

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEMİ GÖVDE KİRİŞİ GÖÇME MUKAVEMETİNİN  
KADEMELİ GÖÇME ANALİZİ YAKLAŞIMIYLA BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mak. Yük. Müh. Hasan ÖLMEZ**

**ŞUBAT 2014**

**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEMİ GÖVDE KİRİŞİ GÖÇME MUKAVEMETİNİN  
KADEMELİ GÖÇME ANALİZİ YAKLAŞIMIYLA BELİRLENMESİ**

**Hasan ÖLMEZ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31.12.2013**

**Tezin Savunma Tarihi : 21.02.2014**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ercan KÖSE**

**İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL**

**Trabzon 2014**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında**  
**Hasan ÖLMEZ tarafından hazırlanan**

**GEMİ GÖVDE KİRİŞİ GÖÇME MUKAVEMETİNİN**  
**KADEMELİ GÖÇME ANALİZİ YAKLAŞIMIYLA BELİRLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21/01/2014 gün ve 1538 sayılı**  
**kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL** .....

**Üye : Prof. Dr. Ercan KÖSE** .....

**Üye : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU** .....

**Üye : Prof. Dr. Nurten VARDAR** .....

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma kapsamında, gemi ve diğer açık deniz yapılarında, geleneksel kural tabanlı tasarımın aksine sadece tasarım yüklerinden kaynaklı gerilmeleri değil, bu değerlerin de ötesinde, yapının görevini yerine getirmesine son verecek farklı şartları ve değişkenleri de hesaplamalara dâhil eden, akma, göçme ve göçme sonrası gerçek yapı davranışını tahmin edilebilen limit durumu tasarım yaklaşımı, bu yaklaşımı etkin şekilde uygulama imkânı tanıyan kademeli göçme analizi ve bu analiz için de gemi yapıları için kolay ve hızlı uygulanabilir olan Smith yöntemi seçilmiştir. Öncelikle, tekil eleman ve eleman gruplarının ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş, ardından da kademeli göçme analizi ile tüm yapının göçme mukavemeti tahmin edilmiştir.

Çalışma içerisinde, gemi orta kesiti tekil plak, tekil stifner, stifnerli panel ve köşe elemanlara ayrılmak suretiyle idealleştirilmiştir. Başlangıç deformasyonlarına sahip tekil plak elemanların davranışları von-Karman & Marguerre plak denklemleri yardımıyla, farklı geometrideki boyuna stifnerlerin davranışları IACS-CSR'ye göre ve boyuna stifnerli panel elemanların davranışları, güncellenen ortotropik panel yaklaşımıyla elde edilmiştir.

Çalışmalarım boyunca yakın ilgi ve desteğini gördüğüm değerli bölüm başkanım ve danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ercan KÖSE'ye ve yardımlarını esirgemeyerek bu özel ve önemli tez çalışmasını bana öneren, her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, eş danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL'a ve öğrencisi Öğr. Gör. Dr. G. Tansel TAYYAR'a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir görev sayarım. Tez çalışmam boyunca bilgi ve birikimlerinden faydalandığım tez izleme jürisi hocalarım Sayın Prof. Dr. Ragıp ERDÖL'e ve Sayın Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU'na değerli önerileri ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, birlikte çalıştığım tüm iş arkadaşlarıma minnettar olduğumu belirtmek isterim. Bu süreçte beni sabırla destekleyen başta her iki anne ve babam olmak üzere tüm aile bireylerim ile hoşgörü ve sabır örneği gösteren eşim Zübeyde ÇOLAK ÖLMEZ'e müteşekkir olduğumu belirtir, çalışmanın üniversitemiz ve konuyla ilgili çalışacaklar için yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

Hasan ÖLMEZ  
Trabzon 2014

## **TEZ BEYANNAMESİ**

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Gemi gövde kirişi göçme mukavemetinin kademeli göçme analizi yaklaşımıyla belirlenmesi’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ercan KÖSE ve eş danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

21.02.2014

Hasan ÖLMEZ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	IX
SUMMARY .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Limit Durumu Tasarım Yöntemi.....	7
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	9
1.4. Kademeli Göçme Analizi Yaklaşımında Literatüre Bakış .....	11
1.5. Yöntemin Seçimi .....	34
1.6. Tezin Akışı .....	37
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	40
2.1. Problemin Tanımı, Çözüm Aşamaları ve Metodoloji .....	40
2.2. Gemi Gövde Kiriş Yapısı ve Desteklenmiş Panellerle İlgili Genel Tanımlar.....	41
2.2.1. Desteklenmiş Panellerin Davranışlarını Etkileyen Faktörler .....	42
2.2.2. Desteklenmiş Plakların Burkulmaya Bağlı Göçme Tipleri .....	42
2.2.2.1. Tip-I-Bütün Panel Göçmesi.....	43
2.2.2.2. Tip-II-Plak Burkulması .....	43
2.2.2.3. Tip-III-Plak-Stifner Birleşimi Kiriş-Kolon Burkulması.....	43
2.2.2.4. Tip-IV-Stifner Gövdesinin veya Flencinin Yerel Burkulması .....	44
2.2.2.5. Tip-V-Stifnerlerin Yanal Burulmalı Burkulması .....	44
2.2.3. Farklı Tipte Stifnerlerin En Kesit Özellikleri .....	45
2.2.4. Etkin Genişlik.....	46
2.2.5. Eğrilik Kavramı .....	46
2.2.5.1. Düzlem Kesit Düzlem Kalır Kabulü .....	46

2.2.5.2.	Eksenel Kuvvet Dengesi.....	48
2.2.5.3.	Moment Dengesi .....	48
2.2.6.	Moment-Eğrilik İlişkisi .....	48
2.2.7.	Problemin Çözüm Aşamalarında Yapılan Yaklaşım ve Kabuller .....	50
2.3.	Tekil Plakların Elastik ve Elastik Olmayan Göçme Davranışları .....	53
2.3.1.	İlkel Sehimi Olan Tekil Plakta Uygunluk Bağıntısı ve Denge Denklemi.....	53
2.3.1.1.	Marguerre Denklemlerinin Yaklaşık Analitik Çözümü .....	59
2.3.1.2.	Mambran Gerilme (Plak Kenarı Odaklı Plastik Mafsal) Yaklaşımı .....	65
2.4.	Lama, T ve L Kesitli Tekil Stifnerlerin ve Plak-Stifner Birleşimi Kiriş Programı Kolon Elemanların Göçme Mukavemet Değerlerinin Belirlenmesi .....	71
2.4.1.	IACS-CSR Plak-Stifner Birleşimi Kiriş-Kolon Burkulması.....	71
2.4.2.	IACS-CSRstifnerlerin Burulmalı Burkulması .....	73
2.4.3.	IACS-CSRstifner Gövdesinin Yerel Burkulması .....	74
2.5.	Desteklenmiş Panellerin Burkulma ve Göçme Davranışları.....	77
2.5.1.	Desteklenmiş Panel Yapılarının Analizlerinde Yapılan İdealleştirmeler.....	78
2.5.2.	Plak-Stifner Birleşimi Yapılarak Desteklenmiş Panellerin Burkulma ve Göçme Mukavemet Davranışlarının İncelenmesi .....	79
2.5.3.	Plak-Stifner Ayrışımı Yapılarak Desteklenmiş Panellerin Burkulma ve Göçme Mukavemet Davranışlarının İncelenmesi .....	81
2.6.	Panel Göçme Mukavemeti İçin Yarı Analitik Çözüm Metodolojisi.....	82
2.7.	Kademeli Göçme Analizi ve Smith Yöntemi.....	89
2.7.1.	Smith Yönteminde Yapılan Kabuller .....	90
2.7.2.	Smith Yöntemi Uygulama Adımları .....	91
2.7.3.	Elemanlarda Eksenel Yer Değiştirme .....	95
2.7.4.	Kademeli Göçme Analizi Hesap Tablosu .....	97
3.	BULGULAR .....	98
3.1.	Tekil Plak Elemanların Göçme Mukavemet Değerlerinin Tahmin Edilmesi Uygulamaları ve Kanıtlanması.....	98
3.1.1.	Tekil Plak Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Uygulama-I .....	99
3.1.2.	Tekil Plak Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Uygulama-II.....	102
3.1.3.	Tekil Plak Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı Uygulama-III.....	105
3.2.	Desteklenmiş Panellerin Göçme Mukavemet Değerlerinin Tahmin Edilmesi Uygulamaları ve Kanıtlanması .....	106
3.2.1.	Tanaka ve Endo Desteklenmiş Panel Testleri .....	106

3.2.2.	Smith Desteklenmiş Izgara Panel Testleri.....	108
3.2.3.	Biswarup Ghosh-55 Stifnerli Panel FEM Analizi .....	109
3.2.4.	ISSC-2009 – Desteklenmiş Panel Analizi .....	110
3.3.	Yöntemin Stifnerli Kutu Kirişlere Uygulanması.....	112
3.3.1.	IACS-CSR Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama.....	113
3.3.2.	Önerilen Yöntem Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama .....	124
3.3.2.1.	Adım 1- Gemi Kesitinin Elemanlarına Ayrıklaştırılması.....	125
3.3.2.2.	Adım 2 – Ayrıklaştırılan Elemanların Gerilme-Şekil Değişirme (Yük-Eksenel Kısalma) Eğrilerinin Elde Edilmesi .....	125
3.3.2.2.1.	Tekil Plak Elemanların (P1, P2, P3, P4) Yük-Eksenel Kısalma Eğrileri .....	126
3.3.2.2.2.	Tekil Stifner Elemanların (S1, S2, S3) Yük-Eksenel Kısalma Eğrileri .....	128
3.3.2.2.3.	Stifnerli Panel Elemanların (SP1, SP2) Yük-Eksenel Kısalma Eğrileri.....	130
3.3.2.3.	Adım 3 –Tasarım Yükleri Altında Başlangıç Tarafsız Eksen Yerinin ve Eğrilik Artımı Değerinin Belirlenmesi .....	136
3.3.2.4.	Adım 4 – Smith Kademeli Göçme Analizi.....	136
3.3.2.4.1.	Adım 5 – Kesite Etkiyen Düşey Eğilme Momenti Değerinin Her Eğrilik Adımında Belirlenmesi.....	137
3.3.2.4.2.	Adım 6 - Moment-Eğrilik Eğrisinin Oluşturulması ve Kesit Göçme Mukavemeti Değerinin Belirlenmesi .....	137
3.3.2.4.3.	Önerilen Yöntemin Kademeli Göçme Analizi Hesap Tablosu .....	137
3.4.	Önerilen Yöntemin Gemi Yapılarına Uygulanması .....	140
3.4.1.	Dow'un 1/3 Ölçekli Fırkateyn Modeli Testi-(Dow,1991) .....	140
3.4.2.	Çift Cidarlı Petrol Tankeri Göçme Mukavemeti Hesaplaması.....	146
3.4.2.1.	IACS-CSR Kullanılarak Gerçekleştirilen Göçme Mukavemeti Hesaplaması ..	148
3.4.2.1.1.	Korozyon Payları ve Net Kalınlık Yaklaşımı.....	149
3.4.2.2.	Önerilen Yöntem Kullanılarak Gerçekleştirilen Göçme Mukavemeti Hesaplaması.....	155
3.4.3.	Büyük Tonajlı Ham Petrol Gemisi (VLCC) Energy Concentration'ın Göçme Mukavemeti Hesaplaması .....	164
3.4.3.1.	IACS-CSR Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama.....	167
3.4.3.2.	Önerilen Yöntem Kullanılarak Gerçekleştirilen Göçme Mukavemeti Hesaplama .....	176
3.4.4.	Çift Dip – Çift Cidar Tipik Bir Konteyner Gemisinin Göçme Mukavemeti Hesaplaması.....	182
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	188



5.	KAYNAKLAR.....	192
6.	EKLER .....	203

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

GEMİ GÖVDE KİRİŞİ GÖÇME MUKAVEMETİNİN  
KADEMELİ GÖÇME ANALİZİ YAKLAŞIMIYLA BELİRLENMESİ

Hasan ÖLMEZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Ercan KÖSE  
Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL  
2014, 202 Sayfa, 5 Ek Sayfa

Bu çalışmada, gemilerin gövde kirişlerinin göçme mukavemet değerlerinin gerçeğe yakın olarak tahmin edilmesi nihai hedef olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, düşey eğilme momenti etkisindeki gemi kirişlerinin orta kesitlerini oluşturan yapısal elemanlardaki yük-eksenel kısalma ilişkileri analitik ve sayısal çözümlerle belirlenmiş, bu ilişkilere bağlı olarak kademeli göçme analizleri Smith yöntemine göre yapılmış, sonucunda da moment-eğrilik eğrisinde, tepe nokta değeri belirlenerek maksimum yük taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. Bölüm 2’de, problemin tanımı, çözümün kapsamını oluşturan temel kavram ve terimlerin tanımları ile metodolojide yapılan kabuller anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde ilk aşama olarak, tekil plak, tekil stifner ve desteklenmiş panel elemanların yük-eksenel kısalma eğrileri, “limit durumu tasarım yaklaşımı”, “membran gerilme yaklaşımı”, “ortotropik panel yaklaşımı” ve IACS-CSR kuralları doğrultusunda elde edilmiş, tüm gövde kesiti analizinin ikinci aşaması olarak kullanılacak Smith yönteminin detayları sunulmuştur. Bölüm 3’de, ayrıklaştırılan tekil plak ve stifner kirişler ile kutu kiriş, 1/3 ölçekli firkateyn modeli ve gerçek gemi kesitleri üzerinde yöntemin geçerliliğini kanıtlamak için uygulamalar gerçekleştirilmiş, her örnek için literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmış ve tablo/grafik sonuçları irdelenmiştir. Son olarak Bölüm 4’de de genel sonuç değerlendirmesi ve öneriler sunulmuştur. Hem ilk aşamada elemanların yük-eksenel kısalma eğrilerinde, ardından gerçekleştirilen gerçek gemi kesiti uygulamalarında, belirlenen hedef açısından tatminkâr sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Gemi mukavemeti, Gemi gövdesi göçme mukavemeti, Kademeli göçme analizi, Smith Yöntemi, Marguerre plak denklemleri, Ortotropik panel teorisi

PhD.Thesis

SUMMARY

ULTIMATE STRENGTH ESTIMATION OF SHIP HULL GIRDERS  
BY PROGRESSIVE COLLAPSE ANALYSIS APPROACH

Hasan ÖLMEZ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Ercan KÖSE  
Co-Supervisor: Ass. Prof. Ertekin BAYRAKTARKATAL  
2014, 202 Pages, 5 Appendix

In this study, the main target is determined as estimation of the hull girder ultimate strengths of ships as close to real behavior. In this context, the load-end shortening curve relationships of structural members such as single plates, single stiffeners, plate-stiffener combination beam-column elements, stiffened panel elements and hard corner elements of hull girders under vertical bending moment have been determined by numerical, empirical and analytically. Then, the progressive collapse calculations have been performed using the determined load-end shortening curves. Finally, ultimate strength of hull girder has been obtained as the peak value of moment-curvature curve, saying the maximum load carrying capacity under maximum vertical bending moment. In Chapter 2, the problem definition, the main terms and assumptions of the solution have been given. Also the load-end shortening curves of structural elements had been obtained by "limit state design approach", "membrane stress approach", orthotropic panel approach" and the rules of IACS-CSR. Then, the details of Smith method progressive collapse calculations have been described. In Chapter 3, the ultimate strength benchmark studies for structural elements, box girder, 1/3 scale frigate and real ships that have test and/or analysis results in the literature have been performed and the comparison results have been examined with tables and graphs. In Chapter 4, general results obtained after study and recommendations have been presented. Satisfactory results in terms of the main target have been obtained for both, load-end shortening curves and ultimate strength calculations.

**KeyWords:** Ship strength, Ship hull girder ultimate strength, Progressive collapse analysis, Smith method, Marguerre plate equations, Orthotropic panel approach

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Bir konteyner gemisinin ortasının dalga tepesinde kaldığı sarkma durumu.....	3
Şekil 1.2.	Bir konteyner gemisinin ortasının dalga çukurunda kaldığı çökme durumu.....	3
Şekil 1.3.	Örnek bir gemi yapısında çökme ve sarkma hallerinin şematik gösterimi.....	5
Şekil 1.4.	Örnek bir geminin yapı elemanları ile birlikte orta kesit resmi (Şekil 1.3- A-A kesiti) .....	6
Şekil 1.5.	Göçme limit durumuna göre yapısal tasarım yaklaşımı .....	8
Şekil 1.6.	Orçun C kuru yük gemisi.....	10
Şekil 1.7.	Titanic yolcu gemisi .....	10
Şekil 1.8.	Dow'un 1/3 ölçekli firkateyn modelinin farklı araştırmacılar tarafından elde edilen moment-eğrilik eğrileri .....	37
Şekil 2.1.	Izgara yapı üzerinde desteklenmiş plak terminolojisi .....	41
Şekil 2.2.	Eksenel bası kuvveti altındaki desteklenmiş plaklar için olası burkulma tipleri.....	43
Şekil 2.3.	Kullanılan stifnerlerin en kesit tipleri.....	45
Şekil 2.4.	Düzlem kesitin eğilme sonrası düzlem kaldığı kabulü .....	47
Şekil 2.5.	Moment-eğrilik diyagramı.....	49
Şekil 2.6.	İki enine destek elemanı arasında kalan desteklenmiş plak modeli .....	51
Şekil 2.7.	Gemi enine kesitini oluşturan plak elemanlarının bası yükleri altında ortalama gerilme ortalama şekil değiştirme eğrisi.....	51
Şekil 2.8.	Plak üzerinde kaynak sonrası oluşan artık gerilme dağılımı .....	52
Şekil 2.9.	Başlangıç sehimli, boyuna aksenal bası etkisi altındaki tekil plak.....	54
Şekil 2.10.	Deforme olmuş durumda plak elemanına etkileyen yüklemeler .....	55
Şekil 2.11.	Plak elemanda meydana gelen toplam sehim durumu.....	56
Şekil 2.12.	Düz kare bir plakta aksenal bası altında oluşan membran gerilme dağılımları.....	66
Şekil 2.13.	Olası plastik akma başlangıcının oluşacağı bölgeler ve gerilme dağılımları ...	68
Şekil 2.14.	Plak üzerinde toplam membran gerilme dağılımı.....	69
Şekil 2.15.	Nishihara'nın kutu kirişinin güverte kısmında bulunan stifnerlerin üç burkulma tipi için gerilme-şekil değiştirme eğrileri (IACS-CSR) .....	77
Şekil 2.16.	Bir gemi yapısını oluşturan ızgara sistemi.....	78
Şekil 2.17.	Desteklenmiş panellerde idealleştirme modelleri.....	79
Şekil 2.18.	Etkin genişlik tanımı.....	81

Şekil 2.19. Örnek bir gemi orta kesitinin kademeli göçme analizi için temel panel eleman ayrıklaştırması .....	82
Şekil 2.20. Çelik bir gemi ana güvertesinin ızgara yapısı.....	83
Şekil 2.21. Desteklenmiş panel için P-du eğrisi elde edilmesi .....	87
Şekil 2.22. Desteklenmiş panel gerilme-şekil değiştirme davranışın yarı analitik çözüm metodolojisi akış şeması .....	88
Şekil 2.23. Çift cidarlı bir tanker genel yerleşim planı .....	89
Şekil 2.24. Bir geminin orta kesitinin yapı elemanları ile gösterimi .....	90
Şekil 2.25. Orta kesitin destek elemanı stifner-plak birleşimlerine ayrılması .....	91
Şekil 2.26. Çalışmada kullanılan kademeli göçme analizi çözüm akış şeması .....	94
Şekil 2.27. Sarkma ve çökme için eğrilik durumları .....	95
Şekil 2.28. Kesit elemanlarında eksenel yer değiştirme .....	96
Şekil 3.1. Tekil plak gerilme-şekil değiştirme eğrisi hesap tablosu .....	98
Şekil 3.2. Uygulama-I'de kullanılan plak ve yükleme durumu.....	99
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan 8 yöntem ile plağın göçme mukavemet değerlerinin genişlik/kalınlık oranına göre değişimi .....	100
Şekil 3.4. Göçme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması .....	102
Şekil 3.5. Uygulama-II'de kullanılan plak ve yükleme durumu .....	102
Şekil 3.6. Tekil plak uygulama-II plak göçme mukavemeti grafik sonuçları.....	104
Şekil 3.7. (a) Paik'in sonlu elemanlar analizi ile göçme mukavemet analizi sonucu (b) Paik'in analzi sonucu ile mevcut çalışma sonuçlarının karşılaştırılması..	106
Şekil 3.8. Tanaka ve Endo'nun testlerinde kullandığı desteklenmiş panel şematik resmi .....	107
Şekil 3.9. Bir gemi yapısını oluşturan desteklenmiş panel sistemi.....	108
Şekil 3.10. Ghosh'un analizlerinde kullandığı desteklenmiş panel şematik resmi .....	109
Şekil 3.11. Karşılaştırma çalışmasında kullanılan B2 paneli şematik resmi .....	111
Şekil 3.12. B2 paneli için elde edilen gerilme - şekil değiştirme eğrisi.....	112
Şekil 3.13. Nishihara'nın test ettiği kutu kiriş modeli .....	112
Şekil 3.14. Nishihara kutu kirişinin kesit ve perspektif görünümü.....	114
Şekil 3.15. Nishihara'nın tek cidarlı tankeri temsilen kutu kiriş modelinin IACS CSR'ye göre eleman ayrıklaştırması .....	114
Şekil 3.16. T1 ve T2 elemanlar için gerilme-şekil değiştirme davranışları .....	115
Şekil 3.17. Kutu kirişte orta kesitin tarafsız eksen ve kesit modülü ile maksimum eğrilik ve eğrilik artımı hesaplama arayüzü.....	116
Şekil 3.18. Kademeli göçme analizinde her eğrilik adımında gerçekleştirilen hesaplama arayüzü.....	117

Şekil 3.19. Hedef ara komutu adım-1 .....	118
Şekil 3.20. Hedef ara komutu adım-2 .....	119
Şekil 3.21. Hedef ara komutu adım-3 .....	120
Şekil 3.22. Hedef ara komutu adım-4 .....	121
Şekil 3.23. Plak kalınlığı 3.05 mm olan model (MST-3) için moment-eğrilik eğrisi (IACSCSR geleneksel ayrıklaştırma) .....	122
Şekil 3.24. Plak kalınlığı 4.35 mm olan model (MST-4) için moment-eğrilik eğrisi (IACS-CSR geleneksel ayrıklaştırma).....	123
Şekil 3.25. Nishihara'nın kutu giriş modeli – mevcut çalışma eleman ayrıklaştırması....	125
Şekil 3.26. P2 tekil plağı için yapılan hesaplamaların arayüzü, dağılım değerleri ve yük eksenel kısalma eğrisi .....	127
Şekil 3.27. S1 tekil stifneri için yapılan hesaplamaların arayüzü, dağılım değerleri ve yük-eksenel kısalma eğrisi.....	129
Şekil 3.28. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde teğet modülü gösterimi.....	131
Şekil 3.29. Desteklenmiş panel hesaplaması Adım 5- geliştirilmiş ortotropik panel çözümlenmesi hesap tablosu arayüzü .....	133
Şekil 3.30. Desteklenmiş panel hesaplaması Adım 6 - Ortotropik panel (global panel davranışı) sonuçları ile tekil elemanlar ve birleşimlerinin(yerel panel davranışı) sonuçlarının karşılaştırılması, kontrolü ve karar verilmesi.....	134
Şekil 3.31. Desteklenmiş panel hesaplaması Adım 6 – karar verilen panel davranışının değer ve grafik çıktısı .....	135
Şekil 3.32. MST-3 ve MST-4 modelleri için düşey eğilme momenti-eğrilik eğrileri .....	139
Şekil 3.33. Dow'un 1/3 Ölçekli firkateyn modelinin IACS-CSR kademeli göçme analizi için ayrıklaştırılan orta kesit eleman numaralandırması .....	141
Şekil 3.34. Dow'un 1/3 Ölçekli firkateyn modelinin mevcut çalışma kademeli göçme analizi için ayrıklaştırılan orta kesit eleman numaralandırması .....	143
Şekil 3.35. Dow'un 1/3 Ölçekli firkateyn modelinin kademeli göçme analizi için karşılaştırmalı moment-eğrilik eğrisi sonuçları .....	146
Şekil 3.36. Çift cidarlı bir petrol tankerinin orta kesit görünümü.....	147
Şekil 3.37. Petrol tankerinin projelendirilen gerçek orta kesit resmi.....	148
Şekil 3.38. Petrol tankeri orta kesitinin kademeli göçme analizi için temel panel eleman ayrıklaştırması .....	149
Şekil 3.39. IACS-CSR hesaplaması için eleman ayrıklaştırması ve tarafsız eksen yeri ..	149
Şekil 3.40. Net kalınlık yaklaşımı.....	150
Şekil 3.41. Tipik bir petrol tankerinin orta kesitini oluşturan elemanlarda korozyon artım değerleri.....	151
Şekil 3.42. Net kalınlık hesaplanmasında kullanılacak korozyon artımları.....	151

Şekil 3.43. Ana güvertede yer alan, bası kuvveti altındaki L-kesit boyuna stifnerler için olası üç burkulma tipine göre grimle-şekil değiştirme eğrisi .....	154
Şekil 3.44. İç cidarda bulunan, bası kuvveti altındaki T-kesit boyuna stifnerin (C2-30) olası üç burkulma tipine göre grimle-şekil değiştirme eğrisi .....	155
Şekil 3.45. IACS-CSR'ye göre elde edilen moment-eğrilik eğrisi .....	155
Şekil 3.46. Ana güverte G1 panelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi .....	160
Şekil 3.47. Ana güverte G2 panelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi .....	160
Şekil 3.48. Cidar yapısındaki C3-33 stifnerinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	161
Şekil 3.49. Düşey eğilme momenti-eğrilik eğrilerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	161
Şekil 3.50. Energy Concentration gemisinin sarkma kırılması durumu .....	164
Şekil 3.51. Geminin plan ve profil resimleri ile kargo, balast, pis su tankları, boyuna perdeler ve enine perdelerin yerleri .....	165
Şekil 3.52. Energy Concentration gemisinin (a) En kesit resmi ve (b) stifner dağılımı ...	166
Şekil 3.53. IACS-CSR'ye göre eleman ayrıklaştırması ve tarafsız eksen konumları.....	167
Şekil 3.54. Energy Concentration Eleman-61 P-du eğrisi .....	174
Şekil 3.55. Energy Concentration Eleman-97 P-du eğrisi .....	174
Şekil 3.56. Energy Concentration Eleman-45 P-du eğrisi .....	175
Şekil 3.57. Energy Concentration Eleman-125 P-du eğrisi .....	175
Şekil 3.58. Düşey eğilme momenti-eğrilik eğrilerinin karşılaştırmalı gösterimi-I.....	176
Şekil 3.59. Önerilen yöntem kapsamında ayrıklaştırılan elemanlar .....	177
Şekil 3.60. Düşey eğilme momenti-eğrilik eğrilerinin karşılaştırmalı gösterimi-II.....	181
Şekil 3.61. Tipik bir çift dip-çift cidar konteyner gemisi .....	182
Şekil 3.62. Çift Dip-Çift Cidar konteyner gemisi orta kesiti .....	183
Şekil 3.63. Konteyner gemisi orta kesitinin eleman ayrıklaştırması .....	184
Şekil 3.64. Başlangıç sehimlerinin göçme mukavemetine etkisi.....	186
Şekil 3.65. Artık kaynak gerilmelerinin göçme mukavemetine etkisi.....	187

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Yöntem kapsamındaki girdiler, değişkenler ve çıktılar .....	70
Tablo 2.2. Stifner kesit tiplerine göre atalet momentleri .....	74
Tablo 2.4. Kademeli göçme analizi hesaplama tablosu.....	97
Tablo 3.1. Tekil plak uygulama-I için plak ana özellikleri .....	99
Tablo 3.2. Tekil plak uygulama-I için boyutsuz plak göçme mukavemeti sonuçlarının karşılaştırması.....	101
Tablo 3.3. Tekil plak uygulama-II için plak ana özellikleri .....	103
Tablo 3.4. Tekil plak uygulama-II için boyutsuz plak göçme mukavemeti sonuçlarının karşılaştırması.....	104
Tablo 3.5. Tekil plak uygulama-III için plak ana özellikleri.....	105
Tablo 3.6. Tanaka&Endo test panellerinin genel özellikleri .....	107
Tablo 3.7. Tanaka&Endo test panelleri için elde edilen sonuçların karşılaştırılması ...	107
Tablo 3.8. Smith'in test panellerinin genel özellikleri .....	108
Tablo 3.9. Smith test panelleri için elde edilen sonuçların karşılaştırılması .....	109
Tablo 3.10. Ghosh'un analizlerinde kullandığı desteklenmiş panel genel özellikleri.....	110
Tablo 3.11. Ghosh'un analizlerinde kullandığı desteklenmiş panel göçme mukavemeti sonuçlarının karşılaştırması .....	110
Tablo 3.12. Panel-B2'nin geometrik ve malzeme özellikleri .....	111
Tablo 3.13. Panel-B2 göçme mukavemeti sonuçlarının karşılaştırılması .....	111
Tablo 3.14. Kutu giriş kademeli göçme analizi hesaplama tablosu .....	138
Tablo 3.15. Nishihara'nın kutu giriş deney modellerinin mukavemet hesaplamalarından elde edilen farklı çalışma sonuçlarının karşılaştırılması.....	140
Tablo 3.16. Dow'un 1/3 Ölçekli fırkateyn modelinin IACS-CSR kademeli göçme analiziiçin ayrıklaştırılan orta kesit elemanlarının özellikleri .....	142
Tablo 3.17. 1/3 Ölçekli fırkateyn modelinin mevcut çalışma kademeli göçme analizi için ayrıklaştırılan orta kesit elemanlarının özellikleri.....	144
Tablo 3.18. Çift cidarlı petrol tankerinin ana özellikleri .....	147
Tablo 3.19. Çift cidarlı petrol tankerinin ayrıklaştırılan elemanlarının genel özellikleri.....	152
Tablo 3.20. Çift cidarlı petrol tankerinin çökme durumunda kademeli göçme analizi için kullanılacak eleman tablosu .....	157



Tablo 3.21. Göçme mukavemeti limit değerlerinin ve güvenlik marjlerinin karşılaştırılması .....	163
Tablo 3.22. Energy Concentration gemisi ana boyutları .....	165
Tablo 3.23. Geminin inşasında kullanılan stifnerlerin geometrik ve malzeme özellikleri.....	166
Tablo 3.24. IACS-CSR'ye göre ayrıklaştırılan elemanların geometrik ve malzeme özellikleri.....	168
Tablo 3.25. Energy Concentration gemisinin IACS-CSR hesap tablosu .....	171
Tablo 3.26. Energy Concentration gemisinin önerilen yöntemle ayrıklaştırılan elemanlarının geometrik ve malzeme özellikleri .....	178
Tablo 3.27. Göçme mukavemeti ve eğrilik değerlerinin karşılaştırılması .....	181
Tablo 3.28. Konteyner gemisi kademeli göçme analizi senaryoları.....	182
Tablo 3.29. Konteyner gemisinde kullanılan stifnerlerin geometrik ve malzeme özellikleri.....	183
Tablo 3.30. Konteyner gemisi göçme mukavemeti değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları .....	185

## KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Kesit alanı
ABS	: AmericanBureau of Shipping
$A_e$	: Etkin kesit alanı
$A_p$	: Plak kesit alanı
$A_{sf}$	: Stifnerflenç kesit alanı
$A_{sg}$	: Stifner gövde kesit alanı
$a_t$	: Boyuna kaynağın etki ettiği genişlik
b	: Plak genişliği
$b_e$	: Etkin plak genişliği
$b_f$	: Stifnerflenç genişliği
$b_t$	: Enine kaynağın etki ettiği genişlik
D	: Plak eğilme rijitliği
du	: Eksenel yer değiştirme
e	: Gemi kirişi orta kesiti tarafsız eksenin dip taraftan mesafesi
E	: Elastisite modülü
F	: Airy gerilme fonksiyonu
GÇ	: Gemi İnşaat Çeliği
$h_w$	: Stifner gövde yüksekliği
I	: Atalet momenti
IACS-CSR	: Uluslararası Klas Kuruluşları Birliği - Genelgeçer Yapısal Kurallar
$I_{p-net}$	: Polar atalet momenti
ISFEM	: IntelligentSupersizeFinite Element Method
ISSC	: International ShipandOffshoreStructuresCongress
ISUM	: IdealizedStructureUnitMethod
$I_{T-net}$	: St.Venant atalet momenti
$I_{w-net}$	: Sektörel atalet momenti
k	: Burkulma sabiti
$K_i$	: Köşe eleman
L	: Plak uzunluğu
M	: Moment
N	: Eksenel kuvvet

$P_i$	: Tekil plak eleman
$PSB_i$	: Plak-stifner birleşimi eleman
$Q$	: Kesme kuvveti
$r$	: Atalet yarıçapı
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
$S_i$	: Tekil stifner eleman
$SP_i$	: Stifnerli panel eleman
SSC	: ShipStructuralCommittee
$t$	: Plak kalınlığı
$t_f$	: Stifnerflenç kalınlığı
$t_w$	: Stifner gövdesi kalınlığı
$u$	: Boyuna düzlem içi yer değiştirme
VLCC	: VeryLargeCrude Carrier
$W$	: Kesit modülü
$w$	: Zorlama altındaki sehım değeri
$W_{dip}$	: Dibe göre kesit modülü
$W_{güv}$	: Güverteye göre kesit modülü
YMC	: Yüksek Mukavemetli Çelik
$z$	: Başlangıç (ilkel) sehım değeri
$Z$	: Düzlem dışı yanal basınç
$\vartheta$	: Poisson oranı
$\Delta\kappa$	: Eğrilik artımı miktarı
$\beta$	: Plak narinlik oranı
$\varepsilon$	: Şekil değiştirme
$\varepsilon_{akma}$	: Akmanın başladığı şekil değiştirme
$\kappa$	: Eğrilik
$\kappa_{max}$	: Öngörülen maksimum eğrilik değeri
$\lambda$	: Stifner narinlik oranı
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma_{krp}$	: Yerel plak burkulmasının başladığı gerilme
$\sigma_{max}$	: Plak üzerindeki en büyük gerilme değeri

$\sigma_{müs}$	: Müsaade edilen gerilme
$\sigma_{ort}$	: Plak üzerindeki ortalama gerilme
$\sigma_{rcx}$	: Enine artık kaynak gerilmesi (bası)
$\sigma_{rcy}$	: Boyuna artık kaynak gerilmesi (bası)
$\sigma_{rtx}$	: Enine artık kaynak gerilmesi (çeki)
$\sigma_{rty}$	: Boyuna artık kaynak gerilmesi (çeki)
$\sigma_{v-m}$	: von-Mises eşdeğer gerilmesi
$\sigma_x$	: Boyuna mambran gerilme
$\sigma_y$	: Enine mambran gerilme
$\sigma_Y$	: Akmanın başladığı gerilme
$\sigma_{Yeş}$	: Eşdeğer akma gerilmesi

Not: Bu listede verilmeyen bazı semboller metin içerisinde ilgili yerlerde tanımlanmıştır.

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Gemiler ve diğer açık deniz yapıları, yapısal olarak tasarımı çok karmaşık olan ve maruz kaldıkları farklı türde yüklemeler (dalga kaynaklı yükler, hidrostatik basınç yükleri vb. gibi) nedeniyle diğer araçlardan ayrılan disiplinler arası yapılardır. Yapısal olarak farklı eleman tiplerine sahip olan ve doğrusal olmayan çizgiler taşıyan gemiler birer mühendislik harikasıdır. Teknolojinin gelişimine paralel olarak bu mühendislik harikası yapılar, ön tasarım hesaplarından seyre başlamalarına kadar geçen süreçteki tüm üretim aşamaları ile geçmişten günümüze sürekli araştırma ve inceleme konusu olmuştur. Çok basit yapısal elemanlar kullanılarak başlanılan gemi inşası, tecrübeler, araştırma ve geliştirmeler sonucunda daha karmaşık, daha dayanıklı, daha modern ve amaca en uygun yapıda inşa seviyesine ulaşmıştır. Bunun yanında üretim, yöntem ve sistemlerinin geliştirilmesiyle birlikte gemilerin denize indirilme süreleri kısalmış, güvenilirlikleri artmış ve üretim maliyetleri düşürülmüştür.

Gemileri oluşturan yapısal elemanlar, geminin, etkisi altında kaldığı yükler karşısındaki dayanımını ve ömrünü tayin etmesi açısından çok büyük öneme sahiptirler. Bu sebeple, genel anlamda 'mukavemet analizi' olarak tanımlanan, tüm tasarımın ve bu tasarımı oluşturan elemanların yapısal ve modal davranış (gerilme, burkulma, titreşim vb.) analizlerinin global ve yerel olarak yapılması gerekmektedir. Bu analizler yapılarak, dış etkilerden dolayı, yapıyı meydana getiren elemanlarda oluşan gerilmeler, şekil değiştirmeler ve yer değiştirmelerin elde edilmeleri gerekmektedir. Nihai amaç ise; elde edilen sonuçlar yardımı ile eleman boyutlarının kabul edilebilir seviyede emniyetli olacak şekilde belirlenmesidir.

Geleneksel gemi tasarımında gemiler ve bütününü oluşturan yapısal elemanların boyutlandırılması, farklı ülkelerin kendi klas kuruluşlarınca tecrübe ve testler sonucunda belirlenmiş ve tasarımın her aşamasında asgari ve/veya azami olarak sağlanmaları gereken ve/veya beklenen tasarım kuralları doğrultusunda yapılmaktadır. Fakat farklı gemi tipleri (tanker, kuru yük gemisi, konteyner vb.) ve dolayısı ile farklı yapısal tasarım gereklilikleri düşünüldüğünde söz konusu tasarım kuralları, farklı gemi tipleri için yeterli ayırım kriterlerine sahip değildir. Kabul edilen gerilme değeri ve enine kesit mukavemet

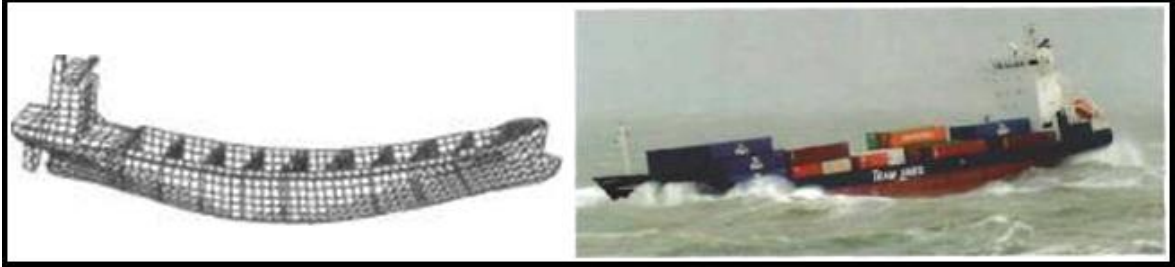
modülü kriterlerinin, yine ampirik formüllerle belirlenmiş tasarım yüklerine göre belirleniyor olmasında gemilerin emniyet ve ekonomiklik açılarından gerçek seviyelerinin belirlenememesine sebep olmaktadır. Basitleştirilmiş formüller sebebiyle, yetersizliğe karşı yeterlilik ölçütleri belirsiz kalmakta, yapısal yeterliliğin sağlanıp sağlanmadığı sağlıklı olarak belirlenememektedir. Böylelikle de gemilerin ömürleri süresince, tasarlandıkları üzere maruz kalacakları yüklemelerden daha aşırıları ile karşılaştıklarında, gemi bütününe, kırılmaya uğramadan önce, yapısal elemanlarla birlikte maksimum yük taşıma kapasiteleri dikkate alınmamakta ve belirlenememektedir. Bu hesaplamaların yapılabilmesi oldukça karmaşık ve kalabalık işlemler gerektirmekle beraber gerçek sonuçlara ulaşmak oldukça zordur. Bu durum göze alındığında geliştirilen yöntemler en gerçekçi sonucu elde etmeye yönelik olmaktadır.

Gemiler, tipik kutu kiriş yapılar olarak ele alındığında, gemi boyunca değişen ağırlık dağılımları, geminin suyun altında kalan kısmı ile ilgili deplasman hacmi kuvvetleri ve dalga yükleri sebebiyle boyuna düşey eğilme yüklerine maruz kalırlar. Bu yükler altında hareket eden bir gemide, hem enine hem de boyuna gerilme ile beraber şekil değiştirmeler meydana gelir. Bu gerilme ve şekil değiştirmelerden, geminin dayanıklılığı açısından önemli olanı ve genellikle analizlerde daha çok önem arz edenleri boyuna (geminin boyu doğrultusunda) olanlarıdır. Hareket halindeki bir deniz aracının, sakin veya dalgalı bir suda maruz kalacağı durumları tam anlamıyla modellemek oldukça güçtür. Malzeme ve geometride ortaya çıkan lineer olmayan problemlerin çözümünün, sonlu elemanlar yöntemi ile dahi tam olarak yapılması karmaşık, pahalı ve zaman alıcı işlemler gerektirir. Bunlar göz önüne alındığında, yapının maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında oluşan bu gerilme ve şekil değiştirmeleri belirlemek oldukça zordur.

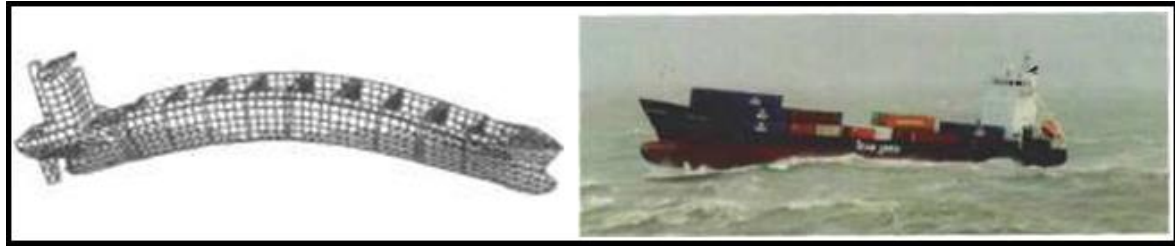
Söz konusu bu yüklerin ve etkilerinin analizlerini basite indirgemeyi amaçlayan bu doktora çalışmasında, gemi gövde kirişlerindeki eğilme momentinin belirlenmesinde, literatürde genellikle kullanılan statik dalga yükü durumu temel alınmıştır. Bu yöntemde genel olarak iki durum göz önüne alınır (Şekil 1.1 ve Şekil 1.2)

- Birincisi, sabit tasarım dalga çukurunun geminin ortasında olduğu ve ana güvertede bası gerilmelerine, dipte çeki gerilmelerine sebep olan 'çökme durumu',
- İkincisi ise tasarım dalga tepesinin gemi ortasında, dalga çukurlarının gemi baş ve kıçında olduğu, gemi dibinde bası gerilmelerine, ana güvertede çekme gerilmelerine sebep olan 'sarkma durumu' olarak tanımlanır.

Bu iki hal de göz önüne alınarak yapısal mukavemet analizi gerçekleştirilir ve her iki durum için de kritik değerler belirlenerek seyir sırasında ortaya çıkabilecek farklı deniz koşulları ve farklı yüklenmeler için yapısal eleman boyutları tayin edilir.



Şekil 1.1. Bir konteynır gemisinin orta kısmının dalga tepesinde kaldığı sarkma durumu (Huges, 1988)



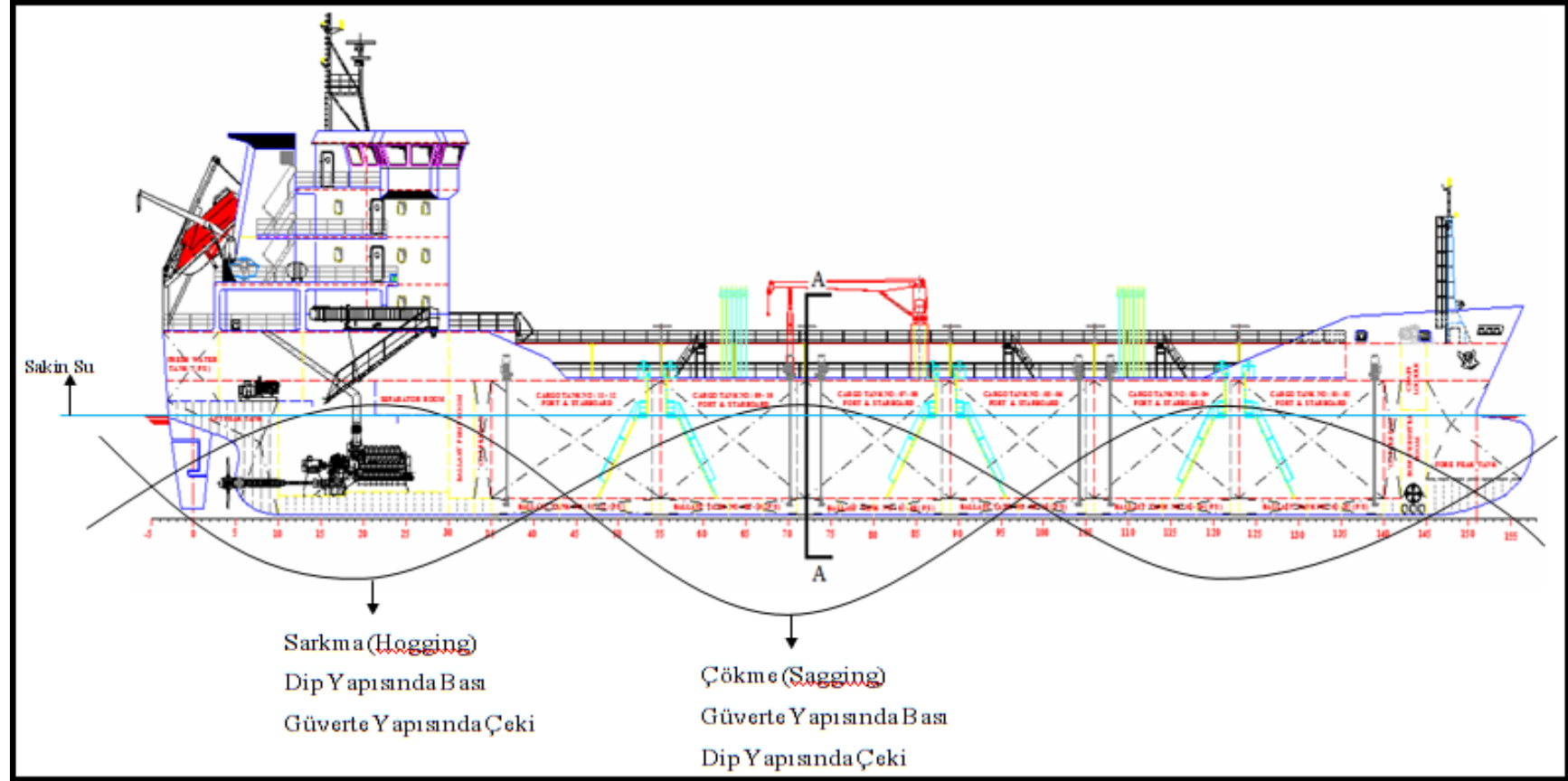
Şekil 1.2. Bir konteynır gemisinin orta kısmının dalga çukurunda kaldığı çökme durumu (Huges,1988)

Geleneksel olarak uygulanan kural tabanlı mukavemet analizinde temel olarak, geminin tipine göre üzerinde oluşacak yük dağılımı (çelik tekne, yakıt, kargo yükleri, kumanya, üst yapı vb.) aşağı doğru etki ederken, geminin deniz içerisine batan hacminden kaynaklanan deplasman kuvveti (sephiye yükleri) yukarıya doğru etki eder yaklaşımı kabul edilir. Bu yük farklarının gemi boyunca integre edilmesinden elde edilen kesme kuvvetleri dağılımı ve bu kesme kuvvetlerinin integre edilmesinden de elde edilen düşey eğilme momentleri dağılımı, geminin sakin suda, sarkma durumunda ve çökme durumunda olmak üzere üç farklı olası senaryo için belirlenir. Bu dağılımda elde edilen maksimum eğilme momenti değeri, gemi orta kesitinin ( $x=0,5L$ ; L: Gemi Boyu) yapısal elemanlarının düşey konumlarına ve kesit özelliklerine göre belirlenen yatay tarafsız eksen dikkate alınarak, güverteye göre ve dibe göre orta kesit mukavemet modülleri değerleri elde edilir. Bu değerler, kural kitaplarında önerilen minimum orta kesit mukavemet modülü değerini

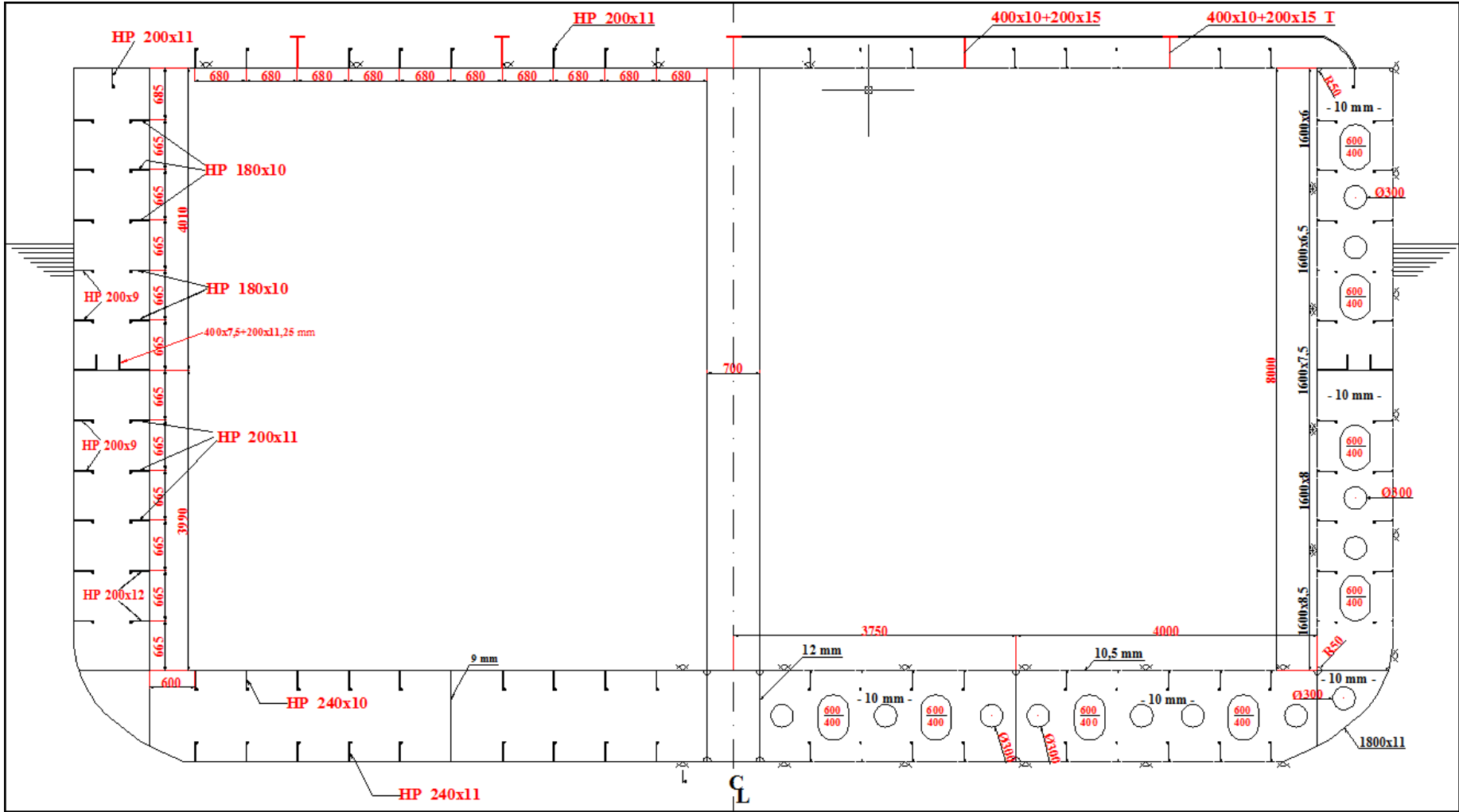
geçmeme şartı ile kullanılır. Kesitte izin verilen eğilme gerilmesi ( $\sigma = \frac{M_{\max}}{W} \leq \sigma_{\text{müs}}$ ), kural sınır değerini ( $175 \text{ N/mm}^2$ ) geçmeyecek şekilde eleman boyutları kontrolü ve gerekirse yeniden boyutlandırılması yapılır. Bu şekilde bir boyuna mukavemet hesabına, yalnızca gemi boyunca uzanan boyuna elemanlar dahil edilir (güverte sacı, dip sacı, boyuna dip postaları, borda boyuna postaları, güverte boyuna kemereleri, güverte altı tülaneleri vb.).

Pratikte daha gerçekçi bir senaryo düşünüldüğünde, geminin yapısal yük taşıma kapasitesini belirleyen farklı değişkenler de mevcuttur. Akma gerilmeleri ve elastisite modülleri gibi malzeme parametrelerinin değişkenlikleri, destek elemanları ve bağlandıkları plakların geometrik değişkenlikleri ile başlangıç sehimleri ve kaynak işleminin ardından oluşan artık gerilmeler gibi ilkel bozulmalardan kaynaklanan değişkenlikler de geminin mukavemet hesaplarında göz önüne alınması gereken belirleyicilerdir. Kural tabanlı yaklaşıma alternatif olan ve son yıllarda tasarım eğiliminin yönlendiği direk analize dayalı rasyonel yapısal tasarım yönteminde, yukarıda belirtilen tüm belirleyici faktörlerin de göz önüne alınması mümkün olmaktadır. Çeşitli kabuller ve idealleştirmeler ile basitleştirilmiş yöntemler geliştirerek, gemilerin yapısal olarak maksimum yük taşıma ya da enine kesitin taşıyabileceği maksimum eğilme momenti değerlerini daha doğru olarak belirlemek ve boyutlandırmanın bu değerler doğrultusunda yapılması amaçlanmaktadır.





Şekil 1.3. Örnek bir gemi yapısında çökme ve sarkma hallerinin şematik gösterimi



Şekil 1.4. Örnek bir geminin yapı elemanları ile birlikte orta kesit resmi (Şekil 1.3- A-A kesiti)

## 1.2. Limit Durumu Tasarım Yaklaşımı

Bir yapının veya yapısal elemanın, belirli yükler altında kendisinden beklenen dayanımı göstermediği, görevini yerine getirme kabiliyetini kaybetmesi hali, limit durumu olarak tanımlanır (Paik ve Thayamballi, 2003). Bu yaklaşımda, geleneksel kural tabanlı tasarımın aksine, sadece tasarım yüklerinden kaynaklı gerilmeleri değil, bu değerlerinde ötesinde, yapının görevini yerine getirmesine son verecek farklı şartlar ve belirleyiciler de hesaplamalara katılabilmektedir. Böylelikle tek eksenli akma, burkulma, göçme ve göçme sonrası gerçek yapı davranışları, yapılar çalışma ömrüne başlamadan tahmin edilebilmektedir. Yapının yük taşıma kapasitesi, bu yaklaşım temel alınarak, basitleştirilmiş tasarım formülasyonları veya geometri ve malzeme özelliklerinin, başlangıç bozukluklarının, sınır şartlarının, yüklemelerin ve ağ yapısının son derece doğru uygulandığı bir model oluşturularak, sonlu elemanlar yöntemi ile elasto-plastik büyük sehim analizigerçekleştirmek suretiyle belirlenebilmektedir. Bu yaklaşımda ele alınan dört farklı limit durumu aşağıda kısaca tanımlanmış ve bu çalışmada kullanacağımız limit durumu kısaca özetlenmiştir:

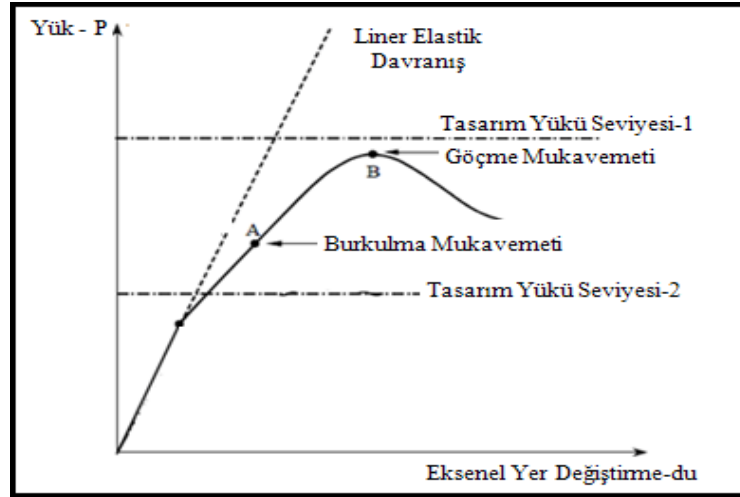
1. İş Görebilir Limit Durumu: Yapı elemanlarının elastik burkulması durumu dikkate alındığında, yapının dayanıklılığını azaltan yerel bozulmaların oluşumunu ve çoğunlukla yapıda estetik açıdan problem yaratan durumları belirleyen limit kriteridir. Örnek olarak, çok büyük güverte şekil değiştirmesi ve plağın elastik burkulması verilebilir.

2. Yorulma Limit Durumu: Yorulma limit durumu için iki tip yaklaşım kullanılır. Bunlardan ilki S-N eğrileri olarak bilinen, yükselen-düşen (dalgalı) gerilme değişimi ve bunun salınım sayısı eğrileri, diğeri de çatlak mekanizması yaklaşımıdır.

3. Kaza Limit Durumu: Kaza ihtimalleri karşısında oluşabilecek durumları (yapıda can kaybı, çevre kirliliği, maddi kayıp, yangın) önleyici yapısal tasarım kriterleri bu limit durumunu oluşturur.

4. Göçme Limit Durumu: Göçme limit durumunu sağlamak için gerekli yapısal tasarım kriteri, plastik kırılma veya göçme mukavemet değerlerine dayalıdır. Şekil 1.5’de görüleceği gibi gemilerin basitleştirilmiş göçme limit durumu tasarımları, bileşenlerinin burkulma mukavemetlerini, elastik burkulma mukavemeti değerlerine yapılan basit plastisite düzeltmesi ile belirleyerek yapılmaktadır. Fakat A noktasına göre yapılan tasarımda burkulma sonrası yapı davranışları ve etkileşimleri hesaba katılmadığından, çalışmamızda da kullanacağımız üzere, tahmini bir B noktasınıdoğru göçme mukavemet

değerini gösterdiği ve bu noktanın kesin değerinin belirlenmesiyle, gerçek emniyet sınırının belirleneceği yaklaşımı daha gerçekçi ve doğru bir boyutlandırma sağlamaktadır. Tasarım yükü seviyesi-2 olduğu zaman yapının emniyetli olduğu, fakat tasarım yükü seviyesi-1 olduğunda yapının kırılacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 1.5. Göçme limit durumuna göre yapısal tasarım yaklaşımı (Paik and Thayamballi, 2003)

Göçme Limit Durumları, yapıların ve bileşenlerinin, aşırı yükleme değerlerine veya bunların doğurduğu etkilere maruz kaldıklarında bozulma durumlarını ifade eder (Paik ve Thayamballi, 2003). Gemi ve diğer açık deniz yapıları için göçme limit durumu kriterleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yapı bileşenlerinin burkulmaları ve sonrasında kırılmaları
- Yapının maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmasından kaynaklanan bütün olarak yapısal mukavemet kaybı
- Yapı bileşenlerinin bireysel olarak burkulma, akma, yarıma, çatlama durumlarının kombinasyonu
- Aşırı su basması, şiddetli deniz koşulları altında su geçirmezliğin kaybolması
- Batma veya ters dönme gibi durumlarda oluşan statik denge kayıpları

### 1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tüm gemi gövdesinin göçme limit durumuna göre tasarımı için gemi gövde kirişinin maksimum boyuna eğilme mukavemetinin belirlenmesine ihtiyaç duyulur. Bu mukavemet değeri, gemi gövdesini oluşturan yapısal elemanların davranışlarına bağlıdır. Yapı elemanlarında oluşan bası gerilmeleri, gemi gövdesinin bütün olarak mukavemetinde belirleyici faktör olan kararsızlıkları arttırabilir. Bu nedenle elemanların aksel bası etkisindeki davranışları, gemi mukavemetinin hesaplanmasında göz önüne alınan en önemli unsurdur. Aksel bası etkisiyle oluşan dayanım kayıpları ve bozukluklar, gemi bünyesini oluşturan çoğu yapısal elemanların, göçme dağılımda maksimum yük taşıma kabiliyetlerini kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, fazla yükün komşu elemanlara kaymasına ve o elemanların da görevlerini yerine getirememesine sebep olur. Bu nedenle, ilk elemanda oluşacak bozulma, bir tetikleme mekanizmasının başlangıcı gibi davranır ve gemi gövdesinin tümünde artarak ilerleyen bozulmalara yol açar. Bu şekilde yapısal bileşenlerin bozulmalarının dikkate alınmasıyla yapılan hesaplama "Kademeli Göçme Analizi" adı verilmektedir (Huges ve Paik, 2010).

Tetikleme sonucu ilerleyerek artan gemi gövdesinin göçme olasılığı sebebiyle, geminin tasarım felsefesinde, basıya zorlanan önemli bir eleman, örneğin güverte yapısındaki kiriş-kolon (plak-stifner) birleşimi bir eleman, maksimum yük kapasitesine ulaştığında gemi gövdesinin göçme mukavemet değerine eriştiği kabulü yapılmaktadır (Faulkner, 1975). Fakat bu yaklaşım çok iyimser kalmaktadır. Çünkü derinlemesine düşünüldüğünde geminin göçme mukavemeti, örnek yerel elemanın göçme değerinin üzerinde olabilir. Bunun sebebi ise, farklı elemanların farklı mukavemetlik derecelerine sahip olmaları ve bu nedenle de, belli bir zamanda farklı gerilme değerlerine sahip olmalarıdır (Ostapenko, 1981).

Gemiler, elde olmayan nedenlerden veya öngörülemeyen sebeplerden ötürü zorlama kuvvetlerini karşılayamayarak yapısal bozulmaya, göçmeye uğrayabilir. Şekil 1.6 da 2010 yılında İstanbul Kilyos'ta şiddetli fırtına nedeniyle karaya oturan Moldova bayraklı 147 metre uzunluğundaki "Orçun C" isimli kuru yük gemisinin, orta kesitinin oluşan ek eğilme momentine karşı koyamaması nedeniyle ortadan kırıldığı durum görülmektedir.



Şekil 1.6. Orçun C Kuru Yük Gemisi (URL-1)

Geleneksel hesap yöntemlerinde, yapısal elemanlar bozulmaya başladıktan sonra sistemin kalan dayanımı için bir öngörüle bulunulmaz. Gerçekte ise bir yapı, yapısal bozulmaya başladıktan sonra tümüyle kopma/kırılma gerçekleşinceye kadar bir yük taşıma kapasitesi bulunur. Gemilerde yapısal bozulmalar genel olarak, plastik şekil değiştirme, burkulma, kopma ve yırtılma şeklinde olmaktadır. Herhangi bir nedenden ötürü yapısal bozulmaya başlayan geminin, yapısal bozulma sonrasındaki mukavemet değerinin bilinmesi, acil müdahale, kurtarma gibi ihtiyaç anında hayati önem arz etmektedir. Bu anlamda, dünyaca tanınan Titanic gemisinin, buz dağı ile çatışması sonrası su alan bölmelerinin oluşturduğu yüksek eğilme momentine karşı koyamamış olması ve ikiye ayrılması en bilinen orta kesit göçme örneğidir.



Şekil 1.7. Titanic yolcu gemisinin batık enkazı (URL-2)

Bu nedenle, gemi gövdesinin mukavemet davranışını belirlemenin doğru yolu, elemanlar arasındaki gerilme uyumluluğu ve kesit boyunca dengeyi sağlayacak şekilde ayrıntılı bir kesit analizi yürütmektir (Smith, 1977). Bu analizi yapabilmek için de gemi kesitini oluşturan tüm elemanların, yük altındaki davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple, gemi gövdesinin göçme mukavemetinin hesaplanmasında kullanılan yapı elemanlarının, burkulma öncesi, burkulma esnası, burkulma sonrası, göçme (göçme mukavemet) esnası ve göçme sonrası yük altındaki doğru davranışının belirlenmesi için güvenilir ve etkili yöntemlere ihtiyaç vardır.

Bu doğrultuda, bu çalışma kapsamında geliştirilecek çözüm aşamaları ile kullanılacak teorik yöntem ve yaklaşımlar, gemilerin dalga içerisinde düşey eğilme momenti etkisi altında, enine kesitlerinde meydana gelecek maksimum eğilme momenti değerine karşı oluşacak boyuna göçme mukavemet değerini, kesiti oluşturan yapı elemanlarının davranışlarını dikkate alarak, doğru bir şekilde tahmin edebilmek amacıyla analitik çözümlerinin kullanılacağı bir metodoloji geliştirmeye yönelik olacaktır.

#### **1.4. Göçme Mukavemeti Tahmini ve Kademeli Göçme Analizi Yaklaşımında Literatüre Bakış**

Genel bilgiler kısmında anlatıldığı gibi, gemilerin yapısal bozuklukları birkaç farklı sebepten kaynaklanmakta ve derecesi de estetik açıdan oluşan bozulmalardan gemilerin alabora olması veya batması gibi felaketlerle sonuçlanan göçme ve kırılmalara kadar değişmektedir. Uluslar arası Gemi Yapıları Kongresi'nin 1973 yılındaki toplantısında Tasarım Prosedürü Komitesinin raporuna göre 4 farklı bozulma mekanizması tanımlanmıştır.

- Malzemenin çeki veya bası etkisinde akması
- Burkulma (bası etkisiyle stabilite bozukluğu)
- Yorulma
- Gevrek kırılma

Bozulmanın son modu, yapısal elemandaki gerilmenin, üretildiği malzemede kalıcı plastik deformasyona sebep olan gerilme seviyesini aşması durumunda oluşur. Bu seviyeye “akma gerilmesi” adı verilmektedir. Akma seviyesinin daha üstünde bir noktada ise malzemenin kırıldığı / koptuğu “göçme” durumu oluşur.

Bası etkisinde bir yapısal elemanda stabilite bozukluğu malzeme akma gerilmesinden daha düşük bir gerilme seviyesinde olabilir. Burkulmanın olduğu bu durumdaki yük değeri malzemenin mukavemetinden çok elemanın geometrisi ve elastisite modulünün bir fonksiyonudur. Gemi yapılarında desteklenmiş plakların oluşturduğu panel elemanlar ile punteller bu etkiler altında burkulma davranışı sergileyen yapı bileşenleridir.

Gemi yapısı tasarlanırken deniz hareketlerinin veya diğer dış ve iç sebepler sonucunda yapısal elemanlarda oluşan gerilme ve sehimlerin büyüklüklerinin tahmin edilmesine dayalı analizler gerçekleştirilir. Lineer yapısal analiz prosedürünün dışında kalan lineer olmayan malzeme ve yapı davranışlarını içeren, yapıların göçme mukavemetleri ve bütünüyle göçme davranışlarını belirleyen çoğu bozulma mekanizması senaryosu bu analizlerin içeriğini oluşturur. Analizler gerçekleştirildikten sonra yapı elemanlarının yeterlilikleri bazı performans kriterleri ile karşılaştırılarak kontrol edilmelidir. Gemi yapılarının tasarımında geleneksel kriter olarak kabul edilebilir gerilme değerleri ile malzeme akma veya göçme mukavemet değerleri veya yapısal elemanın kritik burkulma yükünün karşılaştırılması kullanılmaktadır. Bu temel kriterler çeki etkisiyle akmanın veya bası etkisiyle burkulmanın önüne geçmek için kullanılırlar.

Bir gemi yapısında çok sayıda plak-stifner kombinasyonu panel elemanlar mevcuttur. Herhangi bir anda bu elemanların çoğu, elemanın gemideki yerlerine bağlı olarak değişen şiddetlerde bası yüklerine maruz kalırlar. Gemi gövdesinin aşırı yüklerle maruz kalması durumunda daha fazla bası etkisindeki elemanlarda burkulma veya plastik akma meydana gelir ve yüklenememe (yük taşıyamama) bölgesine girerler. Diğer taraftan taşınamayan bu yük bitişik sağlam elemanlara kayar. Daha sonra bu elemanlarda aşırı yüklenir ve yük taşıma kapasiteleri tükenir. Birbirine bağlı panellerin karmaşık zincirleme göçmesi ile yapının tümüyle göçmesi gerçekleşir. Buradan görüleceği gibi gemi gövdesinin göçme mukavemeti yapısını oluşturan panellerin göçme mukavemet karakteristiklerinin birleşimi olmaktadır.

Bu çalışmanın temel konusu olan göçme mukavemet ile ilgili araştırma ve analizlerin gemi gövdesi ve yapılarına ilk uygulamaları deneysel olarak yapılabildiği. Bunun nedeni ise, tekil olarak dahi basit analitik yöntemlerle göçme mukavemet analizleri yapılamayacak olan plak-stifner kombinasyonu panellerin, farklı geometrilerle, yükleme durumlarıyla ve sınır koşullarıyla gemi bütününe oluşturmaları ile ortaya çıkan yapının kapsamlı bir analitik çözümünün gerçekleştirilmesinin oldukça zor olmasıdır. Bu çalışmalardan en aydınlatıcı ve öğretici olanı, Vasta'nın (1958) yılında kullanılmayan gerçek gemiler



üzerinde, suyu boşaltılabilen havuz içerisinde balast değişimi ve havuz suyunu boşaltma işlemleri ile statik kuvvetler uygulayarak yaptığı testlerdir. Bu testler sonucunda, teknenin göçme eğilme momenti ile tekne kaplamasının bası kuvveti etkisindeki bileşenlerinin (plaklar, plak-stifner kombinasyonu paneller) burkulma mukavemetleri arasında yakın ilişki olduğunu beliremiştir. Buradan hareketle, boyuna posta sistemi ile inşa edilmiş teknelerde eğilme momenti limitinin, elastik kesit modülü ve kaplama levha panellerinin göçme gerilmelerinin bağılısı olarak ele alınması gerektiğini önermiştir.

Vasta'nın yaklaşımı bazı basitleştirmelerin ürünü olarak sunulmuştur. Bu yüzden yaklaşık sonuçlar vermekteydi. Bunun nedeni de, bası kuvvetleri etkisindeki dip ve güverte yapılarında bulunan boyuna kirişlerin burkulma mukavemetlerini veya tümüyle bir eğilme bozulması olması için bası kenarının tamamen burkulmasının ve çeki kenarının akmasının ikisinin birden muhakkak olması gerektiği hesaba katılmamış olmasıdır. Tüm bu etkileri hesaba katarak ve gemi ortası enine kesiti elemanları ile malzeme özelliklerini kullanarak gemi gövde kirişi göçme eğilme momentini teorik olarak hesaplamak için Caldwell (1965) bir çalışma gerçekleştirmiştir. Başlangıç olarak basit ve ideal bir durumda tek güverteli bir geminin orta enine kesitinin, burkulma davranışlarını hesaba katmadan, eğilme bozulmasının yalnızca malzemenin akması nedeniyle oluştuğunu kabul ederek, kesit geometrisi ve göçme dayanım momenti ile ilgili basit formülasyonlar ortaya koymuştur. Ardından yöntemini ilerletip daha gerçek bir durum ele alarak eğilme bozulmasının, yapının bası etkisi altındaki bileşenlerinin burkulmalarının etkisi ile oluştuğu göz önüne alınmıştır. Gerçek emniyet aralığının göçme eğilme momenti ile geminin seyir ömrü boyunca maruz kaldığı maksimum eğilme momenti arasındaki fark olduğunu öne sürmüştür. Faulkner (1974) ise Caldwell'in önerisine olan katkı çalışmasında önerilen burkulma mukavemeti faktörlerinin belirlenmesinde zorluk çıkaran durumları ve bunların etkilerini vurgulamış ve asıl olarak da boyuna kenarından bası etkisi altındaki boyuna desteklenmiş plakların önerilen yöntemle incelenmesini göz önüne almıştır.

Ueda ve Rashed (1975) büyük boyutlu yapıların lineer olmayan bozulma analizleri için İdealleştirilmiş Yapısal Elemanlar Yöntemi (ISUM) olarak adlandırılan etkin bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde yapı, lineer olmayan geometrik ve malzeme davranışları idealleştirilmiş çeşitli büyüklükte yapısal birimlerin birleşiminden (desteklenmiş paneller vb.) oluşacak şekilde modellenir. Böylece, ISUM'da toplam eleman ve düğüm noktası sayısı SEY (FEM)'den çok daha az olacaktır.

Smith (1977) ile Dow ve diğerleri (1981) lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gemi gövdesinin göçme mukavemetinin yaklaşık sayısal analizlerini yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda, ilk olarak gemi enine kesiti, plaklar ve üzerilerine eklenmiş stifnerlerden oluşan panellere ayrılmışlardır. Her bir panel için yük-kısalma eğrileri yaklaşık olarak oluşturulmuştur. Bu eğriler birkaç farklı method ile elde edilebilir. Bunlar, deneysel verilerin kullanılması, her bir panel için lineer olmayan sonlu elemanlar analizleri ve bozulma bölgesine giren elemanlar için geniş genlikli sehim davranışlarını tanımlayabilen bir veya birden fazla analitik formülasyonlar kullanılmasıdır. Tüm bu alt bileşen elemanlar uygun bir şekilde bir araya toplanarak geminin orta kesit kısmı meydana getirilir. Burkulmanın birincil bozulma modu olarak beklenmediği yapının güverte-dış kaplama ve perde-dış kaplama kesişimi kısımlarını temsil etmek için son derece yüksek burkulma dayanımı ortaya koyan sert köşe elemanları belirlenmeye çalışılır. Ardından sehim oluştuktan sonra enine kesitlerin başlangıç düzleminin düzlem kalacağı ve sadece kabul edilen bir tarafsız eksene göre dönme olacağı kabulü ile gövde artımsal olarak eğilme sehimlerine maruz bırakılır. Bu dönmeden sonra, her bir boyuna elemanın kabul edilen tarafsız eksenin pozisyonuna tekabül eden şekil değiştirmeleri belirlenir. Her eleman için gerilme-şekil değiştirme eğrileri referans alınarak gerilme ve eleman üzerindeki yük değeri belirlenir. Daha sonra, yükler ve momentleri enine kesiti oluşturan tüm elemanlar üzerinde toplanır. Boyuna kuvvet dengesi için toplam yük sıfır ve toplam moment söz konusu kesitin dış gövde eğilme momentine eşit olmalıdır. Elemanların lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışları sebebiyle tarafsız eksen genellikle orta kesitin geometrik merkezinde olmaz. Bu sebeple, boyuna kuvvetlerin dengesini oluşturacak tarafsız eksenin yerini belirlemek için açısız sehim değerinin her artımında deneme yanılma yöntemi uygulanır. Bu şekilde bir denge durumu sağlandığında bir elemandaki boyuna kuvvetlerin momenti hesaplanabilir.

Nishihara (1984) diğer yöntemlerden farklı olarak başlangıç tasarım aşamalarında da kullanılabilecek bir yöntem geliştirmeyi hedefleyerek, ilk olarak gemi yapısının dip ve güverte panellerinin göçme bası mukavemetlerini hesaplamak için basitleştirilmiş bir analitik yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemi, bası yüklerine ve yanal basınca maruz kalan desteklenmiş plakların (panellerin) incelenmesinde uygulamıştır. Daha sonra önerilen analitik çözüm sonuçlarının geçerliliği deneysel sonuçlarla kontrol edilmiştir. İkinci olarak, enine kesiti oluşturan yapı elemanlarının göçme mukavemetlerini hesaplamak için önerdiği yönteme dayalı olarak yaptığı parametrik çalışma ile iki yaklaşık formülasyon

geliştirmiştir. Son olarak, enine kesitin bütün olarak göçme eğilme mukavemeti analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, geliştirilen yaklaşık formülasyonlar kullanılarak yaklaşık hesaplama yöntemi geliştirilmiş ve teorik eğilme momentleri altındaki gemi kutu kirişleri kullanılarak yapılan testlerin sonuçları ile önerilen yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Yang (1990), yaptığı doktora çalışmasında, düşey eğilme momenti altındaki gemi gövdesinin göçme mukavemetini incelemiştir. İki gemi gövdesinin büyük ölçekli modelleri inşa edilerek, göçme olana kadar moment arttırılarak lineer ve lineer olmayan bölgelerde testler yapılmıştır. Stifnerler arasındaki plak burkulması, boyuna stifnerlerin stabilite bozuklukları ve tüm ızgara stabilite bozukluğu gibi bozulma modları, bası yükleri altındaki farklı gemi enine kesit elemanlarının mukavemetlerinin yaklaşık karakterizasyonuna dayanılarak analitik olarak incelenmiştir.

Valsgaard ve Steen (1991) çalışmalarında, önemli klaslama kuruluşlarının kendilerine özgü gemi tasarım çalışmalarında kullandıkları gemi kirişi göçme mukavemet aralıklarının göstergeleri sunulmuştur. Referans olarak Norveç klas kuruluşu kullanılmıştır. Gemi kirişinin göçme mukavemetini kontrol eden bozulma modları irdelenmiş, lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi uygulamalarındaki son gelişmeler sunulmuş ve bu yöntemin uygulanmasında karşılaşılan güçlüklerin altı çizilmiştir.

Dow (1991), eğilme yüklerine maruz kalan tipik bir savaş gemisi gövde yapısını temsilen 1/3 ölçekli çelik bir fırkateyn modelinin testlerini gerçekleştirmiş ve sonuçlarını teorik mukavemet tahminleri ile karşılaştırarak öneriler sunmuştur.

Yao ve Nikolov (1991), güvenlik ve ekonomiklik açısından bir gemi gövdesinin yük taşıma kapasitesinin gerçekçi bir şekilde belirlenmesinin önem arz ettiği düşüncesiyle, boyuna eğilmeye maruz kalan gemi gövdesinin kademeli göçme davranışını temsil edecek basit bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem Caldwell ve Smith'in önerdiği yöntemi temel almaktadır. Buna göre, gemi kirişinin enine kesiti stifner ve bağlı olduğu levhadan oluşan alt eleman gruplarına ayrılmıştır. Tüm stifner elemanlar için yalnızca eksenel kuvvetler (gerçek durumda dip kaplamadaki yanal kuvvetler ile borda kaplamasındaki kesme kuvvetleri de oluşmaktadır.) dikkate alınarak ortalama gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, kuvvet ve momentlerin denge durumları için türetilmiştir. Ayrıca, bu yöntem HULLST bilgisayar yazılımına uygulanmıştır.

Yao ve Nikolov (1992), ilk çalışmalarının devamı olarak yaptıkları çalışmada, stifner elemanların burkulma davranışlarını inceledikleri yöntemlerini geliştirerek, plak üzerine

kaynaklı köşebent stifnerlerin davranışlarını incelemişlerdir. Birkaç seri büyük sehim analizi gerçekleştirilmiş ve yöntemlerinin geçerliliğini kontrol etmişlerdir. Böylece göçme sonrasında stifnerlerin ve aynı zamanda tüm enine kesitin yük taşıma kapasitelerinin oldukça azalacağı belirlenmiştir. Loyd klasına göre kabul edilebilir eğilme momenti hesaplanmış ve göçmeye kadarki rezerv mukavemet değerinin bu eğilme momenti değerinden %22.4 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Paik (1993), çalışmasında yaşlı yük gemilerinin gövde göçmeleri sebebiyle batma ihtimallerini araştırmıştır. Boyuna eğilme ve kesme kuvvetlerinin birleşik etkisi altında gövde göçmesi ile ilgili yapısal performans değerlendirmesi için bir prosedür oluşturulmuş ve bu kapsamda gövde göçme mukavemeti etkileşimlerinin ve uygulanan aşırı yük değerlerinin tahmin edilebildiği bir yöntem geliştirilmiştir.

Sherbourne ve Bedair (1993) çalışmalarında, enerji yöntemini kullanarak modellenen çeşitli düzlem içi ve düzlem dışı sınır koşulları durumlarında düzgün aksenal bası kuvvetleri altında plak-stifner birleşimlerinin burkulma sonrası davranışlarını incelemişlerdir. Yüklü kenarlar basit mesnetlenmiş ve düz kalacak şekilde alınmıştır. Yüksüz kenarlar da basit mesnetlenmiş veya dönmeye karşı elastik olarak sınırlandırılmış olarak alınmıştır. Bu şekilde düzlem dışı sınır koşullarının yanında, yüksüz kenarlar için düzlem içi sınır koşulları, serbest ötelenme, ötelenmelere karşı tamamen sınırlandırılması, düz, serbest eğilme ve düzlem içi eğilmeye karşı bir kısmından sınırlandırılması gibi düzlem içi sınır koşullarından birisi de hesaba katılmıştır.

Pang (1994) hazırladığı doktora çalışmasında, çift gövdeli gemilerin panel ve kutu bileşenlerinin aksenal ve yatay yükler altındaki davranışlarını ve göçme mukavemetlerini incelemişlerdir.

Alagusundaramoorthy ve diğerleri (1995) çalışmalarında, kare şeklinde açıklığa sahip ve imalattan kaynaklı başlangıç kusurları olan basit mesnetli desteklenmiş plakların tek aksenal bası etkisindeki göçme mukavemetlerinin kiriş yaklaşımına dayalı olarak tahmin edilmeleri için yaklaşık bir yöntem geliştirmişlerdir. Etkin genişlik kavramı kullanılarak stifnerler arasındaki plakların rijitliklerindeki azalma göz önüne alınmıştır. Farklı plak narinlik oranı ve kolon narinlik oranı değerleri ile kaynaklı desteklenmiş çelik levhaların testleri yapılmış ve sonuçları sunulmuştur. Deneysel çalışma sonuçları ve önerilen yöntemin sonuçları ile kare açıklıkların, stifnerler arası genişlik boyunca, desteklenmiş plakların göçme mukavemetlerine etkileri irdelenmiştir.

Ueda ve diğeri (1995), çalışmalarında düzlem içi çift eksenli bası kuvvetleri ile kesme kuvvetlerinin kombinasyonları etkisindeki plak ve desteklenmiş panellerde burkulma ve göçme mukavemet etkileşimlerini incelemiştir. Tamamen düz plaklar ve tek eksenli desteklenmiş panellerin düzlem içi yükler altında, burkulma yükü, göçme mukavemet değerleri böylelikle el ile hesaplanabilmiştir.

Li ve diğeri (1996) çalışmalarında, desteklenmiş panellerin analizinde kullanılan sonlu elemanlar yönteminde ağ örgüsü (mesh) uyarlama iyileştirmesi için bir yöntem geliştirmiştir. Buna göre ağ örgüsünün boyutunun belirlenmesi için etkin uyarlama stratejileri geliştirmek amacıyla hata yoğunluğu kavramı tanımlanmıştır. Yöntemin avantajlarını ortaya koymak için yapılan örnekler sunulmuştur.

Louca ve Harding (1996) çalışmalarında boyuna desteklenmiş levhalarda stifnerlerin burulmalı burkulmasını incelemiştir. Çalışmada, eksenel yükleme altındaki boyuna desteklenmiş plaklarda düz bar stifnerlerin burulma davranışlarını lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Stifnerler hem plağın bir parçası hem de ayrı olarak ele alınıp modellenmiş ve plak narinliği, stifner narinliği ve sınır koşullarının etkileri araştırılmıştır.

Soh ve diğeri (1996) çalışmalarında, sonlu elemanlar yöntemi ile desteklenmiş panellerin davranışlarının incelenmesinde geniş sehim elasto-plastik sonlu eleman analizi için basitleştirilmiş bir plak eleman geliştirmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan yapısal analizlerde her zaman birçok sayıda levha eleman kullanmak gerekliliğinin önüne geçebilmek için tek boyutlu levha eleman geliştirmişler ve uygulamalarını yaparak sonuçları sunmuşlardır.

Shanmugam ve Arockiasamy (1996), açık deniz yapılarında desteklenmiş plakların yerel burkulması çalışmalarında, eksenel ve yanal yüklerin kombinasyonu etkisindeki, dört kenarından basit mesnetli desteklenmiş plakların göçme mukavemet testlerini gerçekleştirmişler ve sonuçlarını sunmuşlardır. Farklı eksenel ve yanal yüklerin kombinasyonları etkisinde bir dizi bozulma testi, farklı iki plak narinlik değeri için 10 adet desteklenmiş plağa uygulanmıştır.

Paik ve Pedersen (1996) çalışmalarında, kaynak işleminden kaynaklanan artık gerilme ve imalattan kaynaklı başlangıç kusurlarına sahip plakların göçme mukavemet tahminleri için bir yöntem geliştirmiştir. Buna göre, yük-sehim eğrisinin ilk kısmı elastik büyük-sehim teorisi ile belirlenirken, göçme değer sonrası kısmı ise ideal rijit plastiklik mekanizması kullanılarak belirlenmiştir. 33 adet plağın elasto-plastik sonlu

elamanlar analizi sonuçları ile önerilen yöntem sonuçlarını karşılaştırarak uyumlarını göstermiştir.

Bedair (1997), matematiksel programlama tekniklerinin levha-stifner birleşmelerinin stabilite analizlerinde uygulanması ile ilgili çalışmasında, düzlem içi kombine yükler altındaki çoklu desteklenmiş plakların stabilite analizleri için matematiksel programlama teknikleri uygulanmıştır. İlk olarak, yapının analizi için literatürde kullanılan sayısal yöntemlerin incelenmesinin ardından, problemin matematiksel formülasyonu ortaya konulmuştur.

Jiang ve diğerleri (1997), desteklenmiş ve desteklenmemiş ortotropik plakların sonlu elemanlar modeli üzerine yaptıkları çalışmada üç farklı ortogonal ve dikdörtgen plak için (desteklenmemiş, sandwich ve şapka stifner ile desteklenmiş) eğilme ve burkulma davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Birinci derece kabuk elemanlar ile birinci ve ikinci derece üç boyutlu katı elemanlar kullanılarak plakların kritik burkulma yükleri, çökme ve gerilme değerleri için sistematik hesaplamalar yapılmıştır.

Wang ve Moan (1997), çift eksenli ve yanal yükler altındaki gemi yapısı desteklenmiş levhaların göçme mukavemet analizleri ile ilgili çalışmalarında, gemi ve açık deniz yapıları için kullanılan kuralların içerisinde bulunan kiriş-kolon yaklaşımını belirlemeyi amaçlamışlardır. Bir açık deniz petrol çıkarma gemisi orta kesitinden örnek olarak bir dip ve bir de güverte levhası ele alınarak lineer olmayan sonlu eleman analizleri yapılmış ve başlangıç hataları da hesaba katılarak göçme boyuna bası mukavemetleri hesaplanmıştır.

Li ve Bettess (1997) desteklenmiş plakların burkulması ve stifner tasarımı ile ilgili çalışmalarında, rastgele sayıda boyuna ve enine stifnerlerle desteklenmiş, basit mesnetli dikdörtgen plakların kritik bozulma gerilmelerinin kapalı formda çözümlerini sunmuşlardır.

Cameron ve diğerleri (1997), Amerika Sahil Güvenlik Denizde Emniyet Merkezi tarafından yürütülen proje kapsamında, açık deniz tank dubalarının sıklıkla batmalarının nedenlerini araştırma anlamında dubalarda yapısal burkulma davranışlarını araştırmışlardır. Boyuna postalanmış güverte yapılarının bası mukavemetlerini tahmin edebilmek için mevcut çeşitli yöntemler incelenmiştir. Owen F. Hughes'in önerdiği yöntem seçilerek dubanın göçme mukavemetinin belirlenmesine çalışılmıştır. Ayrıca gemi yapılarının analizi için kullanılan MAESTRO programı ile de analizler yapılmış ve uyumluluk kaydedilmiştir.

Grondin ve diğeri (1999), desteklenmiş çelik plakların burkulması ile ilgili parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Model kullanılarak çeşitli parametreler için analizler yapılmıştır. Bu parametreler, plaktaki imalat hatalarının şekil ve büyüklükleri, artık gerilme büyüklüğü ve uygulanan düzgün eğilmenin yönü, plak narinlik oranı, plak en-boy oranı ve plak-stifner enine kesit alanları oranı değerleridir. Elastik ve elastik olmayan bölgede, incelenen parametrelerin aksenal yük taşıma kapasitesine etkileri ve desteklenmiş plakların bozulma modları araştırılmıştır.

Shin (1999) çalışmasında, burkulma sonrası yükleme aralığında burkulan parçadaki değişimi dikkate alarak, düzlem içi bası yükleri altındaki desteklenmiş dikdörtgen izotropik plakların burkulma sonrası davranışlarını incelemiştir. Sonlu deformasyon şekil değiştirmeleri, von Karman yaklaşımı ile geometrik lineer olmayan burkulma sonrası analizler ile birleştirilmiştir. Düzlem içi ve düzlem dışı yer değiştirmeler kesik Fourier serisi olarak kabul edilmiş ve minimum potansiyel enerji prensibi uygulanmıştır. Toplam potansiyel enerjinin, levhanın eğilmesi ve membran hareketleri ile stifnerlerin burkulması nedenleriyle şekil değiştirme enerjisi ve dış bası yüklerinin yaptığı işten oluşmakta olduğu ortaya konulmuştur.

Fujikubo ve Yao (1999), çalışmalarında plak/stifner etkileşimleri ve kaynak artık gerilmelerini hesaba katarak desteklenmiş plakların elastik yerel burkulma mukavemetlerini incelemiştir. Gerçek gemilerin dip ve güverte yapılarında önerilen formülasyon kullanılarak burkulma mukavemeti analizleri yapılmış ve sonuç olarak;

1. Alışılacak desteklenmiş gemi panellerinde, stifner burulma rijitliğinin bir sonucu olarak elastik yerel burkulma mukavemetinde bir artışın, kaynak sonrası artık gerilmeler ile dengelendiği,
2. Enine bası etkisindeki ince plak için, uygun stifner boyutunun seçilerek, klaslama kuruluşunun kurallarında belirtilen değerden daha yüksek elastik burkulma mukavemeti değeri beklenebileceği belirlenmiştir.

Paik ve diğeri (1999) çalışmalarında tek eksenli bası etkisindeki desteklenmiş panellerin göçme bası mukavemetleri ve etkin kaplamasının belirlenmesi için analitik bir method geliştirmişlerdir. Desteklenmiş panelleri temsilen stifner-plak birleşimleri kullanılarak davranışları araştırılmıştır. Plak kaynaklı bozulma, stifner kaynaklı bozulma ve stifner örgüsündeki yerel burkulmalar gibi üç farklı göçme modu ele alınmıştır. Çalışmadaki teorik yöntem sonuçları ile mevcut deneysel sonuçlar karşılaştırılarak geçerlilik kontrol edilmiştir. Desteklenmiş panellerde plak-stifner kombinasyonunun etkin

enine kesit alanlarını daha doğru bir şekilde belirlemek için iyileştirilmiş yeni bir prosedür, çalışma esnasında geliştirilmiş, sunulmuş ve kullanılmıştır.

Yao ve diğerleri (2000), yerel basınç yüklerinin de hesaba katılmasıyla boyuna eğilmeye maruz kalan gemi gövde kirişinin kademeli göçme analizi ile ilgili çalışmalarında Yao tarafından geliştirilen boyuna eğilmeye maruz kalan gemi gövde kirişlerinin aşamalı göçme analizleri için geliştirdiği yöntemde yerel basınç yüklerini de dahil etmişlerdir. Bu analitik prosedür, plak ve stifnerler için sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan hesaplamaların sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilmiş formülasyonlar HULLST bilgisayar programında uygulanmış ve düzenlenmiş yeni kod MV Energy Concentration gemisinin göçme gövde kirişi mukavemeti ve göçme davranışı analizlerinde kullanılmıştır.

Paik ve diğerleri (2000), gemi yapısı panellerinin burkulma sonrası ve göçme mukavemetleri üzerine inceleme yapmışlardır. Gemi yapısı panellerinin (kaplama levhası ve diğer destek elemanlar) davranışları birkaç etken faktöre bağlıdır. Bunlar geometrik özellikler ve malzeme özellikleri, yükleme karakteristikleri, başlangıç hataları (imalat hataları), sınır koşulları ve korozyon, yorulma kırılması ve kazasal çökmelerden kaynaklı bozulmalardır. Bütün bu faktörleri içine alarak hesaplamalar yapmak ve ileri burkulma ve göçme mukavemet tasarımı elde etmek için mevcut idealleştirilmiş metodlardan çok daha gerçekçi ve kompleks yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Paik ve diğerleri (2001) burulma altındaki gemi gövdesinin göçme mukavemeti ile ilgili çalışmalarında, konteyner gemileri ve bazı büyük yük gemileri gibi geniş ambar ağızlarına sahip gemilerde, çarpılma gerilmelerinin ve ambar açıklığı deformasyonlarının, bu gemilerin yapısal analizlerinin önemli kısmını oluşturması ve bu analizlerin geniş ambar açıklıklarına sahip gemilerin göçme burulma mukavemeti karakteristiklerini daha iyi belirlemek için önem arz ettiği düşüncesiyle, geniş ambar açıklığına sahip gemilerde burulma mukavemeti karakteristiklerini belirlemeyi hedeflemişlerdir. Burulmaya maruz kalan ince duvarlı açık enine kesitli kirişlerin kayma gerilmeleri ve eksenel çarpılma gerilmeleri için formülasyonlar geliştirilmiştir. Bu gerilmeleri hesaplamak için kullanılan prosedür anlatılmıştır. Uygulamalı bir örnek için, burulma etkisindeki tipik bir konteyner gemisi enine kesitinde, çarpılma ve kayma gerilmelerinin büyüklükleri ve dağılımları önerilen prosedür ile belirlenmiştir. Teorik ve sayısal analizler sonucunda, burulma kaynaklı kayma gerilmelerinin gemi gövdesi göçme eğilme momentini azaltmasına karşın,



burulma kaynaklı çarpılma gerilmelerinin, sünek gövde malzemeleri için, gemi kirişi göçme eğilme mukavemeti üzerindeki etkisinin küçük olduğu belirlenmiştir.

Zha ve Moan (2001), ağırlıklı olarak burulma bozulması altındaki alüminyum desteklenmiş panellerin göçme mukavemetleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarının amacı, düz bar stifnerlerle desteklenmiş alüminyum panellerin burulma burkulması ve ayrılma bozulması durumlarındaki göçme mukavemetlerini araştırmaktır. İki farklı alüminyum alaşımından yapılmış paneller, farklı düz bar stifner yükseklikleri ile farklı plak ve stifner kalınlıklarında, deneysel ve teorik olarak analiz edilmişlerdir.

Paik ve diğerleri (2001) çalışmalarında gemi panellerinin göçme mukavemetlerinin tasarım formülasyonları için mevcut yöntemlerden daha ileri düzey bir denklem elde etmeyi amaçlamışlardır. Boyuna çeki ve bası, enine çeki ve bası, kenar kesme kuvveti ve yanal basınç olmak üzere, plak göçme mukavemetini etkileyen dört farklı yük ve kombinasyonları hesaba katılmıştır. Kaynak sonrası artık gerilmeler ve imalat hataları da dikkate alınarak geliştirilen yeni formülasyonlar daha gerçekçi ve ileri düzeydir. Daha önce belirlendiği gibi, tekil bir göçme mukavemet etkileşim formülasyonu, tüm olası yük bileşenlerinin kombinasyonu altındaki uzun ve/veya geniş panellerin göçme limit durumlarını belirlemede yeterli olmamaktadır. Bu tip panellerin göçme davranışları çoklu yük bileşenlerine bağlıdır ve bu da daha gerçekçi bir göçme limit durumu belirlemek için birden fazla göçme mukavemet formülasyonu gerektirmektedir.

Belenkiy ve Raskin (2001) çalışmalarında, çoğunlukla yanal yükler altındaki tipik gemi yapılarının, özellikle kirişler, ızgara sistemler ve plakların plastik davranışlarını incelemişlerdir. Kirişlerin, desteklenmiş plakların ve ızgara sistemlerin analitik hesap sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları arasındaki ilişkiler belirlenmiş ve teorik limit analizinden elde edilen göçme yüklerin, yanal basınç etkisindeki desteklenmiş gemi yapılarının mukavemet tahminlerinde kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Hu ve diğerleri (2001) bir yük gemisinin göçme boyuna mukavemeti konusundaki çalışmalarında basitleştirilmiş yöntemi kullanmışlardır. İlk olarak Smith tarafından önerilen ve sonraki yıllarda konu ile ilgili çalışmalar yapan akademisyenler tarafından geliştirilen ve uygulanan yöntemi kullanarak, bir yük gemisinin göçme mukavemetini analiz etmişlerdir. Yöntem gereğince ilk olarak düşey eğilme göz önüne alınmıştır. Moment-eğilme eğrileri, göçme boyuna eğilme momentleri ve göçme durumda anlık tarafsız eksen yeri, sarkma ve bel verme halleri için düşey eğilme durumuna göre elde edilmiştir. Göçme mukavemet durumunda enine kesit üzerindeki gerilme dağılımı elde

edilmiş ve irdelenmiştir. Daha sonra, düşey ve yatay eğilme momentleri birlikte ele alınarak göçme mukavemet incelenmiştir. Farklı eğrilik açılarında, eğilmeye maruz kalan gemi gövde kirişi için bir dizi hesaplama sonuçlarına göre bir etkileşim eğrisi çıkarılmıştır. Bu eğrinin karakteristiği örnek yük gemisinin gövde yapısının karakteristikleri ile karşılaştırılarak sonuçlar irdelenmiştir. Sonuç olarak yük gemileri için etkileşim denklemi elde edilmiştir.

Byklum ve Amdahl (2002), alüminyum ve çelik desteklenmiş panellerin lineer olmayan burkulma analizleri ve göçme mukavemet tahminleri konulu çalışmalarında, desteklenmiş panellerin burkulma ve burkulma sonrası analizleri için hesaplamalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Dönmeler trigonometrik fonksiyonlar ile temsil edilmektedir. Ayrıca minimum potansiyel enerji yaklaşımı kullanılmıştır. Minimum potansiyel enerji Rayleigh-Ritz methodu kullanılarak formülize edilmiştir. Büyük sehim levha teorisi ile geometrik lineer olmama durumları hesaba katılmıştır.

Paik ve Kim (2002) eksenel yükler, düzlem içi eğilme ve yanal basınç kombinasyonu etkisindeki desteklenmiş paneller için göçme mukavemet formülasyonları karşılaştırmalı değerlendirme çalışması sonucunda belirlenmiştir. Desteklenmiş bu paneller için ileri düzey göçme mukavemet formülasyonları elde edilmiştir. Desteklenmiş panellerin göçme modları 6 sınıfa ayrılmıştır. Desteklenmiş panel göçmesinin, her bir göçme modu için hesaplanan göçme yükler arasından en küçük olanında gerçekleştiği kabul edilmiştir. Kaynak sonrası imalat hataları ve artık gerilmeler hesaba katılmıştır.

Lee ve diğerleri (2002) negatif moment etkisi altındaki (sarkma) çelik kutu kirişlerin göçme eğilme momentleri ile ilgili çalışmalarında, 4 tarafından basit mesnetli dikdörtgen plakların burkulduktan sonra narinlik oranlarına bağlı olarak, dikkate değer miktarda burkulma sonrası mukavemete sahip oldukları düşüncesinden hareketle, bası etkisi altında desteklenmiş ve desteklenmemiş plakların burkulma sonrası kapasiteleri, geometrik ve malzeme lineer olmama durumları dikkate alınarak lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir.

Toulios ve Caridis (2002) tek eksenli kenar bası yüküne maruz kalan desteklenmiş plakların elastoplastik dayanımları üzerinde en-boy oranının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, düz bar stifnerlerle desteklenmiş plakların burkulma ve göçme davranışlarında plak en-boy oranının etkilerini irdelemişlerdir.

Fujikubo ve Kaeding (2002) desteklenmiş plakların göçme analizleri için basitleştirilmiş yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşım, ideal yapısal birimler yöntemi

(ISUM) çerçevesinde hazırlanmıştır. İdealleştirilmiş malzeme ve geometrik lineer olmama durumu ile geleneksel sonlu elemanlar yöntemindekinden daha büyük yapısal birimler tanımlanmıştır. Önerilen desteklenmiş panel ISUM plak elemanları ve kiriş-kolon elemanlarından oluşmaktadır. Plak elemanların formülasyonları, plak panellerinin burkulma/plastik göçme davranışlarını doğru temsil edecek şekilde tanımlanarak oluşturulmuştur. Plak ve kiriş-kolon elemanların birleştirilmesi, hem plak panellerin yerel burkulmalarını hem de stifnerlerin tümüyle burkulmasını inceleme imkânı sağlamıştır.

Alagusundaramoorthy ve diğerleri (2003), başlangıç bozulmaları ile birlikte desteklenmiş plakların stabilitesi üzerinde çalışmışlardır. Plak narinlik oranı ve kolon narinlik oranının, bası yükü altındaki basit mesnetli desteklenmiş plakların başlangıç bozulmaları ile birlikte göçme yükleri üzerindeki etkilerini belirlemek üzere testler gerçekleştirilmiştir. Ortotropik plak yaklaşımı ile bir sonlu elemanlar analiz programı geliştirilmiş ve yeni bir göçme kriteri tanımlanmıştır.

Paik ve diğerleri (2003), eksenel bası altındaki çukurlaşmış çelik plakların göçme mukavemetleri üzerinde lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS programını kullanarak çalışmışlardır. Çalışmada, çukurlaşmanın yeri, şekli ve boyutlarının (derinliği ve çapı), eksenel bası etkisindeki basit mesnetli çelik plakların göçme mukavemetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çukurlaşmış çelik plakların göçme bası mukavemetlerini tahmin etmek için, hesaplanan sonuçlara eğri uyulmayarak kapalı formda ampirik bir formül türetilmiştir. Çalışmanın, bünyesinde yerel çukurlaşma oluşan çelik plak yapıların yaralanma toleranslı tasarımlarında kullanışlı olacağı belirlenmiştir.

Paik ve Thayamballi (2003) gemi panellerinin dinamik göçme bası mukavemetlerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında, dinamik olarak etki eden eksenel bası yükleri altında, çelik plakların göçme mukavemetleri için deneysel veri oluşturmak amaçlanmıştır. Yükleme hızı değiştirilerek, eksenel bası yükü uygulanan çelik plaklar için bir dizi dinamik göçme testi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına dayanılarak yükleme hızının göçme mukavemet üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çelik plakların dinamik göçme bası mukavemetlerini, eğri uyulmayarak şekil değiştirme oranı fonksiyonu şeklinde elde etmişlerdir.

Paik ve diğerleri (2003), korozyona uğramış yük gemilerinin zamana bağlı değişen göçme mukavemetlerini araştırdıkları çalışmalarında, yaşlı yük gemilerinin yapısal bozulmalar nedeniyle olduğu düşünülen sebeplerle şiddetli deniz şartlarında kaybedilmesi üzerine, buna sebep olan ve yapısal güvenliği tehdit eden iki temel unsur, korozyon ve

yorulma kırılmalarını incelemişlerdir. Büyük yük gemileri için mevcut olan uygun korozyon ölçütlerine dayanılarak, daha önce bir yük gemisinin farklı bölge ve kategorilerde olan 23 farklı elemanı için geliştirilen zamanla değişen korozyon kaybı modeli kullanılmıştır. Her eleman için yer ve korozyon şiddetinden doğan farklılıklar dikkate alınmıştır. Bu çalışmadan elde edilen yıllık korozyon oranlarına dayanılarak, birincil elemanlar için nominal tasarım korozyon değerleri önerilmiştir. Zamanla değişen korozyon kayıplarının göçme gövde kirişi mukavemetine etkileri kesit modülü ile birlikte incelenmiştir. Çok fazla oranda korozyona uğramış yapısal elemanların göçme mukavemet değerini belirli bir seviyede tutmak için gereken bakım-onarım kriterleri tartışılmıştır.

Paik (2005), çukurlanmış çelik plakların kenar kesme kuvvetleri altında göçme mukavemet değerlendirmesi üzerinde çalışmıştır. Çalışmasında, yerel darbeler nedeniyle çelik plakların göçme kesme mukavemetlerinin azalması karakteristiklerini araştırmış ve ayrıca çukurlanmış plakların göçme kesme mukavemetleri için bir tasarım formülasyonu geliştirmiştir. Çalışma kapsamında ANSYS lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, basit mesnetli ve kenar kesme yükleri altındaki çelik plakların göçme mukavemetleri üzerinde, plakta oluşan çukurun şeklinin, boyutlarının (derinlik, çap) ve yerinin etkileri incelenmiş ve sonuçları sunulmuştur. Hesaplanan sonuçların regresyon analizleri ile çukurlanmış çelik plakların göçme kesme mukavemetlerinin tahmini ifadesi için kapalı formda bir tasarım formülasyonu türetilmiştir.

Paik ve Seo (2005), çalışmalarında gemi yapılarının göçme limit durumlarının değerlendirmesini yapmışlardır. Basit plastisite düzeltmesi ile ayarlanabilen burkulma mukavemeti kontrolü ile birlikte, lineer elastik çözüm yöntemine dayalı olan kabul edilebilir çalışma gerilmesi yaklaşımı kullanarak gerçekçi emniyet aralığı belirlenmesi zordur. Bu sebeple, göçme limit durumu yaklaşımı ile gemi ve diğer deniz yapılarının tasarım ve mukavemet değerlendirmelerinin yapılmasının daha doğru olacağı düşüncesiyle, gemi yapılarının göçme limit durumlarının lineer olmayan değerlendirmeleri için ALPS (Nonlinear Analysis of Large Plated Structures-Geniş Plaklı Yapıların Lineer Olmayan Analizi) teorisi ve buna bağlı bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, ISUM tabanlı ALPS programının plaklara, desteklenmiş levhalara ve gemi gövde kirişlerine uygulamaları sunulmuştur.

Brubak ve diğerleri (2005), rastgele olarak yerleştirilmiş stifnerlerle desteklenmiş plakların yarı analitik burkulma mukavemeti analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada,

keyfi olarak yerleştirilmiş ve kesintiye uğrayan stifnerlerle desteklenen plakların burkulması incelenmiştir.

Paik ve diğerleri (2005), aksel bası ve çeki altındaki çatlaklı plak elemanların göçme mukavemetleri konusunda çalışmışlardır. Korozyonun yanında yorulma çatlakları da yaşlı gemilerin yapısal bozulmalarında bir diğer önemli faktördür. Yorulma çatlakları genellikle periyodik yükler altında oluşmaktadır. Fakat, yorulma çatlakları belirli durumlarda göçme mukavemeti oldukça fazla düşürdüğü için, monoton aşırı yükler altında artık mukavemet değerlendirmesi açısından da çok önemlidir. Çalışmada, çatlak hasarının yeri ve büyüklüğü değiştirilerek, çatlak hasarı nedeniyle plak elemanların göçme mukavemet azalma karakteristikleri, hem deneysel hem de sayısal olarak araştırılmıştır.

Fujikubo ve diğerleri (2005), enine bası ve yanal basınç yüklerinin kombinasyonu altındaki, gemi dibi tipik desteklenmiş sürekli panellerin göçme mukavemetlerinin tahmini için bir yöntem geliştirmişlerdir. Boyuna stifnerler ve enine kirişler ile desteklenen sürekli paneller için bir dizi elastik/elastoplastik büyük sehimli sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Daha önceki çalışmalar genellikle tekil plaklara odaklanarak yapılırken, sunulan çalışmada plak sürekliliğinin, plak burkulması ve plak göçme mukavemeti üzerinde etkilerine odaklanılmıştır.

Qi ve diğerleri (2005), büyük çift gövdeli tankerlerin göçme gövde kiriş mukavemetlerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında daha önceki teorik ve deneysel çalışmalara dayanarak, gemilerin göçme gövde kirişi mukavemetlerini tahmin etmek için mevcut teorik yöntemlerin sistematik bir çalışması yapılmıştır.

Khedmati (2005), düzlem içi bası etkisindeki desteklenmiş/desteklenmemiş gemi plaklarının ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme ilişkilerinin simülasyonu çalışmasını gerçekleştirmiştir. Düzlem içi boyuna bası kuvvetlerine maruz kalan plakların ortalama gerilme ortalama şekil değiştirme ilişkilerinin türetilmesi için, elastik büyük sapma analizi ve rijit plastik mekanizma analizini birleştirerek basit ve etkili bir analitik yöntem sunulmuştur. Kuvvetler ve eğilme momentlerinin denge durumları uygulanarak ve desteklenmiş plak enine kesitinde uygun gerilme ve şekil değiştirme dağılımları kabul edilerek, desteklenmiş plakların da ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme ilişkileri türetilmiştir. Bu algoritmanın, gemi gövde kirişi mukavemeti ve açık deniz yapısı göçme kapasitesinin tahmini değerlendirmesinde kullanılan yöntemlere kolaylıkla uygulanabileceği ortaya konmuştur.

Özgüç ve diğerleri (2006), desteklenmiş kusurlu plakların göçme bası mukavemetleri için başlangıç bozulmalarını geometrik sapmalar ve kaynak artık gerilmeleri şeklinde hesaba katarak yeni ve basit bir tasarım eşitliği geliştirmişlerdir. Geniş yelpazede tipik gemi panel geometrileri için 60 ayrı ANSYS elastik-plastik burkulma analizi lineer olmayan sonlu elemanlar methodu ile gerçekleştirilmiştir. 60 ayrı ANSYS elastik olmayan sonlu elemanlar analizi ile göçme mukavemeti azaltan faktörler ortaya konulmuştur. Bu faktörler kullanılarak da önerilen tasarım eşitliği türetilmiştir.

Ok ve diğerleri (2007), tek eksenli bası etkisindeki, yerel olarak aşınmış olan desteklenmiş plakların göçme mukavemet hesaplamalarını araştırmışlardır. Çalışmalarında, korozyon ve yorulma kaynaklı çatlakların, yapıların dayanma ve yıkılma kapasitelerine olan potansiyel etkilerinin önemi ve her ikisinin de gerçekçi olarak algılanması ve gemilerin muayene ve onarım süreçlerine dahil edilmesi gerekliliğini vurgulamışlardır. Çalışmada, desteklenmeyen plakların göçme mukavemetlerinde, bir veya birkaç olası geniş alanda yoğunlaşan yerel paslanma korozyonu etkilerinin belirlenmesinin üzerinde durulmuştur.

Paik (2007), kısa kenarlarından, gemi ve açık deniz yapılarının düşey ve yatay gövde kirişi eğilme momentlerinden kaynaklanan, eksenel bası yüküne maruz kalan ve tekil dairesel açıklığa sahip çelik plakların göçme mukavemeti karakteristikleri üzerine çalışma yapmıştır. Plaklar dört kenarı boyunca basit mesnetlenmiş ve düz tutulmuş olarak kabul edilmiştir. Plak en-boy oranı ve kalınlığının yanında açıklığın boyutu da (çapı) değiştirilerek bir dizi sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçların regresyon analizi ile delikli plakların göçme boyuna bası mukavemetleri için, ilk kesim mukavemet tahminleri ve güvenilirlik analizleri için kullanışlı bir formülasyon türetilmiştir.

Paik (2007), gemi ve açık deniz yapılarında, yük ağırlıkları ve su basıncından kaynaklı kesme yükleri altındaki, delikli çelik plakların göçme mukavemet karakteristikleri üzerine çalışma yapmıştır. Plaklar dört kenarı boyunca basit mesnetlenmiş ve düz tutulmuş olarak kabul edilmiştir. Delik daireseldir ve plağın merkezinde açılmıştır. Plak en-boy oranı ve kalınlığının yanında açıklığın boyutu da (çapı) değiştirilerek bir dizi sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçların regresyon analizi ile delikli plakların göçme boyuna bası mukavemetleri için, güvenilirlik açısından ilk kesim mukavemet tahminleri ve kod kalibrasyonu için kullanışlı bir formülasyon türetilmiştir.

Daley ve diğeri (2007), yanal yükler altındaki çerçeve ve ızgara sistemlerinin göçme mukavemetlerini deneysel bir çalışma ile incelemişlerdir. Başlangıç testleri, ortasındaki küçük bir bölge veya sonlara yakın kısımlardan yüklenmiş ve sonlarından sabitlenmiş tekil çerçevelere yapılmış ve iki önemli plastik göçme formu oluşturan eğilme ve kesme değerleri incelenmiştir. 8 adet tekil çerçevenin test edilmesinin ardından üç çerçevenin bir levha plağa tutturulması ile oluşturulan iki küçük ızgara sistemi ve ardından da 9 çerçevenin ve 2 stringerin 3 levha plağa tutturulması ile oluşturulan iki büyük ızgara sistemi test edilmiştir. Çalışma sonucunda, çeşitli burkulma mekanizmaları (kesme burkulması, gövde bası burkulması, ve yanal burkulma (tripping) ) ile tümüyle plastik göçme arasında birkaç dikkat çekici ilişki belirlenmiş ve sunulmuştur.

Vhanmane ve Bhattacharya (2007), eksenel bası yükü altındaki plak elemanların gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini belirlemek için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Gemi yapılarında stifnerler arası plakların ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme ilişkilerini tahmin etmek amacıyla, Paik'in büyük elastik deformasyon teorisini içeren membran gerilme yöntemi ve Yao (2003)'ün rijit plastik göçme mekanizmasının kombinasyonu ile basit analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Kombinedeki ilk teori göçme mukavemetine kadarki davranışı hesaplarken, ikinci teori de göçme mukavemetin üstündeki davranışları hesaplamaktadır. Stifnerler arasındaki plakların farklı en-boy oranı değerleri için eksenel yükler altında analizleri yapılmıştır.

Paik (2007), Uluslararası Klaslama Kuruluşları Birliği'nin 'Genel Yapısal Kurallar'ı tarafından tasarlanan petrol tanker yapılarının göçme limit durumu performansı üzerinde çalışmıştır. Çalışmada, Uluslararası Klaslama Kuruluşları Birliği'nin 'Genel Yapısal Kurallarına göre tasarlanan Aframax tipi farazi bir çift dipli petrol tankerinin göçme limit durumu performansını değerlendirmek amaçlanmıştır. Desteklenmiş plak yapılarının göçme mukavemet analizlerinde ALPS/ULSAP kullanılırken, gövde kirişinin aşamalı göçme analizinde ALPS/HULL kullanılmıştır.

Khedmati ve Rastani (2008), düzlem içi eksenel bası altındaki, kesikli kaynaklanmış destekli plakların göçme mukavemet ve süneklik karakteristikleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmada desteklenmiş plak modelleri için farklı tipte stifnerler kullanılmıştır. Stifnerlerin plağa kaynatılması, sürekli, zincirleme dolgu kaynağı ve zigzag dolgu kaynağı olmak üzere 3 farklı şekilde yapılmıştır.

Kim ve Yoo (2008), eğilme ve burulma yüklerinin kombinasyonu altındaki çelik dikdörtgen kutu kirişlerin göçme mukavemetleri konusunda çalışma yapmışlardır.

Çalışmalarında, mükemmel burulma özellikleri nedeniyle, hem eğri hem de düz yapısal elemanlar için geniş oranda kullanılan kutu kirişleri göz önüne almışlardır. Yatay eğrilmiş elemanlar yalnızca düşey yükler etkisindeyken, düşey eğilme ve burulma şeklinde hareket çifti oluşmaktadır. Bundan dolayı, bu elemanların göçme mukavemetlerinin karşılıklı olarak belirlenmesi gereğini vurgulamışlardır.

Guo ve diğerleri (2008), korozyon etkilerini dikkate alarak, yaşlı tanker güverte plaklarının zamanla değişen göçme mukavemetlerini incelemişlerdir. Çalışmada, yarı olasılıksal yaklaşım kullanılarak ve korozyon kayıpları hesaba katılarak belirlenen, yaşlı tankerlerin güverte kaplamalarındaki zamanla değişen göçme mukavemet değerleri sunulmuştur.

Özgüç ve Barltrop (2008), artımsal-iteratif bir yaklaşıma dayalı olarak basitleştirilmiş bir method kullanarak, yük gemilerinin gövde kirişlerinin göçme mukavemetlerini analiz etmişlerdir. İlk olarak, düşey eğilme momenti 7 farklı yöntem ile incelenmiştir. Dalga tepesi (bel verme) ve dalga çukuru (çökme) durumları için, moment-eğrilik eğrileri ve göçme durumunda göçme boyuna moment değerleri belirlenmiştir. İkinci olarak, düşey ve yatay eğilme moment çifti altında göçme mukavemet değerleri hesaplanmıştır. Farklı eğrilik açılarında eğilme durumlarına maruz kalan gemi gövdeleri için yapılan hesaplamaların sonuçları hesaba katılarak, etkileşim eğrileri elde edilmiştir. Burkulmanın sebep olduğu lineer olmama durumu nedeniyle yapısal elemanların çeki etkisindeki dayanımlarının bası durumundakilerden farklı olmasından ve yatay eksene göre gemi enine kesitinin simetrik olmamasından dolayı, etkileşim eğrisinin de asimetrik olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, incelenen durumda, bileşke eğilme momenti vektörü açısı ile eğrilik vektörünün açısının farklı olduğu da belirlenmiştir.

Paik ve Kim (2008), ince duvarlı kutu kolonların aşamalı göçme analizlerini gerçekleştirdikleri çalışmalarında, kutu kolonların, göçme limit durumuna ulaşana dek ve ulaştıktan sonra malzeme ve geometri açısından oldukça fazla lineer olmayan davranış sergilediklerinden yola çıkıp, özellikle, aşırı yükler altında kutu kolonların davranışlarında yerel burkulma, global burkulma ve bunların etkileşimlerinin etkilerinin oldukça fazla olduğunu vurgulayarak, kutu kolonların maksimum yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için bireysel elemanların aşamalı bozulmalarının ve karşılıklı etkileşimlerinin hesaba katıldığı aşamalı yapı göçme analizi gerçekleştirmişlerdir.

Paik vd. (2008), gemi ve gemi şekilli açık deniz yapılarının göçme limit durumlarının belirlenebilmesi için kullanılan mevcut ve yakın zamanda ortaya konulmuş



yöntemlerin (ANSYS sonlu elemanlar, DNV PULS, ALPS/ULSAP, ALPS/HULL, ve IACS CSR) karşılaştırmalı değerlendirme çalışmasını yapmışlardır. Bunun için örnek olarak, Aframax sınıfı farazi bir çift dipli petrol tankeri yapısı CSR (Genel Yapısal Kurallar) methodu ile tasarlanmıştır. Bu bağlamda, biri desteklenmemiş plakların göçme limitleri, diğeri desteklenmiş plakların (panellerin) göçme limitleri ve bir diğeri de gemi gövde yapısının göçme hali olmak üzere üç durumu ayrı ayrı ele almışlardır. İlk çalışmalarında, desteklenmemiş plakların çift eksenli bası yükleri ve yanal basınç etkileri altında göçme limit durumu değerlendirmesi, ANSYS, DNV PULS ve ALPS/ULSAP yöntemleri ile yapılan analiz sonuçlarının karşılaştırılması ile yapmışlardır. İkinci çalışmalarında ise desteklenmiş plakların (panellerin) yukarıdaki benzer yükleme altındaki göçme limit durumunu, örnek geminin çift dip kısmını ele alarak ve ANSYS, DNV PULS ve ALPS/ULSAP yöntemleri ile yapılan analizlerin sonuçlarını karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Üçüncü çalışmalarında da, gemi gövde kirişlerinin eğilme momenti altında aşamalı göçme analizleri için kullanılan yöntemleri (ANSYS FEA, ALPS/HULL, and IACS CSR) ele alarak, gemi gövdesinin göçme düşey eğilme momenti kapasitesinin değerlendirmesini, örnek gemiyi yukarıda belirtilen üç farklı yöntemle analiz edip, sonuçlarını karşılaştırarak yapmışlardır.

Paik vd. (2008), Kuzey Batı Pasifik'te 1980 yılında batan dökme yük gemisi M.V. Derbyshire'in gövde yapısı için göçme limit durumu değerlendirmesi yapmışlardır. Geminin batmasının sebepleri ile ilgili birçok senaryo (gemi ambarının su ile dolması vb. gibi) üzerinden çalışmalar yapılmış ve batmanın gövde yapılarının bozulması kaynaklı olduğu pek hesaba katılmamıştır. Fakat çalışmada bu yönde bir senaryo ele alınmıştır. Son seferindeki fırtına göz önüne alınarak, aşırı eğilme momenti etkisindeki bireysel desteklenmiş plaklar ile gemi gövdesi için, ALPS/ULSAP ve ALPS/HULL programlarında göçme limit durum değerlendirmeleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, geminin ambarlarına su dolsun dolmasın, yüksek ihtimalle gövde kiriş göçmesi sebebiyle batmış olabileceği sonucuna varılmıştır.

Amlashi ve Moan (2008), değişen ambar yükleri koşulları altında bir yük gemisi gövde kirişinin göçme mukavemet analizi konusunda örnek olay üzerinden yaptıkları iki kısımlı çalışmanın ilk kısmında, lineer olmayan sonlu elemanlar modellemesi ve göçme gövde kirişi kapasitesini incelemişlerdir. Çalışmada genel olarak kombine yükler altında gemi gövde kirişi göçme mukavemet kriterlerinin gerçekçi olarak belirlenmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada bel verme (dalga tepesi) hali üzerinde

odaklanılmıştır. Global kombine gövde kirişi eğilme momenti ve yerel yükler nedeniyle, değişken ambar yükleri durumunda boş ambardaki kayda değer büyüklükte çift dip eğilmesi önem arz etmektedir. Yerel yükler gövde kirişi mukavemetini oldukça büyük oranda azaltmaktadır. Tamamen dolu ambar ve kısmen ağır yüklü ambar durumları gibi farklı değişken ambar yükleri durumları göz önüne alınmıştır. Farklı değişken ambar yükleri koşullarında, iç ve dış tasarım basınçlarının kritik durum denetlemesi, CSR-BC ve DNV (Norveç Klasi) kuralları kullanılarak yapılmıştır.

Amlashi ve Moan (2009), çift dipteki gerilme dağılımı farklı yükleme seviyeleri için (kural yük seviyesi, göçme bozulma yükü seviyesi) incelenmiş ve basitleştirilmiş bir yaklaşım sunulmuştur. Farklı klas kurallarından elde edilen farklı tasarım basınçlarının gerilme dağılımlarına dahil edilmeleri araştırılmıştır. Farklı yükleme durumları (tam dolu, kısmen dolu) için hesaplar yapılmış ve çift dip eğilmesini etkileyen başlangıç bozulmaları, yerel yükler, gerilme dağılımı ve bozulma modlarının gövde kiriş mukavemeti üzerindeki etkileri sunulmuştur.

Khedmati ve Gvahami (2009), sabitlenmiş veya sabitlenmemiş enine postalarla desteklenmiş alüminyum plakların burkulma / göçme mukavemet karakteristiklerinin sayısal olarak belirlenmesi ile ilgili çalışmalarında, enine postaların birleştirildiği alüminyum plakların tasarımı için önerilen yöntemlerinin uygulanmasının getireceği kolaylıklar ve dezavantajları, burkulma / göçme mukavemet bakış açısıyla belirlemeyi amaçlamışlardır. Bunu gerçekleştirmek amacıyla, farklı enine stifner yerleşimleri ile ortogonal olarak desteklenmiş alüminyum plakların burkulmaları / göçme mukavemetleri üzerine yaptıkları kapsamlı araştırma sunulmuştur. Enine postalar ya sabitlenmiş yada serbest pozisyonda olacak şekilde kabul edilmiştir. Enine postaların diğer yerleşim durumları da göz önüne alınmış ve karşılaştırma çalışmasında incelenmiştir. Modeller üzerinde lineer olmayan sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında, ortalama gerilme ortalama şekil değiştirme ilişkileri ve ayrıca gerilme ve sehim şekilleri elde edilmiştir. Tüm modeller için burkulma ve göçme mukavemet karakteristikleri elde edilmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Önemli bulgular göstermiştir ki, genelde bilindiğinin aksine, serbest bırakılmış enine postalara sahip model oldukça yüksek burkulma mukavemetine sahip değildir. Ayrıca enine postaların karışık veya karmaşık yerleştirilmesinin yüksek göçme mukavemet doğurabileceği belirlenmiştir.

Wang ve diğerleri (2009), çoklu kırılma hasarına sahip yapısal elemanlardaki artık göçme mukavemet üzerine yaptıkları çalışmada, yaşlı gemi yapılarının bu durumlardaki

artık göçme mukavemetin önemini vurgulamışlar ve bu değerin tahmini için basit bir yöntem önermişlerdir. Bir temel çatlak ve birkaç çatlak başlangıcına sahip bölgesi olan yapısal elemanlar göz önüne alınarak göçme mukavemet karakteristiklerini belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmişlerdir. Plastik bölgelerde ana çatlak ve alt çatlaklar arasındaki birleşme mekanizması, aralarındaki bağ yönünden gösterilmiştir. Temel çatlak birincil parametre olarak düşünüldüğünde, alt çatlakların yer ve büyüklüklerinin etkileri araştırılmıştır. Bu alt çatlakların, temel kırığın yakınında olmaları halinde yapısal elemanın göçme mukavemetini düşürdükleri, bunun yanında, bu alt çatlaklar, yapısal elemanın düşük gerilme bölgelerinde iseler etkilerinin yok sayılabileceği belirlenmiştir.

Paik ve Seo (2009) çift eksenli bası ve yanal basınç kuvvetleri etkisindeki desteklenmiş plakların göçme mukavemetlerinin lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri için modeller geliştirmişler ve bu anlamdaki iki kısımdan oluşan çalışmalarını stifnerler arasında kalan plak elemanlar ve desteklenmiş paneller üzerinde yapmışlardır. Gemiler ve açık deniz yapıları gibi birçok tip yapıda, göçme mukavemet değerlerinin, kabul edilebilir çalışma gerilmesi değerlerinden tasarım için daha iyi olduğunun farkına varılmıştı. Göçme limit durumu tasarımıve mukavemet değerlendirmesi çerçevesinde, ilk görev göçme limit durumunun oluşmasına sebep olan yüklerin seviyelerinin belirlenmesidir. Bu bağlamda çalışmalarının amacı, çift eksenli bası ve yanal basınç kuvvetlerinin kombinasyonu etkisindeki desteklenmiş çelik plakların göçme limit durumu değerlendirmeleri için kullanışlı bir sonlu elemanlar uygulama yöntemi geliştirmektir. Bunun için, örnek inceleme yapmak üzere, 100,000 tonluk klaslı çift dip bir petrol tankerinin dış dip desteklenmiş panel yapısı ele alınmıştır. Çalışmanın ilk kısmında stifnerlerle veya diğer destek elemanları ile çevrilmiş plak elemanlar, ikinci kısımda da, göçme limit durumu üzerinde önemli etkileri olan, yapısal boyutlar, imalat hataları, yükleme türleri ve hesaplama tekniklerinin önem arz ettiği desteklenmiş paneller incelenmiştir.

Paik (2008), eksenel bası etkisinde, boyuna çatlağa sahip çelik plakların artık göçme mukavemeti karakteristiklerini deneysel olarak belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, Paik'in daha önceki çalışmasının aksine, eksenel yükün doğrultusuna dik yönde uzanan enine çatlak oluşması durumu değil, eksenel yüklemeye paralel yönde uzanan boyuna çatlak oluşması durumu ele alınmıştır. Çatlağın doğrultusu, yeri ve büyüklüğü değiştirilerek farklı durumlar için testler yapılmış ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar neticesinde oluşan veri tabanı ve konu ile ilgili algılar

ile, çelik plak yapıların yaralanma toleranslı tasarımlarında ve yaşlı gemilerin çatlak hasarlarında sağlamlıklarının gözlemlenmesi veya durum değerlendirmelerinin yapılmasına imkân sağlanmıştır.

Paik (2009), aksenal bası etkisinde, boyuna çatlığa sahip çelik plakların artık göçme mukavemeti değerlendirmelerini lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanarak araştırmıştır. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan hesapların sonuçlarından elde edilen çıktılar değerlendirilmiş ve çatlak doğrultusu, çatlak yerinin, çatlak boyutlarının, plak kalınlığının ve plak en-boy oranının artık göçme mukavemete etkileri ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar neticesinde, çelik plak yapıların yaralanma toleranslı tasarımlarında ve yaşlı gemilerin çatlak hasarlarında sağlamlıklarının gözlemlenmesi veya durum değerlendirmelerinin yapılmasına imkân sağlanmıştır. Çalışma kapsamında, doğrultularına göre üç çeşit çatlak tipinden (enine, boyuna, açısız) boyuna çatlak durumu incelenmiştir. Boyuna çatlak durumu da, çatlığın plak merkezinde (ortasında), plağın uçlarında ve plağın kenarlarında olmak üzere üç ayrı konum için incelenmiştir. Boyuna aksenal çeki etkisinde, enine çatlığa sahip plakların göçme mukavemet tahminlerinde kullanılan formülasyonun, boyuna aksenal bası etkisindeki boyuna çatlığa sahip plakların göçme mukavemet tahminlerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Dalma (2009), tamamladığı doktora çalışmasında, IACS-CSR kuralları ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, örnek bir çift cidarlı petrol tankerinin göçme mukavemeti değerlerini sarkma ve çökme durumları için belirlemiştir.

Benson (2011), tamamladığı doktora çalışmasında alüminyum malzemedeki yapılmış hafif tonajlı gemilerin göçme mukavemeti değerlerinin kademeli göçme yaklaşımıyla belirlemeye çalışmıştır. Çalışma kapsamında desteklenmiş panel elemanlar oluşturularak, bunların yük-aksenal yer değiştirme eğrilerini ortotropik plak yaklaşımıyla elde etmiştir. Kademeli göçme analizini de, iki enine perde arasında değil, bir veya daha fazla ambar düzeyinde gerçekleştirmiştir.

Stamatelos ve diğerleri (2011), izotropik ve ortotropik desteklenmiş kompozit panellerin yerel burkulma ve burkulma sonrası davranışlarının belirlenmesi için analitik hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Tasarımın ilk aşamalarında, kısa ve hızlı biçimde değişken değişimi ile sonuca gidilecek bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Kim vd. (2012), konteyner gemilerinin göçme mukavemeti analizlerinde, korozyon payı ekleme kuralının uygulanmasının önemini ortaya koyan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Kim vd. (2013), Suezmax sınıfı tankerlerin düşey eğilme momenti etkisi altındaki gövde kirişlerinin göçme davranışına, yanal basınç değerlerinin etkilerini ortaya koyan bir çalışmayı ISUM ve SEY analizleriyle gerçekleştirmişlerdir.

Xu ve Soares (2013), boyuna 4 stifnerli 5 adet geniş desteklenmiş panelin aksel bası kuvveti altında göçme mukavemetlerini belirlemek üzere deneysel çalışma yapmışlardır. Ayrıca bir karşılaştırma çalışması için de iki boyuna stifnerli dar desteklenmiş panel için de deneyler gerçekleştirilmiştir. Özellikle sınır şartlarının etkileri deney sonuçları ile vurgulanmıştır.

Gemilerin yapısal olarak bütünlüğünü oluşturan elemanların ve tüm gemi gövde kirişinin yerel ve global göçme davranışlarının belirlenmesinin literatürdeki gelişimi sunulmuştur. Bunun yanında, çalışmamızda kullanılan kademeli göçme analizi açısından literatür gelişimini tekrar özetlemek ve vurgulamak amacıyla Smith yöntemine geçiş aşağıdaki paragraflarda sunulmuştur.

Gemilerin kiriş gövde yapılarının düşey eğilmeye maruz kalmaları durumunda, taşıyabilecekleri maksimum yük taşıma kapasitelerinin göstergesi olan, göçme düşey eğilme momenti değerini belirleyebilmek için geliştirilmiş ve çoğunlukla tercih edilen yaklaşım, yapısal elemanların gerilme-şekil değiştirme davranışları ve göçme mukavemet değerlerinin doğru belirlenmesine dayalı olan “kademeli kırılma analizi” yaklaşımıdır.

Bu anlamda ilk uygulama Caldwell (1965) tarafından yapılmıştır. Caldwell yapı elemanlarını kısımlara ayırarak, analitik metotlarla veya deneyler sonucunda elde edilen kırılma yükünü belirlemiş ve buradan da gemi orta kesitinin kırılma momentini yaklaşık olarak hesaplamıştır.

Daha sonra Smith (1977), Caldwell'in yöntemini geliştirerek, yapı elemanlarının kırılma sonrası davranışlarını da dikkate almak suretiyle, yapı elemanlarının her birini, belirli genişlikte plağa bağlanmış stifnerlerden oluşan kiriş-kolon elemanı kabul etmiş ve elasto-plastik kiriş-kolon ile plak burkulması davranışlarını, plağın ilkel eğriliğini ve stifnerlerin kaynaklanması sonrası oluşan artık gerilmeleri de hesaba katarak, kiriş-kolon elemanın enine kesitini yatay alt elemanlara ayırarak ve kesite artımsal yükleme uygulayarak incelemiştir. Her alt elemandaki ilgili gerilme artımını, stifnerin ve plağın

ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğiminden türetilmiş ve orta kesit davranışını belirlemiştir.

Smith'in bu öncü yaklaşımı daha sonraları konu ile ilgili çalışan bilim adamları tarafından kullanılmıştır. Metodun uygulanmasındaki farklılıklar ise gemi enine kesitini oluşturan ve tarafsız eksenin yerine göre bası (kısılma) veya çekiye (uzama) maruz kalan boyuna yapısal destek elemanların, ağırlıklı olarak eksenel bası etkisiyle yapının çökmesi durumunda, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin belirlenmesi için kullandıkları yöntemlerde karşımıza çıkmaktadır.

Smith'in plak-stifner birleşimi kiriş elemanların burkulması yaklaşımını kullanarak lineer olmayan sonlu elemanlar analizine alternatif olarak Ueda (1984), sonlu elemanlar terminolojisine dayalı olarak, İdeal Yapısal Elemanlar Methodu (ISUM) yaklaşımını geliştirmiş ve sonlu elemanlardan farklı olarak, bir yapısal parçayı bütün olarak bir eleman olarak ele almak suretiyle serbestlik derecesi sayısını önemli oranda azaltarak çözüm süresini kısaltmıştır. Bu yöntem basitleştirilmiş lineer olmayan sonlu elemanlar analizi olarak düşünülebilir.

Çalışmamızda, bu iki başlıca yöntemden, Smith'in plak-stifner birleşimi kiriş eleman, köşe eleman ve plak eleman burkulması yaklaşımı, farklı eleman ayrıştırması yapılarak ve lineer olmayan plak denklemleri kullanılarak, ayrıca malzeme ve geometrik lineer olmama durumları ile ilkel sehim ve kaynak sonrası artık gerilmeler de hesaba katılarak uygulanacaktır.

### **1.5. Yöntemin Seçimi**

Yapılan literatür taraması sonrasında, gemilerin göçme mukavemet kapasiteleri ve sonrasındaki davranışlarının incelenmesinde Smith (1977) yöntemi yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu yöntem, Caldwell (1965) tarafından başlatılan kademeli göçme analizini temel almaktadır ve basitliği nedeniyle uygulama açısından en uygun olanıdır. Gemi orta kesitinin plak-stifner birleşimi elemanlara ayrılması ve bu elemanların sadece düşey eğilme momenti altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının belirlenmesiyle göçme analizinin gerçekleştirildiği iki aşamalı bir yöntemdir.

Sonlu elemanlar yöntemi de kademeli göçme analizinde kullanılmaktadır. Gemi en kesitinin bütün olarak modellenmesiyle, desteklenmiş plakların birbirleriyle etkileşimleri göz önüne alınabildiği gibi tüm yapının burkulmasına ilişkin öngörü de yapılabilmektedir.

Üçüncü bir yöntem de 1984 yılında Ueda ve Rashed tarafından geliştirilen, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı “ideal yapısal elemanlar yöntemi (*Idealized Structural Units Method-ISUM*)”dur. Smith yöntemine benzer şekilde ayrıklaştırılan elemanlar daha büyük yapısal birimler şeklinde kesit hesaplarına dahil edilir. Ayrıca, Smith yönteminden farklı olarak kesme ve burulma kuvvetleri de göz önüne alınabilmektedir.

Dördüncü ve son olarak 2006 yılında Paik tarafından "akıllı süper boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (*Intelligent Supersize Finite Element Method-ISFEM*) geliştirilmiştir. ISUM'dan farklı olarak bu yöntemde, farklı eleman tipleri çeşitli yapısal modelleme teknikleri kullanılarak büyük yapısal birimler içerisinde kullanılabilir. Ayrıca ISUM ile yapılan hesaplamalarda elemanların gerilme şekil değiştirme bağıntıları için oluşturulan kapalı formlardaki ifadeler yerine geleneksel nonlineer sonlu elemanlar yöntemi yapısı kullanılmaktadır.

Kullanılan yöntemlerin hepsinde de aslında temel olarak yapısal eleman çözümü dikkate alınarak, ya plak-stifner birleşimi elemanların, ya da daha özel tanımlanan plak-stifner birleşimlerinin, plak-stifner ayrışımının veya desteklenmiş panel elemanların davranışları incelenerek çözüm aranmaktadır.

Bu bağlamda, yapılan literatür çalışmaları doğrultusunda, kademeli göçme analizi Smith yöntemi kullanılarak gerçekleştirilecek olup, kapsamını oluşturan yapısal eleman davranışları (gerilme - şekil değiştirme veya yük - eksenel yer değiştirme), bu davranışları etkileyen önemli faktörlerin büyük bölümü dikkate alınarak, gerçeğe en yakın sonuçlar elde edilecek şekilde kapsamlı olarak incelenecektir.

Gemi yapılarının maruz kaldığı ve özellikle boyuna mukavemetini etkileyen yükler altındaki burkulma öncesi, burkulma, burkulma sonrası, göçme mukavemeti ve göçme mukavemetisonrası davranışlarını belirlemek amaçlanmıştır. Özellikle de yapısal elemanların önce bireysel, sonrasında da tüm yapının göçme mukavemet değerlerinin belirlenmesine önem verilmiştir. Böylelikle, kademeli göçme analizlerinin uygulanmasında daha gerçekçi yaklaşım göstermek ve literatürdeki kıyaslama yapılacak test sonuçları ile daha yakın sonuçlar elde etmek hedeflenmiştir. Bu bağlamda, birincil yük olarak eksenel bası ve ikincil yük olarak yanal basınç etkisi altındaki desteklenmiş panellerin, literatürde kabul gören ideal burkulma tipleri (Paik ve Thayaballi, 2003), desteklenmiş panelin bütün olarak burkulması (Tip-I), stifnerler arası tekil plak burkulması (Tip-II), plak-stifner birleşimi elemanların burkulması (Tip-III) ve lama stifner gövdesinin yerel burkulması veya flençli T veya L stifnerlerin gövdelerinin yerel burkulması (Tip-IV) ayrı ayrı hesaba

katılmıştır. Ayrıca, geometrik ve malzeme özellikleri açısından lineer olmayan durumlar, ilkel sehimler ve kaynak sonrası oluşan artık gerilmeler de göz önüne alınmıştır. Tüm bunlara bağlı olarak gemi yapılarının göçme durumlarına göre burkulma sonrası ve göçme mukavemet değerlerini belirlemek amacıyla membran gerilmeler yaklaşımı ve ortotropik panel yaklaşımı kullanılarak yarı-analitik bir metodolojigeliştirilmiştir.

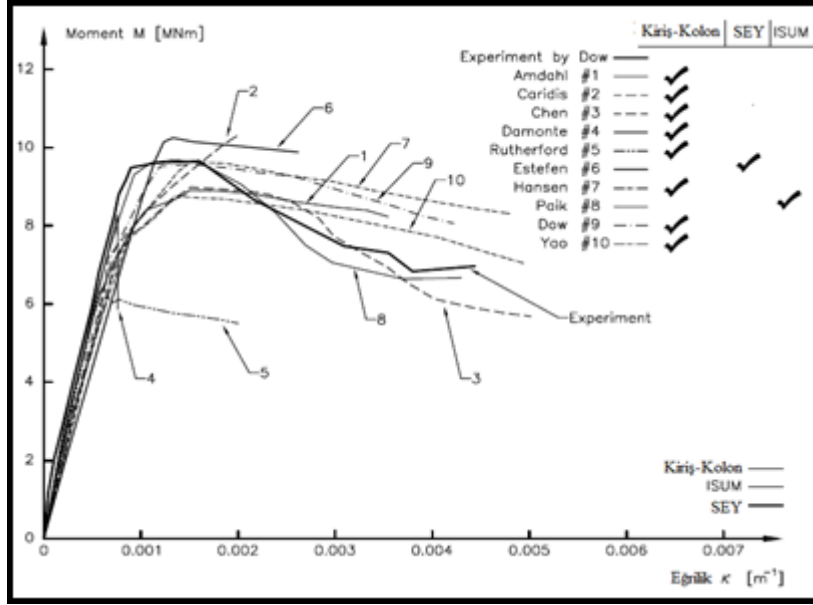
Bu burkulma tiplerine bağlı göçme durumları, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Her bir tipin analizi sonucunda desteklenmiş panelin P-du diyagramı elde edilecektir. Bunlar arasından da elde edilen en düşük gerilme değeri, belirleyici göçme gerilme değeri olarak kabul edilecek ve ilgili elemanda oluşacak kuvvet (P) değerinin belirlenmesinde kullanılacaktır. Ayrıca çalışmada, plak-stifner birleşimi ve plak-stifner ayrışımı şeklinde, her iki yapısal eleman ayrıştırması için de çözümler elde edilecektir.

Smith yönteminden özetle bahsedecek olursak; ilk olarak, ayrıklaştırılan stifner ve plak elemanlarda meydana gelecek burkulma ve akmalar dikkate alınarak, düzlem enine kesit düzlem kalır kabulü ile gemi gövde kirişine, derecesi adım adım artırılan düşey eğrilik uygulanır. Her adımda, analitik olarak elde edilecek gerilme-şekil değiştirme (negatif veya pozitif uzama) ilişkisinden, ilgili eğrinin eğiminden yararlanarak, eğrilik sonucu oluşan şekil değiştirmelerden gerilme değerleri türetilir. Son olarak her elemandaki bu gerilme artımları, eğilme momentindeki artımları elde edebilmek için enine kesit üzerinde integre edilir, eğrilik ve eğilme momenti artımlarının birbirlerine eklenmesiyle toplam davranış elde edilir.

Böylece esas problemin (gemi enine kesitinin göçme eğilme momentinin elde edilmesi) çözümüne kademeli olarak gidilecektir. Bu yaklaşımda, gemi gövdesi göçme eğilme momenti kapasitesi, "düşey eğilme momenti-gemi enine kesiti eğriliği" eğrisinin pik yaptığı değer olarak tanımlanır. Bu eğrinin artımsal iteratif yaklaşımı ile elde edilmesi, yöntemin uygulanışı kısmında anlatılmıştır.

Şekil 1.8 de, 1994 yılında yapılan Uluslararası Gemi ve Açık Deniz Yapıları Kongresi'nin, III-1 Teknik Komitesinde, Dow'un (1991), testlerini gerçekleştirmiş olduğu, eğilme yüklerine maruz kalan tipik bir savaş gemisi gövde yapısını temsilen 1/3 ölçekli çelik bir fırkateyn modelinin, farklı araştırmacıların yaptıkları analizlerde elde ettiği moment-eğrilik eğrileri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.





Şekil 1.8. Dow'un 1/3 ölçekli firkateyn modelinin farklı araştırmacılar tarafından elde edilen moment-eğrilik eğrileri

Buradan da görüleceği gibi, Paik (2003)'ün (8) numaralı ISUM çözümü, desteklenmiş plakların davranışlarını belirlemek için plak elemanlar ve stifner elemanlar şeklinde elemanlara ayırarak çözümlenmek daha gerçekçi sonuç vermektedir. Bu durum özellikle vurgulanmalıdır ki, plak-stifner birleşimi elemanların farklı yükler altındaki davranışı incelenirken yapılan kabuller ile dikkate alınmayan, stifnerlerin burulma rijitliklerinin etkileri, stifnerlerin yerel burkulmaları gibi olası birtakım gerçek davranışların dikkate alınmasına imkan tanıyan plak-stifner ayrışımı yaklaşımı ile elemanların gerilme-şekil değiştirme (yük-eksenel kısalma/uzama) davranışları belirlenecektir. Sonlu elemanlar yöntemi alternatif olarak gözükse de çözüm hızı göz önüne alındığında, sadece kullanılacak yöntemin doğrulanması ve/veya karşılaştırmasının yapılması için literatürdeki sonuçları kullanılmıştır.

## 1.6. Tezin Akışı

Bölüm 2.1 ve 2.2'de, problemin tanımı özetlenmiş ve daha açıklayıcı olması açısından, çözümün kapsamını oluşturan temel kavram ve terimlerin tanımları ve açıklamaları ile metodolojide yapılan kabuller üzerinde durulmuştur.

Bölüm 2.3, gemi gövde kirişini oluşturan temel yapısal elemanlar olan desteklenmiş panellerin (plak-stifner kombinasyonları), alt elemanları olan tekil plakların elastik ve elastik olmayan göçme davranışları ele alınmıştır. Burada, tekil plakların burkulma davranışları üzerinde önemli etkileri olan, kaynak işlemi sonrası oluşan ilkel sehimleri ve artık gerilmeleri de hesaba katılmıştır. Dört kenarı basit mesnetli ideal sınır şartı durumunda, yalnızca aksenal bası/çeki kuvvetleri altındaki elastik ve elasto-plastik burkulma, burkulma sonrası ve göçme mukavemeti davranışları elde edilmiştir. Genel ifadeyle, kademeli gerilme-şekil değiştirme davranışları belirlenerek, göçme mukavemet değerleri tahmin edilmiştir. Burada, düz veya ilkel sehimli plakların büyük sehim davranışlarının, denge ve uygunluk bağıntılarından oluşan lineer olmayan diferansiyel denklemleri (Marguerre, 1938) ve (Timoshenko ve Woinowsky-Krieger, 1959), "plak kenarı odaklı plastik mafsallı yaklaşımı" adı verilen "membran gerilme dağılımı yöntemi" ile çözülmüş ve göçme mukavemet değerleri analitik olarak elde edilmiştir.

Bölüm 2.4'te, destek elemanı stifnerlerin olası 3 yerel burkulma tipi için (kiriş-kolon burkulması, stifner gövde burkulması, stifnerin burulmalı burkulması) farklı kesitlere göre (lamba, T, L) gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin IACS-CSR kuralları ile elde edilmesi anlatılmıştır. Bölüm 2.5'te gemi gövde kirişini oluşturan temel yapısal elemanlar olan desteklenmiş panellerin, gemi orta kesitlerinde en çok rastlanan aksenal bası/çeki kuvvetleri altında elastik ve elasto-plastik burkulma, burkulma sonrası ve göçme mukavemet (göçme) davranışları, genel ifadeyle kademeli gerilme-şekil değiştirme davranışları incelenmiştir. Burada, ağırlıklı olarak bası kuvvetleri altındaki desteklenmiş panellerin, burkulma tiplerine bağlı olarak farklı göçme tipleri için ayrı ayrı davranışları incelenerek, panelin göçme mukavemet değerlerinin nasıl elde edildikleri incelenmiştir.

Bölüm 2.6'da, çalışma kapsamında güncellenen ortotropik panel yaklaşımı ve gemi orta kesitinin kademeli göçme analizinde kullanılacak olan desteklenmiş panellerin ortalama gerilme - ortalama şekil değiştirme davranışlarının, bu yaklaşım ve ayrıca önceki bölümlerdeki yaklaşımlar kullanılarak yarı-analitik bir yöntem ile elde edilmesi anlatılmıştır.

Bölüm 2.7'de, desteklenmiş panellerde elde edilen sonuçların gemi gövdelerinin göçme mukavemet ve kademeli göçme analizinde kullanımını göstermek amacıyla, kullanılacak Smith yöntemi tanıtilmiş, basit uygulamalarda hesabın gerçekçiliği ve dikkat edilmesi gereken hususlar gösterilmiştir.

Bölüm 3.1 ve 3.2'de sırasıyla, tekil plaklar ve stifnerli paneller için mevcut test sonuçları, geliştirilen amprik formüller, analitik yöntemler ve SEY ile gerçekleştirilen sayısal hesaplamalardan elde edilen sonuçları ile karşılaştırmalı olarak örnek kanıtlama uygulamaları sunulmuştur.

Bölüm 3.3'te, Nishihara tarafından gerçekleştirilen deneysel kutu kirişe ait çözümlene, önerilen yöntemle ve ardından Smith yöntemine dayalı olarak kademeli göçme analizinin kullanıldığı Uluslararası Klas Kuruluşları Birliği'nin, Genel-Geçer Yapısal Kuralları (IACS-CSR) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçları deneysel sonuçlar ve diğer bilim adamları tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Smith yönteminde başarıyı elde etmek için desteklenmiş plaklara ait olabildiğince çok parametre göz önüne alınmaya çalışılmıştır. Özellikle, malzemelerin birleşimlerinin kaynak ile gerçekleşecek olmasından ötürü meydana gelecek artık kaynak gerilmelerinin ve ilkel sehimlerin etkisi hesaplara dâhil edilmiştir. Hesaplamalar, sadece göçme mukavemet değerine erişilmesiyle bitirilmeyip, göçme sonrası davranışları da kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3.4'te, gemilere ait sayısal hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. İlk çalışma, deneyleri Dow (1991) tarafından gerçekleştirilen 1/3 ölçeklenmiş firkateyn savaş gemisi için yapılmıştır. İkinci çalışma, Dalma (2009)'nın tamamladığı tez çalışması kapsamında örnek kanıtlama uygulaması olarak hesaplamasını gerçekleştirdiği çift cidarlı bir petrol tankeri için yapılmıştır. Üçüncü çalışma ise “Energy Concentration” adlı yüksek tonajlı ham petrol tankeri için yapılmıştır. Son karşılaştırma çalışması da, çift dip- çift cidarlı bir konteyner gemisinin göçme mukavemeti değeri ve ilkel bozulmaların (ilkel sehim ve artık kaynak sonrası gerilmeler) göçme mukavemetine etkilerini göstermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm çalışmaların sonrasında elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlar ile tablo ve grafikler eşliğinde karşılaştırılmıştır.

Son olarak Bölüm 4'te elde edilen genel sonuçlar irdelenerek özetlenmiş ve sonraki çalışmalara ilişkin öneriler sunulmuştur.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

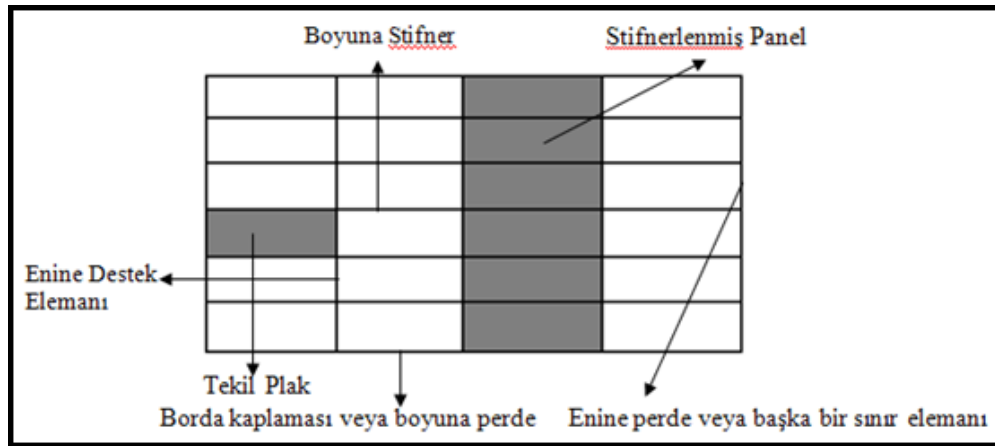
### 2.1. Problemin Tanımı, Çözüm Aşamaları ve Metodoloji

Bu çalışmada, göçme hedef olarak, düşey eğilme momenti etkisindeki gemi girişlerinin, orta kesitlerinde oluşacak gerilme ve şekil değiştirme ilişkileriyanalitik olarak elde edilecek, bu ilişkiye bağlı olarak kademeli göçme davranışları belirlenecek ve sonucunda da moment-eğrilik eğrisinde, tepe nokta (en büyük düşey eğilme momentleri)değeri belirlenerek maksimum yük taşıma kapasiteleri elde edilecektir.

Bu hedef doğrultusunda, ilk olarak gemilerin gövde en kesit yapıları idealleştirilerek yapısal elemanlara ayrılacaktır. Bu elemanlara ayırma, bütünsel davranışı en doğru temsil edecek biçimde yapılmalıdır (Ueda, 1984, Paik vd., 2008). Bu konuda hassas davranılmasının sebebi de göçme sonucuna, ayrıklaştırılan elemanların kademeli göçme hesaplamaları sonucunda gidilecek olmasıdır. Bu doğrultuda, gemi gövde yapısını oluşturan plak, stifner ve desteklenmiş panellerin burkulma ve göçme davranışları, sırasıyla, plak denklemleri (Marguerre, 1938), IACS-CSR kuralları kapsamındaki ampirik formülasyonlar (Özgüç, 2007) ve ortotropik panel denklemlerinin (Paik vd., 2001, Paik ve Thayamballi, 2003) çözülmesi ile elde edilerek, kademeli göçme analizinin alt hesaplamaları yapılacaktır. Böylelikle Smith yöntemi uygulanırken kullanılacak yapısal eleman davranışları elde edilmiş olacaktır. Çalışma kapsamında, ilk kanıtama çalışmaları yapısal elemanların gerilme-şekil değiştirme eğrileri için gerçekleştirilmiştir. Sonrasında da problemin göçmeanalizindekullanılacakmetodolojinin (alt hesaplamalar+Smith Yöntemi) sayısal çalışmaları, ilk olarak, desteklenmiş panellerden oluşan, tek dipli tanker modeli olan kutu giriş üzerinde (Nishihara,1990), ardından 1/3 ölçekte küçültülerek inşa edilmiş bir fırkateyn kesiti üzerinde (Dow,1999), son olarak da 3 farklı gerçek gemi kesiti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Konu ile ilgili çalışan bilim adamlarının elde ettiği göçme mukavemeti sonuçları literatürde bulunan gerçek gemi kesitlerinden ilki çift cidarlı petrol tankeri ikincisi büyük tonajlı ham petrol gemisi (VLCC) Energy Concentration ve üçüncüsü ise çift dip – çift cidarlı bir konteyner gemisidir.

## 2.2. Gemi Gövde Kiriş Yapısı ve Desteklenmiş Panellerle İlgili Genel Tanımlar

Bir gemi yapısında çok sayıda plak-stifner birleşimi panel elemanlar mevcuttur. Herhangi bir anda bu elemanların çoğu, elemanın gemideki yerlerine bağlı olarak değişen şiddetlerde bası yüklerine maruz kalırlar. Gemi gövdesinin aşırı yüklere maruz kalması durumunda daha fazla bası etkisindeki elemanlarda burkulma veya plastik akma meydana gelir ve yük taşıyamama bölgesine girerler. Diğer taraftan taşınamayan büyük bitişik sağlam elemanlara kayar. Daha sonra bu elemanlarda aşırı yüklenir ve yük taşıma kapasiteleri tükenir. Birbirine bağlı panellerin ardışık zincirleme göçmesi ile yapının tümüyle göçmesi gerçekleşir. Buradan görüleceği gibi gemi gövdesinin göçme mukavemeti, yapısını oluşturan yapısal bileşenlerin göçme mukavemet karakteristiklerinin birleşimi olmaktadır.



Şekil 2.1. Izgara yapı üzerinde desteklenmiş plak terminolojisi

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere boyuna stifner ve enine destek elemanları bütün olarak ızgara yapısını oluştururlar. İki enine destek elemanı arasında kalan ve boyuna stifnerlerle desteklenmiş kısım ‘desteklenmiş panel’ olarak ele alınır. İki enine ve iki de boyuna eleman arasında kalan sınırlandırılmış kısım ise alt-panel olarak ele alınır. Izgara yapı, enine destek elemanlarının yeterince dayanımlı olmaması halinde, boyuna elemanlarla birlikte bütün olarak burkulmaya uğrar. Genellikle yapılarda enine destek elemanları boyuna stifnerlerden daha dayanımlı ve rijit oldukları için bütün ızgara yapısı burkulma ihtimali ihmal edilerek, bozulmanın iki enine destek elemanı arasında kalan desteklenmiş

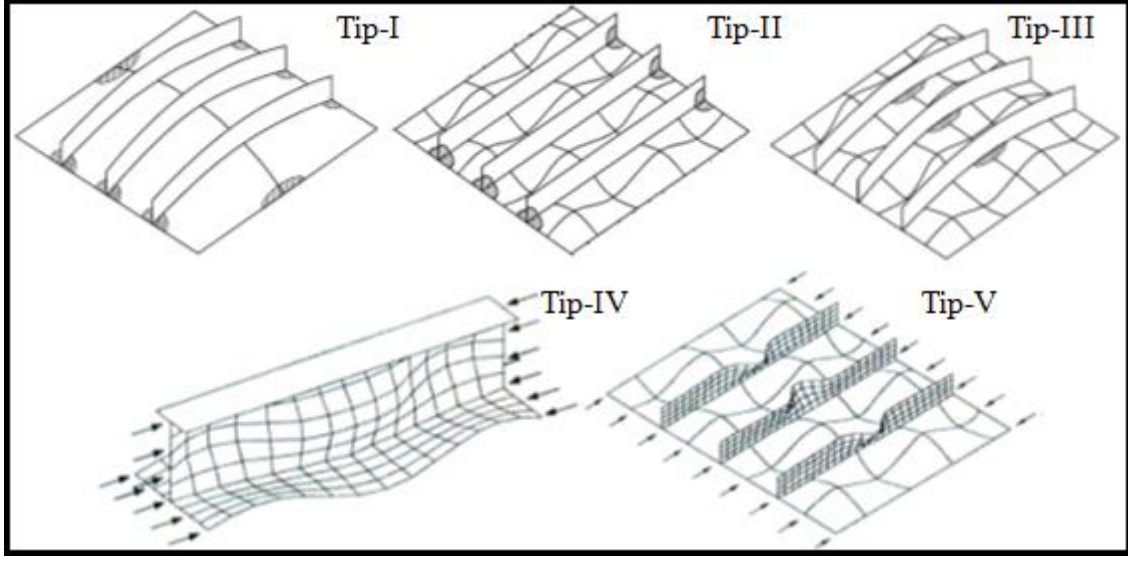
panel kısmında oluşacağı ve analizlerin bu kısımda gerçekleştirilmesi gerekliliği ön plana çıkmıştır (Smith, 1977, Ueda, 1984, Paik vd., 2001).

### **2.2.1. Desteklenmiş Panellerin Davranışlarını Etkileyen Faktörler**

- Plak Narinlik Oranı
- Stifner Enine Kesit Alanının Tüm Enine Kesit Alanına Oranı
- Stifner Gövdesi Narinlik Oranı
- Kolon Narinlik Oranı
- Malzeme Akma Gerilmesi
- İlkel Sehim
- Kaynak Sonrası Artık Gerilme
- Etkin Genişlik
- Geometrik ve Malzeme Özellikleri

### **2.2.2. Desteklenmiş Plakların Burkulmaya Bağlı Göçme Tipleri**

Desteklenmiş bir panelde olası burkulma tipleri Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Bu tiplerden gemi yapılarının incelenmesinde en fazla dikkate alınan ve analiz yöntemleri geliştirilen temel tipler II ve III numaralı tiplerdir. Bunların yanında daha gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için tüm tiplerin incelenerek en düşük göçme mukavemet değerinin elde edildiği tipingöçme mukavemet değeri, panelin göçme mukavemet değeri olarak, tüm gemi orta kesitinin kademeli göçme analizinde kullanılmalıdır (Paik vd., 2001, Kim, B.J., 2003).



Şekil 2.2. Eksenel bası kuvveti altındaki desteklenmiş plaklar için olası burkulma tipleri

### 2.2.2.1 Tip-I-Bütün Panel Göçmesi

Eksenel bası etkisindeki desteklenmiş panelde, stifnerlerin göreceli olarak zayıf olması durumunda, stifnerlerin plak ile birlikte bütün olarak elastik bölgede burkulması ve devamında panel içerisinde ve/veya panel kenarları boyunca geniş akma bölgelerinin oluşması sonucunda göçme mukavemet değerine ulaşarak göçmesi durumudur. Ortotropik plak yaklaşımı ile burkulma ve göçme mukavemet davranışı incelenir.

### 2.2.2.2. Tip-II-Plak Burkulması

Eksenel bası etkisindeki panelin stifnerler arasındaki tekil plak kısımlarının köşelerinde, stifner birleşim bölgelerinde membran gerilmelerin akma değerine ulaşması ile oluşan yerel plak burkulması kaynaklı bu panel göçmesi durumunda, stifnerlerde herhangi bir bozulma oluşmaz.

### 2.2.2.3. Tip-III-Plak-Stifner Birleşimi Kiriş-Kolon Burkulması

Bir mukavemet elemanı üzerindeki hakim yükleme eksenel bası ise 'kolon' davranışı, yanal yükler veya eğilme etkisinde ise 'kiriş' davranışı sergiler. Gemi yapısını oluşturan mukavemet elemanları genellikle bu yüklerin kombinasyonu etkisinde olduğu

için, bu yapı elemanlarının plak-stifner birleşimi kiriş-kolon elemanlar olarak analiz edilmeleri de gerekmektedir.

#### **2.2.2.4. Tip-IV-Stifner Gövdesinin veya Flencinin Yerel Burkulması**

Desteklenmiş bir panelde, plak ve stifnerlerin boyutlarına bağlı olarak, stifner gövdeleri veya flençleri, yerel plak burkulmasından önce burkulabilirler. Bu burkulma ani mukavemet kaybına sebep olur ve panel göçme mukavemet değerine ulaşarak sonrasında aniden göçer. Bu göçme tipinde, stifner gövdesinin ve flencinin burkulması ile tekil plak yerel burkulması birbirleriyle ilişkili olupstifner ve plakların boyutlarına bağlı olarak herhangi bir sırayla oluşabilirler. Burada flenç burkulmasının, gövde burkulmasından önce olmayacağı ve panelin göçme mukavemet değerinin, tekil plakgöçme mukavemeti ile stifner gövdesi göçme mukavemetinin ağırlıklı ortalamasının olacağı kabul edilerek hesaplamalar yapılır (Kim B.J., 2003).

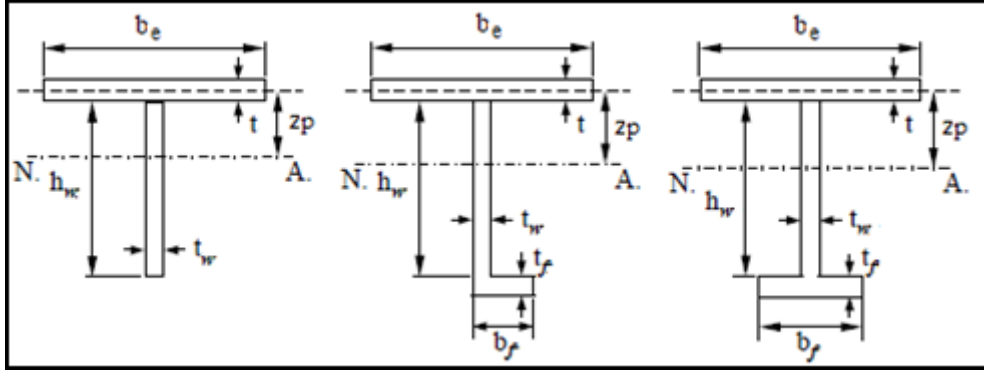
#### **2.2.2.5. Tip-V-Stifnerlerin Yanal Burulmalı Burkulması**

Stifnerin bir diğer burkulma tipi de plağa bağlandıkları noktadan yanlara doğru dönmesidir. Stifnerin burulma rijitliğinin düşük olması veya stifner flencinin zayıf olması durumunda ortaya çıkar.

Geometrik olarak herhangi bir ilkel bozukluğu olmayan kiriş-kolon elemanın kritik yük değeri özdeğer yaklaşımı ile elde edilebilir. Fakat, ilkel sehim ve kaynak sonrası artık gerilme gibi ilkel bozuklukları hesaba kattığımız zaman, özdeğer yaklaşımı yerine daha karmaşık bir yapıya sahip olan ‘yük-yer değiştirme (P-du)’ veya ‘gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma-\epsilon$ )’ yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu amaçla, plak-stifner ayrışımı yapılarak oluşturulan tüm elemanların davranışları belirlenerek, gemi gövdesinin kademeli göçme analizi daha gerçekçi olarak gerçekleştirilebilir.



### 2.2.3. Farklı Tipte Stifnerlerin En Kesit Özellikleri



Şekil 2.3. Kullanılan stifnerlerin en kesit tipleri

Enine Kesit Alanı

$$A = A_p + A_w + A_f, A_e = A_{pe} + A_w + A_f$$

$$A_p = b \cdot t ; A_{pe} = b_e \cdot t ; A_w = h_w \cdot t_w ; A_f = b_f \cdot t_f \quad (1)$$

Enine Kesit Üzerinde Eşdeğer Akma Gerilmesi  $\sigma_{Yeş} = \frac{A_p \cdot \sigma_{Yp} + A_w \cdot \sigma_{Yw} + A_f \cdot \sigma_{Yf}}{A}$  (2)

Plakın Elastik Yatay  
Taraşsız Eksene Olan  
Düsev Mesafesi

$$z_0 = \frac{0,5 \cdot b \cdot t^2 + A_w (t + 0,5 \cdot h_w) + A_f (t + h_w + 0,5 \cdot t_f)}{A} \quad (3)$$

Plakın Plastik Yatay  
Taraşsız Eksene Olan  
Düsev Mesafesi

$$z_p = \frac{0,5 \cdot b_e \cdot t^2 + A_w (t + 0,5 \cdot h_w) + A_f (t + h_w + 0,5 \cdot t_f)}{A_e} \quad (4)$$

Atalet Momenti

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12} + A_p \left( z_0 - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{h_w^3 \cdot t_w}{12} + A_w \left( z_0 - t - \frac{h_w}{2} \right)^2 + \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + A_f \left( t + h_w + \frac{t_f}{2} - z_0 \right)^2 \quad (5)$$

$$I = \frac{b_e \cdot t^3}{12} + A_{pe} \left( z_p - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{h_w^3 \cdot t_w}{12} + A_w \left( z_p - t - \frac{h_w}{2} \right)^2 + \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + A_f \left( t + h_w + \frac{t_f}{2} - z_p \right)^2 \quad (6)$$

Atalet Yarıçapı

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad , \quad \sqrt{\frac{I_e}{A}} \quad (7)$$

$$\text{Kolon Narinlik Oranı} \quad \lambda = \frac{L}{\pi \cdot r} \sqrt{\frac{\sigma_{Yeş}}{E}} ; \lambda_e = \frac{L}{\pi \cdot r_e} \sqrt{\frac{\sigma_{Yeş}}{E}} \quad (8)$$

$$\text{Plak Narinlik Oranı} \quad \beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{Yp}}{E}} \quad (9)$$

#### 2.2.4. Etkin Genişlik

Plak-Stifner birleşimi kiriş-kolon elemanda stifner ile bağlı olduğu plağın yükleme altında ayrı davranış sergileyecekleri düşünülemez. Fakat birlikte davranış sergileyecekleri düşünüldüğünde de plağın ne kadar genişlikteki kısmının bu davranışta etkin rol alacağı önemlidir. Bu anlamda, plağın, aksenal bası kuvvetleri hâkimiyetinde burkulması durumunda veya burkulma sonrası ve büyük yer değiştirme durumlarında, plak üzerinde oluşan lineer olmayan gerilme dağılımlarının lineerleştirilmesi durumunda, etkinliğinin göstergesi olarak 'etkin genişlik' tanımlaması yapılır. Bu çalışmada plak denklemleri kullanılarak elde edilecek çözümlerde lineer olmayan dağılımın kendisi kullanılacağından etkin genişlik kavramından özetle bahsedilerek geçilmiştir.

#### 2.2.5. Eğrilik Kavramı

Düşey eğilme davranışı incelenirken yapılan temel kabuller;

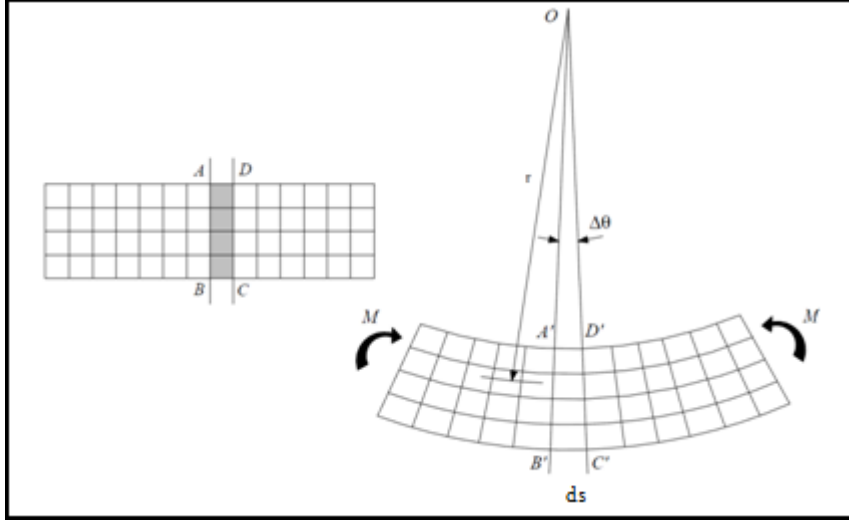
- Düzlem kesitlerin eğilme momenti ve kuvvet etkisiyle de burkulmasından sonra düzlem kalacağı,

$$\sum F_x = 0 \text{ ve } \sum M_z = 0 \text{ denge koşulları sağlanmalı} \quad (10)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (11)$$

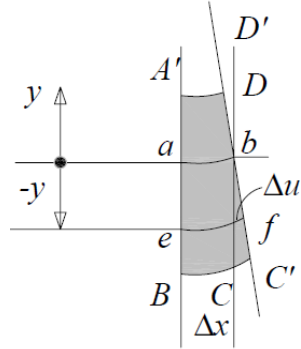
##### 2.2.5.1. Düzlem Kesit Düzlem Kalır Kabulü

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, AB ve AD eğilmeden sonra düz kalmaktadır. A'B' ve C'D' O noktasında kesişmektedir ve r eğrilik yarıçapına sahiptir.



Şekil 2.4. Düzlem kesitin eğilme sonrası düzlem kaldığı kabulü

Bu durumda oluşan tarafsız eksende, ab eğrisi tanım gereği değişmeyerek  $\Delta x$ 'e eşit olacaktır. Bu durumda;



$$\epsilon_x = \frac{\overline{ef} - \overline{ab}}{\overline{ab}} = \frac{(r-y)\Delta\theta - r.\Delta\theta}{r.\Delta\theta} \quad (12)$$

ve  $\frac{1}{r} = \kappa$ , eğrilik olarak alınırsa (13)

$$\epsilon_x = -\frac{y}{r} = -y.\kappa = -y \frac{d\theta}{ds} \quad (14)$$

### 2.2.5.2. Eksenel Kuvvet Dengesi

$$\sum F_x = \int_A \sigma_x \cdot dA = 0 \quad (15)$$

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x$$

$$\int_A E \cdot \varepsilon_x \cdot dA = 0$$

$$\varepsilon = -y \cdot \kappa \text{ ise}$$

$$-E \cdot \kappa \cdot \int_A y \cdot dA = 0 \rightarrow \int_A y \cdot dA = 0$$

düzlem kesitte lineer malzeme için; (16)

$$\text{Tanım gereği } \bar{y} = \frac{\int_A y \cdot dA}{A} \rightarrow \bar{y} = 0$$

, eğer orijin tarafsız eksen ise alan ağırlık merkezinin koordinatı 0 dır.

### 2.2.5.3. Moment Dengesi

$$\sum M = M + \int (n_x \cdot dA) \cdot y = 0$$

$$n_x = E \cdot n_x = E \cdot (-y \cdot n)$$

$$M = E \cdot n \int y^2 \cdot dA \text{ buradan}$$

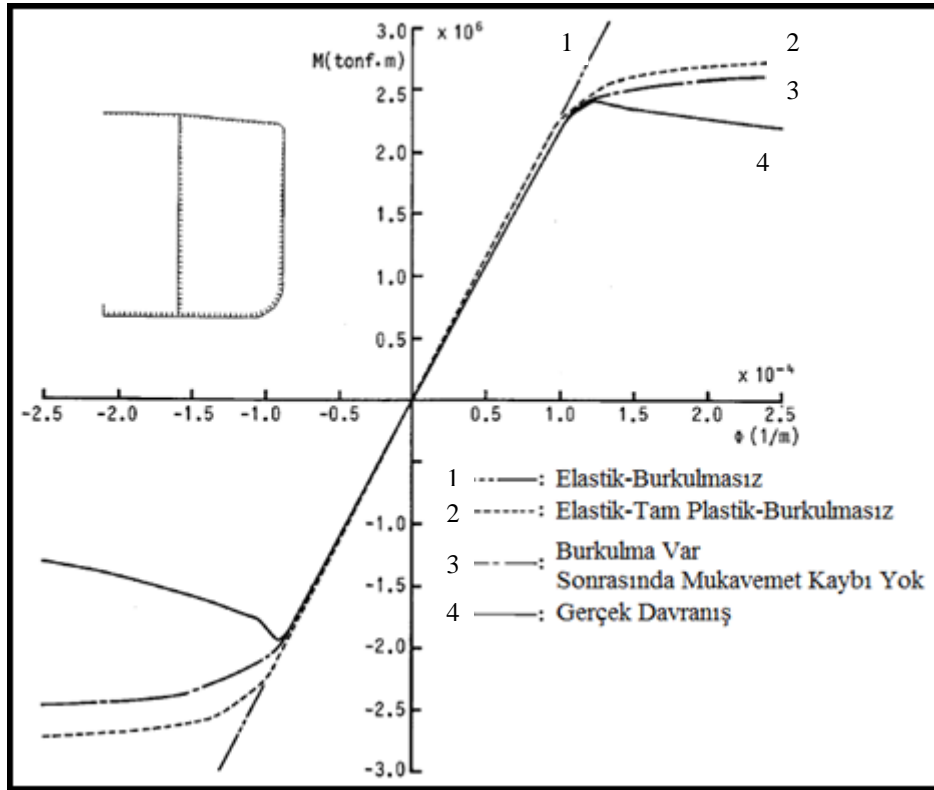
$$n = \frac{1}{r} = \frac{dn}{ds} = \frac{M}{EI} \quad (17)$$

$$n_x = -E \cdot y \cdot n = -E \cdot y \cdot \frac{M}{EI} = -\frac{M \cdot y}{I}$$

### 2.2.6. Moment-Eğrilik İlişkisi

Düşey eğilme neticesinde eksenel bası kuvveti altındaki bir kesitin davranışı, en sağlıklı bir biçimde, gerçek malzeme davranışını temel alarak hesaplanmış veya deneysel verilerden elde edilmiş, "Moment-Eğrilik" eğrilerinden izlenebilir. M-κ eğrisi davranışı çok açık bir biçimde gösterir. Dayanımı ve kesitin dönme kapasitesini belirler ve iki kez integre edilirse gerçekçi deformasyon elde edilir. Moment-eğrilik ilişkisi çıkarılırken malzeme modellerinin olabildiğince gerçekçi olması büyük önem taşır. Çelik modellerde ya elasto-plastik yada elasto-plastik pekleşen malzeme davranışı kullanılır.

Moment-eğrilik eğrisindeki değişim bir noktaya geldiğinde, moment değeri maksimum değerine ulaşır. Bu değer gemi kirişinin dayanabileceği en üst mukavemet değerini yani göçme mukavemetini gösterir (Smith, 1977). Bu değere kadar artan moment ihtiyacı, eğrilik artırılmasına bağlı olarak elemanların rijitliklerinden elde edilir. Bu noktadan sonra eğrilik değerinin artmasına rağmen moment değerinde bir artış gözlenmez ve aksine artış yerini azalmaya bırakır. Elemanlarda başlayan yapısal bozulmalar kademeli olarak ilerleyerek göçmeye başlar. Henüz tümüyle göçmeye uğramamış elemanlar ise dayanım göstermeye ve moment oluşturmaya devam ederler. Göçmemiş eleman sayısındaki azalma nedeniyle toplam moment değeri düşmeye başlar.



Şekil 2.5. Moment-eğrilik diyagramı

Şekil 2.5'te, Smith yöntemiyle yapılan hesaplamada elemanların elastik bölgede kaldıkları kabul edilerek yapılan çözüm sonucu gemi gövde kirişinin moment-eğrilik (göçme mukavemet) davranışları 1 numaralı eğriyle gösterilmiştir. Ayrıklaştırılan elemanlarda burkulmanın göz ardı edildiği durumda, malzeme davranışının ideal elastik-tam plastik olduğu varsayımıyla yapılan hesaplama sonucu gemi gövde kirişinin moment-eğrilik (göçme mukavemet) davranışları 2 numaralı eğri ile gösterilmiştir. Daha gerçekçi

durumolan lokal plak burkulmalarının olduğu ancak idealleştirilerek burkulmaların sonrasında mukavemet kaybının oluşmadığı kabulü ile elemanlara ait yapılan hesaplamasonucu gemi gövde kirişinin moment-eğrilik (göçme mukavemet) davranışları 3 numaralı eğri ile gösterilmiştir. Son olarak, elemanlarda burkulmaların ve burkulmalar sonrası mukavemet kayıplarının dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucu gemi gövde kirişinin gerçek moment-eğrilik (göçme mukavemet) davranışları 4 numaralı eğri ile gösterilmiştir. Gemi gövde kirişinde, gerçek davranışa göre yapılan hesaplama sonucu oluşan eğride, artan eğrilik değerlerine bağlı olarak başlayan yapısal bozulmalar ve mukavemet kayıplarının etkisi gösterilir. Yapısal bozulmaların başlaması verilen eğrilik değerlerinde gemi kirişinin daha az momente karşı koyabileceğini, böylelikle mukavemetinin azaldığını göstermektedir.

### **2.2.7. Problemin Çözüm Aşamalarında Yapılan Yaklaşım ve Kabuller**

Desteklenmiş panelin, birincil yük olarak düzlem içi boyuna eksenini doğrultusunda aksenal basıya, ikincil yük olarak da düzlem dışı yanal basınca zorlanması durumunda;

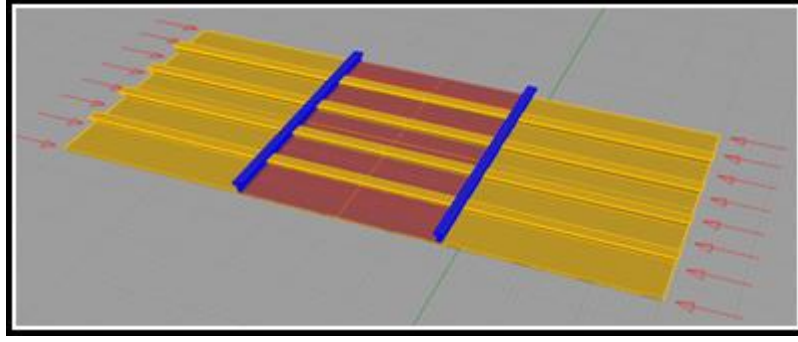
Yaklaşım 1: Elastik bölgedeki davranışı belirlemek için elastik büyük yer değiştirme analizi

Yaklaşım 2: Plastik bölgedeki davranışları belirlemek için plak kenarı odaklı membran gerilme dağılımı yaklaşımı - plak köşe noktaları veya kenar ortalarının plastik akma davranışlarının Von-Mises eşdeğer akma kriteri kontrolü ile belirlenmesi.

Kabul 1: Plak parçasının dörtkenarı da basit mesnetlenmiş ve kenarlar düzlem içi hareketlerde düzgün kalacaktır.

Kabul 2: Kaynak sonrası oluşan artık gerilmeler ile plakta oluşan ilkelyer değiştirmeler hesaba katılacaktır.

Kabul 3: Desteklenmiş sürekli bir panel yapısında bozulmanın, komşu iki enine destek elemanı arasında kalan kısmında meydana geldiği kabul edilerek analizler bu bölgede yapılacaktır. Bu durum Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

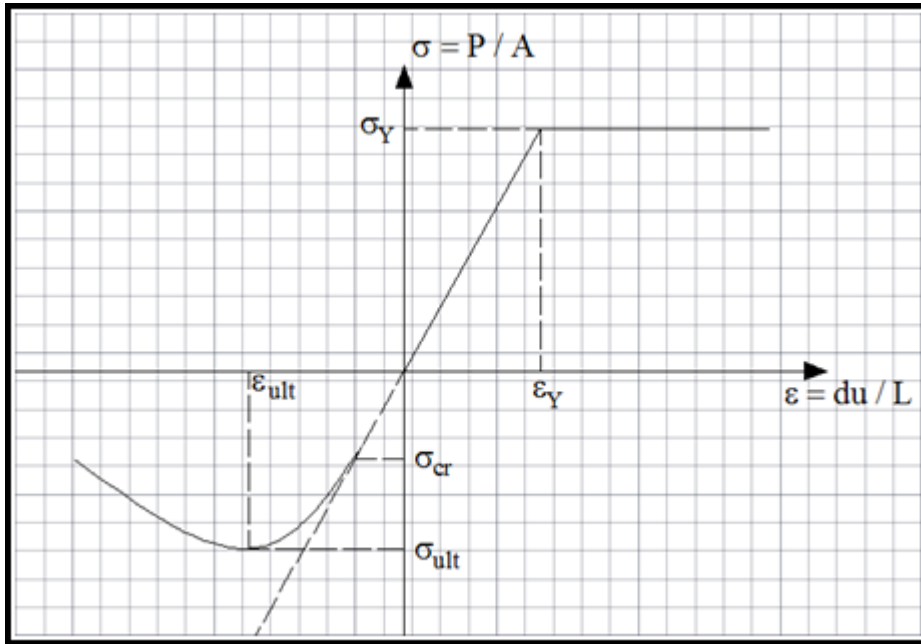


Şekil 2.6. İki enine destek elemanı arasında kalan desteklenmiş plak modeli

Kabul 4: İki enine destek elemanı arasında kalan buyapınımınsonlarının, enine destek elemanlarına basit mesnetli olarak bağlandığı kabul edilecektir.

Kabul 5: Düzlem enine kesitlerineğilme sonrası düzlem kalacağı kabul (Euler-Bernoulli Eğilme Teorisi) edilecektir.

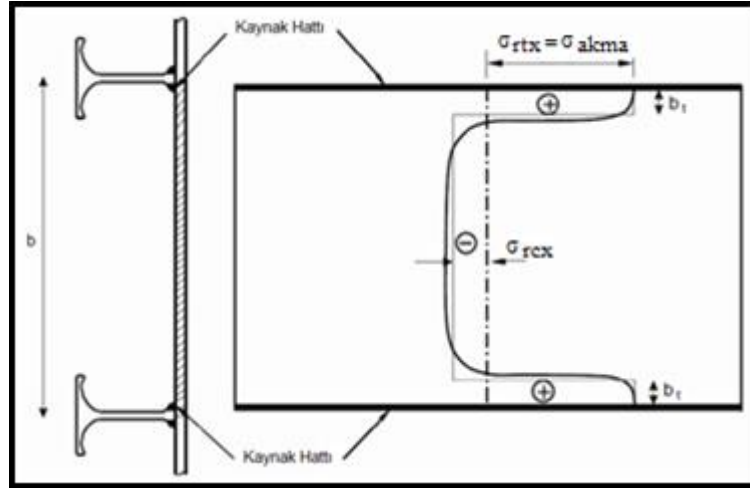
Kabul 6: Çekiye zorlanan elemanlar ile köşe elemanlar için rijit tam plastik malzeme davranışı - plastik bölgeye ulaşıldıktan sonra gerilme değerinin sabit kalarak yer değiştirmenin devam etmesi ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğiminin sıfır olması hali, bası kuvvetleri altındaki elemanlarda ise elasto-plastik burkulma davranışı sergileneceği kabul edilecektir. Bu durum Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Gemi enine kesitini oluşturan plak elemanlarının bası yükleri altında ortalama gerilme ortalama şekil değiştirme eğrisi

Kabul 8: Eksenel bası etkisine maruz kalmadan önce mevcut ilkel yer değiştirmesi tipinin, iki komşu enine destek elemanı arasında kalan plakelemanda meydana gelen yarım-sinüs dalgası (sonlarda yer değiştirmeler sıfır) formunda, burkulma moduna uygun şekilde olduğu kabul edilecektir.

Kabul 9: Kaynak sonrası oluşan artık gerilmelerin plaktaki dağılımları idealleştirilmiş biçimde aşağıdaki şekil 2.8’de gösterildiği gibi olacaktır.



Şekil 2.8. Plak üzerinde kaynak sonrası oluşan artık gerilme dağılımı

$\sigma_{rcx}$  = Kaynak sonrası x-doğrultusunda oluşan ideal artık bası gerilmesi

$\sigma_{rtx}$  = Kaynak sonrası x-doğrultusunda oluşan ve akma gerilmesi ile eşdeğer ideal artık çeki gerilmesi

$\sigma_{rcy}$  = Kaynak sonrası y-doğrultusunda oluşan ideal artık bası gerilmesi

$\sigma_{rty}$  = Kaynak sonrası y-doğrultusunda oluşan ve akma gerilmesi ile eşdeğer ideal artık çeki gerilmesi

Kaynak sonrası oluşan ideal bası ve çeki gerilmelerinin plak üzerinde etki ettiği bölgelerin genişlikleri aşağıdaki şekilde belirlenmektedir. Yüksüz kenar boyunca, kaynak ısı etkisinde kalan bölgenin genişliği  $b_t$  olarak alınır;

$$\frac{2b_t}{b} = \frac{\sigma_{rcx}}{\sigma_{rcx} - \sigma_{rtx}} \quad (18)$$



Gemi yapılarında kullanılan durum ele alındığında, uzun olan doğrultuda (x-doğrultusu, gemi boyu) artık kaynak gerilmeleri, kaynak uzunluğunun fazla olmasından dolayı daha büyük değerlere ulaşabilmektedir. Bu sebeple kısa doğrultuda (y-doğrultusu, gemi eni veya z doğrultusu, gemi yüksekliği) oluşan artık kaynak gerilmeleri ihmal edilecektir. Plak üzerindeki artık kaynak gerilme dağılımı izdüşüm denge denkleminde yerine konularak elde edilecek iç kuvvet değeri sıfır değerini verecektir. Denklem (18) bu dengeye bağlı olarak elde edilmektedir (Hughes ve Paik, 2010).

### **2.3. Tekil Plakların Elastik ve Elastik Olmayan Göçme Davranışları**

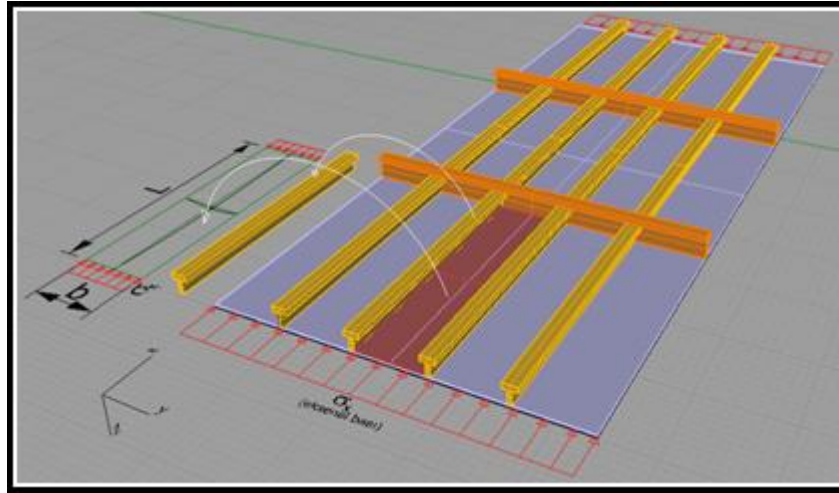
Kutu kirişin veya gerçek gemi kirişinin orta kesitinin kademeli göçme analizinde, yapı yalnız plak-stifner birleşimi şeklinde değil, plak-stifner ayrışımı yapılarak idealleştirilmiş, bunun yanında, stifnerlerin de lama, L-profil ve T-profil olması durumları ayrı ayrı ele alınarak, stifner gövdesinin ve varsa flençlerinin lokal burkulması ile stifner gövdesinin yanal burulma burkulması durumları göz önüne alınmıştır. Plak ve/veya stifner göçmesine bağlı olarak panellerin (güverte, dip veya borda) ve nihayetinde de tüm kesitin göçme mukavemet değeri hesaplanmaya çalışılmıştır.

Desteklenmiş paneller, plak ve plağa destek amacıyla birleştirilen stifnerlerden oluşmaktadır. Bütün olarak panel veya kendisini oluşturan tekil plak veya stifnerler elastik bölgede burkulursa, panel, henüz yük taşıma kapasitesini yitirmez ve daha fazla yüke dayanabilir. Benzer şekilde, stifnerler arasında kalan tekil plak, stifnerin gövde ve/veya flençlerinden önce burkulursa, yapı uygulanacak daha fazla yüke dayanabilecek mukavemete sahiptir ve göçme mukavemet değerine, yapının aşırı plastisiteye uğraması veya stifnerlerin göçmesi sonucunda ulaşmaktadır.

#### **2.3.1. İlkel Sehimi Olan Tekil Plakta Uygunluk Bağıntısı ve Denge Denklemi**

Bu çalışmada kullanılan teori, başlangıçta düzlem dışı deformasyona uğramış, ilkel sehimi olan tekil dikdörtgen plakların, düzlem içi yükler ve plak normal doğrultusunda  $Y \text{ br/m}^2$  lik yük altındaki davranışını incelemeye olanak sağlamaktadır. Teorinin temelleri, başlangıç sehimi olmayan düz plakların sehim davranışlarının incelenmesi için von-Karman vd. (1932) tarafından atılmıştır. Marguerre (1938), bu temel denklemlerden

yola çıkararak plağı  $z = z(x,y)$  formunda başlangıç sehimine sahip olarak ele almıştır. Burada  $Y$  değeri küçük eğim yaklaşımını sağlayacak yeterlikte küçük değerde olacağı kabulü yapılmıştır. Maruz kaldığı yükler altında plağın orta yüzeyinde meydana gelen sehim değeri “ $w$ ” olarak alınmış ve göçme durumda plağın sehim değeri “ $z+w$ ” olarak ele alınmıştır. İncelenen tekil plak örneği Şekil 2.9'da ve toplam sehimin şematik gösterimi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. İkel sehimli, boyuna aksenal bası etkisi altındaki tekil plak

$$N_x = \int \sigma_x \cdot dh \quad Q_x = \int \tau_{xz} \cdot dh \quad M_x = \int \sigma_x \cdot h \cdot dh$$

$$N_y = \int \sigma_y \cdot dh \quad Q_y = \int \tau_{yz} \cdot dh \quad M_y = \int \sigma_y \cdot h \cdot dh$$

$$N_{xy} = N_{yx} \int \tau_{xy} \cdot dh \quad M_{xy} = M_{yx} \int \tau_{xy} \cdot h \cdot dh$$

Deforme olmuş bir elemanda denge denklemleri;

$$\frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial N_x}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

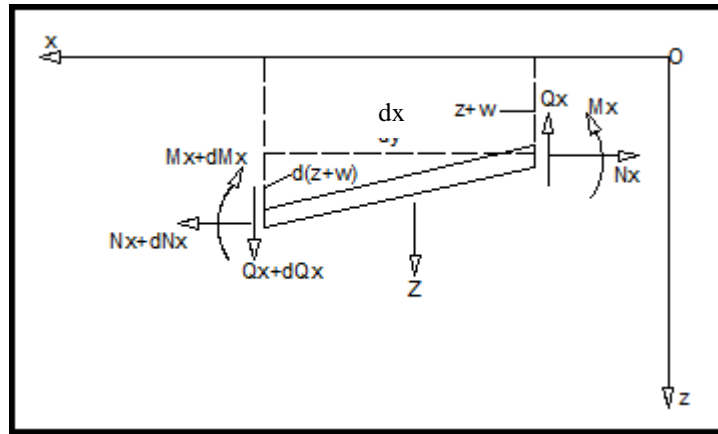
$$\frac{\partial Q_y}{\partial y} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + Z = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y(z+w)}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}(z+w)}{\partial x} - Q_y = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial N_x(z+w)}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}(z+w)}{\partial y} - Q_x = 0 \quad (22)$$

(20), (21) ve (22) denklemleri kullanılarak  $Q_y$  ve  $Q_x$  yok edilir. Bunun için, (21) denkleminin  $z$ 'ye göre, (22) denkleminin de  $x$ 'e göre birer türevi alınır ve yeni eşitlikler alta toplanırsa;

$$\frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \cdot \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 N_y(z+w)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N_x(z+w)}{\partial x^2} + 2 \cdot \frac{\partial^2 N_{xy}(z+w)}{\partial x \partial y} + Z = 0 \quad (23)$$



Şekil 2.10. Deforme olmuş durumda plak elemanına etkiyen yüklemeler

Kütle kuvvetlerinin olmadığı durumda, Airy gerilme fonksiyonu  $F$  olarak tanımlanırsa;

$$N_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \quad ; \quad N_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad ; \quad N_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \quad (24)$$

Bu durumda (19) denge denklemleri sağlanır.

$$\frac{\partial^3 F}{\partial y \partial x^2} - \frac{\partial^3 F}{\partial y \partial x^2} = 0 \quad \text{ve} \quad -\frac{\partial^3 F}{\partial x \partial y^2} - \frac{\partial^3 F}{\partial x \partial y^2} = 0 \quad (25)$$

$$N_x = F'' \quad ; \quad N_y = F'' \quad ; \quad N_{xy} = -F'' \quad \text{olarak yazılabilir.} \quad (26)$$

(" " " y'ye göre türevi ve " " " x'e göre türevi ifade eder.)

Buradan (23) denklemi şöyle yazılabilir.

$$M_y'' + 2M_{xy}' + M_x'' + F''(z+w)'' - 2F''(z+w)' + F''(z+w) + Z = 0 \quad (27)$$

Düzlem elastisite bünye denklemleri gerilme-şekil değiştirme ilişkileri genel haliyle;

$$N_x = \frac{E \cdot t}{1 - \vartheta^2} (\varepsilon_x - \vartheta \varepsilon_y) \quad (28.1)$$

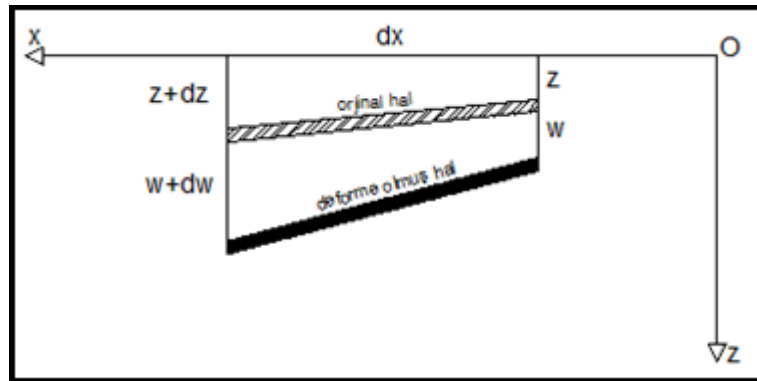
$$M_x = D \cdot (\kappa_x + \vartheta \cdot \kappa_y) \quad (28.4)$$

$$N_y = \frac{E \cdot t}{1 - \vartheta^2} (\varepsilon_y - \vartheta \varepsilon_x) \quad (28.2)$$

$$M_y = D \cdot (\kappa_y + \vartheta \cdot \kappa_x) \quad (28.5)$$

$$N_{xy} = \frac{E \cdot t \cdot \gamma_{xy}}{2 \cdot (1 + \vartheta)} \quad (28.3)$$

$$M_{xy} = D \cdot \kappa_{xy} \quad (28.6)$$



Şekil 2.11. Plak elemanda meydana gelen toplam sehim durumu

Gerilme ve deformasyon sonucu oluşan geometrik değişiklikler dikkate alınarak uygunluk bağıntıları elde edilir. Şekil 2.11'den yararlanarak, Pisagor Teoremi ve kesilmiş binom açılımı kullanılarak şekil değiştirme ve eğrilikler aşağıdaki gibi yazılır.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{(\partial w / \partial x)^2}{2} \quad (29)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{(\partial w / \partial y)^2}{2} \quad (30)$$

$$\gamma_{xy} = - \left[ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (31)$$

$$\kappa_y = - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} ; \quad \kappa_x = - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} ; \quad \kappa_{xy} = - \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (32)$$

(29), (30), (31) denklemlerinden  $\frac{\partial u}{\partial x}$  ve  $\frac{\partial v}{\partial y}$  yok edilirse;

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 z}{\partial x \partial y^2} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{2 \partial x^2 \partial y^2} \quad (33)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2} + \frac{\partial^3 z}{\partial y \partial x^2} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} + \frac{\partial^4 w}{2 \partial x^2 \partial y^2} \quad (34)$$

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = - \left[ \frac{\partial^3 v}{\partial y \partial x^2} + \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 z}{\partial x \partial y^2} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} + \frac{\partial^3 z}{\partial y \partial x^2} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] \quad (35)$$

Taraf tarafa toplayıp, elde edilen eşitlikte “ ‘ ‘ ile “ . “ notasyonunu kullanıp, düzenlersek;

$$\begin{aligned} \varepsilon_y'' + \varepsilon_y' \cdot - \gamma_{xy}' \cdot - z' \cdot w' - \frac{w'^2}{2} - z' \cdot w' - \frac{w'^2}{2} + z'' \cdot w' + z' \cdot w'' + w'' \cdot w' &= 0 \\ \varepsilon_y'' + \varepsilon_y' \cdot - \gamma_{xy}' \cdot + z'' \cdot w' + z' \cdot w'' - 2 \cdot z' \cdot w' - w'^2 + w'' \cdot w' &= 0 \end{aligned} \quad (36)$$

(28) denklemlerindeki şekil değiştirme ve eğrilikleri gerilme fonksiyonu cinsinden düzenlersek ve (24) denklemden yararlanarak uygunluk bağıntısı (36) aşağıdaki halini alır.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E \cdot t} (N_x - \vartheta N_y) \quad (37)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E \cdot t} (N_y - \vartheta N_x) \quad (38)$$

$$\gamma_{xy} = -2 \cdot \frac{1}{E \cdot t} \cdot N_{xy} \cdot (1 - \vartheta) \quad (39)$$

$N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_{xy}$  'ler Airy gerilme fonksiyonu (F) cinsinden yazılıp, denklem (36) gerekli düzenlemeler yapılarak aşağıdaki lineer olmayan kısmi diferansiyel denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right)'' + \left( \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \right)'' - \left( -2 \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \right)' + E \cdot t \cdot [z'' \cdot w \cdot + z \cdot w'' - 2 \cdot z' \cdot w' - w'^2 + w'' \cdot w \cdot] = 0 \\ & \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} + E \cdot t \cdot [z'' \cdot w \cdot + z \cdot w'' - 2 \cdot z' \cdot w' - w'^2 + w'' \cdot w \cdot] = 0 \end{aligned} \quad (40)$$

$$\nabla^4 F + E \cdot t \cdot [z'' \cdot w \cdot + z \cdot w'' - 2 \cdot z' \cdot w' - w'^2 + w'' \cdot w \cdot] = 0 \quad (41)$$

Benzer şekilde işlemler (27) denklemden yararlanarak (25) denklemi için de yapılır ve düzenlenirse,

$$M_y'' = -D \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \quad (42)$$

$$M_x'' = -D \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (43)$$

$$M_{xy}' = -D \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \quad (44)$$

$$\begin{aligned}
& -D. \left( \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) + [F''(z+w)'' - 2F'(z+w)' + F''(z+w)] + Z = 0 \\
& D. (\nabla^4 w) - [F''(z+w)'' - 2F'(z+w)' + F''(z+w)] - Z = 0 \quad (45)
\end{aligned}$$

Yukarıdaki (41) ve (45) denklemleri, Marguerre'in (1938), Von-Karman'ın (1932) ilkel sehimi olmayan, düzgün, tekil plakların (desteklenmemiş plakların), sehim hesapları için elde ettiği denklemleri geliştirerek, ilkel sehimi olan tekil plakları da kapsayan, izotrop malzeme kabulü dışında, genel plak sehim hesaplamaları için elde ettiği, sırasıyla uygunluk bağıntısı ve denge denklemi olmak üzere temel iki lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemlerdir.

### 2.3.1.1. Marguerre Denklemlerinin Yaklaşık Analitik Çözümü

Desteklenmiş plaklarda, Marguerre denklemlerinin çözülerek, yerel ve global burkulma gerilmelerini ayrı ayrı veya eş zamanlı etkileşimli olarak belirlenmesi için sonlu şeritler yöntemi kullanılabilir. Sonlu farklar yöntemi ve Runge Kutta yöntemleri ile de, plak elemanların kenarlarının yer değiştirme yapmayacağı kabulü sebebiyle, yalnızca yerel burkulma gerilmelerini belirleyebilmek mümkündür. Fakat bu iki yöntemde de oluşan sehimin şekli x-doğrultusunda, tekil sinüs eğrisi olarak kabul edildiği için, uçları ankastre mesnetlenmiş durumlarda çözüm vermemektedir. Sonlu farklar yönteminde ise böyle bir sınırlama yoktur. Bu çözümler sadece sınır değer problemi ile ilgilidir. Bu nedenle ikinci derece etkileri ve burkulma sonrası davranışları bu yöntemlerle incelemek mümkün olmamaktadır. Yukarıda belirtilen yöntemlerle incelenemeyen burkulma sonrası davranışları inceleyebilmek için kullanılacak yaklaşık analitik çözüm için dörtkenarlı basit mesnetlenmiş, başlangıç sehimi olan ve boyuna eksenel yüklemeye maruz kalan kare bir plak ele alınmıştır (Murray, 1984).

Burada amaç, plağın merkezinde oluşacak sehimin ifadesini, bunun yanında membran gerilmelerin ve eğilme gerilmelerinin dağılımını,  $\sigma_x$  eksenel gerilmelerinin değişimi cinsinden elde etmektir. Bunun sonucunda da başlangıç sehimlerinin, en-boy oranının ve yüksüz boyuna kenarlarda ( $y = +b/2$ ,  $y = -b/2$ ) sınır koşullarının plak davranışlarına etkileri incelenmiş olacaktır. Orjin noktası olarak plağın merkezi alınmıştır.

Çalışmamızda, gemi yapısını oluşturan tekil plaklar ve maruz kalacağı yükler düşünüldüğünde, yüksüz kenarlarda kullanılan sınır koşullarına göre, kenarlar düz

tutulmuş, y-yönünde sabit yer değiştirmeye izin verilmiş, fakat toplam yanal yük değeri sıfır alınmıştır. Bu durum, geniş bir desteklenmiş plağın (plak panel) eksenel yüklenmesi halini temsil eder. Plak panelin kenarlarının hareketleri, etrafındaki plak paneller tarafından düz kalacak şekilde sınırlanır. Ayrıca, burkulma sırasında yüklü kenarlar düz tutulur, tüm kenarlarda sehimler sıfır olur ve kayma gerilmeleri sıfırdır. En genel kabul ile çoğu araştırmacının kullandığı, yüklü ve yüksüz kenarların basit mesnetli kabul edildiği sınır şartı olan bu ideal durumu ele alarak çözüm yapılmıştır.

Çözüme başlanırken başlangıç sehiminin ifadesi;

$$z = z_0 \cdot \cos(m \cdot \lambda \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \quad (46)$$

$\beta = \frac{\pi}{b}$ ,  $\lambda = \frac{\pi}{L}$  ve m, plak boyutlarına bağlı olarak burkulmanın olduğu durumdaki yarım dalga sayısını ifade eder. Yalnızca eksenel bası kuvvetleri olması durumunda, m genel kabul itibarıyla  $L/b \leq \sqrt{m \cdot (m + 1)}$  değerini sağlayan en küçük dalga sayısı olarak alınmış ve hesaplarda kullanılarak plağın elastik büyük yer değiştirme davranışları incelenmiştir.

Bunun yanında (41) ve (45) denklemlerinin bir çözümü olarak;

$$w = w_0 \cdot \cos(m \cdot \lambda \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \quad (47)$$

Böylece toplam sehim değeri  $z+w$  olacaktır. (41) denklemine tekrar döndüğümüzde denklemin  $w$  sehimini için lineer olmadığı, fakat  $F$ 'ye göre lineer olduğu ve çözümün bu açıdan daha kolay elde edilebileceği görülmektedir. İlk olarak kare plak ( $L=b$  ve  $m=1$ ) alarak, başlangıç sehimini ve zorlanmadan sonra oluşan sehim ifadelerini (46 ve 47 denklemleri), (41) denkleminde yerine yazarsak F-Airy gerilme fonksiyonu için aşağıdaki çözümü elde ederiz.

$$\left. \begin{aligned} z &= z_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \cos \beta y & w &= w_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \cos \beta y \\ z' &= -z_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \lambda \cdot \sin \beta y & w' &= -w_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \lambda \cdot \sin \beta y \\ z'' &= -z_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \lambda^2 \cdot \cos \beta y & w'' &= -w_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \lambda^2 \cdot \cos \beta y \\ z' &= -z_0 \cdot \beta \cdot \sin \lambda x \cdot \cos \beta y & w' &= -w_0 \cdot \beta \cdot \sin \lambda x \cdot \cos \beta y \\ z'' &= -z_0 \cdot \beta^2 \cdot \cos \lambda x \cdot \cos \beta y & w'' &= -w_0 \cdot \beta^2 \cdot \cos \lambda x \cdot \cos \beta y \\ z' &= z_0 \cdot \beta \cdot \lambda \cdot \sin \lambda x \cdot \sin \beta y & w' &= w_0 \cdot \beta \cdot \lambda \cdot \sin \lambda x \cdot \sin \beta y \end{aligned} \right\} \quad (48)$$



$$\begin{aligned} z'' \cdot w'' &= (-z_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \lambda^2 \cdot \cos \beta y)(-w_0 \cdot \beta^2 \cdot \cos \lambda x \cdot \cos \beta y) \\ &= z_0 \cdot w_0 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2 \cdot \cos^2 \lambda x \cdot \cos^2 \beta y \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} -2 \cdot z' \cdot w' &= -2 \cdot (z_0 \cdot \beta \cdot \lambda \cdot \sin \lambda x \cdot \sin \beta y)(w_0 \cdot \beta \cdot \lambda \cdot \sin \lambda x \cdot \sin \beta y) \\ &= -2 \cdot z_0 \cdot w_0 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2 \cdot \sin^2 \lambda x \cdot \sin^2 \beta y \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} z'' \cdot w'' &= (-z_0 \cdot \beta^2 \cdot \cos \lambda x \cdot \cos \beta y)(-w_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \lambda^2 \cdot \cos \beta y) \\ &= z_0 \cdot w_0 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2 \cdot \cos^2 \lambda x \cdot \cos^2 \beta y \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} w'' \cdot w'' &= (-w_0 \cdot \cos \lambda x \cdot \lambda^2 \cdot \cos \beta y)(-w_0 \cdot \beta^2 \cdot \cos \lambda x \cdot \cos \beta y) \\ &= w_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2 \cdot \cos^2 \lambda x \cdot \cos^2 \beta y \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} -w'^2 &= -(w_0 \cdot \beta \cdot \lambda \cdot \sin \lambda x \cdot \sin \beta y)^2 \\ &= -w_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2 \cdot \sin^2 \lambda x \cdot \sin^2 \beta y \end{aligned} \quad (53)$$

(35)-(39) denklemleri yerlerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} &[+2 \cdot z_0 \cdot w_0 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2 \cdot (\cos^2 \lambda x \cdot \cos^2 \beta y - \sin^2 \lambda x \cdot \sin^2 \beta y)] + \\ &[w_0 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2 \cdot (\cos^2 \lambda x \cdot \cos^2 \beta y - \sin^2 \lambda x \cdot \sin^2 \beta y)] = -\frac{\nabla^4 F}{E \cdot t} \end{aligned} \quad (54)$$

$$(\cos^2 \lambda x \cdot \cos^2 \beta y - \sin^2 \lambda x \cdot \sin^2 \beta y)(2 \cdot z_0 \cdot w_0 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2 + w_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2) = -\frac{\nabla^4 F}{E \cdot t} \quad (55)$$

$$[\cos^2 \lambda x \cdot \cos^2 \beta y - \sin^2 \lambda x \cdot \sin^2 \beta y](w_0 \cdot \lambda^2 \cdot \beta^2)(2 \cdot z_0 + w_0) = -\frac{\nabla^4 F}{E \cdot t} \quad (56)$$

İlgili trigonometrik değişiklikler yapıldığında;

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = -\frac{1}{2} (\cos 2\beta y + \cos 2\lambda x)(\lambda^2 \cdot \beta^2 (w_0 + 2 \cdot z_0)) \quad (57)$$

Bu denklemin ilk sınır şartlarını sağlayan çözümünden homojen çözüm olarak;

$$F_H = \sigma_{x_{ort}} \cdot \frac{y^2}{2} \quad (58)$$

özel çözüm olarak;

$$F_0 = \frac{E \cdot w_0 \cdot (w_0 + 2 \cdot z_0)}{16} \left( \frac{\lambda^2}{\beta^2} \cos^2 \beta y + \frac{\beta^2}{\lambda^2} \cos^2 \lambda x \right) \quad (59)$$

(58) ve (59) denklemleri toplanarak F-Airy gerilme fonksiyonu için çözüm,

$$F = \frac{E \cdot w_0 \cdot (w_0 + 2 \cdot z_0)}{16} \left( \frac{\lambda^2}{\beta^2} \cos^2 \beta y + \frac{\beta^2}{\lambda^2} \cos^2 \lambda x \right) + \frac{\sigma_{x_{ort}} \cdot y^2}{2} \quad (60)$$

Bu denklemin ikinci teriminde (homojen çözümde) eksenel yük parametresi olarak,

$$p = \frac{\sigma_{x_{av}}}{E} = \frac{N_{x_{av}}}{E \cdot t} \quad (61)$$

alınırsa, denklem (60) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{F}{E \cdot t} = \frac{w_0 \cdot (w_0 + 2 \cdot z_0)}{16} \left( \frac{\lambda^2}{\beta^2} \cos^2 \beta y + \frac{\beta^2}{\lambda^2} \cos^2 \lambda x \right) + \frac{p \cdot y^2}{2} \quad (62)$$

$$F = \frac{E \cdot w_0 \cdot (w_0 + 2 \cdot z_0)}{16} \left( \frac{b^2}{L^2} \cos^2 \beta y + \frac{L^2}{b^2} \cos^2 \lambda x \right) + \sigma_{x_{ort}} \cdot \frac{y^2}{2} \quad (63)$$

(63) denklemi m-burkulma dalga sayısının genel durumu ve artık kaynak gerilmelerine göre düzenlenirse;

$$F = \frac{E \cdot w_0 \cdot (w_0 + 2 \cdot z_0)}{16} \left( \frac{m^2 \cdot b^2}{L^2} \cos^2 \beta y + \frac{L^2}{m^2 \cdot b^2} \cos^2 \lambda x \right) + (\sigma_{x_{ort}} + \sigma_{rex}) \cdot \frac{y^2}{2} \quad (64)$$

(47) denklemi ile ifade edilen sehim değeri yaklaşık bir çözüm öngörüsüdür. Bu sebeple, (46), (47) ve (63) denklemleri (45) denkleminde yerlerine yazılıp gerekli

düzenlemeler yapıldığında, eşitliğin sol tarafı sıfıra eşit olmamaktadır. Bu hata veya genel ifadeyle artık kuvvet değeri, dx.dy boyutlarında her bir elemana etkiyen R.dx.dy kuvveti ile gösterilir. Bu artık gerilme değerinin, w(x,y) sehim değeri ile çarpımından bir ağırlık fonksiyonu elde edilir. Bu fonksiyonun plak üzerinde integre edilmesi ve integrasyonun sıfıra eşitlenmesi ile çözüm elde edilebilir.

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} w. R(w). dx. dy = 0 \quad (65)$$

İlgili denklemin elle çözümü oldukça zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle integral çözümleri yapabilen bilgisayar programlarından Mathematica yardımıyla aşağıdaki denklem, ilk sınır şartı dikkate alınarak elde edilmiştir.

$$\frac{b. L}{32} \left[ -\frac{2. D. w_0. (\beta^2 + \lambda^2)^2}{E. t} - 2. p. \lambda^2. (w_0 + z_0) - \frac{w_0(w_0 + z_0)(w_0 + 2z_0)}{8} (\beta^4 + \lambda^4) \right] = 0 \quad (66)$$

(66) denklemi,  $w_0$  bilinmeyen değişkenine bağlı 3. dereceden bir denklem halinde ifade edilebilir.

$$C_1.w_0^3 + C_2.w_0^2 + C_3.w_0 + C_4 = 0 \quad (67)$$

Galerkin yöntemi kullanılarak  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ve  $C_4$  katsayıları belirlenir.

$$C_1 = \frac{\pi^2.E}{16} \cdot \left[ \frac{m^4.b}{L^3} + \frac{L}{b^3} \right] \quad (68)$$

$$C_2 = \frac{3.\pi^2.E.z_0}{16} \cdot \left[ \frac{m^4.b}{L^3} + \frac{L}{b^3} \right] \quad (69)$$

$$C_3 = \frac{\pi^2.E.z_0^2}{8} \cdot \left[ \frac{m^4.b}{L^3} + \frac{L}{b^3} \right] + \frac{m^2.b}{L} \cdot \sigma_{xort} + \frac{\pi^2.D}{t} \cdot \frac{m^2}{b.L} \cdot \left[ \frac{m.b}{L} + \frac{L}{m.b} \right]^2 \quad (70)$$

$$C_4 = \frac{m^2.b.z_0}{L} \cdot \sigma_{xort} \quad (71)$$

Standart cebirsel yöntemler ile  $w_0$  değeri (72) denklemi ile belirlenir.

$$w_0 = \frac{C_2}{3.C_1} + k_1 + k_2 \quad (72)$$

$$k_1 = \left[ -\frac{Y}{2} + \sqrt{\frac{Y^2}{4} + \frac{X^3}{27}} \right]^{1/3} ; \quad k_2 = \left[ -\frac{Y}{2} - \sqrt{\frac{Y^2}{4} + \frac{X^3}{27}} \right]^{1/3} \quad (73)$$

$$Y = \frac{2.C_2^2}{27.C_1^2} - \frac{C_2.C_3}{3.C_1^2} + \frac{C_4}{C_1} ; \quad X = \frac{C_3}{C_1} - \frac{C_2^2}{3.C_1^2} \quad (74)$$

Diğer taraftan, elde edilen Airy gerilme fonksiyonu (63) ve (24) denklemleri ve belirlenen  $w_0$  değeri kullanılarak yüklü ve yüksüz kenarların düz tutulduğu kabulü ile plak üzerinde oluşan membran gerilmeler aşağıdaki gibi elde edilir. Burada kayma gerilmeleri ihmal edilmiştir.

$$\sigma_x = \frac{1}{E.t} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = (\sigma_{xort} + \sigma_{rex}) + \frac{E.w_0(w_0 + 2z_0).m^2.\beta^2}{8} . \cos 2\beta y \quad (75)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{E.t} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = -\frac{E.w_0(w_0 + 2z_0).m^2.\lambda^2}{8} . \cos 2\lambda x \quad (76)$$

$$\frac{\tau_{xy}}{E} = -\frac{1}{E.t} \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = 0 \quad (77)$$

Ayrıca düzlem dışı yanal kuvvetlerin etkimesi durumunda eğilmeden kaynaklanan moment ifadelerinden eğilme gerilmesi ifadeleri elde edilir.

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \vartheta \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (78)$$

$$M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \vartheta \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (79)$$

Buradan (24) denklemi (63) ve (64) denklemlerinde yerine yazılıp düzenlemeler yapılırsa;

$$\sigma_{x_{\max}} = \frac{6M_x}{t^2} = \frac{E \cdot w_0 \cdot t \cdot (\lambda^2 + \vartheta\beta^2)}{2 \cdot (1 - \vartheta^2)} \cdot \cos\beta y \cdot \cos\lambda x \quad (80)$$

$$\sigma_{y_{\max}} = \frac{6M_y}{t^2} = \frac{E \cdot w_0 \cdot t \cdot (\beta^2 + \vartheta\lambda^2)}{2 \cdot (1 - \vartheta^2)} \cdot \cos\beta y \cdot \cos\lambda x \quad (81)$$

Eksenel bası kuvvetleri neticesinde, plakta elastik eksenel yer değiştirme (kısalma) ve burkulma sonrası sehimlerin etkisiyle  $x = -L/2$ 'de oluşacak yer değiştirme, denklem (29) ile denklem (37) kullanılarak belirlenecektir.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2}{2} \quad (82)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E \cdot t} (N_x - \vartheta N_y) \quad (83)$$

Denklem (29) integre edilip denklem (37)'de kullanıldığı zaman tek bir uçdaki eksenel kısalma değeri  $du_{\text{sol}}$  denklem (84) ile belirlenir ve 2 ile çarpılarak toplam eksenel kısalma  $du_{\text{top}}$  değeri belirlenir.

$$du_{\text{sol}} = \frac{\sigma_{x_{\text{ort}}} \cdot L}{2 \cdot E} - \frac{L \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot m^2 \cdot \lambda^2}{16} \quad (84)$$

$$du_{\text{top}} = \frac{\sigma_{x_{\text{ort}}} \cdot L}{E} - \frac{L \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot m^2 \cdot \lambda^2}{8} \quad (85)$$

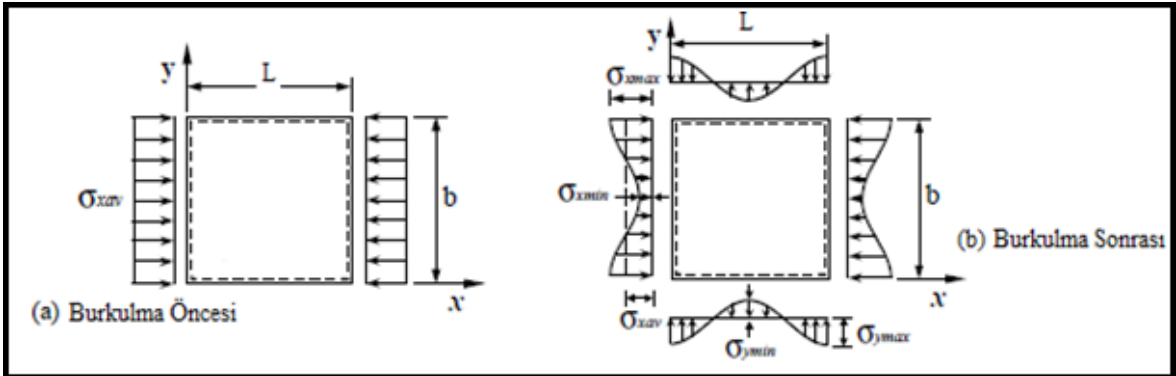
### 2.3.1.2. Mambran Gerilme (Plak Kenarı Odaklı Plastik Mafsal) Yaklaşımı

Benzer çalışmalarda, genel kabul olarak kullanılan dörtkenarından basit mesnetli tekil plak idealleştirmesi ile stifnerler arasındaki plakta oluşan membran gerilmelerini ve varsa eğilme gerilmelerini belirlemiş olduk. Düzlem içi eğilme gerilmeleri değerleri, incelenen kısmın tüm gemi yapısına oranla küçük olmasından dolayı, membran

gerilmelere kıyasla düşük olduğundan ihmal edilmişlerdir. Yükleme yönünde, burkulma öncesi lineer doğrusal bir dağılım sergileyen mambran gerilmeler, burkulma sonrası düzgün olmayan lineer olmayan bir dağılım sergilemeye başlarlar. Yüklemenin olmadığı yönde de, yüksüz kenarlar düz kaldığı (düzlem içi aksinel yer değiştirmeler sıfır) sürece benzer şekilde düzgün olmayan mambran gerilmeler oluşur.

Gemi kirişini oluşturan plak elemanlarda davranışlar ilkel sehimler göz önüne alınarak incelendiği için, yük-eksenel kısalma eğrisi veya ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme eğrisinde net bir burkulma gerilmesi (dallanma burkulması) değeri görülmez. Kirişlerin aksine plaklarda, burkulma sonrası hemen göçme davranışı görülmez ve bası kuvveti arttıkça mambran etkiler ile gerilmeler plak kenarlarına doğru kayar ve yapı daha fazla kuvvete karşı dayanım gösterebilir.

Artık kaynak gerilmelerinin dikkate alınmasına bağlı olarak, maksimum mambran gerilmeler ya plak kenarlarında yadaplık üzerinde genişlik yönündeki ideal artık kaynak gerilmesi dağılımında çeki bölgesi genişliğinin bitim noktalarında oluşur. Minimum mambran gerilmeler ise plak ortasında oluşmaktadır. Bası yüklemeleri düzgün yayılı olduğu sürece karşılıklı kenarlarda gerilme dağılımı eşit olmaktadır. Mambran gerilmeler plak kenarlarında akma gerilmesi değerine ulaştığında, kenarlarda artık düzlem içi yer değiştirmelere engel olunamaz. Böylelikle oluşan akma bölgelerinin büyümesi ani bir sehim artışına da sebep olur ve plak göçme mukavemet değerine ulaşılır. Aşağıdaki Şekil 2.12'de,  $m = L/b = 1$  olan düz kare bir plakta, burkulma öncesinde ve sonrasında oluşan mambran gerilme dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Düz kare bir plakta aksinel bası altında oluşan mambran gerilme dağılımları

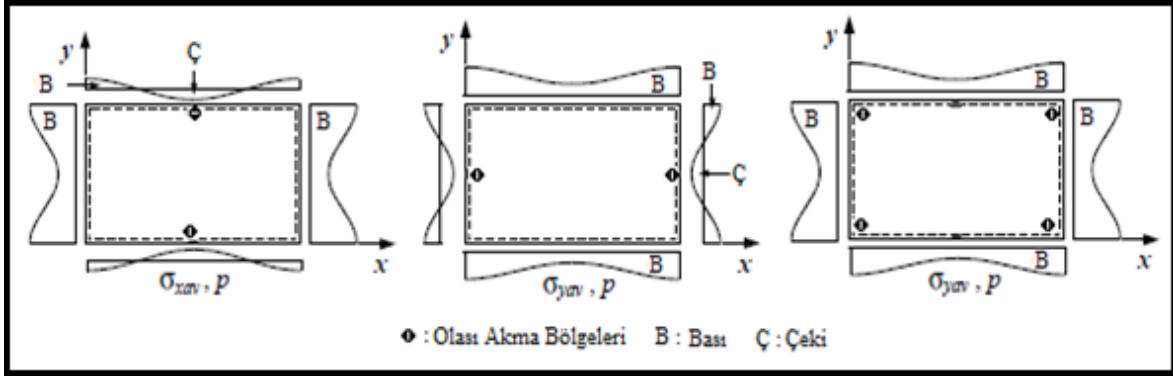
Plak uzunluğu ve genişliği yönlerinin her ikisinde de oluşan membran gerilme dağılımlarının doğası gereği plakta akma başlangıcının gerçekleşeceği 3 olası bölge, yüksüz kenarların ortaları, yüklü kenarların ortaları ve dört bir köşe kısımlarıdır(Hughes ve Paik, 2010). Plak boyutlarına ( $L/b$ ) bağlı olarak, kritik burkulma tipine ve yarım sinüs dalgası sayısına göre, minimum membran gerilmenin yeri değişebileceğinden, boyuna kenar için, plastisitenin oluşacağı olası bölgenin yeri de değişiklik gösterecektir. Yüksüz kısa kenarlarda ise plastisitenin olası yeri kenar orta noktası olmaktadır.

Bu durumda plastisitenin oluşumu von-Mises eşdeğer akma gerilmesi kriteri ile takip edilecektir. Olası üç bölgeye göre, ilgili plak malzemesinin akma gerilmesine bağlı olarak takip edilecek Von-Mises gerilme değerleri  $\sigma_{vm-1}$ ,  $\sigma_{vm-2}$ ,  $\sigma_{vm-3}$  şeklinde olacaktır. Uygulanan yükün artırılması ile bu üç olası bölgede malzeme akması değerine ulaşılması ile plağın göçeceği kabul edilmiştir. Bu akma gerilmesine sebep olan yük değerindeki gerilme göçme mukavemet değerini vermektedir. Diğer bir deyişle, plak kalınlığının ortasındaki membran gerilme değeri, yüksüz kenarın ortasında akmaya sebep olduğunda uygulanan ortalama yük değeri göçme gerilmesi olarak kabul edilir. Burada, kayma gerilmeleri ihmal edilmiştir. Olası plastik akma başlangıcının oluşacağı bölgeler ve gerilme dağılımları Şekil 2.12'de gösterilmiştir.

$$\sigma_{vm-1} = \sqrt{\sigma_{xmax}^2 - (\sigma_{xmax} \cdot \sigma_{ymax}) + \sigma_{ymax}^2 + 3\tau^2} = \sigma_Y: \text{Plak köşe noktaları} \quad (86)$$

$$\sigma_{vm-2} = \sqrt{\sigma_{xmax}^2 - (\sigma_{xmax} \cdot \sigma_{ymin}) + \sigma_{ymin}^2 + 3\tau^2} = \sigma_Y: \text{Boyuna kenar ortası} \quad (87)$$

$$\sigma_{vm-3} = \sqrt{\sigma_{xmin}^2 - (\sigma_{xmin} \cdot \sigma_{ymax}) + \sigma_{ymax}^2 + 3\tau^2} = \sigma_Y: \text{Enine kenar ortası} \quad (88)$$



Şekil 2.13. Olası plastik akma başlangıcının oluşacağı bölgeler ve gerilme dağılımları

Burada önemli olan  $\sigma_{x\max}$  ve  $\sigma_{y\min}$  değerlerinin, artan eksenel kuvvet ve sehimler sonrasında doğru olarak belirlenmesidir. Artık kaynak gerilmelerinin dikkate alınması ile plakta oluşacak maksimum ve minimum gerilme değerleri denklem (89), (90), (91) ve (92) ile belirlenecektir. Aşağıdaki denklemlerle belirtilen maksimum ve minimum gerilmelerin şematik gösterimi Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

$$\sigma_{x\max} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}_{x=0, y=b_t} = (\sigma_{ort} + \sigma_r) - \frac{E \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot m^2 \cdot \lambda^2}{8} \cdot \cos(2 \cdot \beta \cdot b) \quad (89)$$

$$\sigma_{x\min} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}_{x=0, y=0} = (\sigma_{xort} + \sigma_r) + \frac{E \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot m^2 \cdot \lambda^2}{8} \quad (90)$$

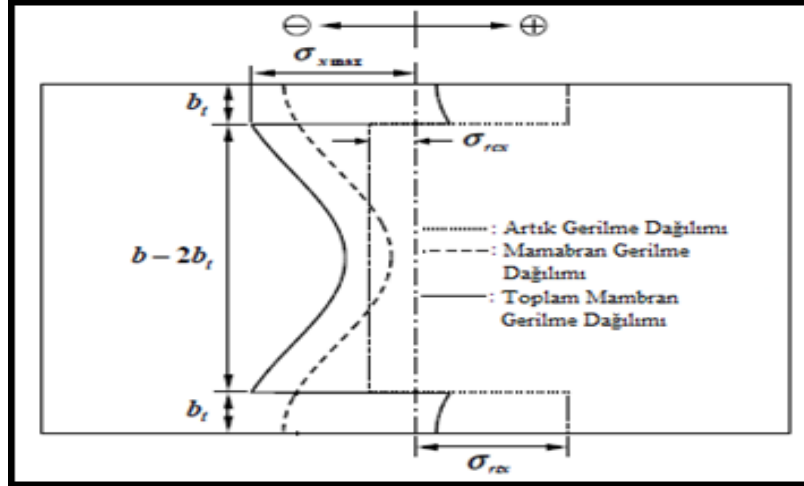
$$\sigma_{y\max} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}_{x=a/2, y=0} = -\frac{E \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot m^2 \cdot \beta^2}{8} \cdot \cos(2 \cdot m \cdot \lambda \cdot x) \quad (91)$$

$$\sigma_{y\min} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}_{x=0, y=0} = \frac{E \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot \beta^2}{8} \quad (92)$$

Burada;

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_r = \sigma_{rtx} \quad 0 \leq y < b_t \\ \sigma_r = \sigma_{rcx} \quad b_t \leq y < b - b_t \\ \sigma_r = \sigma_{rtx} \quad b - b_t \leq y < b \end{array} \right\} \quad (93)$$





Şekil 2.14. Plak üzerinde toplam mambran gerilme dağılımı (Paik vd., 2003)

Kritik plak burkulma gerilmesi değeri ve burkulmaya sebep olan kuvvet değeri, ilkel sehimin sıfır ( $z_0 = 0$ ) olduğu (düz plak) ve sıfıra yakın  $w_0 = 0,00001$  gibi küçük bir sehim değeri tahmini yapılarak elde edilir.

Burkulma öncesi, elastik bölgede davranış sergileyen elemanların yükleme ile birlikte lineer olarak şekil değiştirirler. Marguerre (1938) denklemlerine artık kaynak gerilmelerinin de etkileri eklenerek düşen kritik burkulma gerilmesi değeri ve ardından yüklemenin artırılması ile oluşan lineer olmayan davranışın mambran gerilme yöntemi ile burkulma sonrası davranış olarak izlenmesi ve plastik akımların oluşmasıyla da göçme mukavemet değerlerine ulaşılır.

Bu bölümdeki çözüm akışını özetlersek;

- 1- Plak boyutları verilir,
- 2- İlkel sehim ( $z_0$ ), burkulma tipine benzer şekilde, ortalama ilkel sehim değeri şeklinde  $z_0=0,1.\beta^2.t$  ifadesi ile belirlenir (Smith ve diğerleri,1988).
- 3-  $L/b \leq \sqrt{m.(m+1)}$  değerinin sağlayan minimum m-yarım dalga sayısı belirlenir.
- 4- Başlangıç için plağa etki eden bir ortalama gerilme değeri ( $\sigma_{ort}$ ) alınır.
- 5-  $C_1, C_2, C_3$  ve  $C_4$  katsayıları ile  $w_0$  değeri hesaplanır.
- 6- Her iki yönde düzlem içi maksimum ve minimum mambran gerilmeler (89), (90), (91) ve (92) denklemleri ile hesaplanır.
- 7- (85) denklemi ile toplam aksenal yer değiştirme (kısılma) miktarı hesaplanır.
- 8- Plağın köşe noktaları, boyuna kenarları ve enine kenarlarında olmak üzere (86), (87) ve (88) denklemlerinden 3 ayrı Von-Mises eşdeğer gerilme hesaplaması yapılır.

9- Ortalama gerilme değeri artırılarak hesaplamalar 4. adımdan itibaren tekrarlanır. 3 ayrı Von-Mises denkleminde herhangi birinin, malzeme akma gerilmesine eşit olması durumunda plağingöçme mukavemet değeri elde edilir.

10- Göçme mukavemet değerine kadargerilme - şekil değiştirme davranışı yukarıdaki adımlarla elde edilirken, bu noktadan sonra aksenal yer değiştirme artmaya devam ederken, bu yer değiştirmeye sebep olan yük değeri azalmaktadır. Bu durumda gerilme - şekil değiştirme ilişkisi;

$$\sigma_{xort} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\sigma_{xE}}{E \cdot \varepsilon_{xort}} \right) \cdot \sigma_{xmax}^u \quad (94)$$

$\sigma_{xmax}^u$ : Göçme mukavemet durumundaki maximum mambran gerilme

11- Kademeli göçme analizinde kullanılacak P-du ( $\sigma - \varepsilon$ ) diyagramları elde edilir.

Ayrıca, hesaplama akışı kapsamında kullanılacak girdiler, değişkenler ve çıktılar sembollerle birlikte Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Yöntem kapsamındaki girdiler, değişkenler ve çıktılar

Girdiler	Değişkenler/Çıktılar
Plak Boyu (L)	$C_1, C_2, C_3, C_4$
Plak Genişliği (b)	Sehim Değeri ( $w_0$ )
Plak Kalınlığı (t)	Boyuna Mambran Gerilmeler ( $\sigma_x$ )
Boyuna Yarım Dalga Sayısı (m)	Enine Mambran Gerilmeler ( $\sigma_y$ )
Elastisite Modülü (E)	$\sigma_{vm-1}, \sigma_{vm-2}, \sigma_{vm-3}$
Poisson Oranı ( $\nu$ )	$\sigma_x$ - uygulanan ortalama gerilme
Plak Eğilme Rijitliği (D)	P-eksenel bası yükü
$\beta = \pi/b$	du-eksenel yerdeğiştirme
$\lambda = \pi/L$	$\varepsilon$ - şekil değiştirme
Başlangıç Sehim Değeri ( $z_0$ )	
Düz Plak Elastik Burkulma Gerilmesi ( $\sigma_{kr}$ )	
ArtıkKaynak Gerilmesi ( $\sigma_r$ )	
Artık Kaynak Bası Gerilmesi ( $\sigma_{rcx}$ )	
Malzeme Akma Gerilmesi( $\sigma_Y$ )	
Artık Kaynak Çeki Gerilmesi Genişliği( $b_t$ )	
Plak narinlik oranı( $\beta_p$ )	

## 2.4. Lama, T ve L Kesitli Tekil Stifnerlerin ve Plak-Stifner Birleşimi Kiriş Kolon Elemanların Göçme Mukavemet Değerlerinin Belirlenmesi

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, burkulma tiplerine göre, stifnerlerin göçme mukavemet değerleri ampirik formüllerle yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. Hem geliştirilmiş ortotropik plak yaklaşımı ile desteklenmiş panelin gerilme-şekil değiştirme davranışının elde edilmesinde, hem de orta kesit kademeli göçme analizinde kullanmak üzere stifnerlerin göçme mukavemet öncesi ve sonrası tüm davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bakımdan, IACS-CRS (2010), Ek-A, Kısım 2.3'e göre, kiriş-kolon burkulması, stifner gövde burkulması ve stifner burulma burkulması tipleri için 3 ayrı gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilecektir. Bunlardan en düşük göçme mukavemet değerini veren eğri göçme analizinde kullanılacaktır.

IACS-CRS kullanılarak, gemi orta kesitinin Smith yöntemi ile yapılacak kademeli göçme analizinde kullanılacak boyuna stifner ve plak-stifner birleşimi kiriş-kolon elemanların yük-eksenel kısalma (gerilme-şekil değiştirme) eğrileri olası 3 ihtimale göre elde edilecektir. Her eksenel kısalma (eğrilik) adımında, tekil plak eğrisi ile birlikte bu eğriler de göz önüne alınarak, desteklenmiş panelin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elde edildiği hesaplama gerçekleştirilir. Bu eğriler aşağıdaki gibi ampirik formüller yardımıyla elde edilir.

### 2.4.1. Plak-Stifner Birleşimi Kiriş-Kolon Burkulması

$$\sigma_{CR1} = \Phi \cdot \sigma_{C1} \cdot \left( \frac{A_{s-net50} + 10^{-2} \cdot b_{eff-p} \cdot t_{net50}}{A_{s-net50} + 10^{-2} \cdot s \cdot t_{net50}} \right) \text{ N/mm}^2 \quad (95)$$

$\Phi$ : Kenar fonksiyonu

$$\Phi = -1 \quad \varepsilon < -1$$

$$\Phi = \varepsilon \quad -1 < \varepsilon < 1 \quad (96)$$

$$\Phi = 1 \quad \varepsilon > 1$$

$$\text{Bağıl şekil değiştirme} : \varepsilon = \varepsilon_E / \varepsilon_{akma} \quad (97)$$

$\varepsilon_E$  = Elemanın şekil değiştirmesi

$\varepsilon_{akma}$  = Akma gerilmesindeki şekil değiştirme değeri

$A_{s-net50}$  : Stifnerin net alanı,  $cm^2$

$\sigma_{C1}$ : Kritik gerilme,  $N/mm^2$

$$\sigma_{C1} = \frac{\sigma_{E1}}{\varepsilon} \quad \sigma_{E1} \leq \frac{\sigma_{Yeş}}{2} \cdot \varepsilon \quad (98.1)$$

$$\sigma_{C1} = \sigma_{Yeş} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{Yeş} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_{E1}}\right) \quad \sigma_{E1} > \frac{\sigma_{Yeş}}{2} \cdot \varepsilon \quad (98.2)$$

$$\sigma_{E1} = \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I_{E-net50}}{A_{E-net50} \cdot l_{stf}^2} \cdot 10^{-4} \quad (99)$$

$I_{E-net50}$ : Stifner için etkin plak genişliği değeri ile birlikte stifnerin atalet momenti

$$b_{eff-s} = \frac{b}{\beta_p} \quad \beta_p > 1 \quad (100.1)$$

$$b_{eff-s} = b \quad \beta_p \leq 1 \quad (100.2)$$

$$\beta_p = \frac{b}{t_{net50}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{Yp}}{E}} \quad (101)$$

$b$  : Stifnerler arası mesafe, mm

$t_{net50}$ : Plağın net kalınlığı

$A_{E-net50}$  : Etkin genişlikli plakla beraber stifnerin net alanı,  $cm^2$

$l_{stf}$ : İki enine destek arası stifner boyu, m

$b_{eff-p}$  : Plağın etkin genişliği, mm

$$b_{eff-p} = \left(\frac{2.25}{\beta_p} - \frac{1.25}{\beta_p^2}\right) \cdot b \quad \beta_p > 1.25 \quad (102.1)$$

$$b_{eff-p} = b \quad \beta_p \leq 1.25 \quad (102.2)$$

$\sigma_{Yeş}$  : Eşdeğer akma gerilmesi,  $N/mm^2$

### 2.4.2. Stifnerlerin Burulmalı Burkulması

Tekil stifnerlerin burulmalı burkulması hesaplamaları için eleman kesitlerine göre değişen, polar atalet momenti, St. Venant atalet momenti ve dilimsel atalet momenti değerleri IACS-CSR ve Türk Loydu Kuralları doğrultusunda Tablo 2.2'de sunulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında stifnerlerin olası 3 burkulma durumu ve farklı profil kesit tiplerinin gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde etmek için kullanılan hesaplama arayüzü Tablo 2.3'te, örnek gerilme-şekil değiştirme eğrileri de Şekil 2.15'te gösterilmiştir.

$$\sigma_{CR2} = \Phi \cdot \left( \frac{A_{s-net50} \cdot \sigma_{C2} + 10^{-2} \cdot b \cdot t_{net50} \cdot \sigma_{Cp}}{A_{s-net50} + 10^{-2} \cdot b \cdot t_{net50}} \right) \text{ N/mm}^2 \quad (103)$$

$\sigma_{C2}$  : Kritik gerilme, N/mm<sup>2</sup>

$$\sigma_{C2} = \frac{\sigma_{E2}}{\varepsilon} \quad \sigma_{E2} \leq \frac{\sigma_{Ys}}{2} \cdot \varepsilon \quad (104.1)$$

$$\sigma_{C2} = \sigma_{Ys} \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{Ys} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_{E2}} \right) \quad \sigma_{E2} > \frac{\sigma_{Ys}}{2} \cdot \varepsilon \quad (104.2)$$

$$\sigma_{Cp} = \left( \frac{2.25}{\beta_p} - \frac{1.25}{\beta_p^2} \right) \cdot \sigma_{Yp} \quad \beta_p > 1.25 \quad (105.1)$$

$$\sigma_{Cp} = \sigma_{Yp} \quad \beta_p \leq 1.25 \quad (105.2)$$

$\sigma_{E2}$  : Euler burulma burkulması gerilmesi, N/mm<sup>2</sup>

$$\sigma_{E2} = \frac{E}{I_{p-net}} \cdot \left( \frac{\varepsilon \cdot \pi^2 \cdot I_{w-net} \cdot 10^{-4}}{I_{stf}^2} + 0.385 \cdot I_{T-net} \right) \quad (106)$$

Tablo 2.2. Stifner kesit tiplerine göre atalet momentleri

Profil	Lama	Balblı ve flençli profiller
$I_p$	$\frac{h_w^3 \cdot t_w}{3 \cdot 10^4}$	$\frac{A_w \cdot h_w^2}{3 \cdot 10^4} + \frac{A_f \cdot e_f^2}{10^4}$
$I_r$	$\frac{h_w \cdot t_w^3}{3 \cdot 10^4} \left[ 1 - 0,63 \frac{t_w}{h_w} \right]$	$\frac{A_w \cdot t_w^2}{3 \cdot 10^4} \left[ 1 - 0,63 \frac{t_w}{h_w} \right] +$ $\frac{A_f \cdot t_f^2}{3 \cdot 10^4} \left[ 1 - 0,63 \frac{t_f}{b_f} \right]$
$I_w$	$\frac{A_w^3}{36 \cdot 10^6}$	Balblı ve köşebent profiller: $\frac{A_f \cdot e_f^2 \cdot b_f^2}{12 \cdot 10^6} \left[ \frac{A_f + 2 \cdot 6 A_w}{A_f + A_w} \right]$
		T- profiller için $\frac{b_f^3 \cdot t_f \cdot e_f^2}{12 \cdot 10^6}$

### 2.4.3. Stifner Gövdesinin Yerel Burkulması

$$\sigma_{CR3} = \Phi \cdot \left( \frac{b_{\text{eff-p}} \cdot t_{\text{net50}} \cdot \sigma_{Yp} + (h_{w\text{-eff}} \cdot t_{w\text{-net50}} + b_f \cdot t_{f\text{-net50}}) \cdot \sigma_{Ys}}{b \cdot t_{\text{net50}} + h_w \cdot t_{w\text{-net50}} + b_f \cdot t_{f\text{-net50}}} \right) \text{flençli} \quad (107)$$

$$h_{w\text{-eff}} = \left( \frac{2.25}{\beta_w} - \frac{1.25}{\beta_w^2} \right) \cdot h_w \beta_w > 1.25 \quad (108.1)$$

$$h_{w\text{-eff}} = h_w \beta_w \leq 1.25 \quad (108.2)$$

$$\beta_w = \frac{h_w}{t_{w\text{-net50}}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \sigma_{Ys}}{E}} \quad (109)$$

$$\sigma_{CR4} = \Phi \cdot \left( \frac{b \cdot t_{\text{net50}} \cdot \sigma_{Cp} + 10^{-2} \cdot A_{s\text{-net50}} \cdot \sigma_{C4}}{b \cdot t_{\text{net50}} + 10^{-2} \cdot A_{s\text{-net50}}} \right) \text{lama} \quad (110)$$

$$\sigma_{C4} = \frac{\sigma_{E4}}{\varepsilon} \quad \sigma_{E4} \leq \frac{\sigma_{Ys}}{2} \cdot \varepsilon \quad (111.1)$$

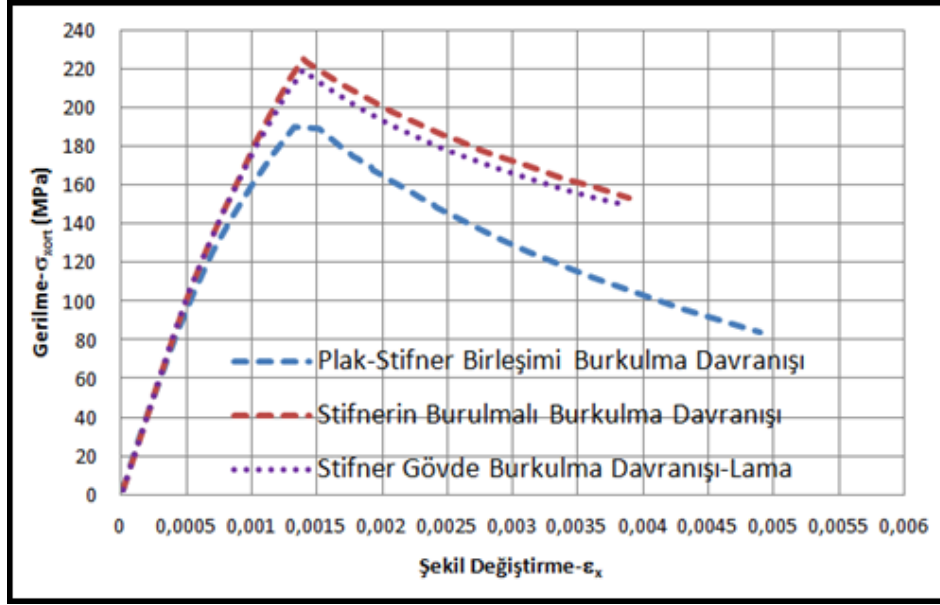
$$\sigma_{C4} = \sigma_{Ys} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{Ys} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_{E4}}\right) \quad \sigma_{E4} > \frac{\sigma_{Ys}}{2} \cdot \varepsilon \quad (111.2)$$

$$\sigma_{E4} = 160000 \cdot \left(\frac{t_{w-net50}}{h_w}\right)^2 \quad (112)$$

Tablo 2.3. Tekil stifnerlerin olası 3 durum için gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edildiği hesaplama tablosu

			H1.Stifner Gövdesi Yerel Burkulması - Lama Stifner				H2.Stifner Gövdesi Yerel Burkulması T veya L Kesit Stifner				H3.Stifnerlerin Burulmalı Burkulması				H4.Plak-Stifner Birleşimi Kiriş-Kolon Burkulması			
GİRDİLER	e	360	$\Delta\kappa$	0,0000387		$\Delta\kappa$	0,0000387		$\Delta\kappa$	0,0000387	$\kappa_i$	0,01159911	$\Delta\kappa$	0,0000387	$\kappa_i$	0,011599109		
	H	720	$\kappa_i$	0,01159911		$\kappa_i$	0,011599109		$I_{P-net-flat}$	12,70833333			$Z_0, cm$	1,749782609	$Z_{0-yeni}, cm$	3,866027005		
	B	720							$I_{P-net-tee}$	12,70833333			$I_{E-net50}, cm^4$	49,18692808	$I_{E-net50}, cm^4$	47,26479419		
	$l_{stf} - m$	0,9							$I_{T-net-flat}$	0,045470442			$A_{E-net50}, cm^2$	7,015	$A_{E-net50}, cm^2$	4,376		
	$t_p$	3,05							$I_{T-net-tee}$	#SAYI/0!						KONTROL		
	b	180							$I_{w-net-flat}$	0,098516059			$\sigma_{E1}$	1769,93221	$\sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$	402,1701208		
	$\pi$	3,14			KONTROL			KONTROL					$\sigma_{E1-yeni}$	2726,63789		KOŞUL		
	$h_w$	50	$\sigma_{E4}$	5538,3364	$\sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$	402,1701208			$\sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$	402,1701208	fixation	103,316604	$\sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$	402,170121	180	$\beta_p < 1,25$ olduğunda		
	$t_t$	0			KOŞUL		$\beta_p$	3,6788	KOŞUL		$\sigma_{E2} =$	290,6254046	KOŞUL		$b_{etkin-p}$	93,46471	$\beta_p > 1,25$ olduğunda	
	$b_t$	0	$\sigma_{CP}$	287,4	$\beta_p < 1,25$ olduğunda		$b_{etkin-p}$	180	$\beta_p < 1,25$ olduğunda		$\sigma_{CP}$	287,4	$\beta_p < 1,25$ olduğunda		$b_{etkin-s}$	180	$\beta_p < 1$ olduğunda	
	$t_w$	3,05	$\sigma_{CP-yeni}$	149,23198	$\beta_p > 1,25$ olduğunda		$b_{etkin-p-yeni}$	93,46471	$\beta_p > 1,25$ olduğunda		$\sigma_{CP}$	149,23198	$\beta_p > 1,25$ olduğunda		$b_{etkin-s-yeni}$	48,92886	$\beta_p > 1$ olduğunda	
	$n_{sx}$	3	$\sigma_{C4}$	276,9651253	$\sigma_{E4} > \sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$ olduğunda		$h_{w-etkin}$	50	$\beta_w < 1,25$ olduğunda		$\sigma_{C2}$	88,54661197	$\sigma_{E2} > \sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$ olduğunda		$\sigma_{C1}$	254,7479888	$\sigma_{E1} > \sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$ olduğunda	
	$\kappa_{max}$	0,01159911	$\sigma_{C4-yeni}$	1978,911161	$\sigma_{E4} < \sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$ olduğunda		$h_{w-etkin-yeni}$	50,23910	$\beta_w > 1,25$ olduğunda		$\sigma_{C2}$	103,8437927	$\sigma_{E2} < \sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$ olduğunda		$\sigma_{C1}$	632,4170927	$\sigma_{E1} < \sigma_{Ys} \times \epsilon / 2$ olduğunda	
	SONUÇLAR																	
	H1	Eleman	$A_{s-net50}$	E	L	zi	dzi	$\kappa$	$\epsilon_j$	$\epsilon_{akma}$	$\sigma_{Yes}$	$\epsilon_{bağıl}$	$\beta_p$	$\sigma_{c4}$	$h_{etkin-p}$	$\sigma_{CR4}$	$P_j$	$M_j$
		S1	152,5	207000	900	695	0,335	0,0115991	0,00389	0,00139	287,4	2,7987	3,6788	276,96513	180	149,2355292	22758,4182	7624,070097
	H2	Eleman	$A_{w-net50}$	E	L	zi	dzi	$\kappa$	$\epsilon_j$	$\epsilon_{akma}$	$\sigma_{Yes}$	$\epsilon_{bağıl}$	$\beta_w$	$h_{etkin-p}$	$h_{w-etkin}$	$\sigma_{CR3}$	$P_j$	$M_j$
		S1	152,5	207000	900	695	0,335	0,011599109	0,003885702	0,00139	287,4	2,7987	1,0219	93,46471	50	179,26851	27338,44731	9158,37985
	H3	Eleman	$A_{s-net50}$	E	L	zi	dzi	$\kappa$	$\epsilon_j$	$\epsilon_{akma}$	$\sigma_{Yes}$	$\epsilon_{bağıl}$	$\beta_p$	$\sigma_{c2}$	$h_{etkin-p}$	$\sigma_{CR2}$	$P_j$	$M_j$
		S1	152,5	207000	900	695	0,335	0,011599109	0,003885702	0,00139	287,4	2,7987	3,6788	103,84379	180	139,36498	21253,16001	7119,808602
	H4	Eleman	$A_{w-net50}$	E	L	zi	dzi	$\kappa$	$\epsilon_j$	$\epsilon_{akma}$	$\sigma_{Yes}$	$\epsilon_{bağıl}$	$\beta_p$	$\sigma_{c1}$	$h_{etkin-p}$	$\sigma_{CR1}$	$P_j$	$M_j$
		S1	152,5	207000	900	695	0,335	0,011599109	0,003885702	0,00139	287,4	2,7987	3,6788	254,74799	93,4647	158,90150	24232,47902	8117,880471





Şekil 2.15. Nishihara'nın kutu kirişinin güverte kısmında bulunan stifnerlerin üç burkulma tipi için gerilme-şekil değiştirme eğrileri (IACS-CSR)

## 2. 5. Desteklenmiş Panellerin Burkulma ve Göçme Davranışları

Daha önceki bölümde elde edilen tekil plak çözümleri, desteklenmiş panellerde burkulma tipleri ve göçme tiplerinin ayrı ayrı, aynı zamanda etkileşimli olarak göçme mukavemet değerlerinin elde edilmesinde kullanılacak ve elde edilecek bu değerlerden en küçüğü panelin göçme mukavemet değeri olarak seçilecektir. Panel için elde edilecek P-du diyagramları daha sonraki adım olan gemi gövde kirişi kademeli göçme analizinde kullanılacaktır.

Desteklenmiş panellerde, göçme mukavemet değerlendirmesinin yapılması için önemli bir gösterge olan burkulma davranışı, global panel burkulması ve yerel plak veya stifner burkulması olarak iki durumda incelenmektedir. Tasarım veya servis sürecinde, gemi yapısını oluşturan elemanların yerel bireysel davranışları belirleyici olmakta ve doğru analiz edilmeleri öncelik arz etmektedir.

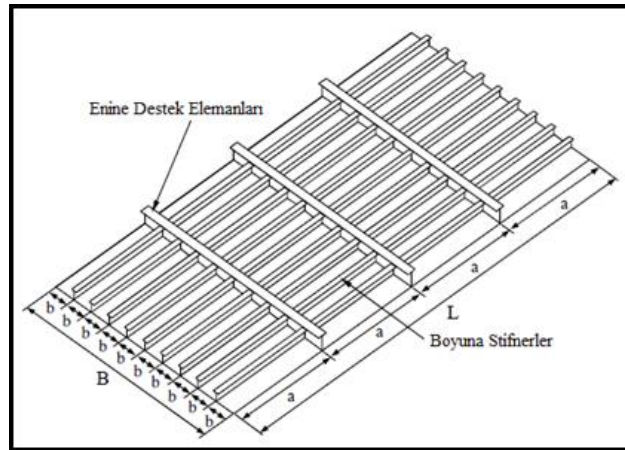
Bu bağlamda çalışmamızda, alt bölüm 2.2.2'de yer alan desteklenmiş panel göçme tipleri dikkate alınmıştır. Bu tipler için, desteklenmiş panellerin büyük sehim davranışları ve göçme mukavemet değerleri incelenmiştir. Desteklenmiş panel yapılarında öncelikli üç tip yerel burkulma tipi, stifnerler arasındaki tekil plağın burkulması (Tip-II), stifner gövdesinin yerel burkulması (Tip-IV) ve stifnerin yanal burulmalı burkulmasıdır (Tip-V). Bunların yanında, global panel burkulması (Tip-I) ve plak-stifner birleşimi şeklinde

elemanlara ayrılan panelin kiriş-kolon burkulması (Tip-III) durumları için de göçme mukavemet değerleri ayrı ayrı belirlenerek, aralarından en küçük olan değer, bir sonraki aşamada, panelin gerçek göçme mukavemet değeri olarak kullanılır.

Özetle, desteklenmiş panellerin gerilme-şekil değiştirme (yük-eksenel kısalma) davranışlarını, temel olarak burkulma öncesi ve burkulma sonrası şeklinde, detaylı olarak da burkulma esnası, göçme (göçme mukavemet) esnası ve göçme sonrası şeklinde kısımlara ayırmak suretiyle, farklı göçme tiplerini dikkate alarak incelemek hedeflenmiştir.

### 2.5.1. Desteklenmiş Panel Yapılarının Analizlerinde Yapılan İdealleştirmeler

Yukarıdaki bölümlerde belirtildiği ve Şekil 2.16'da görüldüğü gibi, çelik gemi yapıları genellikle stifner elemanlarla desteklenmiş panellerin birleşiminden oluşur. Tüm yapının göçmesi, panellerin dolayısı ile bu panelleri oluşturan bireysel yapı elemanlarının (destek elemanları arasında kalan tekil plakların, stifner gövde ve varsa fleñçlerinin) burkulma ve plastik şekil değiştirme davranışları ile doğrudan ilişkilidir. Göçme limit durumu prensibine göre yapılan tasarımda birincil hedef, bu yapı elemanlarının burkulma ve plastik göçme mukavemetlerinin doğru olarak hesaplanabilmesidir. Gemi kirişinin orta kesitinde görüldüğü üzere, bu elemanlar için bahsedilen hesaplamalar kesin çözümle kolayca yapılamamaktadır. Bu durumda, ızgara yapılarda, desteklenmiş panellerde yapısal idealleştirmelerle, tüm yapının sistem analizleri yaklaşık yöntemler kullanılarak yapılmaya çalışılır. Bu yapısal idealleştirmeler genellikle, plak-stifner birleşimleri, plak-stifner ayrışmaları ve ortotropik plak kabulü şeklinde ele alınırlar. (Paikve Thayamballi, 2003).



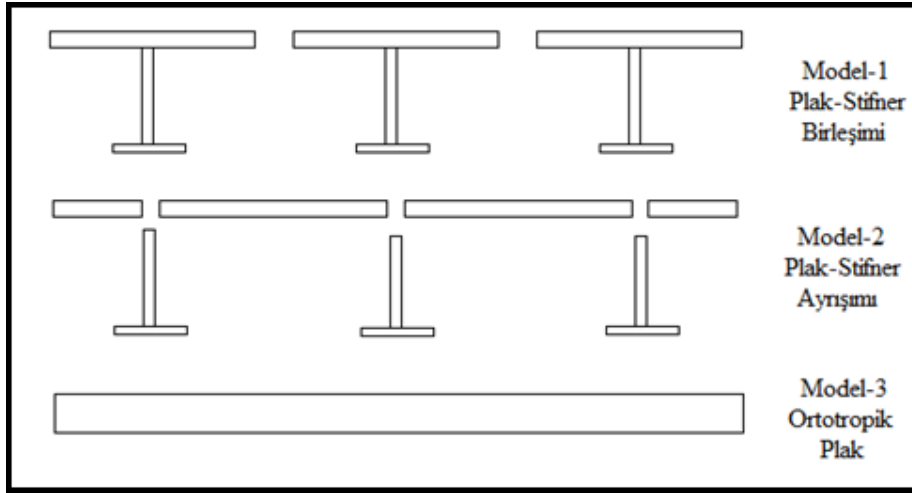
Şekil 2.16. Bir gemi yapısını oluşturan ızgara sistemi

Bunlardan birincisi, stifnerlerin eğilme rijitliklerinin, plak rijitliğine göre daha küçük olduğunda doğruluğu kritik duruma gelen, orta ve büyük yapısal boyutlara sahip stifnerlerin bağlı olduğu plak parçaları ile birlikte davranış sergilediği modeldir.

İkincisi, stifnerlerin göreceli olarak büyük olduğu ve plakların bozulması sırasında düz kalabilecek kadar kuvvetli oldukları durumlarda stifnerlerin plakdan ayrıştırılarak incelendiği modeldir.

Üçüncüsü ise, stifnerlerin göreceli olarak daha zayıf olduğu durumlarda ve özellikle her iki yönde desteklenmiş plakların, stifnerlerin yalnızca boyutsal etkilerini taşıdığı ortotropik tekil plak davranışı sergilediği modeldir.

Bu üç idealleştirme şematik olarak Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Desteklenmiş panellerde idealleştirme modelleri

### 2.5.2. Plak-Stifner Birleşimi Yapılarak Desteklenmiş Panellerin Burkulma ve Göçme Mukavemet Davranışlarının İncelenmesi

Plak-stifner birleşimi idealleştirilmesi yapıldığında, stifnerin bağlandığı plağın hangi genişlikte mukavemet hesaplarına katılacağı önemlidir. Bu problem kapsamında, plakta düzgün olmayan gerilme dağılımı sebebiyle meydana gelen yetersizliği ifade etmek için “etkin genişlik” ve kesme azalması kavramları kullanılmaktadır. Etkin genişlik kavramı, plak elemanların aksenal bası etkisi ile burkulması durumunda veya burkulma sonrasındaki süreçte veya büyük sehim değerlerine ulaşılması durumunda kullanılır. Diğeri ise yanal yüklenme ve düzlem dışı eğilme durumlarında kullanılır.

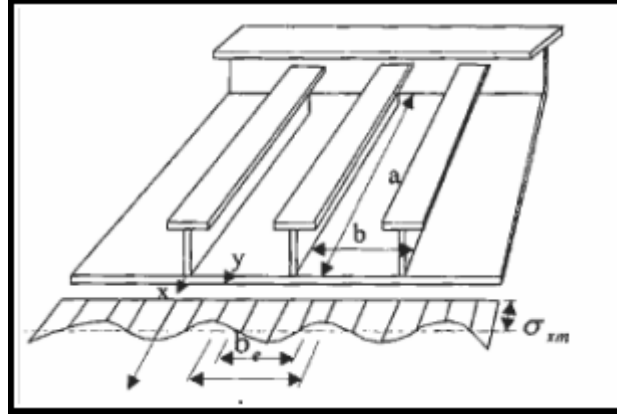
Plak üzerinde bası gerilmeleri arttıkça bir noktada yerel plak burkulması meydana gelir. Bu burkulmanın sonucu olarak, enine doğrultuda sehim oluşur. Sehimin oluştuğu stifnerler arası plak genişliği boyunca lineer olmayan gerilme dağılımı ortaya çıkar. Bu lineer olmayan gerilme dağılımında maksimum membran gerilme, stifner gövdesi ile plağın kesişme noktasında meydana gelir. Plak üzerinde de göreceli olarak daha az gerilme oluşur. Bu durumdan hareketle, tüm yük stifnere yakın  $be/2$  genişliğindeki kısımda, maksimum gerilme değeri değişmeyecek şekilde lineer olarak taşınabilir. (Paik, 2003). Başka bir deyişle, plak üzerinde oluşan lineer olmayan gerilme dağılımı, etkin genişlik tanımı yapılarak lineer hale getirilerek hesaplamalarda kullanılmaktadır. Desteklenmiş plaklarda, yerel plak burkulmaları başladığı zaman lineer olmayan gerilme dağılımı ortaya çıkar. Yerel plak burkulması da, plak üzerindeki gerilmenin, kritik burkulma değerini geçmesiyle oluşmaya başlar. Plaklarda kritik burkulmayükü, plakların birbirine bağlı oldukları düşünüldüğünde teorik olarak;

$$\sigma_{pkr} = 4 \cdot \pi^2 \frac{E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (113)$$

Şekil 2.18'da görüldüğü üzere lineer olmayan gerilme dağılımına, aynı plak genişlik değeri kullanılarak, eşdeğer bir ortalama gerilme değeri oluşturmadan, maksimum gerilme değerinin değişmediği fakat plak genişliğinin azaldığı eşdeğer lineer bir gerilme dağılımı kullanılır. Bu etkin genişlik ve etkin genişlik oranı değerleri de aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\int \sigma_x(z) \cdot dA_p = \sigma_{ort} \cdot b \cdot t = \sigma_{max} \cdot b_e \cdot t \quad (114)$$

$$\frac{b_e}{b} = \frac{\sigma_{ort}}{\sigma_{max}} \quad (115)$$



Şekil 2.18. Etkin genişlik tanımı

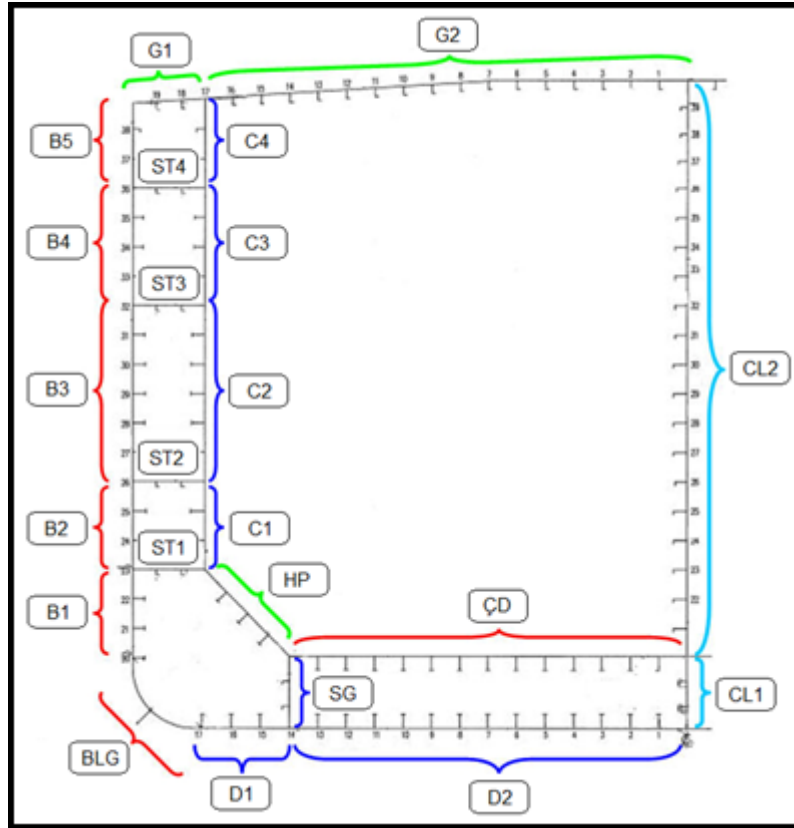
İlkel sehimi olmayan plaklarda, aksenal bası altında burkulmanın hemen ardından maksimum gerilme, ortalama gerilmeden daha büyük olur. Bu durum yukarıdaki denklemde de ifade edilmiştir. Plağın maksimum yük taşıma kapasitesi (göçme mukavemetinin) maksimum membran gerilmenin malzeme akma gerilmesine yakın olduğu yük değeri olmaktadır. Maksimum membran gerilmeye göre belirlenen etkin genişlik, plağın göçme mukavemetinin tahmininde önemli bir değişkendir. Çalışmamızda geliştirilen analiz sürecinde eleman ayrıklaştırması stifnerli ortotropik panel elemanlar, tekil plaklar ve tekil stifnerler şeklinde yapılmış olduğundan, bu idealleştirme kullanılmamıştır.

### 2.5.3. Plak-Stifner Ayrışımı Yapılarak Desteklenmiş Panellerin Burkulma ve Göçme Mukavemet Davranışlarının İncelenmesi

Geminin güverte, dip veya borda kısımlarını oluşturan desteklenmiş bir panel tekil plak elemanlar ve stifnerler şeklinde birleşim yerlerinden ayrıştırılarak, plak elemanlar ve kiriş-kolon elemanlar olarak, etki eden yükler altında bireysel P-du davranışları belirlenir. Ardından Bölüm 5'te anlatılan Smith yöntemine göre gerçekleştirilen gemi gövde kesitinin kademeli göçme analizinde, her bir eğrilik adımında elde edilen ortalama şekil değiştirme ( $\epsilon - du$ ) değerine göre, P-du eğrisinden P-eksenel kuvvet değeri belirlenerek gövde kesitinin göçme mukavemet hesaplamasında kullanılır.

## 2.6. Panel Göçme Mukavemeti İçin Yarı Analitik Çözüm Methodolojisi

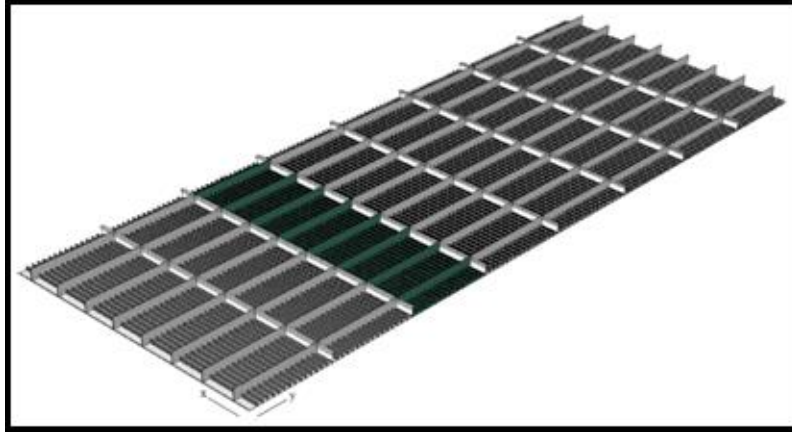
Bir geminin gövdesini oluşturan temel bütünsel yapı elemanlarının, enine ve boyuna yönde stifnerler tarafından desteklenen plak elemanların oluşturduğu paneller olduklarını geçtiğimiz bölümlerde vurgulamıştık. İki enine perde arasında uzanan, boyuna sık ve düzenli aralıklarla uzanan stifnerler ve enine seyrek olarak uzanan daha rijit stifnerlerden oluşan güverte ızgara yapısı, aynı şekilde gemi dip yapısı örnek gösterilebilir. Örnek bir gemi orta kesitinin kademeli göçme analizi için temel panel eleman ayrıklaştırması Şekil 2.19'da gösterilmiştir (Dalma,2009).



Şekil 2.19. Örnek bir gemi orta kesitinin kademeli göçme analizi için temel panel eleman ayrıklaştırması

Gemi gövdesinin kademeli göçme analizleri gerçekleştirilirken, iki enine rijit stifner eleman arasında boyuna uzanan tekil yapısal elemanların boyutlarına, malzeme özelliklerine ve başlangıç sehimlerine bağlı olarak gerçekleşebilecek burkulma tipleri ve

bunlara bağılı göçme davranışları gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ile ifade edilerek analitik kademeli göçme hesaplamasında kullanılmaktadır. Aynı yapının, benzer yüklemeler altında bütün olarak davranışları da büyük sehimli ortotropik plak yöntemi ile belirlenebilmektedir. Ayrıca bu yöntem daha rijit enine stifnerleri de doğrudan hesaba katması sayesinde geliştirilerek, iki enine perde arasında uzanan ızgara yapının davranışı da incelenebilmektedir.



Şekil 2.20. Çelik bir gemi ana güvertesinin ızgara yapısı

Fakat klasik ortotropik plak yönteminde, çözüm denklemlerinde kullanılan panel özellikleri elastik sabitler ile ifade edildiğinden sadece bütün panelin elastik burkulmasını yaklaşık olarak belirleyebilmektedir. Burkulma sonrası ve göçme durumundaki elasto-plastik davranışın incelenmesi mümkün olmamaktadır. Çalışmamızda, bu olumsuz durumdan hareketle, klasik ortotropik plak yöntemini, burkulma sonrası ve göçme davranışlarını, bir anlamda tüm gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirleyebilecek şekilde geliştirilmiştir. Bu yöntem, ayrıklaştırılan tekil plak ve stifner elemanların gerilme-şekil değiştirme davranışlarından yararlanılarak, ortotropik plak çözümünün, artımsal olarak yarı analitik yaklaşımla, tümevarım doğrultusunda elde edilmesine dayalıdır. Yöntemde, aksenal kısalmanın kontrollü olarak artırılması ile artımsal olarak boyuna aksenal bası kuvveti uygulanır. Her artımda, tekil elemanların gerilme değerleri, bütün panel gerilmesi ile karşılaştırılır. Bu değerlerden en küçük olanı o adım için şekil değiştirme-gerilme ilişkisini belirler. Burada dikkat çekilmesi gereken, her adımda yapısal elemanların gerilme-şekil değiştirme eğrilerindeki o adımdaki teğet modüllerinin ( $E_{Tp,i}$ ,  $E_{Ts,i}$ ), ortotropik plak çözümünde güncellenerek,  $E_x$  ve  $E_y$  değerlerinin yeniden belirlenmesi için

kullanılmasıdır. Güncellenen malzeme sabitleri (116)-(126) denklemleri ile belirlenir. Kullanılan tekil elemanların gerilme-şekil değiştirme davranışları ampirik formüller, parametrik veritabanları veya SEY analizlerinden elde edilerek çözüme dâhil edilebilirler.

$$E_x = \frac{E_{Tp} \cdot b \cdot t_p + E_{Ts} \cdot n_{sx} \cdot A_{sx}}{B \cdot t_p} \quad (116)$$

$$E_y = \frac{E_{Tp} \cdot L \cdot t_p + E \cdot n_{sy} \cdot A_{sy}}{L \cdot t_p} \quad (117)$$

Ortotropik plakta Poisson oranı değerleri için;

$$u_x = c \cdot \sqrt{\frac{M}{N}} ; c = \frac{v}{0,86} \quad (118)$$

$$M = \frac{E_y}{E_x} \cdot \left( \frac{E_{Tp} \cdot t^3}{12} + E_{Tp} \cdot t \cdot z_{0x}^2 + \frac{E_{Ts} \cdot I_x}{b} \right) - \frac{E_{Tp} \cdot t^3}{12} - E_{Tp} \cdot t \cdot z_{0y}^2 - \frac{E \cdot I_y}{a} \quad (119)$$

$$N = \frac{E_{Ts} \cdot I_x}{b} \left( \frac{E_y}{E_x} \right)^2 - \frac{E \cdot I_y}{a} \cdot \left( \frac{E_y}{E_x} \right) \quad (120)$$

$$u_y = \frac{E_y}{E_x} \cdot u_x \quad (121)$$

$$u_{xy} = \sqrt{u_x \cdot u_y} \quad (122)$$

Rijitlikler ve kayma modülleri;

$$D_x = \frac{E_{Tp} \cdot t^3}{12 \cdot (1 - u_{xy}^2)} + \frac{E_{Tp} \cdot t \cdot z_{0x}^2}{1 - u_{xy}^2} + \frac{E_{Ts} \cdot I_x}{b} \quad (123)$$

$$D_y = \frac{E_{Tp} \cdot t^3}{12 \cdot (1 - u_{xy}^2)} + \frac{E_{Tp} \cdot t \cdot z_{0x}^2}{1 - u_{xy}^2} + \frac{E \cdot I_y}{a} \quad (124)$$



$$G_{xy} = \frac{\sqrt{E_x \cdot E_y}}{2 \cdot (1 + \sqrt{u_y \cdot u_x})} \quad (125)$$

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left( u_y \cdot D_x + u_x \cdot D_y + G_{xy} \cdot \frac{t^3}{3} \right) \quad (126)$$

Yöntemin aşamalarından bir bölümünü oluşturan büyük sehimli ortotropik panel hesaplamaları için Bölüm 2.3.1.1 ve 2.3.1.2’de tekil plaklar için anlatılan Membran Gerilme Yaklaşımına benzer şekilde Airy gerilme fonksiyonu ve  $w_0$  (sehim) bilinmeyen değişkenine bağlı 3. derece denklemin katsayıları ortotropik panel malzeme sabitlerine bağlı olarak denklem (120)-(130) ile elde edilir. Sehim değerinin elde edilmesiyle, her iki yönde maksimum ve minimum gerilme değerleri belirlenir. Yine benzer şekilde Von-mises gerilme değerinin her artımsal adımda kontrol edilmesiyle hesaplama sürdürülür. Maksimum gerilmenin boyuna kenarın ortasında olması beklendiği için denklem (137) sağlandığında göçme mukavemeti değerine ulaşıldığı kabul edilir. Yöntemin tüm aşamalarıyla birlikte detaylı anlatımı, uygulamalı olarak Bölüm 3.3’te Nishihara Kutu Kiriş analizinde sunulmuştur.

$$C_1 = \frac{\pi^2}{16} \cdot \left[ E_x \frac{m^4 \cdot B}{L^3} + E_y \frac{n^4 \cdot L}{B^3} \right] \quad (127)$$

$$C_2 = \frac{3 \cdot \pi^2 \cdot z_0}{16} \cdot \left[ E_x \frac{m^4 \cdot B}{L^3} + E_y \frac{n^4 \cdot L}{B^3} \right] \quad (128)$$

$$C_3 = \frac{\pi^2 \cdot z_0^2}{8} \cdot \left[ E_x \frac{m^4 \cdot B}{L^3} + E_y \frac{n^4 \cdot L}{B^3} \right] + \frac{m^2 \cdot B}{L} \cdot \sigma_{xort} + \frac{\pi^2}{t} \cdot \left[ D_x \cdot \frac{m^4 \cdot B}{L^3} + D_y \cdot \frac{n^4 \cdot L}{B^3} + 2H \cdot \frac{m^2 \cdot n^2}{L \cdot B} \right] \quad (129)$$

$$C_4 = \frac{m^2 \cdot B \cdot z_0}{L} \cdot \sigma_{xort} \quad (130)$$

$$w_0 = \frac{C_2}{3 \cdot C_1} + k_1 + k_2 \quad (131)$$

$$k_1 = \left[ -\frac{Y}{2} + \sqrt{\frac{Y^2}{4} + \frac{X^3}{27}} \right]^{1/3} ; \quad k_2 = \left[ -\frac{Y}{2} - \sqrt{\frac{Y^2}{4} + \frac{X^3}{27}} \right]^{1/3} \quad (132)$$

$$Y = \frac{2.C_2^2}{27.C_1^2} - \frac{C_2.C_3}{3.C_1^2} + \frac{C_4}{C_1} ; \quad X = \frac{C_3}{C_1} - \frac{C_2^2}{3.C_1^2} \quad (133)$$

$$\sigma_{x\max} = (\sigma_{ort}) + \frac{E_x \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot m^2 \cdot \pi^2}{8 \cdot L^2} \quad (134)$$

$$\sigma_{x\min} = (\sigma_{xort}) - \frac{E_x \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot m^2 \cdot \pi^2}{8 \cdot L^2} \quad (135)$$

$$\sigma_{y\max} = \frac{E_y \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot n^2 \cdot \pi^2}{8 \cdot B^2} \quad (136)$$

$$\sigma_{y\min} = -\frac{E_y \cdot w_0 (w_0 + 2z_0) \cdot n^2 \cdot \pi^2}{8 \cdot B^2} \quad (137)$$

$$\sigma_{vm-2} = \sqrt{\sigma_{x\max}^2 - (\sigma_{x\max} \cdot \sigma_{y\min}) + \sigma_{y\min}^2 + 3\tau^2} = \sigma_Y \quad (138)$$

Çalışmamızda, iki enine rijit eleman arasında kalan ve yalnızca boyuna yönde desteklenmiş panelin, düşey eğilme momenti etkisiyle oluşan boyuna aksenal bası kuvvetleri altında davranışı incelenmiştir. Stifnerlerin olası göçme tiplerine bağlı gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, Bölüm 2.4'te anlatıldığı üzere, Uluslararası Klas Kuruluşları Birliği'nin Genel Geçer Yapısal Kuralları çerçevesinde uygulanan amprik formüller ile elde edilmiştir. Tekil plak elemanların gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ise Bölüm 3'te belirtildiği gibi plakların lineer olmayan diferansiyel denklemlerinin (uygunluk ve denge denklemleri) çözülerek elastik büyük sehim davranışlarının belirlenmesi ile elde edilmiştir. Tekil plak gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde göçme sonrası dayanım değerleri yine membran gerilme ve etkin genişlik değerlerine bağlı olarak, ilkel sehim değerlerinin yok sayılması kabulüne dayanarak, Paik (2003) tarafından geliştirilen formüller ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_{x\max} = E \cdot \varepsilon_{x\text{ort}} = 2 \cdot \sigma_{x\text{ort}} - \sigma_{xE} \quad (139)$$

$$\sigma_{x\text{ort}} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\sigma_{xE}}{E \cdot \varepsilon_{x\text{ort}}} \right) \cdot \sigma_{x\max u} \quad (140)$$

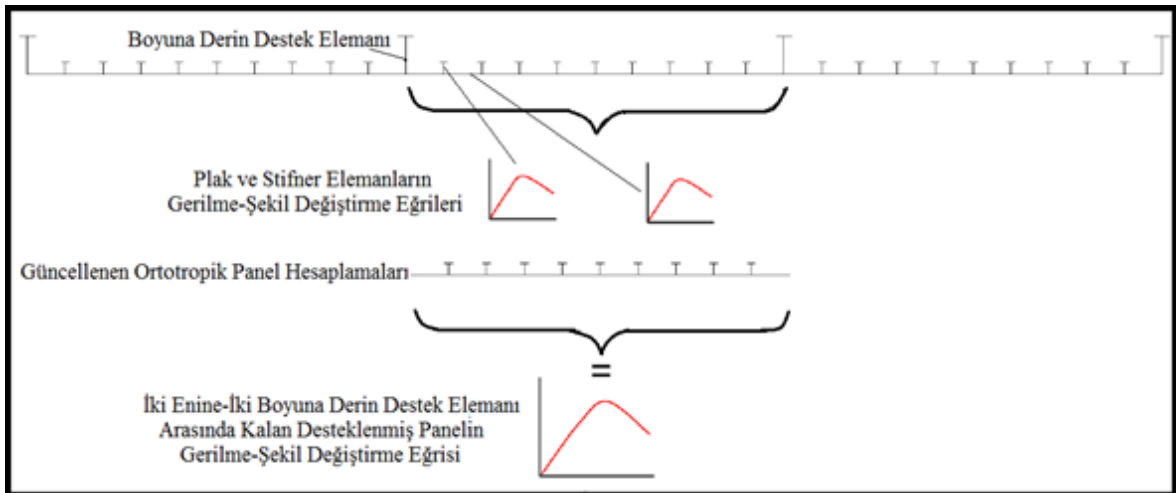
$$\Delta\sigma_{x\text{ort}} = -\frac{\sigma_{x\max u}}{2} \cdot \frac{\sigma_{xE}}{E \cdot \varepsilon_{x\text{ort}}^2} \cdot \Delta\varepsilon_{x\text{ort}} \quad (141)$$

Desteklenmiş panellerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde göçme sonrası dayanım değerleri de benzer şekilde, tekil plak elastik burkulma değeri yerine, ortotropik yaklaşımla panelin bütün olarak elastik burkulma değeri  $\sigma_{xE0}$  kullanılır.

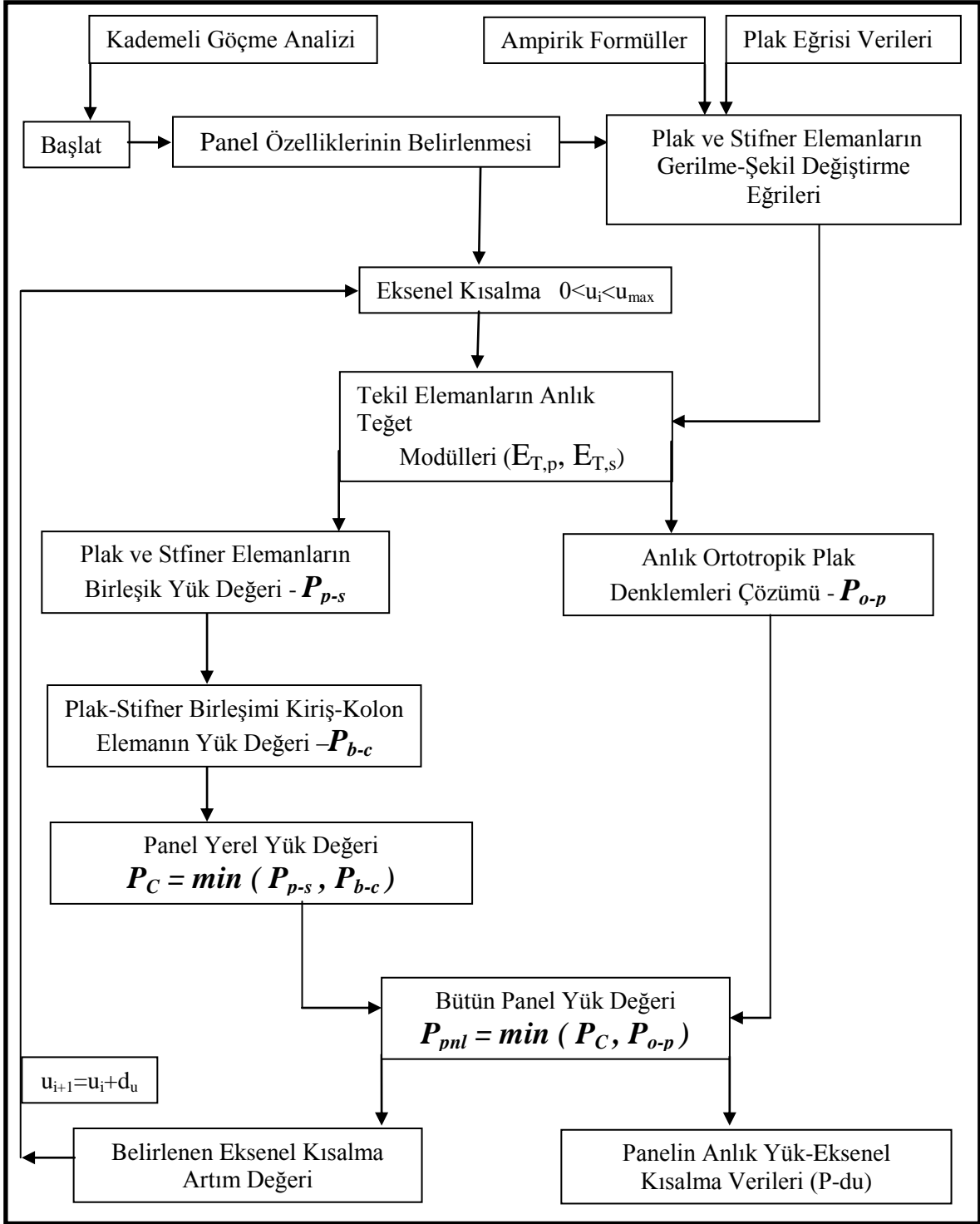
$$\sigma_{xE0} = -\frac{\pi^2}{B^2} \cdot \left( D_x \cdot \frac{m^2 \cdot B^2}{L^2} + 2 \cdot H \cdot n^2 + D_y \cdot \frac{n^4 \cdot L^2}{m^2 \cdot B^2} \right) \quad (142)$$

$$\Delta\sigma_{x\text{ort}} = -\frac{\sigma_{x\max u}}{2} \cdot \frac{\sigma_{xE0}}{E \cdot \varepsilon_{x\text{ort}}^2} \cdot \Delta\varepsilon_{x\text{ort}} \quad (143)$$

Bu bölümde elde edilen desteklenmiş panel gerilme-şekil değiştirme (yük-eksenel kısalma) eğrisi Bölüm 2.7'de anlatılan kademeli göçme analizinde kullanılacaktır. Şekil 2.21 ve Şekil 2.22'de desteklenmiş panel elemanlar için yarı-analitik çözüm metodolojisinin akışı gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Desteklenmiş panel için P-du eğrisi elde edilmesi

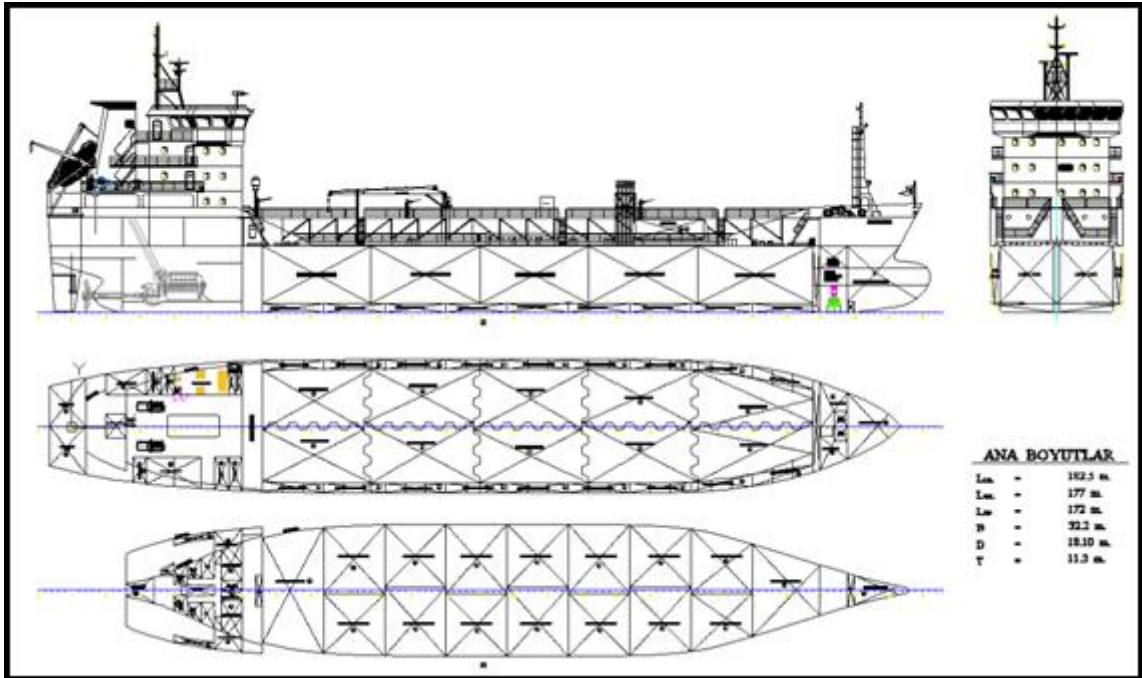


Şekil 2.22. Desteklenmiş panel gerilme-şekil değişirme davranışının yarı analitik çözüm metodolojisi akış şeması

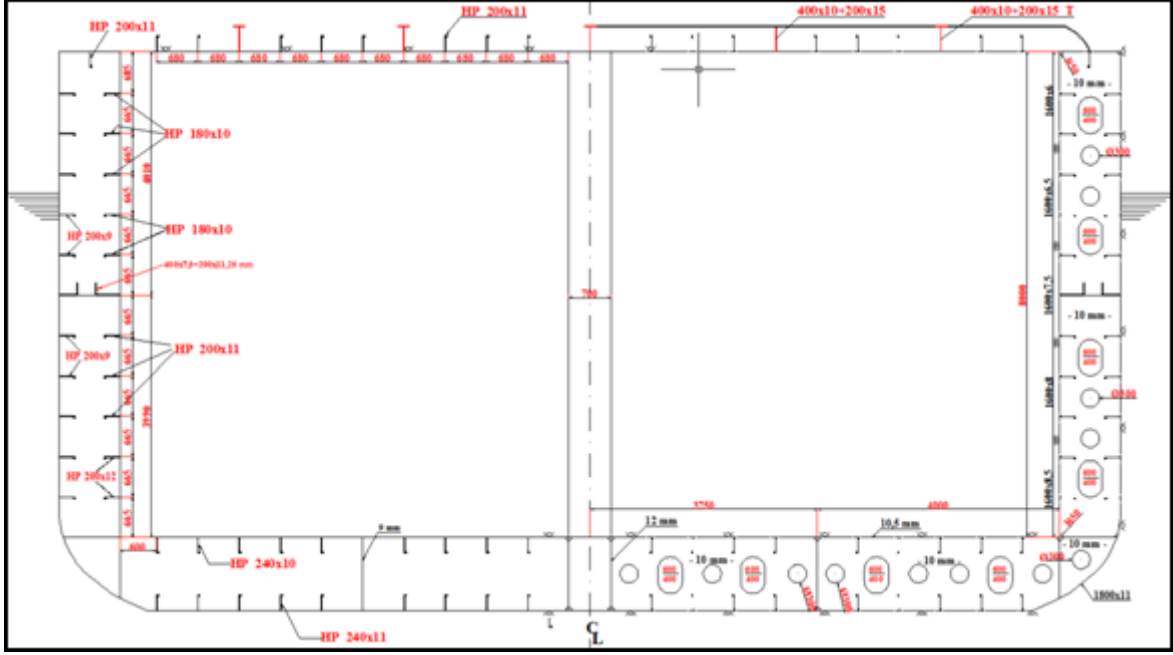
## 2.7. Kademeli Göçme Analizi ve Smith Yöntemi

Bu bölümde, Uluslararası Klas Kuruluşları Birliği'nin Genel Geçer Yapısal Kuralları (IACS-CSR) kapsamında da kullanılan Smith'in (1977) geliştirdiği yöntemeye dayalı olarak, boyuna eğilme etkisi altındaki gemi gövdesi orta kesitinde, yapının kademeli kırılma davranışının (moment-eğrilik eğrisinin) iteratif artımsal yöntemle belirlenmesi yolu ile göçme mukavemet değerinin tahmin edilmesi üzerinde durulmuştur.

Smith yöntemi, temel olarak, geminin düşey eğilmeye maruz kalması durumunda oluşacak eğrilik göz önüne alınarak, bu eğrilik ve oluşacak yeni tarafsız eksen durumunda kuvvet ve moment dengeleri koşullarını sağlayan eleman şekil değiştirme ve karşılığı gerilmeleri, kademeli kırılma analizi yaklaşımıyla artırılan her eğrilik derecesinde elde etmek suretiyle, kesite etki eden göçme kuvvet ve karşılığı göçme moment değerlerine ulaşabilmek amacıyla kullanılan iteratif artımsal yaklaşım yöntemine dayanmaktadır. Şekil 2.23'te göçme mukavemet hesaplaması IACS-CSR tarafından hassas olarak ele alınan örnek bir tankerin genel yerleşim planı, Şekil 2.24'te de bu tanker orta kesiti gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Çift cidarlı bir tanker genel yerleşim planı



Şekil 2.24. Bir geminin orta kesitinin yapı elemanları ile gösterimi

### 2.7.1. Smith Yönteminde Yapılan Kabuller

1-Gemi gövdesinin boyuna sistemde (güverte, dip, iç dip, borda, iç cidar gibi plakların gemi boyu yönünde uzanan elemanlarla desteklenmesi) inşa edildiği kabul edilecek ve göçme mukavemet değeri ikikomşu enine çerçeve arasını oluşturan enine kesit için hesaplanacaktır.

2-Kullanılan boyuna destek elemanı stifnerlerin Lama, L ve/veya T kesitlifiller şeklinde olacağı kabul edilmiştir.

3-Gövde kirişinin enine kesiti her eğrilik artışında düzlem olarak kalacaktır.

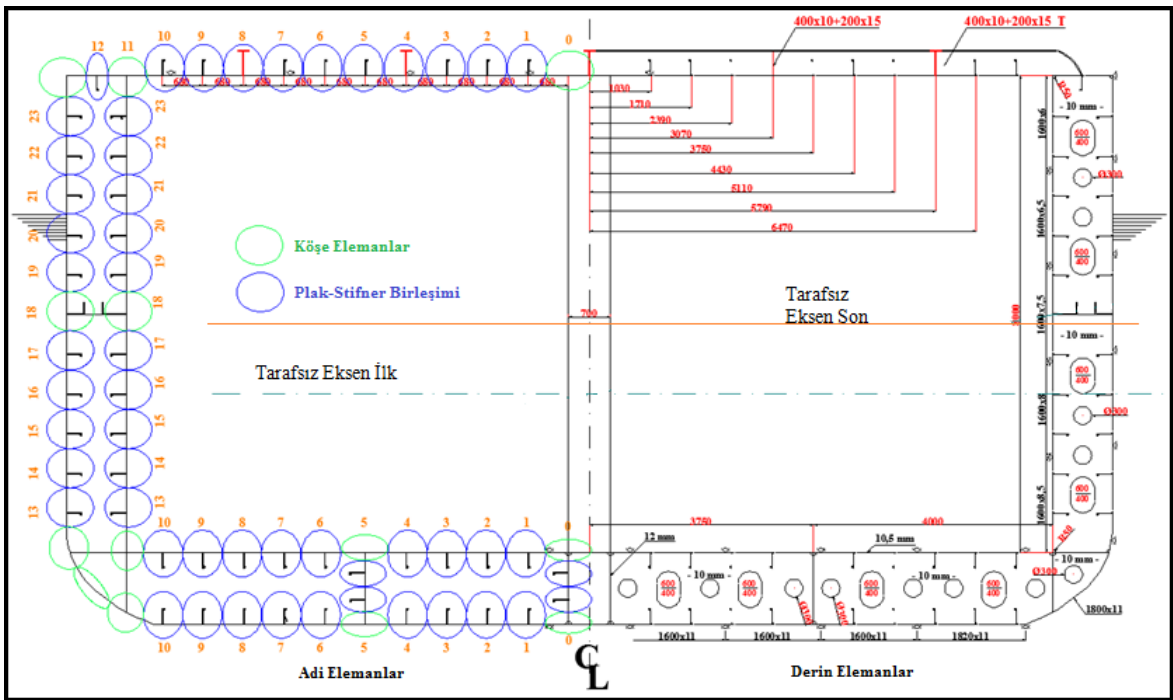
4-Yapısal eleman malzemeleri elastik-tam plastik davranış sergileyecektir.

5-Enine gövde kesiti, ilk olarakbirbirinden bağımsız davranış sergileyen fakat aynı zamanda sınır şartlarına uygun davranış sergileyen plak, stifner, kiriş-kolon veya desteklenmiş panel elemanlara ayrılarak yöntem uygulanacaktır. Daha sonra güverte, dip ve bordayı oluşturan desteklenmiş paneller tek bir eleman olarak ele alınır. Bu panel elemanın P-du eğrisinin belirlenmesinde, ayrı ayrı incelenen göçme tiplerinden en düşük göçme mukavemet değerinin elde edildiği tip, panelin gerçek göçme mukavemeti olarak ele alınır. Göçme mukavemeti sonrası davranış ise, bu kısımda stifnerlerin etkisinin çok az

olması sebebiyle, elde edilen minimum göçme mukavemet tipine bağlı olarak ya ortotropik plak davranışına göre yada izotropik tekil plak davranışına göre belirlenecektir.

### 2.7.2. Smith Yöntemi Uygulama Adımları

1- Gövde ortası enine kesiti, Şekil 2.25'in sol yarısında gösterildiği gibi stifner plak birleşimi elemanlara ve köşe elemanlara ayrılır.



Şekil 2.25. Orta kesitin destek elemanı stifner-plak birleşimlerine ayrılması

2- Gövde kirişinin düşey eğriliğinin derecesi artımsal olarak artırılır. Her eğrilik değerinde enine kesite etkileyen eğilme momenti belirlenir. Bunun için ilk olarak, ilk eğrilik ve artım değeri, çökme (sagging) durumu dikkate alındığı için mukavemet güvertesindeki yapı elemanlarının minimum akma gerilmesine eşdeğer lineer elastik eğilme gerilmesi değerine, tarafsız eksene ve mukavemet güvertesinin düşey konumuna bağlı olarak elde edilir.

$$\Delta\kappa = \frac{0,05 \frac{R_{eH}}{E}}{Z_D - Z_{NA}} \quad \text{Türk Loydu Bölüm 5. Kısım C.8.2.1} \quad (144)$$

$$\Delta\kappa = \frac{M_{yd}}{E \cdot I_{hull}} 10^{-5} \quad \text{IACS-CSR} \quad (145)$$

$R_{eH}$  : Mukavemet güvertesindeki yapı elemanlarının minimum akma gerilmesi değeri.  
 $M_{yd}$  : Mukavemet güvertesindeki yapı elemanlarının akma gerilmesine eşdeğer lineer elastik eğilme gerilmesi sonucu oluşan düşey eğilme momenti değeri.

3- Her eğrilik adımında, yapısal elemanlarda oluşan aksel yer değiştirmeler (negatif veya pozitif uzama) ilgili adımdaki eğrilik değeri ile ilgili yapısal elemanın yatay tarafsız eksene göre düşey konumunun çarpımından elde edilecektir. İlgiliartımsal eleman şekil değiştirmeleri için eğilmenin enine kesitin anlık yatay elastik tarafsız ekseninde olduğu ve eğilmeden sonra düzlem kesitlerin düzlem kaldığı kabulleri yapılır. Yukarıdaki kabullerden hareketle, elde edilen eleman gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin eğilme kullanılarak, ilgili şekil değiştirmeye karşılık gelen artımsal eleman gerilmeleri elde edilecektir. Elde edilen bu gerilme değerleri ile eleman kesit alanları çarpılarak, her bir elemana etkiyen kuvvet değerleri belirlenir. Fakat tarafsız eksenin, lineer olmayan eleman davranışları sebebiyle değişen konumunu doğru olarak belirlemek için boyuna kuvvet dengesini sağlayana veya net kuvvet değerini kabul edilebilir seviyeye çekene kadar, diğer bir ifadeyle, tarafsız eksenin kayma değerinin  $1 \times 10^{-4}$  mertebesinde aşağıda tutabilene kadar bu adımdaki işlemler tekrarlanır. Tekrarlanan bu iteratif işlemleri gerçekleştirmek için bir bilgisayar programı geliştirilecektir.

$$\varepsilon_{ij} = \kappa_i \cdot (z_j - z_{T-i}) \xrightarrow{\text{Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisi}} \sigma_j \sigma_{ij} \cdot A_{ij} = F_{ij} \xrightarrow{\text{hesaplanıp,}}$$

$$\xrightarrow{\text{Kesitte}} \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \cdot A_{ij} = \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} \cdot A_{ij} \text{ veya } \Delta_{TEK} \leq 0,0001 \text{ sağlanmalı,}$$

$i$  : İterasyon numarası;  $j$  : Eleman numarası

$m$  : Tarafsız eksenin üzerinde yer alan yapısal eleman sayısı

$n$  : Tarafsız eksenin altında yer alan yapısal eleman sayısı



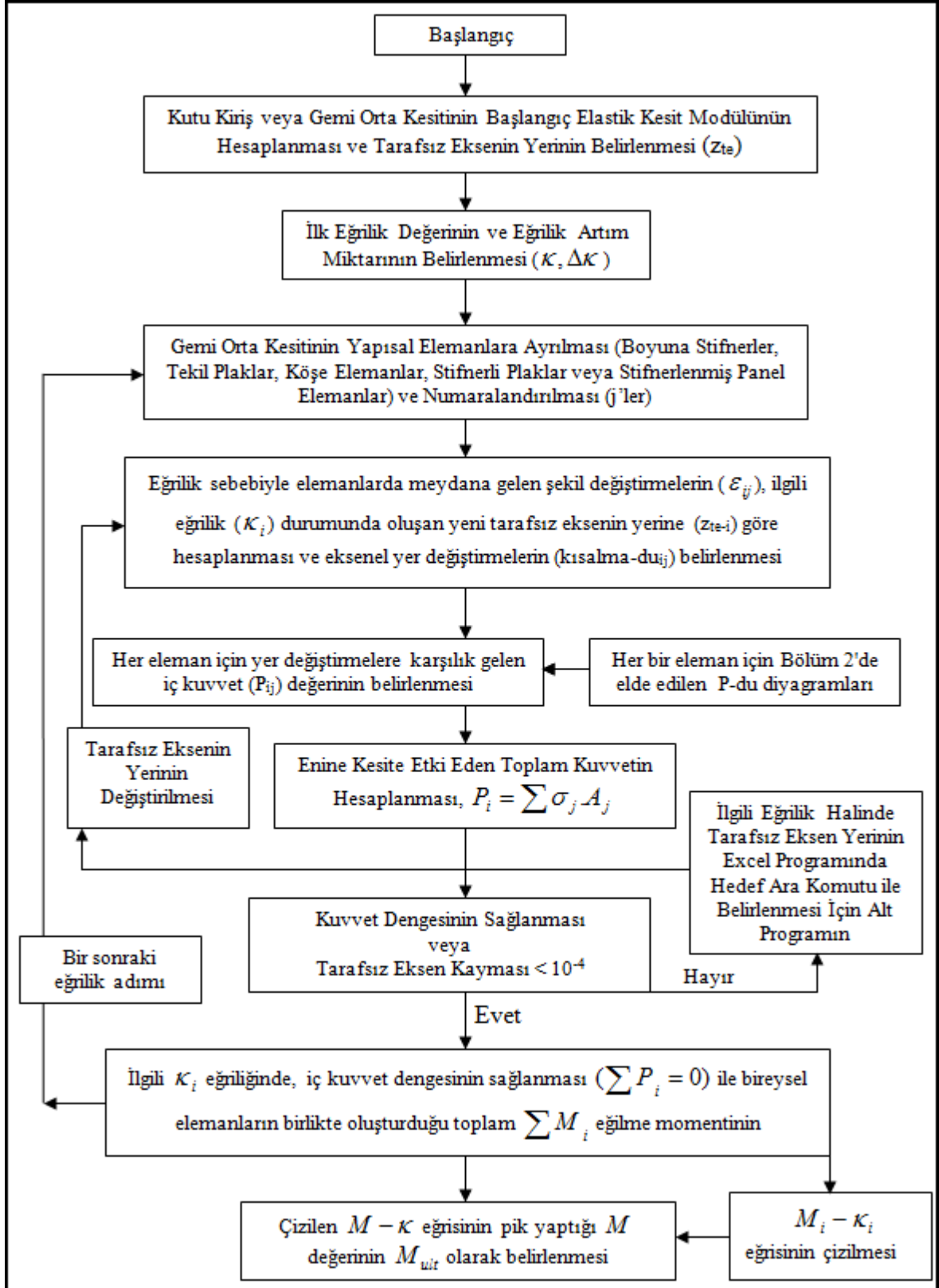
$\Delta_{TEK}$  : Tarafsız eksenindeki kayma miktarı

4- Yeni tarafsız eksenin yeri belirlendikten sonra ilgili adım için, tüm yapısal elemanların kuvvet değerlerinin katılımıyla oluşan artımsal moment değeri belirlenir.

$$M_i = \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \cdot A_{ij} \cdot (z_{ij} - z_{TE-i})$$

5- Her adımda elde edilen  $M_i$  eğilme momenti ve ilgili  $\kappa_i$  eğrilik değerleri grafiğe aktarılır, eğrinin pik yaptığı adıma gelindiğinde iterasyon durdurulur ve pik noktasındaki eğilme momenti değeri, çökme durumunda gemi enine kesitinin  $M_u$  göçme moment değeri olarak belirlenir.

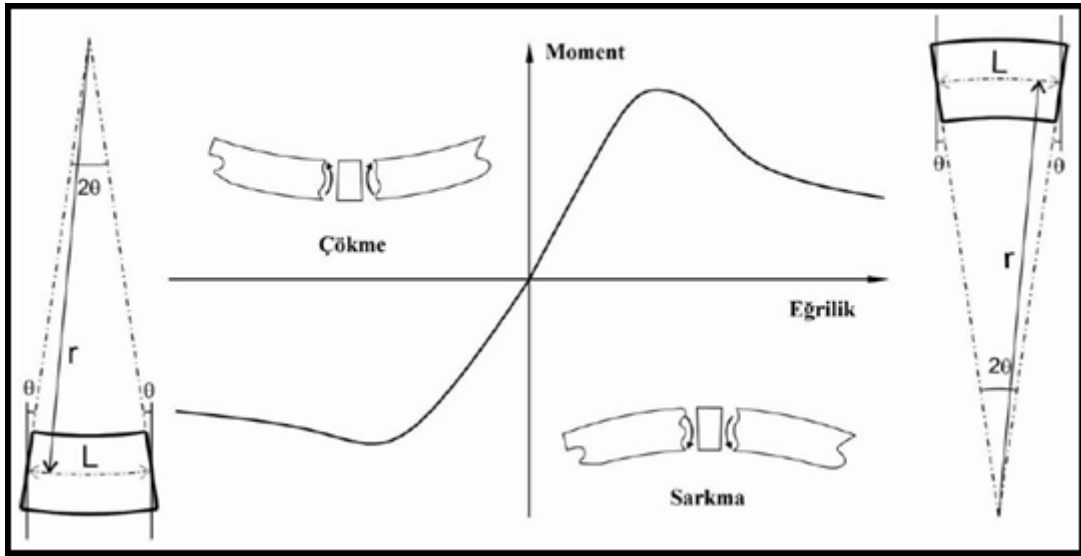
Şekil 2.26'da çalışmada kullanılan kademeli göçme analizi çözüm akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Çalışmada kullanılan kademeli göçme analizi çözüm akış şeması

### 2.7.3. Elemanlarda Eksenel Yer Değiştirme

Smith yönteminde hesaplama gemi bütünü için değil sadece gemi ortasındaki enine destek elemanı arasında kalan bir bölümü için gerçekleştirilmektedir. Bu bölüme etkiyen sabit moment değerine bağlı olarak bölümün oluşturacağı eğrilik hesaplanacaktır. Moment ve eğrilik değerlerinin yükselmesiyle de elemanlar üzerinde yapısal bozulmalar gerçekleşmektedir. Şekil 2.27'de geminin incelenen bölgesinde momente bağlı olarak eğrilik değişimi diyagramda yer almış, ayrıca eğrilik değerine bağlı olarak şekil değiştirmenin nasıl olduğu şematik olarak gösterilmiştir.

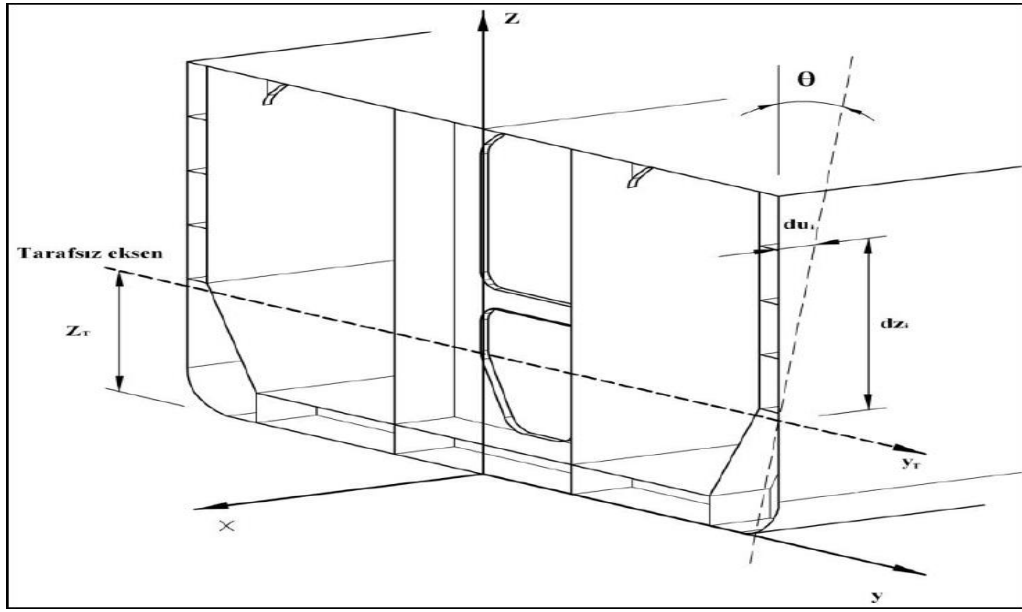


Şekil 2.27. Sarkma ve çökme için eğrilik durumları

Tarafsız eksen üzerinde gerilme veya şekil değiştirme bulunmaması sebebiyle de hesaplamaların yapılacağı gemi bloğunun tarafsız eksen uzunluğu değerini koruyacaktır. İncelemenin yapılacağı kısım boyunca momente bağlı eğrilik değişim göstermeyecektir. Bu sebeple tarafsız eksen, yarıçapı  $1/\kappa$  olan bir çember yayı halini alacaktır. Yapılan ana kabule göre düzlem kesitlerin düzlem kalması ve tarafsız eksene dik olması durumunda her bir kesit  $\theta$  kadar tarafsız eksen etrafında dönme gerçekleştirmiş olacak, toplamda kesitler arasında  $2\theta$ 'lık bir açı oluşacaktır. Tarafsız eksen ve kesitlerin kesişim noktası arasındaki mesafe eğrilik yarıçapını göstermektedir. Çember yay uzunluğu hesabından (146) denklemi ile  $\theta$  ve  $\kappa$  arasındaki bağıntı hesaplanabilir.

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{2\theta}{L} \quad (146)$$

Şekil 2.28’de bir gemi kesitinin tarafsız eksen etrafında  $\theta$  kadar bir dönme gerçekleştirdiği durum şematik olarak gösterilmiştir [Nielsen,1998]. Tarafsız eksenin konumu ilk hesaplama adımında geminin dibinden  $z_{T0}$  mesafeden geçmektedir. Dönme açısının bilinmesiyle ayrılaştırılan elemanlara ait aksenal yer değiştirme miktarı hesaplanabilecektir.



Şekil 2.28. Kesit elemanlarında aksenal yer değiştirme

Denklem (149) ile aksenal yer değiştirme hesaplanabilir. Denklemde geminin her iki ucunun da  $\theta$  kadar dönme gerçekleştirdiği göz önüne alınarak toplam yer değiştirme (kısılma/uzama) hesaplanır.

$$\Delta z_i = z_i - z_{T0} \quad (147)$$

$$\varepsilon_{ilk-ij} = \kappa_{ilk} \cdot \Delta z_i \quad (\text{ilk adımda elemanda oluşan şekil değiştirme}) \quad (148)$$

$$du_{ilk} = \kappa_{ilk} \cdot \Delta z_i \cdot L \quad (149)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \kappa \cdot \Delta z_{i-yeni} \quad (150)$$

$\Delta z_{i-yeni}$  : Yeni tarafsız eksenin yerine göre elemanın merkezinin tarafsız eksene olan düşey mesafesi

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij-1} + \Delta\varepsilon_{ij} \quad (151)$$

$$du_{ij} = \kappa_i \cdot \Delta z_{i-yeni} \cdot L \quad (152)$$

#### 2.7.4. Kademeli Göçme Analizi Hesap Tablosu

Hesaplamalarda ortalama gerilme-ortama şekil değiştirme diyagramları yerine P-du diyagramları kullanılacaktır. Fiziksel olarak bu diyagram elemanın eksenel şekil değiştirme yaptırılmasıyla ne kadar iç kuvvet oluşturacağını göstermektedir.

Plak elemanlar için yapılan büyük sehim analizi sonucunda kesit üzerindeki şekil değiştirme dağılımı yardımıyla elemandaki eksenel yer değiştirme denklem (147) ile hesaplanabilir. Elemana ait eksenel yer değiştirme değerine bağlı normal kuvvet değeri daha önce elde edilen P-du diyagramından okunarak Tablo 2.3'te yer alan hesaplama tablosundaki yerine yazılacaktır. Dengenin oluşması için izdüşüm denge denkleminin sağlanması yani elemanların oluşturdukları iç kuvvetler toplamının sıfır olması gerekmektedir. İç kuvvetler toplamının sıfır olmaması verilen eğrilığe bağlı şekil değiştirme değerlerinin hatalı hesaplandığını yani tarafsız eksenin yerinin hatalı alındığını göstermektedir. Tarafsız eksenin yeri Excel programında hedef ara komutu ile hesaplanarak bulunur. Elemanların oluşturdukları moment değeri ise elemanların oluşturdukları iç kuvvet değerlerinin tarafsız eksene olan uzaklıklarıyla çarpılmasıyla elde edilir. Kesite ait toplam moment değeri ise elemanlara ait moment değerlerinin toplamından oluşmaktadır.

Tablo 2.3. Kademeli göçme analizi hesaplama tablosu

El. No	Anlık Eğrilik Değeri		$\kappa_i$	Anlık Tarafsız Eksen Düşey Mesafesi		$z_{T_i}$
	$z_{ij}$	$\Delta z_{ij}$		$\varepsilon_{ij}$	$du_{ij}$	
$j : 1,2,3$	$z_{ij}$	$z_{ij}-z_{T_i}$	$\varepsilon_{ij} = \kappa_i \cdot \Delta z_{ij}$	$\varepsilon_{ij} \cdot L$	P-du diyagramından	$P_{ij} \cdot \Delta z_{ij}$
$i$ : İterasyon numarası ; $j$ : eleman numarası					$\Sigma P_i = 0$	$\Sigma M_i$

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Tekil Plak Elemanların Göçme Mukavemet Değerlerinin Tahmin Edilmesi Uygulamaları ve Kanıtlanması

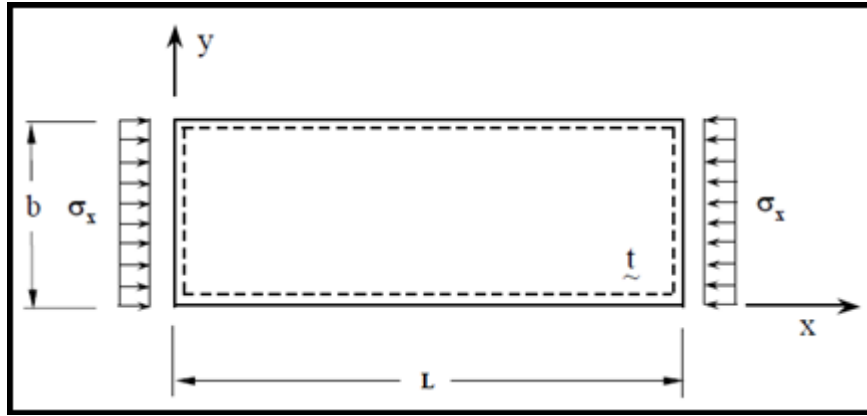
Tüm çözüm metodolojisi içerisinde, tekil plakların gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için kullanılan hesaplama arayüzü Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Burada hesaplama adımları boyuna aksenal yük değerinin (ortalama gerilme- $\sigma_{ort}$ ) iteratif olarak artırılması ile gerçekleştirilmektedir. Hesaplamalarda, boyuna aksenal bası yüklerine ek olarak, yanal basınç (özellikle dip panellerde), plak için burkulma modu şeklinde ilkel sehim değerleri ve artık kaynak gerilmesi değerleri de göz önüne alınmıştır. Hesaplama kapsamında, plakların köşe noktaları, uzun kenarları ve kısa kenarları olmak üzere 3 farklı bölgesinde Von-Mises eşdeğer gerilme değerinin her adımda, malzeme akma gerilmesine ulaşip ulaşmadığı takip edilir. Plak boyutları, ilkel sehim, artık kaynak gerilmesi ve sınır şartlarına bağlı olarak herhangi bir Von-Mises eşdeğer gerilme değerinin malzeme akma sınırı değerine ulaşması ile plağın göçme mukavemetine ulaşmış olduğu belirlenir. Bu değer sağlandığı andaki ortalama gerilme değeri, göçme mukavemetini oluşturan ve plağın maksimum dayanabileceği yük değerini gösterir.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	$\sigma_{veg}$	315						
2	$\pi$	3,141592654			C1	1,696974		
3	m,n	6	1		C2	24,0546		
4	E	205800			C3	714,9732	639,2012	
5	a	5700			C4	-7341,47		
6	b	945			X	354,3456		
7	$z_0$	4,725			Y	-6105,98		
8	$\sigma_{ort}$	-260,3285			k1	18,53233		
9	t	21			k2	-6,37347		
10	P	0			$w_0$	7,433867		
11	D	174534230,769			$w_{0z}$	19,40802		
12	v	0,3						
13	$\beta$	1,760536792						
14	$\sigma_{max}$	0			$\sigma_{yort}$	$\sigma_{xort}$	$w_0$	
15	$\sigma_{yck}$	0			0	-260,329	7,433867	
16	$\sigma_{fkr}$	315			$\sigma_{ymax}$	$\sigma_{ymin}$	$\sigma_{ymax}$	$\sigma_{ymin}$
17					-295,638	-225,019	-35,6844	35,68438
18					$\sigma_{e11}$	$\sigma_{e12}$	$\sigma_{e13}$	
19					279,5097	315	209,4688	
20					$b_e$	$d_u$	$\epsilon_{xort}$	$\sigma_{xort}/\sigma_{veg}$
21					832,1333	-8,18823	-0,00144	-0,82644
22								
23								

Şekil 3.1. Tekil plak gerilme-şekil değiştirme eğrisi hesap tablosu

### 3.1.1. Tekil Plak Gerilme-Şekil Değişirme Davranışı Uygulama-I

Bu kısımda ilk uygulama olarak Paik ve Seo'nun 2004 yılında Busan Ulusal Üniversitesinde boyuna ve enine stifnerler arasında kalan tekil plağın göçme mukavemet değerlendirmesi için gerçekleştirdikleri kıyaslama çalışması ele alınmıştır. İlgili plak Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Uygulamada kullanılan plak ve yükleme durumu

Uygulamada kullanılan tekil plak, enine ve boyuna stifnerler arasında basit mesnetli olarak kabul edilmiştir. Yumuşak çelik malzemenin kullanıldığı plakta, orta seviyede burkulma modu şeklinde ilkel sehim ve orta seviyede artık kaynak gerilmesi kaynaklı başlangıç bozulmaları hesaba dâhil edilmiştir. Kıyaslama hesaplamalarında plak kalınlığı değişken olarak kullanılmıştır. Plağın ana özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

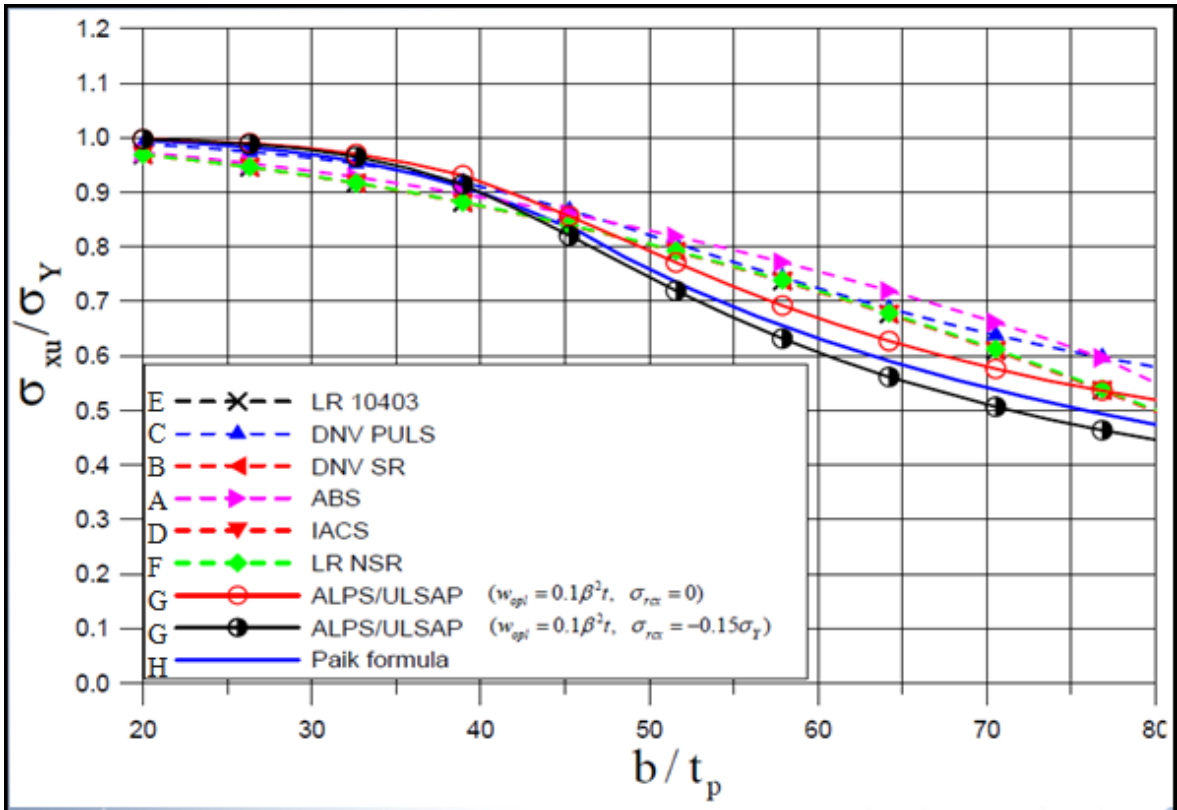
Tablo 3.1. Tekil plak uygulama-I için plak ana özellikleri

L	3600 mm
b	800 mm
$t_p$	10, 15, 20, 25 ve 30 mm
E	208000 MPa
$\nu$	0,3
$\sigma_Y$	235 MPa
$z_0$	$0,1 \cdot \beta^2 \cdot t_p$
$\sigma_{rcx} / \sigma_Y$	0
m	5

Karşılaştırma çalışması kapsamında 8 ayrı yöntem kullanılmıştır. Mevcut çalışma sonuçları ile diğer sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan diğer yöntemler;

- A- ABS - ABS Gemi Klas Kuralları (Amerikan Loydu)
- B- DNV SR - DNV Gemi Klas Kuralları (Norveç Loydu)
- C- DNV PULS - DNV PULS (Norveç Loydu PULS Programı)
- D- IACS - IACS Burkulma Prosedürü, UR S11
- E- LR 10403 – İngiliz Loydu Direk Hesaplama Yöntemi, ‘LR Burkulma’
- F- LR NSR – İngiliz Loydu Özel Hizmet Tekne Kuralları ve Savaş Gemileri Kuralları
- G- ALPS/ULSAP – Paik tarafından geliştirilen program
- H- Paik formülü – Paik tarafından boyuna aksel bası yükleri altındaki çelik plaklar için geliştirilen ampirik formül.

$$\frac{\sigma_{xu}}{\sigma_Y} = \begin{cases} -0,032\beta^4 + 0,002\beta^2 + 1 & \beta \leq 1,5 \\ 1,274/\beta & 15 < \beta < 3 \\ 1,248/\beta^2 + 0,283 & \beta > 3 \end{cases}$$



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan 8 yöntem ile plağın göçme mukavemet değerlerinin genişlik/kalınlık oranına göre değişimi

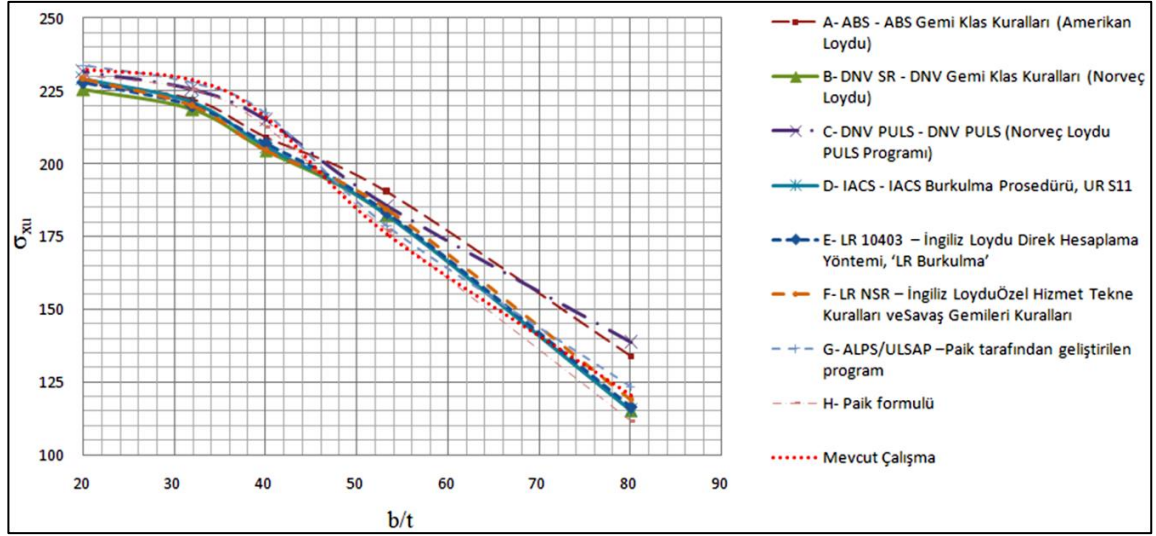


Uygulama için seçilen 5 farklı kalınlık için Şekil 3.3'ten 9 ayrı yöntem ile elde edilen ve malzeme akma gerilmesi ile boyutsuzlaştırılan göçme mukavemet değerleri, mevcut çalışmamız sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Tekil plak uygulama-I için plak göçme mukavemeti sonuçlarının karşılaştırması

L = 3600 mm b = 800 mm t = 10 mm b/t = 80 $\beta = 2,689$ $z_0 = 7,231$ mm $\sigma_{rcx} = 0$									
	A	B	C	D	E	F	G	H	Mevcut Çalışma
$\sigma_{xu}$	133,95	115,15	138,65	115,15	116,325	118,675	123,375	111,625	120,555
$\sigma_{xu}/\sigma_Y$	0,570	0,490	0,590	0,490	0,495	0,505	0,525	0,475	0,513
L = 3600 mm b = 800 mm t = 15 mm b/t = 53,3 $\beta = 1,793$ $z_0 = 4,821$ mm $\sigma_{rcx} = 0$									
	A	B	C	D	E	F	G	H	Mevcut Çalışma
$\sigma_{xu}$	190,35	182,125	185,65	182,125	183,3	184,475	178,6	177,085	175,78
$\sigma_{xu}/\sigma_Y$	0,810	0,775	0,790	0,775	0,780	0,785	0,760	0,711	0,748
L = 3600 mm b = 800 mm t = 20 mm b/t = 40 $\beta = 1,344$ $z_0 = 3,615$ mm $\sigma_{rcx} = 0$									
	A	B	C	D	E	F	G	H	Mevcut Çalışma
$\sigma_{xu}$	209,15	204,45	215,025	205,625	206,8	204,45	217,375	212,78	215,965
$\sigma_{xu}/\sigma_Y$	0,890	0,870	0,915	0,875	0,880	0,870	0,925	0,948	0,919
L = 3600 mm b = 800 mm t = 25 mm b/t = 32 $\beta = 1,076$ $z_0 = 2,892$ mm $\sigma_{rcx} = 0$									
	A	B	C	D	E	F	G	H	Mevcut Çalışma
$\sigma_{xu}$	222,075	218,55	225,6	220,9	219,725	219,725	227,95	225,365	228,89
$\sigma_{xu}/\sigma_Y$	0,945	0,930	0,960	0,940	0,935	0,935	0,970	0,959	0,974
L = 3600 mm b = 800 mm t = 30 mm b/t = 20 $\beta = 0,896$ $z_0 = 2,410$ mm $\sigma_{rcx} = 0$									
	A	B	C	D	E	F	G	H	Mevcut Çalışma
$\sigma_{xu}$	227,95	225,6	231,475	229,125	227,95	229,125	233,825	230,535	232,415
$\sigma_{xu}/\sigma_Y$	0,970	0,960	0,985	0,975	0,97	0,975	0,995	0,981	0,989

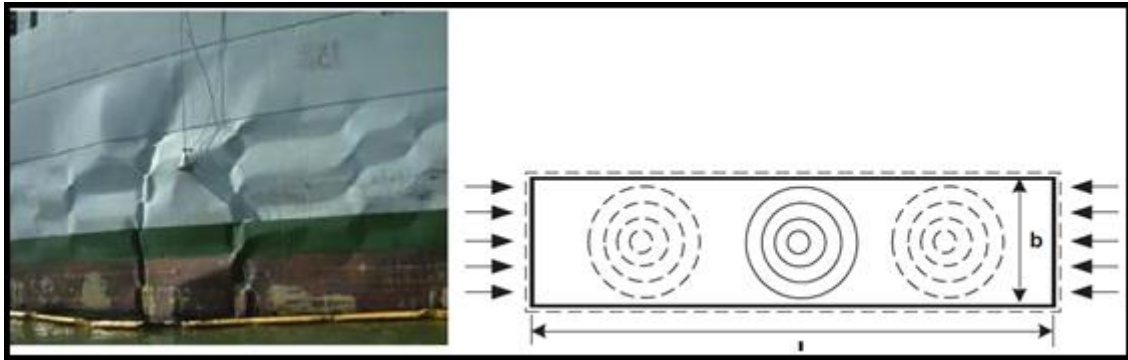
Ayrıca, literatürde elde edilen göçme mukavemeti değerleri ile mevcut çalışmada elde edilen göçme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3.4'te grafik dağılımı üzerinde gösterilmiştir. Bu grafikten de görüleceği üzere, mevcut çalışmada da kalınlık artımına bağlı olarak göçme mukavemeti değerinin de arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında, kalınlık arttıkça göçme mukavemeti değerleri arasındaki artışta azalma olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar açısından bakıldığında da göçme mukavemeti değerlerinin literatür sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Göçme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması

### 3.1.2. Tekil Plak Gerilme-Şekil Değişirme Davranışı Uygulama-II

Bu kısımda ikinci uygulama olarak Zhang ve Khan'ın (2009) yayınladıkları makale kapsamında, 230 m boyundaki, çift dipli bir petrol tankerinin borda yapısında bulunan tekil bir plak ele almışlar ve değişen kalınlıklar için sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Abaqus programında lineer olmayan analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Boyuna ve enine stifnerler arasında kalan bu tekil plağın göçme mukavemet değerlendirmesi için, literatürde en çok tercih edilen ampirik formüllerin sonuçları ile gerçekleştirdikleri kıyaslama çalışmasının sonuçları, mevcut çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İlgili plak Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Uygulama-II'de kullanılan plak ve yükleme durumu

Uygulamada kullanılan tekil plak, enine ve boyuna stifnerler arasında basit mesnetli olarak kabul edilmiştir. Yüksek mukavemetli gemi inşa çeliğinin kullanıldığı plakta,  $b/200$  seviyesinde burkulma modu şeklinde ilkel sehim hesaba dâhil edilmiştir. Plâğın ana özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Tekil plak uygulama-II için plak ana özellikleri

L	4300 mm
b	815 mm
$t_p$	11,8; 13,8; 15,8; 17,8; 21,3 ve 32 mm
E	205800 MPa
$\nu$	0,3
$\sigma_Y$	315 MPa
$z_0$	$b/200 = 4.075$
$\sigma_{rcx} / \sigma_Y$	0
m	5

#### Ampirik Formüller

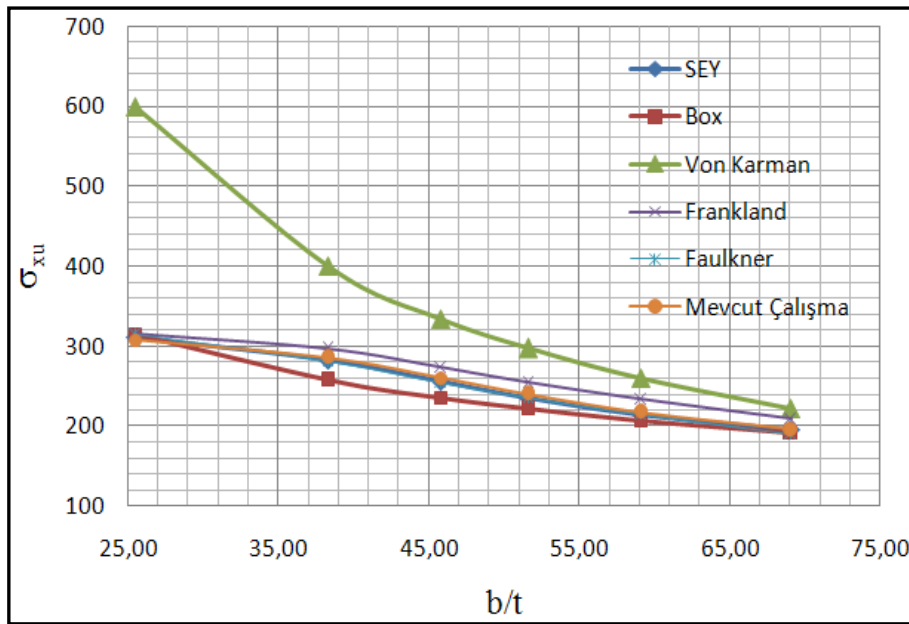
$$\frac{\sigma_{xu}}{\sigma_Y} = \frac{1}{\beta^{0,5}} \quad \text{Box (1883)} \quad \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_Y} = \frac{1,9}{\beta} \quad \text{von Karman (1924)}$$

$$\frac{\sigma_{xu}}{\sigma_Y} = \frac{2,25}{\beta} - \frac{1,25}{\beta^2} \quad \text{Frankland (1940)} \quad \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_Y} = \frac{2}{\beta} - \frac{1}{\beta^2} \quad \text{Faulkner (1975)}$$

Tablo 3.4. Tekil plak uygulama-II plak göçme mukavemet sonuçlarının karşılaştırılması

L	b/t	$\beta$	Göçme Mukavemeti - $\sigma_{xu}$					
			SEY	Box	Von Karman	Frankland	Faulkner	Mevcut Çalışma
4300	25.5	1	310,59	315,00	598,50	315,00	315,00	307,44
4300	38.3	1.5	282,56	257,04	399,11	297,36	280,35	285,08
4300	45.8	1.79	255,47	235,31	334,22	273,11	253,58	259,88
4300	51,6	2.02	235,31	221,76	296,42	254,52	234,99	239,72
4300	59,1	2.31	213,26	207,27	259,25	233,10	213,57	217,04
4300	69.1	2.70	194,67	191,84	221,76	208,53	189,95	194,99
			$\sigma_{xu}/\sigma_Y$					
			SEY	Box	Von Karman	Frankland	Faulkner	Mevcut Çalışma
4300	25.5	1	0.986	1	1.9	1	1	0,976
4300	38.3	1.5	0.897	0.816	1.267	0.944	0.890	0,905
4300	45.8	1.79	0.811	0.747	1.061	0.867	0.805	0,825
4300	51,6	2.02	0.747	0.704	0.941	0.808	0.746	0,761
4300	59,1	2.31	0.677	0,658	0.823	0.740	0.678	0,689
4300	69.1	2.70	0.618	0.609	0.704	0.662	0.603	0,619

Tablo 3.4'te plak göçme mukavemeti sonuçları literatürle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.6'da aynı karşılaştırma grafik ile sunularak, sonuçların uyumluluğu vurgulanmıştır.



Şekil 3.6. Tekil plak uygulama-II plak göçme mukavemeti grafik sonuçları

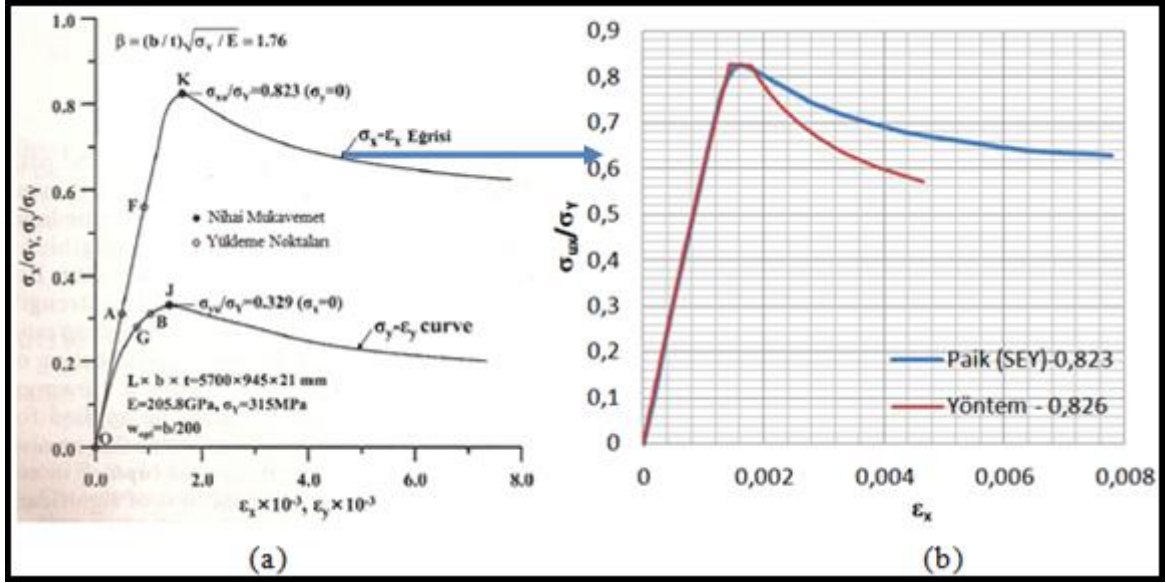
### 3.1.3. Tekil Plak Gerilme-Şekil Değişirme Davranışı Uygulama-III

Bu kısımda üçüncü uygulama olarak Hughes ve Paik'in 2010 yılında yayınladıkları "Ship Structural Analysis and Design" isimli kitaplarının, tekil plak ve desteklenmiş panellerin lineer olmayan sonlu elemanlar analizlerini anlattıkları 7. Bölümde, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Ansys programında tekil bir plağın lineer olmayan analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Boyuna ve enine stifnerler arasında kalan bu tekil plağın göçme mukavemet değerlendirmesi grafik sonuçları Şekil 3.7'de plağın ana özellikleri Tablo3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Tekil plak uygulama-III için plak ana özellikleri

L	5700 mm
b	945 mm
$t_p$	21
E	205800 MPa
$\nu$	0,3
$\sigma_Y$	315 MPa
$z_0$	$b/200 = 4.725$
$\sigma_{rcx} / \sigma_Y$	0
m	6

Uygulamada kullanılan tekil plak, enine ve boyuna stifnerler arasında basit mesnetli olarak kabul edilmiştir. Gemi inşa çeliğinin kullanıldığı plakta,  $b/200$  seviyesinde burkulma modu şeklinde ilkel sehim hesaba dâhil edilmiştir. Göçme mukavemet değerine kadar sonuçların uyumlu olduğu, göçme mukavemet sonrası davranışta ise ayrılma olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, göçme mukavemet sonrası davranış için daha hassas bir algoritma elde edilmeye çalışılacaktır.

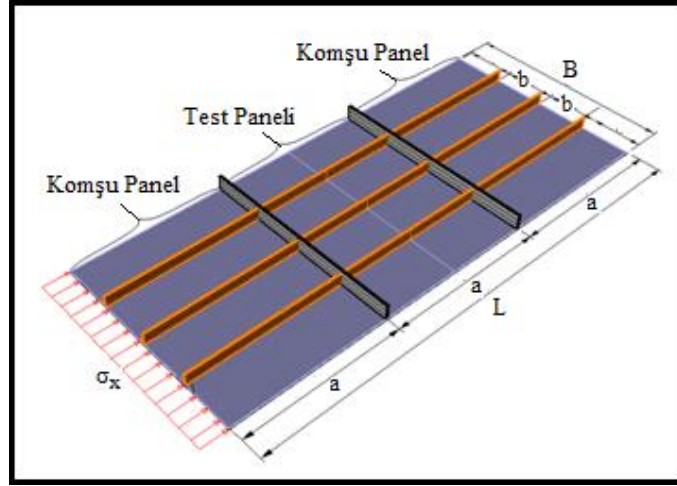


Şekil 3.7. (a) Paik'in sonlu elemanlar analizi ile göçme mukavemet analizi sonucu (b) Paik'in analiz sonucu ile mevcut çalışma sonuçlarının karşılaştırılması

## 3.2. Desteklenmiş Panellerin Göçme Mukavemet Değerlerinin Tahmin Edilmesi Uygulamaları ve Kanıtlanması

### 3.2.1. Tanaka ve Endo Desteklenmiş Panel Testleri

Tanaka ve Endo (1988), 3 boyuna stifnerle desteklenmiş panellerin bası kuvveti altındaki göçme mukavemeti değerlerini tahmin edebilmek amacıyla bir seri deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Şekil 3.8'de test edilen desteklenmiş panel yapısı, Tablo 3.6'da ise test edilen panellerin malzeme ve geometrik özellikleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, test yapısı iki enine destek elemanı arasında kalan boyuna desteklenmiş panel yapısının göçme davranışına, bitişik desteklenmiş panellerin etkilerini de hesaba katacak şekilde oluşturulmuştur. Mevcut çalışma kapsamında önerilen yöntem kullanılarak elde edilen desteklenmiş panel göçme mukavemeti değerleri, Paik'in ULSAP programı ile elde ettiği değerler ve test değerleri Tablo 3.7'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.8. Tanaka ve Endo'nun testlerinde kullandığı desteklenmiş panel şematik resmi

Tablo 3.6. Tanaka ve Endo test panellerinin genel özellikleri

Panel No	a (mm)	B (mm)	t (mm)	$n_{sx}$	$h_{wx}$ (mm)	$t_{wx}$ (mm)	$\sigma_{Yp}$ (MPa)	$\sigma_{Ys}$ (MPa)	$\sigma_{Yeş}$ (MPa)	$Z_{0p}$	$\sigma_{rcx}$
D0	1080	1440	6,15	3	110,0	9,77	234,2	287,1	248,3	0,101	20,58
D0A		1440	5,65		110,0	10,15	249,9	196,0	234,2	0,250	-
D1		1200	5,95		110,0	10,19	253,8	250,9	252,9	0,143	25,97
D2		1560	5,95		110,0	10,19	253,8	250,9	253,0	0,288	18,62
D3		1440	5,95		103,5	11,84	253,8	326,3	275,6	0,312	23,03
D4		1440	5,95		118,5	7,98	253,8	284,2	261,4	0,119	34,00
D4A		1440	5,65		118,5	8,08	249,9	274,4	256,3	0,379	-

$\nu = 0.3$  ;  $E = 205800$  MPa

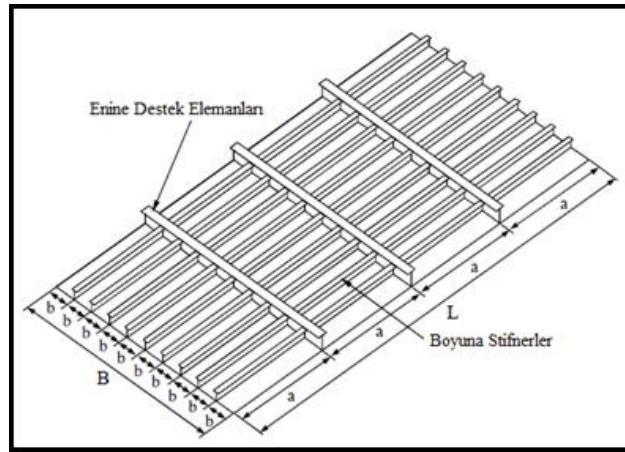
Tablo 3.7. Tanaka&Endo test panelleri için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Panel No	Tanaka & Endo			Paik-ALPS/ULSAP			Mevcut Çalışma-MÇ		
	$\sigma_{xu}$	$\left[ \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Yeş}} \right]_{tes}$	$\left[ \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Yeş}} \right]_{SEY}$	$\sigma_{xu}$	$\left[ \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Yeş}} \right]_{ULSAP}$	$\frac{(\sigma_{xu})_{ULSAP}}{(\sigma_{xu})_{test}}$	$\sigma_{xu}$	$\left[ \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Yeş}} \right]_{MÇ}$	$\frac{(\sigma_{xu})_{MÇ}}{(\sigma_{xu})_{test}}$
D0	231,1	0,931	0,910	219,49	0,884	0,950	217,75	0,877	0,942
				227,69	0,917	0,985			
D0A	197,4	0,843	0,867	196,96	0,841	1,028	192,74	0,823	0,976
D1	276,9	1,095	0,952	241,52	0,955	0,869	252,90	1,000	0,913
D2	227,7	0,900	0,842	202,40	0,800	0,936	197,84	0,782	0,869
D3	284,4	1,032	0,888	223,51	0,811	0,786	230,40	0,836	0,810
				239,77	0,870	0,843			
D4	258,7	0,990	0,784	218,00	0,834	0,792	210,42	0,805	0,813
D4A	224,2	0,875	0,758	215,03	0,839	0,866	201,96	0,788	0,900

### 3.2.2. Smith Desteklenmiş Izgara Panel Testleri

Mevcut çalışmanın performansı, Smith'in 1976 yılında 11 ayrı ızgara panel için gerçekleştirdiği test sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilecektir. Test panelleri enine ve boyuna yönde lama, T ve L kesitli stifnerlerden oluşmaktadır. Bu şekilde ızgara paneller çoğunlukla askeri gemilerde ve yüksek hızlı gemilerde kullanılmaktadırlar. Testlerde kullanılan 11 adet tam ölçekli, kaynaklı birleştirme yöntemi ile oluşturulan ızgara panel, aksenal bası yükü altındaki tipik bir savaş gemisi güvertesini veya aksenal bası ve yanıl basınç yükü altındaki dip yapısını temsil etmektedir. Smith ve arkadaşları 1992 yılında aynı test panellerinin, ortalama ilkel sehim değerleri kullanarak sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Çalışmamızda karşılaştırma yapabilmek amacıyla, iki enine destek elemanı arasında, 3 adet boyuna stifnerden oluşan 4a ve 4b panel modelleri kullanılmıştır. Smith'in kullandığı tipik test panelinin herhangi bir gemide kullanılan şematik gösterimi Şekil 3.9'da, mevcut çalışma kapsamında seçilen panellerin malzeme ve geometrik özellikleri ise Tablo 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.9. Bir gemi yapısını oluşturan desteklenmiş panel sistemi

Tablo 3.8. Smith'in test panellerinin genel özellikleri

Panel No	a mm	B mm	t mm	$n_{sx}$	$h_{wx}$ mm	$t_{wx}$ mm	$b_{fx}$ mm	$t_{fx}$ mm	$\sigma_{Yp}$ MPa	$\sigma_{Ys}$ MPa	$\sigma_{Yeş}$ MPa	$z_{0p}$	$\sigma_{rcx}$
4a	1219.2	1016	6.43	3	76.71	4.85	27.69	6.35	260	224	253	2.06	98.7
4b	1219.2	1016	6.40	3	76.96	4.55	26.16	6.35	264	228	258	1.60	108.4

$\nu = 0.3$  ;  $E = 205800$  MPa

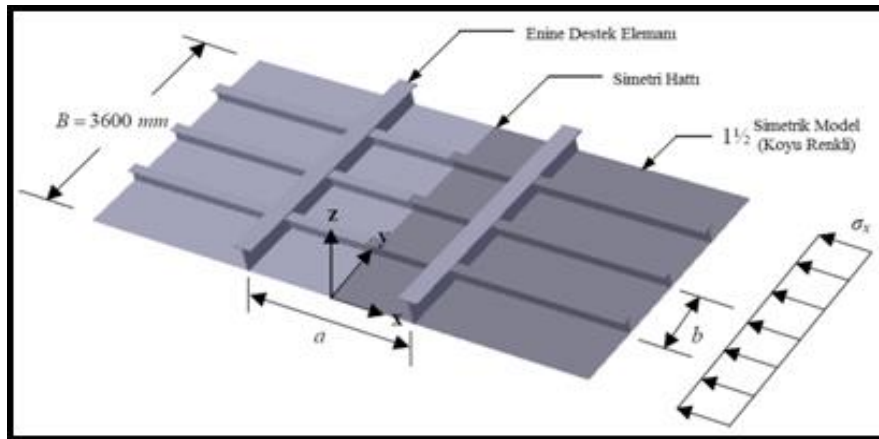


Tablo 3.9. Smith test panelleri için elde edilen göçme mukavemeti sonuçlarının karşılaştırılması

Panel No	Smith – Test & Ansys				Mevcut Çalışma		
	P Yanal Basınç	$\sigma_{xu\text{test}}$	$\sigma_{xu\text{SEY}}$	$\frac{(\sigma_{xu})_{\text{SEY}}}{(\sigma_{xu})_{\text{test}}}$	$\left[ \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Yeş}} \right]_{\text{MÇ}}$	$\frac{(\sigma_{xu})_{\text{MÇ}}}{(\sigma_{xu})_{\text{test}}}$	$\frac{(\sigma_{xu})_{\text{MÇ}}}{(\sigma_{xu})_{\text{SEY}}}$
4a	0	207.5	202.4	0.976	214.3	1.033	1.058
4b	0.055	214.1	188,3	0.880	195.1	0.91	1,036
4a	0	0.82	0.80	0.976	0.847	1.033	1.058
4b	0.055	0.83	0.73	0.880	0.756	0.91	1,036

### 3.2.3. Biswarup Ghosh-55 Stifnerli Panel SEY Analizi

Biswarup Ghosh, Virginia Teknik Üniversitesin’de 2003 yılında tamamladığı “Consequences of Simultaneous Local and Overall Buckling in Stiffened Panels” isimli çalışmasında geliştirdiği formülasyonları kanıtlamak amacıyla, farklı boyutlarda ve sayılarda plak ve stifner elemanlardan oluşan 55 desteklenmiş panelin sonlu eleman modellerini oluşturmuş ve ABAQUS programında özdeğer burkulma analizlerini takip eden lineer olmayan sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmiş ve göçme mukavemeti değerlerini tahmin etmiştir. Çalışmamızda, analizleri gerçekleştirilen 5 adet T-kesit boyuna 3 stifnerli, 5 adet de yine T-kesit boyuna 5 stifnerli panel için karşılaştırma yapılmıştır. İlgili test panelinin şematik gösterimi Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Tablo 3.10’da karşılaştırma çalışması yapılan desteklenmiş panellerin malzeme ve geometrik özellikleri ve ardından Tablo 3.11’de de karşılaştırmalı sonuç tablosu verilmiştir.



Şekil 3.10. Ghosh’un analizlerinde kullandığı stiifnerlenmiş panel şematik resmi

Tablo 3.10. Ghosh'un analizlerinde kullandığı desteklenmiş panel genel özellikleri

Panel No.	a mm	b mm	t mm	$n_s$	$h_w$ mm	$t_w$ mm	$b_f$ mm	$t_f$ mm	$\sigma_{Yp}$ MPa	$\sigma_{Ys}$ MPa	$\sigma_{Yeş}$ MPa	$\beta$	$z_{op}$
50	1800	900	21	3	50	20	200	30	352.8	352.8	352.8	1.77	6.579
58	1800	900	10	3	28	12	100	15	352.8	352.8	352.8	3.73	13.913
64	2640	900	16	3	84	12	100	15	352.8	352.8	352.8	2.33	8.686
69	3600	900	21	3	112	20	200	30	352.8	352.8	352.8	1.77	6.579
77	3600	900	10	3	86	5	60	10	352.8	352.8	352.8	3.73	13.913
78	1800	600	21	5	84	20	200	30	352.8	352.8	352.8	1.18	2.924
86	1800	600	10	5	45	12	100	15	352.8	352.8	352.8	2.48	6.150
89	2640	600	21	5	168	12	100	15	352.8	352.8	352.8	1.18	2.924
96	2640	600	10	5	68	12	100	15	352.8	352.8	352.8	2.48	6.150
100	3600	600	21	5	185	10	160	20	352.8	352.8	352.8	1.18	2.924

$$\nu = 0.3 ; E = 205800 \text{ MPa} ; z_{op} = 0.1 \times \beta^2 \times t_p$$

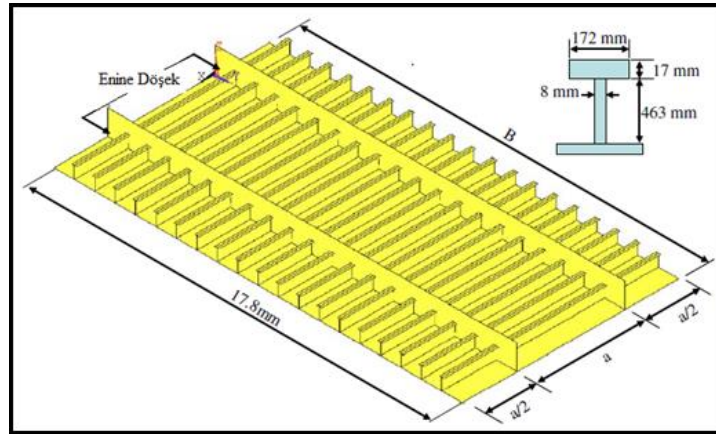
Tablo 3.11. Ghosh'un analizlerinde kullandığı stiifnerlenmiş panel göçme mukavemeti sonuçlarının karşılaştırılması

Panel No	Panel Göçme Mukavemeti - MPa					
	$[\sigma_{göçme}]_{SEY}$	$[\sigma_{göçme}]_{ULTBEA M}$	$[\sigma_{göçme}]_{Mevcut Çalışma}$	$[\frac{\sigma_{göçme}}{\sigma_{Yeş}}]_{SEY}$	$[\frac{\sigma_{göçme}}{\sigma_{Yeş}}]_{ULTBEAM}$	$[\frac{\sigma_{göçme}}{\sigma_{Yeş}}]_{Mevcut Çalışma}$
50	275,184	285,768	282,24	0,78	0,81	0,80
58	105,84	109,368	169,344	0,30	0,31	0,48
64	183,456	183,456	278,712	0,52	0,52	0,79
69	275,184	285,768	299,88	0,78	0,81	0,85
77	112,896	112,896	201,096	0,32	0,32	0,57
78	338,688	338,688	313,992	0,96	0,96	0,89
86	201,096	194,04	282,24	0,57	0,55	0,80
89	328,104	342,216	317,52	0,93	0,97	0,90
96	197,568	194,04	261,072	0,56	0,55	0,74
100	321,048	342,216	310,464	0,91	0,97	0,88

### 3.2.4. ISSC-2009 – Desteklenmiş Panel Analizi

Paik ve arkadaşlarının 2008 yılında yayınladıkları makalede kullandıkları, aynı zamanda 2009 yılında Seul/Kore'de düzenlenen "17. Gemi ve Offshore Yapıları

Kongresi’nde karşılaştırma çalışması yapılan desteklenmiş panel (Paik,2008-Panel B2), mevcut çalışmamız doğrultusunda ele alınarak göçme analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçları diğer sonuçlarla birlikte verilmiştir. Şekil 3.11’de çalışmada kullanılan desteklenmiş panelin şematik resmi gösterilmiştir. Ayrıca, Tablo 3.12’de panelin malzeme ve geometrik özellikleri, Tablo 3.13’te göçme mukavemeti sonuçlarının literatürle karşılaştırması ve Şekil 3.12’de de göçme mukavemeti sonuçlarının grafik üzerinde karşılaştırılması sunulmuştur.



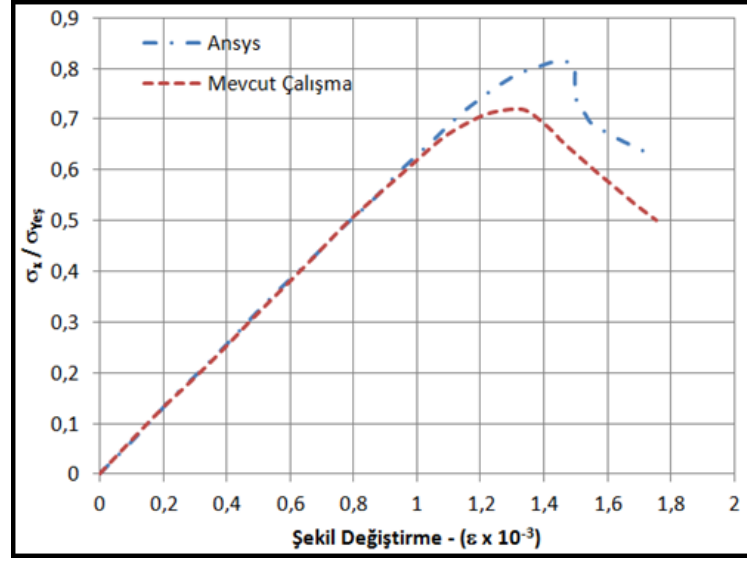
Şekil 3.11. Karşılaştırma çalışmasında kullanılan B2 paneli şematik resmi

Tablo 3.12. Panel-B2’ningeometrik ve malzeme özellikleri

B mm	a mm	b mm	t mm	$n_{sx}$	$h_{wx}$ mm	$t_{wx}$ mm	$b_{fx}$ mm	$t_{fx}$ mm	$\sigma_{Yeş}$ MPa	E MPa	$\nu$	$Z_{0p}$	$\sigma_{rcx}$
16300	4300	815	17.8	19	463	8	172	17	315	205800	0.3	4.075	98.7

Tablo 3.13. Panel-B2 göçme mukavemeti sonuçlarının karşılaştırılması

Panel No B2	Paik ve Arkadaşları (2008)		Mevcut Çalışma	
$\sigma_{xu}$	256,379	249,48	246,33	-
	$\left[ \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Yeş}} \right]_{ANSYS}$	$\left[ \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Yeş}} \right]_{ALPS ULSAP}$	$\left[ \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Yeş}} \right]_{MÇ}$	$\frac{(\sigma_{xu})_{MÇ}}{(\sigma_{xu})_{ALPS ULSAP}}$
	0,814	0,792	0,782	0,987

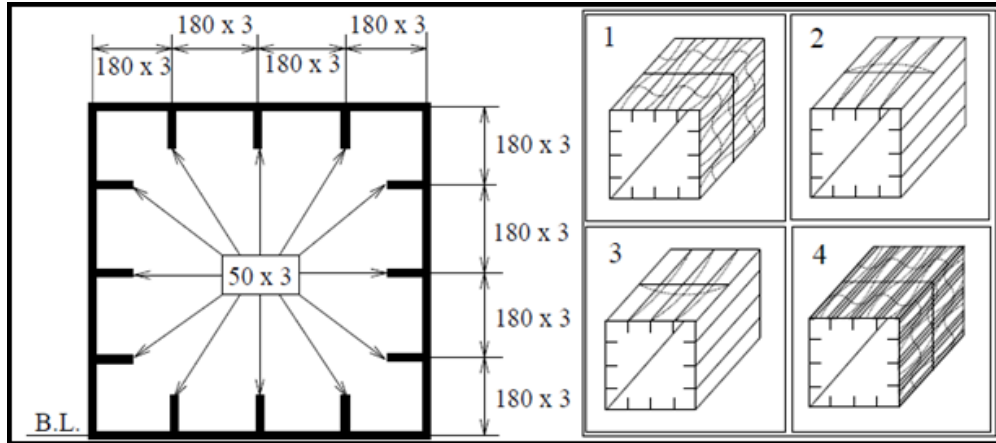


Şekil 3.12. B2-paneli için elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi

### 3.3. Yöntemin Stifnerli Kutu Kirişlere Uygulanması

Mevcut çalışmada kullanılan yöntem, gemi orta kesitlerini temsilen, test sonuçları bulunan ve diğer bilim adamları tarafından analizleri gerçekleştirilen desteklenmiş kutu kirişineksenel bası (düşey eğilme momenti) altındaki göçme mukavemeti değerinin tahmin edilmesi için kullanılmış ve mevcut diğer sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Nishihara (1984), göçme mukavemet kapasitesini belirlemek amacıyla, tek dipli tanker gemisi benzeri kutu kiriş yapısının, yalnızca eğilme etkisi altında testlerini, farklı başlangıç bozukluk durumları için gerçekleştirmiş ve momentlere bağlı sehim değerlerini belirlemiştir. Şekil 3.13'te Nishihara'nın test ettiği kutu kiriş modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Nishihara'nın test ettiği kutu kiriş modeli

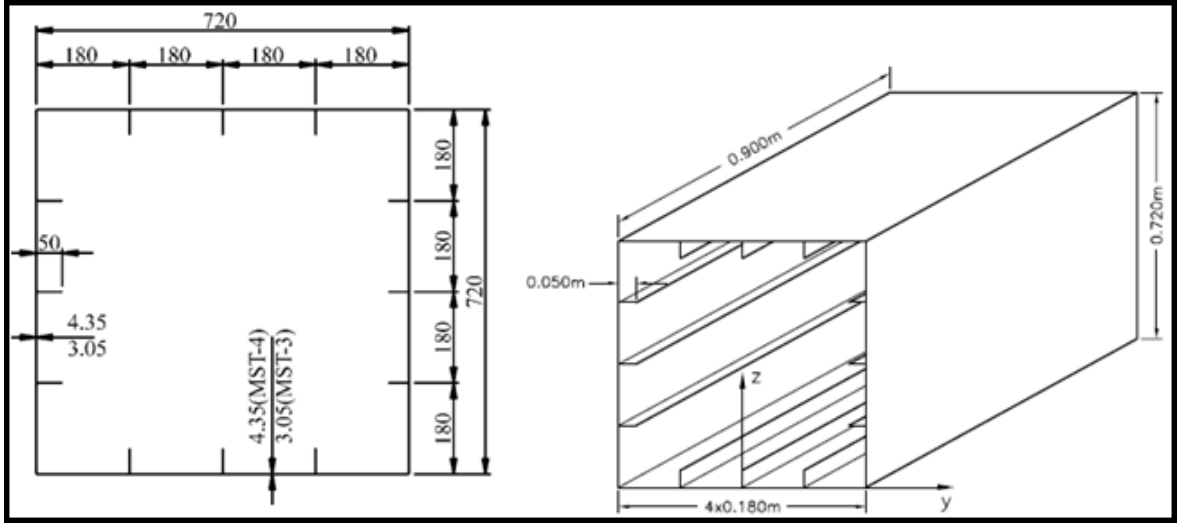
Bu uygulama kapsamında ilk olarak IACS-CSR kuralları ve göçme mukavemeti tahmini için kullanılan kademeli göçme analizi yöntemine göre hesaplama gerçekleştirilmiştir. Bu ilk hesaplamanın detayları için ilgili kurak kitabı kaynak gösterilerek, hesaplama adımları özetle anlatılmış, tablo ve grafiklerle desteklenmiştir. Bu uygulamadan sonraki tüm gemi gövde kesiti uygulamalarında da ilk olarak IACS-CSR'ye göre hesaplama yapılmıştır.

Ardından, çalışmamız kapsamında önerilen Smith metodu temelli kademeli göçme analizi yaklaşımı ile hesaplama gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki örneklerde, gerçek gemi kesitlerine de uygulanacak yöntemin hesaplama adımları, ortalama başlangıç sehim değerleri de hesaba dâhil edilerek bu örnekte anlatılmıştır.

### **3.3.1. IACS-CSR Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama**

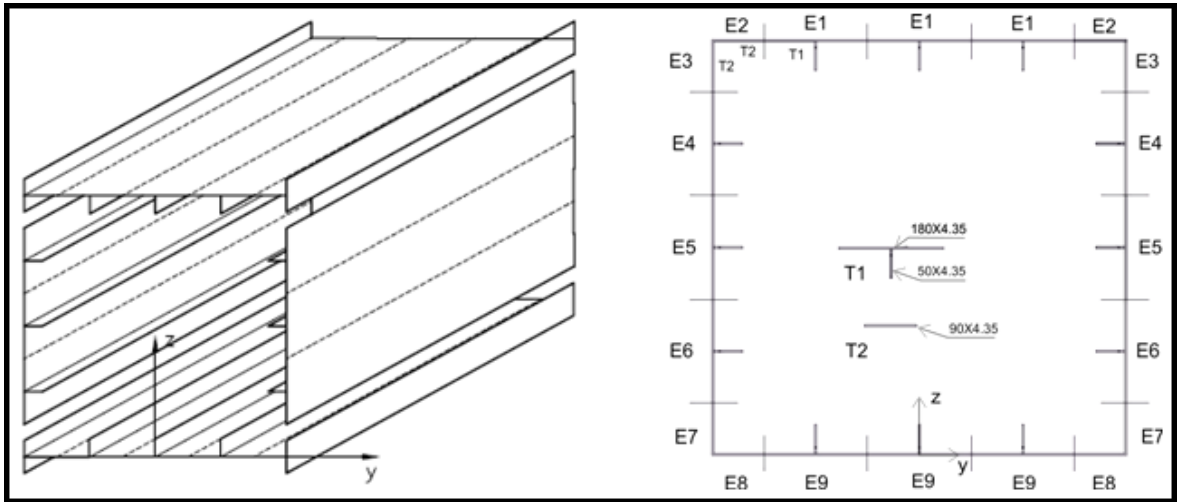
Bu bölümde Nishihara'nın (1984) tek dipli tankeri idealleştirerek deneyler gerçekleştirdiği kutu kirişin, farklı plak kalınlığında (MST-3.05 ve MST-4.35) iki modelinin, sadece tekil plaktaki ilkel sehimler göz önüne alınarak, IACS-CSR'de de kullanılan iteratif artımsal yöntem kullanılarak, Excel programında oluşturulan hesap tablosunda kademeli göçme analizi ve daha sonra da mevcut çalışmada geliştirilen yarı-analitik yöntem ile kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki model için hesaplama tablosu ile elde edilen moment-eğrilik grafiğinden göçme moment değerleri belirlenerek, diğer araştırmacıların bulduğu değerlerle birlikte karşılaştırılmıştır.

IACS-CSR'ye göre test modelinin analizde kullanılmak üzere plak-stifner elemanlara ayrılmış hali, geometrik ve malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir. Eleman ayırıklaştırmada köşe eleman genişliği 30t olarak alınmıştır. Şekil 3.14'te Nishihara kutu kirişinin kesit ve perspektif görünümü sunulmuştur. Ayrıca, Nishihara'nın tek cidarlı tankeri temsilen kutu kiriş modelinin IACS CSR'ye göre eleman ayırıklaştırması Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Nishihara kutu kirişinin kesit ve perspektif görünümü

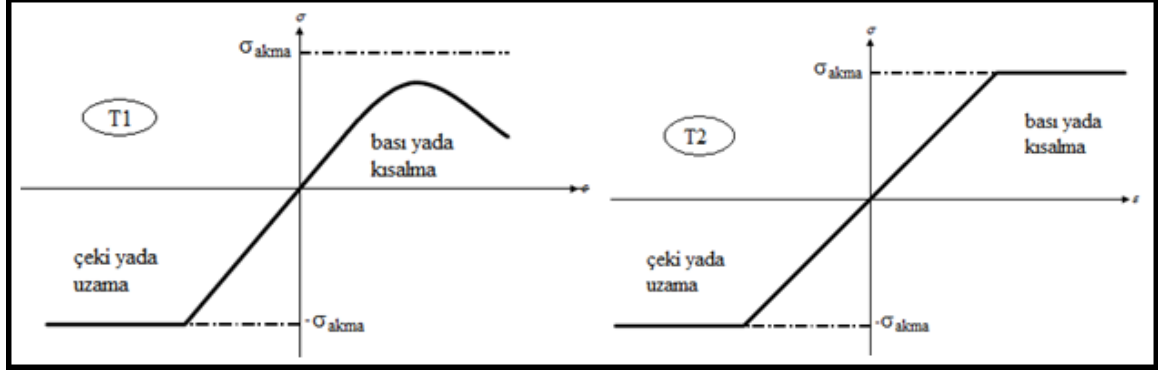
Plak kalınlığı	: 0.003 m	Elastisite modülü	: 207 GPa
Akma gerilmesi	: 287,4 MPa	Kesit alanı	: $9.960 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Kesit modülü	: $2.379 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	Atalet momenti	: $0.856 \times 10^{-3} \text{ m}^4$
Tarafsız eksenin yeri	: 0.360 m		



Şekil 3.15. Nishihara'nın tek cidarlı tankeri temsilen kutu kiriş modelinin IACS CSR'ye göre eleman ayrıklaştırması

T1-plak-stifner elemanlara ve T2-köşe elemanlara ayrılan kutu kiriş kesitinin kademeli göçme analizi yapılırken yararlanılacak, elemanlara ait gerilme-şekil değiştirme davranışları Şekil 3.16 ile gösterilmiştir. T1 elemanlarda yerel plak burkulması

oluşmamakta, kiriş burkulmasından sonra ise mukavemet azalması olmaktadır. T2 elemanlarda da köşe elemanlar olmaları sebebiyle burkulma ve burkulma sonrası mukavemette bir azalma yaşanmamaktadır.



Şekil 3.16. T1 ve T2 elemanlar için gerilme-şekil değiştirme davranışları

Hesaplama tablosunda, eğrilik değerini değiştirerek, her elemana ait şekil değiştirmelere bağlı olarak gerilme değerleri, bu gerilme değerlerinin kesit alanları veya bozulmaların artması ile oluşan etkin kesit alanlarının çarpımı ile eksenel kuvvet değerleri ve bu kuvvetlerin oluşturduğu moment değerleri hesaplanır. Yine hesaplanarak öngörülen maksimum eğrilik değerine kadar bu adımlar tekrarlanır. Bu süreçte yapısal bozulmaların başlaması ile tarafsız eksenin yeri iteratif olarak değiştirilerek kuvvet dengesi sağlanır. Bu iteratif işlem için Excel programı komutlarından “Hedef Ara” kullanılmıştır. Şekil 3.17’de kutu kirişin tarafsız eksenini ile kesit modülü hesaplama ve tahmini maksimum eğrilik değeri ile eğrilik artımı değeri hesaplaması, Şekil 3.18’de her eğrilik adımı için IACS-CSR’ye göre oluşturulan hesaplama tablosu, Şekil 3.19 – Şekil 3.22’de Hedef Ara komutunun kullanımı, Şekil 3.23 ve Şekil 3.24’de sırasıyla MST-3.05 ve MST-4.35 modellerinin moment-eğrilik grafikleri gösterilmiştir.

TARAFSIZ EKSEN, KESİT MODULÜ, MAX.TAHHİNİ EĞRİLİK ve EĞRİLİK ARTIMI HESABI								
Parça Adı	El.No	y(mm)	A(mm <sup>2</sup> )	A*y (mm <sup>3</sup> )	I <sub>x</sub> (mm <sup>4</sup> )	(e-y) <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	A*(e-y) <sup>2</sup> (mm <sup>4</sup> )	I <sub>x</sub> +A*(e-y) <sup>2</sup> (mm <sup>4</sup> )
1-T1	1	712,709	690	491769,21	116166,643	124403,6387	85838510,69	85954677,33
1-T1	2	712,709	690	491769,21	116166,643	124403,6387	85838510,69	85954677,33
1-T1	3	712,709	690	491769,21	116166,643	124403,6387	85838510,69	85954677,33
2-T2	4	718,475	270	193988,25	212,795	128504,3256	34696167,92	34696380,71
2-T2	5	718,475	270	193988,25	212,795	128504,3256	34696167,92	34696380,71
3-T2	6	675	270	182250	185287,5	99225	26790750	26976037,5
3-T2	7	675	270	182250	185287,5	99225	26790750	26976037,5
4-T1	8	540	690	372600	116166,643	32400	22356000	22472166,64
4-T1	9	540	690	372600	116166,643	32400	22356000	22472166,64
5-T1	10	360	690	248400	116166,643	0	0	116166,643
5-T1	11	360	690	248400	116166,643	0	0	116166,643
6-T1	12	180	690	124200	116166,643	32400	22356000	22472166,64
6-T1	13	180	690	124200	116166,643	32400	22356000	22472166,64
7-T2	14	45	270	12150	185287,5	99225	26790750	26976037,5
7-T2	15	45	270	12150	185287,5	99225	26790750	26976037,5
8-T2	16	1,525	270	411,75	212,795	128504,3256	34696167,92	34696380,71
8-T2	17	1,525	270	411,75	212,795	128504,3256	34696167,92	34696380,71
9-T1	18	7,291	690	5030,79	116166,643	124403,6387	85838510,69	85954677,33
9-T1	19	7,291	690	5030,79	116166,643	124403,6387	85838510,69	85954677,33
9-T1	20	7,291	690	5030,79	116166,643	124403,6387	85838510,69	85954677,33
I <sub>y</sub>	0,000850402736	Σ	10440	3758400			850402735,8	852538736,7
e	360	e	0,360	D-e	0,360	Eğrilik Değeri Eğrilik	κ <sub>F</sub>	0,01159911
W <sub>güverte</sub>	0,002368163	Womurga	0,002368163			Artım Değeri	Δκ <sub>F</sub>	3,86637E-05

Şekil 3.17. Kutu kirişte orta kesitin tarafsız eksen ve kesit modülü ile maksimum eğrilik ve eğrilik artımı hesaplama arayüzü



KADEMELİ GÖÇME ANALİZİ							e =	139,468	βp<1 olduğunda				βp>1 olduğunda				
							t =	3,05	İstf.σ =	11,617	b <sub>etkin-lev na</sub> =	74,44342635	Z <sub>0</sub> =	16,6987791			
							s =	180	σ <sub>E1</sub> =	424,9907785	b <sub>etkin-stif ner</sub> =	37,40406666	İstf.-yeni =	7,777566895			
							π =	3,142857143	σ <sub>C1</sub> =	54,70896825			σ <sub>E1-yeni</sub> =	517,2572229			
									Kontrol	σ <sub>yd</sub> * ε / 2 =	688,180534			σ <sub>C1-yeni</sub> =	96,21554		
							κ <sub>max</sub>	0,01159911	Δκ	3,86637E-05	κ <sub>i</sub>	0,011599109					
Eleman	No	A	E	L	zi	dzi	κ	ε <sub>j</sub>	ε <sub>akma</sub>	σ <sub>akma</sub>	ε <sub>bağlı</sub>	β <sub>p</sub>	σ <sub>ci</sub>	İ <sub>etkin-p</sub>	σ <sub>j</sub>	P <sub>i</sub>	M <sub>j</sub>
1-T1	1	690	207000	900	712,709	0,573241191	0,011599109	0,006649087	0,00138841	287,4	4,7890	4,8123	108,00925	74,44343	58,43931	40323,12322	23114,87517
1-T1	2	690	207000	900	712,709	0,573241191	0,011599109	0,006649087	0,001388406	287,4	4,7890	4,8123	108,00925	74,44343	58,43931	40323,12322	23114,87517
1-T1	3	690	207000	900	712,709	0,573241191	0,011599109	0,006649087	0,001388406	287,4	4,7890	4,8123	108,00925	74,44343	58,43931	40323,12322	23114,87517
2-T2	4	270	207000	900	718,475	0,579007191	0,011599109	0,006715968	0,001388406	287,4	4,8372	4,8365			287,4	77598	44929,79999
2-T2	5	270	207000	900	718,475	0,579007191	0,011599109	0,006715968	0,001388406	287,4	4,8372	4,8365			287,4	77598	44929,79999
3-T2	6	270	207000	900	675	0,535532191	0,011599109	0,006211696	0,001388406	287,4	4,4740	4,6513			287,4	77598	41556,22694
3-T2	7	270	207000	900	675	0,535532191	0,011599109	0,006211696	0,001388406	287,4	4,4740	4,6513			287,4	77598	41556,22694
4-T1	8	690	207000	900	540	0,400532191	0,011599109	0,004645817	0,001388406	287,4	3,3462	4,0226	153,81656	86,77675	91,47187	63115,58698	25279,82432
4-T1	9	690	207000	900	540	0,400532191	0,011599109	0,004645817	0,001388406	287,4	3,3462	4,0226	153,81656	86,77675	91,47187	63115,58698	25279,82432
5-T1	10	690	207000	900	360	0,220532191	0,011599109	0,002557977	0,001388406	287,4	1,8424	2,9848	213,84924	110,43108	154,6507	106709,0156	23532,77297
5-T1	11	690	207000	900	360	0,220532191	0,011599109	0,002557977	0,001388406	287,4	1,8424	2,9848	213,84924	110,43108	154,6507	106709,0156	23532,77297
6-T1	12	690	207000	900	180	0,040532191	0,011599109	0,000470137	0,001388406	287,4	0,3386	1,2796	270,94710	180,0000	97,31842	67149,71264	2721,72496
6-T1	13	690	207000	900	180	0,040532191	0,011599109	0,000470137	0,001388406	287,4	0,3386	1,2796	270,94710	180,0000	97,31842	67149,71264	2721,72496
7-T2	14	270	207000	900	45	-0,094467809	0,011599109	-0,001095742	0,001388406	287,4	-0,7892	1,9536			-287,4	-77598	7330,513064
7-T2	15	270	207000	900	45	-0,094467809	0,011599109	-0,001095742	0,001388406	287,4	-0,7892	1,9536			-287,4	-77598	7330,513064
8-T2	16	270	207000	900	1,525	-0,137942809	0,011599109	-0,001600014	0,001388406	287,4	-1,1524	2,3607			-287,4	-77598	10704,08611
8-T2	17	270	207000	900	1,525	-0,137942809	0,011599109	-0,001600014	0,001388406	287,4	-1,1524	2,3607			-287,4	-77598	10704,08611
9-T1	18	690	207000	900	7,291	-0,132176809	0,011599109	-0,001533133	0,001388406	287,4	-1,1042	2,3108			-287,4	-198306	26211,45434
9-T1	19	690	207000	900	7,291	-0,132176809	0,011599109	-0,001533133	0,001388406	287,4	-1,1042	2,3108			-287,4	-198306	26211,45434
9-T1	20	690	207000	900	7,291	-0,132176809	0,011599109	-0,001533133	0,001388406	287,4	-1,1042	2,3108			-287,4	-198306	26211,45434
																0,00000	460088,8852

Şekil 3.18. Kademeli göçme analizinde her eğrilik adımında gerçekleştirilen hesaplama arayüzü

Microsoft Excel - TARAFSIZ EKSEN HESABI 10.02.xls

Yardıma için soru yazın

Yazım Kılavuzu... F7  
 Araştır... Alt+Tıklatma  
 Haşa Denetimi...  
 Paylaşılan Çalışma Alanı...  
 Çalışma Kitabını Paylaş...  
 Değişiklikleri İzle  
 Çalışma Kitaplarını Karşılaştır ve Birleştir...  
 Korumaya  
 Çeyrimiçi İşbirliği  
 Hedef Ara...  
 Senaryolar...  
 Formül Denetleme  
 Makro  
 Eklentiler...  
 Otomatik Düzeltme Seçenekleri...  
 Özelleştir...  
 Seçenekler...

Eleman	No	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1-T1	1	1000,5																				
1-T1	2	1000,5																				
1-T1	3	1000,5																				
2-T2	4	391,5																				
2-T2	5	391,5																				
3-T2	6	391,5																				
3-T2	7	391,5																				
4-T1	8	1000,5																				
4-T1	9	1000,5																				
5-T1	10	1000,5																				
5-T1	11	1000,5																				
6-T1	12	1000,5	208000	900	180	-0,12860539	0,004948454	-0,000826501	0,0012692	284	-0,4936	1,0357	283,69980	180,00000	-130,312	-130377,3498	16508,4746					
6-T1	13	1000,5	208000	900	180	-0,12860539	0,004948454	-0,000826501	0,0012692	284	-0,4936	1,0357	283,69980	180,00000	-130,312	-130377,3498	16508,4746					
7-T2	14	391,5	208000	900	45	-0,26160539	0,004948454	-0,001294542	0,0012692	284	-1,0199	1,4888										
7-T2	15	391,5	208000	900	45	-0,26160539	0,004948454	-0,001294542	0,0012692	284	-1,0199	1,4888										
8-T2	16	391,5	208000	900	2,175	-0,30443039	0,004948454	-0,00150646	0,0012692	284	-1,1869	1,6081										
8-T2	17	391,5	208000	900	2,175	-0,30443039	0,004948454	-0,00150646	0,0012692	284	-1,1869	1,6081										
9-T1	18	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29852279	0,004948454	-0,001477226	0,0012692	284	-1,1639	1,5904										
9-T1	19	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29852279	0,004948454	-0,001477226	0,0012692	284	-1,1639	1,5904										
9-T1	20	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29852279	0,004948454	-0,001477226	0,0012692	284	-1,1639	1,5904										

Adım No	$\kappa_i$ (1/m)	Mi (Nmm)	Mi (Nm)
1	3,535E-05	9031229,536	9031,229536
2	7,0692E-05	18053621,12	18053,62112
10	0,00035346	89914174,68	89914,17468
20	0,00070692	179822373,6	179822,3736

Moment-Eğrilik Hesabı / Adım 1 / Adım 10 / Adım 20 / Adım 30 / Adım 40 / Adım 50 / Adım 60 / Adım 70 / Adım 80 / Adım 90 / Adım 100

Şekil 3.19. Hedef ara komutu adım-1

Microsoft Excel - TARAFSIZ EKSEN HESABI 10.02.xls

Yardımcı için soru yazın

Yazım Kılavuzu... F7  
Araştır... Alt+Tıklatma  
Hafta Denetimi...  
Paylaşılan Çalışma Alanı...  
Çalışma Kitabını Paylaş...  
Değişiklikleri İzle  
Çalışma Kitaplarını Karşılaştır ve Birleştir...  
Koruma  
Çeyrimci İşbirliği  
Hedef Ara...  
Senaryolar...  
Formül Denetleme  
Makro  
Eklentiler...  
Otomatik Düzeltme Seçenekleri...  
Özelleştir...  
Seçenekler...

Eleman	No	A	$\epsilon_i$	$\epsilon_{skms}$	$\sigma_{skms}$	$\epsilon_{\beta_0}$	$\beta_p$	$\sigma_{\alpha}$	$b_{eklin-p}$	$\alpha_i$	$P_i$	$M_i$
1-T1	1	1000,5	0,002005668	0,00126923	264	1,5802	1,8532	200,93345	153,02825	177,37	177458,9694	71926,2524
1-T1	2	1000,5	0,002005668	0,0012692	264	1,5802	1,8532	200,93345	153,02825	177,37	177458,9694	71926,2524
1-T1	3	1000,5	0,002005668	0,0012692	264	1,5802	1,8532	200,93345	153,02825	177,37	177458,9694	71926,2524
2-T2	4	391,5	0,002034901	0,0012692	264	1,6033	1,8666			264	103356	42502,0145
2-T2	5	391,5	0,002034901	0,0012692	264	1,6033	1,8666			264	103356	42502,0145
3-T2	6	391,5	0,001822984	0,0012692	264	1,4363	1,7667			264	103356	38075,7938
3-T2	7	391,5	0,001822984	0,0012692	264	1,4363	1,7667			264	103356	38075,7938
4-T1	8	1000,5	0,001154943	0,0012692	264	0,9100	1,40625	227,68380	174,22210	201,977	202078,2486	47163,975
4-T1	9	1000,5	0,001154943	0,0012692	264	0,9100	1,40625	227,68380	174,22210	201,977	202078,2486	47163,975
5-T1	10	1000,5	0,000264221	0,0012692	264	0,2082	0,6726	255,69376	180,00000	47,3978	47421,53643	2532,05466
5-T1	11	1000,5	0,000264221	0,0012692	264	0,2082	0,6726	255,69376	180,00000	47,3978	47421,53643	2532,05466
6-T1	12	1000,5	0,000626501	0,0012692	264	-0,4936	1,0357	283,69980	180,00000	-130,312	-130377,3496	16506,4746
6-T1	13	1000,5	0,000626501	0,0012692	264	-0,4936	1,0357	283,69980	180,00000	-130,312	-130377,3496	16506,4746
7-T2	14	391,5	0,001294542	0,0012692	264	-1,0199	1,4888			-264	-103356	27038,4862
7-T2	15	391,5	0,001294542	0,0012692	264	-1,0199	1,4888			-264	-103356	27038,4862
8-T2	16	391,5	0,00150646	0,0012692	264	-1,1869	1,6061			-264	-103356	31464,7069
8-T2	17	391,5	0,00150646	0,0012692	264	-1,1869	1,6061			-264	-103356	31464,7069
9-T1	18	1000,5	0,001477226	0,0012692	264	-1,1639	1,5904			-264	-264132	78849,4203
9-T1	19	1000,5	0,001477226	0,0012692	264	-1,1639	1,5904			-264	-264132	78849,4203
9-T1	20	1000,5	0,001477226	0,0012692	264	-1,1639	1,5904			-264	-264132	78849,4203
											-21774,221008	862894,029

Adım No	$\epsilon_i$ (1/m)	Mi (Nmm)	Mi (Nm)
1	3,535E-05	9031229,536	9031,229536
2	7,0692E-05	18053621,12	18053,62112
10	0,00035346	89914174,68	89914,17468
20	0,00070692	178922373,6	178922,3736

Moment-Eğrilik Hesabı / Adım 1 / Adım 10 / Adım 20 / Adım 30 / Adım 40 / Adım 50 / Adım 60 / Adım 70 / Adım 80 / Adım 90

Şekil 3.20. Hedef ara komutu adım-2

Microsoft Excel - TARAFSIZ EKSEN HESABI 10.02.xls

Dosya Düzen Görünüm Ekle Biçim Araçlar Veri Pencere Yardım

Yardım için soru yazın

Formül Çubuğu: =TOPLA(S14:S33)

11

Hedef Ara

Ayarlanacak hücre: \$\$S\$34

Sonuç hücre: 0

Değiştirilecek hücre: \$I\$1

Tamam İptal

Eleman	No	A	E	L	$\Delta i$	$d_{ii}$	$\kappa$	$\epsilon_i$	$\epsilon_{ikms}$	$\sigma_{ikms}$	$\epsilon_{esjli}$	$\beta_p$	$\sigma_{si}$	$b_{akinp}$	$\sigma_j$	$P_i$	$M_i$
1-T1	1	1000,5	208000	900	711,9174	0,40531201	0,004948454	0,002005668	0,00126923	264	1,5802	1,8532	200,93345	153,02825	177,37	177458,9694	71926,2524
1-T1	2	1000,5	208000	900	711,9174	0,40531201	0,004948454	0,002005668	0,0012692	264	1,5802	1,8532	200,93345	153,02825	177,37	177458,9694	71926,2524
1-T1	3	1000,5	208000	900	711,9174	0,40531201	0,004948454	0,002005668	0,0012692	264	1,5802	1,8532	200,93345	153,02825	177,37	177458,9694	71926,2524
2-T2	4	391,5	208000	900	717,825	0,41121961	0,004948454	0,002034901	0,0012692	264	1,6033	1,8666	200,93345	153,02825	264	103356	42502,0145
2-T2	5	391,5	208000	900	717,825	0,41121961	0,004948454	0,002034901	0,0012692	264	1,6033	1,8666	200,93345	153,02825	264	103356	42502,0145
3-T2	6	391,5	208000	900	675	0,36839481	0,004948454	0,001822984	0,0012692	264	1,4363	1,7667	200,93345	153,02825	264	103356	38076,7938
3-T2	7	391,5	208000	900	675	0,36839481	0,004948454	0,001822984	0,0012692	264	1,4363	1,7667	200,93345	153,02825	264	103356	38076,7938
4-T1	8	1000,5	208000	900	540	0,23339481	0,004948454	0,001154943	0,0012692	264	0,9100	1,40625	227,68380	174,22210	201,977	202078,2486	47163,975
4-T1	9	1000,5	208000	900	540	0,23339481	0,004948454	0,001154943	0,0012692	264	0,9100	1,40625	227,68380	174,22210	201,977	202078,2486	47163,975
5-T1	10	1000,5	208000	900	360	0,05339481	0,004948454	0,000264221	0,0012692	264	0,2082	0,6726	255,69376	180,00000	47,3978	47421,53643	2532,05466
5-T1	11	1000,5	208000	900	360	0,05339481	0,004948454	0,000264221	0,0012692	264	0,2082	0,6726	255,69376	180,00000	47,3978	47421,53643	2532,05466
6-T1	12	1000,5	208000	900	180	-0,12660539	0,004948454	-0,000626501	0,0012692	264	-0,4936	1,0357	283,69980	180,00000	-130,312	-130377,3496	16506,4746
6-T1	13	1000,5	208000	900	180	-0,12660539	0,004948454	-0,000626501	0,0012692	264	-0,4936	1,0357	283,69980	180,00000	-130,312	-130377,3496	16506,4746
7-T2	14	391,5	208000	900	45	-0,26160539	0,004948454	-0,001294542	0,0012692	264	-1,0199	1,4888	-264	-264	-264	-103356	27038,4862
7-T2	15	391,5	208000	900	45	-0,26160539	0,004948454	-0,001294542	0,0012692	264	-1,0199	1,4888	-264	-264	-264	-103356	27038,4862
8-T2	16	391,5	208000	900	2,175	-0,30443039	0,004948454	-0,00150646	0,0012692	264	-1,1869	1,6061	-264	-264	-264	-103356	31464,7069
8-T2	17	391,5	208000	900	2,175	-0,30443039	0,004948454	-0,00150646	0,0012692	264	-1,1869	1,6061	-264	-264	-264	-103356	31464,7069
9-T1	18	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29852279	0,004948454	-0,001477228	0,0012692	264	-1,1639	1,5904	-264	-264	-264	-264132	78849,4203
9-T1	19	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29852279	0,004948454	-0,001477228	0,0012692	264	-1,1639	1,5904	-264	-264	-264	-264132	78849,4203
9-T1	20	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29852279	0,004948454	-0,001477228	0,0012692	264	-1,1639	1,5904	-264	-264	-264	-264132	78849,4203
																-21774,221008	862894,029

Adım No	$\kappa_i$ (L/m)	$M_i$ (Nmm)	$M_i$ (Nm)
1	3,535E-05	9031229,536	9031,229536
2	7,0692E-05	18053621,12	18053,62112
10	0,00035346	89914174,68	89914,17468
20	0,00070692	179822373,6	179822,3736

Moment-Eğrilik Hesabı / Adım 1 / Adım 10 / Adım 20 / Adım 30 / Adım 40 / Adım 50 / Adım 60 / Adım 70 / Adım 80 / Adım 90 / Adım 100

Şekil 3.21. Hedef ara komutu adım-3

Microsoft Excel - TARAFSIZ EKSEN HESABI 10.02.xls

Dosya Düzen Görünüm Ekle Biçim Araçlar Veri Pencere Yardım

S34 =TOPLA(S14:S33)

Hedef Arama Durumu

S34 Hücresi ile Hedef Arama bir çözüm buldu.

Tamam

İptal

Hedef değer: 0

Geçerli değer: 0,000000

Adımla

Duraklat

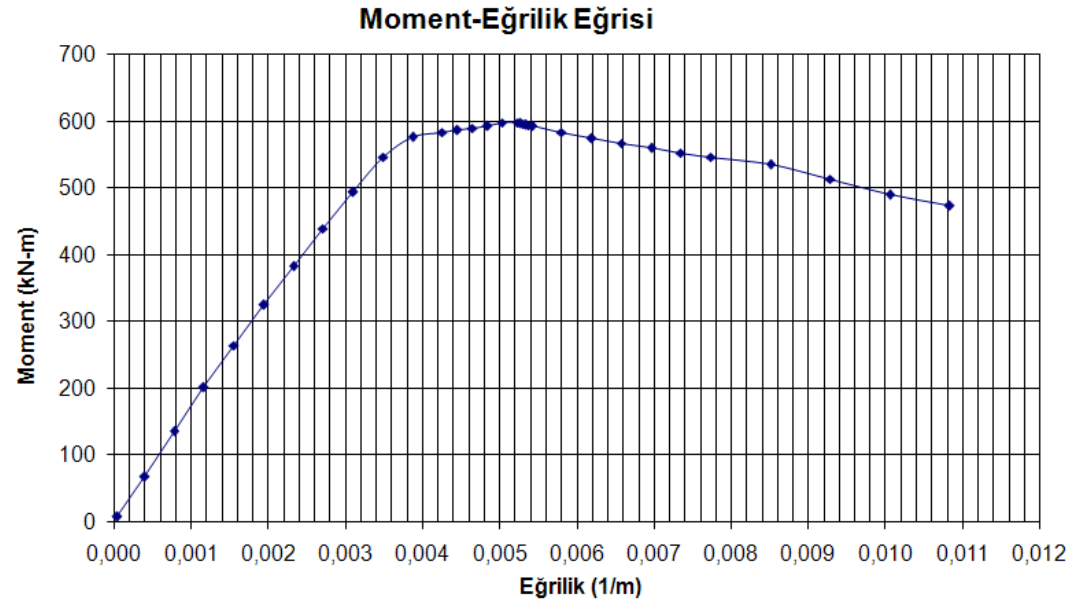
Eleman	No	A	E	L	$\Delta\kappa$	$\Delta\kappa$	$\kappa_i$	$\kappa_j$	$\kappa_{skms}$	$\sigma_{skms}$	$\epsilon_{skms}$	$\beta_p$	$\sigma_{ci}$	$b_{ckin-p}$	$\sigma_i$	$P_i$	$M_i$
1-T1	1	1000,5	208000	900	711,9174	0,41032682	0,004948454	0,002030483	0,00126923	264	1,5998	1,8646	200,22785	152,48939	176,278	176366,4625	72367,8898
1-T1	2	1000,5	208000	900	711,9174	0,41032682	0,004948454	0,002030483	0,0012692	264	1,5998	1,8646	200,22785	152,48939	176,278	176366,4625	72367,8898
1-T1	3	1000,5	208000	900	711,9174	0,41032682	0,004948454	0,002030483	0,0012692	264	1,5998	1,8646	200,22785	152,48939	176,278	176366,4625	72367,8898
2-T2	4	391,5	208000	900	717,825	0,41623442	0,004948454	0,002059717	0,0012692	264	1,6228	1,8780			264	103356	43020,3248
2-T2	5	391,5	208000	900	717,825	0,41623442	0,004948454	0,002059717	0,0012692	264	1,6228	1,8780			264	103356	43020,3248
3-T2	6	391,5	208000	900	675	0,37340942	0,004948454	0,001847799	0,0012692	264	1,4558	1,7787			264	103356	38594,1041
3-T2	7	391,5	208000	900	675	0,37340942	0,004948454	0,001847799	0,0012692	264	1,4558	1,7787			264	103356	38594,1041
4-T1	8	1000,5	208000	900	540	0,23840942	0,004948454	0,001179758	0,0012692	264	0,9295	1,42128	226,94690	173,57029	205,051	205153,9851	48910,6427
4-T1	9	1000,5	208000	900	540	0,23840942	0,004948454	0,001179758	0,0012692	264	0,9295	1,42128	226,94690	173,57029	205,051	205153,9851	48910,6427
5-T1	10	1000,5	208000	900	360	0,05840942	0,004948454	0,000289036	0,0012692	264	0,2277	0,7035	254,91364	180,00000	51,6816	51707,45842	3020,20268
5-T1	11	1000,5	208000	900	360	0,05840942	0,004948454	0,000289036	0,0012692	264	0,2277	0,7035	254,91364	180,00000	51,6816	51707,45842	3020,20268
6-T1	12	1000,5	208000	900	180	-0,12159058	0,004948454	-0,000601885	0,0012692	264	-0,4741	1,0150	282,89736	180,00000	-125,151	-125213,1373	15224,7379
6-T1	13	1000,5	208000	900	180	-0,12159058	0,004948454	-0,000601885	0,0012692	264	-0,4741	1,0150	282,89736	180,00000	-125,151	-125213,1373	15224,7379
7-T2	14	391,5	208000	900	45	-0,25659058	0,004948454	-0,001269727	0,0012692	264	-1,0004	1,4745			-264	-103356	26520,1759
7-T2	15	391,5	208000	900	45	-0,25659058	0,004948454	-0,001269727	0,0012692	264	-1,0004	1,4745			-264	-103356	26520,1759
8-T2	16	391,5	208000	900	2,175	-0,29941558	0,004948454	-0,001481644	0,0012692	264	-1,1674	1,5928			-264	-103356	30946,3966
8-T2	17	391,5	208000	900	2,175	-0,29941558	0,004948454	-0,001481644	0,0012692	264	-1,1674	1,5928			-264	-103356	30946,3966
9-T1	18	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29350798	0,004948454	-0,001452411	0,0012692	264	-1,1443	1,5770			-264	-264132	77524,8496
9-T1	19	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29350798	0,004948454	-0,001452411	0,0012692	264	-1,1443	1,5770			-264	-264132	77524,8496
9-T1	20	1000,5	208000	900	8,0826	-0,29350798	0,004948454	-0,001452411	0,0012692	264	-1,1443	1,5770			-264	-264132	77524,8496
																0,000000	862151,388

Adım No	$\kappa_i$ (1/m)	Mi (Nmm)	Mi (Nm)
1	3,535E-05	9031229,536	9031,229536
2	7,0692E-05	18053621,12	18053,62112
10	0,00035346	89914174,68	89914,17468
20	0,00070692	178922373,6	178922,3736

Moment-Eğrilik Hesabı / Adım 1 / Adım 10 / Adım 20 / Adım 30 / Adım 40 / Adım 50 / Adım 60 / Adım 70 / Adım 80 / Adr

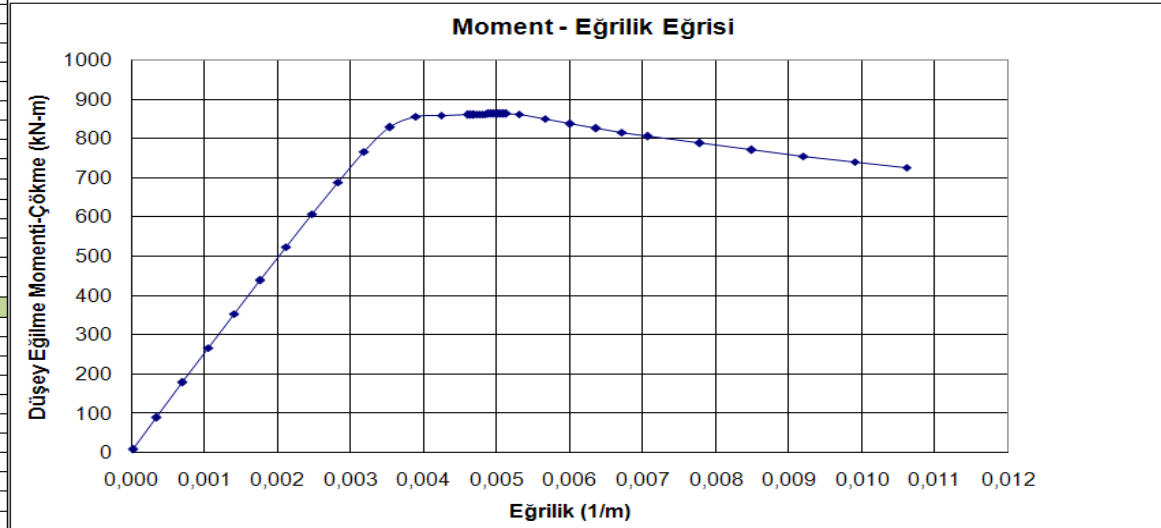
Şekil 3.22. Hedef ara komutu adım-4

Adım	Eğrilik (1/m)	Moment(N-m)	Moment (kN-m)
1	0,000039	6802,372	6,802
10	0,000387	67685,307	67,685
20	0,000773	134606,370	134,606
30	0,001160	200566,367	200,566
40	0,001547	263923,669	263,924
50	0,001933	324380,958	324,381
60	0,002320	382869,732	382,870
70	0,002706	439090,495	439,090
80	0,003093	493563,727	493,564
90	0,003480	546461,610	546,462
100	0,003866	576785,451	576,785
110	0,004253	583725,790	583,726
115	0,004446	586610,573	586,611
120	0,004640	589621,957	589,622
125	0,004833	592994,476	592,994
130	0,005026	597998,883	597,999
135	0,005220	598312,130	598,312
136	0,005258	597129,733	597,130
137	0,005297	596104,176	596,104
138	0,005336	595088,641	595,089
139	0,005374	594082,993	594,083
140	0,005413	593087,090	593,087
150	0,005800	583632,716	583,633
160	0,006186	574998,596	574,999
170	0,006573	567057,890	567,058
180	0,006959	559703,143	559,703
190	0,007346	552845,419	552,845
200	0,007733	546411,468	546,411
220	0,008506	534681,770	534,682
240	0,009279	513339,086	513,339
260	0,010053	490602,855	490,603
280	0,010826	473699,300	473,699
300	0,011599	460088,8852	460,089



Şekil 3.23. Plak kalınlığı 3.05 mm olan model (MST-3) için moment-eğrilik eğrisi (IACS-CSR geleneksel ayrıklaştırma)

Adım	Eğrilik (1/m)	Moment(N-m)	Moment (kN-m)
1	0.000035	9031.229536	9.031
10	0.000353	89912.195809	89.912
20	0.000707	178922.428440	178.922
30	0.001060	267009.798836	267.010
40	0.001414	354152.532856	354.153
50	0.001767	440185.587799	440.186
60	0.002121	524990.001965	524.990
70	0.002474	608796.166895	608.796
80	0.002828	689279.849778	689.280
90	0.003181	767134.992316	767.135
100	0.003535	829972.399716	829.972
110	0.003888	856470.285127	856.470
120	0.004242	859182.804936	859.183
130	0.004595	861436.699429	861.437
131	0.004630	861660.913039	861.661
132	0.004666	861885.032331	861.885
133	0.004701	862109.078393	862.109
134	0.004736	862333.070062	862.333
135	0.004772	862557.024052	862.557
136	0.004807	862780.955090	862.781
137	0.004842	863004.876030	863.005
138	0.004878	863295.415514	863.295
139	0.004913	863255.634304	863.256
140	0.004948	863216.547047	863.217
141	0.004984	863178.152665	863.178
142	0.005019	863140.449282	863.140
143	0.005054	863103.434270	863.103
144	0.005090	863067.104295	863.067
145	0.005125	863031.455366	863.031
150	0.005302	862863.245627	862.863
160	0.005655	850966.715158	850.967
170	0.006009	838582.254927	838.582
180	0.006362	827092.929378	827.093
190	0.006716	816395.750351	816.396
200	0.007069	806640.500726	806.641
220	0.007776	788589.063695	788.589
240	0.008483	771979.618150	771.980
260	0.009190	756097.530491	756.098
280	0.009897	741125.803760	741.126
300	0.010604	726915.940932	726.916



Şekil 3.24. Plak kalınlığı 4.35 mm olan model (MST-4) için moment-eğrilik eğrisi (IACS-CSR geleneksel ayrıklaştırma)

### 3.3.2. Önerilen Yöntem Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama

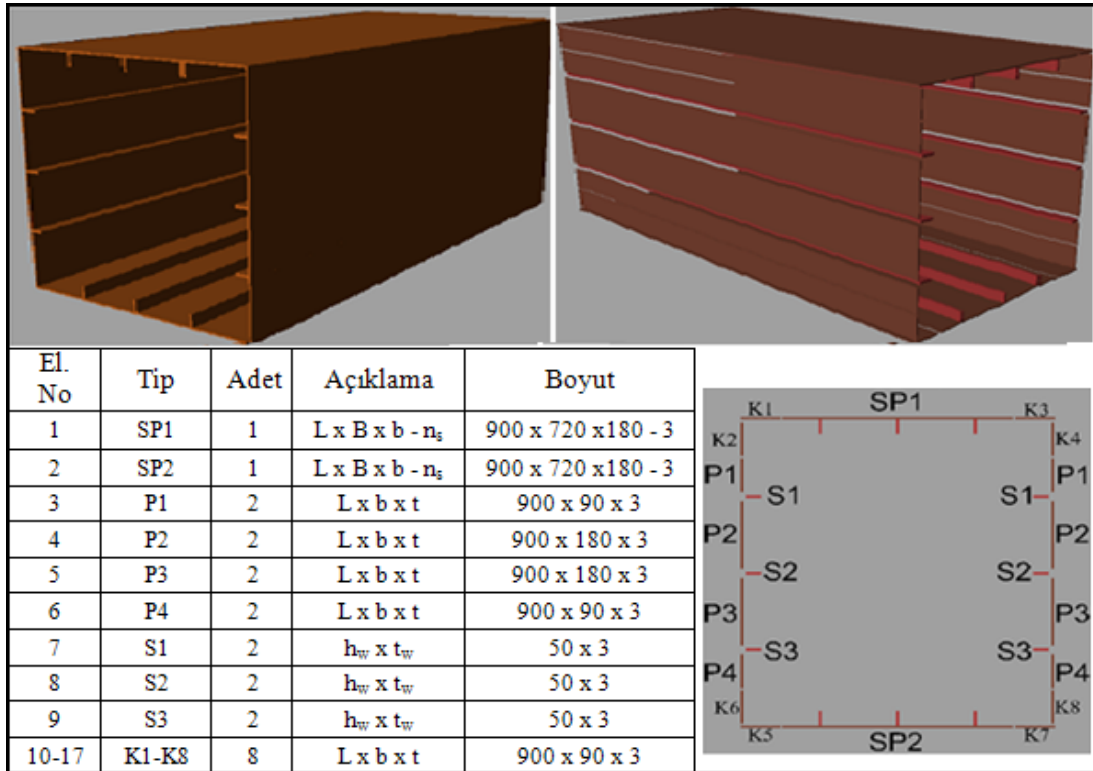
IACS-CSR'ye göre yapılan hesaplamaların ardından mevcut çalışmada önerilen yöntemin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin temelini oluşturan Smith metodu ve kademeli göçme analizi Bölüm 2.7'de detaylı olarak adımlarıyla anlatılmıştır.

Ancak tekrar özetlemek gerekirse, kademeli göçme analizi yaklaşımında, gemi gövde kirişinde muhtemel en yüksek statik non-lineer eğilme momentinin oluşacağı gemi ortasında iki komşu enine destek elemanı arasında kalan kısmın enine kesitini oluşturan boyuna yapısal elemanlar, belirli sınırlar dâhilinde ayrıklaştırılarak idealleştirilir. Geleneksel olarak stifnerli plak, tekil plak veya tekil stifner şeklinde ayrıklaştırılan bu elemanların birbirinden bağımsız davranış gösterdiği kabul edilerek, her birinin göçme davranışına göre tüm kesitin göçme durumu incelenir. Burada belirtmek gerekir ki yöntemimizde geleneksel eleman ayrıklaştırmasının yanı sıra desteklenmiş panel eleman kabulü de yapılarak, bu bütün paneli oluşturan tekil plak ve stifner elemanların davranışlarından da yararlanılıp daha önceki bölümlerde belirtilen olası tüm burkulma tipine bağlı göçmeler göz önüne alınarak, güncellenen ortotropik panel yaklaşımıyla yük-eksenel yer değiştirme eğrisi elde edilir. Ayrıklaştırılan elemanların yük-eksenel kısalma veya ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme eğrileri belirlendikten sonra, iteratif olarak hesaplamaya başlanır. Gemi kesitine ilk adımda kabul edilen bir başlangıç eğriliği uygulanmak suretiyle, ayrıklaştırılan elemanların bu eğrilik etkisiyle maruz kaldıkları ekstenel yer değiştirme (kısalma) belirlenir. Her bir elemanın P-du eğrisi belli olduğu için, her adımda bu eğrilerden ekstenel yer değiştirmelere karşılık gelen yük değerleri belirlenir. Her adımda, her bir elemana etki eden yük değerleri toplanır. Kesitteki yük dengesi sağlayarak toplam yükü sıfır yapmak için tarafsız eksenin yeri değiştirilir. Yeni tarafsız eksen yerine göre yük dengesinin sağlandığı durumdaki eğilme momenti değeri, her bir eleman için etki eden yük ve tarafsız eksene olan düşey mesafelerinin çarpımı ile elde edilerek toplanmaları suretiyle belirlenir. Bu şekilde her bir eğrilik adımında elde edilen moment değerleri bir eğri ile ifade edilirken, bu eğri dönüm noktasına ulaşana kadar tüm adımlar tekrarlanır. Bu dönüm noktası da ilgili kesitin göçme mukavemeti değeri olarak belirlenir.



### 3.3.2.1. Adım 1- Gemi Kesitinin Elemanlarına Ayrıklaştırılması

Kutu kiriş kesitinin dip ve üst kısmı desteklenmiş panel eleman olarak, kutu kiriş kesitinin borda (yan) yapıları ise tekil lama stifner eleman ve tekil plak eleman olarak ayrıklaştırılarak idealleştirilmiştir. Ayrıca 30x30'lik kısımlar da köşe eleman olarak alınmıştır. Şekil 3.25'te Nishihara'nın kutu kiriş modelinin mevcut çalışma eleman ayrıklaştırması gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Nishihara'nın kutu kiriş modelinin mevcut çalışma eleman ayrıklaştırması

### 3.3.2.2. Adım 2 – Ayrıklaştırılan Elemanların Gerilme-Şekil Değişirme (Yük-Eksenel Kısılma) Eğrilerinin Elde Edilmesi

MST-3 modeli ele alınarak, P1, P2, P3 ve P4 tekil plak elemanların yük-eksenel kısılma (gerilme-şekil değişirme) eğrileri Bölüm 2.3'e göre, S1, S2 ve S3 stifnerlerin olası 3 ayrı yük-eksenel kısılma eğrileri Bölüm 2.4'e göre, SP1 ve SP2 stifnerli panel elemanların yük-eksenel kısılma eğrileri, diğer elemanların yük-eksenel kısılma eğrileri de kullanılarak Bölüm 2.6'ya göre elde edilmiştir. K1-K8 köşe elemanların yük-eksenel kısılma eğrileri elastik-tam plastik malzeme davranışına göre belirlenmiştir.

### 3.3.2.2.1. Tekil Plak Elemanların (P1, P2, P3, P4) Yük-Eksenel Kısılma Eğrileri

Bölüm 2.3'te ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, tekil plakların eksenel bası yükleri altında şekil değiştirme ve eksenel yer değiştirme davranışları Marguerre denklemleri ve Membran gerilme (Plak Kenarı Odaklı Plastik Mafsal) yaklaşımı ile elde edilmişlerdir. Excel ortamında oluşturulan, yükleme artımlı iteratif hesaplama ile tekil plağın göçme mukavemet değeri ile bu değer öncesi ve sonrası davranışı belirlenir. Göçme mukavemeti sonrası azalan yükleme değeri ile birlikte artmaya devam eden şekil değiştirme (eksenel kısılma) değerleri de, göçme mukavemeti değerinde oluşan maksimum membran gerilme ( $\sigma_{x_{max}}$ ) ve plağın elastik burkulma değeri ( $\sigma_{xE}$ ) kullanılarak Paik'in önerdiği formülasyon (94) ile artımsal hesaplama dâhil edilir. Hesaplama sonucunda, P1 ve P2 elemanlar için, tarafsız eksenin üzerinde bası kuvvetleri altında, elasto-plastik yük-eksenel kısılma eğrisi, P3 ve P4 elemanlar için de, tarafsız eksenin altında çeki kuvvetleri etkisi altında elastik-tam plastik yük-eksenel kısılma eğrisi elde edilmiştir. Bunların yanında, K1-K8 köşe elemanlar için de burkulma ve burkulma sonrası kayıplar söz konusu olmayacağından yine elastik-tam plastik malzeme davranışı elde edilmiştir. Şekil 3.26'da P2 tekil plağı için yapılan hesaplamaların arayüzü, dağılım değerleri ve yük-eksenel kısılma eğrisi gösterilmiştir.

Excel hesaplama adımları;

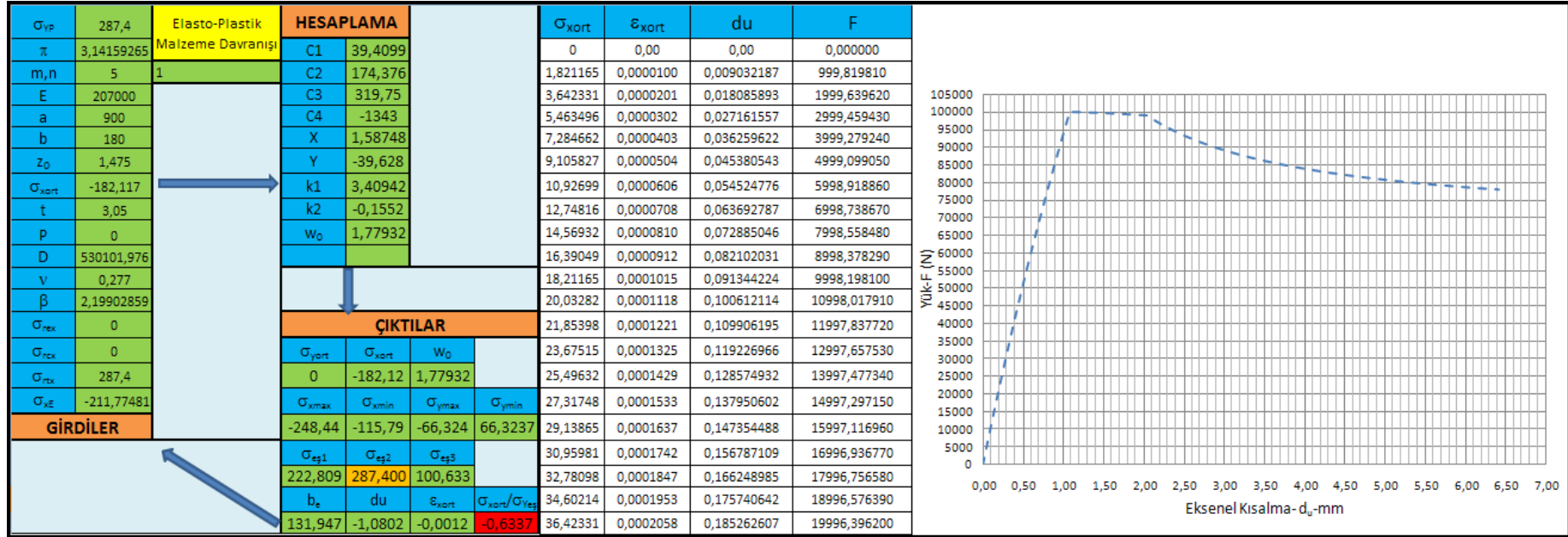
Adım 1. B8 hücresine -1 başlangıç değeri girilir. (- değer bası kuvveti olmasının gereğidir)

Adım 2. "Veri" sekmesinden "Durum Çözümlemesi" ve alt komutlardan da "Hedef Ara" seçilir.

Adım 3. Hedef ara penceresinde; "Ayarlanacak Hücre"ye F20 seçilir veya F\$20 yazılır, "Sonuç Hücre"ye B1'deki malzeme akma gerilmesi yazılır, "Değişecek Hücre"ye ise B8 seçilir veya B\$8 yazılır ve Tamam'a tıklanır.

Adım 4. Döngü tamamlandıktan sonra, Hedef arama Durumu" penceresinde "Hedef Değer" ve Geçerli Değer" uyumu görülürse, B8 hücresindeki değer tekil plağın göçme mukavemeti değeridir.

Adım 5. Bu değer baz alınarak artımsal hesaplama yandaki tabloya sonuç olarak yansır ve başlangıçta görünen grafik değişerek ilgili tekil plağın "gerilme-şekil değiştirme" grafiğini elde ederiz.



Şekil 3.26. P2 tekil plağı için yapılan hesaplamaların arayüzü, dağılım değerleri ve yük-eksenel kısılma eğrisi

### 3.3.2.2.2. Tekil Stifner Elemanların (S1, S2, S3) Yük-Eksenel Kısalma Eğrileri

Bölüm 2.4'te detaylı olarak anlatıldığı gibi, tekil stifnerlerin eksenel bası yükleri altında şekil değiştirme ve eksenel yer değiştirme davranışları IACS-CRS (2010), Ek-A, Kısım 2.3'e göre, kiriş-kolon burkulması, stifner gövde burkulması ve stifner burulma burkulması tipleri için 3 ayrı gerilme-şekil değiştirme eğrisi şeklinde elde edilecektir. Bunlardan en düşük göçme mukavemet değerini veren eğri göçme analizinde kullanılmıştır. Bu hesaplama için de Excel ortamında bir hesaplama arayüzü oluşturulmuş, yeterli sayıda adımdan sonra S1 ve S2 elemanlar için, tarafsız eksenin üzerinde bası kuvvetleri altında, elasto-plastik yük-eksenel kısalma eğrisi, S3 elemanı için de, tarafsız eksenin altında çeki kuvvetleri etkisi altında elastik-tam plastik yük-eksenel kısalma eğrisi elde edilmiştir. Şekil 3.27'de S1 tekil stifneri için yapılan hesaplamaların arayüzü, dağılım değerleri ve yük-eksenel kısalma eğrisi gösterilmiştir.

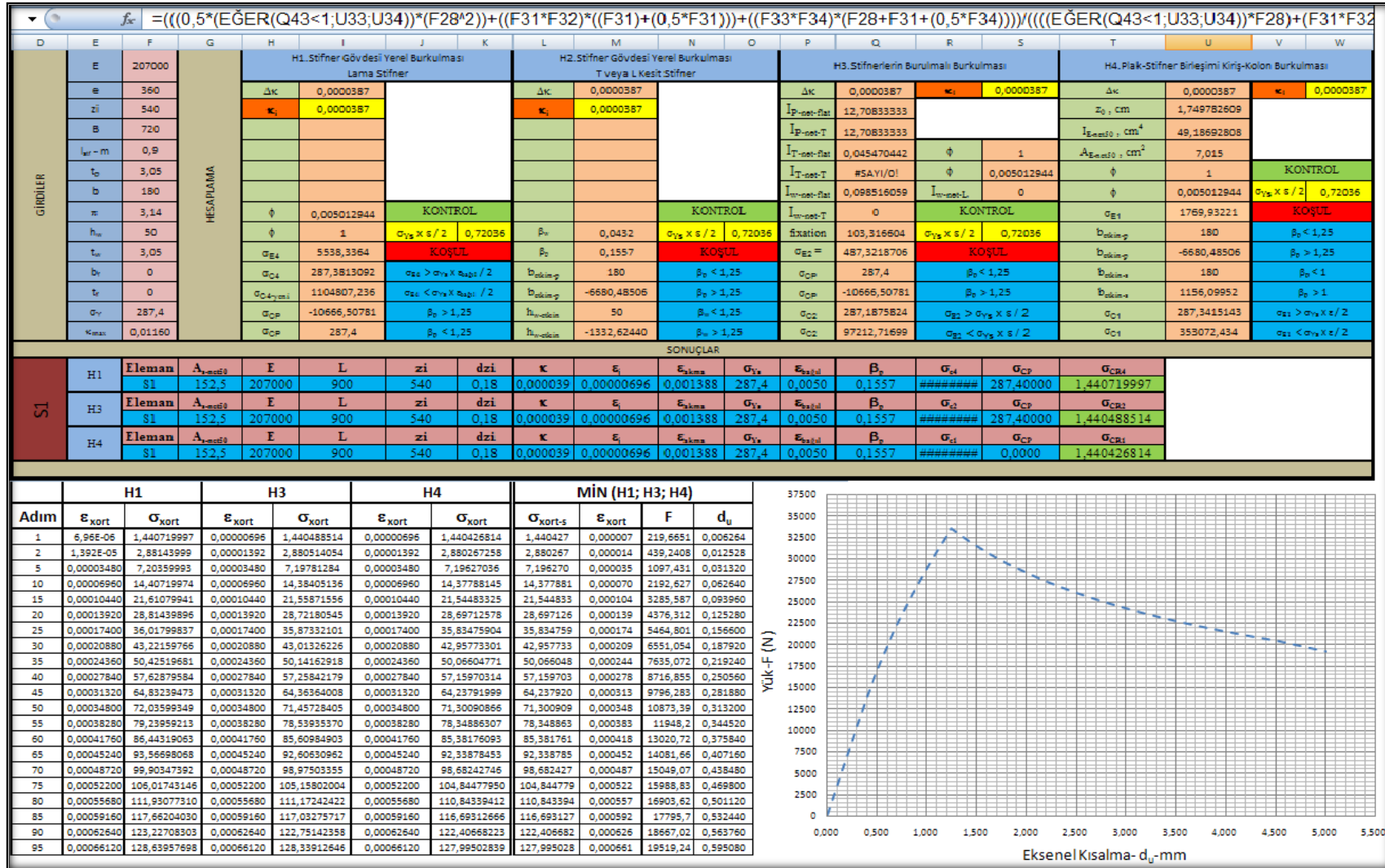
Excel hesaplama adımları;

Adım 1. Stifnerin geometrik ve malzeme özellikleriyle ilk eğrilik değeri girdiler bölümüne yazılır.

Adım 2. Kontrol ve koşullara bağlı olarak, stifner gövdesi yerel burkulması (H1, H2), stifneri burulmalı burkulması (H3) ve plak-stifner birleşimi kiriş burkulması (H4) hesaplamaları kendi içerisinde gerçekleşir.

Adım 3. Yukarıdaki satır ve sütünlarda gerçekleştirilen hesaplamaların ardından ilgili adımdaki şekil değiştirme ve gerilme değerleri her bir adım için sonuçlar tablosuna otomatik olarak yansır.

Adım 4. İlk eğrilik değeri için yukarıdaki adımların gerçekleşmesiyle birlikte diğer adımlarda otomatik olarak hesaplanır ve sonuç değerleri grafik çıktı bölümüne aktarılır.



Şekil 3.27. S1 tekil stifneri için yapılan hesaplamaların arayüzü, dağılım değerleri ve yük-eksenel kısalma eğrisi

### 3.3.2.2.3. Stifnerli Panel Elemanların (SP1, SP2) Yük-Eksenel Kısılma Eğrileri

Bölüm 2.6'da detayları verildiği üzere, tarafsız eksenin üzerinde bulunan ve eksenel bası etkisindeki stifnerli panellerin yük-eksenel kısılma eğrileri, paneli oluşturan tekil plak ve tekil stifnerlerin yük-eksenel kısılma eğrileri kullanılarak elastik sabitleri her adımda güncellenen ortotropik panel çözümlemesi ile elde edilmiştir. Her adımda ortotropik hesaplamaların tamamlanmasının ardından panelin, o eksenel kısılma adımındaki yük değeri, tekil elemanların ilgili adımdaki yük değerleri ile karşılaştırılarak belirlenir. İlk karşılaştırma yerel tekil elemanların kendi davranışları ve birleşimlerinin davranışları arasında yapılır. Her adımda, tekil plak yük değeri ve tekil stifner yük değerinin elemanların kesit alanlarına bağlı olarak kombinasyon yük değeri ( $P_{P-S}$ ) denklem (153) ile hesaplanır. Hesaplanan bu değer, tekil stifnerin plak-stifner birleşimi kiriş burkulması (H4) hesaplamasından elde edilen değer ile karşılaştırılarak panel yerel yük değeri ( $P_C$ ) olarak küçük olan seçilir. Bu karşılaştırmaya paralel olarak ikinci karşılaştırma, ortotropik panel çözümü ( $P_{O-P}$ ) ile ilk karşılaştırmanın sonucu ( $P_C$ ) arasında yapılır ve küçük olan değer seçilir. Bunlara göre, panelin, Bölüm 2.2.2'de anlatılan hangi burkulma tipine bağlı olarak göçme mukavemetine ulaşacağına ise yine karşılaştırmalı olarak karar verilir. İkinci karşılaştırma sonucunda ortotropik panel değerleri sürekli olarak yerel değerlerin üzerindeyse, panelin tekil plak burkulması veya stifner yerel burkulması sonucu göçme değerine ulaştığı kabul edilir.

$$P_{P-S} = \frac{P_{\text{plak}} \cdot (b \cdot t_{\text{plak}}) + P_{\text{stf}} \cdot (t_w \cdot h_w + b_f \cdot t_f)}{(b \cdot t_{\text{plak}}) + (t_w \cdot h_w + b_f \cdot t_f)} \quad (153)$$

Akış şeması Şekil 2.22 ile gösterilen çözümlemenin adımları şöyledir.

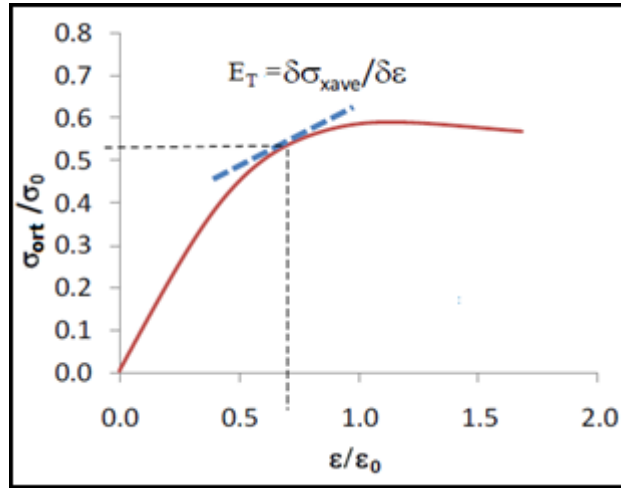
Adım 1- Tekil plak yük değeri ( $P_{\text{plak}}$ ) kendi yük-eksenel kısılma eğrisinden okunur ya da belirli iki değer arasında ise interpolate edilerek belirlenir.

Adım 2- Tekil stifner yük değeri ( $P_{\text{stf}}$ ) kendi yük-eksenel kısılma eğrisinden okunur ya da belirli iki değer arasında ise interpolate edilerek belirlenir.

Adım 3- Denklem (153) ile plak stifner kombinasyonu yük değeri ( $P_{P-S}$ ) hesaplanır.

Adım 4- Tekil stifner hesaplarından H4 hesabı sonucu yük değeri ile ( $P_{P-S}$ ) değeri karşılaştırılarak küçük olan yerel yük değeri olarak seçilir.

Adım 5- Ortotropik panel hesaplaması, kullanılan elastik sabitler, tekil plak ve tekil stifnerlerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen anlık teğet modülü değerleri kullanılarak yapılır. Burada hesaplama kolaylığı sağlamak için, tekil elemanların anlık teğet modülü değerlerini hesaplarken Ramberg-Osgood yaklaşımı kullanılmıştır. Teğet modülü, gerilmenin şekil değiştirmeye göre birinci türevi olduğu kabulü ile Şekil 3.28 ve denklem (154) yardımıyla ifade edebiliriz.



Şekil 3.28. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde teğet modülü

$$E_t = \frac{E \cdot \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2} + 0,002 \cdot n \cdot E \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}}\right)^{n-1}} \quad (154)$$

Burada;

$n$  : Ramberg-Osgood lineer olmama parametresi

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(\sigma_{0,2}/\sigma_{0,01})}$$

$\sigma_{0,2}$  : 0,002 şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerilme değeri

$\sigma_{0,01}$  : 0,0001 şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerilme değeri

$\sigma$  : Anlık gerilme değeri

Adım 6- Adım 4 ve Adım 5 sonuçları karşılaştırılarak küçük olan seçilir. Böylelikle tüm hesaplama adımları aksel yer değiştirme kontrollü yükleme artımına göre aynen tekrarlanır. Yukarıda bahsedilen karşılaştırma ve kontroller neticesinde panelin davranışını

temsilen yük-eksenel kısıalma eğrisi belirlenir. Bu örnekte, ortotropik panel çözümlemesi sonuçları her adımda yerel eleman hesaplaması sonuçlarının üzerinde çıktığından, panel davranışının tekil elemanlardan, ilk göçme değerine ulaşan tekil plak davranışını izlediği kabul edilmiştir.

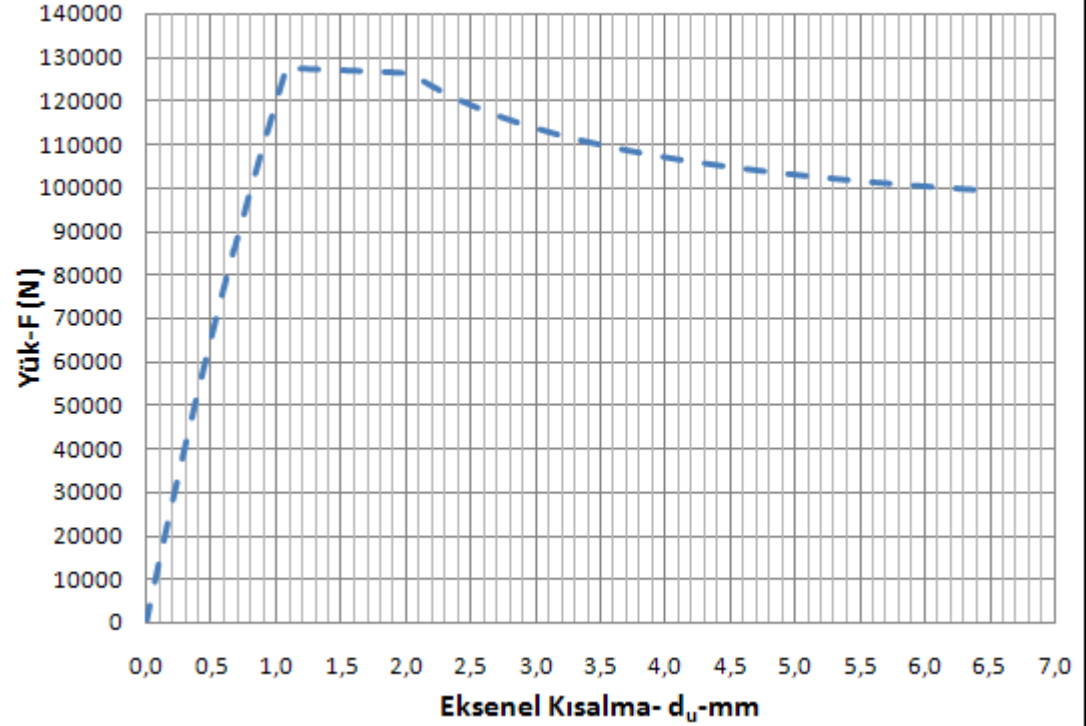




Tekil Plak		Tekil Stifner		Ortotropik Panel ( $P_{O,P}$ )		Tekil Stifner-İnterpolasyon		Tekil Plak-İnterpolasyon		Tekil Plak-Tekil Stifner Kombinasyonu ( $P_{P,S}$ )		Plak-Stifner Birleşimi-H4		Plak-Stifner Birleşimi-H4 (İnterpolasyon)		Panel Yerel Muk. ( $P_C$ ) (Min; $P_{P,S}$ ; $P_{H4}$ )	Panel Global Muk. ( $P_{O,P}$ )	Panel Davranışı ( $P_{PNL}$ ) (Min; $P_C$ ; $P_{O,P}$ )
du	P	du	P	du	P	du	P	du	P	du	P	du	P	du	P	P	P	P
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,009	999,820	0,012	408,782	0,008	1272,995	0,008	277,645	0,008	876,497	0,008	747,988	0,012	1873,547	0,008	1272,512	747,988	1272,995	747,988
0,018	1999,640	0,013	439,278	0,016	2545,989	0,016	555,242	0,016	1751,204	0,016	1494,560	0,013	2013,307	0,016	2544,412	1494,560	2545,989	1494,560
0,027	2999,459	0,031	1097,666	0,024	3818,984	0,024	832,599	0,024	2624,103	0,024	2239,660	0,031	5030,193	0,024	3815,593	2239,660	3818,984	2239,660
0,036	3999,279	0,063	2193,568	0,032	5091,978	0,032	1109,999	0,032	3495,177	0,032	2983,336	0,063	10050,139	0,032	5086,774	2983,336	5091,978	2983,336
0,045	4999,099	0,094	3287,704	0,070	6364,973	0,070	2443,332	0,070	7673,514	0,070	6551,157	0,094	15059,838	0,070	11194,223	6551,157	6364,973	6364,973
0,055	5998,919	0,125	4380,075	0,078	7637,968	0,078	2717,589	0,078	8523,698	0,078	7277,751	0,125	20059,291	0,078	12450,498	7277,751	7637,968	7277,751
0,064	6998,739	0,157	5470,681	0,085	8910,962	0,085	2991,821	0,085	9371,854	0,085	8002,748	0,157	25048,497	0,085	13706,662	8002,748	8910,962	8002,748
0,073	7998,558	0,188	6559,522	0,093	10183,957	0,093	3266,038	0,093	10226,509	0,093	8732,846	0,188	30027,455	0,093	14962,755	8732,846	10183,957	8732,846
0,082	8998,378	0,219	7646,598	0,101	11456,952	0,101	3538,076	0,101	11070,364	0,101	9453,993	0,219	34996,167	0,101	16206,210	9453,993	11456,952	9453,993
0,091	9998,198	0,251	8731,909	0,109	12729,946	0,109	3811,835	0,109	11912,190	0,109	10173,916	0,251	39954,632	0,109	17459,668	10173,916	12729,946	10173,916
0,101	10998,018	0,282	9815,455	0,117	14002,941	0,117	4085,593	0,117	12751,984	0,117	10892,243	0,282	44902,306	0,117	18713,117	10892,243	14002,941	10892,243
0,110	11997,838	0,313	10897,236	0,125	15275,935	0,125	4359,352	0,125	13589,742	0,125	11608,972	0,313	49839,335	0,125	19956,534	11608,972	15275,935	11608,972
0,119	12997,658	0,345	11977,251	0,132	16548,930	0,132	4630,943	0,132	14425,459	0,132	12323,632	0,345	54765,855	0,132	21207,437	12323,632	16548,930	12323,632
0,129	13997,477	0,376	13055,502	0,140	17821,925	0,140	4904,268	0,140	15259,130	0,140	13037,056	0,376	59681,851	0,140	22458,362	13037,056	17821,925	13037,056
0,138	14997,297	0,407	14122,462	0,148	19094,919	0,148	5177,600	0,148	16090,747	0,148	13748,870	0,407	64501,606	0,148	23709,318	13748,870	19094,919	13748,870
0,147	15997,117	0,438	15093,693	0,156	20367,914	0,156	5450,939	0,156	16920,305	0,156	14459,068	0,438	68470,323	0,156	24960,309	14459,068	20367,914	14459,068
0,157	16996,937	0,470	16036,598	0,164	21640,909	0,164	5722,115	0,164	17747,798	0,164	15167,180	0,470	72201,609	0,164	26198,732	15167,180	21640,909	15167,180
0,166	17996,757	0,501	16953,795	0,172	22913,903	0,172	5995,032	0,172	18573,220	0,172	15874,038	0,501	75723,014	0,172	27447,246	15874,038	22913,903	15874,038
0,176	18996,576	0,532	17847,495	0,179	24186,898	0,179	6267,959	0,179	19396,566	0,179	16579,268	0,532	79057,796	0,179	28695,808	16579,268	24186,898	16579,268
0,185	19996,396	0,564	18719,592	0,187	25459,892	0,187	6540,897	0,187	20217,829	0,187	17282,865	0,564	82225,719	0,187	29944,424	17282,865	25459,892	17282,865
0,195	20996,216	0,595	19571,717	0,195	26732,887	0,195	6811,674	0,195	21037,005	0,195	17984,359	0,595	85243,680	0,195	31180,474	17984,359	26732,887	17984,359
0,204	21996,036	0,626	20405,289	0,203	28005,882	0,203	7084,196	0,203	21854,090	0,203	18684,585	0,626	88126,216	0,203	32426,638	18684,585	28005,882	18684,585
0,214	22995,856	0,658	21205,588	0,211	29278,876	0,211	7356,731	0,211	22669,081	0,211	19383,169	0,658	90885,910	0,211	33672,862	19383,169	29278,876	19383,169
0,224	23995,675	0,689	21971,229	0,219	30551,871	0,219	7629,279	0,219	23481,973	0,219	20080,107	0,689	93533,711	0,219	34919,147	20080,107	30551,871	20080,107

Şekil 3.30. Stifnerli panel hesaplaması Adım 6- Ortotropik panel (global panel davranışı) sonuçları ile tekil elemanlar ve birleşimlerinin (yerel panel davranışı) sonuçlarının karşılaştırılması, kontrolü ve karar verilmesi

du	F-Tekil Plak	$\sigma_{ort}$ -panel	F-Panel
0,00000000	0,000000	0,000000	0
0,00791811	876,496846	1,596533	1119,968
0,01583622	1751,203567	3,189806	2237,649
0,02375433	2624,102713	4,779786	3353,02
0,03167244	3495,177162	6,366443	4466,06
0,06977807	7673,514102	13,977257	9805,046
0,07761610	8523,697633	15,525861	10891,39
0,08545345	9371,853874	17,070772	11975,15
0,09329035	10226,508906	18,627521	13067,21
0,10112697	11070,363990	20,164597	14145,47
0,10896343	11912,189813	21,697978	15221,13
0,11679983	12751,983893	23,227657	16294,2
0,12463626	13589,742100	24,753629	17364,67
0,13247277	14425,459268	26,275882	18432,53
0,14030943	15259,129615	27,794407	19497,78
0,14814627	16090,747041	29,309193	20560,4
0,15598334	16920,305354	30,820228	21620,39
0,16382066	17747,798432	32,327502	22677,74
0,17165827	18573,220355	33,831002	23732,45



Şekil 3.31. Stifnerli panel hesaplaması Adım 6 – karar verilen panel davranışının değer ve grafik çıktısı

### 3.3.2.3. Adım 3 –Tasarım Yükleri Altında Başlangıç Tarafsız Eksen Yerinin ve Eğrilik Artımı Değerinin Belirlenmesi

Gövde kirişinin düşey eğriliğinin derecesi artımsal olarak artırılır. Her eğrilik değerinde enine kesite etkiyen eğilme momenti belirlenir. Bunun için ilk olarak, ilk eğrilik ve artım değeri, çökme (sagging) durumu dikkate alındığı için mukavemet güvertesindeki yapı elemanlarının minimum akma gerilmesine eşdeğer lineer elastik eğilme gerilmesi değerine, tarafsız eksene ve mukavemet güvertesinin düşey konumuna bağlı olarak elde edilir.

$$\Delta\kappa = \frac{M_{yd}}{E.I_{hull}} 10^{-5} \quad \text{IACS-CS}$$

$R_{eH}$  :Mukavemet güvertesindeki yapı elemanlarının minimum akma gerilmesi değeri.

$M_{yd}$  : Mukavemet güvertesindeki yapı elemanlarının akma gerilmesine eşdeğer lineer elastik eğilme gerilmesi sonucu oluşan düşey eğilme momenti değeri.

### 3.3.2.4. Adım 4– Smith Kademeli Göçme Analizi

Eleman ayrıklaştırmasına göre iteratif gövde kesit hesaplamaları için hesap tablosu Tablo 3.14'e göre oluşturulur. İlk olarak, hesaplama Excel dosyasının ilk çalışma sayfasına önceki adımlarda elemanlar için elde edilen yük-eksenel kısalma verileri girilir. Bu veriler, her eğrilik adımında elemanlar için oluşan ekstenel kısalma değerleri ve onlara karşılık gelen yük değerlerini interpolasyonla belirlemek için kullanılır. Her eğrilik adımında, yapısal elemanlarda oluşan ekstenel yer değiştirmeler (negatif veya pozitif uzama) ilgili adımdaki eğrilik değeri ile ilgili yapısal elemanın yatay tarafsız eksene göre düşey konumunun çarpımından elde edilecektir. İlgiliartımsal eleman şekil değiştirmeleri için eğilmenin enine kesitin anlık yatay elastik tarafsız eksende oluştuğu ve eğilmeden sonra düzlem kesitlerin düzlem kaldığı kabulleri yapılır.

Yukarıdaki kabullerden hareketle, elde edilen eleman gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin eğimlerikullanılarak, yukarıdaki formüllerle hesaplanan ilgili şekil değiştirmeye karşılık gelen artımsal eleman gerilmeleri elde edilecektir. Elde edilen bu

gerilme değerleri ile eleman kesit alanları çarpılarak, her bir elemana etkiyen kuvvet (yük) değerleri belirlenir.

Fakat tarafsız eksenin, lineer olmayan eleman davranışları sebebiyle değişen konumunu doğru olarak belirlemek için boyuna kuvvet dengesini sağlayana (toplam kuvvet sıfır) veya net kuvvet değerini kabul edilebilir seviyeye çekene kadar, diğer bir ifadeyle, tarafsız eksenin kayma değerinin  $1 \times 10^{-4}$  mertebesinde aşağıda tutabilene kadar bu adımdaki işlemler tekrarlanır. Tekrarlanan bu iteratif işlemler Excel programında, interpolasyonla tabloya alınan değerlerin kontrolü ve ardından “Hedef Ara” komutu temel alınarak gerçekleştirilmiştir.

#### **3.3.2.4.1. Adım 5 – Kesite Etkiyen Düşey Eğilme Momenti Değerinin Her Eğrilik Adımında Belirlenmesi**

Yeni tarafsız eksenin yeri belirlendikten sonra ilgili adım için, tüm yapısal elemanların kuvvet değerlerinin katılımıyla oluşan artımsal moment değeri belirlenir.

$$M_i = \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \cdot A_{ij} \cdot |z_{ij} - z_{TE-i}|$$

#### **3.3.2.4.2. Adım 6 - Moment-Eğrilik Eğrisinin Oluşturulması ve Kesit Göçme Mukavemeti Değerinin Belirlenmesi**

Her adımda elde edilen  $M_i$  eğilme momenti ve ilgili  $\kappa_i$  eğrilik değerleri grafiğe aktarılır, eğrinin pik yaptığı adıma gelindiğinde iterasyon durdurulur ve pik noktasındaki eğilme momenti değeri, çökme/sarkma durumunda gemi enine kesitinin  $M_u$  göçme moment değeri olarak belirlenir.

#### **3.3.2.4.3. Önerilen Yöntem Kademeli Göçme Analizi Hesap Tablosu**

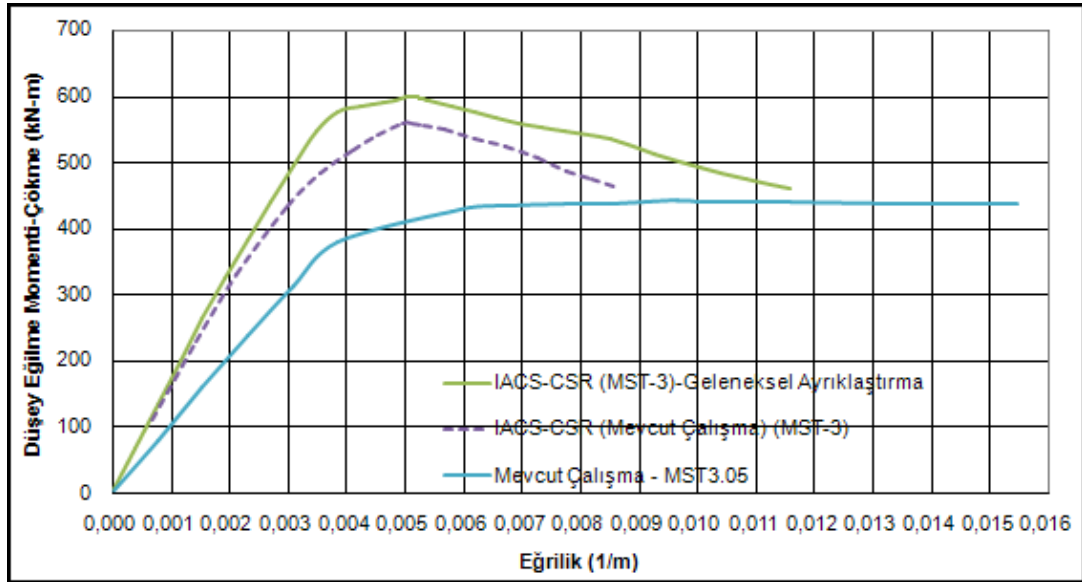
Kademeli göçme analizi hesaplamasında, ayrıklaştırılan elemanlar için elde edilen ortalama gerilme-ortama şekil değiştirme diyagramları P-du diyagramları şeklinde ifade edilerek kullanılmıştır. Fiziksel olarak bu ifade elemanın aksenal şekil değiştirme yaptırılmasıyla ne kadar iç kuvvet oluşturacağını göstermektedir.

Her eğrilik adımında, yapısal elemanlarda oluşan aksel yer değiştirmeler (negatif veya pozitif uzama) ilgili adımdaki eğrilik değeri ile ilgili yapısal elemanın yatay tarafsız eksene göre düşey mesafesinin çarpımından elde edilmiştir. Elemana ait aksel yer değiştirme değerine bağlı normal kuvvet değeri daha önce elde edilen grafikten okunarak veya grafik değerleri arasından interpolasyon yapılarak Tablo 3.14’de yer alan hesaplama tablosundaki yerine yazılacaktır. Dengenin oluşması için kuvvet dengesinin sağlanması yani elemanların oluşturdukları iç kuvvetler toplamının sıfır olması gerekmektedir. İç kuvvetler toplamının sıfır olmaması verilen eğriliğe bağlı şekil değiştirme değerlerinin hatalı hesaplandığını, yani tarafsız eksenin yerinin hatalı alındığını göstermektedir. Tarafsız eksenin yeri Excel programında hedef ara komutu ile hesaplanarak bulunur. Elemanların oluşturdukları moment değeri ise elemanların oluşturdukları iç kuvvet değerlerinin tarafsız eksene olan uzaklıklarıyla çarpılmasıyla elde edilir. Kesite ait toplam moment değeri ise elemanlara ait moment değerlerinin toplamından oluşmaktadır. Tablo 3.14’te kutu kirişin ayrıklaştırılan elemanları için oluşturulan hesap tablosu gösterilmiştir.

Tablo 3.14. Kutu kiriş kademeli göçme analizi hesaplama tablosu

Eğrilik Artımı	0,0000386	Anlık Eğrilik Değeri	0,0000386	L	Anlık Tarafsız Eksen		356,40619	
				900	$du_{ij}$	$P_{ij}$		
El. Tipi	Adet	$Z_{ij}$	$\Delta z_i$	$\epsilon_{ij}$	$du_{ij}$	$P_{ij}$	$M_{ij}$	
		$Z_{ij}$	$Z_{ij}-Z_{Ti}$	$\epsilon_{ij-ilk} = \kappa_{ilk} \cdot \Delta z_i$	$\epsilon_{ij} \cdot L$	P-du diyagramı	$P_{ij} \cdot \Delta z_{ij}$	
SP1	1	714,239	0,35783280	0,000013835	0,01245163	1759,89657	629,7487304	
SP2	1	5,761	-0,35064519	-0,000013557	-0,0122015	-1936,3807	678,9825727	
P1	2	585	0,228593807	0,000008838	0,00795445	994,397566	227,3131253	
P2	2	450	0,093593807	0,000003619	0,00325681	721,027504	67,48370909	
P3	2	270	-0,08640619	-0,000003341	-0,0030067	-665,19881	57,47729681	
P4	2	135	-0,22140619	-0,000008560	-0,0077043	-963,1297	213,242881	
S1	2	540	0,183593807	0,000007098	0,00638857	448,067287	82,26237895	
S2	2	360	0,003593807	0,000000139	0,00012505	8,77081533	0,031520618	
S3	2	180	-0,17640619	-0,000006821	-0,0061385	-430,61329	75,9628503	
K1	1	718,5	0,362093807	0,000014000	0,0125999	795,494541	288,0436468	
K2	1	675	0,318593807	0,000012318	0,01108621	699,928111	222,9927615	
K3	1	718,5	0,362093807	0,000014000	0,0125999	795,494541	288,0436468	
K4	1	675	0,318593807	0,000012318	0,01108621	699,928111	222,9927615	
K5	1	1,5	-0,35490619	-0,000013722	-0,0123498	-779,70386	276,7217286	
K6	1	45	-0,31140619	-0,000012040	-0,0108361	-684,13743	213,0446325	
K7	1	1,5	-0,35490619	-0,000013722	-0,0123498	-779,70386	276,7217286	
K8	1	45	-0,31140619	-0,000012040	-0,0108361	-684,13743	213,0446325	
i : İterasyon numarası ; j : eleman numarası						Toplam	0,00	4034,110604

Şekil 3.32’de MST3.05 modeli için eğilme momenti-eğrilik eğrileri, IACS-CSR’nin geleneksel eleman ayrıklaştırması, tekil plak-tekil stifner ayrıklaştırması ve önerilen yöntem sonuçları ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiş, Tablo 3.15’de ise Nishihara’nın MST-3 ve MST-4 modelleri için test sonuçları ve diğer bilim insanları tarafından tahmin edilen göçme mukavemeti değerleri sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada önerilen yöntemle diğer sonuçların arasındaki farkın, hesaplamalarda elemanlarda ortalama seviyede başlangıç sehimlerinin olduğu kabulünün yapılmış olması ve böyle bir kabul ile beklendiği üzere plak elemanların daha düşük yükleme değerlerinde daha erken göçme değerlerine ulaşmış olmaları ve kutu kiriş gövdesinin daha düşük bir moment değerinde göçmesine yol açmıştır. Bu farkı oluşturan diğer bir sebep de eleman ayrıklaştırmasındaki farklılıktır. Geleneksel Smith yönteminde elemanlar köşe elemanlar ve plak-stifner birleşimi kiriş elemanlar olmak üzere iki tiptir. Çalışmamızda ise eleman ayrıklaştırması gelenekselin dışında tekil plak, tekil stifner, köşe eleman ve stifnerli panel eleman olarak yapılmıştır. Bu ayrıklaştırmada başlangıç sehimli plak ve panel elemanların göçme mukavemeti değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 3.32. MST-3 ve MST-4 modelleri için düşey eğilme momenti-eğrilik eğrileri

Tablo 3.15. Nishihara'nın kutu kiriş deney modellerinin maksimum moment hesaplaması için elde edilen farklı çalışma sonuçlarının karşılaştırılması

Model No	MST-3 (kN-m)	MST-4 (kN-m)
Yapılan Çalışma	Maksimum Moment kN-m	
Deneysel	585,884	941,600
Nishihara	588,873	925,657
Beghin	639,690	946,582
Lin	574,426	896,562
Paik	570,838	892,577
Lee	566,853	914,697
Lin's Ampirik	585,884	894,769
Tayyar-Geometrik Eğrilik	566,953 – 599,037	903,736
Tayyar-Geometrik Eğrilik Düzeltilmiş	577,714 – 612,887	920,675
IACS-CSR-Geleneksel Ayırıştırma	598,147	863,194
IACS-CSR Mevcut Çalışma Ayıklaştırma	558,813	828.550
Mevcut Çalışma-Ortalama İlkel Sehimli	441,718	704,561

Karşılaştırma tablosu incelendiğinde deney sonuçları ve diğer çalışmaların sonuçları ile başlangıç sehimleri ve farklı eleman ayırıştırması göz önüne alındığında, kabul edilebilir yakınlıkta sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Smith yöntemi temelli bu çözüm, önceki bölümlerde yapılan çalışmaların güvenilir biçimde Smith yöntemine geçiş yapılarak kullanılması için iyi bir referans oluşturmuştur.

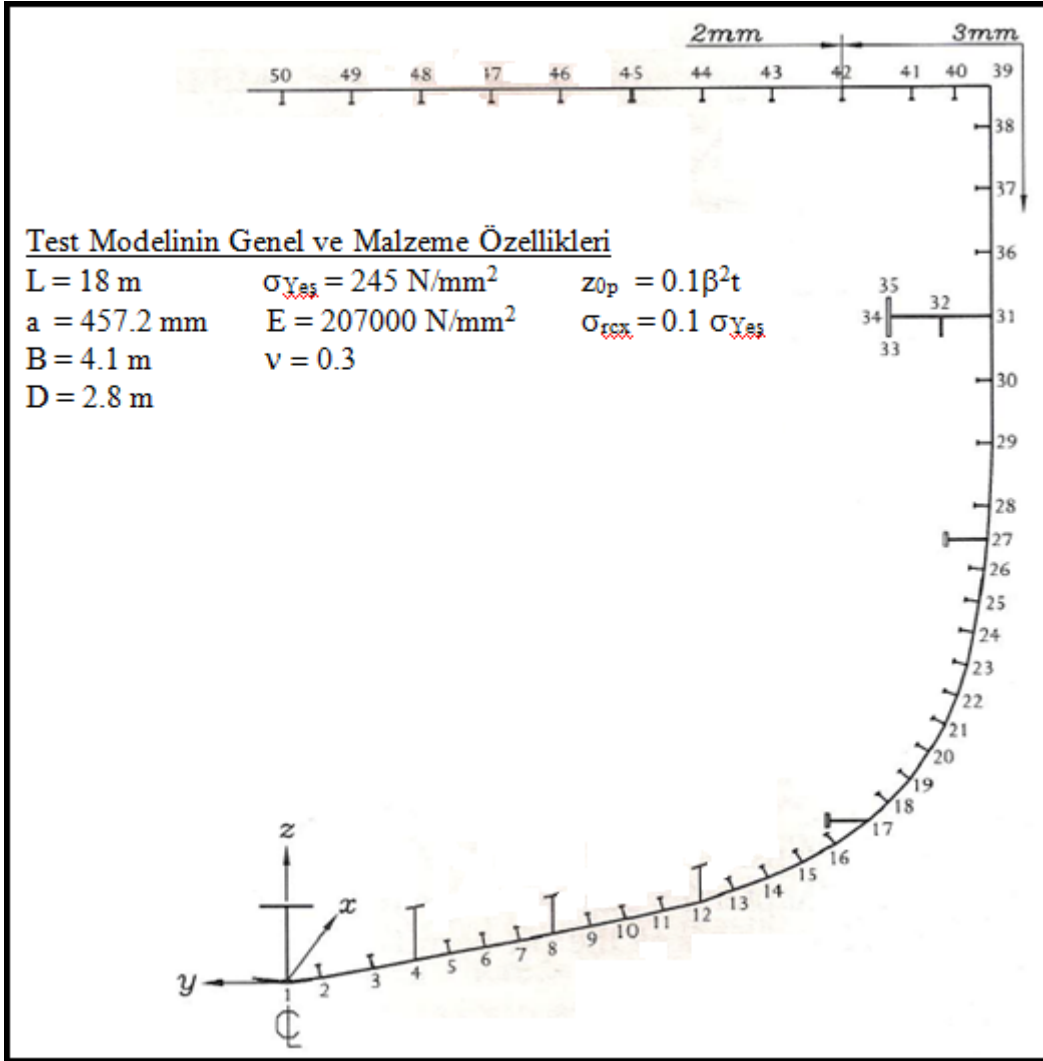
### 3.4. Önerilen Yöntemin Gemi Yapılarına Uygulanması

#### 3.4.1. Dow'un 1/3 Ölçekli Fırkateyn Modeli Testi-(Dow,1991)

Dow (1991), eğilme yüklerine maruz kalan tipik bir savaş gemisi gövde yapısını temsilen 1/3 ölçekli çelik bir fırkateyn modelinin testlerini gerçekleştirmiş ve sonuçlarını teorik mukavemet tahminleri ile karşılaştırarak öneriler sunmuştur. Aşağıda Şekil 3.33'de fırkateyn orta kesiti ve IACS-CSR'ye göre eleman numaralandırması, Tablo 3.16'da da bu elemanların özellikleri verilmiştir. Bu eleman ayırıştırması, fırkateyn kesitinin göçme mukavemeti değerinin IACS-CSR'ye göre hesaplanmasında, sonuçlarının da mevcut çalışma ile elde edilen sonuçla karşılaştırmasında kullanılmıştır. Bu modelin aşağıda



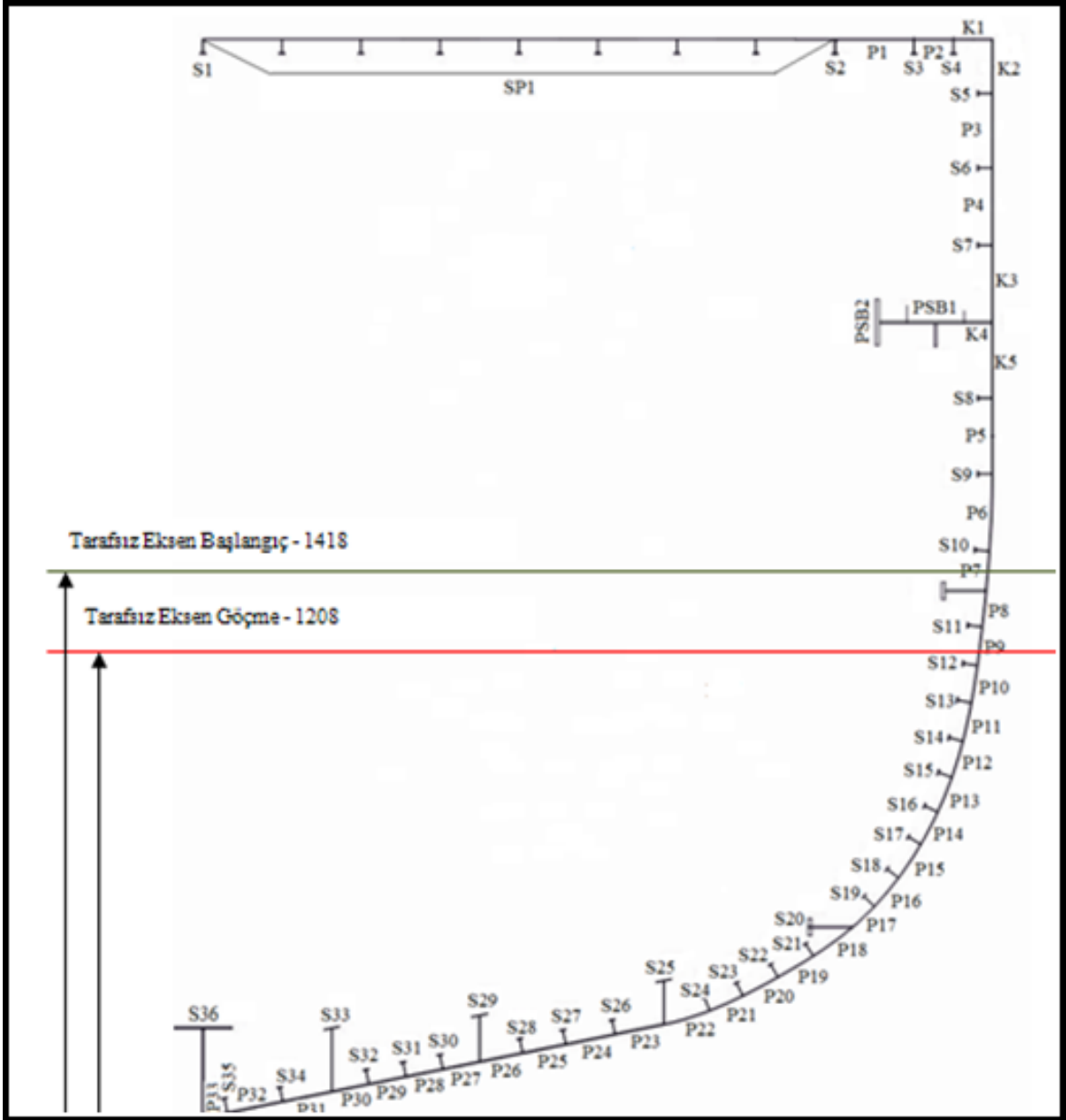
gösterilen orta kesiti bu çalışmada geliştirilecek yöntem ile analiz edilerek, test sonuçları ile karşılaştırmak suretiyle yöntemin doğruluğu kanıtlanmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda, Şekil 3.34'te firkateyn orta kesiti ve önerilen yöntemle göre eleman numaralandırması, Tablo 3.17'de de bu elemanların özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.33. Dow'un 1/3 Ölçekli firkateyn modelinin IACS-CSR kademeli göçme analizi içinayrıklaştırılan orta kesit eleman numaralandırması

Tablo 3.16. Dow'un 1/3 Ölçekli fırkateyn modelinin IACS-CSR kademeli göçme analizi için ayrıklaştırılan orta kesit elemanlarının özellikleri

El.No	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Parça	Plak b x t (mm)	Stifner Gövdesi h <sub>w</sub> x t <sub>w</sub> (mm)	Stifner Flenç b <sub>f</sub> x t <sub>f</sub> (mm)
1	0.0	0.0	0.0	1-2	99.2x3	228.6x3	152.4x5
2	0.0	-98.4	12.9	2-3	153.7x3	38.1x1.78	14x3.3
3	0.0	-249.3	41.9	3-4	127.2x3	38.1x1.78	14x3.3
4	0.0	-373.9	67.7	4-5	100.3x3	162x2	51x2
5	0.0	-472.3	87.1	5-6	103.5x3	38.1x1.78	14x3.3
6	0.0	-574.0	106.5	6-7	103.5x3	38.1x1.78	14x3.3
7	0.0	-675.7	125.8	7-8	100.3x3	38.1x1.78	14x3.3
8	0.0	-774.1	145.2	8-9	110.5x3	117.5x2	51x2
9	0.0	-882.3	167.7	9-10	104.2x3	38.1x1.78	14x3.3
10	0.0	-984.0	190.3	10-11	108.1x3	38.1x1.78	14x3.3
11	0.0	-1089.0	216.1	11-12	111.2x3	38.1x1.78	14x3.3
12	0.0	-1197.0	241.9	12-13	101.5x3	111x2	51x2
13	0.0	-1292.0	277.4	13-14	108.8x3	38.1x1.78	14x3.3
14	0.0	-1394.0	316.1	14-15	109.6x3	38.1x1.78	14x3.3
15	0.0	-1492.0	364.5	15-16	109.8x3	38.1x1.78	14x3.3
16	0.0	-1588.0	419.4	16-17	123.2x3	38.1x1.78	14x3.3
17	0.0	-1686.0	493.5	17-18	78.3x3	114x5	44.5x9.5
18	0.0	-1742.0	548.4	18-19	99.0x3	38.1x1.78	14x3.3
19	0.0	-1807.0	622.6	19-20	103.4x3	38.1x1.78	14x3.3
20	0.0	-1863.0	709.7	20-21	95.6x3	38.1x1.78	14x3.3
21	0.0	-1909.0	793.5	21-22	97.3x3	38.1x1.78	14x3.3
22	0.0	-1945.0	883.9	22-23	98.1x3	38.1x1.78	14x3.3
23	0.0	-1975.0	977.4	23-24	101.9x3	38.1x1.78	14x3.3
24	0.0	-1994.0	1077.4	24-25	98.2x3	38.1x1.78	14x3.3
25	0.0	-2011.0	1174.2	25-26	100.9x3	38.1x1.78	14x3.3
26	0.0	-2024.0	1274.2	26-27	94.0x3	38.1x1.78	14x3.3
27	0.0	-2034.0	1367.7	27-28	103.5x3	114x5	44.5x9.5
28	0.0	-2040.0	1471.0	28-29	200.2x3	38.1x1.78	14x3.3
29	0.0	-2050.0	1671.0	29-30	196.7x3	38.1x1.78	14x3.3
30	0.0	-2050.0	1867.7	30-31	196.8x3	38.1x1.78	14x3.3
31	0.0	-2050.0	2064.5	31-32	146x6	-	-
32	0.0	-1904.0	2064.5	32-33	146x6	60x6	-
33	0.0	-1758.0	2004.5	33-34	60x10	-	-
34	0.0	-1758.0	2064.5	34-35	60x10	-	-
35	0.0	-1758.0	2124.4	35-36	200x3	-	-
36	0.0	-2050.0	2264.5	36-37	200x3	38.1x1.78	14x3.3
37	0.0	-2050.0	2464.5	37-38	193.6x3	38.1x1.78	14x3.3
38	0.0	-2050.0	2658.1	38-39	141.9x3	38.1x1.78	14x3.3
39	0.0	-2050.0	2800.0	39-40	101.7x3	-	-
40	0.0	-1948.3	2800.0	40-41	124x3	38.1x1.78	14x3.3
41	0.0	-1824.3	2800.0	41-42	202.7x3	38.1x1.78	14x3.3
42	0.0	-1621.6	2800.0	42-43	202.7x2	38.1x1.78	14x3.3
43	0.0	-1418.9	2800.0	43-44	202.7x2	38.1x1.78	14x3.3
44	0.0	-1216.2	2800.0	44-45	202.7x2	38.1x1.78	14x3.3
45	0.0	-1013.5	2800.0	45-46	202.7x2	38.1x1.78	14x3.3
46	0.0	-810.8	2800.0	46-57	202.7x2	38.1x1.78	14x3.3
47	0.0	-608.1	2800.0	47-48	202.7x2	38.1x1.78	14x3.3
48	0.0	-405.4	2800.0	48-49	202.7x2	38.1x1.78	14x3.3
49	0.0	-202.7	2800.0	49-50	202.7x2	38.1x1.78	14x3.3
50	0.0	0.0	2800.0	-	-	38.1x1.78	14x3.3



Şekil 3.34. Dow'un 1/3 Ölçekli fırkateyn modelinin mevcut çalışma kademeli göçme analizi için ayrıklaştırılan orta kesit eleman numaralandırması

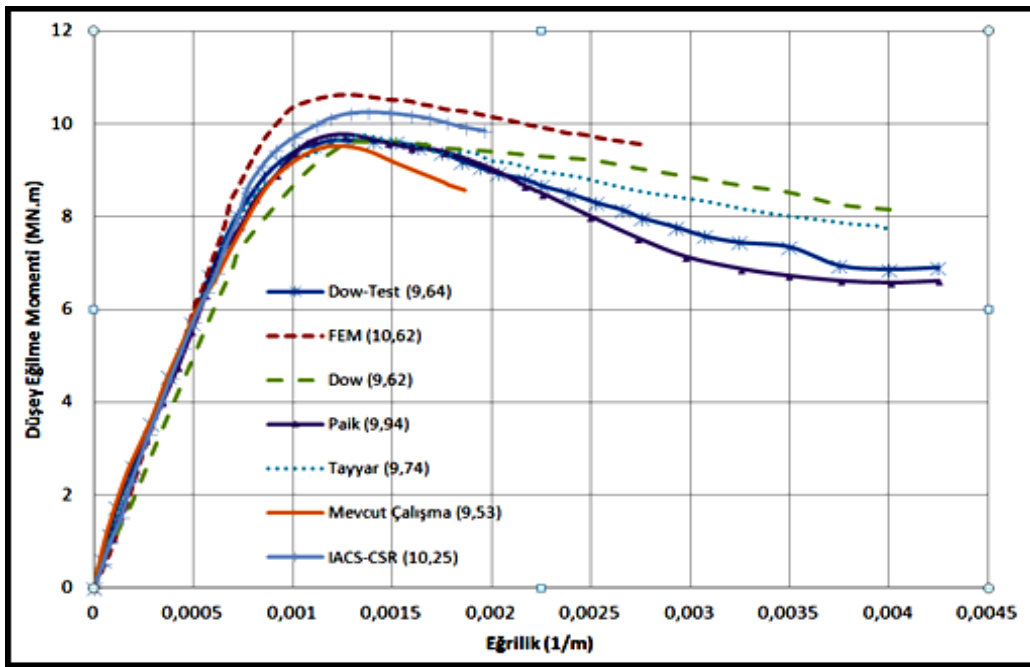
Tablo 3.17. 1/3 Ölçekli fırkateyn modelinin mevcut çalışma kademeli göçme analizi için ayrılaştırılan orta kesit elemanlarının özellikleri

Eleman No	Eleman Adı	B (mm)	b (mm)	t <sub>eş</sub> (mm)	n <sub>sx</sub>	h <sub>w</sub> (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	b <sub>f</sub> (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	σ <sub>Yeş</sub> (MPa)	σ <sub>rcx</sub> (MPa)	Z <sub>o</sub> (mm)	σ-ε Davranış
1	S1	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
2	S2	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
3	S3	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
4	S4	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
5	S5	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
6	S6	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
7	S7	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
8	S8	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
9	S9	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
10	S10	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	1*
11	S11	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**/1*
12	S12	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
13	S13	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
14	S14	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
15	S15	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
16	S16	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
17	S17	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
18	S18	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
19	S19	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
20	S20	-	-	-	-	114	5	44,5	9,5	245	-24,5	-	2**
21	S21	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
22	S22	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
23	S23	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
24	S24	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
25	S25	-	-	-	-	111	2	51	2	245	-24,5	-	2**
26	S26	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
27	S27	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
28	S28	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
29	S29	-	-	-	-	117,5	2	51	2	245	-24,5	-	2**
30	S30	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
31	S31	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
32	S32	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
33	S33	-	-	-	-	162	2	51	2	245	-24,5	-	2**
34	S34	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
35	S35	-	-	-	-	38,1	1,78	14	3,3	245	-24,5	-	2**
36	S36	-	-	-	-	228,6	3	152,4	5	245	-24,5	-	2**
37	S37	-	-	-	-	114	5	44,5	9,5	245	-24,5	-	2**
38	P1	-	202,7			-	-	-	-	245	-24,5	1,621	1**

Tablo 3.17'nin devamı

39	P2	-	163,35			-	-	-	-	245	-24,5	1,053	1*
40	P3	-	167,75			-	-	-	-	245	-24,5	1,110	1*
41	P4	-	196,8			-	-	-	-	245	-24,5	1,528	1*
42	P5	-	196,75	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	1,527	1*
43	P6	-	198,45	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	1,554	1*
44	P7	-	151,85	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,910	T.E./1*
45	P8	-	98,75	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,385	2**
46	P9	-	97,45	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,375	2**
47	P10	-	99,55	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,391	2**
48	P11	-	100,05	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,395	2**
49	P12	-	100	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,395	2**
50	P13	-	97,7	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,377	2**
51	P14	-	96,45	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,367	2**
52	P15	-	99,5	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,391	2**
53	P16	-	101,2	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,404	2**
54	P17	-	88,65	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,310	2**
55	P18	-	100,75	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,400	2**
56	P19	-	116,5	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,535	2**
57	P20	-	109,7	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,475	2**
58	P21	-	109,2	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,470	2**
59	P22	-	105,15	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,436	2**
60	P23	-	106,35	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,446	2**
61	P24	-	109,65	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,474	2**
62	P25	-	106,15	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,445	2**
63	P26	-	107,35	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,455	2**
64	P27	-	105,4	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,438	2**
65	P28	-	101,9	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,410	2**
66	P29	-	103,5	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,423	2**
67	P30	-	101,9	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,410	2**
68	P31	-	113,75	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,510	2**
69	P32	-	140,45	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,778	2**
70	P33	-	126,45	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	0,631	2**
72	SP1	1621,6	202,70	3	-	38.1	1,78	14	3,3	245	-24,5	3,49	1*
73	PSB1	-	146	6	1	60	6	-	-	245	-24,5	0,42	1*
74	PSB2	-	120	10	1	73	6	-	-	245	-24,5	0,17	1*
75	K1		101,7	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	-	1*
76	K2		101,7	3						245	-24,5	-	1*
77	K3		173,00	3						245	-24,5	-	1*
78	K4		73,00	6	-	-	-	-	-	245	-24,5	-	1*
79	K5	-	171,40	3	-	-	-	-	-	245	-24,5	-	1*
1*: Elasto-plastik davranış 2**: Elastik-tam plastik davranış T.E.: Tarafsız Eksen													

Deneysel çalışma sonucunda 9,64 MN.m değeri göçme moment değeri olarak ölçülürken, lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizde 10,62 MN.m, IACS-SCR ile yapılan kademeli göçme analizinde 9.83 MN.m, Paik-ALPS/HULL ile yapılan analizde 9,94 MN.m, Dow'un kendi yöntemi ile 9.62 MN.m, Tayyar'ın geometrik eğrilik yöntemi ile 9.74, klasik kiriş yönteminden 5.59 MN.m ve düzeltilmiş Paik-Mansour yönteminden 9,35 MN.m değerleri elde edilmiştir. Önerilen yöntemde ise 9.53MN.m değeri elde edilmiş ve kabul edilebilir yakınlıkta olduğu Şekil 3.35'te gösterilmiştir.

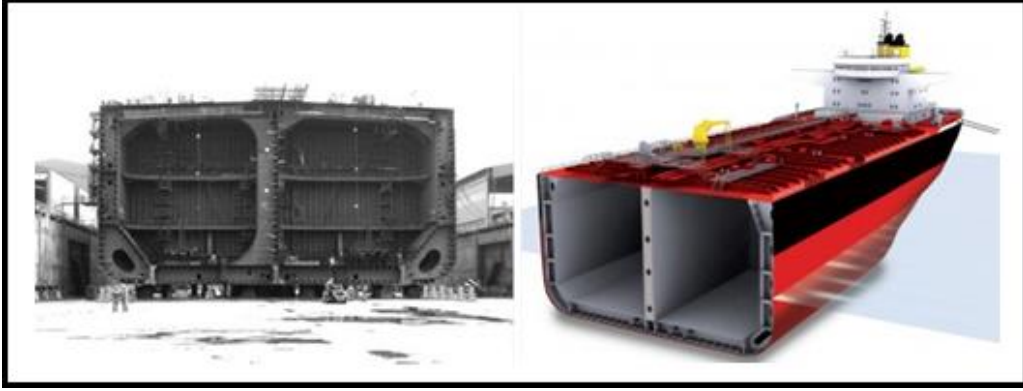


Şekil 3.35. Dow'un 1/3 ölçekli firkateyn modelinin kademeli göçme analizinden elde edilen karşılaştırmalı moment-eğrilik eğrisi sonuçları

### 3.4.2. Çift Cidarlı Petrol Tankeri Göçme Mukavemeti Tahmini

Dalma (2009) yılında tamamladığı tez çalışması kapsamında örnek kanıtlama çalışması olarak Şekil 3.36'da örnek orta kesiti gösterilen çift cidarlı bir petrol tankerinin gövde kirişinin göçme dayanımını IACS-CSR kuralları doğrultusunda ve lineer olmayan sonlu elemanlar analizi de kullanarak tahmin etmeye çalışmıştır. Bu kısımda, ilk olarak IACS-CSR'ye göre kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiş, ardından çalışmamızda kullanılan yöntem ile aynı geminin göçme eğilme moment değeri hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu tanker örneği analizinin kapsamında, IACS-CSR'de

kullanılmaya başlanan korozyon paylarını dikkate alan net kalınlık yaklaşımı anlatılmış ve bu yaklaşım ile elemanlar yeniden boyutlandırarak kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiştir.



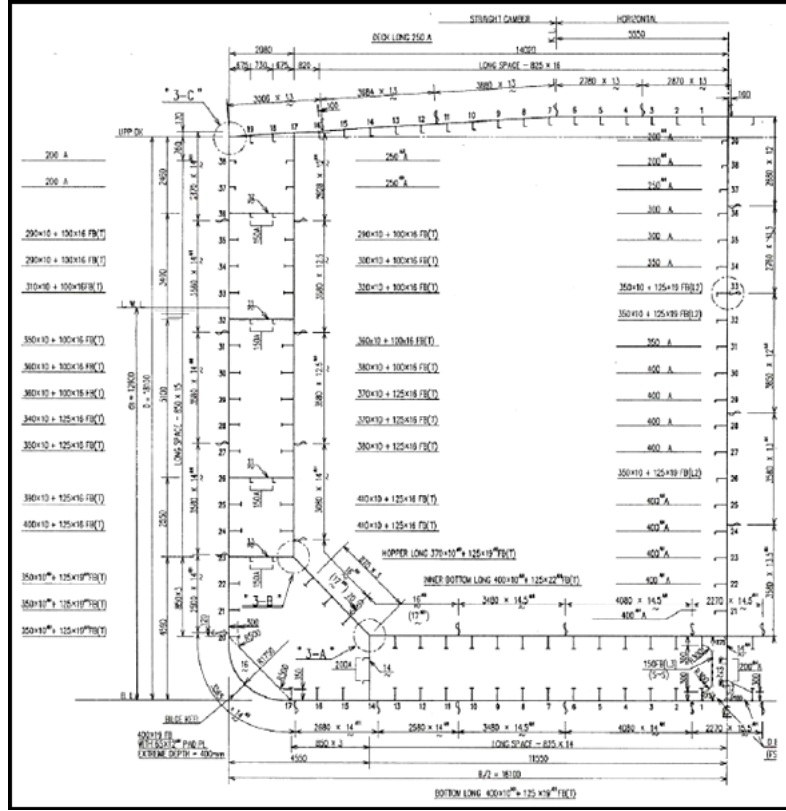
Şekil 3.36. Çift cidarlı bir petrol tankerinin orta kesit görünümü

Hesaplama ele alınan gemi 47326 DWT tonaja ve devamlı ana güverte altında 6 adet petrol tankına sahiptir. Geminin omurgası IACS-CSR (2006) kurallarının yürürlüğe girmesinden iki yıl önce 2004 yılında ABS klas kuruluşu kontrolünde, kızağa konmuştur. Tablo 3.18’de geminin diğer ana özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.18. Çift cidarlı petrol tankerinin ana özellikleri

Tam Boy (LOA)	182.50	Enine Çerçeve Arası Mesafe (m)	4.055
Kaimeler Arası Boy (LBP)	172.00	Stifnerler Arası Mesafe (Güverte, Dip, İç Dip)	0.825
Hesap Boyu ( $L_H$ )	171.69	Stifnerler Arası Mesafe (Borda, İç Cidar, Merkez Perde)	0.850
Genişlik (B)	32.20	Hesaplama Tonajı (DWT)	47326
Derinlik (D)	18.10	Tasarım Tonajı (DWT)	40854
Tasarım Draft ( $T_T$ )	11.30	Hesaplama Draftı ( $T_H$ )	12.60

Boyuna sistemde inşa edilmiş olan geminin orta kesiti, ana güverte yapısı, çift dip yapısı, bordalarda balast tanklarını bulunduran çift cidar yapısı ve merkezde boyuna perde yapısından oluşmaktadır. Kademeli göçme analizinin de uygulanacağı iki enine çerçeve arası mesafe (L) 4050 mm’dir. Aşağıda Şekil 3.37’de ise geminin onaylı orta kesit resmi gösterilmiştir.



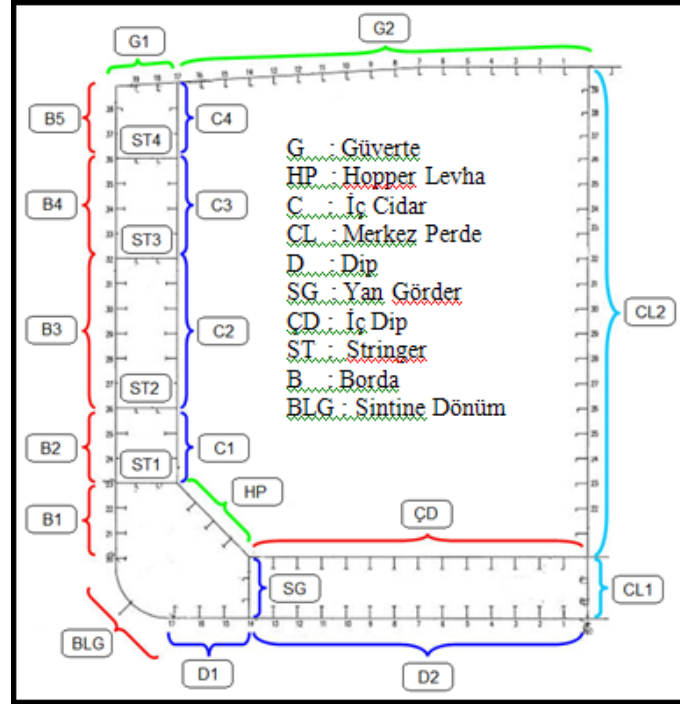
Şekil 3.37. Petrol tankerinin projelendirilen gerçek orta kesit resmi

### 3.4.2.1. IACS-CSR Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama

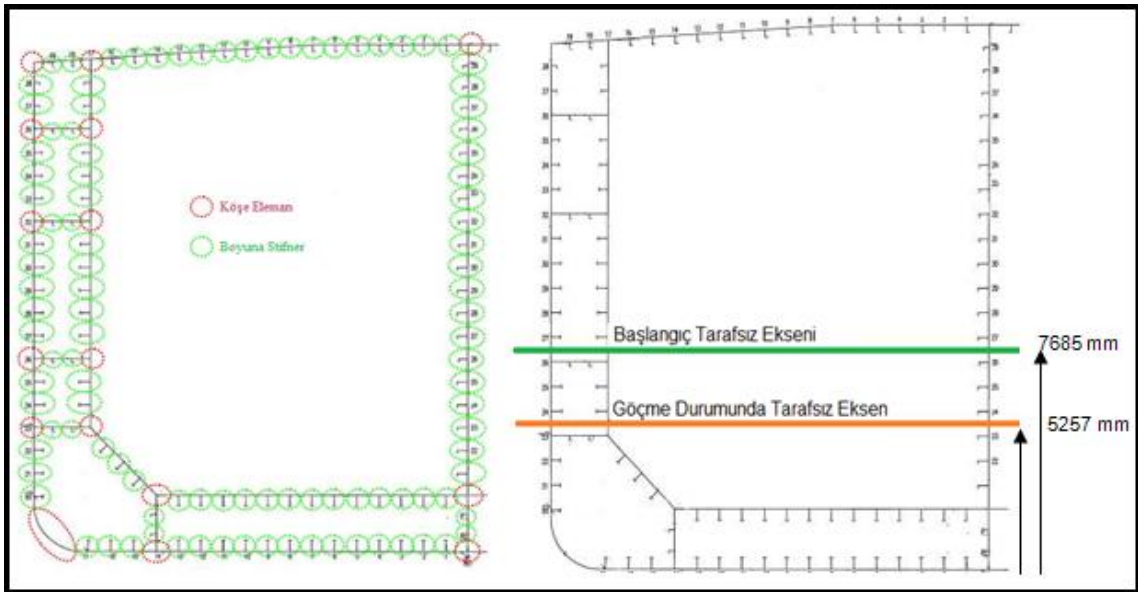
Geminin orta kesiti, orijinalinde olduğu gibi çalışmamızda da, hesaplamalarda kullanılmak üzere temel desteklenmiş panel elemanlara ayrılmıştır. Orta kesitte bulunan elemanlarda, minimum akma değeri  $245 \text{ N/mm}^2$  olan gemi inşa çeliği ve  $315 \text{ N/mm}^2$  olan yüksek mukavemetli çelik olmak üzere iki tür çelik kullanılmıştır. Hesaplamalarda tüm elemanların kalınlıkları IACS-CSR kapsamında uygulanan “net kalınlık yaklaşımı” ile tekrar belirlenmiş, ilkel sehim değerleri Smith’in ortalama ilkel sehim değeri formülü  $(0,1\beta^2.t)$  ile belirlenmiştir. Artık kaynak gerilme değeri de ilgili elemanın malzeme akma değerinin  $1/10$ 'u olarak  $(\sigma_{rcx} = 0,1\sigma_{Yes})$  alınmıştır.

Bu temel elemanların, tekil eleman numaraları ile birlikte gösterimi Şekil 3.38’de, IACS-CSR hesaplaması için kullanılan orta kesit eleman ayrıklaştırması Şekil 3.39’de net kalınlık yaklaşımı doğrultusunda, hesaplamalarda kullanılacak net kalınlık hesaplanırken plak ve stifner elemanların kalınlıklarına eklenecek korozyon artımı değerleri Şekil 3.40’de sunulmuştur. Desteklenmiş panel elemanların özellikleri de ayrıca Tablo 3.18’de verilmiştir.





Şekil 3.38. Petrol tankeri orta kesitinin kademeli göçme analizi için temel panel eleman ayrıklaştırması



Şekil 3.39. IACS-CSR hesaplaması için eleman ayrıklaştırması ve tarafsız eksen konumları

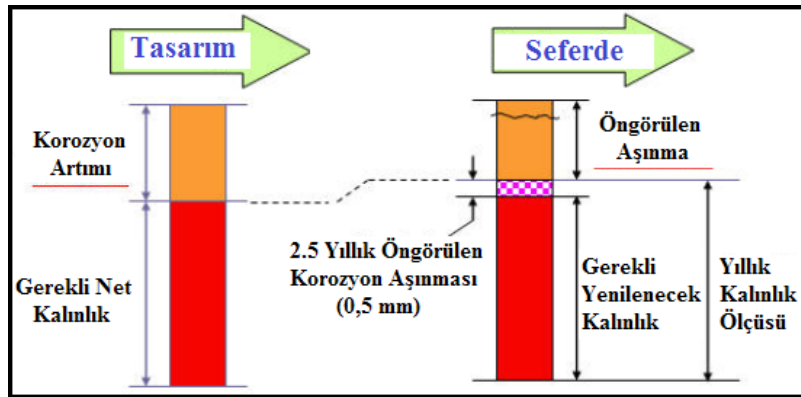
#### 3.4.2.1.1. Korozyon Payları ve Net Kalınlık Yaklaşımı

Gerek Uluslararası Klas Kuruluşları Birliği'nin genelgeçer kuralları gerekse ülkelerin kendi klas kuralları, özellikle sıvı yük taşıyan ticari gemilerin tasarım sürecinde eleman

boyutlandırması yaparken muhtemel korozyon kayıplarını göz önüne alarak, kesitteki yerlerine ve görevlerine bağlı olarak elemanların kalınlıklarında artırıma giderler. Bu artış değerlerine, tecrübeler, zamanla ölçülen gerçek korozyon değerlerinin istatistiksel değerlendirmeleri, taşınan sıvı yükün mahiyeti ve geminin tasarımda öngörülen sefer ömrüne göre karar verilmektedir. Ancak bu korozyon payları mukavemet hesaplamalarında doğrudan kullanılmamaktadır. Burada devreye net kalınlık terimi girmektedir.

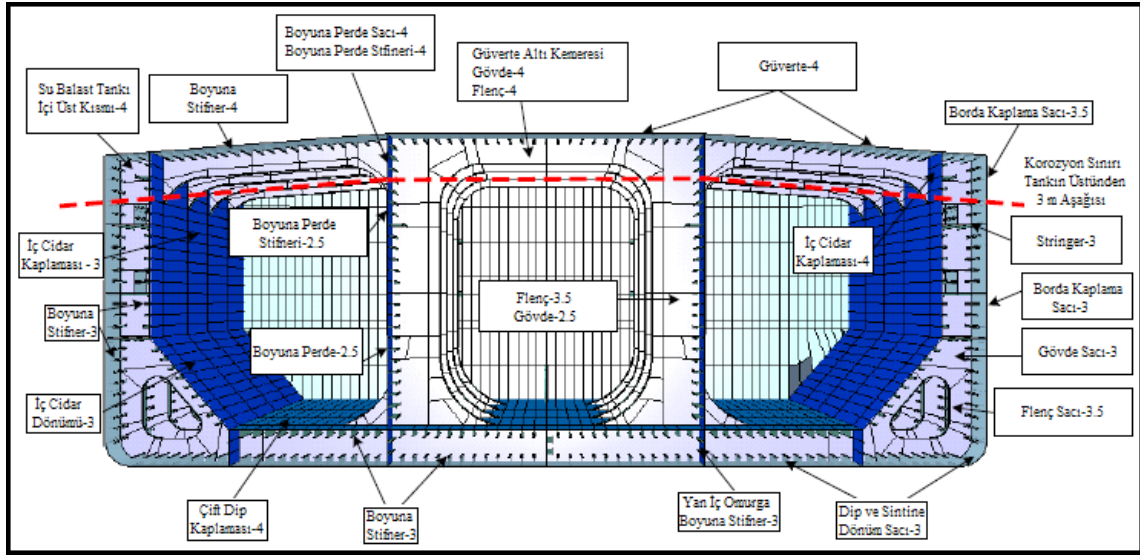
Net kalınlık yaklaşımının felsefesi, yeni inşa edilecek bir geminin mukavemet hesaplamaları aşamasında kullanılacak kalınlık değerleri ile inşa aşamasında kabul edilen minimum kalınlık değerleri arasında doğrudan bir bağıntı kurmaktır. Ayrıca, korozyon aşınması açısından geminin ömrü süresince durumunu korumasını sağlamayı da amaçlamaktadır. Bu yaklaşım Şekil 3.40'da gösterilmiştir.

Bunların yanında, bu yaklaşım yerel ve global korozyonu birbirinden ayırmaktadır. Yerel korozyon, tekil stifner veya plak gibi yerel elemanların düzgün korozyon aşınması olarak tanımlanırken, global korozyon ise birincil destek elemanı veya gövde kirişinin ortalama bütün korozyon aşınması olarak tanımlanmaktadır. Birincil destek elemanlarının ve gemi gövdesi enine kesitinin global ortalama korozyon aşınması değeri, bütün yapısal elemanların kalınlıklarının kurallara göre belirlenen korozyon artımı değerlerinin yarısı kadar azaltılması ile belirlenir. Bu kabul korozyon artımı değerlerinin, başka bir deyişle net kalınlık yaklaşımının gemi orta kesitinin göçme mukavemeti değerinin hesaplanmasında uygulanmaktadır. Özetle belirtmek gerekirse, çalışmamız kapsamında, kesiti oluşturan yapısal elemanların brüt kalınlıklarından, korozyon artımı değerinin yarısı çıkarılarak göçme mukavemeti hesaplamalarında kullanılan net kalınlık değerleri belirlenmiştir.

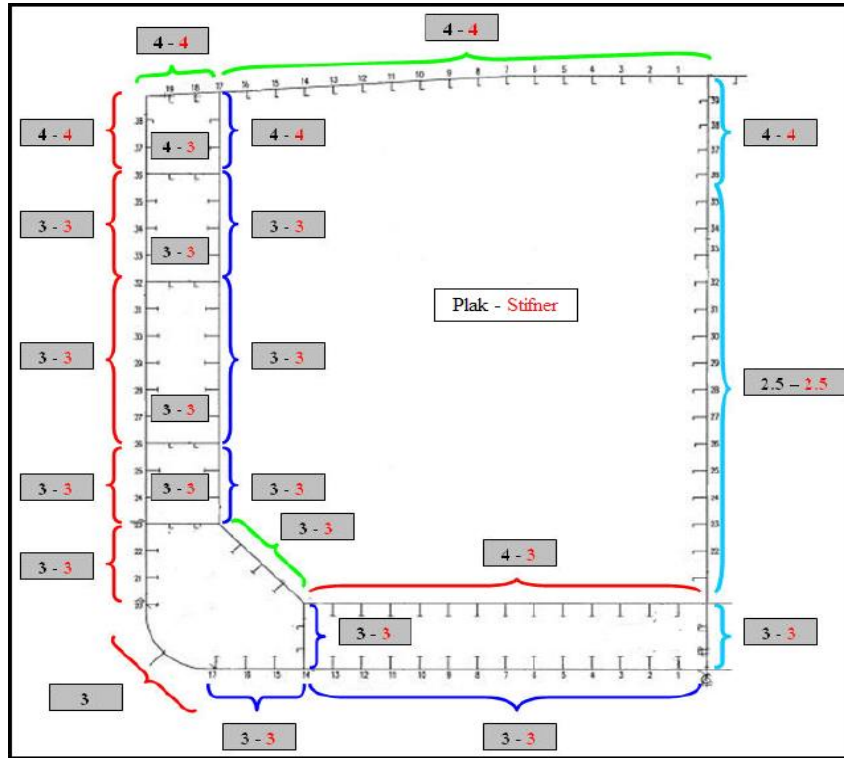


Şekil 3.40. Net kalınlık yaklaşımı

Kurallarla ilgili bu açıklamalar doğrultusunda tipik bir petrol tankerinin orta kesit elemanlarında yerlerine göre değişen korozyon artımı değerleri Şekil 3.41'de, örnek çalışmamızda seçilen petrol tankerinin elemanlarındaki korozyon artımı değerleri de Şekil 3.42'de gösterilmiştir.



Şekil 3.41. Tipik bir petrol tankerinin orta kesitini oluşturan elemanlarda korozyon artımı



Şekil 3.42. Net kalınlık hesaplanmasında kullanılacak korozyon artımları

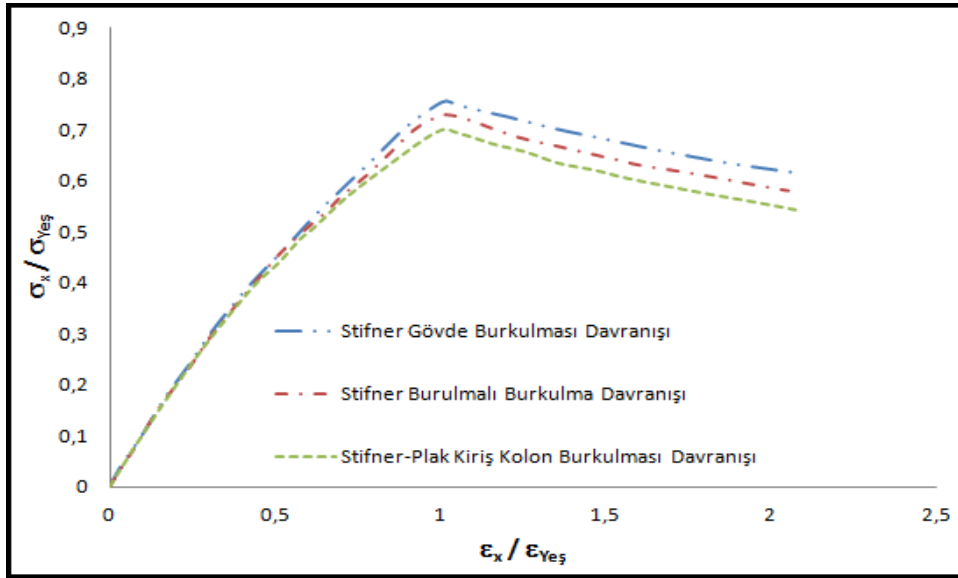
Tablo 3.19. Çift cidarlı petrol tankerinin ayrılaştırılan elemanlarının genel özellikleri

Panel Adı	Stifner Arası Mesafe (mm)	Stifner Adı	Plak Kalınlığı ( $t_p / t_{net}$ ) mm	Stifner Gövdesi ( $h_w \times t_w / t_{w-net}$ ) mm	Stifner Flenç ( $b_f \times t_f / t_{f-net}$ ) mm
G1	703,83	G1-18	13 / 11	235x9 / 7	90x15 / 13
		G1-19			
G2	825	G2-1 / G2-15	13 / 11	235x9 / 7	90x15 / 13
	822,5				
B1	715	B1-20	14 / 12,5	331x10 / 8,5	125x19 / 17,5
	850	B1-21			
		B1-22			
B2	850	B2-24	14 / 12,5	384x10 / 8,5	125x16 / 14,5
		B2-25		374x10 / 8,5	
B3	850	B3-27	14 / 12,5	334x10 / 8,5	125x16 / 14,5
		B3-28		324x10 / 8,5	
		B3-29		344x10 / 8,5	100x16 / 14,5
		B3-30		344x10 / 8,5	
		B3-31		334x10 / 8,5	
B4	850	B4-33	14 / 12,5	294x10 / 8,5	100x16 / 14,5
		B4-34		274x10 / 8,5	
		B4-35		274x10 / 8,5	
B5	850	B5-37	14 / 12	186x8 / 6	90x14 / 12
	805	B5-38			
BLG	-	BLG	14 / 12,5	-	-
D1	850	D1-15	14	381x10 / 8,5	125x19 / 17,5
	675	D1-16			
		D1-17			
D2	825	D2-1	14 / 12,5 15,5 / 14	381x10 / 8,5	125x19 / 17,5
		D2-2	14 / 12,5		
		D2-3			
		D2-4			
		D2-5	14 / 12,5 14,5 / 13		
		D2-6			
		D2-7	14,5 / 13		
		D2-8			
		D2-9			
		D2-10	14 / 12,5 14,5 / 13		
		D2-11			
		D2-12	14 / 12,5		
D2-13					
ÇD	825	ÇD2-1	14,5 / 12,5	378x10 / 8,5	125x22 / 20,5
		ÇD2-2			
		ÇD2-3			
		ÇD2-4			
		ÇD2-5			
		ÇD2-6			
		ÇD2-7			
		ÇD2-8			
		ÇD2-9			
		ÇD2-10			
		ÇD2-11	14,5 / 12,5 16 / 14		
		ÇD2-12	16 / 14		
		ÇD2-13			

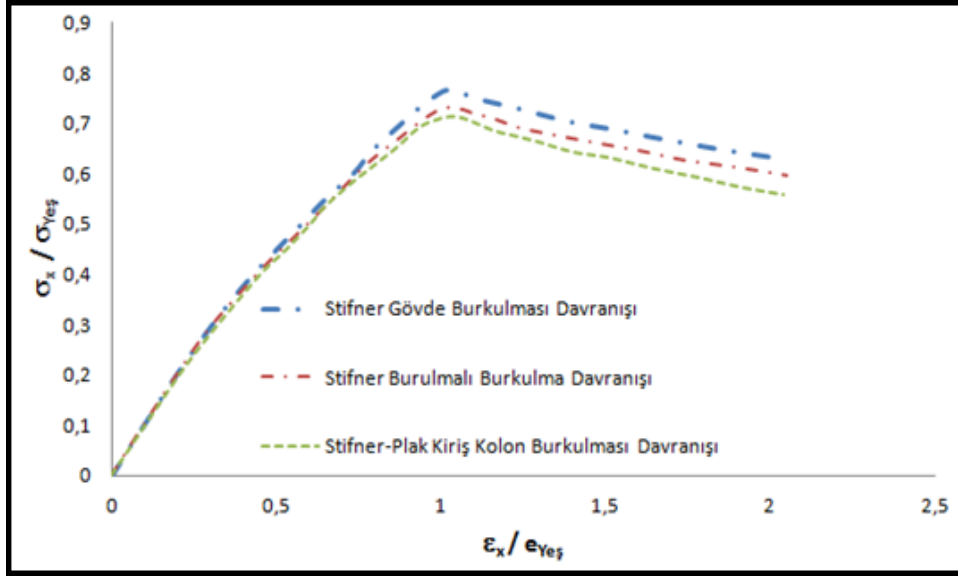
Tablo 3.19'un devamı

CL1	850	CL1-1	14 / 12,5	186x8 / 6,5	90x14 / 12,5
		CL1-2			
CL2	830	CL2-21	13,5 / 12,25	384x11,5 / 10,25	100x16 / 14,75
		CL2-22			
		CL2-23			
	850	CL2-24	13,5 / 12,25 13 / 11,75	331x10 / 8,75	125x19 / 17,75
		CL2-25	13 / 11,75		
		CL2-26		384x11,5 / 10,25	100x16 / 14,75
		CL2-27	12 / 10,75		
		CL2-28		13 / 11,75 12 / 10,75	333x12 / 10,75
		CL2-29	12 / 10,75		
		CL2-30		331x10 / 8,75	125x19 / 17,75
		CL2-31	12 / 10,75 11,5 / 10,25		
		CL2-32		333x12 / 10,75	100x17 / 15,75
		CL2-33	11,5 / 10,25		
		CL2-34		284x10 / 8,75	90x16 / 14,75
	CL2-35	12 / 10,75			
	815		CL2-36	11,5 / 10,25 12 / 10,75	235x9 / 7,75
	780	CL2-37	12 / 10,75		
775	CL2-38	186x8 / 6,75		90x14 / 12,75	
	CL2-39				
SG	850	SG-1	14 / 12,50	186x8 / 6,5	90x14 / 12,5
		SG-2			
HP	870	HP-1	16 / 14,5	351x10 / 8,5	125x19 / 17,5
	890,76	HP-2			
		HP-3			
C1	850	C3-24	14 / 12,5 16 / 14,5	394x10 / 8,5	125x16 / 14,5
		C3-25	14 / 12,5		
C2	850	C2-27	12,5/11 14 / 12,5	364x10 / 8,5	125x16 / 14,5
		C2-28	12,5 / 11	354x10 / 8,5	
		C2-29		354x10 / 8,5	
		C2-30		364x10 / 8,5	100x16 / 14,5
		C2-31		344x10 / 8,5	
C3	850	C3-33		12,5 / 11	304x10 / 8,5
		C3-34	284x10 / 8,5		
		C3-35	274x10 / 8,5		
C4	850	C4-37	12 / 10	235x9 / 7	90x15 / 13
	869	C4-38			
ST1	702,5	ST1-18	13 / 11,5	141x9 / 7,5	90x9 / 7,5
		ST1-19			
ST2	702,5	ST1-18	11 / 9,5	141x9 / 7,5	90x9 / 7,5
		ST1-19			
ST3	702,5	ST1-18	11 / 9,5	141x9 / 7,5	90x9 / 7,5
		ST1-19			
ST4	702,5	ST1-18	12 / 10	141x9 / 7,5	90x9 / 7,5
		ST1-19			

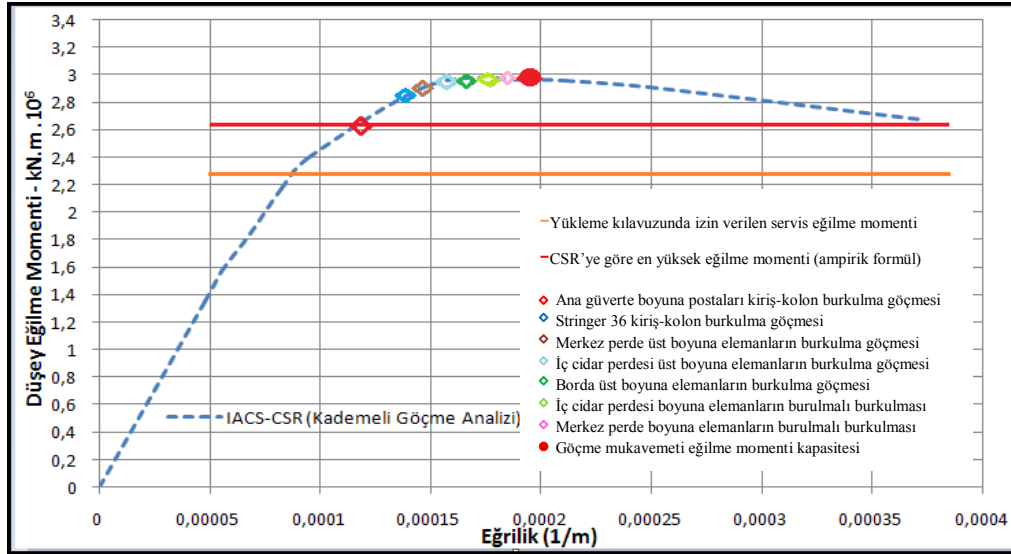
İlk olarak, IACS-CSR'ye göre gerçekleştirilen kademeli göçme analizine göre orta kesit tarafsız ekseninin yeri belirlenmiş ve yukarıda gösterilen eleman ayrıklaştırmasına göre Excel programında oluşturulan hesap tablosu ile kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.43'te ana güvertede yer alan, bası kuvveti altındaki L-kesit boyuna stifnerler için olası üç burkulma durumuna göre gerilme-şekil değiştirme eğrisi, Şekil 3.44'te iç cidarda bulunan, bası kuvveti altındaki T-kesit boyuna stifnerin (C2-30) olası üç burkulma durumuna göre gerilme-şekil değiştirme eğrisi, Şekil 3.45'de ise çökme durumuna (dalga çukuru) göre elde edilen "Düşey Eğilme Momenti-Eğrilik" eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.43. Ana güvertede yer alan, L-kesit boyuna stifnerler için olası üç burkulma tipine göre gerilme-şekil değiştirme eğrisi



Şekil 3.44. İç cidarda bulunan, T-kesit boyuna stifnerin (C2-30) olası üç burkulma tipine göre gerilme-şekil değiştirme eğrisi



Şekil 3.45. IACS-CSR'ye göre elde edilen moment-eğrilik eğrisi

### 3.4.2.2. Önerilen Yöntem Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama

IACS-CSR hesaplamasının ardından, çalışmamızda önerilen yöntem kapsamında kademeli göçme analizi gerçekleştirmek üzere eleman ayrıklaştırması başlangıç tarafsız eksen mesafesine göre yeniden düzenlenmiştir. Hesaplamanın ilk aşamasında, ayrıklaştırılan stifnerli panel, tekil panel, tekil stifner, plak-stifner birleşimi kiriş kolon

eleman ve köşe elemanların  $\sigma_x$ - $\epsilon_x$  (P-du) eğrileri önceki bölümlerde anlatıldığı gibi elde edilmiştir. Çökme durumuna göre hesap yapıldığı için tarafsız eksenin üstünde kalan elemanlar için lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılırken, tarafsız eksen altında kalan elemanlar için elastik-tam plastik malzeme davranışı eğrileri kullanılmıştır. Plak ve stifnerlerin farklı minimum akma gerilmesi değerine sahip olması durumlarında stifnerli panel elemanlar için eşdeğer akma gerilmesi değeri kullanılmıştır. Ayrıca Tablo3.19'dan da görüleceği üzere levha kalınlıkları da her yerde aynı olmadığından ilgili panel için eşdeğer kalınlık hesaplanarak kullanılmıştır. Yine aynı tablodan görülebileceği üzere, aynı temel stifnerli panel eleman üzerinde farklı boyutlara sahip stifnerler de kullanılmıştır. Bu nedenle Smith yöntemi ile hesaplamada kullanılacak eleman ayrıklaştırılmasında tarafsız eksenin yeri kadar, bu hususa da dikkat edilmiştir. Ayrıca, yukarıda söz edilen korozyon paylarının göçme mukavemetine olan etkilerini görmek amacıyla kalınlıklar değiştirilerek iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Hesaplama tablosunu oluşturacak 19 adet stifnerli panel eleman, 14 tekil plak eleman, 31 tekil stifner eleman ve 19 köşe elemanın özellikleri Tablo 3.20'de sunulmuştur.



Tablo 3.20. Çift cidarlı petrol tankerinin çökme durumunda kademeli göçme analizi için kullanılacak eleman tablosu

Eleman Adı	Stifner ID	B (mm)	b (mm)	$t_{eş}/ t_{eş-net}$ (mm)	$n_{sx}$	$h_w$ (mm)	$t_w/ t_{w-net}$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_f/ t_{f-net}$ (mm)	$\sigma_{Yeş}$ (MPa)	$\sigma_{rcx}$ (MPa)	$z_o$ (mm)	$\sigma-\varepsilon$
SP <sub>1</sub>	D2	11550	825	14,38/12,88	13	381	10/8,5	125	19/17,5	315	31,5	8,29	2**
SP <sub>2</sub>	D1-14/17	2550	850	14/12,5	2	381	10/8,5	125	19/17,5	315	31,5	8,8	2**
SP <sub>3</sub>	B1-20/23	2550	850	14/12,5	2	331	10/8,5	125	19/17,5	315	31,5	8,8	2**
SP <sub>4</sub>	B3-28/31	2550	850	14/12,5	2	344	10/8,5	100	16/14,5	299,59	29,96	7,82	1*
SP <sub>5</sub>	B4-33/36	2550	850	14/12,5	2	274	10/8,5	100	16/14,5	301,31	30,13	7,82	1*
SP <sub>6</sub>	G1	2111,49	703,8	13/11	2	235	9/7	90	15/13	245	24,5	5,31	1*
SP <sub>7</sub>	G2-1/16	13200	825	13/11	15	235	9/7	90	15/13	245	24,5	7,32	1*
SP <sub>8</sub>	C2-27/30	2550	850	12,5/11	2	354	10/8,5	125	16/14,5	296,94	29,69	8,88	1*
SP <sub>9</sub>	HP-1/2	2610	870	16/14,5	2	351	10/8,5	125	19/17,5	315	31,5	7,94	2**
SP <sub>10</sub>	ÇD	11550	825	15,25/13,25	13	378	10/8,5	125	22/20,5	315	31,5	8,29	2**
SP <sub>11</sub>	SG	2550	850	14/12,5	2	186	8/6,5	90	14/12,5	315	31,5	4,98	2**
SP <sub>12</sub>	CL1	2550	850	14/12,5	2	186	8/6,5	90	14/12,5	315	31,5	6,4	2**
SP <sub>13</sub>	CL2-20-25	5100	850	13,38/12,13	5	384	11,5/10,25	100	16/14,75	315	31,5	8,14	2**/1*
SP <sub>14</sub>	CL2-27-31	3400	850	12,25/11	3	384	11,5/10,25	100	16/14,75	299,31	29,93	8,14	1*
SP <sub>15</sub>	CL2-31-34	2550	850	12,75/11,5	2	331	10/8,75	125	19/17,75	224	24,5	8,14	1*
SP <sub>16</sub>	ST1	2107,5	702,5	13/11,5	2	141	9/7,5	90	9/7,5	245	24,5	5,08	2**
SP <sub>17</sub>	ST2	2107,5	702,5	11/9,5	2	141	9/7,5	90	9/7,5	245	24,5	6,15	2**/1*
SP <sub>18</sub>	ST3	2107,5	702,5	11/9,5	2	141	9/7,5	90	9/7,5	245	24,5	6,15	1*
SP <sub>19</sub>	ST4	2107,5	702,5	12/10,5	2	141	9/7,5	90	9/7,5	245	24,5	5,84	1*
P <sub>1</sub>	B2-24/25	-	850	14/12,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	2**
P <sub>2</sub>	B3-27/28	-	850	14/12,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	1*
P <sub>3</sub>	B5-37/38	-	850	14/12	-	-	-	-	-	315	31,5	8,15	1*
P <sub>4</sub>	C4-37/38	-	850	12/10	-	-	-	-	-	315	31,5	10,99	1*
P <sub>5</sub>	C3-34/35	-	850	12,5/11	-	-	-	-	-	245	24,5	7,77	1*
P <sub>6</sub>	C3-33/34	-	850	12,5/11	-	-	-	-	-	245	24,5	7,77	1*
P <sub>7</sub>	C2-30/31	-	850	12,5/11	-	-	-	-	-	315	31,5	8,88	1*
P <sub>8</sub>	C1-24/25	-	850	15/13,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	2**

Tablo 3.20'nin devamı

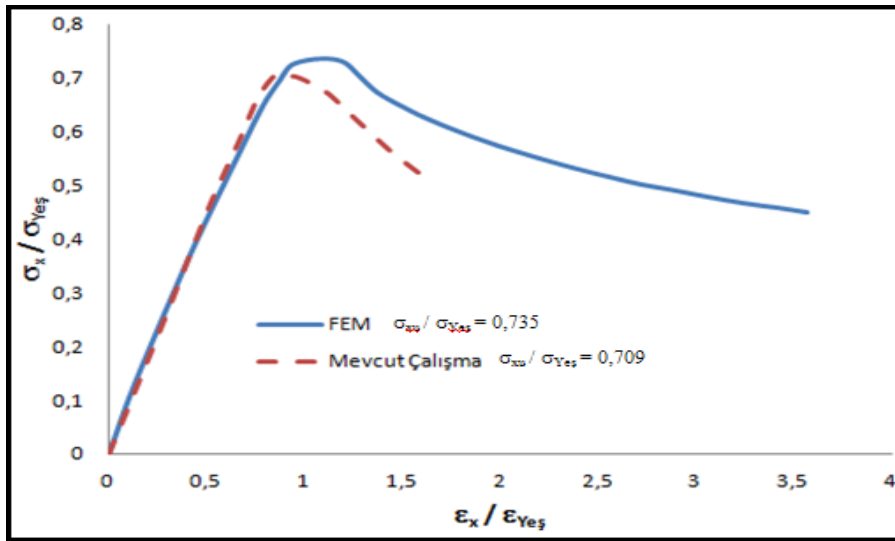
P <sub>9</sub>	CL2-26/27	-	850	13/11,75	-	-	-	-	-	315	31,5	8,14	1*
P <sub>10</sub>	CL2-34/35	-	850	11,5/10,25	-	-	-	-	-	245	24,5	8,14	1*
P <sub>11</sub>	CL2-35/36	-	832,5	11,75/10,5	-	-	-	-	-	245	24,5	8,14	1*
P <sub>12</sub>	CL2-36/37	-	797,5	11,75/10,5	-	-	-	-	-	245	24,5	8,14	1*
P <sub>13</sub>	CL2-37/38	-	780	12/10,75	-	-	-	-	-	245	24,5	8,14	1*
P <sub>14</sub>	CL2-38/39	-	777,5	12/10,75	-	-	-	-	-	245	24,5	8,14	1*
S <sub>1</sub>	D1-17	-	-	-	-	381	10/8,5	125	19/17,5	315	31,5	-	2**
S <sub>2</sub>	B1-20	-	-	-	-	331	10/8,5	125	19/17,5	315	31,5	-	2**
S <sub>3</sub>	B2-24	-	-	-	-	384	10/8,5	125	16/14,5	245	24,5	-	2**
S <sub>4</sub>	B2-25	-	-	-	-	374	10/8,5	125	16/14,5	245	24,5	-	2**
S <sub>5</sub>	B3-27	-	-	-	-	334	10/8,5	125	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>6</sub>	B3-28	-	-	-	-	324	10/8,5	125	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>7</sub>	B3-31	-	-	-	-	334	10/8,5	100	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>8</sub>	B4-33	-	-	-	-	294	10/8,5	100	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>9</sub>	B5-37	-	-	-	-	186	8/6	90	14/12	245	24,5	-	T.E
S <sub>10</sub>	B5-38	-	-	-	-	186	8/6	90	14/12	245	24,5	-	1*
S <sub>11</sub>	G2-16	-	-	-	-	235	9/7	90	15/13	245	24,5	-	1*
S <sub>12</sub>	C4-38	-	-	-	-	235	9/7	90	15/13	315	31,5	-	1*
S <sub>13</sub>	C4-37	-	-	-	-	235	9/7	90	15/13	315	31,5	-	1*
S <sub>14</sub>	C3-35	-	-	-	-	274	10 / 8,5	100	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>15</sub>	C3-34	-	-	-	-	284	10 / 8,5	100	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>16</sub>	C3-33	-	-	-	-	304	10 / 8,5	100	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>17</sub>	C2-31	-	-	-	-	344	10 / 8,5	100	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>18</sub>	C2-30	-	-	-	-	364	10 / 8,5	100	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>19</sub>	C2-27	-	-	-	-	364	10 / 8,5	125	16/14,5	245	24,5	-	1*
S <sub>20</sub>	C1-25	-	-	-	-	394	10 / 8,5	125	16/14,5	245	24,5	-	2*/1*
S <sub>21</sub>	C1-24	-	-	-	-	394	10 / 8,5	125	16/14,5	245	24,5	-	2*/1*
S <sub>22</sub>	HP-3	-	-	-	-	351	10/8,5	125	19/17,5	315	31,5	-	2**
S <sub>23</sub>	CL2-26	-	-	-	-	331	10/8,75	125	19/17,75	245	24,5	-	2*/1*

Tablo 3.20'nin devamı

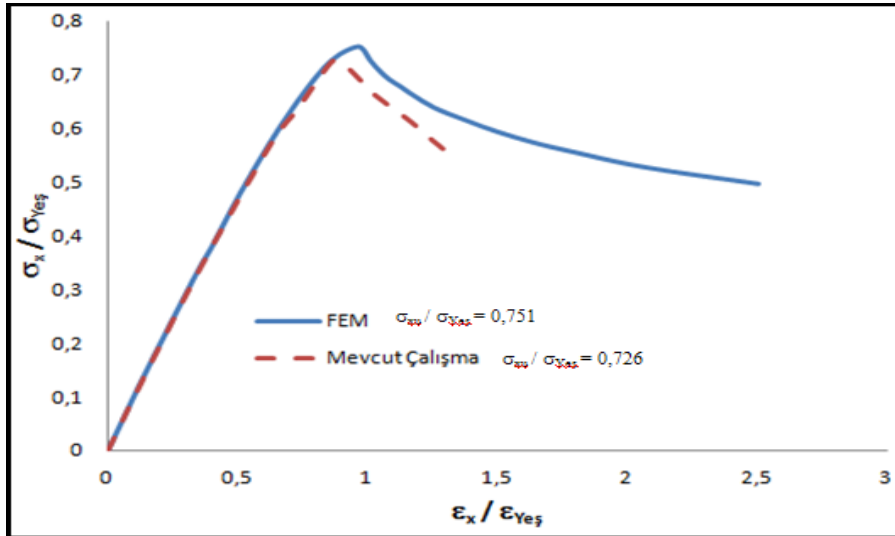
S <sub>24</sub>	CL2-27	-	-	-	-	384	11,5/10,25	100	16/14,75	245	24,5	-	1*
S <sub>25</sub>	CL2-31	-	-	-	-	333	12/10,75	100	17/15,75	245	24,5	-	1*
S <sub>26</sub>	CL2-34	-	-	-	-	333	12/10,75	100	17/15,75	245	24,5	-	1*
S <sub>27</sub>	CL2-35	-	-	-	-	284	10/8,75	90	16/14,75	245	24,5	-	1*
S <sub>28</sub>	CL2-36	-	-	-	-	284	10/8,75	90	16/14,75	245	24,5	-	1*
S <sub>29</sub>	CL2-37	-	-	-	-	235	9/7,75	90	15/13,75	245	24,5	-	1*
S <sub>30</sub>	CL2-38	-	-	-	-	186	8/6,75	90	14/12,75	245	24,5	-	1*
S <sub>31</sub>	CL2-39	-	-	-	-	186	8/6,75	90	14/12,75	245	24,5	-	1*
K <sub>1</sub>	BLG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2**
K <sub>2</sub>	B2-23/24	-	850	14/12,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	2**
K <sub>3</sub>	B2-25/26	-	850	14/12,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	2**
K <sub>4</sub>	B3-26/27	-	850	14/12,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	T.E.
K <sub>5</sub>	B3-31/32	-	850	14/12,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	1*
K <sub>6</sub>	B4-32/33	-	850	14/12,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	1*
K <sub>7</sub>	B5-36/37	-	850	14/12	-	-	-	-	-	315	31,5	8,14	1*
K <sub>8</sub>	B5-38	-	850	14/12	-	-	-	-	-	315	31,5	8,14	1*
K <sub>9</sub>	G2-16/17	-	822,5	13/11	-	-	-	-	-	245	24,5	5,31	1*
K <sub>10</sub>	C4-38	-	869	12/10	-	-	-	-	-	315	31,5	10,99	1*
K <sub>11</sub>	C4-36/37	-	850	12/10	-	-	-	-	-	315	31,5	10,99	1*
K <sub>12</sub>	C3-35/36	-	850	12,5/11	-	-	-	-	-	245	24,5	7,77	1*
K <sub>13</sub>	C3-32/33	-	850	12,5/11	-	-	-	-	-	245	24,5	7,77	1*
K <sub>14</sub>	C2-31/32	-	850	12,5/11	-	-	-	-	-	315	31,5	8,88	1*
K <sub>15</sub>	C2-26/27	-	850	13,25/11,75	-	-	-	-	-	315	31,5	8,88	T.E.
K <sub>16</sub>	C1-25/26	-	850	14/12,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	2**/1*
K <sub>17</sub>	C1-23/24	-	850	15/13,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,82	2**/1*
K <sub>18</sub>	HP3	-	890,8	16/14,5	-	-	-	-	-	315	31,5	7,94	2**
K <sub>19</sub>	CL2-39	-	775	12/10,75	-	-	-	-	-	245	24,5	8,14	1*

1\*: Elasto-plastik davranış 2\*\*: Elastik-tam plastik davranış T.E.: Tarafsız Eksen

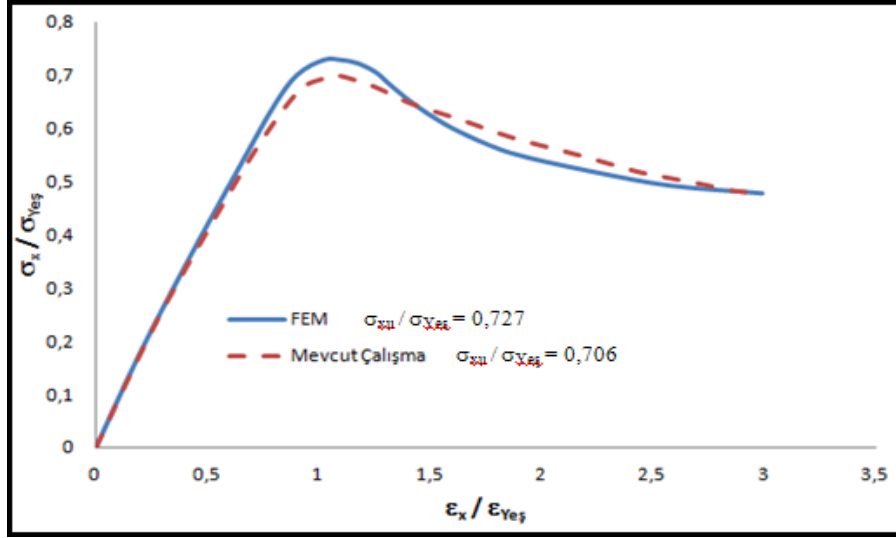
Ardından, Smith yöntemine göre yapılacak kademeli göçme analizi için hesap tablosu oluşturulmuş ve her bir eğrilik artımı adımıında, önceki aşamada elde edilen P-du diyagramları yardımıyla çökme durumu için Düşey Eğilme Momenti - Eğrilik eğrisi elde edilmiş, bu eğrinin pik noktası da geminin tahmini göçme mukavemeti değeri olarak belirlenmiştir. Şekil 3.46 - 3.48'de geminin bazı elemanları için çalışmamızda elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri orjinal çalışmada SEY analizleri ile elde edilen eğri ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.46. Ana güverte G1 panelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi

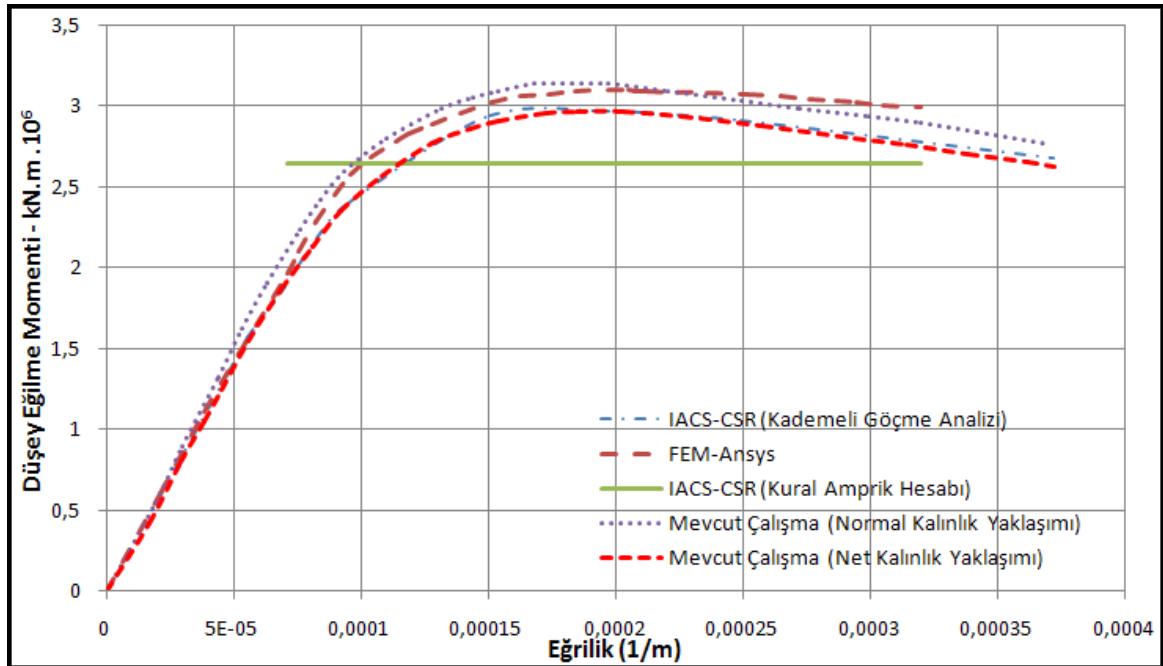


Şekil 3.47. Ana güverte G2 panelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi



Şekil 3.48. Cidar yapısındaki C3-33 stifnerinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Desteklenmiş panel elemanlar (SP<sub>i=1,2,3..</sub>) için SEY sonuçları ile uyumlu olduğu gözlenen gerilme-şekil değiştirme (P-du) diyagramları, bunlara ek olarak, tekil plak elemanların (P<sub>i=1,2,3..</sub>), tekil stifner elemanların (S<sub>i=1,2,3..</sub>) ve plak-stifner birleşimi kiriş-kolon elemanların (PSB<sub>i=1,2,3..</sub>) P-du diyagramları kullanılarak gerçekleştirilen kademeli göçme analizi sonucunda elde edilen düşey eğilme momenti-eğrilik eğrisi Şekil 3.49'da, karşılaştırmalı sonuçlar ise Tablo 3.21'de sunulmuştur.



Şekil 3.49. Düşey eğilme momenti-eğrilik eğrilerinin karşılaştırmalı gösterimi

Gerçekleştirilen kademeli göçme analizi sonucunda gemi gövdesi orta kesitinin göçme mukavemetine ulaştığındaki moment değeri, elemanların tasarım kalınlıklarının kullanılması sonucunda  $3,14 \times 10^6$  kN.m, elemanların net kalınlık yaklaşımı ile korozyon payları eklenerek elde edilen kalınlıklarının kullanılması sonucunda  $3,25 \times 10^6$  kN.m olarak elde edilmiştir. Her iki durumda göçme mukavemeti değerlerine sırasıyla,  $1,79 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  ve  $1,80 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  eğrilik değerlerinde ulaşılmıştır. IACS-CSR kurallarına göre geminin operasyon sırasında maruz kalabileceği beklenen en aşırı eğilme momenti değeri Şekil 3.45'ten de görüleceği gibi ampirik olarak  $2,64 \times 10^6$  kN.m olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca, geminin yükleme talimatında izin verilen maksimum eğilme momenti değeri  $3,25 \times 10^6$  kN.m'dir.

Bu değerler ve net kalınlık yaklaşımı ile elde edilen göçme mukavemeti değerleri baz alınarak tasarım ve gerçek güvenlik marjınları sırasıyla %18,7 ve %30,2'dir. Ayrıca, CSR kuralları gemi gövdesi göçme mukavemeti değerinin tahmini için bazı belirsizlikleri de göz önüne olarak 1.1 güvenlik marjini değeri kullanmaktadır. Yükleme talimatında belirtilen maksimum moment değeri, bu durumda  $3,25 \times 10^6 / 1.1 = 2,955 \times 10^6$  değeri ile karşılaştırılmalıdır. Böylece gerçek güvenlik marjini değeri %23,3'e düşmektedir.

Kademeli göçme analizinin avantajı doğrultusunda, moment-eğrilik eğrisi boyunca kesitte hangi bölgede, hangi elemanların ne zaman göçtüğü belirlenebilmektedir. Bu bağlamda uygulamada kullanılan gemi kesitinde ilk olarak ana güverte boyuna elemanları ve merkez boyuna perdenin üst kısmındaki boyuna elemanlar göçmektedir. Ardından yan iç perdenin ve bordanın üst kısım boyuna elemanları göçmektedir. Şekil 3.45'te sırasıyla göçen elemanlar gösterilmiştir. Son olarak göçen elemanlar da kesitin yarı yüksekliğine denk gelen kısımdaki borda boyuna elemanlardır.

Tablo 3.21. Göçme mukavemeti limit değerlerinin ve güvenlik marjlerinin karşılaştırılması

	<sup>a</sup> IACS-CSR x10 <sup>6</sup> kN.m	<sup>b</sup> IACS-CSR Amirik Gerekli Kapasite x10 <sup>6</sup> kN.m	<sup>c</sup> Geminin Yükleme Talimatında İzin Verilen Kapasite x10 <sup>6</sup> kN.m	<sup>d</sup> DALMA SEY x10 <sup>6</sup> kN.m	<sup>e1</sup> Mevcut Çalışma x10 <sup>6</sup> kN.m	<sup>e2</sup> Mevcut Çalışma (Net Kalınlık) x10 <sup>6</sup> kN.m	a/b	a/c	a/d	a/e2	e1/d	e2/d
M <sub>u</sub>	2,967	2,643	2,266	3,093	3,14	3,25	1.1	1,30	0,95	0,99	1,02	0,96
K <sub>u</sub>	1,90x10 <sup>-4</sup>	-	-	2,05x10 <sup>-4</sup>	1,79x10 <sup>-4</sup>	1,8x10 <sup>-4</sup>						

### 3.4.3. Büyük Tonajlı Ham Petrol Gemisi (VLCC) Energy Concentration'ın Göçme Mukavemeti Momenti Tahmini

Çalışmamızda önerilen yöntemi ve güvenilirliğini tekrar test etmek amacıyla, daha önce üzerinde yapılmış olan birtakım göçme mukavemeti tahmini çalışmalarının sonuçlarının literatürde var olması ve güvenilir karşılaştırmaya imkân tanınması nedeniyle, 1980 yılında, yük getirdiği limanda boşaltma esnasında ortadan ikiye kırılan büyük tonajlı ham petrol gemisi Energy Concentration'ın enine kesiti için kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiştir. Geminin, kaza anında sakin suda yük boşaltıyor olması ve yükleme durumunun biliniyor olması gerçekçi bir göçme eğilme momenti değerinin yeterli doğrulukta belirlenmesini sağlamıştır.

Geminin kırılmadan önceki son kara sövrveyi raporuna göre, büyük ölçüde korozyona maruz kalmış olan 3 numaralı balast tankı hariç tüm kargo ve balast tanklarının iyi durumda olduğu belirlenmiştir. Bu tankların yeri ile kırılmanın gerçekleştiği kısım örtüşmektedir. Tablo 3.22'de geminin ana boyutları, Şekil 3.50'de geminin kırılmış halinin görüntüleri, Şekil 3.51'de ise geminin plan ve profil resimleri ile kargo, balast, pis su tankları, boyuna perdeler ve enine perdelerin yerleri gösterilmiştir.



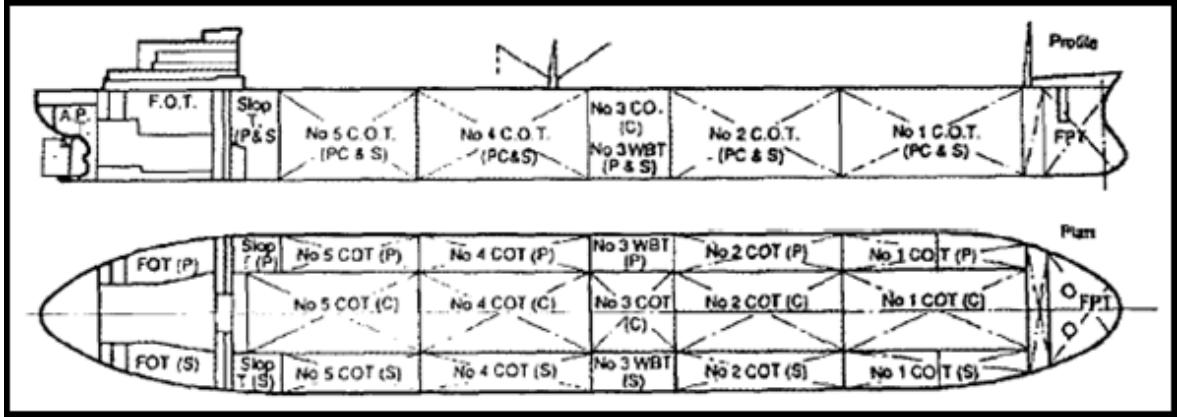
Şekil 3.50. Energy Concentration gemisinin sarkma kırılması durumun



Tablo 3.22. Energy Concentration gemisi ana boyutları

VLCC "Energy Concentration"	
Tam boy	326.75 m
Kaimeler arası boy	313.0 m
Genişlik	48.19 m
Derinlik	25.2 m
Draft	19.597 m
Groston	98,894 ton
DWT	216,269 ton

Olayın gerçekleştiği seferin başlangıcında gemi kıç tarafından 1.47 m gibi oldukça yüksek bir trim ve 42 cm gibi bir sarkma durumu göstermiştir. Rutherford ve Caldwell 1990 yılında gerçekleştirdikleri hesaplama sonucunda göçme anında eğilme momentinin  $17.94 \times 10^6 \text{ kNm}$  olduğunu belirlemişlerdir.



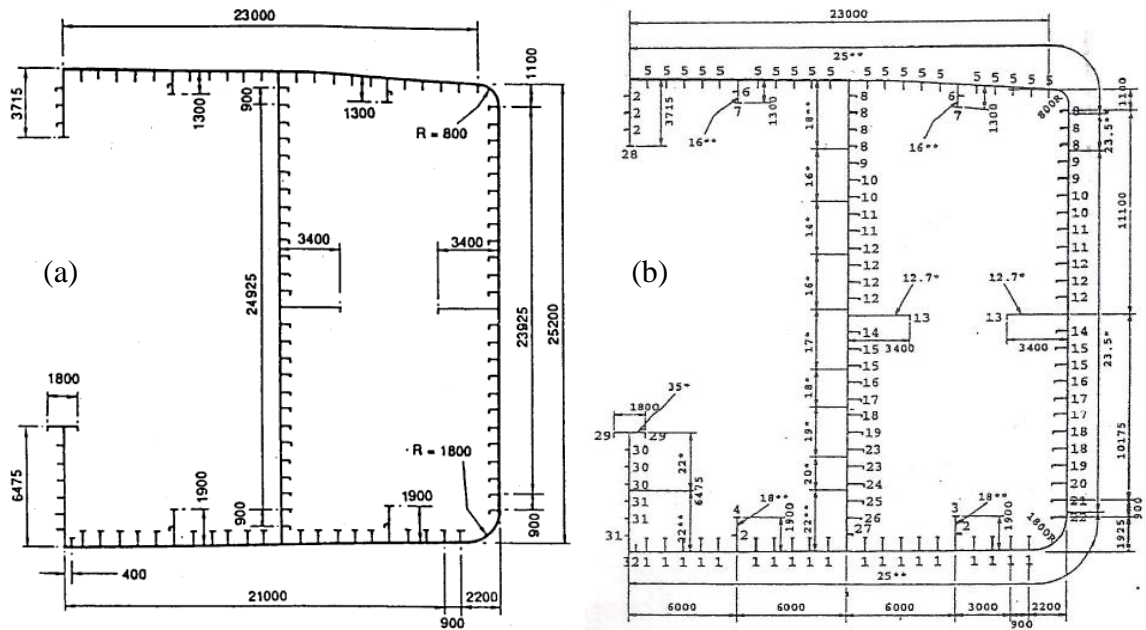
Şekil 3.51. Geminin plan ve profil resimleri ile kargo, balast, pis su tankları, boyuna perdeler ve enine perdelerin yerleri

Energy Concentration gemisinin gövde kirişinin direnç gösterebileceği maksimum yük değerini, bir diğer deyişle, kırılmaya sebep olan maksimum düşey eğilme momenti değerini belirlemek ve moment-eğrilik eğrisini oluşturmak için, ilk olarak IACS-CSR'ye göre kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiş, daha sonra da yöntemimizle hesaplamaya geçilmiştir. Öncelikle, yöntemin daha önceki bölümlerde anlatılan alt aşamaları uygulandıktan sonra Smith yöntemine geçilerek kademeli göçme analizi hesap tabloları yardımıyla gerçekleştirilmiştir. IACS-CSR'ye göre yapılan hesaplamada ilkel sehim ve

artık kaynak gerilmeleri dikkate alınmamıştır. Aşağıdaki Tablo 3.23'te geminin inşasında kullanılan stifnerlerin geometrik ve malzeme özellikleri, Şekil 3.52-a'da geminin orta kesit resmi ve Şekil 3.52-b'de ise stifnerler numaraları ile birlikte kesit üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 3.23. Geminin inşasında kullanılan stifnerlerin geometrik ve malzeme özellikleri

Stf. No	Gövde	Fleñç	Stif. Tipi	Malz.	Stf. No	Gövde	Fleñç	Stif. Tipi	Malz.
1	797X15	200X33	T	YMÇ	17	747X12,7	180X25	L	GİÇ
2	297X11,5	100X16	L	YMÇ	18	797X14	180X25	L	GİÇ
3	370X16		Lama	YMÇ	19	847X14	180X25	L	GİÇ
4	425X25		Lama	YMÇ	20	847X14	180X32	L	GİÇ
5	480X32		Lama	YMÇ	21	847X15	180X25	L	YMÇ
6	297X11,5	100X16	L	YMÇ	22	847X15	180X32	L	YMÇ
7	370X16		Lama	YMÇ	23	897X15	200X25	L	GİÇ
8	447X11,5	125X22	L	YMÇ	24	945X16	200X25	L	GİÇ
9	549X11,5	125X22	L	GİÇ	25	897X15	200X25	L	YMÇ
10	597X11,5	125X22	L	GİÇ	26	797X15	180X25	L	YMÇ
11	597X11,5	125X25	L	GİÇ	27	347X11,5	125X22	L	YMÇ
12	647X11,5	125X25	L	GİÇ	28	397X25		Lama	YMÇ
13	350X25,4		Lama	GİÇ	29	300X35		Lama	GİÇ
14	647X12,7	150X25	L	GİÇ	30	230X12,7		Lama	GİÇ
15	697X12,7	150X25	L	GİÇ	31	230X12,7		Lama	YMÇ
16	747X12,7	150X25	L	GİÇ	32	397X11,5	125X22	T	YMÇ

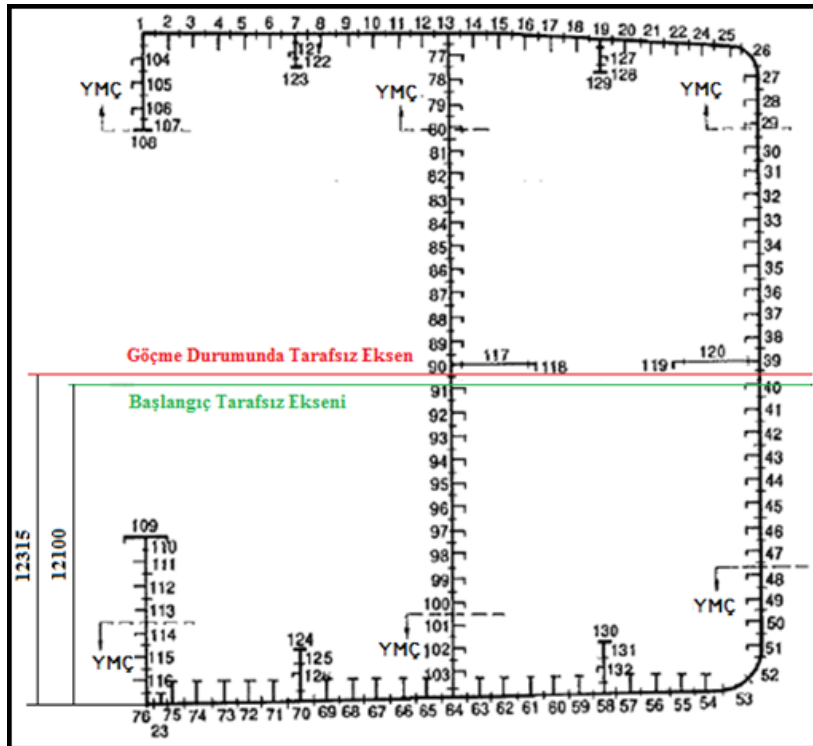


Şekil 3.52. (a) En kesit resmi ve (b) stifner dağılımı

### 3.4.3.1. IACS-CSR Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama

Tablo ve şekillerden de görüldüğü üzere geminin inşaatında iki tür çelik malzeme kullanılmıştır. Güverte ve dipte yüksek mukavemetli çelik ( $\sigma_Y=315$  MPa) ve borda kaplamasının büyük bir bölümü ile boyuna elemanlar ve perdelerde gemi inşa çeliği ( $\sigma_Y=235$  MPa) tercih edilmiştir. Analizleri gerçekleştirilen iki enine destek elemanı arası mesafe (L) 5,1 m, bordalarda ve perdelerde stifnerler arası mesafe 925 mm, güverte ve dipte stifnerler arası mesafe 1000 mm'dir.

Hesaplamalarda tüm elemanların kalınlıkları, karşılaştırmalar için uyumlu bir analiz yapabilmek amacıyla, plak ve stifner gövde kalınlıkları 1 mm, stifner fleñç kalınlıkları ise 2 mm korozyon kayıpları dikkate alınarak yeniden belirlenmiştir. Ayrıca, tekil plak elemanlara ait ilkel sehim değerleri Smith'in ortalama ilkel sehim değeri formülü ( $0,1 \cdot \beta^2 \cdot t$ ) ile belirlenmiştir. Artık kaynak gerilmeleri geminin yaşı göz önüne alınarak hesaplamaya dâhil edilmemiştir. IACS-CSR hesaplaması için kullanılan 132 elemanlı orta kesit eleman ayrıklaştırması Şekil 3.53'te, herbir elemanın geometrik ve malzeme özellikleri ise Tablo 3.24'te sunulmuştur.



Şekil 3.53. IACS-CSR'ye göre eleman ayrıklaştırması ve tarafsız eksen konumları

Tablo 3.24. IACS-CSR'ye göre ayrıklaştırılan elemanların geometrik ve malzeme özellikleri

Eleman No	Eleman ID	Plak b x t (mm)	Stifner Gövdəsi h <sub>w</sub> x t <sub>w</sub> (mm)	Stifner Flenci b <sub>f</sub> x t <sub>f</sub> (mm)	σ <sub>y</sub> (MPa)	A (mm <sup>2</sup> )	z <sub>o</sub> (mm)
1	Köşe	500x24	-	-	315	25.000	6,378
2	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
3	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
4	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
5	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
6	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
7	Köşe	1000x24	-	-	315	25.000	6,378
8	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
9	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
10	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
11	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
12	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
13	Köşe	1000x24	-	-	315	25.000	6,378
14	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
15	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
16	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
17	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
18	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
19	Köşe	1000x24	-	-	315	25.000	6,378
20	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
21	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
22	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
23	PSB32	500x24	397x10.5	100x20	315	19.566	1,594
24	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
25	PSB5	1000x24	480x31	-	315	40.360	6,378
26	Köşe	640x24	-	-	315	16.000	2,612
27	PSB8	925x22.5	447x10.5	125x20	315	29.628	5,821
28	PSB8	925x22.5	447x10.5	125x20	315	29.628	5,821
29	PSB8	925x22.5	447x10.5	125x20	315	29.628	5,821
30	PSB9	925x22.5	549x10.5	125x20	235	30.801	4,317
31	PSB9	925x22.5	549x10.5	125x20	235	30.801	4,317
32	PSB10	925x22.5	597x10.5	125x20	235	31.353	4,317
33	PSB10	925x22.5	597x10.5	125x20	235	31.353	4,317
34	PSB11	925x22.5	597x10.5	125x20	235	31.353	4,317
35	PSB11	925x22.5	597x10.5	125x20	235	31.353	4,317
36	PSB12	925x22.5	647x10.5	125x20	235	31.928	4,317
37	PSB12	925x22.5	647x10.5	125x20	235	31.928	4,317
38	PSB12	925x22.5	647x10.5	125x20	235	31.928	4,317
39	Köşe	925x22.5	-	-	235	21738	4,317
40	PSB14	925x22.5	647x11.7	150x23	235	33.704	4,317
41	PSB15	925x22.5	697x11.7	150x23	235	34.339	4,317
42	PSB15	925x22.5	697x11.7	150x23	235	34.339	4,317
43	PSB16	925x22.5	747x11.7	150x23	235	34.974	4,317
44	PSB17	925x22.5	747x11.7	180x23	235	35.724	4,317
45	PSB17	925x22.5	747x11.7	180x23	235	35.724	4,317
46	PSB18	925x23.5	797x13	180x23	235	37.396	4,317

Tablo 3.24'ün devamı

47	PSB18	925x23.5	797x13	180x23	235	37.396	4,317
48	PSB19	925x23.5	847x13	180x23	235	38.096	4,317
49	PSB20	925x23.5	847x13	180x30	315	39.356	5,821
50	PSB21	925x23.5	847x13	180x23	315	38.096	5,821
51	PSB22	875x23.5	847x13	180x30	315	38.181	5,208
52	Köşe	850x25	-	-	315	21.250	4,608
53	Köşe	850x25	-	-	315	21.250	4,608
54	PSB1	800x25	797x14	200x31	315	38.555	4,082
55	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
56	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
57	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
58	Köşe	1000x25	-	-	315	25.000	6,378
59	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
60	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
61	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
62	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
63	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
64	Köşe	1000x25	-	-	315	25.000	6,378
65	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
66	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
67	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
68	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
69	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
70	Köşe	1000x25	-	-	315	25.000	6,378
71	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
72	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
73	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
74	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
75	PSB1	1000x25	797x14	200x31	315	43.555	6,378
76	Köşe	250x22	-	-	315	5.500	0,456
77	PSB8	925x18	447x10.5	125x20	315	24.541	7,704
78	PSB8	925x18	447x10.5	125x20	315	24.541	7,704
79	PSB8	925x18	447x10.5	125x20	315	24.541	7,704
80	PSB8	925x17	447x10.5	125x20	315	23.616	8,185
81	PSB9	925x16	549x10.5	125x20	235	23.864	6,476
82	PSB10	925x16	597x10.5	125x20	235	24.416	6,476
83	PSB10	925x15	597x10.5	125x20	235	23.491	6,938
84	PSB11	925x14	597x10.5	125x20	235	22.566	7,472
85	PSB11	925x14	597x10.5	125x20	235	22.566	7,472
86	PSB12	925x15	647x10.5	125x20	235	24.066	6,938
87	PSB12	925x16	647x10.5	125x20	235	24.991	6,476
88	PSB12	925x16	647x10.5	125x20	235	24.991	6,476
89	PSB12	925x16	647x10.5	125x20	235	24.991	6,476
90	Köşe	925x17	-	-	235	15.725	6,071
91	PSB14	925x17	647x11.7	150x23	235	27.692	6,071
92	PSB15	925x17	697x11.7	150x23	235	28.327	6,071
93	PSB15	925x17.5	697x11.7	150x23	235	28.789	5,887
94	PSB16	925x18	747x11.7	150x23	235	29.887	5,714
95	PSB17	925x18	747x11.7	180x23	235	30.634	5,714

Tablo 3.24'ün devamı

96	PSB18	925x19	797x13	180x23	235	33.233	5,396
97	PSB19	925x19	847x13	180x23	235	33.933	5,396
98	PSB23	925x19	897x14	200x23	235	36.030	5,396
99	PSB23	925x20	897x14	200x23	235	36.955	5,112
100	PSB24	925x21	945x15	200x23	235	39.545	4,857
101	PSB25	925x22	897x14	200x23	315	38.805	6,236
102	PSB26	875x22	797x14	180x23	315	35.705	5,580
103	PSB27	487.5x22	347x10.5	125x20	315	17.466	1,732
104	PSB2	1000x22	297x10.5	100x14	315	26.866	7,289
105	PSB2	1000x22	297x10.5	100x14	315	26.866	7,289
106	PSB2	1000x22	297x10.5	100x14	315	26.866	7,289
107	Köşe	215x22	-	-	315	5.500	0,456
108	PSB28	-	397x10.5	-	315	4.566	-
109	Köşe	1800x35	-	-	235	63.000	10,818
110	Köşe	225x22	-	-	235	4.950	0,274
111	PSB30	1000x22	230x11.7	-	235	24.921	5,406
112	PSB30	1000x22	230x11.7	-	235	24.921	5,406
113	PSB30	1000x22	230x11.7	-	235	24.921	5,406
114	PSB31	1000x22	230x11.7	-	315	24.921	7,289
115	PSB31	1000x22	230x11.7	-	315	24.921	7,289
116	PSB31	1000x22	230x11.7	-	315	24.921	7,289
117	Plak	2700x12.7	-	-	235	34.290	70,736
118	PSB13	-	350x24.4	-	235	8.890	-
119	PSB13	-	350x24.4	-	235	8.890	-
120	Plak	2700x12.7	-	-	235	34.290	70,736
121	PSB6	500x16	284x10.5	100x14	235	12.866	1,892
122	Plak	300x16	-	-	235	4.800	0,681
123	PSB7	-	370x15	-	315	5.920	-
124	PSB4	-	425x24	-	315	10.625	-
125	Plak	400x18	-	-	315	7.200	1,441
126	PSB2	1000x18	284x10.5	100x14	315	22.866	9,004
127	PSB6	500x16	284x10.5	100x14	315	12.866	2,551
128	Plak	300x16	-	-	315	4.800	0,918
129	PSB7	-	370x15	-	315	5.920	-
130	PSB3	-	370x15	-	315	5.920	-
131	Plak	400x18	-	-	315	7.200	1,441
132	PSB2	1000x18	284x10.5	100x14	315	22.866	9,004

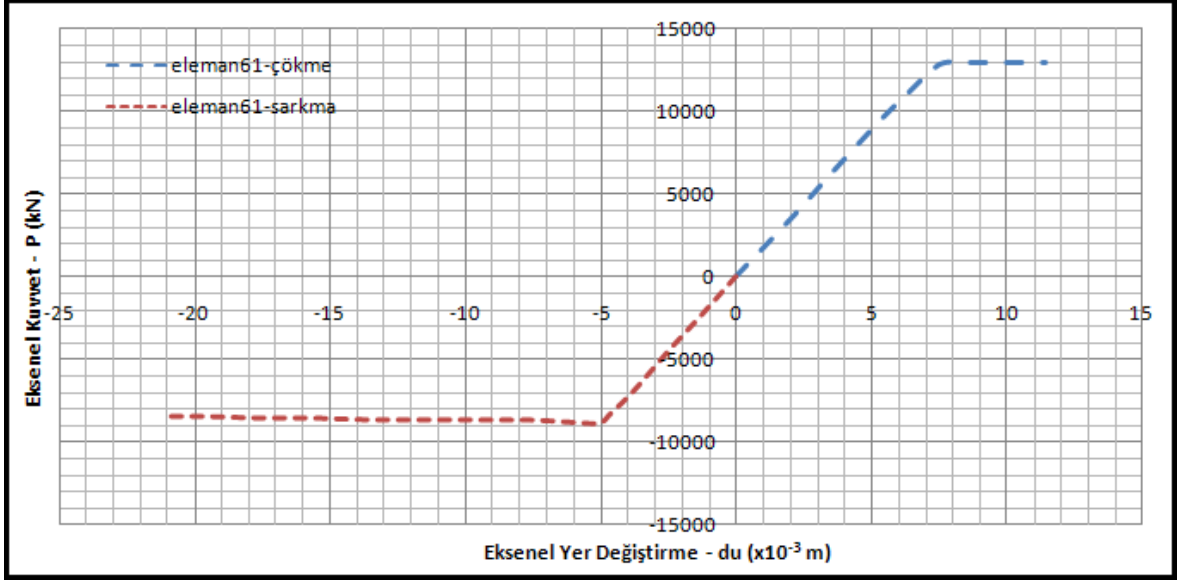
Ayrıklaştırılanbu elemanlar için oluşturulan hesap tablosunun ara yüzüTablo 3.25'te sunulmuştur. Burada, her bir elemanın, sarkma durumuna göre elemanların, bir önceki adımdaki tarafsız eksenin yerine göre olası tüm burkulma tipleri ve malzeme davranışı için alt hesap tablosu koşturulmuş, en küçük yükleme değeri ana hesap tablosuna alınarak, kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiş ve M-κ eğrisi elde edilmiştir. Bazı kritik elemanlar için elde edilen P-du eğrileri Şekil 3.54-3.57'de, hesaplama neticesinde elde edilen eğilme momenti-eğrilik eğrisi Şekil 3.58'de gösterilmiştir.



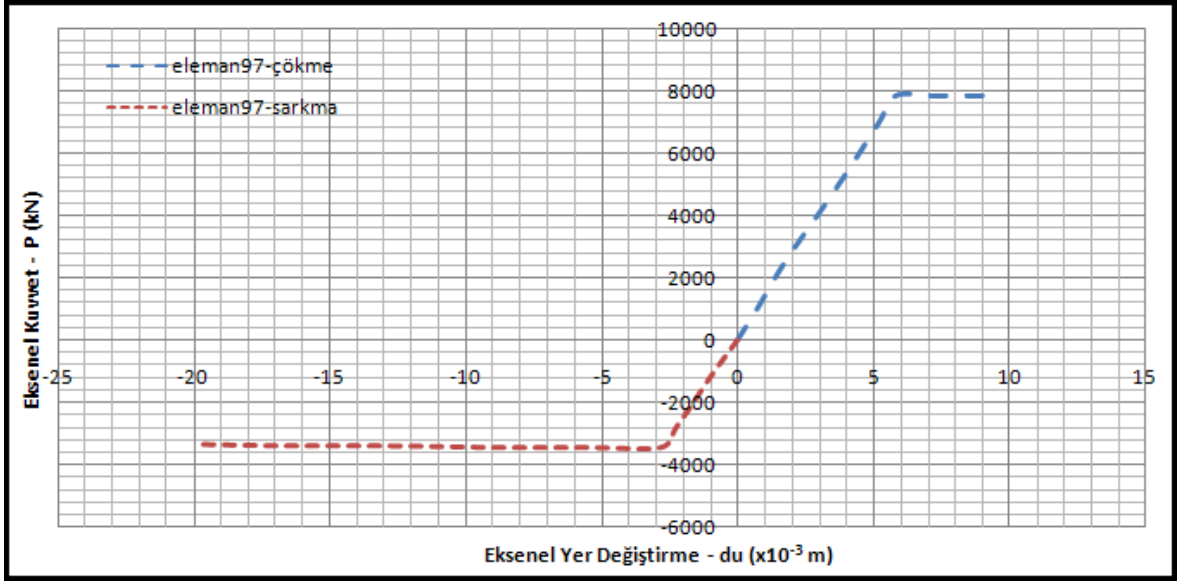




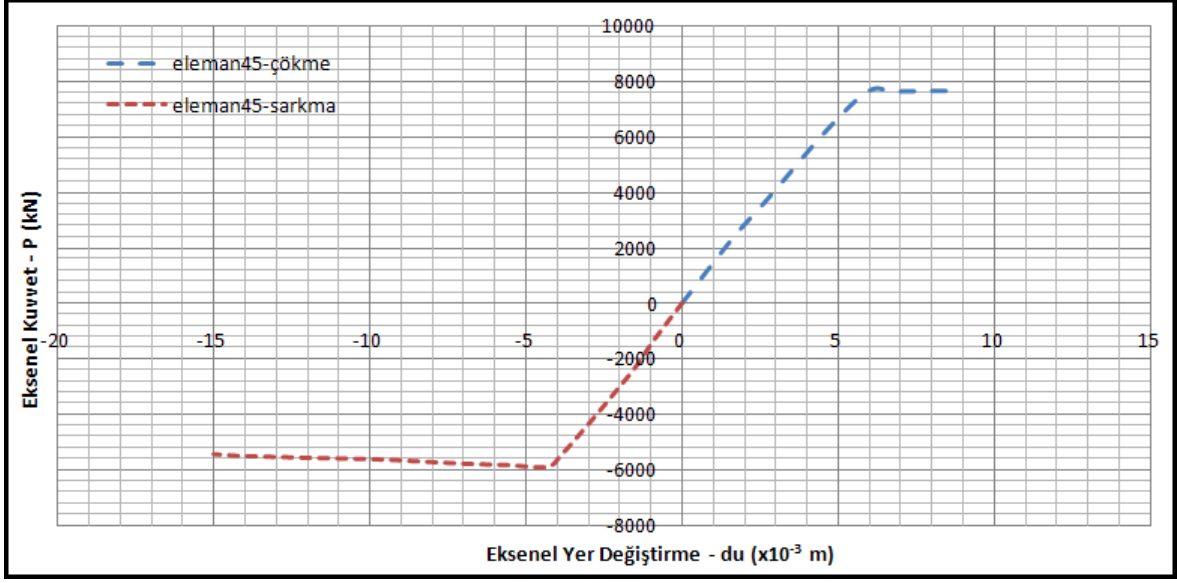




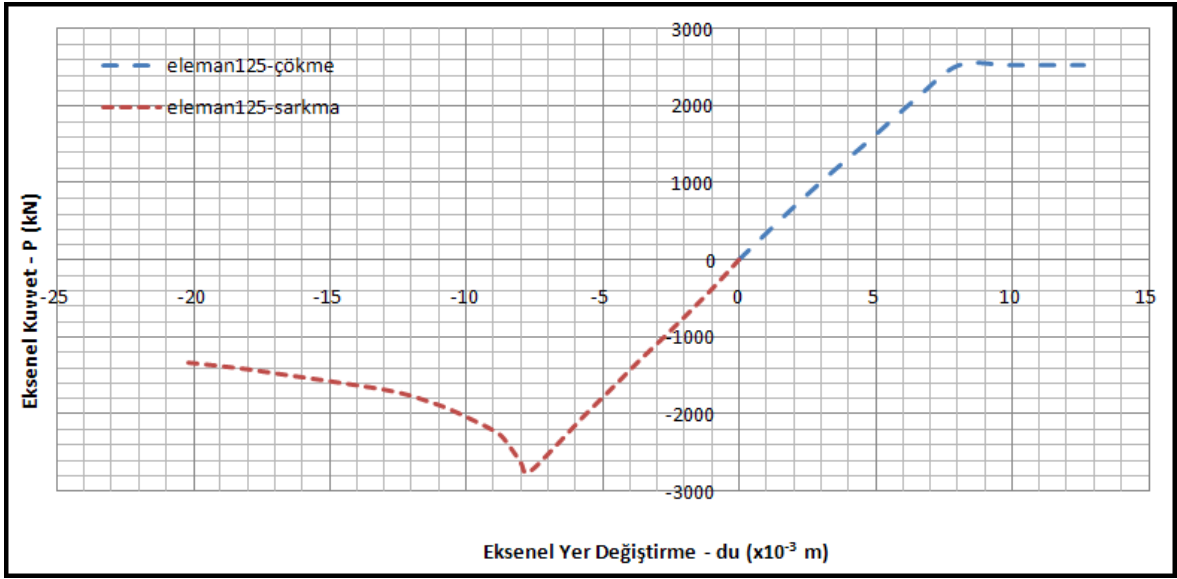
Şekil 3.54. Energy Concentration Eleman-61 P-du eğrisi



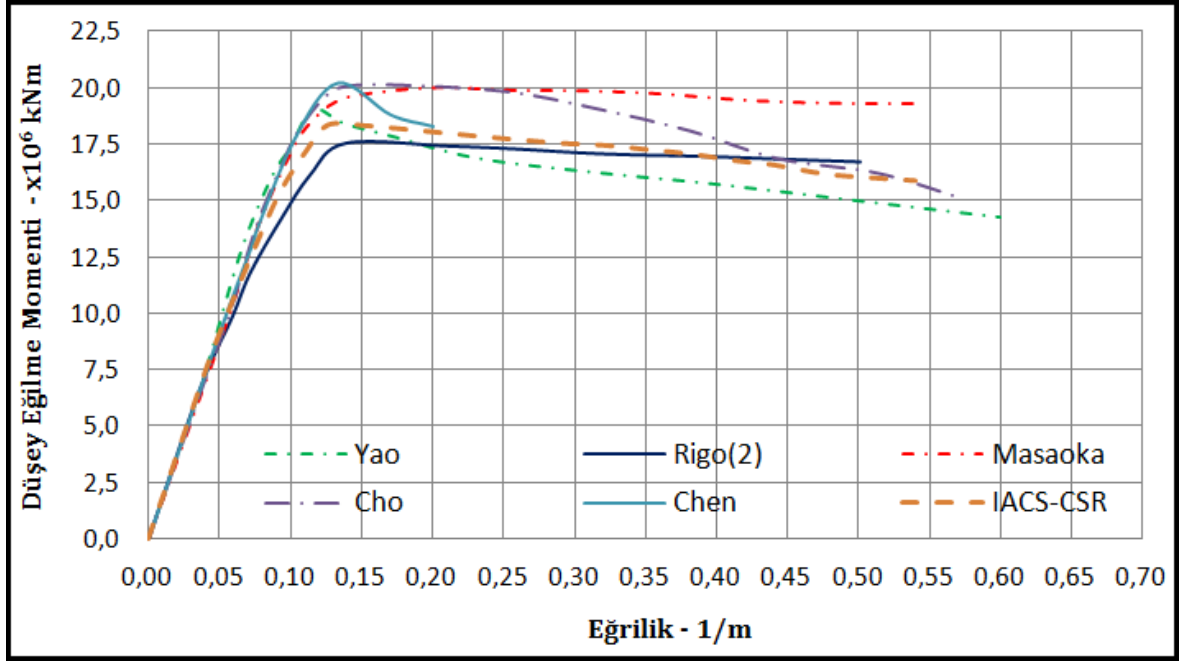
Şekil 3.55. Energy Concentration Eleman-97 P-du eğrisi



Şekil 3.56. Energy Concentration Eleman-45 P-du eğrisi



Şekil 3.57. Energy Concentration Eleman-125 P-du eğrisi

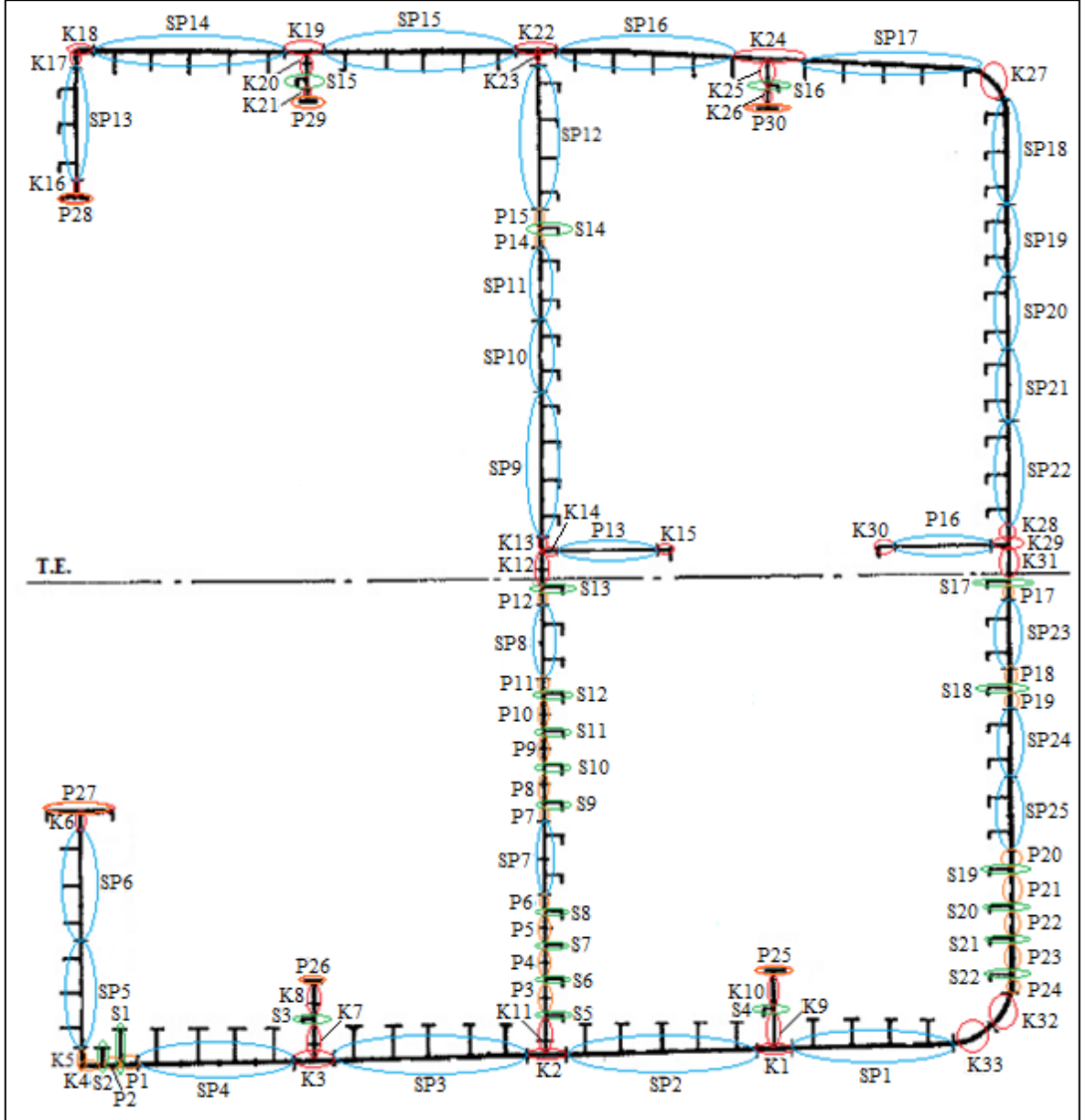


Şekil 3.58. Düşey eğilme momenti-eğrilik eğrilerinin karşılaştırmalı gösterimi-I

### 3.4.3.2. Önerilen Yöntem Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplama

IACS-CSR hesaplamasının ardından, bu kısımda da Energy Concentration gemisinin göçme mukavemeti değerinin ölçüsü olan maksimum eğilme momenti değeri, önerilen yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmamızda önerilen yöntem kapsamında kademeli göçme analizi gerçekleştirmek üzere eleman ayrıklaştırması başlangıç tarafsız eksen mesafesine göre yeniden düzenlenmiştir. Hesaplamanın ilk aşamasında, öncelikle tündengelim mantığı ile geminin enine kesiti stifnerli panel ( $SP_i$ ), plak ( $P_i$ ), stifner ( $S_i$ ) ve köşe eleman ( $K_i$ ) olmak üzere elemanlara ayrıştırılmıştır. Ayrıklaştırılan stifnerli panel, tekil plak, tekil stifner, ve köşe elemanların  $\sigma_x$ - $\varepsilon_x$  (P-du) eğrileri önceki bölümlerde anlatıldığı şekilde elde edilmiştir. Sarkma durumuna göre hesap yapıldığı için tarafsız eksenin altında kalan elemanlar için lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılırken, tarafsız eksenin üstünde kalan elemanlar için elastik-tam plastik malzeme davranışı eğrileri kullanılmıştır. Plak ve stifnerlerin farklı minimum akma gerilmesi değerine sahip olması durumlarında stifnerli panel elemanlar için eşdeğer akma gerilmesi değeri kullanılmıştır. Ayrıca plak kalınlıkları da her yerde aynı olmadığından ilgili elemanlarda eşdeğer kalınlık hesaplanarak kullanılmıştır. Literatürde olduğu gibi hesaplamalarda kullanılan kalınlıklar için korozyon incelemeleri de dikkate alınmıştır.

Ayrıklaştırılan elemanların kesit üzerinde gösterimi Şekil 3.59’da, hesaplama tablosunu oluşturacak 25 adet stifnerli panel eleman, 30 adet tekil plak eleman, 22 adet tekil stifner eleman ve 33 köşe elemanın geometrik ve malzeme özellikleri Tablo 3.26’da sunulmuştur.



Şekil 3.59. Önerilen yöntem kapsamında ayrıklaştırılan elemanlar

Tablo 3.26. Energy Concentration gemisinin önerilen yöntemle ayrıklaştırılan elemanlarının geometrik ve malzeme özellikleri

Eleman Adı	B (mm)	b (mm)	t <sub>eş</sub> (mm)	n <sub>sx</sub>	h <sub>w</sub> (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	b <sub>f</sub> (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	σ <sub>Yeş</sub> (MPa)	Z <sub>o</sub> (mm)	σ-ε
SP <sub>1</sub>	4000	1000	24	4	797	14	200	31	315	6,378	1**
SP <sub>2</sub>	5000	1000	24	5	797	14	200	31	315	6,378	1**
SP <sub>3</sub>	5000	1000	24	5	797	14	200	31	315	6,378	1**
SP <sub>4</sub>	4000	1000	24	4	797	14	200	31	315	6,378	1**
SP <sub>5</sub>	3000	1000	21	3	230	11,7	-	-	315	7,289	1*
SP <sub>6</sub>	3000	1000	21	3	230	11,7	-	-	235	7,289	1*
SP <sub>7</sub>	1850	925	18,5	2	897	14	200	23	235	3,261	1*
SP <sub>8</sub>	1850	925	16,5	2	697	11,7	150	23	235	3,656	1*
SP <sub>9</sub>	3700	925	14,5	4	647	10,5	125	23	235	4,160	2**
SP <sub>10</sub>	1850	925	13	2	597	10,5	125	23	235	4,640	2**
SP <sub>11</sub>	1850	925	15	2	597	10,5	125	20	235	4,021	2**
SP <sub>12</sub>	3700	925	17	4	447	10,5	125	20	315	6,071	2**
SP <sub>13</sub>	3000	1000	21	3	297	10,5	100	14	315	7,289	2**
SP <sub>14</sub>	5000	1000	24	5	480	31	-	-	315	6,378	2**
SP <sub>15</sub>	5000	1000	24	5	480	31	-	-	315	6,378	2**
SP <sub>16</sub>	5000	1000	24	5	480	31	-	-	315	6,378	2**
SP <sub>17</sub>	5000	1000	24	5	480	31	-	-	315	6,378	2**
SP <sub>18</sub>	2775	925	22,5	3	447	10,5	125	20	315	5,821	2**
SP <sub>19</sub>	1850	925	22,5	2	549	10,5	125	20	235	2,681	2**
SP <sub>20</sub>	1850	925	22,5	2	597	10,5	125	20	235	2,681	2**
SP <sub>21</sub>	1850	925	22,5	2	597	10,5	125	23	235	2,681	2**
SP <sub>22</sub>	1850	925	22,5	3	647	10,5	125	23	235	2,681	2**
SP <sub>23</sub>	1850	925	22,5	2	697	11,7	150	23	235	2,681	1*
SP <sub>24</sub>	1850	925	22,5	2	747	11,7	180	23	235	2,681	1*
SP <sub>25</sub>	1850	925	22,5	2	797	13	180	23	235	2,681	1*
P <sub>1</sub>	-	500	24	-	-	-	-	-	315	1,594	2**
P <sub>2</sub>	-	500	24	-	-	-	-	-	315	1,594	2**
P <sub>3</sub>	-	925	21	-	-	-	-	-	315	6,236	2**
P <sub>4</sub>	-	900	21	-	-	-	-	-	315	5,904	2**
P <sub>5</sub>	-	925	21	-	-	-	-	-	235	2,872	2**
P <sub>6</sub>	-	462,5	19	-	-	-	-	-	235	0,794	2**
P <sub>7</sub>	-	462,5	18	-	-	-	-	-	235	0,838	2**
P <sub>8</sub>	-	925	18	-	-	-	-	-	235	3,351	2**
P <sub>9</sub>	-	925	17,5	-	-	-	-	-	235	3,447	2**
P <sub>10</sub>	-	925	17	-	-	-	-	-	235	3,548	2**
P <sub>11</sub>	-	462,5	17	-	-	-	-	-	235	0,887	2**
P <sub>12</sub>	-	462,5	16	-	-	-	-	-	235	0,943	2**
P <sub>13</sub>	-	2700	11,7	-	-	-	-	-	235	43,93	1*
P <sub>14</sub>	-	462,5	15	-	-	-	-	-	235	1,005	1*
P <sub>15</sub>	-	462,5	15	-	-	-	-	-	235	1,005	1*
P <sub>16</sub>	-	2700	11,7	-	-	-	-	-	235	43,93	1*
P <sub>17</sub>	-	462,5	22,5	-	-	-	-	-	235	0,670	1*
P <sub>18</sub>	-	462,5	22,5	-	-	-	-	-	235	0,670	1*
P <sub>19</sub>	-	462,5	22,5	-	-	-	-	-	235	0,670	1*
P <sub>20</sub>	-	462,5	22,5	-	-	-	-	-	235	0,670	1*
P <sub>21</sub>	-	925	22,5	-	-	-	-	-	315	5,821	1*
P <sub>22</sub>	-	925	22,5	-	-	-	-	-	315	5,821	1*
P <sub>23</sub>	-	900	22,5	-	-	-	-	-	315	5,510	1*
P <sub>24</sub>	-	462,5	22,5	-	-	-	-	-	315	1,455	1*
P <sub>25</sub>	-	370	15	-	-	-	-	-	315	1,397	1*
P <sub>26</sub>	-	425	24	-	-	-	-	-	315	1,152	1*
P <sub>27</sub>	-	1800	34	-	-	-	-	-	235	14,59	1*
P <sub>28</sub>	-	397	24	-	-	-	-	-	315	1,049	2**
P <sub>29</sub>	-	370	15	-	-	-	-	-	315	1,397	2**
P <sub>30</sub>	-	370	15	-	-	-	-	-	315	1,397	2**
S <sub>1</sub>	-	-	-	-	797	14	200	30	315	-	1*
S <sub>2</sub>	-	-	-	-	397	10,5	125	20	315	-	1*

Tablo 3.26'nin devamı

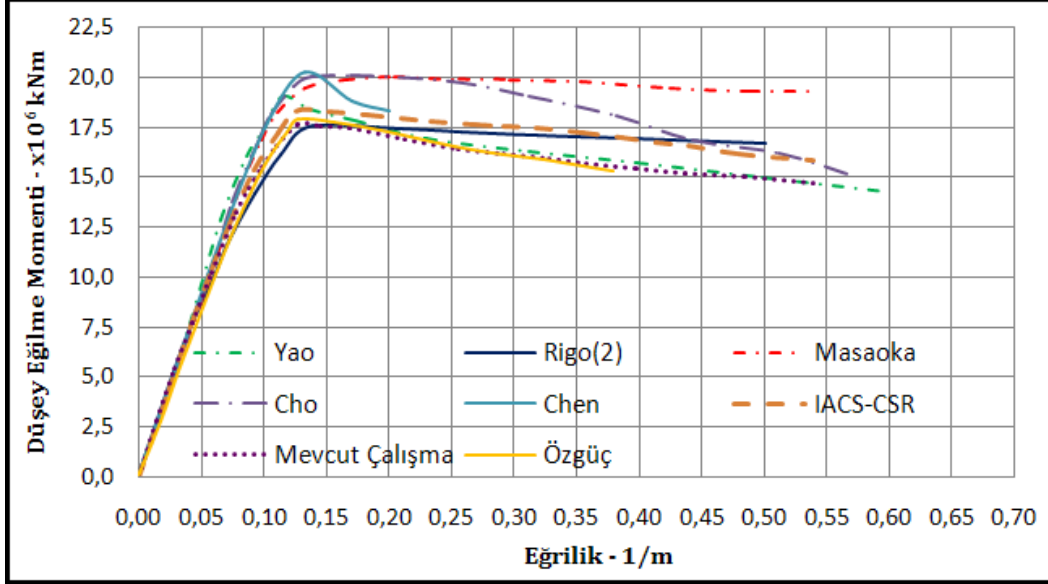
S <sub>3</sub>	-	-	-	-	297	10,5	100	14	315	-	1*
S <sub>4</sub>	-	-	-	-	297	10,5	100	14	315	-	1*
S <sub>5</sub>	-	-	-	-	347	10,5	125	20	315	-	1*
S <sub>6</sub>	-	-	-	-	797	14	180	23	315	-	1*
S <sub>7</sub>	-	-	-	-	897	14	200	23	315	-	1*
S <sub>8</sub>	-	-	-	-	945	15	200	23	235	-	1*
S <sub>9</sub>	-	-	-	-	847	13	180	23	235	-	1*
S <sub>10</sub>	-	-	-	-	797	13	180	23	235	-	1*
S <sub>11</sub>	-	-	-	-	747	11,7	180	23	235	-	1*
S <sub>12</sub>	-	-	-	-	747	11,7	150	23	235	-	1*
S <sub>13</sub>	-	-	-	-	647	11,7	150	23	235	-	1*
S <sub>14</sub>	-	-	-	-	549	10,5	125	20	235	-	2**
S <sub>15</sub>	-	-	-	-	297	10,5	100	14	315	-	2**
S <sub>16</sub>	-	-	-	-	297	10,5	100	14	315	-	2**
S <sub>17</sub>	-	-	-	-	647	11,7	150	23	235	-	1*
S <sub>18</sub>	-	-	-	-	747	11,7	150	23	235	-	1*
S <sub>19</sub>	-	-	-	-	847	13	180	23	315	-	1*
S <sub>20</sub>	-	-	-	-	847	13	180	30	315	-	1*
S <sub>21</sub>	-	-	-	-	847	14	180	23	315	-	1*
S <sub>22</sub>	-	-	-	-	847	14	180	30	315	-	1*
K <sub>1</sub>	-	1000	24	-	-	-	-	-	315	6,378	1*
K <sub>2</sub>	-	1000	24	-	-	-	-	-	315	6,378	1*
K <sub>3</sub>	-	1000	24	-	-	-	-	-	315	6,378	1*
K <sub>4</sub>	-	250	24	-	-	-	-	-	315	0,399	1*
K <sub>5</sub>	-	250	21	-	-	-	-	-	315	0,456	1*
K <sub>6</sub>	-	215	21	-	-	-	-	-	235	0,155	1*
K <sub>7</sub>	-	1000	17	-	-	-	-	-	315	9,004	1*
K <sub>8</sub>	-	900	17	-	-	-	-	-	315	7,293	1*
K <sub>9</sub>	-	1000	17	-	-	-	-	-	315	9,004	1*
K <sub>10</sub>	-	900	17	-	-	-	-	-	315	7,293	1*
K <sub>11</sub>	-	1000	21	-	-	-	-	-	315	7,289	1*
K <sub>12</sub>	-	925	16	-	-	-	-	-	235	3,770	T.E./T.E
K <sub>13</sub>	-	462,5	16,5	-	-	-	-	-	235	0,914	2**
K <sub>14</sub>	-	350	11,7	-	-	-	-	-	235	0,738	2**
K <sub>15</sub>	-	350	24,4	-	-	-	-	-	235	0,354	2**
K <sub>16</sub>	-	215	21	-	-	-	-	-	315	0,337	2**
K <sub>17</sub>	-	500	21	-	-	-	-	-	315	1,822	2**
K <sub>18</sub>	-	500	24	-	-	-	-	-	315	1,594	2**
K <sub>19</sub>	-	1000	24	-	-	-	-	-	315	6,378	2**
K <sub>20</sub>	-	650	15	-	-	-	-	-	315	4,311	2**
K <sub>21</sub>	-	650	15	-	-	-	-	-	315	4,311	2**
K <sub>22</sub>	-	1000	24	-	-	-	-	-	315	6,378	2**
K <sub>23</sub>	-	462,5	17	-	-	-	-	-	315	1,926	2**
K <sub>24</sub>	-	1000	24	-	-	-	-	-	315	6,378	2**
K <sub>25</sub>	-	650	15	-	-	-	-	-	315	4,311	2**
K <sub>26</sub>	-	650	15	-	-	-	-	-	315	4,311	2**
K <sub>27</sub>	-	640	24	-	-	-	-	-	315	2,612	2**
K <sub>28</sub>	-	462,5	24	-	-	-	-	-	315	1,056	2**
K <sub>29</sub>	-	350	11,7	-	-	-	-	-	235	0,738	2**
K <sub>30</sub>	-	350	24,4	-	-	-	-	-	235	0,354	2**
K <sub>31</sub>	-	925	16	-	-	-	-	-	235	3,770	1*
K <sub>32</sub>	-	850	24	-	-	-	-	-	315	4,608	1*
K <sub>33</sub>	-	850	24	-	-	-	-	-	315	4,608	1*
1*: Elasto-plastik davranış 2**: Elastik-tam plastik davranış T.E.: Tarafsız Eksen											

Ardından, Smith yöntemine göre yapılacak kademeli göçme analizi için hesaplamaya geçilmiş ve her bir eğrilik artımı adımı, önceki aşamada ayrıklaştırılan elemanlar için

elde edilen P-du diyagramları yardımıyla çökme durumu için Düşey Eğilme Momenti - Eğrilik eğrisi elde edilmiş, bu eğrinin pik noktası da geminin tahmini göçme mukavemeti değeri olarak belirlenmiştir. Geminin bazı elemanları için çalışmamızda elde edilen çökme durumu yük-eksenel kısalma eğrileri Ek-A'da gösterilmiştir. Önerilen yöntemle gerçekleştirilen kademeli göçme analizi, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırma yapmak için ilkel sehim değerleri hesaba katılarak yapıldığı gibi, ayrıca, ilkel sehimlerin mukavemet kaybına etkisini göstermek amacıyla ilkel sehimlerinin göz ardı edildiği durum için de yapılmıştır. Gemi kesitinin sarkma konumunda erişebildiği en büyük mukavemet momenti değeri, ilkel sehimlerinin göz ardı edildiği durum için  $19.87 \times 10^6$  kNm, ilkel sehimlerinin dikkate alınmasıyla gerçekleştirilen hesaplama neticesinde ise  $17.66 \times 10^6$  kNm olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sırasında gözlemlendiği üzere, yapısal bozulmaların başlamasıyla dip yapıda akma ve burkulmalar meydana gelmiştir. Bozulmaların ilerlemesiyle göçme mukavemet değerine ulaşıldığı, bu sırada güverte üzerinde de plastik şekil değiştirmeler başladığı ve hemen devamında yapının göçtüğü belirlenmiştir. Başlangıç sehimine bağlı olarak geminin kapasitesinde yaklaşık %11 lik bir azalma olmuştur. Ayrıca, gerçekleşen korozyon nedeniyle eleman mukavemetindeki azalmayı ve göçme mukavemeti değerini nasıl etkilediğini belirlemek için kalınlıklar orjinal haliyle alınıp hesaplar tekrarlanmıştır. Orjinal kalınlıkların ve ilkel sehimlerin olmamasının dikkate alınmasıyla gerçekleştirilen kademeli göçme analizi sonucunda da gemi kesitinin sarkma konumunda erişebildiği en büyük mukavemet momenti değeri  $20,37 \times 10^6$  kNm, orjinal kalınlıkların ve ilkel sehimlerin dikkate alınmasıyla ise  $18,74 \times 10^6$  kNm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç da, plak elemanların ve stifner gövdelerinin kalınlıklarında 1 mm, stifner flençlerinin kalınlıklarında da 2 mm olarak alınan korozyon azalması nedeniyle elemanların mukavemetini kaybederek plak burkulmalarına maruz kaldığını göstermektedir. Hesaplanan değer göçme anında sahip olduğu  $17.94 \times 10^6$  kNm'lik moment değerinden farklıdır. Bunun başlıca sebepleri için, başlangıç sehimlerinin hassas olarak tüm elemanlarda bilinmemesine ve hesaplamalarda yalnızca plaklar için ilkel sehim değerlerinin dikkate alınmasına, elemanlardaki korozyon değerlerinin tam bilinmemesine ve eleman ayrıklaştırmasına bağlı olduğu söylenebilir. Ancak, elde edilen değer, geminin orjinal göçme anında sahip olduğu değere ve literatürde diğer bilim insanlarının elde ettikleri sonuçlara yakınlık göstermesi ile yöntemimizin uygulanabilir ve güvenilir olduğunu söylemek de mümkündür. Gerçekleştirilen kademeli göçme analizi sonucunda



elde edilen düşey eğilme momenti-eğrilik eğrisi Şekil 3.60'da, karşılaştırmalı sonuçlar ise Tablo 3.27'de sunulmuştur.



Şekil 3.60. Düşey eğilme momenti-eğrilik eğrilerinin karşılaştırmalı gösterimi-II

Tablo 3.27. Göçme mukavemeti ve eğrilik değerlerinin karşılaştırılması

Yapılan Çalışma	$M_u$ ( $\times 10^6$ kN.m)	$\kappa_u$ (1/m)	$I_y$ ( $m^4$ )	$z_g$ (m)
Rutherford & Caldwell	17,94	0,121	-	-
Yao <sup>1</sup>	19,04	0,115	800,89	12,27
Cho <sup>2</sup>	20,09	0,168	819,70	12,15
Chen <sup>3</sup>	20,23	0,132	-	-
Rigo(2) <sup>4</sup>	17,54	0,139	812,86	12,81
Masaoka <sup>5</sup>	20,01	0,203	828,30	12,01
Dow <sup>6</sup>	18,80	-	743,80	11,85
Özgüç <sup>7</sup>	17,89		808,46	12,34
IACS-CSR <sup>8</sup>	18,03	0,126	803,55	12,32
Tayyar - Korozyonlu İlkel Sehimsiz	19,06	-	-	-
Tayyar - Korozyonlu İlkel Sehimli <sup>9</sup>	17,02	-	-	-
Mevcut Çalışma-Korozyonlu İlkel Sehimsiz	19,87	0,135	818,62	12,55
Mevcut Çalışma-Korozyonlu İlkel Sehimli <sup>10</sup>	17,66	0,130	818,62	12,25
Mevcut Çalışma - Korozyonsuz İlkel Sehimsiz	20,37	0,147	825,20	12,71
Mevcut Çalışma - Korozyonsuz İlkel Sehimli	18,74	0,141	825,20	12,34
Ortalama / %Varyasyon Katsayısı (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)	18,63 / 6,3			

### 3.4.4. Çift Dip – Çift Cidar Tipik Bir Konteyner Gemisinin Göçme Mukavemet Momenti Tahmini

Çalışmamızda önerilen yöntemi ve güvenilirliğini tekrar test etmek ve bunun yanında analiz öncesi seçilen başlangıç sehim, kaynak sonrası artık gerilme ve korozyon payı değerlerinin göçme mukavemeti değerine olan etkilerini incelemek ve göstermek amacıyla, daha önce üzerinde yapılmış olan birtakım göçme mukavemeti tahmini çalışması sonuçlarının literatürde var olması ve güvenilir karşılaştırmaya imkân tanınması nedeniyle, tipik bir çift dipli - çift cidarlı konteyner gemisi enine kesiti için kademeli göçme analizi 5 farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar aşağıda Tablo 3.28’de gösterilmiştir.

Tablo 3.28. Konteyner gemisi kademeli göçme analizi senaryoları

Senaryo No	$w_0$	$\sigma_{rcx}$	$t_{eleman}$
1	$0,025 \times \beta^2 \times t_p$	$-0,15 \times \sigma_{Yp}$	$t_{kor} - ABS$
2	$0,1 \times \beta^2 \times t_p$	$-0,15 \times \sigma_{Yp}$	$t_{kor} - ABS$
3	$0,3 \times \beta^2 \times t_p$	$-0,15 \times \sigma_{Yp}$	$t_{kor} - ABS$
4	$0,1 \times \beta^2 \times t_p$	$-0,05 \times \sigma_{Yp}$	$t_{kor} - ABS$
2	$0,1 \times \beta^2 \times t_p$	$-0,15 \times \sigma_{Yp}$	$t_{kor} - ABS$
5	$0,1 \times \beta^2 \times t_p$	$-0,3 \times \sigma_{Yp}$	$t_{kor} - ABS$

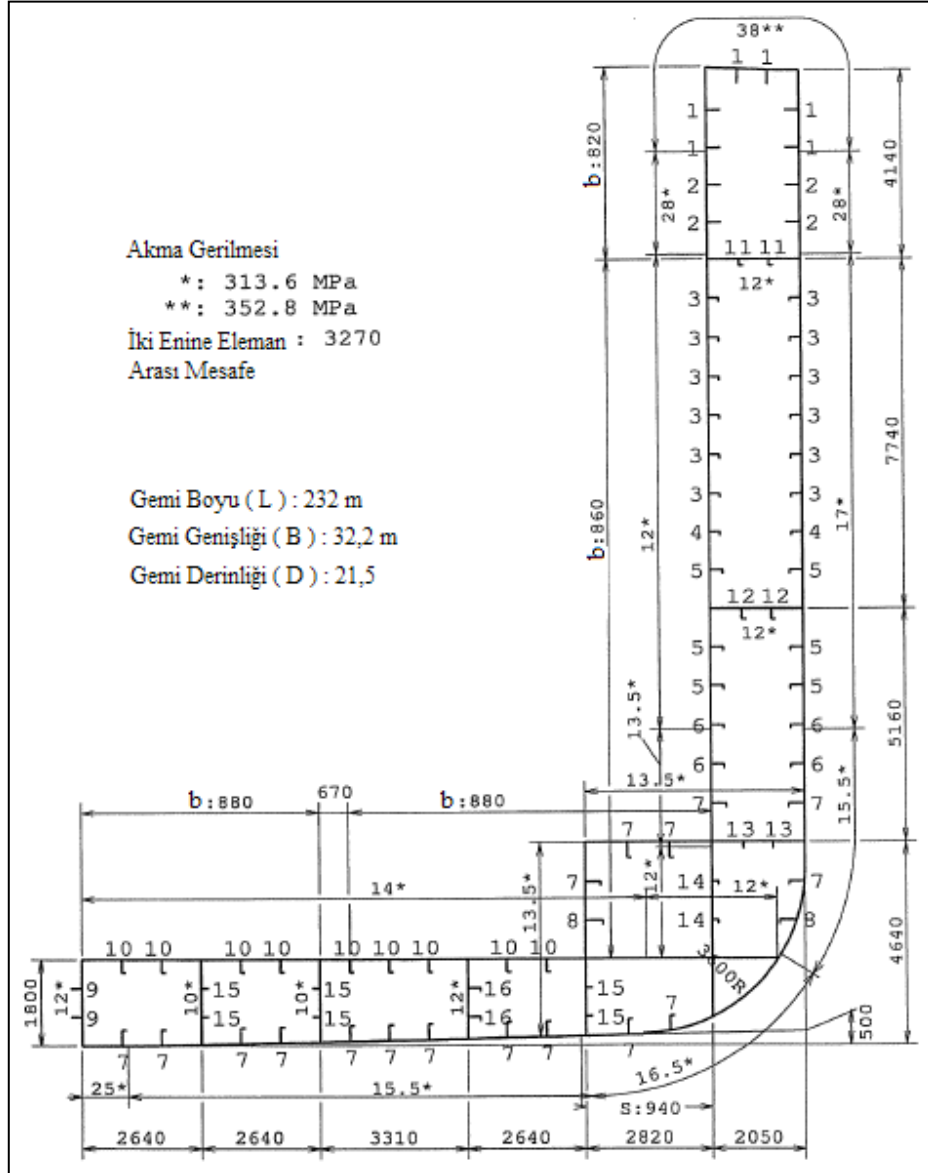
Şekil 3.61’de tipik bir konteyner gemisinin orta kesit ve perspektif resimleri, Şekil 3.62’de göçme mukavemeti hesaplanan konteyner gemisinin numaralandırılmış yapı elemanları ile birlikte orta kesit resmi ve Tablo 3.29’da da hesaplamaları gerçekleştirilen bu konteyner gemisinin yapımında kullanılan boyuna stifner elemanların geometrik ve malzeme özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.61. Tipik bir çift dip-çift cidar konteyner gemisi

Tablo 3.29. Konteyner gemisinde kullanılan stifnerlerin geometrik ve malzeme özellikleri

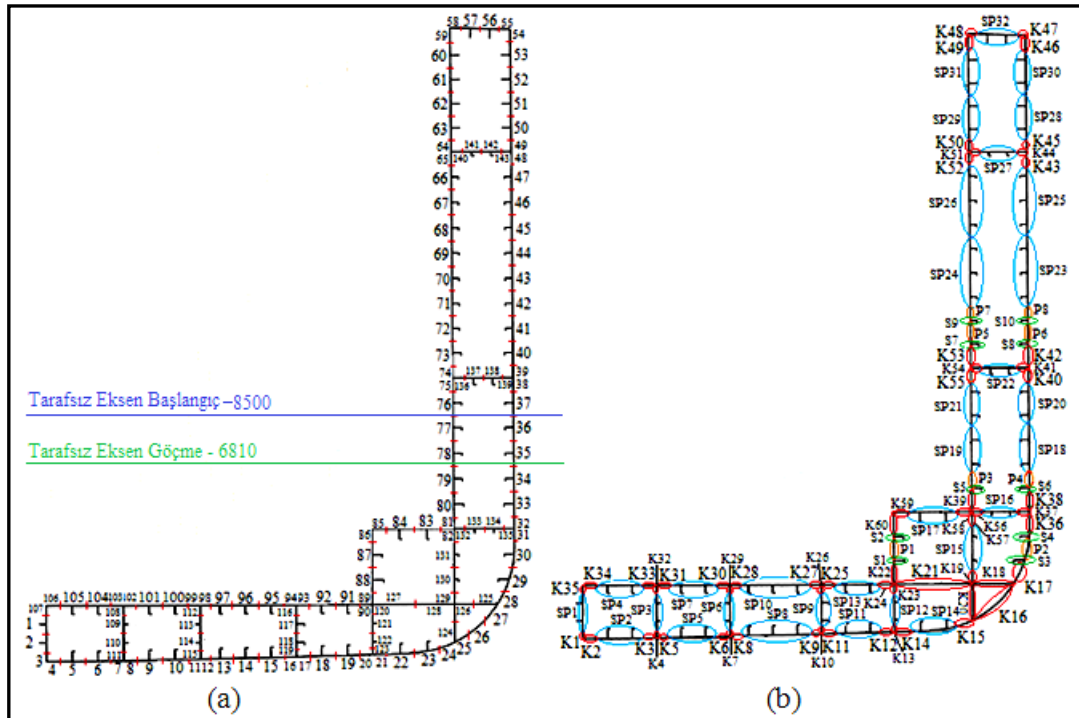
Stf. No	Gövde	Fleñç	Stif. Tipi	Malz. Akma	Stf. No	Gövde	Fleñç	Stif. Tipi	Malz. Akma
1	300 x 38		Lama	352,8	9	230 x 10		Lama	313,6
2	300 x 28		Lama	313,6	10	300 x 13	90 x 17	L	313,6
3	250 x 10	90 x 15	L	313,6	11	150 x 12	90 x 12	L	313,6
4	250 x 12	90 x 16	L	313,6	12	250 x 12	90 x 15	L	313,6
5	300 x 11	90 x 16	L	313,6	13	150 x 12		Lama	313,6
6	300 x 13	90 x 17	L	313,6	14	150 x 9	90 x 9	L	313,6
7	350 x 12	100 x 17	L	313,6	15	150 x 10		Lama	313,6
8	400 x 11,5	100 x 16	L	313,6	16	300 x 11	90 x 16	L	313,6



şekil 3.62. Çift Dip-ift Cidar konteyner gemisi orta kesiti

Tablo ve şekillerden de görüldüğü üzere geminin inşaatında iki tür çelik malzeme kullanılmıştır. Güvertede, borda ve çift cidarın en üst iki elemanlı kısmında daha yüksek mukavemetli çelik ( $\sigma_Y=352,8$  MPa), bordada, iç cidarda, dipte ve çift dip kaplamasında ve boyuna elemanlardagöreceli olarak daha az mukavemetli çelik ( $\sigma_Y=313,6$  MPa) tercih edilmiştir. Analizleri gerçekleştirilen iki enine destek elemanı arası mesafe (L) 3,27 m, borda ve iç cidarın üst kısmında stifnerler arası mesafe 820 mm, geri kalan kısımlarında ise stifnerler arası mesafe 820 mm, dip ve çift dipte ise stifnerler arası mesafe 880 mm'dir.

Hesaplamalarda tüm elemanların kalınlıkları iki farklı senaryo ile kullanılmıştır. Bunların ilkinde korozyon kayıpları göz önüne alınmayarak tasarım kalınlıkları kullanılmıştır. İkinci senaryoda ise, IACS-CSR kuralları kapsamında ve geçmiş bölümlerde anlatılan korozyon payları ve net kalınlık yaklaşımı doğrultusunda kalınlıklar yeniden belirlenmiştir. Önerilen yöntemle, bu iki senaryo için yapılan hesaplamalarda ayrıca, tekil plak elemanlara ait başlangıç sehim değerleri Smith'in ortalama ilkel sehim değeri formülü ( $w_0=0,1.\beta^2.t$ ) ile ve artık kaynak gerilmesi değeri ise yine ortalama artık kaynak gerilmesi formülü ( $-0,15.\sigma_{YP}$ ) ile kullanılmıştır. IACS-CSR hesaplaması için kullanılan 143 elemanlı orta kesit eleman ayrıklaştırması Şekil 3.63-a'da, önerilen yöntem kapsamındaki 110 elemanlı orta kesit eleman ayrıklaştırması Şekil 3.63-b'de sunulmuştur.



Şekil 3.63. Konteyner gemisi orta kesitinin eleman ayrıklaştırması

Ayrıklaştırmalar sonrasında, ilk olarak literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırma yapabilmek amacıyla sarkma durumu için, ortalama başlangıç sehim ve ortalama artık kaynak gerilmesi değerleri ile kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 3.30’da verilmiştir. Ardından, Tablo 3.28’de belirtilen senaryolara göre hesaplamalar tekrarlanmış ve elde edilen moment-eğrilik eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.64 – Şekil 3.65’de sunulmuştur.

Tablo 3.30. Konteyner gemisi göçme mukavemeti değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları

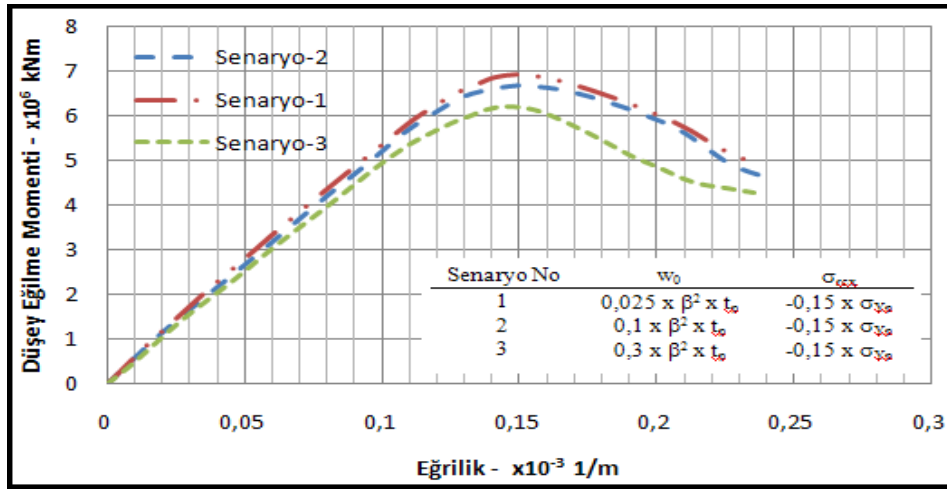
		IACS- CSR	Chen	Paik ALPS/HULL	SEY	Rina Kuralları	Rigo-2	Yao	Mevcut Çalışma
Çökme Sagging)	$M_u$ $\times 10^6 \text{kN.m}$	6,81	5,47	6,64	6,95	5,89	6,91	6,72	6,68
	$\kappa_u$	$1,65 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$	$2,09 \times 10^{-4}$	$1,58 \times 10^{-4}$	$1,41 \times 10^{-4}$	$1,52 \times 10^{-4}$
Sarkma Hogging)	$M_u$ $\times 10^6 \text{kN.m}$	6,65	6,56	6,92	6,97	6,86	7,20	6,72	6,83
	$\kappa_u$	$1,94 \times 10^{-4}$	$2,49 \times 10^{-4}$	$1,87 \times 10^{-4}$	$2,17 \times 10^{-4}$	$2,49 \times 10^{-4}$	$1,62 \times 10^{-4}$	$1,63 \times 10^{-4}$	$1,57 \times 10^{-4}$

Tabloda bulunan literatüre ait göçme mukavemet momenti ve eğrilik değerleri, ISSC-2000 ve ISSC-2012 kapsamında gerçekleştirilen karşılaştırma çalışması sonucunda elde edilen grafiklerden, ilgili bilgisayar programları kullanılarak okunmuştur. Bu değerlere bakıldığında, mevcut çalışma sonucunun diğer sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Göçme mukavemet değerlerinin sarkma (hogging) durumunda daha dar bir dağılım gösterdiği, çökme (sagging) durumunda ise bunun aksine daha geniş bir dağılım gösterdiği görülmüştür. Bunun sebebi, tarafsız eksenin üzerindeki elemanların genellikle daha narin plak oranlarına sahip olması ve kıyasla daha kalın dip elemanlara göre Euler burkulma göçmesine daha önce uğrama ihtimallerinin yüksek olması, bunun aksine dipteki panel elemanların yerel burkulma gerilmelerinin de akma gerilmesine çok yakın olmasıdır.

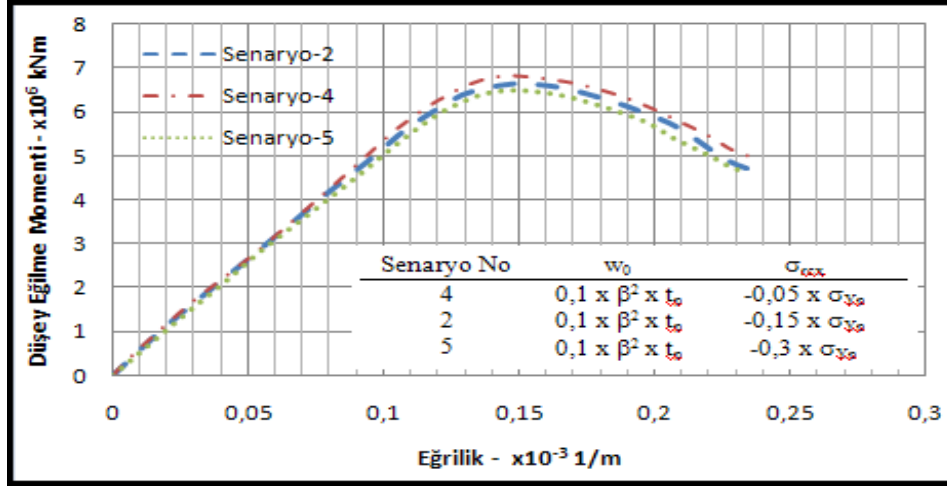
Gemi orta kısmının dalga çukuruna rastladığı durum olan çökme senaryosuna göre yapılan kademeli göçme analizinde, orta kesit göçme mukavemetine ulaşına dek hangi elemanların sırasıyla göçmeye uğrayacağı da gözlemlenmiştir. Düşey eğilme momenti

değerinin  $6,12 \times 10^6$  kNm, eğrilik değerinin  $1,23 \times 10^{-3}$  1/m olduğu adımda ilk olarak üst güverte plakları ile iç/dış borda kaplama plaklarının burkulma göçmesi gerçekleşmiştir. Daha sonra, düşey eğilme momenti değerinin  $6,55 \times 10^6$  kNm, eğrilik değerinin  $1,37 \times 10^{-3}$  1/m olduğu adımda üst güverte boyuna stifnerlerin burkulma göçmesi gerçekleşmiştir. Hemen ardından da, düşey eğilme momenti değerinin  $6,63 \times 10^6$  kNm, eğrilik değerinin  $1,43 \times 10^{-3}$  1/m olduğu adımda ikinci güverte boyuna stifnerlerinin ve iç/dış borda kaplaması boyuna stifnerlerinin burkulma göçmesi gerçekleşmiştir. Ardından son olarak da, düşey eğilme momenti değerinin  $6,68 \times 10^6$  kNm, eğrilik değerinin  $1,52 \times 10^{-3}$  1/m olduğu adımda, ikinci güverte ve üst güverte arasındaki iç/dış borda kaplaması plaklarının burkulma göçmesi gerçekleşmiş ve kesitin göçme mukavemeti limit değerine ulaşılmıştır.

Çalışmanın devamı olarak hesaplamaları yapılan Tablo 3.28'deki senaryoların karşılaştırmalı sonuçları, başlangıç sehimlerinin etkisi, artık kaynak gerilmelerinin etkisi, grafikler halinde ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 3.64. Başlangıç sehimlerinin göçme mukavemetine etkisi



Şekil 3.65. Artık kaynak gerilmesinin göçme mukavemetine etkisi

Son iki grafiğe baktığımızda, ilk olarak başlangıç sehimlerinin göçme mukavemeti değerine olan etkisinin, artık kaynak gerilmesinin etkisinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Artık kaynak gerilmesi değerlerinin sabit tutulduğu durumda, plak elemanlardaki bu başlangıç sehimlerinin değeri arttıkça bütün kesit göçme mukavemeti değerlerinin düştüğünü, daha çabuk göçtüklerini ve bu etkinin hesaplamalarda göz ardı edilemeyecek düzeyde olduğu görülmüştür. Bunun yanında, başlangıç sehimlerinin sabit tutulduğu durumda, artık kaynak gerilmelerinin değeri arttıkça, bütün kesit göçme mukavemeti değerinin yine düşüş gösterdiği görülmüştür. Ancak bu etki, ilgili grafikten de görüleceği üzere çok fazla hissedilir düzeyde değildir. Bu durumda, yeni inşa veya genç bir geminin (1-3 yaş) hesaplamalarında yine de göz önüne alınmasında fayda olduğu, ancak yaşlı gemilerde, çok önemli bir yapısal tadilat geçirmediği takdirde, kaynak sonrası gerilmelerin etkilerini kaybetmiş olacağı düşüncesiyle ihmal edilebileceği söylenebilir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, temel olarak, gemilerin gövde kirişlerinin, ağırlıklı olarak düşey eğilme momenti etkisiyle aksel bası ve çeki kuvvetleri altındaki göçme mukavemeti değerlerinin gerçeğe yakın hesaplanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan literatür çalışması sonucunda, uygulama ve hızlı-etkin sonuç alma bakımından en uygun olan Smith yöntemi temel alınmıştır. Smith yönteminde, ilk olarak gemi gövde kesitinin elemanlara ayrıştırılması ile tündengelim, daha sonra bu elemanların, aksel yük altında, tekil ve kombine davranışları kullanılarak gerçekleştirilen tüm gemi gövde kesiti kademeli göçme analizi ile tümevarım yaklaşımlarına dayanılmaktadır. Eleman ayrıştırmasına dayalı bu yöntemin başarılı sonuçlar vermesi de yine ayrıştırılan elemanların yük-aksel kısalma eğrilerinin gerçekçi olarak elde edilmesine bağlıdır. Bu bağlamda, gemi gövde yapısını oluşturan plak, stifner ve desteklenmiş paneller şeklinde ayrıştırılan elemanların burkulma ve göçme davranışları, sırasıyla, ilkel sehim ve artık kaynak gerilmelerine sahip tekil plak denklemleri, IACS-CSR kuralları doğrultusunda stifner gövdesi burkulması, stifner burulmalı burkulması ve plak-stifner birleşimi kiriş burkulması ile ortotropik panel denklemlerinin kullanılması ile elde edilerek, ikinci aşama olan kademeli göçme analizinin alt hesaplamaları yapılmıştır. Böylelikle belirlenen hedefe ulaşmak için ilk aşamada, Smith yöntemi uygulanırken kullanılacak yapısal eleman davranışları elde edilmiştir.

Elde edilen bu davranışların güvenilir biçimde kullanılabilirliğini kanıtlamak amacıyla, literatürde, sonlu elemanlar analizi, test veya ampirik formüller ile elde edilmiş göçme mukavemeti değer ve davranışları bulunan tekil plak, tekil stifner ve stifnerli paneller, çalışma kapsamındaki kabuller, sınır şartları ve formülasyonlar kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizler ve karşılaştırmalı sonuçlar Bölüm 3 altında tablo ve grafiklerle sunulmuştur. Burada, özellikle desteklenmiş panel elemanların davranışlarının elde edilmesi için, ortotropik panel yaklaşımının, paneli oluşturan plak ve stifner elemanların davranışları kullanılmasıyla elastik sabitler açısından, geliştirilerek kullanılması, bunun yanında eleman ayrıştırmasının tekil plak ve tekil stifnerlere indirgenmesi çalışma açısından altı çizilmesi gereken unsurlardır. İlgili analizlerde yeterli yakınlıkta elde edilen sonuçların ardından, Smith yöntemi ile kademeli göçme analizi sayısal çalışmaları, ilk olarak, desteklenmiş panellerden oluşan, ilkel sehim değerleri



dikkate alınarak tek dipli tanker modeli olan kutu kiriş üzerinde (Nishihara,1990), ardından 1/3 ölçekte küçültülerek inşa edilmiş bir fırkateyn kesiti üzerinde (Dow, 1999), daha sonra çift cidarlı bir tanker gemisinde (Dalma, 2009) ve Energy Concentration isimli büyük tonajlı ham petrol gemisinde ve son olarak da çift dip-çift cidar bir konteyner gemisi kesiti üzerinde uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama çalışmalarından elde edilen sonuçlar herbir uygulamanın başlığı altında vurgulanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen genel sonuç değerlendirmeleri ve öneriler maddeler halinde sırasıyla sunulmuştur.

- Tez çalışmasında gemilerin nihai mukavemetini hesaplamak amacıyla kademeli göçme analizi yaklaşımı seçilmiştir.
- Hızlı ve etkin çözüme ulaşmak için gemi kesitini elemanlara ayırarak çözüm gerçekleştiren Smith yöntemi tercih edilmiştir.
- Smith yöntemi, geleneksel eleman ayrıklaştırması dışına çıkılarak, sadece plak-stifner birleşimi ve köşe elemanlar olarak değil, bunların yanında tekil plak, tekil stifner ve desteklenmiş panel elemanlar şeklinde uygulanmıştır.
- Klasik Smith yönteminde plak ve stifnerler ile kombinasyonlarından oluşan elemanların birbirlerine olan etkileri yok sayılırken, çalışma kapsamında özellikle desteklenmiş panel elemanlarda yapısal elemanların birbirlerine etkileri dikkate alınarak gerilme-şekil değiştirme davranışları belirlenmiş ve kademeli göçme analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Tekil plaklar ve tekil stifnerlerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılarak desteklenmiş panellerin gerilme-şekil değiştirme davranışları elde edilmiştir.
- Literatürde göçme mukavemeti değerleri belli olan tekil plak, stifner ve desteklenmiş paneller için çalışma kapsamındaki kullanılan yöntemlerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.
- Çalışma kapsamındaki kademeli göçme analizine ait sonuçlar, IACS-CSR sonuçları ve literatürdeki deneysel ve sonlu elemanlardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve yöntemin başarısı gösterilmiştir.
- Nishihara kutu kiriş hesaplamasında, çalışma kapsamında altı çizilmek istenen ilkel sehim ve artık kaynak gerilmelerinin tekil elemanların ve nihayetinde de tüm kesitin göçme mukavemet değerlerine etkisi gösterilebilmiştir.
- Gerçekleştirilen gerçek gemi kesiti uygulamalarında da tatmin edici düzeyde göçme değerleri elde edilmiştir.

- Diğer vurgulanması gereken sonuçlardan birisi de, stifnerli panellerin göçme olasılıklarından olan global bütün panel göçmesinde, ortogonal eleman boyutlandırmasının ve malzeme gerilme-şekil değiştirme davranışının etkin rol oynadığının belirlenmiş olmasıdır.
- Bu etkiler düşünüldüğünde, olası tüm göçme tiplerinin dikkate alınması ve böylelikle daha gerçekçi bir değerlendirme imkanı sunması açısından ortotropik panel hesaplamalarının mevcut çalışmaya dâhil edilmesi problemin anlaşılmasında ve çözümlenmesinde önem arz etmiştir.
- Bunların yanında, stifnerli panel elemanlar daha az eleman ile kademeli göçme analizi yapılmasına imkân tanınmasının yanında, geleneksel Smith yönteminin önerdiği olabildiğince küçük eleman ayrıklaştırması kavramına ters düşmekte ve özellikle Nishihara kutu giriş örneğinde olduğu gibi az sayıda stifnerden oluşan desteklenmiş panellerin analizinde daha hassas sonuçların elde edilememesine sebep olmaktadır.
- Konteyner gemisi örneğindeki sonuç grafiklerine baktığımızda, ilk olarak başlangıç sehimlerinin göçme mukavemeti değerine olan etkisinin, artık kaynak gerilmesinin etkisinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Artık kaynak gerilmesi değerlerinin sabit tutulduğu durumda, plak elemanlardaki bu başlangıç sehimlerinin değeri arttıkça bütün kesit göçme mukavemeti değerlerinin düştüğü, daha çabuk göçtükleri ve bu etkinin hesaplamalarda göz ardı edilemeyecek düzeyde olduğu görülmüştür.
- Bunun yanında, başlangıç sehimlerinin sabit tutulduğu durumda, artık kaynak gerilmelerinin değeri arttıkça, bütün kesit göçme mukavemeti değerinin yine düşüş gösterdiği görülmüştür. Ancak bu etki, ilgili grafikten de görüleceği üzere çok fazla hissedilir düzeyde değildir.
- Bu durumda, yeni inşa veya genç bir geminin (1-3 yaş) hesaplamalarında yine de göz önüne alınmasında fayda olduğu, ancak yaşlı gemilerde, çok önemli bir yapısal tadilat geçirmediği takdirde, kaynak sonrası gerilmelerin etkilerini kaybetmiş olacağı düşüncesiyle ihmal edilebileceği söylenebilir.
- Bundan sonra, konuyla ilgili yapılacak çalışmalarda ortotropik panel yaklaşımının, birden fazla enine stifner veya tam bir ambar boyu için genişletilmesi daha gerçekçi bir çözümlenme olacaktır.

- Plak stifner birleşimi plak kenarlarında basit mesnet sınır şartı kabulü yerine, daha gerçekçi elastik sınır şartları için de çözümlene gerçekleştirilmelidir.
- Bunların yanında, çalışmada yalnızca boyuna aksenal bası kuvvetleri altında hesaplamalar yapıldığı düşünüldüğünde, enine aksenal bası ve düzlem dışı yanal basınç kuvvetlerinin de dahil edildiği çözümler de geliştirilmelidir.

## 5. KAYNAKLAR

- Alagusundaramoorthy, P., Sunderavadivelu, R. ve Ganapathy, C., 1995. Ultimate Strength of Stiffened Panels with Cutouts Under Uniaxial Compression, Marine Structures, 8, 279-308.
- Alagusundaramoorthy, P., Aruljayachandran, S. ve Sundaravadivelu R., 2003. Stability of Stiffened Plates with Initial Imperfections, Journal of Engineering Mechanics, 129, 751-758.
- Amlashi, H. K. K. ve Moan, T., 2008. Ultimate Strength Analysis of a Bulk Carrier Hull Girder under Alternate Hold Loading Condition – A Case Study Part 1: Nonlinear Finite Element Modelling and Ultimate Hull Girder Capacity, Elsevier Science Marine Structures, 21, 327-352.
- Amlashi, H. K. K. ve Moan, T., 2009. Ultimate Strength Analysis of a Bulk Carrier Hull Girder under Alternate Hold Loading Condition, Part 2: Stress Distribution in the Double Bottom and Simplified Approaches, Elsevier Science Marine Structures, 22, 522-544.
- Bedair, O. K., 1997. The Elastic Behaviour of Multi Stiffened Plates Under Uniform Compression, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 27, 311-335.
- Belenkiy, Y. ve Raskin, Y., 2001. Estimate of the Ultimate Load on Structural Members Subjected to Lateral Loads, Marine Technology, 38, 169-176.
- Benson S., Downes J. ve Dow R. S., 2009. Collapse Modes and Ultimate Strength Characteristics of Aluminium Grillages in Large High-speed Craft, In: Proceedings of 10<sup>th</sup>. International Conference on Fast Sea Transportation.
- Benson S., Downes J. ve Dow R.S., 2010, A Semi Analytical Method to Predict the Ultimate Strength and Collapse Behaviour of Orthogonally Stiffened Panels, In: 11<sup>th</sup>. International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brezilya.
- Benson S., 2011. Progressive Collapse Assessment of Lightweight Ship Structures, Doktora Tezi, Newcastle University.
- Benson S., Dow R.S. ve Downes J., 2011. Ultimate Strength Characteristics of Aluminium Plates for High-speed Vessels, Ships and Offshore Structures, 6, 67-80.

- Brubak, L., Hellesland, J. ve Steen, E., 2005. Semi-Analytical Buckling Strength Analysis of Plates with Arbitrary Stiffener Orientations, Dept. of Math., University of Oslo Mechanics and Applied Mathematics Preprint Series.
- Byklum, E. ve Amdahl, J., 2002. Nonlinear Buckling Analysis and Ultimate Strength Prediction of Stiffened Steel and Aluminium Panels, The Second International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Busan-Korea.
- Caldwell, J. B., 1965. Ultimate Longitudinal Strength, Transactions, RINA, 107, 411-430.
- Cameron, J., Nadeau, J. ve LoSciuto, J., 1997. Ultimate Strength Analysis of Inland Tank Barges, USCG Marine Safety Center.
- Chen, W.F. ve Lui, E.M., 1987. Structural Stability Theory and Implementation, Elsevier, New York.
- Chen, Y. 2003. Ultimate Strength Analysis of Stiffened Panels using a beam-column Method, Doktora Tezi, Aerospace Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Daley, C., Hermanski, G., Pavic, M. ve Hussein, A., 2007. Ultimate Strength of Frames and Grillages Subject to Lateral Loads – an Experimental Study, 10<sup>th</sup>. International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Houston Texas, United States of America.
- Dalma, E., 2009. Ultimate Hull Girder Strength Assessment Using Semi-Analytical and Computational Methods, Doktora Tezi, National Technical University of Athens.
- Dow, R. S., Hugill, R. C., Clark, J. D. ve Smith, C. S., 1981. Evaluation of Ultimate Ship Hull Strength, Extreme Loads Response Symposium.
- Dow, R.S., 1991. Testing and Analysis of a 1/3 Scale Welded Steel Frigate Model, Proc. Int. Conf. on Advances in Marine Structures, ARE, 749-773.
- Faulkner, D., 1965. Written Discussion on “Caldwell J. B., Ultimate Longitudinal Strength, Transactions, RINA, 107, 411-430.
- Faulkner, D.A., 1974. Review of Effective Plating for Use in the Analysis of Stiffened Plating in Bending and Compression, Journal of Ship Research, 19, 11-17.
- Fujikubo, M. ve Yao, T., 1999. Elastic Local Buckling Strength of Stiffened Plate Considering Plate/Stiffener Interaction and Welding Residual Stress, Elsevier Science Marine Structures, 12, 543-564.

- Fujikubo, M. ve Kaeding, P., 2002. New Simplified Approach to Collapse Analysis of Stiffened Plates, Elsevier Science Marine Structures, 15, 251-283.
- Fujikubo, M., Yao, T., Khedmati, M. R., Harada, M. ve Yanagihara, M., 2005. Estimation of Ultimate Strength of Continuous Stiffened Panel under Combined Transverse Thrust and Lateral Pressure Part 1: Continuous Plate, Elsevier Science Marine Structures, 18, 383-410.
- Ghosh, B., 2003. Consequences of Simultaneous Local and Overall Buckling in Stiffened Panels, Master Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Amerika.
- Gordo, J.M., Soares, C.G. ve Faulkner, D., 1996. Approximate Assessment of the Ultimate Longitudinal Strength of the Hull Girder, Journal of Ship Research, 40, 1, 60-69.
- Gordo, J.M., Guedes Soares, C., 1996. Approximate Methods to Evaluate the Hull Girder Collapse Strength, Marine Structures, 9, 3, 449-470.
- Gordo, J.M. ve Guedes Soares, C., 1997. Interaction Equation for the Collapse of Tankers and Containership Under Combined Bending Moments, Journal of Ship Research, 41, 230-240.
- Grondin, G.Y., Chen, Q., Elwi, A.E. ve Cjeng, J.J., 1998. Stiffened Steel Plates Under Compression and Bending, Elsevier Science Journal of Constructional Steel Research, 45, 2, 125-148.
- Grondin, G. Y., Elwi, A. E. ve Cheng, J. J. R., 1999. Buckling of Stiffened Steel Plates- A Parametric Study, Elsevier Science Journal of Constructional Steel Research, 50, 151-175.
- Guo, J., Wang, G., Ivanov, L. ve Perakis, A. N., 2008. Time-Varying Ultimate Strength of Aging Tanker Deck Plate Considering Corrosion Effect, Elsevier Science Marine Structures, 21, 402-419.
- Hansen, A.M., 1995. Reliability methods for the longitudinal Strength of Ships, Doktora Tezi, Dep. of Naval Arch. and Offshore Engineering, DTU.
- Hu, Y., Zhang, A. ve Sun, J., 2001. Analysis on the Ultimate Longitudinal Strength of a Bulk Carrier by Using a Simplified Method, Marine Structures, 14, 311-330.
- Hughes, O. ve Paik, J. K., 2010. Ship Structural Analysis and Design, SNAME, New Jersey.
- Hughes, O.F., 1988. A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach, Ship Structural Design, SNAME, New Jersey.

- IACS, 2012. Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, International Association of Classification Societies.
- İnan, M., 1996. Cisimlerin Mukavemeti, İTÜ Vakfı, İstanbul.
- Jang, B.S., Suh, Y.S., Paik, J.K., Seo, J.K. ve Kim, B.J., 2007. Ultimate Limit State Assessment of Tankers considering Common Structural Rules, TSCF 2007 Shipbuilders Meeting, Caldwell, J.B., 1965. Ultimate Longitudinal Strength, Trans Rina, 107, 441-430.
- Jiang, W., Bao, G. ve Roberts, J. C., 1997. Finite Element Modelling of Stiffened and Unstiffened Orthotropic Plates, Elsevier Science Computers & Structures, 63, 105-117.
- Khedmati, M. R., 2005. Simulation of Average Stress-Average Strain Relationship of Ship Unstiffened/Stiffened Plates Subject to In-Plane Compression, Scientia Iranica, 12, 359-367.
- Khedmati, M. R. ve Rastani, M., 2008. Ultimate Strength and Ductility Characteristics of Intermittently Welded Stiffened Plates Under In-Plane Axial Compression, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-ASME, 130.
- Khedmati, M. R., ve Ghavami, K., 2009. A Numerical Assessment of the Buckling/Ultimate Strength Characteristics of Stiffened Aluminium Plates with Fixed/Floating Transverse Frames, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 47, 1373-1386.
- Kim, B.J., 2003. Ultimate Limit State Design of Ship Structures, Doktora Tezi, Pusan National University, Güney Kore.
- Kim, K. ve Yoo, C. H., 2008. Ultimate Strengths of Steel Rectangular Box Beams Subjected to Combined Action of Bending and Torsion, Elsevier Science Engineering Structures, 30, 1677-1687.
- Kim, D. K., vd., 2012. The Necessity of Applying The Common Corrosion Addition Rule to Container Ships in Terms of Ultimate Longitudinal Strength, Elsevier Science Ocean Engineering, 49, 43-55.
- Kim, D. K., vd., 2013. Lateral Pressure Effects on the Progressive Hull Collapse Behaviour of a Suezmax-Class Tanker Under Vertical Bending Moments, Elsevier Science Ocean Engineering, 63, 112-121.
- Kuo, H.C. ve Chang, J.R., 2003. A simplified Approach to Estimate The Ultimate Longitudinal Strength of Ship Hull, Journal of Marine Science and Technology, 11, 3, 130-148.

- Lee, S. C., Yoon, D. Y., ve Yoo, C. H., 2002. Ultimate Bending Strength of Steel Box Girders Subjected to Negative Moment, 15<sup>th</sup>. ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University.
- Li, L. Y., Applegarth, I., Bull, J. W., Bettess, P. ve Bond, T. J., 1996. Adaptive Analysis of Stiffened Structures Using Stiffened Plate Bending Elements, Elsevier Science Int. J. Pres. Ves. & Pipping, 65, 117-125.
- Li, L. Y. ve Bettess, P., 1997. Buckling of Stiffened Plates and Design of Stiffeners, Elsevier Science Int. J. Pres. Ves.& Pipping, 74, 177-187.
- Louca, L. A. ve Harding, J. E., 1996. Torsional Buckling of Outstands in Longitudinally Stiffened Panels, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 24, 211-229.
- Marguerre, K., 1938. Zur Theorie der Gekrümmter Platte Grosser Formänderung. Proc. Fifth Int. Congress Appl. Mech., 93.
- Murray, N.W., 1984. Introduction to the Theory of Thin-Walled Structures, Clarendon Press, Oxford.
- Nishihara, S., 1983. Analysis of Ultimate Strength of Stiffened Rectangular Plate (4th Report)- on the Ultimate Bending Moment of Ship Hull Girder, JSNA of Japan, 154.
- Nishihara, S. 1984. Ultimate Longitudinal Strength of Mid-ship Cross Sections, Naval Architecture and Ocean Engineering, 22, 200-214.
- Ok, D., Pu, Y. ve Incecik, A., 2007. Computation of Ultimate Strength of Locally Corroded Unstiffened Plates under Uniaxial Compression, Elsevier Science Marine Structures, 20, 100-114.
- Ostapenko, A., 1981. Strength of Ship Hulls Girders under Moment, Shear and Torque, Extreme Loads Response Symposium, The Society of Naval Architects and Maritime Engineers, Arlington, U.S.A, 149-165.
- Ozguc, O, Das, P.K. ve Barltrop, N, 2005. A Comparative Study on the Structural Integrity of Single and Double Side Skin Bulk Carriers Under Collision Damage, Marine Structures, 18, 511–547.
- Ozgülç, Ö., Das, P. K. ve Barltrop, N., 2006. The New Simple Design Equations for The Ultimate Compressive Strength of Imperfect Stiffened Plates, Elsevier Science Ocean Engineering, 33.
- Ozguc, O, 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.



- Ozgülç, Ö. ve Barltrop, N. D. P., 2008. Analysis on the Hull Girder Ultimate Strength of a Bulk Carrier Using Simplified Method Based on an Incremental-Iterative Approach, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-ASME, 130.
- Paik, J. K., 1993. Hull Collapse of an Aging Bulk Carrier under Combined Longitudinal Bending and Shearing Force, Meeting of The Royal Institution of Naval Architects.
- Paik J.K. ve Mansour A. A., 1995. Simple Formulation for Predicting the Ultimate Strength of Ships, Journal of Marine Science Technology, 1, 52-62.
- Paik, J. K. ve Pedersen, P. D., 1996. A Simplified Method for Predicting Ultimate Compressive Strength of Ship Panels, International Shipbuilding Progress, 43, 139-157.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K. ve Kim, D. H., 1999. An Analytical Method for The Ultimate Compressive Strength and Effective Plating of Stiffened Panels, Elsevier Science Journal of Constructional Steel Research, 49, 43-68.
- Paik J. K., Thayamballi A. K., Wang G. ve Kim B. J., 2000. On Advanced Buckling and Ultimate Strength Design of Ship Plating, The Society of Naval Architects and Marine Engineers Annual Meeting, 1-34.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K., Pedersen P. T. ve Park Y. I., 2001. Ultimate Strength of Ship Hulls under Torsion, Ocean Engineering, 28, 1097-1133.
- 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, 3, 215-246.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K. ve Kim B. J., 2001. Advanced Ultimate Strength Formulations for Ship Plating Under Combined Biaxial Compression/Tension, Edge Shear, and Lateral Pressure Loads, Marine Technology, 38, 9-25.
- 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, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 40, 45-83.
- Paik, J. K. ve Thayamballi, A. K., 2002. An Experimental Investigation on The Dynamic Ultimate Compressive Strength of Ship Plating, International Journal of Impact Engineering.
- Paik, J.K. ve Thayamballi, A.K., 2003. Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, John Wiley & Sons, San Ramon.

- Paik, J. K., Lee, J. M. ve Lee, D. H., 2003. Ultimate Strength of Dented Steel Plates under Axial Compressive Loads, International Journal of Mechanical Sciences, 45, 433-448.
- Paik, J. K., Lee, J. M., Park, Y., Hwang J. S. ve Kim J. W., 2003. Time-Variant Ultimate Longitudinal Strength of Corroded Bulk Carriers, Elsevier Science Marine Structures, 16, 567-600.
- Paik J. K., 2005. Ultimate Strength of Dented Steel Plates under Edge Shear Loads, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 43, 1475-1492.
- Paik J. K. ve Seo, J. K., 2004. Ultimate Limit State Assessment of Steel Plates: A Benchmark Study, Ship Structural Mechanics Lab. Pusan National University, Busan, Korea.
- Paik, J. K. ve Seo, J. K., 2005. Ultimate Limit State Assessment of Ship Structures, International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Barcelona.
- Paik, J. K., Kumar, Y. V. S. ve Lee, J. M., 2005. Ultimate Strength of Cracked Plate Elements under Axial Compression or Tension, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 43, 237-272.
- Paik, J.K., 2007. Ultimate Limit State Performance of Oil Tanker Structures Designed by IACS Common Structural Rules”, Thin-Walled Structures, 45, 1022-1034.
- Paik, J. K., Kim, B. J. ve Seo, J. K., 2008. Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped Offshore Structures: Part I-Unstiffened Plates, Elsevier Science Direct Ocean Engineering, 35, 261-270.
- Paik, J. K., Kim, B. J. ve Seo, J. K., 2008. Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped Offshore Structures:Part II- Stiffened Panels, Elsevier Science Direct Ocean Engineering, 35, 271-280.
- Paik, J. K., Kim, B. J. ve Seo, J. K., 2008. Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-Shaped Offshore Structures:Part III- Hull Girders, Elsevier Science Direct Ocean Engineering, 35, 281-286.
- Paik, J. K., Seo, J. K. ve Kim, B. J., 2008. Ultimate Limit State Assessment of the M.V. Derbyshire Hull Structure, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-ASME, 130.
- Paik, J.K ve Kim, B.J., 2008. “Progressive Collapse Analysis of Thin-Walled Box Columns”, Thin-Walled Structures, 46, 5, 541-550.
- Paik, J. K., 2008. Residual Ultimate Strength of Steel Plates with Longitudinal Cracks under Axial Compression – Experiments, Elsevier Science Ocean Engineering, 35, 1775-1783.

- Paik, J. K., 2009. Residual Ultimate Strength of Steel Plates with Longitudinal Cracks under Axial Compression-Nonlinear Finite Element Method Investigations, Elsevier Science Ocean Engineering, 36, 266-276.
- Paik, J. K. ve 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 I: Plate Elements, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 47, 1008-1017.
- Pang, A. A., 1994. Ultimate Strength and Behavior of Plate and Box Components of Double Hull Ships under Axial and Lateral Loads, Ph. D. Thesis, Lehigh University.
- Parunova, J.K. ve Soaresb, C.G., 2008. Effects of Common Structural Rules on Hull-Girder Reliability of an Aframax Oil Tanker, Reliability Engineering and System Safety, 93, 1317–1327.
- Qi, E., Cui, W. ve Wan, Z., 2005. Comparative Study of Ultimate Hull Girder Strength of Large Double Hull Tankers, Elsevier Science Marine Structures, 18, 227-249.
- Rutherford, S.E. ve Caldwell, J.B., 1990. Ultimate Longitudinal Strength of Ships: A Case Study, SNAME Transactions, 98, 441-471.
- Shanmugam, N. E. ve Arockiasamy, M., 1996. Local Buckling of Stiffened Plates in Offshore Structures, Elsevier Science J. Construct. Steel Res., 38, 41-59.
- Sherbourne, A. N. ve Bedair, O. K., 1993. Plate-Stiffener Assemblies in Uniform Compression: Part I: Buckling, Journal of Engineering Mechanics, 119, 1956-1972.
- Shin, D. K., 1999. Postbuckling Behavior of Rectangular Stiffened Plates Considering Buckled Pattern Change, KSCE Journal of Civil Engineering, 3, 319-330.
- Smith, C.S., 1977. Influence of Local Compressive Failure on Ultimate Longitudinal Strength of a Ship's Hull, PRADS-International Symposium on Practical Design in Ship Building, Tokyo-Japonya, 73-79.
- Smith, C. S., Davidson, P. C., Chapman, J. C. ve Dowling, P. J., 1988. Strength and Stiffness of Ships' Plating Under In-Plane Compression and Tension, RINA Transactions, 130, 277-296.
- Smith, C. S., Anderson, N., Chapman, J. C., Davidson, P. C. ve Dowling, P. J., 1992. Strength of Stiffened Plating Under Combined Compression and Lateral Pressure, RINA Transactions, 134, 131-147.

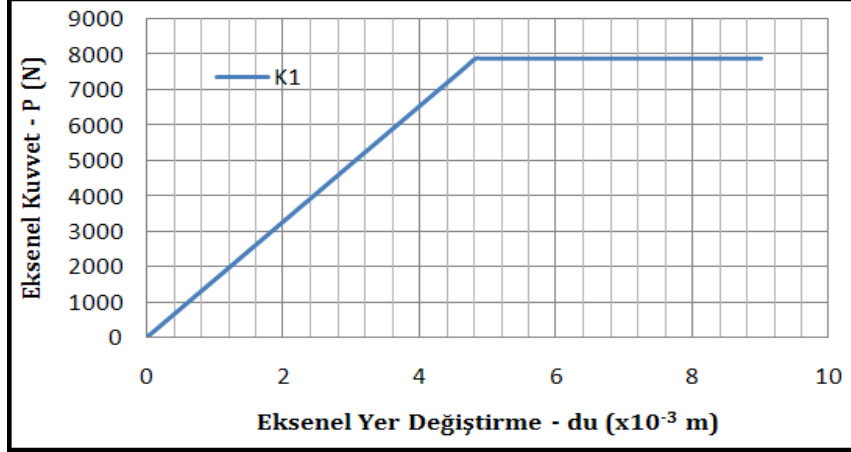
- Soh, A. K., Soh, C. K. ve Hoon, K. H., 1996. Development of a Simplified Plate Element for Large Deflection Elasto-Plastic FEA, Elsevier Science Computers & Structures, 61, 183-188.
- Stamatelos, D. G., vd., 2011. Analytical Calculation of Local Buckling and Post-Buckling Behavior of Isotropic and Orthotropic Stiffened Panels, Elsevier Science, Thin-Walled Structures, 49, 422-430.
- Sun, H. ve Wang, X., 2005. Buckling and Ultimate Strength Assessment of FPSO, Trans. SNAME, 113, 634-660.
- Tanaka, Y. ve Endo, H., 1988. Ultimate Strength of Stiffened Plates With Their Stiffeners Locally Buckled in Compression, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 164, 456-467.
- Tayyar G.T., 2010. Gemi Kirişinin Nihai Mukavemetinin Tayini, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Technical Committee III.1 Ultimate Strength, 2000. Benchmark Calculation on Ultimate Hull Girder Strength, The 14<sup>th</sup>. International Ship and Offshore Structures Congress, Nagasaki, Japonya.
- Technical Committee III.1 Ultimate Strength, 2012. Benchmark Studies, 18<sup>th</sup>. International Ship and Offshore Structures Congress, Rostock, Almanya.
- Timoshenko, S., 1947. Strength Of Material-Part II, Lancaster Press, New York.
- Timoshenko, S.P. ve Gere, J.M., 1985. Theory of Elastic Stability, Mc Graw Hill, London.
- Timoshenko, S. P. ve Woinowsky-Krieger, S., 1959. Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, Kogakusha.
- Toulios, 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., 1984. The Idealized Structural Unit Method and Its Application to Deep Girder Structures, Computers & Structures, 18,2, 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 In-plane Biaxial and Shearing Forces, Marine Structures, 8, 1-36.
- Ueda, Y. ve Rashed, S. M. H., 1975. An Ultimate Transverse Strength Analysis of Ship Structures, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 136.
- URL-1, [www.denizhaber.com.tr/guncel/23727/istanbul-karaya-oturdu-firtina-yuk-gemisi-kilyos.html](http://www.denizhaber.com.tr/guncel/23727/istanbul-karaya-oturdu-firtina-yuk-gemisi-kilyos.html), 19 Ocak 2010.
- URL-2, <http://www.virahaber.com/foto-galeri/titanic-boyle-bulundu-120.htm>, 01.09.2009

- Valsgaard, S. ve Sten, E., 1991. Ultimate Hull Girder Strength Margins in Present Class Requirements, Marine Structural Inspection, Maintenance and Monitoring Symposium, Arlington-Virginia.
- Vasta, J., 1958. Lessons Learned from Full Scale Structural Tests, Transactions SNAME, 66, 165-243.
- Vhanmane, S. ve Bhattacharya, B., 2007. On Improved Analytical Method for Stress-Strain Relationship for Plate Elements under Axial Compressive Load, Ships and Offshore Structures, 2, 4, 347-353.
- von Karman, T., 1910. Untersuchungen über Knickfestigkeit, Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 81.
- von Karman, T., Sechler, E.E. ve Donnell, L.H., 1932. Strength of Thin Plates in Compression, ASME Trans, 54, 553-557.
- Wang X. ve Moan T., 1997. Ultimate Strength Analysis of Stiffened Panels in Ships Subjected to Biaxial and Lateral Loading, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 7.
- Wang, F., Cui, W. C. ve Paik, J. K., 2009. Residual Ultimate Strength of Structural Members with Multiple Crack Damage, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 47, 1373-1386.
- Xu, M. C. ve Soares, C. G., 2013. Experimental Study on the Collapse Strength of Wide Stiffened Panels, Elsevier Science Marine Structures, 30, 33-62.
- Yang, J. M., 1990. Ultimate Strength of a Ship Hull Under Vertical Bending Moment Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Yao, T. ve Nikolov, P.I., 1991. Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull under Longitudinal Bending, Society of Naval Architectures of Japan, 170, 449-461.
- Yao, T. ve Nikolov, P. I., 1992. Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull under Longitudinal Bending-2<sup>nd</sup> Report, Autumn Meeting of The Society of Naval Architects of Japan.
- Yao vd., 2000. Special Task Committee Ultimate Hull girder Strength, 14 th International Ship and Offshore Structures Congress, Nagasaki, 1,2, 321-391.
- Yao, T., Fujikubo, M. ve Khedmati, M.R., 2000. Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull Girder under Longitudinal Bending Considering Local Pressure Loads, Society of Naval Architectures of Japan, 188, 142, 507-515.
- Yao, T., 2003. Hull girder strength, Marine Structures, 16, 1-13.

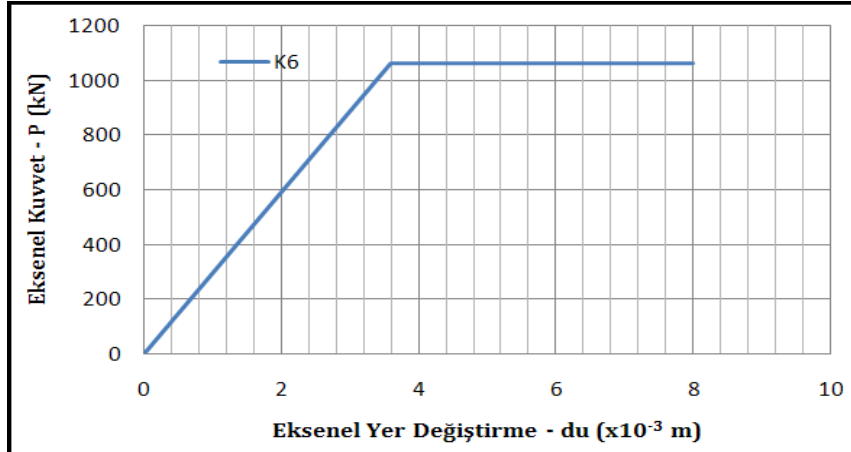
- Zha Y. ve Moan, T., 2001. Ultimate Strength of Stiffened Aluminium Panels with Predominantly Torsional Failure Modes, Elsevier Science Thin-Walled Structures, 39, 631-648.
- Zhang, S. ve Khan, I., 2009. Buckling and Ultimate Capability of Plates and Stiffened Panels in Axial Compression, Marine Structures, 22, 791-808.

## 6. EKLER

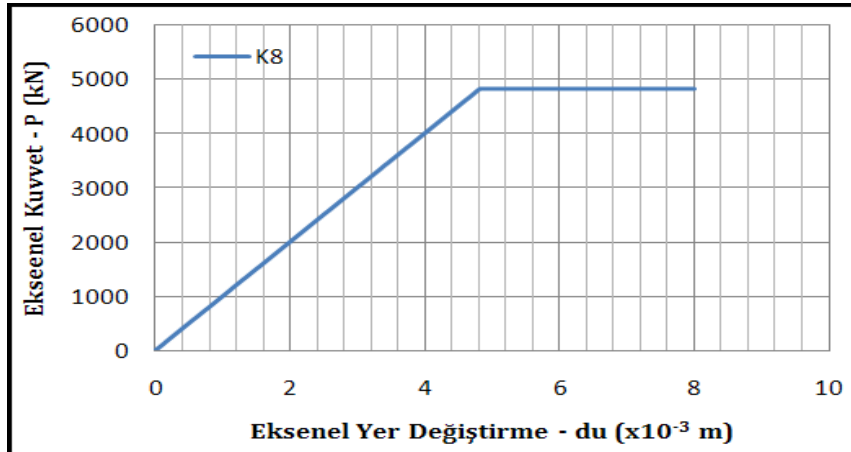
### Ek-A- Energy Concentration Gemisi Elemanların P-du Eğrileri



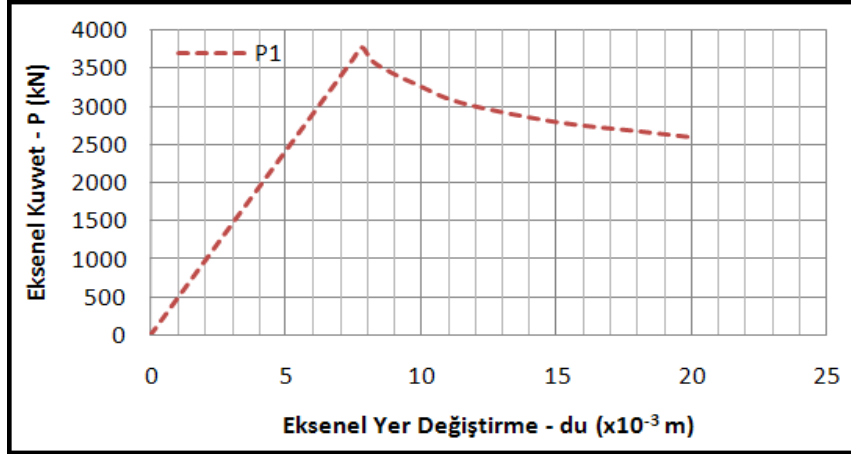
Ek Şekil 1. K1 P-du eğrisi



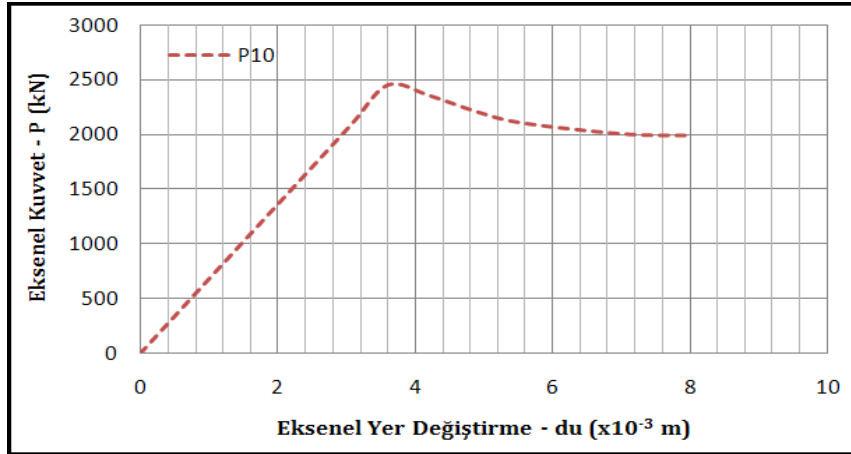
Ek Şekil 2. K6 P-du eğrisi



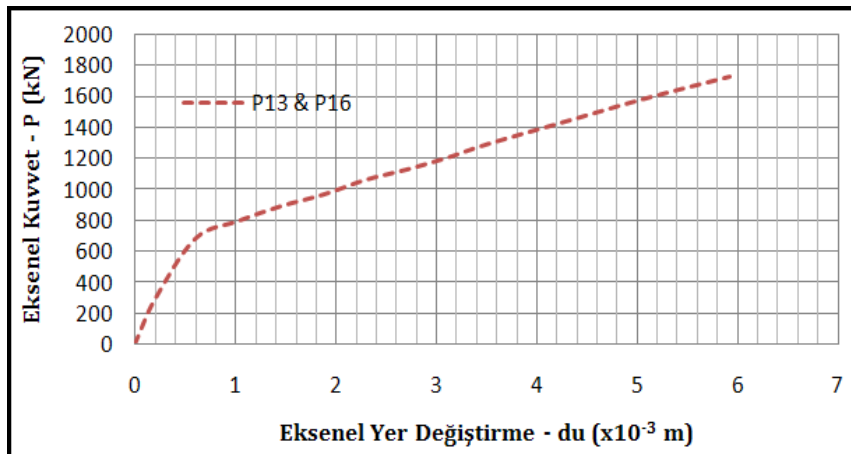
Ek Şekil 3. K8 P-du eğrisi



Ek Şekil 4. P1 P-du eğrisi

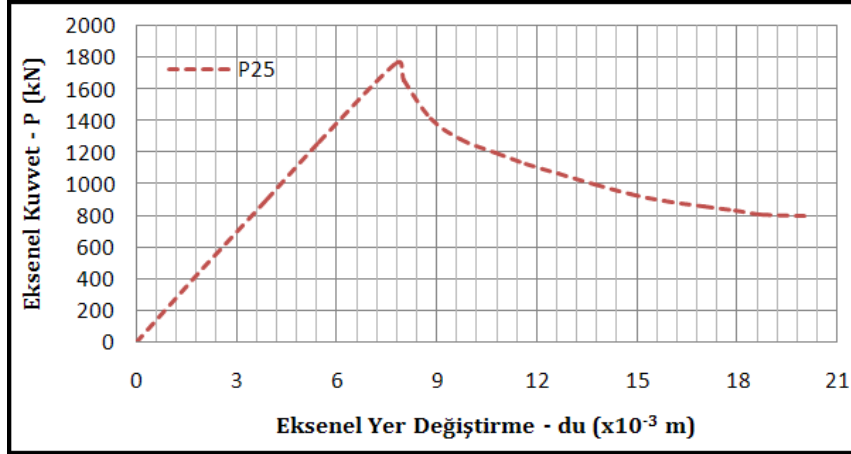


Ek Şekil 5. P10 P-du eğrisi

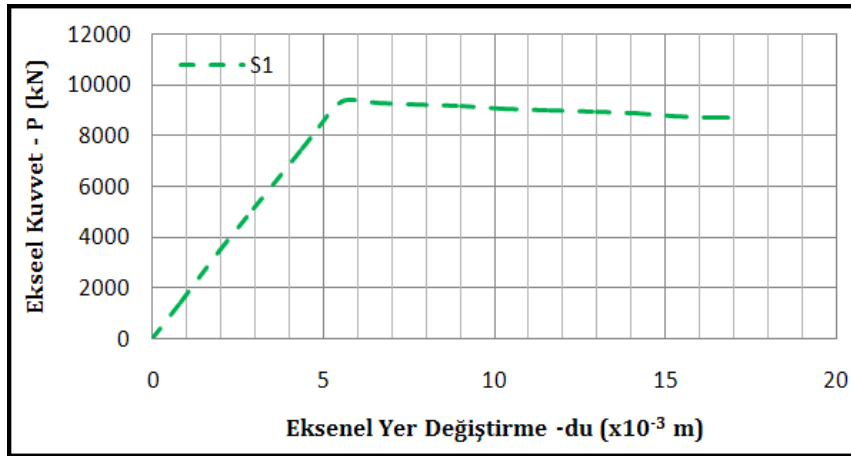


Ek Şekil 6. P13 ve P16 P-du eğrisi

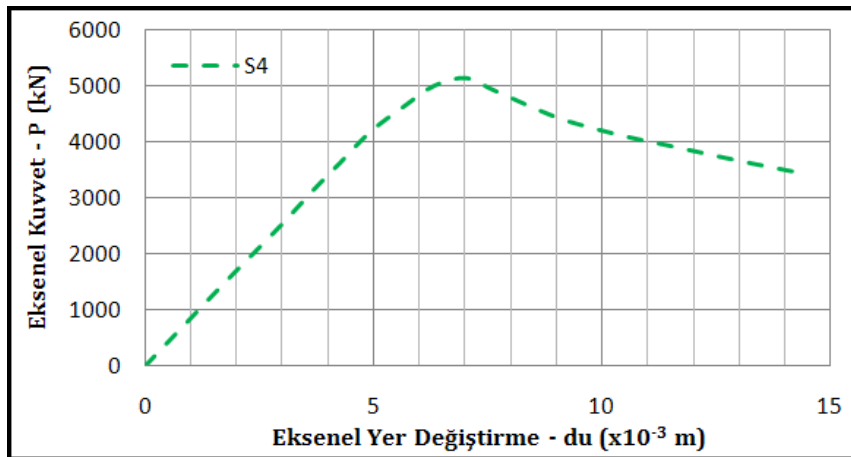




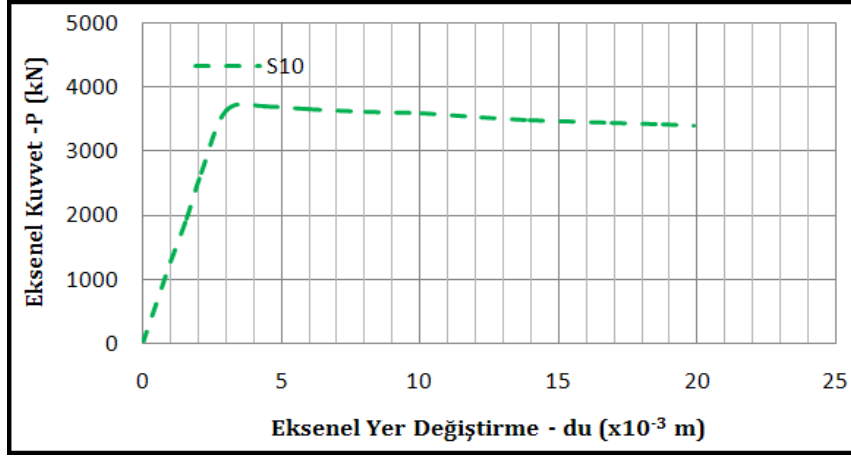
Ek Şekil 7. P25 P-du eğrisi



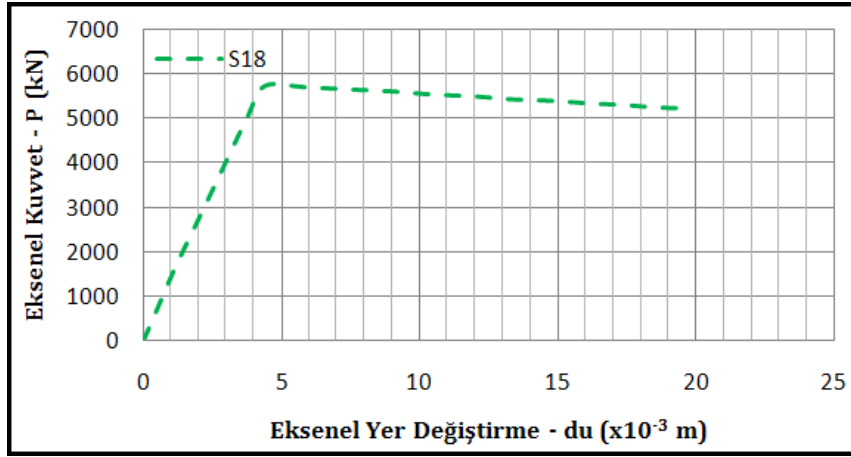
Ek Şekil 8. S1 P-du eğrisi



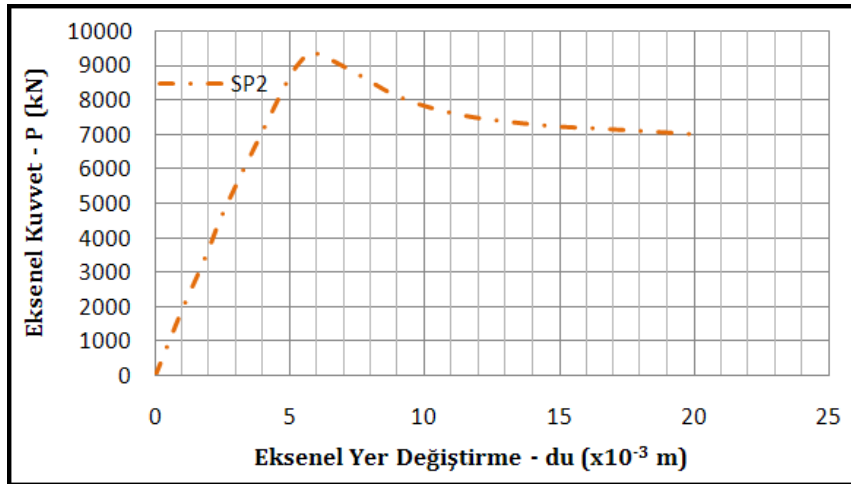
Ek Şekil 9. S4 P-du eğrisi



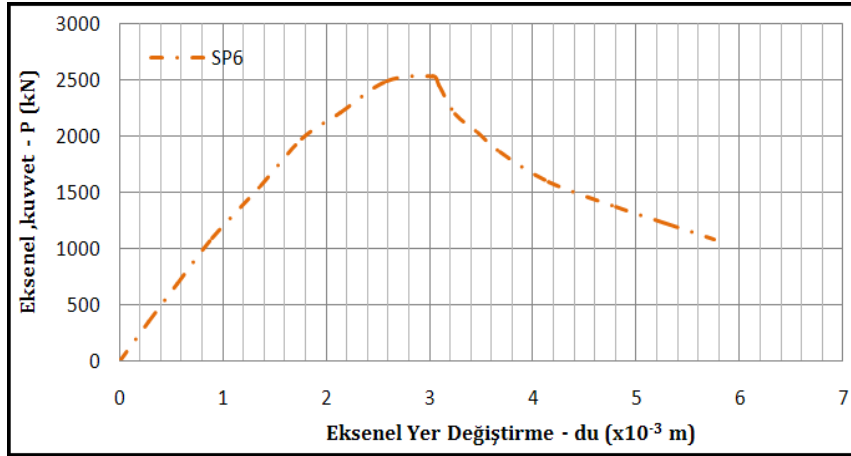
Ek Şekil 10. S10 P-du eğrisi



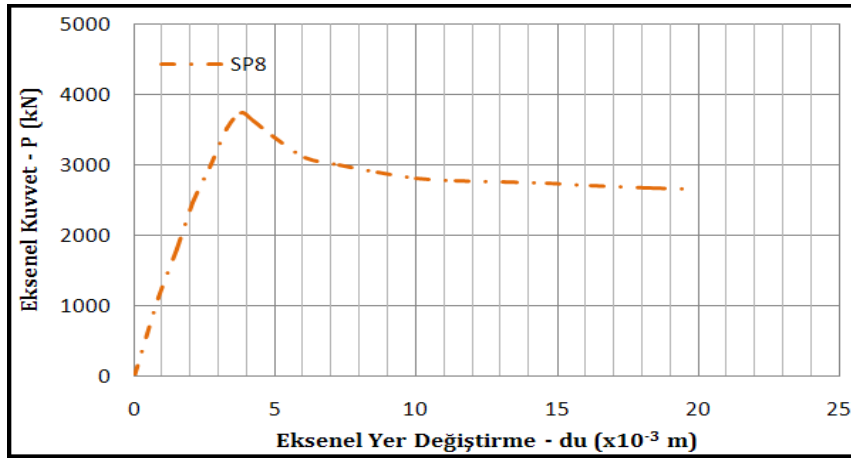
Ek Şekil 11. S18 P-du eğrisi



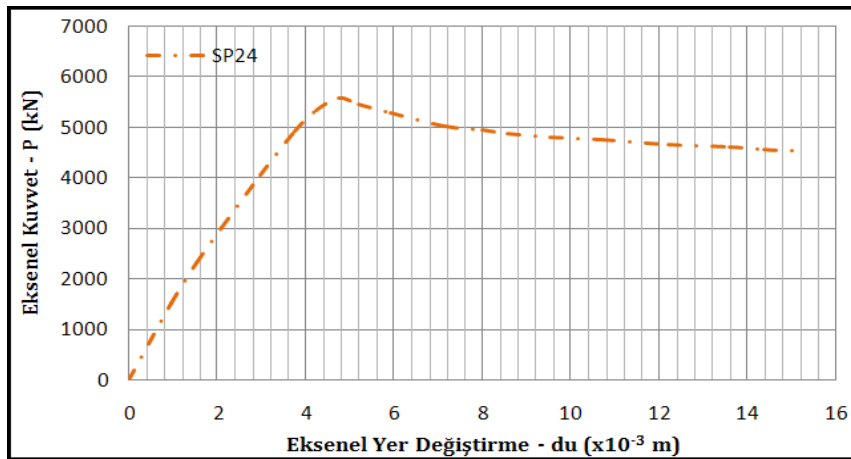
Ek Şekil 12. SP2 P-du eğrisi



Ek Şekil 13. SP6 P-du eğrisi



Ek Şekil 14. SP8 P-du eğrisi



Ek Şekil 15. SP24 P-du eğrisi

## ÖZGEÇMİŞ

Arş. Gör. Hasan ÖLMEZ 01.06.1981 tarihinde Burdur'da doğdu. İlk, orta ve Lise (Anadolu Öğretmen Lisesi) eğitimini Burdur'da tamamladıktan sonra 2003 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü'nden Bölüm 3. sù olarak mezun oldu. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan yüksek onur öğrencisi ve Gemi İnşaa Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. 2008 yılında aynı Anabilim Dalında Doktora çalışmalarına başlayan Hasan ÖLMEZ, 2004 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Ana çalışma konuları, Gemi Mukavemeti, Gemi Yapı Elemanları ve Gemilerin Yapısal Tasarımı ve Analiz Yöntemleri olan yazar, bilimsel projelerin yanında, sektör ile ilgili ulusal ve uluslararası (AB) projeleri ile de ilgilenmektedir. 2008 yılından itibaren Gemi Mühendisleri Odası Doęu Karadeniz İribat kişisi, 2009 yılından itibaren Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) üyesi olan Hasan ÖLMEZ, evlidir ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.