

Stifnerli Panellerin İki Eksenli Yükleme Altında Burkulma/Göçme Davranışlarının İncelenmesi

Murat Özdemir

muratozdemir@odu.edu.tr

Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye

ÖZET

Stifnerli gemi panellerinin iki eksenli yükleme altında yapısal analizi gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda burkulma ve göçme davranışları incelenmiştir. Bu çalışmadaki amaç stifnerli panellerin çeşitli yükleme koşulları altında burkulma/göçme davranışının detaylı şekilde incelenmesidir. Burkulma/göçme analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz basamakları tanımlanarak, bu tür panel yapısal analizleri için bir kılavuz oluşturması da hedeflenmiştir.

İlk olarak sadece panel boyuna ekseninde basınç yükleri uygulanmış, daha sonra ise hem boyuna hem de enine yönde yüklemeler uygulanmıştır. Ele alınan paneller bir dökme yük gemisinin dip panelleridir. Ayrıca farklı stifner kesitleri (T ve I kesitli) dikkate alınmıştır. Paneller 1/2 + 1 + 1/2 aralıklı olarak modellenmiş, periyodik sınır koşulları uygulanmıştır. Panellerdeki stifner sayısı 2 ve 4 olarak belirlenmiştir. Elde edilen nihai mukavemet değerleri referans sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Diğer yandan enine yüklemenin baskın olduğu durumlarda nihai mukavemet değerinin burkulma gerilmesinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Stifner sayısının burkulma gerilmesi üzerindeki etkisi düşük iken bu etki nihai mukavemet değerlerinde ihmal edilebilecek seviyededir. Farklı yükleme oranlarının burkulma/göçme davranışına etkisi incelenmiş; $\sigma_x:\sigma_y = 0.2:1$ ve $\sigma_x:\sigma_y = 1:0.2$ yükleme oranları ile elde edilen nihai mukavemet değerlerinin sırasıyla sadece enine ve boyuna yükleme olan durumlara göre bir miktar daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca $\sigma_x:\sigma_y = 1:0.2$ yükleme durumu için elde edilen burkulma modunda enine derin elemanlar arası burkulma dalga sayısı çift sayı olmaktadır, yani periyodik sınır koşulunun gerekliliği görülmüştür. Enine yüklemenin baskın olduğu durumlarda panel üzerindeki gerilme dağılımı incelendiğinde levha üzerinde bazı bölgelerin plastik mafsallık şeklinde davrandığı, diğer bölgelerin ise elastik bölgede olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Stifnerli paneller, nihai mukavemet, Sonlu Elemanlar Yöntemi, iki eksenli yükleme

Makale geçmişi: Geliş 20/09/2019 – Kabul 17/11/2019

Investigation into Buckling/Collapse of Stiffened Panels under Bi-axial Thrust Loads

Murat Özdemir

muratozdemir@odu.edu.tr

Ordu University, Ordu, Turkey

ABSTRACT

Buckling/collapse analyses of stiffened ship panels under bi-axial thrust loads are carried out and collapse behavior of the panels is investigated. The main purpose of this study is the detailed examination of failure mechanisms of the stiffened panels under combined load cases for developing an approximate method to estimate the ultimate strength of panels. Finite Element Method is employed for the computations. Analysis steps are also provided so that to present a guide for such structural analyses.

At first, only longitudinal thrust loads are considered. Then, bi-axial load cases are simulated. The target panels are adopted from bottom of a bulk carrier. Two different stiffener cross-sections, namely Tee bar and Flat bar are considered. Triple span-triple bay (1/2+1+1/2) modeling extent with periodical boundary conditions is employed. Number of stiffeners is utilized as two and four. The obtained ultimate strength values are compared with those available in the literature and a good agreement is achieved. When the transverse compression is dominant loading, it is observed that the ultimate strength values are relatively higher than those of linear buckling analyses. Influence of the number of stiffeners is considered as small on the buckling strength of the panels, while this effect is negligible on the ultimate strength values. Effects of different loading ratios are examined and it is figured out that the evaluated ultimate strength values for $\sigma_x:\sigma_y = 0.2:1$ and $\sigma_x:\sigma_y = 1:0.2$ cases are slightly higher than those of the uniaxial transverse and longitudinal thrust cases, respectively. Moreover, for $\sigma_x:\sigma_y = 1:0.2$ case, the buckling mode shape has two half-waves in longitudinal direction, which apparently shows necessity of the periodical boundary conditions. In case of dominant transverse compressive thrust, the Von Mises stress distributions suggest that some parts of plate behave as plastic hinges while remaining parts in plating are still in elastic range.

Keywords: Stiffened panels, ultimate strength, Finite Element Method, bi-axial thrust

Article history: Received 20/09/2019 – Accepted 17/11/2019

1. Giriş

Bir gemi yapısı global olarak ele alındığında sakin suda veya dalgalar arasında yayılı yüklere maruz kalan bir kiriş gibi davranacaktır. Bu tür bir yaklaşım geminin global ölçekte eğilme davranışının modellenmesinde yeterli olabilir ancak detaya inmek gerektiğinde global eğilmelerin yanı sıra yerel elemanların yapısal kapasitelerinin tayin edilmesinde bu yaklaşım yeterli olmamaktadır. Bu yapısal bileşenlere etkiyen yükler belirlenip detaylı analizlerle kapasiteleri belirlenir.

Stifnerli paneller (boyuna veya enine profiller ile desteklenmiş saclar) gemilerin en temel yapısal bileşenlerindedir. Gemi güvertesinde yer alan paneller yerel yüklerin yanı sıra gemi kirişinin boyuna eğilmesi sebebiyle boyuna eksende basınç yüklerine maruz kalırlar. Dip panelleri ise boyuna eğilmeye ek olarak bordaya etki eden hidrostatik basınç sebebiyle enine aksenal yüklere, dipteki hidrostatik basınç sebebiyle de yanal yüklere maruz kalır.

Stifnerli panellerin yapısal kapasitelerinin tayininde en önemli kriter burkulma ve burkulma ile birlikte yapının tamamen göçmesi olayıdır. Stifnerli panellerin göçme davranışları önceden beri mühendis ve araştırmacıların ilgi alanları arasındadır. Fujikubo ve Yao (1999) stifnerli gemi panellerinin iki aksenal yüklemeye altında elastik burkulma davranışını analitik olarak modellemiş ve sonuçları Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) sonuçları ile karşılaştırmıştır. Kaynak sebebiyle oluşan artık gerilmeler de hesaba dâhil edilmiştir. Daha sonra ise Fujikubo ve diğ. (2005a, 2005b) sürekli levhaların ve stifnerli panellerin enine ve yanal yükler altındaki göçme davranışını incelemiş, ampirik esaslı yaklaşık formüller yardımıyla panellerinin nihai mukavemet değerlerini tayin etmeyi hedeflemişlerdir. Stifnerli panellerin boyuna yükler altında nihai mukavemet hesabı için Fujikubo ve diğ. (1999a, 1999b) yaklaşık yöntem önermişlerdir. Bu yaklaşım daha sonra çeşitli yüklemeye koşulları altında nihai mukavemet değerini elde edecek şekilde geliştirilmiştir (Harada ve diğ., 2007).

Paik ve diğ. (2001) stifnerli panellerin çeşitli yükler altındaki nihai mukavemet hesabı için yarı analitik bir formülasyon önermiştir. Paik ve diğ. (2001) tarafından önerilen yöntem panellerin küçük boyutlu ve fazla sayıda stifnerler ile desteklendiği durumlarda uygun sonuç vermektedir ancak gemi panellerinde fazla sayıda zayıf stifnerli bir konfigürasyon pratik bir uygulama değildir. Paik ve diğ. (2008) stifnerli panellerin çeşitli yüklemeye durumlarındaki nihai mukavemet hesabı için mevcut yöntemleri incelemiş ve sonuçları karşılaştırmıştır. Ayrıca lineer olmayan SEY modelleme teknikleri stifnerli paneller için incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Paik ve Seo (2009) tarafından sunulmuştur. Bahsi geçen çalışmada stifnerli panel için boyuna yönde $1/2+1+1/2$ aralıklı model simetrik sınır şartları altında analiz edilmiştir. Enine yönde ise tek bir aralık kabul edilmiş ve basit mesnet sınır koşulu uygulanmıştır. Son zamanlarda ise stifnerli panellerin çeşitli yüklemeye koşulları altındaki göçme davranışlarını Xu ve diğ. (2013) detaylı olarak incelemiştir. Xu ve diğ. (2013), çeşitli model aralıklarını ve sınır koşullarını inceleyerek stifnerli panellerin nihai mukavemet ve göçme davranışı üzerine etkilerini tayin etmiştir. Stifnerli panellerde levhanın burkulma dalga sayısı tek sayı ise simetrik sınır koşullarının uygun sonuç verdiği, ancak dalga sayısının çift olduğu durumlarda periyodik sınır koşulunun gerekliliği vurgulanmıştır. Son olarak stifnerli panellerin boyuna yüklemeye durumları altında göçme davranışı Özdemir (2018) ve Özdemir ve diğ. (2018) tarafından detaylı olarak incelenmiş; buradan elde edilen veriler ile panellerin göçme davranışları gruplandırılmıştır. Panellerin nihai mukavemet hesabı için analitik esaslı bir formülasyon türetilmiş ve hesaplanan nihai mukavemet değerleri hem literatür hem de SEY ile kıyaslanmıştır. Literatürde yer alan ve DNV (Det Norske Veritas)'nin ticari bir yazılımı olan PULS (2005) sonuçlarından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında stifnerli panellerin burkulma ve göçme davranışları lineer ve lineer olmayan SEY ile incelenerek nihai mukavemet değerleri elde edilecektir. SE yazılımı olarak ANSYS (2016) kullanılacaktır. Model aralığı $1/2 + 1 + 1/2$ olarak alınmış ve periyodik sınır şartları altında analizler

gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana hatları şu şekilde olacaktır. İlk olarak ele alınacak stifnerli panellerin geometrik ve malzeme özellikleri verilecektir. Daha sonra ise modelleme aralıkları ve sınır koşulları tanımlanacaktır. Panellerin üzerine başlangıç kusuru olarak deformasyonların uygulanması ile çözüm adımına geçilecektir. Bu süreçte en önemli adımlar olan sınır şartlarının uygulanması ve başlangıç kusurlarının ANSYS Mechanical APDL ile nasıl uygulanacağı da açıklanacaktır.

2. Stifnerli Panellerin Geometrik ve Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada bir dökme yük gemisine ait dip yapısının paneli ele alınmıştır. Panel boyutları aşağıda verilmiştir.

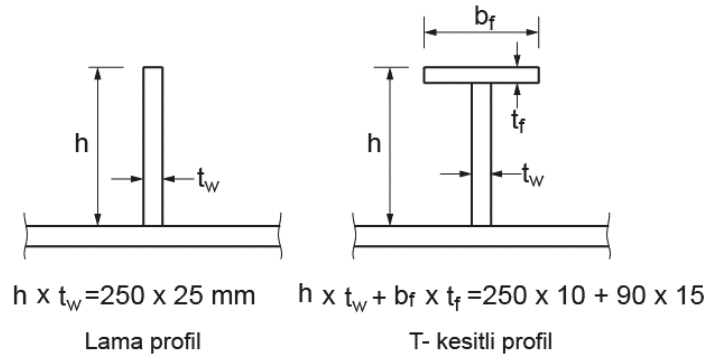
$$a \times b = 2550 \times 850 \text{ mm } (a/b=3.0)$$

$$t_p = 16 \text{ mm}, \beta = 2.07.$$

Burada verilen β , levha narinlik katsayısını ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\beta = \frac{b}{t_p} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \quad (1)$$

Panel malzemesi elastik-tam plastik olarak kabul edilmiştir. Akma gerilmesi, $\sigma_Y = 313.6 \text{ MPa}$, elastisite modülü, $E = 205,800 \text{ MPa}$ 'dır. Akma sonrası pekleşme dikkate alınmamıştır. Stifner kesitleri ise Şekil 1'de verilmiştir. Panel üzerinde stifner sayısı iki ($ns = 2$) ve dört ($ns = 4$) olarak alınmıştır. Stifner sayısı panel üzerindeki toplam stifner sayısını değil iki boyuna derin eleman arasında kalan stifner sayısını ifade etmektedir.

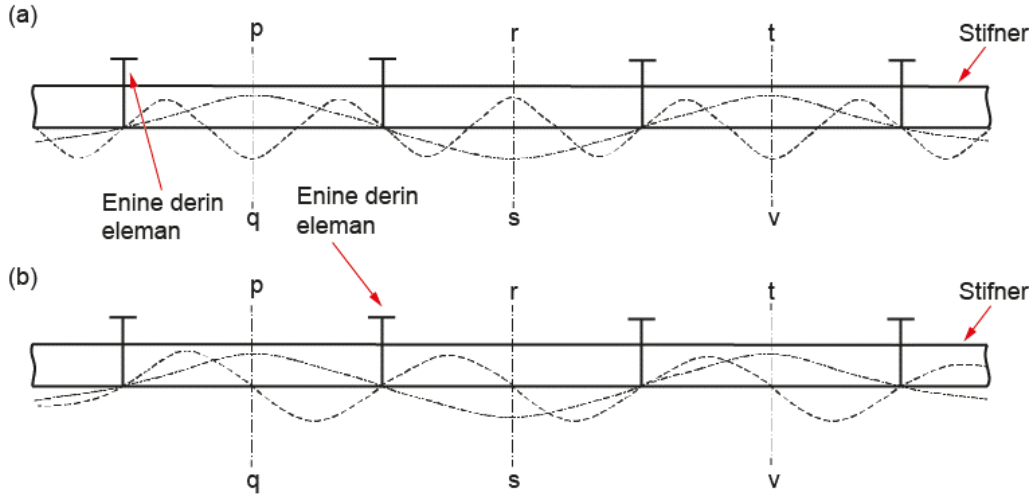


Şekil 1. Stifner tipleri ve boyutları.

Levha en kenar oranı, $a/b = 3.0$ olduğundan sadece boyuna yükleme altında iki enine derin eleman arası burkulma dalga sayısı, $m = 3$ olacaktır. Sadece enine yükleme altında ise burkulma dalga sayısı, $m = 1$ olacaktır. Bu durumda $1/2 + 1/2$ modeli simetrik sınır şartları altında bize mantıklı sonuçlar verecektir. Ancak hem enine hem de boyuna yükün aynı anda etki ettiği durumda m değeri yük bileşenlerinin oranına bağlı olarak değişecektir. Bu durumda ise $1/2 + 1 + 1/2$ modeli periyodik sınır koşulları altında burkulma dalga sayısının çift veya tek olmasına bakılmaksızın uygun çözüm sağlayacaktır. Simetrik ve anti-simetrik deformasyonlar Şekil 2 üzerinde burkulma dalga sayısı ile birlikte gösterilmiştir.

Şekil 2'de kesikli çizgiler burkulma deformasyonlarını (burkulma dalgalarını) temsil etmektedir. Verilen şekilde enine derin elemanlar gemi yapısında bulunduğu konuma göre *kemere* veya *döşek* olarak da adlandırılabilir. Şekil 2(a)'da simetrik burkulma deformasyonlarının ($m = 1, 3$) *pq*, *rs* veya *tv* kesitlerinden herhangi birine göre simetrik olduğu görülmektedir. Diğer yandan simetrik ($m = 1$) ve anti-simetrik ($m = 2$) burkulma deformasyonları birlikte dikkate alındığında bahsedilen kesitlerde

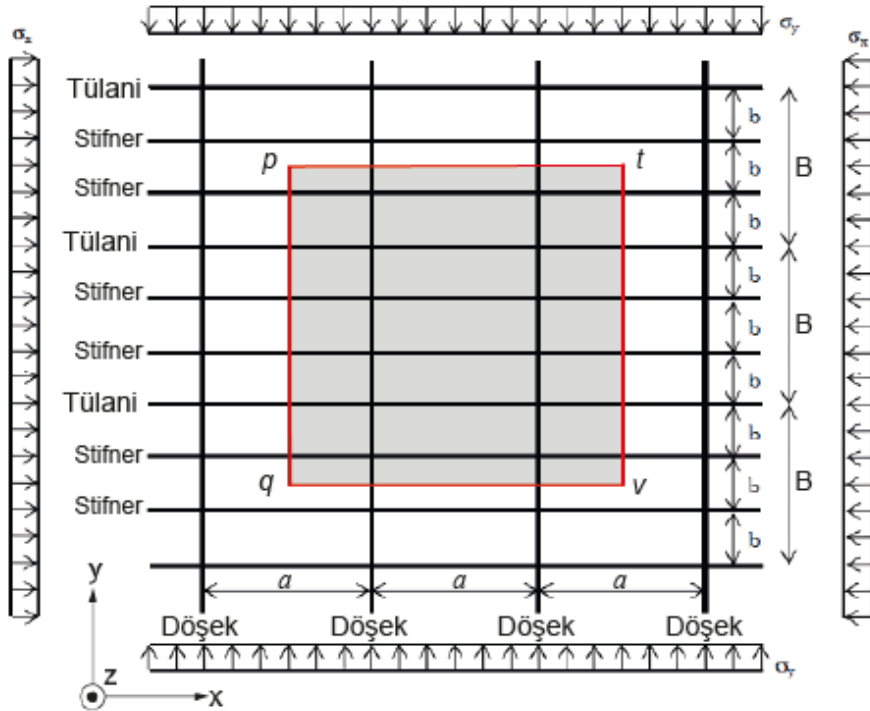
deformasyonların simetrisinden söz etmek mümkün olmayacaktır. Şekil 2(b)'de model sınırı olarak pq ve tv kesitleri ele alındığında deformasyonların bu kesitlerde birbirlerine eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Burkulma deformasyonları : (a) simetrik deformasyonlar, (b) simetrik + anti-simetrik deformasyonlar.

3. Modelleme Aralığı ve Sınır koşulları

Bu çalışma kapsamında $1/2 + 1 + 1/2$ modelleme aralığı periyodik sınır koşulları ile Şekil 3'te gösterildiği gibi ele alınmıştır. Şekil 3'te gölgelendirilmiş alan SEY ile modellenecek aralıktır. Verilen şekilde boyuna derin elemanlar *tülani* olarak adlandırılmıştır. İki derin eleman arasını aralık olarak tanımlarsak $1/2 + 1 + 1/2$ şeklinde belirtilen modelleme aralığı hem enine, hem de boyuna doğrultuda *yarım + tam + yarım* aralık şeklinde bir modellemeyi ifade eder, bkz Şekil 3. Kırmızı çizgiler modelin sınırlarını ifade etmektedir ve bu kenarlara periyodik sınır koşulları uygulanacaktır. σ_x boyuna yönde yüklemeyi, σ_y ise enine yönde yüklemeyi temsil etmektedir.



Şekil 3. $1/2+1+1/2$ modelleme aralığı ve temsili yükler.

Periyodik sınır şartlarını daha iyi kavramak için Şekil 2(b)'ye tekrar bakmak gerekirse pq ve tv kesitlerinde deformasyonların burkulma dalga sayısına bakılmaksızın karşılıklı olarak birbirine eşit olduğu görülecektir. u , v ve w sırasıyla x , y ve z eksenlerinde yer değiştirmeyi; θ_x , θ_y ve θ_z sırasıyla x , y ve z eksenlerine göre dönmeyi temsil edecek şekilde periyodik sınır koşulu aşağıdaki gibi yazılabilir (Tanaka ve diğ. 2014).

- $p - t$ ve $q - v$ (boyuna kenarlar) için
 v : kenarlar boyunca düzgün
 $u_{pt}=u_{qv}$, $w_{pt}=w_{qv}$ aynı x koordinatına sahip noktalarda
 $\theta_{x(pt)} = \theta_{x(qv)}$, $\theta_{y(pt)} = \theta_{y(qv)}$, $\theta_{z(pt)} = \theta_{z(qv)}$ aynı x koordinatına sahip noktalarda
- $p - q$ ve $t - v$ (enine kenarlar) için
 u : kenarlar boyunca düzgün
 $v_{pq}=v_{tv}$, $w_{pq}=w_{tv}$ aynı y koordinatına sahip noktalarda
 $\theta_{x(pq)} = \theta_{x(tv)}$, $\theta_{y(pq)} = \theta_{y(tv)}$, $\theta_{z(pq)} = \theta_{z(tv)}$ aynı y koordinatına sahip noktalarda

Periyodik sınır koşulu için model aralığının geniş olması çözüm maliyetini artırırken, bir SEY programında uygulanması da göreceli olarak karmaşıktır. Diğer yandan modelleme ve sınır koşulu kaynaklı belirsizlikler en aza indirgenmiş olacaktır.

Şekil 3'te kalın düz çizgiler ile gösterilen tülani ve döşekler SEY ile doğrudan modellenmemiş, yerine uygun sınır şartları atanmıştır. Her ne kadar bu elemanlar levhanın sadece öteleme hareketine değil dönel hareketine de direnç gösterse, güvenli bölgede kalmak ve literatürde yer alan genel uygulamayı takip etmek adına basit mesnet kabulü ile bu elemanların geçtikleri hatlarda z -yönündeki deplasmanlar engellenirken dönme hareketi serbest bırakılmıştır.

4. Sonlu Elemanlar Modeli

Stifnerli panellerin SE ortamında modellenmesi Tanaka ve diğ. (2014) ve Özdemir ve diğ. (2018) tarafından belirtilen şekilde yapılmıştır. Panel levhası üzerinde stifnerler arası mesafe 10'a bölünerek her bir elemanın kenar uzunluğu belirlenmiş ve levha üzerindeki tüm elemanların eş boyutlarda olması sağlanmıştır. Stifner gövdesi (web) ve alın laması (flange) kesitleri ise stifner boyutuna bakılmaksızın 6 elemana bölünmüştür.

4.1. Başlangıç deformasyonu ve yükler

Stifnerli panellerin imalatı sırasında uygulanan kaynak işlemleri ve daha sonraki operasyonel sebepler dolayısıyla paneller üzerinde bir miktar başlangıç deformasyonları gözlemlenmektedir. Bu deformasyonların maksimum değerleri klas kuruluşları tarafından kısıtlanmıştır. Diğer yandan lineer olmayan SEY ile göçme analizleri yapılırken uygulanan aksel yük sacın orta düzlemine uygulandığından başlangıç deformasyonları burkulmayı/göçmeyi tetikleyen bir mekanizma olarak görev yapacaktır.

Başlangıç deformasyonları sıklıkla levhanın yerel burkulması ile panelin global burkulma modunun üst üste bindirilmesi şeklinde uygulanmaktadır (Paik ve diğ. 2009; Yao ve diğ. 2011; Xu ve diğ. 2013). Diğer yandan, Ueda ve Yao (1985) imal edilmiş gerçek gemiler üzerinde yaptıkları ölçümlerde başlangıç kusurlarının burkulma mod şekillerinden farklı olduğunu belirtmiştir. Başlangıç kusurlarının zayıf-at modu (thin-horse mode) şeklinde olduğu belirtilmiştir. Zayıf-at modu şeklindeki başlangıç deformasyonları burkulma mod şekillerinde uygulanan başlangıç deformasyonlarına göre daha yüksek nihai mukavemet değerleri vermektedir. Hem daha güvenli bölgede kalmak hem de elde edilen

sonuçları Yao ve diğ. (2011) ile kıyaslayabilmek adına, başlangıç deformasyonları burkulma deformasyonlarının üst üste bindirilmesi ile elde edilmiştir. Başlangıç deformasyonları matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

Panel levhası üzerindeki toplam deformasyon:

$$w_{0p} = w_{0lokal} + w_{0glob}, \quad (2)$$

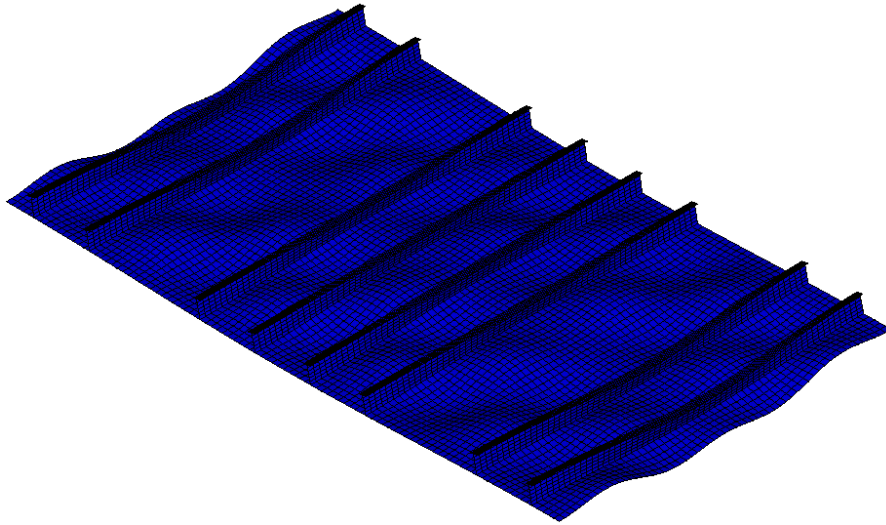
burada yerel levha burkulması şeklindeki başlangıç deformasyonu:

$$w_{0lokal} = A_{0maks} \sum_{m=1,3} A_{0m} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right), \quad (3)$$

global burkulma modu şeklindeki başlangıç deformasyonları ise:

$$w_{0glob} = B_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{B}\right). \quad (4)$$

(3) ve (4) numaralı ifadelerde a , b ve B sırasıyla iki enine derin eleman arası mesafeyi, stifnerler arası mesafeyi ve iki boyuna derin eleman arası mesafeyi temsil etmektedir, bkz Şekil 3. Tek eksenli boyuna veya enine yüklemelerde sırasıyla $A_{03} = 1.0$ ve $A_{01} = 1.0$ değerleri kullanılmıştır. İki eksenli yükleme halinde ise $A_{01} + A_{03} = 1.0$ olmaktadır. $B_0 = a/1000$ değeri tüm yükleme durumlarında kullanılmaktadır. A_{0maks} değeri ise Tanaka ve diğ. (2014)'e göre belirlenmiştir. Diğer yandan stifner için de burulmalı-burkulma (tripping) modu şeklinde başlangıç deformasyonu uygulanmıştır.



Şekil 4. Başlangıç deformasyonları uygulanmış tipik gemi paneli (deformasyon x 20).

Tüm başlangıç deformasyonlarının uygulandığı tipik bir gemi paneli Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'te gösterilen panel $1/2 + 1 + 1/2$ aralıklı ve T kesitli dört stifnerle sahiptir. Lineer burkulma analizlerinde ise başlangıç deformasyonlarının uygulanmasına gerek yoktur.

Stifnerli panel Şekil 3'te gösterildiği üzere x ve y yönlerinde düzlem içi yüklere maruz kalmaktadır. Yükleme oranları Yao ve diğ. (2011) ile aynı olacak şekilde seçilmiştir.

$$(\sigma_x: \sigma_y) = (1:0), (1:0.2), (1:0.41), (1:0.67), (1:1), (0.67:1), (0.41:1), (0.2:1), (0:1)$$

Verilen yükleme oranları hem lineer olmayan göçme analizlerinde hem de lineer burkulma analizlerinde uygulanmıştır. Yükleme oranlarını sabit tutabilmek amacıyla ANSYS bünyesinde yer alan

Arc-Length çözüm yöntemi lineer olmayan göçme analizlerinde kullanılmıştır. Lineer burkulma analizlerinde ise sadece yükler oransal bir şekilde uygulanmış, herhangi bir özel tekniğe gerek duyulmamıştır.

5. ANSYS Mechanical APDL Uygulaması

Bu kısımda geometrik model oluşturma, malzeme modeli ve eleman tipi atama ile ağ örgüsünün (meshing) nasıl oluşturulacağı gibi tüm yapısal analiz süreçlerinde ortak olan işlemlerin okuyucu tarafından bilindiği kabul edilmiştir. Bu aşamada verilen bilgiler lineer olmayan SEY ile panellerin göçme analizine yöneliktir.

SE modelinin oluşturulması sırasında stifnerler de dâhil tüm yapı kabuk (Shell) elemanlar ile modellenmiştir. ANSYS yazılımı içerisinde yer alan bi-lineer kabuk elemanı (Shell 181) ile tüm modelin ağ yapısı oluşturulmuştur. Shell 181 elemanının özellikleri için bkz ANSYS (2016) . Analizlerde kayma kitlenmesini engellemek amacıyla elemanlar üzerindeki sayısal integrasyonda tek bir Gauss noktası kullanılmıştır. Bu özellik Shell 181 elemanı için varsayılan ayardır. Kabuk elemanların kalınlık yönünde ise kullanılan sayısal integrasyon nokta sayısı beş olarak seçilmiştir.

5.1. Başlangıç kusurlarının uygulanması

Başlangıç kusurlarının uygulanması için öncelikle levha ve stifnerler üzerinde düğüm noktalarının ayrı ayrı toplam sayıları belirlenir. Bu işlem için “*GET” komutu kullanılmaktadır. Daha sonra ise bir döngü yardımıyla bu düğüm noktalarının koordinatları uygun dizinler içerisinde yazılır. Koordinatların dizinlere yazılması işleminde “*VGET” komutu kullanılmıştır. Tüm düğüm noktalarının koordinatları belirlendikten sonra yeni bir döngü ile (2), (3) ve (4) numaralı ifadeler panel levhası üzerindeki her düğüm noktası için hesaplanır. (2) numaralı ifade ile elde edilen sonuç, ilgili düğüm noktası üzerine düşey (z –yönü) deplasman olarak uygulanır.

Benzer işlemler stifnerler için de tekrarlanır. Stifner başlangıç kusuru değerleri ise yatay (y –yönü) deplasman değerleri olarak ilgili düğüm noktasına uygulanır. Tüm başlangıç deformasyonları uygulandıktan sonra lineer-statik çözüm yapılarak deforme olmuş panel geometrisi elde edilir. Daha sonra ANSYS yazılımının “UPGEOM” komutu kullanılarak deforme olmuş (başlangıç deformasyonu uygulanmış) geometri lineer olmayan SEY analizleri için artık hazırdır.

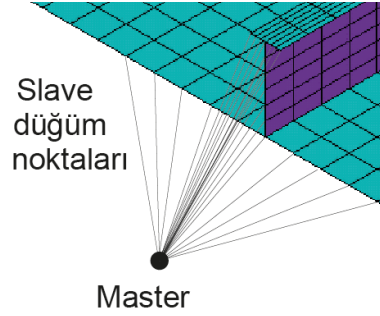
5.2. Periyodik sınır koşullarının uygulanması

Sınır koşullarının uygulanması sırasında enine ve boyuna derin elemanlar doğrudan modellenmemiş, onların yerine düşey yöndeki (z –yönü) deplasmanlar kısıtlanmıştır. Ayrıca enine derin elemanların stifnerleri kestiği noktalarda, stifner kesitinin levha ile dik açı yapacağı kabulü de yapılmıştır. Bu işlem için MPC (Multi Point Constraint) tekniği ile stifner ve enine derin elemanın birleştiği kesit üzerinde y – yönündeki deplasmanların düzgün dağılımı sağlanmıştır. ANSYS yazılımında MPC tekniği için “CP” komutu kullanılmıştır. Diğer yandan periyodik sınır koşulları da “CP” komutu kullanılarak uygulanmıştır. Sınır koşullarının uygulanması amacıyla panel üzerinde karşılıklı kenarlar üzerinde döngüler çevrilmiş, enine kenarlardan aynı y koordinatına sahip düğüm noktalarının ilgili serbestlik dereceleri birbirlerine eşitlenmiştir. Boyuna kenarlarda ise aynı x koordinatına sahip düğüm noktalarının ilgili serbestlik dereceleri birbirlerine eşitlenmiştir.

5.3. Yüklerin uygulanması

Yük uygulaması için ise “master” ve “slave” düğüm noktaları konsepti uygulanmıştır. Bu amaçla ANSYS yazılımı bünyesinde “TARGET” ve “CONTACT” elemanlar kullanılmıştır. Yükler hem lineer burkulma

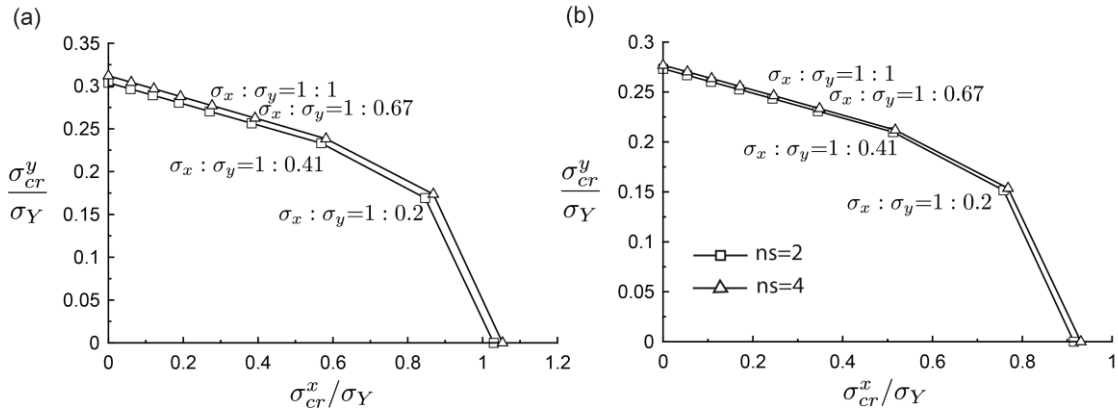
analizinde hem de lineer olmayan göçme analizinde “master” düğüm noktaları üzerine uygulanmış ve levha kenarındaki “slave” düğüm noktalarına aktarılmıştır. “Master” ve “slave” düğüm noktaları konsepti şematik olarak Şekil 5’te verilmiştir. Uygulanacak maksimum yük panel malzemesinin akma mukavemetine karşılık gelecek şekilde, uygulanan kenarın kesit alanı ile akma gerilmesi çarpılarak elde edilmiş, daha sonra “master” düğüm noktası üzerine kuvvet olarak uygulanmıştır. Uygulanan bu yüklemenin büyüklüğü hem lineer olmayan göçme analizinde, hem de lineer burkulma analizinde aynıdır.



Şekil 5. Master ve slave düğüm noktalarının temsili gösterimi.

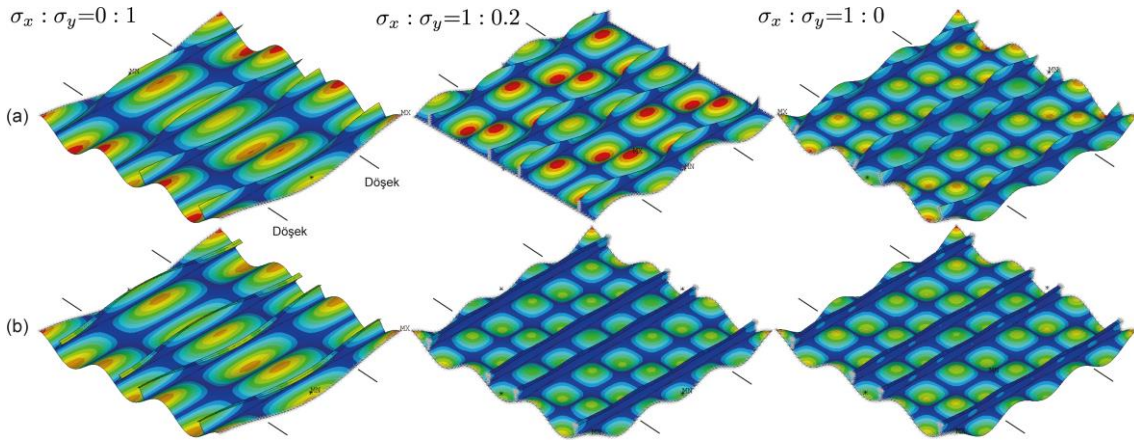
6. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

İlk olarak stifnerli panellerin iki eksenli yükleme altında burkulma davranışı incelenmiştir. Buradan elde edilen burkulma gerilmeleri lama profil kesitine ve T-profil kesitine sahip stifnerli paneller için Şekil 6(a) ve (b)’de sırasıyla verilmiştir. Verilen şekilde σ_{cr}^x ve σ_{cr}^y sırasıyla burkulma olduğu andaki x ve y yönündeki kritik burkulma gerilmelerini temsil etmektedir. σ_Y ise panel malzemesinin akma gerilmesidir. Şekil 6’da açıkça görüldüğü üzere stifner sayısının burkulma gerilmesine etkisi çok düşük seviyede olmaktadır. Bunun sebebi ise ele alınan panellerde burkulma modunun stifner sayısından bağımsız olarak, Şekil 7 ve 8’de görüldüğü üzere panel levhasının yerel burkulması şeklinde olmasıdır. Yerel levha burkulmasında etkin parametreler levha boyutu, kalınlığı ve levhanın sınır koşulları olmaktadır. Stifner sayısının burkulma gerilmesi üzerinde etkin olduğu durumlar genellikle kalın levhaların fazla sayıda zayıf stifner ile desteklendiği, global burkulma gözlenen panellerdir. Bu panellerde stifner ile levhalar birlikte burkulmaya maruz kalır, bu konudaki detaylı analizler için bkz Özdemir (2018). Şekil 6(a) ve (b) kıyaslandığında lama kesitli stifnere sahip panellerin burkulma gerilmelerinin T-kesitli olanlara nazaran daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise levhanın yerel burkulması sırasında stifner kesitlerinin dönmeye karşı gösterdiği direnç ile ilgilidir. Lama profile sahip stifnerlerin burulma rijitliği T-kesitli stifnere oranla daha yüksektir. Burulma rijitliği stifner gövdesinin (web) kalınlığı ile ilgilidir. Yine stifner sayısının burkulma gerilmesine etkisinin T-kesitli stifnerli panellerde daha düşük olması bununla ilgilidir. Ele alınan paneller için elde edilen burkulma mod şekilleri Şekil 7 ve 8’de verilmiştir. Burada tüm panellerde yerel levha burkulması gözlemlenmiştir. Verilen şekillerde tüm yükleme oranlarını vermek yerine enine yükleme, boyuna yükleme ve iki eksenli yükleme için ise sadece $\sigma_x:\sigma_y = 1:0.2$ için burkulma mod şekilleri verilmiştir. Burada verilen yükleme oranı hariç tüm yükleme oranları için elde edilen burkulma mod şekilleri sadece enine yükleme sonucu elde edilen ile benzer olmaktadır. Yani iki döşek arasında tek bir burkulma dalgası oluşmaktadır. İki adet stifner ile desteklenmiş panellerde (Şekil 7), $\sigma_x:\sigma_y = 1:0.2$ olduğunda ise iki döşek arası burkulma dalga sayısı lama profilli panelde $m = 2$ iken T-kesitli profile sahip panelde $m = 3$ olmaktadır.

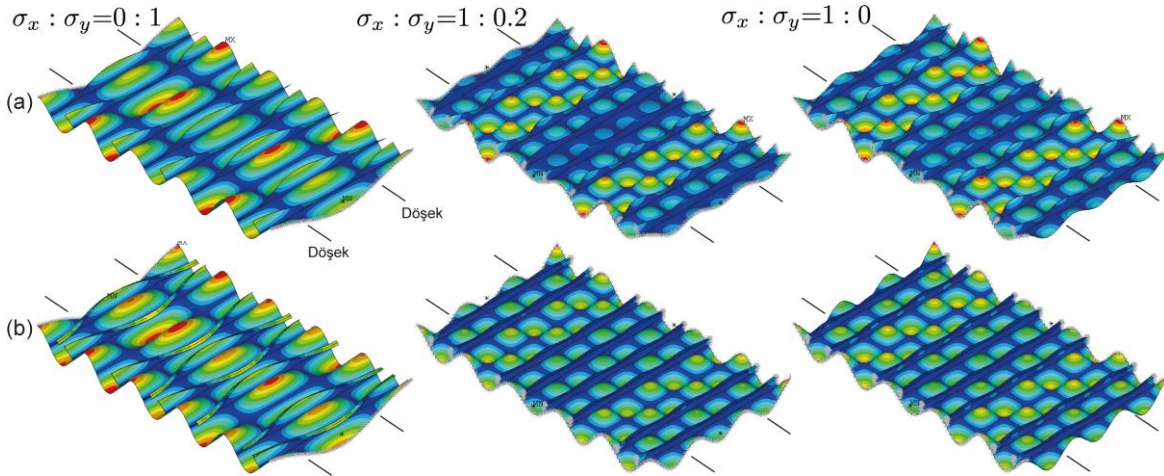


Şekil 6. İki eksenli yükleme altında burkulma gerilmesinin değişik yükleme oranları için değişimi: (a) lama profil, (b) T-kesitli profil.

Burkulma dalga sayısının üç ($m = 3$) olduğu durumlarda simetrik sınır koşulları problemin çözümünde uygun sonuç verecek iken lama profil kesitte eğer simetrik sınır koşulları uygulanmış olsaydı $\sigma_x : \sigma_y = 1 : 0.2$ yükleme oranı için mevcut burkulma modunu elde edemeyecektik. Bu burkulma modunun elde edilebilmesi için periyodik sınır şartlarının uygulanması gerekir.



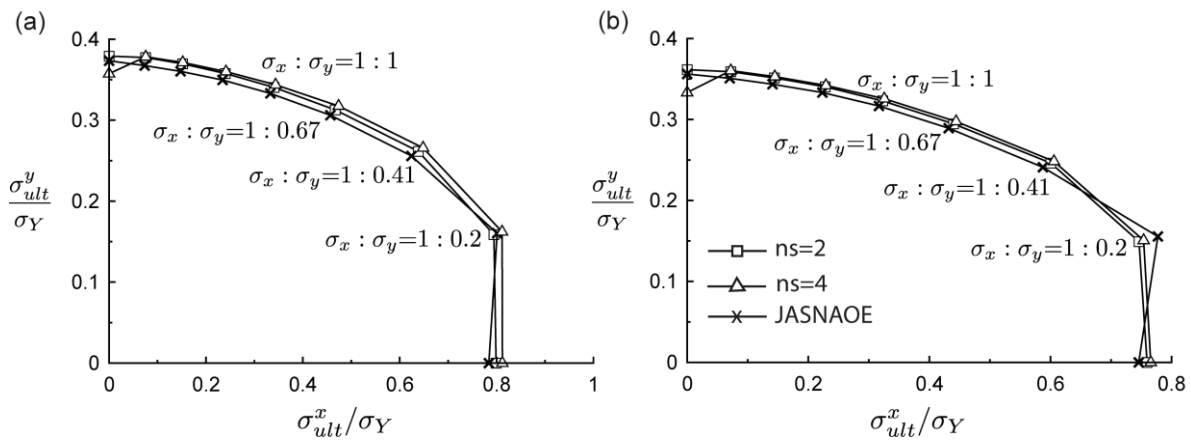
Şekil 7. İki eksenli yükleme altında burkulma mod şekilleri ($ns = 2$): (a) lama profil, (b) T-kesitli profil.



Şekil 8. İki eksenli yükleme altında burkulma mod şekilleri ($ns = 4$): (a) lama profil, (b) T-kesitli profil.

Stifnerli panellerin nihai mukavemet (göçme) analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. İlk olarak stifnerli panellerin iki eksenli basma altında taşıyabilecekleri maksimum yükleri

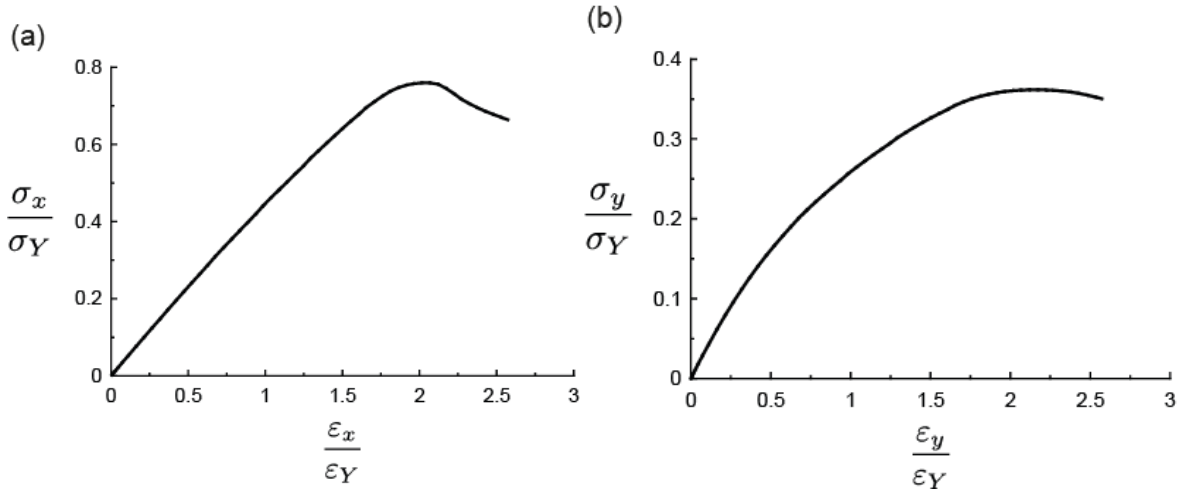
belirten nihai mukavemet değerleri elde edilmiş ve Şekil 9'da Yao ve diğ. (2011) ile kıyaslanarak verilmiştir. Şekil 9'da σ_{ult}^x ve σ_{ult}^y ifadeleri sırasıyla x ve y yönlerindeki nihai mukavemet değerlerini ifade etmektedir. Burada Yao ve diğ. (2011) tarafından verilen referans sonuçlar "JASNAOE" ifadesi ile belirtilmiştir. Ele alınan referans çalışmada panelin iki adet stifnere sahip olduğu durumlar için sonuçlar verilmiştir. Ayrıca referans çalışmada başlangıç deformasyonlarının uygulanması, bu çalışma ile kısmen farklılık göstermektedir. Referans çalışmada başlangıç deformasyonları $m = 1, 3$ ve 5 değerleri için ayrı ayrı hesaplanıp uygulanmış ve nihai mukavemet değerleri her durum için hesaplanmıştır. Elde edilen nihai mukavemet değerlerinden en küçük olanı ise panelin gerçek nihai mukavemeti olarak alınmıştır. Bizim çalışmamızda ise iki eksenli yükleme altında başlangıç kusurları $m = 1$ ve 3 değerleri için hesaplanıp üst üste bindirilmiştir. Böylelikle çok fazla sayıda simülasyon yapılmamıştır. Bu çalışmada hangi göçme modu için nihai mukavemet değeri en düşük ise o mod için m değeri analiz sonucunda elde edilen göçme deformasyonlarında daha baskın olacaktır.



Şekil 9. İki eksenli yükleme altında nihai mukavemetin değişik yükleme oranları için değişimi: (a) lama profil, (b) T-kesitli profil.

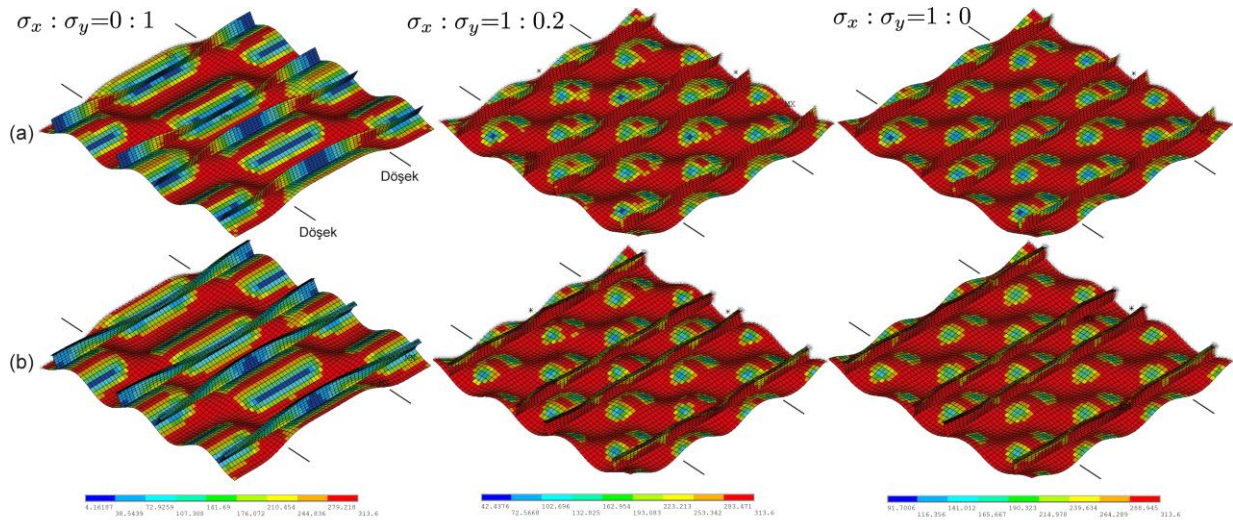
Şekil 9'da görüldüğü üzere elde edilen nihai mukavemet değerleri referans sonuçlar ile uyum içerisinde. Stifner sayısının nihai mukavemet üzerine etkisi, burkulma gerilmesi üzerine olan etkisine kıyasla daha azdır.

Özellikle stifner sayısının dört ($ns = 4$) olduğu durumda, $\sigma_x : \sigma_y = 0.2 : 1$ yükleme oranı için nihai mukavemetin sadece enine yöndeki yükleme durumuna ($\sigma_x : \sigma_y = 0 : 1$) göre bir miktar daha yüksek olduğu gözlemlenebilir. Diğer yandan $\sigma_x : \sigma_y = 1 : 0.2$ yükleme durumu için de nihai mukavemet değeri sadece boyuna yöndeki yükleme durumuna ($\sigma_x : \sigma_y = 1 : 0$) göre bir miktar yüksek olmaktadır. Bu tür bir davranışın açıklaması Poisson oranı ile basitçe yapılabilir. Panel eğer sadece enine yükleme altında ($\sigma_x : \sigma_y = 0 : 1$) ise panel Poisson oranının etkisi ile boyuna yönde (x - yönü) bir miktar genişleyecektir. Yükleme oranı $\sigma_x : \sigma_y = 0.2 : 1$ olduğunda ise panelin boyuna yöndeki genişlemesi, başlangıçta boyuna yöndeki yüklemeye rağmen meydana gelmektedir. Yük miktarı kademeli olarak arttıkça boyuna yöndeki genişleme durmakta ve panel boyuna yönde de sıkışmaya başlamaktadır. Panelin başlangıçta boyuna yönde sıkıştırılmaması fakat genişlemenin bir miktar bastırılması nihai mukavemet değerinin sadece enine yükleme olan duruma göre bir miktar daha yüksek olmasına olanak sağlamaktadır. Aynı mantıkla $\sigma_x : \sigma_y = 1 : 0.2$ yükleme oranı için de nihai mukavemet değerindeki bir miktar artış açıklanabilir.

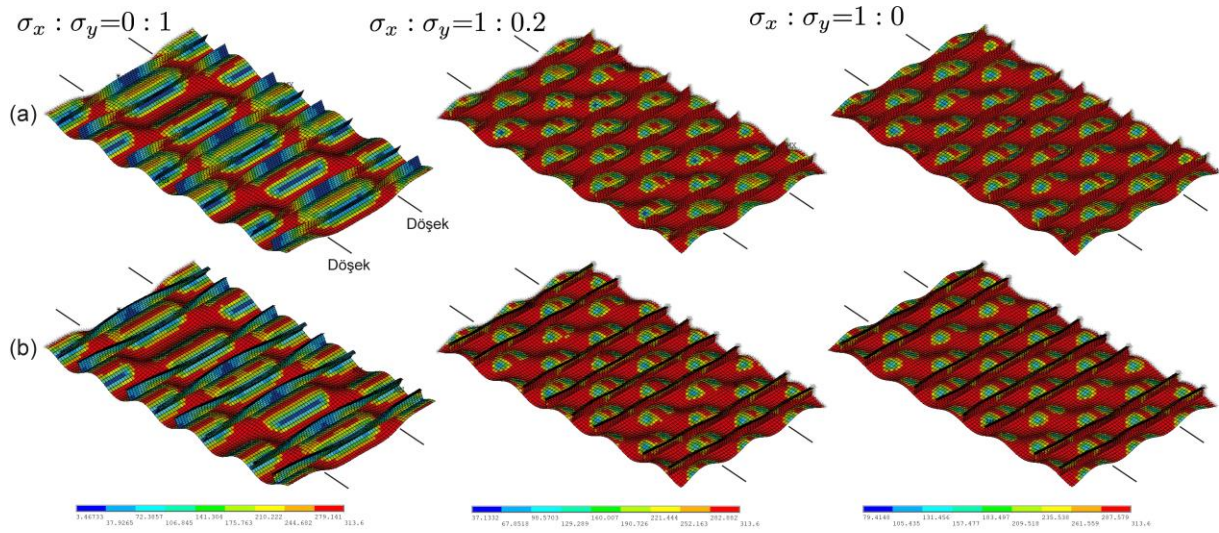


Şekil 10. T-kesitli iki stifnerli ($ns = 2$) panel için gerilme-gerinim eğrileri: (a) boyuna yükleme ($\sigma_x : \sigma_y = 1 : 0$), (b) enine yükleme ($\sigma_x : \sigma_y = 0 : 1$).

Şekil 6 ile 9 kıyaslandığında enine yüklemenin baskın olduğu durumlarda elastik burkulma gerilmesinin nihai mukavemet değerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun sebebini daha iyi açıklamak amacıyla Şekil 10'da bir panel için gerilme-ortalama gerinim eğrileri verilmiştir. Şekil 10(a)'da boyuna yükleme altında nihai mukavemet değerine ulaşıncaya kadar eğrinin eğiminin neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Yani panelin dayanımını sabit kalmaktadır. Burkulmanın meydana geldiği nokta eğimin değişmeye başladığı nokta olarak görülebilir. Bu değer ise yaklaşık olarak $\sigma_x/\sigma_Y = 0.7$ olarak kabul edilebilir. Diğer yandan Şekil 10(b)'de görüleceği üzere eğim yaklaşık olarak $\sigma_y/\sigma_Y = 0.15$ civarında değişmeye başlamaktadır. Yani enine yükleme altında burkulmanın bu değer civarında meydana geldiğini söyleyebiliriz. Elastik burkulma gerilmesine göre bu değer oldukça küçük olduğu görülmektedir. Uygulanan başlangıç deformasyonları sebebiyle burkulma çok daha erken meydana gelmiştir. Panel, burkulmanın meydana gelmesi sonrası yük taşımaya devam etmektedir. Şekil 11 ve 12'den görüleceği üzere panel enine yükleme altında iken levha üzerinde bazı bölgeler plastik mafsalsi şekilde davranırken diğer bölgelerde gerilme değerleri çok düşük olmaktadır, yani elastik bölgededir.



Şekil 11. İki eksenli yükleme altında nihai durumdaki deformasyonlar ($ns=2$): (a) lama profil, (b) T-kesitli profil.



Şekil 12. İki eksenli yükleme altında nihai durumdaki deformasyonlar ($ns=4$): (a) lama profil, (b) T-kesitli profil.

Şekil 11 ve 12’de iki ($ns = 2$) ve dört ($ns = 4$) stifnerli paneller için nihai mukavemete ulaşıldığı anda göçme deformasyonları ve Von Mises gerilme dağılımları verilmiştir. Burada enine, boyuna ve $\sigma_x : \sigma_y = 1 : 0.2$ yükleme oranı için deformasyonlar verilmiştir. Diğer yükleme oranları için göçme deformasyonları enine yükleme durumu ile benzer olmaktadır. Sadece gerilme dağılımlarında değişiklik olmaktadır. Verilen şekillerde kırmızı renkli bölgeler genel olarak plastik deformasyon gözlemlenen bölgelerdir. Enine yükleme durumunda minimum ve maksimum gerilme değerleri arasındaki farkın oldukça fazla olması sebebiyle panelin bazı bölgelerinin plastik mafsalsı davranışını söyleyebiliriz. Diğer yandan elastik burkulma analizi sonucu elde edilen burkulma dalga sayısı ile göçme analizleri ile elde edilen burkulma dalga sayıları panellerin çoğu için aynı olmaktadır. Sadece iki adet lama profil ile desteklenmiş panellerin $\sigma_x : \sigma_y = 1 : 0.2$ yükleme oranında elastik burkulma analizi sonucu elde edilen burkulma dalga sayısı döşekler arasında $m = 2$ iken, göçme analizinde bu değer $m = 3$ olmaktadır. Bunun başlıca sebebi uygulanan başlangıç deformasyonlarının $m = 3$ bileşenini içermesidir.

7. Genel değerlendirmeler

Stifnerli panellerin iki eksenli yükleme altında burkulma/göçme davranışları incelenerek elde edilen nihai mukavemet değerleri mevcut referans değerler ile karşılaştırılmış, sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Panellerin burkulma ve göçme analizleri sonrasında elde edilen deformasyon şekilleri birbirlerine benzer iken; sadece tek bir yükleme oranında, $\sigma_x : \sigma_y = 1 : 0.2$, iki adet lama profil panel için deformasyonlar farklılık göstermektedir.

Stifner sayısının burkulma ve nihai mukavemet üzerinde etkisinin küçük olduğu, bu etkinin T- kesitli stifnerlerde neredeyse önemsiz olduğu görülmüştür. Enine yüklerin baskın olduğu durumlarda nihai mukavemet değerinin elastik burkulma gerilmesinden büyük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise enine yüklemenin baskın olduğu durumlarda, burkulma sonrası yükün plastik mafsalsı davranışa baskın olarak karşılanmasıdır.

Teşekkür

Bu çalışmanın bir kısmı, yazarın Hiroşima Üniversitesi, Ulaştırma ve Çevre Sistemleri Bölümü, Yapısal Sistemler laboratuvarına gerçekleştirdiği ziyaret esnasında gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple desteklerinden dolayı Prof. Tetsuya Yao, Assoc. Prof. Satoyuki Tanaka ve Mrs. Septia H. Sujiatanti'ye teşekkür ederim. Ayrıca akademik hayata nihai mukavemet konusu ile başlamama vesile olan ve beni destekleyen değerli hocam Prof. Dr. Ahmet Ergin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

8. Kaynaklar

ANSYS. (2016). User's Manual Release 17.2.

Det Norske Veritas. (2005). Nauticus Hull user manual, PULS.

Fujikubo, M., Harada, M., Yao, T., Khedmati M.R., Yanagihara, D. (2005). Estimation of ultimate strength of continuous stiffened panel under combined transverse thrust and lateral pressure Part 2: Continuous stiffened panel. *Mar. Struct.* 18, 411–427.

Fujikubo, M., Yanagihara, D., Yao, T. (1999). Estimation of ultimate strength of continuous stiffened plates under thrust. *J. Soc. Nav. Archit. Jpn.* 185,203-212. (Japonca)

Fujikubo, M., Yanagihara, D., Yao, T. (1999). Estimation of ultimate strength of continuous stiffened plates under thrust (2nd report). *J. Soc. Nav. Archit. Jpn.* 186,631-638. (Japonca)

Fujikubo, M., Yao, T. (1999). Elastic local buckling strength of stiffened plate considering plate/stiffener interaction and welding residual stress. *Mar. Struct.* 12, 543–564.

Fujikubo, M., Yao, T., Khedmati M.R., Harada, M., Yanagihara, D. (2005). Estimation of ultimate strength of continuous stiffened panel under combined transverse thrust and lateral pressure Part 1: Continuous plate. *Mar. Struct.* 18, 383–410.

Harada M., Fujikubo M., Yanagihara, D. (2007). Development of a set of closed-form formulae for estimation of ultimate strength of a continuous stiffened panel under combined in-plane and lateral pressure. *ClassNK Tech. Bull.* 25, 11-21.

Özdemir, M. (2018). Elastic-plastic collapse analysis of stiffened ship panels. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

Özdemir, M., Ergin, A., Yanagihara, D., Tanaka S., Yao T. (2018). A new method to estimate ultimate strength of stiffened panels under longitudinal thrust based on analytical formulas. *Mar. Struct.* 59, 510–535.

Paik, J.K., Kim, B.J., Seo, J.K. (2008). Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part II stiffened panels. *Ocean Eng.* 35, 271-280.

Paik, J.K., Seo, J.K. (2009). Nonlinear finite element method models for ultimate strength analysis of steel stiffened-plate structures under combined biaxial compression and lateral pressure actions Part II: Stiffened panels. *Thin-Walled Struct.* 47, 998-1007.

Paik J.K., Thayamballi, A.K., Kim, B.J. (2001). Large deflection orthotropic plate approach to develop ultimate strength formulations for stiffened panels under combined biaxial compression/tension and lateral pressure. *Thin-Walled Struct.* 39, 215-246.

Tanaka S., Yanagihara, D., Yasuoka, A., Harada, M., Okazawa, S., Fujikubo, M., Yao T. (2014). Evaluation of ultimate strength of stiffened panels under longitudinal thrust. *Mar. Struct.* 36, 21–50.

Ueda Y., Yao, T. (1985). The influence of complex initial deflection modes on the behavior and ultimate strength of rectangular plates in compression. *J. Constr. Steel Res.* 5, 265-302.

Xu, M.C., Yanagihara, D., Fujikubo, M., Soares C.G. (2013). Influence of boundary conditions on the collapse behaviour of stiffened panels under combined loads. *Mar. Struct.* 34, 205–225.

Yao *et al.* (2011). Report of research committee for verification of ISO formulas to evaluate ultimate strength. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (JASNAOE).