



ÇOK KATLI YAPILARDA UNİFORM OLMAYAN BURULMA NEDENİYLE OLUŞAN TESİRLERİN BELİRLENMESİ İÇİN BİR YÖNTEM

A METHOD TO DETERMINE THE EFFECTS OF NONUNIFORM TORSION ON TALL BUILDINGS

Tuncay AYDOĞUŞ^{1*}, Güliz BAYRAMOĞLU², Alpay ÖZGEN²

¹ENKA Teknik Genel Müteahhitlik Bakım İşletme Sevk ve İdare Anonim Şirketi, İstanbul, Türkiye.
tuncayaydogus@gmail.com

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
guliz.bayramoglu2@itu.edu.tr, ozgena@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 03.04.2014, Kabul Tarihi/Accepted: 29.05.2014
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2014.88597
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, yüksek yapılarda yatay yükler etkisinde oluşan, Vlasov uniform olmayan burulması nedeniyle taşıyıcı yapı elemanlarda oluşan tesirlerin belirlenmesi için bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde, mevcut yöntemlerde yapıya yüksekliği boyunca uniform yayılı bir yatay yük etkimesi kabulü yerine, daha gerçekçi olan kat seviyelerinde farklı büyüklüklere sahip yatay yüklerin etkimesi kabulü yapılmıştır. Önerilen yöntemde, herhangi bir enkesitin kesit özelliklerinin hesaplandığı ve birim çarpılma diyagramının çizildiği bir algoritma hazırlanmış ve bu algoritma MATHCAD programında yazılmış ve böylece zaman alıcı diferansiyel denklem çözümüne gerek kalmadan kısa sürede sonuçların elde edilmesi sağlanmıştır. Yöntem Taranath, Smith ve Coull'un çalışmaları ile karşılaştırılmış, hassaslığını tespit için konsol bir kiriş ele alınarak ANSYS ve CONSTEEL analiz programları ile karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Uniform burulma, Uniform olmayan burulma, Çarpılma burulması, Yüksek yapılarda çarpılma, Taşıma matrisi

Abstract

In this paper, a method is presented to determine the effects of Vlasov nonuniform torsion caused by horizontal loads on structural systems of tall buildings. In this method, a realistic assumption is made that the variable horizontal loads act at each story level instead of a uniform lateral load along the height of building. For the presented method, an algorithm is prepared in software MATHCAD in which the cross-sectional characteristics are calculated and the sectorial coordinate diagram is plotted. The results can be obtained in a short time, hence it is not needed to solve the time consuming differential equations. The method is compared with the studies of Taranath and Smith & Coull, and is also compared with the softwares ANSYS and CONSTEEL by modeling as a cantilever beam to check the accuracy of the algorithm.

Keywords: Uniform torsion, Nonuniform torsion, Warping torsion, Warping effect on tall buildings, Transfer matrix

1 Giriş

Yapı mühendisliğinde yüksek yapı kavramı, rüzgar ve deprem yüklerinin başlıca etken yanal yük olduğu taşıyıcı sistemlerdir. Yüksekliklerinin oldukça fazla olması nedeniyle normal yükseklikteki taşıyıcı sistemlere oranla gerek yapı, gerekse de statik hesap yöntemi büyük önem arz etmektedir. Normal yükseklikteki yapılarda etkili olmayabilen yer değiştirmeler, titreşimler ve stabilite bozuklukları yüksek yapılarda göz ardı edilemeyecek mertebelerde olabilmektedir.

Literatürde yüksek yapılarda genel olarak uniform yayılı yatay yüklerden oluşan burulma ve bu burulmadan meydana gelen çarpılma etkileri incelenmiştir. Pek çok kaynakta, yapılarda uniform yayılı yatay yük etkisinden oluşan uniform yayılı burulma momentlerinin açık enkesitlerde meydana getirdiği kesit tesirlerini veren yaklaşımlar yer almaktadır.

Gerçekte yükler, mevcut uniform yayılı yük varsayımıyla uyuşmamakta, yapı yüksekliğince eşit ve yayılı olarak etkimemektedir. Örneğin yüksek yapılarda yapı yüksekliğince cepheye etkiyen rüzgar yükü, cephe düşey taşıyıcı elemanları tarafından ana taşıyıcı sisteme kat seviyelerinden tekil olarak etkimektedir. Ayrıca hem deprem yüklerinin, hem de rüzgar yüklerinin yapı yüksekliğince dağılımı farklılık gösterdiği için her kata etkiyen kesme kuvvetleri de farklı olur.

Son yüzyılda, özellikle Amerika'da, yüksek yapı yapımına hız verilmesi sonucunda yüksek yapılar ile ilgili çalışmalara da ağırlık verilmiştir. Son çeyrek yüzyılda ise burulma etkisinin çok katlı yüksek yapılardaki etkileri incelenmeye başlanmıştır. Çok katlı yüksek yapılardaki burulma problemi ile ilgili ilk kapsamlı çalışma Smith ve Coull [1] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada Smith ve Coull yatay yük taşıyıcı sistemleri çekirdekten oluşan yüksek yapıları ele almışlardır. Çalışmada, uniform yayılı yatay yüklerden oluşan burulmadan meydana gelen çarpılmanın tespiti ve bu çarpılma nedeniyle çekirdekte oluşan sekonder gerilmelerin tayini için yöntemler sunulmuştur.

Vasquez ve Riddell [2] çok katlı yapılardaki çekirdek elemanları ince cidarlı elemanlar olarak ele almışlar, ince cidarlı açık kesitlerde çarpılma nedeniyle oluşan şekil değiştirme etkisini de içeren bir rijitlik matrisi önermişlerdir. Jolissaint ve Chen [3] rijit çerçevelerin uniform ve uniform olmayan çarpılma burulmalarını incelemişler, burulma dönmesinin fonksiyonu için bir diferansiyel denklem önermişlerdir. İnce cidarlı çekirdeklerden oluşan bina çerçevelerinin nonlinear inelastik analizine ilişkin bir çalışma Shanmugam, Liew ve Chen [4] tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışmada ince cidarlı çekirdeklerden oluşan taşıyıcı sistemlerin ikinci mertebe elasto-plastik analizi hem stabilite, hem de plastisite kavramlarını kapsayacak şekilde ele alınmıştır.

Sunulan bu çalışmada ise yüksek yapılarda yatay yükler nedeniyle ortaya çıkan burulma etkisinin sabit enkesitli ana taşıyıcı elemanlarda oluşturduğu sekonder tesirler incelenmiştir. Yükler yapıya uniform olarak değil, kat seviyelerinden tekil olarak etkilmiştir. Dolayısıyla yapı uniform yayılı burulma momentleri yerine, tekil burulma momentlerine göre incelenmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntemle, her kata etkileyen eşit tekil yükler altındaki burulma etkilerinin yanı sıra, her kata etkileyen farklı büyüklükteki tekil yükler altında burulma etkileri de incelenebilmektedir.

2 Burulma

2.1 Burulma Kavramı

Yapı mekaniğinde burulma kavramı, belki de en az bilinen ya da en az anlaşılan konulardan biridir. Burulma kavramı yaklaşık onsekizinci yüzyılın başından itibaren bilim adamları tarafından incelenmektedir. Burulma ile ilgili ilk çalışmalar Fransız fizikçi Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) tarafından yapılmıştır. Coulomb'un teorisine göre burulmaya maruz dairesel kesitli çubuklarda, şekil değiştirme sonrası enkesitin düzlem kaldığı ve çarpılma şekil değiştirmesi olmadan kendi eksenini etrafında döndüğü kabul edilir. Enkesitin herhangi bir noktasında kayma gerilmesi kesit yarıçapına diktir ve burulma sabiti kesitin polar atalet momentine eşittir [5]. Louis Henri Navier, enkesiti dairesel olmayan prizmatik çubuklarda, burulma altında en büyük kayma gerilmelerinin kesit ağırlık merkezinden en uzak noktalarda meydana geldiğini göstermiştir [6].

1855'de burulma teorisinin ilkeleri Adhemar Jean-Claude Barre de Saint Venant tarafından açıklanmıştır. Saint Venant burulmaya maruz prizmatik bir çubuğun enkesit düzleminin değişmeyeceğini belirtmiştir. St. Venant'ın teorisi "uniform burulma" olarak isimlendirilmektedir [7]. 1930'larda Vlasov tarafından "uniform olmayan burulma" kavramını içeren burulma teorisi geliştirilmiştir [8]. Bu teori "çarpılma burulması" olarak da isimlendirilmektedir [9].

1944'de von Karman ve Christensen kapalı kesitler için bir teori geliştirmişlerdir. 1954'de ise Benscoter kapalı kesitler için daha hassas bir teori geliştirmiştir [10].

Son 10 yılda uniform olmayan burulmaya ilave olarak nonlineer elastik uniform olmayan burulma kavramı ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır; bu konuda 2005 yılında Trahair [11] detaylı bir çalışma yayınlamıştır.

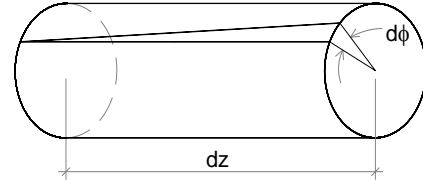
Burulma etkisindeki elemanlarda oluşan tesirlerin dağılımını içeren diferansiyel denklemlerle ilgili günümüze kadar pek çok farklı çalışma yapılmıştır. Özellikle Galambos'un [12] vermiş olduğu diferansiyel denklemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca farklı statik sistemler için Murray [13] tarafından da diferansiyel denklemler verilmiştir. AISC'de çelik yapılarda karşılaşılabilecek bazı durumlar için burulma ifadeleri yer almaktadır [14].

Uniform olmayan burulmaya maruz açık kesitlerde oluşan gerilmelerin dağılımı Galambos [12], Murray [13], Smith ve Coull [1], Taranath [15], Saade, Espion ve Warzee [16] tarafından incelenmiş ve dağılıma ilişkin çözümler üretilmiştir.

Hem St. Venant burulması, hem de Vlasov çarpılma burulması etkisindeki sürekli sistemlerde çarpılma momentininin dağılımı için iteratif bir çalışma Medwadowski [17] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada burulma momentlerine maruz sürekli bir kren kirişi ele alınmış, bilinen moment dağılımı yöntemine benzer bir yöntem önerilmiştir.

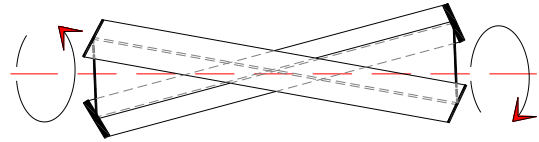
2.2 Çarpılma Burulmasının Diferansiyel Denklemleri ve Çözümü

Bir kiriş enkesitinin dönmesinin kiriş eksenini doğrultusundaki ϕ bileşenine "burulma dönmesi" denir. Şekil 1'deki gibi dz boyunda bir elemanın sağ kesitinin sol kesitine göre dönmesi $d\phi$ olduğuna göre $\phi' = \frac{d\phi}{dz}$ "birim dönme" denir.



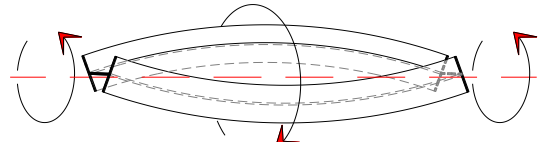
Şekil 1: Burulma geometrisi.

St. Venant uniform burulması halinde eleman boyunca ϕ' birim dönmesi ve boyuna çarpılma yer değiştirmeleri sabittir, bu nedenle bu burulmaya "uniform burulma" denir [7]. Uniform burulma durumu yapılarda nadiren görülen ve daha çok türbin ve jeneratör şaftları gibi makine parçalarında görülen bir burulma türüdür. St. Venant uniform burulması Şekil 2'de bir I profilinde gösterilmiştir.



Şekil 2: St Venant burulması.

Vlasov uniform olmayan burulma halinde ϕ' birim dönmesi eleman boyunca sabit olmayıp değişkendir. Çarpılma yer değiştirmeleri de eleman boyunca değişkendir. Vlasov tipi uniform olmayan burulma Şekil 3'te bir I profilinde gösterilmiştir.



Şekil 3: Vlasov burulması.

Toplam burulma St. Venant burulması ile Vlasov çarpılma burulmasının toplamıdır [18].

Uniform yayılı burulma momenti durumuna ait diferansiyel denklem aşağıda verilmiştir:

$$T_z = T_t + T_w$$

$$T_z = G \cdot I_t \cdot \frac{d\phi}{dz} - E \cdot I_w \cdot \frac{d^3\phi}{dz^3} \quad (1)$$

$$-t_z = \frac{d}{dz} T_z$$

$$t_z = -G \cdot I_t \cdot \phi'' + E \cdot I_w \cdot \phi''''$$

Burada;

$$\lambda^2 = \frac{G \cdot I_t}{E \cdot I_w} \quad (2)$$

olarak tanımlanır ve denklemin genel çözümü yapılarak,

$$\phi(z) = A + B \cdot z + C \cdot \cosh(\lambda z) + D \cdot \sinh(\lambda z) - \frac{t_z}{\lambda^2 \cdot E \cdot I_w} \cdot z^2 \quad (3)$$

elde edilir. Tekil burulma momenti durumuna ait diferansiyel denklem

$$\phi''' - \frac{G \cdot I_t}{E \cdot I_w} \cdot \phi' = \frac{-T_z}{E \cdot I_w} \quad (4)$$

ve genel çözümü

$$\phi(z) = A + B \cdot \cosh(\lambda z) + C \cdot \sinh(\lambda z) + \frac{T_z}{\lambda^2 \cdot E \cdot I_w} \cdot z \quad (5)$$

olur. (3) ve (5)'te verilen ifadelerdeki A, B, C ve D sabitleri ifade etmektedir. Bu sabitler sınır koşulları kullanılarak bulunur. Çalışmada ele alınan konsol giriş için sınır koşulları:

$$\begin{aligned} \phi(0) &= 0 \\ \phi'(L) &= 0 \\ \phi''(L) &= 0 \\ \phi'''(L) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Denklemler çözülerek;

Toplam dönme : $\phi(z)$

Uniform burulma momenti: $T_t(z) = G \cdot I_t \cdot \phi'(z)$

Bimoment : $T_{wm}(z) = E \cdot I_w \cdot \phi''(z)$

Çarpılma burulması momenti: $T_w(z) = -E \cdot I_w \cdot \phi'''(z)$

Toplam burulma momenti : $T_z(z) = G \cdot I_t \cdot \phi'(z) - E \cdot I_w \cdot \phi'''(z)$

elde edilir. Bu ifadelerde E. I_w çarpılma rijitliği, G. I_t burulma rijitliğidir.

2.3 Uniform Yayılı Burulma Momenti Durumunda Burulma Fonksiyonları

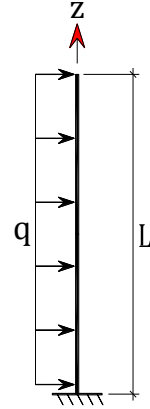
Uniform yayılı burulma momenti etkisindeki bir konsol giriş (Şekil 4) için burulma fonksiyonları (7) bağıntılarıyla verilmiştir. t_z uniform yayılı burulma momenti, q yayılı yükü ile ağırlık ve kayma merkezleri arasındaki mesafenin çarpımına eşittir.

$$\begin{aligned} \phi(z) &= \frac{t_z}{G \cdot I_t \cdot \lambda^2} \cdot \left[\frac{(\lambda L \cdot \sinh \lambda L + 1) \cdot (\cosh \lambda z - 1)}{\cosh \lambda L} \right. \\ &\quad \left. - \lambda L \cdot \sinh \lambda z + (\lambda L)^2 \left[\frac{z}{L} - \frac{\left(\frac{z}{L}\right)^2}{2} \right] \right] \\ \phi'(z) &= \frac{t_z}{G \cdot I_t \cdot \lambda} \cdot \left[\frac{(\lambda L \cdot \sinh \lambda L + 1) \cdot \sinh \lambda z}{\cosh \lambda L} - \lambda L \cdot \cosh \lambda z \right. \\ &\quad \left. + \lambda L \left[1 - \frac{z}{L} \right] \right] \quad (7) \\ \phi''(z) &= \frac{t_z}{G \cdot I_t} \cdot \left[\frac{(\lambda L \cdot \sinh \lambda L + 1) \cdot \cosh \lambda z}{\cosh \lambda L} - \lambda L \cdot \sinh \lambda z - 1 \right] \\ \phi'''(z) &= \frac{t_z \cdot \lambda}{G \cdot I_t} \cdot \left[\frac{(\lambda L \cdot \sinh \lambda L + 1) \cdot \sinh \lambda z}{\cosh \lambda L} - \lambda L \cdot \cosh \lambda z \right] \end{aligned}$$

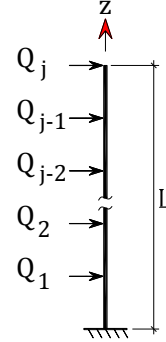
2.4 Farklı Tekil Burulma Momentleri Durumu için Önerilen Yöntem

Bir konsol taşıyıcı sistemde j. noktada etkiyen Q_j tekil burulma momentinden dolayı (Şekil 5) i. noktada oluşan burulma

fonksiyonları aşağıda yazılmıştır. T_z tekil burulma momenti, Q_j tekil yükü ile ağırlık ve kayma merkezleri arasındaki mesafenin çarpımına eşittir.



Şekil 4: Statik sistem ve uniform yayılı burulma momentini oluşturan yükleme durumu.



Şekil 5: Tekil burulma momentleri oluşturan yükleme durumu.

A1 = sinhλz_i · coshλL

A2 = (1 - coshλz_i)

A3 = [sinhλ(L - z_j) - sinhλL]

A4 = -λ(z_i - z_j) + sinhλ(z_i - z_j)

A5 = coshλ(z_i - z_j)

A6 = sinhλ(z_i - z_j)

$$\phi_{ij}(z) = \begin{cases} i \leq j \rightarrow \frac{T_{zj}}{\lambda \cdot G \cdot I_t} \cdot \left[\lambda z_i - \frac{A1 - A2 \cdot A3}{\cosh \lambda L} \right] \\ i \geq j \rightarrow \frac{T_{zj}}{\lambda \cdot G \cdot I_t} \cdot \left[\lambda z_i - \frac{A1 - A2 \cdot A3}{\cosh \lambda L} + A4 \right] \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi_i(z) = \sum_{j=0}^n \phi_{ij}(z) \quad (9)$$

$$\phi'_{ij}(z) = \begin{cases} i \leq j \rightarrow \frac{T_{zj}}{G \cdot I_t} \cdot \left[A2 - \frac{A3 \cdot \sinh \lambda z_i}{\cosh \lambda L} \right] \\ i \geq j \rightarrow \frac{T_{zj}}{G \cdot I_t} \cdot \left[\frac{A2 - A3 \cdot \sinh \lambda z_i}{\cosh \lambda L} - 1 + A5 \right] \end{cases} \quad (10)$$

$$\phi''_i(z) = \sum_{j=0}^n \phi''_{ij}(z) \quad (11)$$

$$\phi''_{ij}(z) = \begin{cases} i \leq j \rightarrow \frac{T_{zj}}{\lambda \cdot G \cdot I_t} \cdot \left[\frac{\sinh \lambda z_i + A3 \cdot \cosh \lambda z_i}{\cosh \lambda L} \right] \\ i \geq j \rightarrow \frac{T_{zj}}{\lambda \cdot G \cdot I_t} \cdot \left[\frac{\sinh \lambda z_i + A3 \cdot \cosh \lambda z_i}{\cosh \lambda L} - A6 \right] \end{cases} \quad (12)$$

$$\phi''_i(z) = \sum_{j=0}^n \phi''_{ij}(z) \quad (13)$$

$$\phi'''_{ij}(z) = \begin{cases} i \leq j \rightarrow \frac{T_{zj}}{G \cdot I_t} \cdot \left[\cosh \lambda z_i + \frac{A3 \cdot \sinh \lambda z_i}{\cosh \lambda L} \right] \\ i \geq j \rightarrow \frac{T_{zj}}{G \cdot I_t} \cdot \left[\cosh \lambda z_i + \frac{A3 \cdot \sinh \lambda z_i}{\cosh \lambda L} - A5 \right] \end{cases} \quad (14)$$

$$\phi'''_i(z) = \sum_{j=0}^n \phi'''_{ij}(z) \quad (15)$$

Önerilen yöntem, taşıma matrisi yöntemi kullanılarak uniform olmayan burulmaya maruz değişken enkesitli taşıyıcı sistemlere de uygulanabilmektedir.

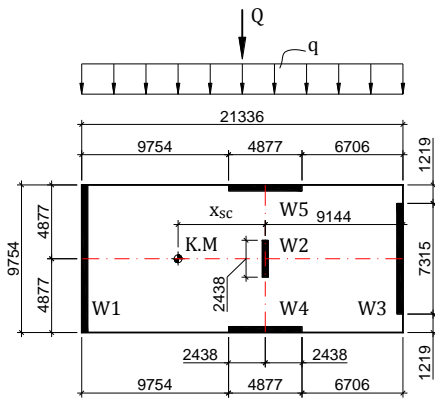
3 Önerilen Yöntemin Mevcut Çalışmalar ve Farklı Analiz Programları ile Karşılaştırılması

3.1 Taranath Yapı Modeli Üzerinde Karşılaştırma

Bu bölümde Taranath [15] tarafından incelenmiş olan 15 eşit yükseklikte kata sahip, yaklaşık 55 m yüksekliğinde betonarme bir yapı ele alınmıştır. Taranath, tipik kat planı Şekil 6'da verilen yapıyı, Şekil 7'de gösterdiği gibi uniform yayılı yatay yük kabulü ile çözmüştür. Söz konusu yapıda diyafram etkisinin döşeme tarafından sağlandığı kabul edilmiştir. Yatay yükler, planda farklı konumlarda teşkil edilmiş farklı enkesitlerdeki perdeler tarafından zemine aktarılmaktadır.

Şekil 6'da gösterildiği gibi yapıya etkiyen q yayılı yükünün bina genişliği ve kat yüksekliğiyle çarpımından elde edilen Q tekil yükü kat döşemesinin ağırlık merkezinden etkimektedir. Ağırlık merkezi ile şekilde K.M ile gösterilen kayma merkezi arasındaki x_{sc} mesafesi kadar bir dışmerkezlilik bulunmaktadır. Çözüm, bu dışmerkezlilik mesafesi ile Q yükünün çarpımından elde edilen burulma momenti altında gerçekleştirilmiştir.

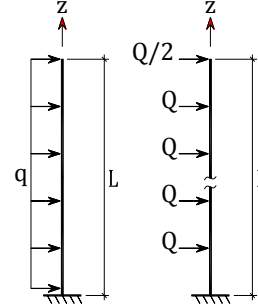
Önerilen yöntemle yapılan çözüm sonucunda elde edilen burulma dönmesi değerleri ile Taranath'ın [15] bulmuş olduğu burulma dönmesi değerleri Şekil 8'de aynı grafik üzerinde gösterilerek karşılaştırılmıştır.



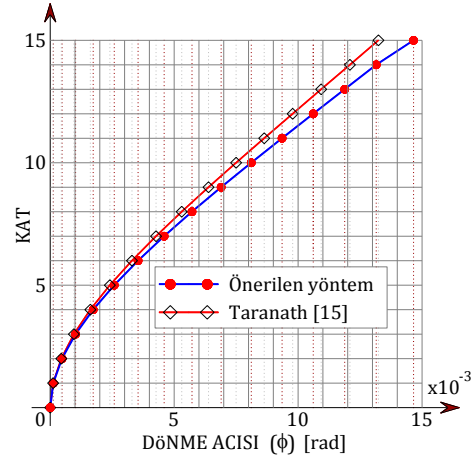
Şekil 6: Kat planı ve yükleme durumu.

Elde edilen burulma dönmesi değerleri incelendiğinde, önerilen yöntemle edilen değerlerin Taranath'ın bulmuş olduğu değerlerden ortalama %7.7 oranında daha büyük olduğu görülmüştür.

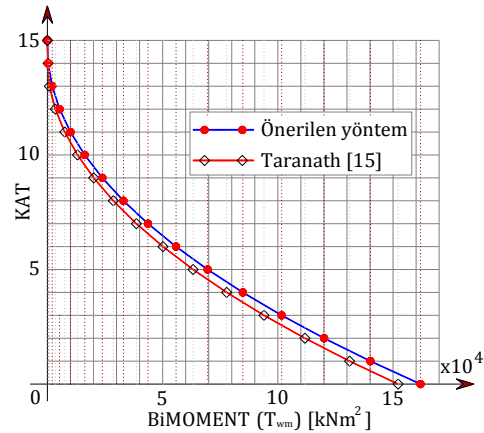
Burulma dönmesi fonksiyonunun ikinci mertebe türevinin, çarpılma rijitliği ile çarpımından bimomentler elde edilmiştir. Şekil 9'da hem önerilen yöntemle bulunan, hem de Taranath'ın [15] bulmuş olduğu bimomentlerin yapı yüksekliğince dağılımları grafik üzerinde gösterilmiştir. Önerilen yöntemle edilen değerlerin Taranath'ın bulmuş olduğu değerlerden %6.4 ~ %11.3 kadar büyük olduğu görülmüştür.



Şekil 7: Taranath [15], Smith ve Coull [1] ve önerilen yöntemle ait yükleme durumları.



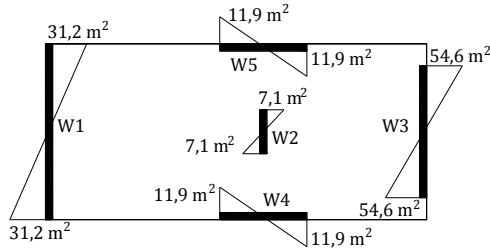
Şekil 8: Burulma dönmelerinin karşılaştırılması.



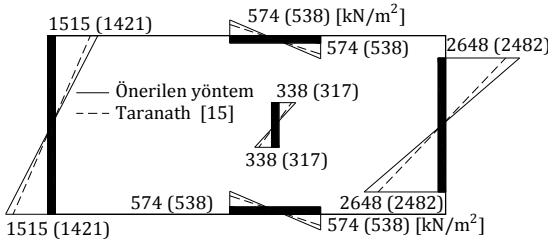
Şekil 9: Bimomentlerin karşılaştırılması.

Perdelerde burulma nedeniyle oluşacak normal gerilmelerin tespiti için öncelikle enkesitin Şekil 10'da verilen birim çarpılma diyagramı elde edilmiştir.

Burulma momenti etkisinde taşıyıcı sistemin dipten ankastre olması nedeniyle yapı elemanlarında çarpılma gerilmeleri oluşur. Önerilen yöntemle hesaplanan çarpılma gerilmeleri, Taranath'ın [15] bulmuş olduğu çarpılma normal gerilmeleriyle Şekil 11'de karşılaştırılmıştır. Yapı tabanındaki taşıyıcı elemanlarda oluşan çarpılma normal gerilmesi değerlerinin Taranath'ın bulduğu değerlerden yaklaşık olarak %6.7 mertebesinde daha büyük olduğu görülmüştür. İki yöntemin kullanılmasıyla elde edilen burulma dönmelerinin, bimomentlerin ve çarpılma normal gerilmelerinin farklılık göstermesinin sebebi; Taranath'ın burulma momenti etkisini uniform yayılı olarak, önerilen yöntemde ise kat seviyelerinde etkiyen tekil burulma momentleri olarak dikkate alınmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 10: Enkesitin birim çarpılma diyagramı.



Şekil 11: Çarpılma normal gerilmelerinin karşılaştırılması.

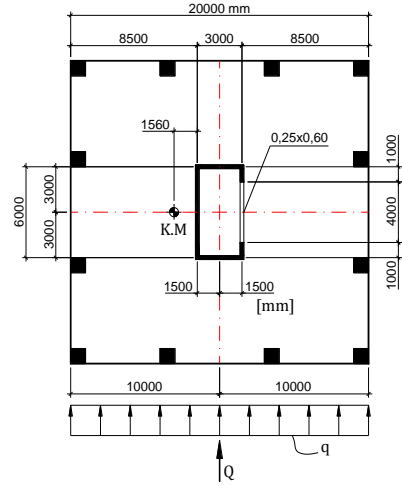
3.2 Smith ve Coull'un Yapı Modeli Üzerinde Karşılaştırma

Bu bölümde Smith ve Coull [1] tarafından incelenmiş olan 20 eşit yükseklikte kata sahip, yaklaşık 70 m yüksekliğinde betonarme bir yapı ele alınmıştır. Tipik kat planı Şekil 12'de verilen yapı, Şekil 7'de gösterildiği gibi uniform yayılı yatay yük kabulü ile çözülmüştür. Söz konusu yapıda diyafram etkisinin döşeme tarafından sağlandığı kabul edilmiştir. Yatay çekirdekte teşkil edilmiş olan açık enkesitli perde bulunmaktadır. Hesaplarda Smith ve Coull'un kabullerine uyulmuş olup perde enkesitinin yapı yüksekliğince değişmeden devam ettiği varsayılmıştır.

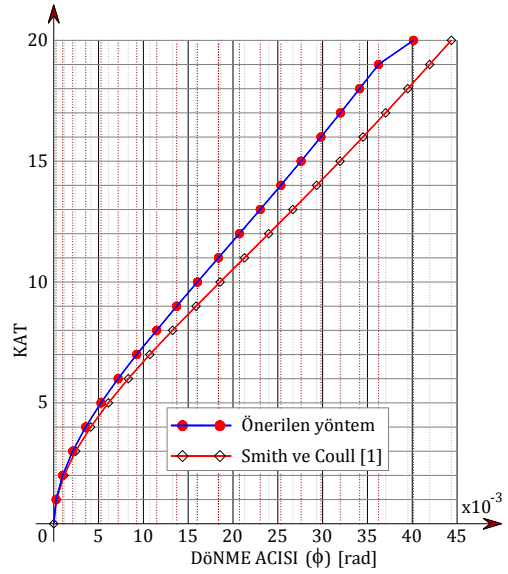
Önerilen yöntemle yapılan çözüm sonucunda elde edilen burulma dönmesi değerleriyle Smith ve Coull'un [1] bulmuş olduğu burulma dönmesi değerleri Şekil 13'te aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Önerilen yöntemle elde edilen burulma dönmesi değerlerinin Smith ve Coull'un bulmuş olduğu değerlerden %10 mertebesinde daha küçük olduğu görülmüştür.

Çarpılma gerilmelerinin elde edilebilmesi için gerekli olan birim çarpılma diyagramı değerleri MATHCAD'de [19] hazırlanan bir programla hesaplanmış ve aynı programda Şekil 14'te verilen diyagram çizdirilmiştir.

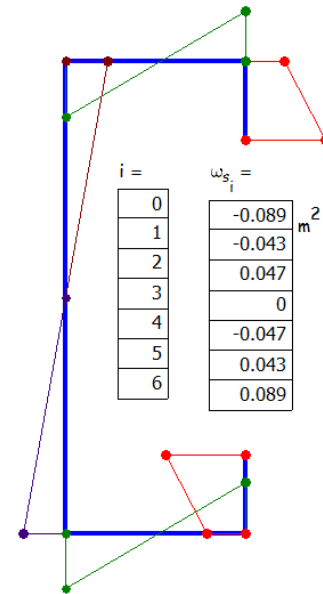
Şekil 15'te hem önerilen yöntemle hesaplanan, hem de Smith ve Coull'un [1] bulduğu bimomentlerin yapı yüksekliğince dağılımları gösterilmiştir.



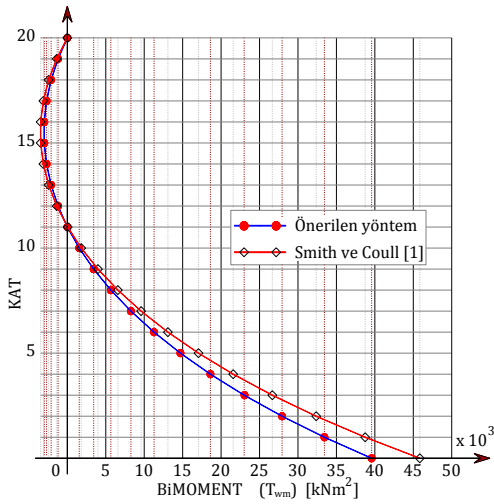
Şekil 12: Tipik kat planı ve yükleme durumu.



Şekil 13: Burulma dönmesi açılarının karşılaştırılması.



Şekil 14: MATHCAD'den elde edilen birim çarpılma diyagramı (Düğüm noktaları Şekil 19'da gösterilmiştir).



Şekil 15: Bimomentlerin karşılaştırılması.

Şekil 16'da verilen her iki yöntemle elde edilen çarpılma normal gerilmesi değerleri incelendiğinde, önerilen yöntemle edilen değerlerin Smith ve Coull'un [1] bulmuş olduğu değerlerden ortalama %8.6 oranında daha küçük kaldığı görülmüştür. Bu durumda aradaki farkın önemsiz olmayıp, tam tersine özellikle irdelemeyi gerektirecek seviyede olduğu ortaya çıkmıştır. Aradaki fark, önerilen yöntemde, Smith ve Coull'un yapı yüksekliğince uniform yayılı yük nedeniyle oluşan uniform yayılı burulma momenti kabulü yerine kat seviyelerinde etkiyen tekil yükler nedeniyle oluşan tekil burulma momentleri kabulünün dikkate alınmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 17'de her iki kabule göre yapı tabanında ele alınan kesitte oluşan eğilme normal gerilmesi değerleri verilmiştir. Yapı yüksekliğince etkiyen uniform yayılı yükten oluşan eğilme momenti ile kat seviyelerinde etkiyen tekil yüklerden oluşan eğilme momentinin birbirinden farklı olması sonucunda, eğilme gerilmeleri arasında küçük farklar meydana gelmektedir. Eğilme momentleri arasındaki oran yapı yüksekliğine ve etkiyen yükün büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir.

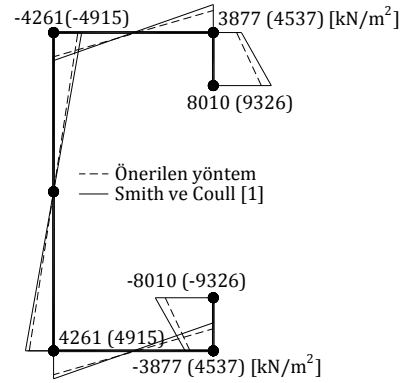
Çarpılma normal gerilmelerinin ele alınan 20 katlı bir yapıda eğilme normal gerilmelerine oranla ne kadar etkili olduğunu göstermek için Şekil 18'de çarpılma gerilmelerinin eğilme gerilmelerine oranları verilmiştir. Buna göre çarpılma gerilmelerinin ihmal edilemeyecek mertebelerde olduğu, aksine, özellikle dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kesitte oluşan çarpılma gerilmeleri, yapı yüksekliğinin, yapıya etkiyen yatay yükün ve kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafenin artması sonucu artan burulma momentine bağlı olarak artış göstermektedir.

3.3 ANSYS ve CONSTEEL Programları ile Karşılaştırma

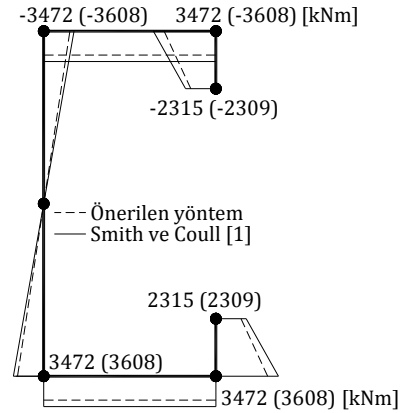
Önerilen yöntemle hazırlanan algoritma, pratik programlamaya olanak veren MATHCAD'de [19] programlanmıştır. Bu program sayesinde farklı geometriye sahip enkesitlerin tüm kesit değerleri ve birim çarpılmalar elde edilebilmektedir. Ayrıca n adet farklı büyüklükteki yükün n adet farklı konumdan etkimesi durumunda bir kesitte oluşan hem eğilme, hem de burulma tesirleri, aynı zamanda eğilme ve burulma nedeniyle oluşan yer değiştirmeler de bulunabilmektedir.

MATHCAD'de [19] hazırlanan algoritmayla kesit geometrisinin asal eksen takımına göre ölçekli olarak çizilebilmesi, çizilen kesit üzerinde ağırlık merkezinin ve kayma merkezinin konumlarının gösterilebilmesi, kesitin birim çarpılma diyagramının ölçekli olarak çizilebilmesi, eğilme ve çarpılma normal gerilmesi diyagramlarının hem bağımsız, hem de toplam şeklinde çizilebilmesi ve sonuçların görsel olarak da elde edilebilmesi sağlanmaktadır.

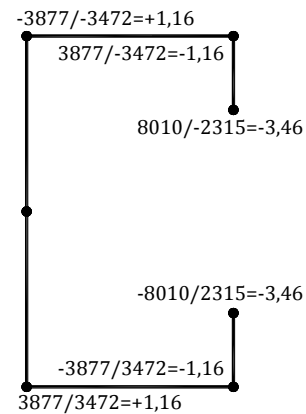
Diğer taraftan, yapı mühendisliğinde analiz ve tasarım amaçlı kullanılan programların büyük bir bölümü sekonder tesirler olarak da nitelendirilen burulma ve çarpılma kaynaklı etkilerin hesabında yetersiz kalmaktadır. MATHCAD'de hazırlanan program CONSTEEL [20] ve ANSYS [21] programları kullanılarak kontrol edilmiş, bu şekilde yapılan çalışmanın doğruluk derecesi değerlendirilebilmiştir.



Şekil 16: Çarpılma normal gerilmelerinin karşılaştırılması.



Şekil 17: Eğilme normal gerilmelerinin karşılaştırılması.



Şekil 18: Çarpılma/eğilme normal gerilmesi oranları.

Karşılaştırmada kullanılan her iki program yardımıyla da, çok katlı bir yapının modellenmesi ve bir elemanda çarpılma nedeniyle oluşan tesirlerin elde etmesi pek kolay olmamaktadır. Bu nedenle çok katlı bir yapı yerine konsol bir eleman ele alınmıştır. Konsol elemanda çarpılma etkilerini net görebilmek için kayma merkezi ile ağırlık merkezinin çakışmadığı, Şekil 19'da boyutları verilen ince cidarlı bir eleman seçilmiştir. Çubuk elemanın enkesiti Smith ve Coull'un [1] incelediği yapının çekirdek enkesitidir.

Çubuk eleman, Şekil 19'daki gibi farklı noktalarda farklı büyüklükteki tekil yükler ile yüklenmiştir. Yükler şekilde görüldüğü gibi enkesitin ağırlık merkezine etkilmiştir. Yapı mühendisliğinde kullanılan programlardan farklı olarak gerek ANSYS [21], gerek CONSTEEL [20], gerekse de MATHCAD'de [19] hazırlanan algoritmada, enkesitin kayma merkezinin konumu bulunarak kayma merkezi ile ağırlık merkezinin çakışmamasından kaynaklı burulma momenti dikkate alınabilmektedir.

MATHCAD'de hazırlanan programın ANSYS [21] ve CONSTEEL'den [20] üstünlüğü ise çok katlı yapılarda eğilme, burulma ve çarpılma nedeniyle oluşan etkilerinin model yapmadan kısa sürede yaklaşık olarak tasarımcıya verilebilmesidir. Bu özellik, yapı mühendisliği açısından hem ön boyutlama için çok yararlı olmakta, hem de analiz programlarından elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında önemli bir yardımcı araç olabilmektedir.

ANSYS analiz programında ele alınan taşıyıcı sistem üç boyutlu modellenip çözülmüş, analiz sonucunda Şekil 20'de gösterilen şekil değiştirmeler elde edilmiştir. Şekilden kesitin çarpılma davranışı açıkça görülebilmektedir.

CONSTEEL [20] programında statik sistem eşit uzunluğa sahip 10 adet çubuk eleman kullanılarak ve yükleri düğüm noktalarına etkililerek oluşturulmuştur. Şekil 21'de CONSTEEL programında hazırlanan modele ilişkin yükleme ve bu yükleme sonucu oluşan şekil değiştirmeler gösterilmiştir. Şekilden kesitte eğilmenin yanı sıra çarpılma nedeniyle de şekil değiştirmelerin meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 22'de incelenen enkesite ait MATHCAD'de [19] hazırlanan program kullanılarak hesaplanmış olan birim çarpılma değerleri ile yine aynı programda çizim için özel bir algoritma yazılarak elde edilen birim çarpılma diyagramı verilmiştir. MATHCAD'de hazırlanan programda çarpılma diyagramı ölçekli olarak çizilebilmektedir. Çarpılma diyagramı üzerinde yer alan noktaların isimleri Şekil 19'da verilmiştir.

Bimomentlerin karşılaştırılmasında ANSYS [21] programında bimoment etkisinin açıkça görülebilmesi mümkün olmadığından, MATHCAD [19] programından elde edilen sonuçlar ancak CONSTEEL [20] programından alınan sonuçlarla karşılaştırılabilmektedir.

Şekil 23'te MATHCAD'de önerilen yöntemi içerecek şekilde hazırlanan programdan ve CONSTEEL'den alınan bimoment değerleri gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi önerilen yöntemin verdiği bimoment değerleri CONSTEEL'in verdiği değerlerden çok az fark etmekte, yaklaşık olarak %0.1 mertebesinde daha küçük kalmaktadır. İki programın verdiği sonuçlar arasında bu kadar küçük fark olması, önerilen yöntemin yeterince hassas olduğunu göstermektedir.

Şekil 24'te MATHCAD'de hazırlanan programdan ve CONSTEEL'den alınan, sadece çarpılma nedeniyle oluşan normal gerilmeler aynı enkesit üzerinde gösterilmiştir. Gerilme değerlerinden de görülebileceği gibi önerilen yöntem ile

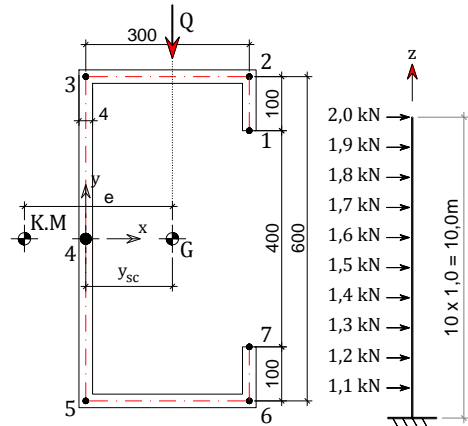
CONSTEEL değerleri arasındaki fark %1.5 civarındadır. Gerilme değerleri arasındaki oranın bimoment değerleri arasındaki orandan farklı olması, birim çarpılma değerleri arasındaki küçük farklardan kaynaklanmaktadır.

ANSYS programı bimoment değerlerini ve çarpılma nedeniyle oluşan normal gerilmeleri ayrı ayrı vermemekte, ancak eğilme ve çarpılma normal gerilmelerinin toplamını verebilmektedir. Şekil 25'te ANSYS'den alınan normal gerilme dağılımı verilmiştir.

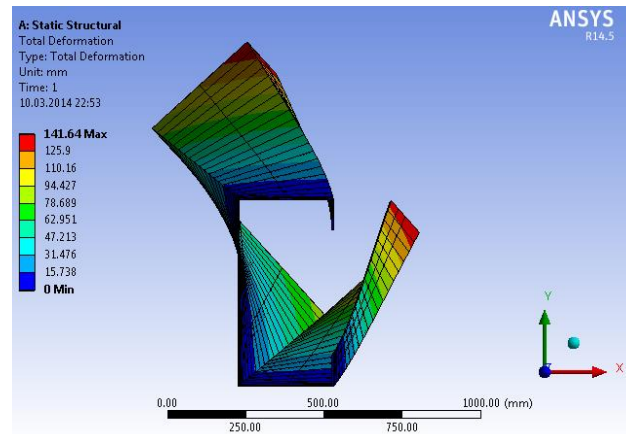
Şekil 26'da ise MATHCAD'de [19] hazırlanan programdan ve CONSTEEL'den [20] alınan eğilme ve çarpılma nedeniyle taşıyıcı sistem tabanında oluşan toplam normal gerilmeler gösterilmiştir. Şekil 24'te verilen çarpılma normal gerilmesi değerleri, Şekil 26'da verilen toplam normal gerilme değerleriyle karşılaştırıldığında, çarpılma nedeniyle oluşan normal gerilmelerin ihmal edilemeyecek mertebelerde olduğu açıkça görülmektedir.

4 Sonuç

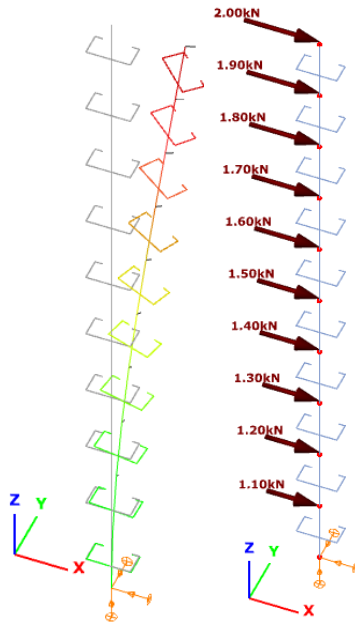
Bu çalışmada, özellikle yüksek yapılarda yatay yükler nedeniyle oluşan burulma etkisine maruz taşıyıcı elemanlarda meydana gelen sekonder tesirlerin bulunması için bir yöntem sunulmuştur. Yöntem Taranath'ın [15] ve Smith ve Coull'un [1] incelemiş olduğu yapı modellerine uygulanmıştır. Taranath yapı modelinde çarpılma nedeniyle oluşan normal gerilmeler açısından %10 mertebesinde bir fark olduğu görülmüştür. Smith ve Coull yapı modelinde ise burulma dönmeleri açısından %10, bimomentler açısından ise %8.8 bir fark olduğu tespit edilmiştir.



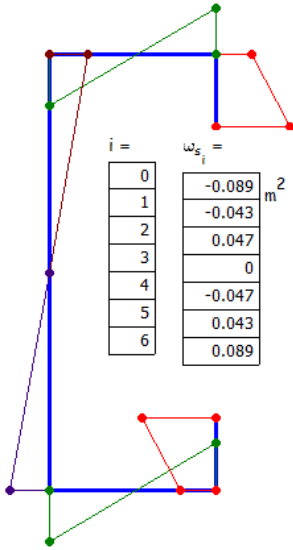
Şekil 19: Eleman enkesiti ve yükleme durumu.



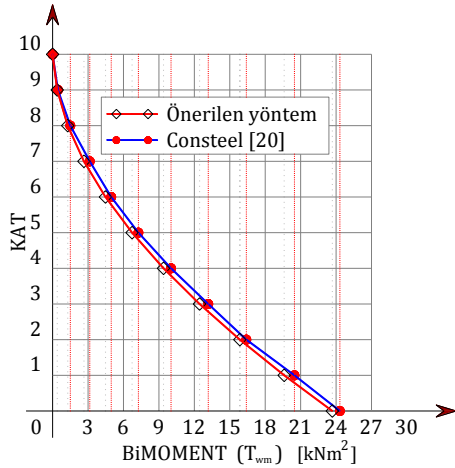
Şekil 20: ANSYS modelinin şekil değiştirme görüntüsü.



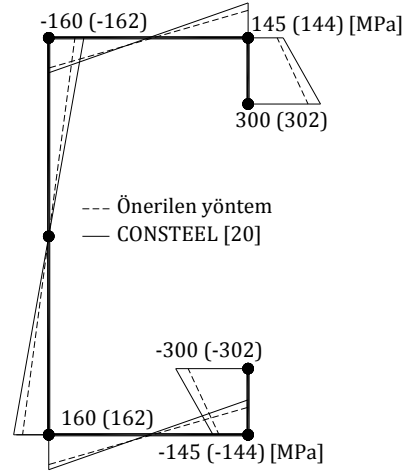
Şekil 21: CONSTEEL yüklem ve şekil değiştirme görüntüleri.



Şekil 22: MATHCAD'den elde edilen birim çarpılma diyagramı.



Şekil 23: Bimomentlerin karşılaştırılması.



Şekil 24: Çarpılma normal gerilmelerinin karşılaştırılması.

Önerilen yöntemin hassaslığı ANSYS ve CONSTEEL programları kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Önerilen yönteme göre MATHCAD'de hazırlanan programın verdiği sonuçlar ilgili analiz programlarının verdiği sonuçlarla karşılaştırıldığında, aradaki farkın %1.5 değerini aşmadığı, dolayısıyla yöntemin oldukça hassas sonuçlar verdiği görülmüştür.

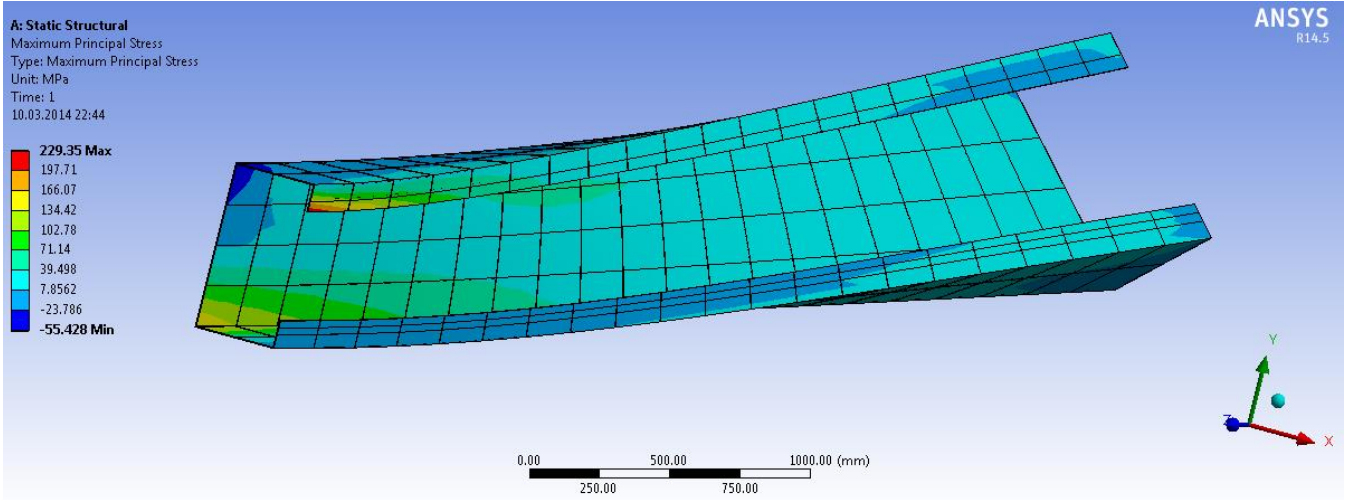
Yapılan bu çalışma sonucunda, günümüzde ülkemizde ve dünyada yapıyı oldukça yaygınlaşan yüksek yapı tasarımında uniform olmayan burulma etkilerinin büyük önem arz ettiği ve ihmal edilmemesi gerektiği ortaya çıkarılmıştır. Aynı zamanda uniform olmayan burulmaların tayininde, gerçekte deprem, rüzgar gibi yatay yüklerin yapıya uniform yayılı olarak değil, tekil yükler şeklinde ve farklı büyüklüklerde etki ettiği göz önüne alınır, önerilen yöntemin daha gerçekçi sonuçlar vereceği anlaşılmıştır. Önerilen yöntemi içerecek şekilde MATHCAD'de hazırlanan programın yapı mühendisine hem ön boyutlandırma, hem de farklı programlarla yapılan analizlerin doğruluğunu kontrol etmede önemli ölçüde yardımcı olacağı görülmüştür.

5 Semboller

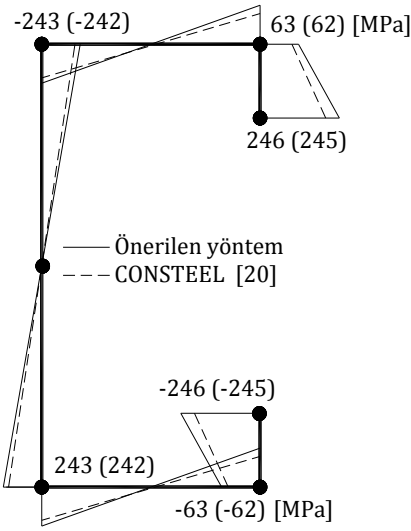
- I_w : Çarpılma mukavemeti,
- I_t : Burulma mukavemeti,
- T_t : St. Venant burulması momenti,
- T_w : Vlasov çarpılma burulması moment,
- T_{wm} : Bimoment,
- T_z : Tekil burulma momenti,
- t_z : Yayılı burulma momenti,
- E : Elastisite modülü,
- G : Kayma modülü,
- ϕ : Burulma dönmesi,
- Q_i : i. kata etkiyen yatay tekil kuvvet,
- q : Yayılı yük,
- z_i : i. katın temel üstünden olan yüksekliği.

6 Teşekkür

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisine katkı sağlayan tüm yazar ve hakemlere teşekkür ederiz.



Şekil 25: ANSYS normal gerilme dağılımı.



Şekil 26: Çarpılma + eğilme normal gerilmelerinin karşılaştırılması.

7 Kaynaklar

- [1] Smith BS, Coull A. *Tall Building Structures: Analysis and Design*, 1st ed. New York, USA, Wiley, 1991.
- [2] Vasquez J, Riddell R. "Thin-Walled Core Element for Multistory Buildings". *Journal of Structural Engineering*, 110(5), 1021-1034, 1984.
- [3] Chen M, Jolissaint DE. "Pure and Warping Torsion Analysis of Rigid Frames". *Journal of Structural Engineering*, 109(8), 1999-2003, 1983.
- [4] Chen H, Liew JR, Shanmugam NE. "Nonlinear Inelastic Analysis of Building Frames With Thin-Walled Cores". *Thin Walled Structures*, 37(3), 189-205, 2000.
- [5] Doğruer OY, Tüfekçi E. "Çember Eksenli Sabit Kesitli Çubukların Düzlem Dışı Serbest Titreşimleri". *İTÜ Dergisi/d*, 6(2), 53-62, 2007.
- [6] Timochenko S, Goodie JN. *Theory of Elasticity*, 2nd ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1951.
- [7] Chajes A. *Principles of Structural Stability Theory*, USA, Prentice-Hall, 1974.
- [8] Yang YB. *Linear and Nonlinear Analysis of Space Frames With Nonuniform Torsion Using Interactive Computer Graphics*. PhD Thesis, Cornell University, USA, 1984.
- [9] Hoogenboom PCJ. "Wringing-CT5141_chap7.pdf". http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/CT5141_chap7.pdf (08.02.2014).
- [10] Baber T. "Torsion in Structural Desing-torsion pdf". <http://people.virginia.edu/~ttb/torsion.pdf> (16.01.2014).
- [11] Trahair NS. "Nonlinear Elastic Nonuniform Torsion". *Journal of Structural Engineering*, 131(7), 1135-1142, 2005.
- [12] Galambos TV. *Structural Members and Frames*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1968.
- [13] Murray NW. *Introduction to the Theory of Thin-Walled Structures*, Oxford, UK, Clarendon Press, 1984.
- [14] Seaburg PA, Carter CJ. *Torsional Analysis of Structural Steel Members*, USA, AISC, 1997.
- [15] Taranath BS. *Reinforced Concrete Design of Tall Buildings*, 1st ed. USA, CRC Press, 2009.
- [16] Saade K, Espion B, Warzee G. "Non-Uniform Torsional Behavior and Stability of Thin-Walled Elastic Beams With Arbitrary Cross Sections". *Thin-Walled Structures*, 42(6), 857-881, 2004.
- [17] Medwadowski SJ. "Warping Moment Distribution". *Journal of Structural Engineering*, 111(2), 453-466, 1985.
- [18] Trahair NS, Bradford MA, Nethercot D, Gardner L. *Behaviour and Design of Steel Structures to EC3*, 4th ed. USA, Taylor and Francis, 2008.
- [19] PTC MATHCAD. "Engineering Calculations Software". <http://www.ptc.com/product/mathcad> (10.01.2013).
- [20] CONSTEEL. "ConSteel Software". <http://www.consteelsoftware.com> (12.10.2013).
- [21] ANSYS. "Simulation Driven Product Development". <http://www.ansys.com> (21.11.2013).