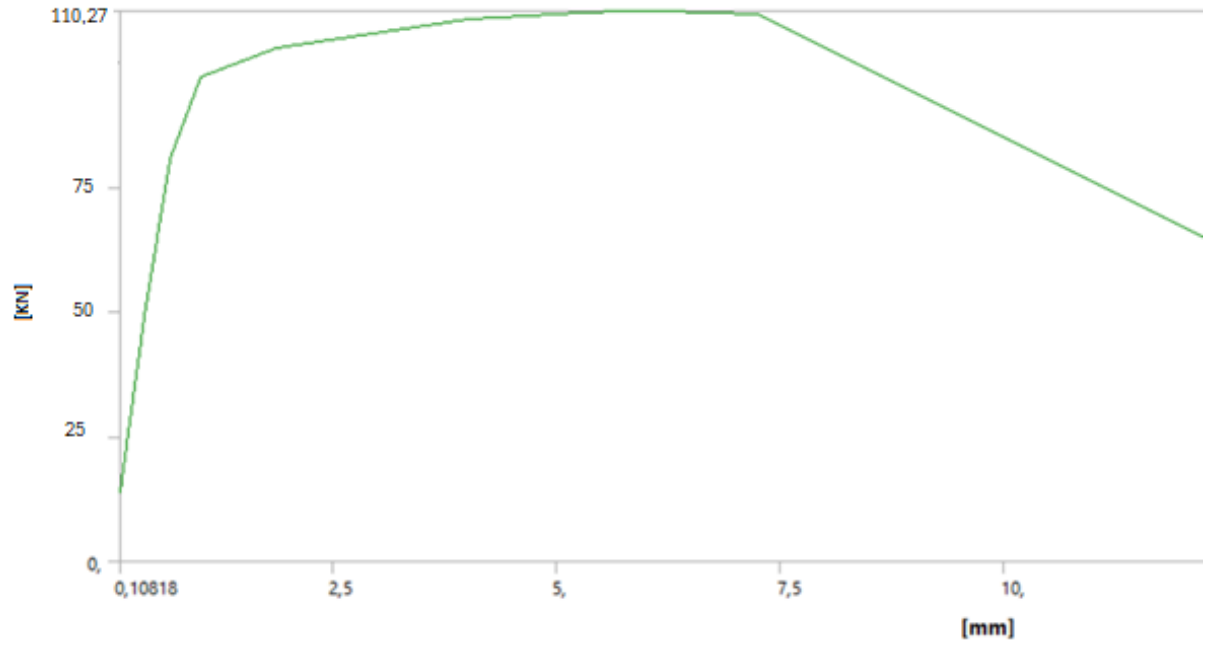
Şekil 4. 29. 60cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



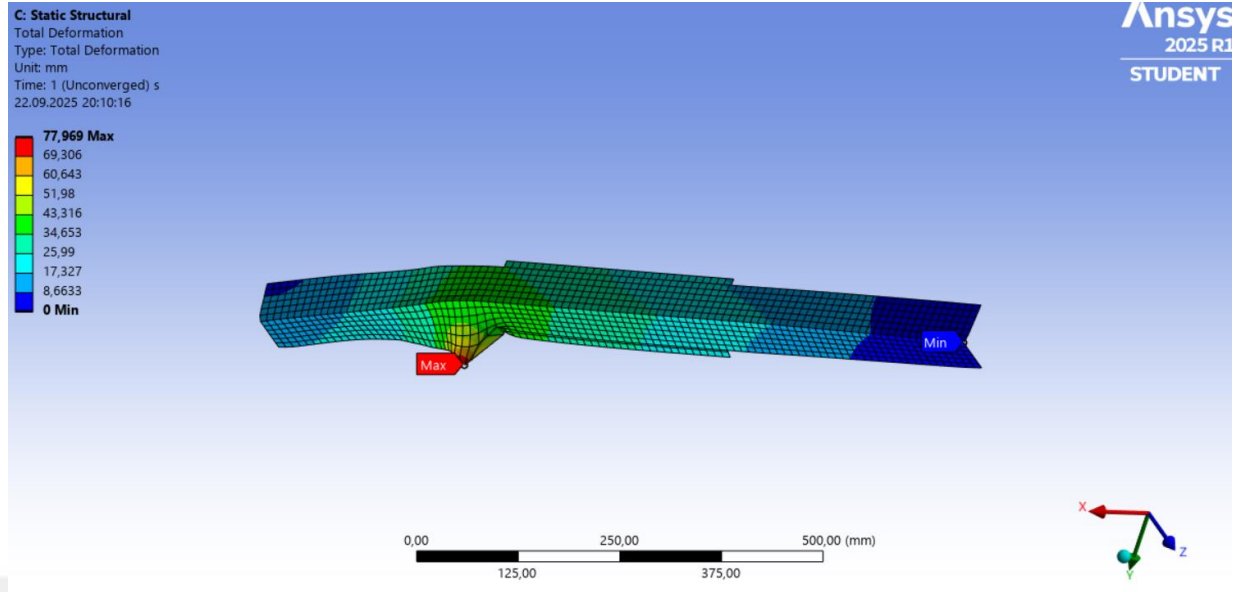
Şekil 4. 30. 60cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



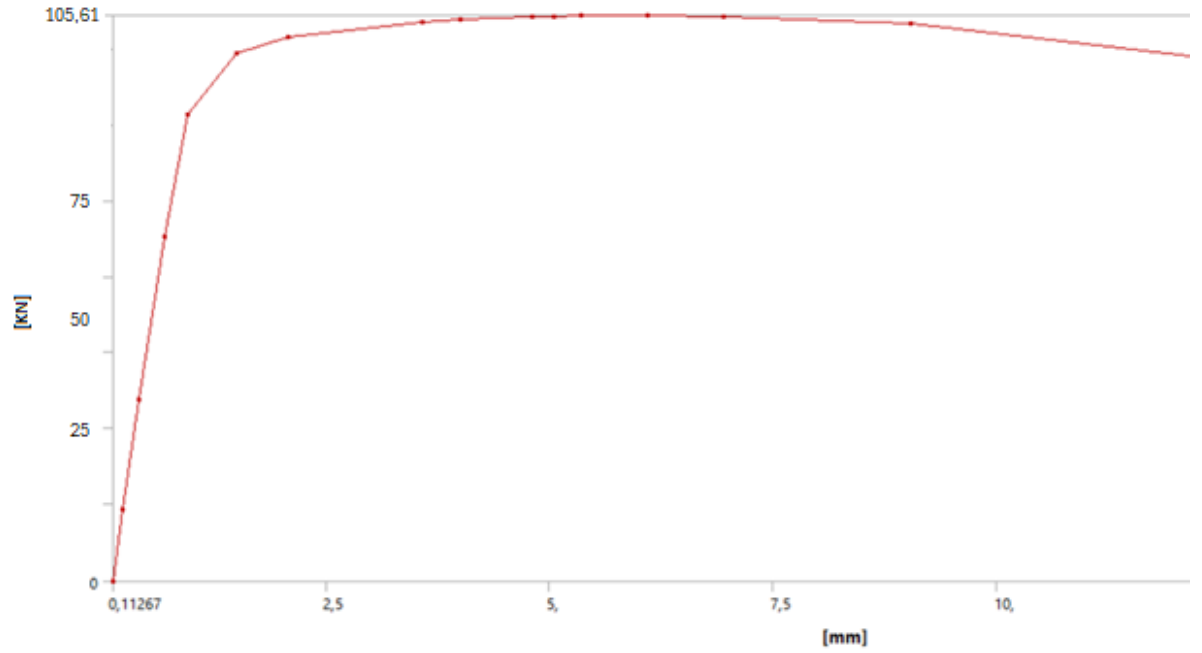
Şekil 4. 31. 80cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



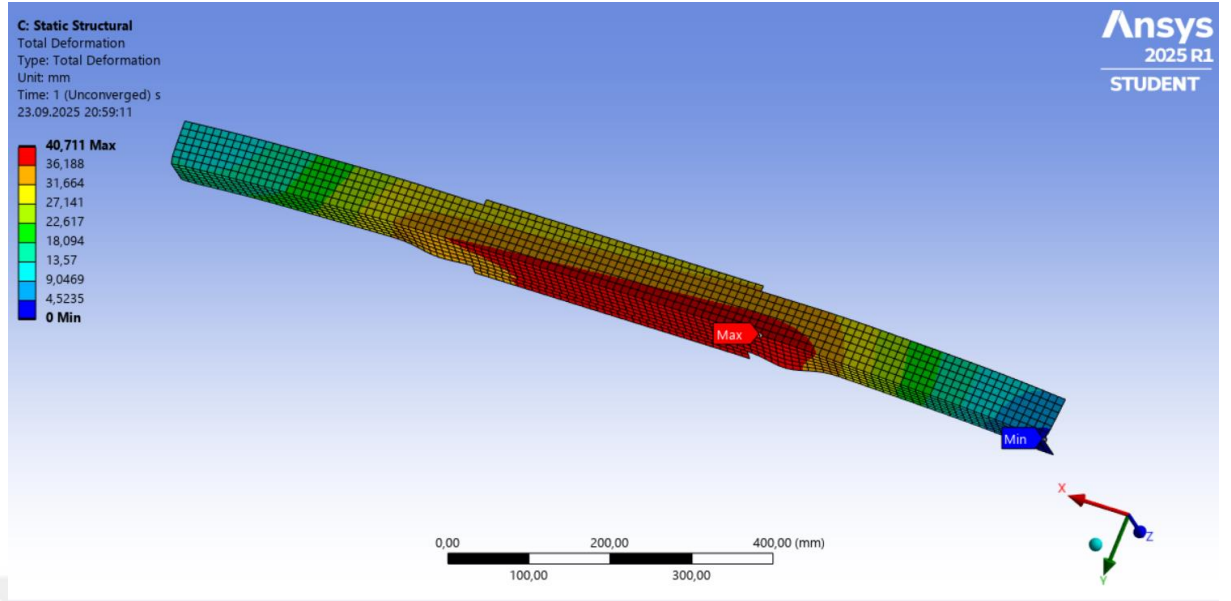
Şekil 4. 32. 80cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



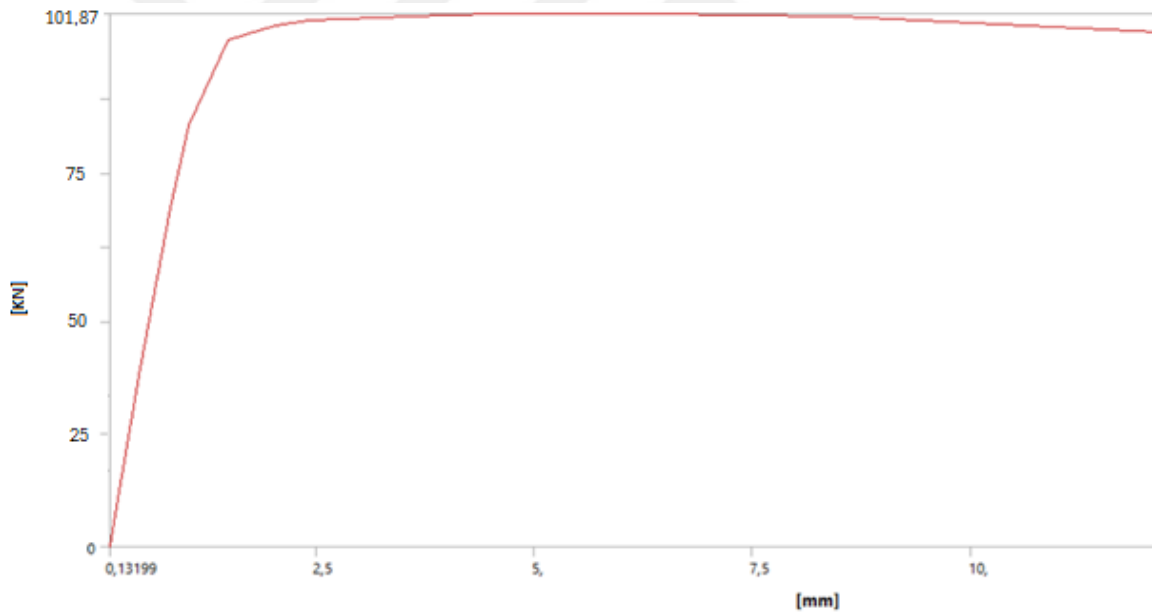
Şekil 4. 33. 100cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



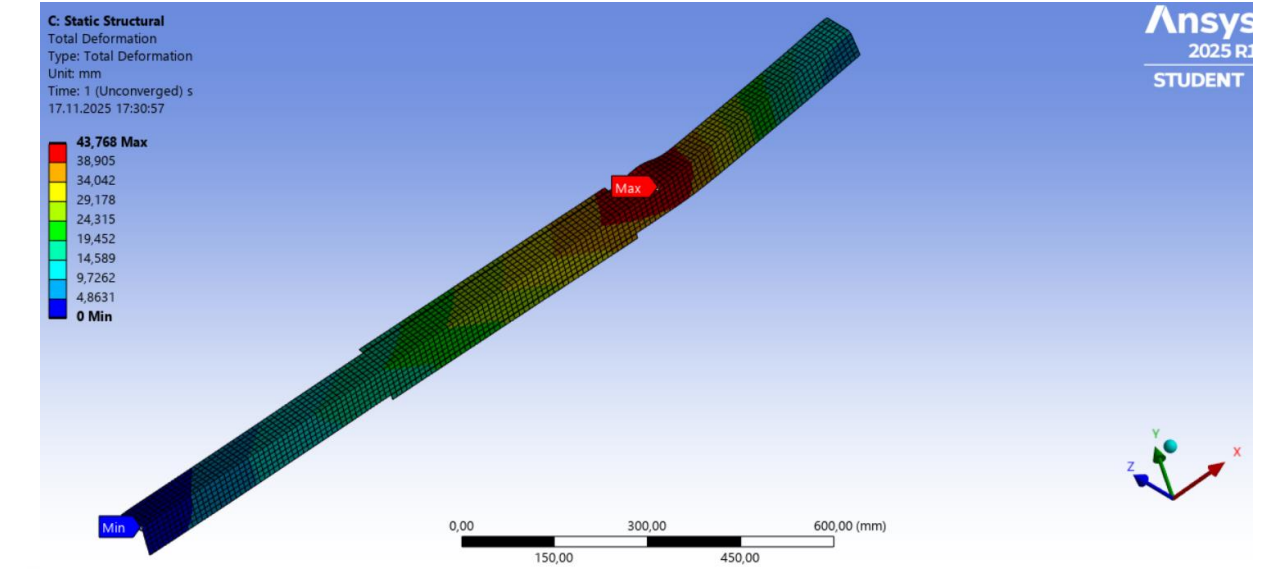
Şekil 4. 34. 100cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



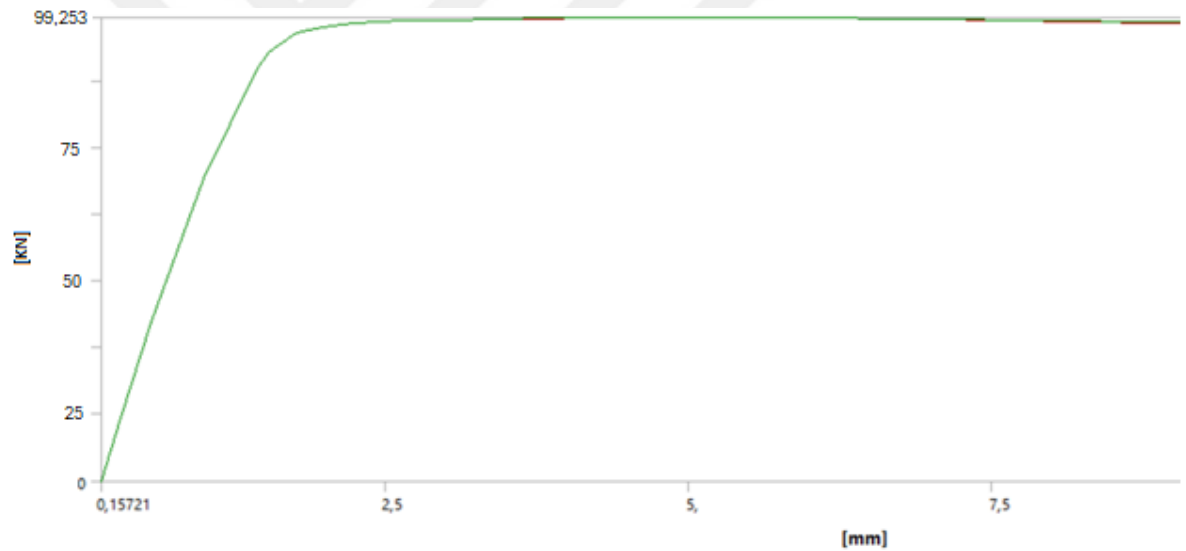
Şekil 4. 35. 120cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



Şekil 4. 36. 120cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



Şekil 4. 37. 150cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



Şekil 4. 38. 150cm uzunluğunda L/3'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi

4.4. L/4 Bölgesinden Berkitilmiş Elemanların Analizine Giriş

Bu aşamadan itibaren, berkitmenin farklı bir konumda uygulanmasının yapısal davranış üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, aynı elemanların bu kez $L/4$ bölgesinden güçlendirilmiş modelleri ele alınmıştır. Bu yaklaşımın temel amacı, berkitmenin konuma bağlı etkinliğini değerlendirmek, $L/3$ ile $L/4$ çözümlerini karşılaştırmak ve optimum berkitme yerleşimine ilişkin yapısal bir çıkarım elde etmektir. $L/4$ bölgesinden berkitilmiş modellerde, önceki analizlerde kullanılan sınır şartları ve kusur genlikleri korunarak tutarlı bir karşılaştırma zemini oluşturulmuştur.

Berkitme plakaları, önceki modelleme stratejisiyle tutarlı şekilde, korniyer elemanına ağırlık merkezi çakıştırılarak eklenmiş ve temas koşulları *bonded* olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, ilk burkulma modu her eleman boyu için yeniden elde edilmiş ve kusur tanımlamaları bu yeni mod şekline göre ölçeklendirilmiştir.

Çizelge 4. 7. L/4'lük kısmı berkitilmiş ve berkitilmemiş elemanlar üzerinde gerçekleştirilen eigenvalue buckling analizi sonuçları

SHELL			
L/4'lük kısma ek			
L (cm)	Güçlendirilmemiş Pcr (eigenbuckling)	Güçlendirilmiş Pcr (eigenbuckling)	Artış %
60	519,11	557,12	7,32
80	413,67	457,69	10,64
100	320,76	370,16	15,4
120	249,42	289,43	16,04
150	176,34	213,15	20,87

L/4 bölgesinden berkitilmiş korniyer elemanlara ait lineer eigenvalue burkulma analizleri incelendiğinde, eleman boyuna bağlı olarak kritik burkulma yüklerinde anlamlı artışlar meydana geldiği görülmektedir. Kısa elemanlarda berkitmenin etkisi sınırlı kalmakta olup $L = 60$ cm uzunluğundaki elemanda kapasite 519,11 kN'dan 557,12 kN'a yükselmiş ve artış oranı yaklaşık %7,32 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuç, kısa boylu elemanlarda burkulma davranışının büyük ölçüde kesit rijitliğiyle şekillendiğini, dolayısıyla berkitmenin etkisinin görece sınırlı kaldığını göstermektedir.

Orta boydaki elemanlarda ise berkitmenin etkisi daha belirgin hale gelmiştir. $L = 80$ cm boyunda kapasite 413,67 kN'dan 457,69 kN'a yükselmiş ve artış oranı %10,64 olmuştur. Benzer şekilde, $L = 100$ cm uzunluğunda kapasite 320,76 kN'dan 370,16 kN'a çıkarak yaklaşık %15,40 oranında bir iyileşme sağlamıştır. Bu değerler, eleman boyu arttıkça berkitmenin burkulma davranışına olan katkısının güçlendiğini ortaya koymaktadır.

Uzun elemanlarda artış daha da dikkat çekici hale gelmiştir. $L = 120$ cm uzunluğunda kapasite 249,42 kN'dan 289,43 kN'a yükselmiş ve artış oranı %16,04 olarak elde edilmiştir. En yüksek iyileşme ise $L = 150$ cm uzunluğundaki elemanda gözlenmiştir. Bu elemanda kapasite 176,34 kN'dan 213,15 kN'a çıkarak yaklaşık %20,87'lik bir artış

sağlamıştır. Bu eğilim, eleman boyu uzadıkça global burkulma eğiliminin arttığını ve berkitmenin bu davranışı sınırlamada daha etkili hale geldiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kısa elemanlarda artış yaklaşık %7 seviyesinde kalırken, orta boy elemanlarda %10–15 aralığına, uzun elemanlarda ise %16–21 aralığına ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, burkulmanın kritik hale geldiği daha uzun elemanlarda berkitmenin yapısal faydasının arttığını açıkça göstermektedir. Ayrıca bazı durumlarda $L/4$ konumundan yapılan berkitmenin, elemanın burkulma moduna daha doğrudan etki ederek kapasiteyi $L/3$ berkitme durumlarına kıyasla daha yüksek oranlarda artırdığı da dikkat çekmektedir.

$L/4$ bölgesinden berkitilmiş elemanlara ait doğrusal olmayan analiz sonuçları ve lineer elastik burkulma kapasiteleri, berkitme konumunun kapasite artışı üzerindeki etkisi farklı eleman boyları için analiz sonuçları tabloda verilmiştir.

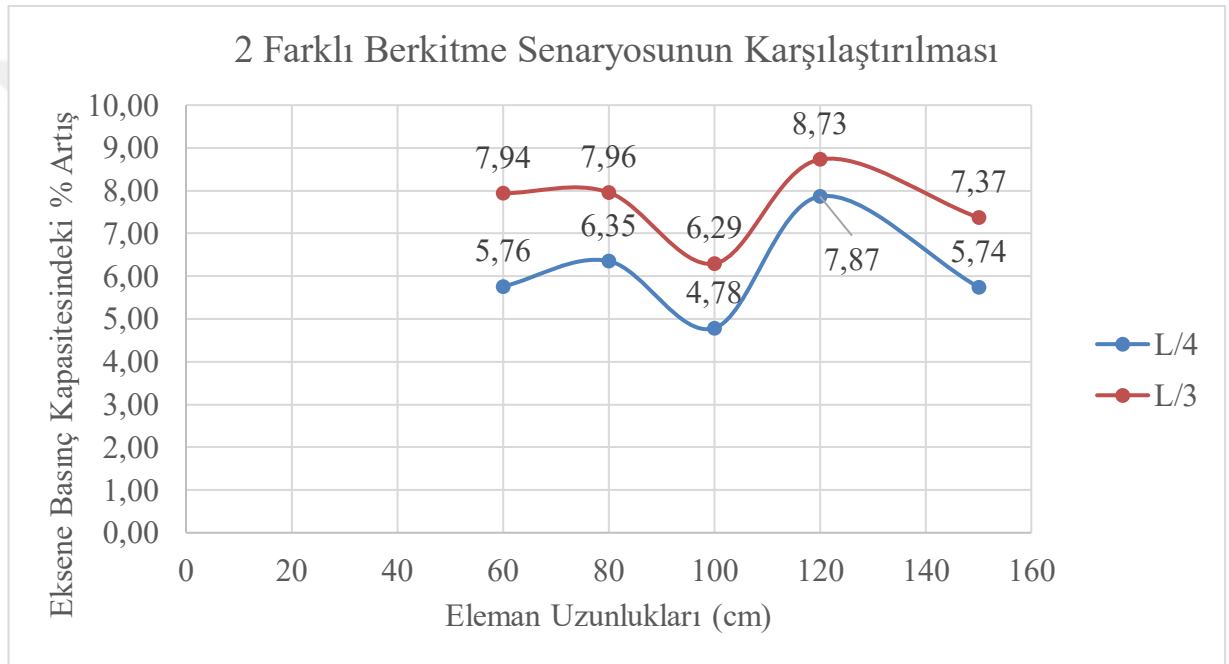
Çizelge 4. 8. $L/4$ 'lük kısmı berkitilmiş ve berkitilmemiş elemanların doğrusal olmayan analiz sonuçları

SHELL				
L/300 Kusur seçildi				
	Kusur	Güçlendirilmiş NL Sonuç	Güçlendirilmeden NL Sonuç	Artış
L (cm)	L/300 (mm)	Plim	Plim	%
60	2,00	115,01	108,75	5,76
80	2,67	108,63	102,14	6,35
100	3,33	104,11	99,356	4,78
120	4,00	101,06	93,691	7,87
150	5,00	97,747	92,438	5,74

$L/4$ bölgesinden berkitilmiş korniyer elemanlara ait doğrusal olmayan statik analiz sonuçları incelendiğinde, her bir eleman boyu için eksenel basınç kapasitesinde belirli oranlarda artış sağlandığı görülmektedir. Ancak bu artışın miktarı eleman uzunluğuna bağlı olarak doğrusal bir eğilim göstermemekte, farklı boylardaki elemanların davranışı kusur etkileri, mod geçişleri ve yerel stabilite koşullarıyla birlikte şekillenmektedir. En kısa eleman olan 60 cm uzunluğundaki modelde kapasite 108,75 kN'dan 115,01 kN'a yükselmiş ve yaklaşık %5,76'lık bir artış elde edilmiştir. Bu durum, kısa elemanlarda global burkulma etkilerinin sınırlı olması nedeniyle berkitmenin etkisinin görece kısıtlı kaldığını göstermektedir. Eleman uzunluğu 80 cm'ye çıktığında kapasite 102,14 kN'dan 108,63 kN'a yükselmiş ve artış oranı %6,35'e ulaşmıştır. Bu boyut aralığında burkulma davranışı daha baskın hale geldiğinden berkitme elemanının katkısı biraz daha hissedilir olmuştur.

100 cm uzunluğundaki elemanda kapasite artışı 99,356 kN'dan 104,11 kN'a yükselerek %4,78 ile tablodaki en düşük orana karşılık gelmiştir. Bu sonuç, bu boy aralığında elemanın berkitmeden önce farklı bir burkulma moduna geçmesi ya da kusur etkilerinin kritik bölgeleri baskılamasıyla ilişkilendirilebilir. Buna karşın 120 cm'lik elemanda kapasite 93,691 kN'dan 101,06 kN'a yükselmiş ve yaklaşık %7,86 oranında bir artış sağlamıştır. Bu değer, orta-uzun eleman boylarında berkitmenin daha etkili çalıştığını göstermektedir. En uzun model olan 150 cm'lik elemanda ise kapasite 92,438 kN'dan 97,747 kN'a yükselmiş ve artış %5,74 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuç, uzun elemanlarda doğrusal olmayan davranışın ve yerel stabilite etkilerinin berkitmenin verimliliğini kısmen sınırlayabildiğine işaret etmektedir.

2 farklı bölgeden berkitilen elemanların sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. 39. 2 farklı bölgeden berkitilen elemanların sonuçları

İki farklı berkitme senaryosuna ait eksenel basınç kapasitesindeki artışların karşılaştırıldığı grafik incelendiğinde, bazı dikkat çekici noktalar ortaya çıkmaktadır.

Berkitme elemanlarının 100 cm uzunluğundaki elemanlar için her iki senaryoda da kapasite artışının minimum düzeyde kaldığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu eleman boyunda berkitme uygulamasının beklenen verimi sağlayamadığını göstermektedir. Buna karşın, 120 cm uzunluğundaki elemanlarda kapasite artışı her iki senaryoda da en yüksek değere ulaşmıştır; bu durum berkitme uygulamasının optimal verim sağladığı boy olarak 120 cm'yi işaret etmektedir.

100 cm ve 150 cm boylarındaki elemanlarda kapasite artışının diğer elemanlara kıyasla düşük olmasının olası sebepleri arasında, burkulma modlarının tam olarak

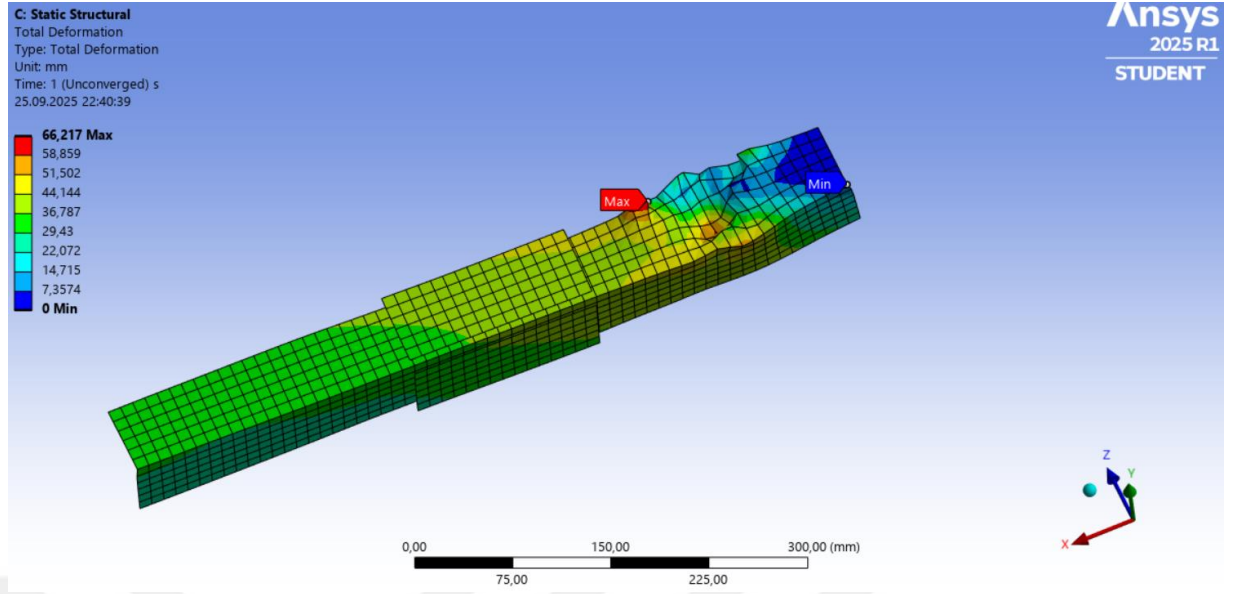
yakalanamaması ve mod değişimleri ön plana çıkmaktadır. Özellikle kısa ve uzun elemanlarda, berkitme elemanlarının burkulma şekillerini kontrol etmede sınırlı etkisi olabilmektedir.

Eleman uzunluğu arttıkça burkulma kapasitesindeki düşüşün doğrusal bir oranla ilerlememesi, burkulma davranışının yalnızca eleman boyuna bağlı olmadığını, aynı zamanda gerilme dağılımı, mod şekli ve lokal stabilite koşullarıyla da ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle berkitmeye yakın bölgelerde oluşan kısmi rijitlik artışı, elemanın teorik olarak beklenen global burkulma moduna ulaşmasını engelleyebilmekte ve eleman farklı modlara yönelerek kapasitesini bu modlar üzerinden kaybetmektedir.

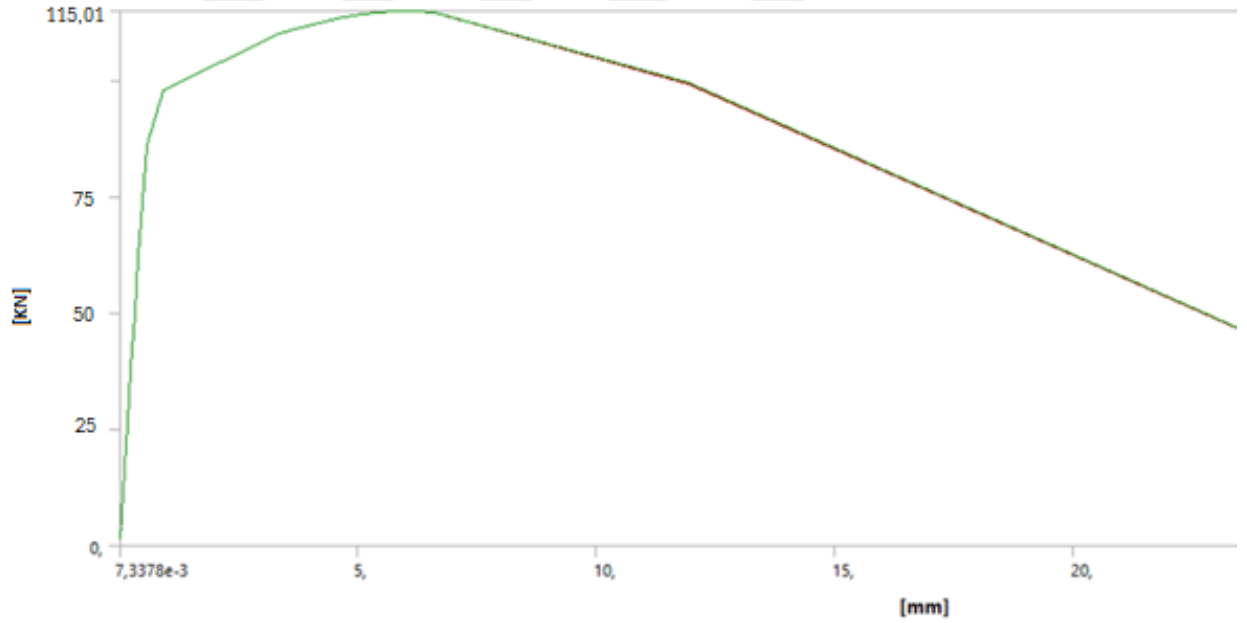
Uzun elemanlarda stabilite kaybı çoğu zaman ilk temel mod üzerinden gerçekleşmemektedir. Bunun yerine, berkitmenin oluşturduğu rijitlik dağılımı nedeniyle yerel bölgelerde ikincil modlara kayma, kısmi göçme şekilleri veya burulmalı burkulma eğilimleri meydana gelebilmektedir. Bu durum, özellikle burkulma modunun sürekliliğini bozan ara rijitliklerin varlığında daha belirgin hale gelir. Berkitme elemanının konumu, yük aktarım yollarını ve eleman üzerindeki gerilme dağılımını etkileyerek burkulmanın farklı bölgelerde başlamasına zemin hazırlayabilir. Dolayısıyla kapasite, yalnızca elemanın toplam boyuna bağlı olarak azalmamakta; lokal stabilite sınırları, yük yolunun değişimi ve mod şeklinin yeniden dağılımı kapasiteyi belirleyen temel unsurlar haline gelmektedir.

Eleman uzunluğu arttıkça kapasite düşüşünün orantısız ilerlememesinin nedeni, elemanın beklenen global burkulma moduna ulaşmadan önce berkitmeye yakın bölgelerde lokal instabilite gelişmesi ve sistemin daha yüksek mertebeden modlara kayarak göçme davranışı sergilemesi olarak öngörülmektedir. Özellikle kabuk ve ince cidarlı elemanlarda, kesitin burkulma öncesi şekil değiştirme karakteri, burkulma modunun konum ve biçimini değiştirmekte; böylece kapasite üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

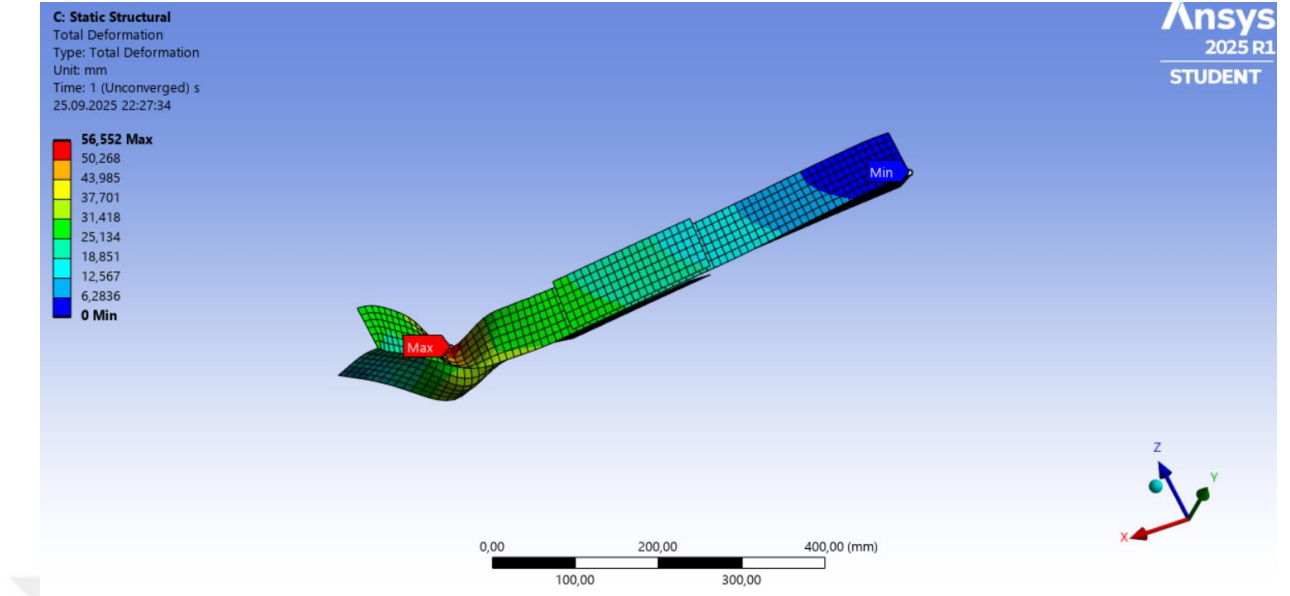
Kapasite değişiminin eleman boyuyla doğrusal ilişki göstermemesi, berkitmenin oluşturduğu rijitlik dağılımı, mod geçişleri ve lokal burkulma eğilimleriyle yakından ilişkilidir. Bu durum, berkitmenin yalnızca varlığının değil, konumunun ve elemanın burkulma moduna etkisinin de tasarım açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.



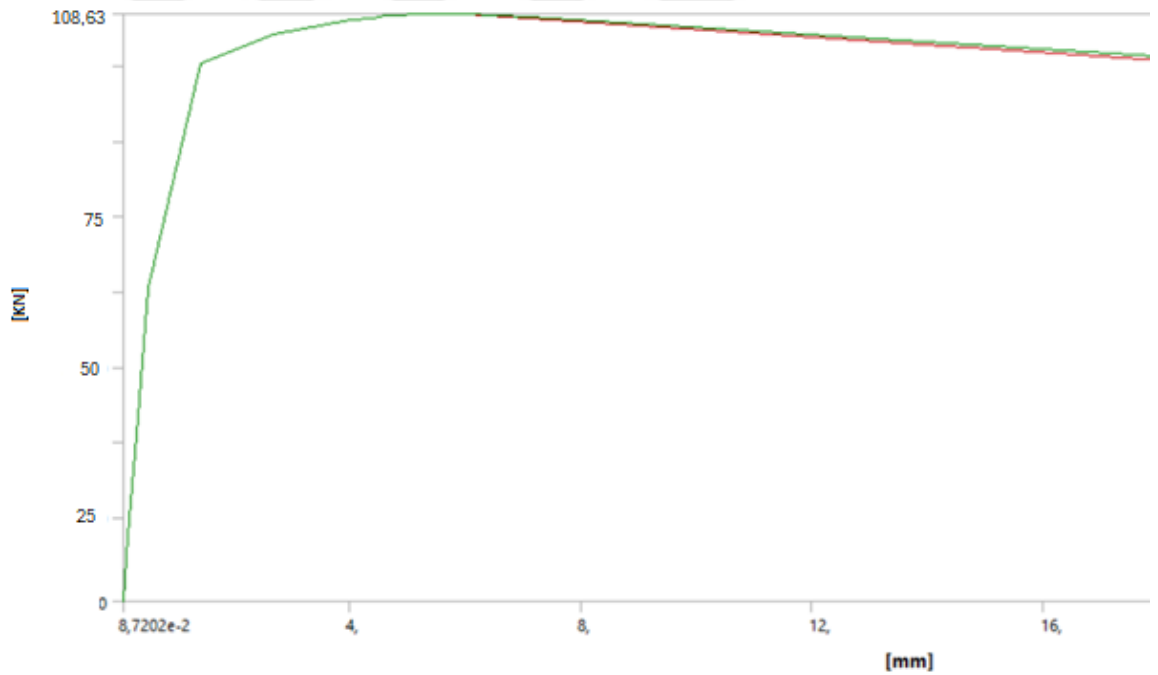
Şekil 4. 40. 60cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



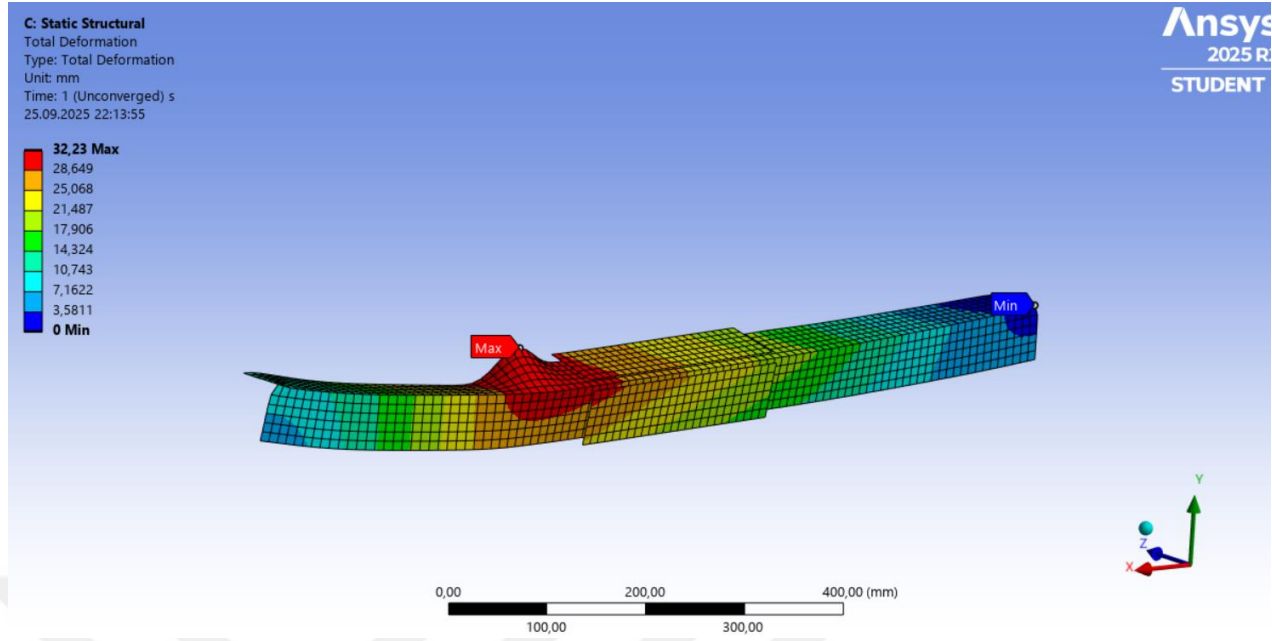
Şekil 4. 41. 60cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



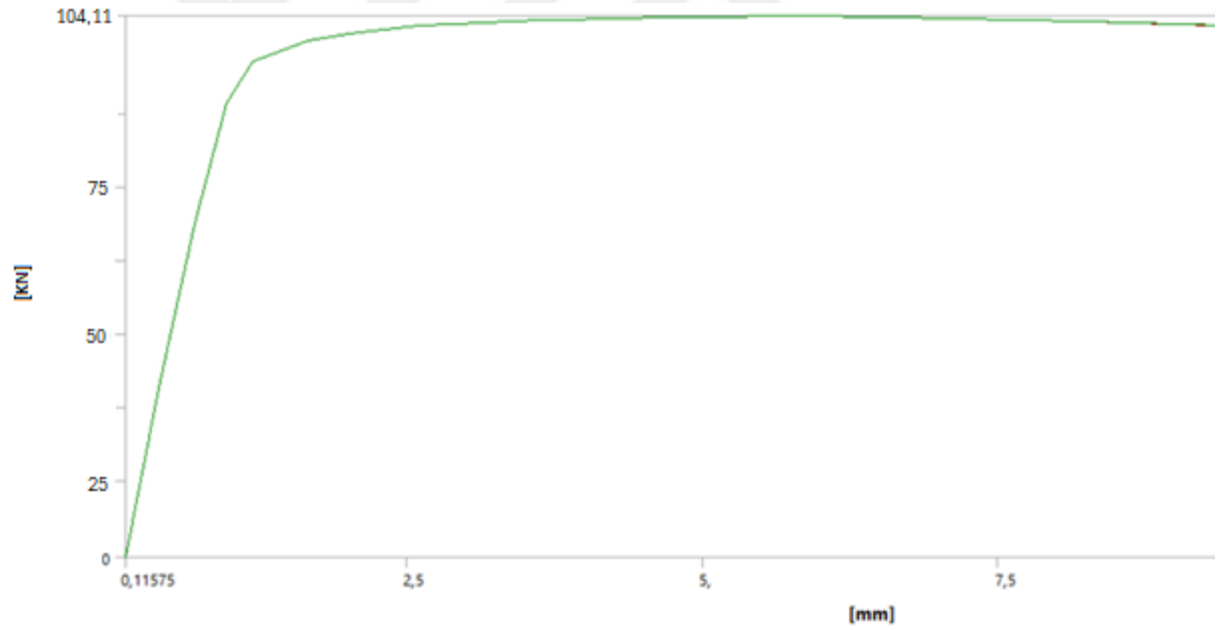
Şekil 4. 42. 80cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



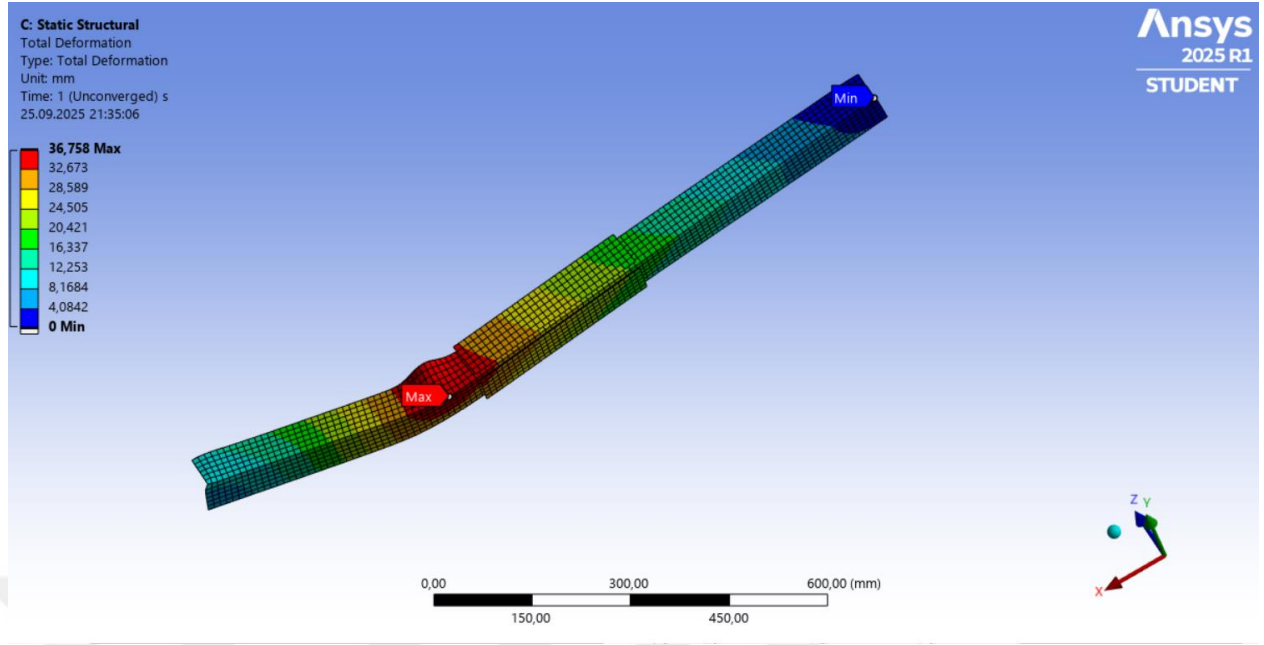
Şekil 4. 43. 80cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



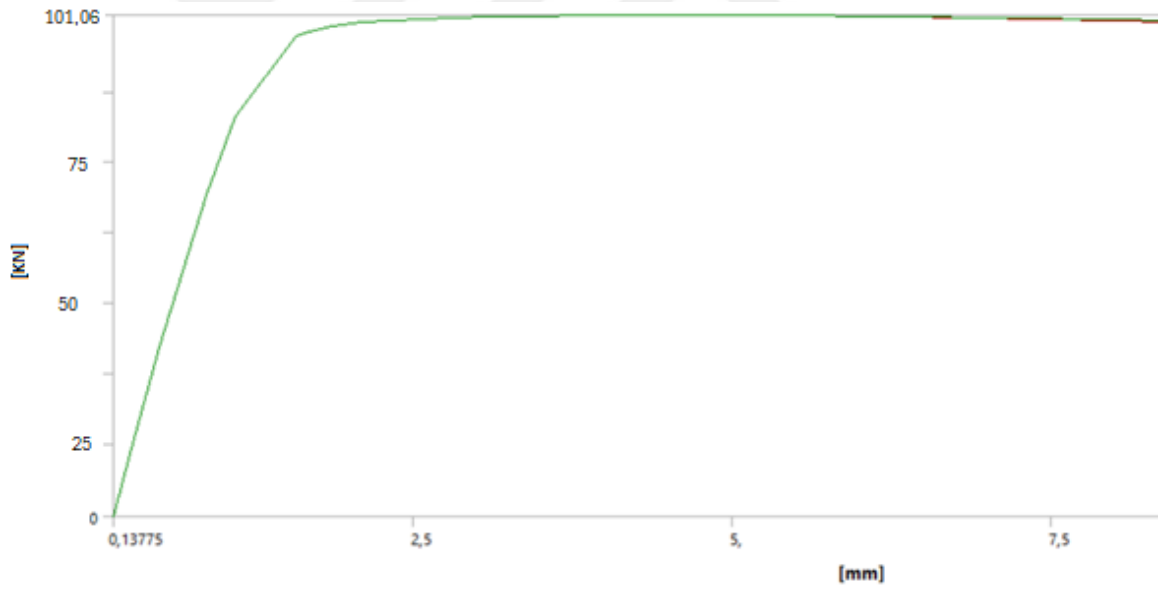
Şekil 4. 44. 100cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



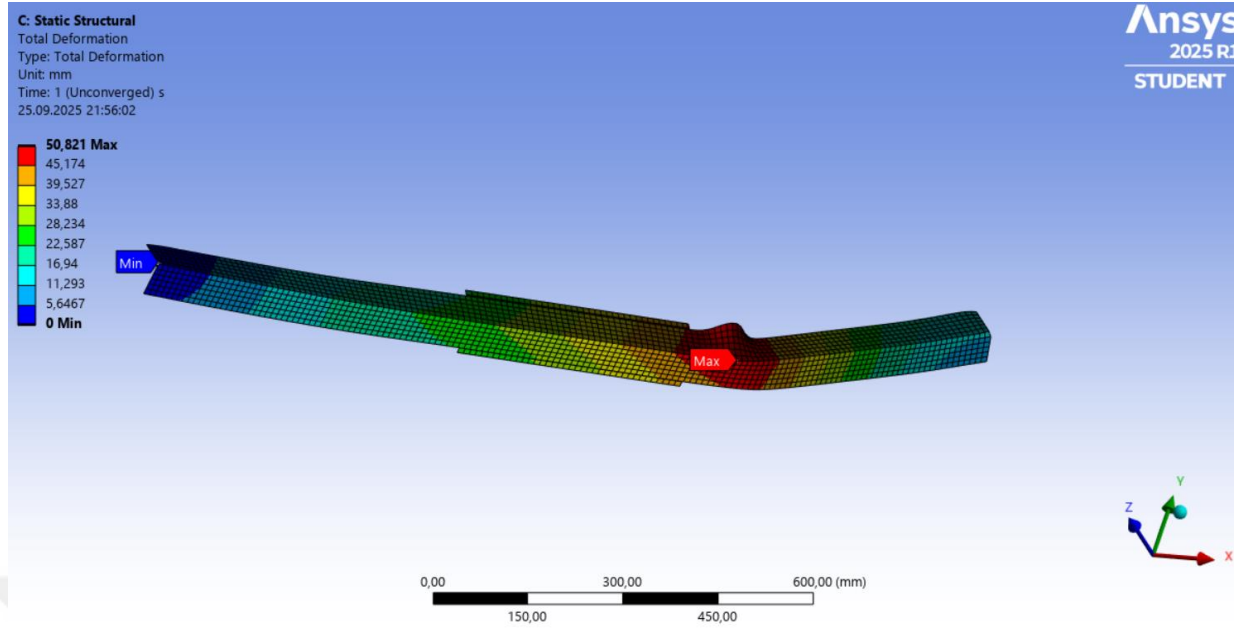
Şekil 4. 45. 100cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



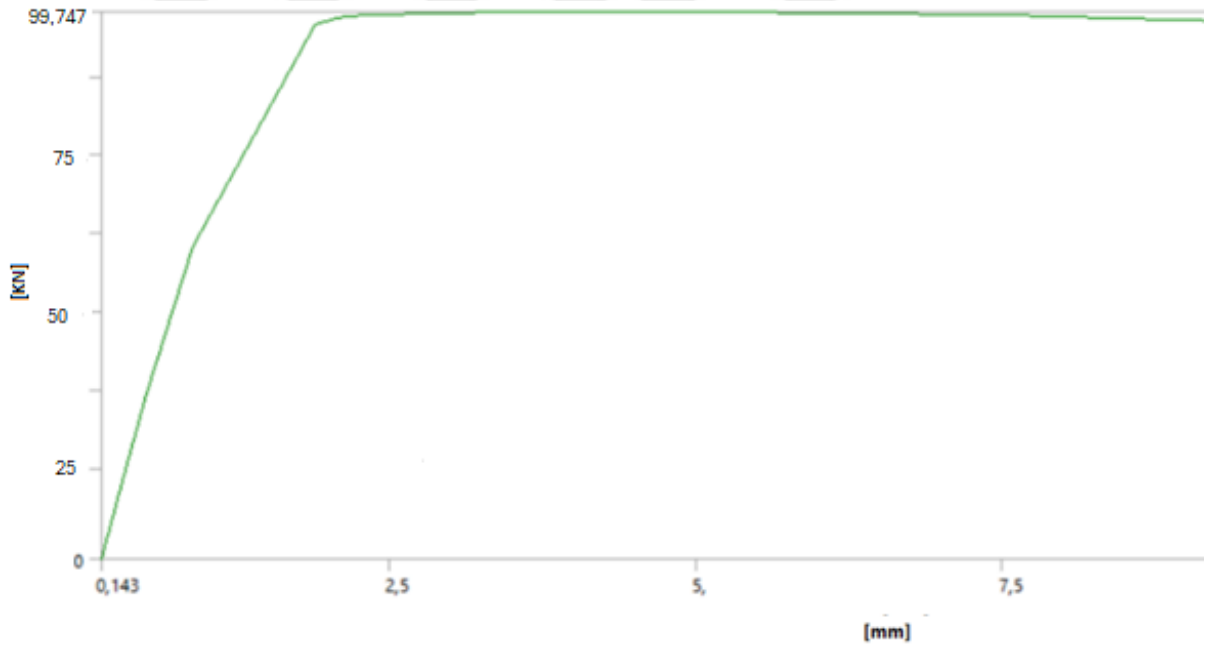
Şekil 4. 46. 120cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



Şekil 4. 47. 120cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi



Şekil 4. 48. 150cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu



Şekil 4. 49. 150cm uzunluğunda L/4'lük kısmı berkitilen elemanın doğrusal olmayan statik analiz sonucu Kuvvet (N) – Deplasman (mm) eğrisi

5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, basınç etkisi altındaki L60.60.6 kesitli çelik köşe elemanlarının yerel berkitme plakaları kullanılarak güçlendirilmesi incelenmiş ve önerilen berkitme yöntemlerinin eksenel basınç taşıma kapasitesine olan etkileri sayısal olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elemanların 60 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm ve 150 cm olmak üzere beş farklı boyu dikkate alınmış; her bir boy için eleman uzunluğunun L/3 ve L/4 oranlarına karşılık gelen orta bölgelerine yerel berkitme plakaları uygulanmıştır. Elde edilen davranışlar, geometrik ve malzeme doğrusal olmayanlıkları içeren sonlu eleman analizleri yardımıyla incelenmiştir.

Yapılan analizler, yerel berkitmenin köşe elemanlarının burkulma davranışında iyileşme sağladığını göstermektedir. Ancak bu iyileşmenin büyüklüğü, eleman boyuna, berkitmenin konumuna ve elemanın baskın burkulma moduna bağlı olarak değişmektedir. Genel eğilim olarak, eleman uzunluğunun L/3 bölgesinde yapılan berkitmelerin, L/4 bölgesinde yapılanlara kıyasla daha yüksek eksenel taşıma kapasitesi artışı sağladığı görülmüştür. L/3 oranında gerçekleştirilen güçlendirmelerde kapasite artışı %7,37 ile %8,73 aralığında gerçekleşmiş; en yüksek artış 120 cm uzunluğundaki elemanlarda elde edilmiştir. Buna karşılık, kapasite artışının en düşük olduğu eleman boyu 100 cm olarak belirlenmiştir.

Benzer şekilde, L/4 oranında yapılan berkitmelerde eksenel taşıma kapasitesindeki artış %5,76 ile %7,87 arasında değişmiş ve en yüksek artış yine 120 cm uzunluğundaki elemanlarda gözlenmiştir. Her iki berkitme stratejisinde de 100 cm uzunluğundaki elemanlarda elde edilen kapasite artışlarının görece düşük seviyede kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, elemanın mevcut burkulma mod şekli ile berkitme konumunun örtüşme düzeyinin sınırlı olmasına bağlanmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, berkitme plakalarının konumlandırılmasının yapısal verimlilik açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. L/3 oranında yapılan berkitmelerde daha yüksek kapasite artışı sağlanması, bu konumun elemanın baskın burkulma mod şekliyle daha etkin bir etkileşim içinde olmasına bağlanabilir. Ayrıca, 120 cm uzunluğundaki elemanlarda her iki berkitme yönteminde de en yüksek kapasite artışlarının gözlenmesi, orta boy elemanlarda yerel rijitlik artışlarının global stabilite davranışına daha etkin şekilde yansımalarını düşündürmektedir.

Bu çalışma kapsamında incelenen berkitilmiş köşe elemanlarında enkesit özelliklerinin eleman boyunca değişkenlik göstermesi nedeniyle narinlik oranı tek bir değer olarak tanımlanamamaktadır. Bununla birlikte, göçme yükleri ve genel burkulma davranışı birlikte değerlendirildiğinde, uygulanan yerel berkitmenin elemanın etkin atalet yarıçapını artırdığı öngörülmektedir. Ancak bu artışın büyüklüğü sayısal olarak belirlenememekte olup, elde edilen sonuçlar berkitmenin eleman narinliği üzerinde sınırlı bir iyileşme sağladığını ve eksenel taşıma kapasitesinde belirgin bir artışa yol açmadığını göstermektedir.

100 cm uzunluğundaki elemanlarda kapasite artışının nispeten düşük kalması, her eleman boyu için tek tip bir güçlendirme stratejisinin optimum sonuç vermeyebileceğini

ortaya koymaktadır. Bu bulgu, yerel berkitme tasarımında eleman boyu, burkulma modu ve berkitme konumunun birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermesi açısından önemlidir.

Sonuç olarak, yerel berkitme plakalarıyla yapılan müdahalelerin, çelik köşe elemanlarının aksenal taşıma kapasitesini artırmada uygulanabilir ve yapısal açıdan anlamlı bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, elde edilen kapasite artışlarının sınırlı düzeyde kalması, yöntemin tasarım parametrelerine duyarlı olduğunu göstermektedir. Optimum performansın sağlanabilmesi için berkitme yerinin eleman boyu ve baskın burkulma modu dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir. Gelecek çalışmalarda farklı kesit tipleri, berkitme geometrileri, bağlantı detayları ve deneysel doğrulamalarla yöntemin kapsamının genişletilmesi, elde edilen bulguların mühendislik uygulamalarına aktarılabilirliğini artıracaktır.



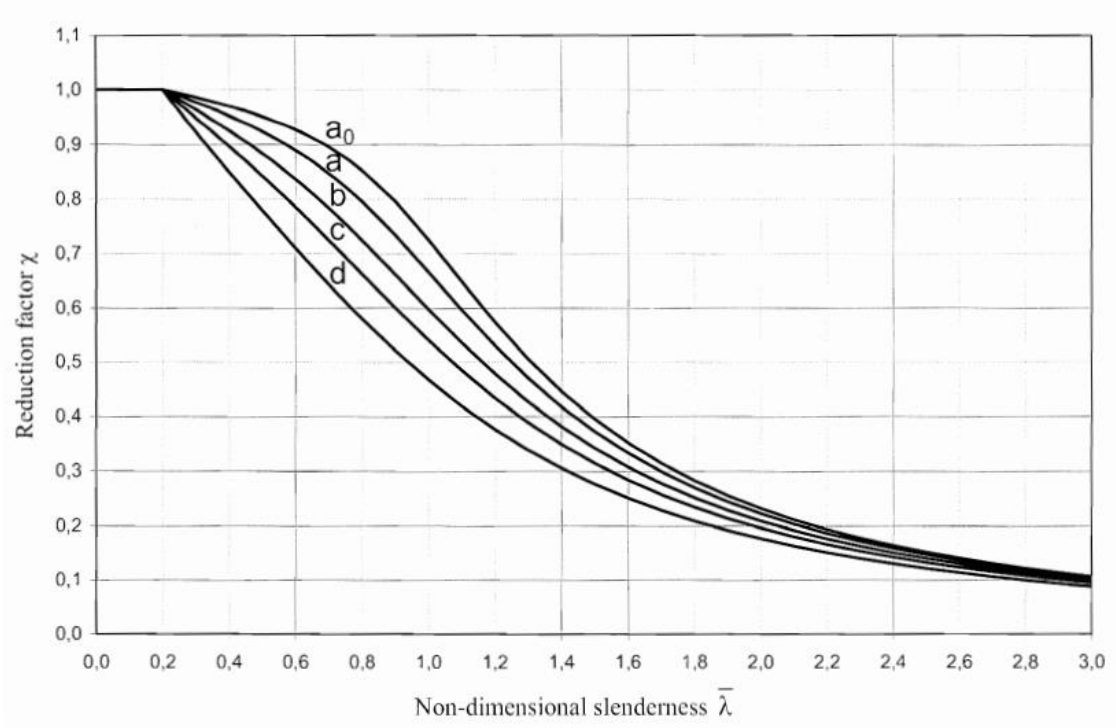
6. KAYNAKLAR

- Abdelrahman. (2020). *Advanced Analysis And Design Of Steel Structures With Single Angle Members*. HONG KONG: POLYTECHNIC UNIVERSITY.
- Alenezi, A. M. (2022). *Buckling Resistance of Single and Double Angle Compression Members*. Ottawa, Canada: University of Ottawa.
- Bernatowska, E. (2023). *Ultimate tensile resistance of steel angle members connected by one leg with bolts*. Inżynieria i Budownictwo: Rzeszów University of Technology.
- BS5950. (1990). *Structural use of steelwork in building: Part 1 – Code of practice for design in simple and continuous construction: hot rolled sections (BS 5950-1:1990)*. London: British Standards Institution.
- Chai Hong Yoo, S. L. (tarih yok). *Stability of Structures*. ELSEVIER.
- Chakravarthy. (2025). *Axial Strength of Short Hot-Rolled Steel Equal Angle Members: Experimental Analysis, Numerical, and Machine Learning Modeling*. Springer.
- Chenghao Lu, X. M. (2014). *The structural effect of bolted splices on retrofitted transmission tower angle members*. School of Natural and Built Environments, University of South Australia, SA 5095, Australia: ELSEVIER.
- ÇYTHYE. (2016). *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları*. Ankara, Türkiye: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- EC3. (2005). *EN 1993-1-1: Eurocode 3 – Design of Steel Structures*. Brussels: CEN.
- Elgaaly, M. (1991). *Behavior Of Single-Angle-Compression Members*. New York: New York University.
- Galambos, T. V. (1998). *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures (5th Edition)*. New York: John Wiley & Sons.
- Gere, S. P. (1936). *Theory Of Elastic Stability*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- IŞIK, E. (2013). *Kar Yüğü Etkin Bölgelerde Çelik Kafes Sistem Güçlendirmesi*. Bitlis: BEÜ Fen Bilimleri Dergisi.
- Kalaga, S. (2018). *End Restraints in Single - and Double - Bolted Angles in Lattice Towers*. Consulting Engineer, Glen Burnie, USA: Juniper Publishers.
- Kang, W. (2007). *Modeling And Analysis Of Lattice Towers With More Accurate Models*. Hong Kong Special Administrative Region, China: Department of Building & Construction, City University of Hong Kong.

- KÖŞKER, Y. A. (2022). *Nonlinear Performance Analysis Of Steel Lattice Energy Distribution Towers*. Ankara, Türkiye: MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.
- Li. (2023). *Experimental Study and Bearing Capacity Analysis of Retrofitted Built-Up Steel Angle Members under Axial Compression*. Switzerland: applied sciences.
- Lu C, O. Y. (2016). *Structural Analysis of Lattice Steel Transmission Towers: A Review*. School of Natural and Built Environments, University of South Australia, Australia: Journal of Steel Structures & Construction.
- Mustafa DURMAZ, A. D. (2011). *Merkezi Yüklü Korniyerlerin Yük Taşıma Kapasiteleri*. Trabzon/TÜRKİYE: KTÜ, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü.
- Sadeghi. (2024). *Computational and Experimental Study on Comparing the Methods of Retrofitting the Steel Lattice Tower under the Effect of Wind Load*. Damghan, Iran : Journal of Rehabilitation in Civil Engineering .
- SATO. (2024). *Flexural Buckling Strength of Steel Angle with Reinforcement in Electric Transmission Towers*. Nagoya, Japan: ELSEVIER.
- Ślęczka, E. B. (2021). *Failure modes of steel angles connected by one leg*. Rzeszów, Poland: Rzeszów University of Technology.
- Trahair, N. (1995). *Single angle compression members*. Australia: Australian Steel Institute (AS 4100 DS06).
- Trahair, N. S. (1993). *Flexural-Torsional Buckling of Structures*. N. S. Trahair içinde, *Flexural-Torsional Buckling of Structures* (s. 91-95). London ; Melbourne: Spon (E & FN Spon).
- Woolcock, B. S. (1986). *Design Of Single Angle Web Struts In Trusses*. GEORGE MASON UNIVERSITY.
- ZHANG. (2022). *Critical Stress Determination of Local and Distortional Buckling of Lipped Angle Columns under Axial Compression*. buildings.
- ZHU. (2023). *Stability of Equal-leg Angle Steel Columns with Single-clad End Connection Joints*. Chongqing, China: Chongqing University.

7. EKLER

EK-1. EC1993-1-1 'de Bulunan Burkulma Eğrileri



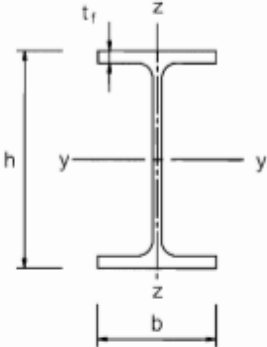
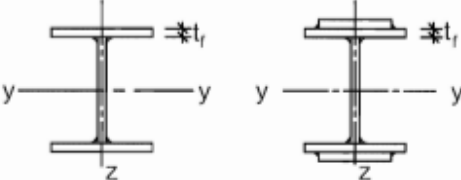
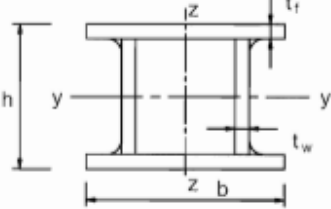
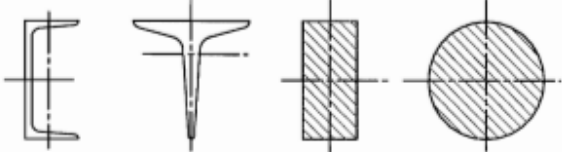
EK-2. EC1993-1-1'de Bulunan Kusur Faktörleri

Table 6.1: Imperfection factors for buckling curves

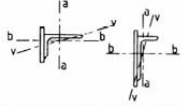
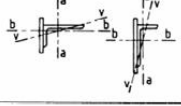
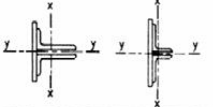
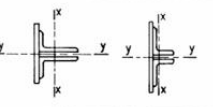
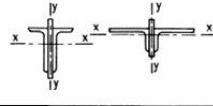
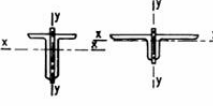
Buckling curve	a_0	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

EK-3. Bir kesit için burkulma eğrisinin seçimi

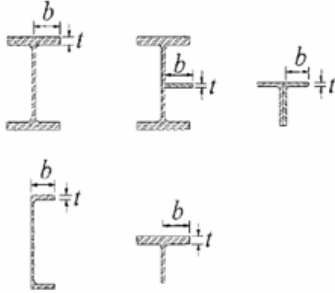
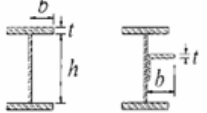
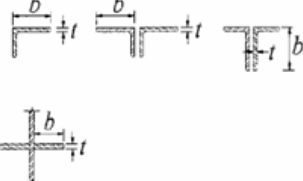
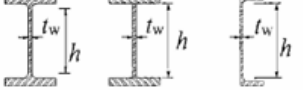
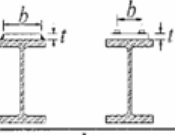
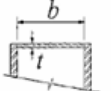
Table 6.2: Selection of buckling curve for a cross-section

Cross section		Limits	Buckling about axis	Buckling curve	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Rolled sections 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a b	a ₀ a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c
Welded I-sections 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y-y z-z	b c	b c
	$t_f > 40 \text{ mm}$		y-y z-z	c d	c d
Hollow sections 	hot finished		any	a	a ₀
	cold formed		any	c	c
Welded box sections 	generally (except as below)		any	b	b
	thick welds: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		any	c	c
U-, T- and solid sections 			any	c	c
L-sections 			any	b	b

EK-4. BS5950’de bulunan korniyer sınır şartlarına göre hesaplanan narinlik oranları

Table 28. Angle, channel and T-section struts			
Clause	Connection	Sections and axes	Slenderness ratios (see notes 1 and 2)
4.7.10.2(a)			vv axis: $0.85L_{vv}/r_{vv}$ but $\geq 0.7L_{vv}/r_{vv} + 15$ aa axis: $1.0L_{aa}/r_{aa}$ but $\geq 0.7L_{aa}/r_{aa} + 30$ bb axis: $0.85L_{bb}/r_{bb}$ but $\geq 0.7L_{bb}/r_{bb} + 30$
4.7.10.2(b)	 (see note 3)		vv axis: $1.0L_{vv}/r_{vv}$ but $\geq 0.7L_{vv}/r_{vv} + 15$ aa axis: $1.0L_{aa}/r_{aa}$ but $\geq 0.7L_{aa}/r_{aa} + 30$ bb axis: $1.0L_{bb}/r_{bb}$ but $\geq 0.7L_{bb}/r_{bb} + 30$ (see note 3)
4.7.10.3(a)	 (see note 4)		xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ but $\geq 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $[(0.85L_{yy}/r_{yy})^2 + \lambda_c^2]^{1/2}$ but $\geq 1.4\lambda_c$ (see note 5)
4.7.10.3(b)	 (see note 4)		xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ but $\geq 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $[(L_{yy}/r_{yy})^2 + \lambda_c^2]^{1/2}$ but $\geq 1.4\lambda_c$ (see note 5)
4.7.10.3(c)	 (see note 4)		xx axis: $0.85L_{xx}/r_{xx}$ but $\geq 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $[(L_{yy}/r_{yy})^2 + \lambda_c^2]^{1/2}$ but $\geq 1.4\lambda_c$ (see note 5)
4.7.10.3(d)	 (see notes 3 and 4)		xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ but $\geq 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $[(L_{yy}/r_{yy})^2 + \lambda_c^2]^{1/2}$ but $\geq 1.4\lambda_c$ (see notes 3 and 5)

EK-5. ÇYTHYE’de bulunan kompaktlık için gereken minimum enkesit koşulları**TABLO 5.1A – EKSENEL BASINÇ KUVVETİ ETKİSİNDEKİ ENKESİT PARÇALARI İÇİN GENİŞLİK / KALINLIK ORANLARI**

	Durum	Tanım	Genişlik / Kalınlık Oranı, λ	Genişlik / Kalınlık Oranı Sınır Değeri, λ_r	Enkesit
Rijitleştirilmemiş Enkesit Parçası	1	Hadde I-profillerinin başlıkları, bu profillere bağlanan levhalar, boşluksuz olarak sürekli birleştirilen çift korniyerlerin dış kolları, U- ve T-profillerin başlıkları	b/t	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2	Yapma I-profillerin başlıkları, bu profillere bağlanan levhalar ve korniyerlerin dış kolları	b/t	$0.64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ [a]	
	3	Tek korniyerlerin kolları, birbirlerine boşluklu olarak bağlanan çift korniyerlerin kolları ve tüm rijitleştirilmemiş elemanlar	b/t	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4	T-profillerin gövdeleri	d/t	$0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Rijitleştirilmiş Enkesit Parçası	5	U-profillerin ve çift simetri eksenli I-profillerin gövdeleri	h/t_w	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6	Üniform kalınlıklı dikdörtgen ve kare kutu enkesitlerin gövde ve başlıkları	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7	Birleşim araçları arasında kalan takviye levhaları ve diyafram levhaları	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8	Tüm diğer rijitleştirilmiş enkesit parçaları	b/t	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9	Boru enkesitli elemanlar	D/t	$0.11 \frac{E}{F_y}$	

EK-6. ÇYTHYE'ye göre eşit kollu korniyerlerin eksenel yük kapasitesini hesaplayan program

clear

clc

%-----Tüm elemanlar için eğilmeli burkulma karakteristik basınç dayanımı-----

% Değişkenlerin tanımlanması

E=200000; %Mpa

L1=60; %mm

L2=60; %mm

t=6; %mm

k=1; %mesnet şartı (burkulma boyu)

L=1500; %mm eleman uz.

Fy=235; % s235 çeliği 235mpa

J=2*(L1-t/2)*t^3/3; %Burulma sabiti kaynak :<https://www.projectengineer.net/what-is-the-torsion-constant/>

G=77200; %mpa Kayma modülü

A=(L1-t)*t+L2*t;

xg=(L1*t*t/2+(L2-t)*t*((L2-t)/2+t)*(1))/A;

Ix1=L1*t^3/12+L1*t*(xg-t/2)^2;

Ix2=t*(L2-t)^3/12+t*(L2-t)*((L2-t)/2+xg)^2;

Ix=(Ix1+Ix2); %mm4

i=sqrt(Ix/A);%mm;

omega=1.67; %GKT ise 1.67böl YDKT ise 0.9çarp

narinlik=k*L/i;

Fe=pi()^2*E/(narinlik^2);

if narinlik >200


```

disp("Çok Narin")
end
if narinlik<4.71*sqrt(E/Fy)
    Fcr=0.658^(Fy/Fe)*Fy;
else
    Fcr=0.877*Fe;
end
if omega==1.67
    Pn=Fcr*A/omega;
end
if omega ==0.9
    Pn=Fcr*A*omega;
end

%-----Eşit kollu korniyerler için etkin narinlik oranları
disp("Aşağıda verilen koşulları sağlayan, tek korniyerden oluşan basınç")
disp("elemanlarında, dışmerkezlik etkisinin ihmal edilmesine ve (1) veya (2) de")
disp(" tanımlanan etkin narinlik oranları (Lc / i) kullanılarak eksenel basınç")
disp(" kuvveti dayanımının hesaplanmasına izin verilmektedir")
disp("a) Korniyer, her iki ucunda aynı kolundan basınç kuvveti etkisinde olmalıdır.")
disp("b) Korniyer uçları, en az 2 bulon ile veya kaynakla bağlanmalıdır")
disp("c) Korniyerin boyuna eksenine dik yük bulunmamalıdır")
disp("d) Lc/i oranı 200 sınırını aşmamalıdır")
disp("e) Farklı kollu korniyerde, uzun kol boyunun kısa kol boyuna oranı 1.7 yi aşmamalıdır.")
disp("-----")

```

```
if L1/t<0.71*sqrt(E/Fy)
```

```
    disp("Burulmalı ve Eğilmeli-Burulmalı Burkulma Sınır Durumu da DİKKATE  
    ALINMASINA GEREK YOK")
```

```
else
```

```
    disp("Burulmalı ve Eğilmeli-Burulmalı Burkulma Sınır Durumu da DİKKATE  
    ALINMASINA GEREK VAR")
```

```
end
```

```
disp("-----")
```

```
if narinlik<75
```

```
    narinlik2=60+0.8*narinlik;
```

```
else
```

```
    narinlik2=45+narinlik;
```

```
end
```

```
Fe2=pi()^2*E/(narinlik2^2);
```

```
if narinlik2<4.71*sqrt(E/Fy)
```

```
    Fcr2=0.658^(Fy/Fe2)*Fy;
```

```
else
```

```
    Fcr2=0.877*Fe2;
```

```
end
```

```
Pn2=Fcr2*A;
```

```
%-----Burulmalı ve Eğilmeli-Burulmalı Burkulma Sınır  
Durumu
```

```
Fex=pi()^2*E/narinlik2^2;
```

```
Fey=pi()^2*E/narinlik2^2;
```

```
x0=(xg-t/2);
```

```
y0=(xg-t/2);
```

$i0 = (\sqrt{x0^2 + y0^2 + 2 * Ix / (A)});$ %kayma merkezine göre hesaplanan polar atalet yarıçapı

$Fez = G * J / ((A) * i0^2);$ %çarpılma etkileri ihmal edildi

$H = 1 - (x0^2 + y0^2) / (i0^2);$

$Fe3 = ((Fey + Fez) / (2 * H)) * (1 - \sqrt{1 - (4 * Fey * Fez * H) / ((Fey + Fez)^2)});$

if $narinlik2 < 4.71 * \sqrt{E / Fy};$

$Fcr3 = 0.658^{(Fy / Fe3)} * Fy;$

else

$Fcr3 = 0.877 * Fe3;$

end

$Pn3 = Fcr3 * A;$

fprintf("Eleman Uzunluğu = %d mm\n", L)

fprintf("Eğilmeli burkulma sınır durumu %d kN\n", $Pn2 / 1000$)

fprintf("Eğilmeli burkulma sınır durumu (GKT) %d kN\n", $Pn2 / \omega / 1000$)

fprintf("Eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumu %d kN\n", $Pn3 / 1000$)

fprintf("Eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumu (GKT) %d kN\n", $Pn3 / \omega / 1000$)

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim GENÇYILMAZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2024-2026	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2019-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

İnşaat Mühendisi	Özer GENCAY Mühendislik
2023-2025	Çelik ve Betonarme Yapıların Tasarımı, Projelendirilmesi
Araştırma Görevlisi	İnşaat Mühendisleri Odası Antalya Şube
2025-Devam ediyor	Statik Proje Kontrolü Birimi