

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ PANELLERİNİN NİHAİ MUKAVEMET ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat ÖZDEMİR

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ PANELLERİNİN NİHAİ MUKAVEMET ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Murat ÖZDEMİR
(508101012)**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ERGİN

OCAK 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508101012 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Murat ÖZDEMİR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**GEMİ PANELLERİNİN NİHAİ MUKAVEMET ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ahmet ERGİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet H. OMURTAG
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2013**

Değerli aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yapılmasında emeği geçen başta tez danışmanım sayın Prof. Dr. Ahmet ERGİN' e, beni her zaman destekleyen değerli aileme, değerli yardımlarını esirgemeyen, başta Yasin Kaan İLTER ve Arş. Gör. Onur USTA olmak üzere tüm arkadaşlarıma, yüksek lisans öğrenimim süresince beni maddi olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na ve tez çalışmam sırasında gerekli olan donanımların alınmasına destek olan İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2013

Murat Özdemir
(Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları
Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Panel Terminolojisi	2
1.2 Panellerin Göçme Modları	3
2. GEMİ PANELLERİNİN LİNEER BURKULMA ANALİZİ.....	7
2.1 Basit Mesnetli Levhanın Lineer Burkulma Analizi	8
2.1.1 Denge yöntemi	8
2.1.2 Enerji yöntemi	9
2.2 Stifnerli Panellerin Burkulma Analizi.....	12
2.2.1 Sınır şartları	14
2.2.2 Burkulma ifadesi	16
2.2.3 Artık gerilmeler	17
2.2.4 Sonlu elemanlar analizi (SEA).....	19
2.3 Sonuçlar.....	20
3. GEMİ PANELLERİNİN NONLİNEER BURKULMA ANALİZİ.....	27
3.1 Sonlu Elemanlar Modeli.....	30
3.2 Sınır Koşulları	31
3.3 Başlangıç Deformasyonları	32
3.4 Sonuçlar.....	33
4. DEĞERLENDİRMELER	41
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ.....	49

KISALTMALAR

BC	: Bulk Carrier
DNV	: Det Norske Veritas
FEM	: Finite Element Method
ISUM	: Idealized Structural Unit Method
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
VLCC	: Very Large Crude Carrier

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Basit mesnetli levha için analitik ve SEA sonuçları.	20
Çizelge 2.2 : Stifnerli panel için SEA ve analitik sonuçlar (Yao, 2009).	22
Çizelge 3.1 : Stifnerli panel özellikleri.	31
Çizelge 3.2 : Malzeme özellikleri.....	31
Çizelge 3.3 : Nonlineer SEA sonuçlarının Chen (2003) tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması.....	34
Çizelge 3.4 : P1 için stifner gövde yüksekliğinin etkisi	36
Çizelge 3.5 : P2 için stifner gövde yüksekliğinin etkisi	36
Çizelge 3.6 : P3 için stifner gövde yüksekliğinin etkisi	36
Çizelge 3.7 : P4 için stifner gövde yüksekliğinin etkisi	36
Çizelge 3.8 : P1 için lateral yükün etkisi	39
Çizelge 3.9 : P2 için lateral yükün etkisi	40
Çizelge 3.10 : P3 için lateral yükün etkisi	40
Çizelge 3.11 : P4 için lateral yükün etkisi	40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Stifnerli panel yapıları (Chen, 2003).....	2
Şekil 1.2 : Global göçme (Mod I).....	4
Şekil 1.3 : İki eksenli yükleme altında göçme (Mod II).....	4
Şekil 1.4 : Stifner ve levhanın kiriş-kolon tipi göçmesi (Mod III) .	4
Şekil 1.5 : Stifner gövdesinin Burkulması (Mod IV).	5
Şekil 1.6 : Stifnerin burulmalı burkulması.	5
Şekil 2.1 : Stabilite analoji (Szilard, 2004).....	9
Şekil 2.2 : Basit mesnetli levha.	10
Şekil 2.3 : Burkulma katsayısının levha kenar oranına bağlı olarak değişimi.	11
Şekil 2.4 : Stifnerli gemi paneli.	14
Şekil 2.5 : Levha üzerinde artık gerilme dağılımı.	17
Şekil 2.6 : Stifner gövdesi üzerinde artık gerilme dağılımı.	18
Şekil 2.7 : Stifner flenşi üzerinde artık gerilme dağılımı.....	18
Şekil 2.8 : Stifnerli panel sonlu elemanlar modeli.	20
Şekil 2.9 : Stifnerli panel burkulma mod şekli (Lama:195x10 mm).	21
Şekil 2.10 : Stifnerli panel burkulma mod şekli (T-profil:250x12+90x10 mm).	21
Şekil 2.11 : BC paneli için analitik ve SEA sonuçlarının karşılaştırılması.	22
Şekil 2.12 : VLCC paneli için analitik ve SEA sonuçlarının karşılaştırılması.....	23
Şekil 2.13 : BC paneli için artık gerilmenin etkisi.....	23
Şekil 2.14 : VLCC paneli için artık gerilmenin etkisi.	24
Şekil 2.15 : BC paneli için levha kenar oranının etkisi.	24
Şekil 2.16 : VLCC paneli için levha kenar oranının etkisi.	25
Şekil 2.17 : BC paneli için levha kalınlığının etkisi.	25
Şekil 2.18 : VLCC paneli levha kalınlığının etkisi.....	25
Şekil 2.19 : BC paneli için stifner gövde yüksekliğinin etkisi.	26
Şekil 2.20 : VLCC paneli için stifner gövde yüksekliğinin etkisi	26
Şekil 3.1 : Stifnerli panel modeli.	31
Şekil 3.2 : Stifnerli panel global burkulma mod şekli.	33
Şekil 3.3 : P1 için yük-deplasman eğrisi.	34
Şekil 3.4 : P2 için yük-deplasman eğrisi.	34
Şekil 3.5 : P3 için yük-deplasman eğrisi.	35
Şekil 3.6 : P4 için yük-deplasman eğrisi.	35
Şekil 3.7 : P1 için levha kalınlığının etkisi.	36
Şekil 3.8 : P2 için levha kalınlığının etkisi.	37
Şekil 3.9 : P3 için levha kalınlığının etkisi.	37
Şekil 3.10 : P4 için levha kalınlığının etkisi.	37
Şekil 3.11 : P1 için stifner tipinin etkisi.	38
Şekil 3.12 : P2 için stifner tipinin etkisi.	38
Şekil 3.13 : P3 için stifner tipinin etkisi.	39
Şekil 3.14 : P4 için stifner tipinin etkisi.	39

GEMİ PANELLERİNİN NİHAİ MUKAVEMET ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada stifnerli gemi panellerinin lineer ve nonlinear burkulma davranışları incelenmiştir. İlk olarak basit mesnetli bir levhanın denge yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak stifnerli panellerin burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve uyum gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca stifner ve stifner tipinin burkulmaya etkisi basit mesnetli levha burkulma gerilmesi referans alınarak incelenmiştir.

Minimum potansiyel enerji teoremi kullanılarak stifnerli panellerin boyuna ve enine doğrultuda iki eksenli yükleme altında burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında levha-stifner etkileşimi ve artık gerilmeler de dikkate alınmıştır. Artık gerilmelerin dikkate alınmadığı durum için sonlu elemanlar yöntemi ile burkulma analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar analitik çözüm ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan parametrik çalışma ile levha kenar oranının, levha kalınlığının ve stifner gövde yüksekliğinin panel elastik burkulma gerilmesine etkisi incelenmiştir. Levha kenar oranının ve levha kalınlığının panel elastik burkulma gerilmesi üzerinde oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Levha kenar oranı arttıkça panel burkulma gerilmesinde de artış görülmüştür. Stifnerler arası levhanın lokal burkulması sebebiyle levha kalınlığının artırılması panel burkulma gerilmesini önemli ölçüde artırmıştır. Stifner gövde yüksekliğinin artırılması panel burkulma davranışını ihmal edilebilecek seviyede etkilemiştir.

Stifnerli panellerin nonlinear burkulma davranışı ve nihai yük taşıma kapasitesini incelemek amacıyla nonlinear sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle öz değer analizleri gerçekleştirilmiş ve panellerin burkulma modları belirlenmiştir. Panelin global burkulma modu panelin göçmeye maruz kalacağı mod olarak öngörülmüş ve stifnerli panelin göçmesini başlatabilmek adına panel ve stifnerlere global burkulma modu şeklinde başlangıç deformasyonu uygulanmıştır. Nonlinear sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmış ve uyum gözlemlenmiştir.

Yapılan parametrik çalışma ile stifner gövde yükseliğinin, levha kalınlığının ve lateral yükün panel nihai yük taşıma kapasitesine ve göçme davranışına etkisi incelenmiştir.

Stifner gövde yüksekliğinin artırılması panelin nihai yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır.

Levha kalınlığının artırılması ise panelin nihai yük taşıma kapasitesi üzerinde çok büyük etki yaratmamıştır ancak panelin göçme sonrası davranışını etkilemiştir.

Panel nihai yük taşıma kapasitesine lateral yükün etkisi araştırılırken panele herhangi bir başlangıç deformasyonu uygulanmamıştır. Öncelikle lateral yük uygulanmış, daha sonra ise boyuna doğrultuda eksenel yük uygulanmıştır. Lateral yük genel olarak panelin nihai yük taşıma kapasitesini azaltmıştır ancak lateral yükün baskın olduğu bazı durumlarda panel nihai yük taşıma kapasitesinde bir artış gözlenmiştir.

ULTIMATE STRENGTH ANALYSIS OF SHIP STRUCTURAL PANELS

SUMMARY

In this study, linear and nonlinear buckling behaviors of stiffened ship panels are investigated. Buckling strength of a simply supported plate is calculated by using both finite element method (FEM) and equilibrium method. Results are compared each other and it is observed that results are consistent but FEM gives lower buckling strength for simply supported plate.

Buckling strength of stiffened ship panels under longitudinal thrust is investigated by using FEM. Symmetric boundary condition is imposed to panel because of that buckling half wave number in the longitudinal direction is odd number.

Results are compared with literature and finite element analysis gives acceptable results for buckling strength of stiffened ship plates. It is observed that FEM is capable to simulate buckling behavior of stiffened panels.

Effect of stiffener is investigated for buckling strength of stiffened panels. Generally, stiffener increases the buckling strength of panels, but in some cases, buckling strength of stiffened panel is lower than the simply supported plate. This is because stiffener is very slender and buckles prior to the plate. This situation is dangerous and should be avoided.

Elastic buckling behavior of stiffened panels under biaxial thrust considering welding residual stresses and plate-stiffener interaction is investigated by using principle of minimum potential energy. FEM eigenvalue analyses are also carried out. In the analytical study, plate and web are modeled as plate elements, whereas flange is modeled as beam. Continuity of rotation along the panel-web intersection and web-flange intersection is considered. Equilibrium of bending/torsional moment along plate-web intersection and web-flange intersection is also considered.

In the finite element analysis, plate, web and flange are modeled as plate elements. Shell181 finite strain shell element is used for the modeling of stiffened panel. Shell181 element considers shear deformation of plate elements and it is capable to simulate buckling behavior of stiffened panels. Symmetric boundary condition is applied if the buckling half wave number in the longitudinal direction is odd number. Anti-symmetric boundary condition is applied to the panel edges if the buckling half wave number is even number. Transverse frame is not modeled, but displacement in the vertical direction is constrained along the transverse member. Welding residual stress is not considered in the finite element analysis.

Analytical and FEM results are compared and it is observed that results are generally consistent. Analytical formulation always satisfies boundary conditions, because boundary conditions are not dependent on buckling half wave number. In the finite element analysis, boundary conditions depend on buckling half wave number. Because of that, FEM results differ from analytical results in some cases.

Welding residual stress does not affect the buckling mode shape of panels but it has great effects on buckling strength. When the longitudinal thrust is dominant, welding residual stress reduces the buckling strength, but if the transverse thrust is dominant, effects of welding residual stress would be smaller. Effects of welding residual stress for bulk carrier (BC) bottom panel is greater than the very large crude carrier (VLCC) bottom panel. This is because; transverse welding residual stresses are greater for BC bottom panel.

Some parametric studies are carried to investigate the effects of plate aspect ratio, plate thickness and stiffener web height on buckling strength of stiffened panels. In the parametric studies, welding residual stresses are considered and principle of minimum potential energy is used.

Plate aspect ratio has great effects on panel elastic buckling behavior. Increase in the aspect ratio causes reduction in plate slenderness and this situation increases buckling strength of stiffened panels. Plate thickness affects the panel buckling strength a lot. Plate thickness increases buckling strength of panels. For the global buckling problem, effect of plate thickness on buckling strength is smaller. Stiffener web height has no considerable effect on local buckling strength of stiffened panels. When, transverse thrust is dominant, effect of stiffener web height can be ignored. This is because; transverse thrust is not directly applied to the stiffener.

Ultimate strength analyses of stiffened panels can be carried out by several methods such as, Nonlinear Finite Element Method, Idealized Beam Column Method and Idealized Structural Unit Method (ISUM). Nonlinear FEM is the one of the strongest candidate to assess the ultimate strength of panels and ship hull. Idealized Beam Column Method and ISUM requires some extra interests, therefore nonlinear FEM is chosen to investigate the ultimate strength of stiffened panels.

Nonlinear finite element analyses are carried out to investigate the ultimate load carrying capacity and collapse behaviour of stiffened ship panels. Firstly, finite element eigenvalue analyses were carried out to determine the buckling mode shapes of stiffened panels.

The structure being modeled must be sufficient to capture all the mechanisms that could lead to collapse of the structure. For large deflection analyses of stiffened panels subjected to longitudinal thrust, one bay model taken from grillage system is not sufficient. Under longitudinal thrust, an interframe bay would deflect in an upward or downward half wave, which is a plate induced or stiffener induced mode respectively, while the next bay would deflect in the opposite sense. The boundary condition at the frame is intermediate between simply supported and clamped, and can not be accurately modeled as a loaded edge. Therefore, for the large deflection analysis, at least three bay model becomes necessary, which we have represented as a symmetric $1\frac{1}{2}$ bay model.

The long edges of stiffened panel is assumed as simply supported and displacement in z-direction, rotations about y and z- axes are constrained to impose simply supported boundary condition.

The transverse interbay frame is not modeled, but displacement in z-direction is constrained along the interbay frame.

The short edge, which is the mid-length of the mid-bay of the full three bay model, has symmetric boundary conditions. Displacement in x direction and rotation about y-axis are constrained to simulate symmetric boundary condition.

Displacement in y direction at the mid-width node in each of the two short edges is constrained to prevent rigid body motion of stiffened panel.

In order to analyze the post-buckling situation, the problem has to be considered as a continuous response problem instead of a bifurcation one by introducing an initial imperfection for the stiffeners and plating.

Imperfect geometry is assumed as an overall buckling mode shape obtained from eigenvalue analysis. The selected mode shape has an upward half wave deflection in the full bay and a downward deflection in the half bay. Initial imperfection is not imposed to the finite element model while the effect of lateral pressure is investigated.

Results of nonlinear finite element analyses are compared with literature and results are consistent with each other.

Series of parametric nonlinear finite element analyses are carried out to investigate the effects of stiffener type, stiffener web height, plate thickness and lateral pressure on collapse behavior of stiffened panels.

T-bar, angle bar and flat bar stiffeners are considered in the finite element analyses. T-bar and angle bar stiffeners have equal section modulus with respect to the horizontal axis. Flat bar stiffener is evaluated by removing flange of T-bar stiffeners. Stiffener type has great effects on ultimate load carrying capacity of stiffened panels. Collapse behavior of stiffened panels are similar for T-bar and angle bar stiffeners but in case of flat bar stiffeners, load carrying capacity of stiffened panel reduces sharply.

Stiffener web height increases the load carrying capacity of stiffened panels. If the stiffener web height is increased more, panel collapse mode shape would change. Panel collapse would be as the collapse of plating between stiffeners or tripping of stiffeners depending upon the slenderness of stiffener.

Plate thickness has no considerable effect on ultimate load carrying capacity of stiffened panels but affects the post collapse behavior of panels, therefore it must be taken into consideration. In case of local collapse of plating between stiffeners, effect of plate thickness would be much more.

Lateral pressure generally reduces the ultimate load carrying capacity of stiffened panels. If the lateral pressure is increased more, ultimate load carrying capacity of panel, also increase due to the deflection which is in opposite sense of buckling mode shape in the half bay of panel.

1. GİRİŞ

Günümüzde, üretimlerinin basit olması ve sağladıkları mukavemete göre ağırlıklarının düşük olması sebebiyle stifnerlerle desteklenmiş çelik paneller gemi inşaatı ve diğer ağır sanayi dallarında sık kullanılmaktadır. Bu etkenler göz önünde bulundurulduğunda panellerin tasarımı mühendislerin ve araştırmacıların başlıca çalışma alanlarından birisi haline gelmiştir.

Günümüz gemi yapısal tasarımları sadece lineer elastik bölge için müsaade edilebilir gerilme kriterine göre yapılmamaktadır. Özel gemilerin sayısının da gün geçtikçe artması sebebiyle yapının taşıyabileceği maksimum yükün(nihai yük) belirlenmesi ve yapının güvenilirlik analizlerinin yapılması elzem bir hale gelmiştir.

Gemi kirişinin nihai mukavemetini belirlemeyi ilk olarak Caldwell (1965) denemiştir. Caldwell, yaptığı çalışmasında stifnerli panelleri davranışları daha önceden deneysel veya teorik olarak belirlenmiş eşdeğer kalınlıkta levhalar olarak modellemiş ve burkulma etkisini de dikkate alarak tam plastik eğilme momentlerini elde etmiştir. Burkulan bölge için akma gerilmesi değeri mukavemet azaltma faktörü ile çarpılarak elde edilmiştir. Caldwell yönteminin en önemli eksikliklerinden birisi yapının göçme sonrası davranışlarını dikkate almamasıdır.

Gemi kirişi için boyuna ve enine nihai mukavemetin belirlenmesinde gemi yapısının en önemli yapısal birimlerinden olan panellerin nihai mukavemetlerinin belirlenmesi ilk adım olarak değerlendirilebilir.

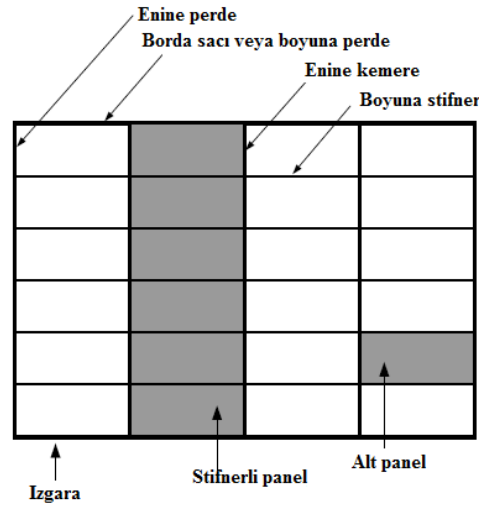
Stifnerli gemi panelleri yapının geometrisine ve yükleme şekline bağlı olarak nihai mukavemet durumuna çeşitli şekillerde ulaşırlar. Panel eksenel yüklemelere maruz kaldığında yapı çok güçlü ve kısa ise ezilme meydana gelir ve yapı malzemesinin akma sınırına bağlı olarak panel nihai mukavemet değerine ulaşır. Panelin narin veya yükleme yönünde boyu uzun olduğu durumda ise öncelikle panel burkulmaya maruz kalır. Panel burkulma sonrasında ise nihai mukavemet değerine ulaşır.

Stifnerli panellerin burkulma davranışları ise panelin yükleme durumuna, stifner geometrisine ve panel üzerinde oluşan üretim kusurlarına bağlı olarak değişiklik gösterir.

1.1 Panel Terminolojisi

Panellerin göçme modunu daha iyi anlamak adına paneller hakkında kısa bir bilgi vermek gerekebilir. Paneller büyüklüklerine göre üç gruba ayrılabilir. Şekil 1.1’de stifnerli panel yapıları görülmektedir.

- Boyuna destek elemanları ve enine destek elemanlarından oluşan yapıya *ızgara sistemi* adı verilir.
- İki enine destek elemanı arasında kalan ve boyuna stifnerlerden oluşan panellere *stifnerlenmiş paneller* adı verilir.
- Boyuna stifnerler ve enine destek elemanları arasında kalan yapıya ise *alt panel* adı verilir.



Şekil 1.1 : Stifnerli panel yapıları (Chen, 2003).

Panellerde yapının büyük bir kısmını levhalar oluşturur. Levhalar, yapıya etkiyen eksenel yüklemelerin de taşınmasını sağlar. Boyuna stifnerler ise yapıyı güçlendirerek yapının stabilitesini artırır. Ayrıca eksenel yüklemelerin bir kısmını taşır. Yapıya yanal yükleme uygulandığı durumlarda ise bu yükün taşınabilmesi için yapıya gerekli desteği sağlar. Enine destek elemanları ise boyuna stifnerlere ara destek sağlar.

Eğer enine destek elemanları boyuna stifnerlerin deformasyonunu engelleyecek rijitlikte değilse, levha boyuna stifnerler ve enine destek elemanları ile birlikte burkulur. Enine destek elemanları yeterli rijitliğe sahip ise burkulma iki enine destek elemanı arasında yer alan panelde meydana gelir (Chen, 2003).

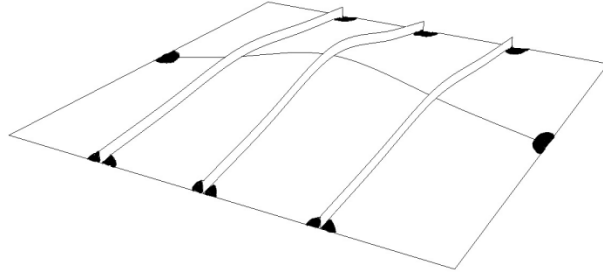
Genel olarak enine destek elemanları boyuna stifnerlerin deformasyon yapmasını engelleyecek kapasiteye sahip olduğundan panelin iki enine destek elemanı arasındaki bölümünün burkulma ve göçme analizi yapılır.

1.2 Panellerin Göçme Modları

Gemi kirişinin en önemli yapı birimlerinden olan paneller, levha ve stifnerlerin yapısına ve rijitiğine göre çeşitli modlarda göçmeye maruz kalırlar. Panellerin göçme davranışları genel olarak altı kategoride incelenebilir (Paik ve Thayamballi, 2003).

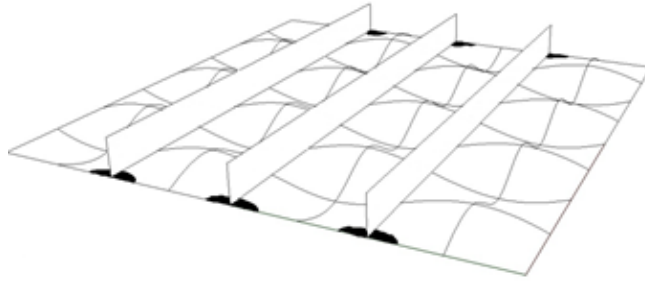
- Mod I: levha ve stifnerin bir bütün olarak burkulması sonucu meydana gelen göçmedir (*overall collapse*).
- Mod II: panelin enine ve boyuna doğrultudaki eksenel yükleme sebebiyle göçmeye maruz kalmasıdır.
- Mod III: panel üzerindeki stifnerlerin kiriş-kolon elemanı şeklinde burkulması sonucu meydana gelen göçmedir.
- Mod IV: stifner gövdesinin burkulması sonucu meydana gelen göçmedir.
- Mod V: stifner gövdesinin burulmalı burkulması (*tripping*) sebebiyle meydana gelen göçmedir.
- Mod VI: panelin aşırı akmaya maruz kalması sonucu meydana gelen göçmedir.

Mod I, genellikle stifnerlerin yeterince güçlü olmadığı panellerde levha ve stifnerlerin bir bütün olarak burkulması durumudur. Bu modda meydana gelen burkulma başlangıçta elastik bölgededir. Deformasyonların artmasıyla panel içinde ve panel kenarlarında akma meydana geldiğinde panel nihai yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Enine ve boyuna destek elemanlarına sahip bir panelin bu modda burkulması ortotropik levha burkulması olarak değerlendirilebilir.



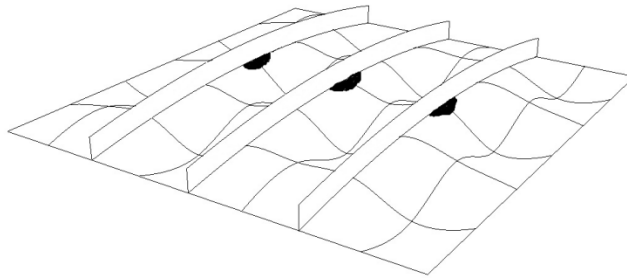
Şekil 1.2 : Genel göçme (mod I).

Mod II, panellerin enine ve boyuna doğrultuda eksenel basınç yüküne maruz kalması sonucu panel kenarlarında stifner – levha bağlantılarının akmaya maruz kalması sonucu oluşan göçme durumudur. Bu durum genellikle levha narinliğinin düşük olduğu panellerin iki eksenli yüklemeye maruz kalması sonucu oluşur.



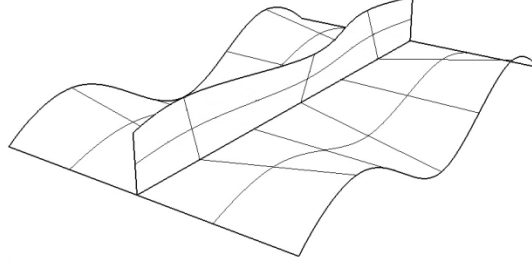
Şekil 1.3 : İki eksenli yükleme altında göçme (mod II).

Mod III, panellerin boyuna basınç yükü etkisi altında levha ve stifner birleşiminin orta bölgelerinde akma sonucu meydana gelen göçmeyi temsil eder. Bu durum genellikle stifner rijitliğinin orta seviyede olduğu paneller için geçerlidir.



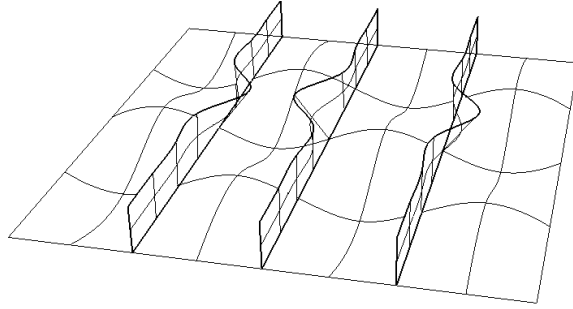
Şekil 1.4 : Stifner ve levhanın kiriş-kolon tipi göçmesi (mod III).

Mod IV, stifner gövdesinin yükseklik / kalınlık oranının büyük olması sebebiyle stifnerin lokal burkulması sonucu panelin göçmeye maruz kaldığı durumdur. Ayrıca stifner flenşinin gövdenin burkulmasını engelleyemeyecek kadar zayıf olduğu durumlarda da panel bu modda göçmeye maruz kalır.



Şekil 1.5 : Stifner gövdesinin burkulması (mod IV).

Mod V, stifner yükseklik / kalınlık oranının büyük olması sebebiyle stifnerin burulmalı burkulmaya maruz kalması sonucu panelin göçme modudur.



Şekil 1.6 : Stifnerin burulmalı burkulması (mod V).

Mod VI, panelin narinlik oranının çok düşük olması sebebiyle panel basınç yükü altında burkulmaya maruz kalmadan önce levha üzerindeki gerilme değerleri malzemenin akma gerilmesi değerine ulaşır ve göçme meydana gelir. Ayrıca panele etkiyen çekme yükü değeri panel malzemesinin akma sınırına ulaşırsa panel yine bu modda göçmeye maruz kalır.

2. GEMİ PANELLERİNİN LİNEER BURKULMA ANALİZİ

Gemi yapısı global olarak ele alındığında bir kiriş gibi davranır. Bu durumda geminin güverte kaplamaları, dip kaplamaları ve borda kaplamaları çeki gerilmesinin yanı sıra basınç gerilmelerine de maruz kalırlar. Levhalar başlangıç durumunda yükleme ve geometriye bağlı olarak kararlı veya kararsız durumda olabilirler. Levhaya küçük bir yükleme uygulanarak sonsuz küçük deplasman yaptırıldıktan sonra yükleme kaldırıldığında levha eski konumuna geri dönüyor ise levha kararlı bir haldedir. Yükleme kaldırıldığında levha eski konumuna geri dönmüyor ve deplasman yapmaya devam ediyor ise levha kararsız bir yapıdadır. Yükleme kaldırıldıktan sonra yapı ne eski konumuna geri dönüyor ne de deplasman yapmaya devam ediyor ise levha nötr stabilite durumundadır (Ventsel ve Krauthammer, 2001) . Yapının kararlı halden kararsız hale geçtiği bu duruma *Burkulma* veya *Yapısal Kararsızlık* adı verilir. Yapıyı kararlı halden kararsız halde getiren en küçük yük değerine de *Kritik Burkulma Yüğü* adı verilir.

Levhaların burkulma davranışını etkileyen faktörler, levhanın geometrik ve malzeme özellikleri, yükleme durumu, sınır koşulları, üretim kusurları ve lokal yapısal bozukluklar olarak sıralanabilir (Paik ve Thayamballi, 2003).

Yapı kritik burkulma yükünün üzerinde bir yüklemeye maruz kaldığında deplasman yapmaya devam eder, sonuç olarak yapı üzerinde meydana gelen gerilme değerleri büyür ve yapı göçer. Bu bakımdan burkulma problemi oldukça önemlidir.

Yapıların burkulma davranışı malzemenin mekanik davranışına göre elastik, elasto plastik ve plastik burkulma olarak sınıflandırılabilir. Elastik burkulma sadece elastik bölgede meydana gelir. Elasto plastik burkulma ise levhada bazı bölgelerin lokal plastikleşmesi sonrası oluşan burkulmadır. Plastik burkulma ise yapı malzemesinin tamamen akmaya maruz kalması sonucu oluşan burkulmadır. İnce levhalar genellikle elastik burkulma davranışı sergilerler. Daha kalın levhalarda ise elasto plastik veya plastik burkulma davranışı gözlemlenir (Paik ve Thayamballi, 2003).

2.1 Basit Mesnetli Levhanın Lineer Burkulma Analizi

Elastik burkulma problemlerinin çözümünde genellikle denge yöntemi ve enerji yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılabilir.

2.1.1 Denge yöntemi

Denge yönteminde, bir levhaya uygulanan eksenel yüklerin kritik değerleri levhanın yönetici diferansiyel denkleminin çözümünden elde edilebilir. Bir levhanın elastik burkulma problemi için yönetici diferansiyel denklem (2.1) ifadesinde verilmiştir.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left(N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.1)$$

Burada w levhanın yaptığı düşey deplasmanı N_x , N_y ve N_{xy} sırasıyla levha üzerindeki iç kuvvetleri temsil etmektedir. Bu kuvvet değerleri, verilen geometri ve diğer yük bileşenlerine bağlı olarak düzlem gerilme probleminin çözümünden elde edilebilir. Ancak bu yöntemle çözüm, geometrinin ve yükleme koşullarının kompleks olduğu durumlarda oldukça zorlaşmaktadır. Bu sebeple basit geometri ve yükleme koşulları için çözüm yapılabilir. Çoğu durumda (2.1) denkleminin çözümü analitik olarak mümkün olmadığından öz değer probleminin nümerik yöntemlerle çözülmesi gerekir. Bu amaçla referans alınan yük bileşenleri $(\overline{N_x}, \overline{N_y}, \overline{N_{xy}})$ bir yük parametresi ile çarpılır.

$$N_x = -\lambda \overline{N_x}, N_y = -\lambda \overline{N_y}, N_{xy} = -\lambda \overline{N_{xy}} \quad (2.2)$$

(2.2) ifadeleri (2.1) de yerine yazılırsa diferansiyel denklem (2.3) formuna gelir.

$$\nabla^4 w + \frac{\lambda}{D} \left(\overline{N_x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \overline{N_y} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \overline{N_{xy}} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (2.3)$$

(2.3) denklemi keyfi C_i sabitleri içeren homojen lineer denklem sistemidir. Bu sabitler sınır koşullarına bağlı olarak elde edilebilir. Trivial olmayan çözüm için katsayılar matrisi determinantı sıfıra eşit olmalıdır. Determinant işlemi sonrasında λ ya bağlı karakteristik denklem elde edilir. Bu denklemin çözümünden elde edilen sıfırdan farklı en küçük λ değeri λ_{cr} olur. Burada λ değerleri sistemin öz değerleridir. Kritik burkulma yükü ise referans yük değerinin λ_{cr} ile çarpılması ile elde edilir. Öz

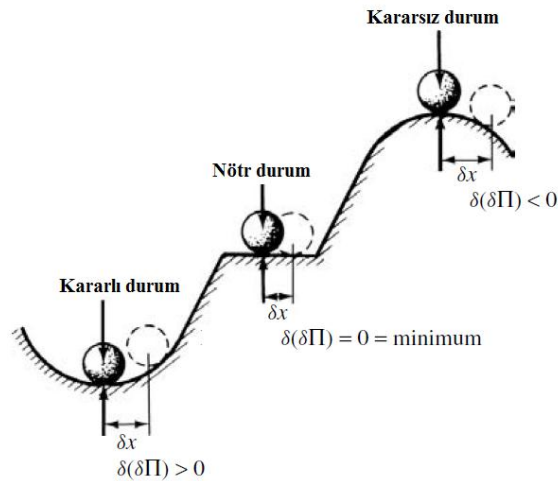
değerlere karşılık gelen fonksiyonlara da öz vektörler adı verilir. Bunlar sistemin burkulma modlarını temsil etmektedir.

2.1.2 Enerji yöntemi

Enerji yöntemi mekanik sistemlerin dengesi üzerine genel teoremleri baz alır (Ventsel ve Krauthammer, 2001). Denge durumunda sistemin potansiyel enerjisi ekstremum değerine ulaşır. Bu yaklaşım göz önüne alınırsa mekanik sistemlerin denge durumunda, sistemin diğer durumlarına göre potansiyel enerjisi minimumdur. Eğer sistemin potansiyel enerjisi sistemin diğer durumlarına göre maksimum değere sahip ise sistem kararsızdır. Sistemin potansiyel enerjisi ne maksimum ne de minimum ise sistem nötr durumdadır.

Levha başlangıç durumunda herhangi bir deformasyona sahip değil ise yapı dengededir. Burkulma sonrası bölge ise yapının kararsız olduğu durumdur. Bu bölgede sisteme dışarıdan uygulanacak kuvvetler yapıdaki deformasyonun büyümesine ve yapının göçmesine sebep olur.

Mekanik sistemler kararlı halden kararsız hale geçerken mutlaka nötr durumdan geçiş yaparlar. Levhaların elastik stabilite problemlerinin matematiksel olarak modellenmesinde ayrılma(bifurcation) noktası olarak sistemin nötr hali kabul edilir (Szilard, 2004).



Şekil 2.1 : Stabilite analoji (Szilard, 2004).

Levhaların burkulma analizi için potansiyel enerji teoremi uygulansın. Π_0 ve Π sırasıyla yapının başlangıçta denge halindeki potansiyel enerjisini ve başlangıç hali civarındaki durumlar için potansiyel enerjisini ifade etsin. Tüm küçük deplasmanlar

için eğer $\Pi_0 < \Pi$ ise yapı kararlı durumdadır. $\Pi_0 > \Pi$ ise yapı kararsız, $\Pi_0 = \Pi$ ise nötr durumdadır.

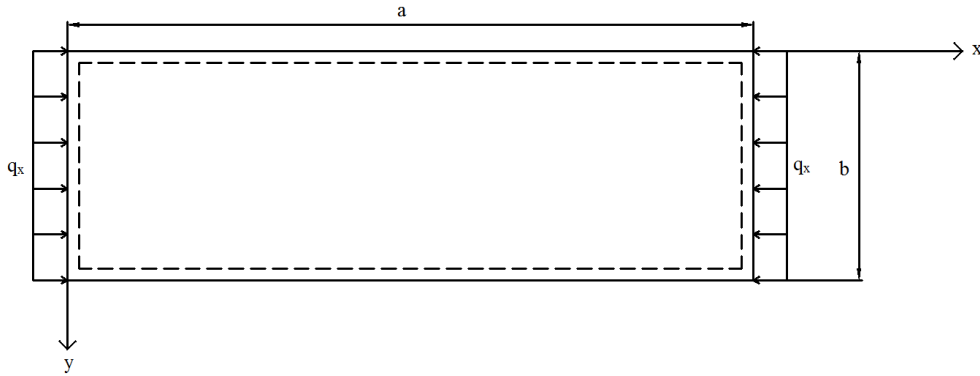
Levhaya bir dış yük uygulandığında yapıda meydana gelecek potansiyel enerji artımı (2.4) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta\Pi = \Pi - \Pi_0 = \Delta U_0 + U_b + \Delta\Omega_r \quad (2.4)$$

Burada ΔU_0 , U_b ve $\Delta\Omega_r$ ifadeleri sırasıyla burkulma sırasında levha orta düzleminin şekil değiştirme enerjisindeki artışı, orta düzlemin eğilmesinden kaynaklanan şekil değiştirme enerjisini ve dış kuvvetlerin etkisiyle sistemdeki potansiyel enerji artısını ifade etmektedir. Burkulma anında yapı nötr dengede olacağından $\Delta\Pi=0$ olur.

Denge yöntemi kullanılarak tek yönlü aksenal yükelemeye maruz kalan basit mesnetli bir levhanın kritik burkulma yükünü belirlemek için $N_x=-q_x$, $N_y=0$ ve $N_{xy}=0$ ifadeleri (2.1) denkleminde yerine yazılırsa yönetici diferansiyel denklem (2.5) formuna gelir.

$$D\nabla^2\nabla^2 w - q_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2.5)$$



Şekil 2.2 : Basit mesnetli levha.

Basit mesnetli bir levha için gerekli sınır şartlarını sağlayan burkulma mod şekli (2.6) ifadesindeki gibidir.

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.6)$$

Burada m levha boyuna doğrultusundaki burkulma yarım dalga sayısını, n ise enine doğrultuda burkulma yarım dalga sayısını temsil etmektedir. m levha kenar oranına bağlı olarak (2.7) ifadesindeki gibi elde edilebilir.

$$\frac{a}{b} \leq \sqrt{m(m+1)} \quad (2.7)$$

(2.6) ifadesi (2.5)'te yerine yazılırsa (2.8) ifadesi elde edilir.

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[D\pi^4 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 - q_x \pi^2 \frac{m^2}{a^2} \right] w_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) = 0 \quad (2.8)$$

(2.8) ifadesinin trivial çözümü $w_{mn}=0$ dır. Bu çözüm levhanın hiç deplasman yapmamış halini temsil eder. Levhanın burkulacağı minimum yükü aradığımız için $n=1$ alınmalıdır. Bu durumda:

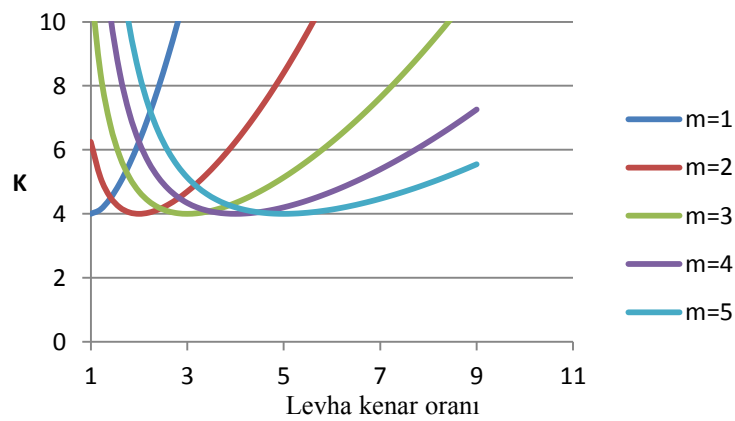
$$N_x = \frac{\pi^2 D}{b^2} \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (2.9a)$$

$$N_x = K \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (2.9b)$$

Burada elde edilen yük ifadesi birim uzunluk içindir. Birim alana düşen yük için elde edilen değerin kalınlığa bölünmesi gerekecektir.

$$K = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (2.10)$$

Burada K burkulma katsayısını ifade etmektedir ve levha kenar oranına bağlı olarak değişimi şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 : Burkulma katsayısının levha kenar oranına bağlı olarak değişimi.

2.2 Stifnerli Panellerin Burkulma Analizi

Günümüze kadar yapılmış, stifnerli panellerin burkulma davranışını ve burkulmayı etkileyen parametreleri inceleyen çeşitli çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Danielsen (1995), boyuna stifnerlenmiş bir panelin çeşitli yükleme durumlarında burkulma davranışını analiz etmiştir. Levhayı Von Karman plağı olarak, stifnerleri nonlinear giriş olarak modellemiştir. Stifnerlerin yanal burkulmasını da incelemiştir.

Shanmugam ve Arockiasamy (1995), levha narinlik oranını ve üretim kusurlarının stifnerli panelin burkulma davranışına etkisini deneysel olarak incelemiştir.

Louka ve Harding (1996), lama profilli panellerde stifnerin yanal burkulma davranışına sınır koşullarının, levha ve stifner narinliklerinin etkisini araştırmıştır. Ayrıca Paik ve diğ. (1998), eksenel basınç yüklemesine maruz kalan lama profilli panellerde stifnerin burulmalı burkulma davranışını incelemiş ve levfa/stifner alan oranına bağlı olarak parametrik bir çalışma yapmıştır.

Fujikubo ve Yao (1999), panellerin enine ve boyuna doğrultudaki eksenel yükleme durumunda levha-stifner etkileşimi ve artık gerilmeleri de dikkate alarak elastik lokal burkulma gerilmelerini minimum potansiyel enerji teoremi kullanarak incelemişlerdir.

Grondin ve diğ. (1999), başlangıç kusurunun, artık gerilmelerin, uygulanan eğilme momentinin yönünün, levha narinlik oranının ve levha-stifner kesit alanları oranının stifnerli panellerin burkulma davranışına etkisini incelemiştir.

Byklum ve Amdahl (2002), enerji ve pertürbasyon yöntemini kullanarak stifnerli panellerin lokal burkulma davranışını incelemişlerdir.

Toulis ve Caridis (2002), lama profilli panellerin burkulma ve göçme davranışlarına levha kenar oranının etkisini araştırmıştır. Artık gerilme ve üretim kusurları da dikkate alınmıştır.

Hughes ve diğ. (2004), farklı T kesitli stifnerlere sahip panellerin burkulma modunu tespit etmişlerdir. Stifnerin yapısına bağlı olarak panelin global burkulma mı yoksa lokal burkulma mı göstereceği incelenmiştir.

Gordo ve Soares (2008), stifner profil kestilerinin panelin burkulma ve göçme davranışına etkisini incelemiştir. Lama profil, L ve U kesitli profilleri incelemiştir.

Bu çalışmada stifnerli gemi panellerinin iki eksenli yükleme altında burkulma davranışını analiz etmek amacıyla minimum potansiyel enerji teoremi kullanılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan öz değer analizlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İlk etapta stifnerli gemi panellerinin boyuna eksenel yükleme durumunda lineer elastik burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak kullanılan stifnerlerin panel burkulma davranışına etkisi araştırılmıştır.

İki eksenli yüklemeye maruz kalan stifnerli bir gemi paneli için stifnerler arası levhanın çökmesi ve levha-stifner birleşim noktalarındaki eğilme ve burulma momentlerinin dengesi göz önünde bulundurularak stifnerler arası levha için burkulma fonksiyonu (2.11) ifadesindeki gibi verilebilir (Fujikubo ve Yao, 1999).

$$w = W_1 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} + \frac{W_2}{2} \sin \frac{m\pi x}{a} \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \quad (2.11)$$

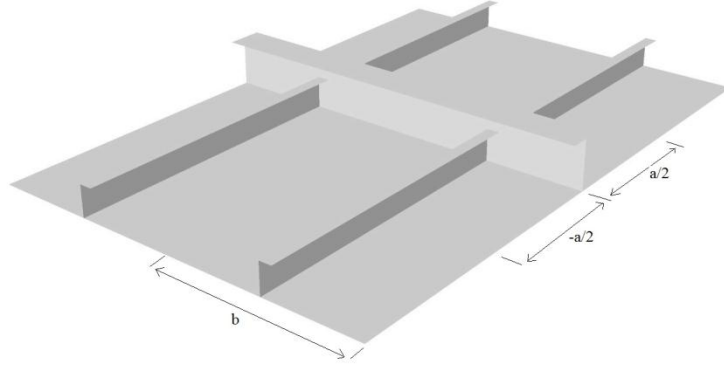
(2.11) ifadesinin ilk kısmı basit mesnetli bir levhanın burkulma fonksiyonunu, ikinci kısmı ise boyuna kenarların ankastre mesnetli olduğu durumda bir levhanın burkulma fonksiyonunu temsil etmektedir.

Aynı şekilde stifner gövdesi için yanal deplasman fonksiyonu ise (2.12) ifadesindeki gibi alınabilir (Fujikubo ve Yao, 1999).

$$v = V_1 \frac{z}{h_w} \sin \frac{m\pi x}{a} + V_2 \sin \frac{m\pi x}{a} \left(1 - \cos \frac{\pi z}{2h_w} \right) + V_3 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi z}{2h_w} \quad (2.12)$$

(2.12) ifadesinde ilk terim levha ile stifner gövdesinin birleştiği noktada rijit dönmeyi, ikinci terim stifner gövdesi eğilme momentinin levhaya iletilmesini, üçüncü terim ise stifner gövdesinin eğilme momentinin flenşe (alın laması) iletilmesini temsil etmektedir.

İncelenen stifnerli panel temsili olarak şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Stifnerli gemi paneli.

2.2.1 Sınır şartları

Stifnerli sürekli bir gemi paneli için sınır şartları aşağıdaki gibi verilebilir.

- Panel ve stifnerin birleşme bölgesinde dönmenin sürekliliği şartı:

$$\left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial w}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.13)$$

- Panel ve stifnerin birleşme bölgesinde eğilme ve burulma momentlerinin eşitliği şartı:

$$D_w \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \Big|_{z=0} + 2D_p \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \Big|_{y=0} = 0 \quad (2.14)$$

Burada:

$$D_w = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)}, \quad D_p = \frac{Et_p^3}{12(1-\nu^2)}$$

- Stifner gövdesi ve flenşin birleşme bölgesinde dönmenin sürekliliği ve eğilme-burulma momentlerinin dengesi şartı:

$$GJ_f \left. \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial z} \right|_{z=h_w} - D_w \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \Big|_{z=h_w} = 0 \quad (2.15)$$

Burada GJ_f flenşin Saint Venant burulma rijitliğini temsil etmektedir.

Önerilen burkulma fonksiyonları (2.13) te yerine yazılırsa:

$$\left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{V_1}{h_w} \sin \frac{m\pi x}{a} + \frac{V_3 \pi}{2h_w} \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (2.16)$$

$$\left. \frac{\partial w}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{W_1 \pi}{b} \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (2.17)$$

(2.16) ve (2.17) ifadelerinin eşitliğinden

$$V_1 + \frac{\pi}{2} V_2 - \frac{\pi h_w}{b} W_1 = 0 \quad (2.18a)$$

$$V_1 + k_1 V_2 - k_2 W_1 = 0 \quad (2.18b)$$

Burada;

$$k_1 = \frac{\pi}{2}, \quad k_2 = \frac{\pi h_w}{b}$$

(2.14) ifadesinde gerekli türevler alınıp yerine yazılırsa :

$$D_w \frac{V_2}{4h_w^2} + 4D_p \frac{W_2}{b^2} = 0 \quad (2.19)$$

(2.19) ifadesinde gerekli düzenlemeler yapılarak (2.20) ifadesi elde edilir.

$$V_2 + k_3 W_2 = 0 \quad (2.20)$$

Burada k_3 ifadesi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$k_3 = \frac{D_p}{D_w} \frac{16h_w^2}{b^2}$$

(2.15) te gerekli türevler alınıp yerine yazılırsa (2.21) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} & -GJ_f \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \frac{V_1}{h_w} \sin \frac{m\pi x}{a} + \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \frac{\pi V_2}{2h_w} \sin \frac{m\pi x}{a} \right) + D_w \left(\frac{\pi^2 V_3}{4h_w^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \right) \\ & + D_w v \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 V_1 \sin \frac{m\pi x}{a} + \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 V_2 \sin \frac{m\pi x}{a} + \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 V_3 \sin \frac{m\pi x}{a} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

(2.21) de gerekli düzenlemeler yapılarak (2.22) ifadesi elde edilebilir.

$$k_4 V_1 + k_5 V_2 + k_6 V_3 = 0 \quad (2.22)$$

Burada:

$$k_4 = \left(D_w v - \frac{GJ_f}{h_w} \right) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2, \quad k_5 = \left(D_w v - \frac{\pi GJ_f}{2h_w} \right) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2, \quad k_6 = D_w \left[v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{\pi}{2h_w} \right)^2 \right]$$

(2.18), (2.20) ve (2.22) ifadeleri kullanılarak gerekli düzenlemeler yapılırsa V_1 , V_2 , V_3 ifadeleri W_1 ve W_2 cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_1 = \frac{k_2 k_6}{k_6 - k_1 k_4} W_1 + \frac{k_1 k_3 k_5}{k_1 k_4 - k_6} W_2, \quad V_2 = -k_3 W_2, \quad V_3 = \frac{k_2 k_4}{k_1 k_4 - k_6} W_1 + \frac{k_3 k_5}{k_6 - k_1 k_4} W_2$$

Verilen bu ifadeler düzenlenirse:

$$\eta_1 = \frac{k_2 k_6}{k_6 - k_1 k_4}, \quad \eta_2 = \frac{k_1 k_3 k_5}{k_1 k_4 - k_6}, \quad \eta_3 = -k_3, \quad \eta_4 = \frac{k_2 k_4}{k_1 k_4 - k_6}, \quad \eta_5 = \frac{k_3 k_5}{k_6 - k_1 k_4}$$

2.2.2 Burkulma ifadesi

Stifnerlenmiş sürekli bir panel, boyuna ve enine doğrultuda eksenel basınç yüklemesine maruz kaldığında burkulma anındaki toplam potansiyel enerji (2.23) ifadesindeki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{D_p}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} \right] dx dy \\ & + \frac{D_w}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} \right] dx dz \\ & + \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} EI_f \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Big|_{z=h_w} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} GJ_f \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial z} \Big|_{z=h_w} \right)^2 dx \\ & - \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} N_{px} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy - \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} N_{py} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 dx dy \\ & - \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_0^{h_w} N_w \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 dx dz - \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{bf} N_f \left(\frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{z=h_w} \right)^2 dx dy \end{aligned} \quad (2.23)$$

(2.23) ifadesinde N_{px} , N_{py} , N_w ve N_f stifnerli panele etkiyen kuvvetleri temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} N_{px} &= t_p \left\{ \sigma_x + \sigma_{xr}^p(y) \right\}, \\ N_{py} &= t_p \left\{ \sigma_y + \sigma_{yr}^p(x) \right\}, \\ N_w &= t_w \left\{ \sigma_x + \sigma_{xr}^w(z) \right\}, \\ N_f &= t_f \left\{ \sigma_x + \sigma_{xr}^f(y) \right\} \end{aligned}$$

Burada σ_x ve σ_y sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda dış yükler sebebiyle oluşan gerilmeleri temsil etmektedir. Basınç gerilmeleri pozitif, çeki gerilmeleri negatif kabul edilmiştir.

$\sigma_{xr}^p(y)$, $\sigma_{yr}^p(x)$, $\sigma_{xr}^w(z)$ ve $\sigma_{xr}^f(y)$ ifadeleri sırasıyla levha üzerinde boyuna doğrultudaki artık gerilmeyi, levha üzerinde enine doğrultudaki artık gerilmeyi, stifner gövdesi üzerinde boyuna doğrultudaki artık gerilmeyi ve stifner flenşi üzerinde boyuna doğrultudaki artık gerilmeyi temsil etmektedir.

2.2.3 Artık gerilmeler

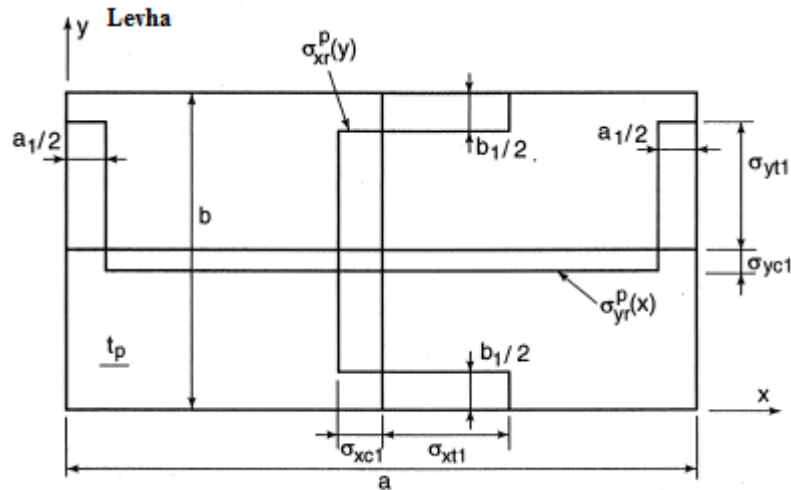
Artık gerilmelerin büyüklüğü sisteme giren ısı miktarı ile ilgilidir. Bu çalışmada maksimum ısı girişi (2.24) ifadesinde verilmiştir (Yao, 2000).

$$\Delta Q = 78,8xl^2 \quad (2.24)$$

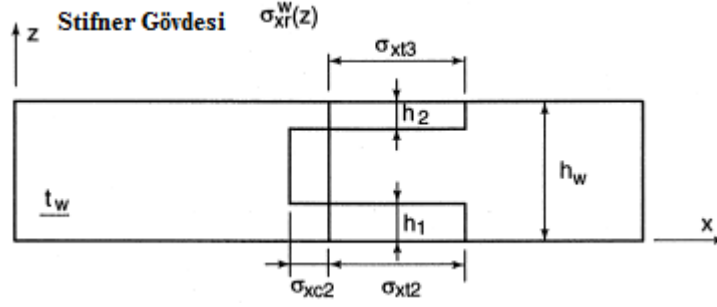
(2.24) ifadesinde l kaynak adım uzunluğudur. Stifner gövdesi kalınlığına bağlı olarak (2.25) te verilmiştir.

$$l = \begin{cases} 0,7*t_w(mm) \rightarrow 0,7*t_w < 7(mm) \\ 7(mm) \rightarrow 0,7*t_w \geq 7(mm) \end{cases} \quad (2.25)$$

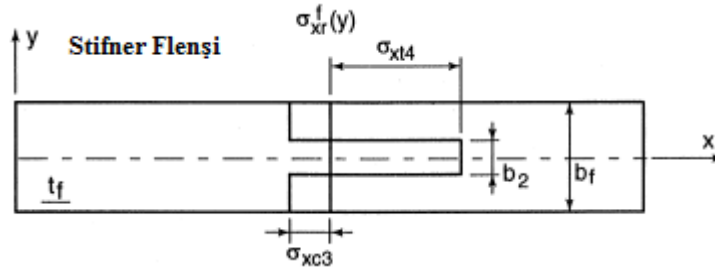
Panel levhası, stifner gövdesi ve stifner flenşi üzerinde oluşan artık gerilme dağılımları şekil 2.5-2.7’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 2.5 : Levha üzerinde artık gerilme dağılımı.



Şekil 2.6 : Stifner gövdesi üzerinde artık gerilme dağılımı.



Şekil 2.7 : Stifner flenşi üzerinde artık gerilme dağılımı.

Fujikubo ve Yao (1999) tarafından gerçekleştirilen elastoplastik analizler sonucunda levha ve stifnerin birleştiği bölgede artık çeki gerilmelerinin olduğu genişlikler (2.26) ifadesinde verilmiştir.

$$\begin{aligned} a_1 &= t_{tr} + 0,52 * \Delta Q / (2t_p + t_{tr}) \\ b_1 &= t_w + 0,52 * \Delta Q / (2t_p + t_w) \\ h_1 &= \left(\frac{t_p}{t_w} \right) * 0,26 * \Delta Q / (2t_p + t_w) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Yukarıda yapılan kabuller stifner gövdesi ile flenşin birleştiği bölge için de yapılabilir. Bu bölge için artık çeki gerilmelerinin olduğu genişlikler (2.27) ifadesinde verilmiştir.

$$\begin{aligned} b_2 &= t_w + 0,52 * \Delta Q / (2t_f + t_w) \\ h_2 &= \left(\frac{t_w}{t_f} \right) * 0,26 * \Delta Q / (2t_f + t_w) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Artık çeki gerilmeleri malzeme akma gerilmesine eşit alınabilir. Artık basınç gerilmeleri ise (2.28) ifadesindeki şekilde hesaplanır.

$$\sigma_{xc1} = \sigma_{xc2} = \sigma_{xc3} = \frac{b_1 t_p \sigma_{Yp} + (h_1 + h_2) t_w \sigma_{Yw} + b_2 t_f \sigma_{Yf}}{(b - b_1) + (h_w - t_f - h_1 - h_2) t_w + (b_f - b_2) t_f} \quad (2.28)$$

Burada levha, stifner gövdesi ve flenşte oluşan artık basınç gerilmelerinin aynı büyüklükte olduğu kabul edilmiştir.

Levha üzerinde enine elemanın kaynatılması sebebiyle enine doğrultuda oluşan artık basınç gerilmesi (2.29) ifadesindeki şekilde belirlenir.

$$\sigma_{yc1} = \frac{a_1 \sigma_{yp}}{a - a_1} \quad (2.29)$$

Yukarıda verilen ifadelerde σ_{yp} , σ_{yw} ve σ_{yf} ifadeleri sırasıyla levha, stifner gövdesi ve flenşin akma gerilmeleridir.

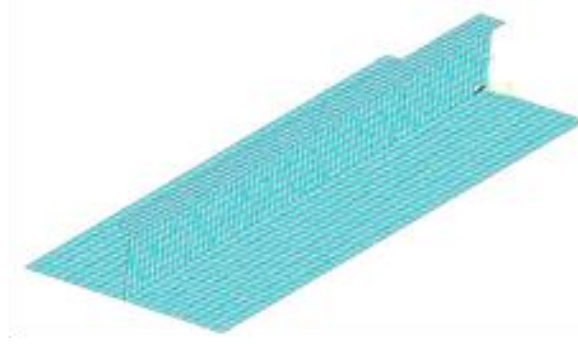
(2.11) ve (2.12) ifadeleri (2.23) te yerine yazılarak burkulma anında stifnerli panelin toplam potansiyel enerjisi elde edilir. Minimum potansiyel enerji teoremi panele (2.30) ifadesindeki gibi uygulanır.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial W_1} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial W_2} = 0 \quad (2.30)$$

W_1 ve W_2 nin sıfır olmayan değerleri için (2.30) dan gelen denklem takımının çözümü için katsayılar matrisinin determinantı sıfır olmalıdır. Buradan iki eksenli yükleme altında stifnerli paneller için burkulma gerilmesi etkileşim denklemi elde edilir.

2.2.4 Sonlu elemanlar analizi (SEA)

Stifnerli panellerin elastik burkulma gerilmelerini elde etmek amacıyla analitik çözümün yanı sıra sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. Stifnerli panellerde burkulma yarım dalga sayısı ‘ m ’ tek sayı ise panele simetrik sınır şartı uygulanmıştır. Burkulma yarım dalga sayısının çift olduğu durumda ise panelin 3 aralıklı (triple span) olarak modellenmesi ve panel uçlarının eşit deplasman yapması gerekir. Bu durum 2 aralıklı model ucuna anti-simetrik sınır şartı uygulanarak sağlanmıştır. Panel kenarlarına ise simetrik sınır şartı uygulanmıştır. Panel ortasındaki enine kemere modellenmemiş fakat kemerenin geçtiği doğrultuda düşey deplasmanlar kısıtlanmıştır. Panel, stifner ve flenş Shell181 kabuk elemanı ile modellenmiştir. Shell181 kabuk elemanı kayma deformasyon teorisi olarak Mindlin-Reissner plak teorisini kullanmaktadır. Panelin burkulma davranışını tam olarak elde edebilecek şekilde mesh yoğunluğu seçilmiştir.



Şekil 2.8 : Stifnerli panel sonlu elemanlar modeli.

2.3 Sonuçlar

Basit mesnetli bir levhanın denge yöntemi kullanılarak burkulma gerilmesi hesaplanmış, elde edilen bu sonuç sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Stifner tipinin ve stifner özelliklerinin panel burkulma davranışını incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Yao (2009) tarafından elde edilen analitik çözümlerle karşılaştırılmıştır.

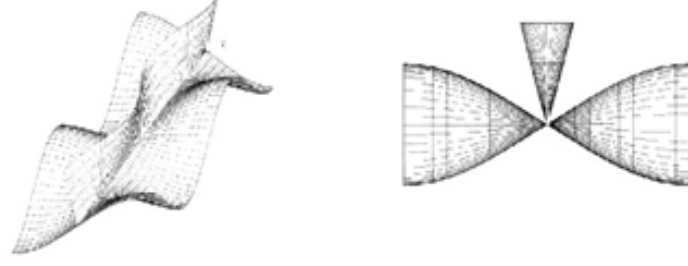
Daha sonra stifnerli gemi panellerinin iki eksenli yükleme altında burkulma gerilmeleri minimum potansiyel enerji teoremi kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen analitik sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Basit mesnetli bir levhanın burkulma gerilmesi (2.9) ifadesi kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuç ile SEA sonucu çizelge 2.1’de karşılaştırılmıştır.

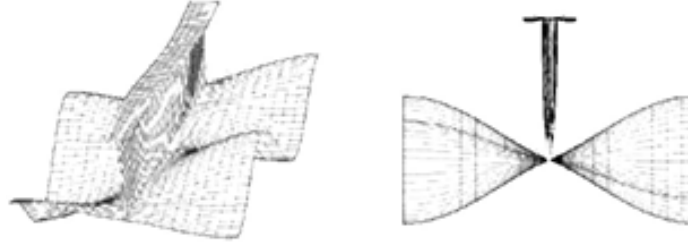
Çizelge 2.1 : Basit mesnetli levha için analitik ve SEA sonuçları (MPa).

a(mm)	b(mm)	t _p (mm)	σ_0^{SEA}	$\sigma_0^{Analitik}$
2400	800	10	108.25	116.25

Şekil 2.9-2.10 da stifnerli panellerin SEA ile elde edilen burkulma mod şekilleri görülmektedir. Elde edilen mod şekilleri literatür ile uygunluk göstermektedir.



Şekil 2.9 : Stifnerli panel burkulma mod şekli(lama:195x10 mm).



Şekil 2.10 : Stifnerli panel burkulma mod şekli (T-profil:250x12+90x16 mm).

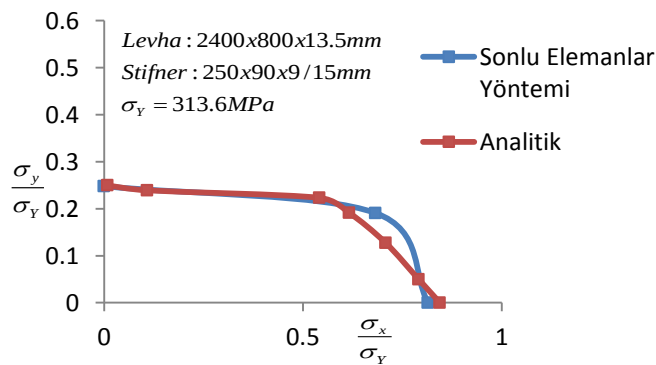
Stifnerli panellerin burkulma davranışı üzerinde stifner tipinin ve özelliklerinin etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen SEA sonuçları ve bu sonuçların Yao (2009) tarafından elde edilen analitik sonuçlarla karşılaştırılması çizelge 2.2’de yapılmıştır. Sonuçlar genel olarak birbiriyle uygun olmakla beraber, sonlu elemanlar yönteminin (SEY) analitik yöntemle göre burkulma mukavemetini daha düşük hesapladığı görülmüştür. Yapının güvenliği açısından bakıldığında SEA ile elde edilen sonuçların daha güvenli bölgede olduğu söylenebilir.

Çizelge 2.2’de yer alan sonuçlar stifner tipinin panel burkulma davranışı üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Köşebent profil kullanılan paneller ile T-profil kullanılan paneller arasında çok büyük farklılık gözlemlenmemiştir. Ancak lama profil kullanıldığında panelin burkulma mukavemetinde önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. Bazı durumlarda panel burkulma gerilmesinin basit mesnetli levhadan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise narinliği artan stifnerin levhadan daha önce burkulmasıdır.

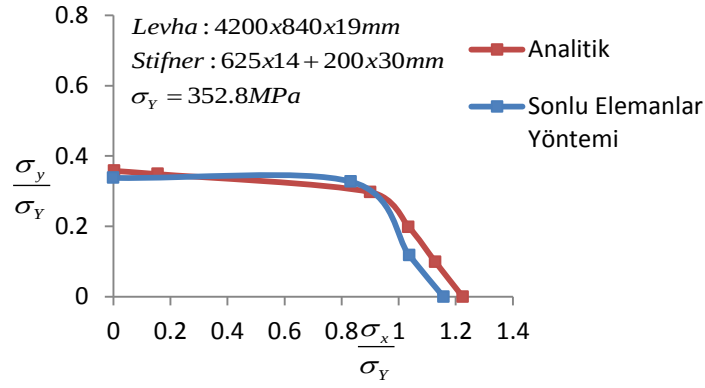
Çizelge 2.2 : Stifnerli panel için SEA ve analitik sonuçlar (Yao, 2009).

Stiffener	h_w	t_w	b_f	t_f	SEA	Yao
					σ_1/σ_0	σ_1/σ_0
Lama	100	10	0	0	1.033	1.069
Lama	100	15	0	0	1.14	1.136
Lama	100	20	0	0	1.269	1.441
Lama	195	10	0	0	1.044	1.077
Lama	195	15	0	0	1.197	1.303
Lama	195	20	0	0	1.544	1.563
Lama	310	10	0	0	1.013	0.989
Lama	310	15	0	0	1.209	1.296
Lama	310	20	0	0	1.557	1.618
Lama	400	10	0	0	0.772	0.836
Lama	400	20	0	0	1.552	1.62
Köşebent	150	12	90	12	1.48	1.607
Köşebent	150	12	150	12	1.487	1.66
Köşebent	250	12	90	16	1.451	1.555
Köşebent	250	12	120	16	1.453	1.577
Köşebent	250	12	150	16	1.454	1.593
Köşebent	400	12	90	16	1.423	1.477
Köşebent	400	12	150	16	1.425	1.517
T-profil	150	12	90	12	1.475	1.567
T-profil	150	12	150	12	1.486	1.617
T-profil	250	12	90	16	1.449	1.507
T-profil	250	12	150	16	1.454	1.578
T-profil	400	12	90	12	1.421	1.425
T-profil	400	12	120	12	1.422	1.449
T-profil	400	12	90	16	1.423	1.486
T-profil	400	12	150	16	1.425	1.51
T-profil	400	12	150	12	1.423	1.462

Minimum potansiyel enerji teoremi kullanılarak dökme yük gemisi (BC) ve tanker (VLCC) panelleri için burkulma analizi gerçekleştirilmiş, SEA sonuçları ile analitik yöntemle elde sonuçlar ile şekil 2.11 ve 2.12’de karşılaştırılmıştır.



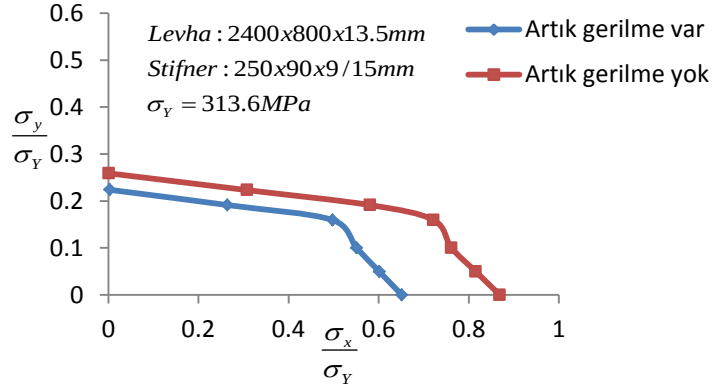
Şekil 2.11 : BC paneli için analitik ve SEA sonuçlarının karşılaştırılması.



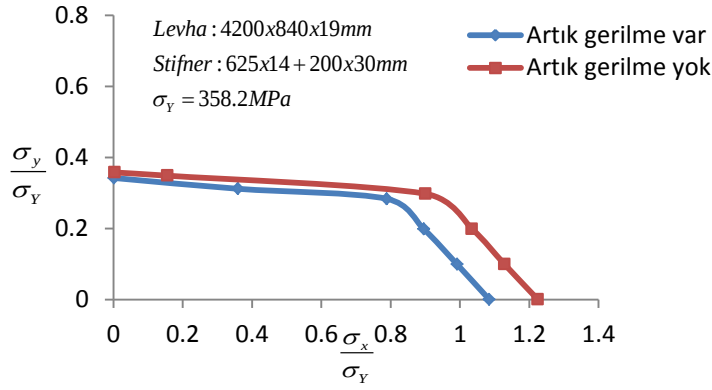
Şekil 2.12 : VLCC paneli için analitik ve SEA sonuçlarının karşılaştırılması.

Burada ele alınan iki tip panelin sonlu elemanlar ve analitik çözümlerinde artık gerilmeler dikkate alınmamıştır. Analitik çözümün panelin burkulma gerilmesini daha büyük hesapladığı görülmektedir. Ancak bazı bölgelerde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar daha büyük olmaktadır. Bunun sebebi de burkulma mod şekli değişimi dolayısıyla sınır şartları da değişmektedir. Sınır şartlarındaki bu değişim sebebiyle sonlu elemanlar modelinde analiz sayısı düşük tutulmuştur. Bu sebeple eğri uydurma problemi meydana gelmiştir.

BC ve VLCC panelleri için artık gerilmenin etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerin sonuçları şekil 2.13 ve şekli 2.14 te verilmiştir.



Şekil 2.13 : BC paneli için artık gerilmenin etkisi.

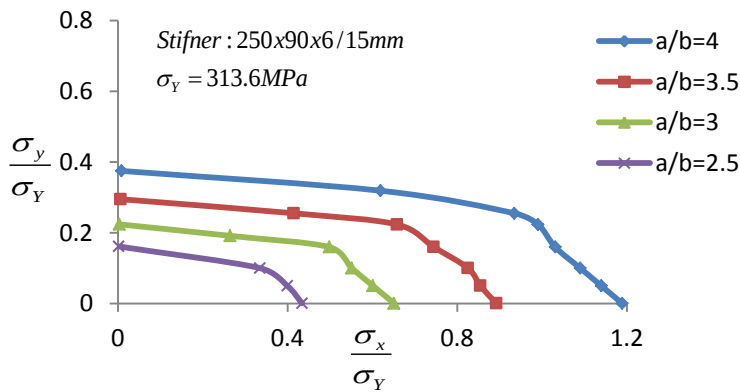


Şekil 2.14 : VLCC paneli için artık gerilmenin etkisi.

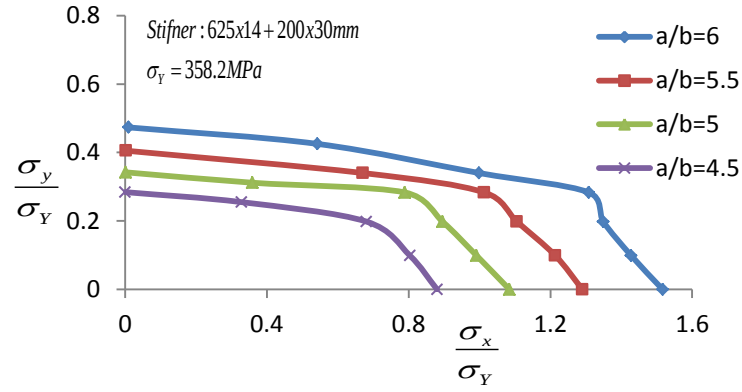
Artık gerilmelerin panelin burkulma gerilmesini azalttığı görülmektedir. Enine eksenel yüklemenin (y yönünde) baskın olduğu durumlarda artık gerilmelerin etkisi daha az olmaktadır. BC panelinde artık gerilmenin etkisinin daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise BC panelinde enine yöndeki artık gerilmenin VLCC paneline göre daha büyük olmasıdır.

Bir seri parametrik çalışma yaparak panel özelliklerinin burkulma gerilmesine etkisi araştırılmıştır. İlk olarak levha kenar oranı değiştirilerek panellerin burkulma gerilmesi incelenmiştir. Daha sonra ise levha kalınlığının ve stifner gövde yüksekliğinin burkulma gerilmesine etkisi incelenmiştir. Yapılan parametrik çalışmalarda artık gerilmeler dikkate alınmıştır.

İncelenen paneller için levha kenar oranının panel burkulma gerilmesine etkisi şekil 2.15 ve 2.16 da verilmiştir.



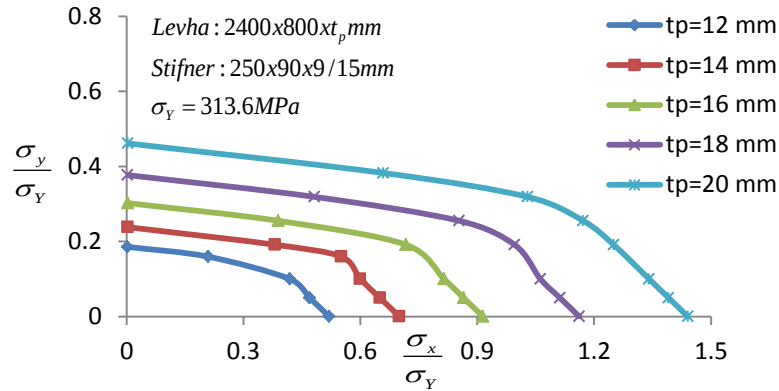
Şekil 2.15 : BC paneli için levha kenar oranının etkisi.



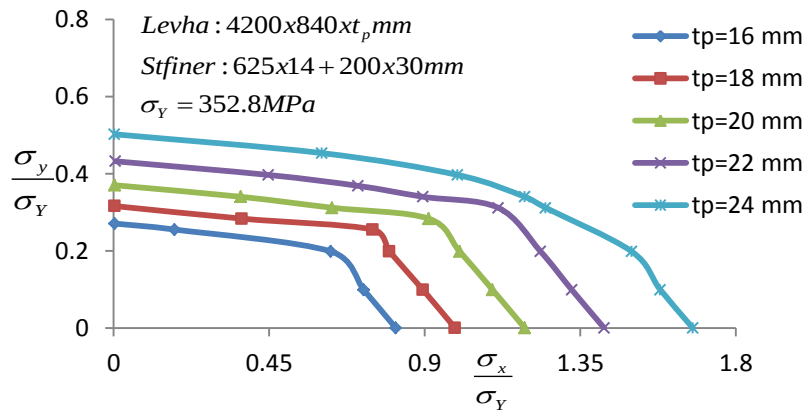
Şekil 2.16 : VLCC paneli için levha kenar oranının etkisi.

Şekil 2.15 ve 2.16 dan görüldüğü üzere levha kenar oranı panelin burkulma davranışı üzerinde oldukça etkilidir. Levha kenar oranının artması yani levhanın narinliğinin azalması burkulma gerilmesini önemli ölçüde artırmıştır.

Sifnerli panellerin burkulma davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biri de panelin levha kalınlığıdır. Şekil 2.17 ve şekil 2.18 de incelenen paneller için levha kalınlığının burkulma gerilmesine etkisi verilmiştir.

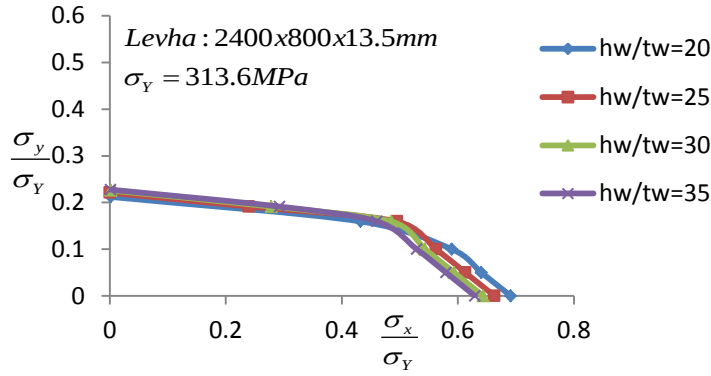


Şekil 2.17 : BC paneli için levha kalınlığının etkisi.

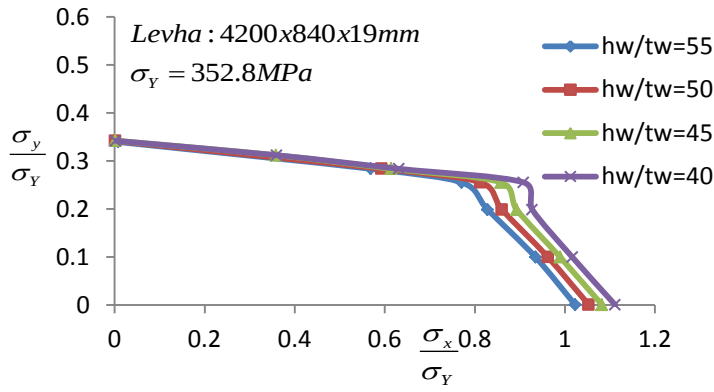


Şekil 2.18 : VLCC paneli için levha kalınlığının etkisi.

Stifner gövde yüksekliğinin panel burkulma gerilmesine etkisi şekil 2.19 ve şekil 2.20 de verilmiştir.



Şekil 2.19 : BC paneli için stifner gövde yüksekliğinin etkisi.



Şekil 2.20 : VLCC paneli için stifner gövde yüksekliğinin etkisi.

Yapılan çalışma sonucunda stifner gövde yüksekliğinin panel burkulma gerilmesi üzerinde etkisinin çok büyük olmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle enine aksenal yüklemenin baskın olduğu durumda stifner gövde yüksekliğinin etkisi ihmal edilebilir seviyede düşüktür. Bunun sebebi ise enine yüklemenin sadece panele etki etmesidir.

3. GEMİ PANELLERİNİN NONLİNEER BURKULMA ANALİZİ

Gemi kirişi ve stifnerli panellerin nihai mukavemet analizlerinin gerçekleştirilmesinde genel olarak kullanılan yöntemleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Nonlineer sonlu elemanlar yöntemi,
- İdealize edilmiş yapısal birim metodu (ISUM),
- Basitleştirilmiş yöntemler (Simplified Beam-Column Methods), Smith yöntemi.

Nonlineer sonlu elemanlar yöntemi yapıların hem geometrik hem de yapısal nonlineer davranışlarının analiz edilmesinde güçlü bir yöntemdir. Genel olarak problemin çözümü oldukça uzun süreç ve hesaplama gerektirmektedir. Bunun sebebi sistemde bilinmeyen sayısının çok fazla olması ve kullanılan nümerik integrasyon yönteminin karmaşık olmasıdır. Nonlineer sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçların doğruluğu açısından analizi gerçekleştiren kişinin tecrübesi ve bilgi birikimi oldukça önemlidir. Aksi durumda elde edilen sonuçların yorumlanması yanlış yapılacaktır. Nonlineer sonlu elemanlar yöntemi kontrol mekanizması şeklinde de kullanılabilir. Mühendis ve araştırmacılar geliştirdikleri yeni yöntemlerin sonuçlarının doğruluğunu bu yöntem ile göstermektedirler.

ISUM (Idealized Structural Unit Method), Ueda ve Rashed (1984) tarafından geliştirilen sonlu elemanlar temelli bir yöntemdir. Yöntem, çözüm süresinin azaltılmasını, yapının daha basit ve etkin bir biçimde modellenmesini, sistem serbestlik derecesi ve düğüm sayısının azaltılmasını amaçlamaktadır.

Yapıyı oluşturan elemanlar sonlu elemanlar yönteminin aksine daha büyük yapısal birimler olarak modellenir. Böylelikle çözüm süreci daha kısa hale getirilebilir. Çözümün daha doğru sonuç verebilmesi için ise modellenen yapısal birimlerin davranışları özel amaçlı şekil fonksiyonları kullanılarak önceden belirlenir. Böylece yapının nonlineer davranışları hızlı ve verimli bir şekilde analiz edilebilir.

Fujikubo ve Keadin (2002), ISUM yöntemini kullanarak stifnerli paneli plak ve kiriş elemanlar şeklinde modellemiş malzeme ve geometrik nonlineerlikler de göz önünde bulundurularak stifnerli panelin nihai mukavemet analizi gerçekleştirilmiştir.

Caldwell'in gemi kirişinin nihai mukavemeti üzerine yaptığı çalışmanın ardından bu çalışmanın eksikliklerini gören Smith (1977) genel olarak basitleştirilmiş yöntemler adı verebileceğimiz yeni bir yöntem geliştirmiştir.

Basitleştirilmiş yöntemler hızlı ve kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermeleri sebebiyle dizayn amaçlı kullanılabilir. Yapının davranışı üzerinde stifnerlerin baskın olduğu durumlarda yöntem daha doğru sonuç verecektir. Yöntemin özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Stifnerlerin bağlandığı levhanın stifnerle birlikte kiriş elemanı gibi davranan kısmına, kiriş elemanı için levhanın etkin genişliği tanımı yapılır.
- Bu yöntemin kullanılabilmesi için stifnerlerin eğilme rijitliklerinin büyük olması gereklidir.
- Stifnerlerin yapının davranışı üzerinde baskın olduğu durumlarda paneller kiriş elemanlara ayrılarak, her bir kiriş elemanı için ortalama gerilme – ortalama şekil değiştirme eğrileri elde edilir.
- Elde edilen bu eğriler yardımıyla her bir kiriş elemanının taşıyabileceği nihai yük değerleri belirlenir. Bu değerlerin basit bir şekilde toplanması ile panelin veya gemi kirişinin nihai mukavemet değerleri belirlenebilir.

Basitleştirilmiş yöntemde elemanların elastoplastik davranışları ve levhanın lokal burkulması da dikkate alınır. Basitleştirilmiş yöntemler hızlı ve güvenilir sonuç vermesi sebebiyle çokça incelenmiştir. Bu yöntem kullanılarak yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Ueda ve diğ. (1995), levha ve tek yönlü stifnerlenmiş panelin iki yönlü aksenal yükleme ve kesme kuvveti etkisi altında burkulma gerilmesi, nihai mukavemet değeri ve tam plastik mukavemet değeri arasındaki ilişkiyi incelemiştir.

Gordo ve Soares (1996), basitleştirilmiş yöntemde kiriş elemanlarının göçme davranışını temsil eden yeni bir yöntem önermişlerdir.

Soares ve Gordo (1997), tek yönlü aksenal yükleme altındaki stifnerli paneller için dizayn formüllerini nümerik ve deneysel çalışmaları baz alarak kıyaslamışlardır.

Paik ve diğ. (1999), stifnerli panelleri levha ve stifnerden oluşan yapılar olarak modellemiş ve 3 farklı göçme modu önererek nihai mukavemet analizi için analitik bir yöntem geliştirmiştir.

Özgüç ve Blatrop (2008), basitleştirilmiş yöntem kullanarak artımsal iteratif bir yaklaşım ile bir dökme yük gemisi için tekne kirişi nihai mukavemetini hesaplamışlardır. Tekne kirişinin boyuna ve enine eğilme momentleri altında nihai mukavemet etkileşimini göstermişlerdir.

Stifnerli panellerin nihai mukavemetini belirlemek amacıyla Gordo ve Soares (2008), deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada çeşitli stifner profilleri kullanılmış ve bu profillerin nihai mukavemete etkisi incelenmiştir. İlk defa U kesitli bir profil üzerine çalışma yürütülmüştür.

Gemi panellerinin ve tekne kirişinin nihai mukavemet değeri malzeme ve yapının geometrik özelliklerine bağlıdır. Vhanane ve Bhattachary (2011), bu parametrelerin nihai mukavemete etkisi incelenmiştir.

Paik ve diğ. (2001), çelik veya alüminyum stifnerli panellerin çeşitli yükleme durumlarında elastik-plastik büyük deformasyon analizini gerçekleştirmek amacıyla yarı analitik ortotropik levha modeli geliştirmiştir. Panelin mesnetlendiği kenarda akma meydana geldiğinde panelin nihai yük taşıma kapasitesine ulaştığı kabul edilmiştir. Geometrik nonlineerlikler nonlineer yönetici diferansiyel denklemin çözülmesiyle incelenmiştir. Malzeme kaynaklı nonlineerlikler ise kapalı formda nümerik olarak incelenmiştir. Yöntem stifnerlerin daha zayıf olduğu ve yapının global modda göçmeye maruz kaldığı durumlarda daha doğru sonuç vermektedir.

Özgüç ve diğ. (2007), stifnerli panellerin nihai mukavemetini belirlemek amacıyla yeni bir formülasyon önermiştir. Stifnerli panellerin elastik- plastik burkulma analizini nonlineer sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak stifnerli panellerin nihai mukavemet hesabı için formülasyonlar geliştirilmiştir. Çalışma sırasında artık gerilme ve başlangıç deformasyonları dikkate alınmıştır.

Paik ve Kim (2002), çeşitli yükleme durumları altında stifnerli panellerin nihai mukavemetini hesaplamak amacıyla formüller türetmiştir. Türetilen formüllerden elde edilen sonuçlar DNV dizayn kılavuzundan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve DNV kılavuzundan elde edilen sonuçların stifnerin çok güçlü

olduğu durumlarda iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Stifnerin zayıf olduğu durumlarda DNV kılavuzu nihai mukavemet değerini çok düşük hesaplamaktadır.

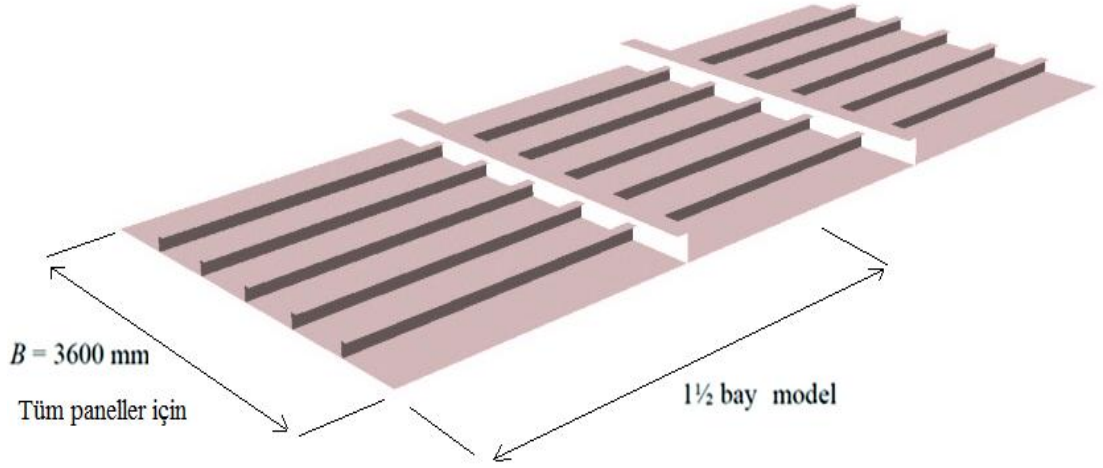
Fujikubo ve diğ. (2005a), sürekli bir levhanın enine yönde eksenel ve lateral yükleme altında nihai mukavemetini hesaplamak amacıyla bir seri elastik ve elasto plastik büyük deformasyon analizi gerçekleştirmiş ve analiz sonuçlarından yola çıkarak formülasyonlar türetmişlerdir. Fujikubo ve diğ. (2005b) ise daha önce türettikleri formülleri stifnerli panellerin nihai mukavemet analizi için geliştirmişlerdir. Stifner tipinin, stifner-levha etkileşiminin ve dönme sürekliliğinin nihai mukavemete etkisi incelenmiştir.

Chen (2003), stifnerli panellerin çeşitli yükleme durumlarında nihai mukavemet analizi için yeni bir kademeli göçme analizi tekniği geliştirmiştir. Bu yöntem ile elde ettiği sonuçları nonlinear sonlu elemanlar analizi, ISUM ve Paik ve diğ. (2001) tarafından geliştirilen ortotropik levha modeli sonuçları ile karşılaştırmıştır.

3.1. Sonlu Elemanlar Modeli

Çalışmada 3 ve 5 stifnerli olmak üzere iki tip toplam 4 panel incelenmiştir. Panellerin nihai mukavemet karakteristiklerine etki eden stifner tipi, stifner gövde yüksekliği ve levha kalınlığı gibi parametreler değiştirilerek bu parametrelerin panelin göçme davranışına nasıl bir etki yaptığı gözlemlenmiştir. İlk olarak öz değer analizleri yapılmış ve panelin burkulma modları elde edilmiştir. Daha sonra ise panelin global burkulma modu (1. mod) panel için başlangıç kusuru olarak alınmış ve nonlinear analizler gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar modeli panelin maruz kalabileceği tüm göçme modlarını temsil edebilecek kapasitede olmalıdır (Chen, 2003). Yapının nonlinear davranışlarının analiz edilmesinde iki enine eleman arası model (1-bay) yapının göçmesini tam olarak temsil etmemektedir. Şekil 3.1 de gösterilen 3 aralıklı (3-bay) model göz önünde bulundurulursa ortada yer alan iki enine eleman arası panel aşağı veya yukarı yönde deformasyon yaparken komşu paneller ona ters yönde deformasyon yapacaktır. Yani panel ortasındaki enine elemanın sınır şartı ne basit mesnet ne de anakastre mesnettir ve yüklü kenar olarak modellenemez. Bu sebeple sonlu elemanlar modeli $1\frac{1}{2}$ aralıklı olarak alınmıştır.



Şekil 3.1 : Stifnerli panel modeli.

Nonlinear analizlerin gerçekleştirilmesinde ANSYS akademik yazılımı kullanılmıştır. Tüm panel Shell181 kabuk elemanlar ile modellenmiş ve ağ (mesh) yoğunluğu panelin tüm burkulma modları temsil edebilecek şekilde seçilmiştir. İncelenen panellerin özellikleri çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Stifnerli panel özellikleri.

Panel	a(mm)	t _p (mm)	n _s	h _w (mm)	t _w (mm)	b _f (mm)	t _f (mm)
P1	1800	21	3	42	12	100	15
P2	3600	16	3	100	9	100	14
P3	3600	21	5	80	12	100	15
P4	3600	10	5	80	6	80	10

Çizelge 3.1’de n_s ifadesi stifner sayısını temsil etmektedir.

Çizelge 3.2’de ise panel malzemesinin özellikleri verilmiştir. Hem levha hem de stifnerler aynı tip malzemeden imal edilmiştir.

Çizelge 3.2 : Malzeme özellikleri.

Akma gerilmesi	352.8 MPa
Elastisite(Young) modülü	205800 MPa
Poisson oranı	0.3

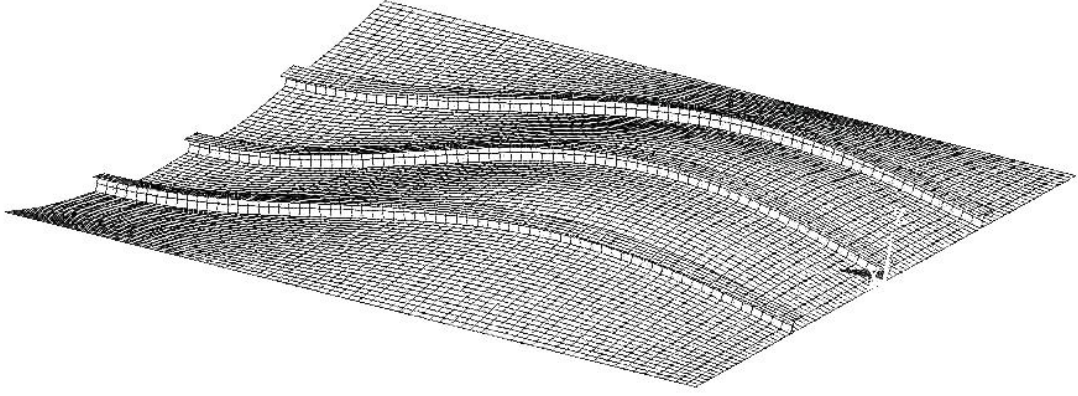
3.2 Sınır Koşulları

- Panel uzun kenarları (yan kenarlar) basit mesnetli olarak modellenmiştir. Basit mesnet sınır şartını sağlamak için z-yönündeki deplasmanlar ile y ve z eksenini etrafındaki dönmeler kısıtlanmıştır.
- 3 aralıklı (3-bay) modelin ortasında yani panelin kısa kenarında simetrik sınır şartı uygulanmıştır. Simetrik sınır şartını sağlamak amacıyla x-yönündeki deplasmanlar ile y eksenini etrafındaki dönme kısıtlanmıştır.
- $1\frac{1}{2}$ aralıklı model içerisinde yer alan enine eleman modellenmemiştir. Bunun yerine enine eleman doğrultusunda düşey yöndeki (z-yönü) deplasmanlar kısıtlanmıştır. Bu çalışmada panele enine yönde bir yükleme uygulanmadığı için enine elemanın modellenmesine gerek duyulmamıştır. Enine yükleme olduğu durumda yükleme enine elemanın deforme olmasına sebep olabilecek büyüklükte olsaydı enine eleman panelin tüm davranışını etkileyebilirdi. Bu sebeple enine yüklemenin baskın olduğu durumlarda enine elemanların modele dahil edilmesi gerekir.
- Panel kısa kenarlarının orta noktasında panelin rijit hareketini önlemek amacıyla y-yönündeki (yatay yön) deplasman kısıtlanmıştır.

3.3 Başlangıç Deformasyonları

Nonlinear burkulma analizinde gözlemlenmek istenen yapının çatallanma (bifurcation) burkulması değildir. Nonlinear burkulma yapının sürekli tepki problemidir. Bu sebeple yapıya başlangıç durumu için bir deformasyon veya göçmeyi tetikleyici bir kuvvet uygulanmalıdır. Burada tetikleyici kuvvet yerine yapıya global burkulma modu şeklinde başlangıç deformasyonu uygulanmıştır.

Başlangıç kusurları panelin burkulma modu şeklinde ise panelin nihai mukavemetinde düşüşe sebep olacaktır. Başlangıç kusurları farklı şekillerde olduğunda ise panel nihai mukavemetini artırıcı özellik gösterebilir (Fujikubo ve diğ., 2005b). Panel için öngörülen başlangıç deformasyon şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 : Stifnerli panel global burkulma mod şekli.

Panel başlangıç deformasyonu için seçilen mod şekli tam aralık bölümünde yukarı yönlü bir deplasman, yarım aralık bölümünde ise aşağı yönlü bir deplasmana sahiptir. Önerilen başlangıç kusuru için maksimum deformasyon büyüklüğü $w_0 = 0.0025a$ şeklinde kabul edilmiştir. Burada a panelin 1 aralık boyudur.

Panel nihai mukavetine lateral yükün etkisinin araştırıldığı durumlarda panele başlangıç deformasyonu uygulanmamıştır. Bu aşamada ilk olarak lateral yük uygulanmış daha sonra ise boyuna yönde eksenel yükleme uygulanmıştır. Yükleme sırasının panelin nonlinear davranışını etkilediği fakat panelin nihai yük taşıma kapasitesi üzerinde etkisinin çok az olduğu bilinmektedir (Chen, 2003).

3.4 Sonuçlar

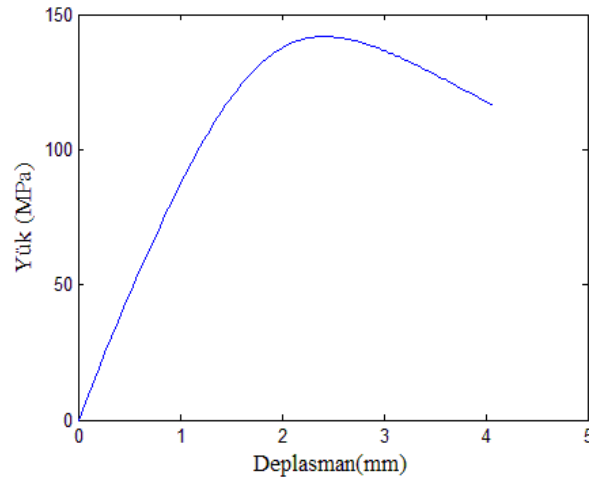
Stifnerli gemi panellerinin nonlinear burkulma davranışı ve nihai yük taşıma kapasitesini belirlemek amacıyla bir seri nonlinear sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca panellerin nihai yük taşıma kapasitesine stifner tipinin, stifner gövde yüksekliğinin, levha kalınlığının ve lateral yüklemenin etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 3.3'te nonlinear analiz sonuçları, Chen (2003) tarafından idealize edilmiş kiriş yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirine en yakın olduğu durum stifner gövde yüksekliğinin en küçük olduğu durumdur. Bunun sebebi idealize edilmiş kiriş yönteminin yapıyı bölerek bir kiriş gibi ele almasıdır. Stifner eğilme rijitliğinin en küçük olduğu durumda yapının davranışı kirişe çok benzerdir.

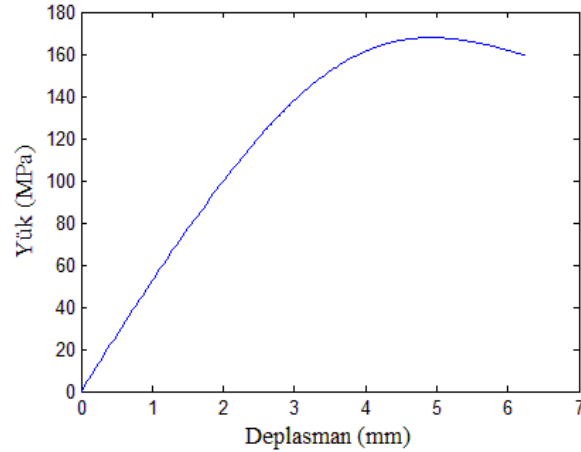
Çizelge 3.3 : Nonlinear SEA sonuçlarının Chen (2003) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması.

Panel	Nonlinear SEA	Chen(2003)
	σ_u / σ_Y	σ_u / σ_Y
P1	0.402	0.418
P2	0.476	0.507
P3	0.517	0.549
P4	0.412	0.448

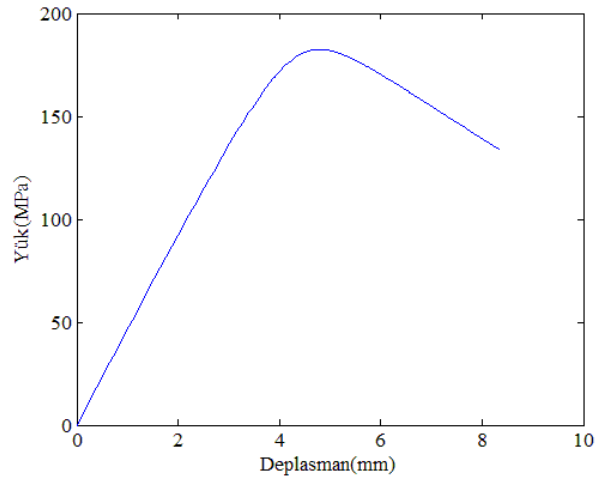
Yapılan nonlinear sonlu elemanlar analizleri sonucu paneller için yük - deplasman eğrileri elde edilmiştir. Eğrilerden de görüleceği üzere eğrilerin maksimum noktaları panelin nihai yük taşıma kapasitesi olarak kabul edilebilir. Şekil 3.3 - 3.6'da paneller için yük - deplasman eğrileri verilmiştir.



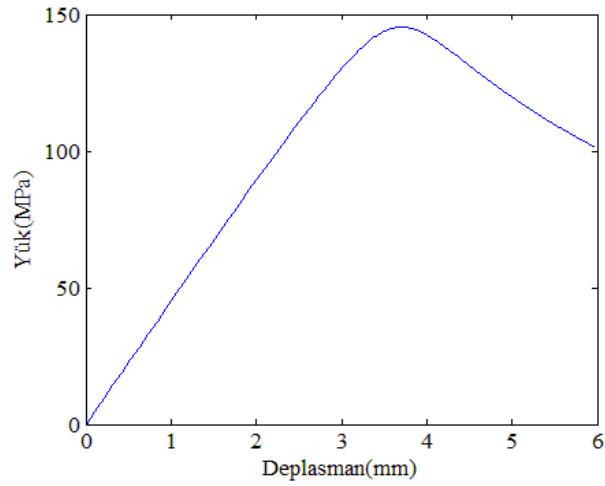
Şekil 3.3 : P1 için yük-deplasman eğrisi.



Şekil 3.4 : P2 için yük-deplasman eğrisi.



Şekil 3.5 : P3 için yük-deplasman eğrisi.



Şekil 3.6 : P4 için yük-deplasman eğrisi.

Verilen grafiklerden de görüldüğü üzere panellerin taşıyabilecekleri maksimum yük değerleri yakın olsa bile panellerin göçme davranışları oldukça farklılık göstermektedir. Paneller için stifner gövde yüksekliğinin nihai yük taşıma kapasitesine etkisi çizelge 3.4 – 3.7’de verilmiştir. Stifner gövde yüksekliği belli bir değeri aşmadığından stifnerler arası levhada lokal burkulma meydana gelmemiştir. Ayrıca stifnerler yanal burkulmaya maruz kalmayacak şekilde burulma rijitliğine sahip olduğundan stifner gövde yüksekliğinin değiştirilmesinin panelin burkulma davranışı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Ancak stifner gövde yüksekliğinin artırılması panellerin nihai yük taşıma kapasitesinde önemli artışa sebep olmuştur.

Çizelge 3.4 : P1 için stifner gövde yüksekliğinin etkisi.

$h_w(\text{mm})$	σ_u/σ_Y
40	0.379
50	0.501
60	0.641
70	0.764

Çizelge 3.5 : P2 için stifner gövde yüksekliğinin etkisi.

$h_w(\text{mm})$	σ_u/σ_Y
80	0.336
100	0.476
120	0.624
140	0.822

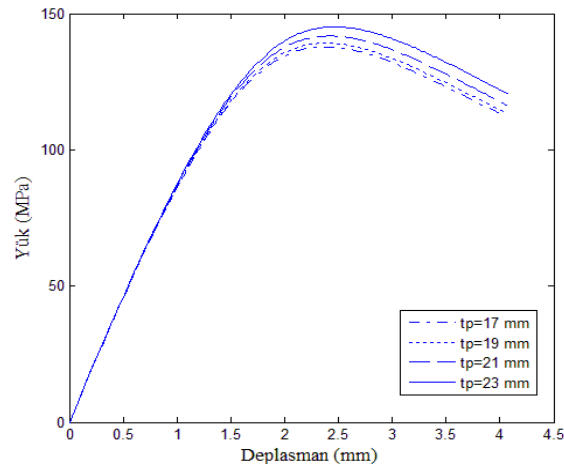
Çizelge 3.6 : P3 için stifner gövde yüksekliğinin etkisi.

$h_w(\text{mm})$	σ_u/σ_Y
60	0.364
80	0.517
100	0.673
120	0.877

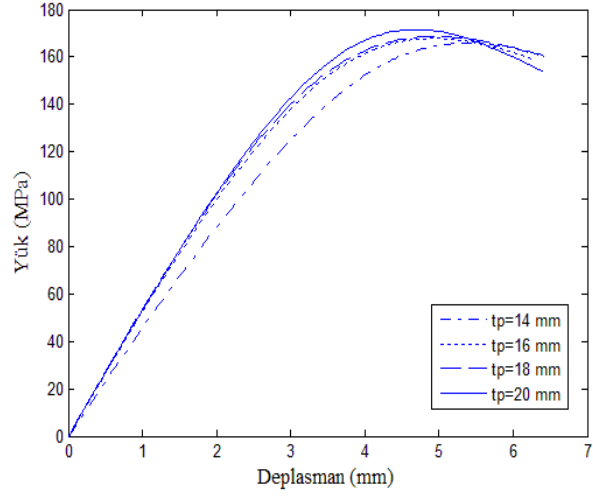
Çizelge 3.7 : P4 için stifner gövde yüksekliğinin etkisi.

$h_w(\text{mm})$	σ_u/σ_Y
70	0.333
80	0.412
90	0.501
100	0.596

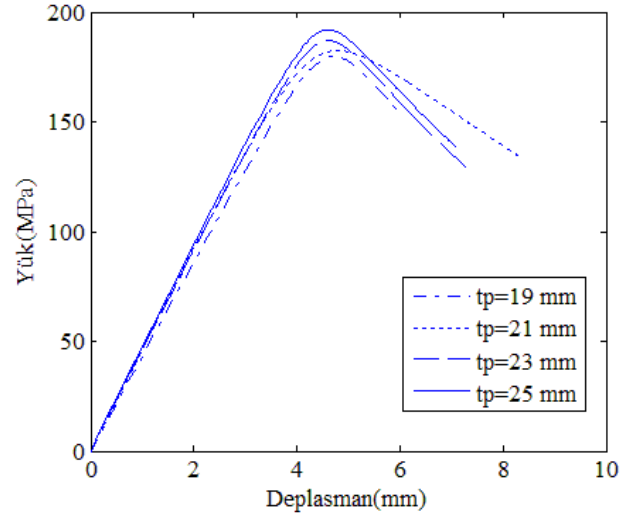
Paneller için levha kalınlığının göçme davranışına etkisi incelenmiştir. Levha kalınlığının panelin nihai yük taşıma kapasitesine etkisi oldukça az olmuştur. Göçme sonrası durumda ise levha kalınlığının panelin davranışı üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.7 – 3.10’da paneller için levha kalınlığının etkisini gösteren yük - deplasman eğrileri yer almaktadır.



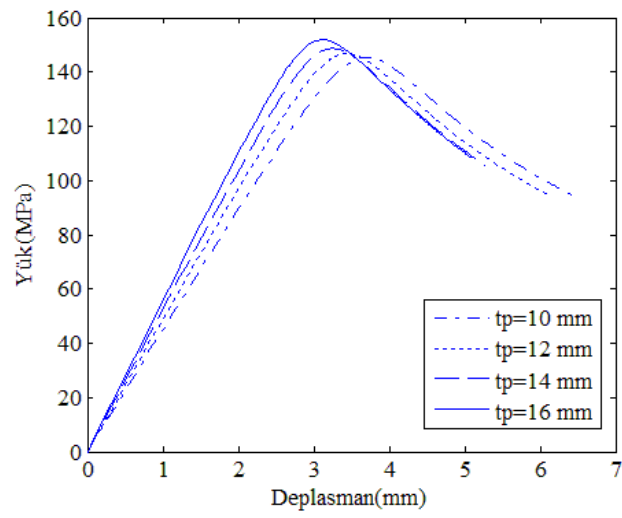
Şekil 3.7 : P1 için levha kalınlığının etkisi.



Şekil 3.8 : P2 için levha kalınlığının etkisi.

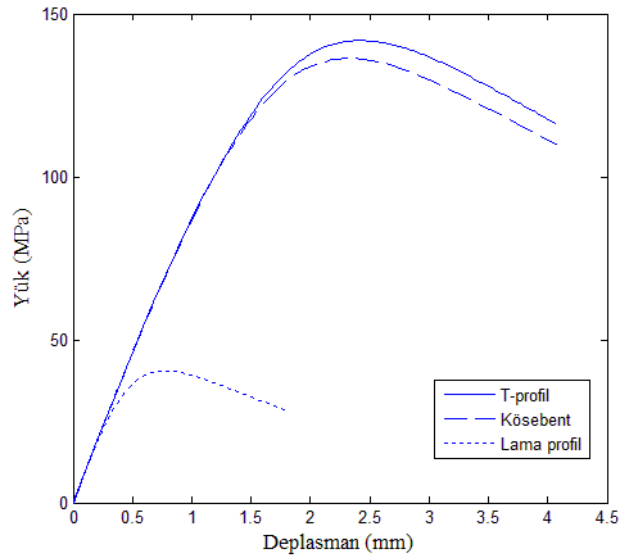


Şekil 3.9 : P3 için levha kalınlığının etkisi.

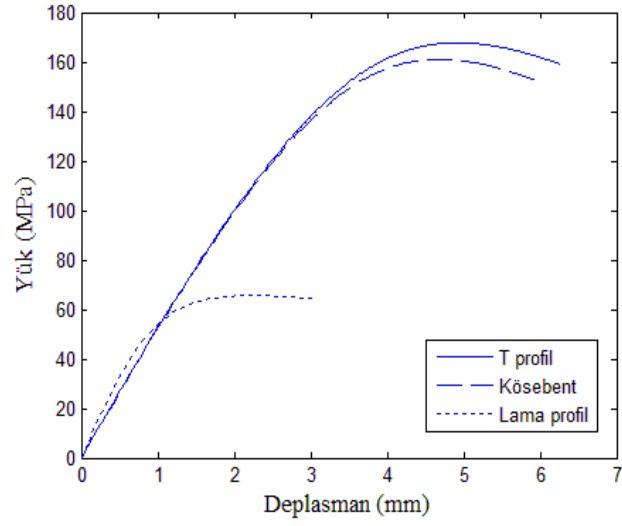


Şekil 3.10 : P4 için levha kalınlığının etkisi.

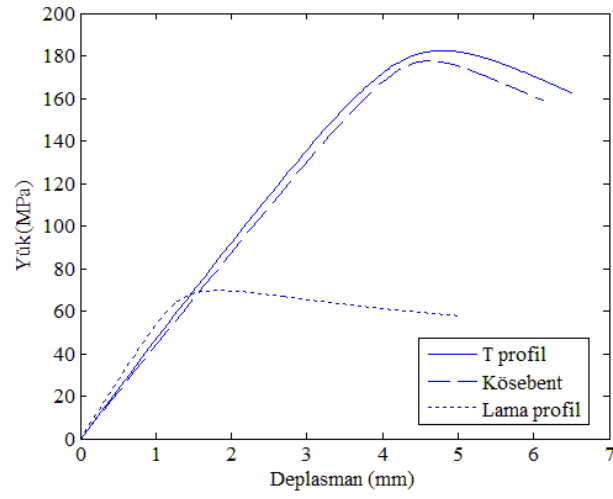
Stifner tipinin panel göçme davranışına ve nihai yük taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Çizelge 3.1’de özellikleri verilen paneller T profil kesitinde stifnere sahiptir. Stifner tipinin etkisini incelemek amacıyla T profilli kesit ile aynı boyutlara sahip köşebent profil ve bu profillerin filenşi çıkartılmış haldeki lama profiller incelenmiştir. Şekil 3.11 – 3.14’te stifner tipinin panel göçme davranışına etkisi yük – deplasman eğrileri şeklinde verilmiştir. Köşebent profil ile T profilli stifnerler arasında hem nihai yük taşıma kapasitesi bakımından hem de göçme davranışı bakımından önemli bir fark bulunmamaktadır. Ancak lama profilli durumda panelin nihai yük taşıma kapasitesinde önemli bir düşüş olmaktadır. Bunun yanı sıra göçme davranışı da farklılık göstermektedir. Böyle bir durumun ortaya çıkmasında en büyük etken lama profilli durumda stifnerin kesit atalet momentinde önemli bir düşüşün meydana gelmesidir. T profilli ve köşebent profilli durumlarda stifner kesitlerinin kesit atalet momentleri birbirine eşit olmaktadır. Bu sebeple aralarında önemli bir fark görülmemektedir ancak T profil kesitine sahip stifnerli panelin nihai yük taşıma kapasitesinin daha fazla olduğu görülmektedir.



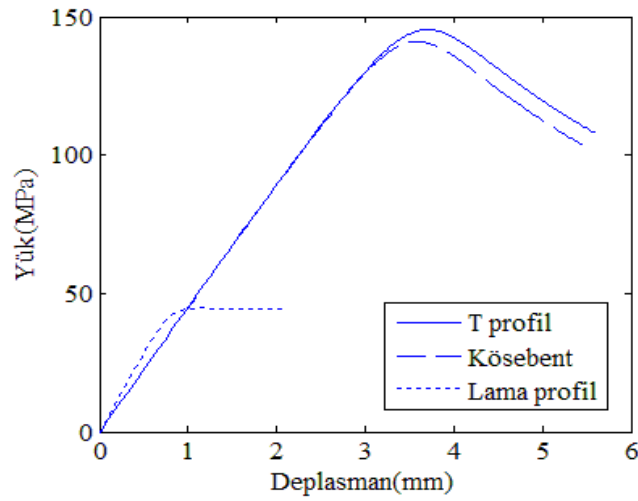
Şekil 3.11 : P1 için stifner tipinin etkisi.



Şekil 3.12 : P2 için stifner tipinin etkisi.



Şekil 3.13 : P3 için stifner tipinin etkisi.



Şekil 3.14 : P4 için stifner tipinin etkisi.

Stifnerli panellerin göçme davranışı ve nihai yük taşıma kapasitesine lateral yükün etkisi incelenmiştir. Lateral yükleme sebebiyle panellerin yarım aralık kısmında

önerilen global mod şeklinin ters yönünde deformasyon meydana gelmiştir. Bu sebeple latarel yükün arttırıldığı bazı durumlarda panelin nihai yük taşıma kapasitesinde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çizelge 3.8 – 3.11’de paneller için lataral yükün etkisi verilmiştir.

Çizelge 3.8 : P1 için lateral yükün etkisi.

Lateral yük(MPa)	σ_u/σ_Y
0.025	0.468
0.05	0.438
0.1	0.398

Çizelge 3.9: P2 için lateral yükün etkisi.

Lateral yük(MPa)	σ_u/σ_Y
0.01	0.499
0.015	0.486
0.025	0.467

Çizelge 3.10: P3 için lateral yükün etkisi.

Lateral yük(MPa)	σ_u/σ_Y
0.05	0.434
0.1	0.419
0.2	0.425

Çizelge 3.11: P4 için lateral yükün etkisi.

Lateral yük(MPa)	σ_u/σ_Y
0.01	0.354
0.015	0.342
0.025	0.327

4. DEĞERLENDİRMELER

Gemi panellerinin burkulma davranışı ve nihai yük taşıma kapasitesini incelemek amacıyla lineer ve nonlinear analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak stifnerli gemi panellerinin iki yönlü eksenel yükleme altında levha-stifner etkileşimleri ve artık kaynak gerilmeleri göz önünde bulundurularak burkulma davranışı analitik olarak incelenmiştir. Elde edilen analitik çözümler SEA ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca artık gerilmelerin sisteme dahil edilmediği boyuna yönde eksenel yükleme altındaki stifnerli panellerin burkulma gerilmesi SEA ile incelenmiş, sonuçları Yao (2009) tarafından verilen analitik çözümler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan lineer analizler sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- SEA ile elde edilen sonuçlar ile minimum potansiyel enerji teoremi kullanılarak elde edilen analitik sonuçlar genel olarak uyumludur. Ancak SEA, analitik yöntemle göre daha düşük sonuç vermiştir.
- İki yönlü eksenel yükleme altındaki stifnerli panellerin burkulma davranışının incelenmesi sırasında önerilen matematiksel model sınır şartlarını burkulma yarım dalga sayısına bağlı olmaksızın sağlamaktadır. Sonlu elemanlar modelinde sınır şartları ise değişkendir. Burkulma yarım dalga sayısının tek olduğu durumda panel uçlarına simetrik sınır şartı, çift olduğu durumda ise anti-simetrik sınır şartı uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde bazı kısımlarda analitik çözümden bir miktar sapma olmasının sebebi bu şekilde açıklanabilir.
- Artık kaynak gerilmeleri stifnerli panellerin burkulma modunu etkilememiştir ancak burkulma gerilmesinde önemli düşüşe sebep olmuştur.
- Enine yönde eksenel yüklemenin baskın olduğu durumlarda artık gerilmelerin etkisi daha az olmuştur.
- BC panelinde artık gerilmelerin etkisi daha fazla olmuştur bunun sebebi ise, enine yönde artık gerilmelerin BC panelinde daha büyük olmasıdır.

- Levha kenar oranının stifnerli panel burkulma davranışı üzerinde oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Levha kenar oranının artması yani levha narinliğinin azalması panel burkulma gerilmesinde önemli bir artışa sebep olmuştur.
- Stifner gövde yüksekliğinin panel burkulma davranışı ve burkulma gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir. Özellikle panelin enine yönde yüklemeye maruz kaldığı durumlarda etkisi ihmal edilebilir seviyededir. Ancak panel boyunun çok uzaması ve stifner gövde yüksekliğinin de eş zamanlı olarak artışı panelin 2.11 ve 2.12 ifadelerinde verilen burkulma mod şekillerinin dışında bir modda burkulmasına sebep olacaktır. Bu durumda meydana gelecek burkulma gerilmesi çok daha düşük olacaktır.
- Levha kalınlığının panel burkulma gerilmesi üzerinde oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Levha kalınlığının artması panel burkulma gerilmesinde önemli bir artışa sebep olmuştur. Levha kalınlığındaki artışın burkulma gerilmesinde bu kadar büyük bir artışa sebep olması burkulmanın lokal olarak gerçekleşmesindendir. Burkulmanın global olduğu durumlarda stifner ve levha bir bütün olarak hareket edeceğinden levha kalınlığının etkisi daha az olacaktır.

Gemi panellerinin nonlinear burkulma davranışı ve nihai yük taşıma kapasitesini incelemek amacıyla gerçekleştirilen nonlinear sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen bulgular şu şekilde sıralanabilir.

- Gerçekleştirilen nonlinear SEA sonuçları Chen (2003) tarafından verilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirlerine yakın oldukları gözlemlenmiştir. Özellikle stifner gövde yüksekliğinin küçük olduğu durumlarda SEA sonuçları ile Chen (2003) tarafından idealize edilmiş kiriş metoduyla elde edilen sonuçlar daha yakın olmuştur. Bunun sebebi ise idealize edilmiş kiriş yönteminin paneli kiriş şeklinde ayırıklaştırması ve levha stifner kombinasyonunun davranışını kiriş olarak modellemesidir. Bu yaklaşım stifner gövdesinin küçük olduğu durumlarda daha doğru sonuç verirken stifner boyutlarının arttığı durumlarda sonuçlar tartışmalı olmaktadır.

- Yapılan parametrik çalışmalar sonucunda stifner gövde yüksekliğinin artırıldığı durumda panelin nihai yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Stifner gövde yüksekliğinin daha fazla artırıldığı durumda panel global burkulma modundan stifnerler arası levhanın lokal burkulmasına geçecektir. Bu durum gelecek çalışmalarda incelenebilir.
- Levha kalınlığının panel nihai yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi çok az olmuştur. Bunun sebebi panelin global burkulma sonucu global göçmeye maruz kalmasıdır. Fakat panelin göçme sonrası davranışı üzerinde levha kalınlığının etkisi dikkate alınmalıdır.
- Stifner tipinin panel nihai yük taşıma kapasitesi üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. T profilli stifnere sahip panellerin nihai yük taşıma kapasitesi daha büyüktür. Köşebent profil kesitine sahip stifner kullanılan panellerde ise yük taşıma kapasitesinde az da olsa bir düşüş söz konusu olmaktadır. Kesit atalet momentleri eşit olan bu iki tip stifner kesiti içinde T profil kesitine sahip stifnerlerin kullanılmasının daha uygun olduğu söylenebilir. Lama profil kullanıldığında ise panel nihai yük taşıma kapasitesinde önemli bir düşüş söz konusu olmaktadır.
- Panel yüzeyine uygulanan lateral yükün genel olarak stifnerli panelin nihai yük taşıma kapasitesini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ancak lateral yükün daha fazla artırılması durumunda panel nihai yük taşıma kapasitesinde artış olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise panelin yarım aralık bölümüne lateral yük sebebiyle burkulma modunun tersi yönünde deformasyon oluşmasıdır. Ayrıca lateral yük panel ortasından geçen enine elemanın çevresinde levhanın dönmesine de engel olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Byklum, E. ve Amdahl, J.** (2002). A Simplified Method For Elastic Large Deflection Analysis of Plates and Stiffened Panels Due To Local Buckling, *Thin-Walled Structures*, 40, 925-953.
- Caldwell, J. B.** (1965). Ultimate Longitudinal Strength, *Transactions of The Royal Institution of Naval Architects*, 107, 411-430.
- Chen, Y.** (2003). *Ultimate Strength Analysis of Stiffened Panels Using A Beam-Column Method*, (doktora tezi), Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Danielson, D. A.** (1995). Analytical Tripping Loads For Stiffened Plates, *International Journal of Solid Structures*, 32, 1319-1328.
- Fujikubo, M., Harada, M., Yao, T., Khedmati, M. R. ve Yanagihara, D.** (2005). Estimation of Ultimate Strength of Continuous Stiffened Panel Under Combined Transverse Thrust and Lateral Pressure Part 2: Continuous Stiffened Panel, *Marine Structures*, 18, 411-427.
- Fujikubo, M. ve Kaeding, P.** (2002). New Simplified Approach to Collapse Analysis of Stiffened Plates, *Marine Structures*, 15, 251-283.
- Fujikubo, M. ve Yao, T.** (1999). Elastic Local Buckling Strength of Stiffened Plate Considering Plate/Stiffener Interaction and Welding Residual Stress, *Marine Structures*, 12, 543-564.
- Fujikubo, M., Yao, T., Khedmati, M. R., Harada, M. ve Yanagihara, D.** (2005). Estimation of Ultimate Strength of Continuous Stiffened Panel Under Combined Transverse Thrust and Lateral Pressure Part 1: Continuous Plate, *Marine Structures*, 18, 383-410.
- Gordo, J. M. ve Soares, C. G.** (1996). Approximate Method to Evaluate the Hull Girder Collapse Strength, *Marine Structures*, 9, 449-470.
- Gordo, J. M. ve Soares, C. G.** (2008). Compressive Tests on Long Continuous Stiffened Panels, *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Estoril, Portugal, June 15-20.
- Grondin, G. Y., Elwi, A. E. ve Cheng, J. J. R.** (1999). Buckling of Stiffened Steel Plates-A Parametric Study, *Journal of Constructional Steel Research*, 50, 151-175.
- Hughes, O. F., Ghosh, B. ve Chen, Y.** (2004). Improved Prediction of Simultaneous Local and Overall Buckling of Stiffened Panels, *Thin-Walled Structures*, 42, 827-856.
- Louca, L. A. ve Harding, J. E.** (1996). Torsional Buckling of Outstands in Longitudinally Stiffened Panels, *Thin-Walled Structures*, 24, 211-229.

- Özgüç, Ö. ve Barltrop, N. D. P.** (2008). Analysis on the Hull Girder Ultimate Strength of A Bulk Carrier Using Simplified Method Based on Incremental-Iterative Approach, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 130.
- Özgüç, Ö., Das, P. K. ve Barltrop, N.** (2007). The New Simple Design Equations For the Ultimate Compressive Strength of Imperfect Stiffened Plates, *Ocean Engineering*, 34, 970-986.
- Paik, J. K. ve Kim, B. J.** (2002). Ultimate Strength Formulations For Stiffened Panels Under Combined Axial Load, In-Plane Bending and Lateral Pressure: A Benchmark Study, *Thin-Walled Structures*, 40, 45-83.
- Paik, J. K. ve Thayamballi, A. K.** (2003). *Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures*, John Wiley & Sons Inc., England.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K. ve 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 Structures*, 39, 215-246.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K. ve Kim, D. H.** (1999). An Analytical Method for the Ultimate Strength and Effective Plating of Stiffened Panels, *Journal of Constructional Steel Research*, 49, 43-68.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K. ve Lee, W. H.** (1998). A Numerical Investigation of Tripping, *Marine Structures*, 11, 159-183.
- Shanmugam, N. E. ve Arockiasamy, M.** (1996). Local Buckling of Stiffened Plates in Offshore Structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 38, 41-59.
- Smith, C. S.** (1977). Influence of Local Compressive Failure on Ultimate Longitudinal Strength of A Ship's Hull, *International Symposium on Practical Design in Shipbuilding*, Tokyo, Japan.
- Soares, C. G. ve Gordo, J. M.** (1997). Design Methods for Stiffened Plates Under Predominantly Uniaxial Compression, *Marine Structures*, 10, 465-497.
- Szillard, R.** (2004). *Theories and Applications of Plate Analysis: Classical, Numerical and Engineering Methods*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- Toulis, M. ve Caridis, P. A.** (2002). The Effect of Aspect Ratio on The Elastoplastic Response of Stiffened Plates Loaded in Uniaxial Edge Compression, *Computers and Structures*, 80, 1317-1328.
- Ueda, Y. ve Rashed, S. M. H.** (1984). The Idealized Structural Unit Method and its Application to Deep Girder Structures, *Computers and Structures*, 18, 277-293.
- Ueda, Y., Rashed, S. M. H. ve Paik, J. K.** (1995). Buckling and Ultimate Strength Interaction in Plates and Stiffened Panels Under Combined Inplane Biaxial and Shearing Forces, *Marine Structure*, 8, 1-36.
- Ventsel, E. ve Krauthammer, T.** (2001). *Thin Plates and Shells Theory, Analysis, and Applications*, CRC Press, New York.

- Vhanmane, S. ve Bhattacharya, B.** (2011). Ultimate Strength Analysis of Ship Hull Girder Under Random Material and Geometric Properties, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 33.
- Yao, T.** (2000). Ultimate Hull Girder Strength, *14th International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC)*, Nagasaki, Japan, October 2-6.
- Yao, T.** (2009). Buckling/Plastic Collapse Behavior and Strength of Ship Structures, *Ders Notları*.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Murat Özdemir

Doğum Yeri ve Tarihi: Adana /15.05.1989

E-Posta: mozdemir@itu.edu.tr

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, 2010.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Özdemir M.**, Ergin A., 2012: Buckling Strength Analysis of Ship Structural Panels. *The 26th Asian Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures*, September 03-06, 2012 Fukuoka, Japan.
- **Özdemir M.**, Ergin A., 2013: Nonlinear Buckling Behavior of Stiffened Ship Panels. *4th International Conference on Marine Structures*, March 25-27, 2013 Espoo, Finland