

**ÖNGERİLMELİ ÇELİK KAFES KİRİŞLERİN
MİNİMUM AĞIRLIKI BOYUTLANDIRILMASI
İnş. Müh. Ebru ÇAKIR
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Zekeriya AYDIN**

2011

T.C.
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖNGERİLMELİ ÇELİK KAFES KİRİŞLERİN MİNİMUM AĞIRLIKLI
BOYUTLANDIRILMASI

Ebru ÇAKIR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Zekeriya AYDIN

TEKİRDAĞ-2011

Her hakkı saklıdır

Yrd. Doç Dr. Zekeriya AYDIN danışmanlığında, Ebru ÇAKIR tarafından hazırlanan bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Juri Başkanı: Prof.Dr. Abdurrahman GÜNER

İmza :

Üye: Yrd.Doç.Dr. Güler GAYGUSUZUOĞLU

İmza :

Üye: Yrd.Doç.Dr. Zekeriya AYDIN

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç.Dr. Fatih KONUKÇU
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÖNGERİLMELİ ÇELİK KAFES KİRİŞLERİN MİNİMUM AĞIRLIKLIL BOYUTLANDIRILMASI

Ebru ÇAKIR

**Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Zekeriya AYDIN

Bu çalışmada öngerilmeli yanal burkulması önlenmiş çelik kafes kirişlerin minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılması ele alındı. Seçilen kafes kiriş türü paralel başlıklı düzlem geometriye sahiptir. Öngerme verme tekniği olarak alt başlığın altına takoz yerleştirmek suretiyle, kafes kirişin iki ucundaki mesnetler arasında öngerme kablosunun gerildiği düşünüldü. Yükleme sınıfı olarak kar, kaplama yükü ve öz ağırlık dikkate alındı. Öngerilme kayıpları ise ânî ve ilave kayıplar olmak üzere iki aşamalı olarak hesaba katıldı. Kafes kirişlerin tasarımı için gerekli olan profil kesitleri boru kesit olarak seçildi.

Bu çalışmanın amacı, çelik kafes kirişlere öngerilme uygulanmak suretiyle, malzeme miktarında ve dolayısıyla maliyette bir kazanç sağlanıp sağlanamayacağının belirlenmesidir. Ayrıca öngerilme uygulamak suretiyle kafes kiriş yüksekliğinde bir azalma olup olmayacağı incelendi. Bu tezin bir diğer amacı ise öngerme kablosunun geometrisini belirlemede kullanılan takozlar için uygun boyların belirlenmesidir.

Bu amaçlar doğrultusunda, çalışmada 40 m, 60 m, 80 m ve 100 m açıklığa sahip kafes kirişler incelendi. Bu kirişler farklı kiriş yüksekliklerinde ve farklı öngerme kuvvetleri altında boyutlandırılarak, hangi öngerme kuvvetinin en uygun olduğu ve ne kadar malzeme tasarrufu sağlandığı belirlendi. Yine bir adet kafes kiriş farklı takoz boyutları ile çözülmek suretiyle en uygun takoz boyutları belirlendi.

Çalışmanın sonucunda kiriş uzunluğu arttıkça ve kiriş yüksekliği azaldıkça çelik kafes kirişlerde öngerme uygulanan sağladığı kazancın da arttığı görüldü. Ayrıca çelik kafes kirişlere öngerilme uygulanmak suretiyle kullanılan yapı çeliği malzeme ağırlığında %35'e varan oranda kazanç sağlandı.

Anahtar Kelimeler: Öngerilmeli çelik, Kafes kiriş, Öngerme kuvveti

2011, 92 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

MINIMUM-WEIGHTED DESIGN OF PRESTRESSED STEEL TRUSS BEAMS

Ebru ÇAKIR

**Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor : Asist.Prof. Zekeriya AYDIN

In this study, minimum-weighted design of prestressed steel truss beams is investigated. Bottom and top bar of selected plane truss beam are parallel. It is considered that prestressing cable is settled under the bottom bar between two ends of beam using wedge. Snow, coating and self-weight loads are considered. Prestress loses are calculated in two steps as initial loses and additional loses. Profile sections for the bars of the truss beam are selected as pipe section.

Purpose of this study is to determine whether the amount of material and cost of truss beam will be less using prestressing. Changing of the height of truss beam according to prestressing is also investigated. Another purpose of this study is to determine the appropriate length of wedges which are used for prestressing tendon geometry.

For these purposes, truss beams with 40 m, 60 m, 80 m and 100 m span length were studied. These beams were designed for different beam heights and different prestressing forces. The fittest prestressing forces and amount of cost saving were determined. A selected truss beam was analyzed for different wedge heights and the appropriate height of the wedges was investigated.

It is concluded from this study that the profit of applying prestressing to steel truss beams is studied higher the bigger the beam span and the smaller is beam height. Amount of structural steel can be reduced up to 35% by applying prestressing to steel truss beams.

Keywords : Prestressed steel, Truss beam, Prestressing force

2011 , 92 pages

TEŞEKKÜR

Öngörilmeli Çelik Yapılar Çelik Kafes Kirişlerin Minimum Ağırlıklı Boyutlandırılması adlı yüksek lisans tezinde SAP2000 bilgisayar programından, çeşitli kitap, tezlerden ve makalelerden faydalanıldı.

Yüksek lisans tez çalışmamı hazırlamamda her türlü bilgi tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Zekeriya AYDIN'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Kaynak temin etmem için her türlü yardımı sağlayan ve çelik yapıda öngerme fikri ile tanışmama vesile olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. A. Zafer ÖZTÜRK'e, tez çalışmamı hazırlamam için bana her türlü hoşgörü ve anlayışı gösteren işverenim değerli hocam Sayın İ.T.Ü. Em. Öğr. Üyesi Dr. Yük. Müh. Akın ERİŞKON'a, ayrıca bu süreç boyunca maddi manevi desteklerini daima hissettiğim beni bugüne getiren aileme teşekkür ederim.

Eylül 2011

Ebru ÇAKIR

SİMGELER DİZİNİ

E = Normal çelik için elastisite modülü

E_z = Germe elemanının elastisite modülü

F_z = Germe elemanının kesit alanı

l_z = Germe elemanının uzunluğu

V = Sisteme verilen öngerme kuvveti

V_{\max} = Germe elemanının emniyet kuvveti

Δl_k = Ankraj elastiklik katsayısı

ΔV_0 = Toplam ani gerilme kaybı

ΔV_k = Ankrajlardaki ve sürtünmeden dolayı meydana gelen kayıp

ΔV_r = İlave gerilme kaybı

ΔV_{sp} = Gergilerin farklı zamanlarda gerilmesinden doğan gerilme kaybı

ΔV_{topl} = Toplam gerilme kaybı

σ = Gergideki karakteristik gerilme

P = Kesitin maruz kaldığı yük değeri

F = Kesitin toplam en kesit alanı

ΔF = Kesit zayıflama miktarı (delik alanı)

F_n = Faydalı en kesit alanı

σ_a = Çeliğin akma gerilmesi

σ_{bem} = Çeliğin basınç emniyet gerilmesi

σ_{cem} = Çeliğin çekme emniyet gerilmesi

σ_d = Çeliğin çekme gerilmesi

$\sigma_{0,01}$ = Yüksek mukavemetli çelik için elastisite sınırı

$\sigma_{0,2}$ = Yüksek mukavemetli çelik için akma sınırı

ϵ_k = Yüksek mukavemetli çelik için kopma uzaması

σ_B = Yüksek mukavemetli çelik için çekme dayanımı

σ_{kopma} = Yüksek mukavemetli çelik için karakteristik kopma dayanımı

σ_{Vr} = Yüksek mukavemetli çelik için sünme sınırı

S_k = Basınca çalışan çubukların burkulma boyları

λ = Narinlik

λ_p = Kritik narinlik

n = Emniyet katsayısı

P_k = Kar yükü

P_{kp} = Kaplama yükü

a = Paralel başlıklı düzlem kafes kirişte iki dikme arası açıklık

h = Paralel başlıklı düzlem kafesin yüksekliği

L = Sistemin toplam açıklığı

F_y = Akma dayanımı

G = Kayma modülü

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL ÇALIŞMALAR	4
2.1. Öngerilme Kavramı ve Tarihçesi	4
2.2. Çelik Yapıda Öngerilmenin Fayda ve Zararları	7
2.3. Öngermenin Çelik Yapıda Uygulanma Biçimleri	8
2.4. Kafes Kirişlerde Öngerme Prensibi	9
2.5. Malzeme	10
2.5.1. Yapı Çeliği.....	10
2.5.2. Yüksek Mukavemetli Çelik (Gergi Malzemesi).....	10
2.5.3. Dökme Demir – Dökme Çelik (Ankraj Malzemesi)	11
2.6. Gerilme Kayıpları	12
2.6.1. Ani Kayıplar	12
2.6.1.1. Ankrajlardaki Kayıplar	12
2.6.1.2. Sürtünme Kayıpları.....	13
2.6.1.3. Germe Metoduna Bağlı Olan Kayıplar.....	13
2.6.2. İlave Kayıplar	14
2.7. Öngerilmeli Çelik Konstrüksiyonların Statik ve Mukavemet Hesapları.....	15
2.7.1. Statik Hesaplar.....	15
2.7.2. Öngerilmeli Kafes Kirişlerin Statik Hesabı.....	15
2.7.3. Öngerilmeli Kafes Kirişler İçin Mukavemet Hesapları.....	16
2.7.3.1. Çekmeye maruz çubukların TS 648'e Göre Boyutlandırılması	16
2.7.3.2. Merkezi basınca maruz çubukların TS 648'e Göre Boyutlandırılması	17
2.8. Öngerilmeli Çelik Kafes Kirişlerde Sehim.....	18
2.9. Konstrüksiyon ve Birleştirme Elemanları	18

2.9.1. Konstrüksiyon Elemanları	18
2.9.2. Birleştirme Elemanları.....	20
2.9.2.1. Ankrajlar	21
2.9.2.2. Kılavuzlama Düzenleri	21
2.10. Öngerilmeli Çelik Konstrüksiyon Örnekleri	21
2.11. Konu İle İlgili Daha Önce Yapılmış Olan Çalışmalar.....	22
2.12. Optimum Tasarım.....	25
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	28
3.1. Optimum Tasarımı Yapılan Sistemin Tanıtılması.....	28
3.2. 40m Açıklıklı Kafes Kiriş	33
3.3. 60m Açıklıklı Kafes Kiriş	41
3.4. 80m Açıklıklı Kafes Kiriş	48
3.5. 100m Açıklıklı Kafes Kiriş	57
3.6. Optimum Takoz Yüksekliğinin Araştırılması	63
4. BULGULAR ve İRDELEME.....	81
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	88
6.KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ	92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Çekme çubuklarında öngerme uygulaması	8
Şekil 2.2 Kafes kirişlerde öngerme uygulanması	9
Şekil 2.3 Basit kafes kirişlerde germe elemanı tertibi	20
Şekil 3.1. Sistem planı ve kesiti.....	28
Şekil 3.2. Kar ve kaplama noktasal yüklemeleri	30
Şekil 3.3. 40 m açıklıklı kafes kiriş	33
Şekil 3.4. 40 m açıklık ve 3 m yükseklikli kafes kiriş.....	33
Şekil 3.5. 40 m açıklık 3 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	34
Şekil 3.6. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş C1 kombinasyonu normal kuvvet diyagramı	35
Şekil 3.7. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş C2 kombinasyonu normal kuvvet diyagramı	35
Şekil 3.8. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş C3 kombinasyonu normal kuvvet diyagramı	35
Şekil 3.9. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kirişin C1 kombinasyonu altında şekil değiştirmiş hali....	36
Şekil 3.10. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kirişin C2 kombinasyonu altında şekil değiştirmiş hali	36
Şekil 3.11. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kirişin C3 kombinasyonu altında şekil değiştirmiş hali	36
Şekil 3.12. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kafes kiriş	36
Şekil 3.13. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	37
Şekil 3.14. 40 m açıklık 5 m yükseklikli kafes kiriş	38
Şekil 3.15. 40 m açıklık 5 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişim	39
Şekil 3.16. 40 m açıklık 6 m yükseklikli kafes kiriş	39
Şekil 3.17. 40 m açıklık 6 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	40
Şekil 3.18. 60 m açıklıklı kafes kiriş	41

Şekil 3.19. 60 m açıklıklı 3m yükseklikli kafes kiriş	41
Şekil 3.20. 60 m açıklık 3 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	43
Şekil 3.21. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş	43
Şekil 3.22. 60 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	45
Şekil 3.23. 60 m açıklıklı 5 m yükseklikli kafes kiriş	45
Şekil 3.24. 60 m açıklık 5 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	46
Şekil 3.25. 60 m açıklıklı 6 m yükseklikli kafes kiriş	47
Şekil 3.26. 60 m açıklık 6 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	48
Şekil 3.27. 80 m açıklıklı kafes kiriş	48
Şekil 3.28. 80 m açıklıklı 5 m yükseklikli kafes kiriş	49
Şekil 3.29. 80 m açıklık 5 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	51
Şekil 3.30. 80 m açıklıklı 6 m yükseklikli kafes kiriş	51
Şekil 3.31. 80 m açıklık 6 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	53
Şekil 3.32. 80 m açıklıklı 7 m yükseklikli kafes kiriş	53
Şekil 3.33. 80 m açıklık 7 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	55
Şekil 3.34. 80 m açıklıklı 8 m yükseklikli kafes kiriş	55
Şekil 3.35. 80 m açıklık 8 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	56
Şekil 3.36. 100 m açıklıklı kafes kiriş	57
Şekil 3.37. 100 m açıklıklı 8 m yükseklikli kafes kiriş	58
Şekil 3.38. 100 m açıklık 8 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	59
Şekil 3.39. 100 m açıklıklı 9 m yükseklikli kafes kiriş	59
Şekil 3.40. 100 m açıklık 9 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	61
Şekil 3.41. 100 m açıklıklı 10 m yükseklikli kafes kiriş	61
Şekil 3.42. 100 m açıklık 10 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi	63
Şekil 3.43. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 200 mm yükseklikli takoz.....	64

Şekil 3.44. 60 m açıklık 4 m yükseklik 200 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	65
Şekil 3.45. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 300 mm yükseklikli takoz.....	65
Şekil 3.46. 60 m açıklık 4 m yükseklikli 300 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	66
Şekil 3.47. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 400 mm yükseklikli takoz.....	67
Şekil 3.48. 60 m açıklık 4 m yükseklik 400 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	68
Şekil 3.49. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 500 mm yükseklikli takoz.....	68
Şekil 3.50. 60 m açıklık 4 m yükseklik 500 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	69
Şekil 3.51. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 1000 mm yükseklikli takoz.....	70
Şekil 3.52. 60 m açıklık 4 m yükseklik 1000 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	71
Şekil 3.53. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 1500 mm yükseklikli takoz.....	71
Şekil 3.54. 60 m açıklık 4 m yükseklikli 1500 mm takozlar ile teşkil edilmiş düzlem kafes kiriş için ağırlık-kazanç oran değişimi	72
Şekil 3.55. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 2000 mm yükseklikli takoz.....	73
Şekil 3.56. 60 m açıklık 4 m yükseklik 2000 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	74
Şekil 3.57. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 2500 mm yükseklikli takoz.....	74
Şekil 3.58. 60 m açıklık 4 m yükseklik 2500 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	75
Şekil 3.59. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 3000 mm yükseklikli takoz.....	76
Şekil 3.60. 60 m açıklık 4 m yükseklik 3000 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	76
Şekil 3.61. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 3500 mm yükseklikli takoz.....	77
Şekil 3.62. 60 m açıklık 4 m yükseklik 3500 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	78
Şekil 3.63. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 4000 mm yükseklikli takoz.....	79

Şekil 3.64. 60 m açıklık 4 m yükseklik 4000 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi	80
Şekil 4.1. 40 m açıklıklı kafes kiriş için ağırlıktaki azalma oranının öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi	82
Şekil 4.2. 60 m açıklıklı kafes kiriş için ağırlıktaki azalma oranının öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi	83
Şekil 4.3. 80 m açıklıklı kafes kiriş için ağırlıktaki azalma oranının öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi	84
Şekil 4.4. 100 m açıklıklı kafes kiriş için ağırlıktaki azalma oranının öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi	85
Şekil 4.5. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kirişte takoz boylarının ağırlıktaki azalma oranına etkisiyle öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi	86
Şekil 4.6. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kirişte takoz yüksekliklerine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranlarının değişimi	87

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Tasarımda kullanılan boru profil kesitleri	31
Tablo 3.2. 40 m açıklık 3 m yükseklikli kafes giriş	34
Tablo 3.3. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kafes giriş	37
Tablo 3.4. 40 m açıklık 5 m yükseklikli kafes giriş	38
Tablo 3.5. 40 m açıklık 6 m yükseklikli kafes giriş	40
Tablo 3.6. 60 m açıklık 3 m yükseklikli kafes giriş	42
Tablo 3.7. 60 m açıklık 4 m yükseklikli kafes giriş	44
Tablo 3.8. 60 m açıklık 5 m yükseklikli kafes giriş	46
Tablo 3.9. 60 m açıklık 6 m yükseklikli kafes giriş	47
Tablo 3.10. 80 m açıklık 5 m yükseklikli kafes giriş	50
Tablo 3.11. 80 m açıklık 6 m yükseklikli kafes giriş	52
Tablo 3.12. 80 m açıklık 7 m yükseklikli kafes giriş	54
Tablo 3.13. 80 m açıklık 8 m yükseklikli kafes giriş	56
Tablo 3.14. 100 m açıklık 8 m yükseklikli kafes giriş	58
Tablo 3.15. 100 m açıklık 9 m yükseklikli kafes giriş	60
Tablo 3.16. 100 m açıklık 10 m yükseklikli kafes giriş	62
Tablo 3.17. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes giriş – 200 mm yükseklikli takoz	64
Tablo 3.18. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes giriş – 300 mm yükseklikli takoz	66
Tablo 3.19. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes giriş – 400 mm yükseklikli takoz	67
Tablo 3.20. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes giriş – 500 mm yükseklikli takoz	69
Tablo 3.21. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes giriş – 1000 mm yükseklikli takoz.....	70
Tablo 3.22. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes giriş – 1500 mm yükseklikli takoz.....	72
Tablo 3.23. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes giriş – 2000 mm yükseklikli takoz.....	73
Tablo 3.24. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes giriş – 2500 mm yükseklikli takoz.....	75

Tablo 3.25. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 3000 mm yükseklikli takoz.....	76
Tablo 3.26. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 3500 mm yükseklikli takoz.....	78
Tablo 3.27. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 4000 mm yükseklikli takoz.....	79

1. GİRİŞ

Öngerilme günümüzde çokça kullanılan ve büyük açıklıklı sistemlerde oldukça fayda sağlayan bir inşaat tekniğidir. İnsanoğlunun dünya üzerindeki varlığı sürdükçe ihtiyaçları sürekli artmıştır. Bu ihtiyaçlar arttıkça birçok alanda gelişim göstermiş ihtiyaçlarını karşılamaya çalışmıştır. Ancak bu ihtiyaçların sürekli artarak devam etmesi, teknolojinin de gelişimini beraberinde getirmektedir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda sürekli gelişim gösteren sektörlerden biri de yapı sektörüdür.

Günümüzde artan ihtiyaçlar ve gelişen teknoloji daha geniş açıklıklı sistemlere ihtiyacı doğurmuştur. Önceleri gerçekleştirilmesi zor olan bu tip geniş açıklıklı yapılar öngerilme tekniği ile kesitlerin taşıma kapasitesi artırılarak yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu gelişime öngerilme tekniği çok büyük katkı ve kolaylık sağlamıştır.

Her ne kadar günümüzde öngerilme tekniği betonun kendine has özellikleri nedeniyle çok daha yaygın kullanılsa ve öngerilme tekniği sadece beton malzemesine uygulanabilecek bir teknik olarak bilinse de öngerilme çelik yapılarda da uygulanabilmektedir.

Çelik yapılar betonarme yapılara birçok üstünlük sağlasa da beraberinde getirdiği yüksek maliyetler nedeniyle ülkemizde yeterince tercih edilmemektedirler. Öngerilme tekniğinin sağlayacağı çelik sarfiyatındaki tasarruf çelik yapı elemanlarının büyük açıklıklarda kullanılmasının önünü açabilir. Ancak betonda öngerimenin sağladığı faydaların gölgesinde kalan çelik yapıda öngerme tekniği yeterince incelenmemiş ve sağlayacağı faydalar konusunda yeterince çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle bu konuyla ilgili çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Dolayısıyla sağlayacağı faydalar veya ortaya çıkaracağı mahzurlar konusunda kesin şeyler söylenememektedir. Bu çalışmada öngerilme tekniğinin sağlayacağı faydaların niceliği konusunda teorik bir çalışma yapılmış, günümüze kadar yapılan çalışmalardan faydalanılarak elde edilecek tasarruflar araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında öngörilmeli düzlem çelik kafes sistemler optimize edilmeye çalışıldı. Çeşitli açıklık ve çeşitli yükseklikteki kafes kirişler ele alındı, bu kafes kirişlere farklı öngerilme kuvvetleri tesir ettirildiğinde elde edilen tasarruflar incelendi.

İncelenen sistem paralel başlıklı düzlem kafestir. Öngerme halatı altta teşkil edildi. Alt başlık, üst başlık, diyagonal ve dikme çubukları ayrı ayrı tek kesit olacak şekilde tasarlandı. Sistem bir kayıcı ve bir sabit mesnet üzerine oturmaktadır. Tez çalışmasına esas olacak sistem ve öngerilme elemanı için bir geometri belirlendi ve çalışmalar bu sistem üzerinde gerçekleştirildi. Alt başlık ve üst başlıkta yer alan çubukların tamamının, düğüm noktalarından, kafes düzleme dik doğrultudaki hareketlerinin tutulduğu kabul edildi.

Bu tez çalışmasının amacı, yukarıda anlatılan yöntem kullanılarak elde edilen öngörilmeli çelik kafes kirişlerin büyük açıklıklı yapılarda ekonomi sağlayıp sağlamadığını araştırmaktır. Çelik yapıda öngerme işleminin kullanılmasına en müsait yapılar olan hal yapıları, uçak hangarları, şed çatılı konstrüksiyonlar ve köprü, viyadük gibi büyük açıklıklara sahip yapılarda bu yöntemin kullanılmasıyla, daha küçük ağırlıklarla bu açıklıkların geçilip geçilemeyeceği incelendi.

Çalışmaya esas 40 m, 60 m, 80 m ve 100 m olmak üzere dört açıklık vardır ve bu açıklıklar 3 m ile 10 m arasında değişen yükseklikler ile tasarlandı. 5 ton ile 140 ton arasında değişen öngerme kuvvetleri sisteme uygulandı, bunlardan elde edilen veriler bir araya toplanıp değerlendirilerek öngörilmeli sistemlerin öngerilmesiz sistemlere göre ne kadar ekonomi sağlandığı incelendi.

Tezin ikinci bölümünde genel olarak öngerilme kavramı ve tarihçesi anlatıldı. Öngerilmenin kafes sistemlerde uygulanma biçimleri, öngerme çeliğinin özellikleri, hesap ve konstrüksiyon esasları ile daha önce bu yöntemin uygulandığı yapılardan örnekler de bu bölümde anlatıldı. Ayrıca bu konuyla ilgili literatürde yer alan teorik çalışmalardan da bu bölümde bahsedildi.

Tezin üçüncü bölümünde tez çalışmasına konu olan öngörilmeli çelik kafes kirişlere öngerilme kuvveti uygulanarak yapılan analizler sonucu elde edilen çalışmalar anlatıldı, tez çalışmasının nasıl bir yol izlediğinden bahsedildi. Hesap yöntemi ve hesaba konu olan yükler belirtildi.

Dördüncü bölümde elde edilen bulgular birbirleriyle karşılaştırıldı ve genel bir durum değerlendirilmesi yapıldı.

Beşinci bölümde ise bu çalışmadan çıkartılan sonuçlar ve bundan sonra benzer konuda yapılacak olan çalışmalar için öneriler sıralandı.

2. KURAMSAL ÇALIŞMALAR

2.1. Öngerilme Kavramı ve Tarihçesi

Öngerilme denince genel olarak bir konstrüksiyona onun taşıma gücünü artıracak ölçüde dağılacak olan ilave gerilmelerin verilmesi akla gelmektedir. Öngermeli betonun öncülerinden E. Freyssinet öngerilmeyi, bir taşıyıcı sisteme ya da elemana, dış yüklerin yüklenmesinden önce veya bu yükleme ile aynı zamanda yapay olarak sürekli iç zorların uygulanması olarak tanımlamaktadır. Bu yapay ve sürekli iç zorlar öyle olmalıdır ki, dış yüklerden ileri gelen iç zorlarla süperpoze edildiklerinde oluşan toplam gerilmeler, her noktada ve göz önüne alınan bütün yükleme durumları için malzemenin dayanabileceği gerilme sınırları içinde kalsınlar. Yani bu tanımdan da anlaşılabilceği gibi malzemenin öngermeye dolaysız bir ilişkisi yoktur, ancak malzeme dayanım sınırlarını belirler (Arda ve Yardımcı 2000).

Öngörme ilkesi dış etkileri karşılayan yapı elemanlarında yahut tüm sistemde meydana gelen kuvvetlerin, gerilme elemanıya sisteme ithal edilmesi esasına dayanır. Dış etkilerle öngerilme kuvvetinin etkisinin süperpozisyonu yapı elemanında ya da belirli bölgelerde azalma gösterir (Herrle 2009).

Tekrar edilecek olursa, bir yapı elemanının hizmet durumunda ekseriyetle maruz kalacağı yükler altında zorlanacak bölgelerinin, önceden yüklenmiş içsel bir kuvvete maruz bırakılması yapı elemanının öngerilmesini tanımlayan bir ifade olacaktır. Böylece kullanma yüklerinin oluşturacağı gerilmeler ile elemandaki iç gerilmeler birbirlerini karşılayacak, bu sayede de kritik bölgeler zorlanmayacaktır. Bu da kullanılmış olan malzemeden daha iyi bir fayda sağlanmasını ve malzemeden tasarruf edilmesini sağlayacaktır.

Öngerilmenin amacı, beton ve çelik yapı elemanları için bazı bakımlardan değişiklik gösterir. Öngermeli betondaki asıl amaç, betonun çekme emniyet gerilmesinin pratikte sıfır olmasından dolayı, kesitte hiç çekme gerilmesi olmayacak şekilde gerilmeleri düzenlemektir (Öztürk 1979). Betonun çekme altındaki mukavemeti, basınç altındaki mukavemetinin 1/10, 1/12'si kadardır (Özden ve ark. 1994). Çekme gerilmeleri betonun içine koyulan çelik elemanlar sayesinde, çelik lifler tarafından karşılanır. Böylece beton ve çelikten oluşan bu

karmaşık cisim, yani “betonarme”, giderek yaygınlaşmıştır. Ancak köprü kirişleri, hal yapılarının kirişleri gibi büyük açıklıklar geçilen durumlarda kesitler büyümekte ve ekonomik olmaktan çıkmaktadır. Böyle durumlarda kirişlerin içsel olarak tersine yüklenmesi ile çok daha büyük yükler taşınmaları sağlanır. Bu özeliğinden ötürü öngerilmeli betonun kullanım alanı hayli genişlemiş, öngerilme işlemi önem kazanmıştır.

Öngerilmenin beton malzemesinin eksikliklerini karşılaması ve çok fayda sağlaması mühendislik alanında öngerilmenin daha çok beton malzemeler için kullanılmasının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Bu da diğer malzemelere uygulanabilir olmasını ya da diğer yapı malzemeleri ve sistemleri üzerinde sağlayacağı etkinin bir bakıma ihmal edilmesine neden olmuştur. Bunda betonun çekme gerilmesinin sıfır olmasının ve çeliğin çekme ve basınç emniyet gerilmelerinin eşit veya birbirine çok yakın olmasının da payı vardır. Ancak ilerleyen teknoloji ve yapılan çalışmalar köprü, viyadük ve hal yapıları gibi büyük açıklıklı kirişlerin olduğu yapı türlerinde çelikte öngerilmenin büyük ekonomi ve kolaylık sağladığını ortaya çıkarmıştır.

Yapılarda öngerme günümüzde çok yaygın bir metot olmasına rağmen birçok durumda betonda başvuru olan bir yöntem olarak sınırlanmış, çelik yapıda öngerme köprülerde veya aşırı yüklenmiş taşıyıcı elemanların güçlendirilmesinde başvuru olan bir yöntem olmuş, yaygınlaşmamıştır (Herrle 2009).

Öngerme fikrinin, çelik çemberlerin ısıtılıp genleştikten sonra ahşap tekerleklere ve fiçılara geçirilip, soğuduktan sonra ahşap parçaları sıkıştırarak bir arada tutulmasına çalışılmasından ortaya çıkmıştır. Çelikte rötne ve sünme gibi öngerme kaybına yol açan değerlerinin tahmin edilmesi güç özelliklerin olmaması, öngerilmenin daha güvenli uygulanmasını sağlayan bir üstünlüktür. Çelikteki öngerilmenin asıl amacı, kesitteki gerilme dağılımını düzenleyerek malzemenin etkinliğini arttırmaktır. Böylece malzeme ve maliyette bir ekonomi sağlanabilmektedir (Arda ve Yardımcı 2000).

Gerek gelişen malzeme ve yapı teknolojileri, gerekse de yapılan araştırmalar sayesinde, çeliğin malzeme olarak üstünlükleri de göz önüne alındığında, çelikte öngerilmenin malzeme ve dolayısıyla maliyette sağlayabildiği görülmüştür.

Çelik yapıda öngerme ile ilgili ilk çalışmayı çelik kirişlerin öngerilmesi ile ilgilenen Dischinger 1935'te yapmıştır. Bu çalışmalardan sonra ise Magnel çelik kafes kirişlerin öngerilmesiyle ilgili bir çalışma gerçekleştirerek çelik kafes kirişlerin hesabı ile ilgili olarak bir metod geliştirmiştir. Magnel bu konuda ilk ciddi çalışmayı yapan bilim adamıdır. Magnel'in çalışmalarına ise daha sonra B. Fritz kafes kirişlerin hesap metodu ile ilgili kabuller ekleyerek Magnel'in metodunu geliştirmiştir (Öztürk 1979).

Dischinger teknik ve ekonomik faydaların yalnızca kompozit elemanlarda elde edilebileceği neticesine varmıştı. Ancak Amerika'da yapılan bir çalışma ile bir eğilme çubuğunun çekme başlığına yerleştirilen germe elemanları ile kesitin taşıma gücünün %34 arttığı görülmüştür. Magnel bu konuda ilk ciddi çalışmayı yapmış, B. Fritz ise onun çalışmalarına ilaveler yaparak metodu geliştirmeyi başarmıştır. Magnel kafes çekme çubuklarında başlık çeliklerinin akma sınırının etki eden yükler halinde aşılmadığını en çok akma sınırına ulaştığını kabul etmiştir. Fritz ise, germe çeliğinde elastikiyet sınırının aşılmadığı kabulünü ekleyerek metodu geliştirmiştir.

Öngerilmeli çelik kafeslerle ilgili bir çalışma da Çin'de yapılmıştır. Öngerilmeli çelik kafeslerde öngerilme kayıplarının konstrüksiyona etkilerini araştıran bu çalışmada genel olarak şunlar belirtilmiştir:

Asılmış kubbe sistemi 2008 Olimpiyat Oyunları için badminton binasının çelik çatısına uyarlanmıştır. Sistem tek kat kafes iskelet, üst kiriş, altta kablo ve dikme çubuklarından meydana gelmiştir. Tasarım çalışmaları boyunca çatı makası ve alttaki konstrüksiyon dahil olmak üzere tüm sistem sabit kabul edilmiş, hesap ve analiz sonlu elemanlar metoduyla yapılmıştır. Projenin önemi göz önünde bulundurulduğunda, tüm sistemdeki gerilmeler, yapım hatâları, öngerilme kayıpları, mimari modelleme ve konstrüksiyon maliyeti, çeşitli yükler altında, ölü yük, hareketli yük, kar yükü, rüzgâr yükü, ısı etkenler ve deprem yükü gibi, değişkenler göz önünde bulundurularak ve iç kuvvetler, şekil değiştirmeler ve kullanma yükleri altındaki durum tüm sistem güvenli tarafta kalacak şekilde hesaplanmış ve ayrıntılı analiz edilmiştir. Tasarım yapılırken sistem konstrüksiyonu ve geçici olarak kalan rijitlik etkisinin karşılığıyla birlikte sıralı eleman aktivasyon yöntemi dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar analiz metodu ve temas analiz teknolojisinin üç boyutlu modeli kablo destek noktaları için öngerilme hesabının modeline uygulanmıştır. Bu çalışmada lineer olmayan yay

sistemi çelik kablonun öngerilme kayıplarına uyarlanmış ve öngerilme kayıplarının tüm sistem üzerindeki etkisi araştırılmıştır (GE Jiaqi ve ark. 2007).

2.2. Çelik Yapıda Öngerilmenin Fayda ve Zararları

Çelik yapıda öngerme işlemi esasen az rastlanır faydalara sahiptir ve bunlar temelde pek de bilinmemektedir. Bu da bu tip bir konstrüksiyonun hesabı ve imalini genelde teorik kalmaya zorlamaktadır. Böyle konstrüksiyonlar diğer ülkelerde nâdir de olsa uygulanmış, ancak ülkemizde henüz uygulamaya geçmemiştir.

Çalışmamıza esas olan öngerme yönteminin, öngerilmeli konstrüksiyonu normal konstrüksiyona üstün kılabilecek birçok özeliği ve üstünlüğü vardır:

1. Çelik sarfiyatının azalması
2. Tek parça elemanların stabilitesinin artırılması
3. Dış ölçüleri büyütmeden mevcut haldeki yapı elemanına takviye olanağı
4. Çelik sarfiyatının azalmasından dolayı toplam konstrüksiyon maliyetinin azalması
5. Sabit yüklerden dolayı doğan sehimin azaltılması sayesinde konstrüksiyonun rölatif rijitliğinin artması
6. Taşıma gücünün artması sayesinde yapılarda büyük açıklıkların uygulanabilmesi
7. Öngerilmemiş çözüme göre daha az çelik sarfiyatına neden olacak küçük yükseklikli yapı elemanlarının kullanılma imkânı

Ancak öngerilme bir takım olumsuzlukları da beraberinde getirir:

1. Montaj için daha fazla zaman ihtiyacı
2. İşçiliğin artması
3. Öngerilme işlemlerinin (halat gerilmesi, öngerilmenin ölçümü vs...) gerekmesi
4. Germe elemanlarının paslanmaya karşı korunması için gerekli ek önlemler
5. Hizmet süresince öngerilmemiş çelik konstrüksiyonlara göre daha sık kontrol edilmesi zorunluluğu
6. Proje, ölçülendirme, uygulama ve montaj esnasında gerekli uzman işçilik (Öztürk 1979).

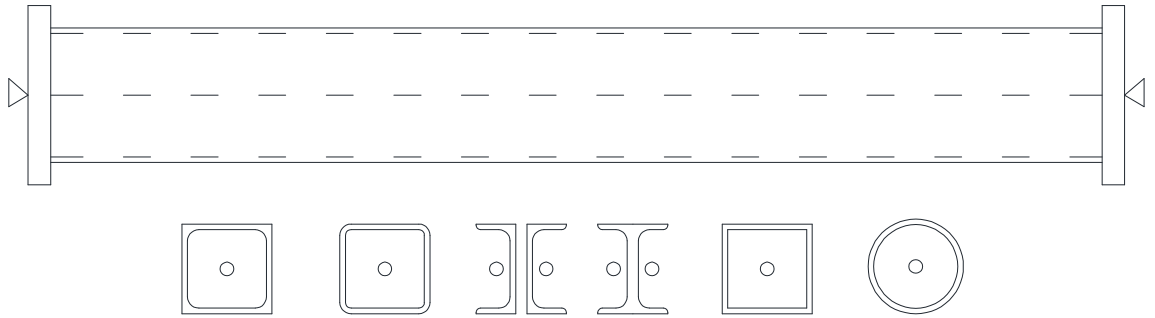
2.3. Öngermenin Çelik Yapıda Uygulanma Biçimleri

Eksenel basınç ve eksantrik basınç (bileşik eğilme) etkisi altındaki çelik yapı elemanlarında ortaya çıkan stabilite problemleri, malzeme dayanımından tam olarak faydalanılamamasına yol açar.

Öngerilmeli betonarme sistemlerde gergi elemanı betonarme yapı elemanına aderansla kaymayacak şekilde sürekli bağlanabilmektedir. Ancak çelik yapıda öngerme elemanı sisteme belirli bazı noktalarda bağlanabilir, bu da eğilme rijitliği olmayan gergi elemanının eğilme rijitliği büyük olan taşıyıcının oluşturdukları sistemin değişik mertebeden hiperstatiklik göstermesine neden olur.

Diğer bir fark öngerilmeli beton elemanlarda ana taşıyıcının şekil değiştirmelerinin öngerme kuvvetine etkisinin ihmal edilmesidir. Ancak daha narin kesitli olan çelik yapı elemanlarında bütün şekil değiştirmeler göz önünde tutulmak zorundadır (Arda ve Yardımcı 2000).

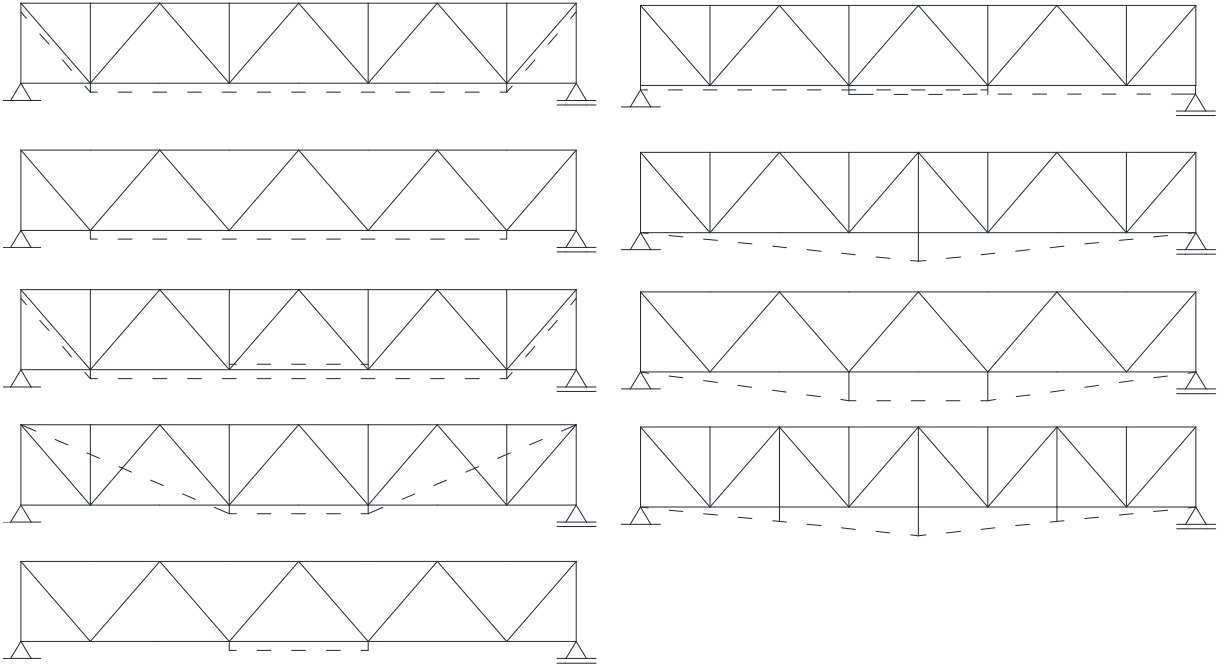
Öngerme işlemi çelik yapıda birçok şekilde uygulanabilir. Çekme çubukları, dış yükmeden önce uygulanan bir öngerme ile burkulmaya yol açmayacak mertebede basınca çalıştırılabilirler. Aşağıda Şekil 2.1’ de çekme çubuklarında öngerilme uygulamasına ilişkin bir örnek görülmektedir.



Şekil 2.1.Çekme çubuklarında öngerme uygulanması (Arda ve Yardımcı 2000)

Sistemde dış yükten dolayı oluşan çekme etkisi, önce bu basınç kuvvetini dengeleyecek daha sonra da çekmeye çalıştırarak aynı çekme kuvvetinin daha küçük bir kesitle taşınmasını sağlayacaktır (Arda ve Yardımcı 2000).

Öngerme sadece dolu gövdeli sistemlerde değil, aynı zamanda kafes gövdeli çelik eğilme çubuklarında yani kafes kirişlerde de faydalı olabilmektedir. Kafes kirişlerde öngerme iki amaçla yapılabilir. Yalnız en çok yük alan çekme çubuklarını hafifletmek için yapılabileceği gibi, kafes kirişin tamamında dış yük momentinin farklı işaretinde bir moment yaratmayı hedefleyerek de yapılabilir. Kafes kirişlerde öngerilmenin uygulanmasına ilişkin 8 farklı örnek Şekil 2.2' de verilmektedir.



Şekil 2.2. Kafes kirişlerde öngerme uygulanması (Öztürk 1979)

2.4. Kafes Kirişlerde Öngerme Prensibi

Çelik yapıya uygulanacak bir öngerilme dış yüklerden dolayı oluşacak olan gerilmeleri karşılayacak şekilde olmalıdır. Bu nedenle de beton için geçerli olan öngerilme prensipleri büyük ölçüde çelik yapıda da uygulanabilir (Herrle 2009).

Çelik kafes kirişler genellikle alt kısımlarından gerilmeye tabi tutulurlar. Yapım esasları çubuklar ve bağlantılar için normal kafes kirişlerdeki gibidir. Ancak öngerme elemanının dönme ve ankraj bölgelerinde özel konstrüktif kurallar geçerlidir.

Gerilme ve öngerme elemanının dönme ve ankraj bölgeleri kafes kirişin düğüm noktalarında kafes kiriş çubuklarının eğilmesini engelleyecek şekilde düzenlenmelidir (Herrle 2009).

Bir elik kafes kirişdeki çubuklar ayrı ayrı ya da birlikte ngerilmeye tabi tutulabilirler. Germe elemanının konumu da çubuklar içersinde istendiği gibi seçilebilir.

2.5. Malzeme

Öngerilmeli elik yapılarda kullanılan malzemelerin özelikleri de hesabı etkilemektedir. Öngerilmeli elik konstrüksiyonlarda kullanılan temel malzemeler řu şekilde sıralanabilir:

- Yapı eliği
- Yüksek mukavemetli elik
- Dökme elik ya da dökme demir (ztrk 1979)

2.5.1. Yapı eliği

elik malzemenin bünyesinde demir dışında %16 - %20 oranında karbon (C) bulunur. Bu miktar arttıkça çeliğin mukavemeti ve sertliği de artar. Bugün yapılarda kullanılan çeliğin kristal bir yapısı vardır. İzotrop ve homojen bir malzemedir (Odabaşı 2000). Öngermeli elik konstrüksiyonlarda normal elik konstrüksiyonlarda kullanılan bütün elik cinsleri kullanılabilir.

ngerme işlemi genellikle ayrı bir germe düzeni kullanılarak gerçekleştirildiği için ana taşıyıcıda kullanılan malzemeye bir şart ya da sınır getirmez. Ancak bazı durumlarda elik kalitesinin de önemi olabilir. Çekme başlığının çekilip öngerme uygulandıktan sonra basınç başlığına kaynaklanan bir basit kirişte hem başlıktaki çeliğin hem de bileşik kesitteki bütün çeliklerin kaynaklanabilir olması gerekmektedir (Arda ve Yardımcı 2000).

2.5.2. Yüksek Mukavemetli elik (Gergi Malzemesi)

elik malzemenin bünyesine krom, nikel, vanadyum, molibden gibi alaşım elemanları katılarak yüksek mukavemetli elik elde edilir (Odabaşı 2000).

Öngerilmeli sistemler için gergi elemanının yüksek mukavemetli olması bir zorunluluktur. Çünkü ngerilme çeliği çok sayıda ve her zaman aynı yönde olmayan etkilere maruz kalır

(Karaesmen 2002). Prensipler olarak ana taşıyıcı sistemde kullanılan normal yapı çeliğinden daha yüksek mukavemete sahip olan germe elemanı çeliğinin mukavemet artışı;

- Alaşımlandırma (karbon, manganez, titanyum, boron, krom, molibden, ...) (sertleştirilebilirlik ve sünekliği artırma)
- Su verme (sertleştirme, akma dayanımını artırma), tavlama (süneklik sağlama)
- Soğukta çekme (sertleştirme, akma dayanımını artırma)

gibi işlemler ile elde edilir. Öngerilmeli çelik sistemlerin projelendirilmesinde ana taşıyıcı ve germe elemanının âni ve sonradan oluşan şekil değiştirmeleri ve germe elemanının gerilme gevşemesi çok önemlidir. Projelendirme yapılırken bu şekil değiştirmeler ve öngerme kayıpları göz önünde bulundurulmalıdır. Zamana bağlı deformasyonlar ve kayıplar özellikle germe çeliği için çok önemlidir.

Öngerme çelikleri yüksek dayanımın yanı sıra yüksek gerilmelerde elastik sınırlar içinde kalabilmeli, dayanım sınırına kadar yeterli sünekliği gösterebilmeli, aderansı iyi olmalı, düşük gevşemeli olmalı, yorulmaya ve korozyona karşı dayanıklı, ekonomik ve kolay ulaşılabilir gibi özelliklere de sahip olmalıdır.

Öngerme çeliği olarak, öngerme teli, öngerme toronu veya öngerme çubuğu kullanılabilir. Öngerilme elemanı olarak kullanılacak teller; çapları 1,5 mm den 7 mm'ye kadar olan, kaplamasız, artık gerilmelerden arındırılmış, orantılılık sınırı yükseltilmiş ve TS 3233 (1979) Çizelge-1 de verilen mekanik özelliklere sahip olacaktır. Öngerilme toronları iki veya daha fazla telin helis şeklinde üst üste sarılmaları ile elde edilen germe donatılarıdır. Öngerme toronları TS 3233 (1979) Çizelge-2 de verilen mekanik özelliklere sahip olacaktır. Öngerme çubukları çapları 7 mm ile 32 mm arasına değişen, tek parçadan oluşan, sıcak çekilmiş, özel alaşımlı TS 3233 (1979) Çizelge-3 de verilen mekanik özelliklere sahip çubuklardır.

2.5.3. Dökme Demir – Dökme Çelik (Ankraj Malzemesi)

Ankraj malzemesi olarak kullanılan çelik, özellikle farklı bir türdedir. Ankraj malzemesi için en çok kullanılan malzemeler, dinamik etkilere de dayanıklı dökme çelik ve yüksek mukavemetli çeliktir.

2.6. Gerilme Kayıpları

Öngerilmeli çelik konstrüksiyona etki ettirilen öngerme kuvveti çeşitli nedenlerle öngerme esnasında, hemen sonra ya da zamanla çeşitli kayıplara uğrar. Meydana gelen bu kayıplar ihmal edilemeyecek ve hesapta ihmal edilemeyecek, mutlaka göz önünde bulundurulması gerekecek kadar büyük değerlere sahiptir. Bu kayıplar genel olarak iki kısımda incelenebilir (Öztürk 1979).

- 1) Ânî kayıplar
- 2) İlave (zamana bağlı) kayıplar

2.6.1. Ânî Kayıplar

Öngerme esnasında ya da hemen sonrasında ortaya çıkan kayıplardır. Ânî kayıplar ankrajlardaki kayıplar, germe metoduna bağlı olan kayıplar ve sürtünmeden ileri gelen kayıplar olarak üç sınıfta toplanabilir.

Öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda meydana gelen toplam ânî kayıp aşağıdaki formülle ifade edilebilir (Öztürk 1979).

$$\Delta V_0 = \Delta V_k + \Delta V_{sp} \quad (1)$$

Burada ΔV_k ankrajlarda meydana gelen ve sürtünmeden dolayı oluşan kayıpları, ΔV_{sp} ise gergilerin farklı zamanlarda gerilmesi nedeniyle ortaya çıkan gerilme kayıplarını ifade etmektedir.

2.6.1.1. Ankrajlardaki Kayıplar

Öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda gergi elemanının ana taşıyıcıya kenetlendiği ve yön değiştirmek için ana elemana yük aktardığı noktalarda kalıcı yerel şekil değiştirmeler oluşur. Gerek ankrajlardaki kayma gerekse de uygulamadaki zorluklar nedeniyle ortaya çıkan bu kayıpların değeri malzeme özellikleriyle ilişkilidir. Bu kaybın hesabına ilişkin amprik bir formül aşağıda belirtilmiştir (Öztürk 1979).

$$\Delta V_k = \Delta l_k \frac{F_z E_z}{l_z} \quad (2)$$

E_z : Germe elemanlarının elastisite modülü

F_z : Germe elemanının kesit alanı

l_z : Germe elemanının uzunluğu

Δl_k : Ankraj elastiklik katsayısı (Somunlu ve dişli ankrajlarda 1 mm, basınç dağıtım plaklı teşkilleri için 2 mm değerinde bir katsayıdır.)

Gergi elemanının kenetlenmeleri esnasında ankrajlarda oluşan kayıplar ve ankrajın elastikiyetinden dolayı meydana gelen gerilme kayıpları da bu tür kayıplara dâhildir. Bu tür kayıplar elemanın boyu ile ters orantılıdır. $l_z=40m$ olan bir germe elemanı için gerilme kaybı pratikte “0”dır (Brodka ve Klabukowski 1969).

2.6.1.2. Sürtünme Kayıpları

Öngerilmeli çelik sistemlerde, germe elemanlarının doğrultularının değiştiği, germe elemanı ile kılavuzlama tertibatı arasındaki noktalarda bir sürtünme oluşur. Öngerme kuvvetinde bir kayba yol açan bu sürtünme problemi, klasik bir kablo sürtünmesi problemi olmakla birlikte mekaniğin genel esaslarından dolayı ortaya çıkarlar (Arda ve Yardımcı 2000).

2.6.1.3. Germe Metoduna Bağlı Olan Kayıplar

Öngerilmeli çelik sistemlerde kullanılan germe elemanı, tek bir gergi ya da birden çok gergi elemanından oluşur. Bu elemanlara aynı anda ya da sırayla hidrolik verenlerle germe işlemi uygulanabilir. Gergilerin farklı zamanlarda gerilmesi, daha çok büyük açıklıklı kafes kirişlerde görülür ve genellikle verenler yardımıyla çok büyük germe kuvvetleri için uygulanır. Tek bir verenle tek bir germe elemanına bu kadar büyük bir yükün uygulanması çok zor olduğundan, daha küçük verenlerle gergi gruplarına kademe kademe öngerme uygulanır (Öztürk 1979). Bu işlem germe kuvvetinin uygulanması açısından daha iyi olmakla birlikte, önceden gerilmiş uç kenetlenmeleri yapılmış gergilerdeki çekme kuvveti, sonradan gerilen aynı bölgedeki gergilerin ana elemanda oluşturdukları kısılma nedeniyle bir gevşeme oluşur ve öngerilme kuvvetinde bir kayba neden olur. Önceden gerilen elemanların sonradan gerilen elemana tesir etmesi sonucu meydana gelen bu kayıp ihmal edilemeyecek kadar büyüktür ve mutlaka hesaba katılmalıdır.

2.6.2. İlave Kayıplar

Sistem öngerildikten sonra zamanla ortaya çıkan kayıplardır. Germe elemanı çeliğinin zamanla sünmesinden ve gevşemesinden dolayı germe kuvvetinde meydana gelen kayıplara ilave kayıplar denir ve kesin olarak hesaplanamazlar.

Gerilmiş bir çekme elemanında ânî elastik uzama sonrası sabit yük altında zamanla oluşan gevşemeye rölaksasyon (gevşeme) denir. Rölaksasyon yapı çeliklerinde 300°-350° C üzerindeki sıcaklıklarda ortaya çıkmasına rağmen, yüksek mukavemetli çeliklerde normal sıcaklıklarda başlayıp, sıcaklık 40°C üzerine çıktığında artış gösterir. Başta hızlı bir artış gösteren bu deformasyon, zamanla yavaşlayıp tamamen ortadan kalkmasa da etkisizleşir. Kesitteki gerilmeler ne kadar büyükse, rölaksasyon da o ölçüde etkindir (Arda ve Yardımcı 2000).

Çelik elemandaki zamana bağlı olan şekil değiştirmeler imalat esnasında kullanılan farklı teknolojik yöntemler, diğer bir deyişle alınacak tedbirlerle azaltılabilir. Kullanılan metotlardan biri, uygulanacak maksimum germe kuvvetinin bir süre aşılmasına müsaade edilerek kuvvet aşımı uygulanmasıdır. Böylece sünmeden dolayı ortaya çıkan kayıp %16'dan %7'ye, gevşemeden ortaya çıkan kayıp %12'den %2'ye düşmektedir. Yapılan araştırmalara göre elde edilen bu sonuçlar %5 ile %7lik bir maksimum kuvvet aşımının kâfi olduğunu göstermekle birlikte çelik türlerine göre değişebilmektedir (Öztürk 1979).

Öngerme çeliklerinin gevşeme özellikleri ve gevşemeden ileri gelen sonuç gerilme kayıpları, yapımcı firmalar tarafından belirtilirler. TS 3233 bu değerlerin şantiyede kontrolünü şart koşturmuştur. Yine TS 3233'e göre öngermeden sonra gergideki karakteristik σ gerilmesinin karakteristik σ_{kopma} dayanımının %70'ini aşmadığı durumlarda, gerilme kaybının öngerme gerilmesinin %8'i, %50'sini aşmadığı durumlarda ise aynı gerilme kaybının öngerme gerilmesinin %6'sı kadar alınabileceğini ve ara değerler için de enterpolasyon yapılabileceğini belirtmektedir.

2.7. Öngerilmeli Çelik Konstrüksiyonların Statik ve Mukavemet Hesapları

2.7.1. Statik Hesaplar

Bir konstrüksiyonun doğal halinin, yüklemenin sisteme ithalinden önceki hali olduğu kabul edilir (Brodka ve ark. 1968). Genel olarak öngerilmeli çelik elemanlar statik hesap açısından gergili normal elemanlar gibidir. Yani kirişin altına yerleştirilmiş bir gergide meydana gelen çekme kuvvetinin yatay bileşeni kirişe basınç olarak etkir ve kiriş, basınç ve eğilmeye çalışan bir çubuk olur (Deren ve ark. 2005).

Öncelikle sistem öngerilmesiz halde dış yükler altında çözülür. Daha sonra sisteme uygulanacak öngerilme kuvveti kayıplar ve diğer faktörlere bağlı olarak hesaplandıktan sonra sisteme uygulanır. Dış yükler sisteme öngerilmenin tatbikinden sonra etki edecek ve sistemde bir kuvvet artışına sebep olacaktır. Bu kuvvet artışı da ya tablolar yardımıyla ya da kuvvet metoduyla hesaplanıp statik hesaba dâhil edilmelidir. Kuvvet metodu sistemin gerilme halinin elastik bölgede olduğunu kabul eder (Öztürk 1979).

2.7.2. Öngerilmeli Kafes Kirişlerin Statik Hesabı

Büyük açıklıklı kafes kirişler öngerilmeli çelik konstrüksiyonların en uygun uygulama alanlarıdır. Buradaki işlemin amacı kafes kirişi oluşturan çubuklardan bir kısmının ya da tamamının gerilmelerinin işaretlerini, dış yüklerden ileri gelen gerilmelerinkinin tersine çevirebilmektir.

Asıl olarak sabit ve kullanma yüklerinden dolayı oluşan gerilmelerin en büyük olduğu bölgede öngerilmeli çelik yapı elemanları esas alınır. Sadece istisnai durumlarda öngerilmenin meydana getirdiği gerilmenin dış yük ile aynı işarete sahip olmasına müsaade edilir (Brodka ve Klabukowski 1969).

Kafes kirişler genellikle germe kuvveti artışının ek bilinmeyen olarak kabul edildiği hiperstatik sistemler olarak incelenir. Sistem önce öngerilme olmadan sadece dış yükler altında çözülmelidir. Kafes kirişlerdeki çubuklar için çelik akma sınırının belli oranda artması halinde aşılmadığı en çok akma sınırına ulaştığı kabul edilerek kontroller yapılmalıdır (Öztürk 1979).

Öngerilmeden sonra çubuklarda oluşan kuvvetlerin değerleri ve işaretleri öngerilme kuvvetinin şiddeti, yeri ve doğrultuları ile de yakından ilişkilidir. Dolayısıyla ana amaç olan malzeme tasarrufu, gergilerin düzenlenmesi ile de yakından ilgilidir (Arda ve Yardımcı 2000).

2.7.3. Öngerilmeli Kafes Kirişler İçin Mukavemet Hesapları

2.7.3.1. Çekmeye maruz çubukların TS 648'e Göre Boyutlandırılması

Çekme emniyet gerilmesi (σ_{cem}) faydalı enkesitte en fazla;

$$\sigma_{\text{cem}} \leq 0,6 \sigma_a \quad (3)$$

olabilir. Ayrıca bu değer çekme dayanımının yarısını aşmamalıdır;

$$\sigma_{\text{cem}} \leq 0,5 \sigma_d \quad (4)$$

Çekme çubuklarında gerilme aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{F_n} \quad (5)$$

Bu bağıntıda F_n faydalı en kesit alanını göstermekte olup aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$F_n = F - \Delta F \quad (6)$$

Yukarıdaki bağıntılarda;

- P : Kesitin maruz kaldığı yük değeri
- σ : Kesitte oluşan gerilme
- F : Kesitin toplam enkesit alanı
- ΔF : Kesit zayıflama miktarı (delik alanı)
- σ_a : Çeliğin akma gerilmesi
- σ_d : Çeliğin çekme gerilmesi

Delikler göz önüne alınarak elde edilen faydalı enkesit alanı hiçbir durumda toplam alanın %85 ini geçemez.

$$F_n \leq 0,85 F \quad (7)$$

2.7.3.2. Merkezi basınca maruz çubukların TS 648'e Göre Boyutlandırılması

Basınca çalışan çubukların kafes kiriş düzlemi içindeki burkulma boylan S_k , çubukların sistem uzunluğuna eşit alınır. Kafes kiriş düzlemi dışındaki burkulma boyunun da çubuk uzunluğuna eşit olabilmesi için, basınç başlığı düğüm noktalarının kiriş düzleminden dışarıya doğru hareketleri önlenmiş olmalıdır.

Eksenel basınca çalışan çubuğun narinliği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\lambda = \frac{S_k}{i} \leq 250 \quad (8)$$

Yukarıdaki bağıntı ile hesaplanan narinlik, kritik narinlik değerinden küçük ($\lambda \leq \lambda_p$) ise; basınç emniyet gerilmesi

$$\sigma_{bem} = \frac{\left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^2 \right] \cdot \sigma_a}{n} \quad (9)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Çubuğun narinliği kritik narinlikten büyük ise ($\lambda > \lambda_p$) basınç emniyet gerilmesi

$$\sigma_{bem} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = \frac{1}{2,5} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = \frac{8290000}{\lambda^2} \quad (10)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Bu formüllerde n emniyet katsayısını göstermekte olup

$$\lambda < 20 \text{ ise } n = 1,67 \quad (11)$$

$$\lambda \leq \lambda_p \text{ ise } n = 1,5 + 1,2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_p} \right) - 0,2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^3 \quad (12)$$

$$\lambda > \lambda_p \text{ ise } n = 2,5 \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır. E elastisite modülünü göstermektedir. λ_p ise kritik narinlik (plasik narinlik) sınırını göstermekte olup,

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_a}} = \frac{6438,4}{\sqrt{\sigma_a}} \quad (14)$$

Bağıntısıyla hesaplanabilir.

2.8. Öngerilmeli Çelik Kafes Kirişlerde Sehım

Basit bir kirişin alt kısmına uygulanan öngerme kuvveti, kirişe negatif bir moment vermesinin yanı sıra, dış yükten dolayı meydana gelecek sehime karşı ters bir sehım de doğurur. Yani öngerilmeli bir kiriş daha narin olmasına rağmen daha rijit bir davranış sergileyerek, normal bir kirişe göre daha az sehım yapar. Bu da öngerilmeli kirişleri daha üstün kılmaktadır (Arda ve Yardımcı 2000).

Oluşan bu sehımlerin hesaplanmasında sistemdeki gergiler, germe elemanlarının ankraj yerlerinde ya da doğrultu değiştirdikleri noktalarda basınç kuvveti şeklinde sisteme etkililip bilinen yöntemlerle hesaplanabilirler. Sabit ya da hareketli yükten doğan sehımler bilinen mukavemet formülleri ile hesaplanırlar. Kirişteki toplam sehım, öngerilmesiz haldeki sadece dış yüklerin etkisine maruz halde sistemdeki sehımlerle, sadece öngerilme kuvvetinin sistemde olduğu düşünülerek hesaplanan sehımın toplamına eşittir (Öztürk 1979).

2.9. Konstrüksiyon ve Birleştirme Elemanları

2.9.1. Konstrüksiyon Elemanları

Öngerilmeli çelik kafes kirişler, tek bir germe elemanı ya da birden fazla germe elemanından oluşmuş germe grupları ile öngerilmeli taşıyıcı konstrüksiyondan meydana gelir. Öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda germe elemanı olarak, tel demetleri, halatlar ya da çubuk elemanlar kullanılabilir. Öngerilmeli çelik kafeslerde normal kafes kirişlerden farklı olarak germe elemanları bulunduğu için projelendirilmeleri normal konstrüksiyonlardan farklı değildir. Çubuk elemanlar ve bağlantı elemanları bilinen yöntemlerle hesaplanarak projelendirilirler.

Ancak kenetlenme noktalarında, doğrultunun değiştiği yerlerde ve kılavuzlanma düzenlerinin olduğu bölgelerde bazı özel önlemler alınmalıdır (Öztürk 1979).

Germe elemanlarının tertibiyle ve sistem üzerindeki etkileriyle ilgili olarak önerilmeli kafes sistemler ikiye ayrılır:

1. Germe elemanının bir çubukta (yakınında) olduğu ve önerilmenin bu çubukta meydana getirildiği sistemler
2. Germe elemanının tüm gerilme uzunluğu boyunca ya da münferit çubukların ayrı ayrı gerilmesi suretiyle uygulandıkları kısım boyunca önerilme işleminin yapıldığı kafes sistemler.

Öngerilme şekillerine göre kafes kirişler řu şekilde özetlenebilir. Öngerilme kuvvetinin en etkin olduğu hal gerginin kiriş dışında uygulandığı durumdur. Bu sistemler statik bakımdan gergili sistemler grubuna dâhildir. Bu tarz sistemlerde önerme, doğrusal ya da kırık çizgi şeklindeki gergilerle tatbik edilebilir. Çok ekonomik sonuçlar doğurmasına rağmen, yapının faydalı hacim yüksekliğini azaltması ve konstrüksiyon boyunu azaltması nedeniyle çok tercih edilmeyen mahzurlu bir önerme şeklidir. Ayrıca bu şekilde önerme uygulanmış sistemlerde kafes düzlemine dik burkulma boyunun çok büyük olması da mahzurlar arasındadır.

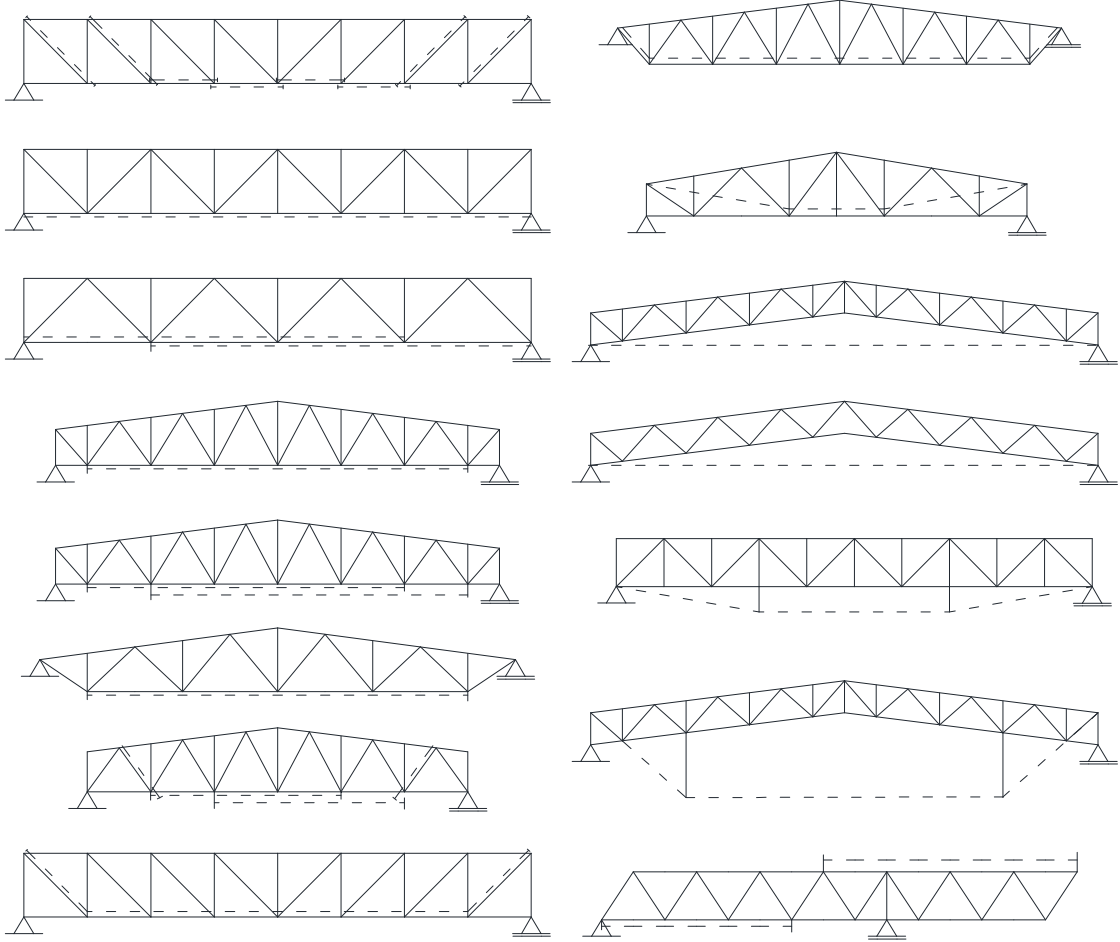
Kırık çizgi şeklindeki germe elemanları çok sayıda kafes kiriş çubuğunun gerilmesini mümkün kılar. Bunun yanında kırık alt başlıklı kafes kirişler montaj ve önerme işlemini açısından kolaylık sağlamaktadır (Öztürk 1979).

Öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda stabilite önemli bir problemdir ve Ancak uygulamada hayli külfetli çözümler gerektirir.

Germe elemanı konstrüksiyonun içine yerleştirilmişse, taşıyıcı konstrüksiyon ve germe elemanının birçok noktada temas ettirilmesi gerekmektedir. Mevcut stabilite problemi bu şekilde çözülebilir. Rijitlik levhaları ve kama şeklindeki mesafe tutucuları gibi kılavuzlama düzenleri ile bu çözüm uygulamaya geçirilebilir.

Germe elemanının konstrüksiyonun dışına yerleştirildiği durumlarda ise; kafes düzlemine dik kılavuzlama düzenleri ile sorunun çözümüne gidilir.

Basit kafes kirişlerde gerilme elemanının tertibine ilişkin 15 farklı uygulama Şekil 2.3' de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Basit kafes kirişlerde germe elemanı tertibi (Öztürk 1979)

2.9.2. Birleştirme Elemanları

Yapı elemanları ya da taşıyıcı sistemlere öngerme verilebilmesi, gergilerin öngörülen noktalarda uygun bir şekilde bağlanıp mesnetlenmesi ile mümkündür. Çünkü öngerilmeli çelik sistemin sağlamlığı, hesapta göz önünde bulundurulan öngerme kuvvetlerinin sistemde sürekli halde bulunmasına bağlıdır. Bundan dolayı en iyi sonucun elde edilebilmesi için sistemde öngerilme kuvvetiyle gerilmiş olan çekme çubuklarının yükten dolayı oluşan çekme kuvvetine denk olmaları sağlanmalıdır. Bu devamlılığı ise sözü geçen ankrajlar, yani kenetlenme elemanları sağlar (Brodka ve Klabukowski 1969).

Ancak verilen karmaşık bağlantı sistemleri ve ankrajların sayısının çokluğu zaman zaman bu tür çözümlerin teorik olarak çok iyi olmasına rağmen ekonomik olmamasına yol açmaktadır (Brodka ve Klabukowski 1969).

Diğer bir yandan gergilerin doğrultu değiştirdikleri noktalarda ya da öngerilme verilmesi sırasında burkulma boyunu azaltmak için kılavuzlanmaları gerekir. Buradan hareketle öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda kullanılan birleştirme elemanları iki grupta incelenir:

- 1) Ankrajlar
- 2) Kılavuzlama düzenleri

2.9.2.1. Ankrajlar

Sistemin sağlamlığı için gerekli olan öngerme kuvvetlerinin sistemde devamlılığı germe elemanı uçlarındaki ankrajlar ile sağlanmaktadır. Sistemin sağlamlığı için ankrajların taşıma gücünün en az germe elemanı taşıma gücüne eşit olması gerekir. Germe kuvvetlerinin sisteme verildiği yerlerdeki olası gerilme yığılmalarının olmaması içinse bu bölgelere rijitlik levhaları yerleştirilmelidir (Öztürk 1979).

Öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda kullanılan ankraj tipleri üçe ayrılır:

- Kamalı ankrajlar
- Vidalı ankrajlar
- Diğer ankraj tipleri

2.9.2.2. Kılavuzlama Düzenleri

Öngerilmeli yapı elemanlarının işleyebilmesi için statik hesapta öngörülen formda uygulanmış olması gerekir. Sistemin güvenliği açısından bu çok önemlidir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, germe elemanının yön değiştirdiği dönme yerlerindeki büyük etkiler nedeniyle meydana gelen enine basıncın değeridir. Enine basıncın artması çekme mukavemetini azaltır (Öztürk 1979).

2.10. Öngerilmeli Çelik Konstrüksiyon Örnekleri

Hesap ve konstrüksiyon esasları incelenen öngerilmeli çelik konstrüksiyonlar birçok ülkede farklı amaç ve yöntemlerle çeşitli yapılarda uygulanmıştır. Yapının cinsi, taşıyıcı

konstrüksiyon ve germe elemanlarının geometrik özelliklerine bağlı olarak farklı malzeme ve maliyet tasarrufları elde edilmiştir. Öngerilmeli çelik konstrüksiyonların uygulamada kullanıldığı yapı türleri aşağıda sıralanmıştır (Öztürk 1979).

- Sanayi binaları
- Uçak hangarları
- Şed çatılı konstrüksiyonlar
- Köprü ve viyadükler

Sanayi binalarının çatı konstrüksiyonları bugüne kadar, öngerilmeli çelik sistemlerin en çok uygulanmış olduğu konstrüksiyon tipidir. Bu tarz uygulamalardan biri Rusya'da yapılan bir hal sanayi binasının 36 m ve 42,8 m açıklıklı 6m aralıklı makaslarıdır. Bu uygulamada her makastaki yük kaplamadan dolayı 3 t_f ve taşıma düzeninden dolayı 75 t_f' dur. Araştırmalar en büyük tasarrufun, germe elemanının konstrüksiyonun alt başlığın altına yerleştirildiğinde elde edildiğini göstermiştir. Aynı makasın öngerilmesiz çözümüne kıyasla malzemede %35,5 ve maliyette %25 tasarrufa ulaşılmıştır (Öztürk 1979).

Öngerilmeli çelik kafes kirişler için hayata geçirilmiş ilk uygulamalardan biri de Belçika'daki bir uçak hangarı için yapılmış olan iki açıklıklı bir kafes kiriştir. Proje İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Magnel'in projesine göre yapılmıştır. Öngerilme uygulaması ile bu konstrüksiyonda malzemede %12, maliyette ise %4' lük bir tasarruf elde edilmiştir (Öztürk 1979).

2.11. Konu İle İlgili Daha Önce Yapılmış Olan Çalışmalar

Öztürk (1979) tarafından yapılan çalışmada çelik yapıda öngermenin tarihçesi, öngerilmenin fayda ve mahzurları, öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda kullanılan malzemelerin özellikleri açıklanmıştır. Öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda hesaplarda büyük önem taşıyan kayıplar geniş bir biçimde anlatılmış, bunun yanı sıra öngerilmeli çelik konstrüksiyonlarda statik ve mukavemet hesapları ve sehim konusu ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Konstrüksiyon ve birleştirme elemanlarından ve hesap yöntemlerinden ayrıntılı bir şekilde bahsedilmiştir. Dünyanın çeşitli yerlerinde yapılmış olan ve öngerilmeli çelik elemanlarla imal edilen yapılarda, bu metodun kullanılması ile ne kadar tasarruf edildiği belirtilmiştir. Çelik yapıda

öngermenin geniş açıklıklarda büyük fayda sağlayabileceği, ancak konu ile ilgili yapılan çalışmaların artırılması gerektiği belirtilmiştir.

Arda ve Yardımcı (2000) tarafından yapılan çalışmada öngerilmeli çelik sistemlerle ilgili sayısal uygulamalar verilmiş ve elde edilebilecek tasarruflardan bahsedilmiştir. Ayrıca öngerme işleminin çelik kafes kirişlerde nasıl uygulanacağı, malzemeler, hesap yöntemleri, gergi ve kılavuz düzenleri hakkında bilgiler verilmiştir. Öngerilmeli çelik kafes sistemler ile ilgili sayısal örnekler ve elde edilen tasarruflar belirtilmiştir. Bu yöntemin çelik yapılar için pek irdelenmemiş olduğunu, ancak yapılacak daha geniş ve kapsamlı çalışmalarla daha fazla bilgi edinilerek çelik yapıda tasarruf elde edilmesini sağlayacak bu yöntemle ilgili görüşün değişmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

GE Jiaqi ve ark. (2007) Çin’ de yapmış oldukları çalışmada öngerilmeli çelik kafeslerde öngerilme kayıplarının konstrüksiyona etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaya 2008 Olimpiyat Oyunları için hazırlanan badminton binasının çelik konstrüksiyon çatısı esas olmuştur. Bu çelik konstrüksiyona asılmış kubbe sistemi uyarlanmıştır. Sistem tek kat kafes iskelet, üst kiriş, altta kablo ve dikme çubuklarından meydana gelmiştir. Dizayn boyunca çatı makası ve alttaki konstrüksiyon dahil olmak üzere tüm sistem sabit kabul edilmiş, hesap ve analiz sonlu elemanlar metoduyla yapılmıştır. Tüm sistemdeki gerilmeler, yapım hataları, öngerilme kayıpları, mimari modelleme ve konstrüksiyon maliyeti, çeşitli yükler altında, ölü yük, hareketli yük, kar yükü, rüzgâr yükü, ısı etkenler ve deprem yükü gibi, değişkenler göz önünde bulundurularak ve iç kuvvetler, şekil değiştirmeler ve kullanma yükleri altındaki durum tüm sistem güvenli tarafta kalacak şekilde hesaplanmış ve ayrıntılı çözümlenmiştir.

Tasarım yapılırken sistem konstrüksiyonu ve geçici olarak kalan rijitlik etkisinin karşılığıyla birlikte sıralı eleman aktivasyon yöntemi dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar analiz metodu ve temas analiz teknolojisinin üç boyutlu modeli kablo destek noktaları için öngerilme hesabının modeline uygulanmıştır. Bu çalışmada doğrusal olmayan yay sistemi çelik kablonun öngerilme kayıplarına uyarlanmış ve öngerilme kayıplarının tüm sistem üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Herrle (2009) yaptığı çalışmada İsviçre Basel’ deki yeni sergi salonunun daha estetik hale getirilmesi için mevcut binanın bir bölümü kaldırılarak yerine yeni bir bölümün getirilmesiyle binada yapılan revizyondan bahsetmiştir. Bu işlem esnasında sistemin öngerilmeli olarak mı,

yoksa öngerilmemiş olarak mı seçileceği ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Çalışmada incelenen iki çelik düzlem kafes sistem ayrı ayrı statik olarak incelenmiş ve uygun konstrüksiyon belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler ve maliyet hesapları sonucunda bu çalışmaya esas olan sistemin öngerilmeli konstrüksiyon olarak yapılması halinde ekonomik açıdan fayda sağlamadığı, ancak daha farklı yapı sistemleri için faydalı olabileceği belirtilmiştir.

Jia ve Liang (2011) yapmış oldukları çalışmada öngerilmeli çelik kiriş, kablo ve kirişin oluşturduğu kompozit bir sistem olarak değerlendirilmiş ve bu iki parça arasındaki etkileşim dikkate alınmıştır. Uygulanan yükler altında çelik kirişteki sehim ve kablodaki gerilme artışının hesaplanması için bir bağıntı geliştirmişlerdir. Hesaplama sonuçlarını doğrulamak için model bir öngerilmeli çelik kiriş kullanılmıştır.

Belletti ve Gasperi (2010) basit mesnetlenmiş öngerilmeli çelik kirişlerin davranışı hakkında bir çalışma yapmışlardır. 35 ila 45 m arasında uzunluğu sahip, orta açıklıklı, öngerilmeli çelik çatı kirişlerini analiz etmişlerdir. Çalışmada öngerilme kuvvetinin miktarı ve öngerilme kablosunun yönlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Doğrusal olmayan analiz yapılmış, malzeme yönünden ve geometrik doğrusal olmama durumu dikkate alınmıştır.

Özçatalbaş ve Özer (2007) tarafından yapılan çalışmada öngerilmeli çelik plak ve çelik T profilinin birleşiminden oluşturulmuş öngerilmeli çelik I kirişlerin mekanik özellikleri ve üretimi araştırılmıştır. Eğilme deneyi sonuçlarında öngerilmeli I kirişlerin eğilme kapasitesinde öngerilme kuvvetine bağlı olarak bir artış olduğu görülmüştür.

Guo ve Shi (2005) tarafından yapılan çalışmada farklı ilkeler ve ölçütlere göre öngerilmeli çelik yapıların sınıflandırılması incelenmiştir. Çalışmada öngerilmeli çelik yapıların pratikteki uygulamasına ilişkin tipik projelere yer verilmiştir.

Ronghe ve Gupta (1999) çelik I kirişlerin analiz ve tasarımı üzerinden çeşitli öngerilme parametreleri ve tendon geometrisi ile ilgili karşılaştırmalı bir analitik çalışma sunmuşlardır. Çeşitli tendon geometrisine sahip kiriş çözümleri ile öngerilmemiş kiriş çözümleri karşılaştırılmıştır. Düzgün geometriye sahip tendon ile öngerilme verilmiş bir kiriş laboratuvar ortamında denendikten sonra güvenli yük taşıma kapasitesi ve maksimum sehimi belirlenmiştir.

2.12. Optimum tasarım

Optimizasyon anlam olarak “en iyileme” demektir. Bir iş farklı şekillerde, farklı yollardan yapılabilir. Problemler çözülürken değişik yöntemler kullanılabilir. Ancak bu işin yapılması ya da problemin çözülmesi onun en iyi şekilde yapılmış olması demek değildir. İşte burada optimizasyon devreye girer.

Optimizasyon, bütün çalışma alanlarında uygulanabilirliğe sahiptir ve mühendislik uygulamasında vazgeçilmez yere sahiptir. Bunun sebebi ise, bir problem için en iyi çözümü aramanın, mühendisliğin temel ve değişmez bir kaidesi olmasıdır.

Mühendislik kapsamında optimum tasarım, fiziksel modellerin matematiksel problemler olarak ifadesine en iyi çözümü belirleme işlemi olarak tanımlanır. Optimizasyon alanı içerisinde, optimizasyon için kullanılan ve kullanılacak tekniklerin çeşitli problemler için çözüm algoritmalarının oluşturulması, bu tekniklerin yapısal olarak irdelenmesi ve bilgisayar ortamında derlenmesi yer almaktadır. Mühendislik optimizasyonunda karşılaşılan yaygın problemler; yapıların statik ve dinamik davranışlarına göre optimum boyutlandırılması, mekanik ve yapısal sistemlerin optimum şekil ve geometrik tasarımı ve güvenilirlik bazında planlanan sistemlerin optimum kontrolü olarak sıralanabilir (Aydın 2006).

Yapı optimizasyonu 1960’lı yıllardan günümüze kadar gelişmekte olan bir araştırma konusudur. Ancak yapıların tasarımlarında optimizasyon teknikleri yeni yeni kullanılmaya başlanmıştır. Bugün varılan nokta, bir yapı optimizasyonu kuramının ortaya çıkmış olması ve elde edilen sonuçların uygulayıcıların hizmetine sunulmasıdır. Bilgisayar kullanımının gelişip etkinleşmesinin yanı sıra çok yeni optimizasyon tekniklerinin de kullanılmaya başlanması, kuramdan uygulamaya geçişi kolaylaştırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Ancak bütün bu gelişmelere rağmen yine de optimum tasarım teknikleri uygulamada etkin bir şekilde kullanılamamaktadır (Aydın 2006).

Yapı mühendisi için, problemini optimum tasarım problemi olarak ifade etmesi yanında, çözümünde kullanacağı tekniğin seçimi de önem taşımaktadır. Genel olarak, yapı mühendisliği tasarımlarında kullanılan optimum tasarım teknikleri üç farklı yaklaşım içinde kategorize edilebilirler. Bunlar: matematik programlama, optimumluk kriteri metodu ve yapay

zekâya dayalı arama metotlardır. Bunların içinde, son yıllarda bilgisayarların da gelişmesine bağlı olarak, yapay zekâya dayalı yöntemlerin popülerliği gittikçe artmaktadır. Özellikle yapay zekâ tekniklerinin kullanımı ile geliştirilen hüristikler yardımıyla, problemin matematiksel bir ifadesinin olup olmamasına bakılmaksızın her türlü problem rahatlıkla bilgisayar ortamında çözülebilmektedir (Aydın 2006).

Herhangi bir optimum tasarım problemi üç nesnenin tanımlanması ile belirir. Bunlar amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılarıdır. Amaç fonksiyonu problemin tipine ve ihtiyaçlara göre kurulur. Tasarım değişkenleri, optimum çözüme ulaşmak için optimizasyon işlemi boyunca değiştirilen sistem parametreleridir. Sınırlayıcılar ise tasarım ve optimizasyon probleminde istenmeyen çözümlerin oluşmasını engellemek amacıyla kullanılırlar. Optimizasyon probleminde en iyi sonuca en kısa zamanda ulaşabilmek açısından, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların belirlenmesi ve tasarım değişkenlerinin seçimi son derece önemlidir.

Literatürde bir çok farklı yapının optimum tasarımına ilişkin 1960'lerden günümüze kadar yayımlanmış pek çok yayın bulunmaktadır. Optimum tasarımın bazı farklı yapı ve yapı elemanlarına uygulanışına örnek vermek için konuyla ilgili birkaç çalışmaya aşağıda değinilmiştir.

Friel (1974) ACI şartnamesine göre maksimum moment sınırlayıcısını dikkate alarak, basit mesnetli betonarme kirişlerde maliyeti minimuma indirecek optimum çelik-beton oranını bulmaya çalışmıştır. Brown (1975) ACI şartnamesine göre eğilme sınırlayıcılarını dikkate alarak, tek doğrultuda çalışan basit mesnetli döşemelerin, maliyetini minimuma indirecek, kalınlıklarının belirlenmesi için bir yöntem sunmuşlardır. Kocer ve Arora (1996) öngerilmeli beton enerji nakil direklerinin maliyet optimizasyonunu yapmışlardır. Simoes ve Negrao (1994) asma köprülerin boyut ve geometri optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Moharrami ve Grierson (1993) betonarme bina taşıyıcı çerçevelerinin optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Saka (1980) çalışmasında kafes sistemlerin şekil optimizasyonunu yapmıştır.

Çelik taşıyıcı sistemler betonarme sistemlere göre belirli üstünlükler sergilerler. Yüksek dayanımları ve hafif olmaları sebebiyle asgari düzeyde deprem yüklerine maruz kalmaları bu üstünlüklerin başında gelir. Çelik malzemenin kullanılması çekme ve basınç akma

mukavemetlerinin eşit olması itibarı ile çekme mukavemeti daha düşük malzemelerle yapılamayan sistemler için iyi bir çözüm yolu olarak düşünülebilir.

Her tür yapıda olduğu gibi çelik yapı sistemlerinin de ekonomik olarak tasarlanması optimizasyon teknikleri ile mümkündür. Böylece en uygun kesitler seçilerek yapı en küçük ağırlıkla tasarlanacak ve çelik yapı sistemlerinin yaygınlaşması sağlanacaktır. Türkiye’de yapı optimizasyonu yöntemleri pek kullanılmamaktadır. Ancak ülkemizin yoğun deprem yükleri etkisinde kalan bir coğrafyada yer aldığı nazara getirilecek olursa çelik yapı sistemlerinin yaygınlaşmasının sağlanmasının çok büyük faydalar sağlayabileceği açıktır.

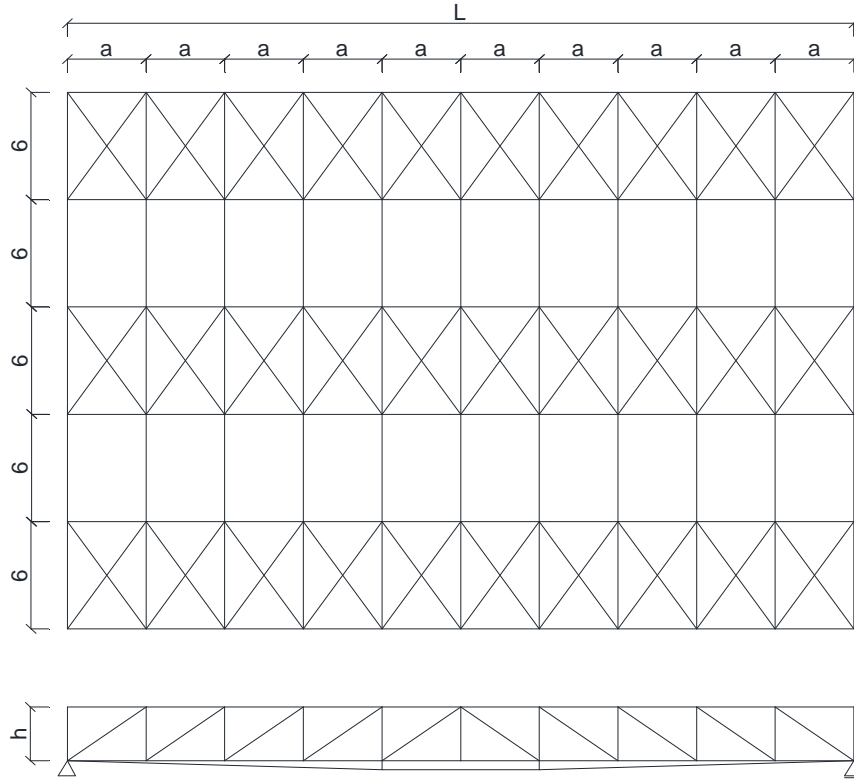
Daha önce de ifade edildiği gibi çelik kafes kirişler için optimum çözüm ağırlığın minimum olması olarak kabul edilebilir. Bu çalışmada önerilmeli çelik kafes kirişler incelendiğinden, önerilmeli çelik kafes kirişler için deneme-yanılıya dayalı bir optimum tasarım gerçekleştirilecektir.

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1. Optimum Tasarımı Yapılan Sistemin Tanıtılması

Bu çalışmada çeşitli açıklıklarda ve çeşitli yüksekliklerdeki, boru profillerden imal edilmiş, düzlem çelik kafes kirişlere önerilme verilerek elde edilecek tasarruflar incelendi. Model bilgisayar ortamına aktarılıp, SAP2000 paket programı aracılığıyla önerilme kuvvetine tabi tutulup sonuçlar grafikler halinde sunuldu.

Bu çalışmada ele alınan sistem, paralel başlıklı ve diyagonal çubuklara sahip bir düzlem kafes kiriş sistemidir. Paralel başlıklı düzlem kafes kirişlerin dikmeler arası mesafeleri toplam açıklığın 1/12' si olarak seçildi. Sistem bir kayıcı ve bir sabit mesnet üzerine oturmaktadır. Sistemde paralel başlıklı düzlem kafes kirişler arası mesafe 6 m olarak seçildi. Seçilen sistemin planı ve kiriş görünüşü aşağıda Şekil 3.1' de verildi. Aşağıdaki şekilde ölçüler m cinsindedir.



Şekil 3.1. Sistem planı ve kesiti

Şekilde;

- a: Paralel başlıklı düzlem kafes kirişte iki dikme arası açıklığı
- h: Paralel başlıklı düzlem kafes kirişin yüksekliğini
- L: Kafes kirişin toplam açıklığını ifade etmektedir.

Sisteme öngerme kuvvetinin aktarılacağı öngerme elemanı alt başlığın altına ve iki uçtaki mesnetlerin arasına yerleştirildi. Öngerme elemanı geometrisini oluşturmak için iki adet takoz kullanıldı. Takozlar orta dikmenin sağındaki ve solundaki dikmelerin altına gelecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.1). Takoz yüksekliği 500 mm olarak seçildi.

Yukarıda tanımlanan sisteme ait 40m, 60m, 80m ve 100 m olmak üzere toplam 4 farklı açıklıktaki düzlem kafes kirişler incelendi. Seçilen bu açıklıklardaki düzlem kafes kirişlerin farklı yüksekliklere göre tasarımı yapıldı. Tasarımda alt başlık ve üst başlıkta yer alan çubukların tamamının, düğüm noktalarından, kafes düzleme dik doğrultudaki hareketlerinin tutulduğu kabul edildi.

Kesitlerin boyutlandırılmasından sonra optimum kesitler ve düzlem kafes kiriş geometrisi deneme yanılma yoluyla tespit edildi. En uygun kesit ve düzlem kafes kiriş geometrisi için ön tespit yapıldıktan sonra düzlem kafes kiriş üzerinde analizlere başlandı.

Kirişler 3 m ile 10 m aralığında 1' er m arttırılarak farklı yüksekliklerde modellendi. Kirişlere minimum 50 kN, maksimum 1400 kN' luk öngerme kuvvetleri kayıplar da hesaplandıktan sonra düzgün aralıklarla 50 kN arttırılarak etkitildi.

Kirişlerin öz (zati) ağırlığı program tarafından hesaplandı, bunun dışında kar ve kaplama olarak iki yük daha tanımlandı. Kar yükü (P_k), TS 498'e uygun olarak 1. derece kar bölgelerindeki değer olan $7,5 \text{ kN/m}^2$ alındı. Modele rüzgâr yükü etkitilmemiş, kaplama yükü olarak da $2,5 \text{ kN/m}^2$ alındı.

Kafes kirişin üst başlığında yer alan düğüm noktalarına etkiyen yükler hesaplanırken aşağıdaki yol izlendi:

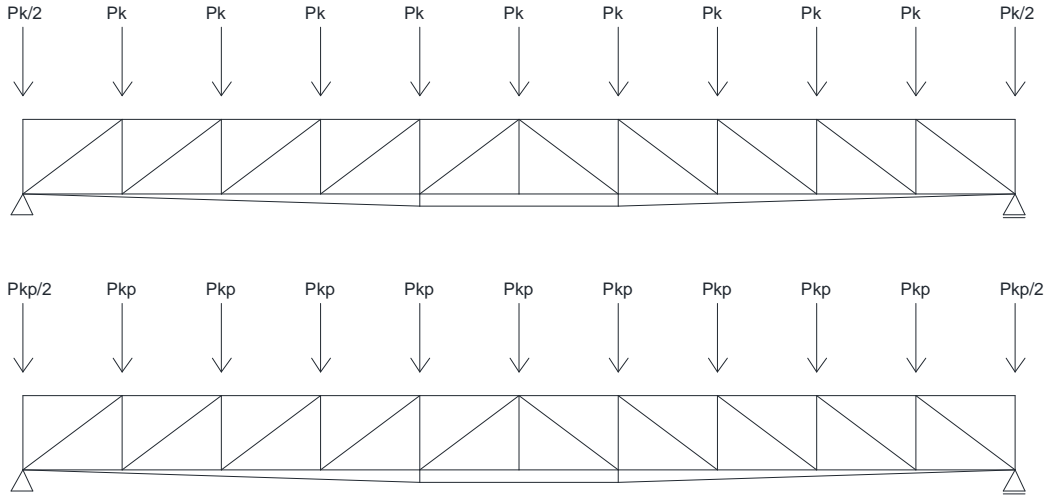
a) Kar yükü:

$$P_k = 7,5 \times 6 \times a$$

b) Kaplama yükü:

$$P_{kp} = 2,5 \times 6 \times a$$

Paralel başlıklı düzlem kafes kirişin en sağ ve en sol düğüm noktalarına elde edilen bu yük değerlerinin yarısı etkitildi. Düzlem kafes kirişin düğüm noktalarında yapılan yüklemeler Şekil 3.2' de belirtildi.



Şekil 3.2. Kar ve kaplama noktasal yüklemeleri

Programda 3 adet farklı yük kombinasyonu aşağıda verildiği şekliyle tanımlandı.

C1 : zati + öngerilme1

C2 : zati + kaplama + öngerilme2

C3 : zati + kaplama + kar + öngerilme2

Yukarıda tanımlanan kombinasyonlarda öngerilme1 ilk öngerme kayıplarından sonraki, öngerilme2 ise ilave (zamana bağlı) kayıplardan sonraki öngerilme kuvvetini ifade etmektedir.

Analiz yapılmadan önce çubuklar, alt başlık, üst başlık, diyagonal ve dikme çubukları olarak dört grupta sınıflandırıldı. Bu gruplar tasarım esnasında yalnızca tek tip kesitler elde edilmesi

amacıyla kullanıldı. Bütün analizlerde SAP2000 menüsünden düzlem kafes seçildi. Tasarımda kullanılan boru profil kesitleri aşağıda Tablo 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1. Tasarımda kullanılan boru profil kesitleri

Dış Çap	Et Kalınlığı	Birim Ağırlık	Kesit Alanı		Dış Çap	Et Kalınlığı	Birim Ağırlık	Kesit Alanı
D mm	t mm	M kgf/m	A mm ²		D mm	t mm	M kgf/m	A mm ²
42,4	4	3,79	483		168,3	8	31,6	4030
48,3	4	4,37	557		177,8	4	17,1	2180
48,3	5	5,34	680		177,8	5	21,3	2710
60,3	4	5,55	707		177,8	6	25,4	3240
60,3	5	6,82	869		177,8	6,3	26,6	3390
76,1	4	7,11	906		177,8	8	33,5	4270
76,1	5	8,77	1120		219,1	4	21,2	2700
88,9	4	8,38	1070		219,1	5	26,4	3360
88,9	5	10,3	1320		219,1	6	31,5	4020
88,9	6	12,3	1560		219,1	6,3	33,1	4210
88,9	6,3	12,8	1630		219,1	8	41,6	5310
101,6	4	9,63	1230		219,1	10	51,6	6570
101,6	5	11,9	1520		244,5	5	29,5	3760
101,6	6	14,1	1800		244,5	6	35,3	4500
101,6	6,3	14,8	1890		244,5	6,3	37	4710
114,3	4	10,9	1390		244,5	8	46,7	5940
114,3	5	13,5	1720		244,5	10	57,8	7370
114,3	6	16	2040		273	5	33	4210
114,3	6,3	16,8	2140		273	6	39,5	5030
114,3	8	21	2670		273	6,3	41,4	5280
139,7	4	13,4	1710		273	8	52,3	6660
139,7	5	16,6	2120		273	10	64,9	8260
139,7	6	19,8	2520		273	12	77,2	9840
139,7	6,3	20,7	2640		323,9	5	39,3	5010
139,7	8	26	3310		323,9	6	47	5990
168,3	4	16,2	2060		323,9	6,3	49,3	6290
168,3	5	20,1	2570		323,9	8	62,3	7940
168,3	6	24	3060		323,9	10	77,4	9860
168,3	6,3	25,2	3210		323,9	12	92,3	11800

Analizler yapılırken aşağıdaki aşamalar izlendi:

- Aşama 1: İlk önce sistem öngerilmesiz olarak kendi ağırlığı altında çözüldü ve tasarımı yapıldı.

- Aşama 2: Sistemde sadece öngerilme kuvvetinin olduğu durum incelendi. Öngerme kuvveti sisteme tesir ettirilirken ani kayıplar da hesaba katıldı ve uygulanan öngerme kuvvetinden çıkarılarak elde edilen kuvvet sisteme etkitildi.
- Aşama 3: Sistem hem dış yükler, hem de öngerilme kuvvetinin ortak etkisi altında incelenerek analiz edildi. Bu aşamada ise uygulanan öngerilme kuvveti hem ânî kayıplar hem de ilave kayıplar hesaba katılarak sisteme tesir ettirildi, elde edilen öngerilme kuvveti altında sistemin tasarımı yapıldı.

Yapılan hesaplarda ânî kayıplar %5 olarak alındı. Yapılan araştırmalara göre öngerme kuvvetinin %5'i ile %7'si arasında bir değer alan ilave kayıplar da %5 olarak alındı, hesaplarda kullanılan ve modele etkileyen öngerme kuvveti bu kayıplar öngerme kuvvetinden çıkarılarak elde edildi.

Çözümlenen düzlem kafes kirişin önce öngerme kuvveti olmaksızın kendi ağırlığı altında hesabı yapılarak zati ağırlığı elde edildi. Daha sonra bahsi geçen düzlem kafes kiriş üç farklı yük kombinasyonu altında öngerme kuvvetleri de hesaba katılarak çözümlendi, elde edilen tasarruf ve çeşitli yük değerleri altındaki davranışı tespit edildi. Bu bulgular ışığında elde edilen değerler her açıklık ve her yükseklik için ayrı ayrı grafik ve tablo olarak sunuldu.

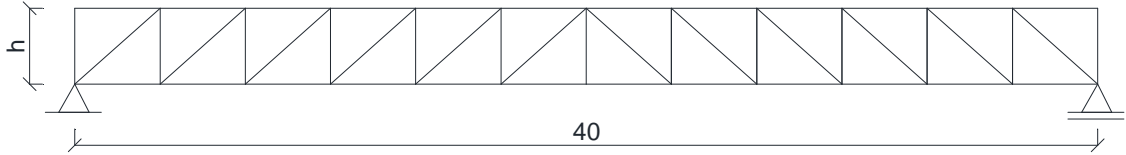
Sistem, yükseklik ve açıklıklar için çözümlendikten sonra, öngerme elemanının mesnetlendiği takoz yüksekliği ve konumu ile ilgili çözümlenmeler yapıldı. 200 mm ila 700 mm arasında 100'er mm aralıklarla artan takoz yüksekliklerinin elde edilen tasarruflara katkısı incelendi.

Seçilen malzemeye ilişkin mekanik özellikler aşağıda görülmektedir:

- Akma dayanımı : 238000 kN/m²
- Çekme dayanımı : 337000 kN/m²
- Birim ağırlık: 0,785 kN/m³
- Elastisite modülü : 211081000 kN/m²

3.2. 40m Açıklıklı Kafes Kiriş

Aşağıda Şekil 3.3' te 40 m açıklık için seçilen düzlem kafes kirişin geometrisi görülmektedir. Bu kafes kirişin 3m, 4m, 5m ve 6m yükseklikler için optimum tasarımı gerçekleştirildi. Aşağıdaki şekilde boyutlar m olarak verildi.



Şekil 3.3. 40 m açıklıklı kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş için dikmeler arası mesafe (a) 3,33 m'dir. $a = 3,33$ m' ye bağlı olarak düğüm noktalarına etkiyen yükler aşağıdaki gibi hesaplandı.

a) Kar yükü:

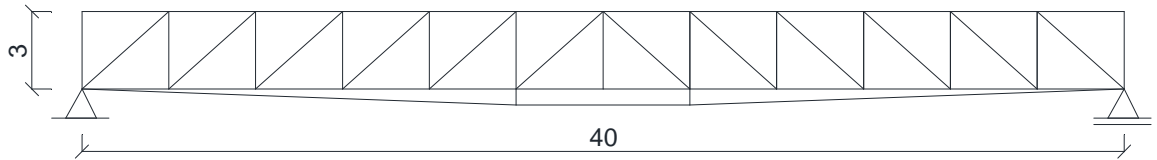
$$P_k = (7,5 \times 6 \times 3,33) \text{ kN}; P_k = 15 \text{ kN}; P_{k/2} = 7,5 \text{ kN}$$

b) Kaplama yükü:

$$P_{kp} = (2,5 \times 6 \times 3,33) \text{ kN}; P_{kp} = 5 \text{ kN}; P_{kp/2} = 2,5 \text{ kN}$$

• 3 m Yükseklikli Kafes Kiriş

Aşağıda Şekil 3.4' de 40 m açıklık ve 3m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde boyutlar m olarak verildi.



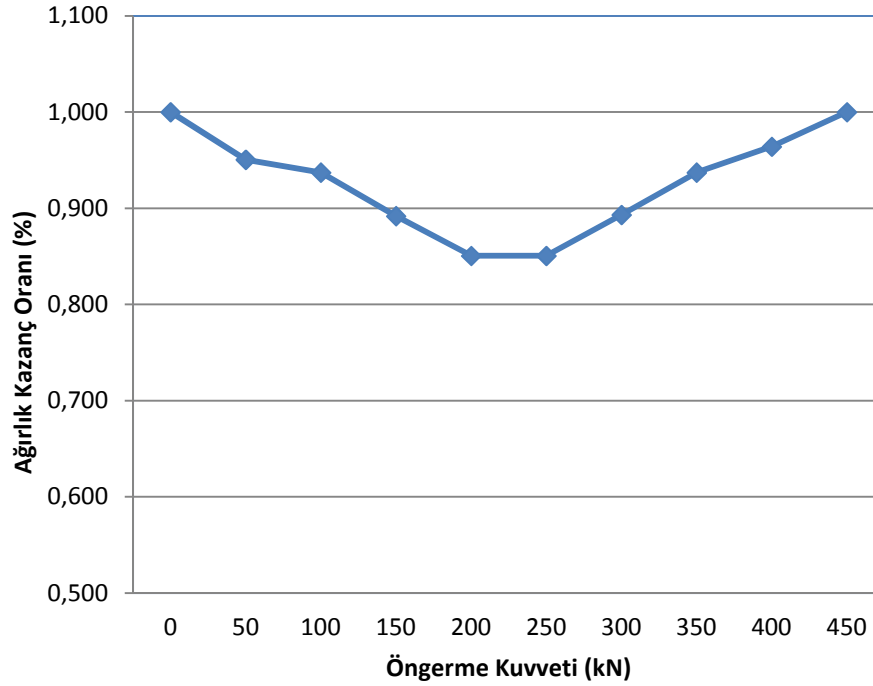
Şekil 3.4. 40 m açıklık ve 3 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50' şer kN' luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 450 kN' luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.2' de verildi.

Tablo 3.2. 40 m açıklık 3 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	3760	3760	2060	869	34,97	1,00
50	3760	3210	2060	869	33,24	0,95
100	3760	3060	2060	869	32,77	0,94
150	3760	2520	2060	906	31,19	0,89
200	3760	2060	2060	906	29,74	0,85
250	3760	2060	2060	906	29,74	0,85
300	3760	2570	2060	869	31,23	0,89
350	3760	3060	2060	869	32,77	0,94
400	3760	3360	2060	869	33,71	0,96
450	3760	3760	2060	869	34,97	1,00

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimi Şekil 3.5’de verilmektedir.

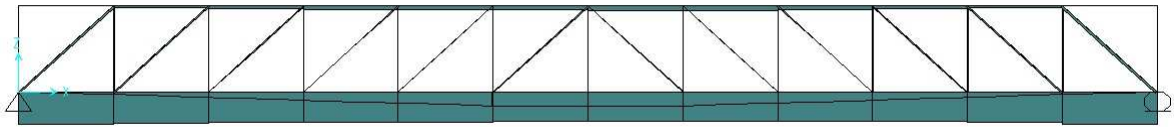


Şekil 3.5. 40 m açıklık 3 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

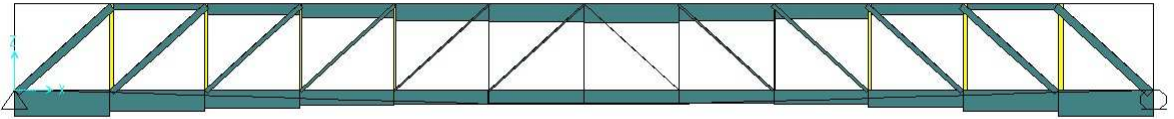
Şekil 3.5' den de görüleceği üzere 40 m açıklık ve 3 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %15 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 200 kN' luk kuvvettir.

Analiz yapılan ilk kafes sisteme ait normal kuvvet diyagramları ve sistemin şekil değiştirmiş halleri aşağıdaki şekillerde verildi. Bundan sonraki analizlerde sadece tasarım sonuçlarına ait tablo ve grafikler verilecektir.

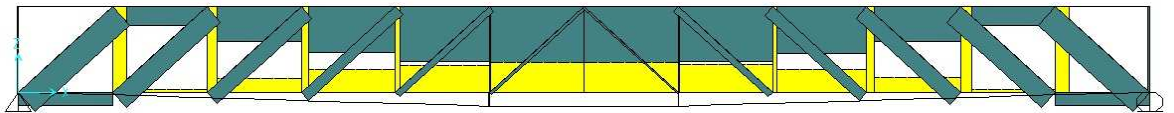
Aşağıda Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 'de, sırasıyla C1, C2 ve C3 kombinasyonlarına ait normal kuvvet diyagramları, Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 'de de yine sırasıyla C1, C2 ve C3 kombinasyonlarına ait sistemin şekil değiştirmiş halleri verilmektedir.



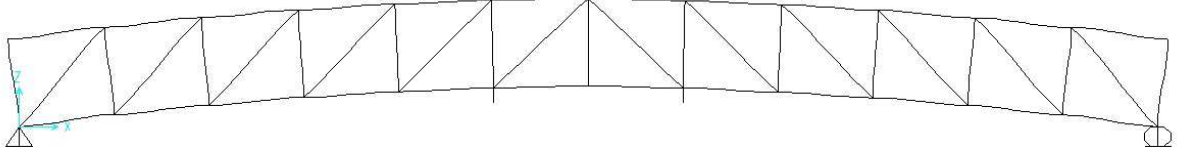
Şekil 3. 6. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş C1 kombinasyonu normal kuvvet diyagramı



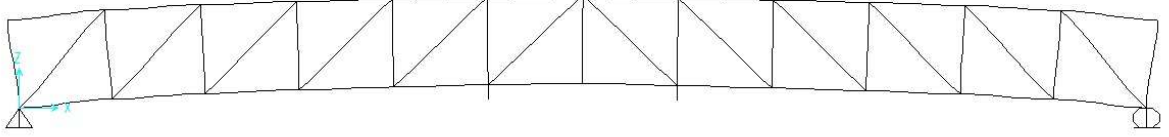
Şekil 3.7. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş C2 kombinasyonu normal kuvvet diyagramı



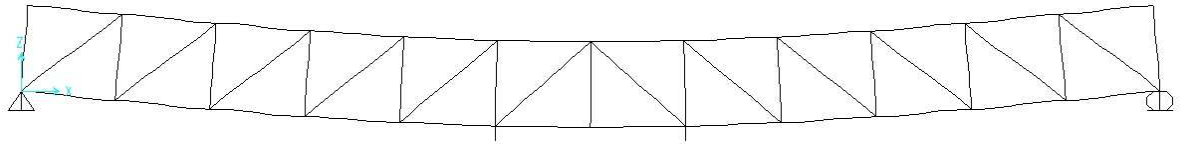
Şekil 3.8. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş C3 kombinasyonu normal kuvvet diyagramı



Şekil 3.9. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kirişin C1 kombinasyonu altında şekil değiştirmiş hali



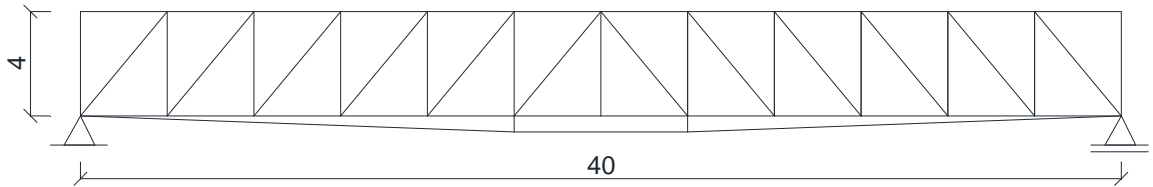
Şekil 3.10.40 m açıklık 4 m yükseklikli kirişin C2 kombinasyonu altında şekil değiştirmiş hali



Şekil 3.11.40 m açıklık 4 m yükseklikli kirişin C3 kombinasyonu altında şekil değiştirmiş hali

- **4 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.12' de 40 m açıklık ve 4m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir.



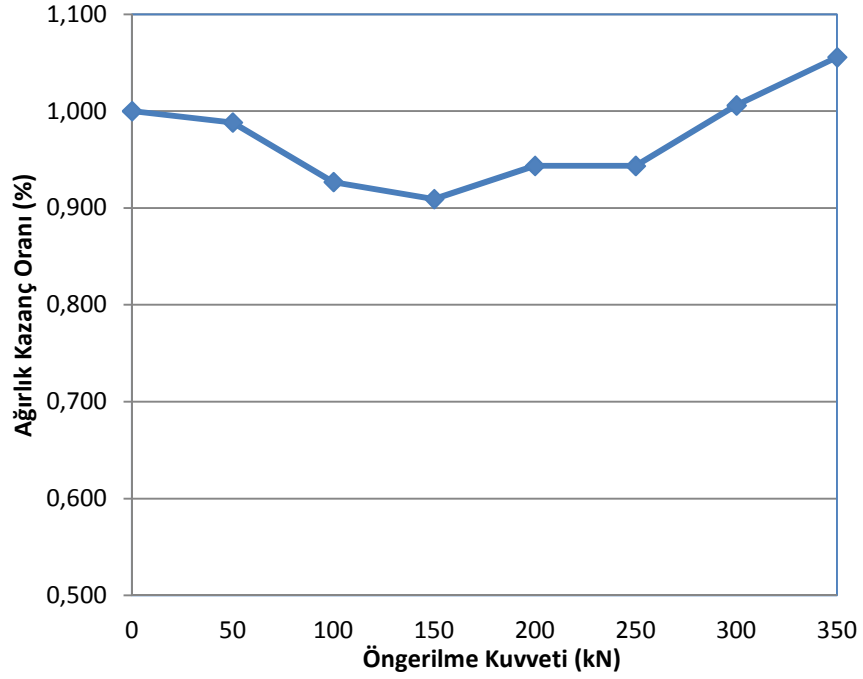
Şekil 3.12. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50' şer kN' luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 350 kN' luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.3' de verildi.

Tablo 3.3. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	3210	2640	2060	906	32,18	1,00
50	3210	2520	2060	906	31,80	0,99
100	3210	1890	2060	906	29,82	0,93
150	3210	1710	2060	906	29,26	0,91
200	3210	2060	2060	906	30,36	0,94
250	3210	2060	2060	906	30,36	0,94
300	3210	2700	2060	906	32,37	1,01
350	3210	3210	2060	906	33,97	1,06

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.13' de verilmektedir.

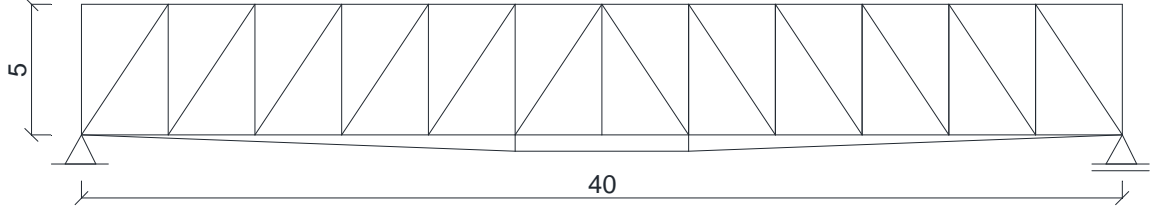


Şekil 3.13. 40 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.13' den de görüleceği üzere 40 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %10 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için 150 kN en uygun öngerme kuvvetidir.

- **5 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.14’ de 40 m açıklık ve 5m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir.



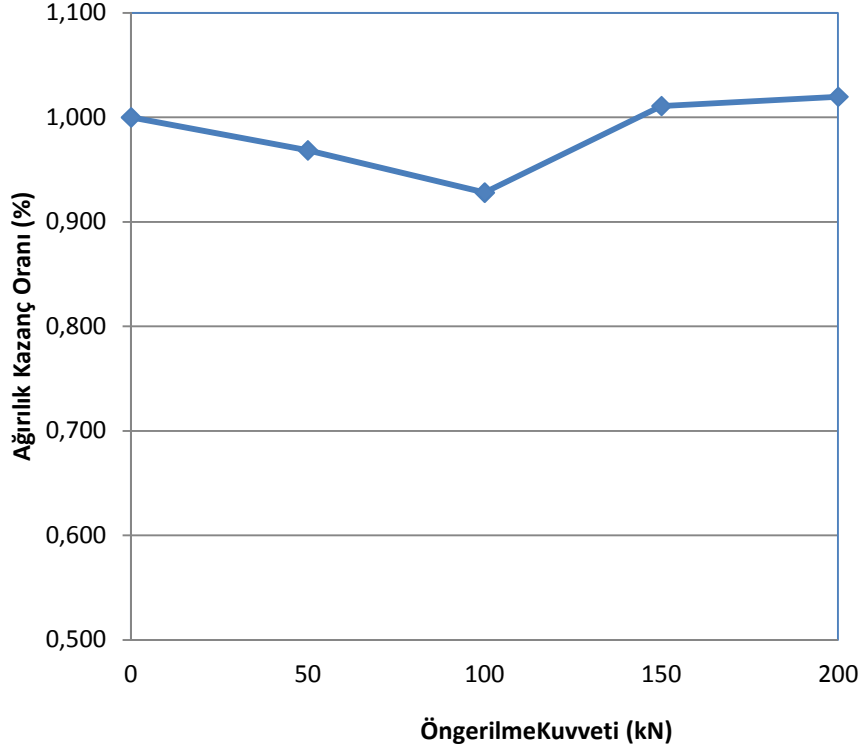
Şekil 3.14. 40 m açıklık 5 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50’şer kN’ luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 200 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.4’de verildi.

Tablo 3.4. 40 m açıklık 5 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	3210	2640	2060	906	32,18	1,00
50	3210	2520	2060	906	31,80	0,99
100	3210	1890	2060	906	29,82	0,93
150	3210	1710	2060	906	29,26	0,91
200	3210	2060	2060	906	30,36	0,94
250	3210	2060	2060	906	30,36	0,94
300	3210	2700	2060	906	32,37	1,01
350	3210	3210	2060	906	33,97	1,06

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.15’de verilmektedir.

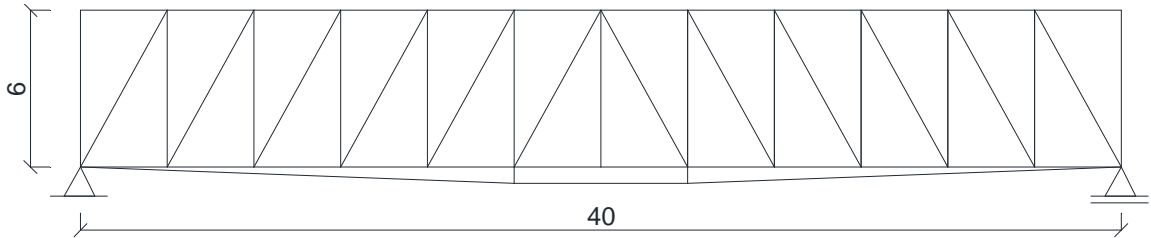


Şekil 3.15. 40 m açıklık 5 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.15'den de görüleceği üzere 40 m açıklık ve 5 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %8 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için 100 kN en uygun öngerme kuvvetidir.

- **6 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.16'da 40 m açıklık ve 6 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir.



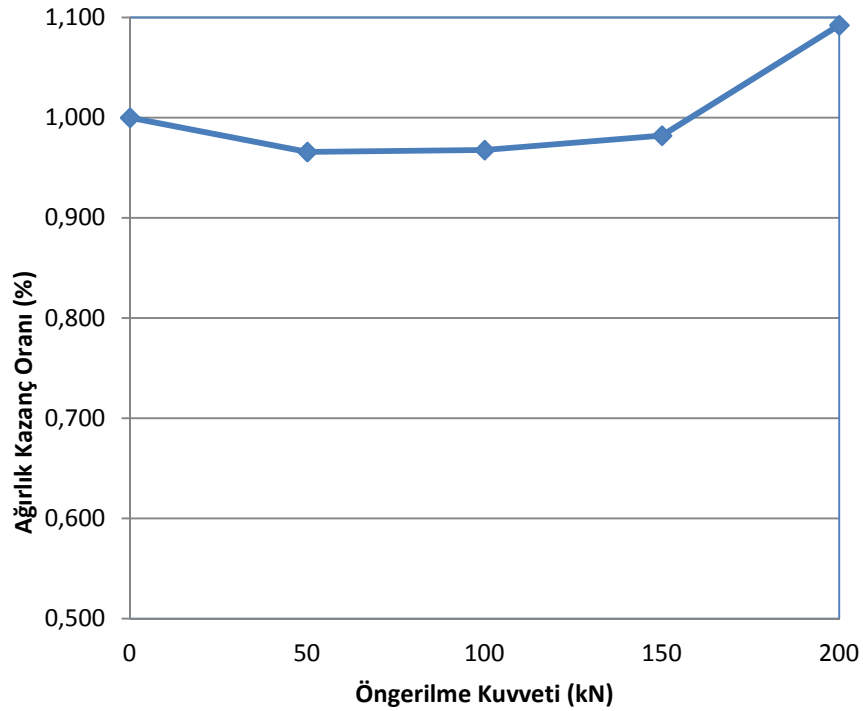
Şekil 3.16. 40 m açıklık 6 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN' luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 200 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.5' de verildi.

Tablo 3.5. 40 m açıklık 6 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	2180	1800	2570	1230	36,64	1
50	2060	1520	2570	1230	35,38	0,966
100	2060	1230	2570	1390	35,45	0,968
150	2060	1710	2570	1230	35,98	0,982
200	2060	2060	2570	1710	40,01	1,092

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.17' de verilmektedir.



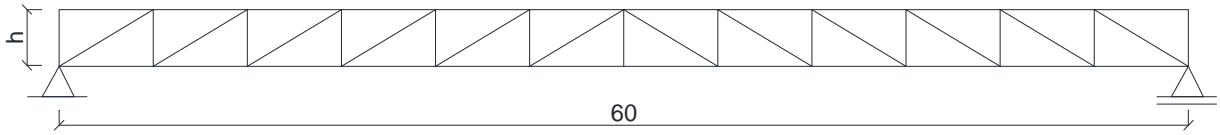
Şekil 3.17. 40 m açıklık 6 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.17'den de görüleceği üzere 40 m açıklık ve 6 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %4 kadar tasarruf sağlanmaktadır.

Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için 50 kN en uygun öngerme kuvvetidir.

3.3. 60m Açıklıklı Kafes Kiriş

Aşağıda Şekil 3.18’de 60 m açıklık için seçilen düzlem kafes kirişin geometrisi görülmektedir. Bu kafes kirişin 3m, 4m, 5m ve 6m yükseklikler için optimum tasarımı gerçekleştirildi.



Şekil 3.18. 60 m açıklıklı kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş için dikmeler arası mesafe (a) 3,33 m’dir. $a = 3,33$ m değerine bağlı olarak düğüm noktalarına etkiyen yükler aşağıdaki gibi hesaplandı.

a) Kar yükü:

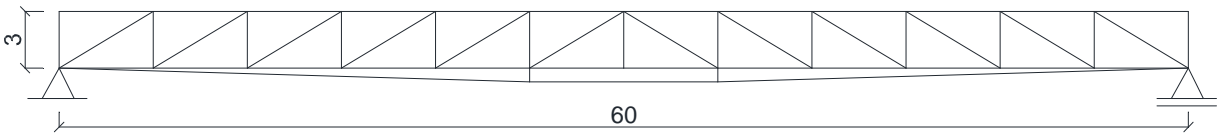
$$P_k = (7,5 \times 6 \times 5) \text{ kN}; P_k = 22,5 \text{ kN}; P_{k/2} = 11,25 \text{ kN}$$

b) Kaplama yükü:

$$P_{kp} = (2,5 \times 6 \times 5) \text{ kN}; P_{kp} = 7,5 \text{ kN}; P_{kp/2} = 3,75 \text{ kN}$$

• 3 m Yükseklikli Kafes Kiriş

Aşağıda Şekil 3.19’ da 60 m açıklık ve 3m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



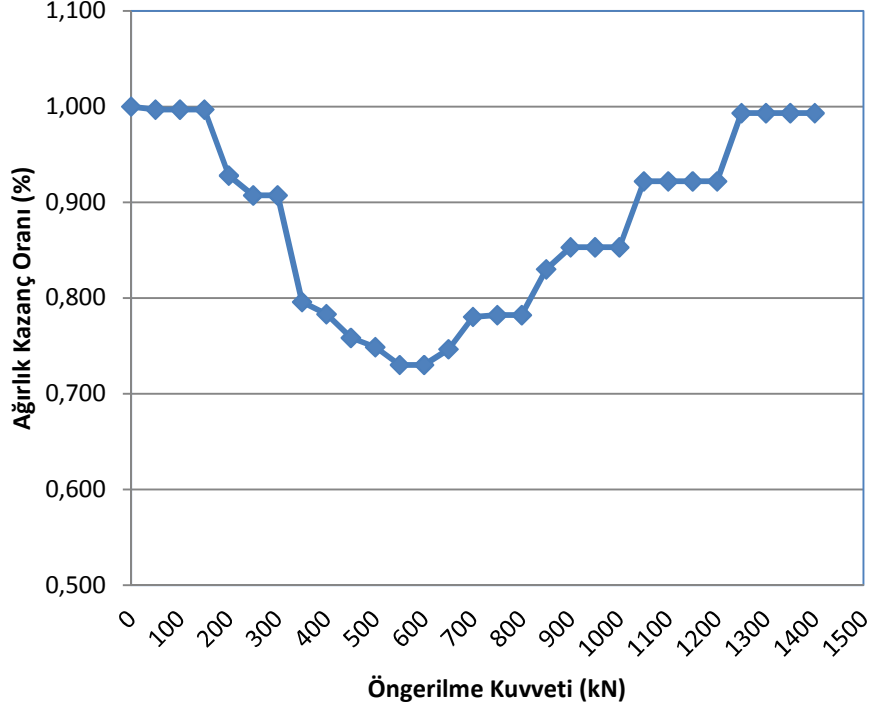
Şekil 3.19. 60 m açıklıklı 3m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 1400 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.6'da verildi.

Tablo 3.6. 60 m açıklık 3 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	11800	9840	4210	1520	129,70	1,00
50	11800	9840	4210	1390	129,30	0,997
100	11800	9840	4210	1390	129,30	0,997
150	11800	9840	4210	1390	129,30	0,997
200	11800	7940	4210	1390	120,35	0,928
250	11800	7370	4210	1390	117,67	0,91
300	11800	7370	4210	1390	117,67	0,91
350	9860	6290	4210	1320	103,23	0,80
400	9860	5940	4210	1320	101,58	0,78
450	9840	5280	4210	1320	98,38	0,76
500	9840	5010	4210	1320	97,11	0,75
550	9840	4500	4210	1320	94,70	0,73
600	9840	4500	4210	1320	94,70	0,73
650	9840	5010	4210	1230	96,83	0,75
700	9840	5940	4210	1230	101,21	0,78
750	9840	5990	4210	1230	101,45	0,78
800	9840	5990	4210	1230	101,45	0,78
850	9840	7310	4210	1230	107,66	0,83
900	9840	7940	4210	1230	110,63	0,85
950	9840	7940	4210	1230	110,63	0,85
1000	9840	7940	4210	1230	110,63	0,85
1050	9840	9840	4210	1230	119,58	0,92
1100	9840	9840	4210	1230	119,58	0,92
1150	9840	9840	4210	1230	119,58	0,92
1200	9840	9840	4210	1230	119,58	0,92
1250	9840	11800	4210	1230	128,81	0,99
1300	9840	11800	4210	1230	128,81	0,99
1350	9840	11800	4210	1230	128,81	0,99
1400	9840	11800	4210	1230	128,81	0,99

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.20'de verilmektedir.

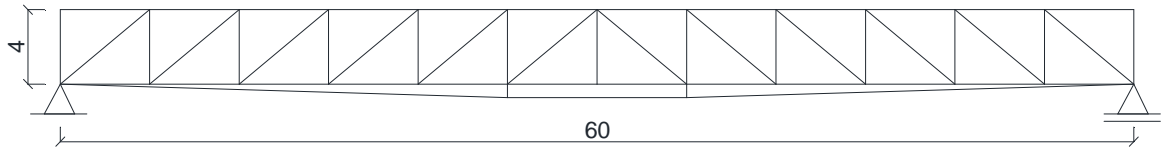


Şekil 3.20. 60 m açıklık 3 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.20'den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 3 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %27 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için 600 kN en uygun öngerme kuvvetidir.

- **4 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.21'de 60 m açıklık ve 4m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



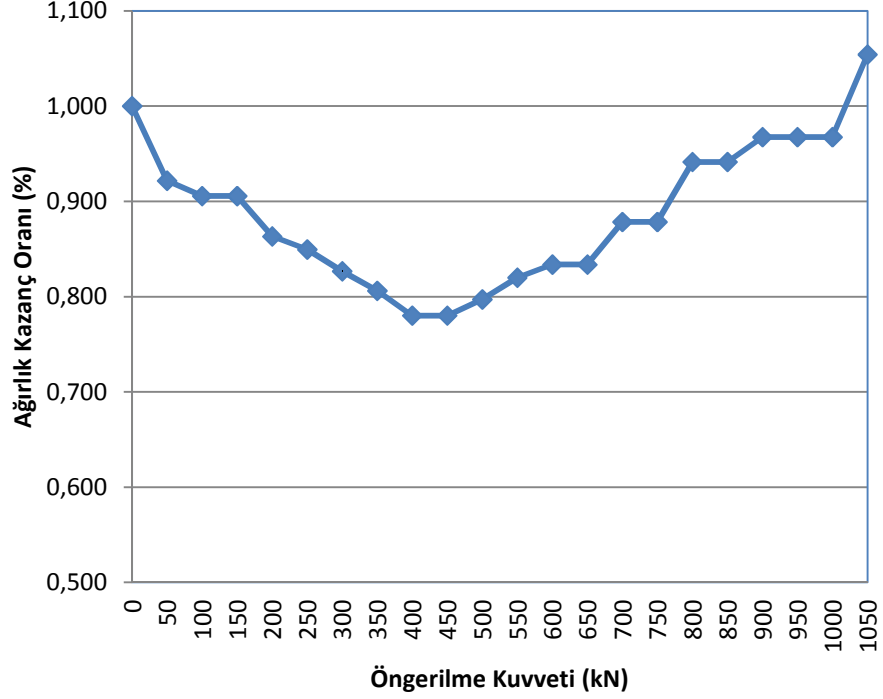
Şekil 3.21. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN' luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 1050 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.7'de verildi.

Tablo 3.7. 60 m açıklık 4 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	7940	7370	4210	1390	103,17	1
50	7940	6290	3760	1320	95,08	0,922
100	7940	5940	3760	1320	93,43	0,906
150	7940	5940	3760	1320	93,43	0,906
200	7940	5010	3760	1320	89,05	0,863
250	7940	4710	3760	1320	87,64	0,85
300	7940	4210	3760	1320	85,28	0,83
350	7940	3760	3760	1320	83,16	0,81
400	7370	3760	3760	1320	80,48	0,78
450	7370	3760	3760	1320	80,48	0,78
500	7370	4210	3760	1230	82,23	0,80
550	7370	4710	3760	1230	84,59	0,82
600	7370	5010	3760	1230	86,00	0,83
650	7370	5010	3760	1230	86,00	0,83
700	7370	5990	3760	1230	90,61	0,88
750	7370	5990	3760	1230	90,61	0,88
800	7370	7370	3760	1230	97,11	0,94
850	7370	7370	3760	1230	97,11	0,94
900	7370	7940	3760	1230	99,80	0,97
950	7370	7940	3760	1230	99,80	0,97
1000	7370	7940	3760	1230	99,80	0,97
1050	7370	9840	3760	1230	108,75	1,05

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.22'de verilmektedir.

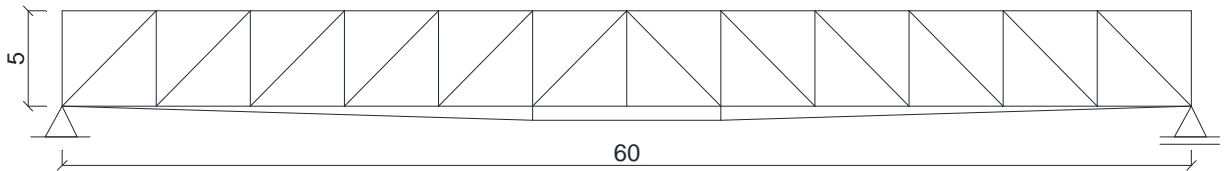


Şekil 3.22. 60 m açıklık 4 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.22’ den de görüleceği üzere 40 m açıklık ve 3 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %22 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 400 kN’luk kuvvettir.

• 5 m Yükseklikli Kafes Kiriş

Aşağıda Şekil 3.23’ de 60 m açıklık ve 5m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



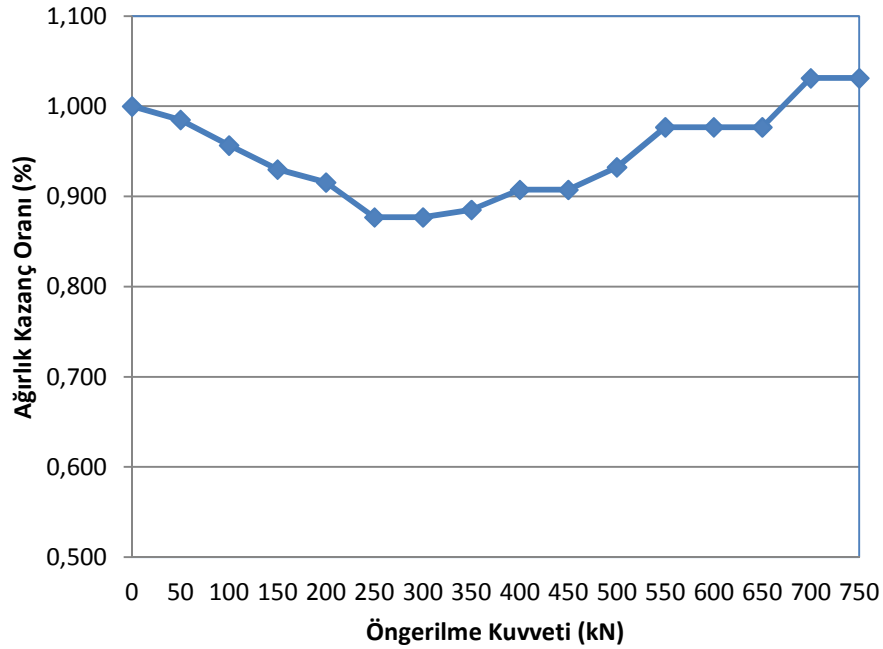
Şekil 3.23. 60 m açıklıklı 5 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50’ şer kN’luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 750 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.8’de verildi.

Tablo 3.8. 60 m açıklık 5 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	5990	5280	3760	1320	84,86	1
50	5990	5010	3760	1320	83,59	0,985
100	5990	4500	3760	1320	81,18	0,957
150	5990	4020	3760	1320	78,92	0,930
200	5990	3760	3760	1320	77,70	0,916
250	5940	3210	3760	1230	74,41	0,88
300	5940	3210	3760	1230	74,41	0,88
350	5940	3360	3760	1230	75,12	0,89
400	5940	3760	3760	1230	77,00	0,91
450	5940	3760	3760	1230	77,00	0,91
500	5940	4210	3760	1230	79,12	0,93
550	5940	5010	3760	1230	82,89	0,98
600	5940	5010	3760	1230	82,89	0,98
650	5940	5010	3760	1230	82,89	0,98
700	5940	5990	3760	1230	87,51	1,03
750	5940	5990	3760	1230	87,51	1,03

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.24' de verilmektedir.

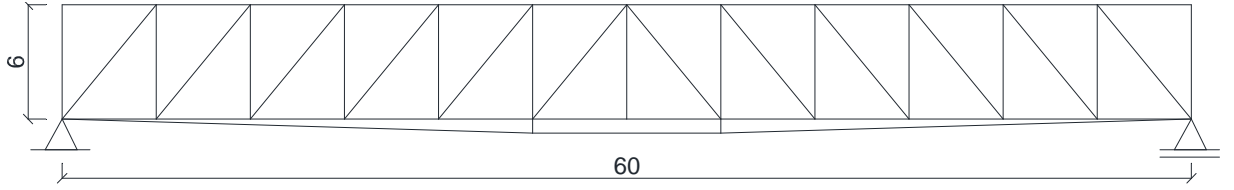


Şekil 3.24. 60 m açıklık 5 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.24'den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 5 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %13 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için 250 kN en uygun öngerme kuvvetidir.

- **6 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.25'de 60 m açıklık ve 6m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



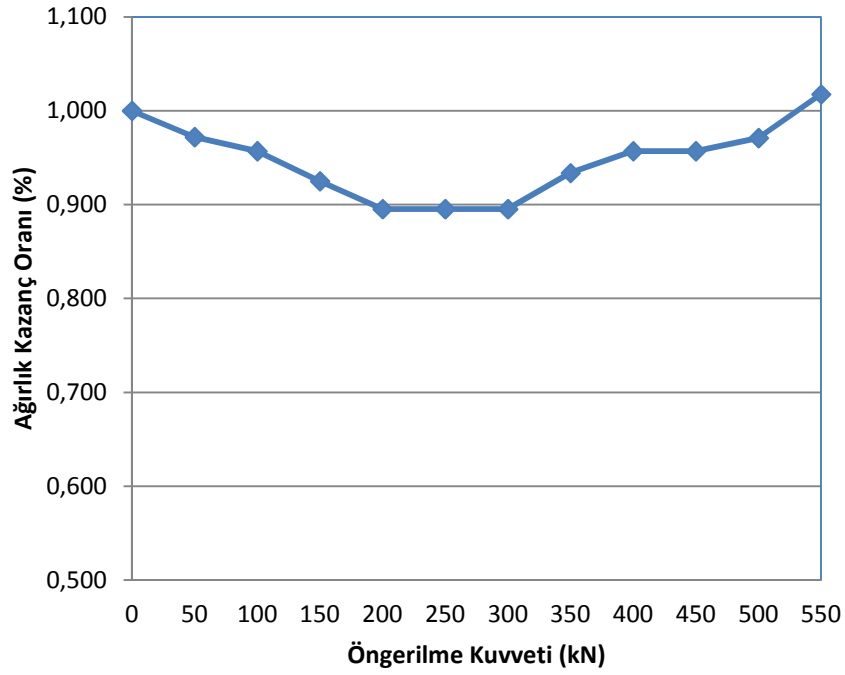
Şekil 3.25. 60 m açıklıklı 6 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN maksimum 550 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.9'da verildi.

Tablo 3.9. 60 m açıklık 6 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	5010	4500	3760	1390	80,97	1
50	5010	4020	3760	1390	78,70	0,972
100	5010	3760	3760	1390	77,48	0,957
150	5010	3210	3760	1390	74,89	0,925
200	5010	2700	3760	1390	72,49	0,895
250	5010	2700	3760	1390	72,49	0,90
300	5010	2700	3760	1390	72,49	0,90
350	5010	3360	3760	1390	75,60	0,93
400	5010	3760	3760	1390	77,48	0,96
450	5010	3760	3760	1390	77,48	0,96
500	5010	4210	3760	1230	78,62	0,97
550	5010	5010	3760	1230	82,39	1,02

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak, ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.26'da verilmektedir.

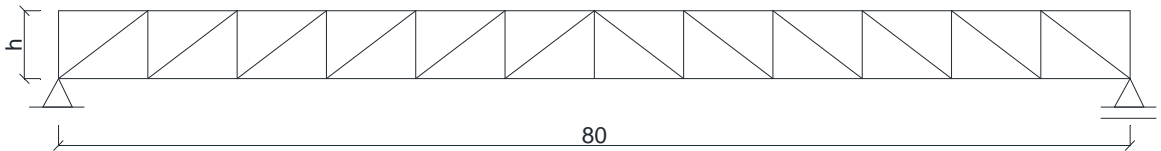


Şekil 3.26. 60 m açıklık 6 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.26'dan da görüleceği üzere 60 m açıklık ve 6 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %10 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için 200kN en uygun öngerme kuvvetidir. Başka etmenler söz konusu değilse en uygun öngerme kuvveti 200 kN bunlar arasında en küçüğü olarak alınabilir.

3.4. 80m Açıklıklı Kafes Kiriş

Aşağıda Şekil 3.27'de 80 m açıklık için seçilen düzlem kafes kirişin geometrisi görülmektedir. Bu kafes kirişin 5 m, 6 m, 7m ve 8m yükseklikler için optimum tasarımı gerçekleştirildi. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



Şekil 3.27. 80 m açıklıklı kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş için dikmeler arası mesafe (a) 6,67 m'dir. $a = 6,67$ m'ye bağlı olarak düğüm noktalarına etkiyen yükler aşağıdaki gibi hesaplandı.

a) Kar yükü:

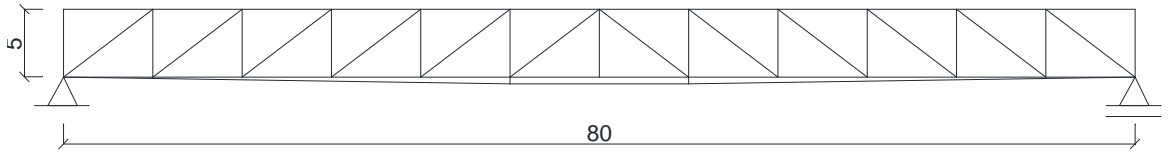
$$P_k = (7,5 \times 6 \times 6,67) \text{ kN}; P_k = 30 \text{ kN}; P_{k/2} = 15 \text{ kN}$$

b) Kaplama yükü:

$$P_{kp} = (2,5 \times 6 \times 6,67) \text{ kN}; P_k = 10 \text{ kN}; P_{k/2} = 5 \text{ kN}$$

- **5 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.28'de 80 m açıklık ve 5 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



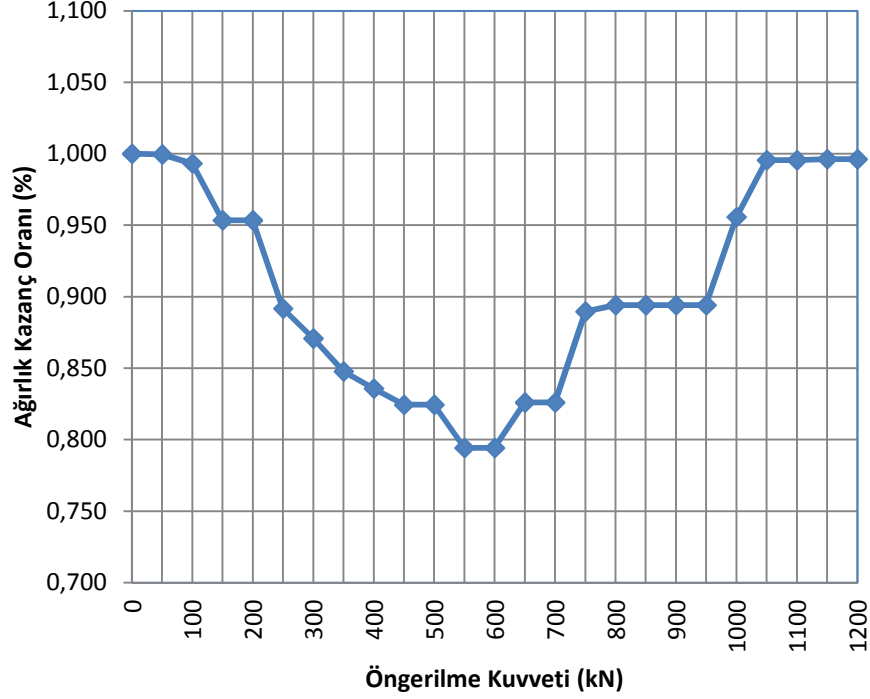
Şekil 3.28. 80 m açıklıklı 5 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN maksimum 1200 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.10'da verildi.

Tablo 3.10. 80 m açıklık 5 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	11800	9840	5990	2060	193,41	1
50	11800	9840	5990	2040	193,31	0,999
100	11800	9840	5990	1800	192,09	0,993
150	11800	9840	5010	1800	184,40	0,953
200	11800	9840	5010	1800	184,40	0,953
250	11800	7940	5010	1800	172,46	0,89
300	11800	7370	5010	1710	168,43	0,87
350	11800	6660	5010	1710	163,97	0,85
400	11800	6290	5010	1710	161,64	0,84
450	11800	5940	5010	1710	159,45	0,82
500	11800	5940	5010	1710	159,45	0,82
550	11800	5010	5010	1710	153,60	0,79
600	11800	5010	5010	1710	153,60	0,79
650	11800	5990	5010	1710	159,76	0,83
700	11800	5990	5010	1710	159,76	0,83
750	11800	7940	5010	1720	172,06	0,89
800	11800	7940	5010	1890	172,92	0,89
850	11800	7940	5010	1890	172,92	0,89
900	11800	7940	5010	1890	172,92	0,89
950	11800	7940	5010	1890	172,92	0,89
1000	11800	9840	5010	1890	184,86	0,96
1050	11800	9840	5990	1890	192,55	1,00
1100	11800	9840	5990	1890	192,55	1,00
1150	11800	9860	5990	1890	192,67	1,00
1200	11800	9860	5990	1890	192,67	1,00

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.29' da verilmektedir.

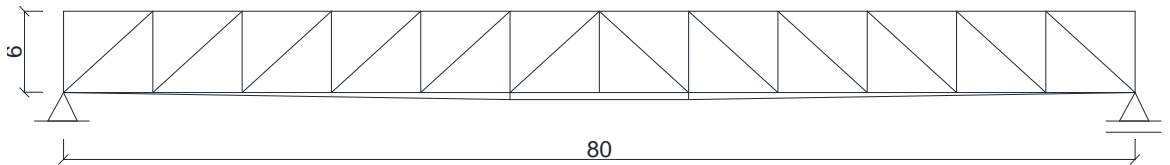


Şekil 3.29. 80 m açıklık 5 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.29’ dan da görüleceği üzere 80 m açıklık ve 5 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %21 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 550 kN’luk kuvvettir.

- **6 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.30’ da 80 m açıklık ve 6m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



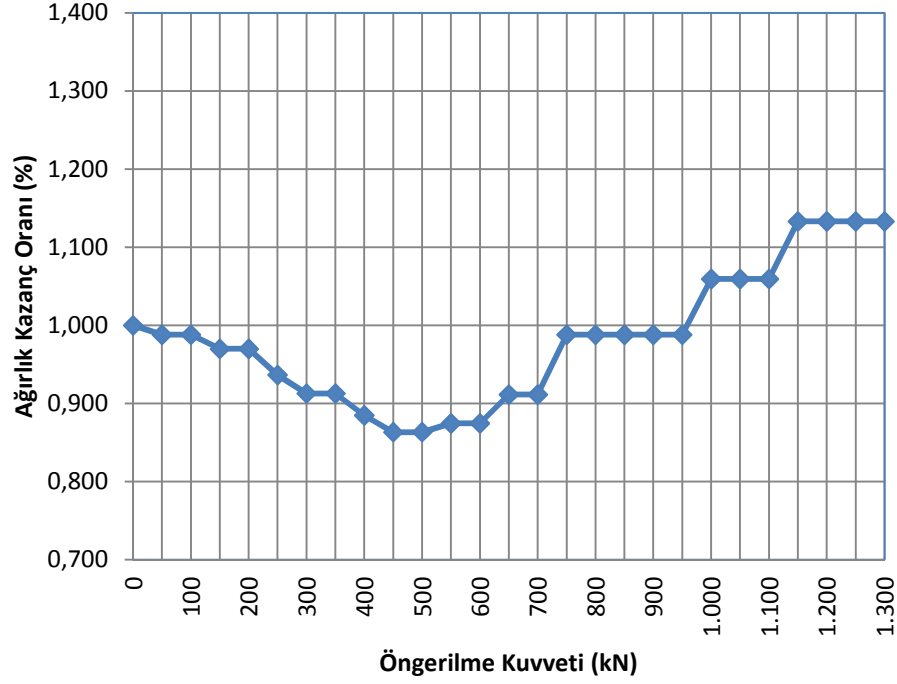
Şekil 3.30. 80 m açıklıklı 6 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN maksimum 1300 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.11'de verildi.

Tablo 3.11. 80 m açıklık 6 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	9860	8260	5010	1800	167,15	1
50	9860	7940	5010	1800	165,14	0,988
100	9860	7940	5010	1800	165,14	0,988
150	9860	7370	5010	1890	162,11	0,970
200	9860	7370	5010	1890	162,11	0,970
250	9860	6570	5010	1800	156,53	0,937
300	9860	5940	5010	1800	152,58	0,913
350	9860	5940	5010	1800	152,58	0,913
400	9860	5280	5010	1710	147,88	0,885
450	9860	4710	5010	1710	144,30	0,863
500	9860	4710	5010	1710	144,30	0,863
550	9860	5010	5010	1710	146,19	0,875
s600	9860	5010	5010	1710	146,19	0,875
650	9860	5990	5010	1710	152,34	0,911
700	9860	5990	5010	1710	152,34	0,911
750	9860	7940	5010	1800	165,14	0,988
800	9860	7940	5010	1800	165,14	0,988
850	9860	7940	5010	1800	165,14	0,988
900	9860	7940	5010	1800	165,14	0,988
950	9860	7940	5010	1800	165,14	0,988
1000	9860	9840	5010	1800	177,07	1,059
1050	9860	9840	5010	1800	177,07	1,059
1100	9860	9840	5010	1800	177,07	1,059
1150	9860	11800	5010	1800	189,38	1,133
1200	9860	11800	5010	1800	189,38	1,133
1250	9860	11800	5010	1800	189,38	1,133
1300	9860	11800	5010	1800	189,38	1,133

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.31'de verilmektedir.

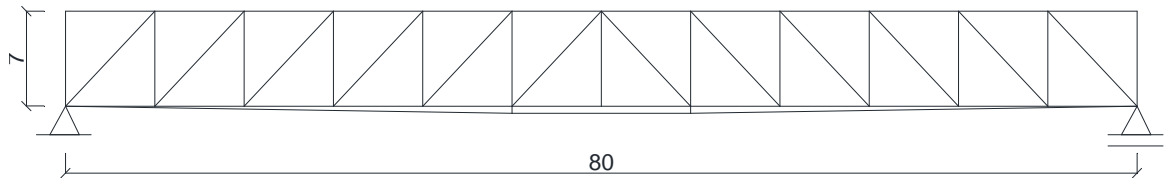


Şekil 3.31. 80 m açıklıklı 6 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.31'den de görüleceği üzere 80 m açıklıklı ve 6 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %14 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 450 kN'luk kuvvettir.

- **7 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.32'de 80 m açıklıklı ve 7m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



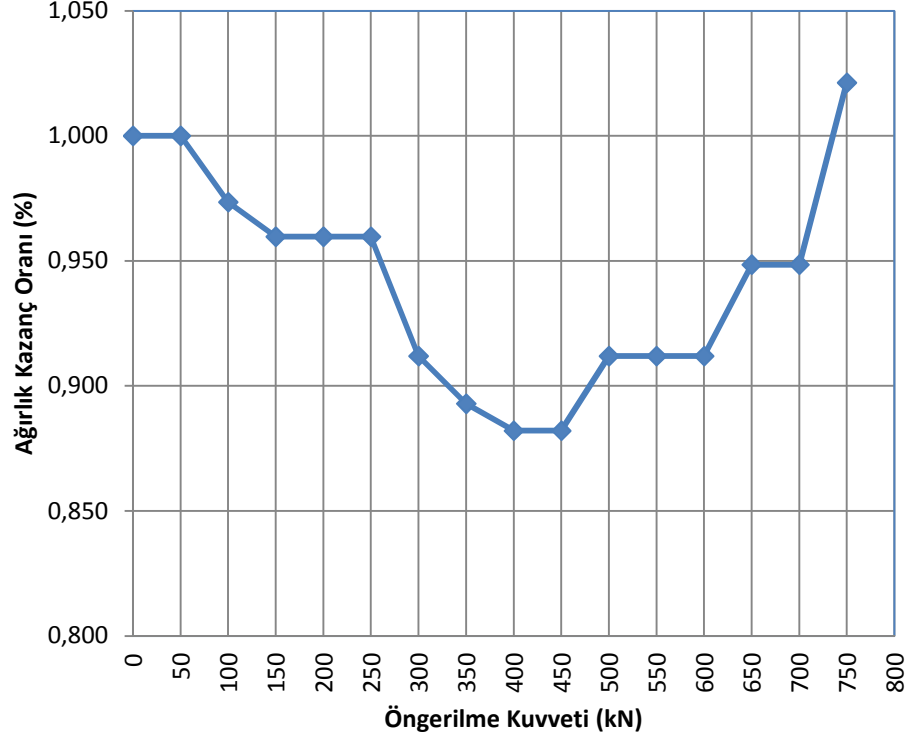
Şekil 3.32. 80 m açıklıklı 7 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN maksimum 800 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.12'de verildi.

Tablo 3.12. 80 m açıklık 7 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	9840	7370	5010	2040	168,29	1
50	9840	7370	5010	2040	168,29	1,000
100	9840	6660	5010	2040	163,83	0,974
150	9840	6290	5010	2040	161,51	0,960
200	9840	6290	5010	2040	161,51	0,960
250	9840	6290	5010	2040	161,51	0,96
300	9840	5010	5010	2040	153,47	0,91
350	9840	4500	5010	2040	150,26	0,89
400	9840	4210	5010	2040	148,44	0,88
450	9840	4210	5010	2040	148,44	0,88
500	9840	5010	5010	2040	153,47	0,91
550	9840	5010	5010	2040	153,47	0,91
600	9840	5010	5010	2040	153,47	0,91
650	9840	5990	5010	2040	159,62	0,95
700	9840	5990	5010	2040	159,62	0,95
750	9840	7940	5010	2040	171,87	1,02

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.33'de verilmektedir.

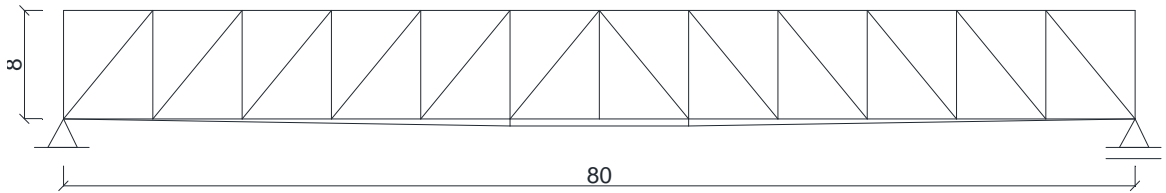


Şekil 3.33. 80 m açıklık 7 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.33'den de görüleceği üzere 80 m açıklık ve 7 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %12 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 400 kN'luk kuvvettir.

- **8 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.34'de 80 m açıklık ve 8m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



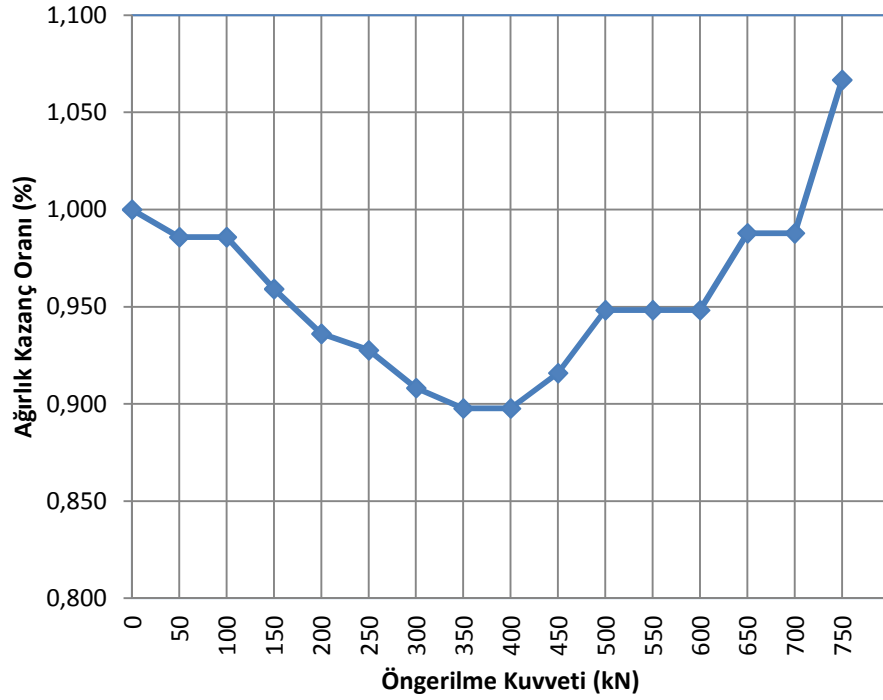
Şekil 3.34. 80 m açıklıklı 8 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN maksimum 750 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.13'de verildi.

Tablo 3.13. 80 m açıklık 8 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	7940	6290	5010	2060	155,31	1
50	7940	5940	5010	2060	153,11	0,986
100	7940	5940	5010	2060	153,11	0,986
150	7940	5280	5010	2060	148,97	0,959
200	7940	4710	5010	2060	145,39	0,936
250	7940	4500	5010	2060	144,07	0,93
300	7940	4020	5010	2060	141,06	0,91
350	7940	3760	5010	2060	139,42	0,90
400	7940	3760	5010	2060	139,42	0,90
450	7940	4210	5010	2060	142,25	0,92
500	7940	5010	5010	2060	147,27	0,95
550	7940	5010	5010	2060	147,27	0,95
600	7940	5010	5010	2060	147,27	0,95
650	7940	5990	5010	2060	153,43	0,99
700	7940	5990	5010	2060	153,43	0,99
750	7940	7940	5010	2060	165,67	1,07

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.35’de verilmektedir.

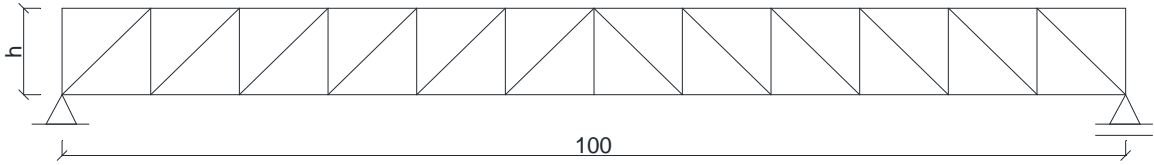


Şekil 3.35. 80 m açıklık 8 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.35'den de görüleceği üzere 80 m açıklık ve 8 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %10 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 350 kN'luk kuvvettir.

3.5. 100m Açıklıklı Kafes Kiriş

Aşağıda Şekil 3.36'da 100 m açıklık için seçilen düzlem kafes kirişin geometrisi görülmektedir. Bu kafes kirişin 8 m 9 m ve 10 m yükseklikler için optimum tasarımı gerçekleştirildi. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



Şekil 3.36. 100 m açıklıklı kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş için dikmeler arası mesafe, a 8,33 m olduğuna göre düğüm noktalarına etkiyen yükler aşağıdaki gibi hesaplandı.

a) Kar yükü:

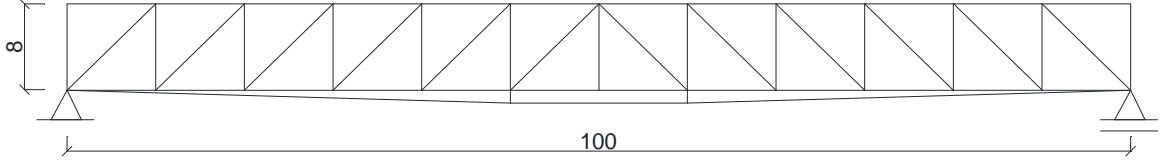
$$P_k = (7,5 \times 6,0 \times 8,33) \text{ kN}; P_k = 37,5 \text{ kN}; P_{k/2} = 18,75 \text{ kN}$$

b) Kaplama yükü:

$$P_{kp} = (2,5 \times 6,0 \times 8,33) \text{ kN}; P_{kp} = 12,5 \text{ kN}; P_{kp/2} = 6,25 \text{ kN}$$

- **8 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.37'de 100 m açıklık ve 8m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



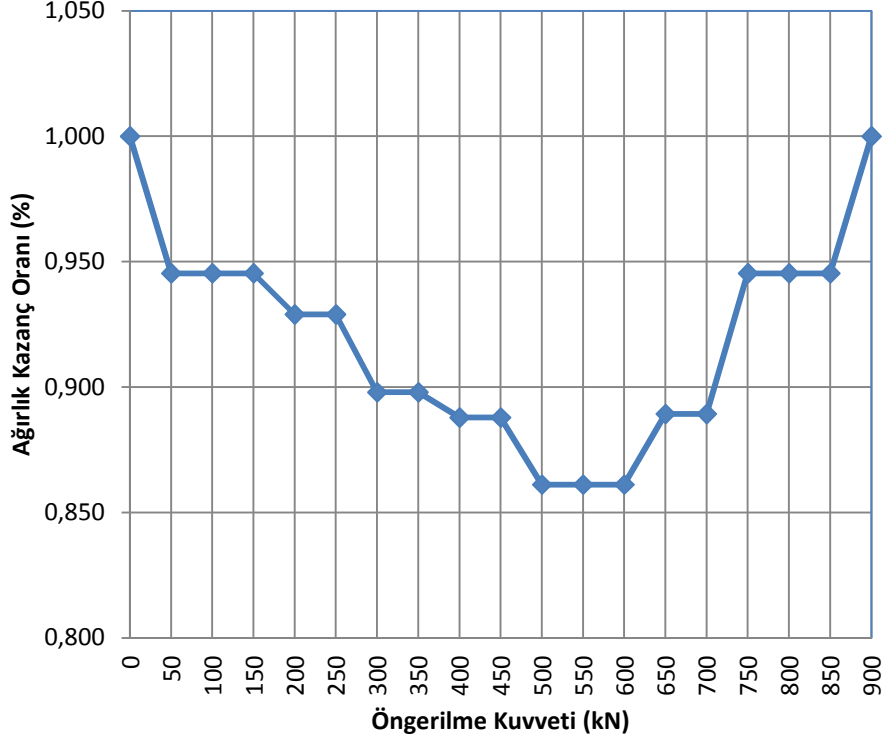
Şekil 3.37. 100 m açıklıklı 8 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN maksimum 900 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.14'de verildi.

Tablo 3.14. 100 m açıklık 8 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	11800	9840	7940	2060	273,08	1
50	11800	7940	7940	2060	258,16	0,945
100	11800	7940	7940	2060	258,16	0,945
150	11800	7940	7940	2060	258,16	0,945
200	11800	7370	7940	2060	253,69	0,929
250	11800	7370	7940	2060	253,69	0,93
300	11800	6290	7940	2060	245,21	0,90
350	11800	6290	7940	2060	245,21	0,90
400	11800	5940	7940	2060	242,46	0,89
450	11800	5940	7940	2060	242,46	0,89
500	11800	5010	7940	2060	235,16	0,86
550	11800	5010	7940	2060	235,16	0,86
600	11800	5010	7940	2060	235,16	0,86
650	11800	5990	7940	2060	242,86	0,89
700	11800	5990	7940	2060	242,86	0,89
750	11800	7940	7940	2060	258,16	0,95
800	11800	7940	7940	2060	258,16	0,95
850	11800	7940	7940	2060	258,16	0,95
900	11800	9840	7940	2060	273,08	1,00
950	11800	9860	7940	2060	273,24	1,00
1000	11800	9860	7940	2060	273,24	1,00
1050	11800	9860	7940	2060	273,24	1,00

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.38'de verilmektedir.

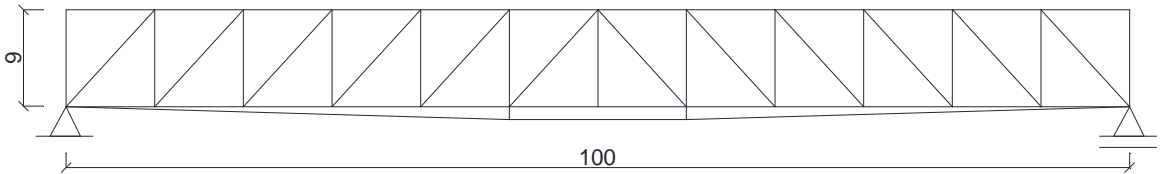


Şekil 3.38. 100 m açıklık 8 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.38’den de görüleceği üzere 100 m açıklık ve 8 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %14 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için 500kN en uygun öngerme kuvvetidir.

- **9 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.39’da 100 m açıklık ve 9 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



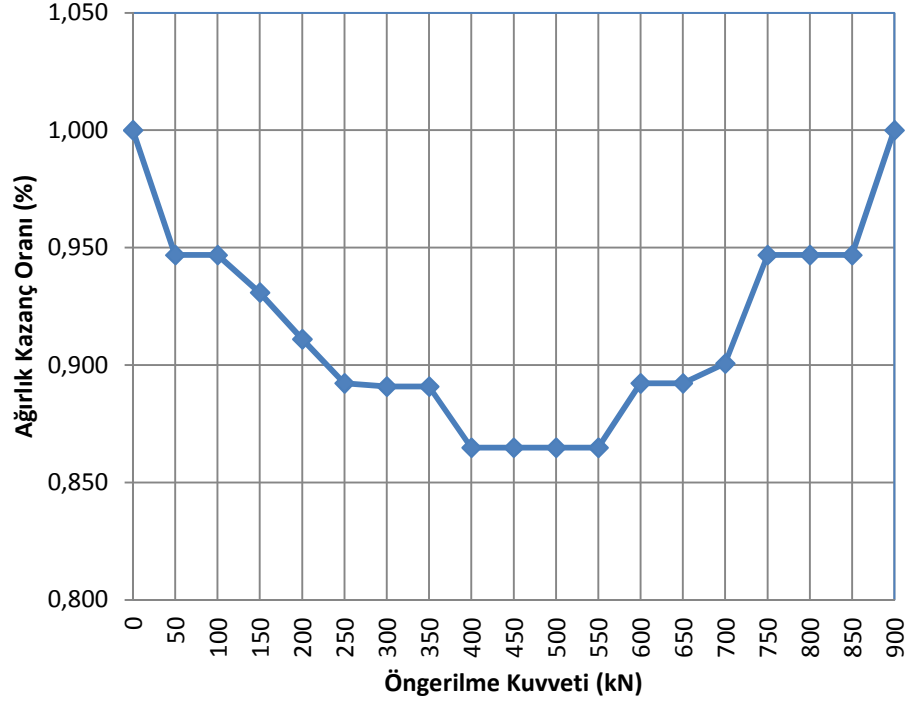
Şekil 3.39. 100 m açıklıklı 9 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 900 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.15'de verildi.

Tablo 3.15. 100 m açıklık 9 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	11800	9840	7940	2060	280,57	1
50	11800	7940	7940	2060	265,65	0,947
100	11800	7940	7940	2060	265,65	0,947
150	11800	7370	7940	2060	261,18	0,931
200	11800	6660	7940	2060	255,60	0,911
250	11800	5990	7940	2060	250,34	0,89
300	11800	5940	7940	2060	249,95	0,89
350	11800	5940	7940	2060	249,95	0,89
400	11800	5010	7940	2060	242,65	0,86
450	11800	5010	7940	2060	242,65	0,86
500	11800	5010	7940	2060	242,65	0,86
550	11800	5010	7940	2060	242,65	0,86
600	11800	5990	7940	2060	250,34	0,89
650	11800	5990	7940	2060	250,34	0,89
700	11800	6290	7940	2060	252,70	0,90
750	11800	7940	7940	2060	265,65	0,95
800	11800	7940	7940	2060	265,65	0,95
850	11800	7940	7940	2060	265,65	0,95
900	11800	9840	7940	2060	280,57	1,00

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.40'da verilmektedir.

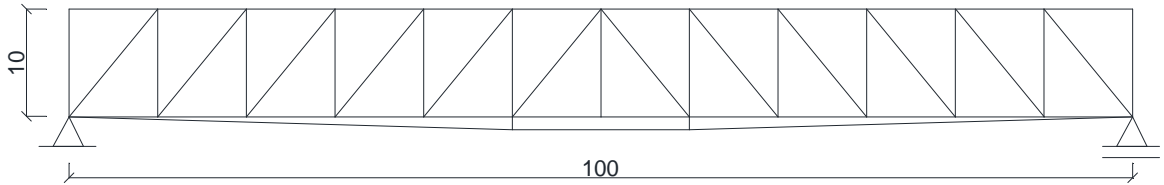


Şekil 3.40. 100 m açıklık 9 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

Şekil 3.40'dan da görüleceği üzere 100 m açıklık ve 9 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %14 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 400 kN'luk kuvvettir.

- **10 m Yükseklikli Kafes Kiriş**

Aşağıda Şekil 3.41'de 100 m açıklık ve 10 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve bu kirişe ait öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



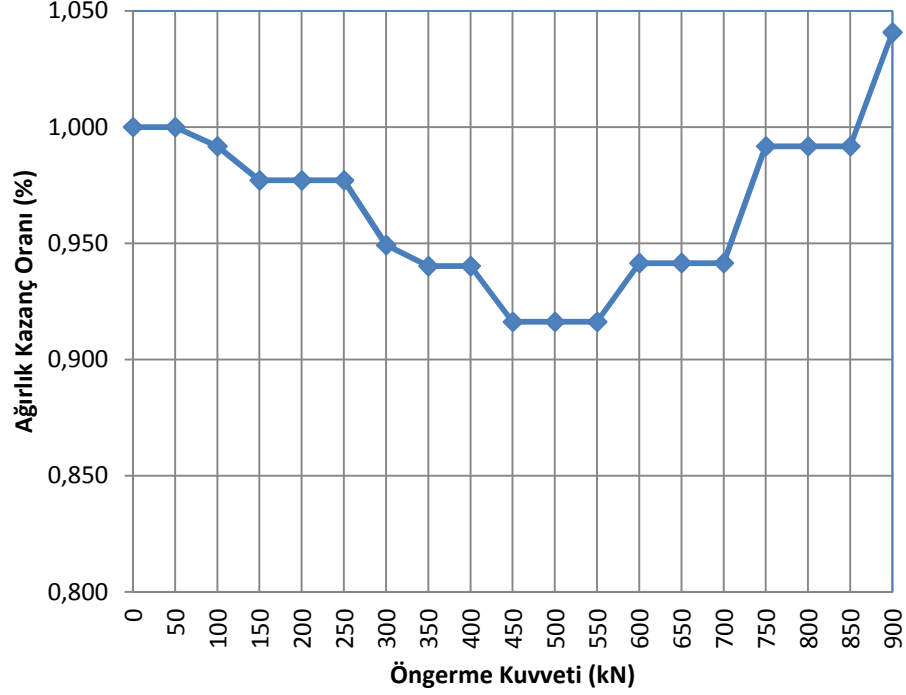
Şekil 3.41. 100 m açıklıklı 10 m yükseklikli kafes kiriş

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN maksimum 150 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.16'da verildi.

Tablo 3.16. 100 m açıklık 10 m yükseklikli kafes kiriş

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	11800	8260	9860	2570	304,60	1
50	11800	8260	9860	2570	304,60	1,000
100	11800	7940	9860	2570	302,09	0,992
150	11800	7370	9860	2570	297,61	0,977
200	11800	7370	9860	2570	297,61	0,977
250	11800	7370	9860	2570	297,61	0,977
300	11800	6290	9860	2570	289,14	0,949
350	11800	5940	9860	2570	286,39	0,940
400	11800	5940	9860	2570	286,39	0,940
450	11800	5010	9860	2570	279,09	0,916
500	11800	5010	9860	2570	279,09	0,916
550	11800	5010	9860	2570	279,09	0,916
600	11800	5990	9860	2570	286,78	0,941
650	11800	5990	9860	2570	286,78	0,941
700	11800	5990	9860	2570	286,78	0,941
750	11800	7940	9860	2570	302,09	0,992
800	11800	7940	9860	2570	302,09	0,992
850	11800	7940	9860	2570	302,09	0,992
900	11800	9840	9860	2570	317,00	1,041

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.42'de verilmektedir.



Şekil 3.42. 100 m açıklık 10 m yükseklikli kiriş için ağırlık kazanç oranının değişimi

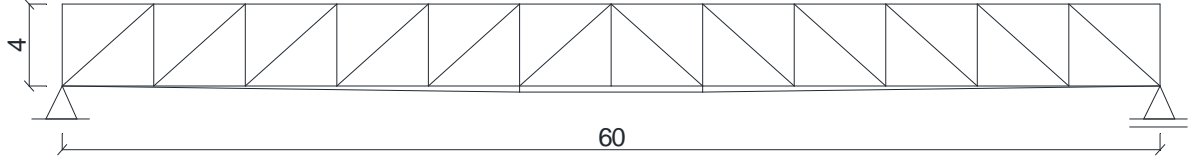
Şekil 3.42’den de görüleceği üzere 100 m açıklık ve 10 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle ağırlıkta maksimum %8 kadar tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve seçilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 450 kN’luk kuvvettir.

3.6. Optimum Takoz Yüksekliğinin Araştırılması

Takoz yüksekliğine bağlı olarak öngerilmeli kafes kiriş ağırlığının nasıl değiştiğinin belirlenmesi için seçilen bir kafes kiriş farklı takoz yüksekliklerinde analiz edildi. Seçilen kafes kiriş 60 açıklık ve 4 m yüksekliğe sahip olan kafes kiriştir. Kafes kiriş ilk olarak 200 mm ile 500 mm arasında 100’er mm artarak değişen yüksekliklere sahip takozlar için analiz edilmiş ve beklendiği gibi sonuçlarda fazla bir değişim olmadığı görüldü. Bunun ardından araştırmaya 500 mm ile 4000 mm arasında yükseklikleri 500’er mm artarak değişen takozlar incelenerek devam edildi. Analizler sonucunda elde edilen sonuçlar tablo ve grafik şeklinde sunuldu.

- **200 mm Yüksekliğinde Takoz**

Aşağıda Şekil 3.43’de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 200 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



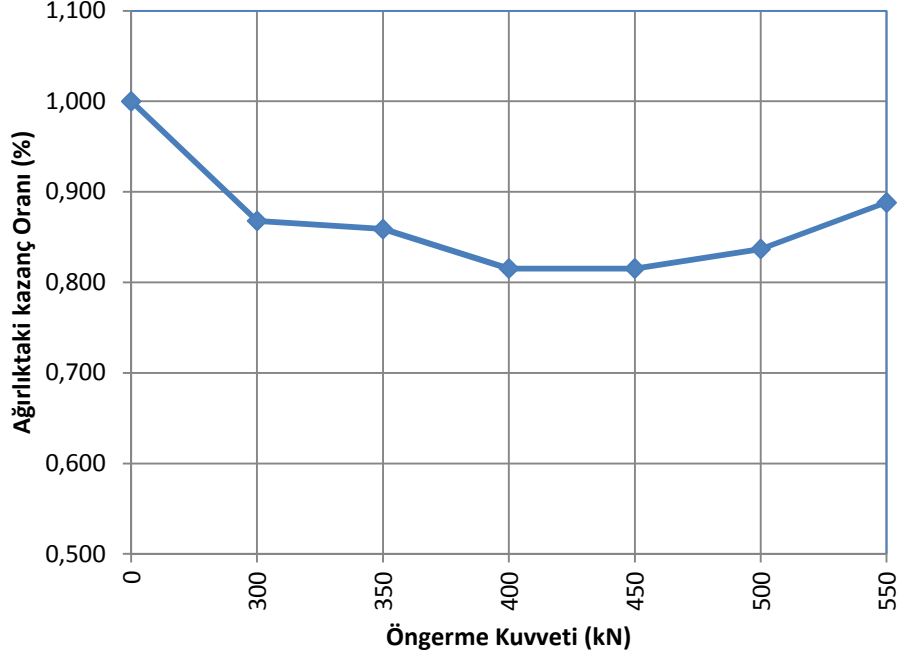
Şekil 3.43. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 200 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50’şer kN’luk artışlarla minimum 300 kN maksimum 550 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.17’de verildi.

Tablo 3.17. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 200 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
300	7940	4210	3760	1320	85,28	0,868
350	7940	4020	3760	1320	84,39	0,859
400	7370	3760	3760	1230	80,11	0,815
450	7370	3760	3760	1230	80,11	0,815
500	7370	4210	3760	1230	82,23	0,837
550	7940	4710	3760	1230	87,27	0,888

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.44’de verilmektedir.

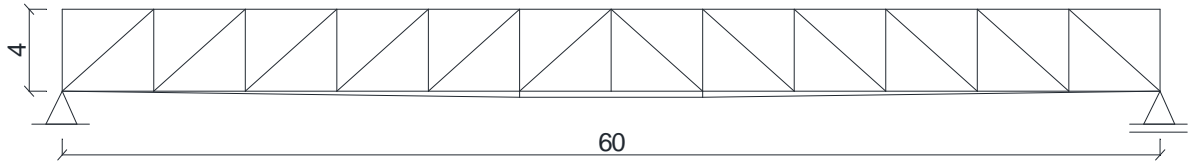


Şekil 3.44. 60 m açıklık 4 m yükseklik 200 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.44'den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe 200 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %19 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 200 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 400 kN'luk kuvvettir.

- **300 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.45'de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 300 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



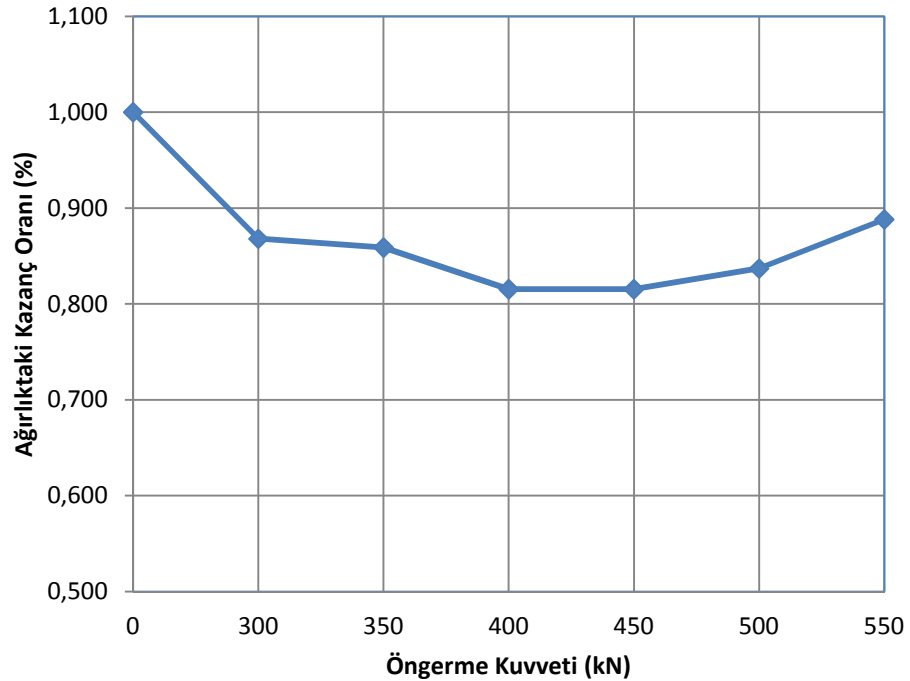
Şekil 3.45. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 300 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 300 kN maksimum 550 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.18'de verildi.

Tablo 3.18. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 300 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
300	7940	4210	3760	1320	85,28	0,868
350	7940	4020	3760	1320	84,39	0,859
400	7370	3760	3760	1230	80,11	0,815
450	7370	3760	3760	1230	80,11	0,815
500	7370	4210	3760	1230	82,23	0,837
550	7940	4710	3760	1230	87,27	0,888

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.46'da verilmektedir.



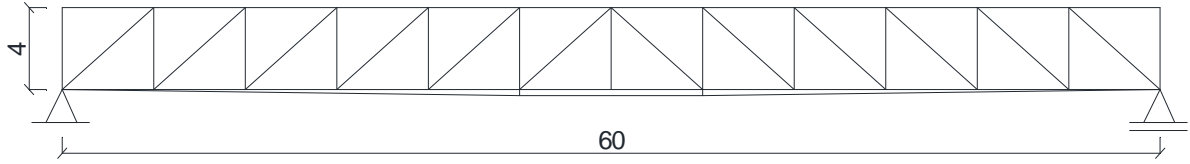
Şekil 3.46. 60 m açıklık 4 m yükseklikli 300 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.46'dan da görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş 300 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %19

tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 300 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 400 kN'luk kuvvettir.

- **400 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.47’de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 400 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



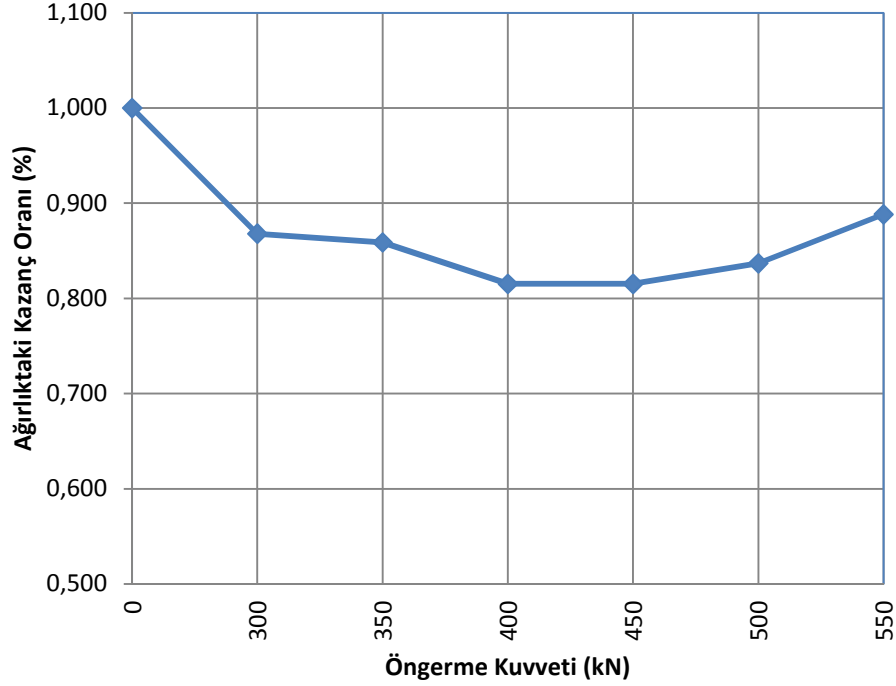
Şekil 3.47. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 400 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50’şer kN’luk artışlarla minimum 300 kN maksimum 550 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.19’da verildi.

Tablo 3.19. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 400 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
300	7940	4210	3760	1320	85,28	0,868
350	7940	4020	3760	1320	84,39	0,859
400	7370	3760	3760	1230	80,11	0,815
450	7370	3760	3760	1230	80,11	0,815
500	7370	4210	3760	1230	82,23	0,837
550	7940	4710	3760	1230	87,27	0,888

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.48’de verilmektedir.

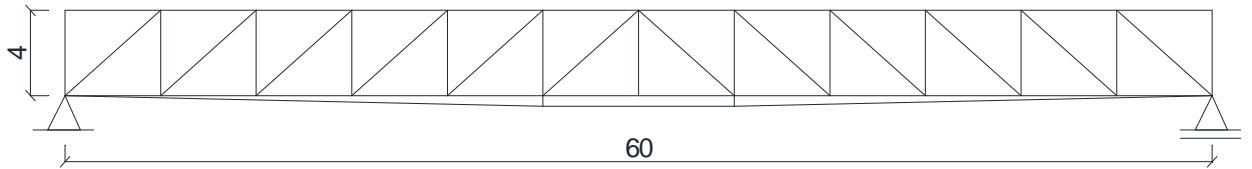


Şekil 3.48. 60 m açıklık 4 m yükseklik 400 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.48’den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş 400 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %19 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 400 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 400 kN’luk kuvvettir.

- **500 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.49’da 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 500 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



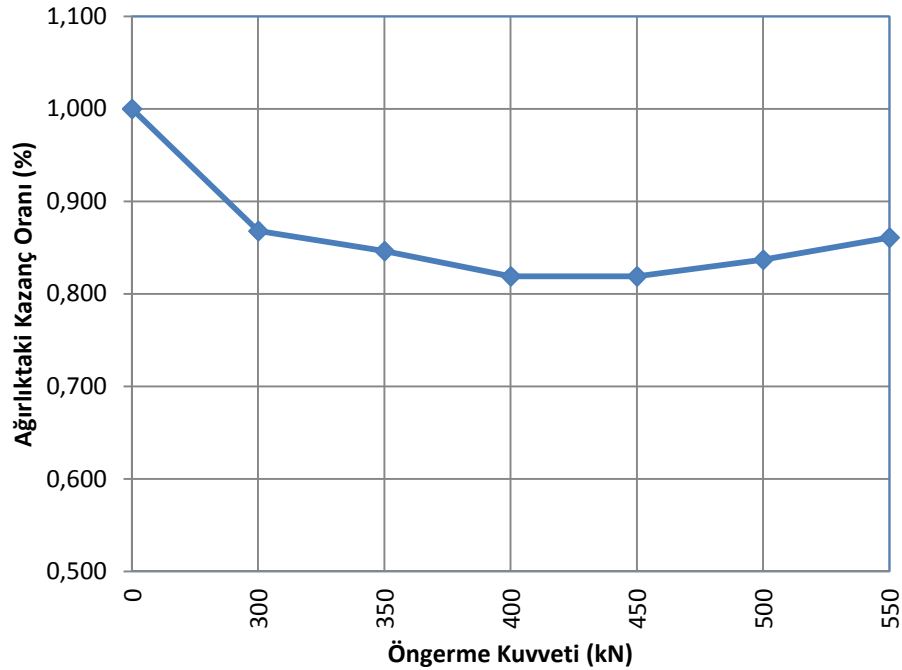
Şekil 3.49. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 500 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 300 kN maksimum 550 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.20'de verildi.

Tablo 3.20. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 500 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
300	7940	4210	3760	1320	85,28	0,868
350	7940	3760	3760	1320	83,16	0,846
400	7370	3760	3760	1320	80,48	0,819
450	7370	3760	3760	1320	80,48	0,819
500	7370	4210	3760	1230	82,23	0,837
550	7370	4710	3760	1230	84,59	0,861

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.50'de verilmektedir.



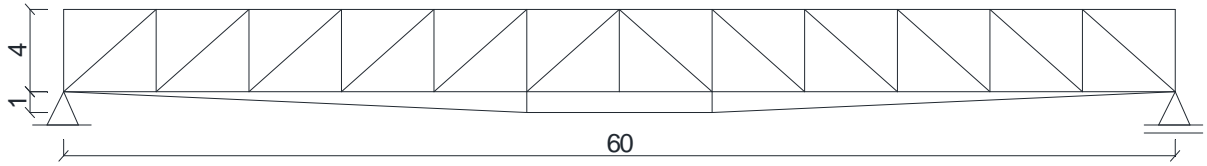
Şekil 3.50. 60 m açıklık 4 m yükseklik 500 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.50'den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe 500 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum % 18

tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 500 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 400 kN'luk kuvvettir.

- **1000 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.51’de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 1000 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



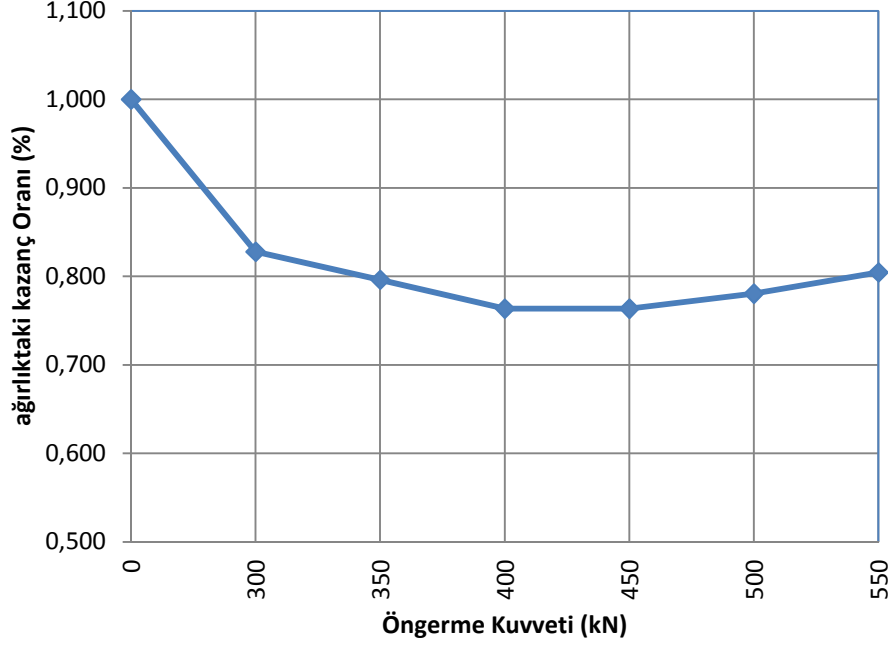
Şekil 3.51. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 1000 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50’şer kN’luk artışlarla minimum 300 kN maksimum 550 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.21’de verildi.

Tablo 3.21. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 1000 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
300	7370	4020	3760	1230	81,34	0,828
350	7370	3360	3760	1230	78,23	0,796
400	6290	3760	3760	1230	75,02	0,764
450	6290	3760	3760	1230	75,02	0,764
500	6290	4210	3760	1120	76,70	0,781
550	5990	5010	3760	1120	79,05	0,805

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.52’de verilmektedir.

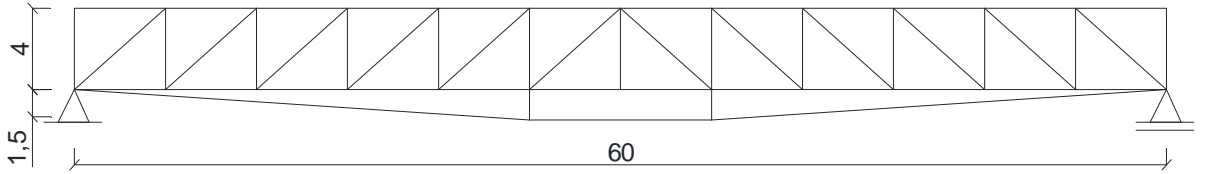


Şekil 3.52. 60 m açıklık 4 m yükseklik 1000 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.52’den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş 1000 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %24 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 1000 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 400 kN’luk kuvvettir.

- **1500 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.53’de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 1500 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



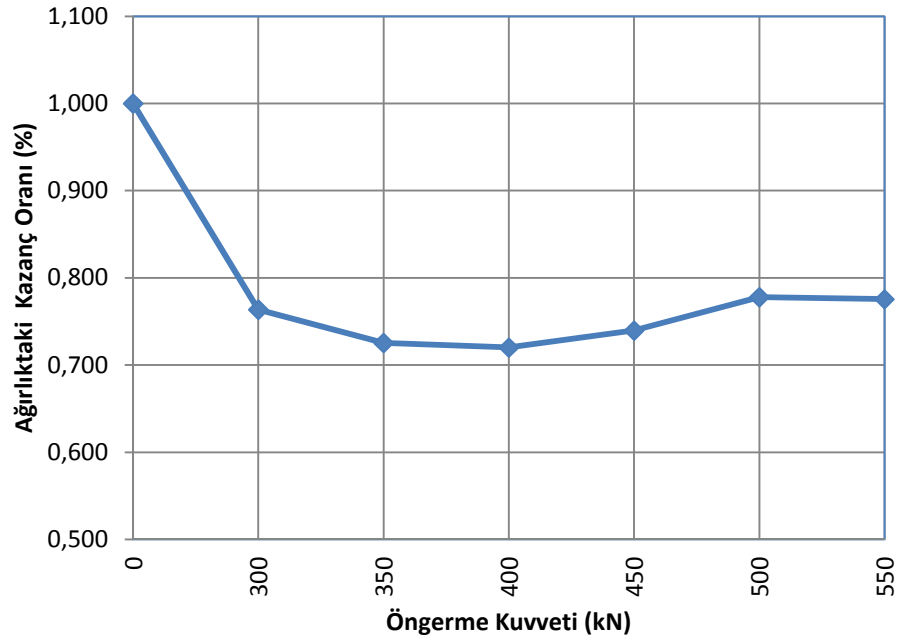
Şekil 3.53. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 1500 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 300 kN maksimum 550 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.22'de verildi.

Tablo 3.22. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 1500 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
300	6290	3760	3760	1230	75,02	0,764
350	5990	3360	3760	1120	71,28	0,725
400	5990	3760	3360	1120	70,75	0,720
450	5990	4210	3360	1070	72,67	0,740
500	5990	5010	3360	1070	76,43	0,778
550	5940	5010	3360	1070	76,20	0,776

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.54'de verilmektedir.



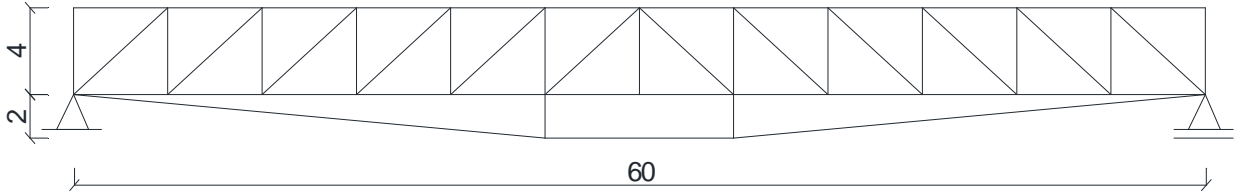
Şekil 3.54. 60 m açıklık 4 m yükseklikli 1500 mm takozlar ile teşkil edilmiş düzlem kafes kiriş için ağırlık-kazanç oran değişimi

Şekil 3.54'den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş 1500 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %28 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 1500 mm yüksekliğinde

takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için 400 kN en uygun öngerme kuvvetidir.

- **2000 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.55’de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 2000 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



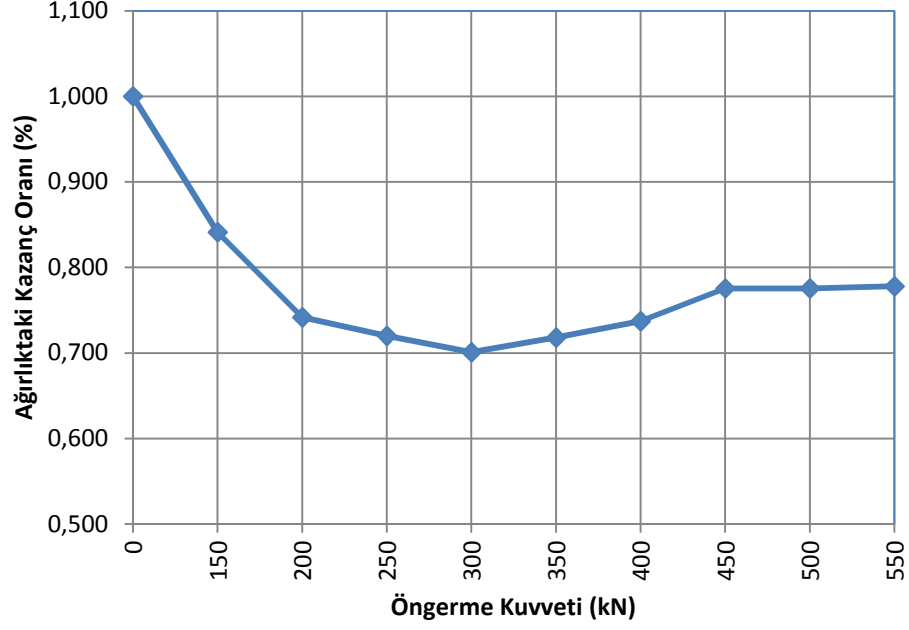
Şekil 3.55. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 2000 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50’şer kN’luk artışlarla minimum 150 kN maksimum 550 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.23’de verildi.

Tablo 3.23. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 2000 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
150	6660	5010	3760	1230	82,65	0,841
200	5990	4210	3360	1120	72,87	0,742
250	5990	3760	3360	1120	70,75	0,720
300	5990	3360	3360	1120	68,87	0,701
350	5990	3760	3360	1070	70,55	0,718
400	5940	4210	3360	1070	72,43	0,737
450	5940	5010	3360	1070	76,20	0,776
500	5940	5010	3360	1070	76,20	0,776
550	5010	5990	3360	1070	76,43	0,778

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.56’da verilmektedir.

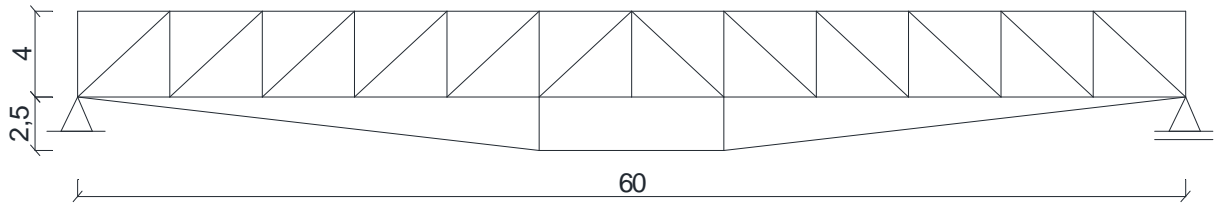


Şekil 3.56. 60 m açıklık 4 m yükseklik 2000 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.56'dan da görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş 2000 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %30 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 2000 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 300 kN'luk kuvvettir.

- **2500 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.57'de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 2500 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



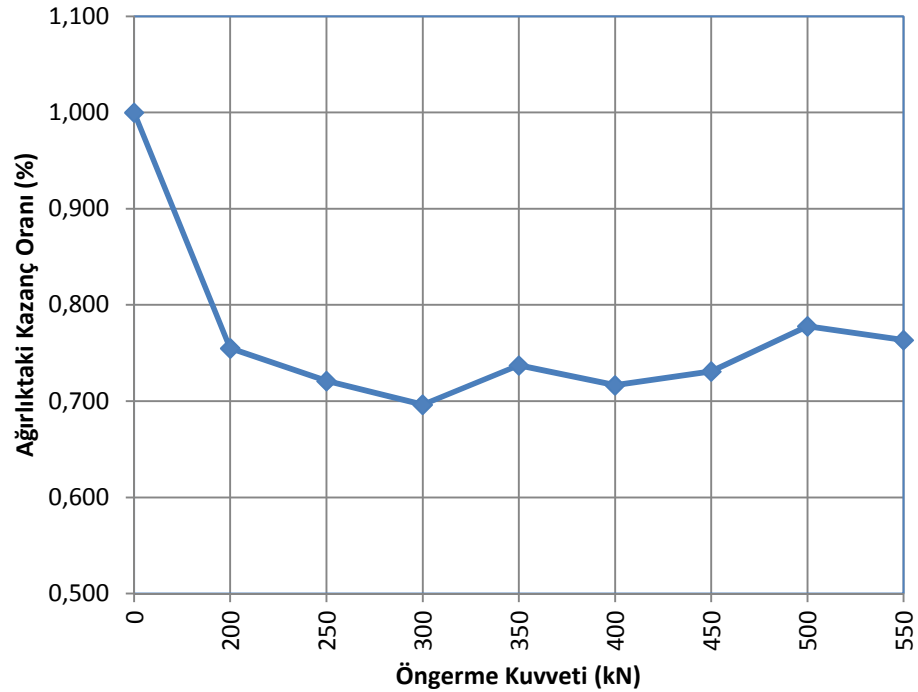
Şekil 3.57. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 2500 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 200 kN maksimum 550 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.24'de verildi.

Tablo 3.24. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 2500 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
200	5990	4020	3760	1070	74,18	0,755
250	5940	3360	3760	1070	70,84	0,721
300	5940	3360	3360	1070	68,43	0,696
350	5940	4210	3360	1070	72,43	0,737
400	5010	4710	3360	1070	70,41	0,717
450	5010	5010	3360	1070	71,82	0,731
500	5010	5990	3360	1070	76,43	0,778
550	4710	5990	3360	1070	75,02	0,764

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.58'de verilmektedir.

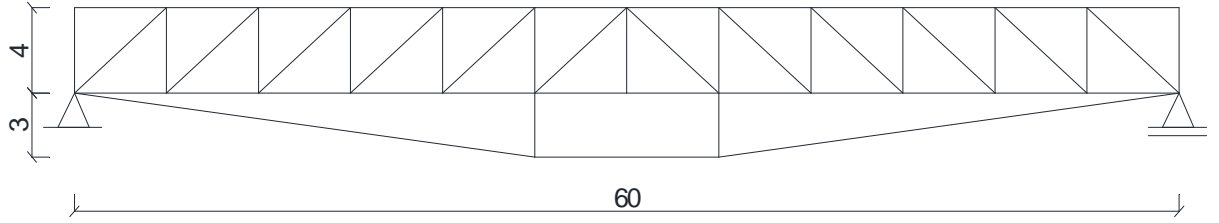


Şekil 3.58. 60 m açıklık 4 m yükseklik 2500 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.58’den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş 2500 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %31 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 2500 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 300 kN’luk kuvvettir.

- **3000 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.59’da 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 3000 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



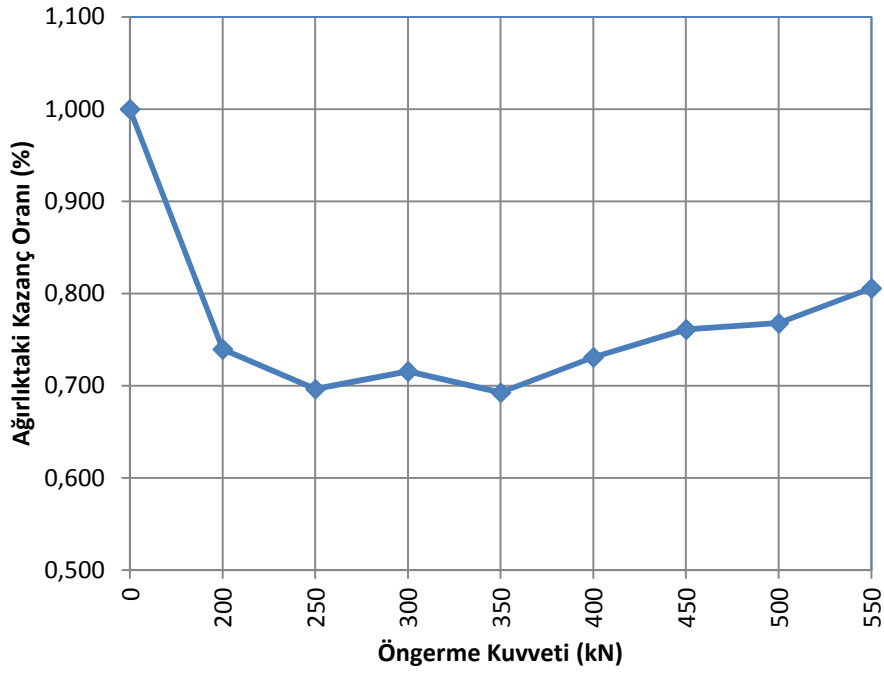
Şekil 3.59. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 3000 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50’şer kN’luk artışlarla minimum 200 kN maksimum 550 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.25’de verildi.

Tablo 3.25. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 3000 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
200	5990	4210	3360	1070	72,67	0,740
250	5940	3360	3360	1070	68,43	0,696
300	5940	3760	3360	1070	70,31	0,716
350	5010	4210	3360	1070	68,05	0,693
400	5010	5010	3360	1070	71,82	0,731
450	4710	5940	3360	1070	74,79	0,761
500	4500	6290	3360	1070	75,45	0,768
550	4210	7370	3360	1070	79,17	0,806

Yine bu düzlem kafes sisteme ait uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.60’da verilmektedir.

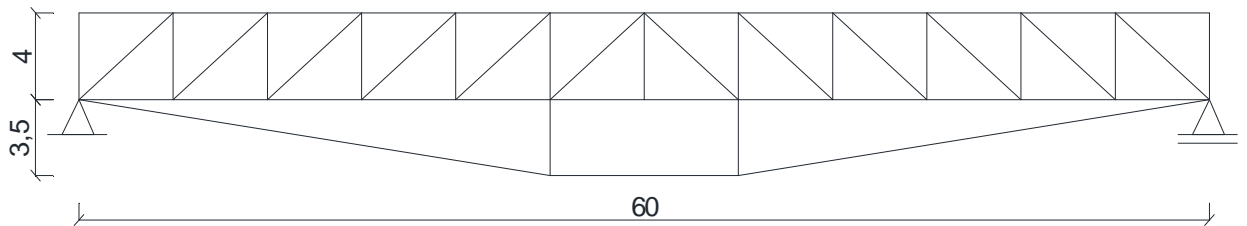


Şekil 3.60. 60 m açıklık 4 m yükseklik 3000 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.60'dan da görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş 3000 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %31 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 3000 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 350 kN'luk kuvvettir.

- **3500 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.61'de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 3500 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



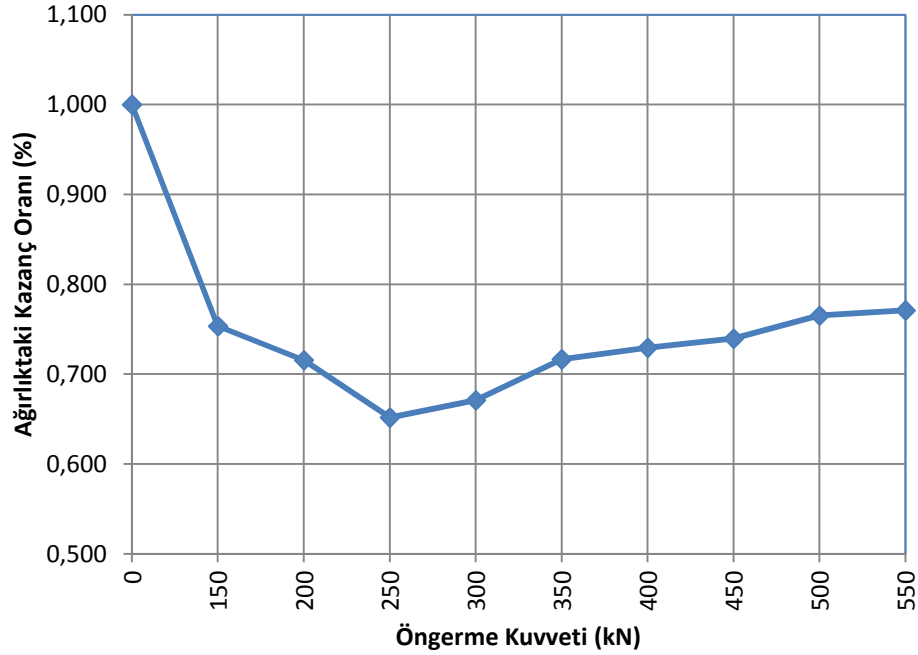
Şekil 3.61. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 3500 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 150 kN maksimum 550 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.26'da verildi.

Tablo 3.26. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 3500 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
150	5990	4500	3360	1070	74,03	0,753
200	5940	3760	3360	1070	70,31	0,716
250	5010	3360	3360	1070	64,05	0,652
300	5010	3760	3360	1070	65,93	0,671
350	5010	4710	3360	1070	70,41	0,717
400	4710	5280	3360	1070	71,68	0,730
450	4210	5990	3360	1070	72,67	0,740
500	4210	7370	2700	1070	75,19	0,765
550	3760	7940	2700	1070	75,75	0,771

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.62'de verilmektedir.

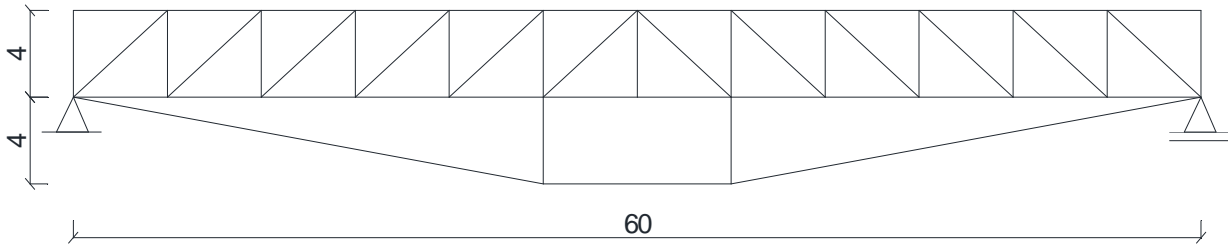


Şekil 3.62. 60 m açıklık 4 m yükseklik 3500 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.62’den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş 3500 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %35 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 3500 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvveti 250 kN’luk kuvvettir.

- **4000 mm Yükseklikli Takoz**

Aşağıda Şekil 3.63’de 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kiriş ve 4000 mm yüksekliğindeki takozlara mesnetlenmiş öngerme elemanı geometrisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ölçüler m olarak verildi.



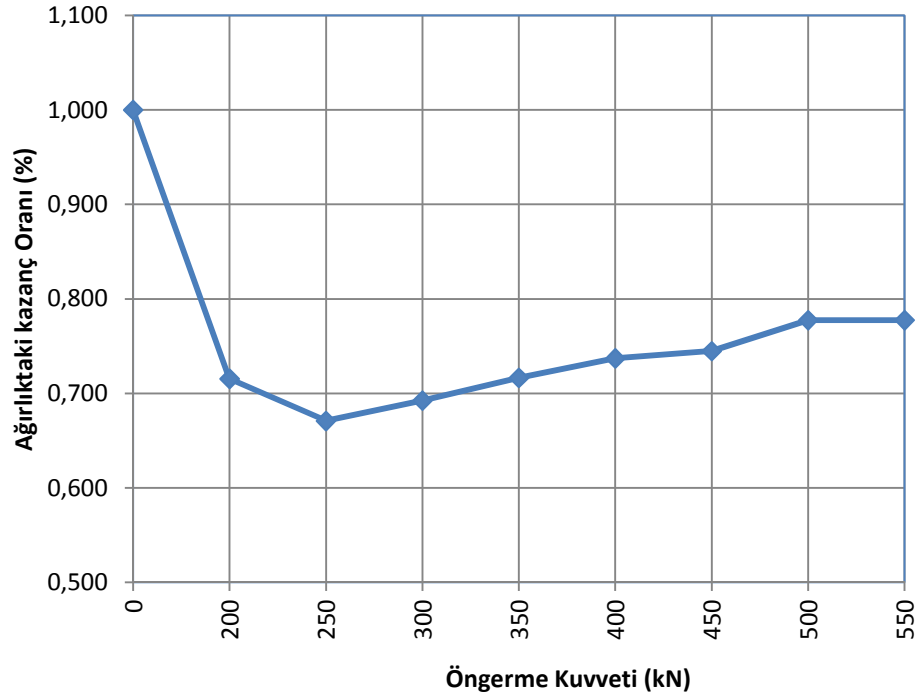
Şekil 3.63. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 4000 mm yükseklikli takoz

Bu düzlem kafes kiriş 50’şer kN’luk artışlarla minimum 200 kN maksimum 550 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. Yapılan bu analizlere ait tasarım sonuçları aşağıda Tablo 3.27’de verildi.

Tablo 3.27. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kiriş – 4000 mm yükseklikli takoz

Öngerme kuvveti	Üstbaşlık	Altbaşlık	Diyagonal	Dikme	Toplam Ağırlık	Ağırlıktaki Kazanç Oranı
kN	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	kN	%
0	7940	6570	4020	1390	98,25	1
200	5940	3760	3360	1070	70,31	0,716
250	5010	3760	3360	1070	65,93	0,671
300	5010	4210	3360	1070	68,05	0,693
350	4710	5010	3360	1070	70,41	0,717
400	4210	5940	3360	1070	72,43	0,737
450	4020	6290	3360	1070	73,18	0,745
500	3760	7940	2700	1230	76,41	0,778
550	3760	7940	2700	1230	76,41	0,778

Yine bu düzlem kafes sisteme ait, uygulanan öngerme kuvvetine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranının değişimini gösteren grafik Şekil 3.64’de verilmektedir.



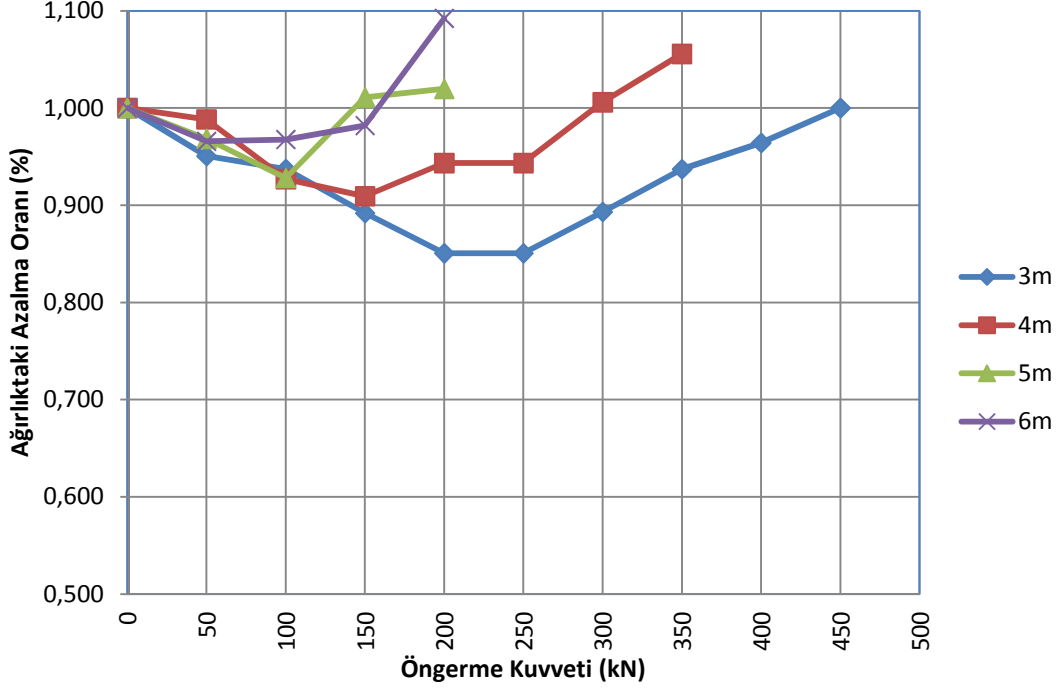
Şekil 3.64. 60 m açıklık 4 m yükseklik 4000 mm takozlu kiriş için ağırlık kazanç oranı değişimi

Şekil 3.64’den de görüleceği üzere 60 m açıklık ve 4 m yüksekliğindeki düzlem kafes kirişe 4000 mm yüksekliğinde takozlar kullanılarak öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %33 tasarruf sağlanmaktadır. Dikkate alınan yükler altında ve 4000 mm yüksekliğinde takozlarla teşkil edilen öngerme elemanı geometrisine göre 250 kN bu düzlem kafes sistem için en uygun öngerme kuvvetidir.

4. BULGULAR ve İRDELEME

Bu tez çalışmasında boru profillerden imal edilmiş ve çeşitli yükseklik ve açıklıklarda farklı öngerme kuvvetleri uygulanan öngerilmeli düzlem çelik kafes kirişlerin kendi ağırlığı, dış yükler ve öngerilme kuvvetleri altında tasarımı yapıldı. Ayrıca bu kafes kirişlerden 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli düzlem kafes kiriş üzerinde öngerme elemanının mesnetlendiği takozların yükseklikleri ile ilgili çalışmalar yapıldı. Analizler sonucu elde edilen veriler, analiz aşamaları ve hesaplar tezin “Yapılan Çalışmalar” bölümünde ayrıntılı olarak anlatıldı. Bu bölümde yapılan analizler sonucu elde edilen verilerin değerlendirmesi ve birbiriyle mukayesesi anlatılmaktadır.

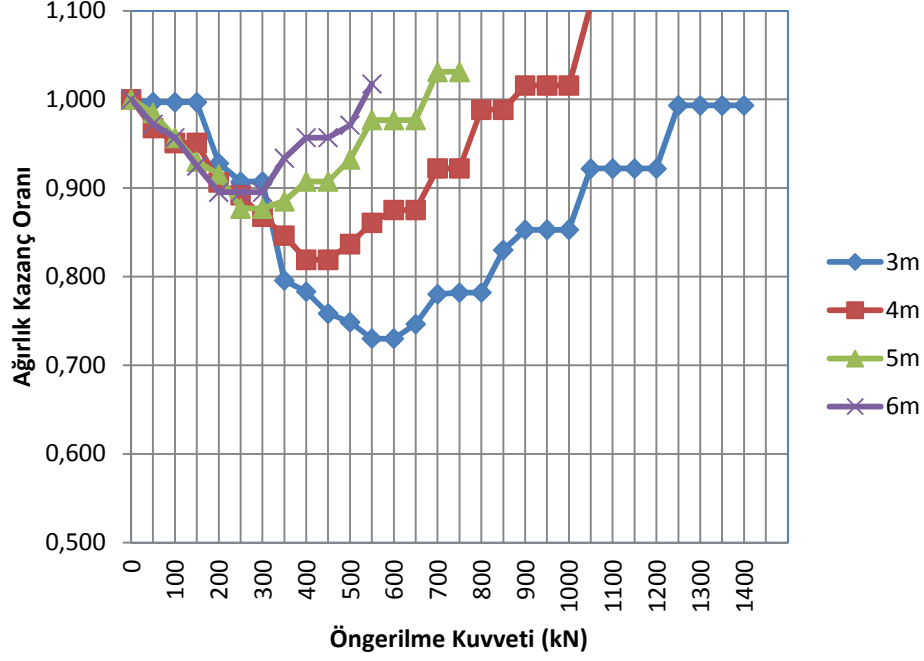
İlk olarak 40 m açıklığa sahip kafes kirişin 3 m, 4 m, 5 m ve 6 m yükseklikler için optimum tasarımı gerçekleştirildi. Bu düzlem kafes kiriş 50’şer kN’luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 450 kN’luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırılmıştır. 3 m, 4 m, 5 m ve 6 m yükseklikler için tasarlanan bu kafes kirişte sırasıyla %15, %10, %8 ve %4 oranında ağırlıktan kazanç elde edildi. Bu oranlar 200 – 250 kN, 150 kN, 100 kN ve 50 kN’luk öngerme kuvvetleri altında elde edildi. Elde edilen bu ağırlıkta kazanç oranlarının değişimi Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. 40 m açıklıklı kafes kiriş için ağırlıktaki azalma oranının öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi

Şekil 4.1' den de anlaşılacağı gibi 40 m açıklıklı düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %15 tasarruf elde edilmiştir. Bu kazanç 3 m yükseklikli düzlem kafes kirişte, 200 kN – 250 kN değerindeki öngerilme kuvveti altında elde edildi. Sonuç olarak 40 m açıklıkta seçilen düzlem kafes ve öngerilme elemanı geometrisi ele alındığında 3 m, 4 m, 5 m ve 6 m yükseklikleri için yapılan tasarımda optimum çözüm 200 kN – 250 kN öngerilme kuvveti altında 3 m yükseklikli kafes kiriş için yapılan çözüm olarak bulundu.

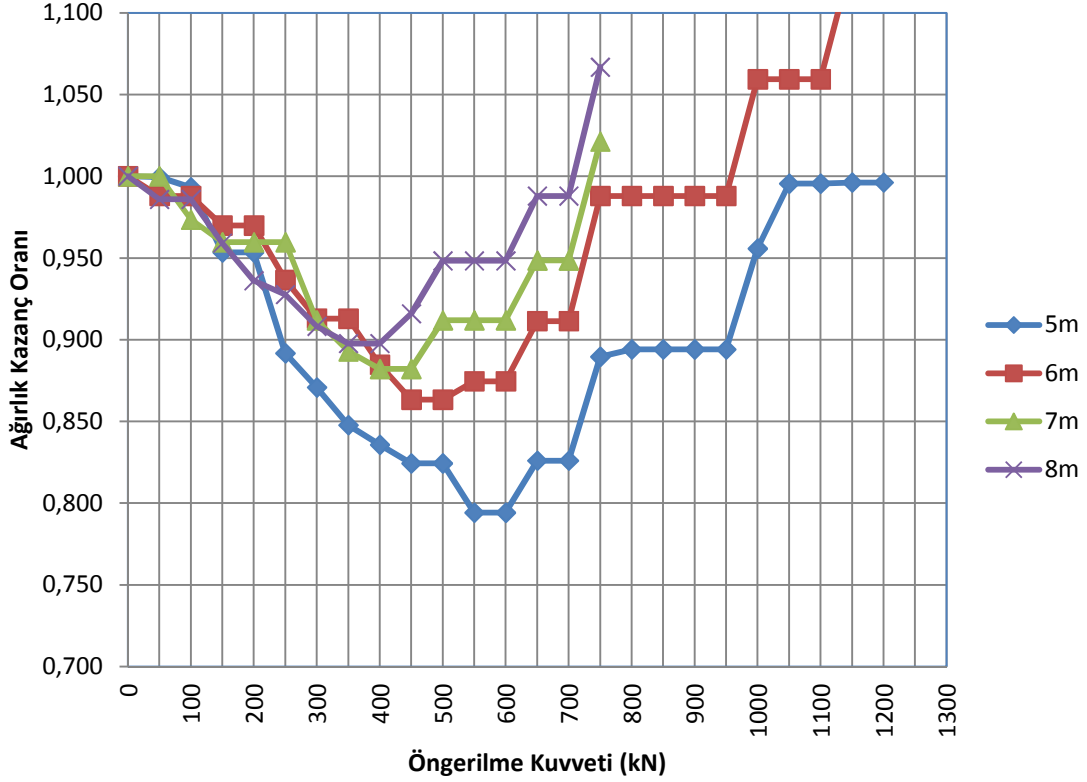
60 m açıklıklı kafes kirişin 3 m, 4 m, 5 m ve 6 m yükseklikler için optimum tasarımı gerçekleştirildi. Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 1400 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. 3 m, 4 m, 5 m ve 6 m yükseklikler için tasarlanan bu kafes kirişte sırasıyla %27, %18, %13 ve %10 oranında ağırlıktan kazanç elde edildi. Bu oranlar 550 kN – 600 kN, 400 kN - 450 kN, 250 kN – 300 kN ve 200 kN - 300 kN'luk öngerme kuvvetleri altında elde edildi. Elde edilen bu ağırlıkta kazanç oranlarının değişimi Şekil 4.2' de görülmektedir.



Şekil 4.2. 60 m açıklıklı kafes kiriş için ağırlıktaki azalma oranının öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi

Şekil 4.2' den de anlaşılacağı gibi 60 m açıklıklı düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %27 tasarruf elde edildi. Bu kazanç 3 m yükseklikli düzlem kafes kirişte, 550 kN – 600 kN değerindeki öngerilme kuvveti altında elde edildi. Sonuç olarak 60 m açıklıkta seçilen düzlem kafes ve öngerilme elemanı geometrisi ele alındığında 3 m, 4 m, 5 m ve 6 m yükseklikleri için yapılan tasarımda optimum çözüm 550 kN – 600 kN öngerilme kuvveti altında 3 m yükseklikli kafes kiriş için yapılan çözüm olarak bulundu.

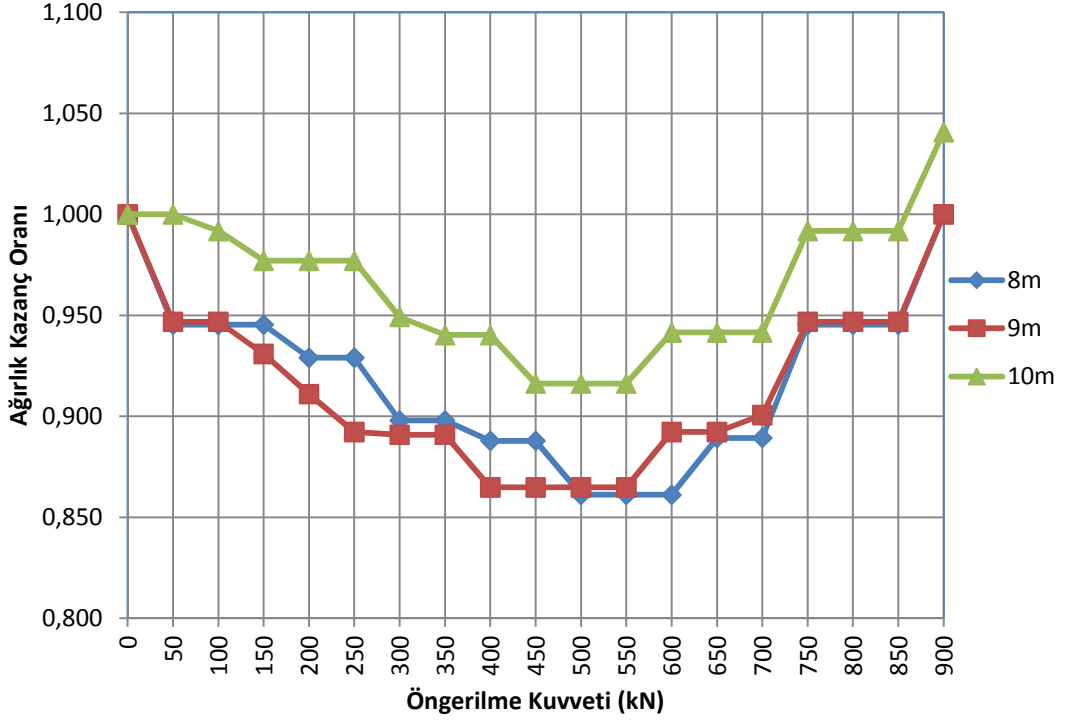
80 m açıklık için seçilen düzlem kafes kirişin 5 m, 6 m, 7 m ve 8 m yükseklikler için optimum tasarımı gerçekleştirildi. Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 1300 kN'luk öngerme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. 5 m, 6 m, 7 m ve 8 m yükseklikler için tasarlanan bu kafes kirişte sırasıyla %21, %14, %12 ve %10 oranında ağırlıktan kazanç elde edildi. Bu oranlar 550 kN – 600 kN, 450 kN - 500 kN, 400 kN – 450 kN ve 350 kN - 400 kN'luk öngerme kuvvetleri altında elde edildi. Elde edilen bu ağırlıkta kazanç oranlarının değişimi Şekil 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.3. 80 m açıklıklı kafes kiriş için ağırlıktaki azalma oranının öngerilme kuvvetine bağlı olarak değişimi

Şekil 4.3'den de anlaşılacağı gibi 80 m açıklıklı düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %21 tasarruf elde edildi. Bu kazanç 5 m yükseklikli düzlem kafes kirişte, 550 kN – 600 kN değerindeki öngerilme kuvveti altında elde edilmiştir. Sonuç olarak 80 m açıklıkta seçilen düzlem kafes ve öngerilme elemanı geometrisi ele alındığında 5 m, 6 m, 7 m ve 8 m yükseklikleri için yapılan tasarımda optimum çözüm 550 kN – 600 kN öngerilme kuvveti altında 5 m yükseklikli kafes kiriş için yapılan çözüm olarak bulundu.

100 m açıklık için seçilen düzlem kafes kirişin 8 m, 9 m ve 10 m yükseklikler için optimum tasarımı gerçekleştirildi. Bu düzlem kafes kiriş 50'şer kN'luk artışlarla minimum 50 kN, maksimum 900 kN'luk öngerilme kuvvetleri altında boyutlandırıldı. 8 m, 9 m ve 10 m yükseklikler için tasarlanan bu kafes kirişte sırasıyla %14, %14 ve %8 oranında ağırlıktan kazanç elde edildi. Bu oranlar 500 kN – 600 kN ve 400 kN - 550 kN'luk öngerilme kuvvetleri altında elde edildi. Elde edilen bu ağırlıkta kazanç oranlarının değişimi Şekil 4.4'de görülmektedir.

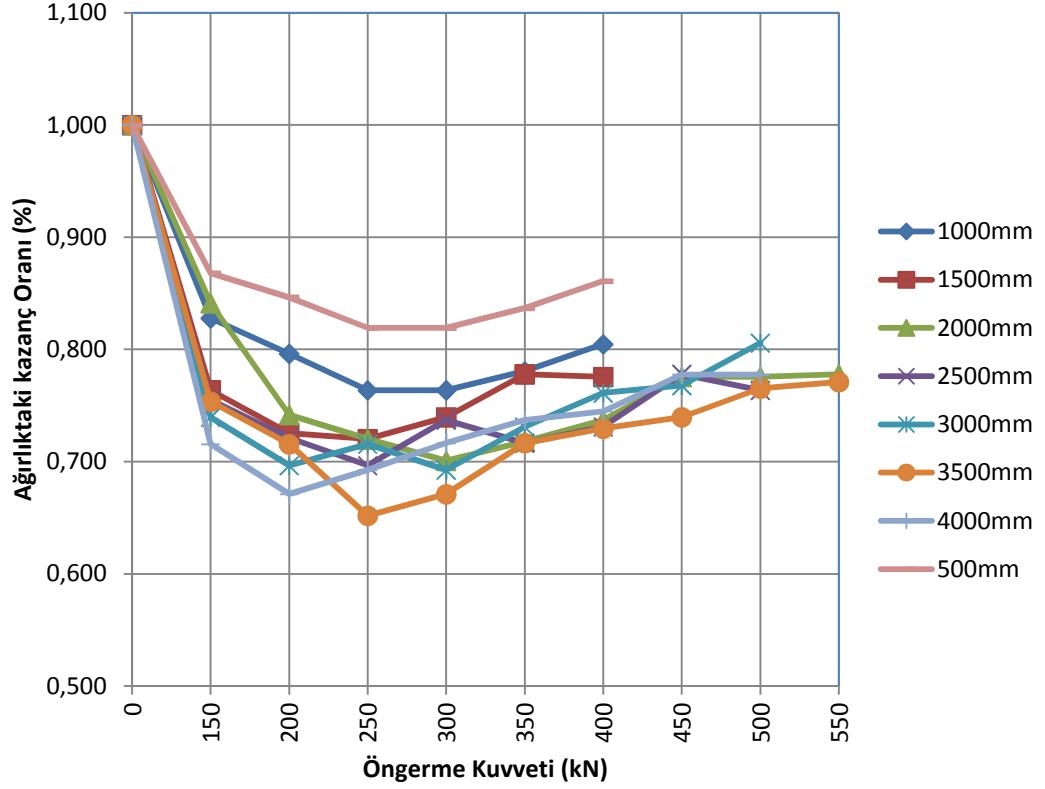


Şekil 4.4. 100 m açıklıklı kafes kiriş için ağırlıktaki azalma oranının öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi

Şekil 4.4' den de anlaşılacağı gibi 100 m açıklıklı düzlem kafes kirişe öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %14 tasarruf elde edildi. Bu kazanç 8 m ve 9 m yükseklikli düzlem kafes kirişte, 400 kN – 600 kN değerindeki öngerilme kuvveti altında elde edildi. Sonuç olarak 100 m açıklıkta seçilen düzlem kafes ve öngerilme elemanı geometrisi ele alındığında 8 m, 9 m ve 10 m yükseklikleri için yapılan tasarımda optimum çözüm 500 – 600 kN ve 400 – 550 kN' luk öngerilme kuvvetleri altında 8 m ve 9 m yükseklikli kafes kirişlerin ikisi için de yapılan çözümler olarak bulundu.

60 m açıklıklı ve 4 m yükseklikli düzlem kafes kiriş üzerinde bir takoz yükseklik optimizasyonu yapıldı. Bunun için 200 mm ile 500 mm arasında 100'er mm artan yükseklikteki takozların yükseklik değişimlerinin, elde edilecek tasarrufa katkısı incelendi. Beklenildiği üzere takoz yüksekliğinin 200 mm ile 500 mm arasında değişiminin sonuçları pek fazla etkilemediği görüldü. Bunun ardından 500 mm ile 4000 mm arasında 500'er mm aralıklarla artan takoz yüksekliklerinin ağırlıkta elde edilen kazanç katkısı araştırıldı. Seçilen düzlem kafes kirişe 50'şer kN'luk artışlarla minimum 150 kN, maksimum 550 kN'luk öngerme kuvvetleri uygulanarak sistem analiz edildi. 500 mm ile 4000 mm arasında

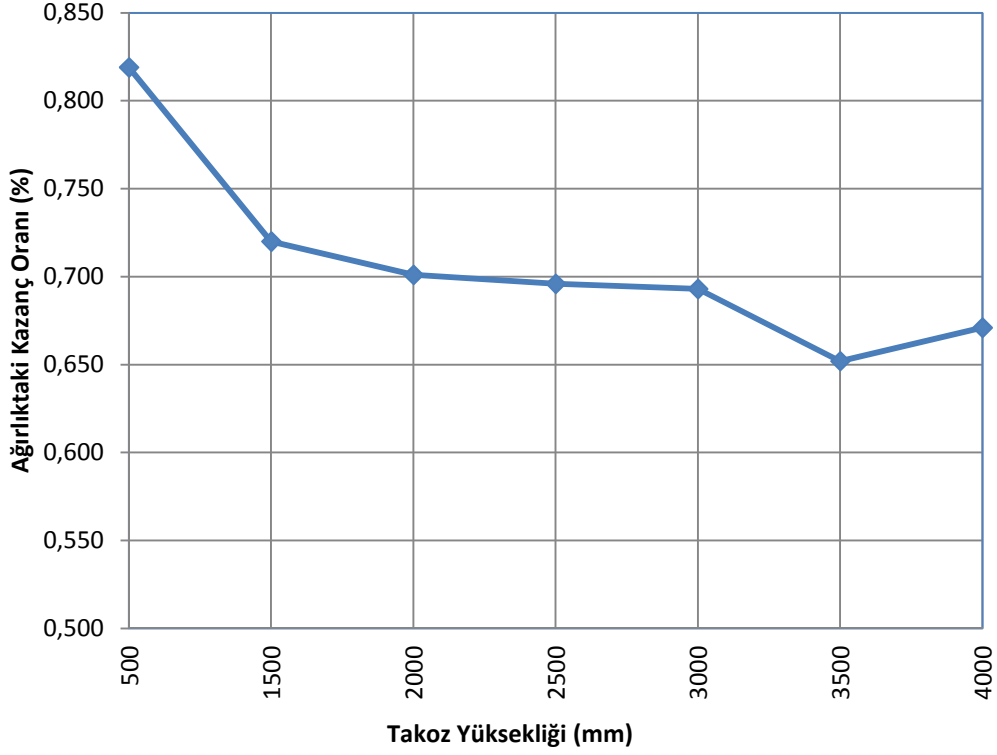
yüksekliklere sahip takozlar için sırasıyla, %18, %24, %28, %30, %31, %31, %35, %33 oranlarında kazançlar elde edildi. Bu oranlar 250, 300, 350, 400 ve 450 kN'luk öngerme kuvvetleri altında elde edildi. Elde edilen bu ağırlıkta kazanç oranlarının değişimi Şekil 4.5'de görülmektedir.



Şekil 4.5. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kafes kirişte takoz boylarının ağırlıktaki azalma oranına etkisiyle öngerme kuvvetine bağlı olarak değişimi

Şekil 4.5' den de anlaşılacağı gibi 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli düzlem kafes kirişe, 500 mm ila 4000 mm arasında değişen yüksekliklere sahip takozlar teşkil edildiğinde, öngerilme uygulanmak suretiyle maksimum %35 tasarruf elde edildi.

Şekil 4.6' da takoz yüksekliklerine bağlı olarak ağırlıktaki maksimum kazanç oranının değişimi verilmektedir.



Şekil 4.6. 60 m açıklıklı 4 m yükseklikli kirişte takoz yüksekliklerine bağlı olarak ağırlıktaki kazanç oranlarının değişimi

Şekil 4.6' dan da anlaşılacağı üzere takoz yüksekliği arttıkça ağırlıkta genel bir azalma olmaktadır. Takoz yüksekliklerine bağlı olarak ağırlıktaki kazancın değişimine ilişkin yapılan araştırma 4000 mm yükseklikli takozda sonlandırıldı. Takoz yükseklik araştırmasının yapılması için seçilen sistemin yüksekliği 4 m olduğundan, 4 m'den daha büyük bir yüksekliğin takoz elemanları için kullanılmasının uygun olmayacağı düşünüldüğünden, çalışmada yapılan son analiz 4000 mm yükseklikli takoza aittir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada Bölüm 3.1’de tanıtılan sisteme ait 40 m, 60 m, 80 m ve 100 m açıklığa sahip paralel başlık öngerilmeli düzlem çelik kafes kirişlerinin minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılması araştırıldı. Öngerme elemanın alt başlığın her iki ucunda yer alan mesnetlere ankrajlandığı ve alt başlığın altına yerleştirilen takozlar yardımıyla şekillendirildiği varsayıldı. Tasarımda alt başlık ve üst başlıkta yer alan çubukların tamamının, düğüm noktalarından, kafes düzleme dik doğrultudaki hareketlerinin tutulduğu kabul edildi. Yapılan bu çalışma ile aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşıldı.

- Düzlem çelik kafes kirişlere öngerilme uygulamak suretiyle %35’e varan oranlarda yapı çeliği malzemesinden tasarruf sağlanabilmektedir. Takoz yüksekliği 500 mm ile sınırlandırıldığı durumda malzeme tasarrufu maksimum %24 olmaktadır.
- Özellikle kiriş uzunluğu arttıkça ve kiriş yüksekliği azaldıkça, çelik kafes kirişlere öngerilme uygulanmak suretiyle daha büyük malzeme tasarrufları sağlanmaktadır.
- Çelik kafes kirişin alt başlığının altına öngerme uygulanmak suretiyle, alt başlık boyutu büyük ölçüde azaltılabilmekte, diyagonal ve dikme boyutları az miktarda azaltılabilmektedir. Ancak, üst başlık kesitinde pek bir değişime neden olmamaktadır.
- Genel olarak çelik kafes kiriş yüksekliği azaldıkça minimum ağırlıklı boyutlandırma için uygulanması gereken öngerme kuvveti artmaktadır.
- Takoz yüksekliği arttıkça (kiriş yüksekliğine kadar) genel olarak malzemede sağlanan tasarruf artmaktadır. Öngerme için gerekli kuvvet ise azalmaktadır.

Bu sonuçların yanı sıra bu çalışma neticesinde, bundan sonra benzer konuda yapılacak çalışmalar için aşağıda sıralanan öneriler getirilebilir.

- Deneme yanılma yerine bir optimizasyon yönetimi kullanmak suretiyle, minimum ağırlıklı boyutlandırma için en uygun öngerme kuvvetinin değeri ve takoz yüksekliği daha hızlı bir şekilde ve daha etkili olarak belirlenebilir.
- Bu çalışmada sadece yapı çeliği miktarındaki azalma incelendi. Bununla birlikte birleşim elemanları ve öngerme uygulama maliyeti de hesaba katılmak suretiyle ağırlık yerine toplam maliyet dikkate alınarak daha gerçekçi bir optimizasyon yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Arda TS, Yardımcı N (2000). Çelik Yapıda Öngerme. Birsen Yayınevi, 92s, İstanbul.
- Aydın Z (2006). Öngerilmeli Beton Kirişli Köprü Üstyapılarının Genetik Algoritma İle Optimum Tasarımı. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Belletti B, Gasperi A (2010). Behavior of Prestressed Steel Beams. Journal of Structural Engineering-ASCE, 136:1131-1139.
- Brodka J, Jerka-Kulawinska K, Kwasniewski M (1968). Vorgespannte Stahlträger Statische Berechnung. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 90s, Köln-Braunsfeld.
- Brodka J, Klabukowski J (1969). Vorgespannte Stahlkonstruktionen. Verlag von Wilhelm Ernst&Sohn, 180s, Berlin-München.
- Brown RH (1975). Minimum Cost Selection of One-Way Slab Thickness. Journal of Structural Division, 101: 2585-2590.
- Deren H, Uzgider E, Piroğlu F (2005). Çelik Yapılar. Çağlayan Kitabevi, 820s, İstanbul.
- Friel LL (1974). Optimum Singly Reinforced Concrete Sections. ACI Journal, 71: 556-558.
- GE Jiaqi ve ark. (2007). Design And Research Of The Large-Span Steel Structure Of The Badminton Gymnasium For 2008 Olympic Games. Çin, www.caod.oriprobe.com/articles/13287697/Design_and_research_of_the_large_span_steel_structure_of_the_badminton.htm , (erişim tarihi, 15.05.2011).
- Guo ZX, Shi KR (2005). New Development of Construction Technology for Prestressed Steel Structures. International Symposium on Innovation and Sustainability of Structures in civil Engineering-Including Seismic Engineering, Innovation & Sustainability of Structures, Volume 1-3, 1104-1122.
- Herrle K (2009). Variantenuntersuchung von vorgespannten und nicht vorgespannten Stahlfachwerken als Abfangkonstruktion für die neue Messehalle in Basel. Lisansüstü Tezi, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg.
- Jia YM, Liang DW (2011). Numerical Analysis of Prestressed Steel Box Beams. International Conference on Structures and Building Materials, Volume 163-167, 862-865, Guangzhou.
- Karaesmen E (2002). Ardgermeli Beton ve Yeni Çözümler. Freysaş-Freyssinet Yapı Sistemleri San. A.Ş. 153s, İstanbul.
- Kocer FY, Arora JS (1996). Design of Prestressed Concrete Transmission Poles: Optimization Approach. Journal of Structural Engineering, 123:804-814.
- Ozcatalbas Y, Ozer Y (2006). Investigation of Fabrication and Mechanical Properties of Internally Prestressed Steel I Beam. Materials & Design, 28:1988-1993.

- Odabaşı Y (2000). Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları. Beta Yayınları. 479s, İstanbul.
- Özden K, Trupia AL, Eren İ, Öztürk T (1994). Öngerilmeli Beton. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası. 379s, İstanbul.
- Öztürk AZ (1979). Öngerilmeli Çelik Konstrüksiyonlar Hesap ve Konstrüksiyon Esasları. Doktora Tezi, İstanbul Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi İnşaat Bölümü, İstanbul.
- Ronghe GN, Gupta LM (1999). Study of Tendon Profile on the Analysis and Design of Prestressed Steel Beams. 2nd International Conference on Advances in Steel Structures, Advances in Steel Structures, Volume 1-2, 921-929.
- Saka MP (1980). Çelik Kafes Sistemlerin Şekil Optimizasyonu. Doçentlik Tezi, K.T.Ü., Trabzon.
- Simoes LMC, Negrao JHO (1994). Sizing and Geometry Optimization of Cable-Stayed Bridges. Computers and Structures. 52: 309-321.
- TS 3233 (1979). Öngerilmeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. TSE. 52s, Ankara.
- TS 3721 (1988). Öngerilmeli Beton İçin Çelik Teller. TSE. 18s, Ankara.
- TS 498 (1997). Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri. TSE. 19s, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Ebru ÇAKIR 1984 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. Lisans öğrenimini 2003-2007 yılları arasında Trakya Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2008 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve halen devam etmektedir. Bekâr olan ÇAKIR, Almanca bilmekte ve halen özel bir şirkette proje mühendisi olarak çalışmaktadır.