



Eğrisel Alt Başlıklı Çelik Kirişlerin Ön Germeli Davranışının İncelenmesi

Analyzing Pre-Stressed Steel Beams with Lower Flange Arch Shape

Erkan Polat¹, Barlas Özden Çağlayan²

¹Istanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Ayazağa Kampüsü 34469, Maslak İstanbul, TÜRKİYE

²Istanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü 34469, Maslak İstanbul, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 12/12/2022

Kabul / Accepted: 30/05/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2023

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2023

Öz

Bu çalışmada, daha önce teorik ve deneysel çalışmaları yapılan alt başlıklı eğrisel, ön germeli I kirişin, kiriş eğrisel alt başlık formuna göre burkulma davranışı incelenip ideal kesit formunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için Sap 2000 programında 250 kadar sonlu elemanlar modeli hazırlanarak lineer elastik burkulma analizleri yapılmıştır. İlaveten FEMAP (Nastran) Sonlu elemanlar analizi programı ile de deneysel modele uygun solid sonlu elemanlar modeli oluşturulup nonlineer burkulma analizi yapılmıştır. Bu modellerde kiriş başlığı açıklık boyunca herhangi bir mesnetle desteklenmemiştir. Analizler sonucunda kiriş alt başlığının eğriselliği arttıkça burkulma yükü katsayısının arttığı görülmüştür. Ön germe kuvvetine ve açıklığa bağlı olarak, kiriş orta yüksekliği (h) / kenar yüksekliği (H) oranına göre yaklaşık $h/H = 0,6$ oranından düşük değerlerden itibaren, burkulma yükü katsayısının belirgin bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu davranışa kemer şeklini alan kiriş alt başlık levhasının burulmaya karşı gösterdiği direncin etkili olduğu yapılan analizlerle ıspatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Öngermeli çelik kiriş, Burkulma analizi, Sonlu elemanlar analizi, Alt başlıklı Eğrisel I kiriş, Kemer Kiriş”

Abstract

In this study, it is aimed to determine the ideal section height according to the beam mid-section height by examining the buckling behavior of pre-stressed beam with the lower flange arch shape of which theoretical and experimental studies have been done before, For this, about 250 finite element models were prepared in the Sap 2000 program and linear buckling analyzes were performed. In addition, with the FEMAP (Nastran) Finite Element Analysis program, a solid finite element model prepared and nonlinear buckling analysis was performed. In these models, the beam head is not supported by any support along the span. As a result of the analysis made, it was seen that the buckling coefficient increased as the curvature of the lower beam flange increased. . Depending on the pre-tension force and span, it was observed that the buckling load coefficient increased significantly from values lower than the ratio of $h/H = 0.6$ according to the beam middle height (h) / edge height (H) . It has been proved by the analyzes that the resistance of the lower flange plate of the beam, which takes the form of an arch, against torsion is effective in this behavior.

Key Words

“Pre-stressed arch beams, Buckling analysis, Beams with Lower Flange Arch Shape, Finite elemnet analysis”

1. Giriş

Alt Başlığı Eğrisel Çelik I Kirişin (AEIÇK) geliştirilmesindeki amaç, kirişin seçilen açıklık boyunca yanal burkulmaya veya burulmaya karşı herhangi bir yatay mesnetleme yapmadan, kirişin serbest bir şekilde üzerindeki yükleri güvenle taşımasıdır. Bunun yanında kirişe mimari estetik görünüm kazandırmak, kirişe zarar vermeden ve kat yüksekliğinden fedakarlık etmeden, mekanik, elektrik tesisatı gibi geçişlere yer açmak diğer önemli amaçlarındandır. Bu kiriş, özellikle açıklık boyunca kiriş yanal ötelenmesi tutulması istenmeyen veya kısıtlı olan yapılarda kullanılması avantajlı olacaktır.



Şekil 1. Öngermeli eğrisel alt başlıklı I kiriş için örnek görünüşü.

Daha önce Polat ve Çağlayan (2018) tarafından AEIÇK için yapılan deneylerde, 6 m. uzunluğundaki alt başlığı eğrisel kiriş, yatayda kiriş boyunca tutulmadan akma gerilmesine kadar herhangi bir elastik burkulma gözlenmeden yüklenen düşey yükleri taşımış, plastik sınırdan sonra basınç başlığındaki yerel burkulma ile kapasiteye ulaşmıştır. Bu veriler sonucunda teorik model ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp, deney sonuçlarının teorik model ile birebir örtüştüğü gösterilmiştir. Bu çalışmada aynı kiriş boyutları referans alınarak diğer analizler yapılmıştır.

Bu çalışmada ideal kiriş alt başlık formunun bulunması için farklı formdaki kirişlerin burkulma yükü katsayılarını belirlenmesi hedeflenmiştir. Önceki çalışmalara ek olarak FEMAP (Nastran) Sonlu elemanlar analizi programı ile de solid sonlu elemanlar modeli oluşturulup kirişin nonlineer analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerin birbirleriyle ve laboratuvarında yapılan test sonuçları ile tutarlı sonuç vermelerine dayanarak, farklı açıklıklar ve kiriş yükseklikleri için Sap 2000 de Shell elemanlar ile modeller hazırlanıp, kirişlerin burkulma davranışları incelenmiştir.

Literatürde yapılan araştırma sonucunda öngermeli çelik kemer kirişi ve çelik kemer köprülerin davranışı hakkında sınırlı deneysel çalışmalara rastlanmıştır.

Öngermeli çelik kirişlerle ilgili yapılan çalışmalardan bazıları şunlardır.

Literatürdeki ilk çalışma Whipple (1847) 'a aittir, dökme demir elemanların zayıf çekme kapasitelerini öngörme yoluyla telafi ettiğini fark etmiştir. Coff (1950), 76.2 metre uzunluğunda öngermeli çelik kirişli köprü üzerinde çalışmıştır. Magnel (1950-1954), halatları kirişin içine yerleştirmiş ve (gerilme uygulanan) bir çelik kirişin öngermeli deneysel sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bir sonraki araştırmasında, çekme kablolarındaki kaybı ölçebildi. Barnett (1957), Ağırlık ile öngermeli rot kolu ile Queen Post kirişi üzerinde çalışıldı. % 30'un üzerinde kapasite artışı elde etti. Petrov (1965-1967), tüm kiriş uzunluğu boyunca kablolarla tasarım yapmak için öngermeli çelik kirişlerin parametresi üzerinde çalışmıştır. Tochacek ve Mehta (1972), öngermeli çelik yapılar için güvenlik sorununun %20'ye kadar azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Bradford (1991) öngermeli çelik kirişlerin burkulması üzerinde çalışmıştır. Özçatalbaş ve Özer (2007) içten öngermeli çelik I kiriş üretimi ve mekanik özellikleri incelenmiş, Park (2010) tendonlarla öngermeli kirişler için saptırıcı kullanıldığında eğilme kapasitesinin %30-40 oranında arttığını bulmuşlardır. Ren et ve diğerleri (2018), çoklu tendonlarla incelenen çelik derin kirişlerin eğilme özelliklerini araştırmışlardır.

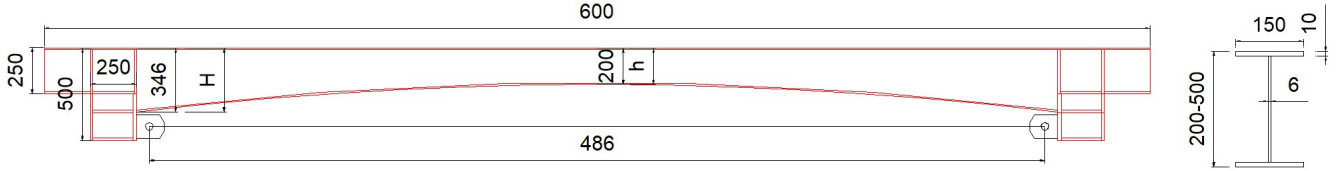
Öngermeli kemer kirişleri ile ilgili yapılan çalışmalar ise;

Austin ve Ross (1976), kemerlerin anti-simetrik burkulmasına yönelik, kritik yüklerin ve kritik reaksiyonların tanımlanması için analiz yöntemleri önerilmiştir. Pi ve Trahair (1999), çelik yay şeklindeki kirişlerin burkulma parametrelerini incelediler. Nazir (2003) Kemer köprüler üzerinde çalıştı ve öngermeli çelik kemerlerin köprü yük kapasitesine etkisi üzerine teorik araştırmalar yaptı. Dou ve diğerleri (2015-2018), sonlu eleman analizlerini kullanarak, düzlem içi pimli çelik kemerlerin eğilme-burulma nihai direnci ve çelik kafes kemerlerin düzlem içi elasto-plastik burkulma ve mukavemet tasarımı ile ilgili testler üzerinde çalışmıştır. Bharathi ve Kumar (2016) öngörme kullanarak mevcut kemer köprülerin yük kapasitesini arttırmayı incelediler. Sonuçlar, açıklıkları değişen kemer köprüler için karşılaştırıldı.

2. Modelleme ve Metot

İdeal kiriş alt başlık formunun bulunması için farklı alt başlık formundaki kirişlerin burkulma yükü katsayılarını bularak, katsayıların en yüksek olduğu durumdaki kiriş formunun belirlenmesi amaçlanmaktadır. Burkulma yükü katsayısı, sistem burkulma yükünün (F_b), halihazırda uygulanan yüke (F) oranının (F_b/F) bir göstergesidir. Bir başka deyişle burkulmaya karşı güvenlik faktörüdür. Burkulma yükü katsayısı 1 den büyük ise sistemde burkulma beklenmez. 1'e eşit veya küçükse sistemde burkulma beklenir.

Yapılan analizlerde 6m. boyunda, 346 mm. kenar ve 200 mm. orta kiriş yüksekliği olan kiriş referans alınmıştır. Kiriş sol ve sağ uçlarda mesnetlere serbest olarak oturmaktadır.



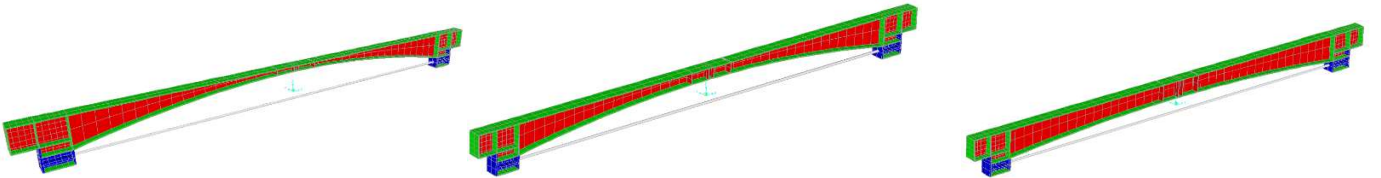
Şekil 2. Eğrisel alt başlıklı I kiriş kesiti, kenar ve orta yüksekliği

Kiriş ve halat malzeme özellikleri aşağıdaki gibidir.

Çelik kiriş malzemesi : S235 JR f_y : 235 MPa

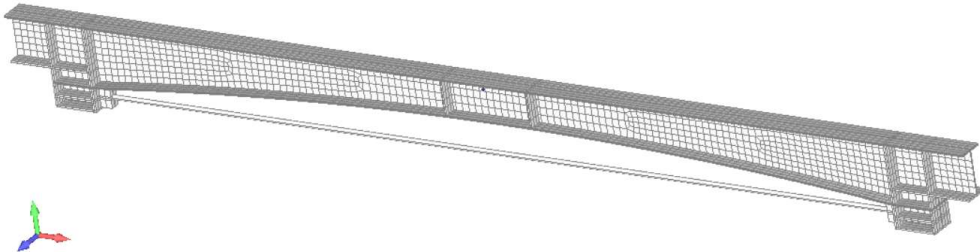
Öngerme halatı çapı Φ 28mm. TS1918 / 14 (AISI 316) f_u : 180 /mm²

Değişken kesitli bu kiriş için basınç başlığı emniyet gerilmesi 14.4 kN olarak hesaplanmıştır. Kirişe verilen ön germe kuvveti ile (ters moment etkisi oluşturacağından dolayı) kiriş alt başlığında basınç emniyet gerilmesinin biraz altında 10 kN/cm² basınç gerilmesi oluşturacak şekilde 98.1 kN olarak seçilmiştir. Sap2000 Modelinde öngerme kuvveti, kirişe negatif sıcaklık farkı verilerek tanımlanmıştır. Düşey yük olarak kiriş üst başlık basınç gerilmesi 13.1 kN/cm² ulaşacak kadar (66.34 kN) tekil yük yüklenmiştir. Bu tekil yük, her bir farklı kirişte aynı değerde kalacak şekilde kiriş açıklığı, 4m., 6m. ve 8m. için, kiriş kenar yüksekliği H: 340mm. ve 500 mm. için , kiriş orta yüksekliği 20 mm. artımlar ile h: 20mm~340mm. aralığı için ve öngerme kuvveti 20 kN, 50 kN 100 kN ve 150 kN değerlerinin her bir durumu için 250 kadar farklı sonlu elemanlar modeli analiz edilerek, burkulma yükü katsayısı değerleri bulunmuştur.



Şekil 3. Sap 2000 de modellenen değişik formdaki eğrisel alt başlıklı kiriş örnekleri

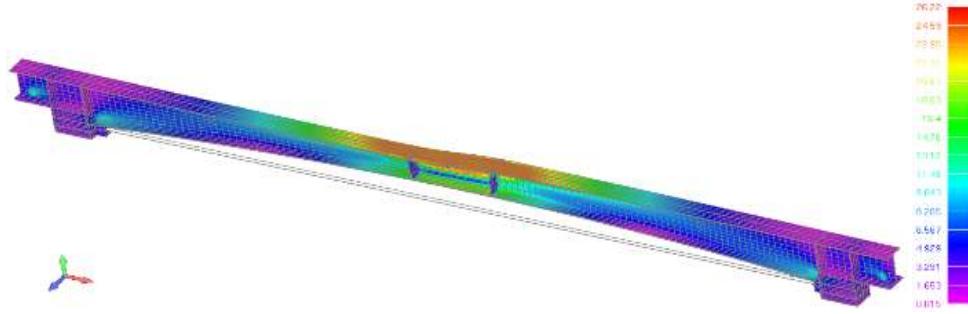
Sap 2000 lineer elastik sonlu elemanlar analizine ilave olarak, yine yukarıda verilen referans AEIÇK için Femap (Nastran) programında da nonlineer analizi için solid sonlu elemanlar modeli hazırlanıp analiz edilmiştir. Femap (Nastran) programındaki nonlineer analizde malzeme ve geometrik açıdan nonlineer durum geçerlidir. Sap 2000 de bulunan burkulma yükleri, elastik burkulma yükleridir.



Şekil 4. FEMAP Femap (Nastran) Solid Sonlu elemanlar modeli ,

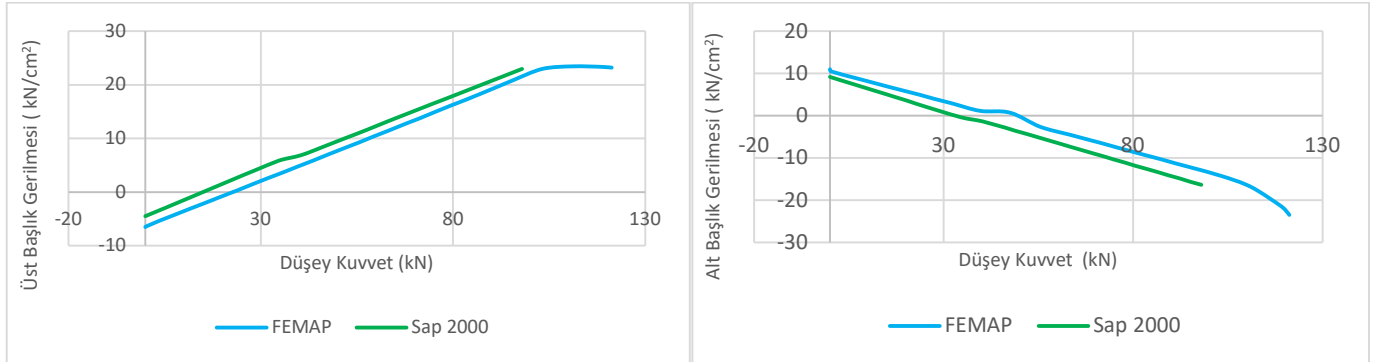
3. Analiz Sonuçlarının İrdelenmesi

Kiriş ortasında yüklenecek 66,34 kN değerindeki düşey tekil yük altında kiriş üst başlığında 13kN/cm^2 emniyet gerilmesine ulaşılmakta ve bu yük altında yapılan nonlineer burkulma analizi sonucunda ise 137,4 kN burkulma yükü bulunmuştur. Bu durumda nonlineer burkulma yükü katsayısı $137,4 / 66,34 = 2,07$ olmaktadır. Sap 2000 de ise elastik burkulma yükü katsayısı 1,8 olarak bulunmuştur. Bu burkulma yük katsayılarına göre yük güvenle taşınmaktadır denilebilir.



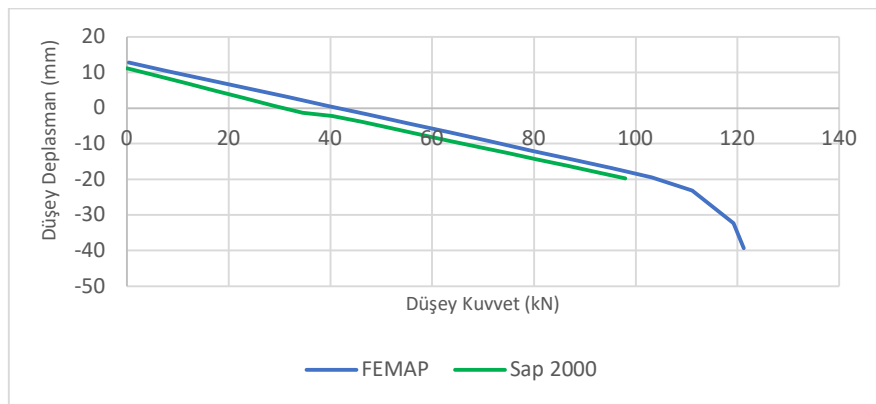
Şekil 5. FEMAP (Nastran) sonlu elemanlar modeli – nonlineer burkulma analizi sonucu

FEMAP (Nastran) sonlu elemanlar modeli ile yapılan analizde her yük artımı için Sap 2000 ve deney sonuçları ile benzer gerilme ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Farklı programlardan tutarlı sonuç elde edilmesi modellerin doğru girdiğini ve sonuçların doğruluğunu güçlendirmektedir.



(a)

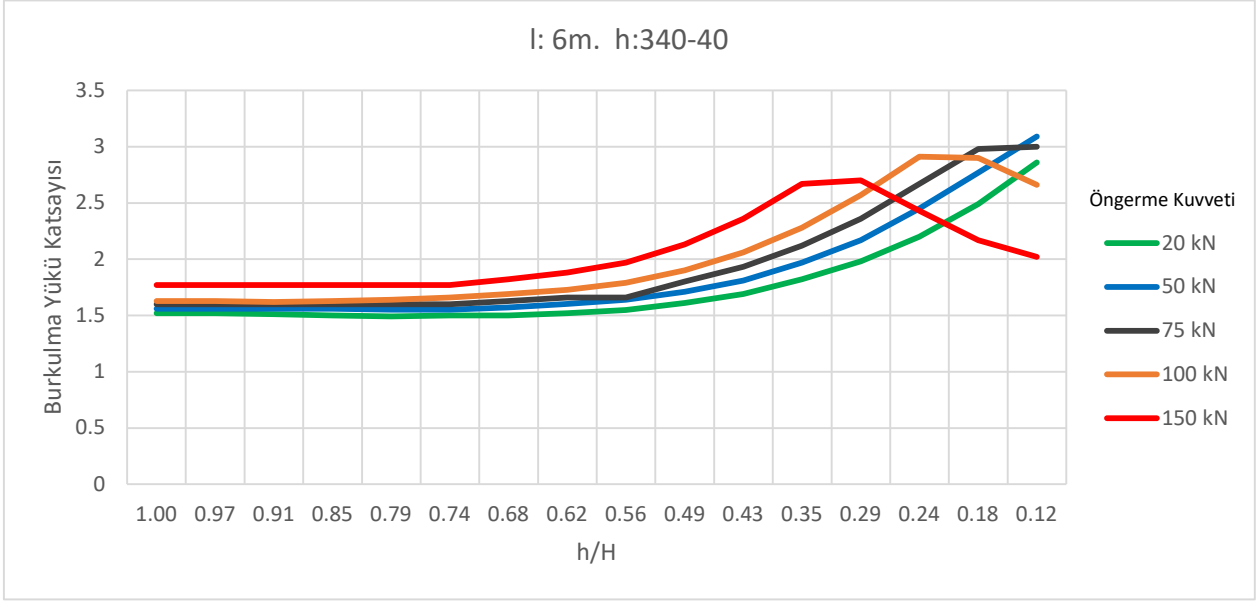
(b)



(c)

Şekil 6. FEMAP (Nastran) – Sap 2000 analiz sonuçlarına göre Kiriş alt (a) – üst (b) başlık gerilme ve düşey deplasman (c) karşılaştırma grafiği

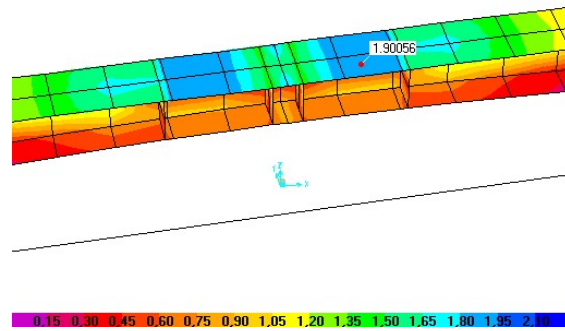
6m. boyundaki kiriş ele alındığında farklı orta yükseklikteki (formdaki) kirişler için h/H oranına göre Sap 2000 de hesaplanan burkulma yükü katsayısının değişim grafiği Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 7. 6 m. kiriş boyu için farklı ön germe kuvvetleri ve farklı kiriş orta yükseklikleri için bulunan burkulma yükü katsayıları grafiği

Şekil 6 de verilen grafik incelendiğinde, kiriş burkulma yükü katsayısı, kiriş orta yüksekliği yaklaşık $h/H = 0,6$ oranına kadar her öngerme kuvveti için fazla değişiklik göstermeden kalmaktadır. Diğer bir değişle kiriş başlıklarındaki gerilme limit değerleri aşılmıyorsa kiriş taşıma kapasitesi burkulma olmadan halen sağlanıyor demektir. 0,6 oranından sonra öngerme kuvveti arttıkça burkulma katsayısının yükseldiği fakat kiriş orta yüksekliğinin azaldığı kirişlerde düştüğü görülmektedir. Öngermenin düşük olduğu durumda ise düşük orta yüksekliğe sahip kirişlerde burkulma katsayısının belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu koşullar altında kesit yüksekliği azaldığı için kesit ortasında gerilmeler artacaktır ancak, malzeme kalitesi veya kiriş ortasında kiriş başlıklarının et kalınlığı artırılarak, gerilme yönetmeliklerin tanımladığı sınırlara getirilebilir.

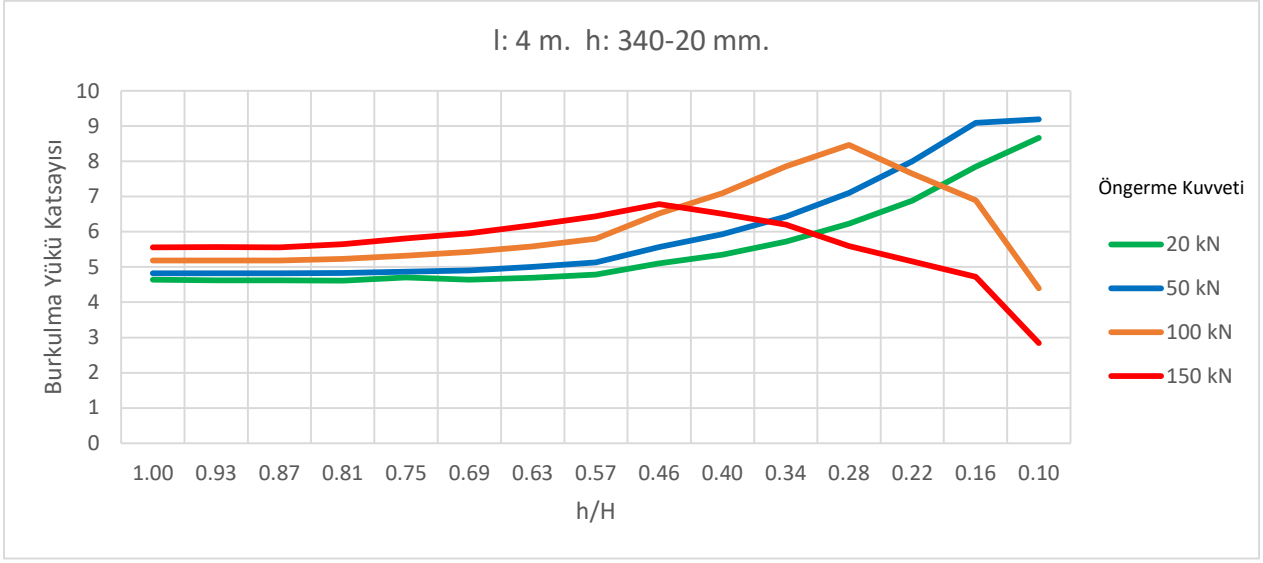
Örneğin kiriş yüksekliği ortada 100 mm olduğunda aynı düşey yük altında ve 2 ton ön germe kuvveti ile kiriş üst başlığında oluşan gerilme $1,9 \text{ t/cm}^2$ ye ulaşmaktadır.



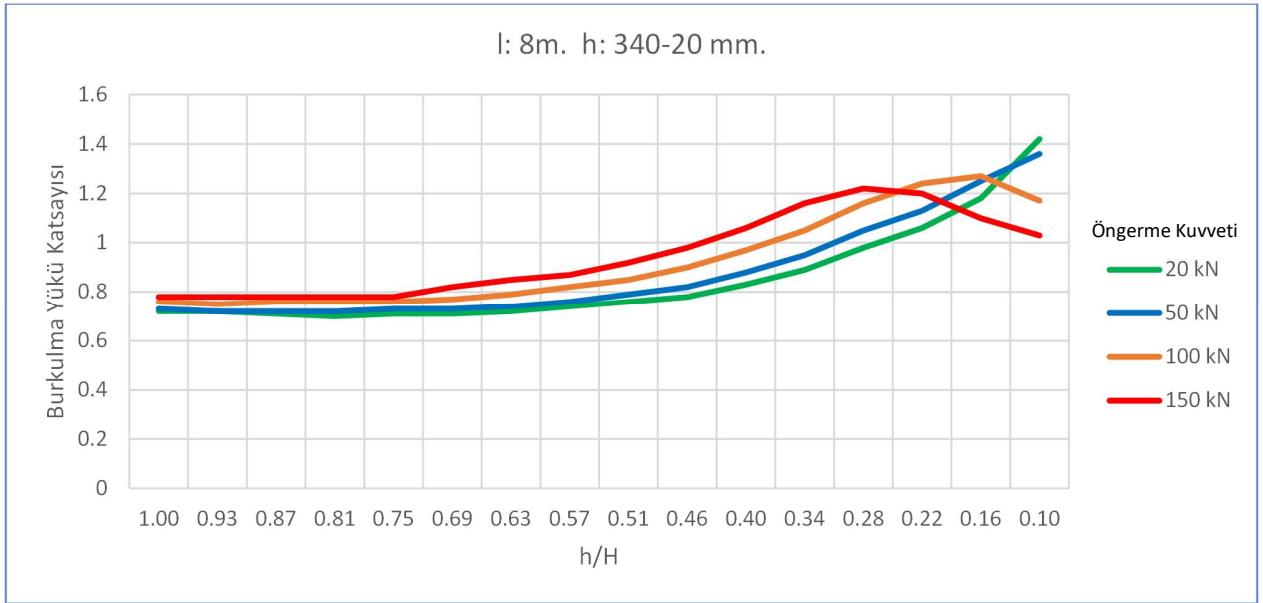
Şekil 8. 100 mm orta yükseklikteki kiriş gerilme grafiği (t/cm^2)

Sadece kiriş üst başlığında orta kısımda ki levha kalınlığı 10 mm den 15 mm ye çıkarılması durumunda gerilme $1,44 \text{ t/cm}^2$ ye gerileyecek ve yönetmeliklerce kabul edilen sınır değere gelecektir, ya da çelik malzemesi malzemesinin st 52 (S355) kalitesi seçilmesi durumunda elde edilen gerilme sınır değerlerin altında kalacaktır. Deplasman kontrol edildiğinde orta noktada görülen 14,9 mm düşey deplasman, kiriş net açıklığına göre $L/300$ oranı ile kıyaslanırsa $562/300 = 1,87 \text{ cm}$ sınır değerinin altında yani kullanılabilirlik sınırları içerisinde kalacaktır.

Şekil 6 ve Şekil 7 de verilen grafikler, 4m. ve 8m. boyundaki kirişler için sırasıyla burkulma analizi sonuçlarının grafik halinde değişimini göstermektedir.

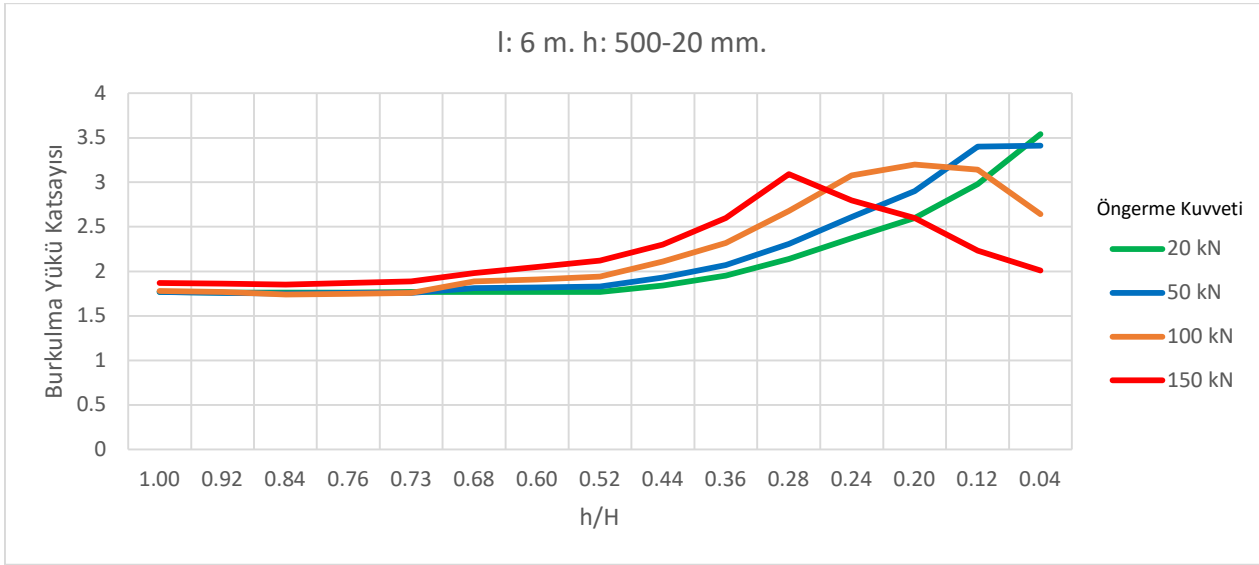


Şekil 9. 4m. kiriş boyu için farklı ön germe kuvvetleri ve farklı kiriş orta yükseklikleri için bulunan burkulma yükü katsayıları grafiği



Şekil 10. 8m. kiriş boyu için farklı ön germe kuvvetleri ve farklı kiriş orta yükseklikleri için bulunan burkulma yükü katsayıları grafiği

Kiriş H yüksekliği 340mm den 500 mm ye çıkarıldığında da benzer davranış sergilenmektedir. Şekil 11 da verilen grafiğin elde edilmesi sırasında da yükleme ve sınır koşulları aynı tutulmuş, kiriş yüksekliği değiştirilmiştir.



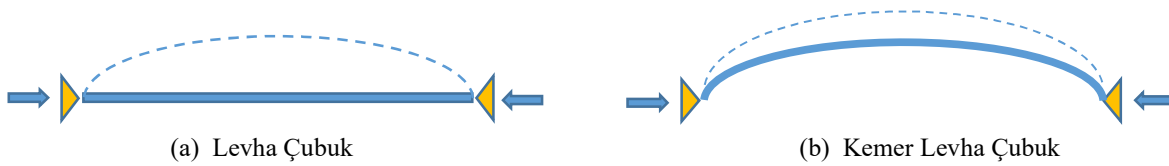
Şekil 11. 6m. kiriş boyu ve H:500 mm yüksekliği için 2-5-10 ve 15 ton ön germe kuvvetine göre burkulma katsayısı grafiği

4. Bulgular ve Tartışma

Grafikler incelendiğinde her 3 farklı açıklıktaki kiriş için $h/H = 0,6$ oranından sonra kiriş orta yüksekliği azaldıkça burkulma katsayısında belirgin artışlar görülmeye başlanmaktadır. Öngerme kuvvetinin artması ile de kiriş kapasitesindeki artış h/H oranı yine 0,6 oranından sonra daha belirgin bir şekilde artmakla beraber kirişte eksenel basıncın artmasına neden olduğundan bir pik noktaya ulaştıktan sonra burkulma yükü katsayısı tekrar düşmeye başlamaktadır. Bu noktada dengeli bir öngerme kuvvetinin kirişi daha yüksek bir taşıma kapasitesine ulaştıracağı anlaşılmaktadır.

Çalışmalar sonunca bulunan burkulma katsayılarının artmasının nedeni, kiriş alt başlığının kemer şeklini alması ile altta bulunan öngerme kablosu sayesinde açılmaya karşı tutularak burulmaya karşı daha dirençli hale gelmesidir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir;

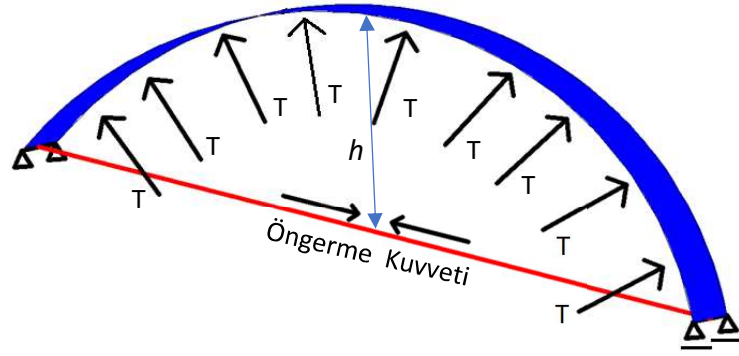
Düz bir levha basınca maruz kaldığında eksenine dik yönde kolayca burkulabilir. Fakat eğrisel bir levha, basınç altında burkulmadan, sadece daha fazla eğilecektir.



Şekil 12. (a) Normal levha çubuk ve (b) kemer şeklinde levha çubuk 1. burkulma modları

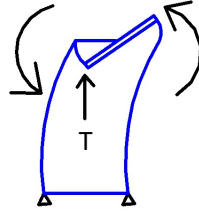
Kemer kirişin burkulması aslında bir burkulma değil eğilme hareketidir

Basit bir levhadan oluşan kemer kirişte, kirişin bir mesneti yatayda kayıcı olduğunda kemer etkisi görülmemektedir. Bunu sağlamak için kirişe altta bir halat ile uçlar birbirine bağlandığında kemer etkisini tekrar elde edilmiş olunur. Kemer kirişe verilen öngerme kuvveti, kemer levhayı bir yaya benzer şekilde gererek, Şekil 13'de gösterildiği gibi levhayı dışa doğru iten bir T itme kuvveti oluşturacaktır.



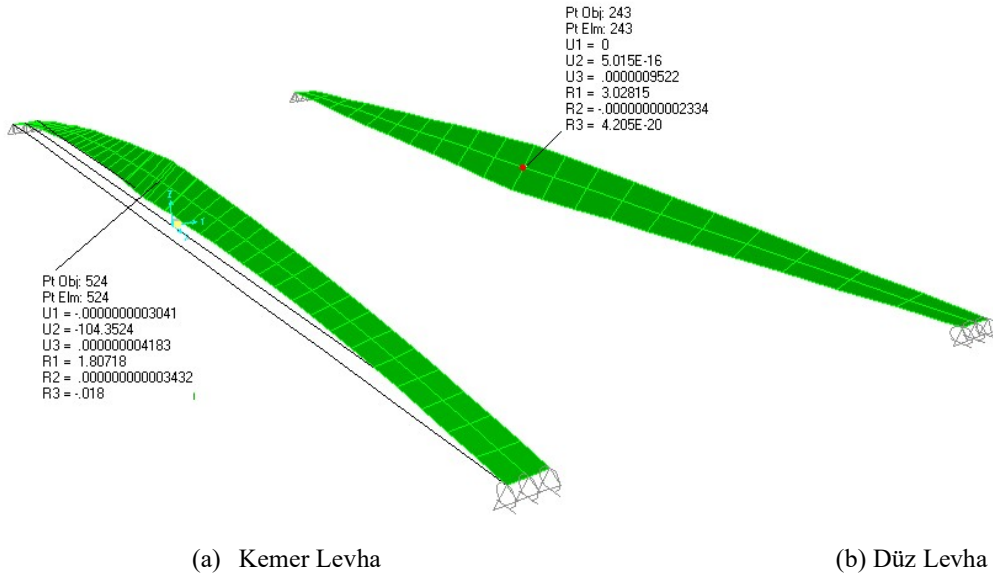
Şekil 13. Kemer levhanın altta bulunan ön germe halatı ile birlikte davranışı.

Eğer kemer levha ortasından bir burulma kuvveti uygulanırsa, yukarıda bahsedilen T itme kuvvetinin etkisi ile düz haline göre burulmaya karşı daha yüksek bir direnç gösterecektir. Bu etki kirişin h kemer yüksekliği arttıkça daha da artacaktır.



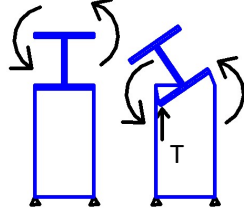
Şekil 14. Kemer levha kesitinin burulmaya karşı tepkisi.

Bu davranışı teorik olarak ispatlamak için , Sap 2000 de düz ve kemer şeklindeki 10mm. kalınlık ve 150 mm. genişliği olan 6 m. açıklığa sahip iki levhaya 10 kNm. lik burulma momenti uygulandı. Düz levha ortasında $R_1=3.02$ radyan dönme olduğu görüldü. Kemer şeklindeki levha ortasında ise $R_1=1.8$ radyanlık dönme görülmektedir. (Şekil 15) . Bu değerlere göre kemer şeklindeki levhanın, burulmaya karşı daha dirençli olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 15. Kemer şeklindeki levha ve düz levhanın burulma analizi sonuçları.

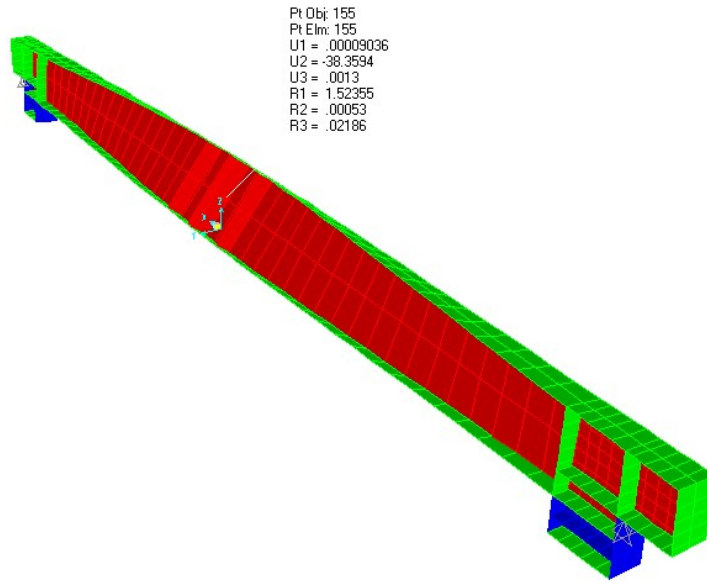
Bu levhanın üzerine I kirişi tamamlayacak, gövde ve üst başlık levhaları eklenirse üst başlığında yerel burkulmasını geciktireceği düşünülebilir.



Şekil 16. Kemer alt başlığın üst başlığa etkisi.

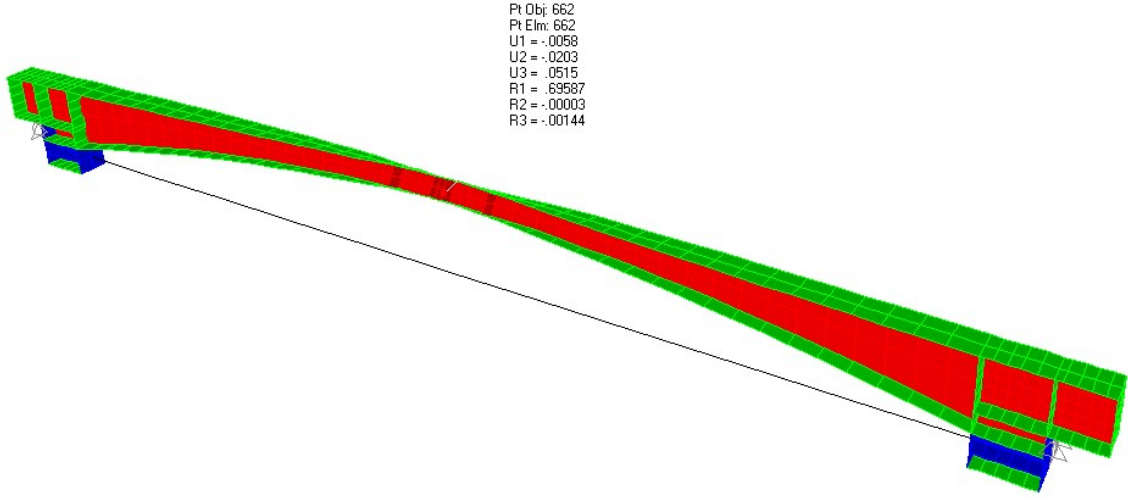
Bu nedenle Sap2000 de yapılan analizlerde kiriş orta yüksekliği azaldıkça veya alt başlık kemer yüksekliği arttıkça burkulma yükü katsayısı artmaktadır ya

ni burkulma karşı dayanımı artmaktadır.. Bu davranış yine Sap2000'de kirişlere burulma momenti verilerek test edilebilir. Kiriş yüksekliği, kiriş boyunca 340 mm olan kirişe gövde orta noktasından 50 kNm. lik burulma moment uyguladığında kiriş ortasındaki dönme $R_1=1.52$ radyan olarak hesaplanmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. Sabit 340 mm. yükseklikteki kirişe burulma momenti uygulandığındaki dönme miktarı

Orta kiriş yüksekliği 100 mm. olan kirişe ise 100 kN öngerme kuvveti uyguladıktan sonra, 50 kNm. burulma momenti uygulandığında kiriş ortasındaki dönme miktarı $R_1=0,695$ radyan olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre yüksekliği kiriş boyunca değişmeyen kirişe göre kiriş ortasında yüksekliği azalan eğrisel alt başlıklı kirişin daha fazla burulma dayanımına sahip olduğu bu analizlerle ispatlanmaktadır.



Şekil 18. 340 – 100 mm. yükseklikteki kirişe burulma momenti uygulandığındaki dönme miktarı

5. Sonuçlar

Yapılan 4 farklı kiriş analizinden elde edilen sonuçlara göre kiriş orta yüksekliğinin kenar yüksekliğine oranında yaklaşık 0,6 oranına denk gelen yüksekliğe kadar kiriş burkulma yük katsayısında önemli bir değişiklik olmamaktadır. 0,6 h/H oranından sonra burkulma yükü katsayısında belirgin bir artış görülmekte ve daha sonra düşmektedir. Fakat kiriş orta yüksekliği ve öngerme kuvvetine bağlı olarak en büyük burkulma katsayısı oranını verebilecek standardize bir yükseklik oranı veya öngerme kuvveti değeri belirlenmemektedir. Bu nedenle maksimum taşınabilecek yük için kiriş açıklığı ve yüksekliğe göre analiz yaparak en uygun boyut seçilmelidir. En büyük burkulma yükü katsayısı 0,6 h/H oranından sonra oluşmaya başladığından, gerilme ve deplasman problemi olmayacak ise, h/H oranın 0,6' dan küçük seçilmesi uygun olacaktır. Kirişlerin alt başlığının eğrisel yapılması ve öngerme halatının kullanılması ile kirişlerin burulmaya karşı dayanımının artacağından dolayı yanal tutulmaya gerek kalmadan veya daha az miktarda tutulma ile büyük açıklıklar geçilebilecektir. Konut ve ticari yapılarda ise kiriş altında elde edilen boşluk mekanik, elektrik tesisatı gibi projede özel yer ayrılması gereken elemanlara kullanışlı bir geçiş yolu olacaktır. Asma tavan kullanılmaması durumunda dahi mimari yönden bakıldığında düz bir kirişe göre daha estetik bir görünüş sergileyecektir.

6. Referanslar

- AISC-360 (2016). Specification for Structural Steel Buildings, ANSI / AISC 360-16,
- Austin W.J. & Ross J. (1976). Elastic buckling of arches under symmetrical loading, J. Struct. Div. 102 , 1085–1095.
- Barnett R.L. (1957). Prestressed truss beams, J. Struct. Div. 83, 1191-1-1191–22.
- Bharathi C.V., Kumar C.V. (2016). Effect of external prestressing on steel arches, Int. Res. J. Eng. Technol. 1382–1387.
- Bradford M.A. (1991). Buckling of prestressed steel girders, Eng. Journal–American Inst. Steel Constr. 28, 98–101.
- Circular Arches, J. Struct. Eng. 141, 04015006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001240](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001240).
- Coff L.,(1950). Prestressing of structural steel, Civ. Eng. 20, 64–65.
- Constr. Steel Res. 66, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.07.013>.
- Des. 28 , 1988–1993. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.04.007>.
- Dou C., Guo Y.-L., Zhao S.-Y. & Pi Y.-L. (2015). Experimental Investigation into Flexural-Torsional Ultimate Resistance of Steel
- Dou C., Guo Y.-F., Jiang Z.-Q., Gao W. & Pi Y.-L. (2018). In-plane buckling and design of steel tubular truss arches, Thin-Walled Struct. 130, 613–621. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.024>.

- Magnel G. (1950). Prestressed steel structures, *Struct. Eng.* 28, 285–295.
- Magnel G. (1954). Long prestressed steel truss erected for Belgian hangar, *Civ. Engineer.* 24 . 38–39.
- Nazir C. (2003). Prestressed Steel Arch Bridge, *J. Inst. Eng.*
- Ozcatalbas Y. & Ozer A. (2007). Investigation of fabrication and mechanical properties of internally prestressed steel I beam, *Mater.*
- Park S., Kim T., Kim K. & Hong S. (2010). Flexural behavior of steel I-beam prestressed with externally unbonded tendons, *J.*
- Petrov A.M. (1965). On the parameters of prestressed steel beam, *IVSIA.* 9–14.
- Petrov A.M. (1967), On the choice of cross-section of prestressed steel beam, *IVSIA.* 3–6.
- Pi Y.-L. & Trahair N.S. (1999). In-Plane Buckling and Design of Steel Arches, *J. Struct. Eng.* 125, 1291–1298.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:11\(1291\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:11(1291)).
- Polat E. Çağlayan B. (2018) Finite element analysis of pre-stressed steel arch beams. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2018.03.003>
- Ren Y., Wang Y., Wang B., Ban H., Song J. & Su G. (2018). Flexural behavior of steel deep beams prestressed with externally unbonded straight multi-tendons, *Thin-Walled Struct.* 131, 519–530. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.022>.
- Tochacek M. & Mehta C.L. (1972), No Title, *J. Struct. Div.* 98, 1273–1289.
- Whipple S. (1847). A work on brigge building, Utica, N.Y.: H.H. Curtiss, printer.