

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEMİ KİRİŞİNİN
NİHAİ MUKAVEMETİNİN TAYİNİ**

**DOKTORA TEZİ
Gökhan Tansel TAYYAR**

Anabilim Dalı : Gemi İnşaatı Mühendisliği

Programı : Gemi İnşaatı Mühendisliği

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEMİ KİRİŞİNİN
NİHAİ MUKAVEMETİNİN TAYİNİ**

**DOKTORA TEZİ
Gökhan Tansel TAYYAR
(508022001)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 Eylül 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Ocak 2011

**Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Ahmet ERGİN (İTÜ)
Prof.Dr. Ömer BELİK (PRÜ)
Prof.Dr. Ercan KÖSE (KTÜ)
Y.Doç.Dr. İsmail BAYER (YTÜ)**

OCAK 2011

Eşime ve oğluma,

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum bu çalışmada bana değerli fikirleriyle yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Y.Doç.Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL'a, tez izleme komitemdeki sayın hocalarım Prof.Dr. Ahmet ERGİN'e ve Prof.Dr. Ömer BELİK'e, ayrıca yardımlarından ötürü Prof.Dr. Jeom Kee PAIK'e ve Y.Doç.Dr. Bahadır UĞURLU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2010

Y.Müh.Gökhan Tansel TAYYAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı	2
1.2 Gemi Kirişinde Göçme Mekanizması	3
1.3 Kademeli Göçme Analizi Yöntemleri	4
1.4 Yöntemin Seçimi	5
1.5 Akış	8
2. EĞRİLİK HESAPLAMALARI.....	11
2.1 Kiriş Tanımı	11
2.2 Eğrilik	12
2.3 Mekanik Davranış	14
2.4 Denge Denklemleri.....	15
2.5 Moment-Eğrilik Diyagramları.....	16
3. SEHİM MODELLEMESİ.....	19
3.1 Yöntemler	19
3.2 Ana Kavram	21
3.3 Şekil - Süreklilik Şartları	22
3.4 Yay-Çifti Eğrileri	22
3.5 Eğrilik Değerleriyle Eğri Modelleme.....	24
3.6 Başlangıç Sehim Modelleme.....	27
4. GEOMETRİK SEHİM MODELLEMESİYLE KİRİŞ HESAPLARI	29
4.1 Eğilme Davranışı	29
4.1.1 Moment denklemleri.....	29
4.1.2 Başlangıç noktası	31
4.1.3 Yöntem	31
4.1.4 Sayısal çalışmalar	35
4.1.5 Tekil kuvvet altındaki basit mesnet kiriş	35
4.1.6 Yayılı yükler altındaki ankastre sınır koşullu kiriş.....	39
4.2 Burkulma Hesapları.....	45
4.2.1 Eğilme ve eksenel kuvvetleri altında bulunan kiriş	47
4.2.2 Euler burkulma problemi	52
4.2.3 Başlangıç sehimine ilişkin uygulama	56
5. STİFNERLENMİŞ PLAK ELEMAN HESAPLAMALARI	61
5.1 Etkin Genişlik.....	63

5.2 Artık Kaynak Gerilmesi ve Etkileri.....	66
5.2.1 İdealleştirilmiş artık kaynak gerilme dağılımı	67
5.2.2 Artık kaynak gerilmesi altında etkin genişlik hesabı	68
5.3 Gerilme Şekil Değiştirme Bağıntıları	70
5.4 Eksenel Yer Değiştirme ve Moment Hesapları	72
5.5 Eğrilik Hesaplamaları	74
5.6 Yöntem	75
5.7 Göçme Sonrası Dayanım Hesaplamaları	75
5.8 Sayısal Hesaplamalar.....	77
5.8.1 Deney seti.....	78
5.8.2 Yüklemler ve momentler.....	81
5.8.3 Başlangıç sehiminin modellenmesi.....	82
5.8.4 Hesaplamalar.....	84
5.8.5 Sonuçlar ve karşılaştırmalar.....	88
6. SMITH YÖNTEMİ.....	91
6.1 Yöntem	91
6.2 Gemi Kesitinin Elemanlara Ayırıştırılması	92
6.3 Elemanlarda Eksenel Yer Değiştirme.....	95
6.4 Hesap Tablolarının Oluşturulması.....	96
6.5 Smith Yönteminde Sınırlar ve Sayısal Hatalar	97
6.6 Sayısal Çalışmalar	101
6.7 I Kiriş Hesaplamaları.....	101
6.8 Kutu Kiriş Hesaplamaları	104
6.8.1 MST-4 çözümü	105
6.8.2 MST-3 çözümü	108
6.8.3 Karşılaştırmalar.....	111
7.SAYISAL ÇALIŞMA	113
7.1 Fırkateyn Analizi	113
7.1.1 Kesit	114
7.1.2 Elemanlara ait hesaplamalar	116
7.1.3 Smith yöntemi ile çözüm	117
7.1.4 Karşılaştırmalar.....	120
7.2 “Energy Concentration” Büyük Tonajlı Ham Petrol Tankeri Analizi.....	122
7.2.1 Model	123
7.2.2 Sonuçlar	126
7.2.3 Karşılaştırma	127
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	129
8.1 Öneriler	130
KAYNAKLAR.....	131
EKLER	135
ÖZGEÇMİŞ.....	151

KISALTMALAR

ABS	: American Bureau of Shipping
CDC	: Column Deflection Curve
ISSC	: International Ship and Offshore Structures Congress
ISUM	: Idealized Structure Unit Method
ISFEM	: Intelligent Supersize Finite Element Method
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SSC	: Ship Structural Committee
VLCC	: Very Large Crude Carrier
YMÇ	: Yüksek Mukavemetli Çelik
GÇ	: Gemi İnşaat Çeliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Birinci iterasyon ($z_1=30\text{mm}$, $du=0\text{ mm}$)	38
Çizelge 4.2 : İkinci iterasyon ($z_1=45.06\text{ mm}$, $du= 6.20\text{ mm}$)	38
Çizelge 4.3 : Üçüncü iterasyon ($z_1=44.64\text{ mm}$, $du= 6.08\text{ mm}$)	38
Çizelge 4.4 : Eleman uzunluğuna bağlı elde edilen sonuçlar	39
Çizelge 4.5 : Eksenel yer değiştirme ihmal edilirse elde edilen sonuçlar	39
Çizelge 4.6 : Birinci iterasyon hesap tablosu.....	42
Çizelge 4.7 : Son iterasyon hesap tablosu	43
Çizelge 4.8 : Karşılaştırmalı sonuçlar.....	44
Çizelge 4.9 : 2 elemanlı çözüm	50
Çizelge 4.10 : Eleman sayısına bağlı elde edilen sonuçlar.....	51
Çizelge 4.11 : Eleman sayısına bağlı olarak elde edilen ANSYS sonuçları.....	51
Çizelge 4.12 : $P=6000\text{ N}$ (1. iterasyon)	53
Çizelge 4.13 : $P=7000\text{ N}$ (1. iterasyon)	54
Çizelge 4.14 : Eleman sayısına bağlı olarak elde edilen çökmeler.....	56
Çizelge 4.15 : 2 elemanlı başlangıç sehim hesapları, $du_0=0\text{ mm}$	58
Çizelge 4.16 : 2 elemanlı başlangıç sehim hesapları, $du_0=0.4\text{ mm}$	58
Çizelge 4.17 : 2 elemanlı sehim hesaplamaları	59
Çizelge 5.1 : Eğilme rijitliği hesabı	82
Çizelge 5.2 : Başlangıç sehim hesabı	83
Çizelge 5.3 : Sehim hesabı-kontrol.....	84
Çizelge 5.4 : Sehim hesabı-başlangıç sehimli	85
Çizelge 5.5 : Eğilme rijitliği-etkin genişliğe göre	87
Çizelge 5.6 : Sehim hesabı	87
Çizelge 5.8 : Etkin genişlik iterasyonları.....	88
Çizelge 6.1 : Örnek hesaplama tablosu.....	97
Çizelge 6.2 : Moment hesabı	102
Çizelge 6.3 : 12 elemanlı moment hesabı.....	103
Çizelge 6.4 : Malzeme özellikleri.....	105
Çizelge 6.5 : Moment hesabı	107
Çizelge 6.6 : Moment düzeltmesi	107
Çizelge 6.7 : Toplam momentler	108
Çizelge 6.8 : Moment hesabı-3.05-%10 artık kaynak gerilmeli.....	109
Çizelge 6.9 : Moment düzeltme.....	109
Çizelge 6.10 : Toplam momentler	110
Çizelge 6.11 : Moment hesabı-3.05-%10 artık kaynak gerilmeli.....	110
Çizelge 6.12 : Moment düzeltme.....	111
Çizelge 6.13 : Toplam momentler	111
Çizelge 6.14 : Nishihara deney sonuçları-karşılaştırmalar	112
Çizelge 7.1 : Hesap tablosu	118
Çizelge 7.2 : Profil özellikleri.....	123

Çizelge 7.3 : Sonuçlar	127
Çizelge B.1 : Hesap tablosu “Energy Concentration”	146

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Titanik yolcu gemisi [1].	1
Şekil 1.2 : “Energy Concentration” petrol tankeri [1].	2
Şekil 1.3 : Moment eğrilik diyagramı [6].	6
Şekil 1.4 : Ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme diyagramı [6].	7
Şekil 2.1 : Uzay eğrisi.	11
Şekil 2.2 : Kiriş üzerinde eğrilik.	12
Şekil 2.3 : Kiriş parçasında eğilme.	13
Şekil 2.4 : Gerilme-şekil değiştirme diyagramı.	14
Şekil 3.1 : Süreklilik dereceleri [32].	22
Şekil 3.2 : Eğriliğin yön değiştirmesi.	23
Şekil 3.3 : Çember yay açısı.	24
Şekil 3.4 : Yay çiftleriyle modellenen eğri.	25
Şekil 3.5 : Çember yayı.	25
Şekil 3.6 : Yay çiftleriyle oluşan eğri.	26
Şekil 4.1 : Yanal kuvvet altında kiriş.	30
Şekil 4.2 : Birinci ve ikinci merteye teorisinde moment hesabı.	30
Şekil 4.3 : Elemanlara ayrılmış kiriş eksen.	31
Şekil 4.4 : Ardışık eleman hesaplamasında eleman uzunluğu.	32
Şekil 4.5 : Eksenel yer değiştirme.	33
Şekil 4.6 : Tekil kuvvet altında iki ucu basit mesnet sınır koşullu kiriş.	35
Şekil 4.7 : Tekil kuvvet altında denge durumuna ulaşılmış sehim.	36
Şekil 4.8 : Birinci iterasyon sonucu sehim eğrisi.	37
Şekil 4.9 : Ankastre sınır koşullu kiriş.	39
Şekil 4.10 : İdeal pekleşen elasto-plastik malzeme diyagramı.	40
Şekil 4.11 : Moment dağılımı.	40
Şekil 4.12 : M-r diyagramı.	41
Şekil 4.13 : Eleman gösterimleri.	42
Şekil 4.14 : Birinci iterasyon sehim eğrisi.	43
Şekil 4.15 : Son iterasyon sehim eğrisi.	44
Şekil 4.16 : Mesnetler arası mesafe değişimleri.	45
Şekil 4.17 : Eleman üzerine etki eden normal kuvvet.	46
Şekil 4.18 : Her iki ucu basit mesnet sınır koşullu kiriş ve özellikleri.	47
Şekil 4.19 : İki elemanlı çözüm.	48
Şekil 4.20 : Sehim eğrisi.	50
Şekil 4.21 : ANSYS programından elde edilen çökme değerleri.	51
Şekil 4.22 : Eksenel basınç kuvveti altında kiriş.	52
Şekil 4.23 : Sehim eğrisi.	53
Şekil 4.24 : Son iterasyona ait sehim eğrisi.	54
Şekil 4.25 : Sehim eğrisi birinci iterasyon.	54
Şekil 4.26 : Sehim eğrisi denge durumu.	55

Şekil 4.27 : Başlangıç öncesi ve sonrası sehimler.	56
Şekil 4.28 : İkinci merteye etkiler altında başlangıç öncesi ve sonrası sehimler.	57
Şekil 5.1 : Stifnerlenmiş plak eleman.	61
Şekil 5.2 : Lokal plak burkulması [51].	63
Şekil 5.3 : Plak üzerinde gerilme dağılımı.	64
Şekil 5.4 : Lineer olmayan gerilme dağılımı ve ortalaması.	64
Şekil 5.5 : Plak üzerinde gerilme dağılımı ve etkin genişlikler.	66
Şekil 5.6 : Artık kaynak gerilmeleri [50].	67
Şekil 5.7 : Kaynaktan doğan gerilmeler ve idealleştirilmesi [1].	68
Şekil 5.8 : Artık kaynak gerilme etkisi-düşük gerilmeler.	68
Şekil 5.9 : Artık kaynak gerilme etkisi-burkulma.	69
Şekil 5.10 : Kompozit yapı.	70
Şekil 5.11 : Gerilme şekil değiştirme grafikleri ve en kesit üzerindeki dağılımları.	70
Şekil 5.12 : Kompozit yapı gerilme ve şekil değiştirme dağılımı.	71
Şekil 5.13 : Basınç gerilmesi altında burkulma.	72
Şekil 5.14 : Etkin genişlik ve eksantrik [45].	73
Şekil 5.15 : Eksantrik oluşumu.	73
Şekil 5.16 : Plastik mafsallarda denge.	76
Şekil 5.17 : Deney numunesi [50].	78
Şekil 5.18 : Uç kısımlar sınır düzenleyicisi [50].	78
Şekil 5.19 : Kenar sınır koşulu düzenleyicisi [50].	79
Şekil 5.20 : Malzeme özellikleri [50].	80
Şekil 5.21 : Artık kaynak gerilme dağılımı [50].	80
Şekil 5.22 : Deney düzeneği [50].	81
Şekil 5.23 : Sehim eğrisi.	84
Şekil 5.24 : SP1.1 sonuçları.	89
Şekil 5.25 : SP1.4 sonuçları.	89
Şekil 6.1 : Gemi elemanı [52].	91
Şekil 6.2 : Eleman tipleri [55].	92
Şekil 6.3 : Elemanlara ayırma işlemi [56].	93
Şekil 6.4 : Köşe eleman [55].	93
Şekil 6.5 : Stifnerlenmiş plak eleman.	94
Şekil 6.6 : Eleman numaralandırılması [2].	94
Şekil 6.7 : Eğrilik durumları [55].	95
Şekil 6.8 : Elemanlarda eksenel yer değiştirme [52].	96
Şekil 6.9 : Kutu kiriş ve gerilme, şekil değiştirme dağılımları.	98
Şekil 6.10 : Ortalama ve gerçek gerilme.	99
Şekil 6.11 : Lineer ve lineer olmayan hesaba göre ortalama gerilme dağılımları.	99
Şekil 6.12 : Lineer olmayan ve lineer ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme.	100
Şekil 6.13 : Düzeltilmiş ortalama gerilme dağılımı.	100
Şekil 6.14 : Eğilme momenti altında kiriş.	101
Şekil 6.15 : Dört elemanlı kiriş.	102
Şekil 6.16 : On iki elemanlı kiriş.	103
Şekil 6.17 : Kutu kirişler-Nishihara deneyleri [57].	104
Şekil 6.18 : Eleman numaralandırma ve eleman tipleri.	105
Şekil 6.19 : P-du diyagramı.	106
Şekil 6.20 : P-du diyagramı.	108
Şekil 7.1 : Fırkateyn kesiti.	113
Şekil 7.2 : Deney seti [59].	114
Şekil 7.3 : Fırkateyn en kesit resmi [59].	115

Şekil 7.4 : Eleman numaralandırması.....	116
Şekil 7.5 : P-du diyagramı.....	117
Şekil 7.6 : Sonuçlar.....	120
Şekil 7.7 : Karşılaştırmalı sonuçlar.....	121
Şekil 7.8 : Seçilmiş sonuçlar.....	122
Şekil 7.9 : “ <i>Energy Concentration</i> ” göçme sonrası [1].	122
Şekil 7.10 : Tank planları [2].	123
Şekil 7.11 : En kesit [2].	124
Şekil 7.12 : Profil dağılımı [2].	125
Şekil 7.13 : Eleman numaralandırması [2].	125
Şekil 7.14 : E102 numaralı elemana ait P-du diyagramları.....	126
Şekil A.1 : E54 P-du diyagramı.....	136
Şekil A.2 : E 55 P-du diyagramı.....	136
Şekil A.3 : E 75 P-du diyagramı.....	136
Şekil A.4 : E 76,E57,E59-E63,E65-E69,E71-E74 P-du diyagramı.....	137
Şekil A.5 : E96 P-du diyagramı.....	137
Şekil A.6 : E48 P-du diyagramı.....	137
Şekil A.7 : E97 P-du diyagramı.....	138
Şekil A.8 : E49 P-du diyagramı.....	138
Şekil A.9 : E102 P-du diyagramı.....	138
Şekil A.10 : E50 P-du diyagramı.....	139
Şekil A.11 : E51 P-du diyagramı.....	139
Şekil A.12 : E126,E132 P-du diyagramı.....	139
Şekil A.13 : E101 P-du diyagramı.....	140
Şekil A.14 : E114-E116 P-du diyagramı.....	140
Şekil A.15 : E23 P-du diyagramı.....	140
Şekil A.16 : E103 P-du diyagramı.....	141
Şekil A.17 : E124 P-du diyagramı.....	141
Şekil A.18 : E125 P-du diyagramı.....	141
Şekil A.19 : E130 P-du diyagramı.....	142
Şekil A.20 : E98 P-du diyagramı.....	142
Şekil A.21 : E99 P-du diyagramı.....	142
Şekil A.22 : E100 P-du diyagramı.....	143
Şekil A.23 : E111-E113 P-du diyagramı.....	143
Şekil A.24 : E117,E120 P-du diyagramı.....	143
Şekil A.25 : E44-E45 P-du diyagramı.....	144
Şekil A.26 : E94-E95 P-du diyagramı.....	144
Şekil A.27 : E43 P-du diyagramı.....	144
Şekil A.28 : E41-E42 P-du diyagramı.....	145
Şekil A.29 : E92-E93 P-du diyagramı.....	145

SEMBOL LİSTESİ

A	: Kesit alanı
b	: Plak genişliği
be	: Etkin plak genişliği
b_f	: Alın laması genişliği
dc	: Çember yayı giriş uzunluğu
dL	: Giriş boyundaki küçülme
ds	: Parça uzunluğu
du	: Eksenel yer değiştirme
du₀	: Başlangıç konumunda eksenel yer değiştirme
du_e	: Etkin genişlik nedeniyle eksenel yer değiştirme
du_i	: Eleman yatay yer değiştirmesi
dw_i	: Eleman dikey yer değiştirmesi
dθ	: Çember yay merkez açısı
E	: Elastisite modülü
F	: Yanal tekil kuvvet
h_w	: Gövde yüksekliği
I	: Atalet momenti
K	: Etkin genişlik oranı
k	: Burkulma sabiti
L	: Giriş boyu
L^{sağ}	: Girişin başlangıç noktasından sağ tarafındaki uzunluğu
L^{sol}	: Girişin başlangıç noktasından sol tarafındaki uzunluğu
M	: Moment
O	: Çember merkezi
P	: Eksenel kuvvet
r	: Eğrilik yarıçapı
r₀	: Başlangıç durumunda eğrilik yarıçapı
t	: Plak kalınlığı
T_A	: Birim teğet vektörü
t_f	: Alın laması kalınlığı
x,y,z	: Koordinat eksenleri
z_D	: Giriş ekseninin girişin dip noktasından mesafesi
z_{De}	: Etkin genişlikli durumda eksenin dip noktadan mesafesi
z_G	: Katmanın ağırlık merkezinin dip noktadan mesafesi
z_T	: Tarafsız eksenin dip noktadan mesafesi
ε_{akma}	: Akmanın başladığı şekil değiştirme oranı
η	: Kaynağın etki ettiği genişlik değeri
θ	: Açı
σ_{akma}	: Akmanın başladığı gerilme değeri
σ_{crp}	: Lokal plak burkulmasının başladığı gerilme değeri
σ_{maks}	: Plak üzerindeki en büyük gerilme değeri
σ_{ort}	: Plak üzerindeki ortalama gerilme değeri

Φ	: Eğrilik değeri
Φ_0	: Başlangıç eğrilik değeri
Φ_F	: Zorlamaya karşılık oluşan eğrilik değeri
α	: Eğim

GEMİ KİRİŞİNİN NİHAİ MUKAVEMETİNİN TAYİNİ

ÖZET

Gemilerin nihai mukavemetini hesaplamak amacıyla kademeli göçme analiz yöntemleri incelenmiştir. Hızlı ve etkin çözüme ulaşmak için Smith yöntemi tercih edilmiştir. Smith yöntemi oldukça basit bir yöntem olmakla birlikte başarısı hesaplamada kullanılacak elemanlara ait ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme diyagramlarına bağlıdır.

Elemanlara ait çözümlemede iki boyutlu plak davranışının modellendiği çözüm yerine tek boyutlu ve plak davranışının etkin genişlik tanımı yardımıyla lineerleştirilerek modellendiği giriş yöntemi seçilmiştir. Bu sayede çözümleme süresinde avantaj elde edilmesi amaçlanmıştır.

Smith yönteminde daha başarılı sonuç elde etmek amacıyla eleman çözümleri üzerinde durulmuştur. Hesaplamalar elemanın sadece lineer değil geometri ve malzeme olarak lineer olmayan davranış gösterdiği bölgeyi de kapsamaktadır. Bu bölgede ikinci mertebe teorisinin etkin olması nedeniyle geometri büyük önem kazanmaktadır. Şekil değiştirmeye bağlı olarak geometrinin oluşturulması ve sehimin hesaplanması gerekmektedir. Sehimin hesabına ilişkin yapılan çalışmalar incelenmiştir. Moment ve eğrilik arasında ilişki ilk olarak Jacob Bernoulli tarafından bulunmuştur. Daha sonra öğrencisi Euler tarafından varyasyonel hesap kullanılarak eğrinin denklemi diferansiyel denklemler yardımıyla hesaplanmıştır. Takip eden çalışmalarda ise araştırmacılar Euler'in izinden giderek eğri denkleminde ister analitik ister sayısal çözümleme ile olsun diferansiyel denklemleri kullanmışlardır.

Hesaplamaların özünde kesite ait moment değerine bağlı olarak bir eğrilik değeri hesaplanması bulunmaktadır. Bu eğrilik değeriyle sehimin oluşturulmasına çalışılmıştır. Öncelikle eğriliğin tanımı incelenmiştir. Eğriliğin fiziksel, geometrik anlamlarına bağlı olarak eğrinin nasıl modellenebileceği üzerinde durulmuştur. Eğrilik değerinin sabit olduğu bölgede sehimin çember yayı formunda olduğu görülmüştür. Bu amaçla çember yaylarından eğri modellemek için gerekli şekil ve süreklilik şartları incelenmiştir. Çember yayları kullanılarak eğri modelleme yöntemi olan Yay-çifti eğri uydurma yöntemi geliştirilerek eğrilik değerlerine bağlı olarak eğri modelleme yöntemi geliştirilmiştir.

Geometrik olarak eğrilik değerleri yardımıyla eğri modellemesi giriş hesaplamalarında uygulanmıştır. Yöntem öncelikle eğilme problemine uygulanmıştır. İlk aşamada büyük yer değiştirmelerin olduğu koşullarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. İkinci aşamada ise malzeme açısından lineer olmayan davranışlar altındaki çözüm gerçekleştirilmiştir.

Eğilme problemlerinde yöntemin başarısı kanıtlandıktan sonra burkulma problemleri incelenmiştir. Yapılan sayısal çalışmalarla çatalsız burkulmaya ait örnek problemlerle başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çatallı burkulmada ise Euler burkulma problemi ile karşılaştırma yapılmıştır. Burkulma kriteri uygulanmadan çözümün önerilen yöntemle mümkün olduğu gösterilmiştir. En son olarak burkulma üzerinde

büyük etkiye sahip başlangıç sehiminin modellenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu sayede karmaşık dahi olsa plastik şekil değiştirmeye uğramış yapılara ilişkin çözümleme yapılmasının önü açılmış olmaktadır.

Aynı yöntemde stifnerlenmiş plaklar için de başarılı sonuçlar elde etmek üzere plağın etkileri üzerine durulmuştur. Etkin genişlik tanımı kullanılarak plak üzerinde oluşacak lineer olmayan gerilme dağılımları lineerleştirilmiştir. Bu lineerleştirme sayesinde plak denklemlerine ait çözüm yapmaksızın kiriş yöntemi kullanılmaya devam edilmiştir. Stifnerlenmiş plağın üretim aşamasında kaynak yönteminin doğuracağı sonuçlar incelenmiş, artık kaynak gerilmelerinin çözüm üzerine etkileri modellenmiştir. Farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerden üretilmiş olan plak ve stifnerin durumu gözetilerek genel eğrilik hesaplarına ait işlem adımları oluşturulmuştur. Yapılan tüm geliştirmelerin başarısını test etmek amacıyla sonlu elemanlar analizinden deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Sayısal çalışmalarda hedeflendiği üzere yüksek başarı düşük modelleme ve çözümleme süreleriyle elde edilmiştir.

Elemanlara ait çözümde elde edilen başarıdan sonra Smith yöntemine ait uygulamaya geçilmiştir. Basit bir kiriş üzerinde Smith yönteminin gösterilmesinden sonra yine deneysel bir çalışma olan stifnerlenmiş kutu kirişe ait sayısal çözümleme yapılmıştır. Sonuçlarda başarının artması için Smith yönteminde oluşacak sayısal hatalar incelenmiştir. Sayısal hataların bertaraf edilmesine yönelik iyileştirme çalışmalarında bulunulmuştur. Bu çalışmalar neticesinde geliştirilmiş Smith yöntemiyle kutu kirişte çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların geliştirdiği yöntemlerden elde ettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışması gerçekleşmiş 1/3 ölçeğe sahip fırkateyn gemisine ait veriler kullanılarak sayısal hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların geliştirdikleri yöntemlere ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Son sayısal çalışmada ise büyük tonajlı ham petrol tankerine ait çözümleme yapılmış, aynı şekilde diğer araştırmacı ve klas kuralları sonuçlarıyla karşılaştırması yapılmıştır.

DETERMINATION OF ULTIMATE STRENGTH OF THE SHIP GIRDER

SUMMARY

In this thesis, progressive collapse analysis methods are investigated to determine the ship ultimate strength. For achieving fast and efficient solution, the Smith method is preferred, which uses a simple approach, though its performance closely related with the average stress-strain diagrams of the elements used in the analysis.

For element-wise solutions, one dimensional beam approach is chosen, in which the plate behavior is modeled through a linearization by using the effective width, instead of two dimensional models, thus an advantage in solution time is accomplished.

Element-wise solutions are extensively studied for achieving better results in the Smith method. In fact, the calculations should include not only the linear region, but also the nonlinear one, where the element behaves nonlinearly in both geometrical and material point of view. In this second region, geometry gains importance due to the dominance of the second order effects and geometry and displacements should be determined by considering the deformation. The studies concerning the computation of the displacement pattern are also investigated in detail. The relation between moment and curvature was first settled by Jacob Bernoulli, and the differential equations defining the curvature were obtained by Euler using variational calculus. The later studies, analytical or numerical, in the literature all rely on differential equations.

In the core of the proposed method, the curvature value lies, calculated depending on the moment value, which leads to the displacement pattern. First, the definition of the curvature is investigated by also analyzing the modeling of the curve, depending on the physical and geometrical understanding of the curvature. It is clear that, when the curvature is constant the displacement takes the form of a circular arc. Here, the required shape and continuity conditions are investigated for modeling the curvature in terms of arcs, and the Bi-arc curve fitting method, a curve modeling technique that depends on arcs, is further extended by making use of the curvatures.

Curve modeling by using geometrical curvature values is used for beam calculations. The method initially applied to the bending problems, where large deflections satisfactorily considered first, followed by allowing for material nonlinearities. Then buckling problems, with no bifurcation as well as considering bifurcation, where the results are compared with those due to the Euler buckling, are investigated, and it is showed that the solution can be achieved by the presented method without applying a buckling criteria. The last application is related with the initial displacements, having great effect on buckling, thus it becomes possible to study plastically deformed structural systems, even if they are complex.

The solution method is next applied to the stiffened plates. By using the effective width definition, the nonlinear stress variations on plate are linearized, which enables

to use the beam approach without using the plate equations for solution. The possible problems arising from the welding process during the production phase are analyzed and the effects of redundant stresses on the solution are modeled. Solution steps for curvature computations are established by considering plates and stiffeners produced from materials having different mechanical properties. All made enhancements are tested by comparing the results with those obtained from the finite element analyses as well as experiments. As it should be aimed from numerical techniques, high quality results are achieved with low modeling and computation times.

After the element-wise achievement, an application for the Smith method is performed. Application of the Smith method is demonstrated through a simple beam and an experimentally analyzed stiffened box beam. For reducing the observed numerical errors several improvements are made, and the resulting values for the box beam show perfect agreement with the data in the open literature.

The final applications of the method are an experimentally studied 1/3 scaled frigate model and a very large crude carrier, where the comparison of the predicted values with the results is also presented.

1. GİRİŞ

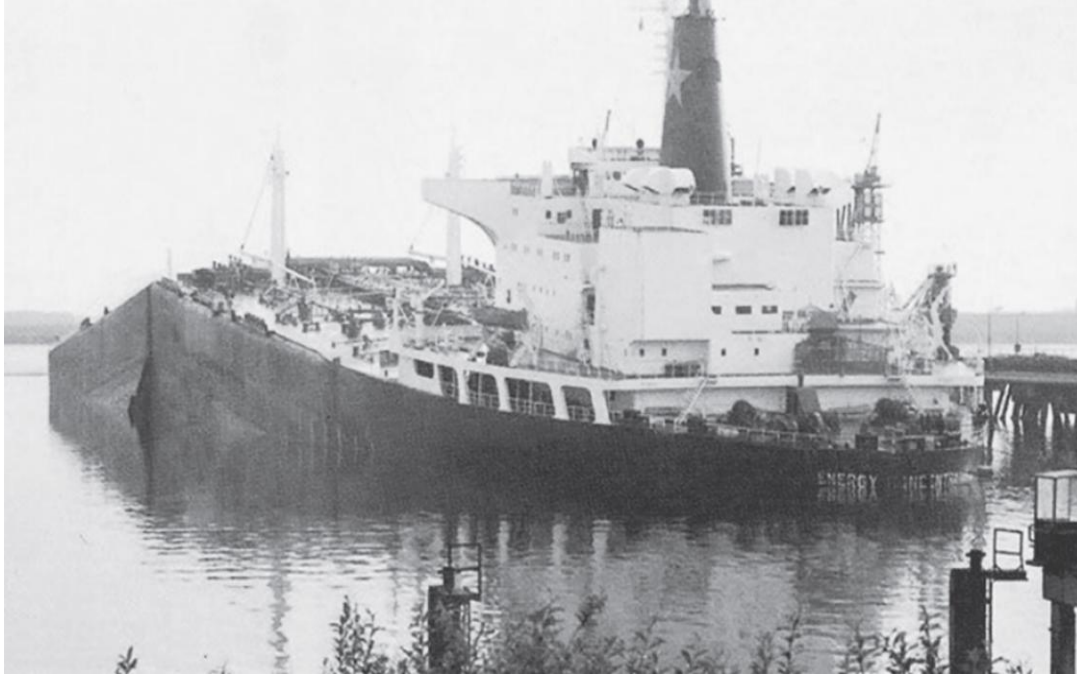
Gemiler çoğunlukla uluslararası denizcilik otoriteleri ve klas kuruluşları tarafından verilen kurallar çerçevesinde boyutlandırılmaktadır. Bu kurallarla imal edilen gemi bünyesinin kabul edilebilir bir güvenlik seviyesinde olması garanti altına alınmaya çalışılır. Gemiler elde olmayan nedenlerden veya öngörülemeyen sebeplerden ötürü zorlama kuvvetlerini karşılayamayarak yapısal bozulmaya, göçmeye uğrayabilir.

Geleneksel hesap yöntemlerinde yapısal bozulmaya başladıktan sonra sistemin kalan dayanımı için bir öngöründe bulunulmaz. Gerçekte ise bir yapı yapısal bozulmaya başladıktan sonra tümüyle kopma/kırılma gerçekleşinceye kadar bir yük taşıma kapasitesi olacaktır. Gemilerde yapısal bozulmalar genel olarak plastik şekil değiştirme, burkulma, kopma ve yırtılma şeklinde olmaktadır. Sistemdeki gerilmelere ek olarak başlangıç sehim, artık gerilmeler, korozyon hasarları ve yorulma çatlakları gibi faktörler yapısal bozulmaları hızlandırmaktadır. Herhangi bir nedenden ötürü yapısal bozulmaya başlayan geminin yapısal bozulma sonrasındaki mukavemet değerinin bilinmesi ihtiyaç anında hayati bir bilgi olacaktır.



Şekil 1.1 : Titanik yolcu gemisi [1].

Gemi kazalarında en bilineni şüphesiz 1912 yılında meydana gelen Şekil 1.1’de yer alan Titanik yolcu gemisinin batmasıdır [1]. Çatışma nedeniyle su alan bölmelerin oluşturduğu yüksek eğilme momentine gemi karşı koyamamış ve ikiye ayrılmıştır [1]. Sadece olağandışı durumlarda değil bazen yükleme boşaltma hatalarında da gemi kayıpları yaşanmaktadır. Şekil 1.2’de yer alan “Energy Concentration” adlı ham petrol tankeri güvenli bir şekilde limana gelmiş ama yük boşaltması sırasında kırılmıştır [1,2].



Şekil 1.2 : “Energy Concentration” petrol tankeri [1].

1.1 Çalışmanın Amacı

Gemi mukavemetinde iki ayrı mukavemet hesabı bulunmaktadır, bunlar boyuna mukavemet ve enine mukavemettir. Bunların içinde gemi yapısının güvenliğine yönelik temel ve en önemli hesap türü gemi boyuna mukavemeti diğer bir deyişle gemi kiriş mukavemetidir [3]. Bu tezin içeriği gemi kiriş mukavemetinin kapsamı içerisinde yer almaktadır.

Yapısal bozuluma uğrayan gemiler incelendiğinde genel olarak sebepleri hatalı yükleme/boşaltma, büyük dalgalı havalarda, çarpışma veya karaya oturma neticesinde mukavemetin yetersiz kalması sayılabilir. Bu tip hasarlı gemilerde nihai mukavemetin ve göçme sonrası mukavemetinin bilinmesi çok önemlidir. Acil durumlarda hızlı ve güvenilir hesap sonuçları doğru karar vermek için büyük

ihtiyaçtır. Boyuna eğilme momentinde meydana gelen artışlar elemanlarda burkulma veya plastik şekil değiştirme neticesinde yapısal bozulmaya, göçmeye sebep olabilir. Yapısal bozulmaların dikkate alınarak gerçekleştirilen hesaplama Kademeli Göçme Analizi “*Progressive Collapse Analyse*” adı verilmektedir. 2008 yılında Uluslararası Klas Kuruluşları Birliği “*International Association of Classification Societies-IACS*” kuralları içerisinde kademeli göçme analizi yerini almıştır [1].

Klas kuruluşları tarafından verilen kurallarda dâhil edilemeyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar genel olarak kullanılan malzeme parametrelerindeki bilinmeyenler, levha ve kirişlerdeki başlangıç deformasyonları, kaynak sonrasında oluşan artık gerilmelerdir. Tüm bu belirsizlikleri bünyesinde bulunduran hesaplama metodlarının daha efektif olacağı açıktır.

Bu tez çalışmasında amaçlanan gemi kirişinin nihai mukavemet değerinin tayini için hızlı ve güvenilirliği yüksek hesaplama modeli geliştirmektir.

1.2 Gemi Kirişinde Göçme Mekanizması

Gemi yapısı farklı boyut ve mekanik özelliklere sahip stifnerlenmiş plak elemanlardan meydana gelmektedir. Gemi kirişine etkiyen zorlamalar kesitler üzerinde şekil değiştirmelere sebep olmaktadır. Şekil değiştirmelere ve elemanların malzeme davranış özelliklerine bağlı olarak da kesit üzerinde gerilme dağılımı bulunmaktadır. Elemanlara etkiyen gerilme değerinin yükselmesiyle yapısal bozulmalar başlamaktadır. Gemi yapısını oluşturan elemanlara ait yapısal bozulmalar genel olarak burkulma ve/veya malzeme davranışının elastik bölge dışına çıkması şeklinde olmaktadır. Yapısal bozulmaya başlayan elemanın mukavemetinde azalma meydana gelecektir. Mukavemetteki bu azalma kesitin daha büyük şekil değiştirmesiyle karşılanacaktır. Artan şekil değiştirmelere bağlı olarak tetikleme mekanizmasıyla daha çok elemanın yapısal bozulmaya başlamasına, göçmesine neden olacaktır. En kesitin şekil değiştirmeye daha fazla mukavemette artış sağlamayacağı nokta gemi kirişinin nihai mukavemet değeri olmaktadır. Bu noktanın aşılmasıyla en kesit tümüyle mukavemetini kaybetmeyecek, meydana gelen plastik şekil değiştirmelerin artmasına bağlı olarak mukavemet kademeli olarak azalacak ve en sonunda tümüyle mukavemetini yitirecektir.

1.3 Kademeli Göçme Analizi Yöntemleri

Gemi kiriş mukavemetinde çeşitli bozulmalar sebebiyle oluşacak dayanım azalmalarını göz önüne alan kademeli hesaplama çalışmalarının temeli ilk olarak Caldwell tarafından gerçekleştirilmiş ve geliştirilerek günümüze kadar gelmiştir. Caldwell tarafından 1965 yılında gemilerin plastik dizaynı tanıtılmıştır [3]. En kesitin tam plastik momenti esasına dayanan bu yöntemde burkulma ve basınç etkisi altındaki elemanların taşıma kapasitesi azaltılarak yapılmıştır [4]. Hesaplamalarda elemanda meydana gelen göçme sonrası dayanımı göz ardı edilmiştir. En kesit üzerindeki gerilme dağılımını yaptığı teorik, sayısal ve deneysel çalışmalara göre öngörerek nihai mukavemeti hesaplarını gerçekleştirmiştir [3].

Caldwell tarafından başlatılan kademeli göçme analizi Smith tarafından geliştirilmiştir [3]. Smith yönteminde en kesiti küçük elemanlara ayırmıştır. Ayırıklaştırılan elemanların eksenel kuvvetler altında akma ve burkulma etkilerini de göz önüne alınmasıyla gerilme şekil değiştirme bağıntıları elde edilmiştir. Ayırıklaştırılan elemanların dayanım analizleri sonlu elemanlar analiziyle ideal elasto-plastik büyük yer değiştirmeler altında gerçekleştirilmiştir [5]. Daha sonra düzlem kesitler düzlen kalır prensibine ve her ayırık elemanın gerilme şekil değiştirme bağıntısına uygun olarak davranacağı kabulüyle eğilme rijitliklerine bağlı olarak kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiştir. Yöntemin başarısı ayırıklaştırılan elemanlara ait dayanım hesaplamalarındaki hassasiyete bağlı olmaktadır [1,6]. IACS kurallarında kademeli göçme analizi Smith yöntemi benimsenerek başlangıç sehimini gibi birçok parametre göz önüne alınmadan yer almaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi de kademeli göçme analizi için oldukça etkili bir yöntemdir. 1983 yılında ABS tarafından sonlu elemanlar analizi göçme hesaplarında ilk kez kullanılmıştır [3]. Daha sonra takip eden araştırmacılar tarafından sonlu elemanlar analizinde kullanılan elemanlara ait özellikleri geliştirilerek kullanılmaya devam edilmiştir. Gemi en kesitinin bir bütün olarak modellenmesiyle stifnerlenmiş plakların birbiriyle olan etkileşimleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca hesaplamalarda tüm yapının burkulmasına ilişkin öngörü Smith yönteminin aksine mümkün olmaktadır [1].

Bir diğer yöntem ise 1984 yılında Ueda ve Rashed tarafından geliştirilen idealleştirilmiş yapısal birim yöntemidir (*Idealized Structural Unit Method-ISUM*).

Smith yönteminden farklı olarak sadece eğilmenin etkin olduğu durum için değil kesme ve burulma kuvvetleri de göz önüne alarak hesaplamalar yapılır [1,7]. Smith yöntemine benzeyen bu yöntemde ayrıklaştırılan elemanlar daha büyük yapısal birimler seçilerek elde edilen değerleri en kesite ait dayanım hesaplamalarında kullanılır. Hassas sonuçlar için gelişmiş elemanlara ihtiyaç duyulan bu yöntemde birçok araştırmacı tarafından yeni eleman tipleri geliştirilmiştir [1].

Gemilerin kademeli göçme analizlerine yönelik geliştirilen son yöntem ise 2006 yılında Paik tarafından geliştirilen akıllı süpersize sonlu elemanlar yöntemidir (*Intelligent Supersize Finite Element Method-ISFEM*). ISUM'dan farklı olarak bu yöntemde farklı eleman tipleri çeşitli yapısal modelleme teknikleri kullanılarak büyük yapısal birimler içerisinde kullanılabilir. Ayrıca ISUM ile yapılan hesaplamalarda elemanların gerilme şekil değiştirme bağıntıları için oluşturulan kapalı formlardaki ifadeler yerine geleneksel lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi yapısı kullanılmaktadır. Süper boyut sonlu elemanlar kullanılarak burkulma ve plastik göçme haricinde çarpışma kırılma gibi durumlardaki hesaplamalar pekleşme özelliği de dikkate alınarak hesaplanmaktadır [1].

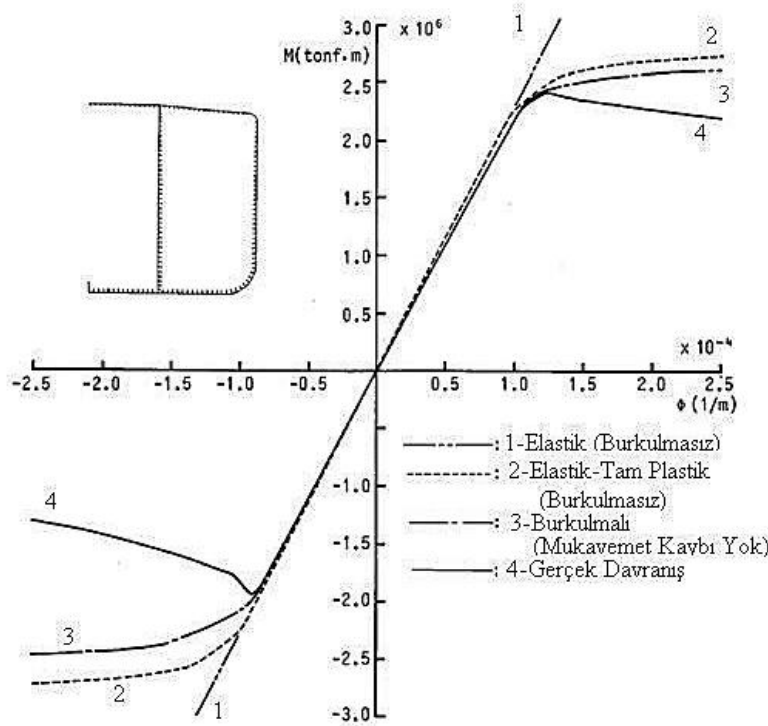
1.4 Yöntemin Seçimi

Bu tez çalışmasında gemi kiriş mukavemeti için hızlı ve güvenilir çözümleme elde edilmesi amaçlanmıştır. Dayanım hesapları modelleme ve çözümleme evrelerinden geçmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi oldukça uzun modelleme ve çözümleme süresine gereksinim duymaktadır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar lineer olmayan durumlar için her zaman gerçeği yansıtamamaktadır [1]. Ayrıklaştırmayla yapılan çözüm yöntemlerinde ise başarı ayırık elemana ait davranışın gerçeğe yakınlığına bağlıdır. Ayrıklaştırılan elemanların çözümünün sonlu elemanlar çözümüne bağlı olması hassasiyetin yüksek olmasına karşılık modelleme ve çözümleme süresi bakımına hedeften uzak bulunmaktadır. ISUM da elemanlara ait çözümler Sonlu elemanlar yöntemi sistemi kullanılarak kapalı formda elde edilen denklemlerle sağlanmaktadır. Denklemlerin elde edilmesindeki zorluklar nedeniyle ISUM tercih edilmemiştir.

Smith yöntemi hesaplamalarda kullanılmak üzere seçilmiştir. Smith yönteminde gemi kirişinin bir bütün olarak çözümünün yerine ayrıklaştırılarak çözümü

önerilmiştir. Bu amaçla gemi kirişi stifnerler ve bunlara bağlı plaklardan oluşan elemanlara ayrılmıştır. Ayrıklaştırılan elemanlara ait ortalama gerilme ortalama şekil değiştirme diyagramları kullanılarak kademeli göçme analizi gerçekleştirilmiştir.

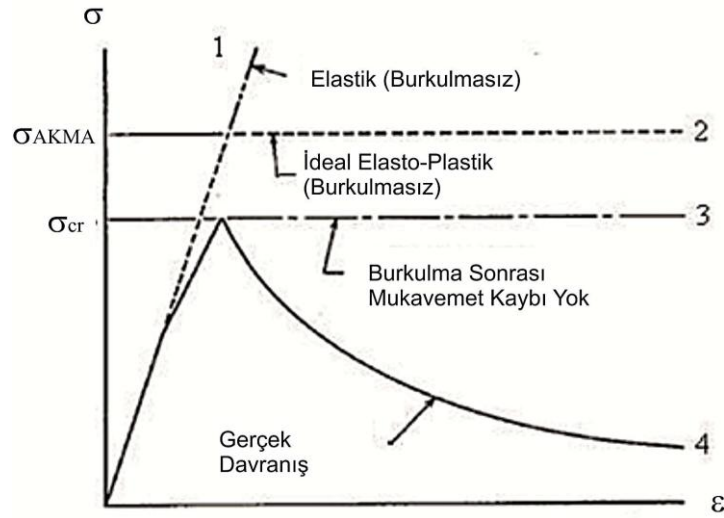
Şekil 1.3'te Yao tarafından gerçekleştirilen bir moment eğrilik diyagramı yer almaktadır [6]. Hesaplamalar gemi kirişinin sarkma ve çökme durumları gözetilerek gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda ayrııklaştırılan elemanların hassasiyetine bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıklaştırılan elemanlara ait gerilme şekil değiştirme diyagramları ise Şekil 1.4'te yer almaktadır [6].



Şekil 1.3 : Moment eğrilik diyagramı [6].

Smith yöntemiyle yapılacak hesaplamada elemanların elastik bölgede varsayılmasıyla yapılan çözüm 1 numaralı eğriyle gösterilmektedir. Elemanda burkulmanın gözetilmeyip malzeme davranışının ideal elasto-plastik olduğu varsayımıyla yapılan hesaplama sonucu 2 numaralı eğri elde edilecektir. Elemanlara ait hesaplamada yapı biraz daha gerçekçi hale getirilerek lokal plak burkulmasının da etkisi katılarak 3 numaralı eğri elde edilecektir. Bu hesaplamada elemanın burkulma durumu sonrası mukavemet azalımı dikkate alınmamıştır. Son hesaplamayı gösteren 4 numaralı eğri ise elemanın gerçek davranışını göstermektedir. Gemi kirişinde gerçek davranışa göre yapılan hesaplamada artan eğrilik değerlerine bağlı olarak başlayan yapısal bozulmalar başlamıştır. Yapısal bozulmaların başlaması verilen

eğrilik değerlerinde gemi kirişinin daha az momente karşı koyabileceğini, mukavemetinin azaldığını göstermektedir. Moment-eğrilik eğrisindeki değişim bir noktaya geldiğinde maksimum değerine ulaşacaktır. Bu değer gemi kirişinin dayanabileceği en üst mukavemet değerini, nihai mukavemetini göstermektedir. Bu değere kadar artan moment ihtiyacı eğriliğin artırılmasına bağlı olarak elemanlardaki rijitlik değerlerinden elde edilmektedir. Bu noktadan sonra eğrilik değerinin artmasına rağmen moment değerinde bir artış gözlenemeyecektir. Artış yerini azalmaya bırakacaktır. Elemanlarda başlayan yapısal bozulmalar ilerleyerek göçmeye başlatmıştır. Henüz tümüyle göçmeye uğramamış elemanlar ise dayanım göstermeye ve moment oluşturmaya devam edecekler ama göçmemiş eleman sayısındaki azalma nedeniyle moment değeri düşecektir.



Şekil 1.4 : Ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme diyagramı [6].

Smith yönteminde başarılı sonuç almak için ayrıklaştırılan elemanlara ait çözümlerin mümkün olduğunca gerçek davranışa yaklaşması gerekmektedir. Elemana ait çözüm sonlu elemanlar yöntemiyle yapılabileceği gibi kiriş yöntemiyle de yapılması mümkündür [6,8,9]. Kiriş yönteminin kullanılması çözümleme süresinde hız kazandıracaktır. Elemanların malzeme ve geometrik olarak lineer olmayan davranış gösterdiği bölgelerdeki çözüm analitik yöntemlerde yapının karmaşık olması durumunda mümkün olamamaktadır [10]. Kaldı ki çözümleme hızının yüksek olması sayısal yöntemleri tercih ettirmektedir.

Büyük yer değiştirmelerin gerçekleşmesi durumunda ikinci mertebe teorisi uyarınca artan moment değerlerinin hesabı ancak hassas sehim modellemesiyle mümkün olmaktadır. Klasik sehim hesaplamaları eğrilik değerlerini diferansiyel denklemlerin

çözümüne bağlı olarak elde etmektedir. Eğrilik değeri aynı zamanda en kesitte meydana gelen şekil değiştirmeyi de ifade etmektedir. Eğrilik değerlerinin doğrudan sehim geometrisinde kullanılması ve hassas sehim modellemesinin sayısal olarak gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Bu yöntemin geliştirilmesiyle işlemlerdeki azalma nedeniyle çözümleme sürelerindeki azalmanın yanı sıra daha hassas çözüm elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.5 Akış

İkinci bölümde kiriş ve eğrilik tanımları üzerinde durularak en kesitin zorlama neticesinde oluşturduğu eğrilik değerinin hesabı gösterilmiştir. Eğri tanımı yapılarak şekil değiştirme ile bağıntısı oluşturulmuş, fiziksel anlamı gösterilmiştir. Malzemenin mekanik davranışları özetlenerek denge denklemlerinin nasıl oluşacağı gösterilmiştir. Sonuç olarak malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olarak moment-eğrilik hesaplanmasına ilişkin aşamalar incelenmiştir.

Üçüncü bölümde malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olarak hesaplanan moment-eğrilik diyagramlarının sehim hesaplamalarında nasıl kullanılacağı gösterilmiştir. Öncelikle sehim hesaplamalarında kullanılan yöntemler üzerinde durulmuş, sonrasında yöntemin ana kavramı anlatılmıştır. Oluşturulacak sehim eğrisinin uyması gereken şekil ve süreklilik şartlarının ardından Yay-çifti eğri uydurma yöntemi açıklanmıştır. Yay-çifti eğrilik yönteminin sehim ve başlangıç sehimini hesaplamalarına uyarlanması ve denklemlerin oluşturulması gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü bölüm yöntemin kiriş elemanlara ait sayısal çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle elastik bölgede yer alan büyük yer değiştirmeli eğilme problemi üzerinde durulmuş analitik ve sonlu elemanlarla olan karşılaştırmaları yer almıştır. Daha sonra problem bir aşama ilerletilerek sınır koşulları ankastre mesnet olması durumunda pekleşen malzeme özelliklerine sahip kiriş için çözüm oluşturulmuş, yine aynı şekilde analitik ve sonlu elemanlar çözümleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Eğilme problemi karşısında yöntemin hızı ve başarısı gösterildikten sonra eksenel kuvvetler de probleme dâhil edilmiştir. Öncelikle eksenel ve yanal kuvvetler altındaki kirişe ait hesap gösterildikten sonra sadece eksenel kuvvetler altındaki kirişin sonuçları oluşturulmuştur. Çatallı ve çatalsız burkulmaya ilişkin

uygulamaların tamamlanmasıyla burkulma üzerinde yüksek etkiye sahip başlangıç sehiminin oluşturulması ve kullanılmasına ilişkin çözümlemeyle kiriş problemleri tamamlanmıştır.

Beşinci bölüm gemi en kesitini oluşturan stifnerlenmiş plakların hesaplarına ayrılmıştır. Smith yönteminde başarıyı elde etmek için stifnerlenmiş plaklara ait olabildiğince çok parametre göz önüne alınmaya çalışılmıştır. Stifnerlenmiş plakta meydana gelebilecek lokal plak burkulmalarının etkisi etkin genişlik tanımı kullanılarak göz önüne alınmaya çalışılmıştır. Ayrıca stifnerler ve plakların farklı malzemelerden oluşma ihtimali göz önüne alınarak denge denklemleri yeniden oluşturulmuş ayrıca bu malzemelerin birleşimlerinin kaynak ile gerçekleşecek olmasından ötürü meydana gelecek artık kaynak gerilmelerinin etkisi hesaplara dâhil edilmiştir. Hesaplamaları sadece nihai mukavemet değerine erişilmesiyle bitirmeyip plastik davranışları da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Sayısal çalışmalarda deneysel ve sonlu elemanlar sonuçlarıyla karşılaştırma yapılmıştır.

Stifnerlenmiş plaklarda elde edilen sonuçların nasıl kullanılacağını göstermek üzere altıncı bölümde Smith yöntemi tanıtılmış, basit uygulamalarda hesabın gerçekçiliği ve dikkat edilmesi gereken hususlar gösterilmiştir. Nishihara tarafından gerçekleştirilen deneysel kutu kirişe ait çözümleme gerçekleştirilmiş, deneysel sonuçlar ve araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Yedinci bölüm gemilere ait sayısal uygulamalara ayrılmıştır. Bir fırkateyne ilişkin deneysel çalışmanın verileri kullanılarak çözümleme ve karşılaştırma yapılmıştır. Son uygulamada ise yüksek tonajlı ham petrol tankerine (*Very Large Crude Carrier-VLCC*) ilişkin çözümleme elde edilerek diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlarla karşılaştırması yapılmıştır.

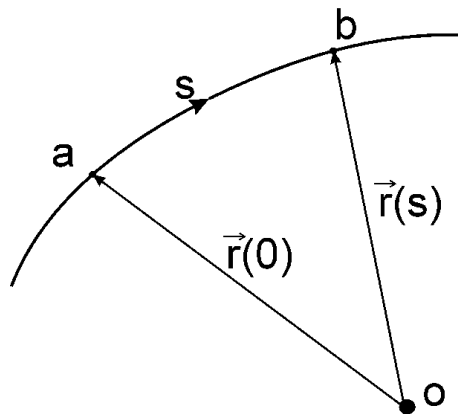
Sekizinci bölümde sonuçlar irdelenmiş ve daha sonraki çalışmalara ilişkin önerilerde bulunulmuştur.

2. EĞRİLİK HESAPLAMALARI

Gemi yapısını oluşturan elemanlara ait sehim modellenmesini gerçekleştirmek üzere kiriş elemanların davranışları incelenecektir. Kiriş elemanlarda kiriş uzunluğunun diğer boyutlarına göre büyük olduğu kabulüyle şekil değiştirmenin sadece boyuna doğrultuda olduğu kabul edilmiştir [11]. Bu amaçla bu bölümde kiriş elemanın yapacağı bir boyutlu sehim eğrisini modellemek üzere gerekli kiriş ve eğrilik tanımları üzerinde durulacak, sonrasında yapının mekanik özelliklerine bağlı olarak eğrilik değerinin nasıl hesaplanacağına ilişkin yöntemler sunulacaktır. Bu çalışmada amaçlanan en kesite etkiyen moment ve eksenel kuvvet değerinin verilmesi durumunda oluşan eğrilik değerinin hesaplanabilmesidir.

2.1 Kiriş Tanımı

Kiriş elemanlar iki boyutu diğer üçüncü boyutuna göre küçük olan cisimlerdir ve tarifleri eksen ve en kesit tanımlarıyla yapılabilir. Kiriş en kesite ait ağırlık merkezlerinden geçmekte olan eksen ile modellenenecektir. Eksen bir uzay eğrisi olup, elemanın diğerlerine göre büyük olan üçüncü boyutunu temsil eder. Bu uzay eğrisini Şekil 2.1’de gösterilen $\vec{r}(s)$ yer vektörleriyle göstermek mümkündür. En kesit ise kapalı bir eğri ile çevrelenmiş düzlem parçasıdır [11].

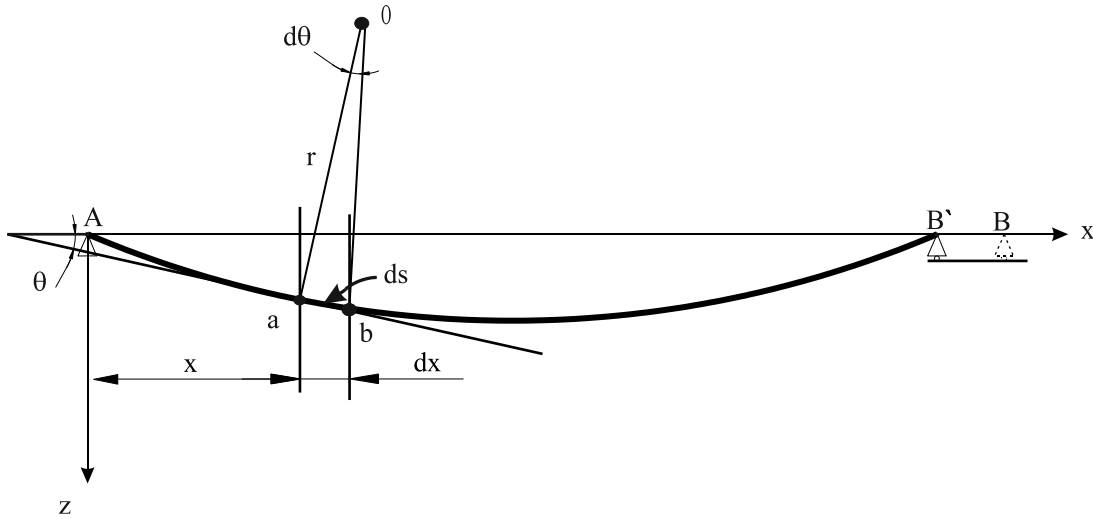


Şekil 2.1 : Uzay eğrisi.

Kesit şeklinin her iki boyutu da çubuğun uzunluğuna göre küçük olmalıdır. Kiriş Bernoulli-Navier hipotezine uygun olarak modellenerek; en kesitlerin şekil değişimi öncesinde ve sonrasında düzlem ve tarafsız eksene dik oldukları kabul edilmektedir [11,12]. Elemanın en az bir simetri düzlemi vardır ve kesit tesirleri bu düzleme etki etmektedir [13]. Hesaplamalarda ihmal edilen bir durum ise kiriş elemanının iki boyutu uzunluğunun yanında yeter derecede küçük olması nedeniyle kesme kuvvetinin eğilme ve uzama şekil değiştirmelerine etkisidir [11,14]. Bir önemli kabul ise çubuğun burulma veya çarpılma şeklinde şekil değiştirmeye uğramadığıdır.

2.2 Eğrilik

Ekseni göstermekte olan eğriyle eğrilik arasındaki bağıntıyı oluşturmak için Şekil 2.2’de gösterilen sehim eğrisi üzerinde a ve b noktaları arasında yer alan ds uzunluğundaki kiriş parçası incelenecektir. Kontrol noktalarından a noktasının x eksenine yapmış olduğu eğim açısı θ ile a ve b noktalarına ait normallerin birbiriyle yapmış olduğu açı $d\theta$ ile gösterilir.



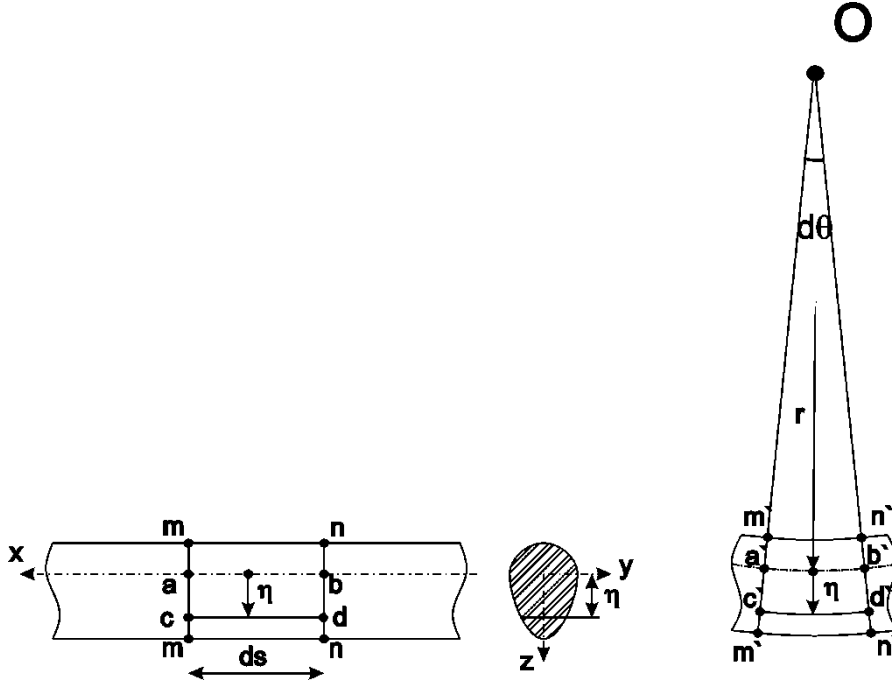
Şekil 2.2 : Kiriş üzerinde eğrilik.

Bu normallerin kesişiminden oluşan ve eğrilik merkezi olarak adlandırılan O noktasının a ve b noktalarına olan uzaklığı eğrilik yarıçapı olarak adlandırılır ve r ile gösterilir [14].

$$\Phi = 1/r \quad (2.1)$$

Tanım olarak eğrilik; eğimin eğri ekseni boyunca değişim oranıdır ve Φ ile gösterilir [14]. Eğrilik yarıçapı ile eğrilik arasındaki bağıntı ise (2.1) ile gösterilir [11]. Kiriş

parçasının yeteri kadar küçük alınmasıyla eğrilik değişiminin parça boyunca ihmal edilebilir mertebede olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda parça boyunca eğrilik yarıçapının değişmediği kabulü eğri parçasını merkezi O noktası olan bir çember yayı haline getirecektir.



Şekil 2.3 : Kiriş parçasında eğilme.

Şekil 2.3'te ds uzunluğuna sahip bir kiriş parçasının basit eğilme öncesi ve sonrası durumu şematik olarak gösterilmektedir. Eğilmeyle birlikte kiriş ipçiklerinin uzunlukları değişmektedir. Bir kısım ipçikler uzarken bir kısım ipçikler kısalmaktadır. Uzama ve kılmanın gerçekleşmediği ipçiklerin oluşturduğu eksen ise basit eğilme durumunda tarafsız eksen olarak adlandırılmaktadır [11].

Tarafsız eksene ait a ve b noktalarının şekil değiştirme sonucunda uzamanın veya kılmanın olmaması durumu ancak O merkezli ve r yarıçaplı a'b' çember yayının ds uzunluğuna eşit olmasıyla ile sağlanacaktır. Çember yayının uzunluğu çember yarıçapı ve dθ ile gösterilen merkez açısı cinsinden hesaplanabilir, (2.2) denklemiyle gösterilir.

$$ds = |ab| = |a'b'| = r \cdot d\theta \quad (2.2)$$

Şekil 2.3'te yer almakta olan tarafsız eksenden η mesafedeki cd ve c'd' ipçiklerinin durumunu incelersek, şekil değiştirmiş durumda a'b' çember yayı ile aynı yay açısına sahip olmalarından dolayı yay uzunluğu denklem (2.3) ile elde edilir.

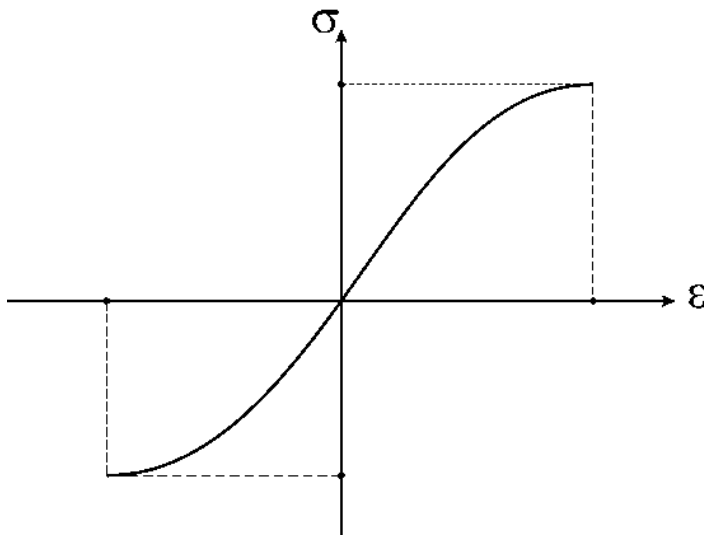
$$|c'd'| = (r + \eta)d\theta \quad (2.3)$$

Birim uzamanın klasik tarifinden, şekil değiştirme ve eğrilik arasındaki bağıntı (2.3) yardımıyla hesaplanarak denklem (2.4) ile gösterilmektedir [11]. Varılan bu sonuç yalnız Bernoulli-Navier hipotezine dayanır ve cismin malzeme özelliklerine bağlı değildir [11].

$$\varepsilon(\eta) = \frac{|cd| - |c'd'|}{|c'd'|} = \frac{(r + \eta)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{\eta}{r} = \eta\Phi \quad (2.4)$$

2.3 Mekanik Davranış

Kirişte gerilme ve şekil değiştirme arasındaki bağıntı, çubuğun malzeme özelliklerine göre değişim gösterecektir. Kiriş malzeme özellikleri bakımından homojen ve izotropik olarak kabul edilmektedir. Kirişe ait malzeme özelliklerinin lineer olmaması durumunda gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.4’te şematik olarak gösterilmektedir. Grafik çekme-basınç deneyi ile elde edilmektedir. Malzeme özelliklerine bağlı olarak davranış karakteri çekme ve basma durumu için farklılık gösterebilir. Bu diyagram farklı malzeme özelliklerine göre değişim gösterecektir. Elde edilecek diyagram yardımıyla en kesit üzerindeki bir noktaya ait birim şekil değiştirme oranının bilinmesi durumunda gerilme değeri hesaplanabilecektir.

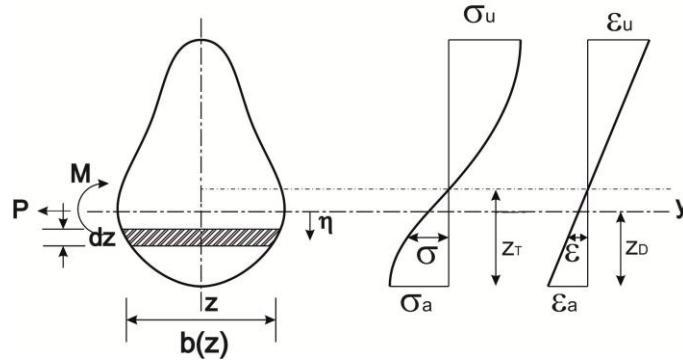


Şekil 2.4 : Gerilme-şekil değiştirme diyagramı.

2.4 Denge Denklemleri

Şekil 2.4'te verilen lineer olmayan malzemeden yapılmış bir en kesite ait gerilme-şekil değiştirme diyagramı yardımıyla denge denklemleri oluşturulacaktır. En kesit üzerinde uygulanacak denge denklemleri eksene ait nokta üzerinde dış kuvvetlerin gerilmeler ile dengede olması gerekmektedir. Ayrıca dış kuvvetlerin eksene ait nokta üzerine yapmış oldukları momentlerin en kesitteki gerilmelerin eksene ait nokta üzerinde yapmış olduğu momente eşit olması gerekmektedir. Şekil değiştirme davranışı basit eğilmeden farklı olup eksenel normal kuvvet değerlerinden ötürü eksen üzerinde kısaltmalar veya uzamalar meydana gelecektir. Bu durumda denge hesaplamalarının yapılacağı eksenin konumu ve şekil değiştirmenin bulunmadığı tarafsız eksenin konumu birbirlerinden farklı olacaktır.

Çubuğun uzunluğu yanında diğer boyutlarının küçük olması sebebiyle sadece boyuna doğrultuda olan şekil değiştirme göz önüne alınmış, enine doğrultuda meydana gelecek sehim ihmal edilmiştir. Önemli husus Şekil 2.5'te de görüleceği üzere en kesit üzerinde birim şekil değiştirme dağılımının malzeme özelliklerinden bağımsız olarak lineer davranış göstermesidir.



Şekil 2.5 : Gerilme ve şekil değiştirme dağılımı.

Şekil 2.5'te gösterilen eğilme momenti ve eksenel kuvvetler altındaki bir çubuğa ait en kesit, en kesit üzerindeki gerilme ve birim şekil değiştirme dağılımı gösterilmektedir. P eksenel kuvvet değeri olmak üzere izdüşüm ve moment denge denklemleri (2.5) ile verilmiştir [14]. Tarafsız eksenin en kesitin alt noktasından uzaklığı z_T , eksenin en kesitin alt noktasından olan uzaklığı ise z_D ile gösterilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} \sum F_y = \sum F_z = 0 \quad \wedge \quad \sum F_x = P - \int \sigma dA = 0 \quad \Rightarrow \quad P = \int \sigma dA \\ \sum M_x = \sum M_z = 0 \quad \wedge \quad \sum M_y = M - \int z \sigma dA = 0 \quad \Rightarrow \quad M = \int z \sigma dA \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Kiriş üzerinde bulunan dış yükler iç kuvvetlerle dengelenecektir. En kesit üzerinde gerilmelerin tesirleri statik denge denklemleriyle hesaplanacaktır. Kiriş eksenindeki bir noktaya ait toplam moment ve eksenel normal kuvvet değeri kesit tesirlerden elde edilen değerlerle dengelenecektir. Kiriş eksenini y eksenini ile gösterilmekle birlikte yüksekliğine yeri olan z_D henüz hesaplanmamıştır. En kesit üzerindeki her nokta σ normal gerilmesine maruz kalmaktadır. Koordinatları η olan dy kalınlığındaki dA alan elemanının ayrıklaştırılarak üzerine etki etmekte olan kuvvet $dP = \sigma dA$ olarak belirlenir. Ayrıklaştırılan dA alan elemanın eksen üzerinde oluşturduğu moment değeri $dM = \eta \cdot dP = \eta \cdot \sigma dA$ ile gösterilmektedir. En kesit üzerine etki etmekte olan M momenti ve P eksenel kuvveti iç kuvvetler ile denge halinde bulunmalıdır. Bu durumda en kesit üzerindeki gerilme dağılımının M ve P değerlerini dengelemesi gerekmektedir. Basit eğilme durumu söz konusu olduğu için normal kuvvet değeri bulunmamaktadır.

Kiriş üzerindeki her hangi bir noktaya ait moment ve eksenel kuvvet değerlerinin verilmesi durumunda en kesit üzerinde bu dengeyi oluşturacak gerilme dağılımları hesaplanır. Gerilme değerleri birim şekil değiştirme oranıyla, birim şekil değiştirme oranı ise eğrilik yarıçapı ve eğrilik cinsinden ifade edilebilmektedir. Bu durumda en kesite etkimekte olan kuvvetlere karşılık meydana gelen eğrilik hesaplanmış olacaktır.

2.5 Moment-Eğrilik Diyagramları

Eğilme kuvvetleri altında bulunan çubuğa ait sehim hesaplamalarında uygulanan momente karşılık kesitte meydana gelen eğrilik değerinin hesaplanması gerekmektedir. Moment değeri kademeli olarak artırılarak denge denklemlerinden elde edilecek eğrilik değerleri hesaplanacaktır.

Kiriş malzemesinin lineer olmayan davranış gösterdiği durumlarda aşağıdaki işlem adımlarına göre eğrilik değerlerinin hesabı mümkündür.

1. Moment değeri verilir.
2. Tarafsız eksenin yeri z_T tahmin edilir.
3. Φ eğrilik değeri tahmin edilir.
4. Denklem (2.4) yardımıyla şekil değiştirme dağılımı elde edilir.

5. Malzemenin σ - ϵ diyagramıyla ve şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak gerilme dağılımı elde edilir.
6. İzdüşüm denge denklemi sağlanmıyorsa 2. adıma geri dönülerek z_T değeri değiştirilir.
7. Moment denge denklemi sağlanmıyorsa 3. adıma geri dönülerek Φ değeri değiştirilir.

Kiriş malzemesinin elastik malzeme olarak kabul edilmesi durumunda moment ve eğrilik arasındaki ilişki eğilme rijitliği kullanılarak denklem (2.6) yardımıyla hesaplanır [12,15].

E elastisite modülü, I kesit atalet momenti olmak üzere:

$$\left. \begin{aligned} M_y &= \int z \sigma(z) dA = \int z E z \Phi dA \\ &= E \Phi \int z^2 dA = E \Phi I \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Phi = M_y / E I = 1 / r \quad (2.6)$$

3. SEHİM MODELLEMESİ

Bu bölümde, kiriş elemanların eksenlerini, yaptıkları sehimleri, eğrilik değerlerini kullanarak gerçekleştirilecek bir model oluşturulacaktır. Öncelikle sehım hesaplamalarına ilişkin yapılan çalışmalar, sonrasında modelleme mantığı üzerinde durularak modelleme için gerekli şekil ve süreklilik şartları incelenecektir. Anlatılacak Yay-çifti eğri modelleme yöntemi genişletilerek sehım ve başlangıç sehimi hesaplamalarına uyarlaması gerçekleştirilecektir.

3.1 Yöntemler

Dış kuvvetler ve sehım arasındaki bağıntılar ilk olarak Leonardo da Vinci tarafından incelenmiş ama eğrilik 18. yüzyıla kadar tanımlanmamış, sadece kirişin mukavemet/dayanım hesapları üzerinde durulmuştur [16]. Eğilme problemindeki çökme durumu ise ilk olarak Galileo tarafından incelenmiş ve yapının tam akma durumu için dayanımını hesaplamıştır [16]. Kirişlerin dayanımı yerine şekil değiştirmeleri üzerine yapılan çalışmalar ilk olarak Jacob Bernoulli tarafından başlatılmıştır ve sehım eğrisinin üzerindeki herhangi bir noktanın eğrilik değerinin o noktaya ait moment değeriyle ilişkili olduğu sonucuna varmıştır [17,18]. Bu çalışmayla dış kuvvetlerin sehimi oluşturacak eğrilik değerleri arasındaki bağıntı kurulmuştur. Daha sonra bu çalışmalar öğrencisi Euler tarafından kullanılarak Direk Yöntem geliştirilmiş, varyasyonel hesaplamayla elastik eğrinin denklemi elde edilmiş, eksenel basınç kuvvetleri altında kolon burkulma kuvveti hesaplanmıştır [17,19]. Euler tarafından yapılan çalışmalarda momentle eğrilik arasında kurulan denklemleri geometrik olarak çözümleme yerine analitik çözüm yoluna gitmiştir. 1826 yılında ise Navier tarafından Bernoulli ve Euler tarafından oluşturulan elastik doğrunun mekanik ve matematik analizi bir araya getirilerek genel eğilme teorisinde uygulamıştır [11,16,17,20]. Ayrıca Navier tarafından eğri çubukların eğilmesi alanında yapmış olduğu çalışmayla şekil değiştirme ile moment arasındaki ilişki eğilmeden önceki eğriliğe bağlı olarak denkleştirilmiştir [17].

Daha sonraları bu çalışmalar elasto-plastik ve büyük yer değiştirmeleri de kapsayacak şekilde araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Geometrik lineer olmayan hesaplamalarda elastik bölgede çözüm eliptik integraller yardımıyla mümkün olmasına karşın elastik bölgenin dışarısına çıkılması durumunda analitik çözüm her zaman mümkün olmamaktadır [10]. Dikdörtgen en kesite sahip yapılar için Ježek yöntemi ile analitik çözüm mümkün olsaydı da yapının en kesitinin farklı formlarda olması durumunda çözüm sayısal ve yaklaşık yöntemlerle mümkün olacaktır [10].

Sayısal yaklaşımda ilk olarak Von Kármán tarafından 1910 yılında herhangi bir kolonun yer değiştirmiş eksenel Kolon Sehim Eğrisi (*Column Deflection Curve-CDC*) parçası tarafından ifade edilebileceği ortaya atılmıştır ve dikdörtgen kesitli çelik kolon-kirişler için eksenel yükleme altında uygulamıştır [21]. Diğer araştırmacılar tarafından farklı en kesit ve yükleme durumları için çözümleme yapılmıştır [10].

Von Kármán tarafından önerilen yöntemde moment-eğrilik-eksenel kuvvet ($M-\Phi-P$) bağıntıları kullanılarak çözümlenmektedir. Daha sonraları Lu ve Kamalvand tarafından geliştirilen bu yöntemler özetle verilen $M-\Phi-P$ diyagramlarından öncelikle sehim oluşturan noktaların yaklaşık olarak eğim değişimleri ve buradan da eksenel yer değiştirmeleri hesaplanmaktadır [22]. Cheong Siat Moy tarafından yapılan çalışmada ise eğrilik değerindeki değişim farklı bölgeler için moment değişimine bağlı olarak denklemi oluşturulmuş ve daha hızlı çözüme gidilmeye çalışılmıştır [23-25].

Young tarafından yapılan sayısal uygulamayla sonlu farklar kullanılarak bir noktaya ait eğrilik değeri bir önceki sehim değerlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır [26].

Sayısal hesaplamalardan Newmark tarafından uygulanan yöntemde ise yapı alt parçalara ayrılarak konjuke giriş yöntemi ile ayrı parçaların bilenen moment eğrilik değerleri kullanılarak eğim ve sehimleri hesaplanır. Hesaplama denge durumu aranarak en büyük sehim değeri tahmin edilir. Dengenin olduğu durumda sınır şartları sağlanmıyorsa iterasyona devam edilerek tahmin edilen en büyük sehim değeri değiştirilir [27]. Benzer bir yöntem olan *Step-By-Step* yönteminde ise konjuke giriş yöntemi yerine ikinci derece merkezi farklar denklemi kullanılarak aranan noktaya ait sehim değeri kendinden önceki sehim ve eğrilik değerlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır [15,28].

20. yüzyılın ortalarında ise sonlu elemanlar yöntemi ortaya atılmış [29] ve 1980 yılında lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi çeşitli ticari yazılımlarda kullanılmaya başlanmıştır [30].

Özetlemek gerekirse kirişlerdeki sehimi hesaplamalarına yönelik sayısal ve yaklaşık yöntemler genel olarak kiriş yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi olarak gruplandırılabilir. Hızlı gelişen bilgisayar teknolojisine rağmen modelleme ve çözümleme zamanının yüksek olması sebebiyle Sonlu Elemanlar Yöntemi yerine kiriş yöntemi halen popülerliğini sürdürmektedir. Kiriş yöntemi gerçekleştirilen sayısal ve yaklaşık yöntemlerde verilen M- Φ -P diyagramları yardımıyla yaklaşık olarak sehimi hesaplanmaya çalışılmış ama eğriliğin geometrisini kullanmak yerine diferansiyel denklemlerde kullanmayı tercih edilmiştir. Sunulan bu yöntemde ise verilen M- Φ -P diyagramları yardımıyla alt parçalara ayrılan kiriş veya kolon-kirişin sehimi hesaplanırken dengeyi oluşturan momente karşılık gelen eğrilik değerinin geometrik özelliklerini eğrinin oluşması için gereken süreklilik şartlarını sağlayacak şekilde kullanarak elde edilecektir.

3.2 Ana Kavram

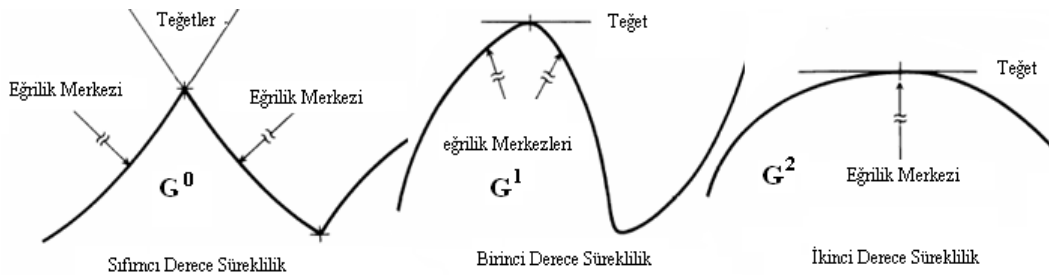
Tanım olarak eğrilik; eğimin eğri eksenini boyunca değişim oranıdır. Kiriş parçasının yeteri kadar küçük alınmasıyla eğrilik değişiminin kiriş parçası boyunca ihmal edilebilir mertebede olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda kiriş parçası boyunca eğimin değişmemesi, eğrilik yarıçapının değişmediği bir çember yayı oluşturacaktır. Bir çubuğun çeşitli noktalarına ait moment değerleri biliniyorsa bu noktalara ait eğrilik değerleri hesaplanabilecektir. Kiriş eksenini bu durumda çember yaylarından meydana gelecektir. Çözülmesi gereken sorun bu çember yaylarının birbirleriyle olan bağıntısının nasıl oluşturulacağıdır. Yapılacak modellemeyle bir eğri elde edilecektir ve bu eğri çubuğa ait eksenini, sehimi ifade edecektir. Öncelikle oluşturulacak eğrinin sağlaması gereken şekil ve süreklilik şartları üzerinde durulacaktır. Çember yaylarından eğri modelleme yöntemi olan Yay-çifti (*Bi-Arc*) eğri yöntemi anlatılacak ve genişletilerek sehimi hesaplamalarına uyarlanacaktır. Böylelikle eğrilik değerleri ve parça uzunluklarına bağlı olarak eğrinin nasıl modelleneceği veya var olan bir eğriye ait eğrilik değerlerinin nasıl hesaplanacağı çıkartılacaktır.

3.3 Şekil - Süreklilik Şartları

Şekil değiştirmiş kiriş eksen uzay eğrisi olarak modellenmiştir [11]. Modellemede kullanılacak olan eğrinin uygunluğu için bir takım şartlar ortaya koymak gerekecektir.

Eğri oluşturulurken verilen noktalar genellikle kontrol noktaları olarak adlandırılır. Eğri verilen bütün noktalardan geçiyorsa enterpolasyon eğrisi adı verilir. Matematiksel olarak sentetik eğriler, verilen noktalardan geçen yumuşak bir eğri uydurma problemini ifade eder. Bu yüzden polinomlar bu eğrileri göstermek için tipik bir formdur. Çeşitli süreklilik şartları ile verilen bu noktalardaki yumuşak geçişlerin mertebesi değişebilir. Süreklilik şartı karmaşık bir eğriyi elde etmek üzere, eğri parçalarını uç uca getirirken önem kazanmaktadır [31].

Eğrinin düzgünlüğü, eğrinin sürekli olduğu G^0 ; eğrinin ve birim teğet vektörünün sürekli olduğu G^1 ve eğri, birim teğet vektörü ve eğriliğinin sürekli olduğu G^2 geometrik süreklilikleriyle tanımlanır [32,33]. Süreklilik mertebelerine ilişkin gösterimler Şekil 3.1’de yer almaktadır.



Şekil 3.1 : Süreklilik dereceleri [32].

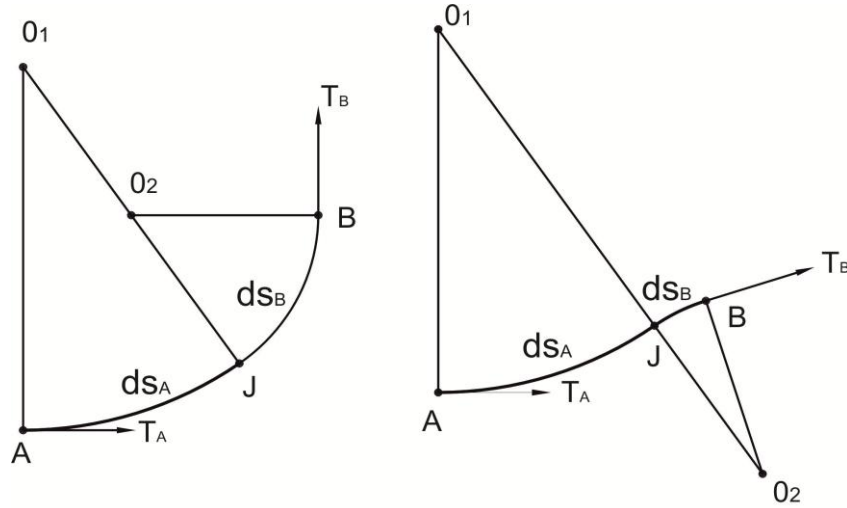
3.4 Yay-Çifti Eğrileri

Kirişin çeşitli zorlamalar neticesinde yapmış olduğu sehim eğrisinin matematiksel olarak ifadesi Yay-çifti eğrileri ile gerçekleştirilecektir. Bu yöntemde eğri çember yaylarından oluşan parçalara bölünecek ve birbirleriyle geometrik süreklilik şartlarını sağlayacak şekilde bağlanacaktır.

Yay-çifti eğrileri ilk defa Bolton tarafından tanıtılmıştır [34]. Yay-çifti elemanları, ortak teğet çemberler ve düz çizgilerden oluşan ve birbirlerine G^1 süreklilik şartını sağlayacak şekilde bağlı olan ardışık eğrilerdir [35]. İkinci türevlerindeki

süreksizliğin birincideki kadar önemli olmamasından ötürü diğer süreklilikler dikkate alınmamaktadır [34].

Eğri tanımlamasında kullanılan bir diğer önemli vektör, eğri merkezi doğrultusundaki asal normal vektördür [36]. Eğrilik için işaret sistemini kabulü; eğrinin merkezinin yeri eğrinin sol tarafında bulunuyorsa artı işaretli, sağ tarafında bulunuyorsa eksi işaretlidir [32]. Şekil 3.2’de artı ve eksi işaretli eğriliklere sahip eğriler gösterilmektedir.

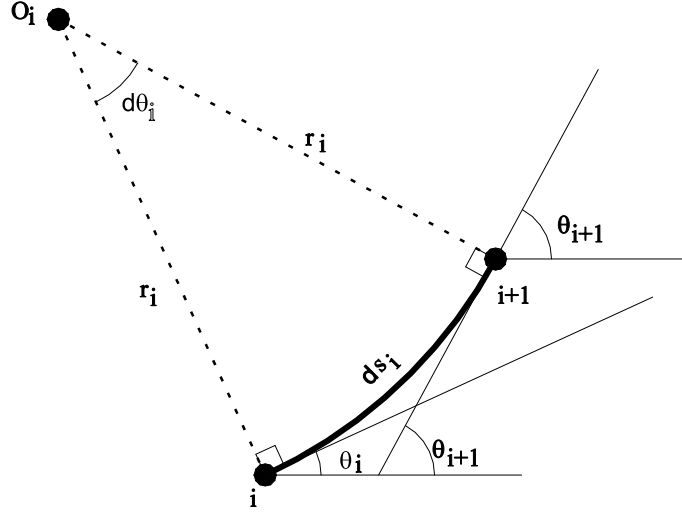


Şekil 3.2 : Eğriliğin yön değiştirmesi.

Şekil 3.2’de A ve B iki farklı nokta olmak üzere T_A ve T_B bu noktaların birim teğet vektörlerini temsil etmektedir. Bir Yay-çifti eğrisi veya A ve B arasındaki Yay-çifti elemanı aşağıdaki özellikleri sağlayan ardışık AJ ve JB çember yaylarından oluşmaktadır [36].

Çember yaylarının uzunlukları ds_A ve ds_B olmak üzere; AJ çember yayı A noktasından J noktasına, JB çember yayı ise J noktasından B noktasına yönelmiştir. AJ yayının teğet vektörleri A noktasında bulunan T_A teğet vektörüne, JB çember yayının teğet vektörleri ise B noktasındaki T_B teğet vektörüne eşit alınmıştır. AJ ve JB yaylarının ortak noktası olan J noktasındaki birim teğet vektörleri de ortaktır.

r_i yarıçapına sahip, i ve i+1 noktaları arasında bulunan çember yayının i noktasındaki eğimi θ_i , i+1 noktasındaki eğimi ise θ_{i+1} olmak üzere, eğimlerin asal normallerine dik olmasının yardımıyla, $d\theta_i$ çember yayına ait açı değeri $d\theta_i = \theta_{i+1} - \theta_i$ denklemiyle bulunabilir. Şekil 3.3’te bu gösterim yer almaktadır.



Şekil 3.3 : Çember yay açısı.

Eğrilik; eğimin eğri eksenine boyunca değişim oranıdır ve (3.1) ile elde edilir [28]. Çember yay uzunluğunu verecek (3.2) denkleminin eğrilik denkleminde yerine konulması ve gerekli sadeleştirmelerin yapılmasıyla eğrilik yarıçapı (3.3) olarak elde edilir.

$$\Phi_i = d\theta_i / ds_i \quad (3.1)$$

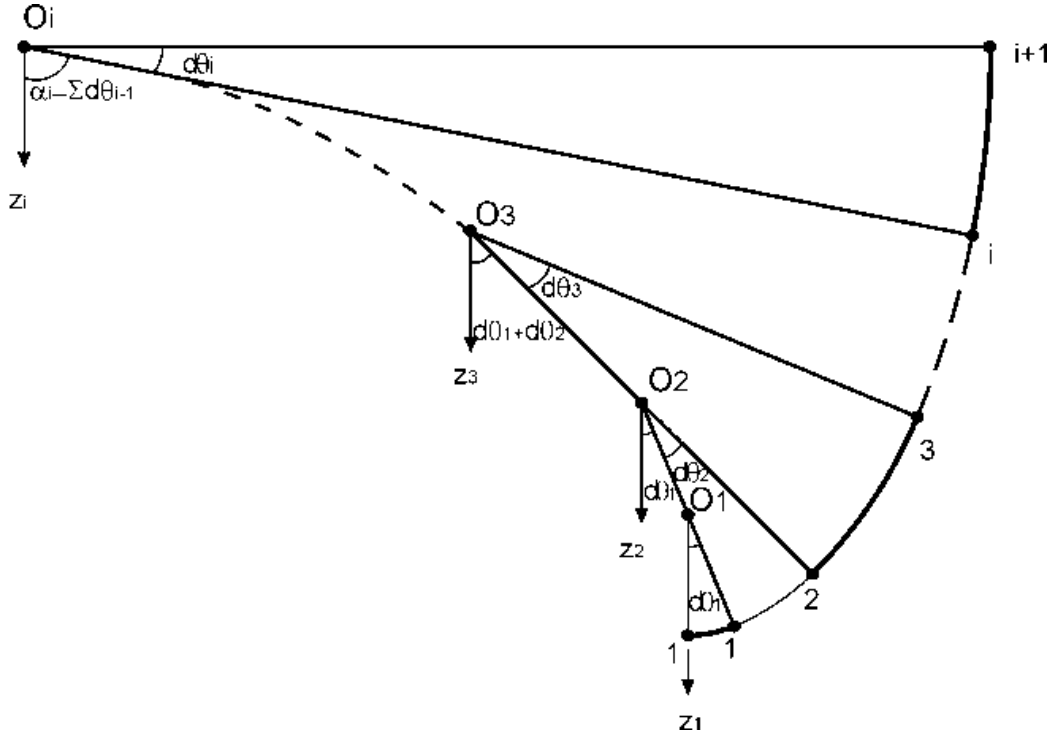
$$ds_i = r_i d\theta_i \quad (3.2)$$

$$r_i = 1 / \Phi_i \quad (3.3)$$

3.5 Eğrilik Değerleriyle Eğri Modelleme

Anlatılan Yay-çifti yöntemi sehim hesaplamaları için tek başına yeterli olmamaktadır. Çember yaylarına ait merkezlerin yerinin tayinine olanak sağlamak amacıyla, G^1 sürekliliği ile birleştirilmiş iki eğri parçasının ortak birim teğet vektörü olma zorunluluğundadır [37]. Bu zorunluluk asal normal vektörleri de kapsayacak şekilde kullanılacaktır. Bu durumda ardışık iki çember yay parçasına ait ortak kontrol noktasında çember yayların eğrilik merkezleri aynı doğrultuda yer alacaktır. Bu müteakip çember yayına ait çember merkezinin doğrultusu hesaplanabilecektir. Tam konumu ise yay parçasına ait eğrilik değerinin hesaplanmasıyla elde edilecektir.

Şekil 3.4'te Yay-çifti yöntemiyle elde edilmiş sehim eğrisi görülmektedir. Her hangi bir i kontrol noktasının z eksenine yapmış olduğu açı α_i , müteakip kontrol noktalarının normalleri arasındaki açı değeri $d\theta_i$ olmaktadır.

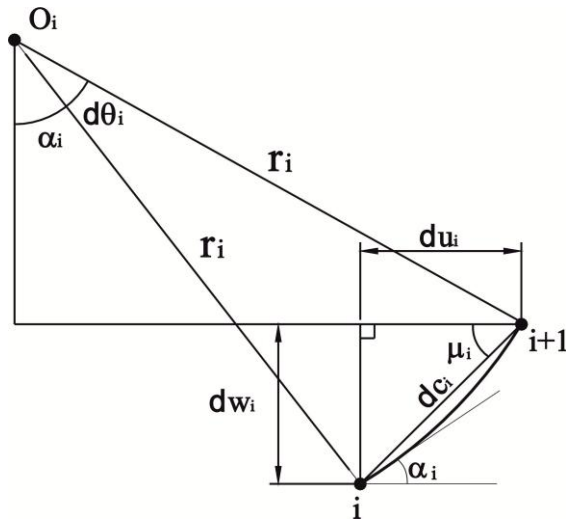


Şekil 3.4 : Yay çiftleriyle modellenen eğri.

Bir sonraki kontrol noktasına ait α_{i+1} açı değeri $\alpha_i + d\theta_i$ toplamıyla elde edilecektir. Eğim genel halde (3.4) denklemiyle gösterilir.

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + d\theta_{i-1} = \sum_{m=1}^{i-1} d\theta_m \quad (3.4)$$

Hesaplamalarda kolaylık olması açısından birinci kontrol noktasına ait α değerinin sıfır olmasında fayda vardır. Bu açı değerinin sıfır olma şartı, yani eğiminin sıfır olması momentin en üst değerde olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 3.5 : Çember yayı.

Şekil 3.5'te i , $i+1$ noktaları arasında yer alan, merkezi O_i noktası, eğrilik yarıçapı r_i , çember yay uzunluğu ds , çember yay açısı $d\theta_i$ ve yaya ait kiriş boyu dc_i olan çember yayı görülmektedir.

Verilenleri kullanarak geometrik ve trigonometrik eşitliklerden i ve $i+1$ noktaları arası konum farklarını hesaplamak üzere kiriş boyunu veren (3.5), yay açısını gösteren (3.6) ve (3.4) denklemleri yardımıyla (3.7) elde edilir. Elde edilen denklemler yardımıyla eğrilik ve yay uzunluklarına bağlı olan noktalar arası konum farklarını veren (3.8) ve (3.9) elde edilir.

$$dc_i = 2 r_i \sin(d\theta_i / 2) \quad (3.5)$$

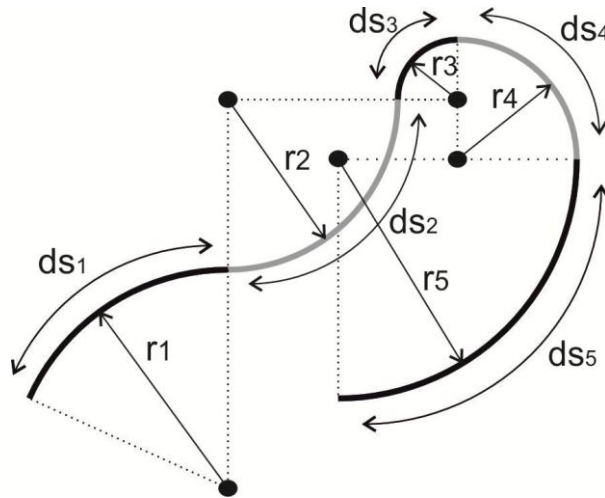
$$d\theta_i = ds_i / r_i \quad (3.6)$$

$$\mu_i = \alpha_i + \frac{d\theta_i}{2} = \sum_{m=1}^{i-1} d\theta_m + \frac{d\theta_i}{2} = \sum_{m=1}^{i-1} \frac{ds_m}{r_m} + \frac{ds_i}{2r_i} \quad (3.7)$$

$$dw_i = dc_i \sin(\mu_i) = 2 r_i \sin\left(\frac{ds_i}{2r_i}\right) \sin\left(\sum_{m=1}^{i-1} \frac{ds_m}{r_m} + \frac{ds_i}{2r_i}\right) \quad (3.8)$$

$$du_i = dw_i / \tan(\mu_i) = dw_i / \tan\left(\sum_{m=1}^{i-1} \frac{ds_m}{r_m} + \frac{ds_i}{2r_i}\right) \quad (3.9)$$

μ_i açısının hesaplanmasında eğriliğin yönü önemlidir. Eğrilik yarıçapı eğrilik değeriyle ters orantılı olup, eğrilik değerinin eksi işaretli olduğu durumlar daha önce açıklanmıştı. Bu durumda eğrinin yön değiştirmesi halinde eğrilik yarıçapı eksi işaretli olarak alınarak $d\theta$ açısının eksi işaretli olması sağlanmalıdır. μ_i açısında eğriliğin yön değiştirmesiyle artım yerine azalış meydana gelmeye başlayacaktır.



Şekil 3.6 : Yay çiftleriyle oluşan eğri.

Şekil 3.6’da yer alan eğrinin eğrilik değerleri farklı işaretlerde olup önerilen yöntem kullanılmasıyla sadece elemanların eğrilik değerleri ve elemanların uzunluklarının bilinmesiyle eğri üzerindeki noktalara ilişkin koordinat hesaplamaları yapılabilecektir. Eğrinin karmaşıklığı yöntem üzerinde bir yavaşlamaya sebep olmamaktadır. Bu yöntemle büyük yer değiştirmeye sahip hesaplamalarda çözümleme üzerine her hangi bir ek yük getirmemesi nedeniyle çözümleme süresinde artış olmayacaktır.

3.6 Başlangıç Sehimi Modelleme

Eğrilik değerlerinin verilmesiyle sehimi oluşturan noktaların koordinatları hesaplanabilmektedir. İşlemi tersine çevirmekde mümkündür, eğer sehim eğrisine ait kontrol noktaları verilmekteyse bu noktaların bir birleriyle olan koordinat farklarının denklemlere yerleştirilmesi suretiyle noktalar arası başlangıç eğrilik değerlerinin (Φ_0) hesaplanması mümkündür. Bu durumda yapının herhangi bir durumdaki sehimi başlangıç sehimi olarak girilerek mukavemet hesapları yapılabilecektir.

Öncelikle başlangıç sehimi kiriş ekseninde olduğu gibi eğrilik değerlerine bağlı olarak modellenmelidir. Herhangi bir eğri üzerinde ölçülen kontrol noktalarında enterpolasyon eğrisi geçirilmesi mümkündür. Yay-çifti yöntemi kullanarak kontrol noktalarına karşılık gelen eğrilik yarıçaplarını, dolayısıyla eğrilik değerlerinin hesaplanması mümkündür [35,37]. Hesaplama için Şekil 3.5’te yer alan i ve $i+1$ noktalarının konumları verilmiş olsun. Bu veriler yardımıyla aşağıdaki denklemlerden r eğrilik yarıçapının elde edilmesi (3.10) ile gösterilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} dc_i &= \sqrt{du_i^2 + dw_i^2} \\ \alpha_i &= \sum_{m=1}^{i-1} d\theta_m \\ \sin(\alpha_i + d\theta_i / 2) &= dw_i / dc_i \Rightarrow \\ d\theta_i &= 2 \arcsin(dw_i / dc_i - \alpha_i) \\ dc_i &= 2 r_i \sin(d\theta_i / 2) \Rightarrow \end{aligned} \right\} r_i = \frac{dc_i}{2 \sin(d\theta_i / 2)} = \frac{dc_i}{2(dw_i / dc_i - \alpha_i)} \quad (3.10)$$

Eğimin sıfır değerini verdiği noktadan hesaplara başlanması durumunda α_i değeri sıfır olacak ve bilinen du ve dw değerleri yardımıyla r eğrilik yarıçapı hesaplanacak ve $d\theta$ değerinin hesaplanmasıyla diğer elemanlara ait eğrilik yarıçapları hesaplanabilecektir.

Önemli sorun hesaplanan başlangıç eğrilik değerlerinin sisteme ait hesaplama esnasında nasıl kullanılacağıdır. Bu konuda çalışmaları bulunan Navier tarafından elde edilen cevap başlangıç eğrilik değerlerinin, eğrilik değerlerine eklenmesi suretiyle gerçekleşeceği [17]. Başlangıç sehimine ait noktaların verilmesiyle Φ_0 eğriliği veya r_0 eğrilik yarıçapları eksenini oluşturacak elemanlar için hesaplanacaktır. r_f eğrilik yarıçapı veya Φ_f eğrilik değeri eleman üzerindeki kesit tesirlere karşılık hesaplanmış olan değerler olmak üzere elemanı oluşturan kontrol noktalarına ait çökme değerlerini hesaplamak üzere kullanılacak r eğrilik yarıçapı veya Φ eğrilik değeri **(3.11)** ile hesaplanacaktır.

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_f \quad \text{veya} \quad r = \frac{r_0 r_f}{r_0 + r_f} \quad (3.11)$$

Sehim hesaplamalarında başlangıç sehimine ait eğrilik değerlerin kullanılması Navier tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi eğrilik değeriyle toplanması ile gerçekleştirilecektir [17].

4. GEOMETRİK SEHİM MODELLEMESİYLE KİRİŞ HESAPLARI

Bu bölümde eğrilik tanımıyla elde edilen sehım eğrisinin kiriş elemanlarına ait mukavemet hesaplarında kullanılması konu edilmiştir. Bölüm 3’te elde edilen yöntem sayesinde kirişe ait moment değerlerinin verilmesiyle sehım elde edilmektedir. Dolayısıyla bir kirişe ait mukavemet veya sehım hesaplarının gerçekleştirilmesi için moment değerlerinin bilinmesi yeterlidir. Sonuçların hassasiyeti açısından momentin yapının şekil değiştirmiş durumu göz önüne alınarak hesaplanması gerekmektedir. Bu bölümde moment hesaplarının nasıl gerçekleştirileceği ve yöntemde nasıl kullanılacağı anlatılacaktır. Öncelikle yanal kuvvetler altında eğilme problemleri, daha sonra ise eksenel basınç kuvvetleri altındaki burkulma problemleri üzerine sayısal çalışmalar yapılacaktır.

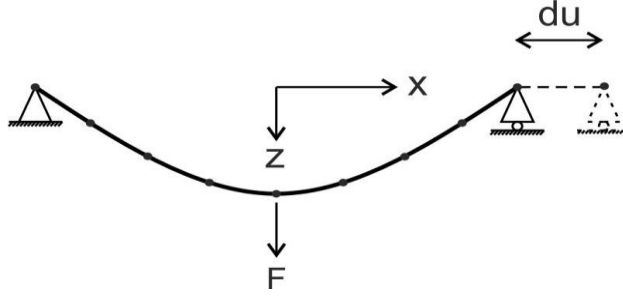
4.1 Eğilme Davranışı

Bu hesaplamada kirişe eksenel veya burulma kuvvetlerinin etki etmediği sadece yanal kuvvetlerin ve mesnet momentlerinin bulunduğu durum incelenecektir. Bir kirişe ait eğilme davranışında dış kuvvetlerin bilinmesi, sınır koşulları ve mesnetler arası mesafeye bağlı olarak kiriş üzerine etki eden moment değerleri hesaplanabilecektir. Önerilen yöntem sayısal bir yöntem olmakta ve çözüm için kirişin parçalara ayrılarak incelenmesi gerekmektedir. Hesabın gerçekleştirilmesi için öncelikle kiriş üzerindeki çeşitli parçalara ait moment değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Parçalara ait eğrilik değerlerinin hesaplanması için Bölüm 2.5’te yer alan işlem adımlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Kirişe ait elemanların eğrilik değerlerinin hesaplanmasıyla sehım eğrisi Bölüm 3.5’te gösterildiği üzere oluşturulacaktır.

4.1.1 Moment denklemleri

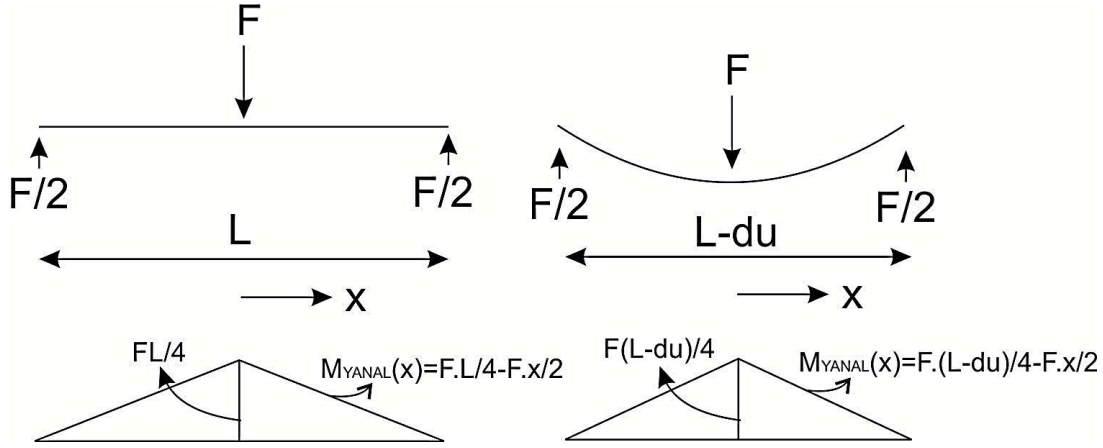
Kiriş parçalara ayrılarak her bir parça üzerine etkiyen moment değerinin hesaplanması gerekmektedir. Moment değerleri kesit tesirlere bağlı olarak değişim gösterecektir. Kesit tesirleri ise yüklemeye, sınır koşullarına ve mesnetler arası

mesafeye bağlı bulunmaktadır. Mesnetler arası mesafe ise kirişin yapacağı sehime bağlı olarak değişim gösterecek, eksenel yer değiştirme oluşacaktır.



Şekil 4.1 : Yanal kuvvet altında kiriş.

Şekil 4.1’de basit mesnet sınır koşullarına sahip ve orta noktasında yanal tekil kuvvet uygulanan kiriş görülmektedir. Yanal F kuvvetinin oluşturduğu eğilme neticesinde sehime meydana gelmiş ve sehime bağlı olarak ise eksenel yer değiştirme oluşmuştur.



Şekil 4.2 : Birinci ve ikinci mertebe teorisinde moment hesabı.

Moment hesaplamalarında eksenel yer değiştirmeye bağlı olarak birinci ve ikinci mertebe teorisine göre moment hesapları ve dağılımları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Denklem (4.1) de ise yanal kuvvetlere bağlı olarak moment hesabı yer almaktadır.

$$M_{Yanal}(x) = \frac{F}{2} \left(\frac{L - du}{2} - x \right) \quad (4.1)$$

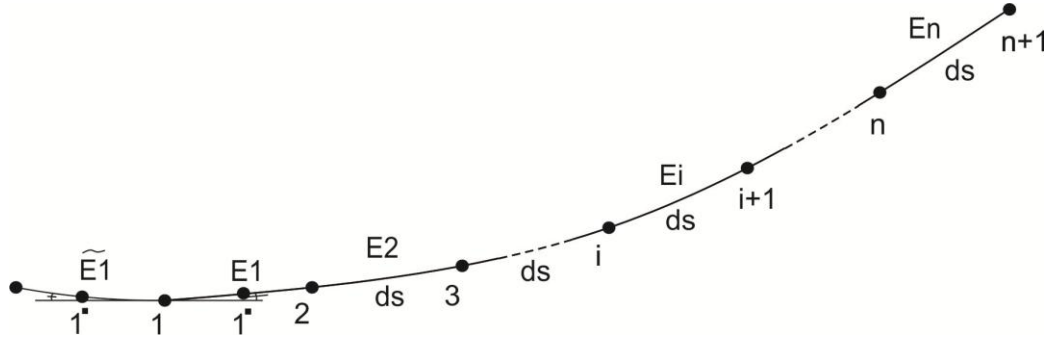
Sehimin oluşmasıyla birlikte eksenel yer değiştirme meydana gelmiş ve mesnetlerin yeri değişmiştir. Reaksiyon kuvvetlerinde değişim olmamasına rağmen kiriş eksenindeki noktaların mesnet noktalarına olan uzaklıkları değiştiği için moment değerleri değişmektedir. Diğer sınır koşullarına göre yapılacak moment hesaplamalarında mesnetlerin yer değiştirmeleri göz önüne alınmalıdır.

4.1.2 Başlangıç noktası

Moment denklemlerinin eksenel yer değiştirmeye bağlı olarak hesaplanmasının ardından kirişin elemanlara ayrılması ve sayısal hesabın başlatılması gerekmektedir. Hesaplamalarda en önemli husus sayısal hesabın başlatılacağı noktadır. Bölüm 3.5'te yer alan (3.7) denkleminde de görüleceği üzere hesaplamalar eğimin bilindiği bir noktadan başlamalıdır. Sınır şartlarına ve yükleme durumuna göre bu noktanın tayini yapılmalıdır. Sınır şartları ankastre mesnet olan bir kiriş, mesnet noktasında eğimin sıfır olmasından ötürü hesaplama mesnet noktasından başlatılabilir. Sınır koşulları basit mesnet olan bir kirişin en büyük çökme değerine sahip olduğu noktada eğim değeri de sıfır olacaktır.

4.1.3 Yöntem

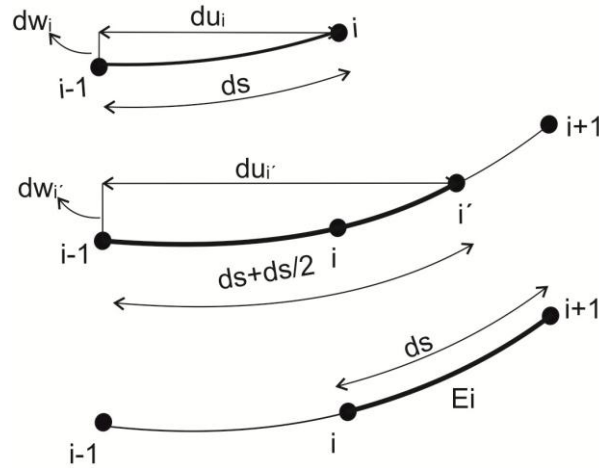
Başlangıç noktasına karar verilmesinden sonra kirişin başlangıç noktasından mesnet noktasına kadar olan kısmı Şekil 4.3'te gösterildiği üzere ds uzunluğunda n adet parçaya ayrılır.



Şekil 4.3 : Elemanlara ayrılmış kiriş eksenini.

Öncelikle bir numaralı elemana ait moment değerinin hesabı gerekmektedir. Bu amaçla eksenel yer değiştirme değeri için bir tahminde bulunulur. Başlangıç noktasında eğimin sıfır olmasından ötürü simetri durumu göz önüne alınarak bu noktanın sağ ve sol tarafında bulunacak elemanların eğrilikleri ve dolayısıyla momentleri de eşit olacaktır. Şekil 4.3'te gösterilen 1 noktasının sağ ve sol tarafında bulunan E_1 ve $\tilde{E}_1$ elemanlarına eşit eğrilik değerini verecek ortalama moment değeri 1 ve 2 noktaları arasındaki $1'$ noktasına ait moment değerinin hesabıyla elde edilecektir. Elde edilen momente bağlı olarak hesaplanacak eğrilik değerinin denklemlerde kullanılmasıyla birlikte 2 noktasına ait konum değerleri hesaplanacaktır.

Hesaplamalara devam edilmesi sırasında bir sonraki elemana ait moment değerinin hesaplanması gerekmektedir. Elemanın ds uzunluğunun yeteri kadar küçük olduğu kabulüyle elemana etkiyen momentin elemanın orta noktasına etkiyen moment olduğu kabul edilir. Bu durumda müteakip elemanın orta noktasına ait konumun hesaplanması gerekecektir. Bu amaçla izlenecek yol Şekil 4.4'te gösterildiği üzere başlatılan hesaba paralel olarak ilk elemanın boyunu $1,5 ds$ almak suretiyle hesabın tekrar edilmesidir. Böylelikle bir sonraki elemanın orta noktasına ait koordinatlar elde edilmiş olacak, moment değeri hesaplanabilecektir.



Şekil 4.4 : Ardışık eleman hesaplamasında eleman uzunluğu.

Elde edilen eğrilik değerinin denklem (3.8) ve (3.9) da yerine koyularak çözülmesi sırasında ds ve $1,5 ds$ değerlerinin kullanılarak yapılacak çözümlemeyle bir sonraki elemanın başlangıç ve orta noktasına ait konumlar hesaplanmış olacaktır. Denklem (4.2) de bu hesap yer almaktadır. Hesaplama ds kullanılmasıyla du_i ve dw_i , $1,5ds$ değerinin kullanılmasıyla da $du_{i'}$ ve $dw_{i'}$ elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 x_{i+1} &= x_i + du_i \\
 x_{i+1'} &= x_i + du_{i'} \\
 z_{i+1} &= z_i + dw_i \\
 z_{i+1'} &= z_i + dw_{i'}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Sonunda $n+1$ noktasına ait konum ve eğim değeri hesaplanacaktır. Bu aşamada sınır koşullarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Sınır koşullarının sağlanamama durumu tahmin edilen başlangıç noktasına ait çökme değerinin hatalı olmasından kaynaklanmaktadır. Tahmin edilen çökme değerinin değiştirilerek yeniden hesaplamanın gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Denklem (4.3) ile iterasyon sonucu

elde edilen değer yardımıyla yeni iterasyonda kullanılacak çökme değeri hesaplanabilmektedir.

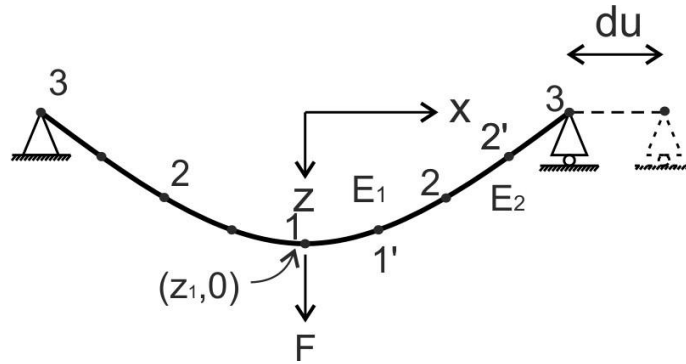
$$z_1^{n+1} = z_1^n - z_{n+1}^n \quad (4.3)$$

İterasyonlar istenilen hassasiyete ulaşınca kadar devam ettirilecektir. Yöntemin sayısal olmasından ötürü eleman sayısının değiştirilerek yakınsamanın kontrol edilmesi gerekmektedir. Kontrol edilmesi gereken bir diğer husus ise eksenel yer değiştirme değeridir. İlk işlemde bu eksenel yer değiştirmeye ait tahmini değer kullanıldıktan sonra bu tahmin değeri yerine artık geometrisi bilinen sehmin mesnet noktaları arası yer değiştirme değeri kullanılmalıdır. Şekil 4.5'te bu durum gösterilmektedir. Eksenel yer değiştirme değeri denklem (4.4) yardımıyla hesaplanır. Denklemden başlangıç noktasının sağ ve sol tarafı için ayrı hesap gerçekleştirilip toplanmaktadır. Simetrik yükleme durumunda simetrik sehmin bekleneneğinden tek taraf için çözüm elde edilip iki ile çarpılabilir.

$$L^{sol} + L^{sağ} = L \rightarrow$$

$$du = du^{sol} + du^{sağ} = L^{sol} - \sum_{i=1}^n du_i^{sol} + L^{sağ} - \sum_{i=1}^n du_i^{sağ} \rightarrow \quad (4.4)$$

$$du = L^{sol} - x_{n+1}^{sol} + L^{sağ} - x_{n+1}^{sağ}$$



Şekil 4.5 : Eksenel yer değiştirme.

Basit mesnet kirişlere ait hesaplamaları gerçekleştirmek üzere izlenmesi gereken hesap adımları aşağıda özetlenmiştir.

1. Başlangıç noktası seçilir, 1 ve 1' numaralı noktalar olarak adlandırılır.
2. Başlangıç ve mesnet arası mesafe ds uzunluğunda n parçaya ayrılır.
3. du değeri tahmin edilir.
4. Başlangıç noktasına ait çökmeyi gösteren z1 değeri tahmin edilir.
5. i= 1 için hesaplamaya başlanır.

6. E_i elemanına ait i' konumu ve (4.1) yardımıyla moment değeri hesaplanır.
7. Moment değeri kullanılarak E_i elemanına ait Φ_i eğrilik değeri hesaplanır.
8. (3.8) ve (3.9) yardımıyla ds uzunluğu için du_i ve dw_i değerleri hesaplanır.
9. du_i ve dw_i değerleri kullanılarak denklem (4.2) yardımıyla $i+1$ konumunu veren x_{i+1} , z_{i+1} hesaplanır.
10. (3.8) ve (3.9) yardımıyla $1,5ds$ uzunluğu için $du_{i'}$ ve $dw_{i'}$ değerleri hesaplanır.
11. (4.2) yardımıyla $i'+1$ konumunu veren $x_{i'+1}$, $z_{i'+1}$ hesaplanır.
12. i değeri $n+1$ den küçükse bir artırılarak 6. adıma geri dönülür.
13. Tahmin edilen eksenel yer değiştirme değeri denklem (4.4) yardımıyla hesaplanır.
14. Sınır koşullarını sağlamak amacıyla denklem (4.3) yardımıyla yeni z_1 değeri yeniden hesaplanır ve istenilen hassasiyet sağlanıncaya kadar 4. adıma geri dönülerek işlemlere devam edilir.
15. 2. adıma geri dönülerek daha yüksek eleman sayısında istenilen hassasiyet elde edilinceye kadar iterasyonlar devam ettirilir.

Sınır koşullarının değişmesi durumunda yapılan tahminler değişim gösterecektir. Örneğin, kirişin basit mesnet yerine ankastre mesnet olması durumunda 1 noktasında olduğu gibi $n+1$ noktasına ait eğim değeri de sıfır olmalıdır. Noktaya ait eğim değeri Bölüm 3.5'te yer alan α_{n+1} değeriyle hesaplanacaktır. Bu sınır koşulunun oluşması ankastre mesnet momentine bağlı olmaktadır. Ankastre mesnet momenti kirişin yapacağı plastik şekil değiştirmeye bağlı olarak değişim gösterecektir. Sınır koşullarındaki eğimi sıfırlamak üzere 4. adımdaki sehim değerine ek olarak ankastre mesnet momentinin de değeri tahmin edilmelidir. Hem çökme hem de ankastre mesnet momentinin tahminine bağlı hesaplama iterasyon sayısını artıracaktır. Bu amaçla hesaplamaların başlangıç noktası mesnet noktası olarak seçilmesi durumunda başlangıç noktasında çökme sıfır olacağından çözüm daha hızlı elde edilecektir. Yapılacak hesaplamada 4. adımda z_1 değeri yerine ankastre mesnet momenti tahmin edilecek ve 14. adımda α_{n+1} değerine göre revize edilecektir.

Hesaplamalarda kullanılan denklemler eğrilik değerinin hesaplanması hariç basit işlemlerden oluşmaktadır. Bu ardışık hesaplamalar için basit programlar yazılabileceği gibi elektronik tablolama programlarının kullanılması da yeterlidir. Yapılan sayısal çalışmalarda Microsoft Excel tablolama programı kullanılmıştır.

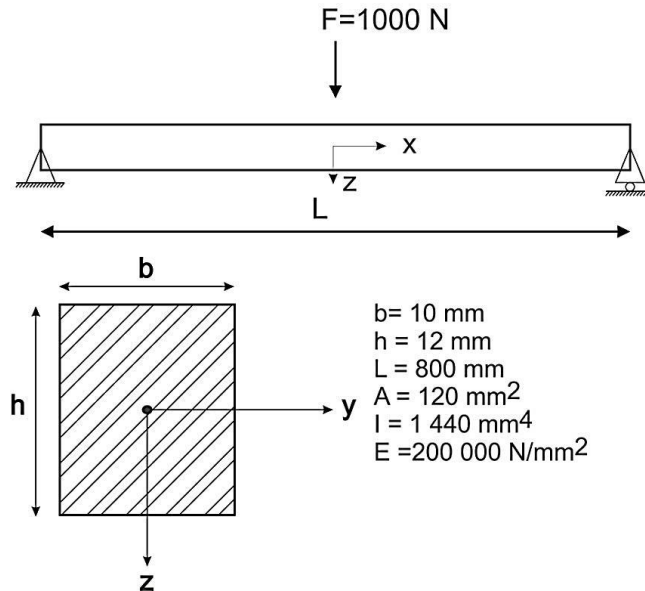
Yapılacak iterasyonlar ise istenildiğinde programın yenilemeli hesaplama özelliği kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir.

4.1.4 Sayısal çalışmalar

Yöntemin pekiştirilmesi amacıyla kiriş hesaplamalar için çeşitli sayısal çalışmalar gerçekleştirilecektir. Öncelikle en basit durum olan elastik bölgeye ilişkin önerilen yöntemin uygulaması gerçekleştirilerek yöntemin basitliği ve analitik hesaplamalara göre karşılaştırılması yapılacaktır. İkinci sayısal çalışmada ise eğilme probleminde sınır koşulları basit mesnetten ankastre mesnete, yükleme tekil kuvvetten yayılı yüke çevrilmiştir. Hesaplamalar sadece elastik bölge için değil plastik bölge için de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar analitik yöntemle ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

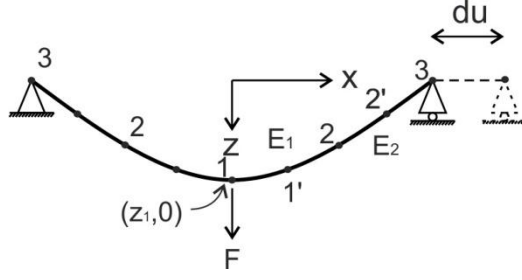
4.1.5 Tekil kuvvet altındaki basit mesnet kiriş

Üzerinde sayısal çalışmaların yapılacağı kirişe ait özellikler Şekil 4.6'da yer almaktadır. Basit mesnet olan kiriş için hesaplama kirişin orta noktasından başlanılacaktır. Yapılacak sayısal çalışmada amaç yöntemin işleyişinin gösterilmesi olduğu için kiriş yarı uzunluğunda öncelikle 2 elemanlı çözüm oluşturulacaktır.



Şekil 4.6 : Tekil kuvvet altında iki ucu basit mesnet sınır koşullu kiriş.

Kirişin 1 numaralı noktasına z doğrultusunda 1000 N şiddetinde tekil kuvvet uygulanmakta ve kiriş Şekil 4.7'de gösterildiği üzere şekil değiştirerek denge konumuna gelmektedir. Hesaplamalar elastik bölgede gerçekleşmektedir.



Şekil 4.7 : Tekil kuvvet altında denge durumuna ulaşılmış sehim.

Hesaplamalara başlamadan önce tekil kuvvetin kiriş üzerinde meydana getireceği moment dağılım fonksiyonunun elde edilmesi gerekmektedir. Mesnet arası mesafeye göre hesaplanacak reaksiyon kuvvetlerinden moment fonksiyonu denklem (4.1) ile hesaplanacaktır. Kiriş üzerindeki moment dağılımı Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Kesite ait eğilme momentinden elde edilecek eğrilik değeri denklem (2.6) yardımıyla hesaplanacaktır.

Başlangıç noktasına ait konum belirlenerek gerekli tahminlerin yapılmasıyla birinci iterasyona başlanır.

$x_1=0$ mm, $x_1'=ds/2$ mm ve $z_1=z_1'=30$ mm, $du=0$ mm olarak tahmin edilir.

1 numaralı eleman için yapılacak hesaplar:

$$M_{Yanal}(x_1) = M_{Yanal}(100) = 500(400 - 100) = 150000 \text{ Nmm}$$

$$r_1 = 1440 \times 200000 / 150000 = 1920 \text{ mm}$$

$ds=200$ için

$$dw_1 = 2r_1 \sin\left(\frac{ds}{2r_1}\right) \sin\left(\frac{ds}{2r_1}\right) = 2 \times 1920 \times \sin\left(\frac{200}{2 \times 1920}\right)^2 = 10,41 \text{ mm}$$

$$du_1 = dw_1 / \tan\left(\sum_{m=1}^{1-1} \frac{ds}{r_m} + \frac{ds}{2r_1}\right) = 10,41 / \tan\left(\frac{200}{2 \times 1920}\right) = 199,64 \text{ mm}$$

$$x_2 = x_1 + du_1 = 0 + 199,64 = 199,64 \text{ mm}$$

$$z_2 = z_1 - dw_1 = 30 - 10,41 = 19,59 \text{ mm}$$

$ds = 1,5 \times 200$ için

$$dw_{1'} = 2r_1 \sin\left(\frac{1,5ds}{2r_1}\right) \sin\left(\frac{1,5ds}{2r_1}\right) = 2 \times 1920 \sin\left(\frac{1,5 \times 200}{2 \times 1920}\right)^2 = 23,39 \text{ mm}$$

$$du_1 = dw_1 / \tan\left(\sum_{m=1}^{1-1} \frac{ds}{r_m} + \frac{1,5 ds}{2r_i}\right) = 31,14 / \tan\left(\frac{1,5 \times 200}{2 \times 1920}\right) = 298,78 \text{ mm}$$

$$x_2 = x_1 + du_1 = 0 + 298,78 = 298,78 \text{ mm}$$

2 numaralı eleman için yapılacak hesaplamalar:

$$M_F(x_2) = M_1(298,78) = 50610 \text{ Nmm}$$

$$r_2 = 200000 \times 1440 / 50610 = 5691 \text{ mm}$$

ds = 200 için

$$dw_2 = 2r_2 \sin\left(\frac{ds}{2r_2}\right) \sin\left(\frac{ds}{r_1} + \frac{ds}{2r_2}\right) \rightarrow$$

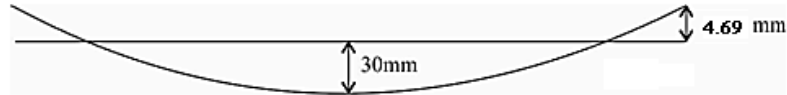
$$dw_2 = 2 \times 5691 \sin\left(\frac{200}{2 \times 5691}\right) \sin\left(\frac{200}{1920} + \frac{200}{2 \times 5691}\right) = 24,29 \text{ mm}$$

$$du_2 = dw_2 / \tan\left(\sum_{m=1}^{1-1} \frac{ds}{r_m} + \frac{ds}{2r_i}\right)$$

$$du_2 = 24,29 / \tan\left(\frac{200}{1920} + \frac{200}{2 \times 5691}\right) = 198,51 \text{ mm}$$

$$x_3 = x_2 + du_2 = 199,64 + 198,51 = 398,15 \text{ mm}$$

$$z_3 = z_2 - dw_2 = 19,59 - 24,29 = -4,69 \text{ mm}$$



Şekil 4.8 : Birinci iterasyon sonucu sehim eğrisi.

Yapılan hesaplama göre elde edilen sehim eğrisi Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Son noktaya ait konum değerleri incelendiğinde başlangıç noktasına ait çökme değerinin hatalı olması nedeniyle mesnet noktasında çökme değeri gözükmemektedir. Yapılacak lineer düzeltmeyle başlangıç noktasına ait çökme değeri değiştirilecektir.

Tahmin edilen çökme değerine ait yenileme değeri denklem (4.2) yardımıyla hesaplanacaktır.

$$z_1 = 30 - (-4,69) = 34,69 \text{ mm}$$

Yapılan bir diğer tahmin olan mesnetler arası kısalma miktarını gösteren du değeri ise denklem (4.4) yardımıyla hesaplanabilir. Verilen denklem sehim eğrisinin başlangıç noktasına göre simetrik olması durumunda geçerlidir, aksi durumda hesapların başlangıç noktasının sağ ve sol tarafı için ayrı çözülmesi ve toplanması gerekmektedir.

$$du = 2 \left(\frac{L}{2} - x_{n+1} \right) = 3,7 \text{ mm}$$

Hesaplamaların tablolama ile gerçekleştirilmesi durumunda Çizelge 4.1 elde edilecektir. İterasyondan elde edilen sonuçlara denklem (4.3) ve denklem (4.4) yardımıyla Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te bulunan sonuçlar elde edilir.

Çizelge 4.1 : Birinci iterasyon ($z_1=30\text{mm}$, $du=0 \text{ mm}$).

EL	(N.mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
No:	M_{yanal}	r_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	$dw_{i'}$	$du_{i'}$	$x_{i'}$	$z_{i'}$
1	150000,0	1920	10,41	199,64	199,64	19,59	23,39	298,78	100,00	30,00
2	50609,6	5691	24,29	198,51	398,15	-4,69				

Çizelge 4.2 : İkinci iterasyon ($z_1=34,69 \text{ mm}$, $du= 3,70 \text{ mm}$).

EL	(N.mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
No:	M_{yanal}	r_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	$dw_{i'}$	$du_{i'}$	$x_{i'}$	$z_{i'}$
1	149075,0	1932	10,34	199,64	199,64	24,35	23,25	298,80	100,00	34,69
2	49677,1	5797	24,09	198,53	398,18	0,25				

Çizelge 4.3 : Üçüncü iterasyon ($z_1=34,44 \text{ mm}$, $du= 3,65 \text{ mm}$).

EL	(N.mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
No:	M_{yanal}	r_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	$dw_{i'}$	$du_{i'}$	$x_{i'}$	$z_{i'}$
1	149087,5	1932	10,34	199,64	199,64	24,10	23,25	298,80	100,00	34,44
2	49689,7	5796	24,10	198,53	398,18	0,00	38,7	297,5		

Çizelge 4.3'te görüleceği üzere iterasyonun tekrarlanmasıyla z_{n+1} değerinde istenilen değere ulaşılmıştır. Elde edilen çözüm, eleman uzunluğunun 200 mm olması durumunda çökmenin 44,64 mm olmasıyla yakınsama sağlamaktadır. Yapılması gereken sonraki işlem ise eleman boylarının küçülmesiyle yakınsamanın

incelenmesidir. Bu amaçla farklı eleman uzunluğuna sahip durumlar için çözümler elde edilmiş ve Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. İterasyonun yakınsaması ile elde edilerek başlangıç noktasına ait çökme değerinin 36,72 mm olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4 : Eleman uzunluğuna bağlı elde edilen sonuçlar.

ds (mm)	200	40	20	10	5	4
z ₁ (mm)	34,44	36,62	36,69	36,71	36,71	36,71

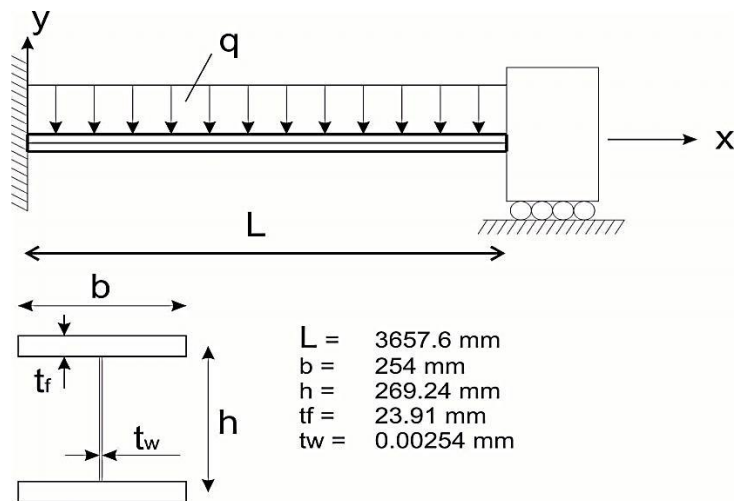
Problemin analitik çözümü ise $w_{\max} = F L^3 / (48 E_x I_x) = 37.03$ mm olarak hesaplanabilmektedir [14]. Analitik çözümde mesnet noktaları arası kısılmanın etkisi ihmal edildiği için iki sonuç arasında fark oluşmaktadır. Aynı kabul altında önerilen yöntemle hesaplamalar gerçekleştirilirse Çizelge 4.5 elde edilecektir. Yakınsamanın olduğu durumda beklenildiği gibi analitik sonuca göre %0.08 yakınlıkta sonuç elde edilmiştir.

Çizelge 4.5 : Eksenel yer değiştirme ihmal edilmesiyle elde edilen sonuçlar.

ds (mm)	200	40	20	10	5	4
z ₁ (mm)	34,69	36,90	36,97	36,99	36,99	37,00

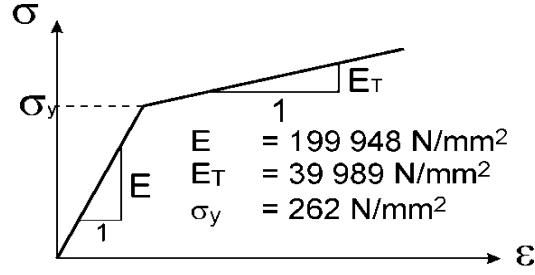
4.1.6 Yayılı yükler altındaki ankastre sınır koşullu kiriş

Şekil 4.9'da gösterilmekte olan iki ucu ankastre mesnet ve düzgün yayılı yük altındaki bir kirişe ait plastik bölgede analiz yapılacaktır. Uygulamanın Hoff tarafından gerçekleştirilen analitik çözümünün yanı sıra sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçları da karşılaştırılacaktır [38,39].



Şekil 4.9 : Ankastre sınır koşullu kiriş.

Kiriş malzemesi elastik-pekleşen bir yapıda olup, şekil değiştirme gerilme grafiği Şekil 4.10 ile verilmiştir.

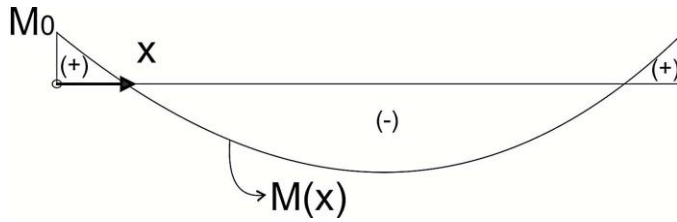


Şekil 4.10 : İdeal pekleşen elasto-plastik malzeme diyagramı.

Yüklemenin simetrik olması nedeni ile en büyük sehim orta noktada meydana gelecektir. Hesaplamaların başlangıç noktası kirişin orta noktası olarak seçilmiştir.

Kirişe ait eğilme moment dağılımı denklem (4.5) yardımıyla hesaplanabilecektir. Şekil 4.11’de moment dağılımı gösterilmektedir. Denklemde M_0 ile gösterilmekte olan mesnet moment değeri sınır koşullarını sağlayacak şekilde iterasyonla tayin edilecektir. Yapılacak uygulamada M_0 değerini lineer teorideki değeri olan $qL^2/12$ değerinden başlatılarak iterasyonun yapılması daha hızlı sonuç verecektir. Sınır koşullarını sağlayacak şekilde ankastre mesnet momentinin de iterasyonlarla değiştirilmesi gerekmektedir.

$$M(x) = \frac{q(L)}{2}x - \frac{qx^2}{2} + M_0 \quad (4.5)$$



Şekil 4.11 : Moment dağılımı.

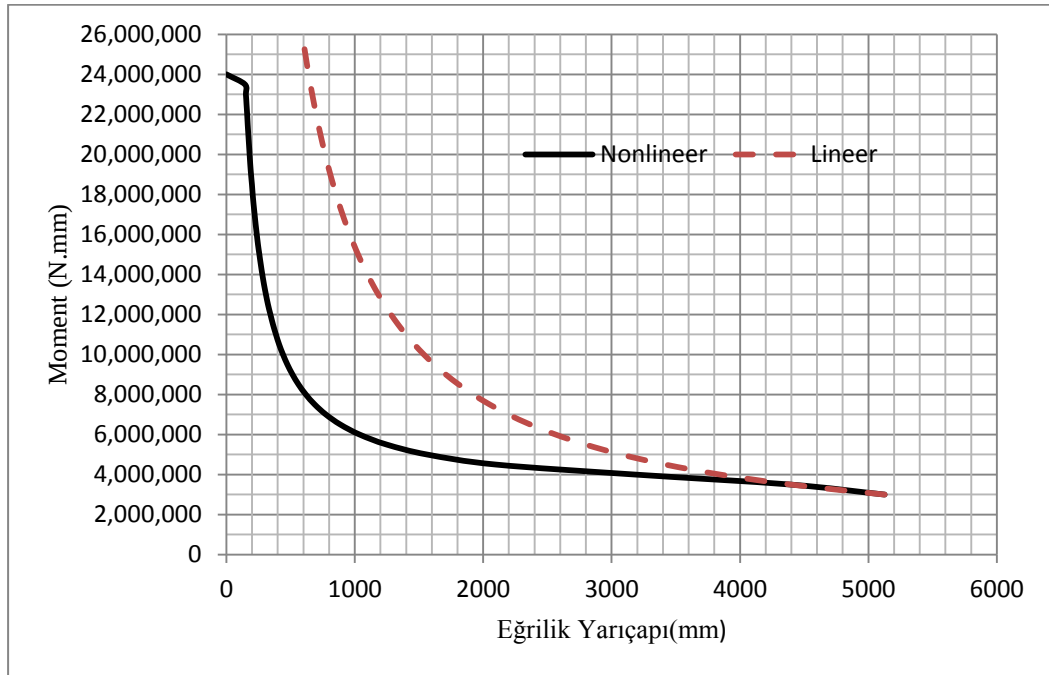
Momente bağlı olarak eğrilik değerlerinin hesaplanmasında sadece elastik bölgenin olmamasından dolayı (2.6) denklemi yetersiz kalacaktır. Elastik bölgenin dışına çıkılmaya başladığı andaki eğrilik değeri, tarafsız eksenin en uzakta bulunan ipçiğe ait gerilmeyi elastik bölgenin dışına çıkaracak eğrilik değeri olarak (4.6) yardımıyla hesaplanacaktır.

$$\sigma(h/2) = \sigma_{akma} = E \varepsilon_{akma} (h/2) = E \Phi_{akma} h/2 \Rightarrow \Phi_{akma} = 2\sigma_{akma} / (Eh) \quad (4.6)$$

Eğrilik değeri Φ_{akma} değerinden daha küçük bir değer olması durumunda elastik bölgenin dışına çıkacaktır. Denklem (2.6)'da eğrilik değeri yerine akmanın başladığı eğrilik değerinin yazılmasıyla akmanın başlayacağı moment değeri hesaplanmış olur.

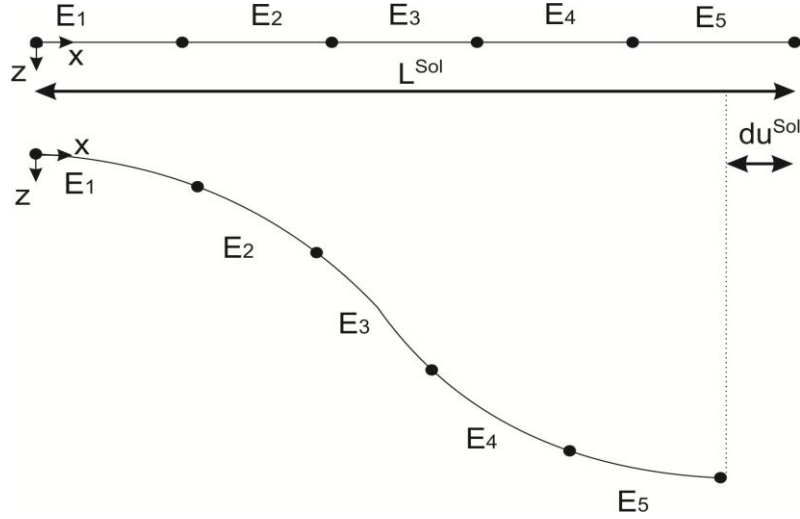
$$\Phi_{akma} = M_{y-akma} / EI \Rightarrow M_{y-akma} = \Phi_{akma} EI = 2\sigma_{akma} I / h = 3\,492\,210 \text{ Nmm}$$

Hesaplanan moment değeri, denklem (4.5) ile elde edilen değerden küçük olması durumunda denklem (2.6) geçerliliğini koruyacaktır. Bu moment değerinin aşılmasıyla denklem (2.6) kullanılamayacak, eğriliğin hesabı için Bölüm 2.5'te yer alan işlem adımlarının gerçekleştirilmesi gerekecektir. Bu işlem adımlarına uygun olarak Mathematica yazılımı kullanılarak komut dizisi oluşturulmuştur. Kiriş en kesitine ait geometrik özellikleri ve kiriş malzemesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiğinin kullanılmasıyla moment ve eksenel kuvvet değerine karşı gelen eğrilik değeri hesaplanmaktadır. Şekil 4.12'de Mathematica programı ile elde edilen M-r diyagramı yer almaktadır. Diyagram üzerinde yer alan kesikli çizgi yapının sadece elastik olması durumunda beklenen M-r değişimini göstermektedir. Bu diyagram yardımıyla hesaplanan moment değerine karşılık gelen eğrilik yarıçapı okunarak hesaplamalar gerçekleştirilecektir.



Şekil 4.12 : M-r diyagramı.

Toplam üç farklı yayılı yük değeri için çözümleme gerçekleştirilecektir. Moment değerlerine karşı gelen eğrilik değerleri Mathematica yazılımıyla elde edilmiştir. Sadece bir yükleme durumu için hesap tabloları gösterilmiştir. Diğer yüklemelere ait sadece sonuçlara yer verilmiştir.

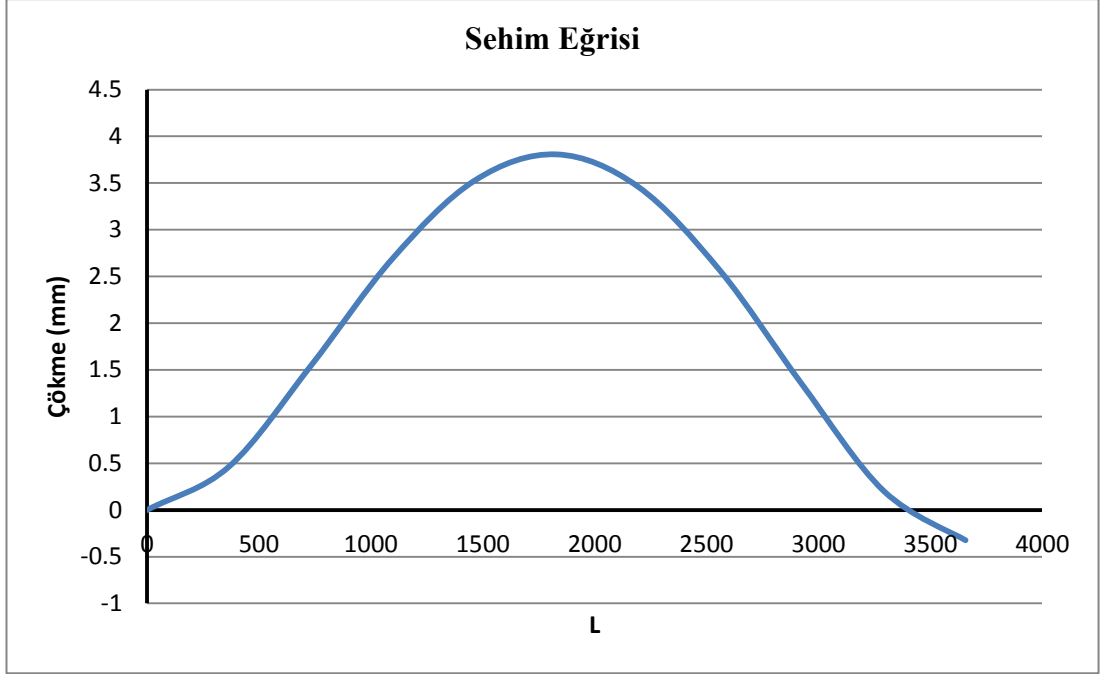


Şekil 4.13 : Eleman gösterimleri.

Kirişin uzunluğu on eşit parçaya ayrılarak çözüm gerçekleştirilecektir. Kirişe ait elemanlar başlangıç ve eğilme sonrası durum için Şekil 4.13 ile gösterilmektedir. Birinci yükleme için yayılı yük değeri 384 N/mm olacaktır. Gerçekleşen hesaplama Çizelge 4.6’da yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : Birinci iterasyon hesap tablosu.

EL	(N.mm)	(mm)	(rad)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
No:	M_{Yanal}	r_i	α_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	$dw_{i'}$	$du_{i'}$	$x_{i'}$	$z_{i'}$
1	-305817518	-144371	0,0000	-0,46	365,76	365,76	0,46	-1,04	548,64	182,88	0,00
2	-100514099	-439255	-0,0025	-1,08	365,76	731,52	1,54	-1,73	548,64	548,64	1,04
3	53463492	825821	-0,0034	-1,15	365,76	1097,28	2,69	-1,66	548,64	914,40	2,20
4	156115682	282811	-0,0029	-0,83	365,76	1463,04	3,53	-1,07	548,64	1280,16	3,21
5	207442306	212836	-0,0016	-0,28	365,76	1828,80	3,81	-0,19	548,64	1645,92	3,76
6	207443000	212836	0,0001	0,35	365,76	2194,55	3,46	0,76	548,64	2011,68	3,71
7	156117815	282808	0,0018	0,90	365,76	2560,31	2,56	1,52	548,64	2377,43	3,05
8	53467177	825764	0,0031	1,21	365,76	2926,07	1,35	1,88	548,64	2743,19	1,94
9	-100508779	-439278	0,0035	1,14	365,76	3291,83	0,20	1,60	548,64	3108,95	0,68
10	-305810786	-144375	0,0027	0,53	365,76	3657,59	-0,32				

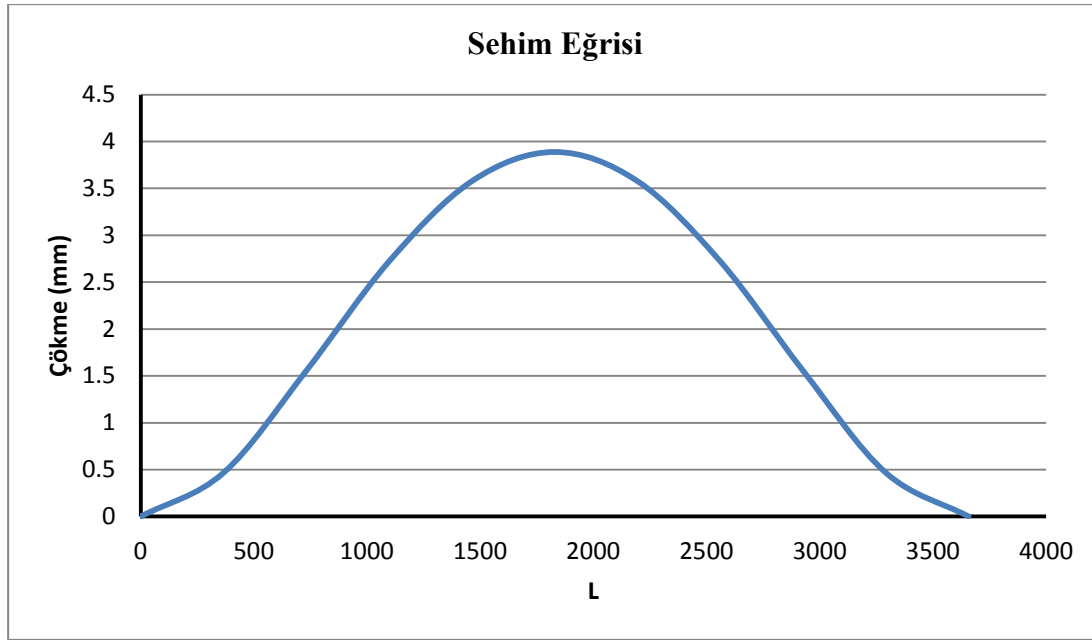


Şekil 4.14 : Birinci iterasyon sehim eğrisi.

Sehim eğrisi ise Şekil 4.14 ile gösterilmektedir. Görüleceği üzere kirişin son elemanına ait sehim değeri ve orta noktaya ait eğim sıfırdan farklıdır. İterasyonlar neticesinde M_0 değerinin 1,005 katı alınmasıyla aşağıdaki Çizelge 4.7 ve Şekil 4.15'teki sehim eğrisi elde edilir. Mesnet momentindeki bu fark hesaplamanın sayısal olarak yapılması neticesinde meydana gelmektedir.

Çizelge 4.7 : Son iterasyon hesap tablosu.

EL	(N.mm)	(mm)	(rad)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
No:	$M_{Y_{anal}}$	r_i	α_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	dw_i	du_i	x_i	z_i
1	-307956102	-143369	0,0000	-0,47	365,76	365,76	0,47	-1,05	548,64	182,88	0,00
2	-102652692	-430104	-0,0026	-1,09	365,76	731,52	1,56	-1,75	548,64	548,64	1,05
3	51324886	860232	-0,0034	-1,17	365,76	1097,28	2,72	-1,69	548,64	914,40	2,22
4	153977074	286739	-0,0030	-0,86	365,76	1463,04	3,58	-1,11	548,64	1280,16	3,25
5	205303711	215054	-0,0017	-0,31	365,76	1828,79	3,89	-0,23	548,64	1645,91	3,83
6	205304427	215053	0,0000	0,31	365,76	2194,55	3,58	0,70	548,64	2011,67	3,81
7	153979248	286735	0,0017	0,86	365,76	2560,31	2,72	1,46	548,64	2377,43	3,19
8	51328574	860170	0,0030	1,17	365,76	2926,07	1,56	1,81	548,64	2743,19	2,12
9	-102647476	-430125	0,0034	1,09	365,76	3291,83	0,47	1,52	548,64	3108,95	0,91
10	-307949605	-143372	0,0026	0,47	365,76	3657,59	0,00	0,35	548,64		



Şekil 4.15 : Son iterasyon sehim eğrisi.

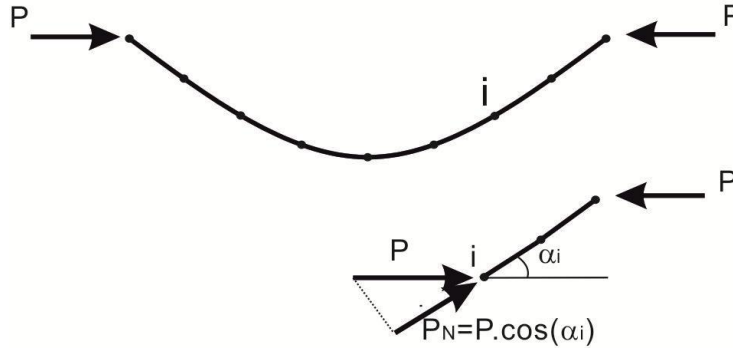
Aşağıdaki Çizelge 4.8’de diğer yayılı yükler altında analitik yöntem, sonlu elemanlar yöntemi ve geometrik yöntemle elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

Çizelge 4.8 : Karşılaştırmalı sonuçlar.

Yayılı Yük		Analitik	ANSYS	Yöntem(n=40)	Yöntem (n=10)
384	Orta Nokta Sehim (mm)	-4,06	-4,06	-4,05	-3,89
N/mm	Mesnet Momenti (N.mm)	-428064985	-428064985	-427629127	-429855392
661	Orta Nokta Sehim (mm)	-9,07	-9,12	-9,03	-8,04
N/mm	Mesnet Momenti (N.mm)	-676487476	-675356226	-678310227,4	-694770850
1585	Orta Nokta Sehim (mm)	-53,09	-53,59	-53,00	-49,76
N/mm	Mesnet Momenti (N.mm)	-1708187440	-1696874940	-1701804325	-1723165147

Birinci yükleme neticesinde nihayetlerde akma başlamış, ikinci yükleme durumunda ise kirişin orta noktası da akmaya başlamıştır. Son yükleme durumunda ise akmanın iyice ilerlediği durum için sonuçlara yer verilmiştir. Geometrik yöntemde elde edilen sehim değerleri analitik sonuçlara sonlu elemanlar çözümüne göre daha yakın olmasına karşın nihayetlerdeki mesnet momentleri farklılık göstermektedir. Bu farklılık sayısal hesaplamının doğurduğu hatalardan meydana gelmektedir.

burkulmanın oluşmadığı durumda kiriş boyu ve mesnetler arası mesafe dL kadar kısalmaktadır. Burkulmanın etkimesiyle birlikte kiriş boyu dL kadar kısalmasına karşın çökme nedeniyle mesnetler arası mesafe toplam du kadar azalmaktadır.



Şekil 4.17 : Eleman üzerine etki eden normal kuvvet.

Kiriş kesitlerine etki eden eksenel kuvvet değerleri kirişte meydana gelen sehimle birlikte değişim göstermektedir. Şekil 4.17’de eksenel kuvvetler altında dengede bulunan sehim eğrisi görülmektedir. Düzlem kesitler düzlem kalır kabulüne uygun olarak sehim eğrisi üzerinde yer alan i noktasına etki eden eksenel kuvvet değeri Şekil 4.17’den de görüleceği üzere o noktaya ait eğimin kosinüsüne bağlıdır. Kiriş üzerinde meydana gelecek sehimin kiriş boyuna göre düşük olması sebebiyle eğim değerlerinin etkisi eksenel kuvvet hesabında ihmal edilmiştir. Eksenel kuvvet değerinden kirişte meydana gelecek küçülme değeri denklem (4.7) yardımıyla hesaplanır [11,14].

$$dL = PL / EA \quad (4.7)$$

Eksenel yer değiştirme hesabı için kullanılan (4.3) denklemi (4.7) denkleminde göz önüne alınarak yeniden düzenlenir ve (4.8) denklemi oluşturulur.

$$du = L^{sol} - dL^{sol} - x_{n+1}^{sol} + L^{sağ} - dL^{sağ} - x_{n+1}^{sağ} \quad (4.8)$$

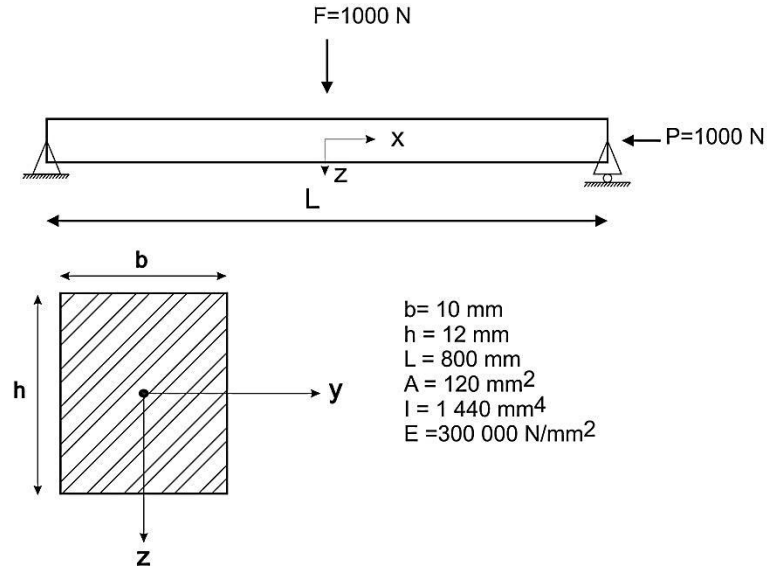
Toplamda üç farklı sayısal çalışma gerçekleştirilecektir. İlk sayısal çalışma çataksız burkulmaya örnek oluşturacaktır. Bölüm 4.1.1’de gerçekleştirilen eğilme problemine ait kirişe eksenel kuvvet değerinin de uygulanması durumundaki hesaplamalar yapılacaktır. Elde edilen çözüm analitik ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen çözümlerle karşılaştırılması yapılacaktır.

Diğer sayısal çalışmada ise çatallı burkulma çözümlemesi için aynı kirişte yanal kuvvetin kaldırılmasıyla burkulmanın oluşumunu sağlayacak eksenel kuvvet değeri

aranacaktır. Elde edilen sonuçlar analitik ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

Son sayısal çalışma ise yine çatalsız burkulmaya örnek oluşturacaktır. Bu çalışmada kirişte başlangıç sehiminin olması durumundaki davranışı incelenecektir. Analitik çözümle de karşılaştırma yapılacaktır.

4.2.1 Eğilme ve eksenel kuvvetler altında bulunan kiriş



Şekil 4.18 : Her iki ucu basit mesnet sınır koşullu kiriş ve özellikleri.

Yapılacak uygulamada Şekil 4.18’de verilen kirişe ait dayanım hesabı yapılacaktır. Homojen ve izotropik kirişin zorlamalar neticesinde elastik bölgede kaldığı ve Hook kanununa uygun davrandığı kabul edilmektedir. Yapılacak çözümleme analitik çözüm ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Sonlu elemanlar analizinde ANSYS sonlu elemanlar program paketi kullanılmaktadır.

Uygulama kirişin dört elemana ayrılarak ve sehimin simetrik olması beklenmesinden ötürü yarı kirişe ait iki eleman için hesap yapılarak gerçekleştirilecektir.

Kesit tesirlerinin oluşturulmadan önce mesnet noktaları arası toplam mesafe değişimi 2 mm olarak tahmin edilir ve moment fonksiyonları denklem (4.9)’da oluşturulur. Toplam moment yanal kuvvetlerin ve eksenel kuvvetin oluşturacağı momentlerin toplamından oluşmaktadır.

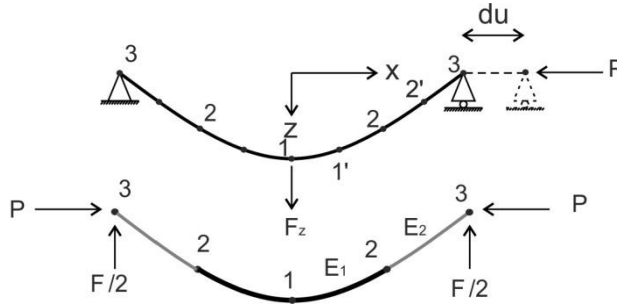
$$M_{top} = M_{Yanal}(x) + M_{Eksenel}(z)$$

$$M_{Yanal}(x) = \frac{F}{2} \left(\frac{L - du}{2} - x \right) \quad (4.9)$$

$$M_{Eksenel}(z) = z P$$

Eksenel küçülme değeri denklem (4.7) yardımıyla hesaplanır ve Şekil 4.19'da şematik olarak gösterilen kiriş eksenini 4 parçaya ayırarak ds mesafesi denklem (4.10) yardımıyla **199,994 mm** olarak hesaplanır.

$$ds = \frac{L - dL}{n} \quad (4.10)$$



Şekil 4.19 : İki elemanlı çözüm.

2 ve 2' noktalarına ait sehim hesaplamaları için öncelikle bir numaralı elemana ait moment değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bir numaralı eleman, sehimin simetrik olması nedeniyle 1 noktasının sağ ve sol tarafındaki çökme değerleri eşit olacaktır. Bu durumda eş çökmeye sahip E₁ numaralı eleman çiftinin ortalama moment değeri 1' noktasına ait moment değerine eşit olacaktır.

$w_{tahmin}^1 = 25$ mm olmak üzere

1 numaralı kontrol noktası için $x_1 = 0$ mm, $z_1 = 25$ mm ve

1' numaralı nokta için $x_1' = ds/2$ mm, $z_1' = 25$ mm olacaktır.

(4.9) denklemleriyle momentler hesaplanır.

$$M_{Yanal}(x_1') = 150\,001,4 \text{ N.mm}$$

$$M_{Eksenel}(z_1') = 25\,000,0 \text{ N.mm}$$

Denklem (2.6) yardımıyla:

$$r_1 = \frac{EI}{M_{Top}(x_1', z_1')} = 2468,6 \text{ mm}$$

$$d\theta_1 = ds / r_1 = 0,081 \text{ rad}, \text{ ilk eleman olması dolayısıyla } \alpha_1 = 0$$

Denklem (3.8) ve (3.9) yardımıyla dw_1 ve du_1 değerleri hesaplanır.

$$dw_1 = 2 \sin(0,081 / 2) \sin(0,081 / 2 + 0) = 8,10 \text{ mm}$$

$$du_1 = dw_1 / \tan(0,0810 / 2 + 0) = 199,78 \text{ mm}$$

Denklem (4.2) yardımıyla 2 noktasına ait koordinatlar hesaplanır.

$$x_2 = 199,78 \text{ mm}, z_2 = 25 - 8,10 = 16,9 \text{ mm}$$

2 numaralı elemana ait ortalama moment değerini hesaplamak üzere orta noktasına ait konumun hesaplanması gerekir. Bu amaçla 1' numaralı noktanın yeri bir numaralı elemana ait eğrilik değeri ve ds mesafesine $ds/2$ eklenmesiyle yapılacak hesaplamayla tayin edilir.

$$r_{1'} = 2468,6 \text{ mm}$$

$$d\theta_{1'} = d\theta_{1,5} = 0,1215 \text{ rad}$$

$$\alpha_{1'} = \alpha_1 = 0 \text{ rad}$$

$$dw_{1'} = 18,2 \text{ mm}$$

$$du_{1'} = 299,3 \text{ mm}$$

$$x_{2'} = 299,3 \text{ mm}$$

$$z_{2'} = 25 - 18,2 = 6,8 \text{ mm}$$

İki numaralı elemana ait moment değeri 2' kontrol noktasına ait konum değerleri yardımıyla:

$$M_{\text{top}} = 57167,2 \text{ N.mm}$$

$$r_2 = 7556,8 \text{ mm}$$

$$d\theta_2 = 0,0265 \text{ rad}$$

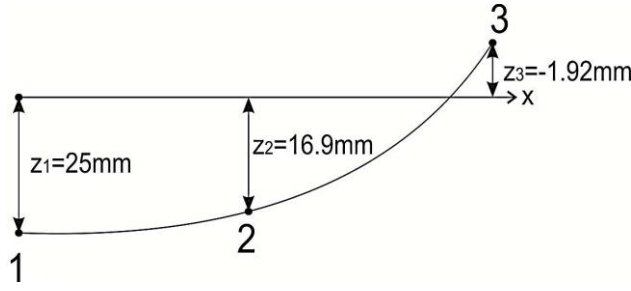
$$\alpha_2 = \sum_{m=2} d\theta_{m-1} = 0,0810 \text{ rad}$$

$$dw_2 = 18,82 \text{ mm}$$

$$du_2 = 199,10 \text{ mm}$$

$$x_3 = x_2 + du_2 = 398,88 \text{ mm}$$

$$z_3 = z_2 - dw_2 = -1,92 \text{ mm}$$



Şekil 4.20 : Sehim eğrisi.

Şekil 4.20’de görüleceği üzere sınır şartı olarak çökmenin sıfır olması gerekirken farklı değerde bulunması başlangıç noktasına ait çökme değerinin hatalı seçildiğini göstermektedir. Son noktaya ait çökme değeri, tahmin edilen sehim değerinin dengein sağlanacağı değerden büyük veya küçük olduğunu gösterir. Yapılan m. iterasyon m+1. iterasyon için yapılacak orta noktadaki sehim tahmini lineer düzeltmeyi veren denklem (4.3) ile gerçekleştirilir. Yakınsama hızını artıracak başka denklemlerin de oluşturulması mümkündür.

Bu durumda başlangıç noktasına ait çökme değeri 25+1,92 alınarak iterasyona devam edilmelidir.

Ayrıca eksenel yer değiştirmeyi veren du değerinin de hesaplanması gerekmektedir. Elde edilen veriler yardımı ile du değeri denklem (4.8) yardımı ile 2,25 mm olarak hesaplanır. Hesaplamanın başında du için yapılan tahmin yakınsama hızını artırmaktadır.

İterasyonları gerçekleştirmek üzere basit bir tablo oluşturmak mümkündür. Çizelge 4.9’da iki elemanlı çözüm için iterasyonun sonlandırıldığı tablolama gözükmektedir.

Çizelge 4.9 : 2 elemanlı çözüm.

EL	(mm)	(mm)	(N.mm)	(N.mm)	(N.mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
No	x_i'	z_i'	$M_{yana}l(x_i')$	$M_{Eksenel}(z_i')$	$M_{top i}$	r_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	$dw_{i'}$	$du_{i'}$
1	100,00	27,21	149426,39	27210,00	176636,4	2445,7	8,17	199,77	199,77	19,04	18,4	299,2
2	299,24	8,83	49805,01	8834,46	58639,5	7367,1	19,04	199,08	398,85	0,00		

Sınır koşullarının haricinde sonuçların da yakınsamasını kontrol etmek amacıyla eleman sayısını artırarak iterasyonlara devam edilir. Elde edilen en büyük çökme değerleri aşağıdaki Çizelge 4.10’da gösterilmektedir.

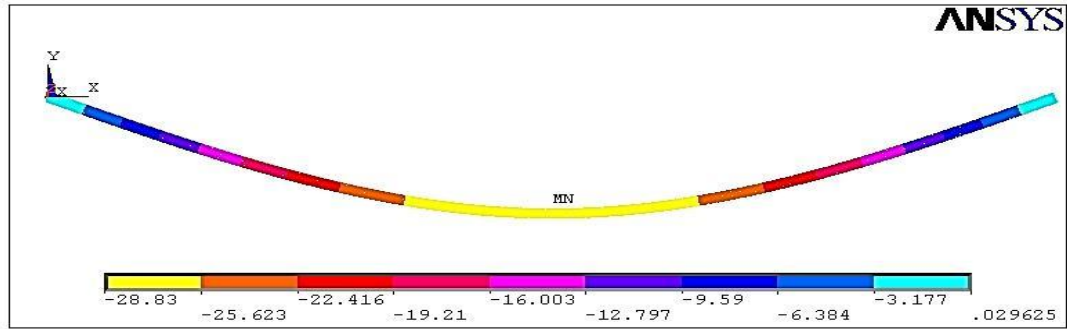
Çizelge 4.10 : Eleman sayısına bağlı elde edilen sonuçlar.

adet	n	4	10	20	40	80	200	400
mm	w	27,21	28,55	28,76	28,81	28,82	28,828	28,828
mm	du	2,3	2,49	2,52	2,53	2,53	2,53	2,53

Analitik çözümden elde edilecek sonuç ise (4.11) yardımıyla 28,99 mm olarak hesaplanır [41].

$$\xi^2 = \frac{PL^2}{4EI} \text{ olmak üzere } z_{\text{maks}} = \frac{F L^3}{48EI} \frac{\tan(\xi) - \xi}{\xi^3 \frac{1}{3}} \quad (4.11)$$

Analitik çözümde eksenel kuvvet neticesinde kiriş boyundaki değişimin ve mesnet noktaları arasındaki mesafe değişimleri göz önüne alınmamaktadır. Analitik ve sayısal sonuçlar arasındaki fark kabul farklarından meydana gelmektedir. Önerilen yöntemde eksenel yer değiştirmenin göz ardı edilmesi durumunda yakınsama 28,96 mm değerinde sağlanmaktadır.



Şekil 4.21 : ANSYS programından elde edilen çökme değerleri.

Aynı problem ANSYS sonlu elemanlar analizi programı ile BEAM3 tipi eleman seçerek lineer olmayan olarak çözülmesi durumunda eleman sayısına bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilir [38]. Şekil 4.21 ile sonlu elemanlardan elde edilen sehim değerleri görülmektedir. Çizelge 4.11’de ise eleman sayısının artırılmasıyla elde edilen orta noktaya ilişkin çökme değerleri yer almaktadır.

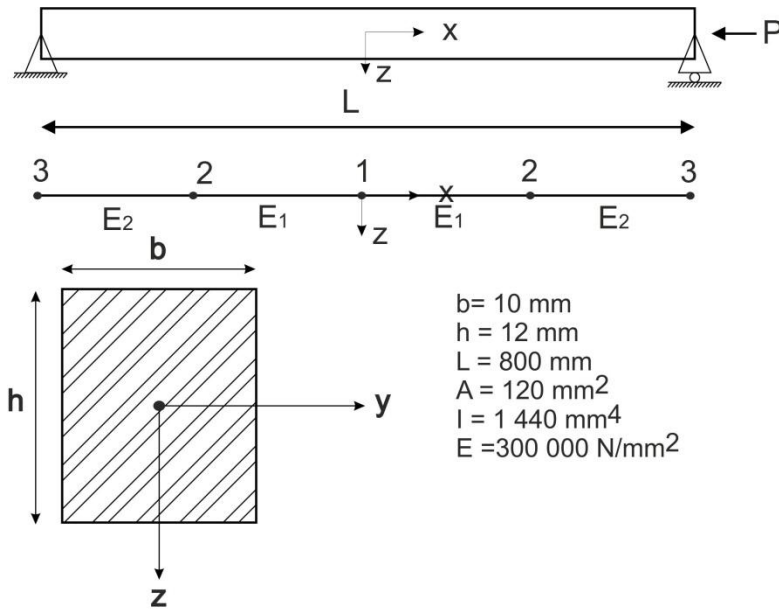
Çizelge 4.11 : Eleman sayısına bağlı olarak elde edilen ANSYS sonuçları.

adet	n	4	10	20	40	80	100	150	200	400
mm	w	28,787	28,813	28,817	28,818	28,828	28,828	28,828	28,830	28,830

ANSYS sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar birbirlerine oldukça yakın bulunmaktadır. Yakınsama hızlarına bakıldığı takdirde iki çözümü de 200 eleman sonrasında yakınsadığı görülmektedir.

4.2.2 Euler burkulma problemi

Önerilen yöntemde yapılan hesaplamalar kuvvetler dengesi prensibine dayanmaktadır. Denge, eğriliğin değiştirilmesi suretiyle aranmaktadır. Şekil 4.22’de bulunan kirişe ait veriler kullanılarak burkulma probleminin çözümü için P eksenel kuvvet değeri ardışık olarak artırılarak yapının dengesi kontrol edilecektir.



Şekil 4.22 : Eksenel basınç kuvveti altında kiriş.

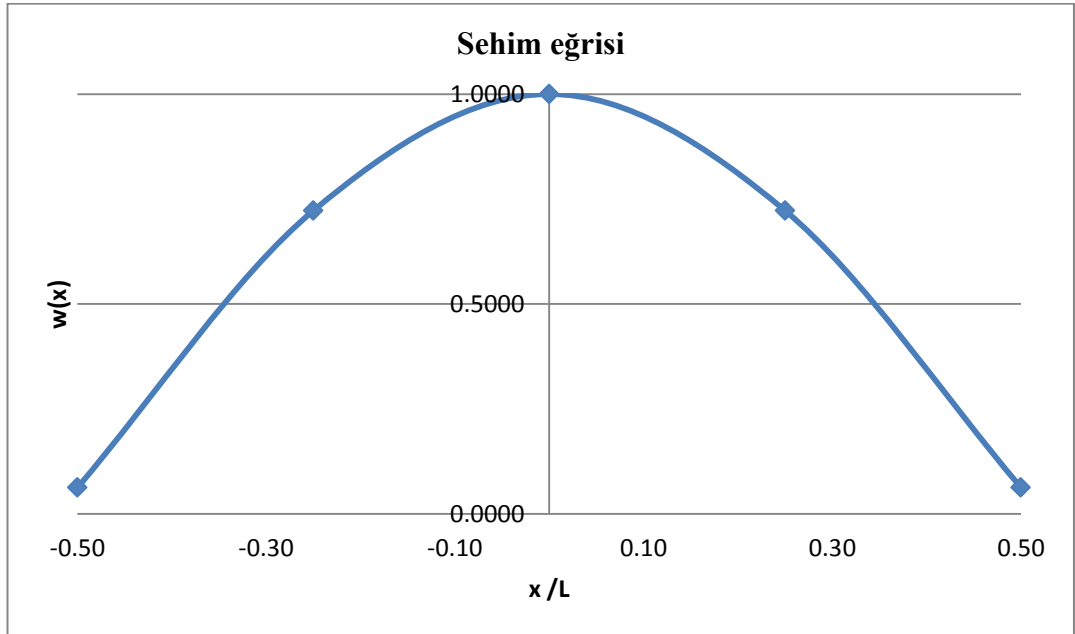
Bir önceki uygulamadan farklı olarak F yanal kuvvetinin olmaması durumundaki dayanım hesapları aynı denklemlerle gerçekleştirilecektir. Verilen P normal kuvveti ve tahmin edilen sehim değeriyle yapılacak hesaplama sonucunda denge oluşmaz ise sınır koşulları sağlanamayacaktır. Sınır koşullarında meydana gelen sapma miktarına göre sehim değeri revize edilerek iterasyon tekrarlanacaktır. Bu hesaplamada yine ilk uygulamada olduğu üzere bir başlangıç çökme değeri tahmin edilerek kirişin geldiği denge durumu hesaplanmaya çalışılacaktır. Eksenel kuvvet değerinin artırarak hesaplamalara devam edilecek ve çökmenin başladığı eksenel kuvvet değeri kritik burkulma kuvveti olarak hesaplanmış olacaktır.

Hesaplamaların elastik bölgede gerçekleştiği kabulüyle eğrilik değerleri denklem (2.6) yardımıyla hesaplanacaktır.

Şekil 4.22’de yer alan kirişte P kuvvetinin 6000 N olması durumunda toplam 4 elemanla yapılan hesaplamalar Çizelge 4.12’de yer almaktadır. Orta noktaya ait sehim değeri 1 mm olarak alınmıştır. 3. kontrol noktasına ait z_3 değeri 0,0628 mm olarak hesaplanmıştır. Sehim eğrisi ise Şekil 4.23 ile gösterilmektedir.

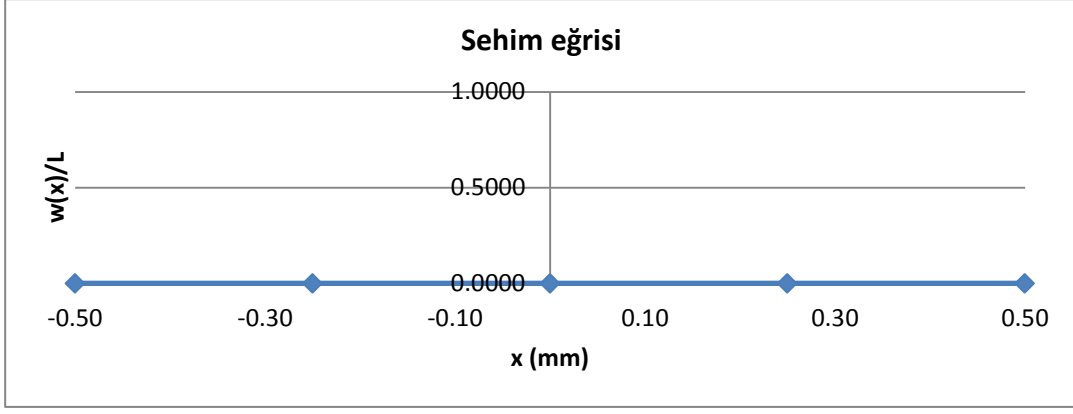
Çizelge 4.12 : P=6000 N (1. İterasyon).

	Mm	mm	N.mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
No:	x_i	z_i	$M_{top i}$	r	dwi	dui	x_{i+1}	z_{i+1}	dw_i	du_i
1	100	1,0000	6000	72000	0,28	199,97	199,97	0,7223	0,6	299,9
2	299,9	0,38	2251	191893	0,66	199,97	399,93	0,0628		



Şekil 4.23 : Sehim eğrisi.

Çizelge 4.12’de ve Şekil 4.23’te yer alan sonuçlardan görüleceği üzere 1 mm orta noktada yapılan sehim tahmini sınır şartlarını sağlamamaktadır. İterasyonun devam ettirilmesi durumunda orta noktaya ait sehim değerinin tahmin değerinden daha küçük bir değer alınması gerekmektedir. İterasyonların devam ettirilmesiyle nihai sehim eğrisi Şekil 4.24 ile gösterilmektedir. Uygulanan kuvvete karşılık yapı dengesini sağlamak için çökme oluşturmamış, burkulma gerçekleşmemiştir. Denge sadece kiriş boyunda meydana gelen kısalma ile sağlanmıştır.

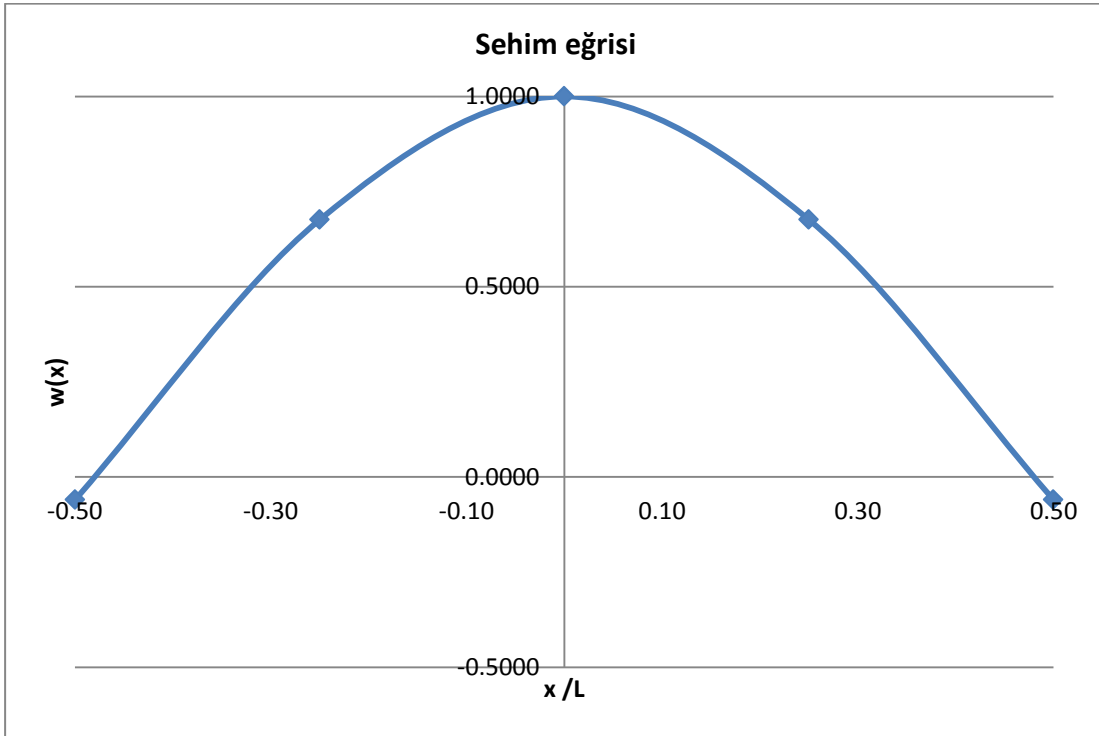


Şekil 4.24 : Son iterasyona ait sehim eğrisi.

Hesaplamalarda P kuvvetinin 7000 N ve sehim tahminin 1 mm olarak alınması durumunda yinelenen sonuçlar ilk iterasyon için Çizelge 4.13'te yer almaktadır.

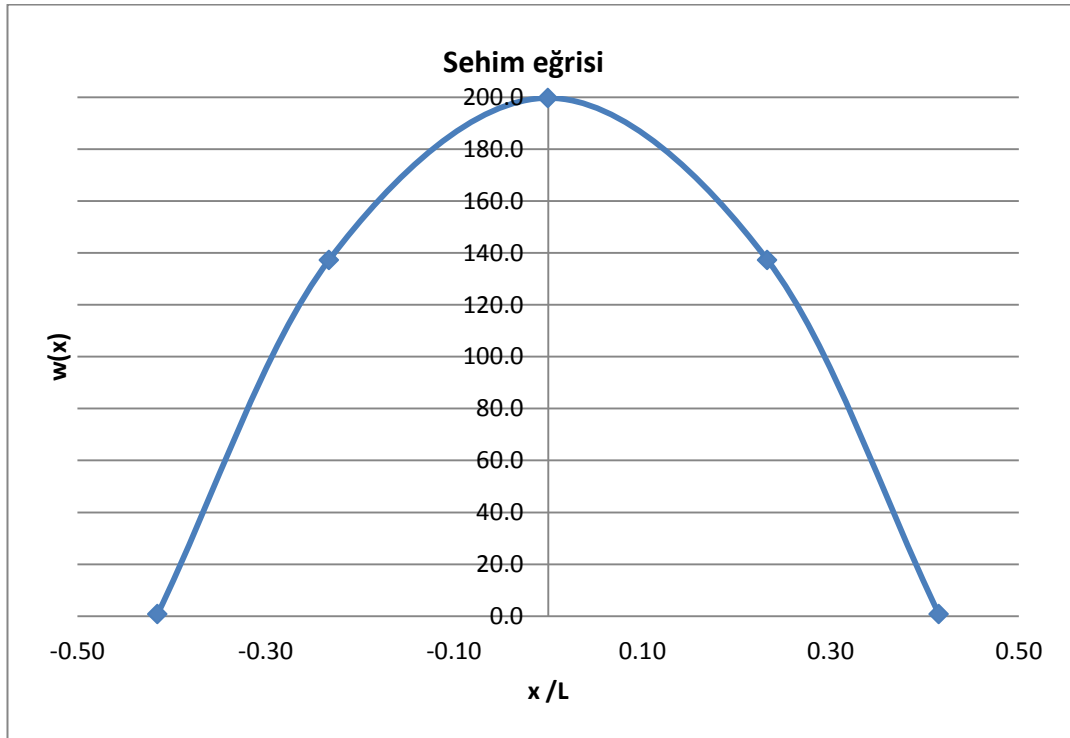
Çizelge 4.13 : P=7000 N (1. İterasyon).

EL	mm	mm	N.mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
No:	x_i	z_i	$M_{top i}$	r	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	dw_{i+1}	du_{i+1}
1	100	1.0000	7000	61714	0.32	199.96	199.96	0.6761	0.7	299.9
2	299.9	0.27	1898	227629	0.74	199.96	399.92	-0.0597		



Şekil 4.25 : Sehim eğrisi birinci iterasyon.

Şekil 4.25’de görüleceği üzere son kontrol noktası olması gereken seviyenin altında bulunmaktadır. Bu durum tahmin edilen sehım değeri için denge durumundan küçük olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.13’ten z_3 değeri için $-0,0597$ mm olduğu okunacaktır. Dengenin sağlanması için sehım değeri revize edilmelidir. İterasyonların devam ettirilmesiyle orta noktaya ait sehım değeri $193,7$ mm civarında yakınsadığı görülecektir. Bu sonuca göre 7000 N değerinde eksenel kuvvet değeri kritik burkulma kuvvetinden büyük olduğu söylenebilir. Şekil 4.26 ile sehım eğrisinin dengeye ulaştığı durum gösterilmektedir. Verilen bu eksenel kuvvet değerinde yapı dengeye ulaşmak için çökme meydana getirmiştir. Biraz daha açmak gerekirse verilen P değeri için denge denklemleri ancak elde edilen sehım eğrisinin gerçekleşmesi durumunda oluşturduğu gerilme dağılımlarıyla sağlanacaktır.



Şekil 4.26 : Sehım eğrisi denge durumu.

Aşağıdaki çizelgede eleman sayısına bağlı olarak P normal kuvvetlerine bağlı olarak orta noktaya ait sehımın dengeye ulaştığı değerler gösterilmektedir.

Çizelge 4.14 ile eleman sayısının artırılmasına bağlı olarak eksenel kuvvet değerlerinde kirişin dengeye eriştiği çökme değerleri yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde eksenel kuvvet değerinin 6663 N civarında olduğu durumda burkulma başlamaktadır.

Çizelge 4.14 : Eleman sayısına bağlı olarak elde edilen çökmeler.

Fx	n=4	n=200	n=400
6663 N	0 mm	0 mm	0.001 mm
6664 N	0 mm	0,001 mm	0,003 mm
6665 N	0 mm	7 mm	7 mm
6666 N	0 mm	11 mm	11 mm
6667 N	0,001 mm	14 mm	14 mm
6668 N	6,2 mm	16 mm	16 mm
6669 N	10,9 mm	17 mm	17 mm

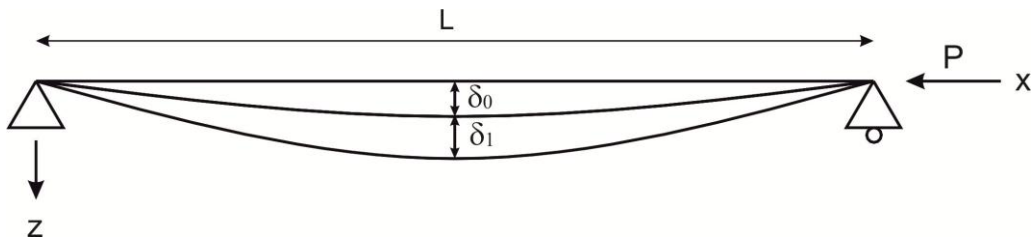
Euler tarafından öngörülen analitik çözüm ise denklem (4.12) ile 6662 N olarak hesaplanır [42].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L^2} \quad (4.12)$$

Sonuçlar incelendiğinde kritik burkulma değerine gelinceye kadar yapı kuvvetler dengesini aksel kısılmayla sağlarken kritik değer aşılmasıyla dengeyi ancak çökme yaparak gerçekleştirmektedir. Elde edilen kritik kuvvet değeri ve Euler kritik burkulma değeri bir birine çok yakın çıkmaktadırlar. Yapılan çözümleme yönteminde değişikliğe gidilmeden burkulma sonrası hesaplamalara devam etmek mümkün olmaktadır.

4.2.3 Başlangıç sehimine ilişkin uygulama

Yine aynı kirişe ait özellikleri kullanarak başlangıç sehimini bulunması durumundaki dayanım hesapları yapılacaktır. Büyük sehimlerde eksene ait çökme değerlerinin hassasiyeti oluşacak moment değerleri üzerindeki etkisi fazladır. Analitik çalışmalarda başlangıç sehimlerinin modellenmesi trigonometrik seriler yardımıyla gerçekleştirilmektedir [10,42].



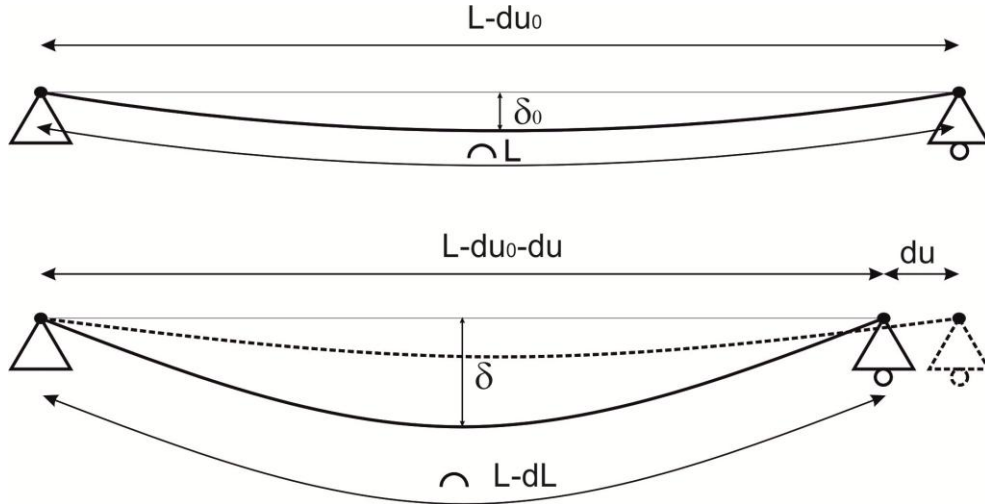
Şekil 4.27 : Başlangıç öncesi ve sonrası sehimler.

Şekil 4.27’de gösterilmekte olan bir kirişin orta noktasında δ_0 kadar bir çökme bulunması ve başlangıç sehiminin bir sinüs dalga formu şeklinde kabul edilmesi halinde P eksenel kuvveti altında yaptığı sehimin analitik çözümü denklem (4.13)’te verilmiştir [42].

$$z_0(L/2) = \delta_0 \text{ olmak üzere } z_0(x) = \delta_0 \sin(\pi x / L)$$

$$\zeta = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} \text{ olmak üzere } z(x) = \frac{2\delta_0}{\zeta^2} \left(\frac{\cos(\zeta - 2\zeta x / L)}{\cos(\zeta)} - 1 \right) \quad (4.13)$$

Yapılacak sayısal çözümlemede mesnetler arası mesafe analitik çözümde kullanılan L kiriş uzunluğuna eşit alınmıştır. Bu durumda kirişin başlangıç sehiminden kaynaklanan kiriş boyu farkı da dikkate alınmıştır. Bu durum Şekil 4.28 ile şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.28 : İkinci merteye etkiler altında başlangıç öncesi ve sonrası sehimler.

Sayısal uygulama amacıyla Şekil 4.27 ile gösterilen kirişin orta noktasında 10 mm çökme olması durumundaki sehim hesaplaması 1000 N değerinde basınç kuvveti altında gerçekleştirilecektir.

$$P = 1000 \text{ N}$$

$$L - du_0 = 800 \text{ mm}$$

Öncelikle başlangıç sehiminin modellenmesi gerekmektedir. Çözümün yarı uzunluk için toplam iki eleman ile gerçekleştirilmesi durumunda. Bir numaralı elemana ait eğrilik yarıçapı hesabı denklem (2.6) ve denklem (4.1) yardımıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned}
x_1 &= 400 \text{ mm} \Rightarrow w_0(x_1) = z_1 = 10 \text{ mm} \\
x_2 &= 200 \text{ mm} \Rightarrow w_0(x_2) = z_2 = 7,071 \text{ mm} \\
du_1 &= 200 \text{ mm}, dw_1 = 2,929 \text{ mm} \\
dc_1 &= 200,021 \text{ mm} \\
\alpha_1 &= 0 \text{ rad} \\
d\theta_1 &= 0,0293 \text{ rad} \\
r_{01} &= 6829,9 \text{ mm}
\end{aligned}$$

İki numaralı eleman için eğrilik yarıçapı hesabı:

$$\begin{aligned}
x_2 &= 200 \text{ mm}, z_2 = 7,071 \text{ mm} \\
x_3 &= 0 \text{ mm}, z_3 = 0 \text{ mm} \\
du_2 &= 200 \text{ mm}, dw_2 = 7,071 \text{ mm} \\
dc_2 &= 200,125 \text{ mm} \\
\alpha_2 &= 0,0293 \text{ rad} \\
d\theta_2 &= 0,0121 \text{ rad} \\
r_{02} &= 16550,1 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Elde edilen eğrilik yarıçaplarının $P=0$ değeri için hesaplama gerçekleştirilirse aşağıdaki Çizelge 4.15 elde edilir.

Çizelge 4.15 : 2 elemanlı başlangıç sehimi hesapları, $du_0=0$ mm.

EL	(mm)	(mm)	(mm)	(rad)	(rad)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
No:	x_i	z_i	r	$d\theta_i$	α_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}
1	100	10,0000	6830	0,0293	0,0000	2,93	199,97	199,97	7,07
2	299,9	3,41	16550	0,0121	0,0293	7,06	199,87	399,85	0,01

Hesaplama kirişin uzunluğunun 800 mm alınması ve ds mesafesinin 200 mm alınması durumunda elde edilecek orta nokta çökme değerinin başlangıç değerinden farklı olduğu görülmektedir. Bu sonucun nedeni kiriş uzunluğunun mesnetler arası mesafeden büyük olmasıdır. Yapılacak iterasyon neticesinde du_0 değerinin 0,4 mm olarak hesaplanmasıyla aşağıdaki Çizelge 4.16 elde edilir.

Çizelge 4.16 : 2 elemanlı başlangıç sehimi hesapları, $du_0=0,4$ mm.

EL	(mm)	(mm)	(mm)	(rad)	(rad)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
No:	x_i	z_i	R	$d\theta_i$	α_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}
1	100	10,00	6829,90	0,03	0,00	2,93	200,07	200,07	7,07
2	300,05	3,41	16550,10	0,01	0,03	7,07	199,97	400,05	0,00

Kiriş boyunun tayin edilmesi ve başlangıç eğrilik değerlerinin bilinmesiyle 1000 N değerinde eksenel kuvveti altındaki sehim hesaplamaları başlangıç eğrilik yarıçaplarının denklem (3.11) yardımıyla sehim hesaplamalarında kullanılmasıyla aşağıdaki Çizelge 4.17 elde edilir.

Çizelge 4.17 : 2 elemanlı sehim hesaplamaları.

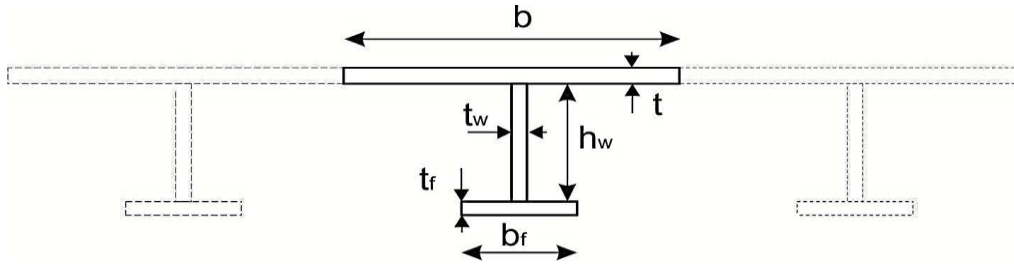
EL	(mm)	(mm)	(N.mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(rad)	(rad)	(mm)	(mm)
No:	x_i	z_i	$M_{top\ i}$	r_o	r_f	r	$d\theta_i$	α_i	dw_i	du_i
1	100	11,83	11830,09	6830	36517	5754	0,0348	0,0000	3,48	200,05
2	300,01	4,00	4003,50	16550	107906	14349	0,0139	0,0348	8,35	199,92

Orta noktaya ait çökme değeri 11,83 mm olarak hesaplanmıştır. Analitik çözüm ise denklem (4.13) yardımıyla 11,82 mm olarak elde edilmektedir. Eleman sayısının 40 ve 200 olarak alınması durumunda orta noktaya ait çökme değeri her iki iterasyon için de 11,77 mm olarak elde edilmiştir.

5. STİFNERLENMİŞ PLAK ELEMAN HESAPLAMALARI

Bu bölümde geometrik eğrilik yönteminin stifnerlenmiş plaklara ait mukavemet hesaplarına uyarlanması gerçekleştirilecektir. Bölüm 4'te kiriş elemanlar için yapılan uygulama geliştirilerek stifnerlenmiş plaklara uyarlanacaktır. Stifnerlenmiş plaklar ve kiriş elemanlar arasında bir takım farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar gözetilerek işlem adımları yeniden düzenlenecektir.

Stifnerlenmiş plaklarda stifner olarak Hollanda profili veya lama gibi kiriş elemanları kullanılmasının yanında yapma stifnerler de kullanılmaktadır. Bu durumda yapı çeşitli ebatlardaki plakların birleştirilmesinden meydana gelebilecektir. Şekil 5.1'de plak, gövde ve alın lamasından meydana gelen stifnerlenmiş plak görülmektedir.



Şekil 5.1 : Stifnerlenmiş plak eleman.

Stifnerlenmiş plak elemanını oluşturan parçalar her zaman kiriş teorisine uygun ebatlarda bulunmayabilir. Plak genişliğinin veya gövde yüksekliğinin büyük olması kiriş kabulünün dışına çıkılmasına sebep olabilir. Bu durumda hesaplamaların plak denklemleriyle gerçekleştirmek yerine daha hızlı sonuç almak ve çözümü basitleştirmek için etkin genişlik tanımı kullanılarak kiriş yöntemiyle çözüme devam edilecektir. Plak üzerindeki basınç gerilmeleri bir seviyeden sonra lokal plak burkulmasını gerçekleştirecektir. Lokal plak burkulmasının sonucu olarak da enine doğrultuda sehim meydana gelecektir. Sehimin meydana geldiği plak genişliği boyunca gerilme lineer olmayan bir dağılım gösterecektir. Plak üzerinde oluşan lineer olmayan gerilme dağılımı etkin genişlik tanımı kullanılarak lineer hale getirilerek hesaplamalarda kullanılacaktır [12,43].

Stifnerlenmiş plaklar ve kirişler arasındaki bir diğer fark ise genellikle stifner ve plağın kaynaklanarak birleştirilmiş olmasından doğmaktadır. Kaynak işlemi neticesinde yapı üzerinde artık kaynak gerilmesi bulunacaktır. Bu gerilmelerin hesaplarda dikkate alınması gerekmektedir [44].

Plak malzemesi ve stifner malzemesi aynı özelliklere sahip olmayabilir. Hatta stifner kendi içinde farklı malzemelerden üretilmiş olabilir. Bu durum göz önüne alınarak hesapların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bölümde gerçekleştirilecek tüm çalışmalar stifnerlenmiş plağı oluşturan alın laması, gövde ve plağın farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerden oluştuğu duruma göre yapılacaktır.

Kesit tesirleri yapının şekil değiştirmiş durumu göz önüne alınarak hesaplanacaktır. Stifnerlenmiş plak kirişte olduğu gibi kiriş eksenini ve en kesit ile tanımlanmaktadır. En kesit etkin genişlik değerlerine göre değişim gösterecektir. Etkin genişliğin değişim göstermesiyle eksene ait konumu değişecektir. Kesit tesirleri eksene göre hesaplanacaktır. Bu hesabın gerçekleşmesi için eksene ait noktaların konumlarının bilinmesi gerekmektedir.

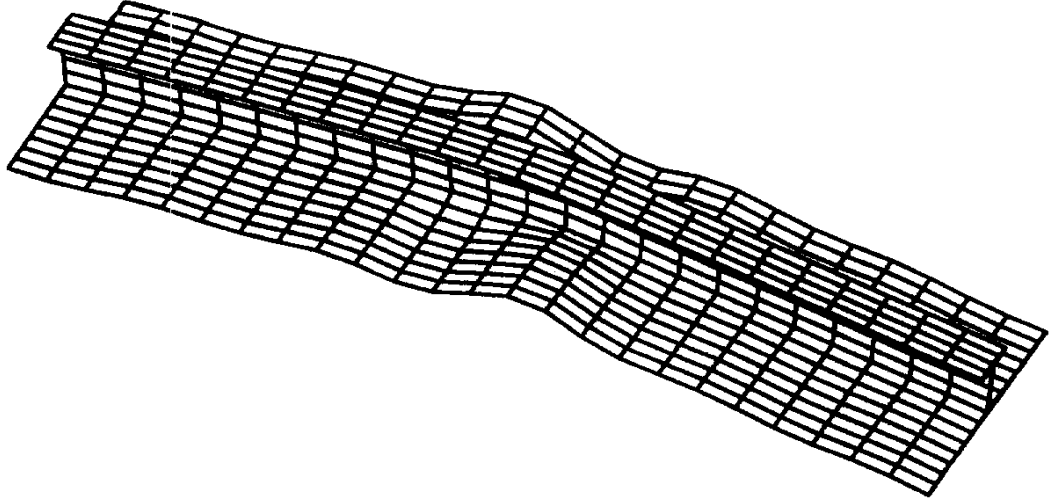
Kiriş eksenine ait noktaların hesaplanması eğrilik değerlerinin geometrik olarak kullanılmasıyla elde edilecektir. Bu hesap için momentlere karşı gelen eğrilik değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Moment ve eğrilik değerleri arasındaki bağıntılar stifnerlenmiş plağın farklı mekanik özelliklere sahip olması durumuna göre düzenlenecektir. Oluşan sehim neticesinde kesit üzerindeki farklı mekanik özelliklere sahip elemanların eğrilik değerlerinin eşit olmasına karşılık, zorlamaya karşı gösterecekleri dayanım değerleri mekanik özelliklerine göre farklılık gösterecektir.

Yapının nihai mukavemet noktasından sonraki durumunu hesaplamak üzere denklemler oluşturulacaktır. Bu sayede yapının düşük değerlerde de olsa plastik bölgede oluşturacağı mukavemet değeri hesaplanmış olacaktır.

Yöntemin anlaşılmasına yönelik olarak deneysel bir çalışmanın verileri kullanarak iki elemanlı sayısal hesaplama gerçekleştirilecektir. Daha sonra eleman sayısının artırılmasıyla yakınsamanın gerçekleştirildiği sonuçların deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen verilerle karşılaştırılması yapılacaktır.

5.1 Etkin Genişlik

Plak üzerindeki lineer olmayan gerilme dağılımının hesaplamalarda kullanılması etkin genişlik tanımı yardımıyla gerçekleşecektir. Basınç gerilmeleri altında bulunan stifnerlenmiş plaklarda burkulma ve burkulma sonrası düzgün olmayan bir gerilme dağılımı oluşur [43,45]. Şekil 5.2’de lokal plak burkulmasına uğramış stifnerlenmiş plak gösterilmektedir.



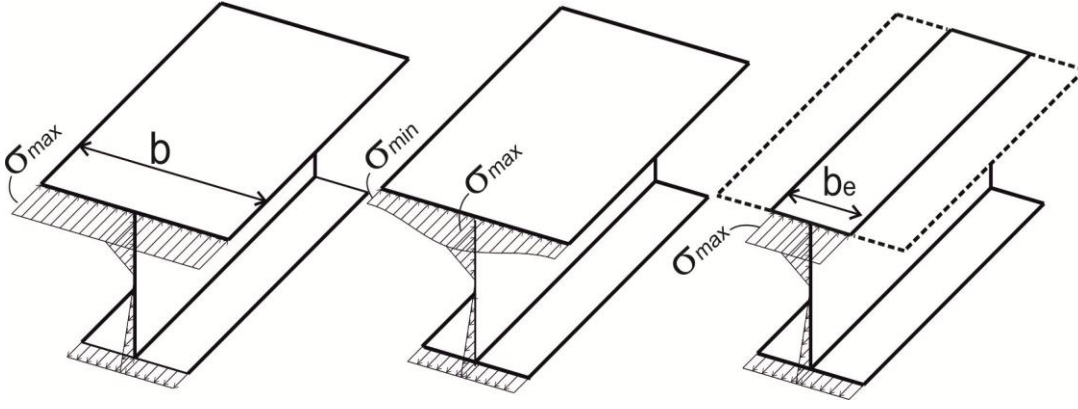
Şekil 5.2 : Lokal plak burkulması [51].

Plaklarda lineer olmayan gerilme dağılımı lokal plak burkulmasının başlamasıyla oluşur. Lokal plak burkulması ise plak üzerindeki gerilmenin kritik burkulma değerinin aşılmasıyla oluşmaya başlar ve gerilme arttıkça dağılımdaki bozukluk daha yüksek değerlere çıkar.

Denklem (5.1) ile kritik plak burkulma gerilme değeri hesaplanabilecektir. Denklem (5.1)’de yer alan k değeri plağın sınır şartlarına göre belirlenecek olup Şekil 5.1’de gösterildiği üzere plakların birbirlerine bağlı olma durumu göz önüne alındığında 4 değeri kullanılacaktır [9,45].

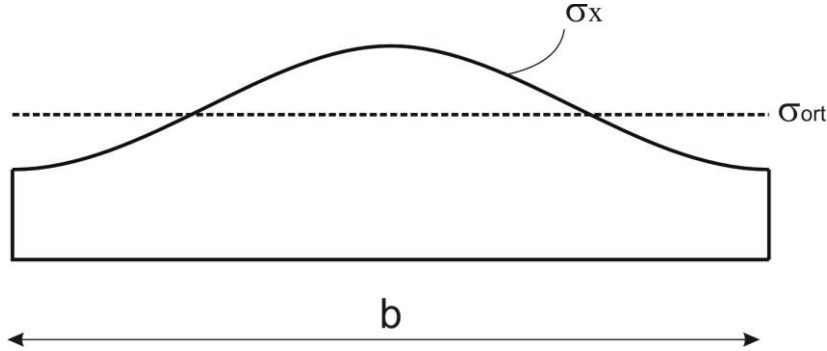
$$\sigma_{crp} = k \pi^2 \frac{E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (5.1)$$

Şekil 5.3’te stifnerlere ait plak t kalınlığında, b genişliğinde bulunmaktadır. Birinci yapıda plak üzerinde düzgün gerilme dağılımı, ikinci yapıda ise lineer olmayan gerilme dağılımı, son şekilde ise lineer olmayan gerilme dağılımının lineerleştirilmiş hali olan etkin genişlikli durum gösterilmektedir.



Şekil 5.3 : Plak üzerinde gerilme dağılımı.

Plak üzerinde bulunan lineer olmayan gerilme dağılımının denge denklemlerinde kullanılması çözümleme süresini artıracaktır. Ayrıca lineer olmayan gerilme dağılımı elde etmek için plak denklemleri kullanılarak çözüm aranacağı için fazladan işlem gerekecektir. Lineer olmayan gerilme dağılımının oluşturacağı iç kuvvet değerlerine denk lineer gerilme dağılımı aranacaktır. Bu amaçla denklem (5.2)'de lineer olmayan gerilme dağılımı izdüşüm denge denkleminde çözülerek elde edilen sonuca eşdeğer ortalama gerilme değeri tanımlanmıştır.



Şekil 5.4 : Lineer olmayan gerilme dağılımı ve ortalaması.

$$\int \sigma_x(z) dA_{\text{plak}} = \sigma_{\text{ort}} b t \quad (5.2)$$

Şekil 5.4'te lineer olmayan gerilme dağılımı ve ortalama gerilme dağılımı gösterilmektedir. Lineer olmayan gerilme dağılımında plağın orta noktasındaki en büyük gerilme değeri kenara yaklaşırken azalmaktadır. Bu gerilme dağılımına eşdeğer bir başka gerilme dağılımı daha oluşturmak mümkündür. Bu dağılımda ortalama gerilme değeri kullanmak yerine en büyük gerilme değerinin değişmediği durumda oluşan gerilme dağılımı kullanılacaktır. Bu gerilme değeri plak genişliği boyunca devam etmeyecektir. Genişlik değeri etkin genişlik olarak tanımlanacak ve

değeri denklem (5.3) yardımıyla hesaplanacaktır. Denklemde yer alan K değeri etkin genişlik oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\sigma_{ort} b t = b_e t \Rightarrow K = \frac{b_e}{b} = \frac{\sigma_{ort}}{\sigma_{maks}} \quad (5.3)$$

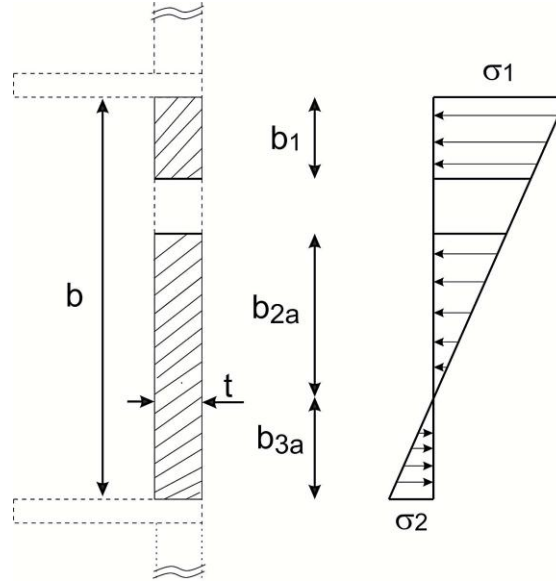
Etkin genişlik değerinin hesaplanmasına yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu problemin yaklaşık analitik çözümüne ilişkin ilk çalışma Bortsch tarafından yapılmış ve sonrasında genel çözüme ilişkin teorik çözüm Von Karman tarafından gerçekleştirilerek etkin genişlik tanımı ortaya atılmıştır [9,43]. Etkin genişliği hesaplamak üzere Von Karman tarafından plak denklemlerinin çözülmesiyle elde edilen denklem (5.4) kullanılacaktır. Etkin genişlik kavramının kullanılmasıyla plak denklemlerinin çözümü ve lineer olmayan gerilme dağılımlarına ait integrasyonlardan kurtulmuş olunacaktır.

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{maks}}{E}} \Rightarrow K = \frac{b_e}{b} = \begin{cases} \frac{1,9}{\beta} & \Leftrightarrow \beta > 1 \\ 1 & \Leftrightarrow \beta \leq 1 \end{cases} \quad (5.4)$$

Von Karman tarafından gerçekleştirilen etkin genişlik hesabına ilişkin denklem birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. Klas kuruluşları tarafından günümüzde en çok kullanılan denklem Winter ve Faulkner tarafından geliştirilen denklemlerdir. Bu denklemler Von Karman tarafından geliştirilen denkleme plağın başlangıç sehimlerine ilişkin düzeltmelerin eklenmesiyle elde edilmiştir [46,47]. Kaynaklı birleşme nedeniyle oluşan artık gerilmelerin etkin genişliğe olan etkisi de ayrıca incelenmiştir. Elde edilen düzeltmeler deneyler sonucunda erişilen ampirik denklemlerdir. Önerilen yöntemde başlangıç sehimi veya artık gerilmeler gibi faktörlerin hesaplamaların içerisinde yer alması nedeniyle bu faktörlerin ampirik olarak dikkate alındığı etkin genişlik denklemleri kullanılmayacaktır.

Lokal plak burkulması stifnerlenmiş plağa ait plak üzerinde gerçekleşebileceği gibi stifner gövdesinde de meydana gelebilir. Gövde üzerinde meydana gelecek burkulma neticesindeki etkin genişlik hesaplamalarını gerçekleştirmek için iki yöntem bulunmaktadır. Birinci yöntem eğilme neticesindeki gerilme değerlerindeki değişim göz önüne alınarak yapılır [48]. Diğer yöntem ise gövde üzerinde bulunan ortalama basınç gerilmesini kullanarak denklem (5.4)'te çözülmesiyle elde edilir. Şekil 5.5'te

plak ve üzerindeki gerilme dağılımı gösterilmektedir. Bu gerilme dağılımına göre etkin genişlik hesabı (5.5) ile verilmiştir.



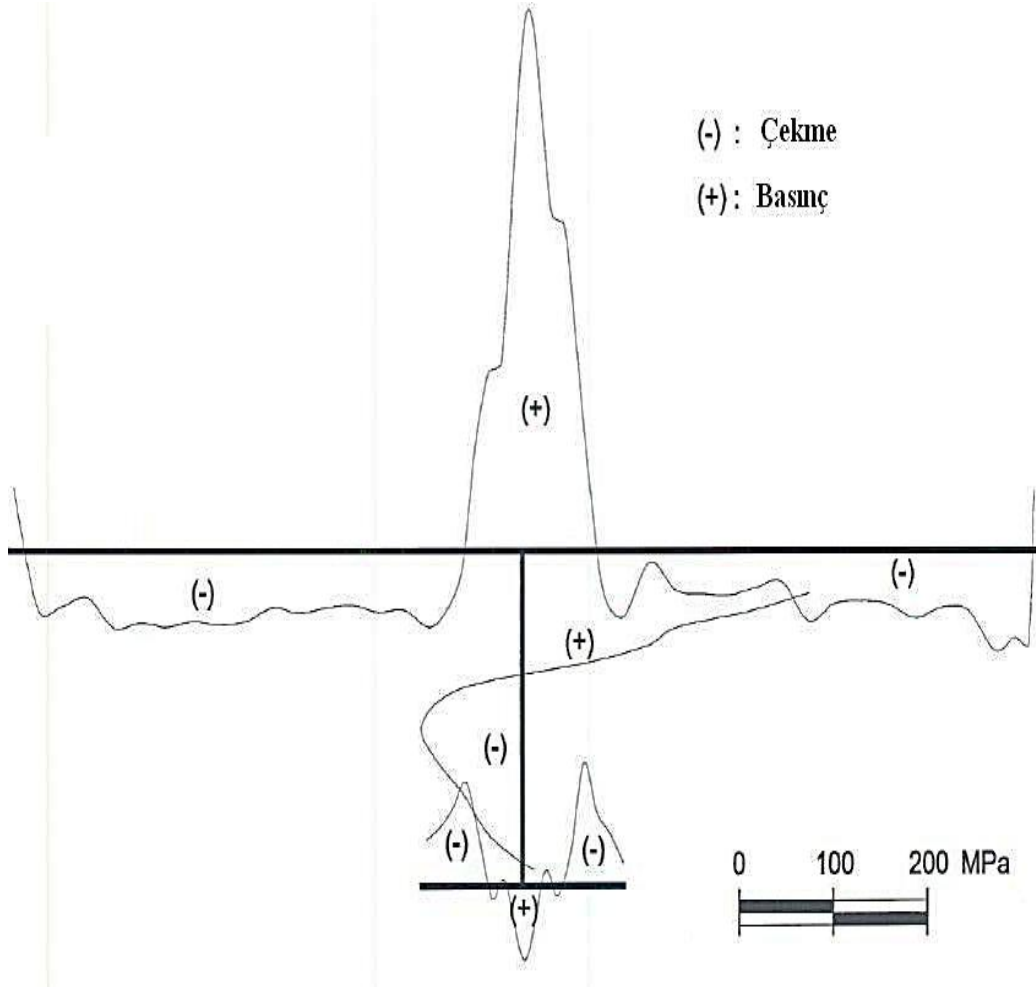
Şekil 5.5 : Plak üzerinde gerilme dağılımı ve etkin genişlikler.

$$\begin{aligned}
 \Psi &= \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \\
 k &= 4 + 2(1 - \Psi)^3 + 2(1 - \Psi) \\
 \lambda &= \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr}}} \\
 b_e &= \frac{b}{\lambda} \\
 b_1 &= \frac{b_e}{3 - \Psi} \\
 \Psi \leq -0,236 &\rightarrow b_{2a} = b_e / 2 \\
 \Psi > -0,236 &\rightarrow b_{2a} = b_e - b_1
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

5.2 Artık Kaynak Gerilmesi ve Etkileri

Kaynak esnasında kaynak bölgesindeki metal tümüyle plastik bölge içerisinde bulunmaktadır. Kaynak sırasında veya sonrasında ise kesit üzerindeki plastik bölgeler soğumaya başlarken, elastik kalan bölgeler ise ısınacaklardır [1]. Elastik bölgelerin ısınmasıyla oluşan kuvvetlerin etkisine ancak plastik bölgelerin yeteri kadar soğuyarak elastik özellik kazanmaları ile karşı koyabilecektir. Kesit üzerindeki farklı bölgelerin oluşturduğu etkileşimin kaynak bölgesi çevresinde malzemenin akma gerilmesine yakın bir çekme gerilmesi oluşacaktır [1]. Plak üzerinde ölçülen

artık gerilme dağılımı Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Bu değerin ölçülmesi yerine değerlerin hesabına yönelik birçok denklem bulunmaktadır.

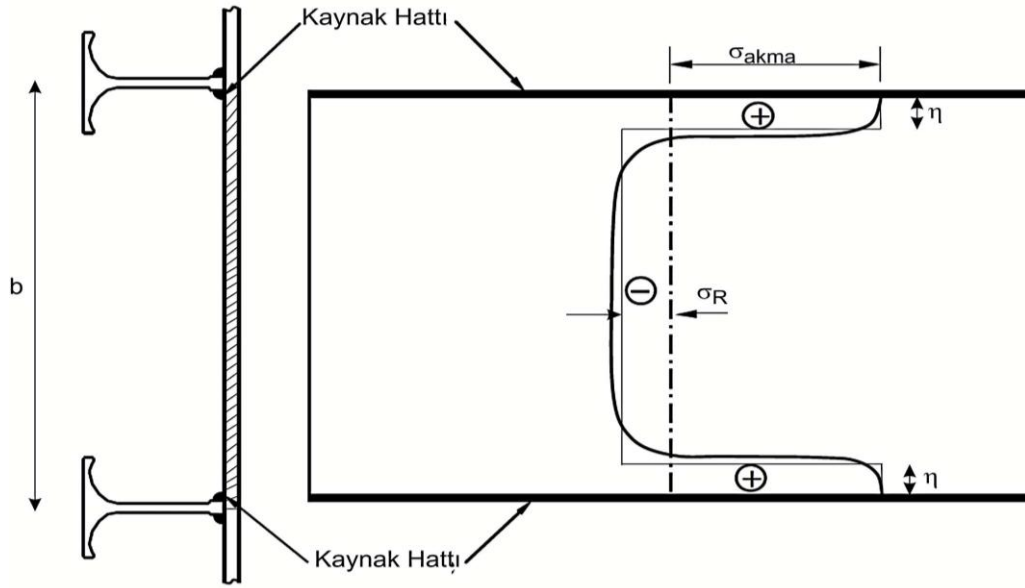


Şekil 5.6 : Artık kaynak gerilmeleri [50].

5.2.1 İdealleştirilmiş artık kaynak gerilme dağılımı

Artık kaynak gerilme dağılımının idealleştirmek mümkündür. Şekil 5.7'de tipik bir artık kaynak gerilmesi dağılımı ve idealleştirilmiş artık kaynak gerilme dağılımı gösterilmektedir [1,44]. Kaynak yapılan bölge civarında çekme gerilmesi akma sınırına kadar yaklaşmakla birlikte diğer bölgelerde idealleştirme yapılarak σ_R kadar bir basınç gerilmesi görülmektedir [1]. Artık kaynak gerilmesinin değeri denklem (5.6) yardımıyla elde edilir [1]. σ_R gerilmesine artık kaynak gerilmesi adı

verilmektedir.
$$\frac{\sigma_R}{\sigma_{akma}} = \frac{2\eta}{\frac{b}{t} - 2\eta} \quad (5.6)$$

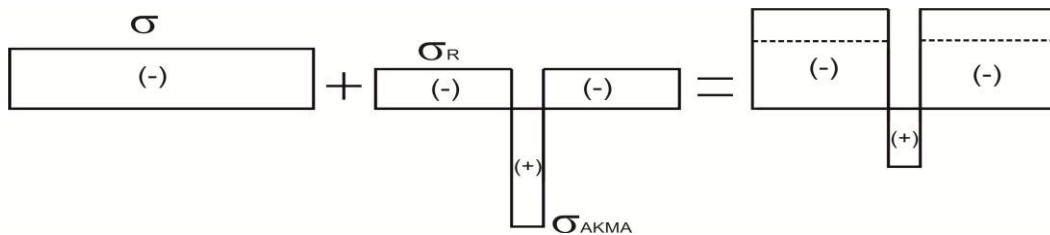


Şekil 5.7 : Kaynaktan doğan gerilmeler ve idealleştirilmesi [1].

Plak üzerindeki artık kaynak gerilme dağılımı izdüşüm denge denkleminde yerine konularak elde edilecek iç kuvvet değeri sıfır değerini verecektir. Denklem (5.6) bu dengeye bağlı olarak elde edilmektedir [1].

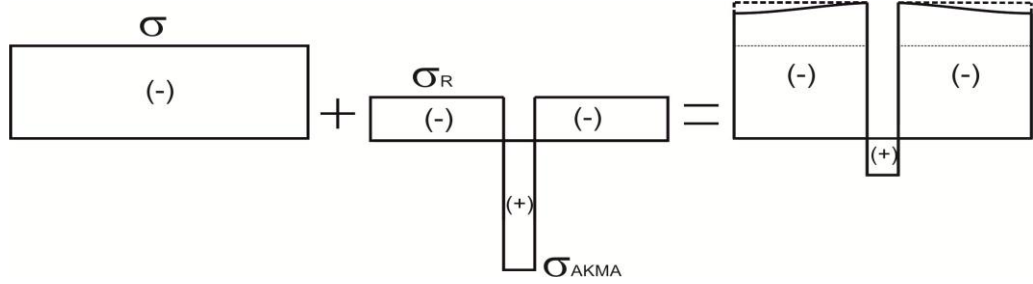
5.2.2 Artık kaynak gerilmesi altında etkin genişlik hesabı

Plak üzerindeki toplam gerilme dağılımı zorlamalar neticesinde gerçekleşen gerilme dağılımı ve artık kaynak gerilme dağılımının toplamından meydana gelecektir. Şekil 5.8’de plak üzerinde yer alan gerilmeleri göstermektedir. Birinci şekil sadece zorlama kuvvetlerine bağlı gerilmeleri oluşturmaktadır. İkinci şekil ise artık kaynak gerilme dağılımını temsil etmektedir. Son şekil ise her iki gerilme dağılımının toplamından oluşmaktadır. Toplam gerilme dağılımındaki en büyük basınç gerilme değerinin plak kritik burkulma gerilmesinden düşük olduğu kabul edilir. Birinci gerilme dağılımından iç kuvvet değeri hesaplanabilirken artık kaynak gerilme dağılımı bir iç kuvvet oluşturmamaktadır. Toplam gerilme dağılımına ait iç kuvvet değeri ise sadece zorlamalara ait oluşan gerilme dağılımının oluşturacağı iç kuvvet değerine eşittir.



Şekil 5.8 : Artık kaynak gerilme etkisi-düşük gerilmeler.

Şekil 5.9'da ise gerilmelerin biraz daha artırılmış durumu gösterilmektedir. Zorlama kuvvetlerine bağlı olan gerilme değerleri kritik plak burkulma değerinin altında olmasına rağmen toplam gerilme dağılımındaki değer kritik plak burkulma değerinin üzerinde bulunmaktadır. Bu durumda plak üzerinde burkulmanın başlaması beklenmektedir.



Şekil 5.9 : Artık kaynak gerilme etkisi-burkulma.

Burkulma hesabının stifnerin sağ ve sol tarafı için ayrı yapılması gerekmektedir. Sağ ve sol tarafın simetrik olma durumu düşünülürse tek bir taraf için hesabın yapılması yeterli olacaktır. Öncelikle basınç gerilmelerine uğrayan plak genişliği hesaplanacaktır. Bu değer yardımıyla kritik plak burkulma gerilmesi hesaplanacak ve denklem (5.7)'de yerine yazılarak etkin genişlik oranı hesaplanacaktır.

$$b = \frac{b_{p1}}{2} + \frac{b_{p2}}{2} + 2\eta$$

$$\sigma_{crp} = k \pi^2 \frac{E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b_{p1}} \right)^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{crp}}} = \beta \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k \pi^2}} \rightarrow \beta = \frac{\pi \lambda}{\sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k}}} \quad (5.7)$$

$$K_{p1} = \frac{b_{ep1}}{b_{p1}} = \begin{cases} \frac{1,9}{\beta} & \Leftrightarrow \beta > 1 \\ 1 & \Leftrightarrow \beta \leq 1 \end{cases}$$

$$b_e = \frac{b_{ep1}}{2} + \frac{b_{ep2}}{2} + 2\eta$$

Plağın stifner birleşim bölgesinde yer alan 2η genişliğindeki kısım basınç gerilmeleri altında bulunmadığı için burkulmaya uğramayacaktır.

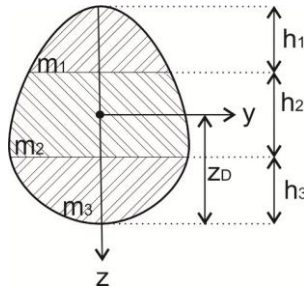
Gemi yapılarında η değeri 3 olarak kullanılabilir [49]. Yapılan hesaplamalarda 2η genişliğinin plak genişliğine oranla çok küçük olması sebebiyle etkin genişlik hesaplamalarına olan etkisi ihmal edilmiştir. Kritik burkulma değerinde plak

genişliğinin tamamı alınır ve artık kaynak gerilmesine göre denklem (5.4) yeniden düzenlenirse denklem (5.8) elde edilir.

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{maks} + \sigma_R}{E}} \Rightarrow K = \frac{b_e}{b} = \begin{cases} \frac{1.9}{\beta} & \Leftrightarrow \beta > 1 \\ 1 & \Leftrightarrow \beta \leq 1 \end{cases} \quad (5.8)$$

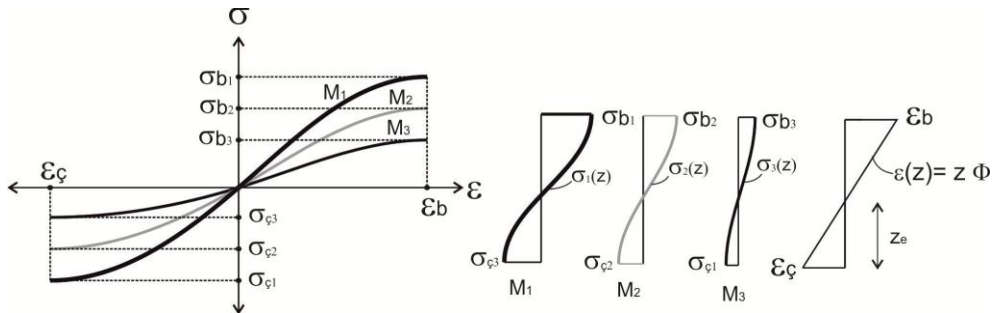
5.3 Gerilme Şekil Değiştirme Bağlılıkları

En kesitin farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerden birleştirilmiş olması göz önüne alınacaktır. Denge denklemlerinin oluşturulacağı üç farklı malzemeden oluşan en kesit Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Katmanları m_1 , m_2 ve m_3 ile katmanlara ait yükseklikler sırasıyla h_1 , h_2 ve h_3 ile gösterilmektedir. Kesitin eksenini dip noktasından z_D kadar yukarıdan geçmektedir.



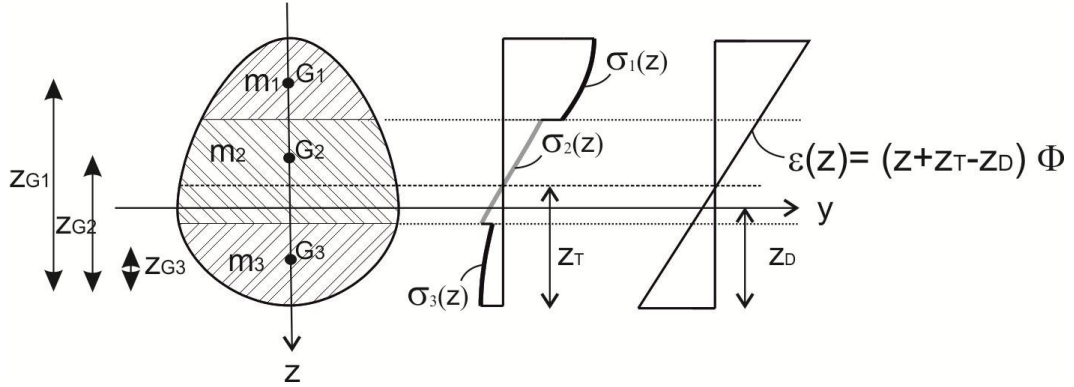
Şekil 5.10 : Kompozit yapı.

En kesit üzerindeki bir noktaya ait şekil değiştirme oranının bilinmesiyle bu noktaya ilişkin gerilme değeri gerilme-şekil değiştirme diyagramı yardımıyla hesaplanabilecektir. Yapıyı oluşturan malzemelere ait gerilme şekil değiştirme grafikleri birbirlerinden farklılık gösterebilecektir. Şekil 5.11'de üç farklı tür malzeme için gerilme ve şekil değiştirme diyagramı ve ayrıca bu diyagramdan aynı şekil değiştirmeye karşı gelen gerilme dağılımları yer almaktadır.



Şekil 5.11 : Gerilme şekil değiştirme grafikleri ve en kesit üzerindeki dağılımları.

Şekil 5.12’de gösterilen en kesit ise bu üç farklı tür malzemeden oluşması durumunda, gerilme ve şekil değiştirme oranı dağılımları şematik olarak gösterilmektedir. En kesit üzerinde lineer olarak değişmekte olan şekil değiştirmeye bağlı olarak en kesit üzerindeki gerilme dağılımı $\sigma_1(z)$, $\sigma_2(z)$ ve $\sigma_3(z)$ dağılımlarıyla gösterilmiştir. Bu gerilme değerleri malzemenin Şekil 5.11’de gösterilen gerilme şekil değiştirme diyagramları yardımıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 5.12 : Kompozit yapı gerilme ve şekil değiştirme dağılımı.

Eksenin geçtiği yer elemanın alt noktasından z_D kadar yukarıdadır. Gerilme ve şekil değiştirmenin sıfır olduğu tarafsız eksen ise alt noktadan z_T kadar yukarıdadır. Tarafsız eksen ve denge hesaplarının gerçekleştiği eksenin çakışmamasının sebebi eksenel normal kuvvetler neticesinde eksende meydana gelen kısalmadır. Bu kısalma neticesinde eksen üzerinde şekil değiştirme değeri oluşacaktır. Eksene ait konum z_{Gi} değerleri katmanlara ait ağırlık merkezleri olmak üzere denklem (5.9) yardımıyla hesaplanabilir [1].

$$z_D = \frac{\sum E_i z_{Gi} A_i}{\sum E_i A_i} \quad (5.9)$$

Eksen üzerindeki şekil değiştirme değeri denklem (5.10) yardımıyla hesaplanır.

$$\epsilon_N = \frac{P}{\sum E_i A_i} \quad (5.10)$$

Şekil değiştirme bağıntısı ise tarafsız eksene ait konumun dikkate alınmasıyla denklem (5.11) ile elde edilir.

$$\Delta z = z_D - z_T \rightarrow \epsilon(z) = (z - \Delta z) \Phi \quad (5.11)$$

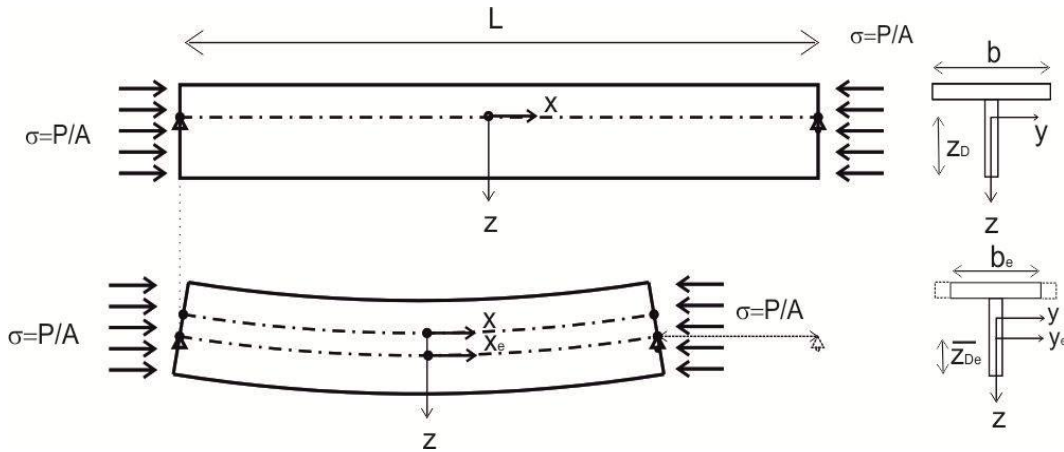
İzdüşüm denge denklemi yardımıyla da tarafsız eksenin yerini veren denklem (5.12) hesaplanır.

$$\varepsilon(0) = (0 - \Delta z)\Phi = \varepsilon_N = \frac{P}{\sum E_i A_i} \rightarrow \Delta z = -\frac{P}{\Phi \sum E_i A_i} \rightarrow z_T = z_D - \frac{P r}{\sum E_i A_i} \quad (5.12)$$

5.4 Eksenel Yer Değiştirme ve Moment Hesapları

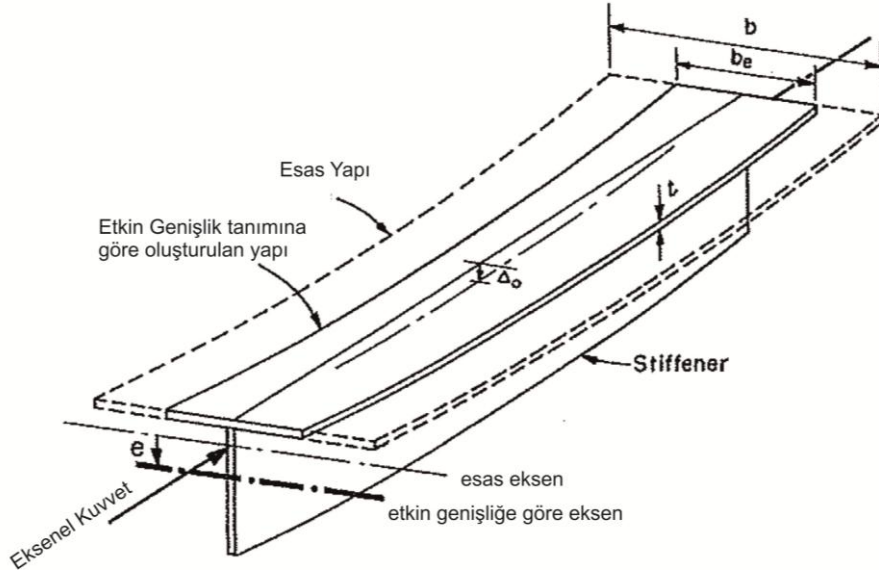
Bölüm 4.1.1’de yapıldığı gibi stifnerlenmiş plaklar için moment hesapları gerçekleştirilirken sehim ve etkilerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Stifnerlenmiş plaklar için bu düzenleme yapılırken kiriş hesaplamalarından farklı olarak etkin genişliğe bağlı olarak kiriş ekseninin yerindeki değişim değerlendirilmelidir.

Şekil 5.13 ile stifnerlenmiş plağın başlangıç durumu ve dengeye eriştiği durumu gösterilmektedir. Eksenin konumu z_D ile gösterilirken etkin genişliğe bağlı olarak nihai durumda z_{De} değerini almaktadır. Denge denklemlerinde yeni duruma göre hesapların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ancak her ne kadar plak üzerindeki lineer olmayan gerilme dağılımını lineerleştirmek için etkin genişlik değeri kullanılsa dahi gerilmenin etki ettiği kesit değişmemektedir.



Şekil 5.13 : Basınç gerilmesi altında burkulma.

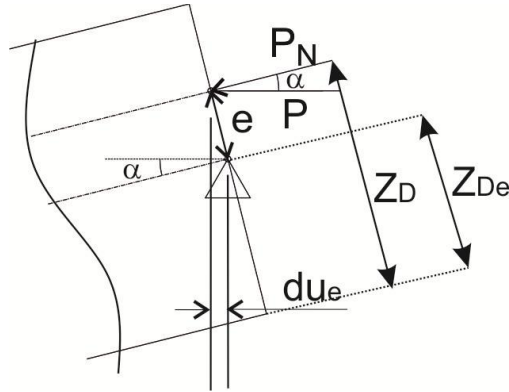
Bu sebeple gerilme değerine bağlı olarak hesaplanacak eksenel kuvvet değeri ile dengenin olduğu eksen arasında bir eksenel fark oluşacaktır [45].



Şekil 5.14 : Etkin genişlik ve eksantrik [45].

Şekil 5.14 ile etkin genişliğe bağlı olarak eksantrik oluşumu gösterilmektedir [45]. Bu eksenel farkın etkilerinin çıkartılması için Şekil 5.15’de eksenel kuvvet ve etkin genişliğe bağlı hesaplanan yeni eksen yer almaktadır. Görüleceği üzere eksenler arasındaki mesafe farkını gösteren e değeri kadar bir eksantriklik oluşmaktadır. Bu eksantriklik normal kuvvete bağlı ise eksen üzerinde sabit bir moment değeri oluşacaktır. Bu moment nihayetlerdeki eğime bağlı olarak (5.13) ile verilmektedir.

$$M_e = P.e = P(z_D - z_{De})\cos(\alpha) \quad (5.13)$$



Şekil 5.15 : Eksantrik oluşumu.

Bir diğer dikkat edilmesi gereken husus stifnerlenmiş plağın yapacağı toplam eksenel yer değiştirme değeridir. Yönteme göre hesaplanan eksenel yer değiştirme değeri kirişin etkin genişliğe bağlı olarak elde edilen eksenine göre hesaplanmaktadır. Bu durumda etkin genişliğe bağlı olarak eksenel yer değiştirme değerindeki düzeltme simetri durumu düşünülerek (5.14) ile hesaplanacaktır.

$$\begin{aligned} du_e &= e \sin(\alpha) = (z_D - z_{De}) \sin(\alpha) \\ du_{top} &= du + 2du_e = du + 2(z_D - z_{De}) \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (5.14)$$

5.5 Eğrilik Hesaplamaları

İç kuvvetleri hesaplamak üzere gerilme dağılımları denge denklemlerinde kullanılmaktadır. Denge denklemleri yapının kompozit kiriş olması ve etkin genişliğin göz önüne alınmasıyla yeniden düzenlenecektir. Stifneri oluşturan elemanların etkin olan bölgeleri üzerinde denge denklemleri gerçekleştirilecektir.

İzdüşüm denge denklemi denklem (5.6) ile yeniden düzenlenmiş, (5.15) elde edilmiştir.

$$P = \int \sigma(z) dA = \int \sigma_1(z) dA_1 + \int \sigma_2(z) dA_2 + \int \sigma_3(z) dA_3 \quad (5.15)$$

Moment denge denklemi ise denklem (5.7) ile yeniden düzenlenmiş, (5.16) elde edilmiştir.

$$M = \int z \sigma(z) dA = \int z \sigma_1(z) dA_1 + \int z \sigma_2(z) dA_2 + \int z \sigma_3(z) dA_3 \quad (5.16)$$

Kesitlere etkiyen kesit tesirlerine bağlı olarak yapının dengeye ulaştığı eksene ve eğrilığe ait değerler aşağıda belirtilen işlem adımlarıyla hesaplanabilecektir.

1. M ve P değerleri verilir.
2. P nedeniyle oluşacak kısalma oranı ϵ_N hesaplanır.
3. Etkin genişlik verilir.
4. Φ tahmin edilir.
5. z_T tarafsız eksenin yeri tahmin edilir.
6. Şekil değiştirme dağılımı elde edilir.
7. ϵ_N değerine sahip z_D eksen mesafesi hesaplanır.
8. σ - ϵ diyagramları yardımıyla artık kaynak gerilme dağılımları göz önüne alınarak $\sigma_1(z)$, $\sigma_2(z)$, $\sigma_3(z)$ dağılımı elde edilir.
9. İzdüşüm denge denklemi kontrol edilir, sağlanmıyorsa 5. adıma geri dönülerek tarafsız eksenin yeri değiştirilir.
10. Moment denge denklemi kontrol edilir, sağlanmıyorsa 4. adıma geri dönülerek eğrilik değeri değiştirilir.

Etkin genişlik değeri elde edilecek gerilme değerlerinin ve artık kaynak gerilme dağılımının denklem 5.4'te kullanılmasıyla elde edilir. Gerilme dağılımına göre etkin genişlik değerinin 3. adımda kullanılan değerden farklı olması durumunda işlemlerin yeniden başlatılması gerekmektedir.

Elastik bölgede yapılacak hesaplamalar için kolaylık olması açısından aşağıdaki denklemler kullanılabilir. Hesaplamalarda etkin genişlik değeri dikkate alınmalıdır.

Yapıyı oluşturan malzemelerin elastisite modüllerini göz önüne alarak hesaplanan $\Sigma E_i I_i$ değeri eğilme rijitliği olmak üzere eğrilik yarıçapı değeri denklem (5.17) yardımıyla hesaplanır.

$$r = \frac{\sum E_i I_i}{M} \quad (5.17)$$

5.6 Yöntem

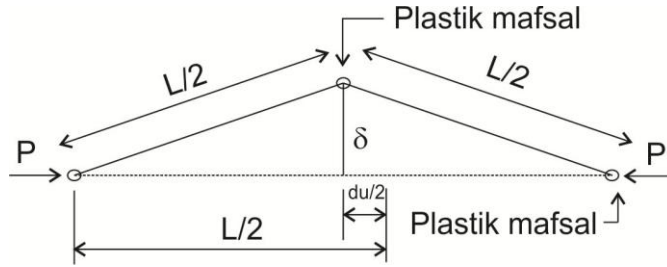
Yöntem iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama momentlere, eksenel normal kuvvetlere ve etkin genişlik değerine bağlı olarak eğrilik değerinin hesaplanmasıdır. İkinci aşama ise eğrilik değerlerine bağlı olarak sehim eğrisinin oluşturulmasıdır. İkinci aşama kiriş için uygulanan yöntemle aynıdır. Sehim eğrisi iteratif olarak elde edileceği için her sehim modellemesi sonrası kesitlere etki eden moment değerleri değişim gösterecektir. Momentlerdeki değişim ise eğimlerin değişmesini ve sehimin daha da değişmesine neden olacaktır. Sehim değişimi belli bir noktada sonlanacak ve denge oluşacaktır. Zorlama kuvvetlerinin büyüklüğü sehim artışıyla karşılanamaması durumunda en üst mukavemet değerini aşılmasıyla yapı göçecektir.

5.7 Göçme Sonrası Dayanım Hesaplamaları

Plak üzerinde lokal burkulmanın gerçekleşmesi ve başlangıç sehimlerinin etkisiyle birlikte stifnerlenmiş plak üzerinde moment ve çökme meydana gelecektir. Eksenel kuvvet değerinin çökme neticesinde oluşturduğu moment değeri sürekli bir artış gösterecektir. En kesit üzerindeki gerilme dağılımının elastik sınırları aşmasıyla birlikte eksenel kuvvet değerinin sabit tutulması durumunda göçme gerçekleşecektir. Bu safhada stifnerlenmiş plak nihai mukavemet değerine ulaşmış bulunmaktadır. Bu noktadan itibaren stifnerlenmiş plağın mukavemetinde bir azalış söz konusu

olacaktır. Yapı halen daha düşük dayanıma karşılık daha yüksek yer değiştirmeler meydana getirecektir. En yüksek momentin bulunduğu nokta ve nihayetlerde mafsallara dayanan rijit plastik analiz hesabına bağlı olarak eksenel yer değiştirmeye bağlı olarak dayanım değerleri hesaplanacaktır. Paik tarafından oluşturulan eksenel yer değiştirme denklemleri kullanılacaktır. Paik yapmış olduğu çalışmada Murray tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi çökme değeri ile eksenel yer değiştirme arasındaki ilişkiyi denklem (5.18) ile kurmuştur [12,45].

$$\begin{aligned}
 du &= 2 \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{L^2}{4} - \delta^2 \right)^{1/2} \right] \\
 &= 2 \frac{L}{2} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2\delta}{L} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{2\delta}{L} \right)^4 - \frac{1}{16} \left(\frac{2\delta}{L} \right)^6 + \dots \right] \right\} \\
 &= \frac{L}{2} \left(\frac{2\delta}{L} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{2\delta}{L} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{2\delta}{L} \right)^4 + \dots \right] \\
 &\approx \frac{2\delta^2}{L}
 \end{aligned} \tag{5.18}$$



Şekil 5.16 : Plastik mafsal oluşumunda denge.

Şekil 5.16’da denge durumuna erişmiş stifnerlenmiş plağa ait durum gösterilmektedir. Yapı üzerinde akmanın meydana gelmesiyle denge artık nihayetlerde ve orta noktada yer alan mafsallara göre oluşturulacaktır. P kuvvetinin etkisiyle toplam çökme değeri δ değerine ve eksenel yer değiştirme değeri ise du değerine erişmesiyle dengede olması ancak $P \cdot \delta$ değerindeki azaltılmış moment değerinin en kesit tarafından oluşturulmasıyla elde edilecektir [45]. Bu moment değeri nihayet ve orta kesit için eğrilik değerinin sıfır olduğu durumdaki gerilme dağılımlarının denge denklemlerinin sağlanacak şekilde düzenlenmesiyle elde edilir. Sehim eksenel yer değiştirme cinsinden ifade edilebilmektedir. Bu sayede moment ve normal kuvvet değerleri eksenel yer değiştirme cinsinden ifade edilebilir. Elde edilen bu denklemin (5.19) ile gösterildiği üzere diferansiyelini almak suretiyle

eksenel normal kuvvet değerlerindeki değişime karşılık gelen eksenel kısalma değişim miktarları hesaplanacaktır.

$$Mr = P\delta = P \left(\frac{L}{2} du \right)^{1/2} \text{ veya } du = \frac{2}{L} \left(\frac{Mr}{P} \right)^2 \quad (5.19)$$

$$\Delta du = \frac{2}{L} \frac{2Mr \left(\partial Mr / \partial P \right) P^2 - 2Mr^2 P}{P^4} \Delta P$$

5.8 Sayısal Hesaplamalar

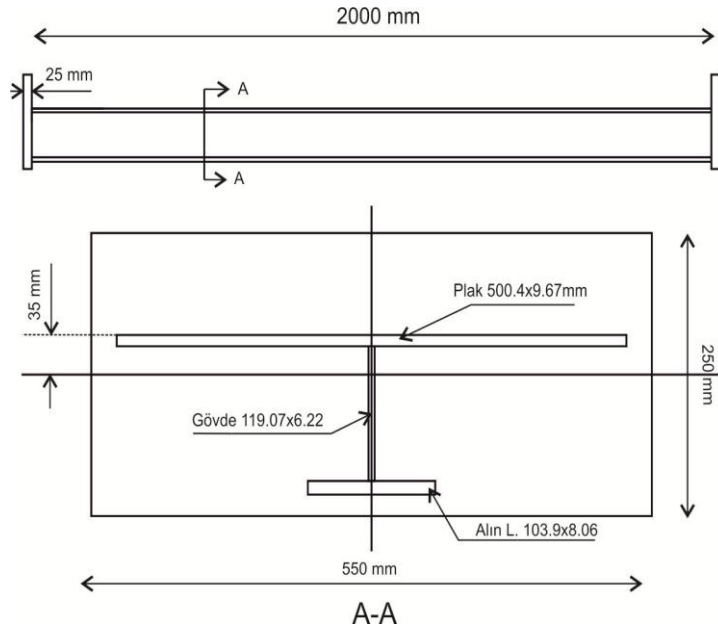
Geometrik eğrilik yönteminin stifnerlenmiş plaklardaki etkin genişlik değerli hesabının gösterilmesi amacıyla *Ship Structure Committee-SSC*'nin deneysel çalışmalarını yaptığı stifnerlenmiş plaklara ait veriler kullanılmıştır [50]. Geometrik eğrilik yöntemiyle elde edilen sonuçlar deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen verilerle karşılaştırılacaktır.

Yapılan bu çalışmada ana amaç bir sonraki adım olan gemi kirişi mukavemet hesaplamalarına ilişkin bir alt yapı elde edilmesidir. Bilindiği üzere Smith ve diğer birçok yöntemde gemi kirişi kesiti elemanlara ayrılmaktadır. Bu elemanların birbirlerinden bağımsız hareket ettiği varsayımına göre hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Plakların burulma yönünden birbirlerine olan etkisinin ihmal edilmesine karşın, birbiriyle olan sınır şartlarının sağlanması gerekmektedir. Şekil 5.1'de bu durum gösterilmektedir. Bu şart bitişik plaklar için kesişme kenarı boyunca yanal hareket sınırlaması ile sağlanacaktır. SSC'nin bu çalışmasının seçilme amacı da bu sınır koşullarının sağlanmış olmasıdır. Bu sayede stifnerlenmiş plağa ait deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilerek, gemi kirişi dayanım hesaplamaları için de başarılı sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir.

Moment ve eksenel normal kuvvete bağlı olarak eğrilik hesaplarının elde edilmesi Bölüm 5.5'te yer alan işlem adımlarına göre Mathematica programında yazılan kod kullanılarak elde edilmektedir. Sayısal çalışmanın ilk adımında yöntemin işleyişinin gösterildiği kısımda elastik bölgede olduğu kabulü yapılacaktır. Bu sayede momente ve normal kuvvete karşılık gelen eğrilik değeri basit denklemlerle hesaplanacaktır. Malzeme davranışlarının lineer olmayan olduğu yüksek eleman sayılı çözümleme ise geliştirilen bilgisayar programları yardımıyla hesaplanmıştır.

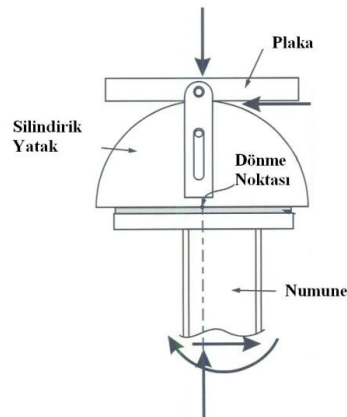
5.8.1 Deney seti

Deneyisel çalışmada stifnerlenmiş plaklar kullanılmıştır. Yapı üç parçadan oluşmaktadır, bunlar plak, gövde ve alın laması olmaktadır. Stifnerlenmiş plaklara ait boyutlar Şekil 5.17’de yer almaktadır. Ayrıca yapının her iki ucuna 25 mm kalınlığında plak kaynatılmıştır. Bu plakanın merkez eksenine uygulanacak aksinel normal kuvvetin tüm elemanlara eşit olarak etki etmesi sağlanacaktır.

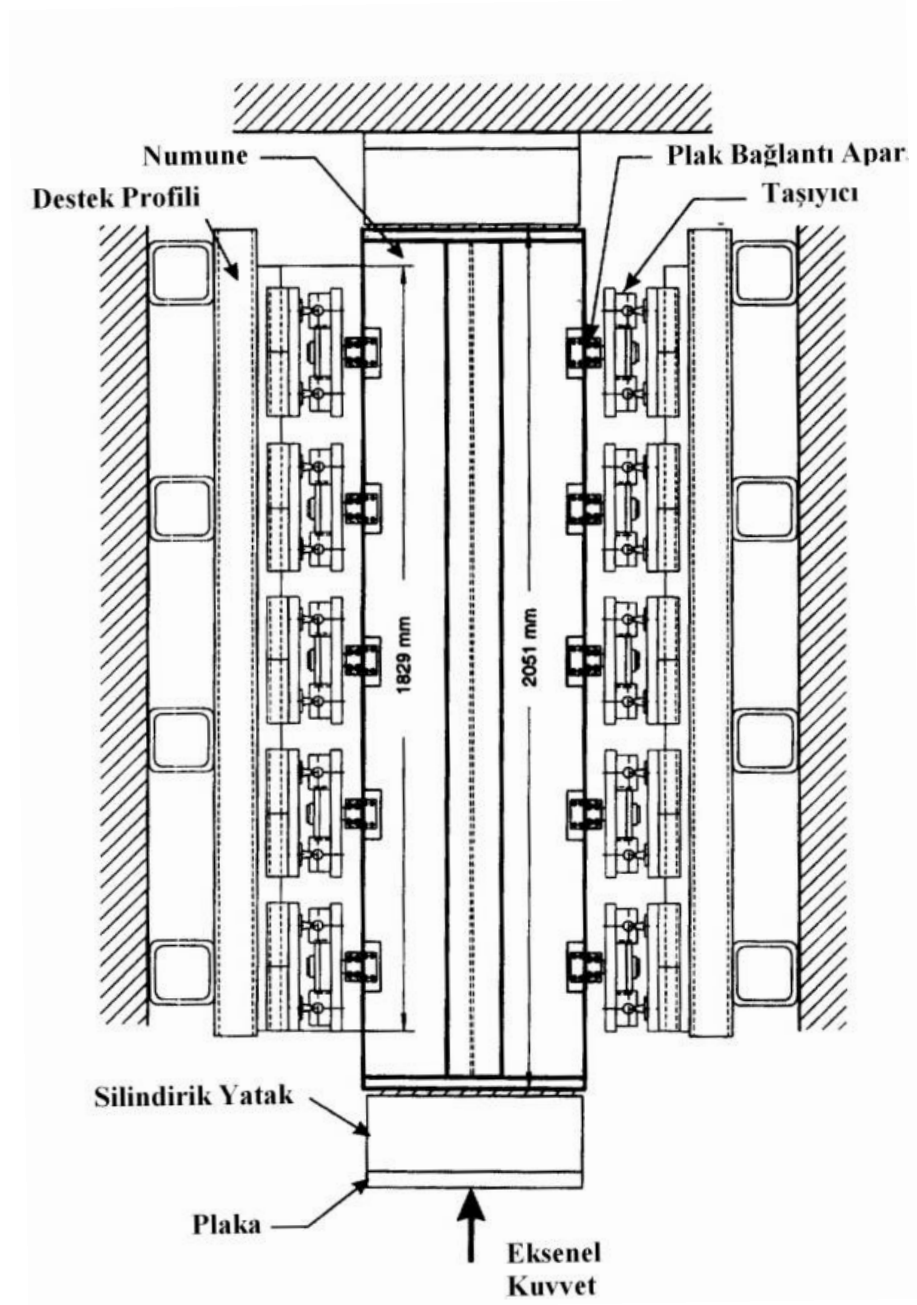


Şekil 5.17 : Deney numunesi [50].

Stifnerlenmiş plağa ait sınır koşulları uçlarda basit mesnet sağlanacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Plagın yan kenarlarında ise hazırlanan düzenek yardımıyla aksinel yer değiştirme hariç tüm hareket serbestliklerine sahiptir. Deneyin sınır koşullarına ilişkin düzenekler Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da yer almaktadır [50].

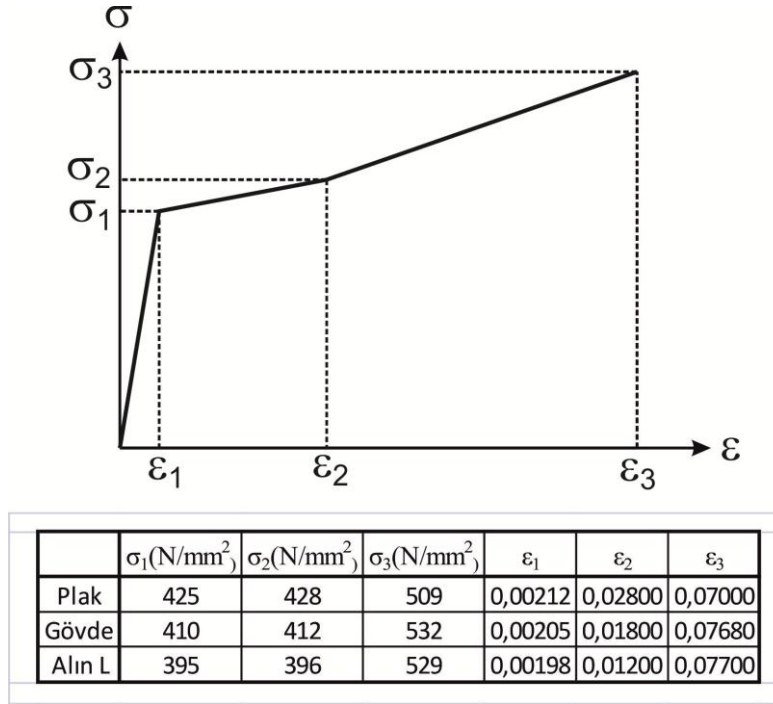


Şekil 5.18 : Uç kısımlar sınır düzenleyicisi [50].



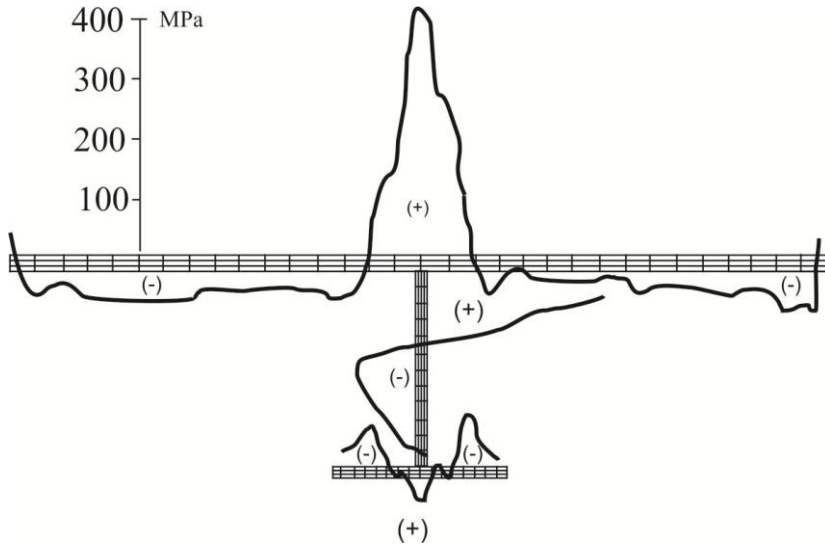
Şekil 5.19 : Kenar sınır koşulu düzenleyicisi [50].

Deney numuneleri üç farklı tür malzemeden oluşmuştur. Deney numunelerine ait malzeme çekme testi diyagramları oluşturulmuştur [50]. Bu verilere göre çözümlemede malzemenin pekleşen ideal elasto-plastik cisim olduğu kabul edilerek Şekil 5.20’de yer alan gerilme şekil değiştirme diyagramlarına uygun davrandığı kabul edilmektedir [50,51]. Bu kabul ileride karşılaştırılmasının yapılacağı sonlu elemanlar çözümünde kullanılmıştır.



Şekil 5.20 : Malzeme özellikleri [50].

Kaynaklı birleştirme sonrasında yapı üzerinde ölçülen artık kaynak gerilmeleri Şekil 5.21’de yer almaktadır [50]. Şekil 5.21’den yararlanılarak artık kaynak gerilme değeri 50 N/mm^2 olarak alınmıştır.



Şekil 5.21 : Artık kaynak gerilme dağılımı [50].

Deney numunesinin hazırlanması sırasında ayrıca kaynak neticesinde plaklar üzerinde çeşitli deformasyonlar ölçülmüştür. Deformasyonlara uygun olarak stifnerlenmiş plağın muhtemel başlangıç sehimine ait en büyük çökme değeri hesaplamalarda kullanılmıştır.

Hesaplamalarda SSC raporunda yer alan SP1.1 deneyine ait veriler kullanılacaktır [50]. Bu deney setinde yapıda 1,9 mm başlangıç sehimli gözlenmiş, eksenel kuvvet öncesinde 10000 N değerinde yanal kuvvet çifti etki ettirilerek plağın basınç gerilmeleri altında olması sağlanmıştır. Daha sonra eksenel normal kuvvetin artırılmasıyla eksenel yer değiştirmeler kaydedilmiştir.

Sehim eğrisine 10000 N değerinde yanal kuvvet çiftinin ve 1500 kN değerinde aksel normal kuvvet etki etme durumu hesaplanacaktır.

$$M_{\text{yanal}}(x) = \begin{cases} x \leq 330 \rightarrow & 670 \text{ F} \\ x > 330 \rightarrow & 670 \text{ F} - F(x - 330) \end{cases} \quad (5.20)$$

81

5.8.3 Başlangıç sehiminin modellenmesi

SP1.1 deney numunesi için başlangıç deformasyonları incelenmiş ve en büyük çökme değeri 1,9 mm olarak kaydedilmiştir [50]. En büyük çökme değerinin yeri veya diğer noktalara ait çökme değerleri hakkında bilgi yer almamaktadır. Bu nedenle ölçülen 1,9 mm değerindeki çökme orta noktaya ait sehim değeri olduğu kabul edilmiştir. Yapının başlangıç sehimine ilişkin tüm verilerin bulunması durumunda modellemesi Bölüm 3.6 yardımıyla hesaplanması mümkündür.

Öncelikle kirişin orta noktasına etkiyen yanal kuvvet değerinin 15000 N olduğu durumdaki hesaplama gerçekleştirilecektir. Momentlere karşılık gelecek eğrilik değerlerini hesaplamak için yapının eğilme rijitliğinin hesaplanması gerekmektedir. Çizelge 5.1’de stifnerlenmiş plağı oluşturan elemanların elastisite modülüne bağlı olarak eğilme rijitliği hesabı yer almaktadır.

Çizelge 5.1 : Eğilme rijitliği hesabı.

	alın laması	gövde	plak	
E (N/mm ²)	199495	200000	200472	
h (mm)	8,06	119,07	9,67	
b (mm)	103,9	6,22	500,4	
z _G (mm)	4,030	67,595	131,965	Toplamlar
A (mm ²)	837,43	740,62	4838,87	6416,92
I (mm ⁴)	9,0425E+06	2,0791E+06	2,8361E+06	1,3958E+07
E.I (N mm ²)	1,8039E+12	4,1583E+11	5,6857E+11	2,7883E+12
E.A (N)	1,6706E+08	1,4812E+08	9,7006E+08	1,2852E+09
E.A.z _G (N.mm)	6,7327E+08	1,0012E+10	1,2801E+11	1,3870E+11

Eksene ait konum değeri denklem (5.22) yardımıyla hesaplanacaktır.

$$z_D = \frac{\sum E_i A_i z_{Gi}}{\sum E_i A_i} = \frac{1,3870 \cdot 10^{11}}{1,2852 \cdot 10^9} = 107,917 \text{ mm} \quad (5.22)$$

En kesite ait eğilme rijitliğinin değeri $2,7883 \cdot 10^{12}$ N.mm² olmaktadır ve bu değeri denklem (5.17) de kullanarak eğilme değerleri elastik bölge için denklem (5.23) ile elde edilecektir.

$$r_i = \frac{2,7883 \cdot 10^{12}}{M_i} \quad (5.23)$$

Başlangıç noktasına ait tahminler aşağıda yer almıştır.

$$z_1 = z_1' = 1,9 \text{ mm} \quad \text{ve} \quad du = 0$$

Yapının orta noktasına tekil kuvvet etki edeceği için moment değerleri denklem (5.24) yardımıyla hesaplanacaktır.

$$M_{\text{yanal}}(x) = \frac{F_{zo}}{2} \left(\frac{L - du}{2} - x \right) \quad (5.24)$$

Bu durumda bir numaralı noktaya ait moment değeri denklem (5.24) ile hesaplanacak ve elde edilen değer denklem (5.23)'te yerine yazılarak eğilme yarıçapı hesaplanmış olacaktır.

$$M_{\text{yanal}}(0) = \frac{15000}{2} \left(\frac{2000 - 0}{2} - 0 \right) = 7500000 \text{ N.mm}$$

$$r_1 = \frac{2.7883 \cdot 10^{12}}{7500000} = 371776 \text{ mm}$$

Eğrilik değerinin hesaplanmasıyla birlikte iterasyonlara başlanır ve Bölüm 3'te yer alan denklemler ve işlem adımlarından yararlanılarak Çizelge 5.2 hazırlanır.

Çizelge 5.2 : Başlangıç sehim hesabı.

1. iterasyon			$z_1 = 1,9 \text{ mm}$			$du = 0 \text{ mm}$					
	N.mm	mm	rad	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
i	$M_{\text{top } i}$	r_i	α_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	$dw_{i'}$	$du_{i'}$	$x_{i'+1}$	$z_{i'+1}$
1	7500000	371776	0,00000	0,34	500,0	500,0	1,56	0,76	750,0	750,0	1,14
2	1875004	1487103	0,00134	0,76	500,0	1000,0	0,81				
2. iterasyon			$z_1 = 1,09 \text{ mm}$			$du = 0,00 \text{ mm}$					
1	7500000	371776	0,00000	0,34	500,0	500,0	0,75	0,76	750,0	750,0	0,33
2	1875004	1487103	0,00134	0,76	500,0	1000,0	0,00				

Başlangıçta 1,9 mm olarak verilen çökme değeri ikinci iterasyonun sonunda 1,09 mm değerine yakınsamıştır. Çizelge 5.2'de ondalık kısımda sadece iki hane alındığı için du değeri sıfır olarak gözükmektedir. Tam değerler du için 0,004 mm, z_1 için 1,0927 mm olmaktadır.

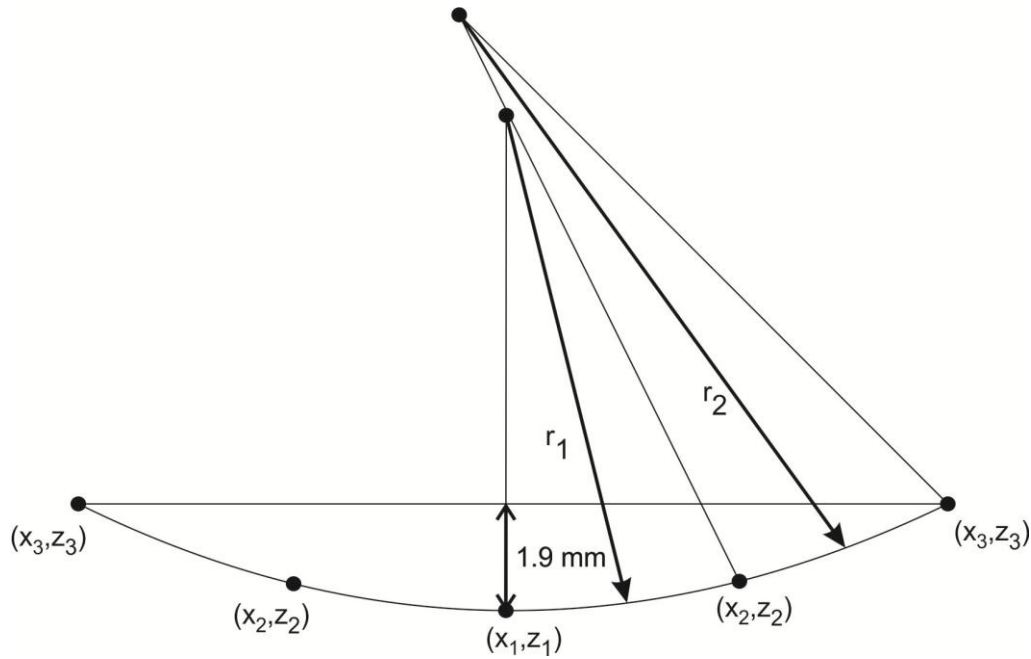
Yapıya 15000 N değerinde yanal tekil kuvvet uygulanması durumunda dengenin olduğu sehime ait en büyük çökme değeri 1,0927 mm olmaktadır. Orantı kurarak

1,9 mm çökme oluşturacak tekil yanal kuvvet değeri 26081 N olarak seçilir ve bu yeni değere göre hesaplar tekrar edilir. Hesaplamalar Çizelge 5.3'te yer almaktadır. Başlangıç noktasına ait çökme değeri 1,9 mm olarak alınmasıyla hesap tek iterasyonda yakınsamıştır. Çizelge 5.3'te yer alan eğrilik yarıçapları başlangıç sehimini oluşturacaktır.

Çizelge 5.3 : Sehim hesabı-kontrol.

1. iterasyon			$z_1 = 1,90 \text{ mm}$			$du = 0 \text{ mm}$					
	N.mm	mm	rad	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
i	$M_{top i}$	r_i	α_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	$dw_{i'}$	$du_{i'}$	$x_{i'+1}$	$z_{i'+1}$
1	13040500	213820	0,00000	0,58	500	500	1,32	1,32	750,0	750,0	0,58
2	3260145	855276	0,00234	1,32	500	1000	0,00				

Şekil 5.23'te Çizelge 5.3'te hesaplanan eğrilik yarıçaplarının kullanılmasıyla elde edilen sehim eğrisi şematik gösterilmektedir.



Şekil 5.23 : Sehim eğrisi.

5.8.4 Hesaplamalar

Etkin genişlik değeri ise plak üzerinde yer alan gerilme değerine bağlı olarak hesaplanacaktır. Hesaplamanın başında gerçek gerilme dağılımı bilinmediği için etkin genişlik değeri tahmin edilecek ve iteratif olarak hesabı gerçekleştirilecektir.

Etkin genişlik oranı $K=1$ olarak tahmin edilir. Eksenel normal kuvvetin 1500000 N olması durumu için öncelikle yapıda meydana gelecek kısalma denklem (5.10) yardımıyla hesaplanacaktır.

$$dL = \frac{N L}{\sum E_i A_i} = \frac{1500000 \text{ N } 2000 \text{ mm}}{1,2852 \cdot 10^9 \text{ N}} = 2,33 \text{ mm}$$

Yapının kısalma sonrası uzunluğunun hesaplanmasıyla ds eleman uzunluğu hesaplanacaktır.

$$ds = \frac{L - dL}{n} = \frac{2000 - 2,33}{4} = 499,4175 \text{ mm}$$

Başlangıç noktasına ilişkin tahminler $du=0$ ve $z_1 = z_{1'} = 1,90 \text{ mm}$ olarak alınması durumunda gerçekleşecek hesap ve iterasyonlar Çizelge 5.4'te yer almaktadır.

Çizelge 5.4 : Sehim hesabı-başlangıç sehimli.

1. iterasyon $z_1 = 1,9 \text{ mm}$ $du = 0 \text{ mm}$											
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
i	r_{fi}	r_{oi}	r_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	$dw_{i'}$	$du_{i'}$	$x_{i'+1}$	$z_{i'+1}$
1	291971	213820	123429	40179	499,42	499,42	0,89	46419	749,12	749,12	-0,37
2	454154	855276	296638	16103	499,41	998,83	-1,55				
2. iterasyon $z_1 = 16497 \text{ mm}$ $du = 12816 \text{ mm}$											
1	234806	213820	111911	40483	499,41	499,41	12451	18660	749,12	749,12	0,94
2	343658	855276	245153	27061	499,41	998,82	-0,40				
3. iterasyon $z_1 = 31107 \text{ mm}$ $du = 12816 \text{ mm}$											
1	223513	213820	109280	41640	499,41	499,41	25965	20852	749,12	749,12	1,28
2	323356	855276	234644	29618	499,41	998,82	-0,11				
4. iterasyon $z_1 = 35125 \text{ mm}$ $du = 12816 \text{ mm}$											
1	220595	213820	108577	42005	499,41	499,41	29618	21217	749,12	749,12	1,38
2	318186	855276	231909	30348	499,41	998,82	-0,02				
5. iterasyon $z_1 = 35855 \text{ mm}$ $du = 12816 \text{ mm}$											
1	220073	213820	108451	42005	499,41	499,41	30348	21582	749,12	749,12	1,39
2	317264	855276	231419	30713	499,41	998,82	-0,01				
6. iterasyon $z_1 = 36220 \text{ Mm}$ $du = 12816 \text{ mm}$											
1	219813	213820	108387	42005	499,41	499,41	30713	21582	749,12	749,12	1,4
2	316805	855276	231175	30713	499,41	998,82	0,00				

Hesaplamanın 6. iterasyonunda yakınsama sağlanmıştır. Çökme değeri 3,99 mm ve eksenel kısalma değeri 2,35 mm olarak hesaplanmıştır. Etkin genişlik hesabının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu hesaplama için yapının başlangıç noktasına ait eğrilik yarıçapı değeri kullanılarak kesite ait gerilme dağılımının hesaplanması gerekmektedir. Plak kesitindeki gerilme değerinin denklem (5.4)'te yerine yazılmasıyla da etkin genişlik değeri hesaplanacaktır.

Gerilme dağılımının hesaplanması için eğrilik değeri ve eksene ait z_D değeri haricinde tarafsız eksenin yerini belirleyecek z_T değerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bölüm 5.3'te yer alan işlem adımları yardımıyla hesaplamalar gerçekleştirilir.

$$z_T = z_D - \frac{P r}{\sum E_i A_i} = 131,965 - \frac{1500000 \times 108387}{1,2852 \cdot 10^9} = -18,5812 \text{ mm}$$

Plak üzerine etki eden gerilme değeri hesaplanır.

$$\sigma_{\text{Plak}} = \frac{E_{\text{Plak}}(z_{G\text{Plak}} - z_T)}{r}$$

$$\sigma_{\text{Plak}} = \frac{200472 \text{ N/mm}^2 (131,965 \text{ mm} + 18,5812 \text{ mm})}{108387 \text{ mm}} = 278,45 \text{ N/mm}^2$$

Denklem (5.6) ve denklem (5.8) yardımıyla etkin genişlik değeri artık kaynak gerilmesine bağlı olarak hesaplanır.

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{maks}} + \sigma_R}{E}} = 2,094$$

$$\Rightarrow K = 1,9 / \beta = 0,907 \Rightarrow b' = 0,908 b = 453,91 \text{ mm}$$

Plak genişliği 500,4 mm değerinden birinci iterasyon sonunda 453,91 mm değerine gerilemiştir. Yeni etkin genişlik değerine göre hesapların tekrar edilmesi gerekmektedir. Hesaplamalarda plak genişliğindeki değişiklik göz önüne alınarak eğilme rijitliğinin yeniden hesaplanması gerekmektedir. Çizelge 5.1 yeniden düzenlenmiş ve Çizelge 5.5 oluşturulmuştur. Alan, atalet momenti, eğilme rijitliği değişim göstermiştir. Aynı zamanda gövde ve alın laması içinde etkin genişlik hesapları gerçekleştirilmelidir. Plağa göre nispeten daha rijit olan alın laması ve gövdede elde edilen gerilme dağılımına göre burkulma tespit edilmemiştir.

Çizelge 5.5 : Eğilme rijitliği-etkin genişliğe göre.

	Alın laması	Gövde	Plak	
E (N/mm ²)	199495	200000	200472	
h (mm)	8,06	119,07	9,67	
b (mm)	103,9	6,22	453,9	
z _G (mm)	4,030	67,595	131,965	Toplamlar
A (mm ²)	837,43	740,62	4389,31	5967,36
I (mm ⁴)	9,0425E+06	2,0791E+06	2,5726E+06	1,3694E+07
E.I (N mm ²)	1,8039E+12	4,1583E+11	5,1574E+11	2,7355E+12
E.A (N)	1,6706E+08	1,4812E+08	8,7993E+08	1,1951E+09
E.A.z _G (N.mm)	6,7327E+08	1,0012E+10	1,1612E+11	1,2681E+11

Eksene ait konum değeri denklem (5.9) yardımıyla hesaplanacaktır.

$$z_D = \frac{\sum E_i A_i z_{Gi}}{\sum E_i A_i} = \frac{1,2681 \cdot 10^{11}}{1,1951 \cdot 10^9} = 106,103 \text{ mm}$$

En kesite ait eğilme rijitliğinin değeri $2,7355 \cdot 10^{12}$ N.mm² olmaktadır ve bu değeri denklem (5.17)'de kullanarak eğilme değerleri elastik bölge için denklem (5.25) ile elde edilecektir.

$$r_i = \frac{2,7355 \cdot 10^{12}}{M_i} \quad (5.25)$$

Yeni değerlere göre momentler ve momentlere bağlı olarak eğrilik değerleri hesaplanmak suretiyle Çizelge 5.6 oluşturulur. Bu hesaplamada başlangıç değeri bir önceki hesaba ait çökme değeri olduğu için iterasyon bir işlem daha kısa sürmüştür. Yakınsama çökme değerinin 4,69 olduğu değerde sağlanmışır.

Çizelge 5.6 : Sehim hesabı.

1. iterasyon $z_1=3,99$ mm $du = 2,35$ mm											
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
i	r_{fi}	r_{oi}	r_i	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}	dw_i	du_i	x_{i+1}	z_{i+1}
1	177561	213820	97005	1,29	499,37	499,37	2,7	2,89	749,05	749,05	1,1
2	247165	855276	191751	3,22	499,36	998,73	-0,52				
2. iterasyon $z_1=4,51$ mm $du = 2,54$ mm											
1	169004	213820	94394	1,32	499,37	499,37	3,19	2,97	749,05	749,05	1,54
2	233254	855276	183272	3,32	499,36	998,73	-0,13				

Çizelge 5.6 : (Devam) Sehim hesabı.

3. iterasyon $z_1=4,64$ mm $du = 2,54$ mm											
1	166992	213820	93763	1,33	499,37	499,37	3,31	2,99	749,05	749,05	1,65
2	230018	855276	181268	3,35	499,36	998,73	-0,04				
4. iterasyon $z_1=4,68$ mm $du = 2,54$ mm											
1	166383	213820	93571	1,33	499,37	499,37	3,35	3	749,05	749,05	1,68
2	229040	855276	180660	3,36	499,36	998,73	-0,01				
5. iterasyon $z_1=4,69$ mm $du = 2,54$ mm											
1	166231	213820	93523	1,33	499,37	499,37	3,36	3	749,05	749,05	1,69
2	228797	855276	180509	3,36	499,36	998,73	0				

İkinci hesaplama elde edilen değerlere bağlı olarak yine etkin genişlik hesabının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Etkin genişlik değerinde yakınsama sağlanıncaya kadar hesapların tekrar edilmesi gerekmektedir. Etkin genişlik tahminlerine bağlı olarak elde edilen değerler Çizelge 5.7’de yer almaktadır. Yakınsama etkin genişlik oranının 0,896 değerinde sağlanmıştır. Bu etkin genişlik oranında çökme değeri 4,78 mm eksenel yer değiştirme ise 2,562 mm olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.7 : Etkin genişlik iterasyonları.

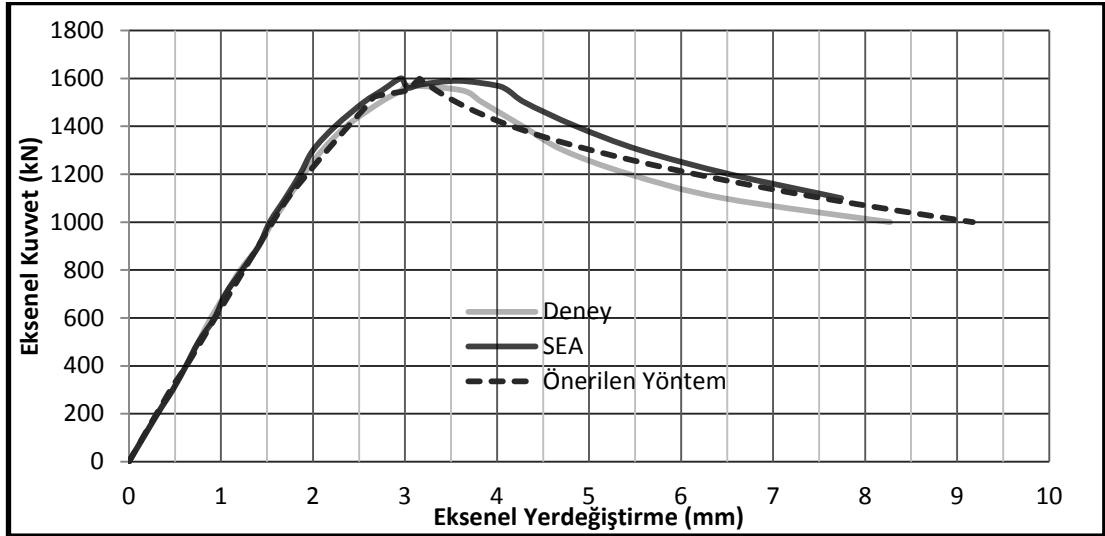
K_{deneme}	r_1	σ_{Plak}	β_{Plak}	K	b_e
1	108387	278,45	2,094	0,907	453,91
0,907	93523	285,518	2,117	0,897	449,1
0,897	92080	286,326	2,119	0,896	448,4
0,896	91879	286,441	2,119	0,896	448,4

Çizelgelerde hesaplamalar kiriş yarı uzunluğunun iki elemanlı olarak alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda eleman sayısını artırarak yakınsama kontrol edilmelidir.

5.8.5 Sonuçlar ve karşılaştırmalar

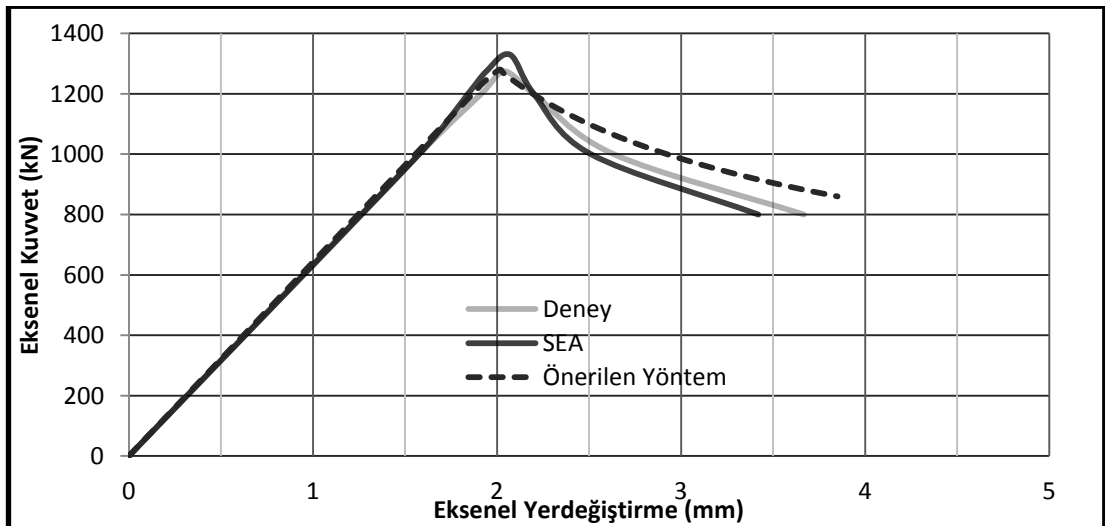
Şekil 5.24’te SSC-SP1.1 deney verileri kullanılarak önerilen yöntemle göre elde edilen yakınsamanın sağlandığı sonuçlar, deney sonuçları ve sonlu elemanlar sonuçları yer almaktadır [50]. Kesikli olarak gösterilmekte olan eğri önerilen yöntemle elde edilen sonuçları göstermektedir. Görüleceği üzere yapılan çalışmadan

elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlara göre deneysel sonuçlara daha yakın bulunmaktadır.



Şekil 5.24 : SP1.1 sonuçları.

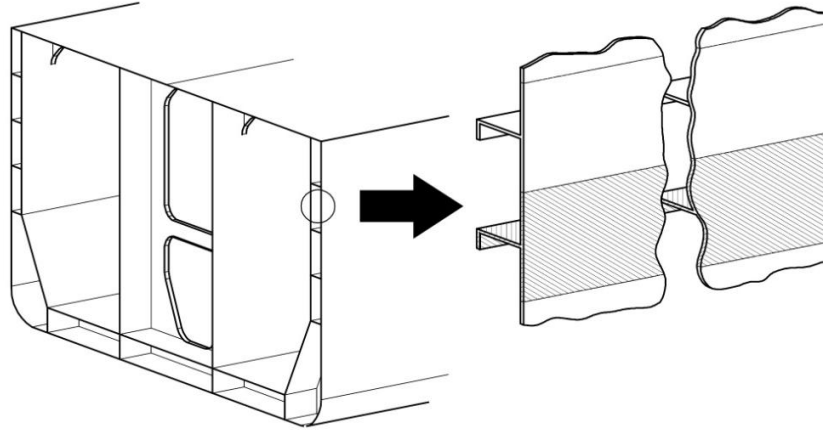
Şekil 5.25'te SP1.4 verilerine ait karşılaştırmalar yer almaktadır [50]. Bu çalışmada lokal plak burkulması bulunmakta, eğilme diğer yönde gerçekleşmektedir. Göçme stifnerlenmiş plağın bütün olarak burkulmaya uğramasıyla gerçekleşmektedir. Önerilen yönteme ait veriler sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlara göre deneysel verilere daha çok yakınsama sağlamıştır. Göçme sonrası hesaplamalarda ise aynı başarıyı gösterememiştir.



Şekil 5.25 : SP1.4 sonuçları.

6. SMITH YÖNTEMİ

Bu bölümde Smith yöntemi incelenecektir. Hesaplama tablosu için gerekli denklem ve işlem adımları oluşturulacaktır. Yöntemde meydana gelebilecek sayısal hatalar incelenecek ve bu sayısal hataların iyileştirme çalışmalarında bulunulacaktır. Sayısal çalışmada öncelikle basit bir kirişe ait çözüm elde edilerek analitik çözüm ile karşılaştırılması yapılacaktır. İkinci sayısal çalışma olarak Nishihara tarafından deneyleri gerçekleştirilen stifnerlenmiş kutu kirişler kullanılacaktır. Deney sonuçları ve diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlar karşılaştırılacaktır.



Şekil 6.1 : Gemi elemanı [52].

6.1 Yöntem

Smith yönteminde gemi kirişinin bir bütün olarak çözümü yerine elemanlara ayrıştırılmasıyla çözüm gerçekleştirilmektedir. Şekil 6.1’de gemi kirişi ve ayrıştırılan eleman görülmektedir [52]. Elemanlar stifnerlenmiş plaklar, köşe elemanlar ve plaklardan meydana gelmektedir. Yöntemde amaç verilen eğriliği oluşturacak kesite etki eden moment değerinin hesaplanmasıdır. Hesabın gerçekleştirilmesi için uygulanacak işlem adımları aşağıda özetlenmiştir [53,54].

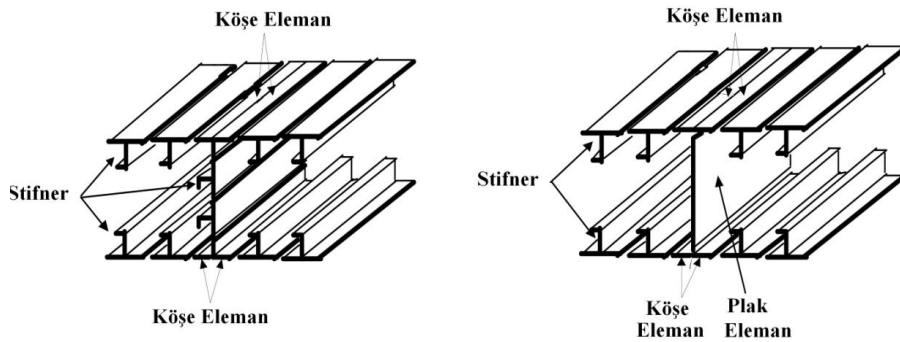
1. Gemi kesiti elemanlara ayrılır.
2. Elemanlara ait ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme diyagramları elde edilir.

3. Gemi kesitlerindeki eğrilik değerleri kademeli olarak artırılır. Kesitlerin düzlem ve eğilmenin tarafsız eksen etrafında gerçekleştiği kabul edilir.
4. Her bir eğrilik artımı adımında elemanlara ait ortalama şekil değiştirme ölçülür. Şekil değiştirme değerleri kullanılarak elemana ait ortalama gerilme ortalama şekil değiştirme diyagramından aksenal rijitliği hesaplanır.
5. Her bir ayrı elemana ait aksenal rijitlik değeri kullanılarak tarafsız eksenin yeri ve kesitin eğilme rijitliği hesaplanır.
6. Eğrilik değerlerindeki artışa bağlı olarak eğilme momentlerindeki artış hesaplanır. Aynı zamanda artan şekil değiştirmelere bağlı olarak ayrı elemanlardaki gerilme artışları hesaplanır.
7. Her eğrilik değerindeki artışa ait adımın sonunda eğrilik artışları ve eğilme momentlerindeki artışlar kümülâtif toplamaları oluşturmak üzere toplanır.
8. Aynı işlemler 3. adıma geri dönülerek yapı mukavemetini yitirene kadar tekrarlanır.

İşlem adımlarının tamamlanmasıyla birlikte gemi kirişinin moment eğrilik diyagramları oluşturulmuş olacaktır.

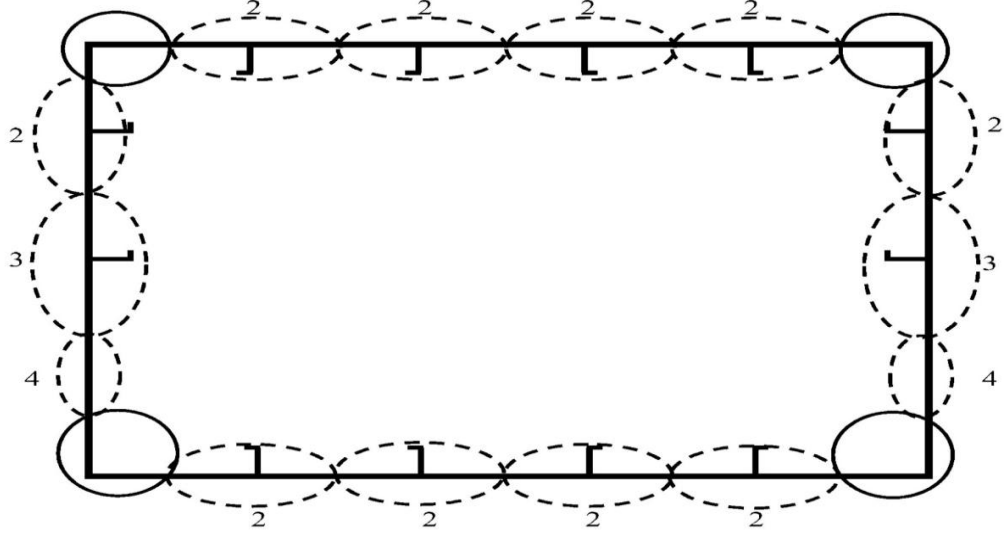
6.2 Gemi Kesitinin Elemanlara Ayrıştırılması

Gemi kesitinde kullanılabilecek elemanlar üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar köşe elemanlar, plak elemanlar ve stifnerlenmiş plak elemanlardır. Köşe elemanlar plağın bir plak gövdesiyle kesişmesi durumunda kullanılır. Bu elemanlarda yüksek rijitlik bulunmaktadır. Plak elemanlar üzerinde stifner bulunmaması durumunda kullanılmakta, üzerinde stifner bulunması durumunda ise stifnerlenmiş plak eleman olarak adlandırılmakta ve kullanılmaktadır. Şekil 6.2’de elemanların gösterimleri yer almaktadır [55].



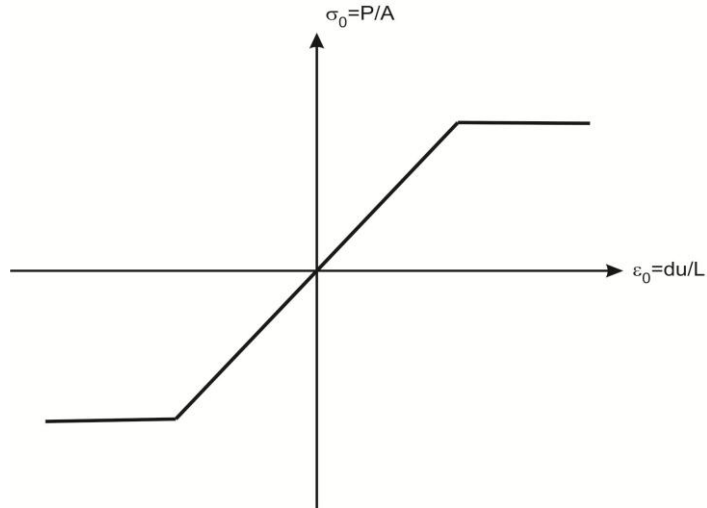
Şekil 6.2 : Eleman tipleri [55].

Şekil 6.3'te bir kutu kiriş yapısındaki kesitin eleman seçimleri görülmektedir. Kesikli çizgilerle gösterilen elemanlar plak ve stifnerlenmiş plak elemanlar, düz çizgiyle gösterilen elemanlar ise köşe elemanlardır [56].



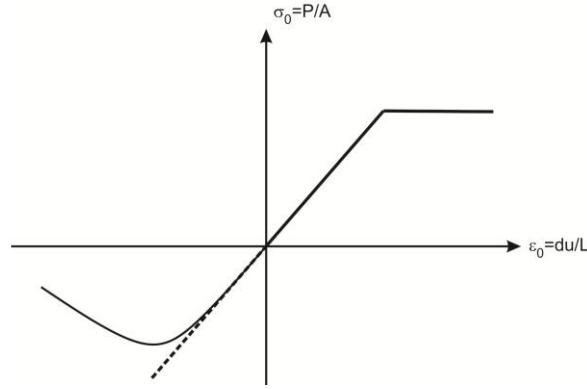
Şekil 6.3 : Elemanlara ayırma işlemi [56].

Köşe elemanlarda rijitlik nedeniyle kiriş burkulması beklenmemektedir. Bu durumda ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme diyagramları Şekil 6.4'te gösterilen diyagrama benzer olacaktır [55]. Bu kabul klas kuruluşları tarafından da benimsenmektedir.



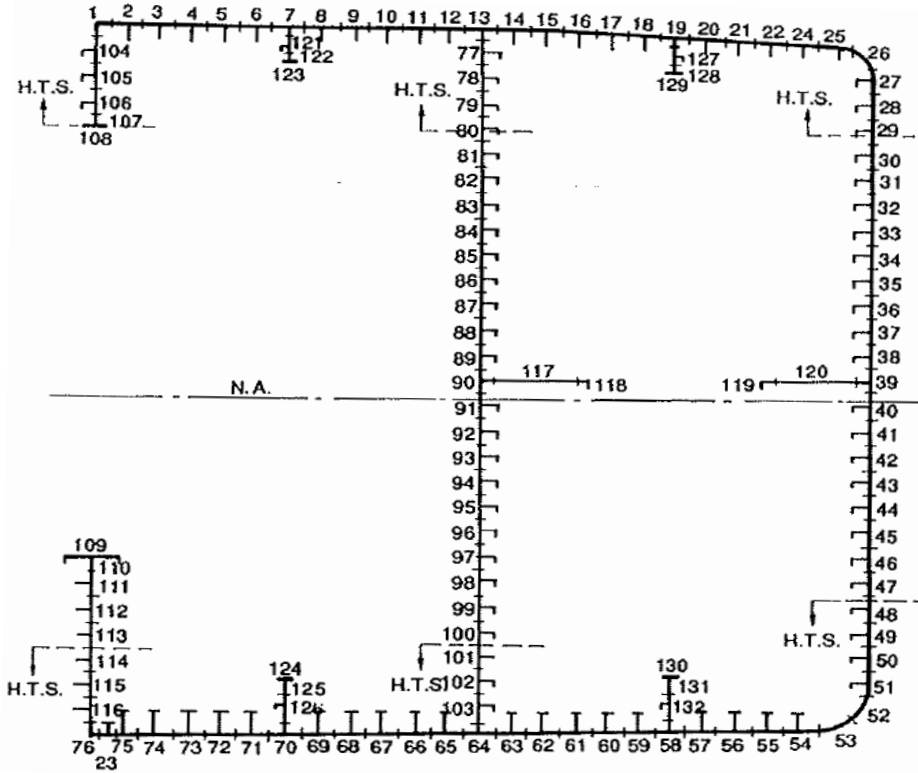
Şekil 6.4 : Köşe eleman [55].

Plak ve stifnerlenmiş plak elemanlara ait ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme diyagramları ise lokal plak burkulması ve kiriş burkulmasına bağlı olarak Şekil 6.5'te gösterilen diyagrama benzer formda gerçekleşecektir.



Şekil 6.5 : Stifnerlenmiş plak eleman.

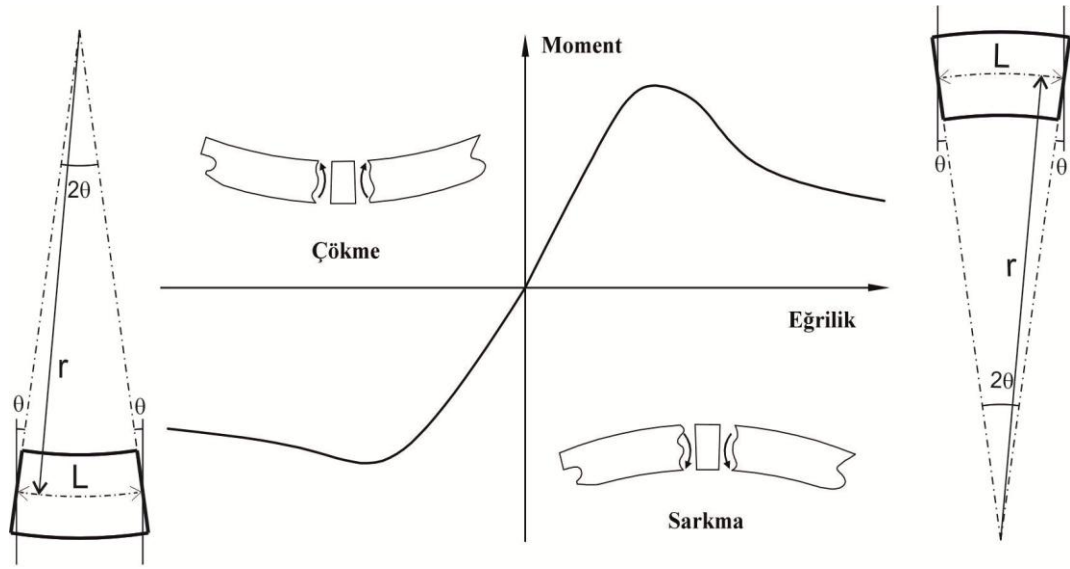
Şekil 6.6'da Rutherford'un yaptığı çalışmada gemi kesitinde ayrıştırdığı elemanlar görülmektedir [2]. Köşe elemanlara ait eleman numaraları 1, 13, 19, 39, 90, 26 olarak örnek verilebilir. Stifnerlenmiş plak elemanlara ise 2, 78, 30, 61, 118 numaralı elemanlar örnek oluşturmaktadır. Plak elemanlara örnek olarak 117 numaralı eleman örnek gösterilebilir. Rutherford çalışmasında perdede ve bordada bulunan ara güverteyi tek bir eleman olarak modellemek yerine 90, 117 ve 118 numaralı elemanlara ayrıştırarak incelemeyi tercih etmiştir. Bu seçimler kesin bir kurala tabi olmayıp elemanın muhtemel bozulma formuna göre karar verilmesi gerekmektedir.



Şekil 6.6 : Eleman numaralandırılması [2].

6.3 Elemanlarda Eksenel Yer Değiştirme

Smith yönteminde hesaplama gemi bütünü için değil sadece bir bölümü için gerçekleştirilmektedir. Bu bölüme etkiyen sabit moment değerine bağlı olarak bölümün oluşturacağı eğrilik hesaplanacaktır. Moment ve eğrilik değerlerinin yükselmesiyle de elemanlar üzerinde yapısal bozulmalar gerçekleşmektedir. Şekil 6.7’de geminin incelenen bölgesinde momente bağlı olarak eğrilik değişimi diyagramda yer almış, ayrıca eğrilik değerine bağlı olarak şekil değiştirmenin nasıl olduğu şematik olarak gösterilmiştir.

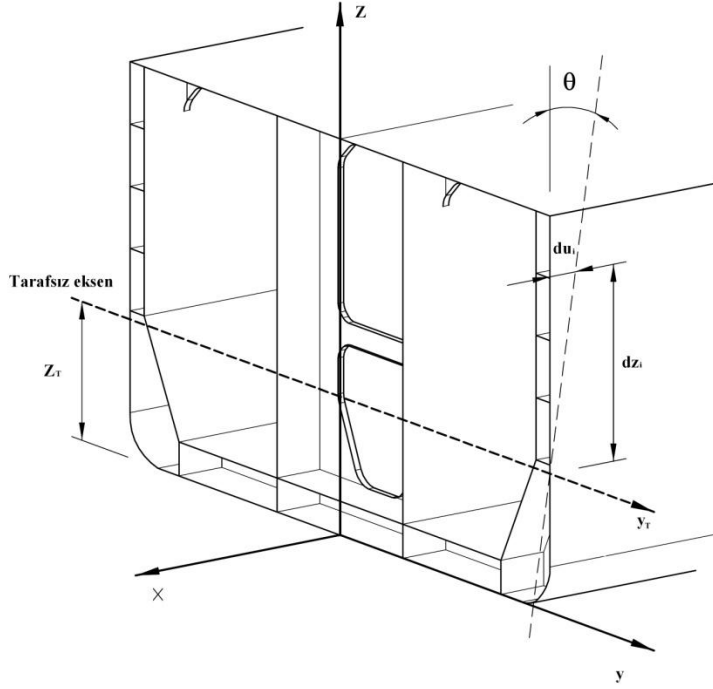


Şekil 6.7 : Eğrilik durumları [55].

Tarafsız eksen üzerinde gerilme veya şekil değiştirme bulunmaması sebebiyle de hesaplamanın yapılacağı gemi bloğunun tarafsız eksen uzunluğu değerini koruyacaktır. İncelemenin yapılacağı blok boyunca momente bağlı eğrilik değişim göstermeyecektir. Bu sebeple tarafsız eksen, yarıçapı $1/\Phi$ olan bir çember yayı halini alacaktır. Yapılan ana kabule göre düzlem kesitlerin düzlem kalması ve tarafsız eksene dik olması durumunda her bir kesit θ kadar tarafsız eksen etrafında dönme gerçekleştirmiş olacak, toplamda kesitler arasında 2θ kadar bir açı oluşacaktır. Tarafsız eksen ve kesitlerin kesişim noktası arasındaki mesafe eğrilik yarıçapını göstermektedir. Çember yay uzunluğu hesabından (6.1) ile θ ve Φ arasındaki bağıntı hesaplanabilir.

$$\Phi = \frac{1}{r} = \frac{2\theta}{L} \quad (6.1)$$

Şekil 6.8’de kesitin tarafsız eksen etrafında θ kadar bir dönme gerçekleştirdiği durum şematik olarak gösterilmiştir [52]. Tarafsız eksenin konumu geminin dibinden z_T mesafeden geçmektedir. Dönme açısının bilinmesiyle ayrıklaştırılan elemanlara ait eksenel yer değiştirme miktarı hesaplanabilecektir.



Şekil 6.8 : Elemanlarda eksenel yer değiştirme [52].

Denklem (6.2) ile eksenel yer değiştirme hesaplanabilir. Denklemde geminin her iki ucunun da θ kadar dönme gerçekleştirdiği göz önüne alınarak ikiyle çarpılarak hesaplanmalıdır.

$$\begin{aligned}\Delta z_i &= z_i - z_T \\ du &= du_{Baş} + du_{Kıç} \\ du_{Baş} &= du_{Kıç} = \theta \Delta z_i = \frac{\Phi L}{2} \Delta z_i \rightarrow \\ du &= \Phi L \Delta z_i\end{aligned}\tag{6.2}$$

6.4 Hesap Tablolarının Oluşturulması

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

bağıntı (6.3) ile ortalama gerilme ve eksenel kuvvet arasındaki bağıntı ise (6.4) ile verilmektedir.

$$\varepsilon_{ort} = du / L \quad (6.3)$$

$$\sigma_{ort} = P / A \quad (6.4)$$

$$\varepsilon(z) = (z + z_T - z_D)\Phi \quad (6.5)$$

Kesit üzerindeki şekil değiştirme dağılımı (6.5) yardımıyla eğriliğe ve tarafsız eksenenden uzaklığa bağlı olarak hesaplanabilir. Elemana etkiyen ortalama şekil değiştirme değeri (6.3) yardımıyla da eksenel yer değiştirmesi hesaplanacaktır. Elemana ait eksenel yer değiştirme değerine bağlı normal kuvvet değeri diyagramdan okunarak Çizelge 6.1’de yer alan hesaplama tablosundaki yerine yazılacaktır. Dengenin oluşması için izdüşüm denge denkleminin sağlanması yani elemanların oluşturdukları iç kuvvetler toplamının sıfır olması gerekmektedir. İç kuvvetler toplamının sıfır olmaması verilen eğriliğe bağlı şekil değiştirme değerlerinin hatalı hesaplandığını yani tarafsız eksenin yerinin hatalı alındığını göstermektedir. Tarafsız eksenin yeri iteratif olarak değiştirilerek bulunmalıdır. Elemanların oluşturdukları moment değeri ise elemanların oluşturdukları iç kuvvet değerlerinin tarafsız eksene olan uzaklıklarıyla çarpılmasıyla elde edilir. Kesite ait toplam moment değeri ise elemanlara ait moment değerlerinin toplamından oluşmaktadır.

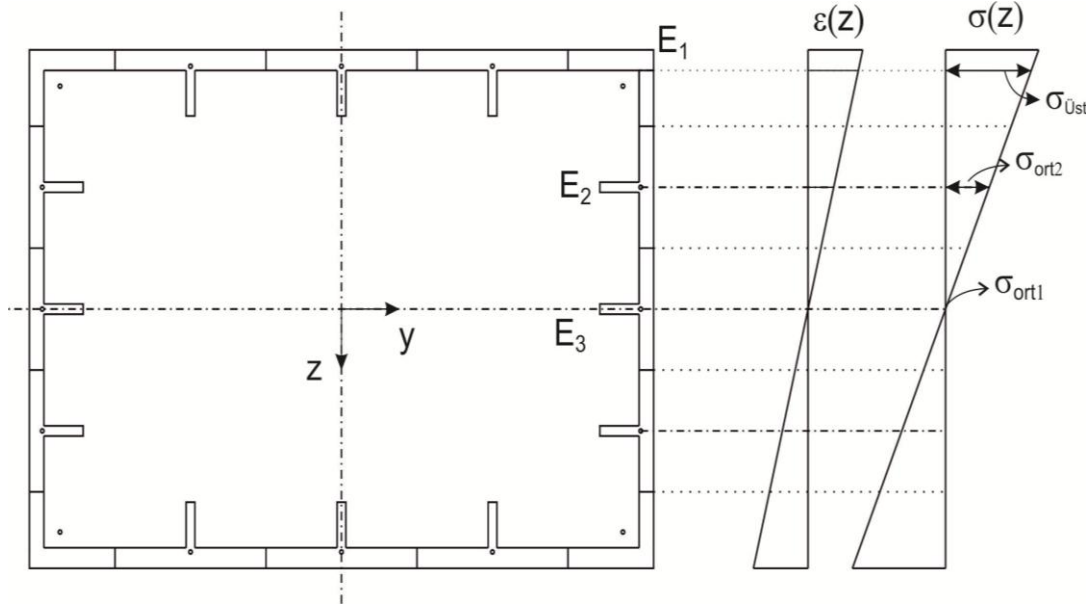
Çizelge 6.1: Örnek hesaplama tablosu.

E. No	z_i	dz_i	du_i	P_i	M_i
i	z_i	$z_i - z_T$	$\Phi L dz_i$	P-du diyagramından	$P_i dz_i$
				$\Sigma P_i = 0$	ΣM_i

6.5 Smith Yönteminde Sınırlar ve Sayısal Hatalar

Smith yönteminde meydana gelebilecek sayısal hataları incelemek üzere stifnerlenmiş kuru kiriş problemi üzerinde durulacaktır. Şekil 6.9’da kutu kiriş ve şekil değiştirme ve gerilme dağılımı yer almaktadır. Gerilmeler lineer bölgede bulunmaktadır. Kutu kiriş elemanlara ayrılmıştır. Smith yönteminde elemanlara ait ortalama şekil değiştirme değerini oluşturacak ortalama gerilme değeri hesaplanır.

Her bir elemanın ortalama gerilmelerine göre oluşturdıkları moment değerleri toplanarak toplam moment değeri elde edilir. Kutu kirişe ait E_3 numaralı eleman incelenirse ortalama şekil değiştirme ve ortalama gerilme değerlerinin eleman eksenleriyle tarafsız eksenin çakışması nedeniyle sıfır olduğu görülecektir. Bu durum izdüşüm denge denklemleri açısından bir sorun yaratmayacaktır. Tarafsız eksenin hesabında hata oluşturmayacak ama elemana ait moment değerleri hesaplanamayacaktır. Dolayısıyla kapasite hesabı hatalı elde edilecektir.

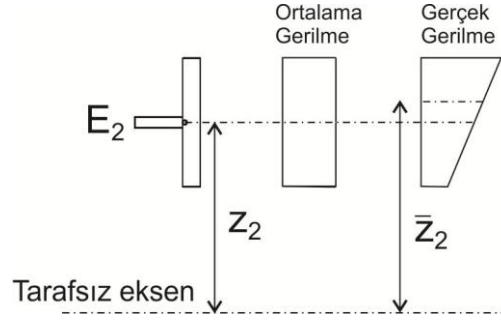


Şekil 6.9 : Kutu kiriş ve gerilme, şekil değiştirme dağılımları.

Şekil 6.10'da E_2 numaralı elemanlara ait gerçek ve ortalama gerilme dağılımları yer almaktadır. Denklem (6.6) ile eksenel kuvvet ve denklem (6.7) ile gerilme dağılımlarının oluşturdıkları moment değerleri hesaplanmaktadır. Her iki gerilme dağılımına ait moment kollarının farklı olması nedeniyle moment değerleri eşit çıkmayacaktır. Bu gerilme dağılımında da tarafsız eksenin yerini hesaplamaya yönelik izdüşüm denge denklemlerinde sorun olmamasına rağmen toplam moment değeri olması gereken değerden düşük çıkacaktır.

$$P_2 = \int \sigma(z) dA = A_2 \sigma_{ort2} \quad (6.6)$$

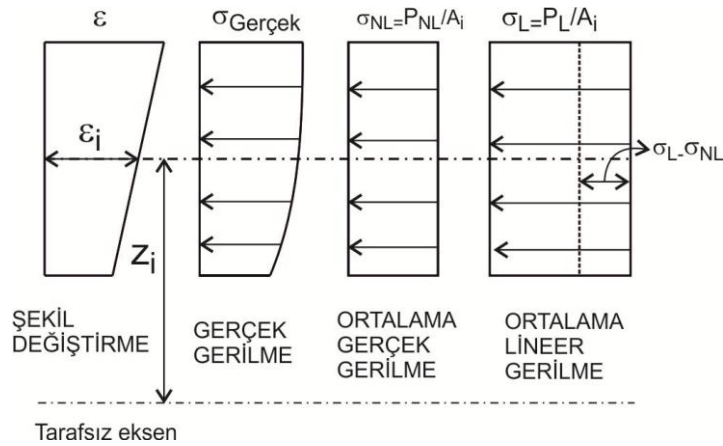
$$M_2 = \int z \sigma(z) dA = P \cdot \bar{z}_2 \neq P \cdot z_2 \quad (6.7)$$



Şekil 6.10 : Ortalama ve gerçek gerilme.

Şekil 6.9’da yer alan E_2 numaralı eleman lokal plak burkulması yönünden incelenecektir. Smith yöntemine göre yapılacak hesaplamada lokal plak burkulması hesaplanırken ortalama gerilme değeri kullanılacaktır. Hâlbuki denklem (5.4)’te yer alan etkin genişlik hesapları için kullanılacak gerilme değerleri üstteki plak için daha yüksek, alttaki plak için daha düşük olacaktır. Etkin genişlik hesapları (5.5) ile yapılmadığı için sonuçlar farklı olacaktır.

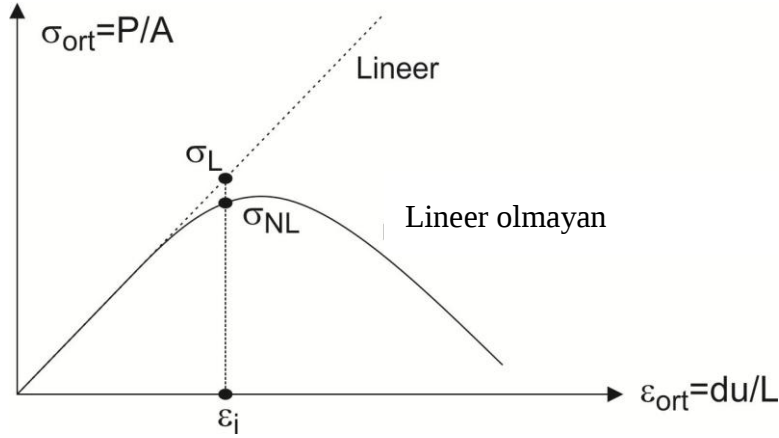
Bu hataların oluşması bordada bulunan eleman yüksekliklerinin gemi yüksekliğine oranının büyük olması durumunda ortaya çıkacaklardır. Bordasındaki eleman sayısının fazla olduğu gemi tiplerinde Smith yönteminde oluşacak sayısal hata değeri azalacak ve ihmal edilebilir seviyelere inecektir. Bordada bulunan eleman sayısının az olması durumunda oluşacak sayısal hata mertebesini azaltmak üzere bir takım iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 6.11 : Lineer ve lineer olmayan hesaba göre ortalama gerilme dağılımları.

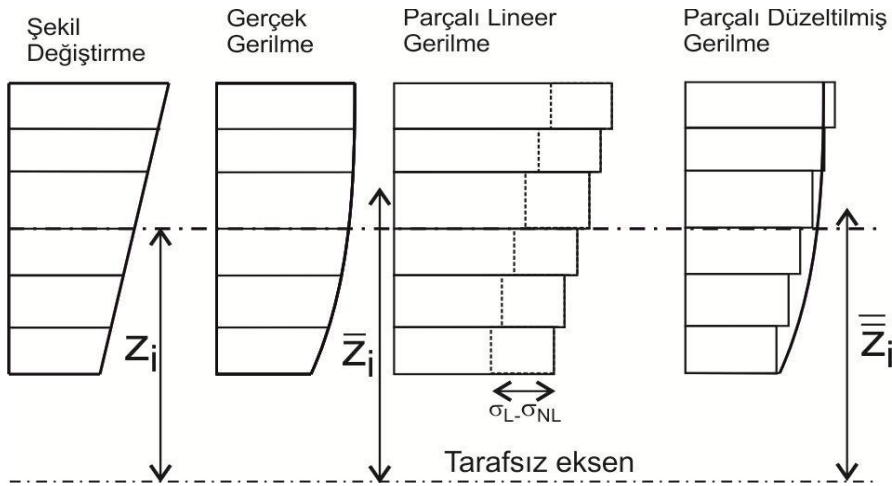
Şekil 6.11’de bir elemana ait şekil değiştirme dağılımı ve gerçek gerilme dağılımı yer almaktadır. Aynı şekil üzerinde ise elemana ait ortalama şekil değiştirme değerine göre lineer ve lineer olmayan olarak elde edilen ortalama gerilme dağılımları yer almaktadır. Ortalama gerilme değerleri Şekil 6.12 yardımıyla hesaplanmıştır. Bu iki

gerilme dağılımı arasındaki fark mukavemetteki kaybı göstermektedir. Bu gerilmedeki azalmanın kesit üzerinde eşit dağıldığı kabul edilmiştir.



Şekil 6.12 : Lineer olmayan ve lineer ortalama gerilme-ortalama şekil değiştirme.

Elemanı parçalara ayırmak suretiyle her bir parçaya ait düzeltilmiş ortalama gerilme dağılımı elde edilecektir. Elemana ait parçanın lineer teoriye göre oluşacak ortalama gerilme değerinden kayıp ortalama gerilme değerinin çıkartılması parçanın yapısal bozulmaların dikkate alındığı ortalama gerilme dağılımını verecektir. Toplam eksenel kuvvet değerleri yönünden düzeltilmiş ve düzeltilmemiş gerilme dağılımları aynı değeri verecek ama oluşturdukları moment değerleri farklılık gösterecektir. Şekil 6.13'te Smith yöntemine göre, gerçek ve düzeltilmiş gerilme dağılımları yer almaktadır. Düzeltilmiş duruma ait gerilme dağılımının oluşturacağı moment değeri gerçek moment değerine daha yakın olacaktır.



Şekil 6.13 : Düzeltilmiş ortalama gerilme dağılımı.

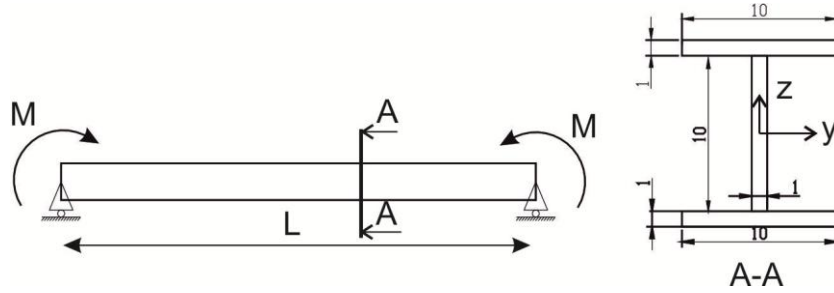
6.6 Sayısal Çalışmalar

Öncelikle yapısal bozulmanın başlamadığı duruma ilişkin sayısal çalışma gerçekleştirilecektir. Analitik sonuç ile karşılaştırma yapılacak ve iyileştirme çalışmasının etkisi gösterilecektir.

İkinci sayısal çalışmada ise deneyleri gerçekleştirilen stifnerlenmiş kutu kirişe ait çözüm elde edilecektir. Önerilen yöntemde elde edilen sonuçların karşılaştırması hem deneysel sonuçlar hem de bu konuda çalışma yapan diğer bilim insanları tarafından elde edilen sonuçlarla yapılacaktır.

6.7 I Kiriş Hesaplamaları

Sayısal hesaplamanın yapılacağı kiriş Şekil 6.14'te yer almaktadır. Hesaplamalar elastik bölgede burkulma oluşmadan gerçekleşmektedir. Kirişin sabit eğilme momenti altındaki analitik çözümüyle Smith yönteminden elde edilen sonuçları karşılaştırılacaktır



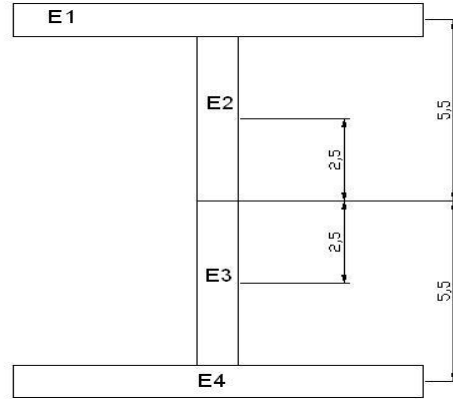
Şekil 6.14 : Eğilme momenti altında kiriş.

Smith yönteminde gemi kirişi stifnerlenmiş plaklardan oluşan elemanlara ayrılmaktadır. Bu çözümde ise kiriş lamalara ayrılarak çözüm aranacaktır. Ayrıklaştırılan elemanlara ait eksenel kuvvet eksenel yer değiştirme bağıntısı yardımıyla da çözüm elde edilecektir. Dikdörtgen kesite sahip elemanın eksenel kuvvet eksenel yer değiştirme bağıntısı denklem (6.8) yardımıyla elde edilir. Malzemeye ait elastisite modülü 200000 N/mm^2 olarak alınmıştır. Kiriş boyu 900 mm olmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{du}{L} = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{EA} \rightarrow du = \frac{P L}{E A} \quad (6.8)$$

Öncelikle kiriş 4 elemana ayrılarak çözüm elde edilecektir. Şekil 6.15'te kirişin dört elemana ayrılmış durumu yer almaktadır. Yapının simetrik olmasından ötürü tarafsız

eksene ait konum orta noktası olacaktır. Şekil 6.15'te ayrıca elemanların tarafsız eksenenden olan mesafeleri de yer almaktadır.



Şekil 6.15 : Dört elemanlı kiriş.

Kirişe eğrilik değeri vererek elemanların yapacağı eksenel yer değiştirmelerin hesaplanması gerekmektedir. Eğriliğin 0,0000222 alınmasıyla hesaplamalar gerçekleştirilecektir. Elemanların eksenel yer değiştirme miktarı denklem (6.2) yardımıyla hesaplanacaktır. Yer değiştirme miktarına bağlı olarak denklem (6.6) yardımıyla elemana ait eksenel kuvvet değeri hesaplanacaktır. Eksenel kuvvet değerleri ve tarafsız eksenin yerinin bilinmesiyle de elemanlara ait momentler hesaplanacaktır. Çizelge 6.2'de bu hesaplamalar Microsoft Excel tablolama programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.2 : Moment hesabı.

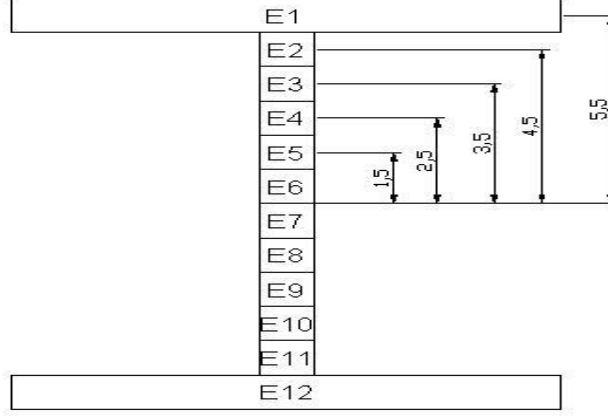
	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm	N	Nmm
El No	b _i	h _i	z _i	A _i	dz _i	du _i /L	P _i	M _i
1	10	1	0,5	10	-5,5	-0,11	-244	1344
2	1	5	3,5	5	-2,5	-0,05	-56	139
3	1	5	8,5	5	2,5	0,05	56	139
4	10	1	12	10	5,5	0,11	244	1344
Toplamlar							0	2967

Toplamda eğriliğe bağlı olarak moment değeri ise 2967 Nmm olarak hesaplanmıştır.

Analitik sonuç ise denklem (6.9) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$M = \frac{EI}{r} = 3066,67 \text{ Nmm} \quad (6.9)$$

İki sonuç arasında fark büyüktür. Bu farkı azaltmak üzere aynı problem eleman sayısının artırılmasıyla yeniden çözülecektir. Şekil 6.16'da kirişin oniki elemana ayrılması durumundaki elemanlar ve tarafsız eksene olan uzaklıkları gösterilmektedir



Şekil 6.16 : On iki elemanlı kiriş.

Eleman sayısının 12 olması durumunda gerçekleştirilen çözüme ilişkin tablolama Çizelge 6.3'te gösterilmektedir. Hesaplama sonunda verilen eğrilik durumunda 3056 Nmm değerinde moment elde edilmiştir. Elde edilen sonuç analitik değere daha çok yaklaşmıştır.

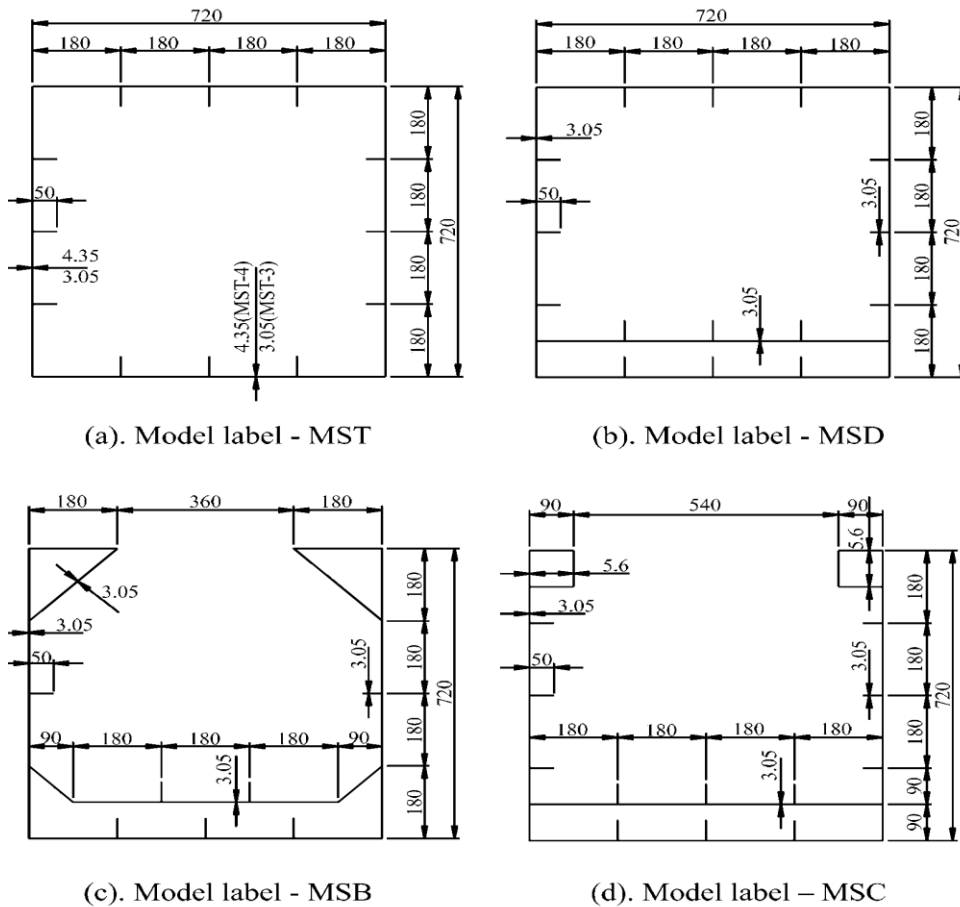
Çizelge 6.3 : Oniki elemanlı moment hesabı.

	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm	N	N.mm
El	b_i	h_i	z_i	A_i	dz_i	du_i/L	P_i	M_i
1	10	1	0,5	10	-5,5	-0,11	-244	1344
2	1	1	1,5	1	-4,5	-0,09	-20	90
3	1	1	2,5	1	-3,5	-0,07	-16	54
4	1	1	3,5	1	-2,5	-0,05	-11	28
5	1	1	4,5	1	-1,5	-0,03	-7	10
6	1	1	5,5	1	-0,5	-0,01	-2	1
7	1	1	6,5	1	0,5	0,01	2	1
8	1	1	7,5	1	1,5	0,03	7	10
9	1	1	8,5	1	2,5	0,05	11	28
10	1	1	9,5	1	3,5	0,07	16	54
11	1	1	10,5	1	4,5	0,09	20	90
12	10	1	11,5	10	5,5	0,11	244	1344
				30	Toplamlar		0	3056

6.8 Kutu Kiriş Hesaplamaları

Bu bölümde gerçekleştirilecek hesaplama için Nishihara tarafından gerçekleştirilen kutu kiriş deneysel çalışmasına ait veriler kullanılacaktır [9,57,58].

Nishihara basit eğilme altında 4 farklı gemi tipini modelleyen 9 kutu kirişle deneysel çalışmalarda bulunmuştur. En kesiti 720 mm x 720 mm olan bu kutu kirişin boyu 900 mm olmaktadır. MST kodlu kutu kirişler tek dipli tankerleri, MSD kodlu kuru kirişler çift dipli tankerleri, MSB kodlu kutu kirişler dökme yük gemilerini ve son olarak MSC kodlu kutu kirişler ise konteyner gemilerini temsil etmek üzere iç elemanları çeşitlendirilmiştir. Postalar arası mesafe tüm kutu kirişler için 540 mm olarak alınmıştır. Stifnerler lamalardan meydana gelmiş olup 90 mm ve 50 mm yüksekliğindedir. Kalınlıkları 3,05 mm olup sadece MST-4 kutu kirişinde 4,35 mm olmaktadır. Şekil 6.17’de kutu kirişlere ait gösterimler yer almaktadır [57]. Deneylerde eğilme momenti uygulanmış ve momentlere bağlı olarak çökme değerleri ölçülmüştür.



Şekil 6.17 : Kutu kirişler-Nishihara deneyleri [57].

Çizelge 6.4 ile deneyde kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler ve elde edilen en büyük moment değerleri yer almaktadır [58].

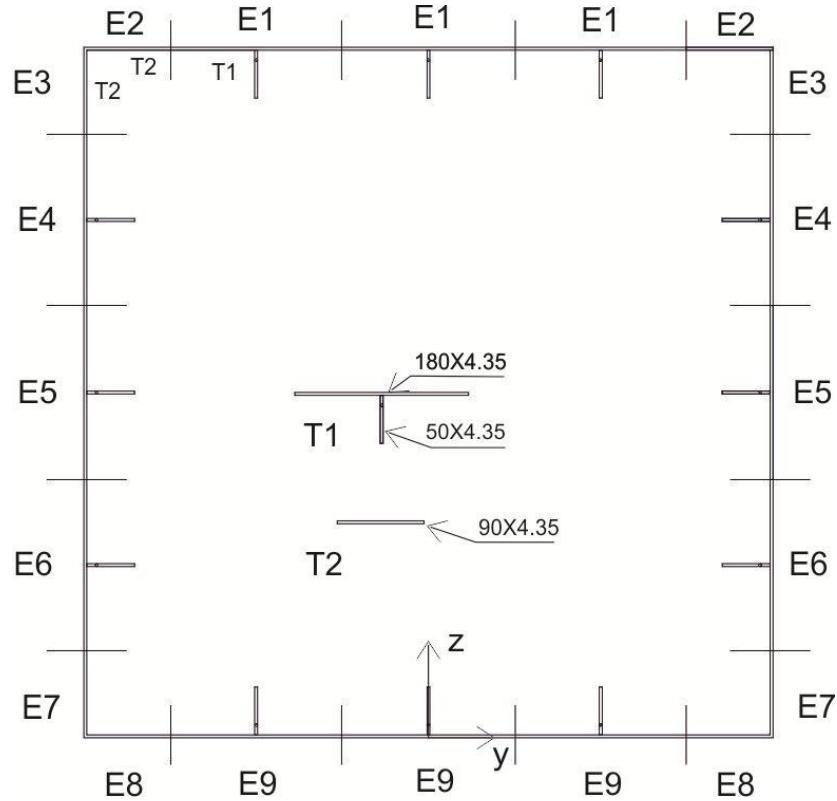
Çizelge 6.4 : Malzeme özellikleri.

mm	N/mm ²	N/mm ²	
t	σ_{Akma}	E	ν
3,05	287,4	207000	0,277
4,35	264	208000	0,281

Sayısal çalışma MST-3 ve MST-4 kodlu kutu kirişleri için gerçekleştirilecektir. Hesaplama öncesi yapıların elemanlara ayrılması gerekmektedir. Hesaplamalarda ayrıca Smith yönteminden doğacak moment hatasına ait düzeltme çalışması da yapılacaktır.

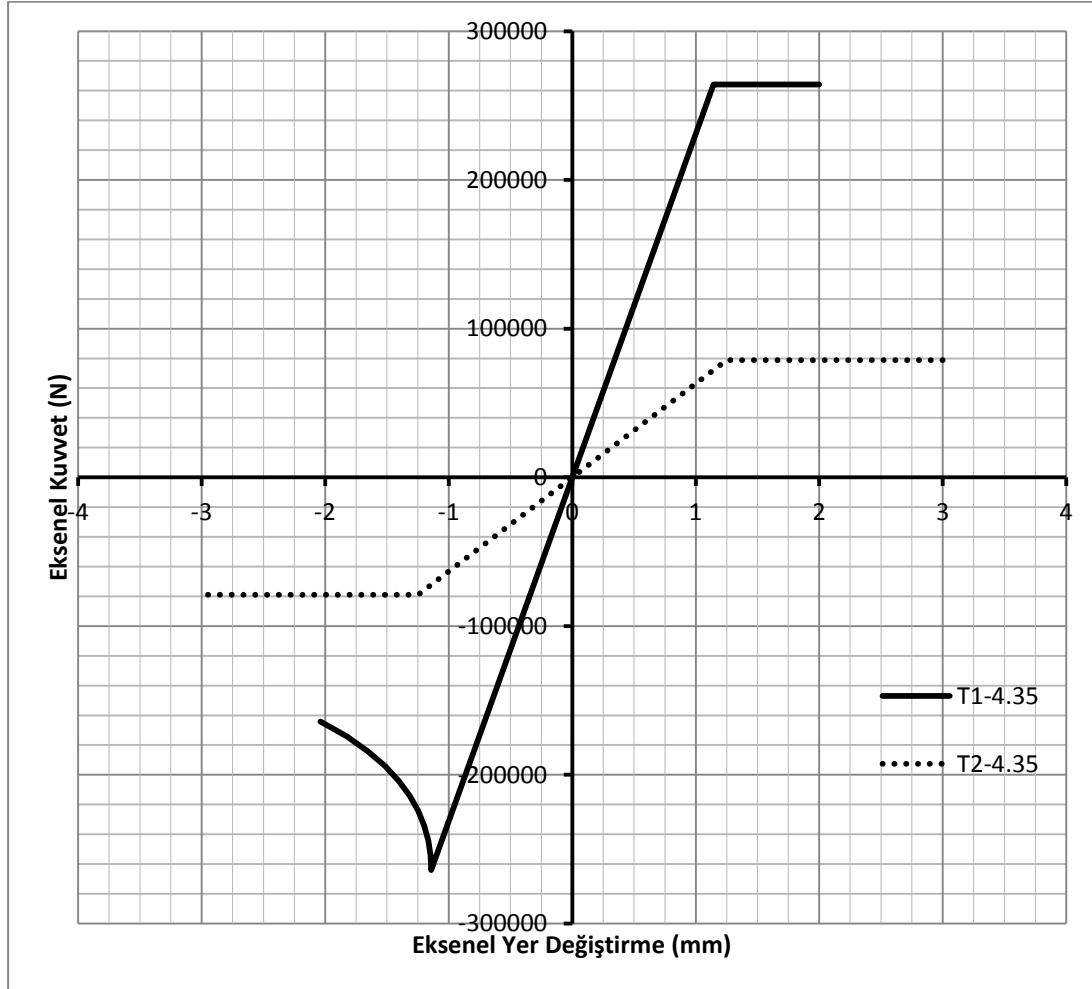
6.8.1 MST-4 çözümü

Kesit Şekil 6.18’de görüldüğü üzere elemanlara ayrılmıştır. Kesit iki tür elemandan meydana gelmektedir. Bunlar T1 kodu verilen stifnerlenmiş plak ve T2 kodu verilen köşe elemanlardır.



Şekil 6.18 : Eleman numaralandırma ve eleman tipleri.

Bu elemanlara ait P-du diyagramları Bölüm 5 yardımıyla hesaplanacaktır. Şekil 6.19’da T1 ve T2 kodlu eleman tipine ait P-du diyagramı yer almaktadır. T1 kodlu eleman tipinde lokal plak burkulması oluşmamakta, kiriş burkulması sonrası ise mukavemet kaybı yaşanmaktadır. Elemana ait kritik lokal plak burkulma gerilmesinin yüksek olmasından ötürü artık kaynak gerilmelerinin P-du diyagramı üzerinde etkisi bulunmamaktadır. T2 eleman tipi köşe eleman olması sebebiyle burkulma ve burkulma sonrası mukavemette bir azalma oluşmamaktadır.



Şekil 6.19 : P-du diyagramı.

Hazırlanan hesaplama tablosunda eğrilik değerini değiştirmek suretiyle her elemana ait eksenel yer değiştirmeye karşı gelen eksenel kuvvet değeri yazılarak moment değerleri hesaplanır. Yapısal bozulmaların başlamasıyla tarafsız eksenin yeri iteratif olarak değiştirilir. Çizelge 6.5’te hesaplama tablosundan elde edilen en büyük momente ait değerler yer almaktadır. Eğrilik değerinin artırılmasıyla moment kapasitesi azalmaya başlamaktadır.

Çizelge 6.5 : Moment hesabı.

adet	Tip	El No	z(mm)	dz(mm)	du(mm)	P(N)	M(N.mm)
3	T1	1	711,9174	351,9274	1,124408	779935	274464914
2	T2	2	717,825	357,835	1,143283	206712	73964654
2	T2	3	675	315,01	1,006457	182116,9	57364998
2	T1	4	540	180,01	0,575132	265942,1	47866925
2	T1	5	360	0,01	3,19E-05	-14,7754	0
2	T1	6	180	-179,99	-0,57507	-265972	47877563
2	T2	7	45	-314,99	-1,00639	-182128	57372283
2	T2	8	2,175	-357,815	-1,14322	-206712	73968789
3	T1	9	8,0826	-351,9074	-1,12434	-779979	274496112
$\Phi=$	0,00355	1/m	zd=	359,990	mm	0	907376238

Çizelge 6.6’da E4 numaralı bordada bulunan elemana ait moment hesabındaki düzeltme gösterilmiştir. Diğer borda elemanlarına ait düzeltmelerin yapılmasıyla elde edilen nihai moment değerini veren değerler Çizelge 6.7 ile gösterilmiştir. Toplamda moment değerinde %1,4 oranında düzeltme gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.6 : Moment düzeltmesi.

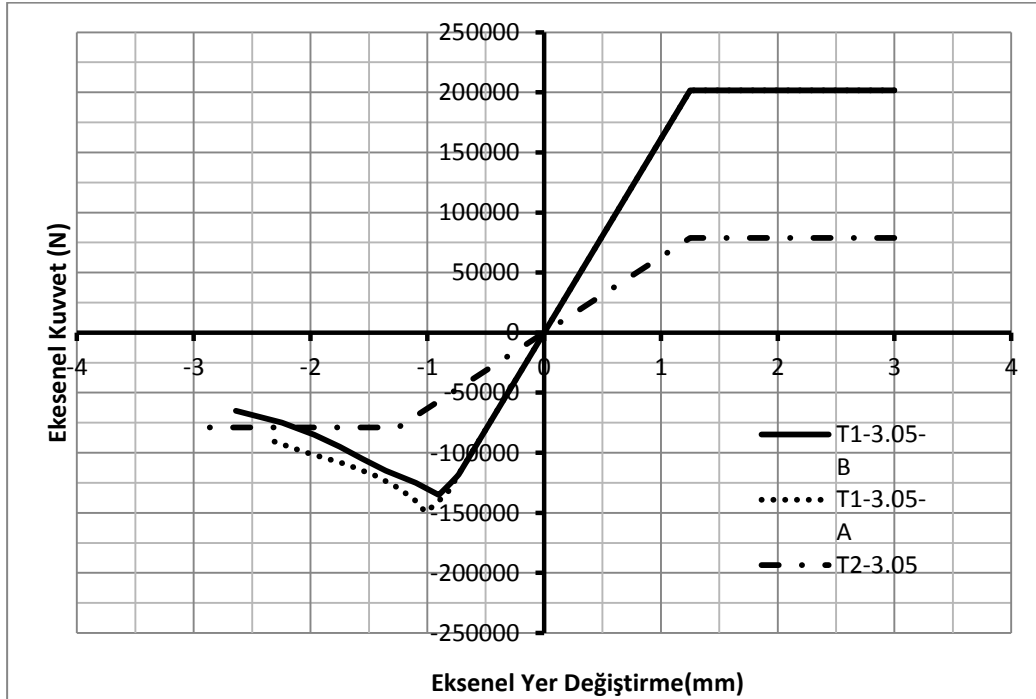
El No:4	z _{ii} (mm)	dz _{ii}	du _{ii} (mm)	A _{ii} (mm ²)	P _{ii} (N)	P _{düzii} (N)	M _{ii} (N.mm)
4-1	627,83	267,83	0,8557	95,51	18887	18887	5059106
4-2	605,87	245,88	0,7856	95,51	17339	17339	4263646
4-3	583,91	223,92	0,7154	95,51	15791	15791	3536182
4-4	561,96	201,97	0,6453	95,51	14242	14242	2876714
4-5	540,00	180,01	0,5751	236,42	31422	31422	5656838
4-6	518,04	158,05	0,5050	95,51	11145	11145	1761768
4-7	496,09	136,10	0,4348	95,51	9597	9597	1306289
4-8	474,13	114,14	0,3647	95,51	8048	8048	918807
4-9	452,18	92,18	0,2945	95,51	6500	6500	599321
TOPLAMLAR					132971	132971	25978671

Çizelge 6.7 : Toplam momentler.

adet	El No	M(N.mm)	Mi ek	Mtop
3	1	274464914	0	274464914
2	2	73964654	0	73964654
2	3	57364998	385445	57750443
2	4	47866925	4079780	51946705
2	5	0	4079780	4079780
2	6	47877563	4079780	51957343
2	7	57372283	385445	57757728
2	8	73968789	0	73968789
3	9	274496112	0	274496112
		907376238	13010230	920386469

6.8.2 MST-3 çözümü

Plak kalınlığının düşmesiyle lokal plak burkulmaları oluşabilmektedir. Şekil 6.20’de T1 ve T2 tipli elemanlara ait P-du diyagramları yer almaktadır. T1-3.05-A yazılı diyagram artık kaynak gerilmesinin akma gerilmesine oranı 0,1 ve T1-3.05-B yazılı diyagramda artık kaynak gerilmesinin akma gerilmesine oranı 0,2 alınmıştır.



Şekil 6.20 : P-du diyagramı.

Çizelge 6.8’de nihai taşıma kapasitesini T1-3.05-A diyagramına göre düzeltilmiş durum ile veren hesap değerleri yer almaktadır.

Çizelge 6.8 : Moment hesabı-3.05-%10 artık kaynak gerilmeli.

ad	Tip	El	z	dz	du	P	M
3	T1	1	712,7	421,259692	1,781928497	320715,8237	135104649
2	T2	2	718,4	427,025996	1,806319963	157782,6	67377272
2	T2	3	675,0	383,550996	1,622420713	157782,6	60517673
2	T1	4	540,0	248,550996	1,051370713	290523,8368	72209989
2	T1	5	360,0	68,550996	0,289970713	93570,6494	6414361
2	T1	6	180,0	-111,449004	-0,471429287	-152125,5166	16954237
2	T2	7	45,00	-246,449004	-1,042479287	-131633,8596	32441034
2	T2	8	1,52	-289,924004	-1,226378537	-154854,8179	44896129
3	T1	9	7,29	-284,1577	-1,201987071	-581803,8119	165324033
Φ	0,0047	1/m	zd=	291,449	mm	0	601226657

Çizelge 6.9 da E4 numaralı bordada bulunan elemana ait moment hesabındaki düzeltme gösterilmiştir. Diğer borda elemanlarına ait düzeltmelerin yapılmasıyla elde edilen nihai moment değerini veren değerler Çizelge 6.10 ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.9 : Moment düzeltme.

El No:4	$z_{ii}(\text{mm})$	$dz_{ii}(\text{mm})$	$du_{ii}(\text{mm})$	A_{ii}	$P_{ii}(\text{N})$	$P_{düzii}$	M_{ii}
4-1	628,48	337,03	1,4256	67,46	22120	18941	6383610
4-2	606,36	314,91	1,3321	67,46	20669	17698	5573203
4-3	584,24	292,79	1,2385	67,46	19217	16455	4817786
4-4	562,12	270,67	1,1449	67,46	17765	15212	4117361
4-5	540,00	248,55	1,0514	161,80	39126	33503	8327130
4-6	517,88	226,43	0,9578	67,46	14862	12726	2881483
4-7	495,76	204,31	0,8642	67,46	13410	11483	2346030
4-8	473,64	182,19	0,7707	67,46	11958	10239	1865569
4-9	451,53	160,08	0,6771	67,46	10506	8996	1440098
$\rho = \Sigma P_{ii}/P_i = 1$, $P_{düzii} = r \cdot P_{ii}$, $M_{iek} = \Sigma M_{ii} - M_i$					169633	145252	37752270

Çizelge 6.10 : Toplam momentler.

adet	El No	M	M _{iek}	M _{top}
3	1	135104649	0	135104649
2	2	67377272	0	67377272
2	3	60517673	1460374,177	61978048
2	4	72209989	3305026,999	75515016
2	5	6414361	3853284,085	10267645
2	6	16954237	3853284,085	20807521
2	7	32441034	1460374,177	33901408
2	8	44896129	0	44896129
3	9	165324033	0	165324033
		601226657	13932344	615171721

Çizelge 6.11’de nihai taşıma kapasitesini T1-3.05-A diyagramına göre düzeltilmiş durum ile veren hesap değerleri yer almaktadır.

Çizelge 6.11 : Moment hesabı-3.05-%10 artık kaynak gerilmeli.

n	Tip	El No	z	dz	du	P	M
3	T1	1	712,71	390,492632	1,335484801	345616,0024	134960502
2	T2	2	718,48	396,258936	1,355205561	157782,6	62522765
2	T2	3	675,00	352,783936	1,206521061	152347,4144	53745720
2	T1	4	540,00	217,783936	0,744821061	239033,8949	52057742
2	T1	5	360,00	37,783936	0,129221061	41698,34421	1575528
2	T1	6	180,00	-142,216064	-0,486378939	-156949,6198	22320757
2	T2	7	45,00	-277,216064	-0,948078939	-119713,9276	33186624
2	T2	8	1,52	-320,691064	-1,096763439	-138488,3194	44411967
3	T1	9	7,29	-314,92476	-1,077042679	-521326,3532	164178577
Φ	0,0038	1/m	zd=	322,210	mm	0	568960175

Çizelge 6.12’de E4 numaralı bordada bulunan elemana ait moment hesabındaki düzeltme gösterilmiştir. Diğer borda elemanlarına ait düzeltmelerin yapılmasıyla elde edilen nihai moment değerini veren değerler çizelge 6.13 ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.12 : Moment düzeltme.

El No:	$z_{ii}(\text{mm})$	$dz_{ii}(\text{mm})$	$du_{ii}(\text{mm})$	$A_{ii}(\text{mm}^2)$	$P_{ii}(\text{N})$	$Pdüz_{ii}$	$M_{ii}(\text{N.mm})$
4-1	628,48	306,26	1,0474	67,46	16252	16163	4950099
4-2	606,36	284,14	0,9718	67,46	15078	14996	4260904
4-3	584,24	262,02	0,8961	67,46	13904	13828	3623348
4-4	562,12	239,90	0,8205	67,46	12731	12661	3037432
4-5	540,00	217,78	0,7448	161,80	27718	27567	6003616
4-6	517,88	195,67	0,6692	67,46	10383	10326	2020522
4-7	495,76	173,55	0,5935	67,46	9209	9159	1589527
4-8	473,64	151,43	0,5179	67,46	8036	7992	1210172
4-9	451,53	129,31	0,4422	67,46	6862	6824	882457
$\rho = \Sigma P_{ii}/P_i = 1$, $Pdüz_{ii} = r * P_{ii}$, $M_{iek} = \Sigma M_{ii} - M_i$					120173,1	119516,9	27578075,5

Çizelge 6.13 : Toplam momentler.

adet	El No	M	M_{iek}	M_{top}
3	1	134960502	0	134960502
2	2	62522765	0	62522765
2	3	53745720	287895,6	54033616
2	4	52057742	3115421,175	55173164
2	5	1575528	3115421,175	4690949
2	6	22320757	4079780	26400537
2	7	33186624	287895,6	33474519
2	8	44411967	0	44411967
3	9	164178577	0	164178577
Toplam		568960175	10886414	579846596

6.8.3 Karşılaştırmalar

Geliştirilmiş Smith yöntemiyle elde edilen nihai mukavemet değeri ve diğer araştırmacılara ait çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları Çizelge 6.14’de yer almaktadır [56].

Çizelge 6.14 : Nishihara deney sonuçları-karşılaştırmalar.

	(kN.m)	(kN.m)
Model No	MST-4	MST-3
Deneyisel	927	564-589
Nishihara	911	580
Beghin	932	630
Lin	883	566
Paik	879	562
Lee	901	588
Lin's Ampirik	881	577
Önerilen Yöntem	907	569-601
Ö.Yöntem Düzeltilmiş	924	580-615

MST-4 hesaplamalarında yapı oldukça rijit olduğu için herhangi bir lokal plak burkulması gerçekleşmeden güverte elemanları plastik şekil değiştirmeye uğramaktadır. Bu noktadan itibaren yapı dayanımını yitirmektedir. MST-3 hesaplamalarında ise malzeme kalınlığının ince olması nedeniyle elemanlar kolaylıkla lokal plak burkulmasına uğramaktadırlar. Öncelikle güvertede yer alan stifnerlenmiş plak elemanlar burkulmakta ve eğriliğin artırılmasıyla burkulmalar ilerlemekte, tarafsız eksen ise dibe doğru yaklaşmaktadır. MST-3 için kritik olan artık kaynak gerilmelerine ait ölçüm değerleri bulunmadığı için iki farklı değerde hesaplama gerçekleştirilmiştir. Her iki artık kaynak gerilmesine göre yapılan hesaplamalarda nihai duruma ait eğrilik değerlerinde büyük farklılık bulunmaktadır.

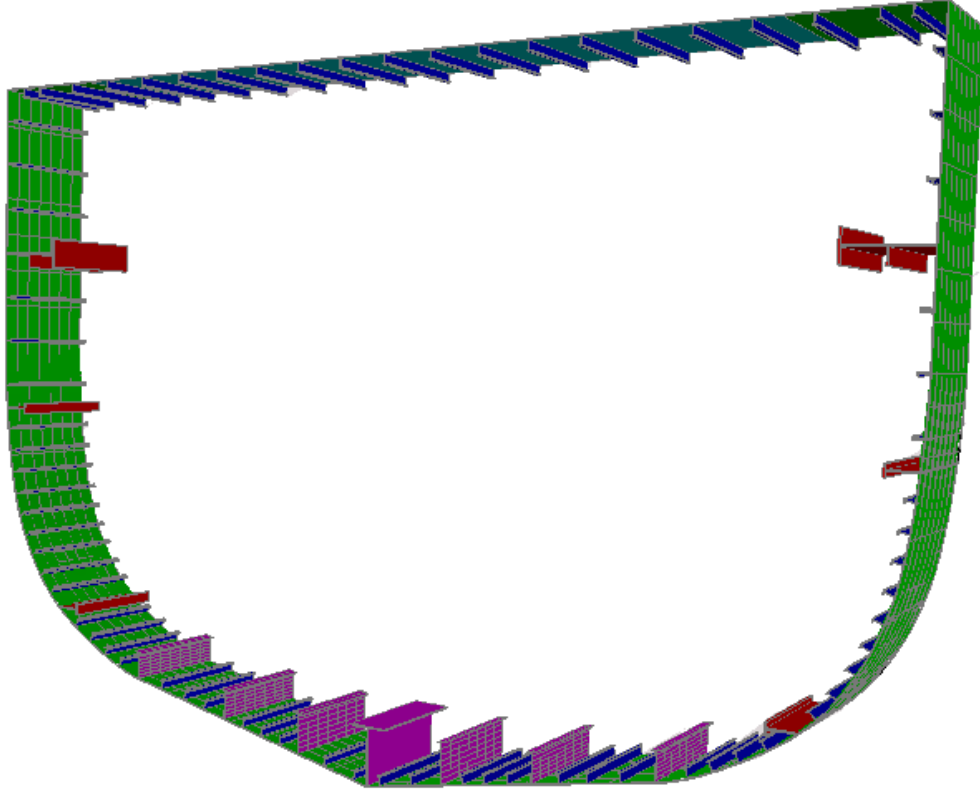
Diğer araştırmacıların sonuçları ile mukayese edilirse yönteme ait sonuçlar her iki deney için de oldukça başarılı olarak elde edilmiştir.

7. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu bölümde gemilere ait sayısal hesaplamalar gerçekleştirilecektir. Birinci sayısal çalışma deneyleri Dow tarafından gerçekleştirilen 1/3 ölçekli fırkateyn için yapılmıştır [59]. İkinci sayısal çalışma ise “*Energy Concentration*” adlı yüksek tonajlı ham petrol tankesine (*Very Large Crude Carrier-VLCC*) ayrılmıştır [2]. Tüm çalışmaların sonrasında elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

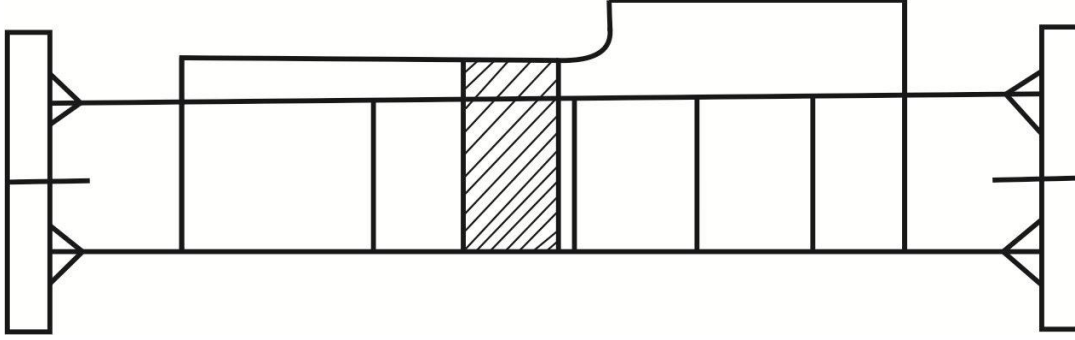
7.1 Fırkateyn Analizi

1991 yılında Dow’un gerçekleştirmiş olduğu 1/3 olarak ölçeklenmiş fırkateynine ait deneysel çalışmaya ait veriler birçok araştırmacı tarafından çalışmalarında kullanılmıştır [6].



Şekil 7.1 : Fırkateyn kesiti.

Şekil 7.1’de deneyleri gerçekleştirilen modele ait kesit resmi yer almaktadır. Model $18m \times 4.1m \times 2,8 m$ boyutlarındadır. Model ayrılabilen üç bölümden oluşmaktadır. Orta bölümde yer alan kısım firkateynin orta kesitini temsil etmektedir. Göçmenin gerçekleştirilmesinden sonra orta bölüm test sistemden çıkartılarak yeni deney numunesi eklenebilmektedir. Böylelikle seri deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.2’de deney setine ait profil kesiti yer almaktadır [59]. Hidrolik sistemlerin uyguladığı kuvvet sonucu eğrilik oluşturulmaktadır.



Şekil 7.2 : Deney seti [59].

Deneylerde numunenin elastik gerçekleşen sarkma, elastik çökme ve plastik çökme durumlarındaki verileri yardımıyla gösterilen moment eğrilik diyagramları elde edilmiştir.

7.1.1 Kesit

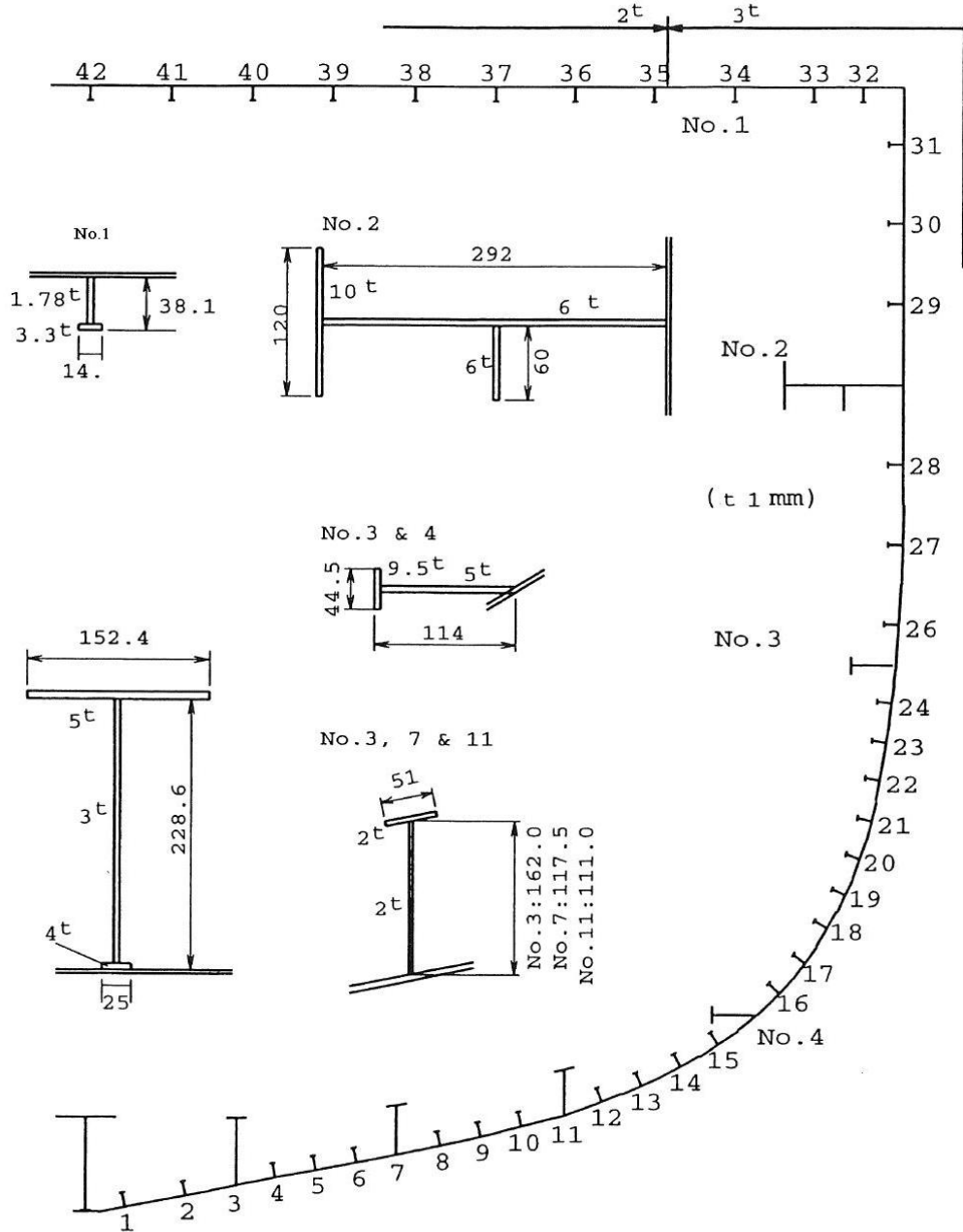
Şekil 7.3’te firkateyne ait en kesit ve en kesiti oluşturan elemanlara ait numaralandırma ve bu elemanlara ait özellikler yer almaktadır [59]. Deney numunelerinde gemi inşaat çeliği kullanılmış ama bu malzemeye ilişkin çekme deneyleri gerçekleştirilmemiştir. Gemi inşaat çeliği için kullanılan $245 N/mm^2$ akma gerilmesi hesaplamalarda kullanılmıştır. Diğer araştırmacılar tarafından yapılan hesaplamalarda malzeme elastik tam plastik olarak kabul edilmiştir [6]. Paik yaptığı çalışmasında malzemenin pekleşme özelliğini de kullanarak en üst mukavemet değeri olarak $408 N/mm^2$ değerini kullanmıştır [1].

Deney numunelerine ait elemanlar üzerindeki başlangıç sehimleri ve artık kaynak gerilmeleri ölçülmüş buna göre hesaplamalarda kullanılmıştır. Artık kaynak gerilmesi denklem (7.1)’de gösterildiği üzere akma gerilmesinin onda biri olarak kullanılmaktadır [1]. Kirişlere ait başlangıç sehimini ise denklem (7.2)’de gösterildiği

üzere desteklenmeyen boya göre hesaplanmaktadır [1]. Denklem (7.2)'de "a" postalar arası mesafeyi göstermektedir.

$$\sigma_R = 0,1 \sigma_{akma} \quad (7.1)$$

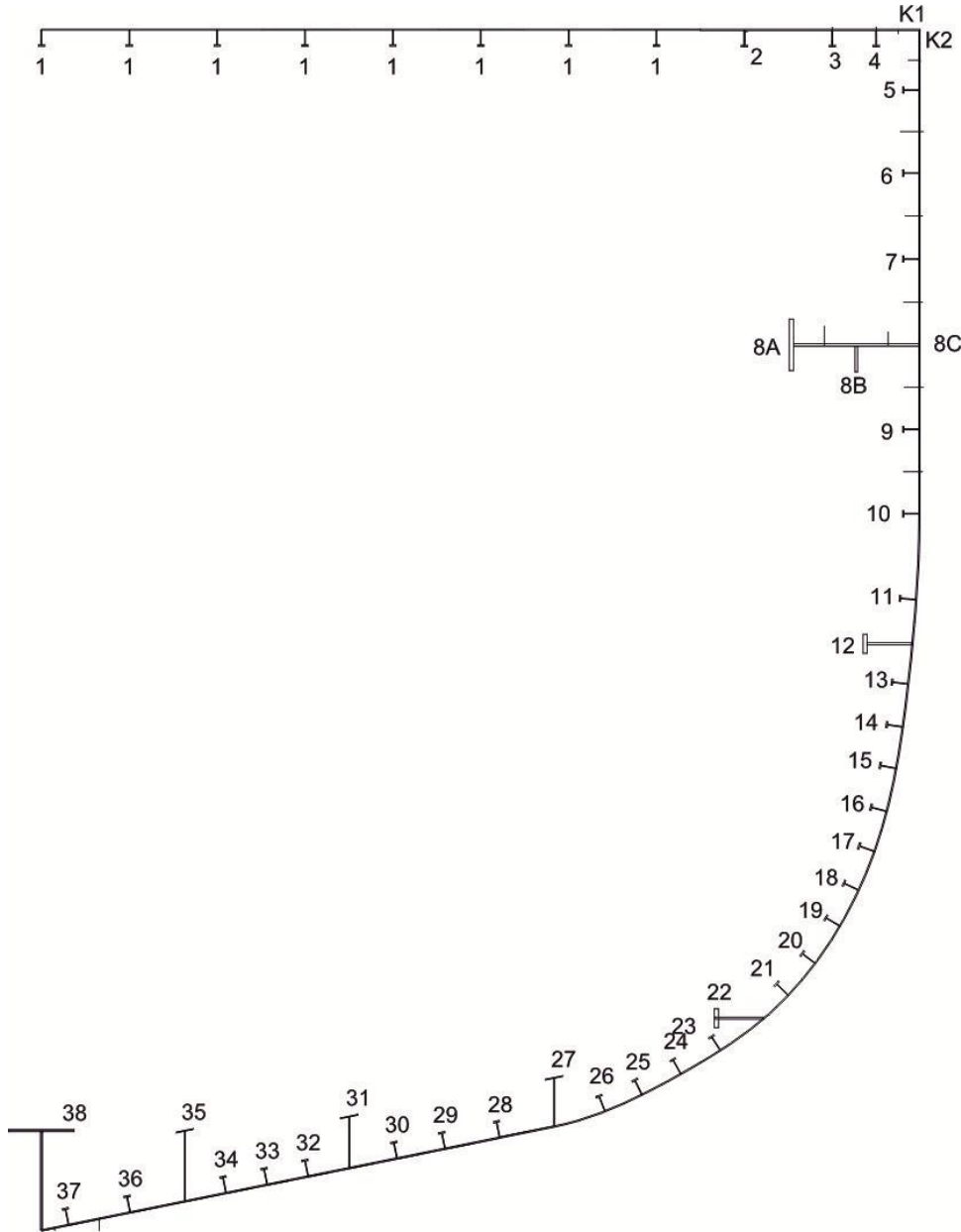
$$\delta_{maks} = 0,0015a \quad (7.2)$$



Şekil 7.3 : Fırkateyn en kesit resmi [59].

7.1.2 Elemanlara ait hesaplamalar

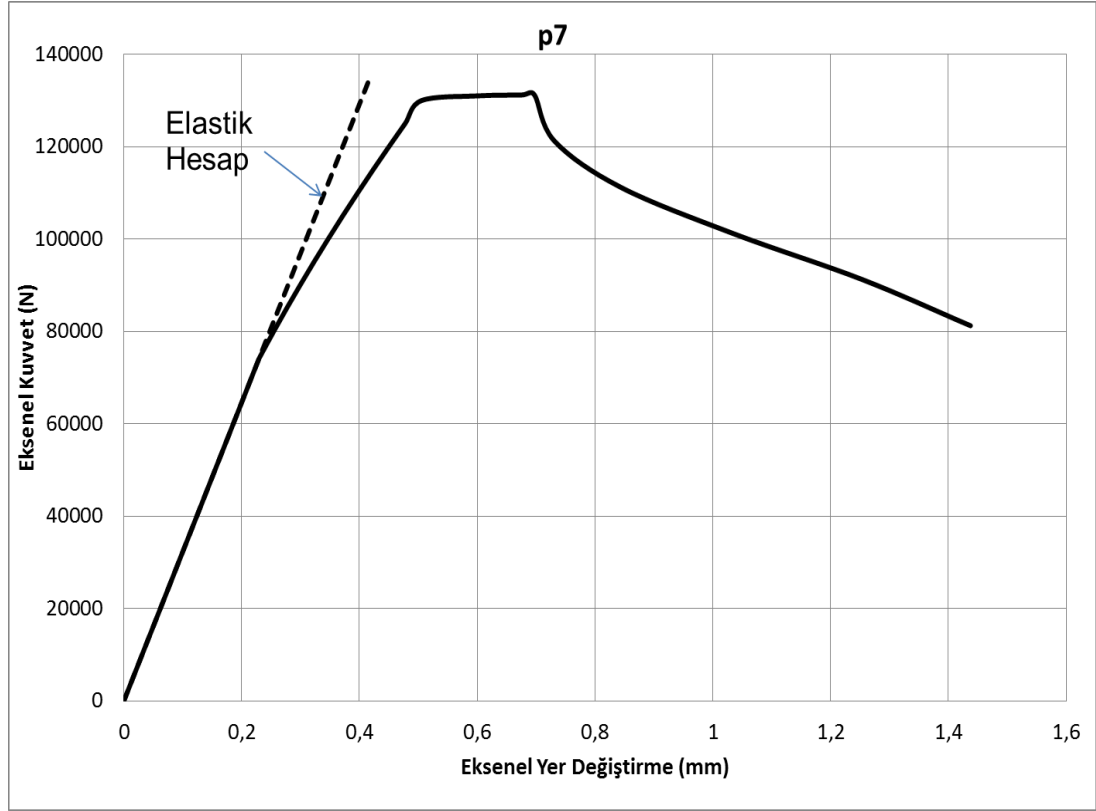
Kesit Şekil 7.4'te görüldüğü üzere 38 farklı stifnerlenmiş plağa ayrılmıştır [59]. Hesaplamalar çökme durumu için gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle dip ve bordada bulunup çekme bölgesinde yer alan plak elemanlar ayrı olarak modellenmiştir. Stifnerlenmiş plak ve plak elemanların haricinde 2 adet de köşe elemanı bulunmaktadır.



Şekil 7.4 : Eleman numaralandırması.

Her bir elemanın geometrik eğrilik yöntemi yardımıyla P-du diyagramları oluşturulacaktır. Şekil 7.5'te 7 numaralı kirişe ait P-du diyagramı yer almaktadır. Bu elemanda belli bir aksenal yer değiştirme değerinin aşılmasıyla lokal plak burkulması

gerçekleşmektedir. Elemanın kesitinde akmanın başlaması ve kesitin tümüne yayılması aşamasında hızlı bir eksenel yer değiştirme meydana gelmiş, sonunda ise nihai dayanım noktasına erişerek tümüyle plastik bölgede hareketlerine başlamıştır.



Şekil 7.5 : P-du diyagramı.

7.1.3 Smith yöntemi ile çözüm

Bu bölümde verilen eğrilığe karşı gelen şekil değiştirmeye bağlı olarak elemanlarda meydana gelecek ortalama şekil değiştirme değerleri hesaplanacaktır. Elemanlar için elde edilen P-du diyagramları yardımıyla ortalama şekil değiştirmeye karşı gelen kuvvet değeri hesaplanacaktır. Daha sonra bu P kuvvetlerine bağlı olarak denge denklemleri yardımıyla kirişe ait toplam moment değeri hesaplanacaktır. Bu hesapları gerçekleştirmek üzere Bölüm 6.4'te yer alan Çizelge 6.1'de gösterilen tablolama kullanılacaktır. Eğrilik değerlerine ait hesaplanan moment değerleri kullanılarak moment-eğrilik diyagramları hesaplanacaktır.

Çizelge 7.1'de nihai mukavemet değerine ulaşıldığı duruma ait hesap tablosu yer almaktadır. Tarafsız eksenin yeri 1140 mm ve eğrilik değeri 0,0013 1/m olarak alınmıştır. Hesaplama neticesinde moment değeri 9,74 MN.m olarak elde edilmiştir.

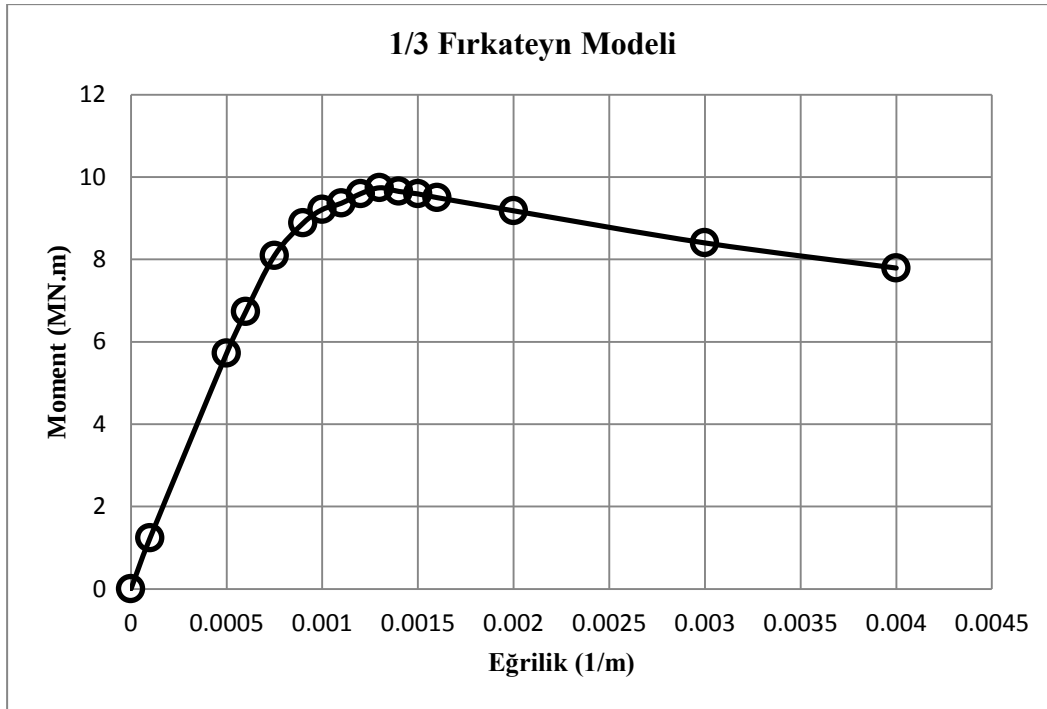
Çizelge 7.1 : Hesap tablosu.

i	adet	z_i	A_i	ze_i	du_i	P_i	M_i	Durum
1	15	2793,3	7808,3	1653,3	0,983	817.034	1.350.809.665	Akma
2	2	2794,3	1451,1	1654,3	0,983	208.049	344.183.890	Akma
3	2	2793,2	1143,6	1653,2	0,983	173.041	286.076.434	Akma
4	2	2791,3	836,1	1651,3	0,981	140.566	232.110.306	Akma
5	2	2647,1	1218,6	1507,1	0,896	206.699	311.524.796	Akma
6	2	2463,6	1399,2	1323,6	0,787	233.136	308.575.811	Akma
7	2	2264,7	1426,4	1124,7	0,668	262.374	295.102.143	Burkulma
9	2	1866,8	1404,3	726,8	0,432	232.885	169.257.748	Burkulma
10	2	1670,1	1041,1	530,1	0,315	185.928	98.558.141	Burkulma
11	2	1493,9	0,0	353,9	0,210	108.752	38.490.416	Elastik
12	2	1368,0	2483,6	228,0	0,136	152.374	34.739.771	Elastik
13	2	1277,7	800,6	137,7	0,082	29.660	4.083.562	Elastik
14	2	1178,4	815,1	38,4	0,023	8.424	323.560	Elastik
15	2	1082,9	815,1	-57,1	-0,034	-12.527	715.447	Elastik
16	2	984,0	815,1	-156,0	-0,093	-34.226	5.340.758	Elastik
17	2	893,7	800,6	-246,3	-0,146	-53.070	13.073.441	Elastik
18	2	805,8	800,6	-334,2	-0,199	-72.005	24.066.269	Elastik
19	2	724,4	815,1	-415,6	-0,247	-91.163	37.889.239	Elastik
20	2	640,0	221,1	-500,0	-0,297	-29.751	14.876.233	Elastik
21	2	568,3	221,1	-571,7	-0,340	-34.016	19.447.067	Elastik
22	2	495,8	845,5	-644,2	-0,383	-146.576	94.426.897	Elastik
22	2	495,8	1045,0	-644,2	-0,383	-181.161	116.707.400	Elastik
23	2	443,7	221,1	-696,3	-0,414	-41.432	28.850.928	Elastik
24	2	389,6	221,1	-750,4	-0,446	-44.648	33.503.561	Elastik
25	2	341,9	221,1	-798,1	-0,474	-47.487	37.899.314	Elastik
26	2	304,2	221,1	-835,8	-0,497	-49.729	41.563.390	Elastik
27	2	356,8	204,0	-783,2	-0,465	-42.994	33.671.855	Elastik
27	2	300,3	444,0	-839,7	-0,499	-100.323	84.237.137	Elastik
28	2	244,3	221,1	-895,7	-0,532	-53.293	47.734.448	Elastik
29	2	218,5	221,1	-921,5	-0,548	-54.171	49.918.132	Elastik
30	2	195,9	221,1	-944,1	-0,561	-54.171	51.142.396	Elastik
31	2	262,6	204,0	-877,4	-0,521	-48.165	42.259.011	Elastik
31	2	206,9	470,0	-933,1	-0,555	-115.150	107.447.617	Elastik
32	2	154,0	221,1	-986,0	-0,586	-54.171	53.412.159	Elastik
33	2	134,7	221,1	-1005,3	-0,597	-54.171	54.455.492	Elastik
34	2	115,3	221,1	-1024,7	-0,609	-54.171	55.506.409	Elastik
35	2	233,6	204,0	-906,4	-0,539	-49.757	45.098.749	Elastik

Çizelge 7.1 : (Devam) Hesap tablosu.

35	2	160,5	648,0	-979,5	-0,582	-158.760	155.507.008	Elastik
36	2	70,1	221,1	-1069,9	-0,636	-54.171	57.957.104	Elastik
37	2	41,1	221,1	-1098,9	-0,653	-54.171	59.528.062	Elastik
38	1	234,2	762,0	-905,8	-0,538	-185.746	168.256.425	Elastik
38	1	117,4	685,8	-1022,6	-0,608	-168.021	171.824.995	Elastik
8a	2	2064,5	3258,0	924,5	0,549	798.210	737.945.145	Akma
8b	2	2055,0	2508,0	915,0	0,544	614.460	562.249.334	Akma
8c	2	2064,5	2045,7	924,5	0,549	501.204	463.362.959	Akma
Borda	2	644,0	319,9	-496,0	-0,295	-42.696	21.178.488	Elastik
Borda	2	585,6	581,5	-554,4	-0,330	-86.763	48.104.695	Elastik
Borda	2	521,3	477,5	-618,7	-0,368	-79.499	49.187.777	Elastik
Borda	2	455,9	751,0	-684,1	-0,407	-138.252	94.575.574	Elastik
Borda	2	392,4	643,3	-747,6	-0,444	-129.405	96.739.530	Elastik
Borda	2	341,1	616,4	-798,9	-0,475	-132.505	105.853.102	Elastik
Borda	2	297,3	568,2	-842,7	-0,501	-128.857	108.593.078	Elastik
Borda	2	258,4	738,4	-881,6	-0,524	-175.160	154.413.622	Elastik
Dip	2	230,5	781,6	-909,5	-0,541	-191.305	173.997.664	Elastik
Dip	2	204,7	781,6	-935,3	-0,556	-191.497	179.112.795	Elastik
Dip	2	180,5	684,7	-959,5	-0,570	-167.742	160.953.193	Elastik
Dip	2	157,9	681,7	-982,1	-0,584	-167.007	164.013.940	Elastik
Dip	2	137,0	587,7	-1003,0	-0,596	-143.987	144.422.779	Elastik
Dip	2	117,6	584,7	-1022,4	-0,608	-143.252	146.457.469	Elastik
Dip	2	98,3	587,7	-1041,7	-0,619	-143.987	149.995.057	Elastik
Dip	2	78,9	587,7	-1061,1	-0,631	-143.987	152.788.395	Elastik
Dip	2	56,3	781,6	-1083,7	-0,644	-191.497	207.530.935	Elastik
Dip	2	28,9	878,6	-1111,1	-0,660	-215.252	239.173.066	Elastik
Dip	2	7,9	390,8	-1132,1	-0,673	-95.741	108.386.584	Elastik
K1	2	2798,5	307,5	1658,5	0,986	75.338	124.947.244	Akma
K2	2	2762,3	416,7	1622,3	0,964	102.092	165.619.978	Akma

Çizelgeye ait son sütunlarda elemanın yapısal bozulmasına ilişkin durum bilgileri yer almaktadır. Görüleceği üzere nihai mukavemet değerine erişildiğinde bazı elemanlarda akma, bazı elemanlarda ise burkulma başlamıştır. Bu değerler elemana ait P-du diyagramları elde edilirken burkulmanın veya akmanın başladığı eksenel yer değiştirme değerlerinin bilinmesiyle elde edilmektedir. Şekil 7.6'da elde edilen moment-eğrilik diyagramı yer almaktadır.



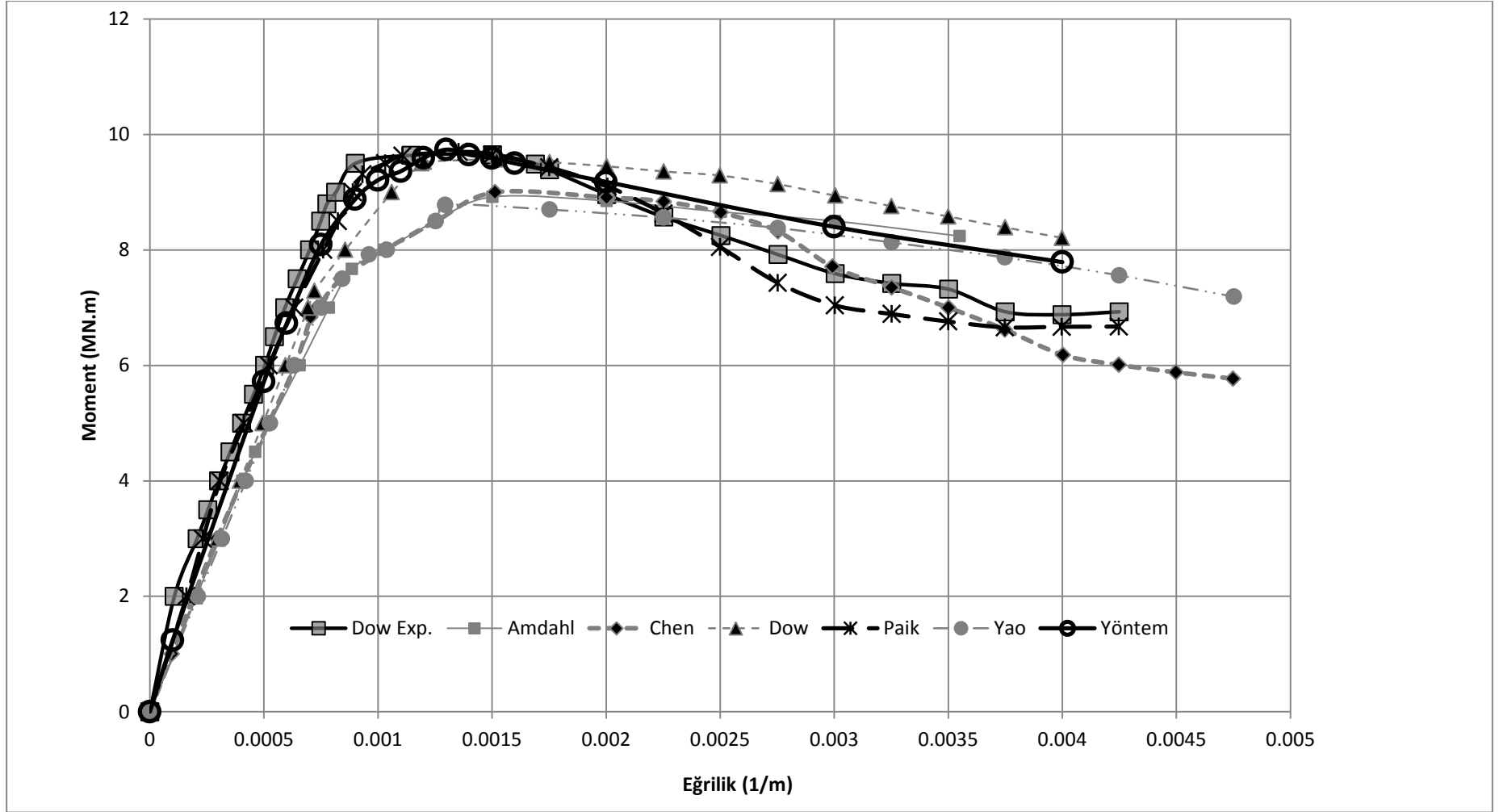
Şekil 7.6 : Sonuçlar.

7.1.4 Karşılaştırmalar

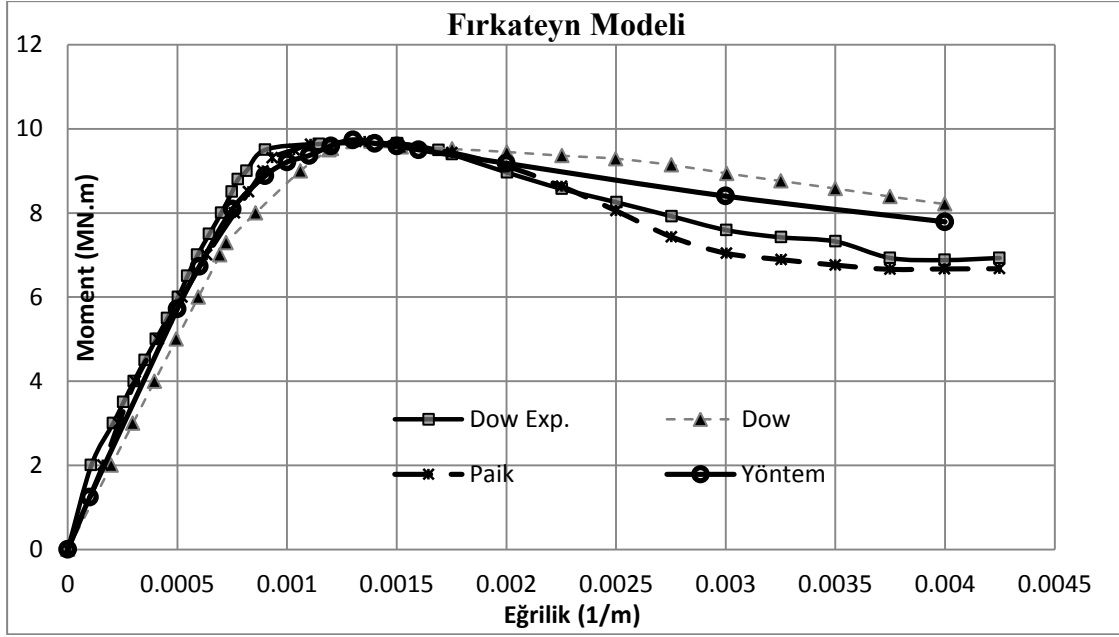
Şekil 7.7’de araştırmacıların aynı model için elde ettiği sonuçlar ve deneysel sonuçlar yer almaktadır [6,9,60].

Sonuçlar incelendiğinde kiriş yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar içerisinde deneysel verilere en yakın sonuç önerdiğimiz yöntemle gerçekleştirilmiştir. En başarılı hesaplamaların yapıldığı Paik tarafından gerçekleşen ISUM’a ait verilerle karşılaştırıldığında önerdiğimiz yöntemde en üst mukavemet değerine ulaşmaya kadar ISUM sonuçlarıyla paralel olarak hareket etmektedir. En üst mukavemet değerinin aşılması sonrası plastik şekil değiştirmelerin ilerlemesiyle birlikte sonuçlar ayrışmaya başlamaktadır. Diğer tüm yöntemlere göre kıyaslama yapıldığında nihai mukavemet öncesi ve sonrası deneysel sonuçlara en yaklaşık sonuçları veren yöntem geometrik eğrilik yöntemi olmaktadır. Şekil 7.8’de deneysel çalışmalara en yakın üç çalışma yer almaktadır.

Deneysel çalışma sonucunda 9,64 MN.m değeri nihai moment olarak ölçülürken [6], lineer olmayan sonlu elemanlar analizinde 10,62 MN.m, ISUM’dan 9,83 MN.m, ISFEM’den 9,94 MN.m, klasik kiriş yönteminden 5,59 MN.m değerleri elde edilmektedir [1]. Önerilen yöntemde elde edilen 9,74 MN.m değeri deneysel sonuçlara oldukça yakın çıkmaktadır.



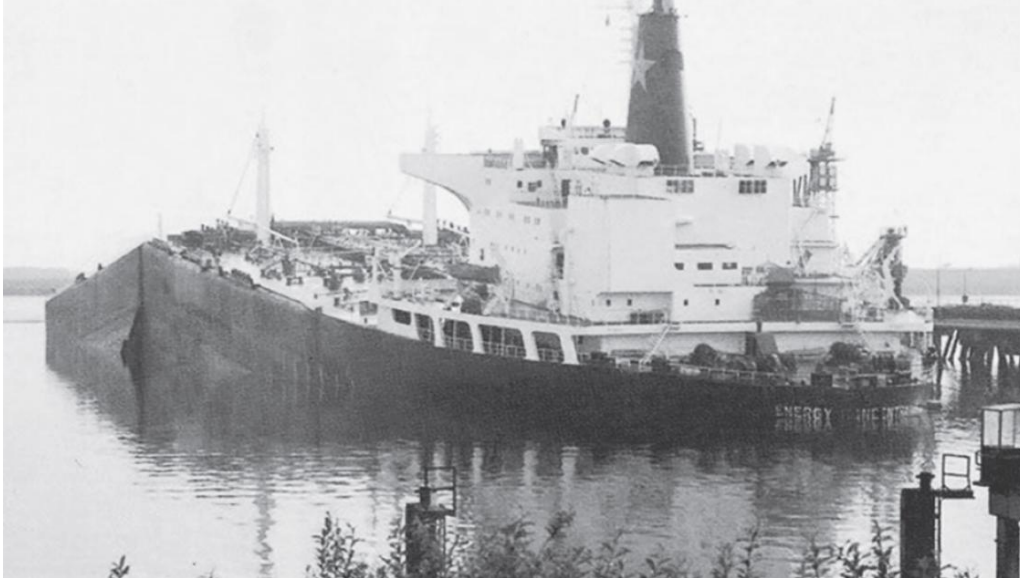
Şekil 7.7 : Karşılaştırmalı sonuçlar.



Şekil 7.8 : Seçilmiş sonuçlar.

7.2 “Energy Concentration” Büyük Tonajlı Ham Petrol Tankeri Analizi

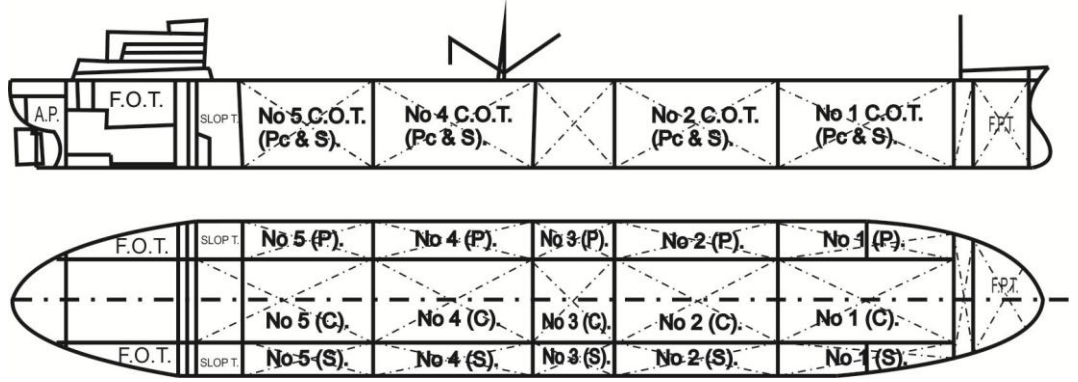
Sayısal hesaplaması yapılacak olan yüksek tonajlı ham petrol tankeri 1980 yılında yüklediği ham petrolü güvenli bir şekilde limana getirmiş ve limana yanaştıktan sonra yük boşaltma esnasında kırılmıştır [1]. Gemiye ait fotoğraf Şekil 7.9’da yer almaktadır [1]. Gemi sarkma konumundayken kırılmıştır.



Şekil 7.9 : “Energy Concentration” göçme sonrası [1].

Şekil 7.10’da gemiye ait tank planları yer almaktadır [2]. Yapılan hesaplamalara göre göçme anında uygulanan kuvvet 17,94 MNm olmaktadır [2,55]. Bu gemi üzerine

birçok araştırmacı tarafından hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Önerilen yönteme göre hesaplama gerçekleştirilecek ve diğer sonuçlarla karşılaştırılması yapılacaktır.



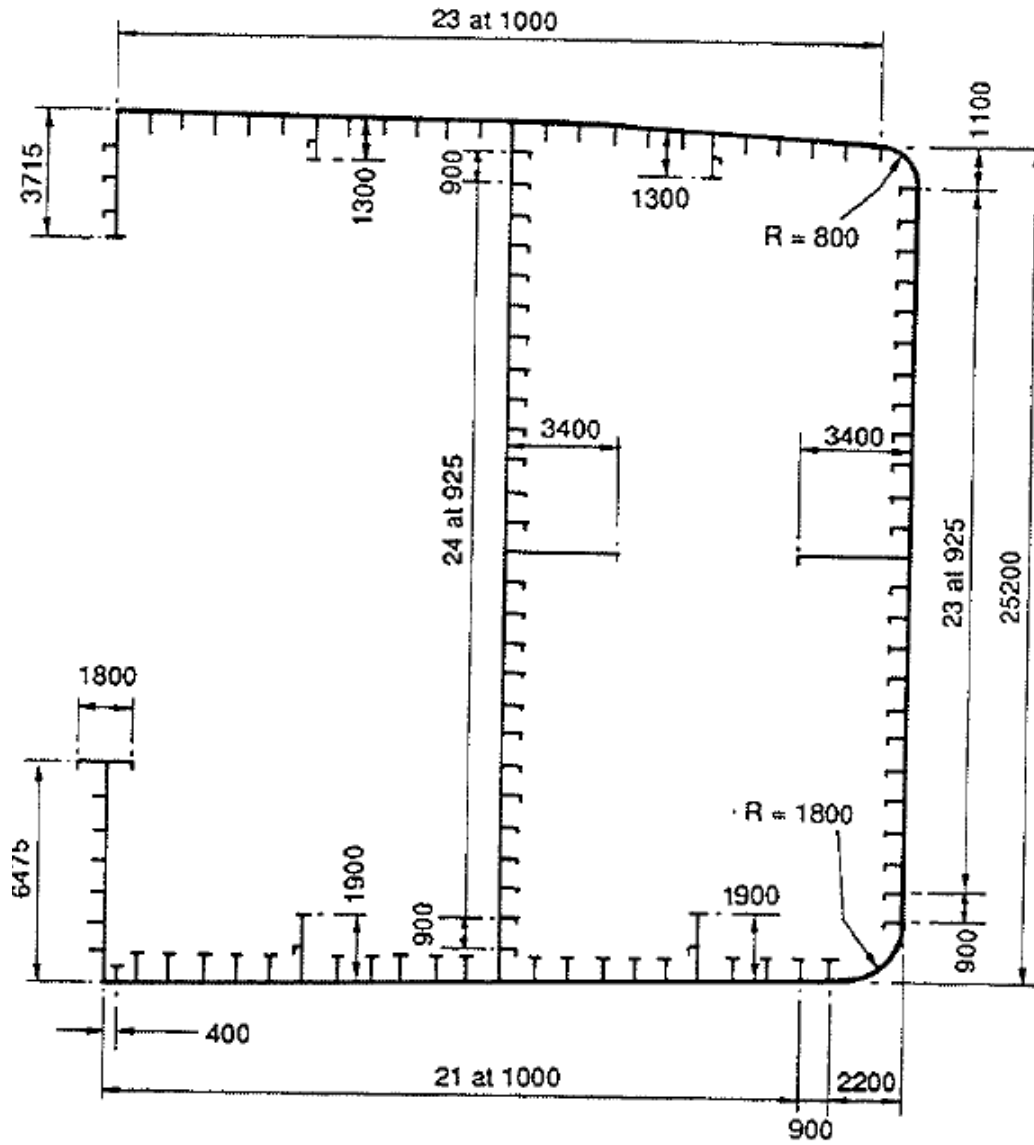
Şekil 7.10 : Tank planları [2].

7.2.1 Model

Şekil 7.11’de gemi enkesiti yer almaktadır [2]. Gemide iki tür malzeme kullanılmıştır, bunlar gemi inşaat çeliği ve yüksek mukavemetli çeliklerdir. Gemi sacı ve profillerin bir kısmı yüksek mukavemetli çelikten meydana gelmiştir. Profiller boyutlarına ve malzeme özelliklerine göre numaralandırılmıştır. Profilere ait özellikler ve numaraları Çizelge 7.2’de yer almaktadır.

Çizelge 7.2 : Profil özellikleri.

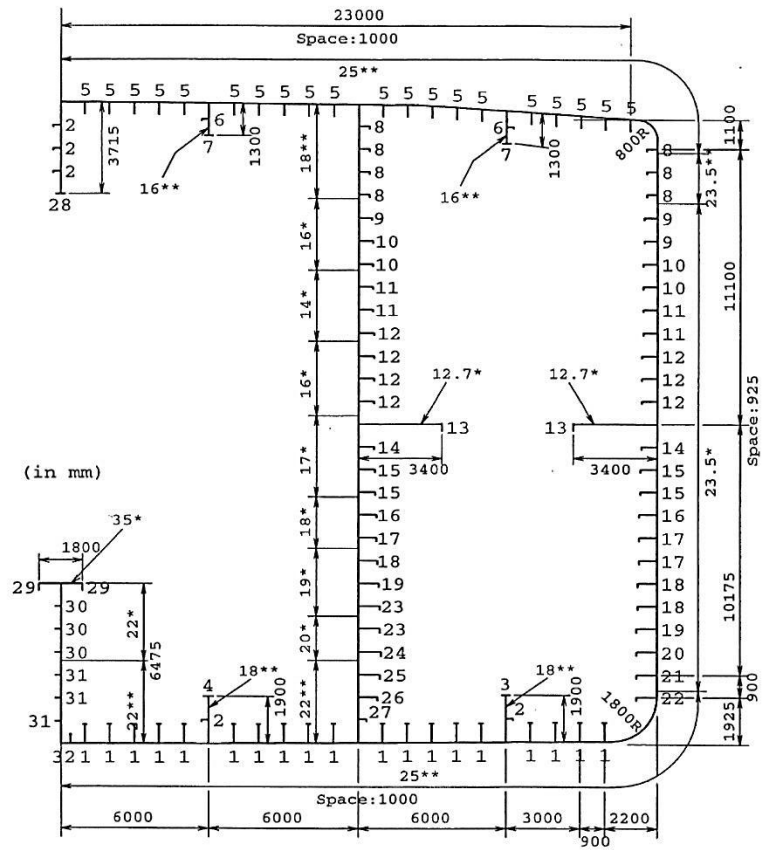
N	Gövde			AlınLaması			Çelik	No:	Gövde			Alın Laması			Çelik
1	797	x	15	200	x	33	YMÇ	17	747	x	12,7	180	x	25	GÇ
2	297	x	11,5	100	x	16	YMÇ	18	797	x	14	180	x	25	GÇ
3	370	x	16				YMÇ	19	847	x	14	180	x	25	GÇ
4	425	x	25				YMÇ	20	847	x	14	180	x	32	GÇ
5	480	x	32				YMÇ	21	847	x	15	180	x	25	YMÇ
6	297	x	11,5	100	x	16	YMÇ	22	847	x	15	180	x	32	YMÇ
7	370	x	16				YMÇ	23	897	x	15	200	x	25	GÇ
8	447	x	11,5	125	x	22	YMÇ	24	945	x	16	200	x	25	GÇ
9	549	x	11,5	125	x	22	GÇ	25	897	x	15	200	x	25	YMÇ
10	597	x	11,5	125	x	22	GÇ	26	797	x	15	180	x	25	YMÇ
11	597	x	11,5	125	x	25	GÇ	27	347	x	11,5	125	x	22	YMÇ
12	647	x	11,5	125	x	25	GÇ	28	397	x	25				YMÇ
13	350	x	25,4				GÇ	29	300	x	35				GÇ
14	647	x	12,7	150	x	25	GÇ	30	230	x	12,7				GÇ
15	697	x	12,7	150	x	25	GÇ	31	230	x	12,7				YMÇ
16	747	x	12,7	150	x	25	GÇ	32	397	x	11,5	100	x	25	YMÇ



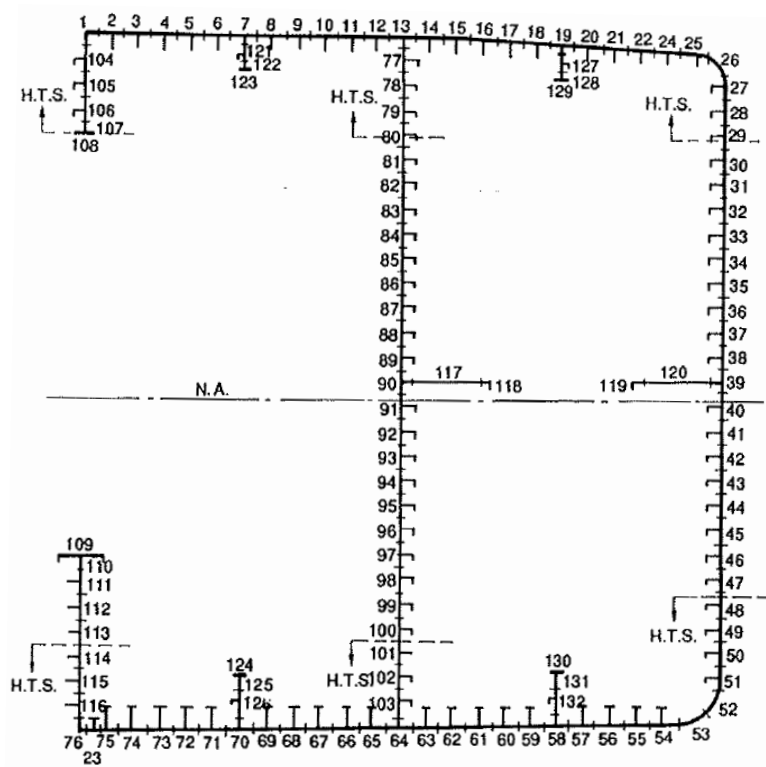
Şekil 7.11 : En kesit [2].

Şekil 7.12’de profillere ait numaraların kesit üzerinde gösterimi yer almaktadır [2]. Ayrıca aynı kesit üzerinde yüksek mukavemetli çelik (YMÇ) ve gemi inşaat çelikleri (GÇ) kalınlıklarıyla birlikte gösterilmektedir.

Hesaplama öncelikle kesit elemanlara ayrılacak ve her bir elemana ait P-du diyagramı oluşturulacaktır. Oluşturulan P-du diyagramı yardımıyla kademeli göçme analizi Smith yöntemine uygun olarak gerçekleştirilecektir. Şekil 7.13’te kesitin elemanlara ayrılmış gösterimi yer almaktadır [55]. Bazı elemanlar stifnerlenmiş plaklardan, bazı elemanlar ise plak veya köşe elemanlardan oluşmaktadır. Elemanların ayrıştırma işlemi Rutherford’un gerçekleştirdiği hesaba uygun olarak alınmıştır



Şekil 7.12 : Profil dağılımı [2].



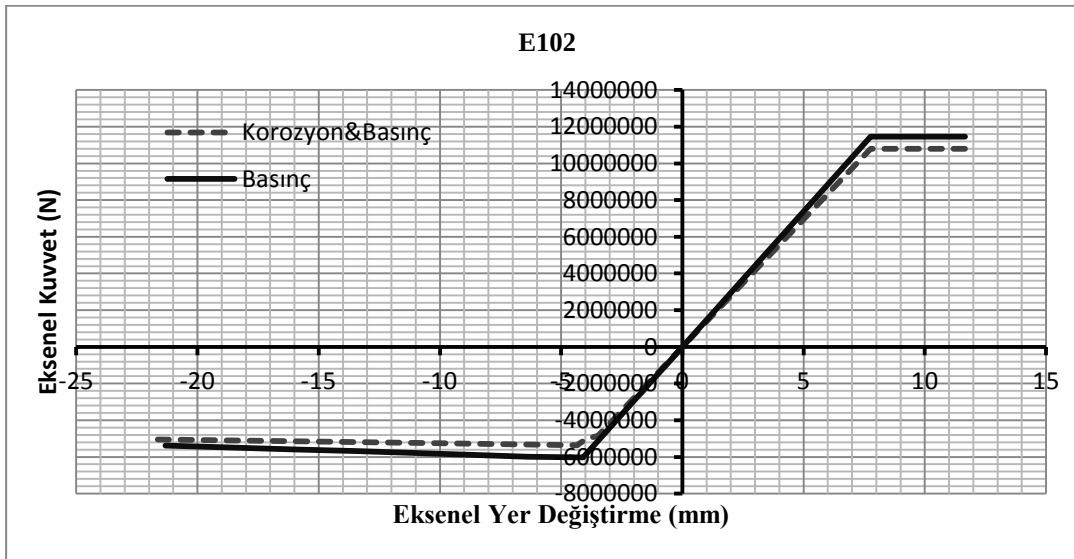
Şekil 7.13 : Eleman numaralandırması [2].

7.2.2 Sonuçlar

Şekil 7.13'te yer alan 132 adet elemana ait P-du diyagramları önerilen yöntemle hazırlanmış ve hesaplama tablosu oluşturularak Smith yönteminde tüm gemi kirişi için mukavemet hesabı gerçekleştirilmiştir. Elemanlara ait korozyon payları dikkate alınarak çözümler oluşturulmuştur [61]. Artık kaynak gerilmelerinin ise geminin yaşı nedeniyle etkisini yitirdiği kabul edilmiştir [62]. Elemanlara ait başlangıç sehim değeri 5,1 mm olarak alınmıştır [61]. Ayrıca teknenin draftının 12 m olması nedeniyle hesaplamalarda dip ve borda elemanlarına 0,12 N/m değerinde basınç etki edilmiştir. Elemanlara ait P-du diyagramları EK A'da yer almaktadır. En üst mukavemet değerine erişildiği duruma ilişkin hesap tablosu EK B'de yer almaktadır.

Gemi kesitinin sarkma konumunda erişebildiği en büyük moment değeri başlangıç sehimlerinin göz ardı edildiği durum için $19,06 \times 10^3$ MNm olarak bulunmuştur. Başlangıç sehimlerinin dikkate alınmasıyla gerçekleştirilen hesaplama neticesinde nihai mukavemet değeri $17,02 \times 10^3$ MNm olarak elde edilmiştir. Yapısal bozulmaların başlamasıyla dip yapıda akma ve burkulmalar meydana gelmiştir. Bozulmaların ilerlemesiyle nihai mukavemet değerine eriştiği anda güverte üzerinde de plastik şekil değiştirmeler başlamış olup akabinde yapı göçmektedir.

Şekil 7.14'te 102 numaralı elemana ait korozyonlu ve korozyonsuz durumlara ait P-du diyagramları gösterilmektedir. Gövde ve plak üzerinde 1 mm, alın laması üzerinde 2 mm olarak gerçekleşen korozyon nedeniyle eleman mukavemetini yitirmekte ve plak burkulmasına uğramaktadır.



Şekil 7.14 : E102 numaralı elemana ait P-du diyagramları.

7.2.3 Karşılaştırma

Karşılaştırmada çeşitli araştırmacıların geliştirdiği yöntemlere ait sonuçlar ve klas kademeli göçme analizi sonucu Çizelge 7.3'te yer almaktadır [6,55]. Karşılaştırma geminin nihai moment değerine göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.3 : Sonuçlar.

Astrup	18,84	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Chen	20,23	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Cho	20,09	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Dow	18,8	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Masoka	20,01	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Rigo(1)	18,46	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Rigo(2)	17,54	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Yao	19,04	$\times 10^3 \text{MN.m}$
ABS	18,22	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Yöntem (İdeal)	19,06	$\times 10^3 \text{MN.m}$
Yöntem (Başlangıç Sehimli)	17,02	$\times 10^3 \text{MN.m}$

Başlangıç sehimine bağlı olarak geminin kapasitesinde yaklaşık %12'lik bir azalma olmuştur. Hesaplanan değer göçme anında sahip olduğu $17,9 \times 10^3 \text{ MNm}$ moment değerinden düşük olmaktadır. Bunun başlıca sebepleri başlangıç sehimlerinin hassas olarak tüm elemanlarda bilinmemesi ve elemanlardaki korozyon değerlerinin tam bilinmemesidir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında gemilerin nihai mukavemetini hesaplamak amacıyla kademeli göçme analiz yöntemleri incelenmiştir. Hızlı ve etkin çözüme ulaşmak için gemi kesitini elemanlara ayırarak çözüm gerçekleştiren Smith yöntemi tercih edilmiştir. Smith yönteminde başarılı sonuçlar elde etmek üzere, eğriliğin geometrik olarak kullanılmasıyla kiriş elemanlar için yeni bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Yönteme ait sonuçlar deneysel ve sonlu elemanlardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve yöntemin başarısı gösterilmiştir.

Geliştirilen yöntemle kiriş elemanlara ait çözümler kullanarak Smith yönteminin uygulanmasına geçilmiştir. Öncelikle Smith yönteminde iyileştirme çalışmalarında bulunulmuş ve bu çalışmalar neticesinde kutu kirişlerde diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlara göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yöntem 1/3 ölçekli fırkateyn modelinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar deneysel ve diğer bilim insanlarının elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bir diğer sayısal çalışmada ise bilim insanları tarafından farklı yöntemlerle incelemesi yapılan büyük tonajlı ham petrol tankerine ait çalışma ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Sehim hesaplamalarında araştırmacılar Euler'in yolundan giderek eğriliği diferansiyel denklemlerle elde ederek çözümleme yapmışlardır. Yöntemde klasik yaklaşımdan uzaklaşmıştır. Eğriliğin geometrik tanımı kullanılarak farklı noktalara ait eğrilik değerleri şekil ve süreklilik şartlarını sağlayarak birleştirilmiştir. Tümüyle geometrik olarak yapılan bu modelleme için herhangi bir diferansiyel denklem çözümüne gerek duyulmadan hesaplamalar basit işlemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem sayesinde karmaşık şekillerdeki sehimlerin bile modellenmesi ve kiriş hesaplarında kullanımına olanak sağlanmıştır.

Aynı yöntemle başlangıç sehimleri de modellenmiştir. Bu sayede trigonometrik fonksiyonlara ihtiyaç kalmamış, karmaşık olsa bile gerçek sehim değerlerinin kullanımına olanak sağlanmıştır.

Burkulma durumu için ister çatallı ister çatalsız burkulma olsun yöntem çözüm sırasında ayrı bir kriter veya denkleme ihtiyaç duymamaktadır. Çatallı burkulmada kararsız dengenin elde edildiği değer kritik Euler burkulmasına denk olmaktadır.

Farklı mekanik özelliklerden oluşan stifnerlenmiş plaklara ait eğrilik hesaplamaları oluşturulmuş ve uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Smith yönteminde geliştirme çalışmalarında bulunulmuş ve sayısal hataların azaltılmıştır.

Eğriliğin geometrik olarak kullanılması sehim hesaplamalarında hassasiyetin yanı sıra işlem süresinde büyük avantajlar sağlamıştır. Elektronik tablolama programlarıyla hesap mümkün olmaktadır.

Başlangıç sehimlerinde modellemenin yapılabilmesi burkulmanın daha hassas hesabını mümkün kılmıştır. Bu sayede etkin genişlik hesabı için ampirik düzeltmelere ihtiyaç kalmamıştır.

Kademeli göçme analizi hızlı ve hassas olarak elde edilmiştir.

8.1 Öneriler

Nihai mukavemetin sonrasına ilişkin hesaplamalarda önerilen yöntem yerine rijit plastik analiz yöntemi kullanılmıştır. Rijit plastik analiz yerine geometrik eğrilik yönteminin kullanılması için yöntemin geliştirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca tek boyutlu kirişin eğriliklerle modellendiği gibi plakda iki boyutlu olarak eğrilikler cinsinden modellenerek kullanılmalıdır. Bu modellemenin gerçekleştirilmesi etkin genişlik tanımı yerine doğrudan hesaplama sayesinde daha hassas olarak yapılacaktır.

Smith yönteminde olduğu gibi bir gemi bloğuna sabit eğrilik değerinin uygulanması yerine tüm gemi boyunca değişken eğrilik değerlerinin kullanıldığı yöntem oluşturulmalıdır. Bu sayede kademeli göçme analizi tüm gemiyi kapsayacak şekilde gerçekleşecektir.

Hesaplamalarda elemanların burulması, çarpılması ihmal edilmiştir. Burulma ve çarpılmaların dikkate alındığı yöntem geliştirmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Huges, O., Paik, J. K.**, 2010. *Ship Structural Analysis and Design*. SNAME, New Jersey.
- [2] **Rutherford, S.E. and Caldwell, J.B.**, 1990. Ultimate Longitudinal Strength of Ships: A Case Study. *SNAME Transactions*. **98**, 441-471.
- [3] **Yao, T.**, 2003. Hull girder strength. *Marine Structures*. **16**, 1-13.
- [4] **Caldwell, J.B.**, 1965. Ultimate Longitudinal Strength. *Trans Rina*. **107**, 441-430.
- [5] **Smith, C.S.**, 1977. Influence of Local Compressive Failure on Ultimate Logitudinal Strength of a Ship's Hull. *PRADS-International Symposium on Practical Design in Ship Building*. Tokyo, Japan, 73-79.
- [6] **Yao, T., Astrup, O.C., Caridis, P., Chen, Y.N., Cho, S.R., Dow, R.S., Niho, O., Rigo, P.**, 2000. Special Task Committee VI.2: Ultimate Hull girder Strength. *14 th International Ship and Offshore Structures Congress*. Nagasaki, 2, 321-391.
- [7] **Ueda, Y.**, 1984. The Idealized Structural Unit Method and Its Application to Deep Girder Structures. *Computers & Structures*. **18**:2, 277-293.
- [8] **Kaminski, M.L., Amdahl, J., Fasano E., Frieze, P.A., Gordo, J.M., Grundy, P., Hess, P.E., Kawamoto, Y., Kujala, P., Paik, J.K., Röhr, U., Simonsen, B.C.**, 2000. Technical Committee III.1: Ultimate Strength. *14 th International Ship and Offshore Structures Congress*. Nagasaki, 1.
- [9] **Hansen, A.M.**, 1995. Reliability methods for the longitudinal Strength of Ships . *PhD Thesis*, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, DTU.
- [10] **Chen, W.F., Atsuta, T.**, 1976. *Theory of beam-columns*. Mc Graw-Hill, New York.
- [11] **İnan, M.**, 1996. *Cisimlerin Mukavemeti*. ITU Vakfı, İstanbul.
- [12] **Paik, J.K., Thayamballi, A.K.**, 2003. *Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures*. John Wiley & Sons, San Ramon.
- [13] **Çakıroğlu, A., Özer, E.**, 1980. *Malzeme ve geometri değişimi bakımından lineer olmayan sistemler*. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [14] **Timoshenko, S.**, 1948. *Strength Of Materials*. 2. Lancaster Press, New York.
- [15] **Chen, Y.**, 2003. Ultimate Strength Analysis of Stiffened Panels using a beam-column Method. *PhD Thesis*, Aerospace Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [16] **Kurrer, K.**, 2008. *The History of the Theory of Structures*. Ernst&Sohn, Berlin.

- [17] **Timoshenko, S.P.**, 1953. *History of Strength of Materials*. Mc Graw Hill, New York.
- [18] **Levien, R.**, 2008. The Euler spiral: a mathematical history. *Report of EECS Department of University of California, Berkeley*, UCB/ECS-2008-111.
- [19] **Euler, L.**, 1774. *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes*. apud Marcum-Michaelem Bousquet & socios, (in Latin).
- [20] **Charlton, T.M.**, 1982. *A history of the theory of structures in the nineteenth century*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [21] **von Karman, T.**, 1910. Untersuchungen über Knickfestigkeit. *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*. **81**.
- [22] **Lu, L.W., Kamalvand, H.**, 1968. Ultimate Strength of Laterally Loaded Columns. *Journal of the Structural Division*. **94**:6, 1505-1523.
- [23] **Cheong Siat Moy, F.**, 1974. A method of Analysis of Laterally Loaded Columns. *Journal of the Structural Division*. **100**:5, 953-970.
- [24] **Cheong siat Moy, F.**, 1974. General Analysis of Laterally Loaded Beam Columns. *Journal of the Structural Division*. **100**:6, 1263-1278.
- [25] **Cheong Siat Moy, F.**, 1975. Plastic Analysis of of Restrained Sway-Columns. *Journal of the Structural Division*. **101**:9, 2010-2013.
- [26] **Young, B.W.**, 1972 The Analysis of Column Buckling Behavior. *Proceeding International colloquium on Column Strength*, Paris. November 136-151.
- [27] **Newmark, N.M.**, 1943. Numerical Procedure for Computing Deflections, Moments and Buckling Loads. *ASCE Transactions*. **108**, 1161-1234.
- [28] **Chen, W.F., Lui, E.M.**, 1987. *Structural Stability Theory and Implementation*. Elsevier, New York.
- [29] **Turner, J., Clough, R.W., Martin, H.C., Topp, L.J.**, 1956. Stiffness and Deflection of Complex Structures. *Journal of Aeronautical Science.*, **23**, 803-823.
- [30] **MacNeal, J.**, 1994. *Finite Elements: Their Design and Performance*. Marcel Dekker, New York.
- [31] **Kurtay, T., Kocabaş, H.**, 1997. Geometrik Modelleme Teknikleri ve Yazılım Paketlerine Yansıması. *I. Makina Müh. Kongresi*, İstanbul .
- [32] **Meek, D.S.**, 2002. Coaxing A Planar Curve To Comply. *Journal Of Computational And Applied Mathematics*. **140**:1, 599-618.
- [33] **Levien, R.**, 2009. From Spiral to Spline: Optimal Techniques in Interactive Curve Design. *PhD Thesis*, EECS Department, University of California.
- [34] **Bolton, K.**, 1975. Biarc curves. *Computer-Aided Design*. **7**:2, 89-92.
- [35] **Held, M., Eibl, J.**, 2005. Biarc approximation of polygons within asymmetric tolerance bands. *Computer-Aided Design*. **37**, 357-371.

- [36] **Salomon, D.**, 2006. *Curves And Surfaces For Computer Graphics*. Springer, New York.
- [37] **Barsky, B. A., Deroose, T. D.**, 1989. Geometric continuity of parametric curves: three equivalent characterizations. *IEEE Computer Graphics & Applications*. **9**:6 ,60-99.
- [38] **ANSYS**, 2006. *User's Manual (Version 10.0)*. Swanson Analysis Systems Inc, Houston.
- [39] **Hoff, N.J.**, 1956. *The analysis of structures based on the minimal principles and the principle of virtual displacements*. John Wiley & Sons, New York.
- [40] **Bazant, Z.P. ve Cedolin, L.**, 1991. *Stability of Structures Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories*. Oxford University Press, New York.
- [41] **Timoshenko, S.**, 1947. *Strength Of Material-Part II*. 2. Lancaster Press, New York.
- [42] **Timoshenko, S.P., Gere, J.M.**, 1985. *Theory of Elastic Stability*. 2. Mc Graw Hill, London.
- [43] **von Karman, T., Sechler, E.E., Donnell, L.H.**, 1932. Strength of Thin Plates in Compression. *ASME Trans*. **54**:5, 53-57.
- [44] **Paik, J.K., Andrieu, C., Cojeen, H.P.**, 2007. Mechanical Collapse Testing on aluminum stiffened Plate Structures for Marine Applications.. *10th Pratical Design of Ships and Other Floating Structures*, Texas.
- [45] **Murray, N.W.**, 1984. *Introduction to the Theory of Thin-Walled Structures*. Clarendon Press, Oxford.
- [46] **Faulkner, D.**, 1975. A review of effective plating for use in the analysis of stiffened plating in bending and compression. *Journal of Ship Research*. **19**:1, 1-17.
- [47] **Winter, G.**, 1947. Strength of thin steel compression flanges, *ASCE Transactions*. **112**, 527-576.
- [48] **Chen, W.F.**, 1999. *Structural Engineering Handbook- Basic Theory of Plates, Elastic Stability*, CRC Press LLC.
- [49] **Hu, S.Z.**, 1993. A Finite Element Assessment of the Buckling Strength Equations of Stiffened Plates, *Ship Structures Symposium*, Virginia.
- [50] **Chen, Q.**, 1996. Strength and Stability testing of Stiffened plate components . s.l. : *Report Ship Structure Committee SSC339*.
- [51] **Grondin, G.Y., Chen, Q., Elwi, A.E., Cjeng, J.J.**, 1998. Stiffened Steel Plates Under Compression and Bending. *J. Construct. Steel Res*. **45**:2, 125-148.
- [52] **Nielsen, L.P.**, 1998. Structural Capacity of the Hull Girder. *PhD Thesis*: Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, DTU.
- [53] **Yao, T., Fujikubo, M. ve Khedmati, M.R.**, 2000. Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull Girder under Longitudinal Bending considering Local Pressure Loads. *Society of Naval Architectures of Japan*. **188**, 507-515.

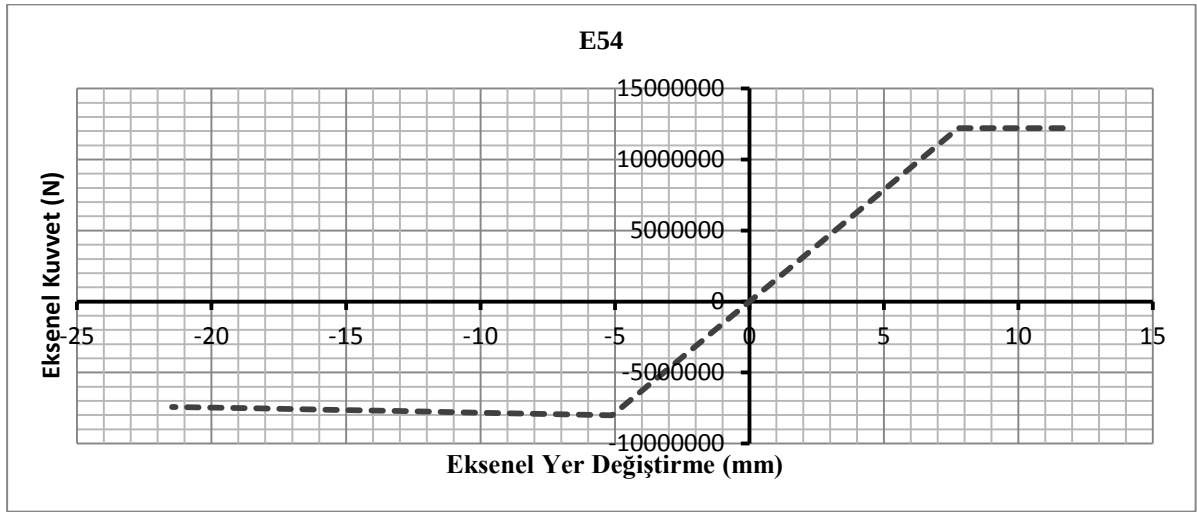
- [54] **Yao, T., Nikolov, P.I.**, 1991. Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull under Longitudinal Bending. *Society of Naval Architectures of Japan*. **170**, 449-461.
- [55] **Sun, H., Wang, X.**, 2005. Buckling and Ultimate Strength Assessment of FPSO. *Trans. SNAME*, **113**, 634-660.
- [56] **Kuo, H.C., Chang, J.R.**, 2003. A simplified Approach to Estimate The Ultimate Longitudinal Stength of Ship Hull. *Journal of Marine Science and Technology*. **11:3**, 130-148.
- [57] **Nishihara, S.**, 1984. Ultimate longitudinal strength of mid-ship cross sections. *Naval Architecture and Ocean Engineering*. **22**.
- [58] **Nishihara, S.**, 1983. Analysis of ultimate strength of stiffened rectangular plate (4th Report)- on the ultimate bending moment of ship hull girder. *JSNA of Japan*. **154**.
- [59] **Dow, R.S.**, 1991. Testing and analysis of a 1/3 Scale Welded Steel Frigate Model. *Proc. Int. Conf. on Advances in Marine Structures*. ARE, 749-773.
- [60] **Jensen, J. et al.**, 1994. Report of Committee III.1-Ductile Collapse . *Proc 12th International Ship and Offshore Structures Congress*. **1**, 229-387.
- [61] **Yao, T., Fujikubo, M., Khedmati, M.R.**, 2000. Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull Girder under Longitudinal Bending considering Local Pressure Loads. *the Autumn meeting of The Society of Naval Architects of Japan*.
- [62] **Gordo, J.M., Soares, C.G., Faulkner, D.**, 1996. Approximate Assessment of the Ultimate Longitudinal Strength of the Hull Girder. *Journal of Ship Research*. **40:1**, 60-69.

EKLER

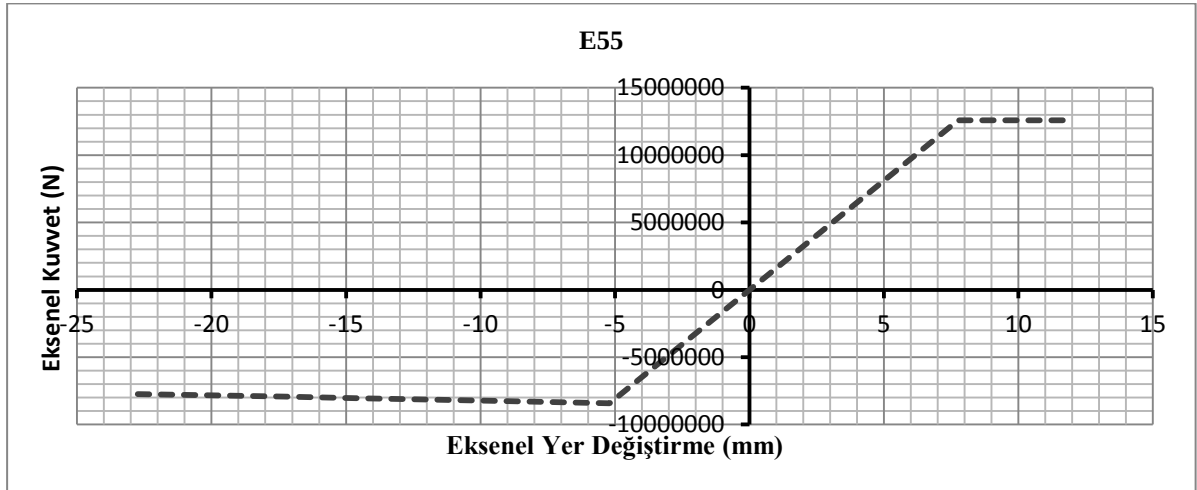
EK A: P-du Diyagramları

EK B: Hesap Tablosu

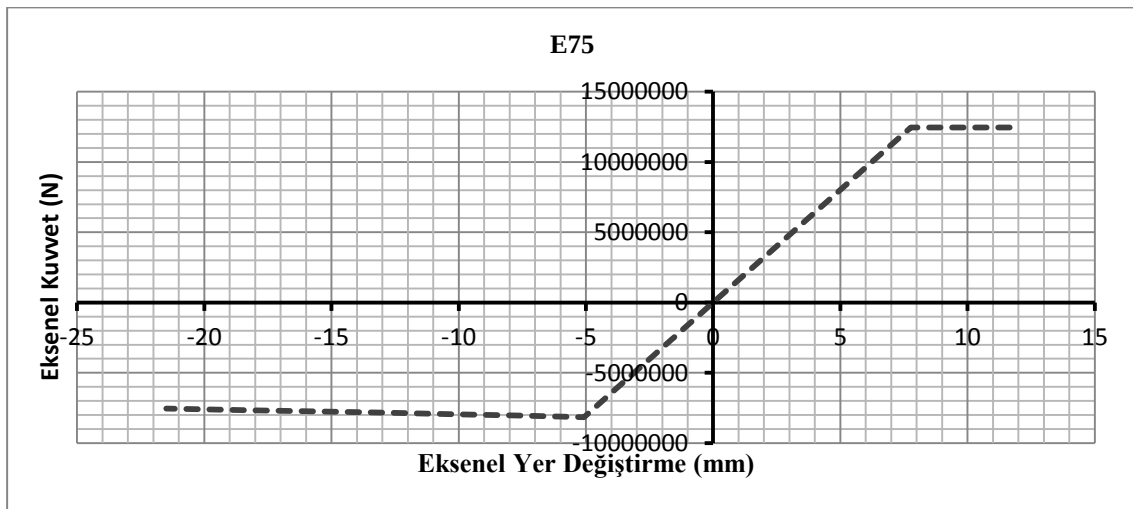
EK A



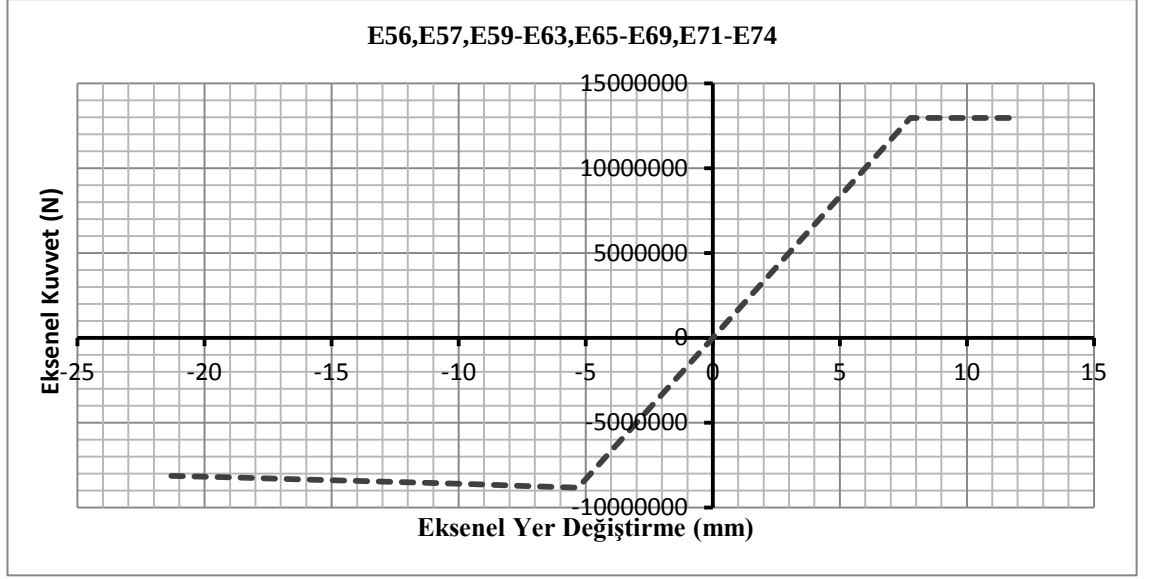
Şekil A.1 : E54 P-du diyagramı.



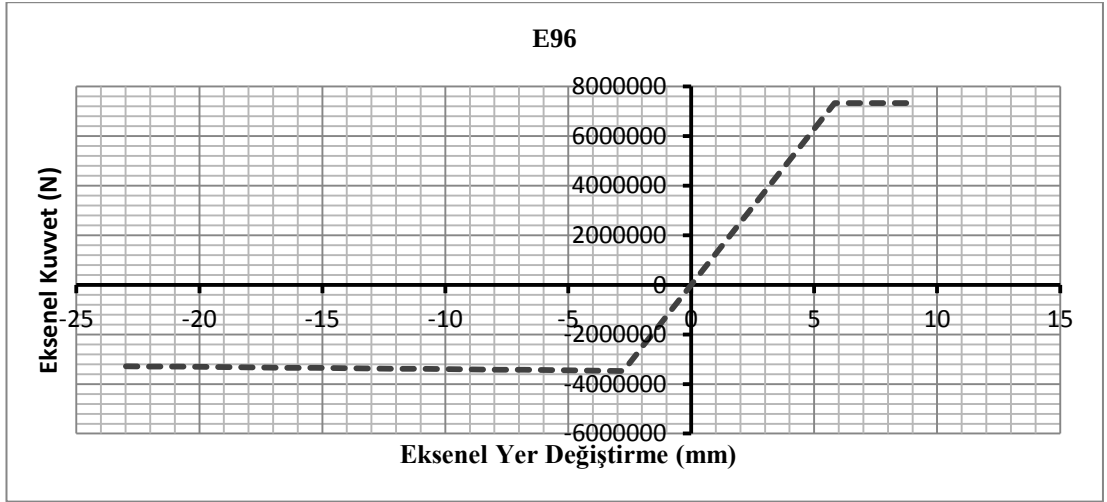
Şekil A.2 : E 55 P-du diyagramı.



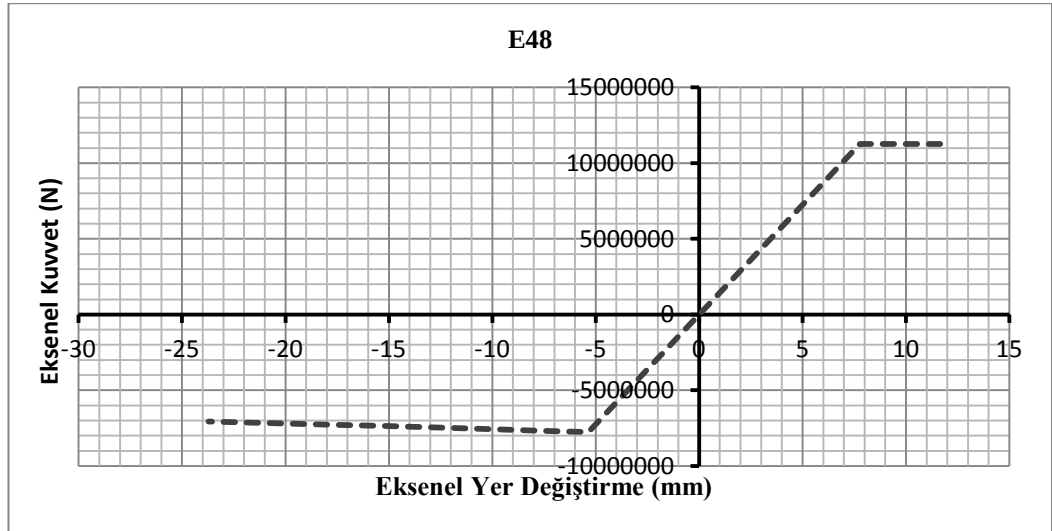
Şekil A.3 : E 75 P-du diyagramı.



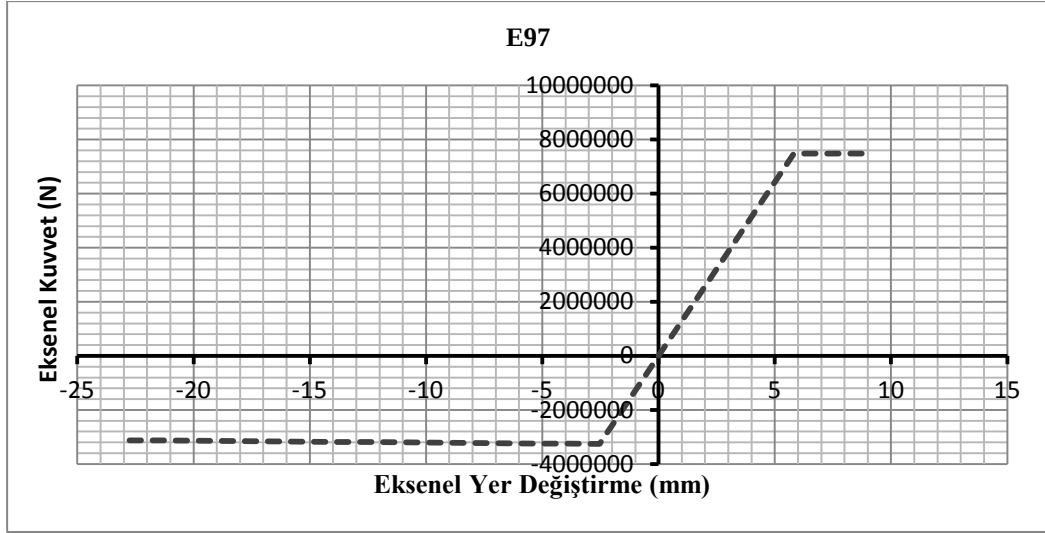
Şekil A.4 : E 76,E57,E59-E63,E65-E69,E71-E74 P-du diyagramı.



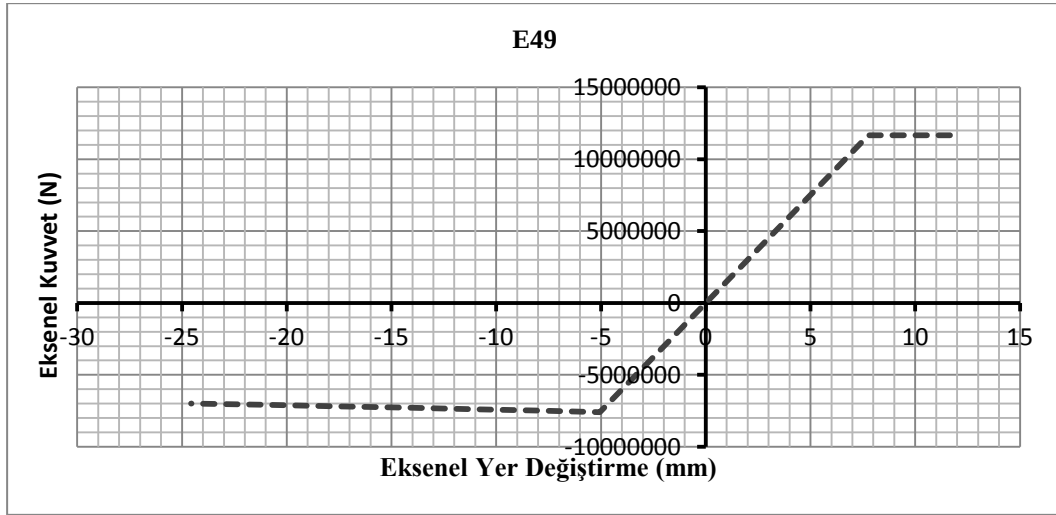
Şekil A.5 : E96 P-du diyagramı.



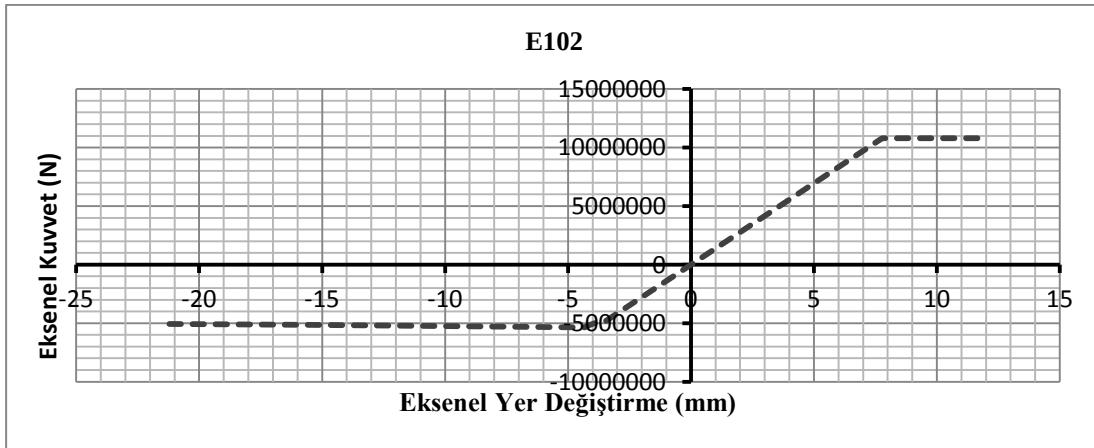
Şekil A.6 : E48 P-du diyagramı.



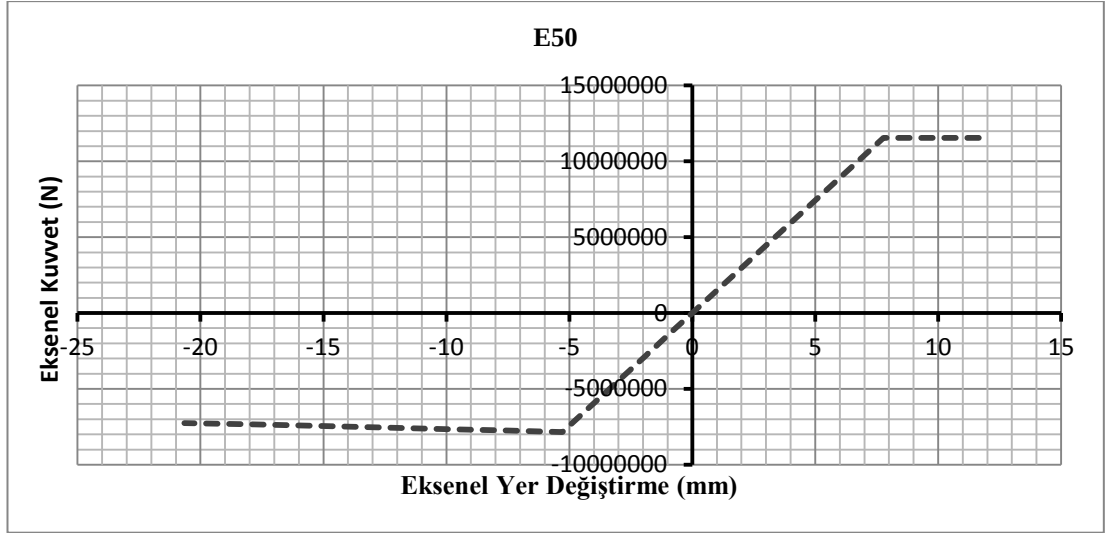
Şekil A.7 : E97 P-du diyagramı.



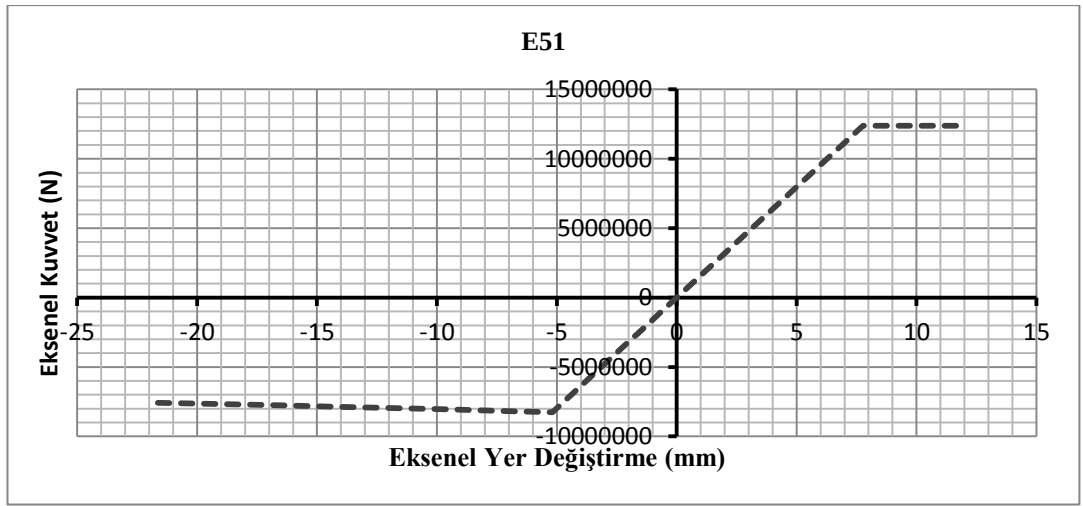
Şekil A.8 : E49 P-du diyagramı.



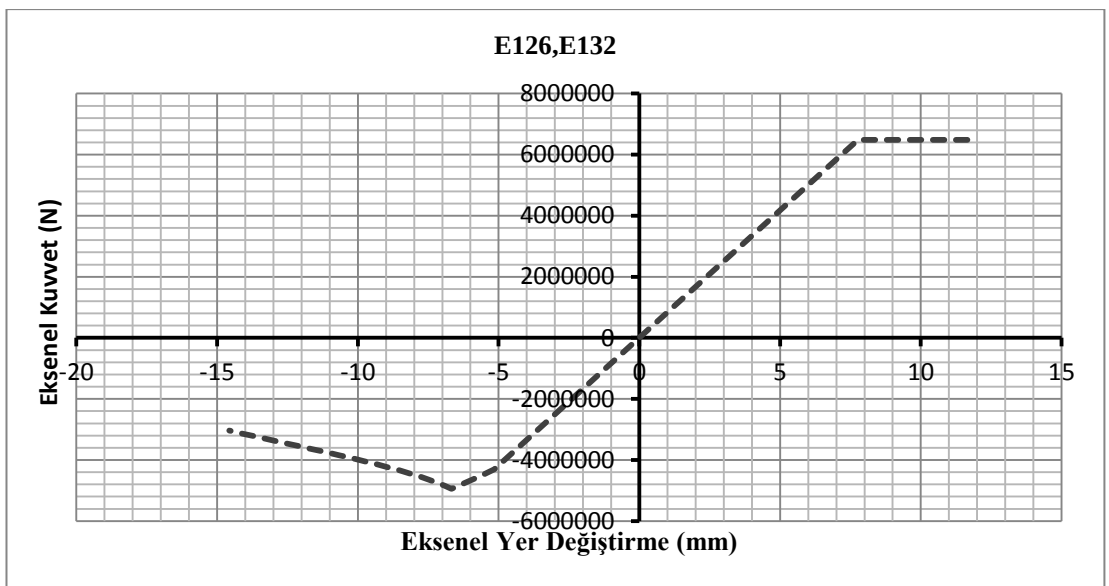
Şekil A.9 : E102 P-du diyagramı.



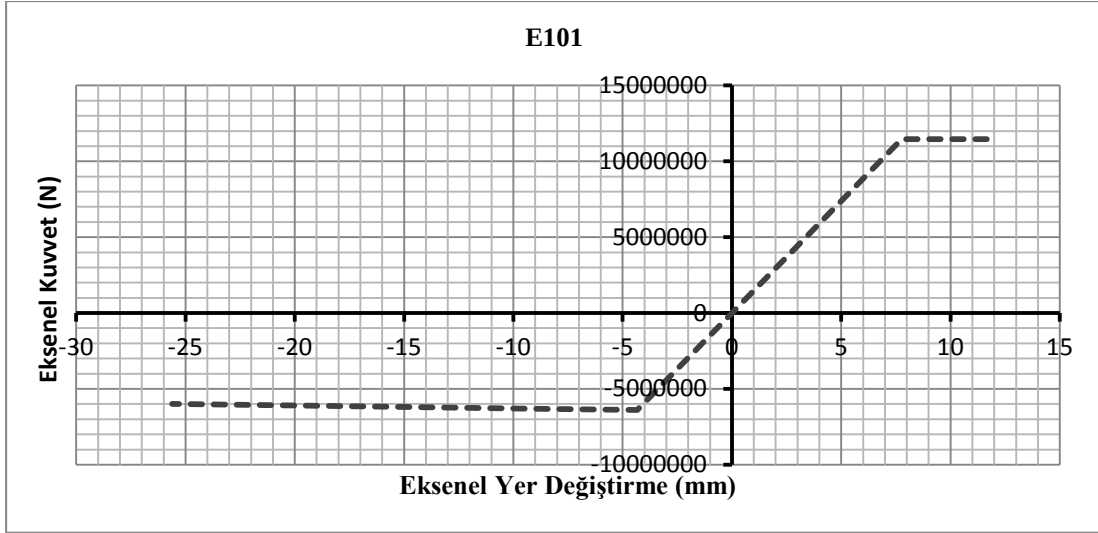
Şekil A.10 : E50 P-du diyagramı.



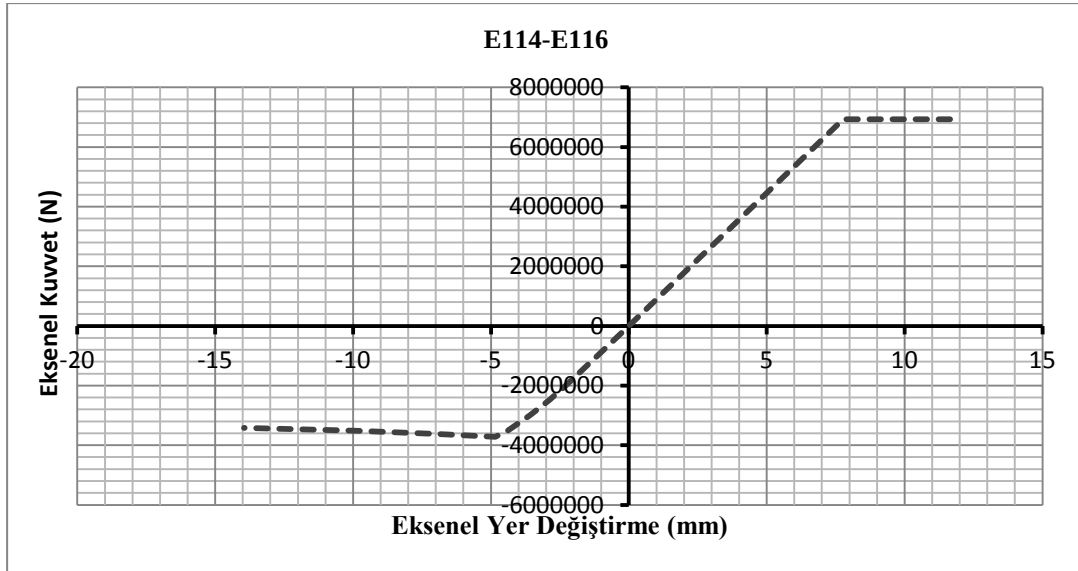
Şekil A.11 : E51 P-du diyagramı.



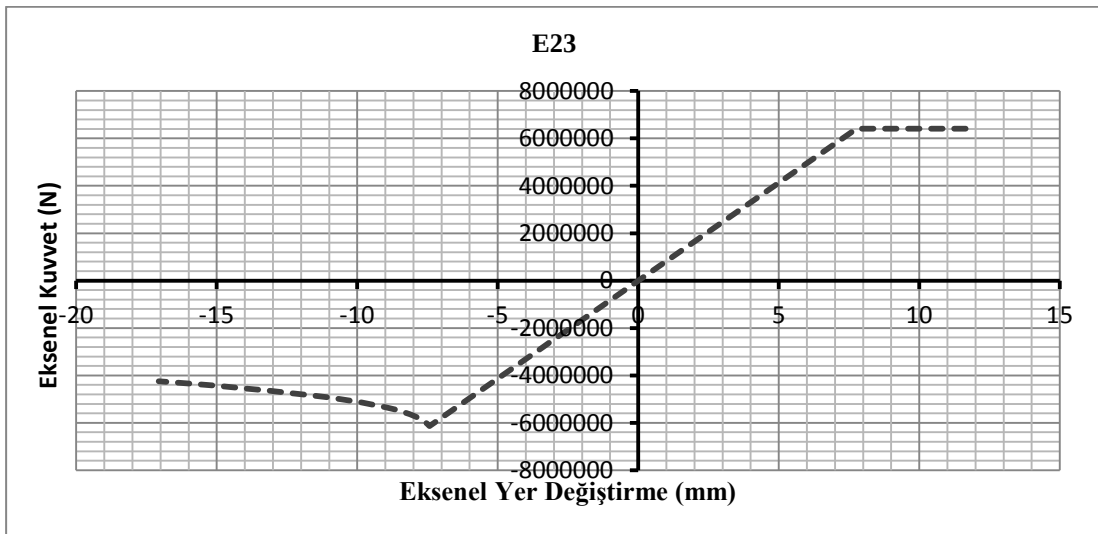
Şekil A.12 : E126,E132 P-du diyagramı.



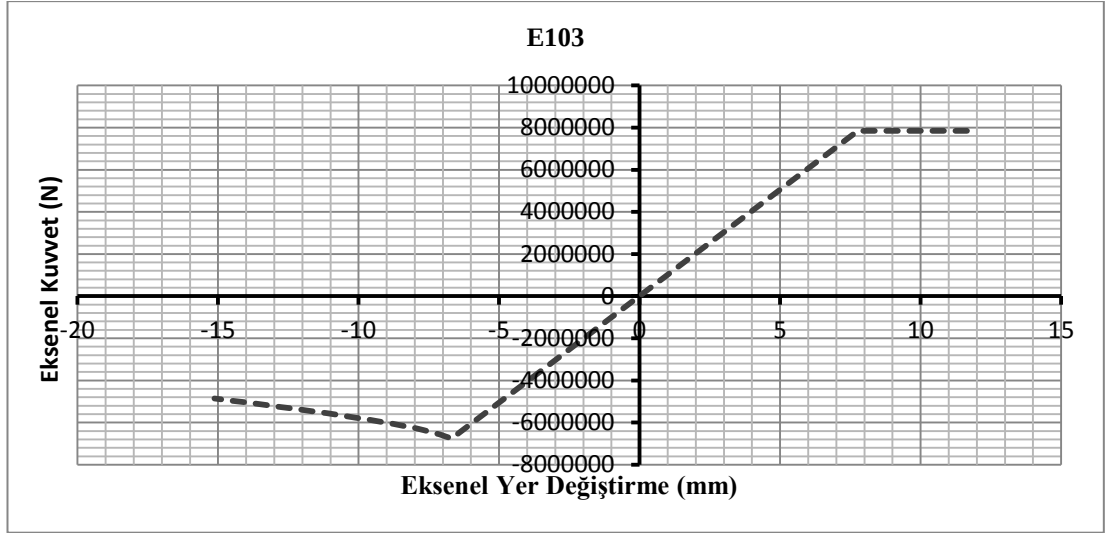
Şekil A.13 : E101 P-du diyagramı.



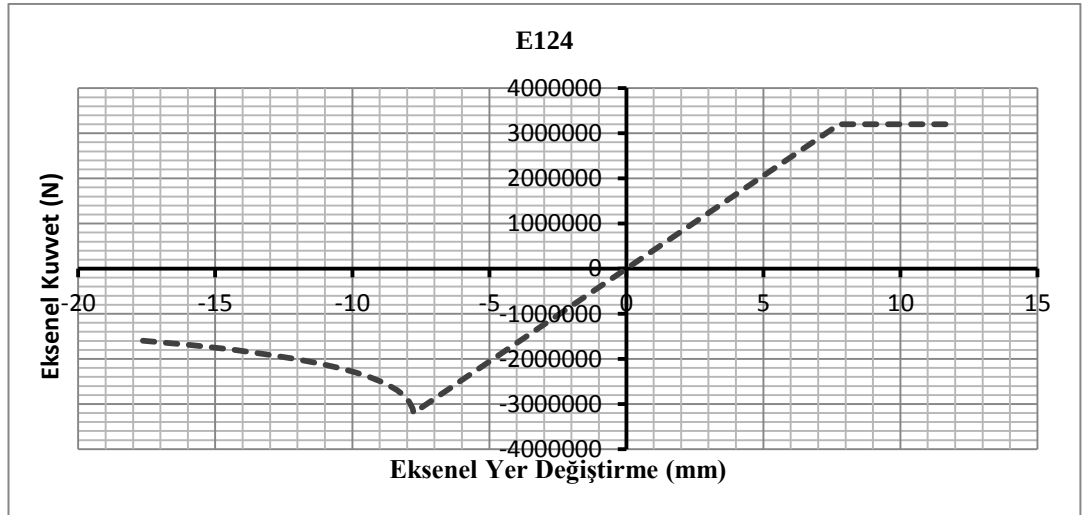
Şekil A.14 : E114-E116 P-du diyagramı.



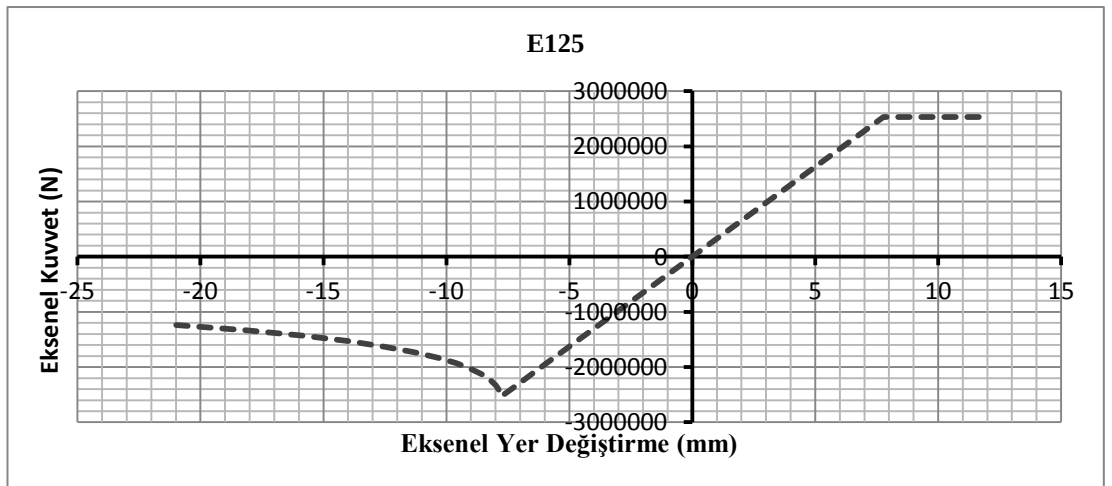
Şekil A.15 : E23 P-du diyagramı.



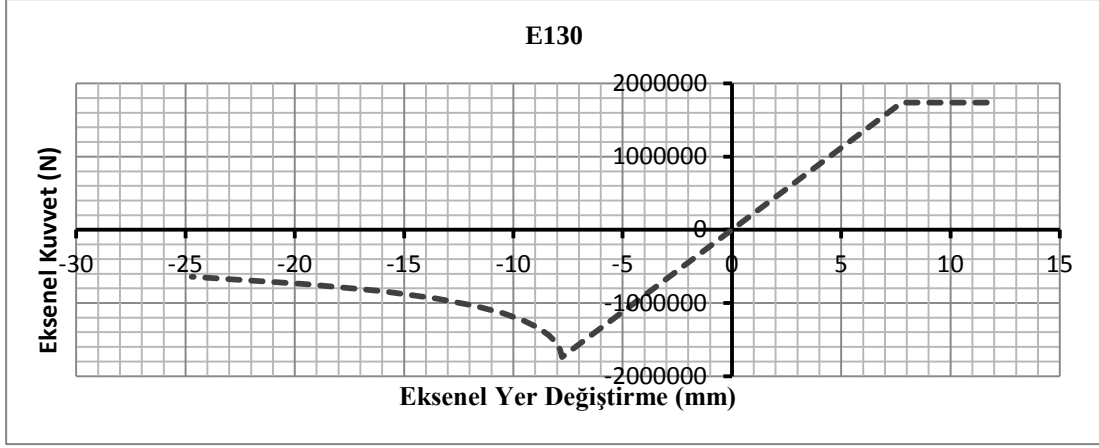
Şekil A.16 : E103 P-du diyagramı.



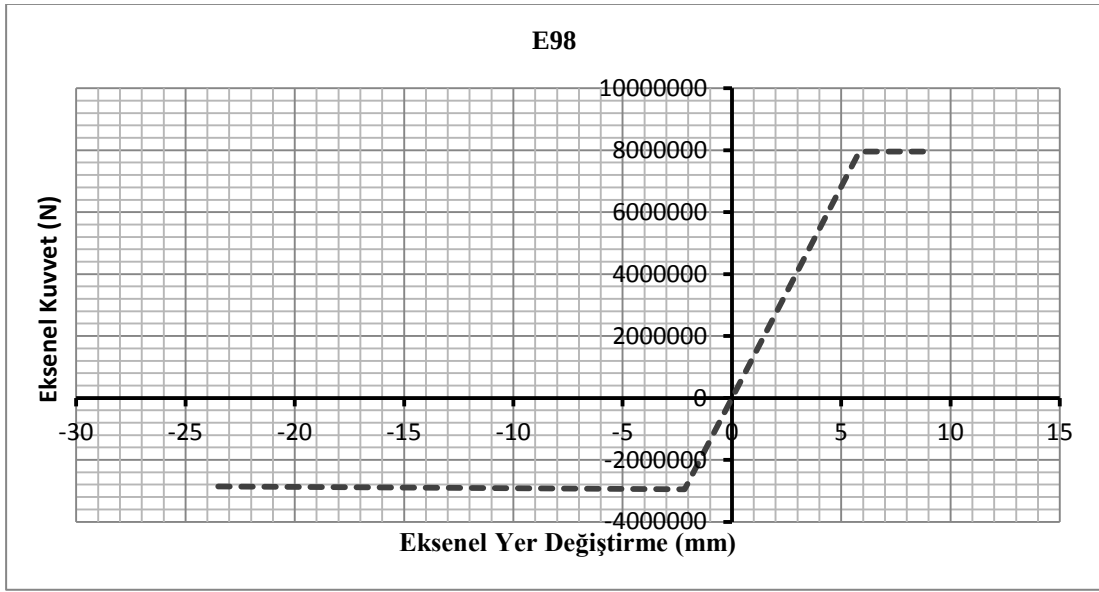
Şekil A.17 : E124 P-du diyagramı.



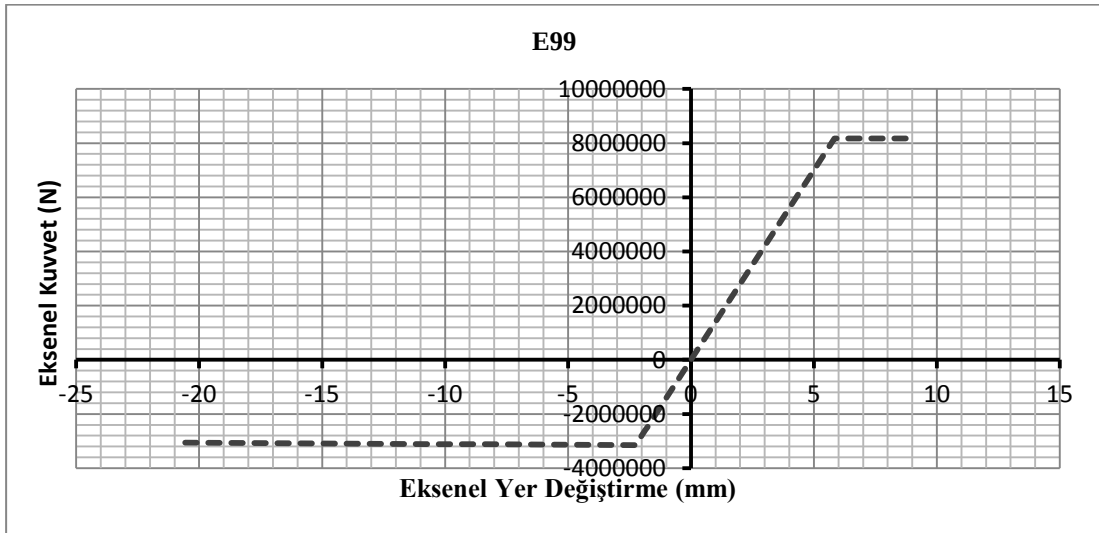
Şekil A.18 : E125 P-du diyagramı.



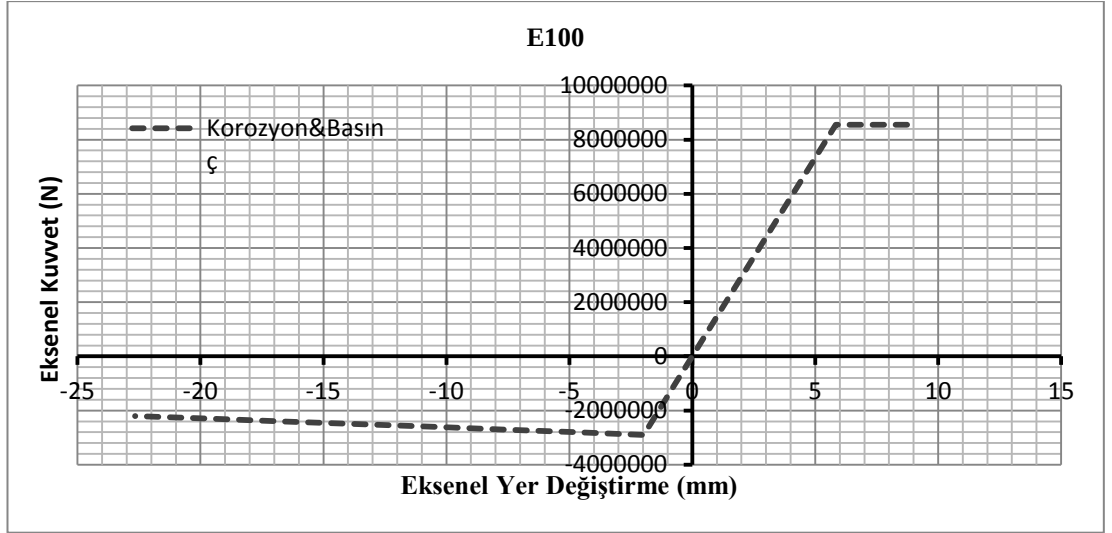
Şekil A.19 : E130 P-du diyagramı.



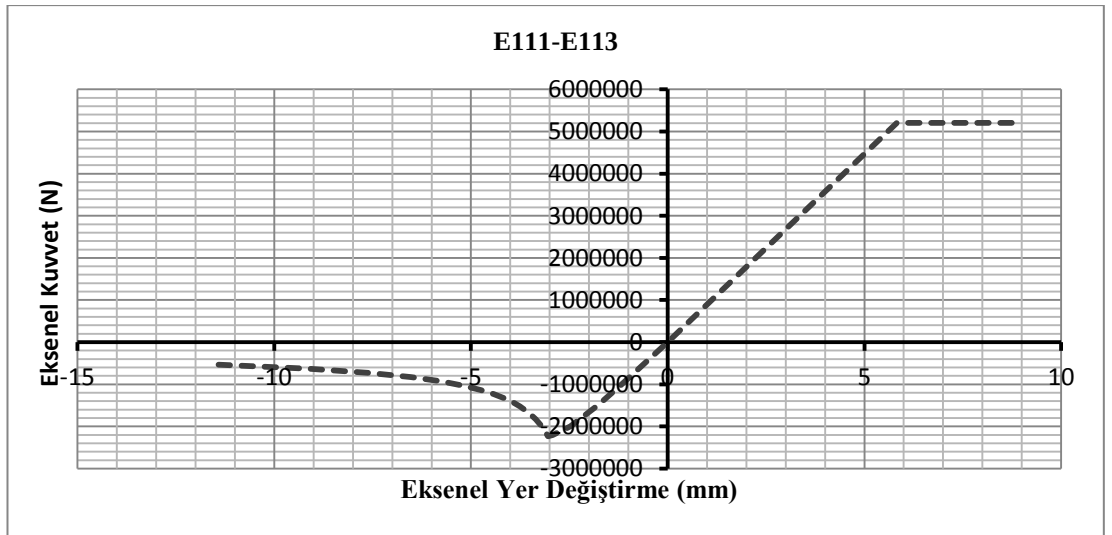
Şekil A.20 : E98 P-du diyagramı.



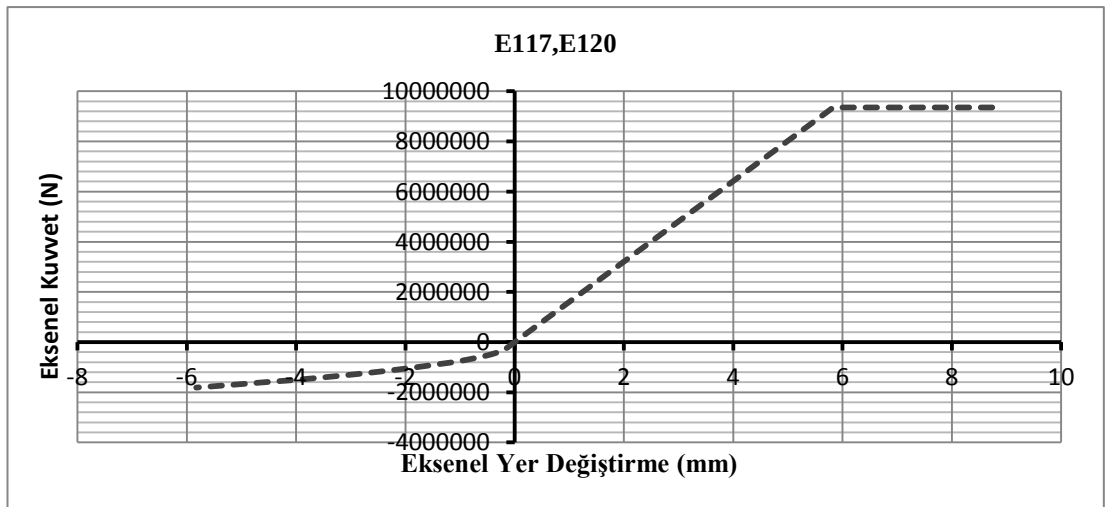
Şekil A.21 : E99 P-du diyagramı.



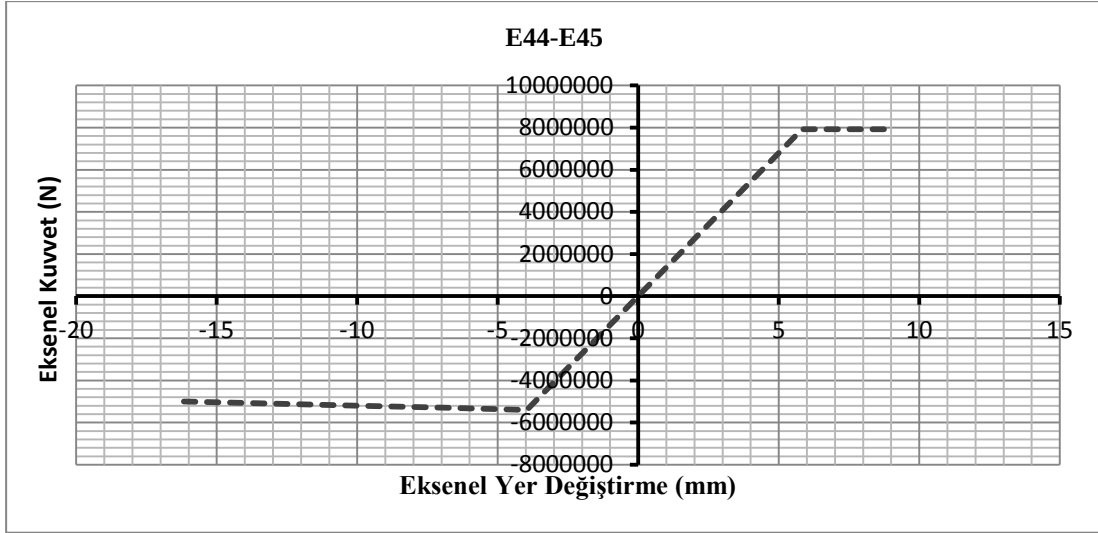
Şekil A.22 : E100 P-du diyagramı.



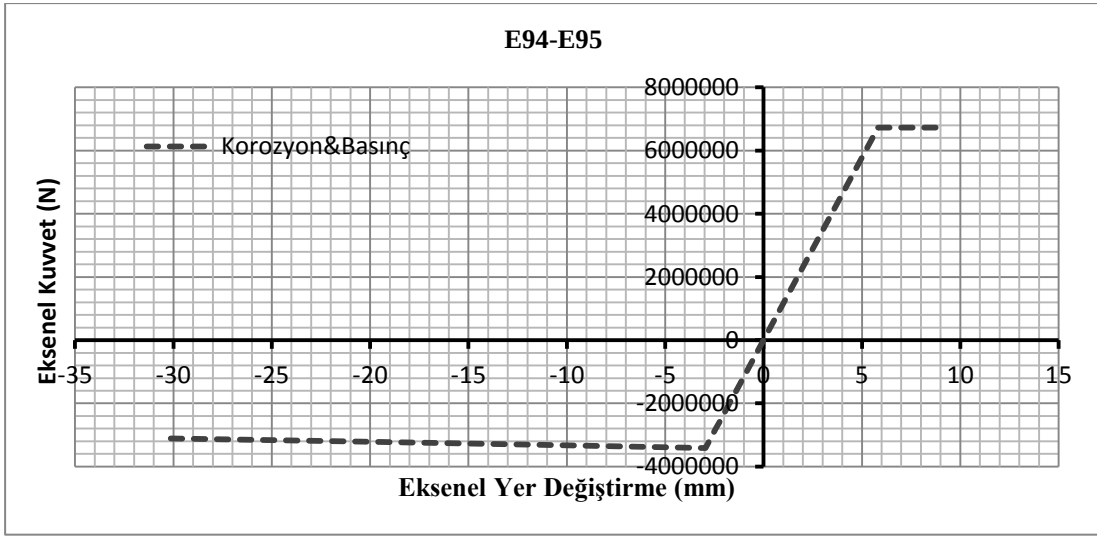
Şekil A.23 : E111-E113 P-du diyagramı.



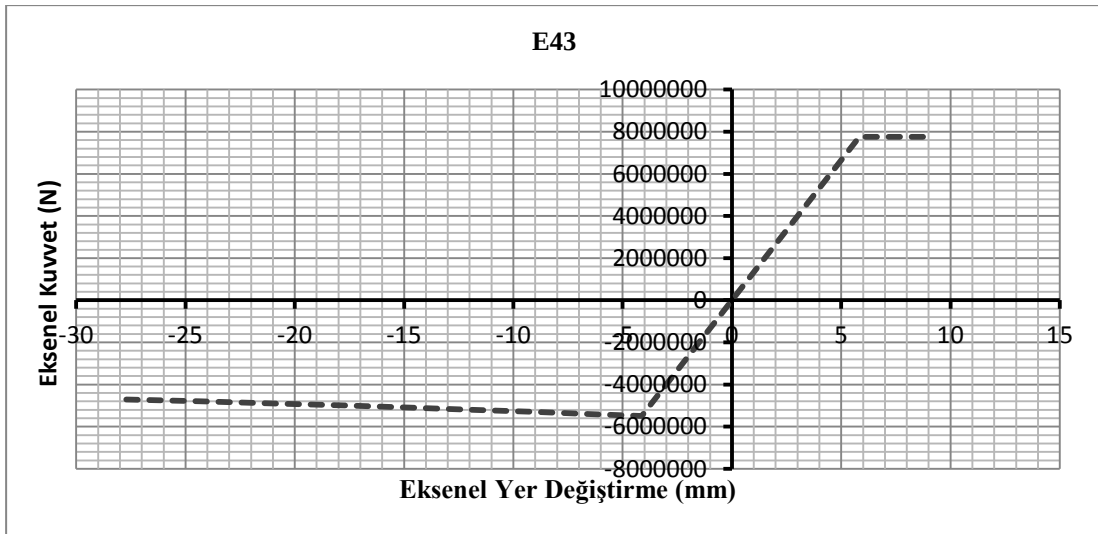
Şekil A.24 : E117,E120 P-du diyagramı.



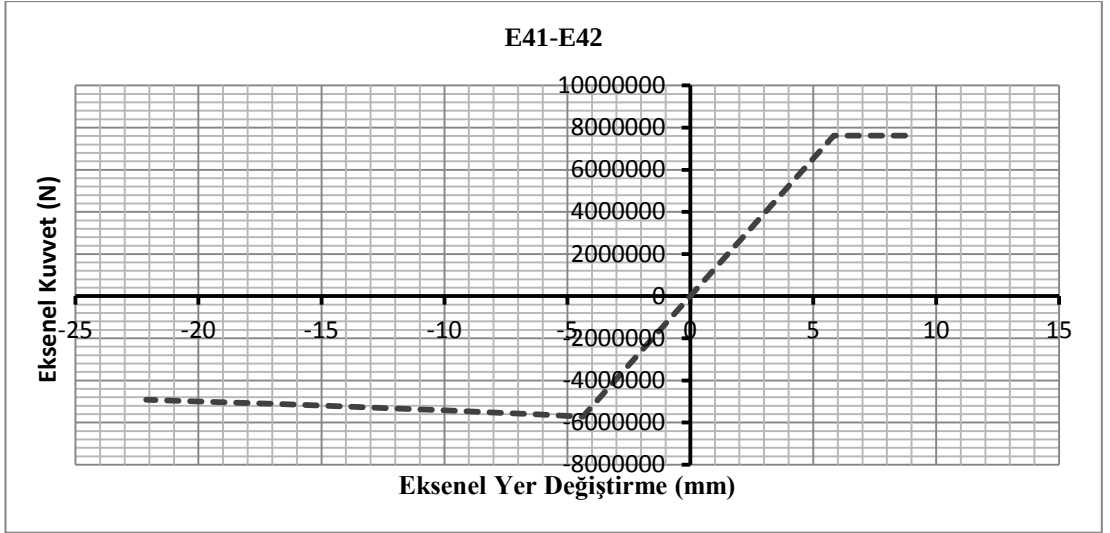
Şekil A.25 : E44-E45 P-du diyagramı.



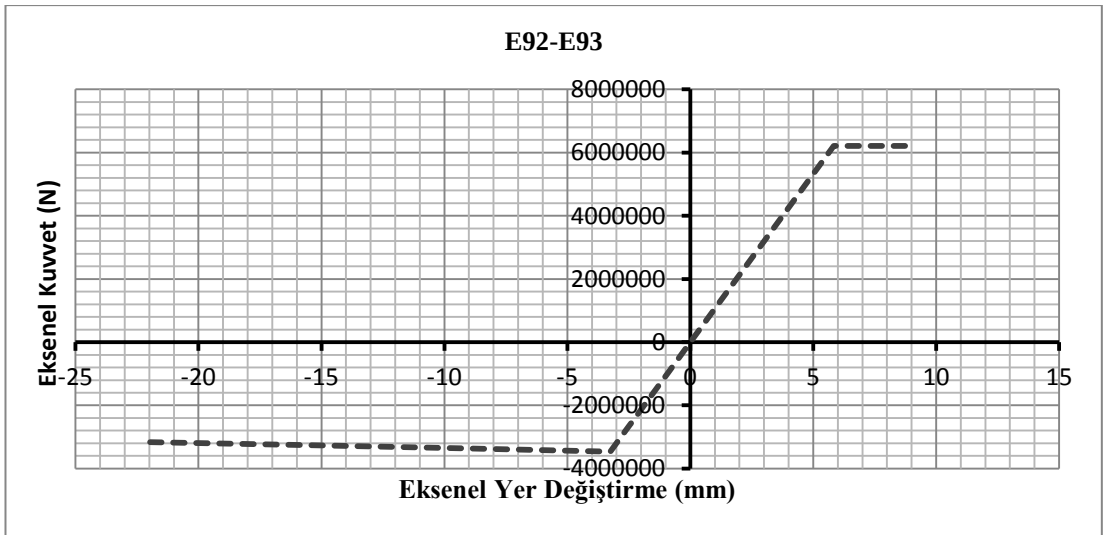
Şekil A.26 : E94-E95 P-du diyagramı.



Şekil A.27 : E43 P-du diyagramı.



Şekil A.28 : E41-E42 P-du diyagramı.



Şekil A.29 : E92-E93 P-du diyagramı.

EK B**Çizelge B.1 : Hesap tablosu “Energy Concentration”.**

zd= 15482,99 mm							
Φ 0,00016 1/m							
adet	Profil No	E no	mm	mm	mm	N	N.mm
n			z	dz	du	P	M
2	Köşe	70	71,90	15411,09	-12,58	-20117440	-310031772760
2	Köşe	64	75,50	15407,49	-12,57	-20979840	-323246773397
2	Köşe	58	76,20	15406,79	-12,57	-20117440	-309945267768
2	P32	23	104,75	15378,24	-12,55	-9442546	-145209769600
1	Köşe	76	107,30	15375,69	-12,55	-6558160	-100836265888
2	Dönüm	53	127,00	15355,99	-12,53	-17401037	-267210228701
2	P1-b	75	228,45	15254,55	-12,45	-15722058	-239832857819
2	P1	56	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	57	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	59	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	60	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	61	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	62	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	63	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	65	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	66	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	67	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	68	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	69	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	71	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	72	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	73	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	74	246,35	15236,64	-12,43	-17006955	-259128924422
2	P1	55	253,35	15229,64	-12,43	-16237001	-247283698084
2	P1	54	260,79	15222,21	-12,42	-15472269	-235522085412
2	Dönüm	52	814,00	14668,99	-11,97	-17401037	-255255716420
2	P27	103	869,10	14613,89	-11,92	-10817586	-158087069269
1	P31	116	925,00	14557,99	-11,88	-3465872	-50456142902
2	P2	126	971,80	14511,19	-11,84	-7192788	-104375947444

Çizelge B.1 : (Devam) Hesap tablosu “*Energy Concentration*”.

2	P2	132	971,80	14511,19	-11,84	-7192788	-104375947444
2	Sac	125	1687,50	13795,49	-11,26	-5064640	-69869214227
2	Sac	131	1687,50	13795,49	-11,26	-5064640	-69869214227
2	P22	51	1763,60	13719,39	-11,20	-15969002	-219085043372
2	P26	102	1764,80	13718,19	-11,19	-10459449	-143484755824
1	P31	115	1850,00	13632,99	-11,12	-3484932	-47510056479
2	P4	124	1937,50	13545,49	-11,05	-4258441	-57682695728
2	P3	130	1937,50	13545,49	-11,05	-2193097	-29706579185
2	P25	101	2688,10	12794,89	-10,44	-12554647	-160635389597
2	P21	50	2690,50	12792,49	-10,44	-15260514	-195220045668
1	P31	114	2775,00	12707,99	-10,37	-3505482	-44547643690
2	P20	49	3612,90	11870,09	-9,69	-14863463	-176430715092
2	P24	100	3623,54	11859,45	-9,68	-5267568	-62470460155
1	P30	113	3700,00	11782,99	-9,61	-1115956	-13149306490
2	P19	48	4540,20	10942,79	-8,93	-15229244	-166650487560
2	P23	99	4548,48	10934,52	-8,92	-6233905	-68164745988
1	P30	112	4625,00	10857,99	-8,86	-1313404	-14260930239
2	P18	47	5465,00	10017,99	-8,17	-15632372	-156605020978
2	P23	98	5473,44	10009,56	-8,17	-5848465	-58540555759
1	P30	111	5550,00	9932,99	-8,11	-1413804	-14043302790
1	Köşe	110	6268,75	9214,24	-7,52	-2284380	-21048836285
2	P18	46	6390,00	9092,99	-7,42	-15713936	-142886740574
2	P19	97	6398,50	9084,49	-7,41	-6449899	-58594052381
1	Köşe	109	6521,88	8961,12	-7,31	-19192320	-171984676649
2	P17	45	7314,50	8168,49	-6,67	-10609313	-86662113806
2	P18	96	7323,47	8159,52	-6,66	-6862798	-55997156820
2	P17	44	8239,50	7243,49	-5,91	-10661331	-77225297047
2	P17	95	8248,34	7234,66	-5,90	-6746130	-48805951870
2	P16	43	9167,60	6315,39	-5,15	-10914148	-68927154558
2	P16	94	9173,58	6309,42	-5,15	-6764135	-42677743209
2	P15	42	10092,50	5390,49	-4,40	-11436413	-61647921316
2	P15	93	10098,50	5384,50	-4,39	-6877340	-37031020807
2	P15	41	11017,50	4465,49	-3,64	-9533297	-42570885428
2	P15	92	11023,50	4459,50	-3,64	-6903649	-30786802879
2	P14	40	11942,40	3540,59	-2,89	-7422342	-26279503801
2	P14	91	11948,46	3534,53	-2,88	-6010101	-21242888452

Çizelge B.1 : (Devam) Hesap tablosu “*Energy Concentration*”.

2	P13	118	12762,40	2720,59	-2,22	-2263781	-6158831023
2	P13	119	12762,40	2720,59	-2,22	-2263781	-6158831023
2	Köşe	39	12875,00	2607,99	-2,13	-4503984	-11746366630
2	Köşe	90	12875,00	2607,99	-2,13	-3471325	-9053196151
2	Sac	117	12875,00	2607,99	-2,13	-5199580	-13560477307
2	Sac	120	12875,00	2607,99	-2,13	-5199580	-13560477307
2	P12	38	13794,50	1688,49	-1,38	-3389411	-5723002830
2	P12	89	13798,60	1684,40	-1,37	-2611628	-4399023985
2	P12	37	14719,50	763,49	-0,62	-1532606	-1170136718
2	P12	88	14723,60	759,40	-0,62	-1177434	-894141863
2	P12	36	15644,50	-161,51	0,13	324199	-52359820
2	P12	87	15648,60	-165,60	0,14	256761	-42519900
2	P11	35	16569,40	-1086,41	0,89	2143241	-2328428605
2	P12	86	16573,48	-1090,48	0,89	1557913	-1698874763
2	P11	34	17494,40	-2011,41	1,64	3968065	-7981386702
2	P11	85	17498,44	-2015,44	1,64	2809675	-5662740502
2	P10	33	18420,00	-2937,01	2,40	5721540	-16804193049
2	P11	84	18423,44	-2940,44	2,40	4099192	-12053442256
2	P10	32	19345,00	-3862,01	3,15	7523520	-29055873242
2	P10	83	19348,90	-3865,90	3,15	5764872	-22286425324
2	P9	31	20269,90	-4786,91	3,91	9166421	-43878787459
2	P10	82	20273,90	-4790,90	3,91	7144241	-34227355146
2	P9	30	21194,90	-5711,91	4,66	10937698	-62475097552
2	P9	81	21198,87	-5715,88	4,66	8333855	-47635285227
1	P28	108	22022,50	-6539,51	5,34	2051691	-13417045557
2	P8	29	22119,70	-6636,71	5,42	12240495	-81236555508
2	P8	80	22123,91	-6640,91	5,42	10023270	-66563678483
1	Köşe	107	22266,25	-6783,26	5,54	1784639	-12105659625
1	P2	106	22956,70	-7473,71	6,10	4981807	-37232559614
2	P8	78	23023,90	-7540,90	6,15	11276113	-85032086902
2	P8	28	23044,70	-7561,71	6,17	13946531	-105459553743
2	P8	79	23048,91	-7565,91	6,17	11419392	-86398140419
1	P2	105	23881,70	-8398,71	6,85	5598392	-47019243885
2	P7	129	24214,30	-8731,31	7,12	3191299	-27864206535
2	Sac	128	24384,80	-8901,81	7,26	2857907	-25440529821
2	P7	123	24442,00	-8959,01	7,31	3274524	-29336474359
2	Sac	122	24612,50	-9129,51	7,45	2931009	-26758666041
1	P2	104	24806,70	-9323,71	7,61	6214977	-57946609703
2	P8	27	24849,15	-9366,15	7,64	18130425	-169812365431
2	P6	127	24867,40	-9384,41	7,66	8818210	-82753654344

Çizelge B.1 : (Devam) Hesap tablosu “*Energy Concentration*”.

2	P8	77	24873,89	-9390,89	7,66	13911031	-130637015795
2	Dönüm	26	24899,00	-9416,01	7,68	15790238	-148680962335
2	P6	121	25095,40	-9612,41	7,84	8949203	-86023368360
2	P5	25	25154,19	-9671,19	7,89	24385536	-235837173015
2	P5	24	25211,12	-9728,12	7,94	24385536	-237225441579
2	P5	22	25268,05	-9785,05	7,98	24385536	-238613710144
2	P5	21	25324,98	-9841,98	8,03	24385536	-240001978708
2	P5	20	25381,91	-9898,91	8,08	24385536	-241390247273
2	P5	18	25438,84	-9955,84	8,12	24385536	-242778515837
2	P5	17	25552,70	-10069,70	8,22	24385536	-245555052966
2	Köşe	19	25562,75	-10079,75	8,23	18110400	-182548381750
2	P5	16	25609,63	-10126,63	8,26	24385536	-246943321531
2	P5	2	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	3	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	4	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	5	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	6	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	8	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	9	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	10	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	11	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	12	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	14	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
2	P5	15	25666,56	-10183,56	8,31	24385536	-248331590095
1	Köşe	1	25701,31	-10218,31	8,34	10032064	-102510772182
2	Köşe	13	25705,72	-10222,72	8,34	19850880	-202930006848
2	Köşe	7	25733,54	-10250,54	8,36	18110400	-185641456966
TOPLAM						0	17.02×10 ³ MN.m

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Gökhan Tansel TAYYAR

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmit 17/05/1977

Adres: İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Gemi İnşaatı ve Deniz
Bilimleri Fakültesi no:308 Maslak/Sarıyer/İstanbul

Lisans Üniversitesi: İTÜ

Yüksek Lisans Üniversitesi: İTÜ