



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering
and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Farklı et kalınlıklarına sahip eksenel basınç altındaki kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarının belirlenmesi için yeni bir yaklaşım

Mirali Nuraliyev^a, Osman Özenc^{a,*}, Mehmet Akif Dunder^a, Hamza Kemal Akyildiz^a

^aMechanical Engineering Department, Yozgat Bozok University, 66100, Yozgat, Turkey.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 18 Aralık 2024
Düzeltilme 24 Mart 2025
Kabul 10 Nisan 2025

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Analitik yöntem
Yerel burkulma
Kutu kesit
Referans kesit
Eksenel basma

ÖZET

Hâlihazırda farklı et kalınlıklarına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarını belirlemek için geliştirilmiş analitik bir yöntem bulunmamaktadır; ilgili literatürdeki bu önemli eksikliğe bir yanıt olarak, bu çalışmada eksenel basınç altındaki bu tür kesitlerin yerel burkulma katsayılarını belirleyebilmek için 'Referans Kesit' burkulma modeli olarak adlandırılan yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu modelde, farklı et kalınlıklarına sahip orijinal bir kutu kesitin burkulma analizi, aynı ana boyutlara sahip ancak duvar kalınlıkları sabit olan ve orijinal kesitin üst duvar ile yan duvar et kalınlıklarına eşit iki referans kutu kesit ile özel bir geometrik ilişkilendirme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen hesap modeline göre, farklı et kalınlıklarına sahip orijinal kutu kesitte meydana gelebilecek tüm kritik burkulma gerilmesi değerleri, belirlenen referans kesitlerdeki kritik burkulma gerilmelerinin tanımladığı aralık içinde kalmak zorundadır. Orijinal kutu kesitin burkulma katsayılarının değerlendirilmesi için, her üç kesitteki yerel burkulma gerilmelerinin karşılaştırmalı analizi yapılmış ve bu analizler sonucunda burkulma davranışının doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenebilmesine olanak tanıyan gerekli sınır şartları tanımlanmıştır. Bu sınır şartları kullanılarak, farklı et kalınlıklarına sahip eksenel basınç altındaki kutu kesitlerin burkulma katsayılarını hesaplamak için ilk defa analitik ifadeler türetilmiş ve türetilen bu analitik ifadeler, pratik mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere bu çalışmada erişilebilir hale getirilmiştir.

A novel approach for determining the local buckling coefficients of box sections with unequal wall thicknesses under axial compression

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 December 2024
Received in revised form 24 March 2025
Accepted 10 April 2025

Available online

Keywords:

Analytical method
Local buckling
Box section
Reference section
Axial compression

ABSTRACT

Currently, there is no analytical method developed to determine the local buckling coefficients of box sections with varying wall thicknesses. Addressing this significant gap in the relevant literature, this study proposes a novel approach called the "Reference Section" buckling model to evaluate the local buckling coefficients of such sections under axial compression. In this model, the buckling analysis of an original box section with unequal wall thicknesses is performed establishing a special geometric correlation with two reference box sections possessing the identical main dimensions of original section but uniform wall thicknesses equal to the flange and web thicknesses of the original section. According to the proposed calculation model, all possible critical buckling stresses that may occur in the original box section must fall within the range defined based on the critical buckling stresses determined for reference sections. To evaluate the buckling coefficients of the original box section, a comparative analysis of local buckling stresses in all three sections was conducted. Based on the results of these analyses, necessary boundary conditions that enable the accurate and reliable determination of buckling behaviour were specified. Utilizing these boundary conditions, analytical expressions were derived for the first time to calculate the buckling coefficients of box sections with unequal wall thicknesses under axial compression. These derived analytical expressions have been made available in this study for use in practical engineering applications.

I. GİRİŞ

İçi boş yapısal kesitler (HSS-Hollow Structural Sections) olarak da bilinen kutu kesitler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, mükemmel burulma rijitliği, hafiflik ve montaj kolaylığı nedeniyle inşaat, otomotiv ve havacılık gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu profiller, eşit ve eşit olmayan et kalınlıklarında üretilmekte olup, yapısal verimlilik ve malzeme maliyetinin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir [1–8]. Eşit et kalınlığına sahip kutu kesitlerin aksine, eşit olmayan et kalınlığına sahip kutu kesitler, daha hafif ancak mukavemet açısından daha verimli yapılar oluşturulmasına olanak tanıyarak hem yapısal performansı artırmakta hem de malzeme ve lojistik maliyetlerinde kayda değer tasarruf sağlamaktadır [6–8]. Bu durum, özellikle ağırlık optimizasyonunun kritik olduğu havacılık ve otomotiv endüstrilerinde önemli avantajlar sunmaktadır [9]. Ancak, bu profillerin kütle verimliliğini artırmaya yönelik optimize edilen tasarımları, profillerin yerel ve genel burkulma davranışına karşı daha hassas hale gelmesine neden olmaktadır [10, 11]. Özellikle, eksenel basınca maruz kalan kutu kesitlerin yerel burkulma davranışı, yapısal stabiliteyi ve yük taşıma kapasitesini doğrudan etkileyen kritik bir olgudur [12–17]. Bu nedenle, bu tip kutu kesitlerin kritik yerel elastik burkulma gerilmelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem arz etmektedir [12–14, 16, 18, 19]. Kritik yerel elastik burkulma gerilmelerinin hassas bir şekilde belirlenmesi, hesaplamalarda kullanılan yerel burkulma katsayılarının doğruluğuyla doğrudan ilişkilidir [12, 14, 16, 19–21]. Kutu kesitli profillerin yerel burkulma katsayıları üretim yönteminden bağımsızdır (Sıcak ya da soğuk şekillendirme) ve temel geometrik boyutlarına, sınır koşullarına ve yükleme durumlarına (eksenel basınç, büyük eksen eğilmesi ve küçük eksen eğilmesi) göre değişkenlik göstermektedir [12]. Bu olguları dikkate alarak kutu kesitlerin yerel elastik burkulma katsayılarının belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalar son derece sınırlıdır [12, 14, 15, 20, 21]. Mevcut literatür, ağırlıklı olarak eşit et kalınlığına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarına odaklanmıştır [12, 14]. Eşit et kalınlığına sahip kutu kesitlerin eksenel basınç, büyük eksen eğilmesi ve küçük eksen eğilmesi gibi farklı yükleme senaryoları için yerel elastik burkulma katsayılarını ele alan çalışmalardan iki tanesi ön plana çıkmaktadır [12, 14]. Bu çalışmalardan ilki, yerel elastik burkulma katsayılarının belirlenebilmesi için kesit yükseklik – kesit genişlik oranına bağlı olarak analitik ifadeler geliştirmiş ve bu ifadeleri ilgili literatürde açık bir şekilde sunmuştur [14]. Bu çalışmanın aksine, ikinci çalışma analitik ifadeler sunma yerine sonlu elemanlar yöntemiyle elde etmiş olduğu sonuçlara dayalı olarak yerel burkulma katsayılarının belirlenebilmesi için polinom ifadeler türetmiştir [12]. Fakat, bu çalışma kutu kesitlerin yükseklik – genişlik oranlarının 1 ile 4 arasında değiştiği durumlar ile sınırlı kalmıştır [12].

Eşit et kalınlığına sahip kutu kesitlerin aksine, eşit olmayan et kalınlığına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarının belirlenmesini ele alan çalışmalar son derece sınırlıdır. Literatürde, bu alanda yapılan iki temel çalışma mevcuttur [20, 21] fakat bu çalışmalar çok eski tarihli (1939 ve 1943) olmalarının ötesinde ilgili katsayıların belirlenmesinde enerji yöntemini kullanmalarından dolayı ortaya analitik bir yöntem sunmaktan çok uzak kalmışlardır. İlave olarak, bu çalışmalar belirli kesit genişlik- kesit yükseklik (b/h) oranları ve üst duvar - yan duvar et kalınlık oranları için yerel elastik burkulma katsayı verileri sunmamıştır [20, 21]. Bundan daha önemlisi, söz konusu çalışmaların en temel eksikliği, yerel elastik burkulma katsayılarının doğrudan analitik bir yöntemle değil, dolaylı olarak enerji yöntemiyle belirlenmesidir. Bu yöntemde, önce kritik yük hesaplanmakta, ardından bu değer kesit alanına bölünerek kritik burkulma gerilmesi elde edilmekte ve son olarak, bu gerilme Timoshenko denkleminde eşitlenerek burkulma katsayısı belirlenmektedir [18]. Ancak bu yaklaşım, yalnızca eksenel basınç durumları için geçerli olup, yerel burkulma katsayılarının tam olarak anlaşılmasını engellemektedir. İlginç olarak, bu öncü çalışmalardan [20, 21] sonra, eşit olmayan et kalınlıklarına sahip kutu kesitler için yerel burkulma katsayılarının

belirlenmesine doğrudan odaklanan, analitik bir model ya da yöntem geliştiren bir çalışma bulunmamaktadır. Sonuç olarak, mevcut yöntemlerin sınırlı kalması, bu alanda önemli bir araştırma boşluğu oluşturmıştır.

Yukarıda açıkça ortaya konan literatürdeki eksikliğe cevap olarak, bu çalışma eksenel yük altında eşit olmayan et kalınlığına sahip kutu kesitlerin yerel elastik burkulma katsayılarını belirlemek için yenilikçi bir analitik yöntem geliştirilmeyi hedeflemiştir. Bu bağlamda, “Referans Kesit Burkulma Modeli” olarak adlandırılan yeni bir model geliştirilmiş ve bu geliştirilen model yardımıyla daha doğru ve güvenilir burkulma analizleri için kapsamlı bir metodolojik çerçeve sunulmuştur. Geliştirilen yöntem, burkulma tahminlerinin doğruluğunu artırmakta, kutu kesit tasarımlarının optimizasyonunda önemli bir ilerleme sunmakta ve araştırmacılar ile tasarımcıların işini kolaylaştırarak daha güvenli ve verimli mühendislik uygulamalarına olanak tanımaktadır.

II. ANALİTİK YÖNTEM

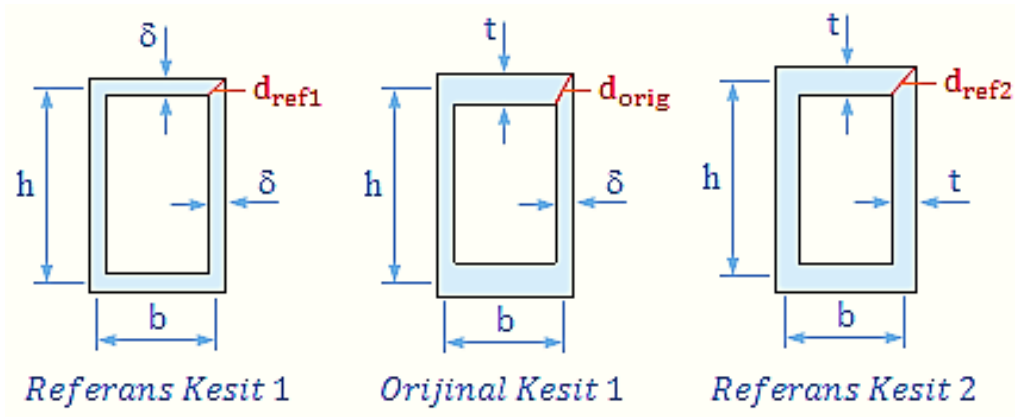
2.1. Üst Duvar Et Kalınlığı Yan Duvar Et Kalınlığından Büyük Olan Kutu Kesitlerde Yerel Burkulma Katsayısının Belirlenmesi

Farklı et kalınlıklarına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarını doğrudan belirlemek için mevcut literatürde herhangi bir yöntem bulunmamaktadır. Daha önceki bazı çalışmalarda bu katsayılar, enerji yöntemi kullanılarak dolaylı yoldan hesaplanmıştır [20,21]. Bu çalışmaların temel algoritması şu şekilde özetlenebilir: İlk olarak, enerji yöntemiyle kutu kesit için kritik yük belirlenmekte, ardından bu yük kesit alanına bölünerek kritik gerilme hesaplanmakta ve son olarak, elde edilen bu değer Timoshenko’nun kritik burkulma gerilmesi denkleminde [18] yerine yazılarak burkulma katsayısı elde edilmektedir. Fakat, yalnızca eksenel basınç yüklemesiyle sınırlı olan bu yaklaşım, farklı et kalınlıklarına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarını kapsamlı bir şekilde açıklamakta yetersiz kalmış ve bu alanda kayda değer bir ilerleme sağlanamamıştır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, bu çalışmada “Referans Kesit Burkulma Hesap Modeli” adı verilen yenilikçi bir yöntem önerilmektedir. Bu model, üst duvar et kalınlığı t ve yan duvar et kalınlığı δ olan $h \times b$ ana boyutlarına sahip orijinal bir kutu kesitin yerel burkulma katsayılarını belirlemek için geliştirilmiştir. Önerilen modele göre, orijinal kesit, sabit et kalınlıkları t ve δ olan ve aynı $h \times b$ boyutlarındaki iki komşu referans kutu kesitle Şekil 1’de gösterildiği gibi ilişkilendirilmiş ve bu üç kesitin yerel burkulma gerilmeleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Modelin temel varsayımına göre, $t > \delta$ şartını sağlayan bir $h \times b$ boyutlarındaki orijinal kutu kesitte, kritik burkulma gerilmesi değerleri, Referans 2 kesitindeki kritik burkulma gerilmesiyle üst sınır, Referans 1 kesitindeki kritik burkulma gerilmesiyle alt sınır arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, orijinal kutu kesitin burkulma katsayısını değerlendirmek için Denklem (1)’de sunulan gerekli şart tanımlanmıştır.

$$\sigma_{crw}^{ref1} \leq \sigma_{crw}^{orig} \leq \sigma_{crw}^{ref2} \quad (1)$$

Burada; σ_{crw}^{ref1} , σ_{crw}^{ref2} ve σ_{crw}^{orig} , sırasıyla Referans 1, Referans 2 ve orijinal kutu kesitlerin yan duvar kısımlarına ait kritik yerel burkulma gerilmelerini temsil etmektedir ve bu gerilmeler yine sırasıyla aşağıda verildiği Denklem (2), Denklem (3) ve Denklem (4) ile tanımlanmıştır.



Şekil 1. Önerilen burkulma hesap modeline göre $t > \delta$ şeklinde olan orijinal kutu kesit ile ilişkilendirilen Referans 1 ve Referans 2 kutu kesitler

$$\sigma_{crw}^{ref1} = k_w^{ref1} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 = k_w^{ref1} n \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{crw}^{ref2} = k_w^{ref2} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{h}\right)^2 = k_w^{ref2} n \left(\frac{t}{h}\right)^2 \quad (3)$$

$$\sigma_{crw}^{orig} = k_w^{orig} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 = k_w^{orig} n \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \quad (4)$$

Burada, k_w^{ref1} , k_w^{ref2} ve k_w^{orig} - sırasıyla Referans 1, Referans 2 ve orijinal kesitlerin yan duvar kısımları için yerel burkulma katsayılarıdır. E kutu kesitin üretildiği malzemenin elastiklik modülünü, ν ise yine kutu kesitin üretildiği malzemenin Poisson oranını temsil etmektedir. İlave olarak, t ve δ sırasıyla referans ve orijinal kutu kesitlerin üst duvar ve yan duvar et kalınlıklarını temsil etmektedir. Ayrıca, h referans ve orijinal kutu kesitlerin yan duvar kısımlarının ortalama burkulma yüksekliğini temsil etmektedir. n ise sabit bir değer olup aşağıda verildiği gibi Denklem (5) ile tanımlanmıştır.

$$n = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

Aynı $h \times b$ boyutlarına, fakat farklı sabit et kalınlıklarına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarının eşit olduğu ilgili literatür tarafından açıkça ortaya konmuştur [14]. Bundan dolayı, Referans 1 ve Referans 2 kutu kesitler için $k_w^{ref1} = k_w^{ref2} = k_w^{ref}$ alınmıştır. Buna bağlı olarak, Denklem (2), Denklem (3) ve Denklem (4) eşitlikleri Denklem (1)'de yerine yazılmış ve gerekli sadeleşmeler yapıldıktan sonra orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısının değişim aralığı için Denklem (6) ve k_w^{orig} / k_w^{ref} oranının değişim aralığı için de Denklem (7)'de verilen ifadeler elde edilmiştir.

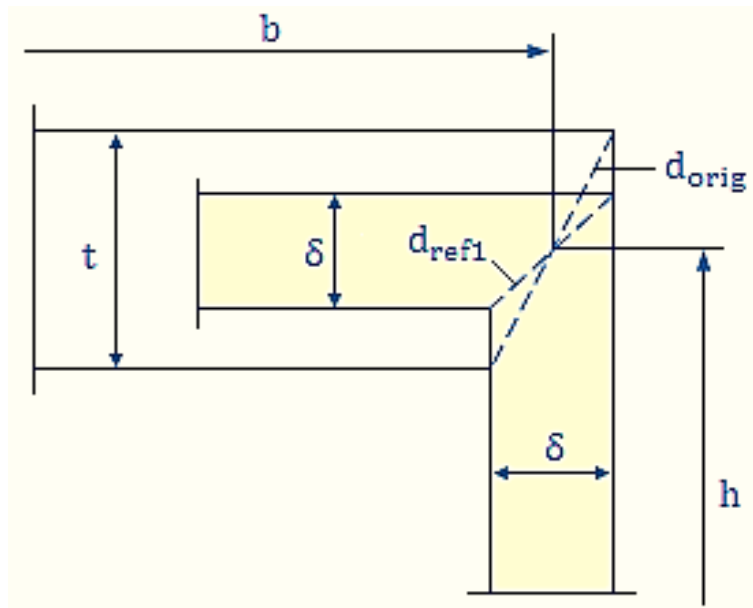
$$k_w^{ref} \leq k_w^{orig} \leq k_w^{ref} \left(\frac{t}{\delta}\right)^2 \Rightarrow k_w^{orig} \in \left[k_w^{ref} \dots k_w^{ref} \left(\frac{t}{\delta}\right)^2 \right] \quad (6)$$

$$1 \leq \frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} \leq \left(\frac{t}{\delta}\right)^2 \Rightarrow \frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} \in \left[\left(\frac{t}{\delta}\right)^0 \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^{0,5} \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^1 \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^{1,5} \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^2 \right] \quad (7)$$

Denklem (7)'de verilen ifadeden görüldüğü üzere, ilişkilendirilen orijinal ve referans kutu kesitlerin burkulma katsayılarının oranı $\left(\frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}}\right)$, $\left[1 \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^2\right]$ aralığına giren bir α değerine eşit olmak zorundadır ($\alpha \geq 1$). Bu bulgu, aynı h ve b ana boyutlarına sahip olan orijinal ve referans kutu kesitlerin yerel burkulma katsayıları arasında Denklem (8)'de verildiği gibi doğrusal ve aynı zamanda fonksiyonel bir bağıntının olduğunu göstermektedir.

$$k_w^{orig} = \alpha k_w^{ref} \quad (8)$$

Orijinal ve referans kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarının oranını temsil eden α faktörünü tanımlamak ve belirlemek için ilk olarak Referans 1 kesiti, orijinal kutu kesit içine Şekil 2'de gösterildiği gibi özel bir şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 2. α faktörünün değerlendirilmesi için orijinal ve Referans 1 kutu kesitlerinin ilişkilendirilme şeması

Böylesine ilişkilendirmenin önemli özelliklerinden birincisi her iki kutu kesitin köşe boyutlarının (d_{ref1} , d_{orig}) orta noktalarında kesişmesi ve ikinci özelliği ise her iki kesit yan duvarlarının üst-üste çakıştırılmasıdır. Bu şekilde ilişkilendirilen referans ve orijinal kutu kesitlerin ana boyutları (ortalama yükseklik ve ortalama genişlik) h ve b aynı olacaktır. Kesitler mukayese edildiğinde orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısının Referans 1 kesitin yerel burkulma katsayısından daha büyük olduğu görülür. Bunun nedeni, $d_{orig} > d_{ref1}$ olması veya orijinal kutu kesitin t üst duvar et kalınlığının, referans kesitin δ üst duvar et kalınlığından büyük olmasıdır. Sadece $t = \delta$

veya $d_{orig} = d_{ref1}$ olduğunda orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısı referans kesitin yerel burkulma katsayısına eşit olarak minimum değerine sahip olur. Denklem (8)'de verilen ifadeden açıkça anlaşılabileceği gibi, $k_w^{orig} = k_w^{ref}$ olduğunda α faktörü 1'e eşit olmaktadır. Bundan dolayı, orijinal kutu kesit ve onunla aynı $h \times b$ ana boyutlarına sahip olan Referans 1 ve Referans 2 kutu kesitlerinin köşe boyutları arasında aşağıda verilen bağıntı söz konusudur.

$$d_{ref1} \leq d_{orig} \leq d_{ref2} \Rightarrow 1 \leq \alpha_1 \leq \frac{d_{ref2}}{d_{ref1}} \quad (9)$$

Burada, $d_{ref1} = \sqrt{2} \delta$ Referans 1 kutu kesitin köşe boyutu, $d_{ref2} = \sqrt{2} t$ Referans 2 kutu kesitin köşe boyutu, $d_{orig} = \sqrt{\delta^2 + t^2}$ orijinal kutu kesitin köşe boyutu, $\alpha_1 = \frac{d_{orig}}{d_{ref1}}$ köşe boyut faktörü olup, orijinal ve Referans 1 kutu kesitlerinin köşe boyutlarının oranını temsil etmektedir. d_{ref1} , d_{ref2} ve d_{orig} ifadeleri kullanılarak, $\frac{d_{ref2}}{d_{ref1}}$ ve $\frac{d_{orig}}{d_{ref1}}$ oranları için aşağıda Denklem (10)'da verilen ifadeler türetilmiştir.

$$\frac{d_{ref2}}{d_{ref1}} = \frac{t}{\delta}, \quad \alpha_1 = \frac{d_{orig}}{d_{ref1}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{t}{\delta}\right)^2} \quad (10)$$

Denklem (9)'da $\frac{d_{ref2}}{d_{ref1}}$ ibaresi yerine $\frac{t}{\delta}$ yazılarak ilgili aralık Denklem (11)'de verildiği gibi yeniden tanımlanmıştır.

$$\alpha_1 = \frac{d_{orig}}{d_{ref1}} \in \left[\left(\frac{t}{\delta}\right)^0 \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^{0,5} \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^1 \right] \quad (11)$$

Denklem (7) ve Denklem (11) ile tanımlanan kümelerin kesişiminden elde edilen ortak aralık aşağıda verilmiştir.

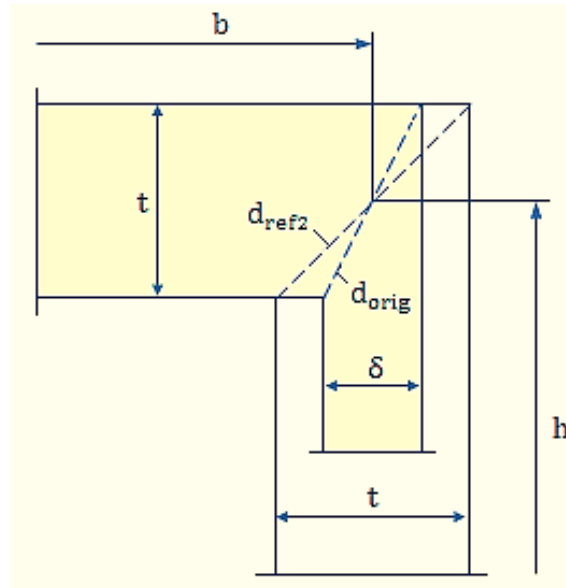
$$\left[\left(\frac{t}{\delta}\right)^0 \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^{0,5} \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^1 \right] \cap \left[\left(\frac{t}{\delta}\right)^0 \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^{0,5} \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^1 \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^{1,5} \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^2 \right] = \left[\left(\frac{t}{\delta}\right)^0 \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^{0,5} \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^1 \right] \quad (12)$$

Denklem (7) ve Denklem (11) kümelerinin her ikisinde de ortak olan ve Denklem (12) ile tanımlanan kesişme aralığı için bu kümelerin uygun olarak temsil ettikleri yerel burkulma katsayıları oranı $\left(\frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} = \alpha\right)$ ile köşe boyutları oranının $\left(\frac{d_{orig}}{d_{ref1}} = \alpha_1\right)$ eşit olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu eşitlik kullanılarak farklı et kalınlıklarına sahip orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısının belirlenmesi için Denklem (13)'de verilen ifade elde edilmiştir.

$$\frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} = \frac{d_{orig}}{d_{ref1}} \Rightarrow k_w^{orig} = \alpha_1 k_w^{ref} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{t}{\delta}\right)^2} k_w^{ref} \quad (13)$$

Referans 1 kesiti ile orijinal kesit arasında yukarıda detaylı olarak izah edilen ilişkilendirmeye takiben orijinal kesit ile Referans 2 kesit arasındaki ilişkilendirme aşağıda verildiği gibi ele alınmıştır.

Orijinal ve referans kutu kesitlerin yerel burkulma katsayıları oranının $\left(\frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}}\right)$, Denklem (7) ile tanımlanmış $\left[1 \dots \dots \left(\frac{t}{\delta}\right)^2\right]$ aralığına giren α değerini belirlemek için sabit duvar kalınlığı t olan Referans 2 kesit ile orijinal kutu kesitin karşılıklı mukayeseli ilişkisi ele alınmıştır. Bu ilişki Şekil 3'te verildiği gibi organize edilmiştir. Bu organizasyon sırasında, orijinal kutu kesit, referans kutu kesitin içine yerleştirilirken her iki kutu kesitin üst duvarlarının çakışmasına ve köşe boyutlarının da orta noktalarından kesiştirilmesine dikkat edilmiştir. Bu durum her iki kesitin $h \times b$ ana boyutlarının birbirlerine eşit olma durumunu ve dolayısıyla da orijinal kutu kesitin burkulma katsayısının Referans 2 kesitin burkulma katsayısından her zaman büyük olduğu gerçekliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3. α faktörünün değerlendirilmesi için orijinal ve Referans 2 kutu kesitlerinin ilişkilendirilme şeması

Bu büyüklük $\frac{d_{ref2}}{d_{orig}}$ oranına veya Referans 2 kesitin t yan duvar et kalınlığının, orijinal kutu kesitin δ yan duvar et kalınlığına oranına (t/δ) bağlı olarak daha önce anlatıldığı gibi Denklem (14)'de verilen ifade ile tanımlanmıştır.

$$\frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} = \frac{d_{ref2}}{d_{orig}} \Rightarrow k_w^{orig} = \alpha_2 k_w^{ref} \quad (14)$$

Burada köşe boyut faktörü olarak tanımlanan α_2 , Referans 2 kesitin köşe boyutunun orijinal kutu kesitin köşe boyutuna oranıdır.

$$\alpha_2 = \frac{d_{ref2}}{d_{orig}} = \left[\frac{2(t/\delta)^2}{1+(t/\delta)^2} \right]^{1/2} \quad (15)$$

Köşe boyut faktörleri α_1 ve α_2 'nin ortalama değeri olan α_{avg} cinsinden orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısı Denklem (16)'da verilen ifade kullanılarak elde edilebilir.

$$k_w^{orig} = \alpha_{avg} k_w^{ref} \quad (16)$$

$$\alpha_{avg} = \frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2) = \frac{\sqrt{2}(1+t/\delta)^2}{4\sqrt{1+(t/\delta)^2}} \quad (17)$$

t/δ nin $[1 \dots 2]$ aralığına giren bazı değerleri için α_1 , α_2 ve α_{avg} köşe boyut faktörleri sırasıyla Denklem (10), Denklem (15) ve Denklem (17)'de verilen ifadeler kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 1'de sunulmuştur.

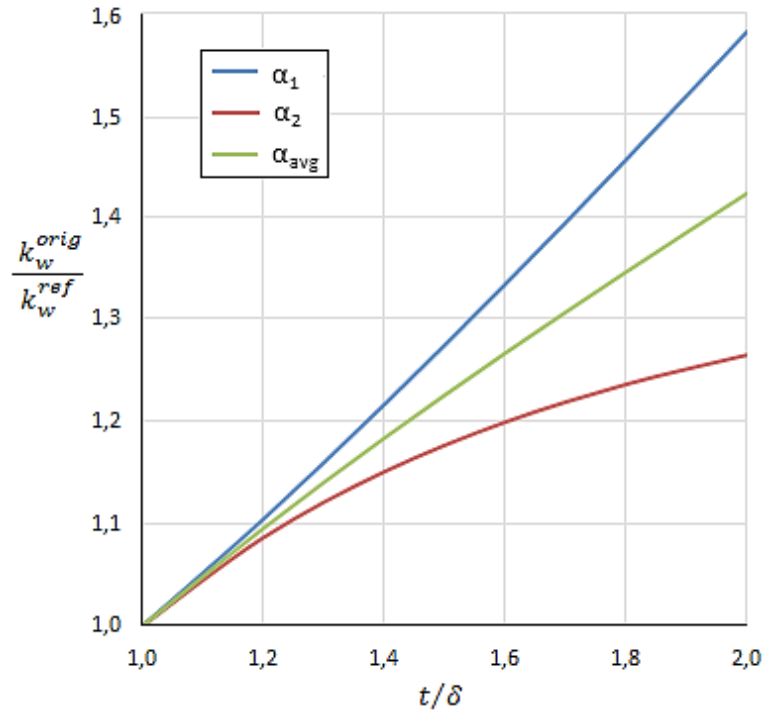
k_w^{orig}/k_w^{ref} oranının t/δ 'ya bağlı olarak Şekil 4'te verilen grafiklerinden ve hem de Tablo 1'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere $t/\delta \neq 1$ durumu için her bir k_w^{orig}/k_w^{ref} oranına karşılık gelen üç farklı α_1 , α_2 ve α_{avg} köşe boyut faktör değerleri bulunmaktadır. Yapılan hesap sonuçları bazı orijinal kutu kesitlerde α_1 in, bazı orijinal kutu kesitlerde α_2 nin ve bazı orijinal kutu kesitlerde ise α_{avg} ortalama köşe boyut faktörünün daha uygun olduklarını ortaya çıkartmıştır. Örneğin $h/b = 1$ ve $t/\delta = 2$ kutu kesiti için $k_w^{orig} = \alpha_1 k_w^{ref} = 1,581 \cdot 4 = 6,32(6,54)$, $h/b = 2,5$ ve $t/\delta = 1,4$ kutu kesiti için $k_w^{orig} = \alpha_2 k_w^{ref} = 1,151 \cdot 5,30 = 6,10(6,05)$, $h/b = 1,25$ ve $t/\delta = 2$ kutu kesiti için $k_w^{orig} = \alpha_{avg} k_w^{ref} = 1,346 \cdot 4,64 = 6,60(6,54)$ değerleri bulunmuştur. Burada parantez içinde karşılaştırma amaçlı olarak verilen değerler Kroll [21] tarafından rapor edilmiş değerlerdir. Bu sonuçların ortaya çıkarmış olduğu en önemli sorulardan bir tanesi; verilen herhangi bir h/b oranı için orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısını belirlemek için hangi durumlarda ve hangi α değeri kullanılmalıdır?

Denklem (13), Denklem (14) ve Denklem (16)'da verilen ifadelerden anlaşılacağı üzere verilen bir h/b oranına karşılık gelen referans kutu kesitin yerel burkulma katsayısı k_w^{ref} , nin sabit olmasına rağmen, $\frac{t}{\delta}$ oranının büyümesiyle, orijinal kutu kesitin burkulma katsayısı k_w^{orig} büyümektedir. Öte yandan eksenel basınç durumunda orijinal kutu kesitin burkulma katsayısının da teorik olarak en fazla $k_w^{orig} = 7$ olduğu bilinmektedir [17, 19-21], yani bu değer aşılmamalıdır. Bunun sağlanması için Denklem (13), Denklem (14) ve Denklem (16)'daki k_w^{orig} parametresi yerine 7 yazılarak, her bir α köşe boyut faktörü için $\frac{t}{\delta}$ oranının maksimum değeri türetilen ve aşağıda verilen denklemler kullanılarak belirlenebilir.

$$\left(\frac{t}{\delta}\right)_{max} = \left[\frac{98}{(k_w^{ref})^2} - 1 \right]^{1/2}, \quad \alpha = \alpha_1 \text{ için} \quad (18)$$

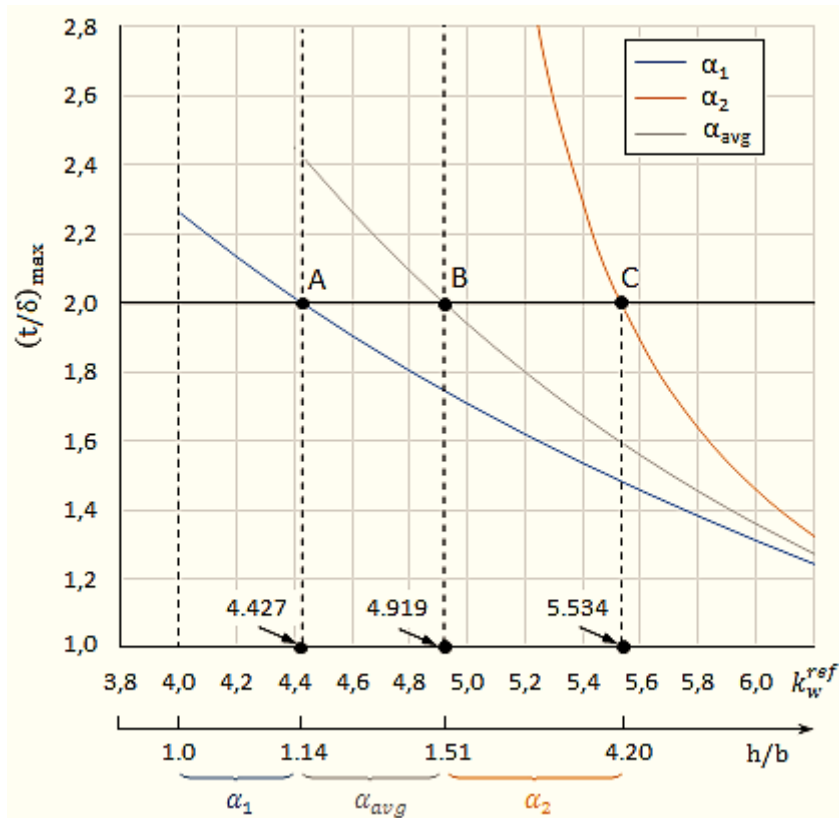
$$\left(\frac{t}{\delta}\right)_{max} = \left[\frac{49}{2(k_w^{ref})^2 - 49} \right]^{1/2}, \quad \alpha = \alpha_2 \text{ için} \quad (19)$$

$$\frac{(k_w^{ref})^2}{392} \left[1 + \left(\frac{t}{\delta}\right)_{max} \right]^4 - \left(\frac{t}{\delta}\right)_{max}^2 - 1 = 0, \quad \alpha = \alpha_{avg} \text{ için} \quad (20)$$



Şekil 4. $k_w^{orig}/k_w^{ref} = f(t/\delta)$ diyagramları

Yukarıdaki yaklaşımın daha iyi anlaşılabilmesi için Denklem (18), Denklem (19) ve Denklem (20) ile her bir köşe boyut faktörü için çizilen $\left(\frac{t}{\delta}\right)_{max} = f(k_w^{ref})$ bağıntıları Şekil 5'te grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 5. α_1 , α_2 ve α_{avg} köşe boyut faktörlerinin uygulanma aralıklarının grafiksel belirlenmesi

Tablo 1. α_1 , α_2 ve α_{avg} köşe boyut faktörleri

t/δ	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
α_1	1,00	1,1045	1,2166	1,3340	1,4560	1,5811
α_2	1,00	1,0864	1,1508	1,1993	1,2362	1,2649
α_{avg}	1,00	1,0955	1,1837	1,2666	1,3460	1,4230

2.2. Üst Duvar Et Kalınlığı Yan Duvar Et Kalınlığından Küçük Olan Kutu Kesitlerde Yerel Burkulma Katsayısının Belirlenmesi

Şekil 6’da verilen eksenel basınç altındaki $t < \delta$ şeklinde olan orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısını belirlemek için bir önceki bölümde derinlemesine izah edilen “Referans Kesit Burkulma Hesap Modeli” üzerinden yapılan analitik işlemler sonucunda aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

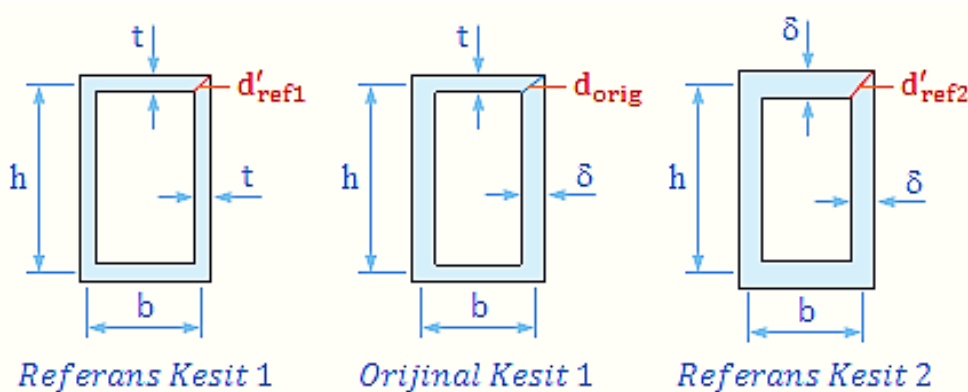
$$\frac{t}{\delta} \leq \frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} = \frac{d'_{ref1}}{d_{orig}} \leq 1 \Rightarrow k_w^{orig} = \alpha'_1 k_w^{ref} \quad (21)$$

$$\frac{t}{\delta} \leq \frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} = \frac{d_{orig}}{d'_{ref2}} \leq 1 \Rightarrow k_w^{orig} = \alpha'_2 k_w^{ref} \quad (22)$$

Burada $d'_{ref1} = \sqrt{2}t$ ve $d'_{ref2} = \sqrt{2}\delta$ sırasıyla Referans 1 ve Referans 2 kesitlerinin köşe boyutlarıdır. Ayrıca, α'_1 ve α'_2 köşe boyut faktörleri olup sırasıyla Denklem (23) ve Denklem (24) ile tanımlanmıştır.

$$\alpha'_1 = \frac{d'_{ref1}}{d_{orig}} = \frac{t}{\delta} \sqrt{\frac{2}{1+(t/\delta)^2}} \quad (23)$$

$$\alpha'_2 = \frac{d_{orig}}{d'_{ref2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{t}{\delta}\right)^2} \quad (24)$$



Şekil 6. Önerilen burkulma hesap modeline göre $t < \delta$ şeklinde olan orijinal kutu kesit ile ilişkilendirilen Referans 1 ve Referans 2 kutu kesitler

t/δ ‘nın [0,5 ... 1] aralığına giren bazı değerleri için α'_1 ve α'_2 köşe boyut faktör değerleri sırasıyla Denklem (23) ve Denklem (24) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. α'_1 ve α'_2 köşe boyut faktörleri

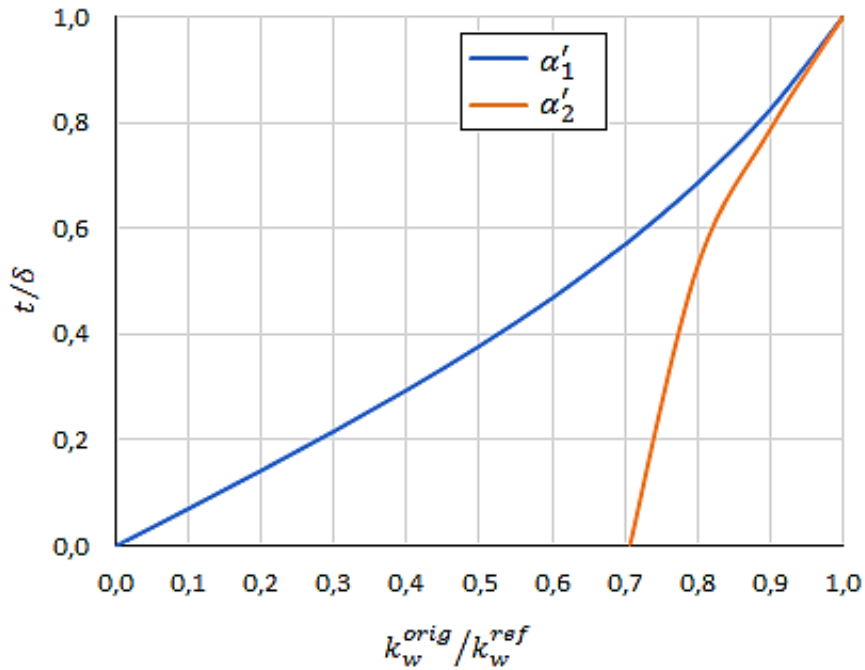
t/δ α	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
α'_1	0,6325	0,7276	0,8110	0,8835	0,9461	1,0000
α'_2	0,7906	0,8246	0,8631	0,9055	0,9513	1,0000

Tablo 2’deki sonuçların ortaya çıkarmış olduğu en önemli sorulardan bir tanesi: Verilen bir h/b oranı için orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısını belirlemek için α'_1 ve α'_2 köşe boyut faktörlerinden hangisi kullanılmalıdır? Bunu açıklığa kavuşturmak için ilk olarak Denklem (21), Denklem (22), Denklem (23) ve Denklem (24)’de sunulan ifadeler yardımıyla α'_1 ve α'_2 için $\frac{t}{\delta} = f(k_w^{orig}/k_w^{ref})$ fonksiyonları Denklem (25) ve Denklem (26)’da verildiği gibi elde edilmiş ve daha sonra bu denklemler yardımıyla Şekil 7’de verilen grafikler elde edilmiştir.

$$\frac{t}{\delta} = \left[\frac{(k_w^{orig}/k_w^{ref})^2}{2 - (k_w^{orig}/k_w^{ref})^2} \right]^{1/2}, \quad \alpha = \alpha'_1 \text{ için} \quad (25)$$

$$\frac{t}{\delta} = \left[2 \left(\frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}, \quad \alpha = \alpha'_2 \text{ için} \quad (26)$$

Şekil 7’deki diyagramlardan görüldüğü üzere α'_1 köşe boyut faktörü $\frac{t}{\delta} = [0 \dots 1]$ aralığının tamamını kapsayacak şekilde $[0 \dots 1]$ değerlerini alabilirken, bunun aksine α'_2 köşe boyut faktörü yalnızca $[0,7 \dots 1]$ değerlerini alabilmektedir. Aynı zamanda, Denklem (26)’da sunulan fonksiyonunun tanım kümesinden de aynı sonuç kolaylıkla elde edilebilir.

**Şekil 7.** $t/\delta = f(k_w^{orig}/k_w^{ref})$ diyagramları

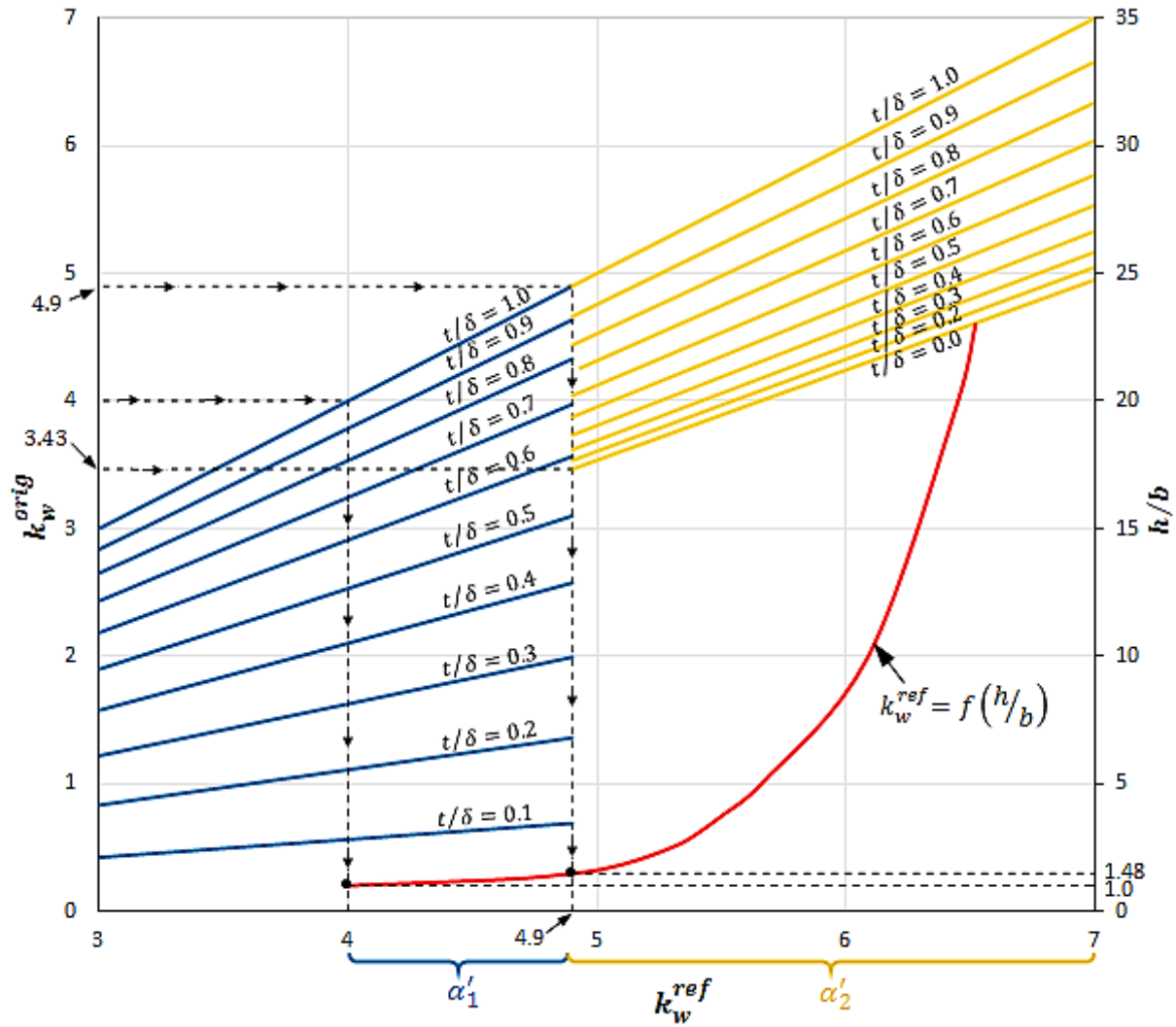
$$2 \left(\frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} \right)^2 - 1 \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{k_w^{orig}}{k_w^{ref}} \geq 0,7 \quad (27)$$

Sonuç olarak, α'_2 köşe boyut faktörünün geçerli olduğu durumlarda orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısını belirlemek için Denklem (28) ile tanımlanan ifade kullanılabilir.

$$k_w^{orig} = [0,7 \dots 1] k_w^{ref} \quad (28)$$

Denklem (28)'de k_w^{ref} parametresinin maksimum değeri ($k_w^{ref} = 7$) yerine yazılınca $\frac{t}{\delta} = 0$ ve $\alpha'_2 = 0,7$ için orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısı $k_w^{orig} = 4,9$ olarak elde edilirken, $\frac{t}{\delta} = 1$ ve $\alpha'_2 = 1$ için ise bu değer $k_w^{orig} = 7$ olarak elde edilir. Denklem (28)'de verilen ifade incelendiğinde orijinal kutu kesitin $k_w^{orig} = 7$ değerine tek bir referans kutu kesitin karşılık geldiğini, bunun aksine ise $k_w^{orig} = 4,9$ değerine çoklu sayıda referans kutu kesitin karşılık geldiği görülebilir. Örneğin $\alpha'_2 = 0,71$ 'de $k_w^{ref} = 6,9$, $\alpha'_2 = 0,86$ 'da $k_w^{ref} = 5,7$, $\alpha'_2 = 0,95$ 'da $k_w^{ref} = 5,16$ v.s. Bu referans kutu kesitler içerisinde yerel burkulma katsayısı en küçük olanı $\alpha'_2 = 1$ 'de $k_w^{ref} = 4,9$ olan kutu kesittir. Bu ilgili referans kesit için $\alpha'_2 = [0,7 \dots 1]$ aralığında karşılık gelen ve en küçük yerel burkulma katsayısına sahip olan orijinal kutu kesitin yerel burkulma katsayısı $k_w^{orig} = 0,7 \cdot 4,9 = 3,43$ şeklinde belirlenmiştir. Böylece $\alpha'_2 = [0,7 \dots 1]$ köşe boyut faktörüne karşılık gelen bütün mümkün referans kutu kesitlerin yerel burkulma katsayıları için $k_w^{ref} = [4,9 \dots 7]$ aralığını, orijinal kutu kesitlerin yerel burkulma katsayıları için ise $k_w^{orig} = [3,43 \dots 7]$ aralığı belirlenmiş olur. α'_2 köşe boyut faktörü için belirlenmiş bu aralıklar, $\alpha'_1 = [0 \dots 1]$ köşe boyut faktörü için de doğrudan $k_w^{ref} = [4 \dots 4,9)$ ve $k_w^{orig} = [0 \dots 4,9)$ aralıklarını ortaya çıkarmaktadır. α'_1 ve α'_2 köşe boyut faktörleri için belirlenen bu aralıkları temsil eden orijinal kutu kesitlere karşılık gelen $\frac{h}{b}$ oranları nedir sorusunun çözümü grafiksel olarak Şekil 8'de verilmiştir. Burada, ilk olarak α'_1 ve α'_2 için $k_w^{orig} = f(k_w^{ref})$ diyagramları ve $k_w^{ref} = f(h/b)$ diyagramı çizilmiş ve daha sonra $k_w^{orig} = 3,43$ ve $k_w^{orig} = 4,90$ yatay doğruları çizilerek sırasıyla $k_w^{orig} = f(t/\delta = 0)$ ve $k_w^{orig} = f(t/\delta = 1)$ doğruları ile Şekil 8'de gösterildiği gibi kesiştirilmiştir. Bu kesişme noktalarını birleştiren dikey çizgi, Şekil 8 'de gösterildiği gibi $k_w^{ref} = f(h/b)$ diyagramı üzerinde h/b oranı için 1,48 değerini belirlemiştir.

Yukarıda elde edilen sonuçlara dayalı olarak, $t/\delta < 1$ şeklinde olan orijinal kutu kesitlerde eğer $h/b \geq 1,48$ ise α'_2 köşe boyut faktörü, eğer $h/b = 1 \dots 1,48$ ise α'_1 köşe boyut faktörü kullanılması gerektiği çıkarımı yapılmıştır.



Şekil 8. α'_1 ve α'_2 köşe boyut faktörlerinin uygulanma aralıklarının grafiksel olarak belirlenmesi

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 5'te açıkça görüldüğü gibi, $\left(\frac{t}{\delta}\right)'$ nin $[1 \dots 2]$ aralığındaki en büyük değeri alınarak, Şekil 5'te verilen diyagramlara yatay olarak çizilen $\left(\frac{t}{\delta}\right)_{\max} = 2$ doğrusu α_1 , α_2 ve α_{avg} eğrilerini sırasıyla A, B ve C noktalarında kesmekle ve bu da $k_w^{ref} = [4 \dots 7]$ aralığını üç geçerli aralığa bölmektedir. $\left(\frac{t}{\delta}\right)_{\max} = 2$ için Denklem (18), Denklem (19) ve Denklem (20) 'de verilen ifadeler yardımıyla A, B ve C kesişme noktalarının apsisi Şekil 5'te gösterildiği gibi sırasıyla $k_w^{ref} = 4,427$, $k_w^{ref} = 4,919$ ve $k_w^{ref} = 5,534$ olarak bulunmuştur. Bu burkulma katsayılarının ait oldukları referans kutu kesitlerin sırasıyla sahip oldukları $\frac{h}{b} = 1,14$, $\frac{h}{b} = 1,51$ ve $\frac{h}{b} = 4,20$ değerleri α_1 , α_2 ve α_{avg} köşe boyut faktörlerinin uygulanma aralıklarının sınırlarını belirlemektedirler. Diğer bir ifadeyle, Şekil 5' den görüldüğü üzere, eğer orijinal kutu kesitin $\frac{h}{b}$ oranı $[1 \dots 1,14]$ aralığına girerse bu durumda α_1 , eğer $[1,14 \dots 1,51]$ aralığına girerse α_{avg} ve eğer $[1,51 \dots 4,20]$ aralığına girerse bu durumda da α_2 köşe

boyut faktörü geçerli olacaktır. Elde edilen bu sonuçlara dayalı olarak, Denklem (13), Denklem (14) ve Denklem (16) kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. $t/\delta > 1$ şeklinde olan orijinal kutu kesitlerde α_1 , α_2 ve α_{avg} köşe boyut faktörlerine göre hesaplanan yerel burkulma katsayıları

t/δ		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
h/b	α	k_w^{ref}	$k_w^{orig} = \alpha k_w^{ref}$				
1,00	α_1	(4,00)	4,42 (4,81)	4,87 (5,56)	5,34 (6,10)	5,82 (6,39)	6,32 (6,56)
1,25	α_{avg}	(4,64)	5,08 (5,28)	5,49 (5,79)	5,88 (6,15)	6,25 (6,39)	6,60 (6,54)
2,00	α_2	(5,16)	5,61 (5,60)	5,94 (5,99)	6,19 (6,25)	6,38 (6,43)	6,53 (6,57)
2,50	α_2	(5,30)	5,76 (5,72)	6,10 (6,05)	6,36 (6,29)	6,55 (6,45)	6,70 (6,59)
3,00	α_2	(5,38)	5,84 (5,80)	6,19 (6,11)	6,45 (6,35)	6,65 (6,50)	6,81 (6,61)
4,00	α_2	(5,51)	5,98 (5,92)	6,34 (6,21)	6,61 (6,41)	6,81 (6,58)	6,97 (6,68)

Not: Tablo 3'te parantez içinde verilen değerler Kroll [21] tarafından rapor edilmiş değerlerdir.

Denklem (13), Denklem (14) ve Denklem (16)'da sunulan formüller kullanılarak elde edilen sonuçlar Kroll [21] tarafından rapor edilen değerler ile karşılaştırıldığında (Tablo 3) söz konusu formüllerin farklı et kalınlıklarına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için kullanılabileceği söylenebilir.

Bunu doğrulamak için Tablo 3'ün $\frac{t}{\delta} = 1$ için olan ilk sütunu ayrıca ele alınmıştır. Bu durumda orijinal kutu kesit sabit et kalınlığına sahip olduğundan Denklem (13), Denklem (14) ve Denklem (16)'da sunulan formüller $k_w^{orig} = k_w^{ref}$ eşitliğine dönüşür. $\frac{t}{\delta} = 1$ için kutu kesitlerin burkulma katsayısını belirlemek için Seif ve Shafer [14] $k_w = 4(h/b)^{0,3}$ formülünü önermiştir. Bu formül kullanılarak elde edilen sonuçlar Stowell [20] ve Kroll [21] tarafından rapor edilen değerler ile kıyaslamalı olarak Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te sunulan sonuçlar Stowell ve Kroll değerlerinin hemen hemen aynı olduğunu fakat Seif ve Shafer'in [14] değerlerinin bunlara kıyasla değişkenlik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Şöyle ki $\frac{h}{b} = 2,5$ oranına kadar Seif ve Shafer'in [14] değerleri ile Stowell [20] veya Kroll [21] değerleri arasındaki fark daha az iken, $\frac{h}{b} > 2,5$ değerleri için bu fark önemli hale gelmektedir.

Tablo 4. Sabit et kalınlığına sahip ($t/\delta = 1$) kutu kesitler için k_w burkulma katsayısı değerleri

h/b	1,00	1,25	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00
Kaynak							
Seif (2010) [14]	4,00	4,28	4,93	5,27	5,56	6,06	6,48
Stowell (1939) [20]	4,00	4,66	5,16	5,29	5,38	5,52	5,68
Kroll (1943) [21]	4,00	4,64	5,15	5,30	5,39	5,51	5,66

Tablo 4'teki sonuçlardan, en büyük artış oranı $(6,48 - 5,66)/5,66 = 0,145$ olarak bulunurken, en büyük azalma oranı ise $(4,66 - 4,28)/4,66 = 0,08$ olarak hesaplanmıştır. Diğer bir ifadeyle, eğer sabit et kalınlığına sahip kutu kesitin burkulma katsayılarının belirlenmesi için Seif ve Shafer'in formülünün kullanılması durumunda Stowell veya Kroll değerlerinin kullanılmasına kıyasla yerel burkulma katsayısında en fazla %8 azalmaya ve en fazla %14,5 artışa neden olma durumu söz konusudur. Buna ilave olarak, Tablo 2'de sunulan ve Denklem (13), Denklem (14) ve Denklem (16) kullanılarak elde edilen sonuçlar Stowell[20] veya Kroll[21] değerleri ile karşılaştırıldığında

yerel burkulma katsayısındaki en büyük artış oranı $(6,97 - 6,68)/6,68 = 0,043$ olarak ve en büyük azalma oranı ise $(6,10 - 5,34)/6,10 = 0,12$ olarak hesaplanmıştır. Daha açık bir ifadeyle, kritik yerel burkulma gerilmelerinin hesaplanmasında k_w için Stowell veya Kroll değerlerinin yerine, teklif edilen Denklem (13), Denklem (14) ve Denklem (16)'da önerilen formüller kullanılırsa, bu durumda kritik burkulma gerilmelerinde en fazla %4,3...%12 arasında artış veya azalma şeklinde bir fark ortaya çıkması söz konusudur.

Görüldüğü üzere Stowell veya Kroll değerleri ile Seif ve Shafer'in formül değerleri arasındaki fark %8...%14,5 iken, Denklem (13), Denklem (14) ve Denklem (16)'da önerilen formüller kullanılarak elde edilen değerler ile kıyaslandığında söz konusu bu fark %4,3... %12'dir. Elde edilen bu sonuçlar önerilen formüllerin eksenel basınç altındaki farklı et kalınlıklarına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarının hesaplanması için kullanılabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.

α'_1 ve α'_2 köşe boyut faktörlerine göre Denklem (21) ve Denklem (22)'de sunulan ifadeler kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. $t/\delta < 1$ şeklinde olan orijinal kutu kesitlerde α'_1 ve α'_2 köşe boyut faktörlerine göre hesaplanan yerel burkulma katsayıları

t/δ		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
h/b	α	$k_w^{orig} = \alpha k_w^{ref}$					k_w^{ref}
1,00	α'_1	2,53 (1,64)	2,91 (2,23)	3,24 (2,75)	3,53 (3,22)	3,78 (3,61)	(4,00)
1,25	α'_1	2,93 (2,56)	3,38 (3,42)	3,76 (3,75)	4,10 (4,04)	4,39 (4,36)	(4,64)
2,00	α'_2	4,08 (4,12)	4,25 (4,29)	4,45 (4,48)	4,67 (4,66)	4,91 (4,91)	(5,16)
2,50	α'_2	4,19 (4,21)	4,37 (4,41)	4,57 (4,62)	4,80 (4,82)	5,04 (5,05)	(5,30)
3,00	α'_2	4,25 (4,25)	4,44 (4,50)	4,64 (4,70)	4,87 (4,91)	5,12 (5,13)	(5,38)
4,00	α'_2	4,36 (4,38)	4,54 (4,60)	4,76 (4,85)	4,99 (5,08)	5,24 (5,31)	(5,51)

Not: Tablo 5'te parantez içinde verilen değerler Kroll [21] tarafından rapor edilmiş değerlerdir.

Tablo 5'te verilen veriler incelendiğinde önerilen ve geliştirilen yöntemle göre belirlenmiş yerel burkulma katsayıları ile Kroll [21] tarafından rapor edilen değerler arasında en yüksek farkın $h/b = 1$ olduğunda ortaya çıktığı ve ortalama farkın %17,39 olduğu görülmüştür. Ayrıca, Tablo 5'te sunulan önerilen model ile hesaplanmış tüm değerler dikkate alındığında genel ortalama farkın ise %3,97 olduğu görülmüştür.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, eşit olmayan et kalınlıklarına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarının analitik olarak hesaplanabilmesi için 'Referans Kesit Burkulma Hesap Modeli' adı verilen bir yöntem geliştirilmiş ve kapsamlı bir biçimde açıklanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Önerilen model ile farklı et kalınlıklarına ($t \neq \delta$) sahip $h \times b$ boyutlarındaki orijinal bir kutu kesit, aynı $h \times b$ boyutlarına sahip, ancak sabit et kalınlıklarında olan iki referans kutu kesit ile geometrik olarak ilişkilendirilmiştir. Bu sayede, her üç kesitin yerel burkulma gerilmeleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve orijinal kutu kesitin burkulma katsayılarının değerlendirilmesine yönelik gerekli sınır şartları tanımlanmıştır.

2. Analitik incelemeler sonucunda, aynı h ve b ana boyutlarına sahip orijinal ve referans kutu kesitlerin yerel burkulma katsayıları arasında doğrusal bir fonksiyonel ilişki bulunduğu ($k_w^{orig} = \alpha k_w^{ref}$) tespit edilmiştir.
3. Orijinal ve referans kutu kesitlerin köşe boyutlarının oranı olarak tanımlanan köşe boyut faktörü α , $t > \delta$ durumundaki orijinal kutu kesitler için α_1 , α_2 ve α_{avg} olmak üzere üç farklı değer; $t < \delta$ durumundaki orijinal kutu kesitler için ise α_1' ve α_2' olmak üzere iki farklı değer belirlenmiştir.
4. Orijinal ve referans kutu kesitlerin yerel burkulma katsayıları oranının, kutu kesitlerin uygun köşe boyutları oranına ya da uygun köşe boyut faktörüne eşit olduğu belirlenmiştir.
5. $t > \delta$ ve $t < \delta$ durumlarındaki orijinal kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarını belirlemek için analitik ifadeler geliştirilmiştir.
6. $t > \delta$ durumundaki orijinal kutu kesitlerin yerel burkulma katsayısının hesaplanmasında ($k_w^{orig} = \alpha k_w^{ref}$), h/b oranına bağlı olarak α 'nın yerine belirli köşe boyut faktörlerinin kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Buna göre, h/b oranı 1,0 ile 1,14 arasında ise α_1 , 1,14 ile 1,51 arasında ise α_{avg} ve 1,51 ile 4,20 arasında ise α_2 köşe boyut faktörünün geçerli olduğu belirlenmiştir.
7. $t < \delta$ durumundaki orijinal kutu kesitlerin yerel burkulma katsayısının hesaplanmasında ($k_w^{orig} = \alpha k_w^{ref}$), h/b oranına bağlı olarak α 'nın yerine belirli köşe boyut faktörlerinin kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Buna göre, h/b oranı 1,0 ile 1,48 arasında ise α_1' , $h/b \geq 1,48$ durumlarında ise α_2' köşe boyut faktörünün geçerli olduğu bulunmuştur.
8. Eksenel basınç altındaki farklı duvar kalınlıklarına sahip kutu kesitlerin yerel burkulma katsayılarını belirlemek amacıyla geliştirilen ve sunulan analitik yöntem, büyük eksen eğilmesi, küçük eksen eğilmesi, eğik eğilme ve birleşik eksenel basınç ile eğilme gibi farklı yükleme koşullarına uygulanabilme potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, bu çalışmada eksenel basınç altındaki eşit olmayan et kalınlıklarına sahip kutu kesitlerde yerel burkulma katsayılarının analitik olarak belirlenebilmesi için yeni bir yöntem geliştirilmiş ve detaylı bir şekilde sunulmuştur. Sunulan yöntem, literatürde enerji yöntemiyle dolaylı olarak hesaplanan bazı yerel burkulma katsayısı [20, 21] değerleriyle karşılaştırılmış ve modelin geçerliliği doğrulanmıştır.

KAYNAKLAR

1. Billingham J, Sharp JV, Spurrier J, Kilgallon PJ (2003) Review of the performance of high strength steels used offshore. United Kingdom.
2. Pocock G (2006) High strength steel use in Australia, Japan & the US. Structural Engineer. 84(21):27–31.
3. Cornelissen R, Maljaars J, Hofmeyer H (2021) Buckling and wrinkling of rectangular hollow sections curved in three-point-roll bending. Int J Adv Manuf Technol 112:2091–2107. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06443-y>
4. Rincón-Dávila D, Alcalá E, Martín Á (2022) Theoretical–experimental study of the bending behavior of thin-walled rectangular tubes. Thin-Walled Struct 173:109009. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109009>
5. Kim TH, Reid SR (2001) Bending collapse of thin-walled rectangular section columns. Comput Struct 79:1897–1911. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00089-X)
6. Gardner L, Chan T, Law K (2010) Structural design of elliptical hollow sections: A review. Proc Inst Civ Eng Struct Build 63:391–402. <https://doi.org/10.1680/stbu.2010.163.6.391>

7. Gardner L, Saari N, Wang F (2010) Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections. *Thin-Walled Struct* 48:495–507. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.02.003>
8. Dundar MA, Nuraliyev M (2024) Determination of optimal cross-section dimensions of rectangular hollow sections under oblique bending: analytical and numerical study. *J Innovative Eng Nat Sci* 4(1):198–219. <https://doi.org/10.61112/jiens.1383887>
9. Yusof NSB, Sapuan SM, Sultan MTH, Jawaaid M, Maleque MA (2017) Design and materials development of automotive crash box: a review. *Ciência & Tecnologia Dos Materiais* 29:129–144. <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2017.09.003>
10. Huang B, Xing K, Rameezdeen R (2023) Exploring Embodied Carbon Comparison in Lightweight Building Structure Frames: A Case Study. *Sustainability* 15(20):15167. <https://doi.org/10.3390/su152015167>
11. Jones RM (1975) *Buckling of bars, plates, and shells*, Virginia, USA.
12. Vieira L, Gonçalves R, Camotim D (2018) On the local buckling of RHS members under axial force and biaxial bending. *Thin-Walled Struct* 129:10–19. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.03.022>
13. Dundar MA, Nuraliyev M (2024) Parametric study on the assessment of the local buckling behavior of perforated square hollow sections with non-uniform wall thickness under axial compression. *J Innovative Eng Nat Sci* 4(2):326–353. <https://doi.org/10.61112/jiens.1397391>
14. Seif M, Schafer BW (2010) Local buckling of structural steel shapes. *J Constr Steel Res* 66(10):1232–1247. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.03.015>
15. Nuraliyev M, Dundar MA, Sahin DE (2022) Determination of optimal dimensions of polymer-based rectangular hollow sections based on both adequate-strength and local buckling criteria: Analytical and numerical studies. *Mech Based Des Struct Mach* 52(2):1159–1189. <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2139720>
16. Gardner L, Fieber A, Macorini L (2019) Formulae for Calculating Elastic Local Buckling Stresses of Full Structural Cross-sections. *Structures* 17:2–20. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.012>
17. Gardner L, Young B (2016) Buckling of ferritic stainless steel members under combined axial compression and bending. *J Constr Steel Res* 117:35–48. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.003>
18. Timoshenko S, Gere JG, Gere JM (1961) *Theory of Elastic Stability*. McGraw-Hill.
19. Nuraliyev M, Dundar MA, Akyildiz HK (2024) A novel analytical method for local buckling check of box sections with unequal wall thicknesses subjected to bending. *Mech Adv Mater Struct* 32(8):1683–1706. <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2369262>
20. Stowell EZ, Lundquist EE (1936) Local instability of columns with I-, Z-, channel, and rectangular-tube sections.
21. Kroll WD, Fisher GP, Heimerl GJ (1943) Charts for calculation of the critical stress for local instability of columns with I-, Z-, channel, and rectangular-tube section. National Advisory Committee for Aeronautics.