

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GENİŞ AMBAR AĞZI AÇIKLIKLI KONTEYNER GEMİLERİNDEKİ
ÇARPILMANIN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe EROL

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

EYLÜL 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GENİŞ AMBAR AĞZI AÇIKLIKLI KONTEYNER GEMİLERİNDEKİ
ÇARPILMANIN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tuğçe EROL
(508101020)**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508101020 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Tuğçe EROL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**GENİŞ AMBAR AĞZI AÇIKLIKLI KONTEYNER GEMİLERİNDEKİ ÇARPILMANIN İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

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

Prof.Dr. Ahmet ERGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İsmail BAYER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 01 Eylül 2015
Savunma Tarihi : 16 Eylül 2015

Tüm zorluklara rağmen hayata gülümseyebilenlere,

ÖNSÖZ

“Geniş Ambar Ağzı Açıklıklı Konteyner Gemilerindeki Çarpılmanın İncelenmesi” konusundaki tezi tarafıma vererek bu konuyu incelememi sağlayan ve yönlendiren; yazım aşamasında her türlü desteğini benden esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında desteklerini her daim hissettiğim eşim Buğra EROL’a ve aileme sonsuz minnetlerimi sunarım.

Eylül 2015

Tuğçe EROL
(Gemi İnş. ve Deniz Tek. Müh.)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KONTEYNER GEMİLERİ VE YAPISAL ÖZELLİKLERİ.....	3
3. BURULMA	5
3.1 Açık Güverteli Gemilerde Burulma	6
3.2 Gemi Kirişinde Burulma Momenti	6
3.3 Gemi Kesitinin Burulma Altındaki Elastik Tepkisi	8
3.4 Gemi Gövdesinin Burulma Deformasyonları	9
4. ÇARPILMA.....	11
4.1 Konteyner Gemilerinin Güverte Yapısındaki Çarpılma Deformasyon ve Gerilmeler.....	14
4.2 Açık Kesitler	20
4.2.1 Açık Kesitlerde Çarpılma.....	21
4.2.1.1 Açık kesitlerde serbest çarpılma	21
4.2.1.2 Açık kesitlerde kısıtlanmış çarpılma.....	22
4.3 Kapalı Kesitlerde Çarpılma	24
4.3.1 Kapalı kesitlerde çarpılma	25
4.3.1.1 Kapalı kesitlerde serbest çarpılma	26
4.3.1.2 Kapalı kesitlerde kısıtlanmış çarpılma	27
4.4 Çok Hücreli Kesitler.....	28
4.4.1 Çok hücreli kesitlerde serbest çarpılma	28
4.4.2 Çok hücreli kesitlerde kısıtlanmış çarpılma	30
4.5 Karışık Kesitler.....	30
5. ÖRNEK BİR KONTEYNER GEMİSİ KESİTİNİN ÇARPILMA SABİTİ HESABI.....	31
5.1 Birinci Örnek Kesit	32
5.2 İkinci Örnek Kesit	53
5.3 Üçüncü Örnek Kesit	69
6. SONUÇ VE YORUMLAR	87
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ.....	91

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Örnek konteyner gemisinin ana boyutları	31
Çizelge 5.2 : Birinci kesite ait düğüm noktaları ve sektörlerin kullanıcı koordinatları.....	32
Çizelge 5.3 : Birinci kesitteki sektörlerin özellikleri.....	35
Çizelge 5.4 : Birinci kesitteki sektörlerin eksenlere göre atalet momentleri.....	37
Çizelge 5.5 : Birinci kesitte sektörel alan hesabı.....	39
Çizelge 5.6 : Birinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre dönüştürülmüş koordinatları.....	41
Çizelge 5.7 : Birinci kesitte kütle merkezine göre sektörel alan hesabı.....	43
Çizelge 5.8 : Birinci kesitteki sektör verileri için özet tablo.....	44
Çizelge 5.9 : Birinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre integrasyonları.....	46
Çizelge 5.10 : Birinci kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.....	48
Çizelge 5.11 : Birinci kesitteki normalize birim çarpılma hesabı	50
Çizelge 5.12 : Birinci kesitteki düğüm noktalarına ait normalize çarpılma değerleri.....	51
Çizelge 5.13 : Birinci kesitteki sektörlerin çarpılma katsayıları.....	52
Çizelge 5.14 : İkinci kesite ait düğüm noktaları ve sektörlerin kullanıcı koordinatları	54
Çizelge 5.15 : İkinci kesitteki sektörlerin özellikleri.....	55
Çizelge 5.16 : İkinci kesitteki sektörlerin eksenlere göre atalet momentleri.....	57
Çizelge 5.17 : İkinci kesitte sektörel alan hesabı.....	58
Çizelge 5.18 : İkinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre dönüştürülmüş koordinatları.....	58
Çizelge 5.19 : İkinci kesitte kütle merkezine göre sektörel alan hesabı.....	60
Çizelge 5.20 : İkinci kesitteki sektör verileri için özet tablo	61
Çizelge 5.21 : İkinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre integrasyonları	62
Çizelge 5.22 : İkinci kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.....	64

Çizelge 5.23 : İkinci kesitteki normalize birim çarpılma hesabı	66
Çizelge 5.24 : İkinci kesitteki düğüm noktalarına ait normalize çarpılma değerleri.	67
Çizelge 5.25 : İkinci kesitteki sektörlerin çarpılma katsayıları.	68
Çizelge 5.26 : Üçüncü kesite ait düğüm noktaları ve sektörlerin kullanıcı koordinatları.....	70
Çizelge 5.27 : Üçüncü kesitteki sektörlerin özellikleri.....	71
Çizelge 5.28 : Üçüncü kesitteki sektörlerin eksenlere göre atalet momentleri.....	73
Çizelge 5.29 : Üçüncü kesitte sektörel alan hesabı.....	74
Çizelge 5.30 : Üçüncü kesitteki sektörlerin birincil eksene göre dönüştürülmüş koordinatları.....	74
Çizelge 5.31 : Üçüncü kesitte kütle merkezine göre sektörel alan hesabı.	77
Çizelge 5.32 : Üçüncü kesitteki sektör verileri için özet tablo.	78
Çizelge 5.33 : Üçüncü kesitteki sektörlerin birincil eksene göre integrasyonları	79
Çizelge 5.34 : Üçüncü kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.	81
Çizelge 5.35 : Üçüncü kesitteki normalize birim çarpılma hesabı.	83
Çizelge 5.36 : Üçüncü kesitteki düğüm noktalarına ait normalize çarpılma değerleri.	84
Çizelge 5.37 : Üçüncü kesitteki sektörlerin çarpılma katsayıları	85
Çizelge 6.1 : Çarpılma sabiti özet tablosu	87

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Konteyner gemilerinin yıllar içindeki gelişimi	1
Şekil 1.2 : Son yıllarda inşa edilen bir konteyner gemisi	2
Şekil 1.3 : Seyir esnasında gövdesinden kırılmış bir konteyner gemisi	2
Şekil 2.1 : Geminin dalgada uğradığı deformasyonlar	4
Şekil 2.2 : Maruz kaldığı yükler sebebiyle gövdesinden kırılmış bir konteyner gemisi	4
Şekil 3.1 : Gemide sektörel yük bileşenleri	7
Şekil 3.2 : Basitleştirilmiş konteyner gemisi kesiti	8
Şekil 3.3 : İnce cidarlı açık kesitli bir kirişte uçlardaki kısıtlamalar sebebiyle meydana gelen çarpılma yer değiştirme ve gerilmeleri.....	9
Şekil 3.4 : Baş taraftan gelen burulma yüklemesi karşısında gemi yapısı.....	9
Şekil 4.1 : Bir konteyner gemisinin boyuna kesiti.....	12
Şekil 4.2 : Ambar kapaklı ve ambar kapaksız örnek konteyner gemi kesiti	12
Şekil 4.3 : Geminin açılı (oblik) dalgalar arasındaki hareketi	13
Şekil 4.4 : Gemi gövdesinin açılı dalgalar arasında maruz kaldığı burulma yüklemesi.....	13
Şekil 4.5 : Gemi boyunca burulma yüklemesinin dağılımı	14
Şekil 4.6 : Gemi yapı elemanlarında burulmadan oluşan çarpılma deformasyonu ...	15
Şekil 4.7 : St. Venant ve çarpılma burulmalarına örnekler.....	16
Şekil 4.8 : Kesite uygulanan P yükünün 4 set yükün toplamı ile ifade edilmesi.....	16
Şekil 4.9 : Tekil P yükünün bileşenlerinin profilin çarpılmasına yol açması.....	17
Şekil 4.10 : Bimoment uygulanan bir kirişte oluşan dönme ve boyuna gerilmeleri..	18
Şekil 4.11 : Bimomentin kiriş boyunca değişmesi ve çarpılma burulma momentine yol açması.....	19
Şekil 4.12 : Kısıtlanmış çarpılmadan doğan gerilmeler	22
Şekil 4.13 : Kapalı kesitteki çarpılma.....	25
Şekil 4.14 : Kapalı kesitteki gerilmelerin dengesi	26

Şekil 4.15 : Çok hücreli bir kesitteki kayma akısı	29
Şekil 4.16 : Burulma rijitliği hesabında izlenebilecek örnek yol.....	30
Şekil 5.1 : Birinci örnek kesit.	32
Şekil 5.2 : Sektörlere ait keyfi alınan k noktasının koordinatları.	38
Şekil 5.3 : k noktasının birim yay elemanına dik uzaklığı ρ gösterimi.	38
Şekil 5.4 : Basit bir profil üzerinde koordinat dönüşümü (temsili)	40
Şekil 5.5 : Birinci kesitteki bölüm, sektör ve düğüm noktaları ile kayma akısı	42
Şekil 5.6 : Birim yay uzunluğuna olan dik mesafe ρ_0	47
Şekil 5.7 : Şekil 5.1'deki kesite ara güverte eklenmiş ikinci en kesit.....	53
Şekil 5.8 : İkinci kesitteki bölüm, sektör ve düğüm noktaları ile kayma akısı.	59
Şekil 5.9 : Şekil 5.7'deki kesite ana güverte eklenmiş üçüncü en kesit	69
Şekil 5.10 : Üçüncü kesitteki bölüm, sektör ve düğüm noktaları ile kayma akısı.....	76

GENİŞ AMBAR AĞZI AÇIKLIKLI KONTEYNER GEMİLERİNDEKİ ÇARPILMANIN İNCELENMESİ

ÖZET

Dünya ekonomisindeki hacim artışı sebebiyle, deniz taşımacılığında hedeflenenleri karşılamak amaçlı, deniz ticaretinin en önemli ayağı olan konteyner gemilerinin boyutları büyümüş ve kapasiteleri artırılmıştır. Daha fazla konteyner taşıyabilmek için gemiler, daha geniş ambar açıklıkları ile inşa edilir duruma gelmiştir. Geniş ambar açıklıklı gemilerde meydana gelen yapısal problemleri çözmek amaçlı birçok çalışma yapılmıştır. Geminin seyri esnasında maruz kaldığı burulma yüklemesi bu problemlerin başında gelir.

Sunulan bu çalışmada geniş ambar açıklıklı konteyner gemilerinde burulma yüklemesinden meydana gelen çarpılma gerilmelerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Geniş ambar açıklıkları gemide süreksizlik noktası yarattığından burulma rijitliğini azaltıcı rol üstlenir. İnce cidarlı yapılar olan konteyner gemilerinde ise burulma rijitliği konusu oldukça önemli olup, son yıllarda yapılan çalışmalarda başat bir rol üstlenmiştir.

İlk bölümde konteyner gemileri hakkında genel bilgi verilmiştir. Bunu takip eden ikinci bölümde yapısal problemleri beraberinde getiren geniş ambar açıklıklarına değinilmiştir. Bu süreksizlik yapısının dizayn aşamasında nasıl dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Üçüncü bölümde burulma konusu anlatılmıştır. Açık güverteli gemilerde burulmanın önemine değinilmiştir. Takip eden bölümlerde ise gemi kiriş kabulü ile burulma momentinin nasıl hesaplanacağı anlatılmış olup, bu hesabı gemi kirişinin burulmaya olan tepkisinin analizi izlemiştir. Bu bölümde son olarak gemi gövdesinin burulma momenti karşısında uğradığı deformasyonlara yer verilmiştir.

Bölüm dördte, burulma kaynaklı çarpılma konusu öncelikle teorik olarak ele alınmıştır. İlk olarak, konteyner gemilerinin güverte yapısında meydana gelen deformasyon ve gerilmeler incelenmiştir. Daha sonra çarpılma temel olarak iki kesit grubunda anlatılmıştır. Açık ve kapalı kesitlerde çarpılmanın nasıl oluşacağı, serbest ve kısıtlanmış çarpılma denklemlerine yer verilmiştir. Takip eden bölümlerde ise çoklu ve karışık kesitlere değinilmiştir.

Beşinci bölümde teorik olarak bu çalışmada sunulan ifadeler, örnek bir konteyner gemisi kesiti üzerinden çözülmüştür. Konteyner gemi kesiti öncelikle çift yalnızca çift dip olarak ele alınmıştır. Kesitin özellikleri ve müteakiben çarpılma fonksiyonları hesaplanmıştır. İkinci kesitte ise birinci kesitin ara güverteli haline yer verilmiştir. Aynı şekilde ikinci kesit için de çarpılma katsayısı belirlenmiştir. Üçüncü ve son kesitte ise, ana ve ara güvertesi olan bir yapı göz önüne alınmıştır. Çarpılma katsayısının hesabının ardından; güvertelerin kesitin rijitliğini artırdığı gözlemlenmiştir.

Sonuç bölümünde ise kesitlerin çarpılma katsayıları karşılaştırılmıştır. Gemi kesitinin kapalı kesite yaklaştıkça, çarpılma rijitliğinin arttığı ve buna bağlı olarak da çarpılma katsayısının azaldığı görülmüştür.

INVESTIGATION OF WARPING OF LARGE CONTAINER SHIPS

SUMMARY

Due to the fact that the world has a growing economy, the maritime transportation tools have begun to be developed in order to meet the intended purposes. The main instrument of maritime transport is container ship. To be able to carry more and more container, the ships are built with large deck openings. In the early 1900s, the container ship capacity was about 5000 TEU whereas in today's time the capacity is scaled up to 20000 TEU. The container ships of large deck openings have structural problems. Many researches have been done to sort out the structural problems. Almost every classification society do many research and statistics in order to lighten the design issues in a structural manner. If one have a look at the main structural problem, it is seen that the torsional loading that the ship is exposed to during seaway is the leading issue.

In this study, it is aimed to investigate the warping stresses induced by the torsional loading of the container ships with large deck openings. Larger and larger deck openings are being design in recent days in order to overcome the increasing demand for much more container transport. However, the large openings bring about lowering the torsional rigidity because large openings create discontinuity point. The cargo area, the area between engine room and cargo area or cross deck beams can be defined as discontinuities in ship hull. Besides the effect of the discontinuities, there are structural problems that comes from being designed as thin walled. To be able to lighten the container ships, they are designed as thin walled structures. That's why the torsional rigidity is quite important. In recent years, studies on warping have conducted a dominant role.

In the first section, general information is given about container ships. The progress in the container carrying capacity and the development of larger container ships are the major topic in the beginning part.

In the following second section, large deck openings that bring about many problems are examined. What is more, some pictures of ship's deformations through the waves are given in order to emphasize the significance of the structural problems. Especially the discontinuity points are the main difficulty in design process.

In the third section, it is given wide coverage to torsion. In this part, first of all, the development of the recent torsion theory is shared. Many physicists and structural researchers try to lighten the torsion base. For example, A. Michell and L. Prandtl searched flexural-torsional buckling whereas S. P. Timoshenko preferred to write a paper on the effects of warping torsion in I beams. In early 1900s, Vlasov presented the theory of general bending and twisting of thin walled beams. The importance of torsion for the ships with large deck openings is mentioned in third subdivision. In the next sections, the ship is assumed as a beam and the proper ways to calculate the

torsional moment are analyzed. Lastly in this section, the several deformations under torsional moment are explained.

In the fourth section, warping induced by torsion is dealt with primarily in theoretic view. At first, the deformations and stresses on deck structure are examined. Many sketches are given to make the deformations and ship sections more clear. It is mentioned that all the ships are exposed to torsional loading during the sail. Although the structural torsional rigidity of the ship is adequate enough, this torsional loading is the major concern for the designer of the ship. The dynamic movement of the ship contributes to stress of the hatch opening edges. During the ships sail among oblique waves, the vertical bending moments are decreased whereas the bending moments in the horizontal direction and the torsional moments are increased. The model test shows the rolling's big effect on torsional moment.

Furthermore, there becomes a static loading to the ship's hull in some cases. One the most import case is the loading/unloading of the cargo in improper way. The sequence of the cargo handling and loading has a significant effect on still water torsional loading. One of the sketches shows the torsional moment distribution along the ship. One can understand that the most critical are is the cargo area of the ship.

Additionally, as the container ships are considered and designed as thin walled structures, the basics of the thin walled theory is given in order to make the ship's structural behavior more clear.

In the fourth section, warping is mentioned in two main groups. The open and closed cross section warping is explained in detail. After all, multiple cell and mixed sections are included.

In the fifth section, the sample sections of a containership are given to be able to understand the theory given in the previous sections more perceptible. The very first section contains only double bottom. It does not have any main deck or a second deck. The half section is being considered. The coordinate system is placed in the keel and mid plane as the ship is symmetrical. The centroid is calculated and placed in the beginning. The next step is the defining the nodes sectors and branches. The ship is sectioned to be able to make the calculations easy to follow. When the nodes are numbers, the geometrical properties are tabulated. In this part, one shall give attention to the coordinates in order to prevent a future mistake. After calculating the centroid, the moment of inertia of every section is being calculated. All in all, the ship's section's moment of inertia is figured out.

By using the geometrical properties of the nodes and sections, the sectoral properties are calculated. The start point is arbitrary and depends on the user's preference. After defining the arbitrary point, the tangent to this point is given. The perpendicular distance from the arbitrary point k to the unit arc is described as ρ . The second sectoral area is found by using this value. While defining the arbitrary point key, one shall kindly note that this point can be chosen as the centroid or the shear center.

Afterwards, the angle between the user coordinate system and the principal coordinate system is used to determine the moment of inertia of the sections according to principal system. Both rotation and transition are taken into account while the transforming process of the coordinate system. All the nodes' coordinates are transformed into principal axis.

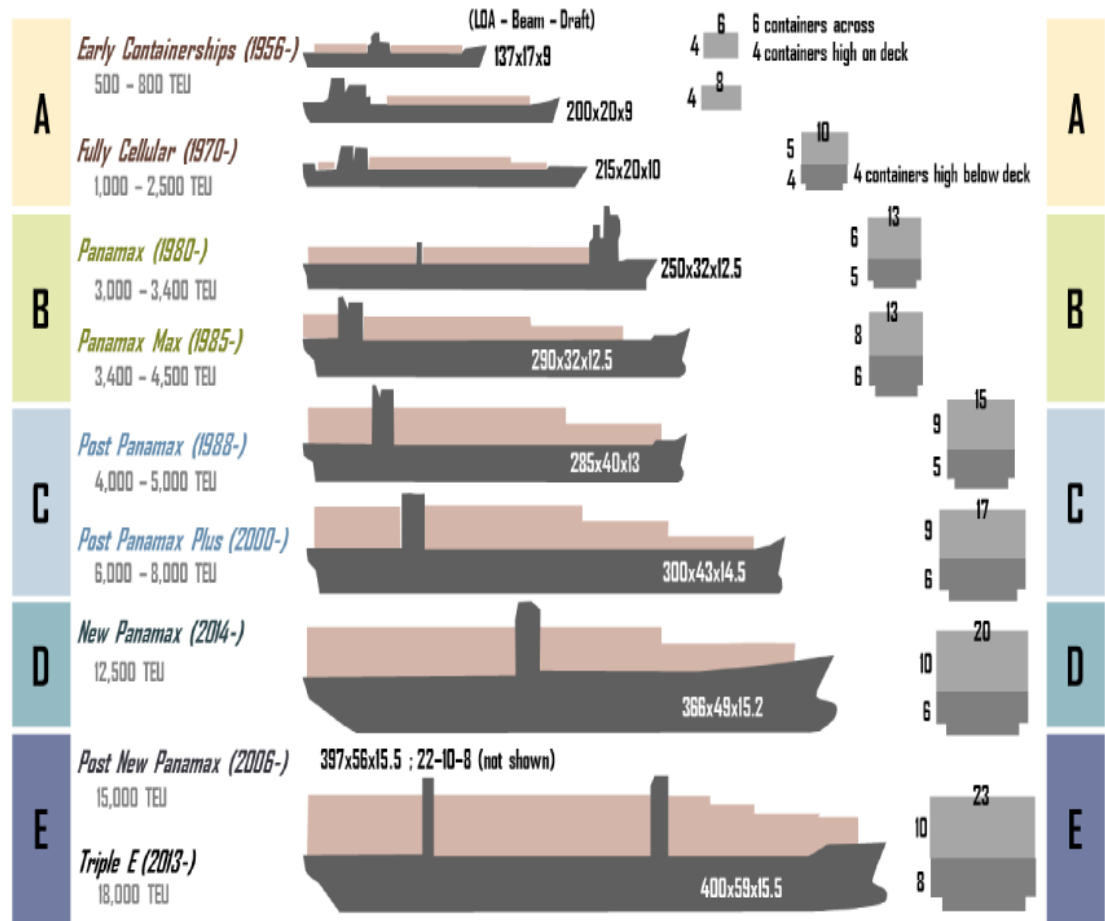
In order to determine the warping constant, the shear flow properties can be adopted to the calculation. The assumption of the shear flow direction is again arbitrary; however it shall be consistent in its own right.

The following step is to undergo the data of the sections properties. By using those values the warping moment of inertia is found. After all, the integrations are done in order to figure out the warping constant.

In the last section, the statements which are presented theoretically are solve under consideration of an example containership cross section. Firstly the container ship is considered as open deck; only double bottom structure is taken into account. Then a containership section with a mid-plane deck is being considered, the calculation for warping constant is made in order to see the effect of the mid plane. After all, the container ship section is turned into closed section by adding the deck structure. In this study, it is shown that, the warping constant is decreased significantly when the ship section resembles much more a closed section than an open section. The warping constant value of the first section which has only double bottom, no mid plane deck or deck has decreased in the percentage of 20. When comparing to the reduction ratio in the warping function of the third section which is most resembling structure to the closed section to the second section with mid-plane is 24%. In overall result, if the first section (which can be described as open section) is compared to the third section (which is almost closed section), 39% of reduction rate is figured out. Consequently, the more the section resembles closed section, the lower the warping function is which means the closed section warps in a difficult manner.

1. GİRİŞ

Ekonominin büyümesi ile birlikte, konteyner gemilerinin boyutları da taşınan yükü artırmak amaçlı değişti. Şekil 1.1'den de görüleceği üzere 10 yıl öncesine kadar en büyük konteyner gemisi 5000 TEU konteyner kapasitesine sahipken; bugünlerde 19224 TEU kapasiteli konteyner gemileri üretildi.



Şekil 1.1: Konteyner gemilerinin yıllar içindeki gelişimi.

Şekil 1.2'de gösterildiği gibi konteyner miktarının artması ile ambar ağız açıklıkları da genişledi [8]. Büyük ambar ağız açıklıkları, kesitte çarpılmanın artmasına yol açmıştır. Bu durum konteyner gemilerinin yapısal dizaynı esnasında çarpılma konusunun önemini arttırmıştır.



Şekil 1.2: Son yıllarda inşa edilen bir konteyner gemisi.

Konteyner gemilerinin gelişimi beraberinde Şekil 1.3'te de örneğinin görülebileceği yapısal problemleri de getirir. Bunlardan en büyüğü gemi kirişinin burulma tepkisidir. Geniş ambar açıklıkları olan gemilerde oluşan burulma deformasyonları ve dalga halinde çarpılma gerilmeleri önem arz eden bir konudur. Gemi kirişinin burulma tepkisi; burulma momentlerinin dağılımına ve gemi yapısının rijitlik parametrelerine bağlıdır. Bunun dışında en önemli etken dizayn yükleridir [7].



Şekil 1.3: Seyir esnasında gövdesinden kırılmış bir konteyner gemisi.

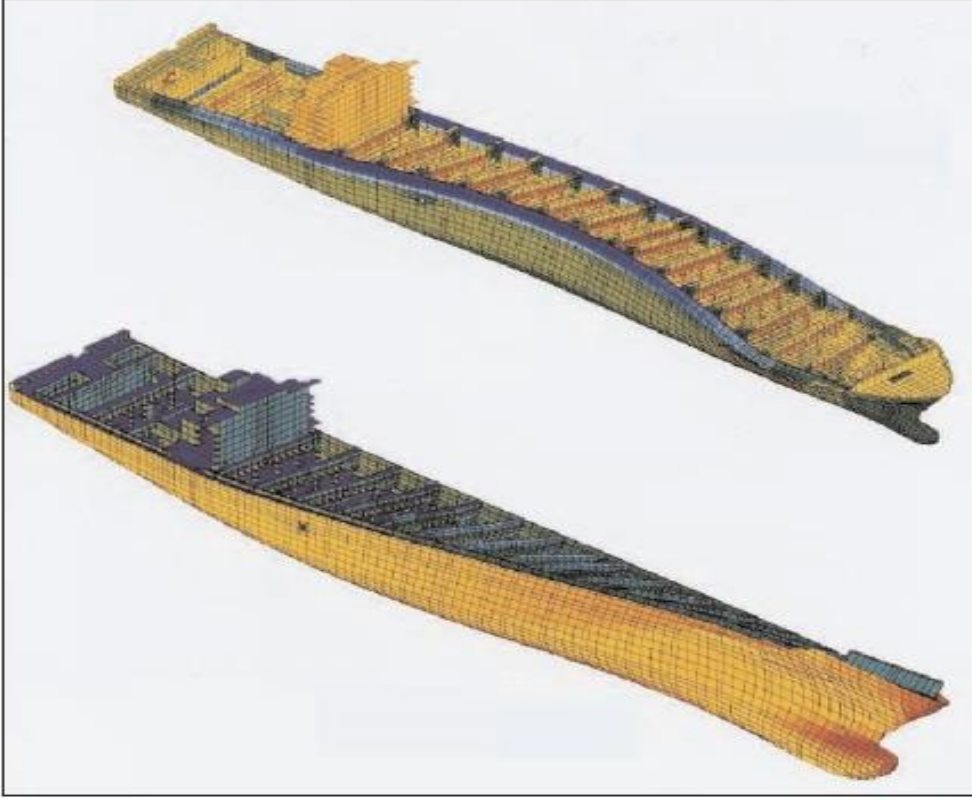
2. KONTEYNER GEMİLERİ VE YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Konteyner gemilerini diğer yük gemilerinden ayıran en özelliği, yükleme boşaltma konusundaki esnekliğidir. Konteynerler dikey olarak gemiye yüklenir. Bu sebeple, konteynerlerin yükleme ve boşaltması için büyük ambar açıklıklarına ihtiyaç vardır. Geniş ambar açıklıkları da gemi mukavemeti konusunda sıkıntılar oluşturur. Bu durumu engellemek için borda ve dipte kutu şeklinde bir sistem kullanılır [9]. Gemi yapısı, denizde oldukça fazla elastik deformasyona ve boyuna gerilmelere maruz kalır. Konteyner gemilerine ise Şekil 2.1'den de görüleceği üzere daha çok dışa burulma hareketi etki eder. Bu hareketten doğan eğilme momenti, devam eden boyuna güverte yapılarında (örneğin; boyuna ambar ağızları, üst güverte kaplaması) yüksek çekme gerilmelerine sebep olur. Bu yüksek eğilme gerilmelerinin aralığı tüm kargo alanını kapsar. Güvertenin bazı özel bölümleri, dövünmenin yüzünden aynı zamanda ek bir baskı gerilmesine; boyuna güverte kirişi de yüksek boyuna gerilmelere maruz kalır.

Şekil 2.2'de de maruz kaldığı ağır deniz koşulları sebebiyle ikiye bölünen gemi örneğinden de anlaşılacağı üzere, ambarlar arasında kalan güverte yapısı, denizdeki basınç ve burulma distorsiyonundan enine baskıya maruz kalır. Ana kargo alanının kenarlarındaki alan yüksek döngüsel gerilmelere maruz kalır. Bunun sebebi, gemi kirişinin eğilme momentleri, enine ve burulma yüklemeleridir.

Ambar ağız kenarları gerilme konsantrasyonuna maruz kalır. Ambar ağız kenarlarında oluşan önemli yatay sürtünme kuvvetleri; yatay düzlemsel yüklemelere karşı fazlasıyla rijit olan ambar kapaklarında ve güverte yapısında elastik deformasyonlara sebep olur. Ambar kapaklarında, contaların yarattığı ihmal edilemeyecek düzeyde yatay sürtünme kuvvetleri de vardır. Bu sürtünme kuvvetleri ve ambar kapaklarının rijitliği birlikte hareket ederek güverte yapısındaki yüklemeleri artırır.

Aynı şekilde düzlemsel basınç altında çalışan gemi bünyesindeki levhalar lokal burulmalara da maruz kalabilir. [4].



Şekil 2.1: Geminin dalgada uğradığı deformasyonlar.



Şekil 2.2: Maruz kaldığı yükler sebebiyle gövdesinden kırılmış bir konteyner gemisi.

3. BURULMA

Konteyner gemilerinin kapasitesinin artması ve ambar açıklıklarının genişlemesi ile geminin seyri esnasında maruz kaldığı yükler sebebiyle burulma analizi yapılması ihtiyacı doğdu. Aslında genel yapısal dizayn alanında burulma konusu her daim karmaşık ve zor anlaşılır olmuştur [5]. Bu sebeple yaklaşık 150 yıldır bilim insanları burulma konusuna eğilmiş ve gelişimine katkıda bulunmuşlardır.

İlk adım, 1853'te Fransız mühendis Adhemar Jean Barre de Saint-Venant'ın klasik burulma teorisini ortaya atması ile gerçekleşti. 1899'da A. Mitchell ve L. Prandtl dönme burulma burkulmasını sunarken; 1905'te S. P. Timoshenko I kirişlerde çarpılma burulmalarının etkilerini anlatan bir makale yayınladı. Bu gelişmelerin ardından 1909'da C. Bach çarpılma gerilmelerinin; kayma merkezi ile ağırlık merkezinin çakışmadığı durumlarda klasik burulma teorisi ile çözülemeyeceğini ortaya attı. H. Wagner 1929'da dönme burulma burkulması ile ilgili genel bir denklem geliştirdi. 1906-1958 yılları arasında V. Z. Vlasov ince cidarlı kirişlerde genel eğilme ve burulma teorisini geliştirdi. 1944'te ise Von Karman ve Christensen kapalı kesitler için yaklaşık bir teori sunarken; son olarak Benscoter 1954'te kapalı kesitler için daha kesin sonuçlar sunan teorisini ortaya attı [6].

Konteyner gemisinin gövde kirişinin burulma mukavemetini değerlendirilirken; dikey eğilme momenti, yatay eğilme gerilmesi ve sakin su gerilmeleri ile çarpılma gerilmelerinin kombinasyonları göz önünde bulundurulur. Bütün gövde kirişindeki toplam gerilmenin izin verilen gerilmelerin altında olması gerekir [7].

Yapılan çalışmalar gösteriyor ki geniş ambar açıklıklı gemi gövdesi burulmaya maruz kalır; bu durumda, sacların burkulmasından sonra simetrik olan gövde asimetrik olmaya meylettğinden çarpılma etkileri anlamlı hale gelir.

İnce cidarlı açık kesitli kirişlerde, burulma sebebiyle hem eksenel (çarpılma) gerilmeleri hem de kayma gerilmeleri meydana gelir [5].

3.1 Açık Güverteli Gemilerde Burulma

Açık güverteli gemilerin burulma davranışı, teorik, sonlu elemanlar yöntemi ya da model test yöntemiyle yani deneysel olarak çalışılabilir. İnce cidarlı açık kesitlerin burulma davranışına dayanan basitleştirilmiş bir yaklaşım da kullanılabilir. Ancak bu yöntemde analiz metodunu doğrulayacak, tam ölçekli ölçümler gereklidir.

Sonlu elemanlar ve model deneyleri pahalı ve zaman harcatıcı yöntemler olduğundan gemi yapısının nihai analizlerinde kritik bölgeler ile sınırlandırılabilir. Ancak, ilk dizayn aşamasında burulma yüklemelerinin hassas olarak belirlenemez. Bu gibi durumlarda farklı dizaynları karşılaştırmak adına, açık güverteli yapıların yapısal dizaynı için basitleştirilmiş bir prosedür kullanılabilir. Basitleştirilmiş yöntem ile açık güverteli gemilerin burulma yüklemesinin sebep olduğu, kayma ve burulma çarpılma gerilmeleri ile burulma deformasyonları hesaplanır. Bu yöntemde gemi kesitinin sektörel özellikleri kullanılır [7].

3.2 Gemi Kirişinde Burulma Momenti

Burulma kesitin kayma merkezinden geçmeyen kuvvetler sebebiyle oluşur. Gemi gövdesine etkiyen burulma momentleri genellikle statik (durgun su) burulma ve dinamik (dalga sebebi) burulma olmak üzere sınıflandırılır. Durgun sudaki burulma simetrik olmayan kargo yüklemesi sebebiyle oluşurken; dinamik burulma hidrostatik ve hidrodinamik kuvvetlerin etkisinden meydana gelir. Gemi hareketlerinden doğan kütle ivme kuvvetleri de dinamik burulma momentine etki eder.

Dalga sebebi burulma momenti, yalnızca gövde formuna değil, dalganın yüksekliğine; aynı zamanda gövde kesitinin yapısal yerleşiminden belirlenen dönme merkezinin yerine bağlıdır. Hassas direkt bir hesaplama yapmak oldukça karışık olduğundan, klas kurallarının belirlemiş olduğu kural ve formüllere göre burulma momentleri hesaplanabilir.

(3.1) ile verilen formül ABS (1995) tarafından belirlenen; gemi ömründeki en yüksek gövde burulma momentidir:

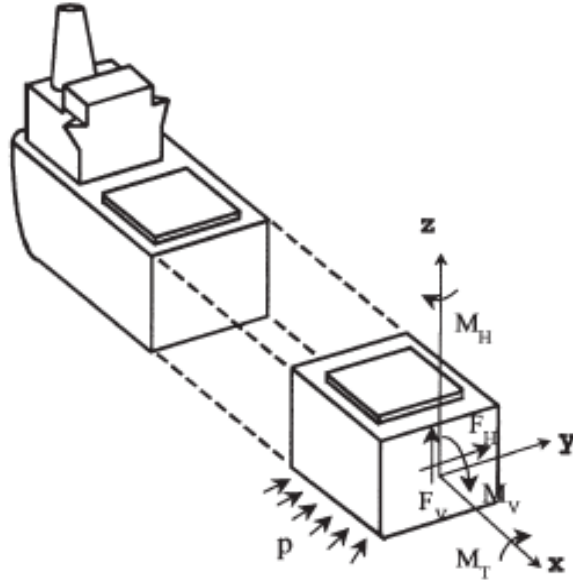
$$M_{Tm} = kLB^2d_f[(C_w - 0.5)^2 + 0.1][0.13 - (e/D) \cdot (c_0/d_f)^{1/2}] \quad (3.1)$$

Burulma momentinin dağılımı ise aşağıdaki koşullara göre verilmiştir [5].

$$M_T(x) = \begin{cases} 5xM_{Tm} & \text{koşul } 0 \leq x \leq 0.2L \\ M_{Tm} & \text{koşul } 0.2L < x < 0.8L \\ 5(1-x)M_{Tm} & \text{koşul } 0.8L \leq x \leq L \end{cases} \quad (3.2)$$

(3.2) numaralı denklemde geçen e kayma merkezinin yeridir ve net çarpılma yer değiştirmelerinin ve birinci çarpılma gerilmesi momentlerinin sıfır olduğu (aksi takdirde yatay ve düşey eğilme momentler meydana gelecektir.) koşuldan (3.3) hesaplanır. Bahsi geçen koşullar aşağıda matematiksel olarak ifade edilmektedir ve Şekil 3.1’den yönler tayin edilebilir [5].

$$\begin{aligned} \int \omega(s)tds &= 0 \\ \int z\omega(s)tds &= 0 \\ \int y\omega(s)tds &= 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

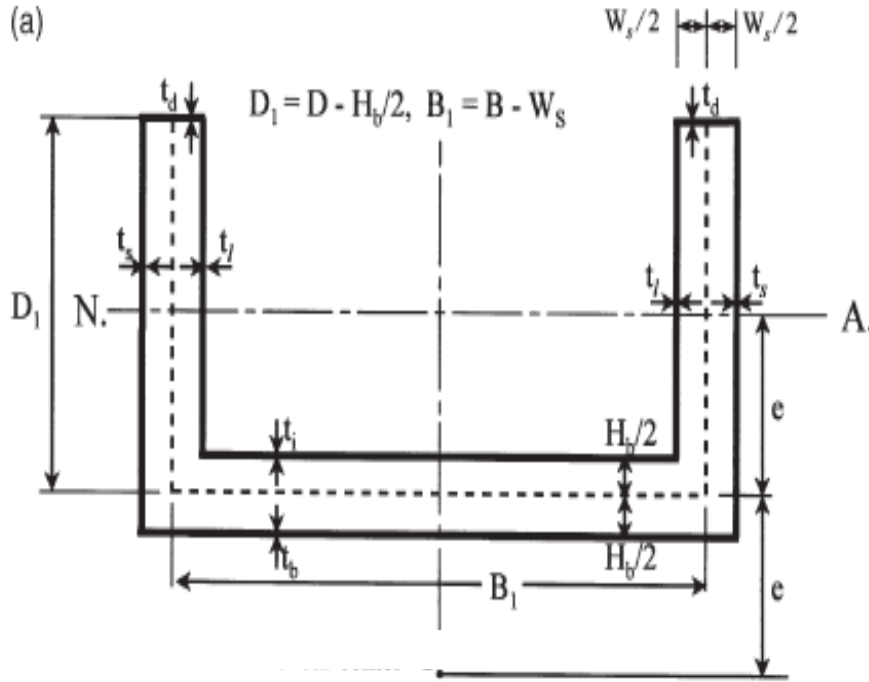


Şekil 3.1: Gemide sektörel yük bileşenleri.

Gövde yapısı, merkez hattına simetrik olduğunda, kayma merkezinin yatay pozisyonu merkez hattındadır. Düşey yeri ise aşağıdaki (3.4)’te gösterilen formülden belirlenir [5].

$$e = -\frac{1}{I_z} \int y \omega(s) t ds \quad (3.4)$$

Bu denklem, taban hattından burulmanın oluşmadığı kadar aşağıda kayma merkezinin yerini tanımlar.



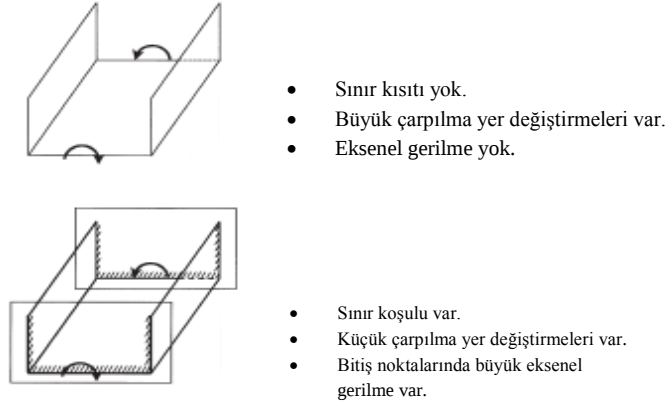
Şekil 3.2: Basitleştirilmiş konteyner gemisi kesiti.

Şekil 3.2’de tipik bir konteyner gemisinin basitleştirilmiş kesiti yer almaktadır.

3.3 Gemi Kesitinin Burulma Altındaki Elastik Tepkisi

Açık kesitli ince cidarlı bir kirişte, burulma rijitliği kapalı bir kesite göre çok azdır. Bu da açık kesitin, maruz kaldığı burulma momentine karşı düşük burulma rijitliği sebebiyle daha fazla büküleceğini gösterir.

Uniform katı kirişlerde ve çarpılmanın serbest olduğu özel tip ince cidarlı kirişlere zıt olarak; açık kesitli ince cidarlı kirişlerde uniform olmayan eksenel deformasyonlar oluşur. Bu da burulma momentlerinin, eksenel (çarpılma) gerilmelerinin yanı sıra; çarpılma yer değiştirmeleri kısıtlanır ise Şekil 3.3'te de görüleceği üzere kayma gerilmeleri de oluşturacağı anlamına gelir.

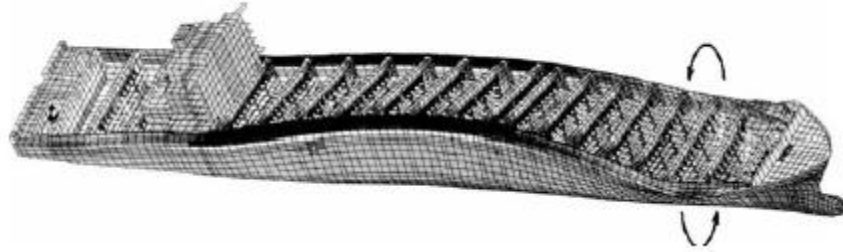


Şekil 3.3: İnce cidarlı açık kesitli bir kirişte uçlardaki kısıtlamalar sebebiyle meydana gelen çarpılma yer değiştirmeleri ve gerilmeleri.

Gerçek gemi yapılarında çarpılma yer değiştirmeleri kısmen kısıtlanmıştır, dolayısıyla çarpılma gerilmeleri ve ambar ağzı deformasyonlarının analizi gemilerin yapı analizinin önemli bir parçasıdır [5].

3.4 Gemi Gövdesinin Burulma Deformasyonları

Açık güverteli gemilerde burulma deformasyonları Şekil 3.4'te görüleceği üzere burulma yüklemesinin dağılımı ve büyüklüğüne; ayrıca yapının burulma rijitliğine bağlıdır [7].



Şekil 3.4: Baş taraftan gelen burulma yüklemesi karşısında gemi yapısı.

Boy ve genişliğiyle karşılaştırıldığında kalınlığın çok küçük kaldığı yapılar “ince cidarlı” olarak adlandırılır.

Bernoulli hipotezine göre, ince cidarlı kirişlerde kayma gerilmesi ve şekil değiştirme katı dikdörtgen kirişlerin gerilmelerine oranla daha fazladır. Düzlemsel kesitler kutu kirişin kesiti boyunca düzlemsel kalır. Ancak Bernoulli hipotezinin göz ardı ettiği bir durum vardır: Kesitlerde çarpılma meydana gelir. Çarpılma bir kirişin kesitinin eksenini doğrultusunda düzlem dışı distorsiyonu yani bozulmasıdır [8].

4. ÇARPILMA

Kesitler çarpılmaya karşı serbest durumdayken, kesite normal olan çarpılma gerilmeleri oluşmaz. Ancak; kargo alanı ve makine dairesi arasındaki geçişler gibi süreksizlik olan noktalarda, çarpılma deformasyonları çeşitli derecelerde kısıtlanır. Bu kısıt çarpılma gerilmelerine sebep olur, çarpılma gerilmeleri ve buna bağlı oluşan deformasyonlar dizayn aşamasında göz önüne alınmalıdır.

Gemi gövdesi denizdeki hareketi esnasında, kesme yüklemesi, eğilme momenti, burulma momenti, enine ve bünyesel yüklemelere maruz kalır. Burulma momentlerinin gemi boyunca dağılımı kargo yükün gemi boyunda ve eninde dağılımına bağlıdır. Momentlerin büyüklüğü ve dağılımı ayrıca dalgalar arasındaki yönünden de etkilenir [5].

Burulma momentleri St. Venant (T_S) ve çarpılma momentinden (T_W) meydana gelir. Bu iki moment gemi gövdesi üzerinde burulma yüklemesini oluşturur. Burulma zorlaması denklem (4.1)'de görüldüğü gibi ifade edilir:

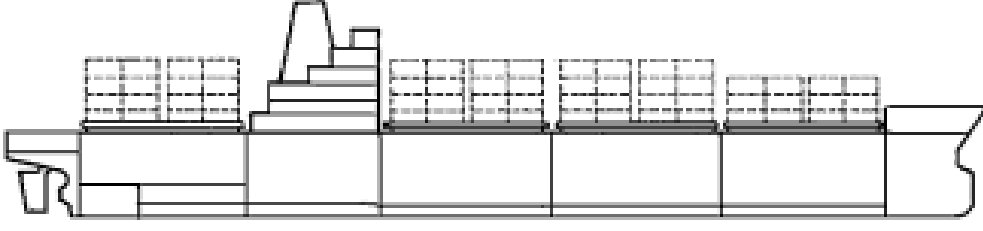
$$T = T_S + T_W \quad (4.1)$$

Pratik olarak çoğunlukla, bu bileşenlerden biri, diğerinin etkisine oranla daha az olduğundan ihmal edilir. Çarpılma burulması genellikle katı, delik ya da kapalı kesitlerin ince elemanlarında ihmal edilir.

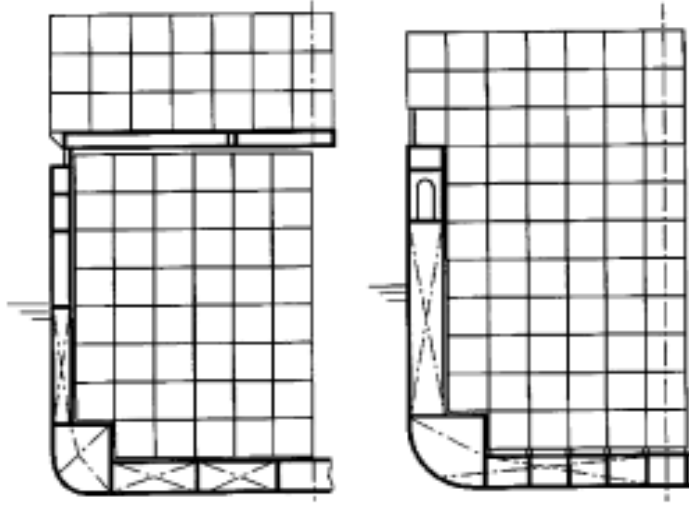
St. Venant burulması ise düzlemsel kesitlerin düzlemsel kaldığı dairesel kesitli kirişlerde geçerlidir. İnce cidarlı kesitlerde ihmal edilebilir. İnce cidarlı kesitlerde düzlemsel kesitler düzlem şeklinde kalmaz ve çarpılma oluşur.

Hem eğilme hem de çarpılma burulması teorisi yüklenmiş elemanın kendi şeklini koruduğunu varsayar. Bu durumu desteklemeyen yapısal elemanlar da vardır [7].

Şekil 4.1'de boyuna kesiti görülen, Şekil 4.2'de ise ambar açıklığı farklı olan görülen konteyner gemilerinde gövdedeki burulma kayma ve eğilme gerilmesi ile birlikte ciddi bir yüke sebep olur.



Şekil 4.1: Bir konteyner gemisinin boyuna kesiti.



Şekil 4.2: Ambar kapaklı ve ambar kapaksız örnek konteyner gemi kesiti.

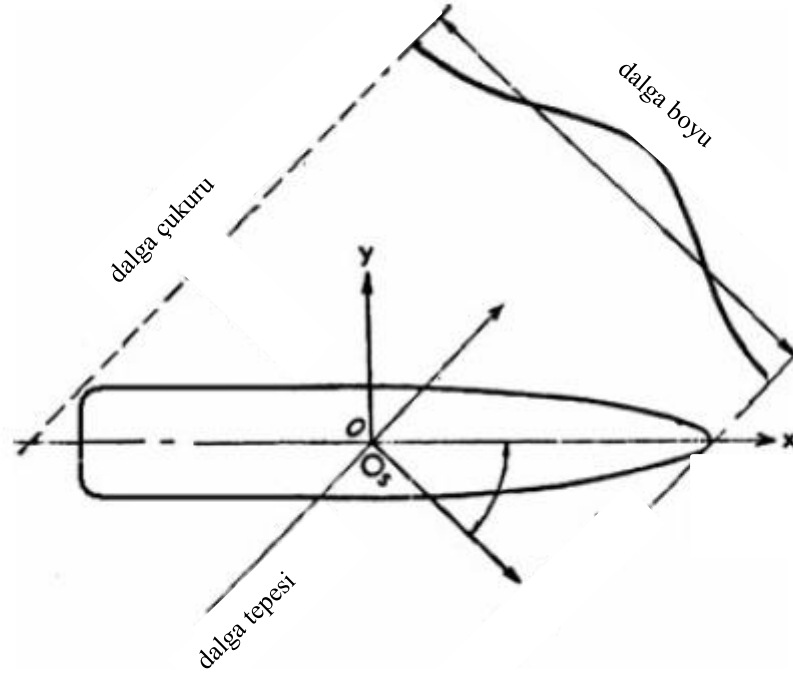
Genellikle konteyner gemileri geniş ambar açıklıkları ile karakterize edilir. Bu tip gemiler açık güverteli olarak da adlandırılır. Büyük ambar açıklıkları burulma mukavemeti ve gemi kirişinin rijitliği üzerinde önemli rol oynar.

Burulma mukavemeti ve rijitliği kargo alanındaki paralel gövde boyunca yer alan yapısal elemanlara; yapısal yerleşimlerin sebep olduğu kısıtlara ve burulma yükünün gemi boyunca dağılımına bağlıdır.

Bütün gemiler gövdesini gemi boyunca döndürecek burulma momentine maruz kalır. Yapının burulma rijitliği biçiminin bozulmasını engelleyecek durumdadır. Burulma yükü ambar ağzı kenarlarında ek gerilmeye sebep olur. Bu gerilme de çarpılma gerilmesi olarak adlandırılır.

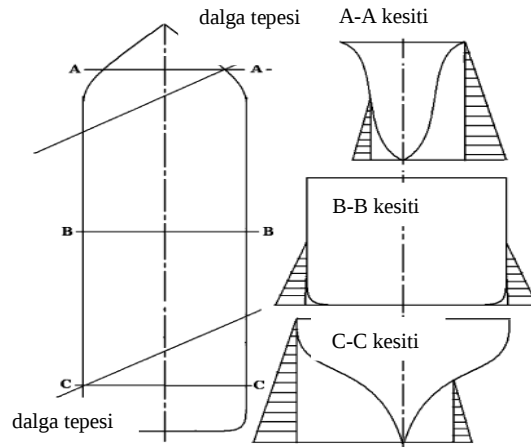
Dalgadan kaynaklı burulma yükü geminin açılı (oblik) dalgalarındaki hareketinden kaynaklanır. Şekil 4.3'ten de anlaşılacağı gibi, gemi dalga ile açı yapacak şekilde ilerlerken, dikey eğilme momentleri azalır; bunun yanında yataydaki eğilme ve

burulma momentleri artar. Burulma momentleri baş-kıç vurma esnasındaki hidrostatik ve hidrodinamik kuvvetlerden ve geminin hareketleri sonucu ivme kuvvetlerinden ileri gelir. Model deneyleri yalpanın burulma momenti üzerindeki büyük etkisini göstermiştir [7].



Şekil 4.3: Geminin açılı (oblik) dalgalar arasındaki hareketi.

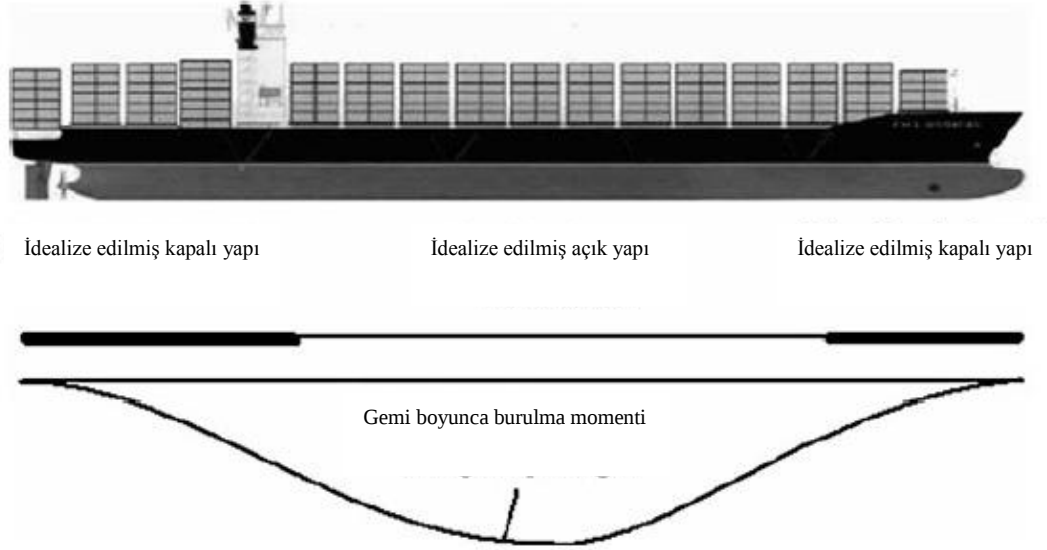
Gemi gövdesine etki eden ve kayma ekseninden geçmeyen tüm dış kuvvetler Şekil 4.4'te de görüleceği üzere burulma yaratır. Açık güverteli gemilerde ek olarak kayma kuvvetlerinin yatay bileşeni de burulma yüklemesine sebep olur. Bu kuvvet gemi kesitinin kayma merkezinden belli mesafede etkilidir.



Şekil 4.4: Gemi gövdesinin açılı dalgalar arasında maruz kaldığı burulma zorlaması.

Kargo yüklerinin düzensiz dağılımı durgun su burulma zorlamasına sebep olur. Bu zorlama klas kurallarının öngördüğü şekilde hesaplanır.

Burulma yükünün gemi boyunca ve kesitlere dağılımı Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Açık güverteli gemilerde burulmaya yanıt enine kesitlerin geometrisinin; açık güvertenin yer aldığı boyuna alanın ve gemi yapısının burulma rijitliğinin bir fonksiyonudur [7].



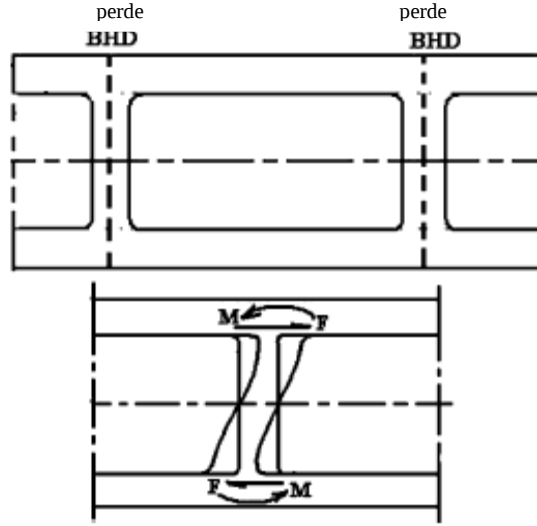
Şekil 4.5: Gemi boyunca burulma momentinin dağılımı.

4.1 Konteyner Gemilerinin Güverte Yapısındaki Çarpılma Deformasyonu ve Gerilmeler

Açık güverteli ince cidarlı konteyner gemisi yapısı her iki uçta da sabittir. Bunun sebebi, kapalı yapıda olan uçların yüksek rijitliğe sahip olmasıdır. Kısıtlanmış olan kargo yapısı burulma momentlerine maruz kaldığında, Şekil 4.6'da da görüleceği üzere güverte yapısında ve lateral kirişlerde çarpılma deformasyonları ve gerilmeleri oluşur. Bu deformasyon ve gerilmelerin şiddeti kapalı uçların yarattığı açık güvertede oluşan kısıtın derecesine ve desteklerin arasındaki kirişlerin esnekliğine bağlıdır [7].

Konteyner gemileri ince cidarlı olarak kabul edildiğinden bundan sonraki bölümde ince cidarlı kesitlerde meydana gelen çarpılma konusu incelenecektir. İnce cidarlı yapılar kenarlarından birleştirilmiş ince levhalardan oluşur. Levhaların kalınlığı, diğer kesit ölçülerine göre oldukça küçüktür. Tercih edilmesinin sebebi ise ince cidarlı

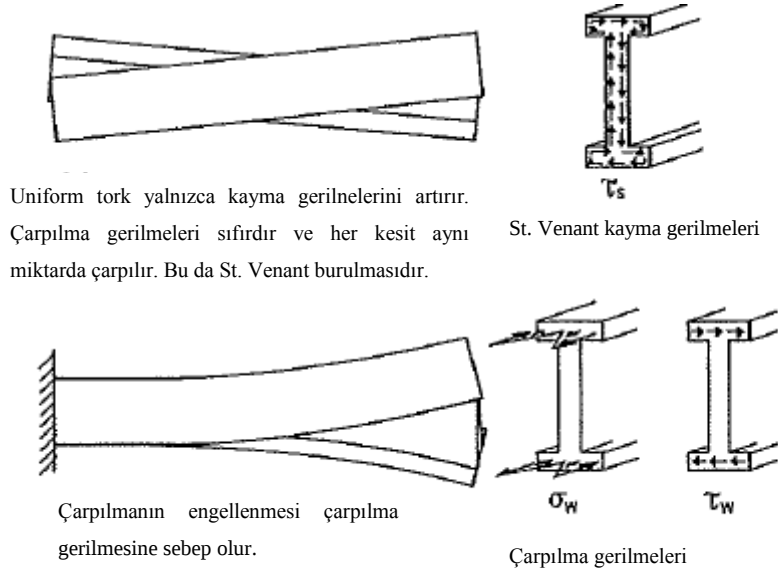
yapıların oldukça hafif olmasıdır. Bu tip yapıların dizaynı ile ilgili göz önünde tutulması gereken bazı konular vardır.



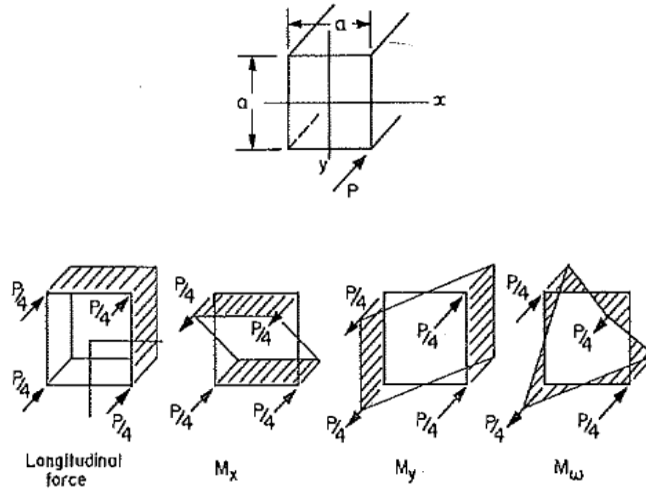
Şekil 4.6: Gemi yapı elemanlarında burulmadan oluşan çarpılma deformasyonu.

İnce cidarlı kirişlerde kayma gerilmeleri ve yer değiştirmeleri katı bir kirişe göre daha fazladır. Bu da akıllara klasik eğilme teorisinin varsayımı olan “eksenel kesitler kesitleri doğrultusunda düzlemsel kalır” diğer bir deyişle “düzlem kesitler düzlem kalır” ifadesini getirir. Bernoulli hipotezi olarak da bilinen bu ifade, çarpılma gerilmelerinin sunulması ile geçerliliğini yitirir. Çarpılmanın bir kirişin kesitinin eksenini doğrultusunda düzlem dışı distorsiyonu yani bozulması olduğu daha önce belirtilmişti. Şekil 4.7’den de görüleceği üzere eksenel yöndeki normal gerilme σ_w ; kesitteki kayma gerilmesi ise τ_w ile gösterilir. Çarpılmanın engellenmesi, çarpılma gerilmesine sebep olur. Kayma gerilmesinin dağılımı önemlidir. Dönme çarpılma etkisi yaratır. İnce cidarlı kesitler hem lokal hem de genel burkulmaya karşı dizayn edilmelidir. Gerilmeler uzunluğu boyunca azalır.

St. Venant Prensibi şu şekilde ifade edilir: Statik olarak toplamı sıfır olan bir set kuvvet, bir yüzeyin küçük bir kısmına etki ederse, bu kuvvetler etki edilen noktanın uzağındaki bölümler üzerinde etki yaratmazlar. Aynı zamanda; statik olarak eşdeğer bileşkeye sahip ve bir alana uygulanan yükler ile yükün uygulandığı bölgenin yeteri kadar uzağında oluşan gerilme ve deformasyonlar aynı olacaktır [8].



Şekil 4.7 : St. Venant ve çarpılma burulmalarına örnekler.



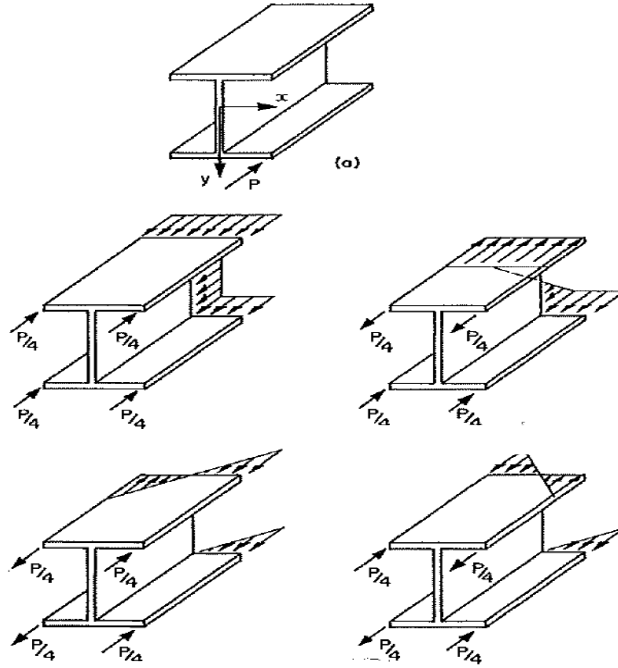
Şekil 4.8: Kesite uygulanan P yükünün 4 set yükün toplamı ile ifade edilmesi.

Şekil 4.8'e bakılırsa katı bir küpün kesit alanı görülür. Bir köşeden eksene paralel olacak şekilde P yüküne maruz kalmıştır. Bu yük dört set yükün toplamı şeklinde de gösterilebilir. İlk üç set için Bernoulli hipotezi geçerli olup, x ve y eksenlerinde eksenel yükleme ve eğilme momentleri gösterilmektedir. Son yükleme durumunda ise kesitin düzlemsel şekilde kalmadığı gözlemlenebilir. Ancak bu son yükleme durumu kendi kendini dengeleyen bir sistem olduğundan, ihmal edilebilir. Bu durumda P ile adlandırılan yük, eşdeğer eksenel yük (P) ve iki eğilme momentinin ($Pa/2$) toplamı ile ifade edilebilir.

Eğer aynı yükleme koşulunda I şeklinde bir kesit incelenecek olursa (Şekil 4.9), dördüncü set yükün yine kendi kendini dengeleyici olduğu fakat ihmal edilemediği görülebilir. Bunun sebebi gerilmenin kiriş boyunca yavaş yavaş azalmasıdır. (I profilde web bir çeşit seperatör gibi davranır ve profili her biri flanşlardan oluşan alt gruplara ayırır. Bu alt gruplar kendi kendini dengeleyemez ve boyuna eğilme gerilmesine yol açar.) Bu da kesitin düzlemsel şekilde kalamayıp, çarpılmasına yol açar ve çarpılma gerilmeleri meydana gelir. (x,y) koordinatlarına sahip bir noktanın boyuna gerilmesi (4.2) numaralı denklem ile ifade edilebilir.

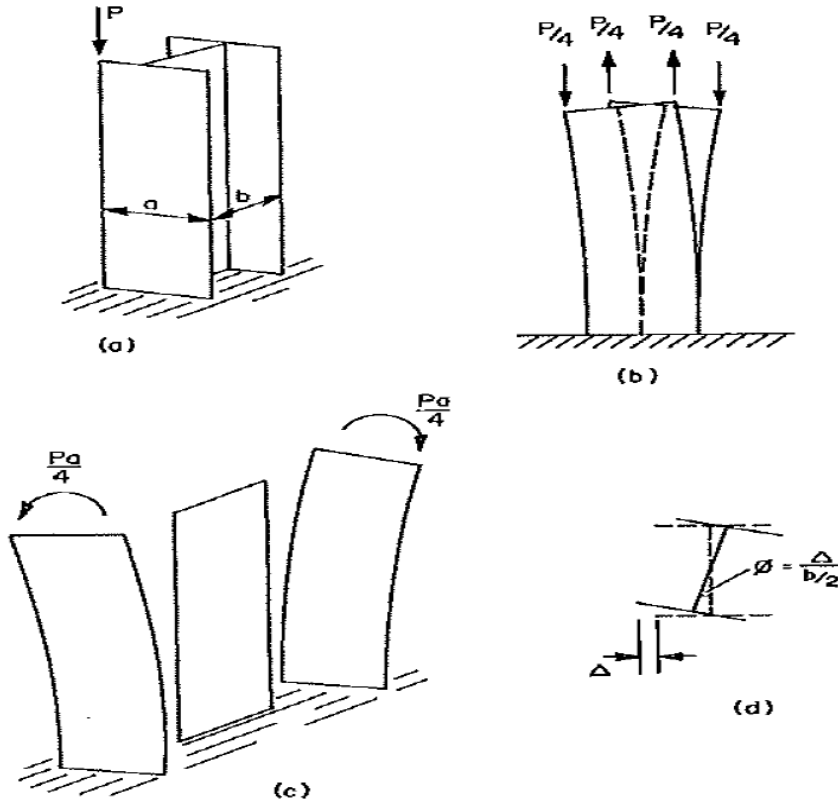
$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{M_x y}{F_{yy}} + \frac{M_y x}{F_{xx}} + \frac{M_\omega \omega}{C_\omega} \quad (4.2)$$

(4.2) numaralı denklemde ilk terim; aksenal gerilme; ikinci ve üçüncü terim eğilmeden gelen gerilme; dördüncü terim ise çarpılmadan meydana gelen boyuna çarpılma gerilmesini ifade eder. M_ω olarak adlandırılan ise bimomenttir. Bimoment, aynı eksene etki eden; iki eşit ve zıt yönlü momenti ifade eder. Moment ve moment kolunun çarpımından oluşur. Birimine örnek olarak Nmm^2 verilebilir. C_ω kesitin çarpılma sabitidir ve mm^6 şeklinde birimlendirilebilir. Çarpılma sabiti; çarpılmayı azaltmak için gereken kuvvetin ölçüsüdür [11]. ω ise çarpılma fonksiyonudur. Çarpılma fonksiyonu ω birimi mm^2 gibi düşünülebilir.



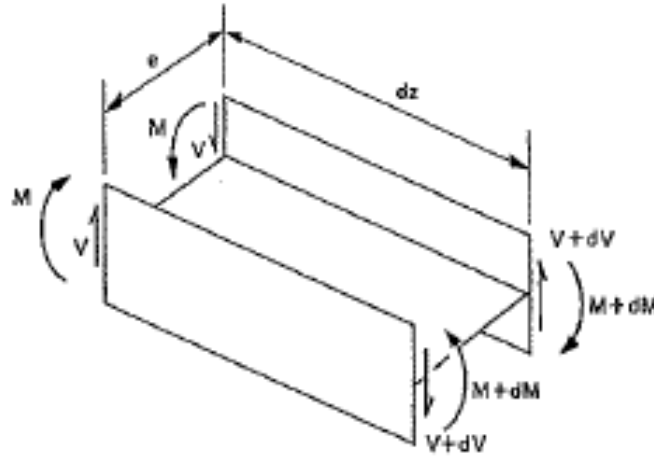
Şekil 4.9: Tekil P yükünün bileşenlerinin profilin çarpılmasına yol açması.

Çarpılma gerilmesi eğilme gerilmesi kadar ve hatta daha büyük olabilir. Kesitin serbest kenarlarında en yüksek değerine ulaşır. Serbest kenarlar, kesitin en zayıf yerleri olduğundan, çarpılma lokal burkulmalar üzerinde de önemli rol oynar. Tekrar I kesitine bakılırsa, bimoment boyuna eksene paralel şekilde distorsiyona (bozulmaya) ve kolonun boyuna ekseninde dönmeye yol açar. Eğer web ve flanşlar birbirinden ayrı düşünülürse, flanşların üst noktasına $Pa/4$ büyüklüğünde bir moment çifti etkinken; flanşlar eğilir; webler ise düz şekilde kalır. Eğer hem flanş hem de web $2\Delta/b$ açısıyla bükülürse (Şekil 4.10), web ve flanşlar çok esnek olduğundan orijinal pozisyonuna geri döner. Bu dönme için gerekli kuvvet de oldukça azdır [8].



Şekil 4.10: Bimoment uygulanan bir kirişte oluşan dönme ve boyuna gerilmeleri.

Her bir levhanın yalnızca burulması St. Venant kayma gerilmesine (τ_{st}) yol açar. Levhaların dönmesi için gerekli olan tork ise St. Venant torku (M_{st}) olarak adlandırılır. Böylelikle, bimomentin bir kolonda dönmeye ve flanşlarda boyuna gerilmeye sebep olduğu anlaşılır.



Şekil 4.11: Bimomentin kiriş boyunca değişmesi ve çarpılma burulma momentine yol açması.

Takip eden kısımda bimoment ve burulma momenti arasındaki ilişki açıklanacaktır.

$$M_w = M e$$

$$M_w + dM_w = M \times e + dM_e \quad (4.3a)$$

$$V dz = dM V = \frac{dM}{dz} \quad (4.3b)$$

$$V dz = dM V = \frac{dM}{dz} \quad (4.3c)$$

$$M_{Ds} = V \times e = \frac{dM}{dz} \times e = \frac{d(M \times e)}{dz} = \frac{dM_w}{dz} \quad (4.3d)$$

(4.3a), (4.3b), (4.3c), (4.3d) numaralı denklemler çözüldüğünde, Şekil 4.11'den de görüleceği üzere bimoment kiriş ya da kolon boyunca değiştiğinde, burulma momenti oluşur sonucuna varılabilir [8].

Dairesel olmayan kesitlerde burulma, kesitte çarpılma olarak adlandırılan boyuna deformasyonlara yol açar. Katı kesitlerde bu deformasyon ihmal edilebilir ve bu tip kesitlerde; burulma esnasında kesitin düzlemsel kalacağı varsayımı yapılır. İnce cidarlı kirişlerde ise durum farklıdır. Bu kesitlerde çarpılma deformasyonları, çarpılma gerilmesi denilen boyuna normal gerilmeye sebep olur. İnce cidarlı kesitlerde burulma teorisi sayısız kişi tarafından geliştirilmiş olup, aşağıdaki varsayımlara dayanır:

Birinci olarak, her yeri ince cidarlı olan bir kirişte çarpılma ve kayma akısı kalınlık boyunca sabittir. İkincil olarak, burulma esnasında, kiriş kesiti döner ve boyuna çarpılmaya maruz kalır ancak; şekli değişmeden kalır ve enine ya da kesit düzleminde distorsiyon (bozulma) oluşmaz. Son olarak, boyuna çarpılma ikincil gerilmeye de sebep olur. Bu gerilmeler hem normal hem de kayma gerilmesidir. Teori ikincil

gerilmelerin etkisini yani kayma gerilmelerinden meydana gelen kayma deformasyonunu yok sayar.

Konteyner gemileri açık kesitli bir kirişe benzetilebilir. Bu sebeple bu çeşit gemiler ek burulma mukavemetine ihtiyaç duyarlar.

Burulma rijitliği kapalı kesitlerde, açık kesitlere oranla çok daha fazladır. Bunun sebebi, açık kesitlerin uygulanan burulma momenti ile daha çok dönmesidir. Açık kesitler daha fazla çarpılmaya maruz kalırlar. Herhangi bir kesitte oluşan çarpılma kısmen ya da tamamen engellenir ise, kesit daha dayanıklı hale gelir. Çarpılmanın şiddeti, bükülme (dönme) ile orantılıdır.

İnce cidarlı kesitler için çarpılma kalınlık boyunca sabittir ve yay uzunluğunun fonksiyonudur. Eğer çarpılmaya herhangi bir kısıt bulunmuyorsa herhangi bir kesit için burulma (4.4) numaralı eşitlikten hesaplanabilir [9].

$$M_x = G \times J \times \frac{d\theta}{dx} \quad (4.4)$$

(4.4) eşitliğinde yer alan ifadelerin açıklaması aşağıda verilmiştir.

M_x : Burulma Momenti

G : Kayma modülü

J :St. Venant kayma sabiti

4.2 Açık Kesitler

Açık kesitlerde kayma gerilmesi kalınlık boyunca değişir ve tam ortasında sıfırdır. Kayma gerilmesi kenarlarda en yüksek değerini alırken, iç kısımlarda en düşüktür. Elemanların narinliğinden dolayı, iç gerilmelerin momentleri küçüktür. Bu da iç moment ve uygulanan bükülme (dönme) momenti ile bir denge sağlar. Bu denge, geniş bir dönme açısına ve kayma gerilmesinde tavan bir değere işaret eder.

Açık ve kapalı kesitleri karşılaştırılırsa, açık kesitlerin daha büyük dönme açısında sahip olduğu; kapalı kesitlerin ise daha az döndüğü söylenebilir. Buna ek olarak, açık kesitlerde büyük kayma gerilmeleri gözlenirken; kapalı kesitlerde daha az kayma gerilmesi oluşur [9].

4.2.1 Açık kesitlerde çarpılma

Çarpılma kayma sebebiyle oluşmaz [9]. Kayma gerilmesinin eğer kalınlık boyunca ortalaması alınırsa değeri sıfırdır. Çarpılma, elemanın kendi düzlemiyle ilgili yaptığı dönme açısından kaynaklanır. (rigid body rotation) Dönme ise elemanın eksenel dönmesinin direkt kinematik bileşenidir. Yer değiştirme ise $h \times d\theta$ eşitliğinden bulunabilir. Burada h bükülme (dönme) ekseninden noktaya teğet olan mesafedir. Teğet yer değiştirme (4.5)'te görülen spiral bir açığa sebep olur:

$$\psi = h \times \frac{d\theta}{dx} = h \times \theta' \quad (4.5)$$

Net kayma gerilmesi kalınlık boyunca sıfır olduğundan, düzlemsel kayma deformasyonları oluşmaz. Bunun yerine eleman kendi içinde bükülür(döner) ve kesit de kendi ekseninin dışına aynı ψ açısını yaparak döner. Bu da lokal bir çarpılma yer değiştirmesine $du = -\psi ds = -h\theta' ds$ sebep olur. Kesit alanındaki herhangi bir noktanın çarpılma yer değiştirmesi, yay boyunun (s) kesitteki bir fonksiyonu şeklinde (4.6)'da görüldüğü gibi tanımlanabilir.

$$\omega(s) = \int_0^s h(s) ds \quad (4.6)$$

4.2.1.1 Açık kesitlerde serbest çarpılma

Serbest çarpılma (4.7)'deki formül ile özetlenebilir:

$$M_x = GJ\theta' \quad (4.7)$$

Burada G kayma modülü iken; J St. Venant burulma sabitidir. Açık kesitlerde burulma sabiti b kesitin toplam yay boyu olacak şekilde (4.8) ile gösterilir.

$$J = \frac{1}{3} \int_0^b t^3 ds \quad (4.8)$$

Birden fazla bölümden oluşan açık kesitlerde ise formül (4.9)'da görüldüğü gibi olup, b_i bölümlerin genişliğini, t_i ise kalınlığını ifade eder.

$$J = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n t_i^3 b_i \quad (4.9)$$

Kayma gerilmesi dış yüzeyin herhangi bir noktasında en yüksek değerine ulaşırken; kalınlığın ortasında sıfırdır. En yüksek değer (4.10) ile gösterilir.

$$\tau_{max} = \frac{M_x t}{J} \quad (4.10)$$

Açık kesitlerde çarpılma; dönmeden meydana gelir. Kesit etrafındaki yerlerde net kayma gerilmesi sıfır olduğundan kesitin enine dönmesine; eksenel bir rijit gövde dönmesi eşlik eder. Bu rijit dönme hareketi eksenel bir dönme yaratır. Kesit etrafındaki çarpılmanın dağılımı (4.6) denklemi ile ifade edilmişti. ω_0 değeri ve kayma merkezinin yeri net çarpılmanın; çarpılmaya ait birinci momentlerin sıfır olduğu koşuldan hesaplanır. Net çarpılmanın değerinin sıfıra eşit olmaması elemanın uzaması anlamına geleceğinden; aynı şekilde dönme eksenini etrafında çarpılma momentlerinin sıfır olmaması, yatay ve dikey eğilme momentlerinin elemana etki etmesi demek olduğundan bu koşullar söz konusu değildir.

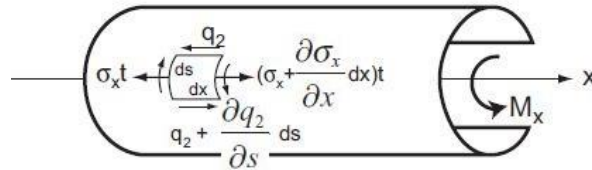
Bahsi geçen koşullar (4.11) ve (4.12) numaralı denklemler yardımıyla matematiksel olarak ifade edilir.

$$\int_0^b \omega_n(s) t ds = 0 \quad (4.11)$$

$$\int_0^b y \omega_n(s) t ds = 0 \quad (4.12)$$

4.2.1.2 Açık kesitlerde kısıtlanmış çarpılma

Prizmatik elemanlardaki çarpılma kısıtlandığında ya da engellendiğinde, eksenel gerilmeler σ_x oluşur. Bu gerilmeler eksenel yönde sabit değildir ve gerilmelere ikincil bir kayma gerilmesi dağılımı τ_2 eşlik eder. Çarpılma kalınlık boyunca sabit olduğundan σ_x ve τ_2 değerleri de kalınlık boyunca sabittir. Bu sebeple $q_2 = \tau_2 t$ şeklinde tanımlanan kayma akısı ile devam edilebilir. Burada τ_2 ile tanımlanan kayma gerilmesi açık kesitlerdeki τ_1 gerilmesinden farklıdır; çünkü τ_2 kalınlık boyunca lineer değişim gösterir. Toplam kayma gerilmesi τ_1 ve τ_2 nin toplamı şeklindedir.



Şekil 4.12: Kısıtlanmış çarpılmadan doğan gerilmeler.

Şekil 4.12’de görülen eksenel yöndeki denge denklemi (4.13) ve (4.14) ile ifade edilir:

$$\left(\sigma_x t + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx\right) ds - \sigma_x t ds + \left(q_2 + \frac{\partial q_2}{\partial s} ds\right) dx - q_2 dx = 0 \quad (4.13)$$

$$q_2(s, x) = - \int_0^s \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} t ds + (q_2)_0 \quad (4.14)$$

Eğer serbest uçtan başlanıp integral alınırsa; $s = 0$ durumunda $q_2 = 0$ eşitliği sağlanır. Burada s yay boyudur. Ek olarak; integral tüm kesite uygulandığında da eşitlik geçerlidir.

Eksenel gerilmeler σ_x (4.15) ve (4.16) ile elde edilir:

$$\sigma_x = E \varepsilon_x = E \frac{\partial u}{\partial x} = E \frac{\partial [\omega_n(s) \theta']}{\partial x} \quad (4.15)$$

$$\sigma_x = E \omega_n \frac{d^2 \theta}{dx^2} \quad (4.16)$$

(4.16) numaralı denklem, (4.14)'te yerine konulursa (4.17) numaralı denklemden kayma akısı q_2 elde edilir.

$$q_2(s, x) = - \int_0^s E \frac{d^3 \theta}{dx^3} \omega_n t ds = -E \frac{d^3 \theta}{dx^3} \int_0^s \omega_n t ds \quad (4.17)$$

Denklemdeki s herhangi bir serbest uçtan ölçülür.

İkincil kayma akısı q_2 ikincil bir burulma momenti M_{x2} oluşturur. Bu moment de (4.18)'den elde edilebilir.

$$M_{x2} = \int_0^b q_2 h ds \quad (4.18)$$

(4.17), (4.18)'te yerine konulduğunda, ikincil burulma momenti M_{x2} (4.19) ile ifade edilir.

$$M_{x2} = -EI_w \frac{d^3 \theta}{dx^3} \quad (4.19)$$

Bu aşamada (4.20) denklemi, (4.19)'a entegre edilir.

$$I_{\omega} = \int_0^b \left(\int_0^s \omega_n t ds \right) h ds$$

$$I_{\omega} = \int_0^s \omega_n t ds \int_0^s h ds - \int_0^b \int_0^s (h ds) \omega_n t ds \quad (4.20)$$

(4.11) denkleminde de görüleceği üzere ilk terim sıfıra gider ve ikinci terim $\int_0^s h ds = \omega_0 - \omega_n$. Bu durumda (4.21)'e ulaşılır.

$$I_{\omega} = \int_0^b (\omega_n - \omega_0) \omega_n t ds = \int_0^b \omega_n^2 t ds - \omega_0 \int_0^b \omega_n t ds \quad (4.21)$$

(4.21) denkleminde de (4.11) koşulundan dolayı ikinci terim sıfıra gider ve sonuç olarak çarpılma burulma rijitliği (4.22) şeklinde ifade edilir.

$$I_{\omega} = \int_0^b [\omega_n(s)]^2 t ds \quad (4.22)$$

Burulma rijitliği de nihai olarak elde edildikten sonra açık kesitlerdeki burulma sabitinin genel denklemine (4.23) ulaşılır.

$$M_x = GJ \frac{d\theta}{dx} - EI_{\omega} \frac{d^3\theta}{dx^3} \quad (4.23)$$

İleride yapılacak olan kapalı kesit hesaplamasından sonra yukarıdaki denklemin kapalı kesitler için de geçerli olduğu; yalnızca J sabitinin değiştiği görülecektir [9].

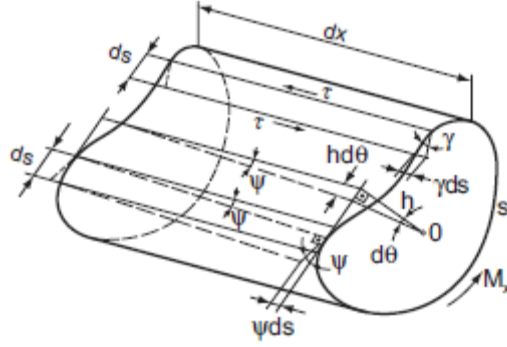
4.3 Kapalı Kesitler

Kapalı kesitlerde, gerilme kalınlık boyunca sabittir ve dönme merkezinden geçen büyük bir moment vardır. Bu çeşit kesitlerde daha az dönme ve uygulanan burulma momentine göre daha az kayma gerilmesi oluşur. Kayma akısı q ise (4.24)'de ifade edildiği gibi kesit çevresinde sabittir.

$$q = \tau t \quad (4.24)$$

4.3.1 Kapalı kesitlerde çarpılma

Çarpılma çok daha küçüktür. Bunun sebebi, çarpılmanın yay uzunluğuna bağlı olması ve kapalı kesitlerde bir dönüş tamamlandığında aynı değere gelinmesidir. Kapalı ve dairesel bir kesit için çarpılma söz konusu değildir. Kalınlık boyunca sabit olan kayma gerilmesi çarpılmayı azaltan etkenlerdendir. Kayma gerinimi (uzanımı) $\gamma = \tau/G$ eleman duvarları üzerinde kayma deformasyonunun yanı sıra; Şekil 4.13'den de görüleceği üzere rijit gövde dönmesinin (ψ) tam tersi yönünde lokal bir dönme yaratır.



Şekil 4.13: Kapalı kesitteki çarpılma.

Dolayısıyla, yay uzunluğu dsolan bir diferansiyel elemandaki net çarpılma (4.25) numaralı denklem ile ifade edilir.

$$du = (\gamma - \psi)ds = \left(\frac{\tau}{G} - h\theta'\right)ds \quad (4.25)$$

Kapalı kesitteki çarpılma kayma deformasyonları ve dönme ya da rijit gövde çarpılmalarının kombinasyonunu ve kısmen sadeleşmesini içerir. Net çarpılma dağılımına (4.26) numaralı denklemden ulaşılır.

$$u(s) = \int_0^s \left(\frac{\tau}{G} - h\theta'\right)ds + \omega_0\theta' \quad (4.26)$$

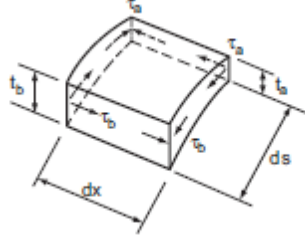
$$\tau = \frac{q}{t}$$

$$u(s) = [\omega_n(s)]\theta' = \left(\frac{J}{2A} \int_0^s \frac{ds}{t} - \int_0^s hds + \omega_0\right)\theta'$$

(4.26)'da ω_0 integrasyon sabitine işaret eder.

4.3.1.1 Kapalı kesitlerde serbest çarpılma

Kapalı kesitlerde kayma gerilmesi τ , kalınlık boyunca sabittir. Bu bölümde τ kesitte nasıl değişir belirlenecektir.



Şekil 4.14: Kapalı kesitteki gerilmelerin dengesi.

Kalınlığı farklı olan yukarı kesitte; net eksenel kuvvetin sıfır olması gerektiğinden Şekil 4.14'ten de kuvvetler görüleceği üzere (4.27) numaralı denklem elde edilir:

$$(\tau_b t_b - \tau_a t_a) dx = (q_b - q_a) dx = 0 \quad (4.27)$$

St. Venant kayma akısı yani q ; kesit çevresinde sabittir. Uygulanan M_x burulma momenti ile iç kayma gerilmesinin moment dengesi düşünülürse; ds diferansiyel elemanına etki eden kuvvetin $q ds$ olduğu ve aynı şekilde dönme merkezindeki momentin $dM_x = h q ds$ olarak ifade edildiği görülür. Geometrik özelliklerden (4.28) ve (4.29) numaralı denklemler elde edilir.

$$dA = \frac{1}{2} h ds \quad (4.28)$$

$$dM_x = 2q dA \quad (4.29)$$

Buradan toplam moment tüm kesit çevresinde integralinin alınması ile (4.30) numaralı denklem elde edilir.

$$M_x = 2qA \quad (4.30)$$

A ile gösterilen kapalı kesitin toplam alanıdır. Bu durumda kayma akısı (4.31) ile gösterilir.

$$q = \frac{M_x}{2A} \quad (4.31)$$

Boy dx olan tipik bir eleman için şekil değiştirmenin ana prensibinden (M_x tarafından yapılan iş iç şekil değiştirme enerjisine eşittir.) (4.32) ve (4.33) denklemi elde edilir.

$$\frac{1}{2} M_x d\theta = dx \oint \frac{1}{2} \frac{\tau^2}{G} t ds \quad (4.32)$$

$$M_x = GJ \frac{d\theta}{dx} = GJ\theta' \quad (4.33)$$

$$J = \frac{4A^2}{\oint \frac{ds}{t}} \quad (4.34)$$

(4.34) numaralı denklemden kapalı kesitlerdeki burulma sabitinin J , açık kesitlerdekinden farklı olduğu görülür.

4.3.1.2 Kapalı kesitlerde kısıtlanmış çarpılma

Açık kesitlerde olduğu gibi kapalı kesitlerde de çarpılmadaki herhangi bir kısıt; uniform olmayan eksenel bir gerilme dağılımı $\sigma_x(s, x)$ ve buna eşlik eden ikincil bir kayma akısı (4.35) numaralı denklem ile görülebilecek olan $q_2(s, x)$ yaratır. Kayma akısının elde edilmesi, açık kesitlerde olduğu gibidir. Kapalı kesitlerdeki tek fark $(q_2)_0$ sabit integrasyonunun direkt sıfıra eşitlenmemesidir. Bunun sebebi q_2 nin sıfır olduğu bilinen serbest ucun olmamasıdır.

$$q_2(s, x) = -E \frac{d^3\theta}{dx^3} \int_0^s \omega_n t ds + (q_2)_0 \quad (4.35)$$

$(q_2)_0$ elde etmek için, kesitin kapalı olmasından yani; bir tam çevrimi sağlayan net eksenel yer değiştirmenin sıfıra eşit olmasından (4.36) faydalanılır. q_2 kayma akısının sebep olduğu çarpılma ile ilgili (4.36) numaralı denklemde yer alan ilk terimde integrasyonun başlangıç noktasının sıfıra eşit alınırken; ikinci terimde (4.37) ise asıl başlangıç noktası olan fakat bilinmeyen nokta alınır.

$$\frac{1}{G} \oint \frac{q_2^*}{t} ds + \frac{(q_2)_0}{G} \oint \frac{ds}{t} = 0 \quad (4.36)$$

$$(q_2)_0 = - \frac{\oint \frac{q_2^*}{t} ds}{\oint \frac{ds}{t}} \quad (4.37)$$

$(q_2)_0$ hesaplandıktan sonra, q_2 'den doğan ek direnç momenti de (4.38) aynı yolla bulunur.

$$M_{x2} = \oint q_2 h ds = -EI_\omega \frac{d^3 \theta}{dx^3} \quad (4.38)$$

$$I_\omega = \int_0^b \omega_n^2 t ds \quad (4.39)$$

(4.39)'da yer alan ω_n (4.25) numaralı denklemde tanımlanmıştır.

4.4 Çok Hücreli Kesitler

4.4.1 Çok hücreli kesitlerde serbest çarpılma

N sayıda hücre içeren kesitlerde, her hücre bir kapalı kesit içerir. Bütün kayma akısı n adet ayrıık hücrede dolaşan kayma akılarının süper pozisyonundan oluşur. Bu hücrelerde kayma akısı çevre boyunca sabittir. İki hücrenin kesişim yüzeyindeki kayma akısı, komşu hücrelerdeki kayma akılarının matematiksel toplamıdır. Her hücreden iletilen tork $M_{xi} = 2A_i q_i$ olarak ifade edilirse; kesitteki toplam tork (4.40) numaralı denklem ifade edilir.

$$M_x = \sum_{i=1}^n 2A_i q_i \quad (4.40)$$

N sayıda bilinmeyen değer olduğu için problem belirsizdir ve geometrik bir uyuma göre çözülmelidir. Kapalı kesitlerdeki geometrik koşul; her bir kapalı devre hücredeki net çarpılmanın sıfır olmasıdır.

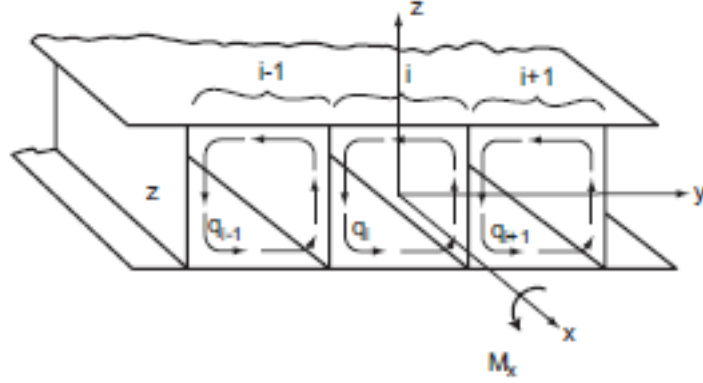
$$\frac{1}{G} \oint \tau ds - \theta' \oint h ds = 0 \quad (4.41)$$

İntegral tek bir devre için olduğundan ω_0 gözlenmez. (4.41) yeniden düzenlenirse (4.42) elde edilir.

$$\frac{1}{\theta'} \oint \frac{q}{t} ds = 2AG \quad (4.42)$$

i nolu hücredeki integrasyondan devam edilirse, hücrenin her bir duvarındaki kayma akısı; o hücredeki değeri ile bitişik hücreden gelen değerin toplamıdır. Örnek olarak Şekil 4.15'e bakılırsa şu durum gözlenir. Hücreleri bağlayan iki adet duvar vardır. Tüm kayma akılarının pozitif yönde (saatin tersi yönünde) dolaştığı kabul edilir.

Sonuç negatif çıkarsa, o hücredeki kayma akısının saatin yönünde olduğunu gösterir. Bitişik hücrelerin katkısı daima q_i ye zıt yöndedir ve çıkartılmalıdır. Bu durumda (4.43) denklemi elde edilir.



Şekil 4.15: Çok hücreli bir kesitteki kayma akısı.

$$\frac{q_i}{\theta'} \oint \frac{ds}{t} - \frac{q_{i-1}}{\theta'} \int_{i-1,i} \frac{ds}{t} - \frac{q_{i+1}}{\theta'} \int_{i+1,i} \frac{ds}{t} = 2A_i G \quad (4.43)$$

Enine deformasyon olmadığı için; tüm hücreler aynı dönme oranına θ' sahiptir. θ' normalize faktör olarak adlandırılır. Bu durumda normalize kayma akısı (4.44) ile ifade edilir.

$$\bar{q}_i = \frac{q_i}{\theta'} \quad (4.44)$$

Denklemdaki integraller belirli bir geometri için verildiğinde, katsayılar bilinmeyen olmaktan çıkar ve C sembolü ile ifade edilir. Bu durumda (4.45) elde edilir.

$$C_i \bar{q}_i - C_{i-1} \bar{q}_{i-1} - C_{i+1} \bar{q}_{i+1} = 2A_i G \quad (4.45)$$

Denklemler sistemi şeklinde ifade edilmiş hali ise (4.46)'dan görülebilir.

$$[C]\{\bar{q}\} = 2G\{A\} \quad (4.46)$$

Toplam tork ve dönme oranı (4.47) ve (4.48)'den çözülebilir.

$$M_x = 2\{A\}^T\{q\} = 2\theta'\{A\}^T\{\bar{q}\} \quad (4.47)$$

$$\theta' = \frac{M_x}{2\{A\}^T\{\bar{q}\}} \quad (4.48)$$

(4.48) denkleminin paydasında yer alan terim ise (4.49) ile ifade edilir.

$$GJ = 2\{A\}^T\{\bar{q}\} \quad (4.49)$$

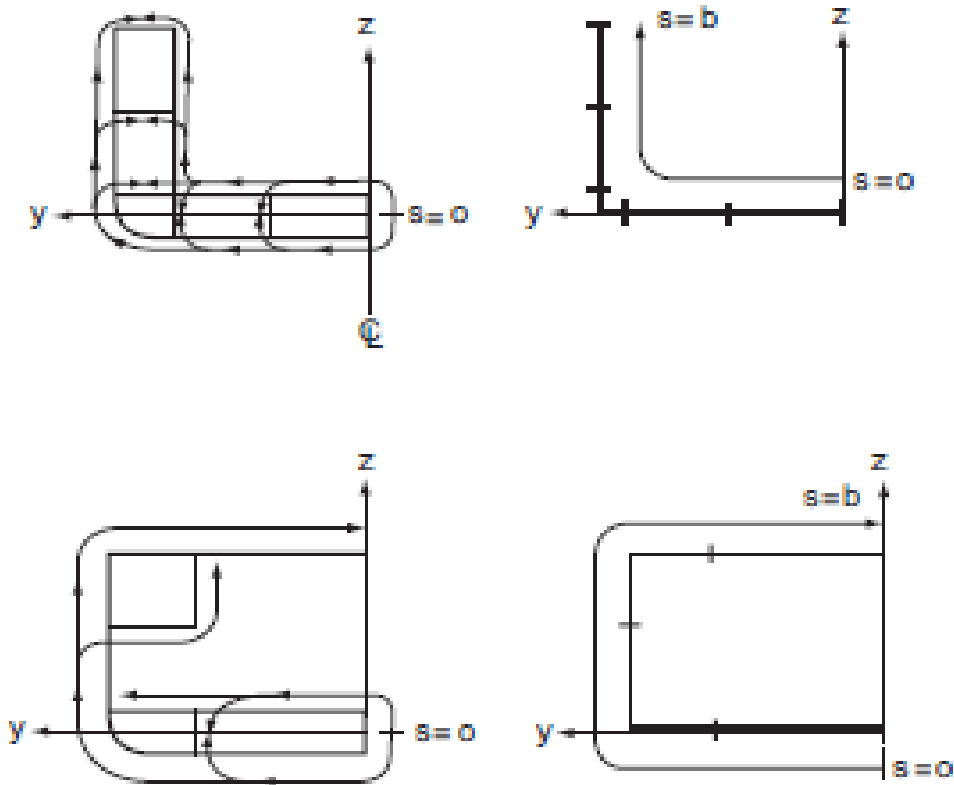
4.4.2 Çok hücreli kesitlerde kısıtlanmış çarpılma

Çok hücreli kesitlerde, kısıtlanmış çarpılmanın etkisi burulma rijitliği ($I_\omega = \omega_n^2 t ds$) ile hesaba katılır. İntegrasyonda ortak hücre duvarı yalnızca bir kez işleme alınmalıdır.

4.5 Karışık Kesitler

Eğer kesitin bütünü, hem açık hem de kapalı kısımlardan oluşuyor ise toplam St. Venant rijitliği, hem açık hem de kapalı olan kesitlerin rijitliğinin (J); aynı şekilde toplam çarpılma rijitliği kesitlerin I_ω değerlerinin toplamıdır.

Açık kesitler çok uzun ya da çok kalın olmadığı sürece J ihmal edilebilir değere sahiptir. Karışık kesitlerde, açık kesitlerin en büyük katkısı çarpılma burulma rijitliği I_ω dir. Şekil 4.16'da da burulma rijitliği hesabında izlenebilecek örnek bir yol gösterilmiştir. Çarpılma bu kısımda sabittir ve değeri, kapalı kesitin diğer hücreye bağlandığı noktadaki değerine eşittir [9].



Şekil 4.16: Burulma rijitliği hesabında izlenebilecek örnek yol.

5. ÖRNEK BİR KONTEYNER GEMİSİ KESİTİNİN ÇARPILMA SABİTİ HESABI

Bu bölüme kadar anlatılan teorik bilginin kesit üzerinde nasıl uygulandığını anlatabilmek amaçlı örnek bir konteyner gemisi kesiti ele alınmıştır. Bu kesit, birinci kısımda dip yapısından meydana gelmektedir. İkinci kısımda, kesite bir ana güverte eklenmiş; üçüncü kısımda ise bir ara güverte eklenmiştir. Her üç durumda da kesitte meydana gelen çarpılma hesaplanmıştır. Eklenen ana güverte ve ara güvertenin çarpılmaya ne gibi bir etkisi olduğunun görülmesi amaçlanmıştır.

Örnek olarak ele alınan konteyner gemisi SL-7 tip olarak adlandırılan bir gruba aittir. SL-7 ya da diğer bir deyişle FSS (FastSealiftShip) dünyadaki en hızlı kargo gemileri arasında yer alır. 33 knot'a çıkabilen SL-7 tip gemiler orijinal olarak 1970'li yıllarda üretilmişlerdir. 1980 sonrası her biri Amerikan donanmasına alınmıştır. Geminin ana boyutları Çizelge 5.1'de verilmiştir [10]. Burada L_{BP} ile gösterilen geminin dikeyler arası boyu; B ile gösterilen genişliği, C_b ile gösterilen ise blok katsayısıdır.

Çizelge 5.1: Örnek konteyner gemisinin ana boyutları.

SL-7 konteyner gemisi		
L_{BP}	268	m
B	32	m
C_b	0,54	

Birinci kesit yalnızca çift dipten oluşmaktadır. İkinci kesite ara güverte eklenmektedir. Üçüncü kesitte ise hem ara hem de ana güverte eklenmektedir. Takip eden bölümlerde bu üç kesit için çarpılma sabitleri hesaplanacak olup, elde edilen değerler karşılaştırılacaktır. Kesit hesaplarında kütle merkezi ve kayma merkezi dikkate alınarak yapılan koordinat dönüşümlerine yer verilmiştir.

Çizelge 5.2: Birinci kesite ait düğüm noktaları ve sektörlerin kullanıcı koordinatları.

DÜĞÜM NOKTASI (mm)			SEKTÖR (mm)							
NO	KULLANICI EKSENİ KOORDİNATLARI		DÜĞÜM NOKTASI				BAŞLANGIÇ		BİTİŞ	
	x	y	NO	i	j	kalınlık (t)	xi	yi	xj	yj
1	0	0	1	1	2	6	0	0	0	1000
2	0	1000	2	2	3	14	0	1000	-2000	1000
3	-2000	1000	3	3	4	14	-2000	1000	-4000	1000
4	-4000	1000	4	4	5	14	-4000	1000	-5250	1000
5	-5250	1000	5	5	6	14	-5250	1000	-7000	1000
6	-7000	1000	6	6	7	16	-7000	1000	-8000	1000
7	-8000	1000	7	8	7	14	-7000	0	-8000	1000
8	-7000	0	8	8	6	12	-7000	0	-7000	1000
9	-5250	0	9	8	9	14	-7000	0	-5250	0
10	-4000	0	10	9	10	14	-5250	0	-4000	0
11	-2000	0	11	10	11	14	-4000	0	-2000	0
12	-8000	3250	12	7	12	14	-8000	1000	-8000	3250
13	-8000	5500	13	12	13	14	-8000	3250	-8000	5500
18	-8000	8000	18	13	18	14	-8000	5500	-8000	8000
19	-8000	9000	19	18	19	16	-8000	8000	-8000	9000
			24	10	4	12	-4000	0	-4000	1000
			25	11	1	14	-2000	0	0	0

Tüm noktaların ve sektörlerin koordinatları belirlendikten sonra, sektörlerle ait özellikler (boy ve alan) hesaplanır. Kütle merkezinin bulunmasında (5.1)'den (5.8)'e kadar olan formüllerden faydalanılır.

$$L_x = [x_j] - [x_i] \quad (5.1)$$

$$L_y = [y_i] - [y_j] \quad (5.2)$$

$$X_c = [x_i] + [x_j]/2 \quad (5.3)$$

$$Y_c = [y_i] + [y_j]/2 \quad (5.4)$$

$$L = \left([\bar{L}_x]^2 + [\bar{L}_y]^2 \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

$$L = [L][A] \quad (5.6)$$

$$\Delta x = [X_c][A] \quad (5.7)$$

$$\Delta y = [Y_c][A] \quad (5.8)$$

L : Sektör boyu

A : Sektör alanı

L_x : Sektörün x eksenindeki boyu

L_y : Sektörün y eksenindeki boyu

X_c : Sektörün x eksenindeki merkezi

Y_c : Sektörün y eksenindeki merkezi

Δx : x eksenindeki alan momenti

Δy : y eksenindeki alan momenti

Hesaplanan sektör özellikleri Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3: Birinci kesitteki sektörlerin özellikleri.

NO	SEKTÖR ÖZELLİKLERİ							
	Lx (mm)	Ly (mm)	L (mm)	A (mm ²)	Xc	Yc	Ax (mm ²)	Ay (mm ²)
1	0	1000	1000	6000	0	500	0,00E+00	3,00E+06
2	-2000	0	2000	28000	-1000	1000	-2,80E+07	2,80E+07
3	-2000	0	2000	28000	-3000	1000	-8,40E+07	2,80E+07
4	-1250	0	1250	17500	-4625	1000	-8,09E+07	1,75E+07
5	-1750	0	1750	24500	-6125	1000	-1,50E+08	2,45E+07
6	-1000	0	1000	16000	-7500	1000	-1,20E+08	1,60E+07
7	-1000	1000	1414	19799	-7500	500	-1,48E+08	9,90E+06
8	0	1000	1000	12000	-7000	500	-8,40E+07	6,00E+06
9	1750	0	1750	24500	-6125	0	-1,50E+08	0,00E+00
10	1250	0	1250	17500	-4625	0	-8,09E+07	0,00E+00
11	2000	0	2000	28000	-3000	0	-8,40E+07	0,00E+00
12	0	2250	2250	31500	-8000	2125	-2,52E+08	6,69E+07
13	0	2250	2250	31500	-8000	4375	-2,52E+08	1,38E+08
18	0	2500	2500	35000	-8000	6750	-2,80E+08	2,36E+08
19	0	1000	1000	16000	-8000	8500	-1,28E+08	1,36E+08
24	0	1000	1000	12000	-4000	500	-4,80E+07	6,00E+06
25	2000	0	2000	28000	-1000	0	-2,80E+07	0,00E+00

Çizelge 5.3'te görülen değerlere göre toplam alanlar (5.9), (5.10) ve (5.11) ile hesaplanır.

$$SA = \sum[A] = 375799 \text{ mm}^2 \quad (5.9)$$

$$SA_x = \sum[A_x] = -1998492424 \text{ mm}^2 \quad (5.10)$$

$$SA_y = \sum[A_y] = 715899495 \text{ mm}^2 \quad (5.11)$$

Kütle merkezi koordinatları (c_x, c_y) ise (5.12) ve (5.13) 'ten bulunur.

$$c_x = [SA_x]/[SA] = -5318 \quad (5.12)$$

$$c_y = [SA_y]/[SA] = 1905 \quad (5.13)$$

Çizelge 5.4'ten de görüleceği üzere kütle merkezinin koordinatları belirlendikten sonra, kullanıcı eksenine göre kesitin atalet momenti hesaplanır.

$$I_{xx} = [A] \left[(y_i - c_y)^2 + (y_i - c_y)(y_j - c_y) + (y_j - c_y)^2 \right] / 3 \quad (5.14)$$

$$I_{yy} = [A] \left[(x_i - c_x)^2 + (x_i - c_x)(x_j - c_x) + (x_j - c_x)^2 \right] / 3 \quad (5.15)$$

$$I_{xy} = [A] \left\{ [(x_i - c_x)(y_i - c_y) + (x_j - c_x)(y_j - c_y)] / 3 + [(x_i - c_x)(y_j - c_y) + (x_j - c_x)(y_i - c_y)] / 6 \right\} \quad (5.16)$$

$$L_x = [x_j] - [x_i] \quad (5.17)$$

$$L_y = [y_i] - [y_j] \quad (5.18)$$

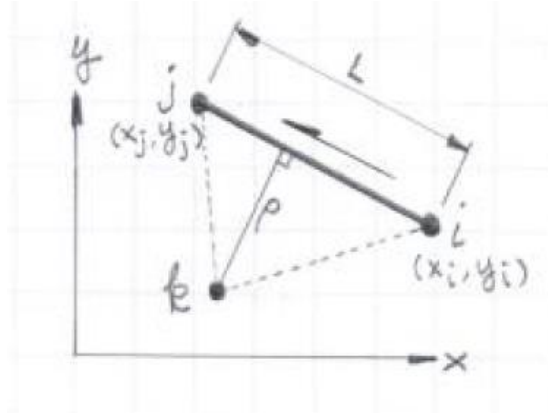
$$X_c = [x_i] + [x_j] / 2 \quad (5.19)$$

$$Y_c = [y_i] + [y_j] / 2 \quad (5.20)$$

Çizelge 5.4: Birinci kesitteki sektörlerin eksenlere göre atalet momentleri.

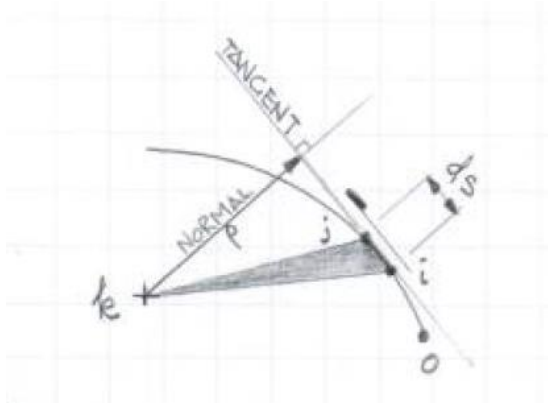
NO	(yi-cy) ²	(yi-cy)*(yj-cy)	(yj-cy) ²	Ixx (mm ⁴)	(xi-cx) ²	(xi-cx)*(xj-cx)	(xj-cx) ²	Iyy (mm ⁴)	(xi-cx)*(yi-cy)	(xj-cx)*(yj-cy)	(xi-cx)*(yj-cy)	(xj-cx)*(yi-cy)	Ixy (mm ⁴)
1	3,63E+06	1,72E+06	8,19E+05	1,23E+10	2,83E+07	2,83E+07	2,83E+07	1,70E+11	-1,01E+07	-4,81E+06	-4,81E+06	-1,01E+07	-7,47E+06
2	8,19E+05	8,19E+05	8,19E+05	2,29E+10	2,83E+07	1,76E+07	1,10E+07	5,31E+11	-4,81E+06	-3,00E+06	-4,81E+06	-3,00E+06	-3,91E+06
3	8,19E+05	8,19E+05	8,19E+05	2,29E+10	1,10E+07	4,37E+06	1,74E+06	1,60E+11	-3,00E+06	-1,19E+06	-3,00E+06	-1,19E+06	-2,10E+06
4	8,19E+05	8,19E+05	8,19E+05	1,43E+10	1,74E+06	8,96E+04	4,62E+03	1,07E+10	-1,19E+06	-6,15E+04	-1,19E+06	-6,15E+04	-6,27E+05
5	8,19E+05	8,19E+05	8,19E+05	2,01E+10	4,62E+03	-1,14E+05	2,83E+06	2,22E+10	-6,15E+04	1,52E+06	-6,15E+04	1,52E+06	7,30E+05
6	8,19E+05	8,19E+05	8,19E+05	1,31E+10	2,83E+06	4,51E+06	7,19E+06	7,75E+10	1,52E+06	2,43E+06	1,52E+06	2,43E+06	1,97E+06
7	3,63E+06	1,72E+06	8,19E+05	4,07E+10	2,83E+06	4,51E+06	7,19E+06	9,59E+10	3,20E+06	2,43E+06	1,52E+06	5,11E+06	2,98E+06
8	3,63E+06	1,72E+06	8,19E+05	2,47E+10	2,83E+06	2,83E+06	2,83E+06	3,40E+10	3,20E+06	1,52E+06	1,52E+06	3,20E+06	2,36E+06
9	3,63E+06	3,63E+06	3,63E+06	8,89E+10	2,83E+06	-1,14E+05	4,62E+03	2,22E+10	3,20E+06	-1,30E+05	3,20E+06	-1,30E+05	1,54E+06
10	3,63E+06	3,63E+06	3,63E+06	6,35E+10	4,62E+03	8,96E+04	1,74E+06	1,07E+10	-1,30E+05	-2,51E+06	-1,30E+05	-2,51E+06	-1,32E+06
11	3,63E+06	3,63E+06	3,63E+06	1,02E+11	1,74E+06	4,37E+06	1,10E+07	1,60E+11	-2,51E+06	-6,32E+06	-2,51E+06	-6,32E+06	-4,42E+06
12	8,19E+05	-1,22E+06	1,81E+06	1,48E+10	7,19E+06	7,19E+06	7,19E+06	2,27E+11	2,43E+06	-3,61E+06	-3,61E+06	2,43E+06	-5,90E+05
13	1,81E+06	4,84E+06	1,29E+07	2,05E+11	7,19E+06	7,19E+06	7,19E+06	2,27E+11	-3,61E+06	-9,64E+06	-9,64E+06	-3,61E+06	-6,62E+06
18	1,29E+07	2,19E+07	3,71E+07	8,40E+11	7,19E+06	7,19E+06	7,19E+06	2,52E+11	-9,64E+06	-1,63E+07	-1,63E+07	-9,64E+06	-1,30E+07
19	3,71E+07	4,32E+07	5,03E+07	6,97E+11	7,19E+06	7,19E+06	7,19E+06	1,15E+11	-1,63E+07	-1,90E+07	-1,90E+07	-1,63E+07	-1,77E+07
24	3,63E+06	1,72E+06	8,19E+05	2,47E+10	1,74E+06	1,74E+06	1,74E+06	2,08E+10	-2,51E+06	-1,19E+06	-1,19E+06	-2,51E+06	-1,85E+06
25	3,63E+06	3,63E+06	3,63E+06	1,02E+11	1,10E+07	1,76E+07	2,83E+07	5,31E+11	-6,32E+06	-1,01E+07	-6,32E+06	-1,01E+07	-8,23E+06
			ΣIxx	2,31E+12			ΣIyy	2,67E+12				ΣIxy	-5,82E+07

Sektörlerin geometrik özellikleri belirlendikten sonra, Çizelge 5.5'te de yer verildiği üzere sektörel alanların hesaplanmasına geçilir. Şekil 5.2'de [12] görüleceği üzere her bir sektör için bir k noktası alınır.



Şekil 5.2: Sektörlere ait keyfi alınan k noktasının koordinatları.

Bu k noktasının sektördeki birim yay uzunluğuna olan dik uzaklığı ise Şekil 5.3'te [12] görüldüğü gibi ρ ile tanımlanır. ρ değeri (5.21) ile (5.27) arasında verilen denklemler aracılığıyla hesaplanır.



Şekil 5.3: k noktasının birim yay elemanına dik uzaklığı ρ ile tanımlanır.

$$A = y_j - y_i \quad (5.21)$$

$$B = x_i - x_j \quad (5.22)$$

$$C = x_i y_j - x_j y_i \quad (5.23)$$

$$Ax + By = C \quad (5.24)$$

$$\rho = \pm \frac{Ax_k + By_k - C}{(\bar{A}^2 + \bar{B}^2)^{1/2}} \quad (5.25)$$

$$L = (\bar{A}^2 + \bar{B}^2)^{1/2} \quad (5.26)$$

$$A_0 = \rho L/2 = \rho ds/2 \quad (5.27)$$

k noktasına göre ikincil sektörel alan (5.28) ile bulunur.

$$w = 2A_0 = \rho ds = \rho L = -\frac{Ax_k + By_k - C}{(\bar{A}^2 + \bar{B}^2)^{1/2}} L \quad (5.28)$$

Denklemde koordinatlar yerine konulursa (5.29) ve (5.30) denklemleri elde edilir.

$$w = -(y_j - y_i)x_k - (x_i - x_j)y_k + x_i y_j - x_j y_i \quad (5.29)$$

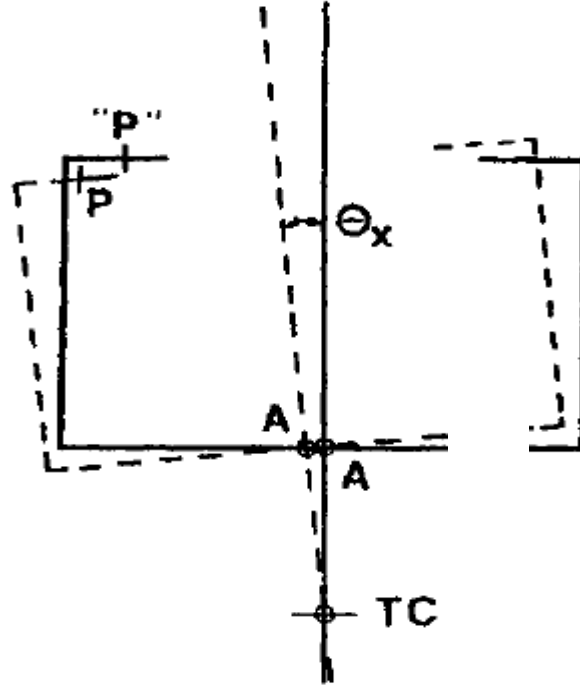
$$w = -L_y x_k - L_x y_k + x_i y_j - x_j y_i \quad (5.30)$$

Burada yer alan k noktası kütle merkezi ya da kayma merkezi olabilir. Öncelikle kütle merkezine göre sektörel alan w hesaplanacaktır.

Çizelge 5.5: Birinci kesitte sektörel alan hesabı.

NO	A	B	C	(A ² +B ²) ^{0,5}	ρ (mm)	ρds (mm ²)
1	1000	0	-1000	1000	-5317	-5,32E+06
2	0	2000	2000	2000	-1906	-3,81E+06
3	0	2000	2000	2000	-1906	-3,81E+06
4	0	1250	1250	1250	-1906	-2,38E+06
5	0	1750	1750	1750	-1906	-3,34E+06
6	0	1000	1000	1000	-1906	-1,91E+06
7	1000	1000	0	1414	-5107	-7,22E+06
8	1000	0	-1000	1000	-5317	-5,32E+06
9	0	-1750	-1750	1750	1906	3,34E+06
10	0	-1250	-1250	1250	1906	2,38E+06
11	0	-2000	-2000	2000	1906	3,81E+06
12	2250	0	-2250	2250	-5317	-1,20E+07
13	2250	0	-2250	2250	-5317	-1,20E+07
18	2500	0	-2500	2500	-5317	-1,33E+07
19	1000	0	-1000	1000	-5317	-5,32E+06
24	1000	0	-1000	1000	-5317	-5,32E+06
25	0	-2000	-2000	2000	1906	3,81E+06

Kütle merkezinin koordinatları belirlenip, kesitin kullanıcı eksenine göre atalet momentleri de hesaplandıktan sonra; birincil eksen ile kullanıcı eksenindeki açı kullanılarak birincil eksene göre atalet momentleri bulunur. Şekil 5.4'te [13] başka örnek bir kesite ait olan açı gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Basit bir profil üzerinde koordinat dönüşümü (temsili).

Birincil eksene göre atalet momentlerini $(I_{x'}, I_{y'})$ hesaplayabilmek için, kullanıcı eksenini ve birincil eksen arasındaki açının belirlenmesi gerekir.

$$Z = \left[\frac{(I_{xx} - I_{yy})^2}{4} + I_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (5.31)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2I_{xy}}{I_{yy} - I_{xx}} \right) \quad (5.32)$$

Açı belirlendikten sonra, kullanıcı eksenini koordinatları, birincil eksene göre dönüştürülür.

$$X_c = x - C_x \quad (5.33)$$

$$Y_c = y - C_y \quad (5.34)$$

$$x' = Y_c \sin \alpha + X_c \cos \alpha \quad (5.35)$$

$$y' = Y_c \cos \alpha - X_c \sin \alpha \quad (5.36)$$

Dönüştürülmüş koordinatlar Çizelge 5.6'da verilmektedir.

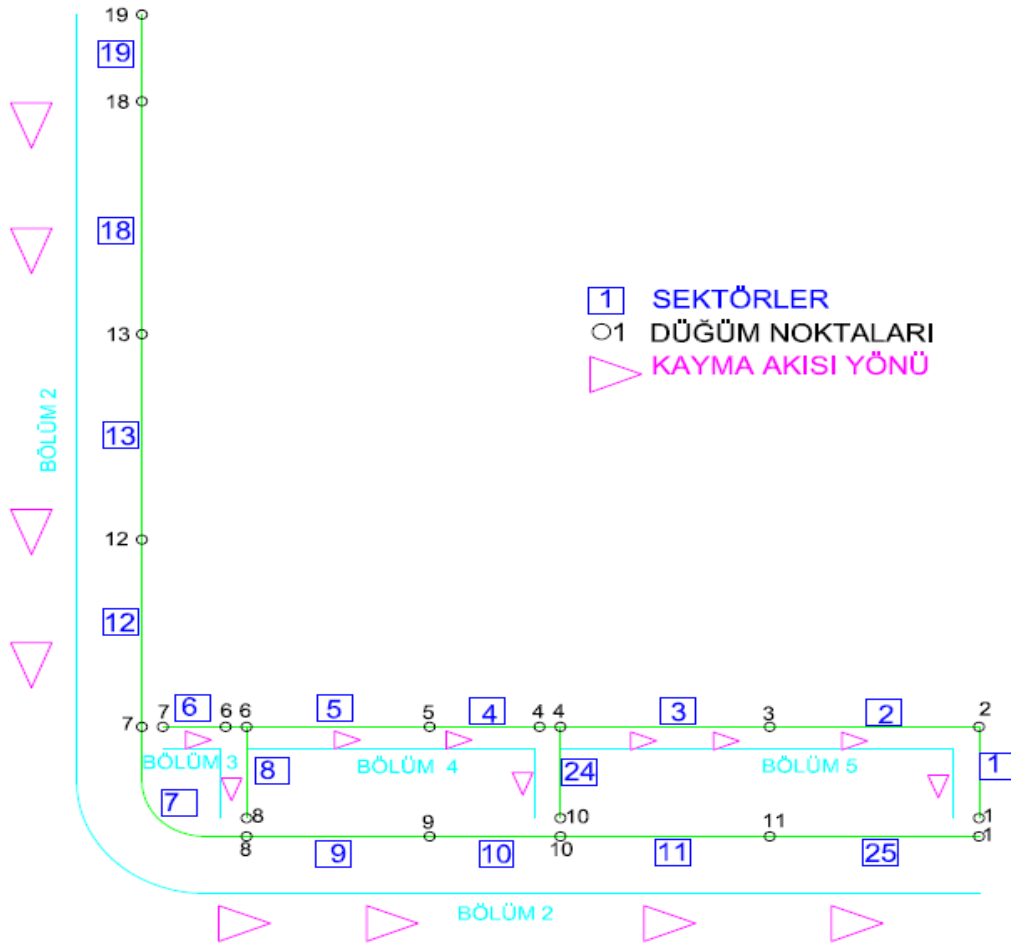
Çizelge 5.6: Birinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre dönüştürülmüş koordinatları.

BİRİNCİL EKSENE GÖRE DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ SEKTÖR KOORDİNATLARI								
NO	xc _i	yc _i	xi'	yi'	xc _j	yc _j	xj'	yj'
1	5318	-1905	5336	-1855	5318	-905	5326	-855
2	5318	-905	5326	-855	3318	-905	3326	-874
3	3318	-905	3326	-874	1318	-905	1326	-893
4	1318	-905	1326	-893	68	-905	76	-904
5	68	-905	76	-904	-1682	-905	-1673	-921
6	-1682	-905	-1673	-921	-2682	-905	-2673	-930
7	-1682	-1905	-1664	-1921	-2682	-905	-2673	-930
8	-1682	-1905	-1664	-1921	-1682	-905	-1673	-921
9	-1682	-1905	-1664	-1921	68	-1905	86	-1904
10	68	-1905	86	-1904	1318	-1905	1336	-1893
11	1318	-1905	1336	-1893	3318	-1905	3336	-1874
12	-2682	-905	-2673	-930	-2682	1345	-2694	1320
13	-2682	1345	-2694	1320	-2682	3595	-2715	3570
18	-2682	3595	-2715	3570	-2682	6095	-2739	6070
19	-2682	6095	-2739	6070	-2682	7095	-2748	7070
24	1318	-1905	1336	-1893	1318	-905	1326	-893
25	3318	-1905	3336	-1874	5318	-1905	5336	-1855

Elde edilen birincil eksen koordinatlarına göre sektörlerin atalet momentleri (5.37) ve (5.38) ile hesaplanır.

$$Ix' = (I_{xx} + I_{yy})/2 + Z = 2,67E + 12 \text{ mm}^4 \quad (5.37)$$

$$Iy' = (I_{xx} + I_{yy})/2 - Z = 2,31E + 12 \text{ mm}^4 \quad (5.38)$$



Şekil 5.5: Birinci kesitteki bölüm, sektör ve düğüm noktaları ile kayma akısı.

Koordinatların dönüştürülmüş değerleri bulunduğundan sonra, kayma merkezinin yeri hesaplanır. Kayma merkezini doğru belirleyebilmek için kayma akısından faydalanılır. Gemi kesitinin kayma akısı yönü kendi içinde bütünlük sağlayacak şekilde tespit edilir. Bu çalışmadaki akı yönleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Kesitte, daha önce belirlenen düğüm noktaları ve sektörler kullanılarak bölümler tanımlanır. Keyfi alınan bir bitiş noktasından başlanıp, bölümler belirlenir. Bölümleri tanımlamada önemli bir nokta da, önce ana hattın belirlenmesi, daha sonra yan hatların belirlenmesidir. Bu çalışmada borda ve devamındaki çift dip ana hat olarak seçilmiş; ana ve ara güverteler ise yandal olarak tanımlanmıştır. Çizelge 5.7'de detayları ile görülen sektörel alan hesabında kullanılan yön sütunu; başlangıç noktası varsayılan kayma akısının yönüne göre sektörün de başlangıç noktası ise pozitifdir. Eğer değilse negatiftir. Ele alınan kesitte, belirlenen kayma akısı yönü, başlangıç noktaları ile aynı doğrultuda olduğundan pozitif olarak alınmıştır. Çizelge 5.8'de de özet tablo yer almaktadır.

Çizelge 5.7: Birinci kesitte kütle merkezine göre sektörel alan hesabı.

BÖLÜM NO	NOKTA			SEKTÖR				Bölüm Başlangıç ρds	BÖLÜM NO	NOKTA			SEKTÖR				Bölüm Başlangıç ρds
	SIRA	NO	Başlangıç Noktası	Yönü	ρds (mm ²)	ρds (yön dahil edilmiş) (mm ²)	SEKTÖREL ALAN W (mm ²)			SIRA	NO	Başlangıç Noktası	Yönü	ρds (mm ²)	ρds (yön dahil edilmiş) (mm ²)	SEKTÖREL ALAN W (mm ²)	
2	1	19	18	1	-5,32E+06	-5,32E+06	0,00E+00	0,00E+00	4	1	6	5	1	-3,34E+06	-3,34E+06	-4,44E+07	-4,44E+07
	2	18	13	1	-1,33E+07	-1,33E+07	-5,32E+06			2	5	4	1	-2,38E+06	-2,38E+06	-4,78E+07	
	3	13	12	1	-1,20E+07	-1,20E+07	-1,86E+07			3	4	10	1	-5,32E+06	-5,32E+06	-5,02E+07	
	4	12	7	1	-1,20E+07	-1,20E+07	-3,06E+07			4	10	-				-5,55E+07	
	5	7	8	1	-7,22E+06	-7,22E+06	-4,25E+07		5	1	4	3	1	-3,81E+06	-3,81E+06	-5,02E+07	-5,02E+07
	6	8	9	1	3,34E+06	3,34E+06	-4,98E+07			2	3	2	1	-3,81E+06	-3,81E+06	-5,40E+07	
	7	9	10	1	2,38E+06	2,38E+06	-4,64E+07			3	2	1	1	-5,32E+06	-5,32E+06	-5,78E+07	
	8	10	11	1	3,81E+06	3,81E+06	-4,40E+07			4	1	-				-6,31E+07	
	9	11	1	1	3,81E+06	3,81E+06	-4,02E+07										
	10	1	-				-3,64E+07										
3	1	7	6	1	-1,91E+06	-1,91E+06	-4,25E+07	-4,25E+07									
	2	6	8	1	-5,32E+06	-5,32E+06	-4,44E+07										
	3	8	-				-4,98E+07										

Çizelge 5.8: Birinci kesitteki sektör verileri için özet tablo.

BAŞLANGIÇ NOKTASI i					BİTİŞ NOKTASI j				BAŞLANGIÇ NOKTASI i					BİTİŞ NOKTASI j			
SEKTÖR NO	NOKTA NO	Wi (mm2)	xi'	yi'	NOKTA NO	Wj (mm2)	xj'	yj'	SEKTÖR NO	NOKTA NO	Wi (mm2)	xi'	yi'	NOKTA NO	Wj (mm2)	xj'	yj'
1	1	-9,95E+07	5336	-1855	2	-5,78E+07	5326	-855	10	9	-4,64E+07	86	-1904	10	-9,95E+07	1336	-1893
2	2	-5,78E+07	5326	-855	3	-5,40E+07	3326	-874	11	10	-9,95E+07	1336	-1893	11	-4,02E+07	3336	-1874
3	3	-5,40E+07	3326	-874	4	-1,00E+08	1326	-893	12	7	-8,51E+07	-2673	-930	12	-3,06E+07	-2694	1320
4	4	-1,00E+08	1326	-893	5	-4,78E+07	76	-904	13	12	-3,06E+07	-2694	1320	13	-1,86E+07	-2715	3570
5	5	-4,78E+07	76	-904	6	-8,89E+07	-1673	-921	18	13	-1,86E+07	-2715	3570	18	-5,32E+06	-2739	6070
6	6	-8,89E+07	-1673	-921	7	-8,51E+07	-2673	-930	19	18	-5,32E+06	-2739	6070	19	0,00E+00	-2748	7070
7	8	-9,95E+07	-1664	-1921	7	-8,51E+07	-2673	-930	24	10	-9,95E+07	1336	-1893	4	-1,00E+08	1326	-893
8	8	-9,95E+07	-1664	-1921	6	-8,89E+07	-1673	-921	25	11	-4,02E+07	3336	-1874	1	-9,95E+07	5336	-1855
9	8	-9,95E+07	-1664	-1921	9	-4,64E+07	86	-1904									

Bu adımda birincil eksenlere göre çarpılma atalet momentleri hesaplanır. Hesap adımları Çizelge 5.9’da görülmektedir. Hesap esnasında kolaylık için (5.38) ve (5.44) arasında yer alan denklemlerde görülen kısaltmalardan faydalanılmıştır.

$$I_{wx} = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^{i=n} (W_i X_i + W_j X_j) b_{ij} t_{ij} + \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{i=n} (W_i X_j + W_j X_i) b_{ij} t_{ij} \quad (5.38)$$

$$XPA = (W_i X_i + W_j X_j) b_{ij} t_{ij} \quad (5.39)$$

$$XPB = (W_i X_j + W_j X_i) b_{ij} t_{ij} \quad (5.40)$$

$$A = b_{ij} t_{ij} \quad (5.41)$$

I_{wx} : Birincil X’ eksenindeki çarpılma atalet momenti

b_{ij} : Sektörün belirtilen eksenindeki uzunluğu

t_{ij} : Sektörün kalınlığı

$$I_{wy} = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^{i=n} (W_i Y_i + W_j Y_j) b_{ij} t_{ij} + \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{i=n} (W_i Y_j + W_j Y_i) b_{ij} t_{ij} \quad (5.42)$$

$$YPA = (W_i Y_i + W_j Y_j) b_{ij} t_{ij} \quad (5.43)$$

$$YPB = (W_i Y_j + W_j Y_i) b_{ij} t_{ij} \quad (5.44)$$

I_{wy} : Birincil Y’ eksenindeki çarpılma atalet momenti

Çarpılma katsayısını hesaplayabilmek için kayma merkezinin bulunması gerekir. Kayma merkezinin yerini hesaplamak için, daha önceki adımlarda belirlenen; kullanıcı eksenine göre atalet momenti, birincil eksene göre çarpılma atalet momenti ve kesitin kütle merkezinin koordinatları kullanılır. Kesitin kütle merkezinden kayma merkezine olan mesafeleri (X_{ref}, Y_{ref}) ve kayma merkezi koordinatları (X_0, Y_0) (5.45) ile (5.55) arasındaki denklemler kullanılarak aşağıda görülen şekilde hesaplanır.

Çizelge 5.9: Birinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre integrasyonları.

SEKTÖR NO	A (mm ²)	X' İNTEGRASYON			Y' İNTEGRASYON		
		XPA	XPB	XPA/3+XPB/6	YPA	YPB	YPA/3+YPB/6
1	6000	-5,03E+15	-5,03E+15	-2,52E+15	1,40E+15	1,15E+15	6,60E+14
2	28000	-1,36E+16	-1,34E+16	-6,79E+15	2,70E+15	2,71E+15	1,35E+15
3	28000	-8,75E+15	-1,13E+16	-4,81E+15	3,83E+15	3,80E+15	1,91E+15
4	17500	-2,39E+15	-1,24E+15	-1,00E+15	2,32E+15	2,33E+15	1,16E+15
5	24500	3,55E+15	1,79E+15	1,48E+15	3,06E+15	3,05E+15	1,53E+15
6	16000	6,02E+15	6,08E+15	3,02E+15	2,58E+15	2,58E+15	1,29E+15
7	19799	7,78E+15	8,07E+15	3,94E+15	5,35E+15	5,07E+15	2,63E+15
8	12000	3,77E+15	3,77E+15	1,89E+15	3,28E+15	3,15E+15	1,62E+15
9	24500	3,96E+15	1,68E+15	1,60E+15	6,85E+15	6,83E+15	3,42E+15
10	17500	-2,40E+15	-1,23E+15	-1,00E+15	4,84E+15	4,85E+15	2,42E+15
11	28000	-7,48E+15	-1,08E+16	-4,29E+15	7,38E+15	7,35E+15	3,69E+15
12	31500	9,76E+15	9,80E+15	4,89E+15	1,22E+15	-2,64E+15	-3,32E+13
13	31500	4,19E+15	4,19E+15	2,09E+15	-3,36E+15	-4,21E+15	-1,82E+15
18	35000	2,28E+15	2,29E+15	1,14E+15	-3,45E+15	-4,62E+15	-1,92E+15
19	16000	2,33E+14	2,34E+14	1,17E+14	-5,16E+14	-6,01E+14	-2,72E+14
24	12000	-3,19E+15	-3,19E+15	-1,60E+15	3,33E+15	3,34E+15	1,67E+15
25	28000	-1,86E+16	-1,53E+16	-8,76E+15	7,28E+15	7,31E+15	3,65E+15
		$\sum I_{wx}$		-1,06E+16	$\sum I_{wy}$		2,29E+16

$$I_{wx} = \sum \left(\frac{XPA}{3} + \frac{XPB}{6} \right) = -1,06E + 16 \text{ mm}^5 \quad (5.45)$$

$$I_{wy} = \sum \left(\frac{YPA}{3} + \frac{YPB}{6} \right) = 2,29E + 16 \text{ mm}^5 \quad (5.46)$$

$$X_{ref} = (I_{xy}I_{wy} - I_{yy}I_{wx}) / I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} \quad (5.47)$$

$$Y_{ref} = (I_{xx}I_{wx} - I_{yy}I_{wy}) / I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} \quad (5.48)$$

$$D_m = I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} = -6,16E + 24 \text{ mm}^8 \quad (5.49)$$

$$X_{ref} = (I_{xy}I_{wy} - I_{yy}I_{wx}) / D_m = -4591 \quad (5.50)$$

$$Y_{ref} = (I_{xx}I_{wx} - I_{yy}I_{wy}) / D_m = 13914 \quad (5.51)$$

$$C_x = -5318 \quad (5.52)$$

$$C_y = 1905 \quad (5.53)$$

$$X_0 = X_{ref} + C_x = -9909 \quad (5.54)$$

$$Y_0 = Y_{ref} + C_y = 15819 \quad (5.55)$$

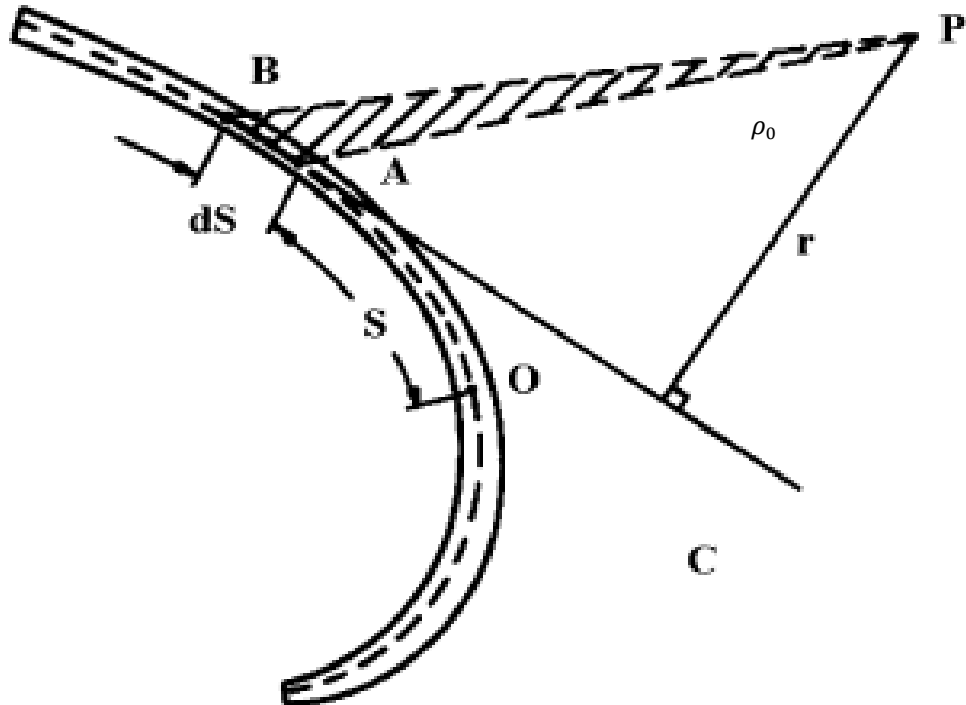
Kayma merkezi koordinatları belirlendikten sonra, kayma merkezine göre sektörel alanlar hesaplanır. Daha önceki aşamalarda yapılan hesaba benzer olarak Çizelge 5.10'daki adımlar izlenir. ρ_0 Şekil 5.6'da görülebileceği üzere kayma merkezinden sektörün teğetine olan dik mesafedir.

$$\rho_0 = -(L_y X_0 - L_x Y_0 - X_i Y_j + X_j Y_i) \quad (5.56)$$

$$W_0 = \int \rho_0 ds \quad (5.57)$$

W_0 : Kayma merkezine göre sektörel alan.

ρ_0 : Kayma merkezinden sektörün teğetine olan dik mesafe.



Şekil 5.6: Birim yay uzunluğuna olan dik mesafe ρ_0 .

Çizelge 5.10: Birinci kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.

NOKTA				SEKTÖR											
BÖLÜM NO	SIRA	NO	BAŞLANGIÇ NOKTASI	YÖNÜ	Ly	Lx	xi	xj	yi	yj	P0	ds (L)	ρ ₀ ds	SEKTÖREL ALAN W0 (mm ²)	BÖLÜM BAŞLANGIÇ PDS
2	1	19	18	1	0	1000	-8000	-8000	8000	9000	7,82E+06	1000	7,82E+09	0,00E+00	0,00E+00
	2	18	13	1	0	2500	-8000	-8000	5500	8000	1,95E+07	2500	4,89E+10	7,82E+09	
	3	13	12	1	0	2250	-8000	-8000	3250	5500	1,76E+07	2250	3,96E+10	5,67E+10	
	4	12	7	1	0	2250	-8000	-8000	1000	3250	1,76E+07	2250	3,96E+10	9,63E+10	
	5	7	8	1	-1000	1000	-7000	-8000	0	1000	-1,09E+06	1414	-1,54E+09	1,36E+11	
	6	8	9	1	1750	0	-7000	-5250	0	0	1,73E+07	1750	3,03E+10	1,34E+11	
	7	9	10	1	1250	0	-5250	-4000	0	0	1,24E+07	1250	1,55E+10	1,65E+11	
	8	10	11	1	2000	0	-4000	-2000	0	0	1,98E+07	2000	3,96E+10	1,80E+11	
	9	11	1	1	2000	0	-2000	0	0	0	1,98E+07	2000	3,96E+10	2,20E+11	
	10	1	-											2,59E+11	
3	1	7	6	1	-1000	0	-7000	-8000	1000	1000	-3,59E+06	1000	-3,59E+09	1,36E+11	1,36E+11
	2	6	8	1	0	1000	-7000	-7000	0	1000	6,91E+06	1000	6,91E+09	1,32E+11	
	3	8	-											1,39E+11	

Çizelge 5.10 (devam) : Birinci kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.

4	1	6	5	1	-1750	0	-5250	-7000	1000	1000	-1,56E+07	1750	-2,73E+10	1,32E+11	1,32E+11
	2	5	4	1	-1250	0	-4000	-5250	1000	1000	-1,11E+07	1250	-1,39E+10	1,05E+11	
	3	4	10	1	0	1000	-4000	-4000	0	1000	-4,00E+06	1000	-4,00E+09	9,11E+10	
	4	10	-											8,71E+10	
5	1	4	3	1	-2000	0	-2000	-4000	1000	1000	2,00E+06	2000	4,00E+09	9,11E+10	9,11E+10
	2	3	2	1	-2000	0	0	-2000	1000	1000	-1,78E+07	2000	-3,56E+10	9,51E+10	
	3	2	1	1	0	1000	0	0	0	1000	1,58E+07	1000	1,58E+10	5,94E+10	
	4	1	-											7,52E+10	

Çarpılmanın kesit etrafındaki dağılımı normalize çarpılma fonksiyonu ile ifade edilir.

$$W_n = \frac{1}{\sum A} \int_0^2 W_0 + ds - W_0 = \frac{1}{\sum A} \left[\sum_1^n \frac{W_{0i} + W_{0j}}{2} (tds) \right] - W_0 = C \quad (5.58)$$

W_n : Normalize birim çarpılma

(5.58) no'lu denklemdeki $\sum_1^n \frac{W_{0i} + W_{0j}}{2} (tds)$ terimi sektörlerin tek bir noktadan değil, iki noktadan oluşmasından kaynaklanır. Her bir sektörün başlangıç ve bitiş noktasındaki sektörel alanlar farklı olduğundan, sektörün bütünü için bahsi geçen terimden elde edilen değer kullanılır. Düğüm noktaları için ise daha önceki adımlarda hesaplanan W_0 değerleri hesaplamada yer alacaktır.

Kayma merkezine göre hesaplanan bu fonksiyonun sektörler için olan değerleri Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.11: Birinci kesitteki normalize birim çarpılma hesabı.

BÖLÜM NO	NOKTA		W_0		tds (A)	$(W_{0i} + W_{0j}) * tds$
	SIRA	NO	W_{0i}	W_{0j}		
1	1	2	3,35E+11	5,94E+10	6000	2,36E+15
2	2	3	5,94E+10	9,51E+10	28000	4,33E+15
3	3	4	9,51E+10	1,82E+11	28000	7,76E+15
4	4	5	1,82E+11	1,05E+11	17500	5,02E+15
5	5	6	1,05E+11	2,65E+11	24500	9,05E+15
6	6	7	2,65E+11	2,72E+11	16000	8,58E+15
7	8	7	2,73E+11	2,72E+11	19799	1,08E+16
8	8	6	2,73E+11	2,65E+11	12000	6,46E+15
9	8	9	2,73E+11	1,65E+11	24500	1,07E+16
10	9	10	1,65E+11	2,67E+11	17500	7,56E+15
11	10	11	2,67E+11	2,20E+11	28000	1,36E+16
12	7	12	2,72E+11	9,63E+10	31500	1,16E+16
13	12	13	9,63E+10	5,67E+10	31500	4,82E+15
18	13	18	5,67E+10	7,82E+09	35000	2,26E+15
19	18	19	7,82E+09	0,00E+00	16000	1,25E+14
24	10	4	2,67E+11	1,82E+11	12000	5,39E+15
25	11	1	2,20E+11	3,35E+11	28000	1,55E+16

Çizelge 5.12: Birinci kesitteki düğüm noktalarına ait normalize çarpılma değerleri.

NOKTA NO	W_0 (mm ²)	c	NORMALİZE ÇARPILMA W_n (mm ²)
1	3,35E+11	1,68E+11	-1,67E+11
2	5,94E+10	1,68E+11	1,08E+11
3	9,51E+10	1,68E+11	7,26E+10
4	1,82E+11	1,68E+11	-1,45E+10
5	1,05E+11	1,68E+11	6,27E+10
6	2,65E+11	1,68E+11	-9,69E+10
7	2,72E+11	1,68E+11	-1,04E+11
8	2,73E+11	1,68E+11	-1,06E+11
9	1,65E+11	1,68E+11	2,97E+09
10	2,67E+11	1,68E+11	-9,96E+10
11	2,20E+11	1,68E+11	-5,21E+10
12	9,63E+10	1,68E+11	7,14E+10
13	5,67E+10	1,68E+11	1,11E+11
18	7,82E+09	1,68E+11	1,60E+11
19	0,00E+00	1,68E+11	1,68E+11

En son aşamada ise kesitin çarpılma sabiti hesaplanır. Çizelge 5.13'te sırasıyla tüm adımları verilen çarpılma katsayısı, normalize çarpılma fonksiyonu aracılığıyla bulunur.

$$C_W = \int_0^2 W_n^2 t ds = \frac{1}{3} \sum_1^n (W_{ni}^2 + W_{ni} W_{nj} + W_{nj}^2) (t ds) \quad (5.59)$$

(5.59) numaralı denklem ile tanımlanan çarpılma sabiti, birinci kesit için sektörlerin başlangıç ve bitiş koordinatlarına göre belirlenen normalize çarpılma fonksiyonlarından faydalanılarak hesaplanır. Burada bahsi geçen t sektörlerin kalınlığıdır. Düğüm noktaları, sektörler ve bölümler ile bunlara ait koordinat bilgileri ise önceki kısımlara göz atıldığında kolayca görülebilir.

Çizelge 5.13: Birinci kesitteki sektörlerin çarpılma katsayıları.

SEKTÖR NO	BAŞLANGIÇ (i)	BİTİŞ (j)	W_{ni}	W_{nj}	$W_{ni2}+W_{ni}*W_{nj}+w_{nj2}$	tds (A)	ÇARPILMA KATSAYISI
1	1	2	-1,67E+11	1,08E+11	2,15E+22	6000	4,31E+25
2	2	3	1,08E+11	7,26E+10	2,48E+22	28000	2,32E+26
3	3	4	7,26E+10	-1,45E+10	4,43E+21	28000	4,13E+25
4	4	5	-1,45E+10	6,27E+10	3,23E+21	17500	1,88E+25
5	5	6	6,27E+10	-9,69E+10	7,24E+21	24500	5,91E+25
6	6	7	-9,69E+10	-1,04E+11	3,03E+22	16000	1,62E+26
7	8	7	-1,06E+11	-1,04E+11	3,31E+22	19799	2,18E+26
8	8	6	-1,06E+11	-9,69E+10	3,08E+22	12000	1,23E+26
9	8	9	-1,06E+11	2,97E+09	1,09E+22	24500	8,90E+25
10	9	10	2,97E+09	-9,96E+10	9,63E+21	17500	5,61E+25
11	10	11	-9,96E+10	-5,21E+10	1,78E+22	28000	1,66E+26
12	7	12	-1,04E+11	7,14E+10	8,50E+21	31500	8,92E+25
13	12	13	7,14E+10	1,11E+11	2,53E+22	31500	2,66E+26
18	13	18	1,11E+11	1,60E+11	5,56E+22	35000	6,48E+26
19	18	19	1,60E+11	1,68E+11	8,04E+22	16000	4,29E+26
24	10	4	-9,96E+10	-1,45E+10	1,16E+22	12000	4,63E+25
25	11	1	-5,21E+10	-1,67E+11	3,93E+22	28000	3,67E+26
KESİT ÇARPILMA KATSAYISI C_w (mm6)							3,05E+27

[illegible]

Şekil 5.7’de ikinci örnek bir konteyner gemisi kesiti yer almaktadır. Bu kesitte de birinci kesitte olduğu gibi öncelikle düğüm noktaları belirlenir. Noktalar arasında kalan bölgelere ise ayrı ayrı sektör numaraları verilmiştir. Kullanıcı eksen, kesitin simetrik yapısından faydalanmak için; çift dibin en alt noktasına ve orta eksene gelecek şekilde seçilmiştir. Çizelge 5.14’de kullanıcı eksenine göre tüm nokta ve sektörlerin koordinatları verilmiştir.

Çizelge 5.14: İkinci kesite ait düğüm noktaları ve sektörlerin kullanıcı koordinatları.

DÜĞÜM NOKTASI (mm)			SEKTÖR (mm)							
KULLANICI EKSENİ KOORDİNATLARI			DÜĞÜM NOKTASI				BAŞLANGIÇ		BİTİŞ	
NO	x	y	NO	i	j	kalınlık (t)	xi	yi	xj	yj
1	0	0	1	1	2	6	0	0	0	1000
2	0	1000	2	2	3	14	0	1000	-2000	1000
3	-2000	1000	3	3	4	14	-2000	1000	-4000	1000
4	-4000	1000	4	4	5	14	-4000	1000	-5250	1000
5	-5250	1000	5	5	6	14	-5250	1000	-7000	1000
6	-7000	1000	6	6	7	16	-7000	1000	-8000	1000
7	-8000	1000	7	8	7	14	-7000	0	-8000	1000
8	-7000	0	8	8	6	12	-7000	0	-7000	1000
9	-5250	0	9	8	9	14	-7000	0	-5250	0
10	-4000	0	10	9	10	14	-5250	0	-4000	0
11	-2000	0	11	10	11	14	-4000	0	-2000	0
12	-8000	3250	12	7	12	14	-8000	1000	-8000	3250
13	-8000	5500	13	12	13	14	-8000	3250	-8000	5500
14	-6000	5500	14	13	14	12	-8000	5500	-6000	5500
15	-4000	5500	15	14	15	12	-6000	5500	-4000	5500
16	-4000	5000	16	15	16	12	-4000	5500	-4000	5000
18	-8000	8000	18	13	18	14	-8000	5500	-8000	8000
19	-8000	9000	19	18	19	16	-8000	8000	-8000	9000
			24	10	4	12	-4000	0	-4000	1000
			25	11	1	14	-2000	0	0	0

Çizelge 5.15: İkinci kesitteki sektörlerin özellikleri.

NO	SEKTÖR ÖZELLİKLERİ							
	Lx (mm)	Ly (mm)	L (mm)	A (mm ²)	Xc	Yc	Ax (mm ²)	Ay (mm ²)
1	0	1000	1000	6000	0	500	0,00E+00	3,00E+06
2	-2000	0	2000	28000	-1000	1000	-2,80E+07	2,80E+07
3	-2000	0	2000	28000	-3000	1000	-8,40E+07	2,80E+07
4	-1250	0	1250	17500	-4625	1000	-8,09E+07	1,75E+07
5	-1750	0	1750	24500	-6125	1000	-1,50E+08	2,45E+07
6	-1000	0	1000	16000	-7500	1000	-1,20E+08	1,60E+07
7	-1000	1000	1414	19799	-7500	500	-1,48E+08	9,90E+06
8	0	1000	1000	12000	-7000	500	-8,40E+07	6,00E+06
9	1750	0	1750	24500	-6125	0	-1,50E+08	0,00E+00
10	1250	0	1250	17500	-4625	0	-8,09E+07	0,00E+00
11	2000	0	2000	28000	-3000	0	-8,40E+07	0,00E+00
12	0	2250	2250	31500	-8000	2125	-2,52E+08	6,69E+07
13	0	2250	2250	31500	-8000	4375	-2,52E+08	1,38E+08
14	2000	0	2000	24000	-7000	5500	-1,68E+08	1,32E+08
15	2000	0	2000	24000	-5000	5500	-1,20E+08	1,32E+08
16	0	-500	500	6000	-4000	5250	-2,40E+07	3,15E+07
18	0	2500	2500	35000	-8000	6750	-2,80E+08	2,36E+08
19	0	1000	1000	16000	-8000	8500	-1,28E+08	1,36E+08
24	0	1000	1000	12000	-4000	500	-4,80E+07	6,00E+06
25	2000	0	2000	28000	-1000	0	-2,80E+07	0,00E+00

Çizelge 5.15'te görülen değerlere göre toplam alanlar (5.60), (5.61) ve (5.62) ile hesaplanır.

$$SA = \sum[A] = 429799 \text{ mm}^2 \quad (5.60)$$

$$SA_x = \sum[A_x] = -2310492424 \text{ mm}^2 \quad (5.61)$$

$$SA_y = \sum[A_y] = 1011399495 \text{ mm}^2 \quad (5.62)$$

Kütle merkezi koordinatları (c_x, c_y) ise (5.12) ve (5.13) 'ten bulunur.

$$c_x = [SA_x]/[SA] = -5376 \quad (5.63)$$

$$c_y = [SA_y]/[SA] = 2353 \quad (5.64)$$

Kütle merkezinin koordinatları belirlendikten sonra, kullanıcı eksenine göre kesitin atalet momenti hesaplanır. Birinci kesit için hesaplamalar yapılırken, bölüm 5.1'de verilmiş olan (5.14) ile (5.20) denklemleri kullanılır. (5.14) denklemi ile kullanıcım belirlemiş olduğu x eksenine göre atalet momenti; (5.15) denklemi ile yine kullanıcım belirlemiş olduğu y eksenine göre atalet momenti hesaplanır. Benzer adımlar izlenerek de (5.16) denklemi yardımıyla çarpım atalet momenti belirlenir.

Bu adımlar detaylı olarak Çizelge 5.16'da görülebilir. Hesaplama adımlarında dikkat edilmesi gereken bir husus da sektörler için başlangıç ve bitiş noktalarının düzenli bir şekilde sıralanarak koordinat bilgilerinin doğru girilmesidir. Sektörlere ait bilgilerin kontrolü sağlandıktan sonra kullanıcı eksenine göre atalet momentleri de hesaplanır.

Kesite ait atalet momentleri hesaplandıktan sonra sektörel alan hesabına geçilir. Sektörlere ait geometrik özellikler belirlendiği için, Çizelge 5.17'de yer alan sektörel alanlar kolayca hesaplanır. Birinci kesit için de yapıldığı gibi, ikinci kesit için de kullanıcı eksen ve birincil eksen arasındaki açı belirlenir. Bir sonraki adım ise Çizelge 5.18'de görüldüğü gibi kullanıcı eksen koordinatlarının, birincil eksene göre dönüştürülmesidir.

Çizelge 5.16: İkinci kesitteki sektörlerin eksenlere göre atalet momentleri.

SEKTÖR ÖZELLİKLERİ													
NO	(yi-cy) ²	(yi-cy)*(yj-cy)	(yj-cy) ²	Ixx (mm ⁴)	(xi-cx) ²	(xi-cx)*(xj-cx)	(xj-cx) ²	Iyy (mm ⁴)	(xi-cx)*(yi-cy)	(xj-cx)*(yj-cy)	(xi-cx)*(yj-cy)	(xj-cx)*(yi-cy)	Ixy (mm ⁴)
1	5,54E+06	3,18E+06	1,83E+06	2,11E+10	2,89E+07	2,89E+07	2,89E+07	1,73E+11	-1,27E+07	-7,27E+06	-7,27E+06	-1,27E+07	-9,96E+06
2	1,83E+06	1,83E+06	1,83E+06	5,13E+10	2,89E+07	1,81E+07	1,14E+07	5,45E+11	-7,27E+06	-4,57E+06	-7,27E+06	-4,57E+06	-5,92E+06
3	1,83E+06	1,83E+06	1,83E+06	5,13E+10	1,14E+07	4,64E+06	1,89E+06	1,67E+11	-4,57E+06	-1,86E+06	-4,57E+06	-1,86E+06	-3,21E+06
4	1,83E+06	1,83E+06	1,83E+06	3,20E+10	1,89E+06	1,73E+05	1,58E+04	1,21E+10	-1,86E+06	-1,70E+05	-1,86E+06	-1,70E+05	-1,02E+06
5	1,83E+06	1,83E+06	1,83E+06	4,49E+10	1,58E+04	-2,04E+05	2,64E+06	2,00E+10	-1,70E+05	2,20E+06	-1,70E+05	2,20E+06	1,01E+06
6	1,83E+06	1,83E+06	1,83E+06	2,93E+10	2,64E+06	4,26E+06	6,89E+06	7,35E+10	2,20E+06	3,55E+06	2,20E+06	3,55E+06	2,87E+06
7	5,54E+06	3,18E+06	1,83E+06	6,96E+10	2,64E+06	4,26E+06	6,89E+06	9,10E+10	3,82E+06	3,55E+06	2,20E+06	6,18E+06	3,85E+06
8	5,54E+06	3,18E+06	1,83E+06	4,22E+10	2,64E+06	2,64E+06	2,64E+06	3,17E+10	3,82E+06	2,20E+06	2,20E+06	3,82E+06	3,01E+06
9	5,54E+06	5,54E+06	5,54E+06	1,36E+11	2,64E+06	-2,04E+05	1,58E+04	2,00E+10	3,82E+06	-2,96E+05	3,82E+06	-2,96E+05	1,76E+06
10	5,54E+06	5,54E+06	5,54E+06	9,69E+10	1,58E+04	1,73E+05	1,89E+06	1,21E+10	-2,96E+05	-3,24E+06	-2,96E+05	-3,24E+06	-1,77E+06
11	5,54E+06	5,54E+06	5,54E+06	1,55E+11	1,89E+06	4,64E+06	1,14E+07	1,67E+11	-3,24E+06	-7,94E+06	-3,24E+06	-7,94E+06	-5,59E+06
12	1,83E+06	-1,21E+06	8,04E+05	1,49E+10	6,89E+06	6,89E+06	6,89E+06	2,17E+11	3,55E+06	-2,35E+06	-2,35E+06	3,55E+06	5,99E+05
13	8,04E+05	2,82E+06	9,90E+06	1,42E+11	6,89E+06	6,89E+06	6,89E+06	2,17E+11	-2,35E+06	-8,26E+06	-8,26E+06	-2,35E+06	-5,31E+06
14	9,90E+06	9,90E+06	9,90E+06	2,38E+11	6,89E+06	1,64E+06	3,90E+05	7,13E+10	-8,26E+06	-1,96E+06	-8,26E+06	-1,96E+06	-5,11E+06
15	9,90E+06	9,90E+06	9,90E+06	2,38E+11	3,90E+05	-8,59E+05	1,89E+06	1,14E+10	-1,96E+06	4,33E+06	-1,96E+06	4,33E+06	1,18E+06
16	9,90E+06	8,33E+06	7,01E+06	5,05E+10	1,89E+06	1,89E+06	1,89E+06	1,14E+10	4,33E+06	3,64E+06	3,64E+06	4,33E+06	3,99E+06
18	9,90E+06	1,78E+07	3,19E+07	6,95E+11	6,89E+06	6,89E+06	6,89E+06	2,41E+11	-8,26E+06	-1,48E+07	-1,48E+07	-8,26E+06	-1,15E+07
19	3,19E+07	3,75E+07	4,42E+07	6,06E+11	6,89E+06	6,89E+06	6,89E+06	1,10E+11	-1,48E+07	-1,74E+07	-1,74E+07	-1,48E+07	-1,61E+07
24	5,54E+06	3,18E+06	1,83E+06	4,22E+10	1,89E+06	1,89E+06	1,89E+06	2,27E+10	-3,24E+06	-1,86E+06	-1,86E+06	-3,24E+06	-2,55E+06
25	5,54E+06	5,54E+06	5,54E+06	1,55E+11	1,14E+07	1,81E+07	2,89E+07	5,45E+11	-7,94E+06	-1,27E+07	-7,94E+06	-1,27E+07	-1,03E+07
			ΣIxx	2,91E+12			ΣIyy	2,76E+12				ΣIxy	-6,01E+07

Çizelge 5.17: İkinci kesitte sektörel alan hesabı.

NO	A	B	C	$(A^2+B^2)^{0,5}$	ρ (mm)	ρds (mm ²)
1	1000	0	-1000	1000	-5375	-5,37E+06
2	0	2000	2000	2000	-2354	-4,71E+06
3	0	2000	2000	2000	-2354	-4,71E+06
4	0	1250	1250	1250	-2354	-2,94E+06
5	0	1750	1750	1750	-2354	-4,12E+06
6	0	1000	1000	1000	-2354	-2,35E+06
7	1000	1000	0	1414	-5465	-7,73E+06
8	1000	0	-1000	1000	-5375	-5,37E+06
9	0	-1750	-1750	1750	2354	4,12E+06
10	0	-1250	-1250	1250	2354	2,94E+06
11	0	-2000	-2000	2000	2354	4,71E+06
12	2250	0	-2250	2250	-5375	-1,21E+07
13	2250	0	-2250	2250	-5375	-1,21E+07
14	0	-2000	-2000	2000	2354	4,71E+06
15	0	-2000	-2000	2000	2354	4,71E+06
16	-500	0	500	500	5375	2,69E+06
18	2500	0	-2500	2500	-5375	-1,34E+07
19	1000	0	-1000	1000	-5375	-5,37E+06
24	1000	0	-1000	1000	-5375	-5,37E+06
25	0	-2000	-2000	2000	2354	4,71E+06

Çizelge 5.18: İkinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre dönüştürülmüş koordinatları.

BİRİNCİL EKSENE GÖRE DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ SEKTÖR KOORDİNATLARI								
NO	xc _i	yc _i	xi'	yi'	xc _j	yc _j	xj'	yj'
1	5376	-2353	5320	-2477	5376	-1353	5343	-1477
2	5376	-1353	5343	-1477	3376	-1353	3344	-1431
3	3376	-1353	3344	-1431	1376	-1353	1344	-1385
4	1376	-1353	1344	-1385	126	-1353	94	-1356
5	126	-1353	94	-1356	-1624	-1353	-1655	-1315
6	-1624	-1353	-1655	-1315	-2624	-1353	-2655	-1292
7	-1624	-2353	-1678	-2315	-2624	-1353	-2655	-1292
8	-1624	-2353	-1678	-2315	-1624	-1353	-1655	-1315
9	-1624	-2353	-1678	-2315	126	-2353	71	-2355
10	126	-2353	71	-2355	1376	-2353	1321	-2384
11	1376	-2353	1321	-2384	3376	-2353	3320	-2431
12	-2624	-1353	-2655	-1292	-2624	897	-2603	957
13	-2624	897	-2603	957	-2624	3147	-2551	3207
14	-2624	3147	-2551	3207	-624	3147	-551	3160

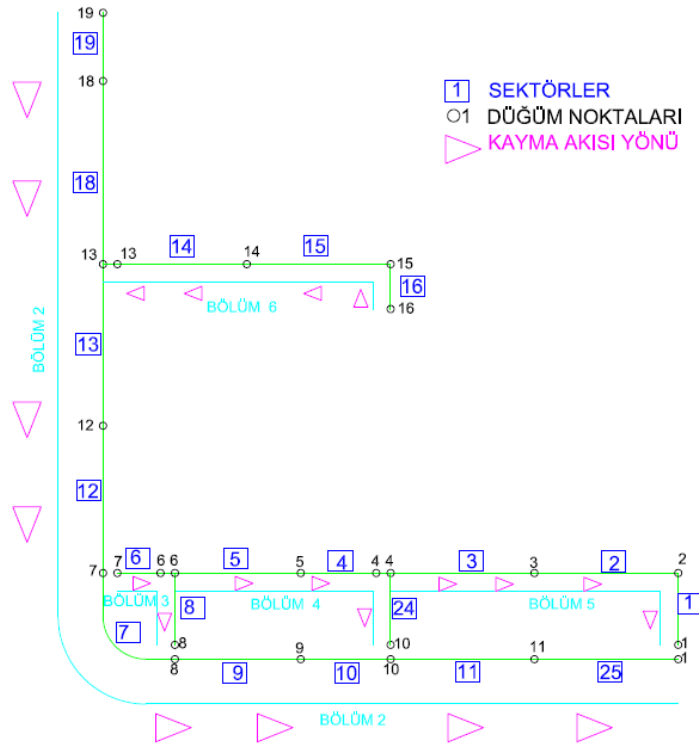
Çizelge 5.18 (devam): İkinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre dönüştürülmüş koordinatları.

16	1376	3147	1448	3114	1376	2647	1437	2614
18	-2624	3147	-2551	3207	-2624	5647	-2493	5706
19	-2624	5647	-2493	5706	-2624	6647	-2470	6706
24	1376	-2353	1321	-2384	1376	-1353	1344	-1385
25	3376	-2353	3320	-2431	5376	-2353	5320	-2477

Birinci kesitte de olduğu gibi, elde edilen birincil eksen koordinatlarına göre sektörlerin atalet momentleri (5.65) ve (5.66) ile hesaplanır.

$$Ix' = (I_{xx} + I_{yy})/2 + Z = 2,91E + 12 \text{ mm}^4 \quad (5.65)$$

$$Iy' = (I_{xx} + I_{yy})/2 - Z = 2,76E + 12 \text{ mm}^4 \quad (5.66)$$



Şekil 5.8: İkinci kesitteki bölüm, sektör ve düğüm noktaları ile kayma akısı.

İkinci kesitteki akı yönleri Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Kesitte, daha önce belirlenen düğüm noktaları ve sektörler kullanılarak bölümler tanımlanır. Çizelge 5.19’da sektörel alan hesabı; Çizelge 5.20’de ise özet tablo yer almaktadır.

Çizelge 5.19: İkinci kesitte kütle merkezine göre sektörel alan hesabı.

NOKTA									SEKTÖR								
BÖLÜM NO	SIRA	NO	Başlangıç Noktası	Yönü	ρds (mm ²)	ρds (yön dahil edilmiş) (mm ²)	SEKTÖREL ALAN W (mm ²)	Bölüm Başlangıç ρds	BÖLÜM NO	SIRA	NO	Başlangıç Noktası	Yönü	ρds (mm ²)	ρds (yön dahil edilmiş) (mm ²)	SEKTÖREL ALAN W (mm ²)	Bölüm Başlangıç ρds
2	1	19	18	1	-5,37E+06	-5,37E+06	0,00E+00	0,00E+00	4	1	6	5	1	-4,12E+06	-4,12E+06	-4,54E+07	-4,54E+07
	2	18	13	1	-1,34E+07	-1,34E+07	-5,37E+06			2	5	4	1	-2,94E+06	-2,94E+06	-4,95E+07	
	3	13	12	1	-1,21E+07	-1,21E+07	-1,88E+07			3	4	10	1	-5,37E+06	-5,37E+06	-5,24E+07	
	4	12	7	1	-1,21E+07	-1,21E+07	-3,09E+07			4	10	-				-5,78E+07	
	5	7	8	1	-7,73E+06	-7,73E+06	-4,30E+07		5	1	4	3	1	-4,71E+06	-4,71E+06	-5,24E+07	-5,24E+07
	6	8	9	1	4,12E+06	4,12E+06	-5,07E+07			2	3	2	1	-4,71E+06	-4,71E+06	-5,71E+07	
	7	9	10	1	2,94E+06	2,94E+06	-4,66E+07			3	2	1	1	-5,37E+06	-5,37E+06	-6,18E+07	
	8	10	11	1	4,71E+06	4,71E+06	-4,37E+07			4	1	-				-6,72E+07	
	9	11	1	1	4,71E+06	4,71E+06	-3,90E+07		6	1	16	15	1	2,69E+06	2,69E+06	0,00E+00	0,00E+00
	10	1	-				-3,42E+07			2	15	14	1	4,71E+06	4,71E+06	2,69E+06	
3	1	7	6	1	-2,35E+06	-2,35E+06	-4,30E+07	-4,30E+07	3	14	13	1	1	4,71E+06	4,71E+06	7,40E+06	
	2	6	8	1	-5,37E+06	-5,37E+06	-4,54E+07			4	13	-				1,21E+07	
	3	8	-				-5,07E+07										

Çizelge 5.20: İkinci kesitteki sektör verileri için özet tablo.

BAŞLANGIÇ NOKTASI i					BİTİŞ NOKTASI j				BAŞLANGIÇ NOKTASI i					BİTİŞ NOKTASI j			
SEKTÖR NO	NOKTA NO	Wi (mm2)	xi'	yi'	NOKTA NO	Wj (mm2)	xj'	yj'	SEKTÖR NO	NOKTA NO	Wi (mm2)	xi'	yi'	NOKTA NO	Wj (mm2)	xj'	yj'
1	1	-1,01E+08	5320	-2477	2	-6,18E+07	5376	-1477	11	10	-1,01E+08	1321	-2384	11	-3,90E+07	3376	-2431
2	2	-6,18E+07	5343	-1477	3	-5,71E+07	3376	-1431	12	7	-8,60E+07	-2655	-1292	12	-3,09E+07	-2624	957
3	3	-5,71E+07	3344	-1431	4	-1,05E+08	1376	-1385	13	12	-3,09E+07	-2603	957	13	-6,71E+06	-2624	3207
4	4	-1,05E+08	1344	-1385	5	-4,95E+07	126	-1356	14	13	-6,71E+06	-2551	3207	14	7,40E+06	-624	3160
5	5	-4,95E+07	94	-1356	6	-9,07E+07	-1624	-1315	15	14	7,40E+06	-551	3160	15	2,69E+06	1376	3114
6	6	-9,07E+07	-1655	-1315	7	-8,60E+07	-2624	-1292	16	15	2,69E+06	1448	3114	16	0,00E+00	1376	2614
7	8	-1,01E+08	-1678	-2315	7	-8,60E+07	-2624	-1292	18	13	-6,71E+06	-2551	3207	18	-5,37E+06	-2624	5706
8	8	-1,01E+08	-1678	-2315	6	-9,07E+07	-1624	-1315	19	18	-5,37E+06	-2493	5706	19	0,00E+00	-2624	6706
9	8	-1,01E+08	-1678	-2315	9	-4,66E+07	126	-2355	24	10	-1,01E+08	1321	-2384	4	-1,05E+08	1376	-1385
10	9	-4,66E+07	71	-2355	10	-1,01E+08	1376	-2384	25	11	-3,90E+07	3320	-2431	1	-1,01E+08	5376	-2477

Çizelge 5.21’de birincil eksene göre hesaplanan çarpılma atalet momentleri yer almaktadır.

Çizelge 5.21: İkinci kesitteki sektörlerin birincil eksene göre integrasyonları.

SEKTÖR NO	A (mm ²)	X' İNTEGRASYON			Y' İNTEGRASYON		
		XPA	XPB	XPA/3+XPB/6	YPA	YPB	YPA/3+YPB/6
1	6000	-5,23E+15	-5,25E+15	-2,62E+15	2,06E+15	1,82E+15	9,88E+14
2	28000	-1,46E+16	-1,44E+16	-7,28E+15	4,85E+15	4,84E+15	2,42E+15
3	28000	-9,39E+15	-1,20E+16	-5,13E+15	6,35E+15	6,42E+15	3,19E+15
4	17500	-2,57E+15	-1,39E+15	-1,09E+15	3,71E+15	3,69E+15	1,85E+15
5	24500	3,50E+15	1,76E+15	1,46E+15	4,57E+15	4,61E+15	2,29E+15
6	16000	6,01E+15	6,09E+15	3,02E+15	3,69E+15	3,68E+15	1,84E+15
7	19799	7,84E+15	8,13E+15	3,97E+15	6,85E+15	6,54E+15	3,37E+15
8	12000	3,81E+15	3,80E+15	1,90E+15	4,25E+15	4,12E+15	2,10E+15
9	24500	4,03E+15	1,60E+15	1,61E+15	8,44E+15	8,50E+15	4,23E+15
10	17500	-2,50E+15	-1,25E+15	-1,04E+15	6,15E+15	6,13E+15	3,07E+15
11	28000	-7,43E+15	-1,10E+16	-4,32E+15	9,42E+15	9,51E+15	4,73E+15
12	31500	9,75E+15	9,69E+15	4,86E+15	2,57E+15	-1,34E+15	6,33E+14
13	31500	3,09E+15	3,10E+15	1,55E+15	-1,61E+15	-3,32E+15	-1,09E+15
14	24000	3,00E+14	-3,52E+14	4,12E+13	4,47E+13	6,04E+13	2,50E+13
15	24000	-9,10E+12	2,09E+14	3,17E+13	7,62E+14	7,57E+14	3,80E+14
16	6000	2,34E+13	2,22E+13	1,15E+13	5,02E+13	4,22E+13	2,38E+13
18	35000	1,09E+15	1,10E+15	5,47E+14	-1,83E+15	-1,94E+15	-9,33E+14
19	16000	2,14E+14	2,26E+14	1,09E+14	-4,91E+14	-5,77E+14	-2,60E+14
24	12000	-3,34E+15	-3,34E+15	-1,67E+15	4,64E+15	4,69E+15	2,33E+15
25	28000	-1,89E+16	-1,53E+16	-8,85E+15	9,69E+15	9,61E+15	4,83E+15
			$\sum I_{wx}$	-1,29E+16		$\sum I_{wy}$	3,60E+16

Daha önce birinci kesit için hesaplanan kullanıcı eksenine göre atalet momentleri, kesitin kütle merkezinden kayma merkezine olan mesafeleri (X_{ref}, Y_{ref}) ve kayma merkezi koordinatları (X_0, Y_0) ikinci kesit için aynı şekilde (5.67) ile (5.75) arasındaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$I_{wx} = \sum \left(\frac{XPA}{3} + \frac{XPB}{6} \right) = -1,29E + 16 \text{ mm}^5 \quad (5.67)$$

$$I_{wy} = \sum \left(\frac{YPA}{3} + \frac{YPB}{6} \right) = -3,60E + 16 \text{ mm}^5 \quad (5.68)$$

$$X_{ref} = (I_{xy}I_{wy} - I_{yy}I_{wx})/I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} \quad (5.47)$$

$$Y_{ref} = (I_{xx}I_{wx} - I_{yy}I_{wy})/I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} \quad (5.48)$$

$$D_m = I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} = -8,04E + 24 \text{ mm}^8 \quad (5.69)$$

$$X_{ref} = (I_{xy}I_{wy} - I_{yy}I_{wx})/D_m = -4427 \quad (5.70)$$

$$Y_{ref} = (I_{xx}I_{wx} - I_{yy}I_{wy})/D_m = 17046 \quad (5.71)$$

$$C_x = -5376 \quad (5.72)$$

$$C_y = 2353 \quad (5.73)$$

$$X_0 = X_{ref} + C_x = -9803 \quad (5.74)$$

$$Y_0 = Y_{ref} + C_y = 19400 \quad (5.75)$$

Birinci kesit için belirlenen yol izlenerek; ikinci kesitin de kayma merkezi koordinatları belirlenir ve kayma merkezine göre sektörel alanlar hesaplanır. Daha önceki aşamalarda yapılan hesaba benzer olarak Çizelge 5.22’de yer alan sıralama ile sektörel alan hesaplamasına devam edilir. Bölüm 5.1’de kayma merkezinden sektörün teğetine olan dik mesafe olarak tanımlanan ρ_0 değeri; (5.57) denklemiyle ikinci kesite ait sektörler için çözülür. Daha sonraki adımda ise (5.58) denklemi ile verildiği üzere ikinci kesit için kayma merkezine göre sektörel alanlar W_0 hesaplanır.

Çizelge 5.22: İkinci kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.

BÖLÜM NO	NOKTA		SEKTÖR											SEKTÖREL ALAN W0 (mm2)	BÖLÜM BAŞLANGIÇ ρ_{ds}
	SIRA	NO	Başlangıç Noktası	Yönü	Ly	Lx	xi	xj	yi	yj	P0	ds (L)	ρ_{ds}		
2	1	19	18	1	1000	0	-8000	-8000	8000	9000	1,80E+06	1,00E+03	1,80E+09	0,00E+00	0,00E+00
	2	18	13	1	2500	0	-8000	-8000	5500	8000	4,51E+06	2,50E+03	1,13E+10	1,80E+09	
	3	13	12	1	2250	0	-8000	-8000	3250	5500	4,06E+06	2,25E+03	9,13E+09	1,31E+10	
	4	12	7	1	2250	0	-8000	-8000	1000	3250	4,06E+06	2,25E+03	9,13E+09	2,22E+10	
	5	7	8	1	1000	-1000	-7000	-8000	0	1000	-1,66E+07	1,41E+03	-2,35E+10	3,13E+10	
	6	8	9	1	0	1750	-7000	-5250	0	0	3,39E+07	1,75E+03	5,94E+10	7,86E+09	
	7	9	10	1	0	1250	-5250	-4000	0	0	2,42E+07	1,25E+03	3,03E+10	6,73E+10	
	8	10	11	1	0	2000	-4000	-2000	0	0	3,88E+07	2,00E+03	7,76E+10	9,76E+10	
	9	11	1	1	0	2000	-2000	0	0	0	3,88E+07	2,00E+03	7,76E+10	1,75E+11	
	10	1	-											2,53E+11	
3	1	7	6	1	0	-1000	-7000	-8000	1000	1000	-1,84E+07	1,00E+03	-1,84E+10	3,13E+10	3,13E+10
	2	6	8	1	1000	0	-7000	-7000	0	1000	2,80E+06	1,00E+03	2,80E+09	1,29E+10	
	3	8	-											1,57E+10	
4	1	6	5	1	0	-1750	-5250	-7000	1000	1000	-3,22E+07	1,75E+03	-5,63E+10	1,29E+10	1,29E+10
	2	5	4	1	0	-1250	-4000	-5250	1000	1000	-2,30E+07	1,25E+03	-2,87E+10	-4,34E+10	
	3	4	10	1	1000	0	-4000	-4000	0	1000	-4,00E+06	1,00E+03	-4,00E+09	-7,22E+10	
	4	10	-											-7,62E+10	

Çizelge 5.22 (devam) : İkinci kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.

5	1	4	3	1	0	-2000	-2000	-4000	1000	1000	2,00E+06	2,00E+03	4,00E+09	-7,22E+10	-7,22E+10
	2	3	2	1	0	-2000	0	-2000	1000	1000	-3,68E+07	2,00E+03	-7,36E+10	-6,82E+10	
	3	2	1	1	1000	0	0	0	0	1000	9,80E+06	1,00E+03	9,80E+09	-1,42E+11	
	4	1	-											-1,32E+11	
6	1	16	15	1	-500	0	-4000	-4000	5500	5000	-2,90E+06	5,00E+02	-1,45E+09	0,00E+00	0,00E+00
	2	15	14	1	0	2000	-6000	-4000	5500	5500	2,78E+07	2,00E+03	5,56E+10	-1,45E+09	
	3	14	13	1	0	2000	-8000	-6000	5500	5500	2,78E+07	2,00E+03	5,56E+10	5,41E+10	
	4	13	-											1,10E+11	

Çizelge 5.23: İkinci kesitteki normalize birim çarpılma hesabı.

BÖLÜM NO	NOKTA		W_0		tds (A)	$(W_{0i}+W_{0j}) \cdot tds$
	SIRA	NO	W_{0i}	W_{0j}		
1	1	2	1,21E+11	-1,42E+11	6000	-1,26E+14
2	2	3	-1,42E+11	-6,82E+10	28000	-5,88E+15
3	3	4	-6,82E+10	-1,44E+11	28000	-5,95E+15
4	4	5	-1,44E+11	-4,34E+10	17500	-3,29E+15
5	5	6	-4,34E+10	2,59E+10	24500	-4,30E+14
6	6	7	2,59E+10	6,27E+10	16000	1,42E+15
7	8	7	2,36E+10	6,27E+10	19799	1,71E+15
8	8	6	2,36E+10	2,59E+10	12000	5,93E+14
9	8	9	2,36E+10	6,73E+10	24500	2,23E+15
10	9	10	6,73E+10	2,14E+10	17500	1,55E+15
11	10	11	2,14E+10	1,75E+11	28000	5,50E+15
12	7	12	6,27E+10	2,22E+10	31500	2,67E+15
13	12	13	2,22E+10	1,23E+11	31500	4,57E+15
14	13	14	1,23E+11	5,41E+10	24000	4,25E+15
15	14	15	5,41E+10	-1,45E+09	24000	1,26E+15
16	15	16	-1,45E+09	0,00E+00	6000	-8,70E+12
18	13	18	1,23E+11	1,80E+09	35000	4,36E+15
19	18	19	1,80E+09	0,00E+00	16000	2,89E+13
24	10	4	2,14E+10	-1,44E+11	12000	-1,48E+15
25	11	1	1,75E+11	1,21E+11	28000	8,29E+15

Daha önce birinci kesitte de bahsedildiği gibi, her bir sektörün başlangıç ve bitiş noktasındaki sektörel alanlar farklı olduğundan, sektörün bütünü için bahsi geçen terimden elde edilen değer kullanılır. Düğüm noktaları için ise daha önceki adımlarda hesaplanan W_0 değerleri hesaplamada yer alacaktır.

Kayma merkezine göre hesaplanan W_0 fonksiyonun sektörler için olan değerleri Çizelge 5.23 ve Çizelge 5.24'te gösterilmiştir.

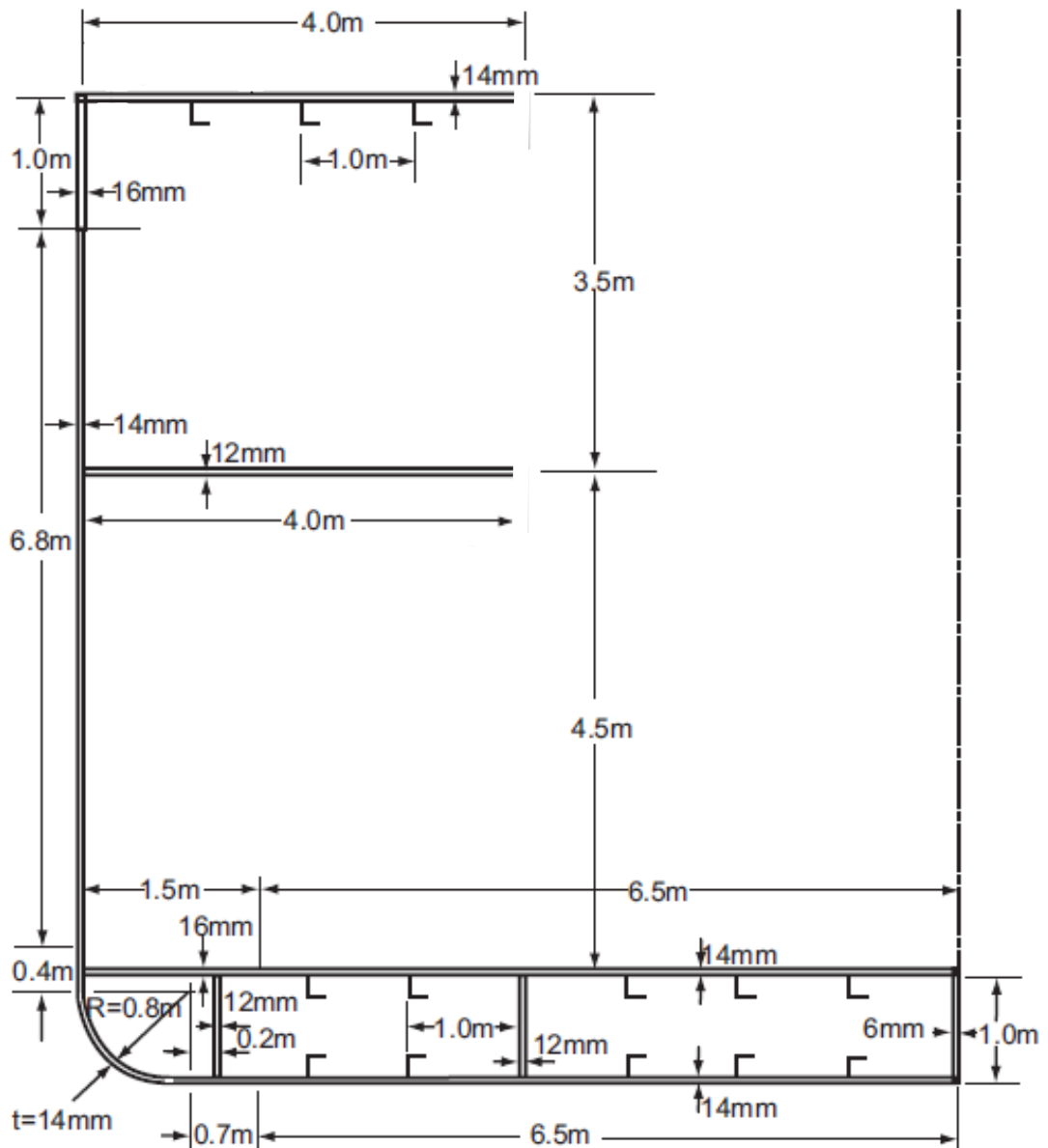
Çizelge 5.24: İkinci kesitteki düğüm noktalarına ait normalize çarpılma değerleri.

NOKTA NO	W_0 (mm ²)	c	NORMALİZE ÇARPILMA W_n (mm ²)
1	1,21E+11	2,48E+10	-9,61E+10
2	-1,42E+11	2,48E+10	1,67E+11
3	-6,82E+10	2,48E+10	9,29E+10
4	-1,44E+11	2,48E+10	1,69E+11
5	-4,34E+10	2,48E+10	6,82E+10
6	2,59E+10	2,48E+10	-1,11E+09
7	6,27E+10	2,48E+10	-3,79E+10
8	2,36E+10	2,48E+10	1,16E+09
9	6,73E+10	2,48E+10	-4,25E+10
10	2,14E+10	2,48E+10	3,34E+09
11	1,75E+11	2,48E+10	-1,50E+11
12	2,22E+10	2,48E+10	2,55E+09
13	1,23E+11	2,48E+10	-9,81E+10
14	5,41E+10	2,48E+10	-2,94E+10
15	-1,45E+09	2,48E+10	2,62E+10
16	0,00E+00	2,48E+10	2,48E+10
18	1,80E+09	2,48E+10	2,30E+10
19	0,00E+00	2,48E+10	2,48E+10

Çizelge 5.25: İkinci kesitteki sektörlerin çarpılma katsayıları.

SEKTÖR NO	NOKTA		W_n			tds (A)	ÇARPILMA KATSAYISI
	BAŞLANGIÇ (i)	BİTİŞ (j)	W_{ni}	W_{nj}	$W_{ni2}+W_{ni}*W_{nj}+W_{nj2}$		
1	1	2	-9,61E+10	1,67E+11	2,10E+22	6000	4,19E+25
2	2	3	1,67E+11	9,29E+10	5,18E+22	28000	4,84E+26
3	3	4	9,29E+10	1,69E+11	5,29E+22	28000	4,94E+26
4	4	5	1,69E+11	6,82E+10	4,48E+22	17500	2,61E+26
5	5	6	6,82E+10	-1,11E+09	4,57E+21	24500	3,73E+25
6	6	7	-1,11E+09	-3,79E+10	1,48E+21	16000	7,89E+24
7	8	7	1,16E+09	-3,79E+10	1,39E+21	19799	9,20E+24
8	8	6	1,16E+09	-1,11E+09	1,29E+18	12000	5,15E+21
9	8	9	1,16E+09	-4,25E+10	1,76E+21	24500	1,44E+25
10	9	10	-4,25E+10	3,34E+09	1,68E+21	17500	9,78E+24
11	10	11	3,34E+09	-1,50E+11	2,21E+22	28000	2,07E+26
12	7	12	-3,79E+10	2,55E+09	1,35E+21	31500	1,41E+25
13	12	13	2,55E+09	-9,81E+10	9,37E+21	31500	9,84E+25
14	13	14	-9,81E+10	-2,94E+10	1,34E+22	24000	1,07E+26
15	14	15	-2,94E+10	2,62E+10	7,80E+20	24000	6,24E+24
16	15	16	2,62E+10	2,48E+10	1,95E+21	6000	3,90E+24
18	13	18	-9,81E+10	2,30E+10	7,89E+21	35000	9,21E+25
19	18	19	2,30E+10	2,48E+10	1,71E+21	16000	9,11E+24
24	10	4	3,34E+09	1,69E+11	2,92E+22	12000	1,17E+26
25	11	1	-1,50E+11	-,61E+10	4,63E+22	28000	4,32E+26
KESİT ÇARPILMA KATSAYISI C_w (mm6)							2,45E+27

5.3 Üçüncü Örnek Kesit



Şekil 5.9: Şekil 5.7’deki kesite ana güverte eklenmiş üçüncü en kesit.

Şekil 5.9’de üçüncü örnek konteyner gemisi kesiti görülmektedir. Düğüm noktaları, sektörler ve bölümler bu kesit için de belirlenmiştir. Gemi kesiti y eksenine göre simetrik olduğundan; yarı kesitte hesaplamalar yapılmıştır. Kullanıcı eksen, kesitin simetrik yapısından faydalanmak için; çift dibin en alt noktasına ve orta eksene gelecek şekilde seçilmiştir. Kullanıcı eksen diğer kesitlerde de olduğu gibi olan birincil eksenlerle karışmaması için seçilmiştir. Kullanıcının hesabın başında keyfi olarak belirlediği eksen, Çizelge 5.26’da kullanıcı eksenine göre tüm nokta ve sektörlerin koordinatları verilmiştir.

Çizelge 5.26: Üçüncü kesite ait düğüm noktaları ve sektörlerin kullanıcı koordinatları.

DÜĞÜM NOKTASI (mm)			SEKTÖR (mm)							
KULLANICI EKSENİ KOORDİNATLARI			DÜĞÜM NOKTASI				BAŞLANGIÇ		BİTİŞ	
NO	x	y	NO	i	j	kalınlık (t)	xi	yi	xj	yj
1	0	0	1	1	2	6	0	0	0	1000
2	0	1000	2	2	3	14	0	1000	-2000	1000
3	-2000	1000	3	3	4	14	-2000	1000	-4000	1000
4	-4000	1000	4	4	5	14	-4000	1000	-5250	1000
5	-5250	1000	5	5	6	14	-5250	1000	-7000	1000
6	-7000	1000	6	6	7	16	-7000	1000	-8000	1000
7	-8000	1000	7	8	7	14	-7000	0	-8000	1000
8	-7000	0	8	8	6	12	-7000	0	-7000	1000
9	-5250	0	9	8	9	14	-7000	0	-5250	0
10	-4000	0	10	9	10	14	-5250	0	-4000	0
11	-2000	0	11	10	11	14	-4000	0	-2000	0
12	-8000	3250	12	7	12	14	-8000	1000	-8000	3250
13	-8000	5500	13	12	13	14	-8000	3250	-8000	5500
14	-6000	5500	14	13	14	12	-8000	5500	-6000	5500
15	-4000	5500	15	14	15	12	-6000	5500	-4000	5500
16	-4000	5000	16	15	16	12	-4000	5500	-4000	5000
18	-8000	8000	18	13	18	14	-8000	5500	-8000	8000
19	-8000	9000	19	18	19	16	-8000	8000	-8000	9000
20	-6000	9000	20	19	20	14	-8000	9000	-6000	9000
21	-4000	9000	21	20	21	14	-6000	9000	-4000	9000
22	-4000	8500	22	21	22	14	-4000	9000	-4000	8500
			24	10	4	12	-4000	0	-4000	1000
			25	11	1	14	-2000	0	0	0

Çizelge 5.27: Üçüncü kesitteki sektörlerin özellikleri.

NO	SEKTÖR ÖZELLİKLERİ							
	Lx (mm)	Ly (mm)	L (mm)	A (mm ²)	Xc	Yc	Ax (mm ²)	Ay (mm ²)
1	0	1000	1000	6000	0	500	0,00E+00	3,00E+06
2	-2000	0	2000	28000	-1000	1000	-2,80E+07	2,80E+07
3	-2000	0	2000	28000	-3000	1000	-8,40E+07	2,80E+07
4	-1250	0	1250	17500	-4625	1000	-8,09E+07	1,75E+07
5	-1750	0	1750	24500	-6125	1000	-1,50E+08	2,45E+07
6	-1000	0	1000	16000	-7500	1000	-1,20E+08	1,60E+07
7	-1000	1000	1414	19799	-7500	500	-1,48E+08	9,90E+06
8	0	1000	1000	12000	-7000	500	-8,40E+07	6,00E+06
9	1750	0	1750	24500	-6125	0	-1,50E+08	0,00E+00
10	1250	0	1250	17500	-4625	0	-8,09E+07	0,00E+00
11	2000	0	2000	28000	-3000	0	-8,40E+07	0,00E+00
12	0	2250	2250	31500	-8000	2125	-2,52E+08	6,69E+07
13	0	2250	2250	31500	-8000	4375	-2,52E+08	1,38E+08
14	2000	0	2000	24000	-7000	5500	-1,68E+08	1,32E+08
15	2000	0	2000	24000	-5000	5500	-1,20E+08	1,32E+08
16	0	-500	500	6000	-4000	5250	-2,40E+07	3,15E+07
18	0	2500	2500	35000	-8000	6750	-2,80E+08	2,36E+08
19	0	1000	1000	16000	-8000	8500	-1,28E+08	1,36E+08
20	2000	0	2000	28000	-7000	9000	-1,96E+08	2,52E+08
21	2000	0	2000	28000	-5000	9000	-1,40E+08	2,52E+08
22	0	-500	500	7000	-4000	8750	-2,80E+07	6,13E+07
24	0	1000	1000	12000	-4000	500	-4,80E+07	6,00E+06
25	2000	0	2000	28000	-1000	0	-2,80E+07	0,00E+00

Çizelge 5.27’de görülen değerlere göre toplam alanlar (5.76), (5.77) ve (5.78) ile hesaplanır.

$$SA = \sum[A] = 492799 \text{ mm}^2 \quad (5.76)$$

$$SA_x = \sum[A_x] = -2674492424 \text{ mm}^2 \quad (5.77)$$

$$SA_y = \sum[A_y] = 1576649495 \text{ mm}^2 \quad (5.78)$$

Kütle merkezi koordinatları (c_x, c_y) ise (5.79) ve (5.80)’den bulunur.

$$c_x = [SA_x]/[SA] = -5427 \quad (5.79)$$

$$c_y = [SA_y]/[SA] = 3199 \quad (5.80)$$

Kütle merkezinin koordinatları belirlendikten sonra, kullanıcı eksenine göre kesitin atalet momenti hesaplanır. Birinci kesit için hesaplamalar yapılırken, bölüm 5.1’de verilmiş olan (5.14) ile (5.20) denklemleri kullanılır. (5.14) denklemi ile kullanıcı belirlemiş olduğu x eksenine göre atalet momenti; (5.15) denklemi ile yine kullanıcı belirlemiş olduğu y eksenine göre atalet momenti hesaplanır. Benzer adımlar izlenerek de (5.16) denklemi yardımıyla çarpım atalet momenti belirlenir.

Bu adımlar detaylı olarak Çizelge 5.28’de görülebilir. Hesaplama adımlarında dikkat edilmesi gereken bir husus da sektörlere ait başlangıç ve bitiş noktalarının düzenli bir şekilde sıralanarak koordinat bilgilerinin doğru girilmesidir. Sektörlere ait bilgilerin kontrolü sağlandıktan sonra kullanıcı eksenine göre atalet momentleri de hesaplanır.

Kesite ait atalet momentleri hesaplandıktan sonra sektörel alan hesabına geçilir. Sektörlere ait geometrik özellikler belirlendiği için, Çizelge 5.29’da yer alan sektörel alanlar kolayca hesaplanır. Birinci kesit için de yapıldığı gibi, ikinci kesit için de kullanıcı eksen ve birincil eksen arasındaki açı belirlenir. Bir sonraki adım ise Çizelge 5.30’da görüldüğü gibi kullanıcı eksen koordinatlarının, birincil eksene göre dönüştürülmesidir.

Çizelge 5.28: Üçüncü kesitteki sektörlerin eksenlere göre atalet momentleri.

SEKTÖR ÖZELLİKLERİ													
NO	(yi-cy)2	(yi-cy)*(yj-cy)	(yj-cy)2	Ixx (mm ⁴)	(xi-cx)2	(xi-cx)*(xj-cx)	(xj-cx)2	Iyy (mm ⁴)	(xi-cx)*(yi-cy)	(xj-cx)*(yj-cy)	(xi-cx)*(yj-cy)	(xj-cx)*(yi-cy)	Ixy (mm ⁴)
1	1,02E+07	7,04E+06	4,84E+06	4,42E+10	2,95E+07	2,95E+07	2,95E+07	1,77E+11	-1,74E+07	-1,19E+07	-1,19E+07	-1,74E+07	-1,46E+07
2	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	1,35E+11	2,95E+07	1,86E+07	1,17E+07	5,58E+11	-1,19E+07	-7,54E+06	-1,19E+07	-7,54E+06	-9,74E+06
3	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	1,35E+11	1,17E+07	4,89E+06	2,04E+06	1,74E+11	-7,54E+06	-3,14E+06	-7,54E+06	-3,14E+06	-5,34E+06
4	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	8,47E+10	2,04E+06	2,53E+05	3,14E+04	1,35E+10	-3,14E+06	-3,90E+05	-3,14E+06	-3,90E+05	-1,76E+06
5	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	1,19E+11	3,14E+04	-2,79E+05	2,47E+06	1,82E+10	-3,90E+05	3,46E+06	-3,90E+05	3,46E+06	1,53E+06
6	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	7,74E+10	2,47E+06	4,05E+06	6,62E+06	7,01E+10	3,46E+06	5,66E+06	3,46E+06	5,66E+06	4,56E+06
7	1,02E+07	7,04E+06	4,84E+06	1,46E+11	2,47E+06	4,05E+06	6,62E+06	8,67E+10	5,03E+06	5,66E+06	3,46E+06	8,23E+06	5,51E+06
8	1,02E+07	7,04E+06	4,84E+06	8,84E+10	2,47E+06	2,47E+06	2,47E+06	2,97E+10	5,03E+06	3,46E+06	3,46E+06	5,03E+06	4,25E+06
9	1,02E+07	1,02E+07	1,02E+07	2,51E+11	2,47E+06	-2,79E+05	3,14E+04	1,82E+10	5,03E+06	-5,67E+05	5,03E+06	-5,67E+05	2,23E+06
10	1,02E+07	1,02E+07	1,02E+07	1,79E+11	3,14E+04	2,53E+05	2,04E+06	1,35E+10	-5,67E+05	-4,57E+06	-5,67E+05	-4,57E+06	-2,57E+06
11	1,02E+07	1,02E+07	1,02E+07	2,87E+11	2,04E+06	4,89E+06	1,17E+07	1,74E+11	-4,57E+06	-1,10E+07	-4,57E+06	-1,10E+07	-7,77E+06
12	4,84E+06	-1,11E+05	2,56E+03	4,96E+10	6,62E+06	6,62E+06	6,62E+06	2,09E+11	5,66E+06	-1,30E+05	-1,30E+05	5,66E+06	2,76E+06
13	2,56E+03	1,16E+05	5,29E+06	5,68E+10	6,62E+06	6,62E+06	6,62E+06	2,09E+11	-1,30E+05	-5,92E+06	-5,92E+06	-1,30E+05	-3,02E+06
14	5,29E+06	5,29E+06	5,29E+06	1,27E+11	6,62E+06	1,47E+06	3,28E+05	6,74E+10	-5,92E+06	-1,32E+06	-5,92E+06	-1,32E+06	-3,62E+06
15	5,29E+06	5,29E+06	5,29E+06	1,27E+11	3,28E+05	-8,18E+05	2,04E+06	1,24E+10	-1,32E+06	3,28E+06	-1,32E+06	3,28E+06	9,83E+05
16	5,29E+06	4,14E+06	3,24E+06	2,54E+10	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	1,22E+10	3,28E+06	2,57E+06	2,57E+06	3,28E+06	2,93E+06
18	5,29E+06	1,10E+07	2,30E+07	4,59E+11	6,62E+06	6,62E+06	6,62E+06	2,32E+11	-5,92E+06	-1,24E+07	-1,24E+07	-5,92E+06	-9,14E+06
19	2,30E+07	2,78E+07	3,36E+07	4,51E+11	6,62E+06	6,62E+06	6,62E+06	1,06E+11	-1,24E+07	-1,49E+07	-1,49E+07	-1,24E+07	-1,36E+07
20	3,36E+07	3,36E+07	3,36E+07	9,42E+11	6,62E+06	1,47E+06	3,28E+05	7,86E+10	-1,49E+07	-3,32E+06	-1,49E+07	-3,32E+06	-9,12E+06
21	3,36E+07	3,36E+07	3,36E+07	9,42E+11	3,28E+05	-8,18E+05	2,04E+06	1,44E+10	-3,32E+06	8,28E+06	-3,32E+06	8,28E+06	2,48E+06
22	3,36E+07	3,07E+07	2,81E+07	2,16E+11	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	1,43E+10	8,28E+06	7,56E+06	7,56E+06	8,28E+06	7,92E+06
24	1,02E+07	7,04E+06	4,84E+06	8,84E+10	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,44E+10	-4,57E+06	-3,14E+06	-3,14E+06	-4,57E+06	-3,85E+06
25	1,02E+07	1,02E+07	1,02E+07	2,87E+11	1,17E+07	1,86E+07	2,95E+07	5,58E+11	-1,10E+07	-1,74E+07	-1,10E+07	-1,74E+07	-1,42E+07
			ΣIxx	5,32E+12			ΣIyy	2,87E+12	ΣIyy	2,87E+12		ΣIxy	-6,32E+07

Çizelge 5.29: Üçüncü kesitte sektörel alan hesabı.

NO	A	B	C	$(A^2+B^2)^{0,5}$	ρ (mm)	ρds (mm ²)
1	1000	0	-1000	1000	-5426	-5,43E+06
2	0	2000	2000	2000	-3200	-6,40E+06
3	0	2000	2000	2000	-3200	-6,40E+06
4	0	1250	1250	1250	-3200	-4,00E+06
5	0	1750	1750	1750	-3200	-5,60E+06
6	0	1000	1000	1000	-3200	-3,20E+06
7	1000	1000	0	1414	-6100	-8,63E+06
8	1000	0	-1000	1000	-5426	-5,43E+06
9	0	-1750	-1750	1750	3200	5,60E+06
10	0	-1250	-1250	1250	3200	4,00E+06
11	0	-2000	-2000	2000	3200	6,40E+06
12	2250	0	-2250	2250	-5426	-1,22E+07
13	2250	0	-2250	2250	-5426	-1,22E+07
14	0	-2000	-2000	2000	3200	6,40E+06
15	0	-2000	-2000	2000	3200	6,40E+06
16	-500	0	500	500	5426	2,71E+06
18	2500	0	-2500	2500	-5426	-1,36E+07
19	1000	0	-1000	1000	-5426	-5,43E+06
20	0	-2000	-2000	2000	3200	6,40E+06
21	0	-2000	-2000	2000	3200	6,40E+06
22	-500	0	500	500	5426	2,71E+06
24	1000	0	-1000	1000	-5426	-5,43E+06
25	0	-2000	-2000	2000	3200	6,40E+06

Çizelge 5.30: Üçüncü kesitteki sektörlerin birincil eksene göre dönüştürülmüş koordinatları.

BİRİNCİL EKSENE GÖRE DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ SEKTÖR KOORDİNATLARI								
NO	xci	yci	xi'	yi'	xcj	ycj	xj'	yj'
1	5427	-3199	5422	-3207	5427	-2199	5424	-2207
2	5427	-2199	5424	-2207	3427	-2199	3424	-2204
3	3427	-2199	3424	-2204	1427	-2199	1424	-2201
4	1427	-2199	1424	-2201	177	-2199	174	-2200
5	177	-2199	174	-2200	-1573	-2199	-1576	-2197
6	-1573	-2199	-1576	-2197	-2573	-2199	-2576	-2196
7	-1573	-3199	-1578	-3197	-2573	-2199	-2576	-2196
8	-1573	-3199	-1578	-3197	-1573	-2199	-1576	-2197
9	-1573	-3199	-1578	-3197	177	-3199	172	-3200

Çizelge 5.30 (devam): Üçüncü kesitteki sektörlerin birincil eksene göre dönüştürülmüş koordinatları.

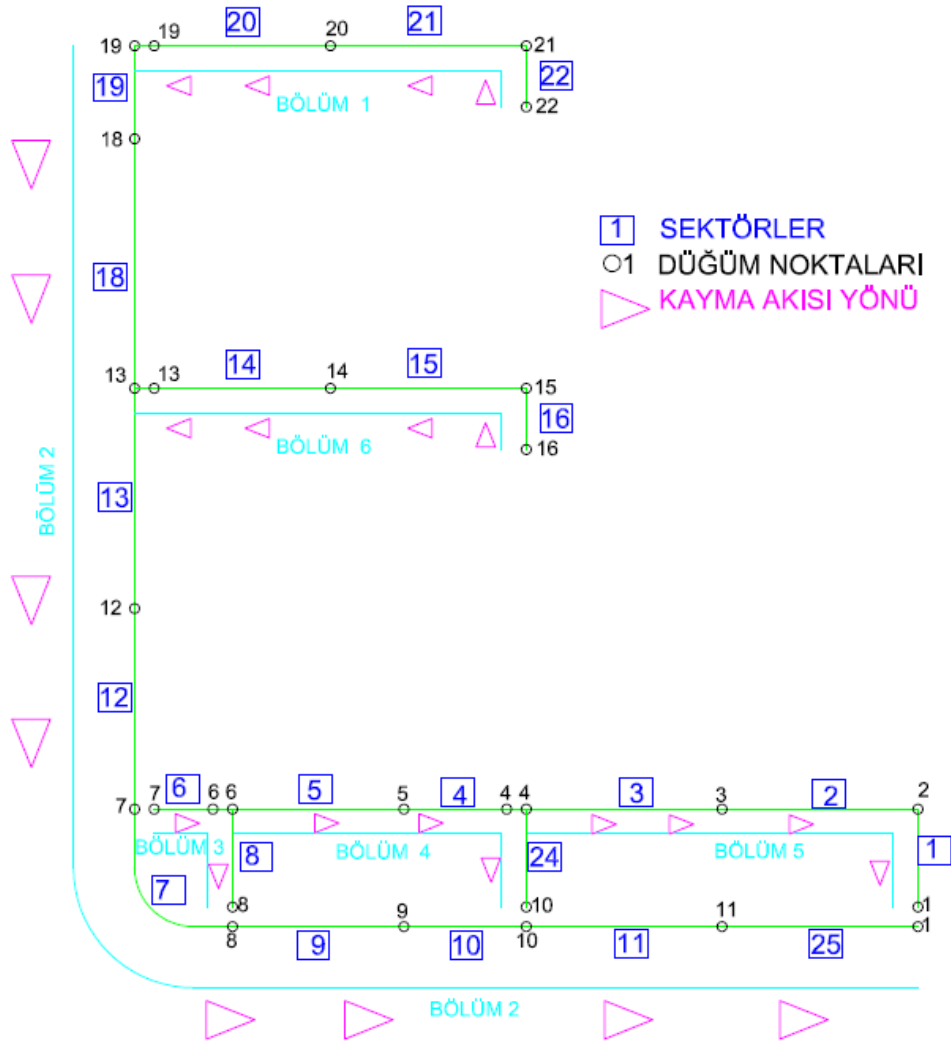
10	177	-3199	172	-3200	1427	-3199	1422	-3201
11	1427	-3199	1422	-3201	3427	-3199	3422	-3204
12	-2573	-2199	-2576	-2196	-2573	51	-2573	54
13	-2573	51	-2573	54	-2573	2301	-2569	2304
14	-2573	2301	-2569	2304	-573	2301	-569	2301
15	-573	2301	-569	2301	1427	2301	1431	2299
16	1427	2301	1431	2299	1427	1801	1430	1799
18	-2573	2301	-2569	2304	-2573	4801	-2566	4804
19	-2573	4801	-2566	4804	-2573	5801	-2564	5804
20	-2573	5801	-2564	5804	-573	5801	-564	5801
21	-573	5801	-564	5801	1427	5801	1436	5799
22	1427	5801	1436	5799	1427	5301	1435	5299
24	1427	-3199	1422	-3201	1427	-2199	1424	-2201
25	3427	-3199	3422	-3204	5427	-3199	5422	-3207

Kullanıcının keyfi olarak belirlediği kullanıcı eksenini ötelenerek kütle merkezi koordinatları hesaplanırken; aynı durum birincil eksen için geçerli olmaz. Birincil eksen dönüşümü yapılırken, kullanıcı eksenini koordinatları hem ötelenir hem de döndürülür. Dönme açısı ise daha önce de bahsedildiği gibi kullanıcının ilk belirlediği eksene göre hesaplanan atalet momentlerinden belirlenir.

Birinci kesitte de olduğu gibi, elde edilen birincil eksen koordinatlarına göre sektörlerin atalet momentleri (5.81) ve (5.82) ile hesaplanır.

$$I_{x'} = (I_{xx} + I_{yy})/2 + Z = 5,32E + 12 \text{ mm}^4 \quad (5.81)$$

$$I_{y'} = (I_{xx} + I_{yy})/2 - Z = 2,87E + 12 \text{ mm}^4 \quad (5.82)$$



Şekil 5.10: Üçüncü kesitteki bölüm, sektör ve düğüm noktaları ile kayma akısı.

Üçüncü kesitteki akı yönleri Şekil 5.10’da gösterilmiştir. Kesitte, daha önce belirlenen düğüm noktaları ve sektörler kullanılarak bölümler tanımlanır. Daha önceki kesitler de anlatıldığı gibi keyfi alınan bir bitiş noktasından başlanıp, bölümler belirlenir. Bölümleri tanımlamada önemli bir nokta da, önce ana hattın belirlenmesi, daha sonra yan hatların belirlenmesidir. Bu çalışmada borda ve devamındaki çift dip ana hat olarak seçilmiş; ana ve ara güverteler ise yan dal olarak tanımlanmıştır. Çizelge 5.31’de detayları ile görülen sektörel alan hesabında görülmektedir. Ele alınan kesitte, belirlenen kayma akısı yönü, başlangıç noktaları ile aynı doğrultuda olduğundan pozitif olarak alınmıştır. Çizelge 5.32’de de özet tablo yer almaktadır.

Çizelge 5.31: Üçüncü kesitte kütle merkezine göre sektörel alan hesabı.

NOKTA				SEKTÖR					NOKTA				SEKTÖR				
BÖLÜM NO	SIRA	NO	Başlangıç Noktası	Yönü	ρds (mm²)	ρds (yön dahil edilmiş) (mm²)	SEKTÖREL ALAN W (mm2)	Bölüm Başlangıç ρds	BÖLÜM NO	SIRA	NO	Başlangıç Noktası	Yönü	ρds (mm²)	ρds (yön dahil edilmiş) (mm²)	SEKTÖREL ALAN W (mm2)	Bölüm Başlangıç ρds
1	1	22	21	1	2,71E+06	2,71E+06	0,00E+00	0,00E+00	3	1	7	6	1	-3,20E+06	-3,20E+06	-2,79E+07	-2,79E+07
	2	21	20	1	6,40E+06	6,40E+06	2,71E+06	2		6	8	1	-5,43E+06	-5,43E+06	-3,11E+07		
	3	20	19	1	6,40E+06	6,40E+06	9,11E+06	3		8	-			-3,65E+07			
	4	19	-			0,00E+00	1,55E+07	4	1	6	5	1	-5,60E+06	-5,60E+06	-3,11E+07	-3,11E+07	
2	1	19	18	1	-5,43E+06	-5,43E+06	1,55E+07	1,55E+07	2	5	4	4	1	-4,00E+06	-4,00E+06	-3,67E+07	
	2	18	13	1	-1,36E+07	-1,36E+07	1,01E+07	3		4	10	1	-5,43E+06	-5,43E+06	-4,07E+07		
	3	13	12	1	-1,22E+07	-1,22E+07	-3,48E+06	4		10	-			-4,61E+07			
	4	12	7	1	-1,22E+07	-1,22E+07	-1,57E+07	5		1	4	3	1	-6,40E+06	-6,40E+06	-4,07E+07	-4,07E+07
	5	7	8	1	-8,63E+06	-8,63E+06	-2,79E+07	2	3	2	2	1	-6,40E+06	-6,40E+06	-4,71E+07		
	6	8	9	1	5,60E+06	5,60E+06	-3,65E+07		3	2	1	1	-5,43E+06	-5,43E+06	-5,35E+07		
	7	9	10	1	4,00E+06	4,00E+06	-3,09E+07		4	1	-			-5,89E+07			
	8	10	11	1	6,40E+06	6,40E+06	-2,69E+07		6	1	16	15	1	2,71E+06	2,71E+06	0,00E+00	0,00E+00
	9	11	1	1	6,40E+06	6,40E+06	-2,05E+07	2	15	14	14	1	6,40E+06	6,40E+06	2,71E+06		
	10	1	-				-1,41E+07		3	14	13	1	6,40E+06	6,40E+06	9,11E+06		
									4	13	-				1,55E+07		

Çizelge 5.32: Üçüncü kesitteki sektör verileri için özet tablo.

BAŞLANGIÇ NOKTASI i					BİTİŞ NOKTASI j				BAŞLANGIÇ NOKTASI i					BİTİŞ NOKTASI j			
SEKTÖR NO	NOKTA NO	Wi (mm2)	xi'	yi'	NOKTA NO	Wj (mm2)	xj'	yj'	SEKTÖR NO	NOKTA NO	Wi (mm2)	xi'	yi'	NOKTA NO	Wj (mm2)	xj'	yj'
1	1	-7,30E+07	5422	-3207	2	-5,35E+07	3424	-2204	13	12	-1,57E+07	-2573	54	13	1,20E+07	-569	2301
2	2	-5,35E+07	5424	-2207	3	-4,71E+07	1424	-2201	14	13	1,20E+07	-2569	2304	14	9,11E+06	1431	2299
3	3	-4,71E+07	3424	-2204	4	-8,14E+07	174	-2200	15	14	9,11E+06	-569	2301	15	2,71E+06	1430	1799
4	4	-8,14E+07	1424	-2201	5	-3,67E+07	-1576	-2197	16	15	2,71E+06	1431	2299	16	0,00E+00	0	0
5	5	-3,67E+07	174	-2200	6	-6,22E+07	-2576	-2196	18	13	1,20E+07	-2569	2304	18	1,01E+07	-2564	5804
6	6	-6,22E+07	-1576	-2197	7	-5,58E+07	-2576	-2196	19	18	1,01E+07	-2566	4804	19	3,10E+07	-564	5801
7	8	-7,30E+07	-1578	-3197	7	-5,58E+07	-2576	-2196	20	19	3,10E+07	-2564	5804	20	9,11E+06	1436	5799
8	8	-7,30E+07	-1578	-3197	6	-6,22E+07	-2576	-2196	21	20	9,11E+06	-564	5801	21	2,71E+06	1435	5299
9	8	-7,30E+07	-1578	-3197	9	-3,09E+07	1422	-3201	22	21	2,71E+06	1436	5799	22	0,00E+00	5422	-3207
10	9	-3,09E+07	172	-3200	10	-7,30E+07	3422	-3204	24	10	-7,30E+07	1422	-3201	4	-8,14E+07	174	-2200
11	10	-7,30E+07	1422	-3201	11	-2,05E+07	-2573	54	25	11	-2,05E+07	-2576	-2196	1	-7,30E+07	5424	-2207
12	7	-5,58E+07	-1576	-2197	12	-1,57E+07	-2569	2304									

Birincil eksene göre hesaplanan çarpılma atalet momentleri Çizelge 5.33'te yer almaktadır.

Çizelge 5.33: Üçüncü kesitteki sektörlerin birincil eksene göre integrasyonları.

SEKTÖR NO	A (mm ²)	X' İNTEGRASYON			Y' İNTEGRASYON		
		XPA	XPB	XPA/3+XPB/6	YPA	YPB	YPA/3+YPB/6
1	6000	-3,48E+15	-3,24E+15	-1,70E+15	2,11E+15	2,00E+15	1,04E+15
2	28000	-1,00E+16	-9,29E+15	-4,88E+15	6,21E+15	6,21E+15	3,10E+15
3	28000	-4,91E+15	-8,03E+15	-2,98E+15	7,92E+15	7,92E+15	3,96E+15
4	17500	-1,02E+15	1,33E+15	-1,17E+14	4,55E+15	4,54E+15	2,27E+15
5	24500	3,77E+15	2,05E+15	1,60E+15	5,32E+15	5,33E+15	2,66E+15
6	16000	3,87E+15	3,97E+15	1,95E+15	4,15E+15	4,15E+15	2,07E+15
7	19799	5,13E+15	5,47E+15	2,62E+15	7,05E+15	6,71E+15	3,47E+15
8	12000	3,31E+15	3,44E+15	1,67E+15	4,44E+15	4,31E+15	2,20E+15
9	24500	1,75E+15	-1,35E+15	3,57E+14	8,15E+15	8,15E+15	4,07E+15
10	17500	-4,47E+15	-2,07E+15	-1,83E+15	5,83E+15	5,82E+15	2,91E+15
11	28000	-1,43E+15	4,44E+15	2,64E+14	6,52E+15	1,73E+15	2,46E+15
12	31500	4,04E+15	5,29E+15	2,23E+15	2,72E+15	-2,96E+15	4,13E+14
13	31500	1,06E+15	-6,94E+14	2,36E+14	8,46E+14	-1,12E+15	9,58E+13
14	24000	-4,29E+14	-1,49E+14	-1,68E+14	1,17E+15	1,17E+15	5,84E+14
15	24000	-3,15E+13	2,76E+14	3,55E+13	6,21E+14	5,43E+14	2,97E+14
16	6000	2,33E+13	0,00E+00	7,76E+12	3,74E+13	0,00E+00	1,25E+13
18	35000	-1,99E+15	-1,99E+15	-9,94E+14	3,02E+15	3,26E+15	1,55E+15
19	16000	-6,94E+14	-1,36E+15	-4,59E+14	3,66E+15	3,32E+15	1,77E+15
20	28000	-1,86E+15	5,93E+14	-5,22E+14	6,52E+15	6,52E+15	3,26E+15
21	28000	-3,50E+13	3,23E+14	4,22E+13	1,88E+15	1,79E+15	9,26E+14
22	7000	2,73E+13	1,03E+14	2,63E+13	1,10E+14	-6,09E+13	2,66E+13
24	12000	-1,42E+15	-1,54E+15	-7,29E+14	4,95E+15	5,05E+15	2,49E+15
25	28000	-9,61E+15	2,15E+15	-2,85E+15	5,78E+15	5,76E+15	2,89E+15
			ΣI _{wx}	-6,18E+15		ΣI _{wy}	4,45E+16

Daha önce birinci kesit için hesaplanan kullanıcı eksenine göre atalet momenti, birincil eksene göre çarpılma atalet momenti, kesitin kütle merkezinden kayma merkezine olan mesafeleri (X_{ref}, Y_{ref}) ve kayma merkezi koordinatları (X_0, Y_0) ikinci kesit için aynı şekilde (5.83) ile (5.91) arasındaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$I_{wx} = \sum \left(\frac{XPA}{3} + \frac{XPB}{6} \right) = -6,18E + 15 \text{ mm}^5 \quad (5.83)$$

$$I_{wy} = \sum \left(\frac{YPA}{3} + \frac{YPB}{6} \right) = 4,45E + 16 \text{ mm}^5 \quad (5.84)$$

$$X_{ref} = (I_{xy}I_{wy} - I_{yy}I_{wx}) / I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} \quad (5.47)$$

$$Y_{ref} = (I_{xx}I_{wx} - I_{yy}I_{wy}) / I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} \quad (5.48)$$

$$D_m = I_{xy}^2 - I_{xx}I_{yy} = -1,53E + 25 \text{ mm}^8 \quad (5.85)$$

$$X_{ref} = (I_{xy}I_{wy} - I_{yy}I_{wx}) / D_m = -1163 \quad (5.86)$$

$$Y_{ref} = (I_{xx}I_{wx} - I_{yy}I_{wy}) / D_m = 10531 \quad (5.87)$$

$$C_x = -5427 \quad (5.88)$$

$$C_y = 3199 \quad (5.89)$$

$$X_0 = X_{ref} + C_x = -6590 \quad (5.90)$$

$$Y_0 = Y_{ref} + C_y = 13730 \quad (5.91)$$

Birinci ve ikinci kesitler için belirlenen yol izlenerek; üçüncü kesitin de kayma merkezi koordinatları belirlenir ve kayma merkezine göre sektörel alanlar hesaplanır. Daha önceki aşamalarda yapılan hesaba benzer olarak Çizelge 5.34'te yer alan sıralama ile sektörel alan hesaplamasına devam edilir. Bölüm 5.1'de kayma merkezinden sektörün teğetine olan dik mesafe olarak tanımlanan ρ_0 değeri; (5.57) denklemiyle üçüncü kesite ait sektörler için çözülür. Daha sonraki adımda ise (5.58) denklemi ile verildiği üzere üçüncü kesit için kayma merkezine göre sektörel alanlar W_0 hesaplanır.

Çizelge 5.34: Üçüncü kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.

BÖLÜM NO	NOKTA		Başlangıç Noktası	Yönü	SEKTÖR										SEKTÖREL ALAN W0 (mm2)	BÖLÜM BAŞLANGIÇ ρ_{ds}
	SIRA	NO			Ly	Lx	xi	xj	yi	yj	P0	ds (L)	ρ_{ds}			
1	1	22	21	1	-500	0	-4000	-4000	9000	8500	-1,29E+06	500	-6,47E+08	0,00E+00	0,00E+00	
	2	21	20	1	0	2000	-6000	-4000	9000	9000	9,46E+06	2000	1,89E+10	-6,47E+08		
	3	20	19	1	0	2000	-8000	-6000	9000	9000	9,46E+06	2000	1,89E+10	1,83E+10		
	4	19	-											3,72E+10		
2	1	19	18	1	1000	0	-8000	-8000	8000	9000	-1,41E+06	1000	-1,41E+09	3,72E+10	3,72E+10	
	2	18	13	1	2500	0	-8000	-8000	5500	8000	-3,53E+06	2500	-8,81E+09	3,58E+10		
	3	13	12	1	2250	0	-8000	-8000	3250	5500	-3,17E+06	2250	-7,14E+09	2,70E+10		
	4	12	7	1	2250	0	-8000	-8000	1000	3250	-3,17E+06	2250	-7,14E+09	1,98E+10		
	5	7	8	1	1000	-1000	-7000	-8000	0	1000	-1,41E+07	1414	-2,00E+10	1,27E+10		
	6	8	9	1	0	1750	-7000	-5250	0	0	2,40E+07	1750	4,20E+10	-7,31E+09		
	7	9	10	1	0	1250	-5250	-4000	0	0	1,72E+07	1250	2,15E+10	3,47E+10		
	8	10	11	1	0	2000	-4000	-2000	0	0	2,75E+07	2000	5,49E+10	5,62E+10		
	9	11	1	1	0	2000	-2000	0	0	0	2,75E+07	2000	5,49E+10	1,11E+11		
	10	1	-											1,66E+11		
3	1	7	6	1	0	-1000	-7000	-8000	1000	1000	-1,27E+07	1000	-1,27E+10	1,27E+10	1,27E+10	
	2	6	8	1	1000	0	-7000	-7000	0	1000	-4,10E+05	1000	-4,10E+08	-3,89E+07		
	3	8	-											-4,49E+08		
4	1	6	5	1	0	-1750	-5250	-7000	1000	1000	-2,23E+07	1750	-3,90E+10	-3,89E+07	-3,89E+07	
	2	5	4	1	0	-1250	-4000	-5250	1000	1000	-1,59E+07	1250	-1,99E+10	-3,90E+10		
	3	4	10	1	1000	0	-4000	-4000	0	1000	2,59E+06	1000	2,59E+09	-5,89E+10		
	4	10	-											-5,63E+10		

Çizelge 5.34 (devam) : Üçüncü kesitte kayma merkezine göre sektörel alan hesabı.

5	1	4	3	1	0	-2000	-2000	-4000	1000	1000	-2,55E+07	2000	-5,09E+10	-5,89E+10	-5,89E+10
	2	3	2	1	0	-2000	0	-2000	1000	1000	-2,55E+07	2000	-5,09E+10	-1,10E+11	
	3	2	1	1	1000	0	0	0	0	1000	6,59E+06	1000	6,59E+09	-1,61E+11	
	4	1	-											-1,54E+11	
6	1	16	15	1	-500	0	-4000	-4000	5500	5000	-1,29E+06	500	-6,47E+08	0,00E+00	0,00E+00
	2	15	14	1	0	2000	-6000	-4000	5500	5500	1,65E+07	2000	3,29E+10	-6,47E+08	
	3	14	13	1	0	2000	-8000	-6000	5500	5500	1,65E+07	2000	3,29E+10	3,23E+10	
	4	13	-											6,52E+10	

Çizelge 5.35: Üçüncü kesitteki normalize birim çarpılma hesabı.

BÖLÜM NO	NOKTA		W_0		tds (A)	$(W_{0i}+W_{0j})*tds$
	SIRA	NO	W_{0i}	W_{0j}		
1	1	2	1,19E+10	-1,61E+11	6000	-8,93E+14
2	2	3	-1,61E+11	-1,10E+11	28000	-7,58E+15
3	3	4	-1,10E+11	-1,18E+11	28000	-6,37E+15
4	4	5	-1,18E+11	-3,90E+10	17500	-2,74E+15
5	5	6	-3,90E+10	-7,77E+07	24500	-9,58E+14
6	6	7	-7,77E+07	2,54E+10	16000	4,05E+14
7	8	7	-7,76E+09	2,54E+10	19799	3,49E+14
8	8	6	-7,76E+09	-7,77E+07	12000	-9,40E+13
9	8	9	-7,76E+09	3,47E+10	24500	6,61E+14
10	9	10	3,47E+10	-1,30E+08	17500	6,06E+14
11	10	11	-1,30E+08	1,11E+11	28000	3,11E+15
12	7	12	2,54E+10	1,98E+10	31500	1,42E+15
13	12	13	1,98E+10	9,22E+10	31500	3,53E+15
14	13	14	9,22E+10	3,23E+10	24000	2,99E+15
15	14	15	3,23E+10	-6,47E+08	24000	7,59E+14
16	15	16	-6,47E+08	0,00E+00	6000	-3,88E+12
18	13	18	9,22E+10	3,58E+10	0	0,00E+00
19	18	19	3,58E+10	7,44E+10	35000	3,86E+15
20	19	20	7,44E+10	1,83E+10	16000	1,48E+15
21	20	21	1,83E+10	-6,47E+08	28000	4,94E+14
22	21	22	-6,47E+08	0,00E+00	28000	-1,81E+13
24	10	4	-1,30E+08	-1,18E+11	7000	-8,26E+14
25	11	1	1,11E+11	1,19E+10	0	0,00E+00

Hem birinci hem de ikinci kesitte de bahsedildiği gibi, her bir sektörün başlangıç ve bitiş noktasındaki sektörel alanlar farklı olduğundan, sektörün bütünü için bahsi geçen terimden elde edilen değer kullanılır. Düğüm noktaları için ise daha önceki adımlarda hesaplanan W_0 değerleri hesaplamada yer alacaktır.

Kayma merkezine göre hesaplanan W_0 fonksiyonun sektörler için olan değerleri Çizelge 5.35 ve Çizelge 5.36’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.36: Üçüncü kesitteki düğüm noktalarına ait normalize çarpılma değerleri.

NOKTA NO	W_0 (mm ²)	c	NORMALİZE ÇARPILMA W_n (mm ²)
1	1,19E+10	1,86E+08	-1,17E+10
2	-1,61E+11	1,86E+08	1,61E+11
3	-1,10E+11	1,86E+08	1,10E+11
4	-1,18E+11	1,86E+08	1,18E+11
5	-3,90E+10	1,86E+08	3,92E+10
6	-7,77E+07	1,86E+08	2,64E+08
7	2,54E+10	1,86E+08	-2,52E+10
8	-7,76E+09	1,86E+08	7,94E+09
9	3,47E+10	1,86E+08	-3,46E+10
10	-1,30E+08	1,86E+08	3,16E+08
11	1,11E+11	1,86E+08	-1,11E+11
12	1,98E+10	1,86E+08	-1,96E+10
13	9,22E+10	1,86E+08	-9,20E+10
14	3,23E+10	1,86E+08	-3,21E+10
15	-6,47E+08	1,86E+08	8,33E+08
16	0,00E+00	1,86E+08	1,86E+08
18	3,58E+10	1,86E+08	-3,56E+10
19	7,44E+10	1,86E+08	-7,42E+10
20	1,83E+10	1,86E+08	-1,81E+10
21	-6,47E+08	1,86E+08	8,33E+08
22	0,00E+00	1,86E+08	1,86E+08

En son aşamada ise üçüncü kesitin çarpılma sabiti hesaplanır. Çizelge 5.37’de sırasıyla tüm adımları verilen çarpılma katsayısı, normalize çarpılma fonksiyonu aracılığıyla bulunur. Bölüm 5.1’de verilen (5.59) denklemi ile tanımlanan çarpılma sabiti, üçüncü kesit için de sektörlerin başlangıç ve bitiş koordinatlarına göre belirlenen normalize çarpılma fonksiyonlarından faydalanılarak hesaplanır

Çizelge 5.37: Üçüncü kesitteki sektörlerin çarpılma katsayıları.

SEKTÖR NO	NOKTA		W _n			tds (A)	ÇARPILMA
	BAŞLANGIÇ (i)	BİTİŞ (j)	W _{ni}	W _{nj}	W _{ni} 2+W _{ni} *W _{nj} +W _{nj} 2		KATSAYISI
1	1	2	-1,17E+10	1,61E+11	2,42E+22	6000	4,83E+25
2	2	3	1,61E+11	1,10E+11	5,57E+22	28000	5,20E+26
3	3	4	1,10E+11	1,18E+11	3,90E+22	28000	3,64E+26
4	4	5	1,18E+11	3,92E+10	2,01E+22	17500	1,17E+26
5	5	6	3,92E+10	2,64E+08	1,55E+21	24500	1,26E+25
6	6	7	2,64E+08	-2,52E+10	6,28E+20	16000	3,35E+24
7	8	7	7,94E+09	-2,52E+10	4,98E+20	19799	3,29E+24
8	8	6	7,94E+09	2,64E+08	6,52E+19	12000	2,61E+23
9	8	9	7,94E+09	-3,46E+10	9,83E+20	24500	8,03E+24
10	9	10	-3,46E+10	3,16E+08	1,18E+21	17500	6,90E+24
11	10	11	3,16E+08	-1,11E+11	1,23E+22	28000	1,15E+26
12	7	12	-2,52E+10	-1,96E+10	1,52E+21	31500	1,59E+25
13	12	13	-1,96E+10	-9,20E+10	1,07E+22	31500	1,12E+26
14	13	14	-9,20E+10	-3,21E+10	1,24E+22	24000	9,95E+25
15	14	15	-3,21E+10	8,33E+08	1,00E+21	24000	8,03E+24
16	15	16	8,33E+08	1,86E+08	8,84E+17	6000	1,77E+21
18	13	18	-9,20E+10	-3,56E+10	1,30E+22	35000	1,52E+26
19	18	19	-3,56E+10	-7,42E+10	9,41E+21	16000	5,02E+25
20	19	20	-7,42E+10	-1,81E+10	7,17E+21	28000	6,70E+25
21	20	21	-1,81E+10	8,33E+08	3,13E+20	28000	2,92E+24
22	21	22	8,33E+08	1,86E+08	8,84E+17	7000	2,06E+21
24	10	4	3,16E+08	1,18E+11	1,40E+22	12000	5,59E+25
25	11	1	-1,11E+11	-1,17E+10	1,37E+22	28000	1,28E+26
KESİT ÇARPILMA KATSAYISI C _w (mm6)							1,89E+27

6. SONUÇ VE YORUMLAR

Gemide yapısal olarak süreksizlik yaratan ambar ağzı açıklıklarının önemle incelenmesi gerekir. Yapısal bütünlüğü bozmamak adına, açık kesitlerde oluşacak çarpılma gerilmeleri mümkün olduğunca azaltılmaya çalışılmalıdır.

Bölüm beşte, örnek bir konteyner gemisi kesiti çarpılma yönünden incelenmiş olup, ana güverte ve ara güverte eklenerek çarpılmayı önlemede ne gibi bir katkısı olduğu gösterilmiştir. Geniş ambar ağzı açıklıklı gemi kesitine ara güverte eklendiğinde çarpılma sabiti, ilk kesite göre yaklaşık %20 oranında azalmıştır. Bir sonraki adımda, kesit ana güverteli kapalı bir kesit haline getirilmiş, çarpılma sabiti ikinci kesite göre %24; üçüncü kesite göre ise %39 azalmıştır. Bu sonuçlara göre, gemi en kesiti kapalı kesit haline yaklaştırıldıkça çarpılma sabitinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

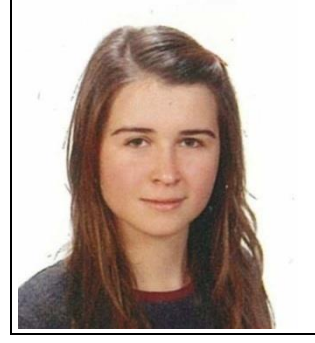
Çizelge 6.1: Çarpılma sabiti özet tablosu.

	Ana güverte	Ara güverte	Çarpılma Katsayısı $C_w(\text{mm}^6)$
Birinci kesit	-	-	3,05E+27
İkinci kesit	-	√	2,45E+27
Üçüncü kesit	√	√	1,87E+27

KAYNAKLAR

- [1] **Okada Tetsuo, Takeda Yu, Maeda Tomoki** (2006) On board measurement of stresses and deflections of a Post-Panamax containership and its feedback to rational design. *Marine structures*, 19(2), 141-172.
- [2] **Iijima K., Shigemi T., Miyake R., Kumano A.** (2004) A practical method for torsional strength assessment of containership structures. *Marine Structures* 17, Sf.355-384.
- [3] **Ünsan, Y.** (1995) *Konteyner Gemilerinde Burulma ve Kesme Gerilmelerinin İncelenmesi*, İstanbul, (doktora tezi), İTÜ.
- [4] **IACS-International Association of Classification Societies** (2005). *Container Ships Guidelines for Surveys, Assessment and Repair of Hull Structures*, London: Witherby & Co. Ltd.
- [5] **Paik, J. K., Thayamballi, A. K., Pedersen, P. T., & Park, Y. I.** (2001). Ultimate strength of ship hulls under torsion. *Ocean Engineering*, 28(8), 1097-1133.
- [6] <<http://people.virginia.edu/~ttb/torsion.pdf>>, alındığı tarih: 22.01.2015
- [7] **Shama, Mohamed.** (2010). *Torsion and Shear Stresses in Ships*. New York: Springer Heidelberg Dordrecht London.
- [8] **Murray, Noel W.** (1986). *Introduction to the Theory of Thin-Walled Structures*. United States: Oxford University Press.
- [9] **Hughes, Owen F. ve Paik, JeomKee** (2010). *Ship Structural Analysis and Design*. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [10] **Hughes, Owen F.** (1988). *Ship Structural Analysis Design. A Rationally-Based Computer-Aided Optimization Approach*. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [11] **Piscopo, V.** (2009). *Analysis of warping and shear stresses for ship structures- Theoretical developments and numerical applications* (doktora tezi), Università degli Studi di Napoli Federico II.
- [12] **Fong, John ve Vanni, Bill.** Warping Constant of Open Sections with Arbitrary Profile Geometry. alındığı tarih: 04.01.2015, adres: [http://cranerepairengineer.com/Torsional%20Warping%20Constant%20\(Cw\)/OpenWarpingConst.pdf](http://cranerepairengineer.com/Torsional%20Warping%20Constant%20(Cw)/OpenWarpingConst.pdf)
- [14] **Jensen J.J.** (2001). *Load and Global Response of Ships*. UK: Elsevier Science Ltd.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Tuğçe EROL
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul 15.12.1987
E-Posta : tugce.oner@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **2011- 2013:** Dearsan Gemi İnşa San. A.Ş.-Planlama Mühendisi
- **2013-** : Worthington Arıtış Basınçlı Kaplar San. A.Ş.-Dizayn Mühendisi