

**BİR AKROBASİ UÇAĞININ YATAY DENGELİYİCİSİNİN
YAPISAL TASARIMI**

**STRUCTURAL DESIGN OF THE HORIZONTAL
STABILIZER OF AN ACROBATIC PLANE**

MEHMET YAŞARTEKİN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

MAKİNA Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2012

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'ında YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Doç. Dr. Murat KÖKSAL

Üye (Danışman) :.....
Doç. Dr. Bora YILDIRIM

Üye :.....
Doç. Dr. Serkan DAĞ

Üye :.....
Yrd. Doç. Dr. Benat KOÇKAR

Üye :.....
Dr. Bilsay SÜMER

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../..... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/...../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BİR AKROBASİ UÇAĞININ YATAY Dengeleyicisinin YAPISAL TASARIMI

Mehmet YAŞARTEKİN

ÖZ

Bu çalışmada, manevra kabiliyeti çok yüksek olan bir akrobasi uçağının yatay dengeleyicisinin yapısal tasarım ve analizi için, bir tasarım prosedürü geliştirilmiştir. Uçak yapılarında yapısal komponentlerin ağırlık değerleri hem uçağın performansı hem de yakıt sarfiyatı açısından çok önemli olduğu için; uçak komponentlerinin yapısal tasarım yöntemini belirleyen ana unsurlar; yapısal elemanların yüksek yüklere dayanabilecek kadar mukavemetli olabilmeleri ve uçak performansını artıracak kadar hafif olmalarıdır. Belirlenen kritik yük durumlarına göre konsept tasarımın, genel sonlu elemanlar ve detay sonlu elemanlar modeli MSC PATRAN/NASTRAN® paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Analitik mukavemet metotlarına göre, iteratif bir şekilde yapısal elemanların boyutlandırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analitik mukavemet hesapları için Microsoft Visual Basic® programlama dilinden yararlanılmıştır. Yapısal tasarımı gerçekleştirilen yatay dengeleyicinin detay sonlu elemanlar modelinin çözümleri elde edilerek analitik hesaplama sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. Sonuç olarak, yatay dengeleyiciye ait bütün yapısal elemanların güvenlik faktörleri birin üzerinde olacak şekilde tasarım tamamlandı. Analiz iterasyonları sonucunda dört giriş istasyonundan ve on beş kaburga istasyonundan oluşan yatay dengeleyici tasarımı tamamlandı.

Anahtar Kelimeler : Yapısal Analiz, Uçak, Yatay Dengeleyici, Sonlu Elemanlar Metodu

Danışman: Doç. Dr. Bora YILDIRIM, Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

STRUCTURAL DESIGN OF THE HORIZONTAL STABILIZER OF AN ACROBATIC PLANE

Mehmet YAŞARTEKİN

ABSTRACT

In this study, a design procedure is developed for structural design and optimization of horizontal stabilizer of aerobatic plane with very high maneuverability. Weights of structural components of the aircraft is very important for both the performance of aircraft and fuel consumption; so the main elements that determines structural design methodology is strength to withstand high loads and lightness that will increase the aircraft's performance. According to critical load cases and conceptual design, coarse finite element model and detailed finite element models are created by using MSC PATRAN/NASTRAN ® package program. The sizing of structural elements have been carried out as an iterative manner according to the analytical strength methods. Coupling strength calculation of analytical language used for Microsoft Visual Basic ® programming language is used for the analytical strength calculations . Detailed fine mesh finite element model of horizontal stabilizer solutions are obtained and compared with analytical results. As a result, the design is completed so that safety factors of all the structural members of horizontal stabilizer are over one. Horizontal stabilizer with four spar stations and fifteen rib stations is completed in the end of analysis iterations.

Key Words : Structural Optimization, Aircraft, Plane, Horizontal Stabilizer, Finite Element Method

Adviser : Doç. Dr. Bora YILDIRIM, Hacettepe University, Mechanical Engineering Department

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca çok değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Doç. Dr. Bora YILDIRIM'a teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZ.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÇALIŞMANIN AMACI, MATERYALLER, YÖNTEM VE LİTERATÜR TARAMASI.....	2
2.1. Amaç.....	3
2.2. Literatür Taraması	3
2.3. Materyal ve Yöntem.....	6
3. UÇAK YAPILARI	7
3.1. Uçakların Hareket Eksenleri.....	7
3.2. Uçuş Kararlılığı	8
3.2.1 Yatay Kararlılık	8
3.2.2 Boylamsal Kararlılık	9
3.2.3 Yönsel Kararlılık	10
3.3. Yatay Dengeleyici Yapısal Elemanları	10
3.3.1 Kabuk.....	11
3.3.2 Kiriş Plakası	12
3.3.3 Boylamsal Kirişler.....	12
3.3.4 Enlemsel Kaburgalar	13
3.4. Uçak Yapılarında Kullanılan Malzemeler	14
4. YAPISAL ELEMANLARIN BOZULMA KRİTERLERİ	15
4.1. Bir Boyutlu Yapısal Elemanlarda Kararsızlık	15
4.1.1 Euler Burkulma Denklemi	18
4.1.2 Lokal Şekil Bozukluğu Denklemi (Crippling)	19
4.1.3 Johnson – Euler Denklemi.....	22
4.2. İki Boyutlu Yapısal Elemanlarda Kararsızlık (Düz Plakalarda Burkulma).....	23
4.2.1 Düz Plakaların Basma Yükleri Altında Elastik Burkulma Denklemi	24
4.2.1.1 Basma Burkulma Katsayısı (k_c).....	25
4.2.2 Düz Plakaların Kesme Yükleri Altında Elastik Burkulma Denklemi	26
4.2.2.1 Kesme Burkulma Katsayısı (k_s).....	27
4.2.3 Düz Plakaların Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	28
5. GERİLME ANALİZLERİ ve BOYUTLANDIRMA	30
5.1. Genel Sonlu Elemanlar Modeli	31
5.2. Genel Sonlu Elemanlar Modeli Numaralandırma Metodolojisi	35
5.3. Tasarım Yükleri	40
5.3.1 Yalpa Manevrası	40
5.3.2 Yunuslama Manevrası.....	41
5.3.3 Dönme Manevrası	41
5.3.4 Yana Yatarak Dönüş Manevrası.....	41
5.3.5 Genel Sonlu Elemanlar Modeli Yük ve Sınır Koşulları	42
5.4. Genel Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	44
5.5. Analitik Yöntemlerle Analiz Sonuçları	46
5.5.1 Geometrik Girdiler Sayfası.....	47
5.5.2 Eksenel Kuvvetler Girdiler Sayfaları.....	48

5.5.3	Kesme Gerilim Girdiler Sayfası.....	48
5.5.4	Analiz Sayfaları.....	48
5.5.5	Minimum Güvenlik Faktörleri Özet Sayfası.....	50
6.	DETAY SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	51
6.1.	Detay Sonlu Elemanlar Modeli	51
6.2.	Detay Sonlu Elemanlar Uygulanan Kuvvetler ve Sınır Koşulları.....	56
6.3.	Detay Sonlu Elemanlar Analiz	57
7.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	58
7.1.	Birinci İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları.....	58
7.2.	İkinci İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları	59
7.3.	Üçüncü İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları	60
7.4.	Dördüncü İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları	61
7.5.	Beşinci İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları.....	62
7.6.	Altıncı İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları	63
7.7.	Detay Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	64
7.7.1	Birinci Yük Durumu için Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	64
7.7.2	İkinci Yük Durumu için Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	68
7.7.3	Üçüncü Yük Durumu için Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	71
7.7.4	Dördüncü Yük Durumu için Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları.....	74
7.8.	Sonuç.....	77
	KAYNAKLAR	82
	EK AÇIKLAMALAR.....	84
	EKLER	86
	ÖZGEÇMİŞ	144

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Akrobasi Hareketleri Yapan Gösteri Uçakları.....	1
Şekil 2.1. Yatay Dengeleyici Montajı	4
Şekil 2.2. Yapısal Tasarım Prosedürü	7
Şekil 3.1. Uçakların Hareket Eksenleri	7
Şekil 3.2. Yatay Kararlılık ve Dihedral Açısı	9
Şekil 3.3. Boylamsal Kararlılık	9
Şekil 3.4. Yönsel Kararlılık.....	10
Şekil 3.5. Yarı Monokok Yatay Dengeleyici Profili	11
Şekil 3.6. Kabuk Elamanına Etkiyen Kuvvetler	12
Şekil 3.7. Kiriş Plakasına Etkiyen Kuvvetler	12
Şekil 3.8. Boylamsal Kirişlere Etkiyen Kuvvetler.....	13
Şekil 3.9. Enlemsel Kaburgalar	13
Şekil 4.1. Yapısal Elemanların Bozulma Kriterleri	15
Şekil 4.2. Kolon Kararsızlığı	16
Şekil 4.3. Kolon Narinlik Oranı - Kararsızlık Dayanımı Grafiği.....	17
Şekil 4.4. Kısa Kolonlarda Lokal Burkulma (Crippling)	19
Şekil 4.5. Basma Yüküne Maruz kalan Kolon Kesitinde Yük Dağılımı.....	20
Şekil 4.6. Kolon Profil Kesiti.....	21
Şekil 4.7. Çeşitli Sınır Koşullarındaki Plakaların Yükleme altındaki Davranışları..	24
Şekil 4.8. Dört Kenarı Mesnetli Düz Plakanın Basma Burkulması.....	24
Şekil 4.9. Düz Plakalar için Basma Burkulma Katsayıları	25
Şekil 4.10. Düz Plakalar için Modifiye Edilmiş Basma Burkulma Katsayıları	26
Şekil 4.11. Dört Kenarı Mesnetli Düz Plakanın Kesme Burkulması.....	27
Şekil 4.12. Düz Plakalar için Kesme Burkulma Katsayıları	27
Şekil 4.13. Düz Plakalar için Modifiye Edilmiş Kesme Burkulma Katsayıları	28
Şekil 4.14. Basma ve Kesme Faktörleri Kombinasyonu Grafiği.....	29
Şekil 5.1. Genel Sonlu Elemanlar Model Uyarlaması	31
Şekil 5.2. Bar” eleman	32
Şekil 5.3. “Quad” eleman.....	34
Şekil 5.4. MSC. Patran “Materials” modülü	34
Şekil 5.5. MSC. Patran “Properties” modülü.....	35
Şekil 5.6. Yatay Dengeleyici Başlangıç Modeli.....	36
Şekil 5.7. Sonlu Elemanlar Modeli 1. Ve 2. Kısımın Numaraları.....	39
Şekil 5.8. Yalpa Manevrası Esnasında Uçağın Deformasyonu	40
Şekil 5.9. Yunuslama Manevrası Esnasında Uçağın Deformasyonu.....	41
Şekil 5.10. Dönme Manevrası Esnasında Uçağın Deformasyonu	41
Şekil 5.11 Yana Yatarak Dönüş Manevrası Esnasında Uçağın Deformasyonu ...	42
Şekil 5.12. Sonlu Elemanlar Modeli Yükleri.....	43
Şekil 5.13. Yatay Dengeleyici Bağlantısı	44
Şekil 5.14. Birinci ve İkinci Kesitlerin Düğüm Noktalarındaki Toplam Kuvvetler ...	45
Şekil 5.15. MSC. Patran Tepki Kuvvet Veri Çıktısı	46
Şekil 5.16. Geometrik Girdiler.....	47
Şekil 5.17. İlk İterasyon “Geometrik Girdiler” Sayfası	48
Şekil 5.18. Kesit Ağırlık Merkezinde Bileşke Kuvvet ve Moment.....	49
Şekil 6.1. Ön Ana Kirişler Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	51
Şekil 6.2. Ön Kiriş Plakası Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	52
Şekil 6.3. Ön Kirişler Sonlu Elamanlar Ağ Modeli.....	52

Şekil 6.4. Arka Kirişler Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	52
Şekil 6.5. Arka Ana Kirişler Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	53
Şekil 6.6. Arka Kiriş Plakası Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	53
Şekil 6.7. Kabuk Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	53
Şekil 6.8. Kaburgalar Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	54
Şekil 6.9. Gövde Bağlantıları Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	54
Şekil 6.10. İrtifa Dümeni Bağlantıları Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	54
Şekil 6.11. Birleştirilmiş Yatay Dengeleyici Sonlu Elamanlar Ağ Modeli	55
Şekil 6.12. Uygulanan Kuvvetler ve Sınır Koşulları	56
Şekil 7.1. Birinci İterasyon CAD Modeli	58
Şekil 7.2. Birinci İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli	59
Şekil 7.3. İkinci İterasyon CAD Modeli	60
Şekil 7.2. İkinci İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli	60
Şekil 7.5. Üçüncü İterasyon CAD Modeli	61
Şekil 7.6. Üçüncü İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli	61
Şekil 7.7. Dördüncü İterasyon CAD Modeli	62
Şekil 7.8. Dördüncü İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli	62
Şekil 7.9. Beşinci İterasyon CAD Modeli	63
Şekil 7.10. Beşinci İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli	63
Şekil 7.11. Altıncı İterasyon CAD Modeli	64
Şekil 7.12. Altıncı İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli	64
Şekil 7.13. Birinci Yük Durumu Deplasman Sonucu	65
Şekil 7.14. Birinci Yük Durumu Boylamsal Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuçları	65
Şekil 7.15. Birinci Yük Durumu Enlemsel Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuçları	66
Şekil 7.16. Birinci Yük Durumu Kesme Gerilim Sonuçları	66
Şekil 7.17. Birinci Yük Durumu Von Mises Gerilim Sonuçları	67
Şekil 7.18. Birinci Yük Durumu İlk Burkulma Modu	67
Şekil 7.19. İkinci Yük Durumu Deplasman Sonucu	68
Şekil 7.20. İkinci Yük Durumu Boylamsal Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuçları	68
Şekil 7.21. İkinci Yük Durumu Enlemsel Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuçları	69
Şekil 7.22. İkinci Yük Durumu Kesme Gerilim Sonuçları	69
Şekil 7.23. İkinci Yük Durumu Von Mises Gerilim Sonuçları	70
Şekil 7.24. İkinci Yük Durumu İlk Burkulma Modu	70
Şekil 7.25. Üçüncü Yük Durumu Deplasman Sonucu	71
Şekil 7.26. Üçüncü Yük Durumu Boylamsal Yöndeki Eksenel Gerilim Sonucu	71
Şekil 7.27. Üçüncü Yük Durumu Enlemsel Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuçları	72
Şekil 7.28. Üçüncü Yük Durumu Kesme Gerilim Sonuçları	72
Şekil 7.29. Üçüncü Yük Durumu Von Mises Gerilim Sonuçları	73
Şekil 7.30. Üçüncü Yük Durumu İlk Burkulma Modu	73
Şekil 7.31. Dördüncü Yük Durumu Deplasman Sonucu	74
Şekil 7.32. Dördüncü Yük Durumu Boylamsal Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuç... ..	74
Şekil 7.33. Dördüncü Yük Durumu Enlemsel Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuç	75
Şekil 7.34. Dördüncü Yük Durumu Kesme Gerilim Sonuçları	75
Şekil 7.35. Dördüncü Yük Durumu Von Mises Gerilim Sonuçları	76
Şekil 7.36. Dördüncü Yük Durumu İlk Burkulma Modu	76
Şekil 7.37. Eksenel Kuvvet – İterasyon Döngü Grafiği	78
Şekil 7.38. Moment – İterasyon Döngü Grafiği	78
Şekil 7.39. Eksenel Gerilim – İterasyon Döngü Grafiği	79

Şekil 7.40. Kesme Gerilimi – İterasyon Döngü Grafiği.....	79
Şekil 7.41. Kritik Basma Burkulma Dayanımı – İterasyon Döngü Grafiği	80
Şekil 7.42. Kritik Kesme Burkulma Dayanımı – İterasyon Döngü Grafiği	80
Şekil 7.43. Güvenlik Faktörü – İterasyon Döngü Grafiği.....	81

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 5.1. Bar2 Köşe Numaralandırması	32
Tablo 5.2. Bar2 Düşüm Noktası Parametrik Koordinatları.....	32
Tablo 5.3. Quad4 Yüzey Numaralandırması	33
Tablo 5.4. Quad4 Kenar Numaralandırması.....	33
Tablo 5.5. Quad4 Düşüm Noktası Parametrik Koordinatları	33
Tablo 7.1. Analitik Analiz ve Detay Sonlu Elemanlar Karşılaştırması	84
Tablo A.1. Birinci İterasyon Kalınlık Girdileri.....	86
Tablo A.2. Birinci İterasyon Panel Boyut Girdileri	86
Tablo A.3. Birinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler	87
Tablo A.4. Birinci İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler	87
Tablo A.5. Birinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri	87
Tablo A.6. Birinci İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri.....	88
Tablo A.7. Birinci İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri.....	88
Tablo A.8. Birinci İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri	89
Tablo B.1. İkinci İterasyon Kalınlık Girdileri	91
Tablo B.2. İkinci İterasyon Panel Boyut Girdileri.....	91
Tablo B.3. İkinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler	92
Tablo B.4. İkinci İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler	92
Tablo B.5. İkinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri	93
Tablo B.6. İkinci İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri	93
Tablo B.7. İkinci İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri	94
Tablo B.8. İkinci İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri	95
Tablo C.1. Üçüncü İterasyon Kalınlık Girdileri	97
Tablo C.2. Üçüncü İterasyon Panel Boyut Girdileri	98
Tablo C.3. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler	98
Tablo C.4. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler	99
Tablo C.5. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri.....	100
Tablo C.6. Üçüncü İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri	101
Tablo C.7. Üçüncü İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri	103
Tablo C.8. Üçüncü İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri	104
Tablo D.1. Dördüncü İterasyon Kalınlık Girdileri.....	106
Tablo D.2. Dördüncü İterasyon Panel Boyut Girdileri	107
Tablo D.3. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler	108
Tablo D.4. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler	109
Tablo D.5. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri	110
Tablo D.6. Dördüncü İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri.....	111
Tablo D.7. Dördüncü İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri.....	113
Tablo D.8. Dördüncü İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri	115
Tablo E.1. Üçüncü İterasyon Kalınlık Girdileri	118
Tablo E.2. Üçüncü İterasyon Panel Boyut Girdileri.....	119
Tablo E.3. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler	120
Tablo E.4. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler	122
Tablo E.5. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri	123
Tablo E.6. Üçüncü İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri	124
Tablo E.7. Üçüncü İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri	126
Tablo E.8. Üçüncü İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri	128
Tablo F.1. Dördüncü İterasyon Kalınlık Girdileri	131

Tablo F.2. Dördüncü İterasyon Panel Boyut Girdileri	132
Tablo F.3. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler	133
Tablo F.4. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler.....	135
Tablo F.5. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri.....	136
Tablo F.6. Dördüncü İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri	137
Tablo F.7. Dördüncü İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri	139
Tablo F.8. Dördüncü İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri	141

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	Ağırlık merkezine olan mesafe (mm)
E	Elastiklik modülü (Young modülü) (MPa)
F_{cr}	Kiriş kritik burkulma gerilmesi (MPa)
F_{cs}	Lokal şekil bozukluğu gerilmesi (MPa)
g	Yük faktörü (m/s^2)
G	Rijitlik modülü (MPa)
ρ	Kiriş jirasyon yarıçapı (mm)
I	Kiriş atalet momenti (mm^4)
A	Kiriş kesit alanı (mm^2)
L	Kiriş uzunluğu (mm)
L'	Kiriş uzunluğunu temsil eden sabit (mm)
P_E	Euler burkulma yükü (N)
F_c	Johnson – Euler Kolon bozulma gerilmesi (MPa)
F_{cs}	Lokal şekil bozukluğu gerilmesi (crippling stress) (MPa)
k_c	Basma Burkulma Sabiti
k_s	Kesme Burkulma Sabiti
K	Modifiye edilmiş burkulma katsayısı
ν_e	Poisson oranı
σ_{cr}	Kritik elastik basma burkulma gerilmesi (MPa)
τ_c	Kritik elastik kesme burkulma gerilmesi (MPa)
t	Plaka kalınlığı (mm)
b	Plaka genişliği (mm)
SEM	Sonlu Elemanlar Modeli
G.F.	Güvenlik Faktörü
R_c	Basma Burkulma Faktörü
R_s	Kesme Burkulma Faktörü

f_c	Uygulanan Basma Gerilimi (MPa)
f_s	Uygulanan Kesme Gerilimi (MPa)
F_c	Basma Burkulma Dayanım Gerilimi (MPa)
F_s	Kesme Burkulma Dayanım Gerilimi (MPa)

1. GİRİŞ

Havacılık ve savunma endüstrisinde uçak tasarım ve imalatı, geçmişten günümüze, tüm dünyada, sürekli üzerinde çalışılan ve sürekli önemini koruyan, geniş bir konudur. İnsanoğlunun en önemli buluşlarından biri olan uçak, dünya tarihi boyunca, kimi zaman ulusların, kimi zaman da tüm insanlığın kaderini değiştirmiş ve ister sivil ister askeri amaçlarla kullanılmış olsun, insan hayatını etkilemiştir.

Akrobasi uçakları ise gerek tasarım açısından gerekse uçuş performansı açısından teknolojik olarak üst sınıf uçaklardır. Aerobasi ya da hava akrobasisi, bir hava taşıtını sıra dışı durumlara sokarak; loop, roll, viril gibi normal uçuşta kullanılmayan manevralarla yapılan hassas uçuşlardır. Birçok akrobasi hareketi, uçağın boylamsal eksenini veya enlemsel eksenini etrafında gerçekleştirilen dönüş hareketlerini içerir. Akrobasi uçuşları yüksek uçuş yeteneği gerektiren uçuşlardır ve akrobasi uçak yapılarının, normal uçak yapılarına göre çok daha yüksek yapısal gerilimlere maruz kalmasına sebep olur. Akrobasi manevraları; gösteri, muharebe, sportif ya da eğitim amaçlı gerçekleştirilir. Akrobasi, çoğunlukla uçak veya planör gibi sabit kanatlı hava taşıtları tarafından gerçekleştirilir. Akrobasi gösteri gerçekleştiren akrobatik uçaklar Şekil 1.1'de gösterilmiştir. [14]



Şekil 1.1 Akrobasi Hareketleri Yapan Gösteri Uçakları [14]

Havacılık ve uzay teknolojilerinde, yapısal tasarım, üzerinde çalışılan yapısal parçaların formu, ağırlığı, fonksiyonu, montaj biçimi, üretilebilirliği ve üretim maliyeti gibi özellikler ile bu parçalarda kullanılan malzemelerin, içeriği, ağırlık, mukavemet ve yorulma mukavemeti gibi değerleri, temin edilebilirliği, işlenebilirliği, idame edilebilirliği ve maliyeti gibi özellikler dikkate alınarak yapılır. Bir tasarımcının hava aracında istenen tüm gereksinimleri sağlarken az ya da çok bu bilgilerin tümüne sahip olması ve yeterli bilgiye sahip olmadığı tüm konularda, konunun uzmanından bilgi sağlaması gerekir. Tasarımcının, parçaları ve bunların bir araya getirildiği bütünü (montajı) tasarlarlarken birçok seçeneği vardır ve iyi bir yapısal tasarımın gerek parça formu ve gerekse parçaların bütün içinde kullanımı açısından ağırlık kriterlerine uygun olması gerekir. Tasarlanan parça ve montajın ağırlığının büyük çıkması ve hedeflenen ağırlık değerlerinde ortaya çıkan küçük sapmalar, hava aracı üzerinde tekrar başka birçok değişikliğin yapılmasına neden olmakta, hava aracının performansına büyük derecede etki etmekte, kaybedilen performansın tekrar kazanımı için de ilave birçok zaman ve emek harcanması gerekmektedir. Tasarımcı tarafından ortaya konulan yapısal tasarımların, analiz mühendisi tarafından da optimize edilmesi oldukça kritik olduğundan, hava araçlarının ağırlık azaltma çalışmaları ve bunun için yürütülen birçok optimizasyon çalışması, ar-ge faaliyetleri içinde önemli yer tutmaktadır.

Yapısal tasarım optimizasyonu havacılık alanında oldukça kritiktir. Bir yapının sahip olması gereken dayanıklılık özellikleri sağlanır veya korunurken, yapının diğer özelliklerinin en iyi değerlere getirildiği bir tasarıma ulaşılmaya çalışılır.

2. ÇALIŞMANIN AMACI, MATERYALLER, YÖNTEM VE LİTERATÜR TARAMASI

Yatay dengeleyiciler, uçaklarda kanat kaldırma yüklerinden kaynaklanan yüksek momentleri dengeleyerek; boylamsal ekseninde kararlı bir uçuş gerçekleştirilmesini sağlayan önemli bir komponenttir. Ayrıca uçağın irtifasını sağlayan irtifa dümeninin, yatay dengeleyiciye bağlı olması; yatay dengeleyicinin önemini daha da artırmaktadır.

2.1. Amaç

Akrobasi uçağının gerçekleştirdiği manevralara göre; yatay dengeleyici yüzeyi üzerine, kanat momentini dengeleyecek çok yüksek aerodinamik yükler gelmektedir. Bunun yanı sıra, uçağın yapacağı manevralar esnasında yapının kendi ağırlığından ötürü yüksek atalet yükleri de yapı üzerine etmektedir. Bu nedenle yapısal tasarımı gerçekleştirilecek yapının, bu yüksek aerodinamik ve atalet yüklerine dayanabilecek kadar mukavemetli olması gerekmektedir. Yüksek yapısal mukavemet, mukavim malzeme seçimi veya uygun tasarım geometrisi (kalınlık, boyut vb..) kullanılarak sağlanır. Havacılık sektöründe, hafif ve dayanıklı olmasından ötürü, uçak yapılarında özel durumlar dışında alüminyum alaşım kullanımı yaygındır. Bu nedenle, bu çalışmada yüksek mukavemetli yapısal tasarımın uygun geometri kullanılarak sağlanması amaçlanmıştır.

Yapısal elemanlarda yüksek mukavemet, kalın yapısal elemanlar kullanılarak sağlanabilir. Ancak gerektiğinden fazla kalın yapısal tasarım, uçağın veriminin düşmesine ve uçaktan beklenen manevraların gerçekleşmemesine sebep olabilir. Akrobasi uçaklarında ağırlığın azaltılması, uçağın performansını, örneğin hızını ve manevra kabiliyetlerini önemli ölçüde artırmakta ve yakıt tüketimini, imalat ve servis maliyetlerini de büyük ölçüde düşürmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada akrobasi uçağının yatay dengeleyicisinin kritik manevra yüklerine dayanabilecek kadar mukavemetli ve uçağın verimini düşürmeyecek kadar hafif olmasını sağlayacak yapısal tasarım metodolojisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2.2. Literatür Taraması

Çalışmaya başlarken öncelikle akrobasi uçaklarının yatay dengeleyicileri incelenmiş ve yatay dengeleyicilerin yapısı ile ilgili temel bilgiler edinilmiştir. Şekil 2.1’de yatay dengeleyici montajını çalışması gösterilmiştir. Yatay dengeleyicilerin uçaktaki görevleri ve önemi ile ilgili genel bilgiler üçüncü bölümde verilmiştir. Yapısal elemanların boyutlandırma kriterlerinde kullanılan bozulma modları dördüncü bölümde anlatılmıştır. Beşinci bölümde, uçak yapılarının tasarım sürecinde kullanılan “tasarım yük” tanımları, “sonlu elemanlar metodu ile gerilim analiz metotları” ve “yapısal analitik metotlar” ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Altıncı bölümde ise yatay dengeleyicinin detay sonlu elemanlar analizi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yatay Dengeleyici Montajı

Çalışma, uçak yapısal elemanları ve yatay dengeleyici yapısal elemanlarının tasarımı, bu yapısal elemanlara yönelik analiz yaklaşımları ve yapısal analiz metotlarının araştırılması ile derinleştirilmiştir. Çalışma süresi içerisinde, yapısal tasarımı, kuyruk ve yatay kuyruk tasarımı, yapısal analiz ve sonlu elemanlar analiz konusunda gerekli bilgileri edinmek üzere, yayınlanmış birçok kitap, dergi, makale ve tez okunmuştur. İncelenen kaynaklarda uçak yatay kuyruk yapısının tasarım ve analiz konseptleri detaylı olarak incelenmiş ve yatay kuyruk yapısal elemanlarının fonksiyonları, tasarım kriterleri, yapısal analiz konularında detaylı bilgiler edinilmiştir.

1972 yılında Megson, tarafından havacılık mühendisliği öğrencileri için yazılmış olan “Aircraft Structures for Engineering Students” [4] isimli kitapta, uçak yapıları, uçak yapı analizleri ve elastisite temelleri gibi birçok konu hakkında kapsamlı bilgi verilmiştir.

Bruhn, 1973 yılında yayınlanan “Analysis and Design of Flight Vehicle Structures” [2] isimli kitabında, uçak yapılarındaki gerilme analizleri ile ilgili yaygın ve uygulanabilir analiz yöntemleri hakkında detaylı bilgi vermiştir. Uçak yapılarının boyutlandırma çalışmaları, yapısal analiz prosedürleri, kirişler, plakalar, kolon burkulması, ince plakalarda burkulma, basma ve kesme panellerinde gerilmelerin analizi konularını ayrıntılı bir şekilde işlenmiştir.

Flabel, ilk baskısı 1997 yılında yayınlanan “Practical Stress Analysis for Design Engineers” [3] isimli kitabında, eğilme, kesme, burkulma gibi gerilmelerin hesaplanması hakkında oldukça detaylı bilgiler vererek uçak gerilme analizi için pratik çözüm metotları sunmuştur. Bu kitapta bir boyutlu problemlerde yapısal dengesizlik, kolonların burkulması, kabuk yapılarında kesme gerilme hesapları, panel üzerindeki delik etrafında gerilim hesapları gibi birçok konuda detaylı bilgi vererek yapısal tasarım ve analiz ilkeleri hakkında bilgi vermiştir.

1999 yılında ikinci baskısı yapılan “Airframe Structural Design” isimli kitabında [5], Niu, uçak yapılarının üretim metotları, yapı yükleri, malzemeleri, bağlayıcılar ve yapısal bağlantılar konusunda detaylı bilgiler vermiştir. Ayrıca kitapta uçak komponentleri, detaylı bir şekilde tanıtılmıştır. Uçaklardaki kanat kutusu, kanat hücum ve firar kenarı, kuyruk yapısı, yatay ve dikey kuyruk, gövde yapısı gibi birçok önemli yapıda yer alan kritik yapısal elemanlar ve tasarımları incelenmiştir.

Şahin tarafından 1999 yılında üçüncü baskısı yayınlanmış olan “Uçaklar ve Helikopterler” [6] kitabında, uçaklar hakkında basitleştirilmiş ve yalın bir şekilde çok geniş bir konu yelpazesinde bilgi verilmiştir. Havacılık sektöründe, Türkçe karşılığı bulunmayan birçok terimin çevirisi yapılarak havacılık konusu çok daha anlaşılır hale getirilmiştir.

Peery, 1982 yılında ikinci baskısını yayınlamış olduğu “Aircraft Structures” isimli kitabında [7], uçan yapıların analiz ve tasarım konuları ile ilgili temel konseptleri işlemiştir. Bunun yanı sıra, Peery kitabında, çalışma alanından bağımsız olarak yapısal elemanların yapısal davranışı için öngörü ve değerlendirme yapabilen genel analitik hesap araçları geliştirmesi konusunda bilgi sağlamıştır.

Çalışma sırasında tasarım, analiz ve optimizasyon konularında, uçak yapısı ve tasarımları, kanat ve kuyruk yapıları ile ilgili olarak incelenmiş diğer kaynaklar, tez ve makale ve araştırma yazıları kaynaklar bölümünde belirtilmiştir.

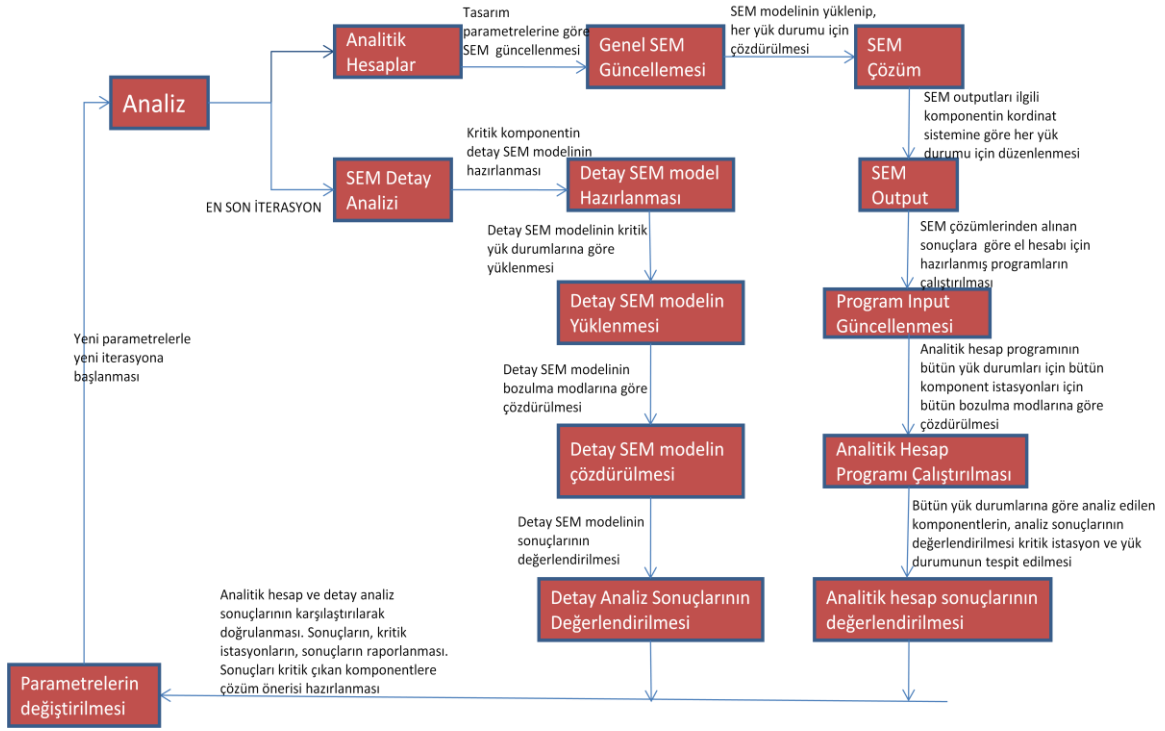
2.3. Materyal ve Yöntem

Çalışmalara literatür taraması yapılarak başlanmıştır. Öncelikli olarak, mevcut uçaklardaki yatay dengeleyiciler incelenerek; çalışmaya ön hazırlık sağlayacak sonuçlar çıkartıldı. Benzer uçaklardaki (akrobasi uçakları) manevra kabiliyetleri araştırılarak; yatay dengeleyici için kritik manevra misyonları belirlendi. Belirlenen kritik manevralara göre, yatay dengeleyicinin yapısal analizlerinde kullanılan kritik yük durumları yaratıldı.

Mevcut akrobatik uçaklardaki yatay dengeleyiciler incelendi ve tasarım iterasyonlarına başlanacak olan yatay dengeleyicinin konsept modeli mühendislik tahminleri kullanılarak oluşturuldu. Konsept modeldeki yük taşıyan ve aktaran ana yapısal elemanların sayı ve lokasyonları belirlendikten sonra; her elemanın yapısal görevi tanımlandı. Literatür taraması sonuçlarına göre yatay dengeleyiciyi oluşturan yapısal elemanların sayı ve boyutlarını belirleyecek olan statik analiz yöntemi belirlenerek; analitik hesapları gerçekleştirecek olan program, Microsoft Visual Basic® programlama dili kullanılarak yaratıldı.

Tasarım sınırlamalarını çözebilmek için, sonlu elemanlar analizi, geleneksel sonlu elemanlar çözücüsü; MSC/NASTRAN® paket programı kullanılarak yapılmıştır. Yatay kuyruğun sonlu elemanlar modelini hazırlayabilmek ve sonuçları gözlemleyebilmek için, ön işlemci ve son işlemci program olarak MSC/PATRAN® paket programı kullanılmıştır.

Yatay dengeleyici yapısal tasarımı sırasında izlenen metodolojinin akış şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Buna göre her iterasyonda esnasında, tasarım parametreleri güncellenerek; genel sonlu elemanlar modeli yeniden çözdürülecektir. Çözdürülen yeni genel sonlu elemanlar modelinin sonuçlarına ve yeni tasarım parametrelerine göre analitik hesaplar bütün yük durumları için tekrarlanacaktır. Analiz sonuçlarına göre kritik istasyonlar belirlenerek; yeni tasarım parametreleri belirlenecektir. Yapısal elemanların güvenlik faktör değerleri kritik değerin üzerinde oluncaya kadar; analiz iterasyonları tekrarlanacaktır. Analitik metotlara göre boyutlandırması tamamlanan yatay dengeleyici için detay sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek; analitik hesap sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

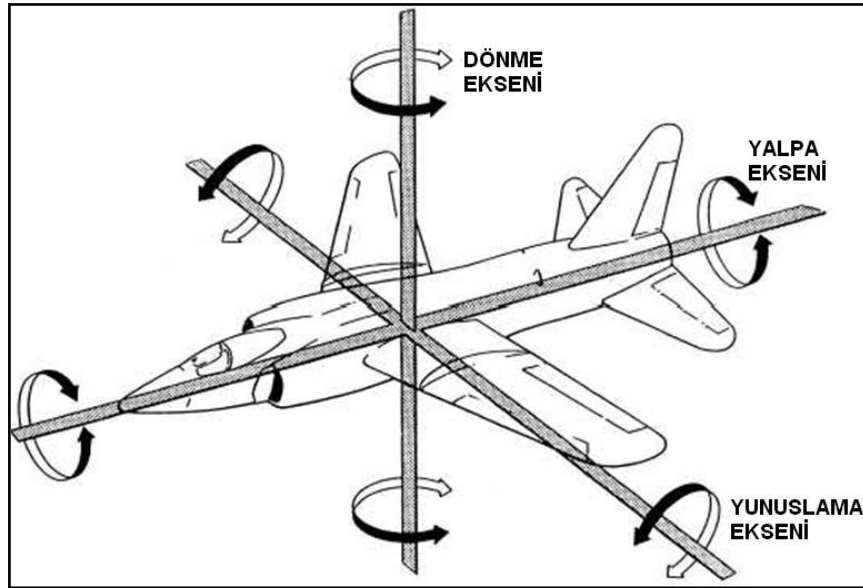


Şekil 2.2. Yapısal Tasarım Prosedürü

3. UÇAK YAPILARI

3.1. Uçakların Hareket Eksenleri

Uçaklar üç eksen üzerinde hareket ederler. Bunlar yalpa/yatış, yunuslama ve dönme/sapma eksenleridir. Bu hayali eksenler, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi uçağın ağırlık merkezinde (CG) kesişirler.



Şekil 3.1. Uçakların Hareket Eksenleri [6]

Yalpa/yatış hareketi uçağın kanatları üzerinde gövdenin ekseni etrafında sağa ve sola yatış yaptığı harekete denir. Yalpa ekseni burun ucu ile kuyruğu birleştiren hayali bir eksendir.

Uçağın kanat ekseni etrafında burun aşağı yukarı yaptığı harekete yunuslama hareketi denir. Yunuslama ekseni, kanat uçlarını gövdeyi dik kesecek şekilde hayali bir çizgi ile birleştiren eksendir.

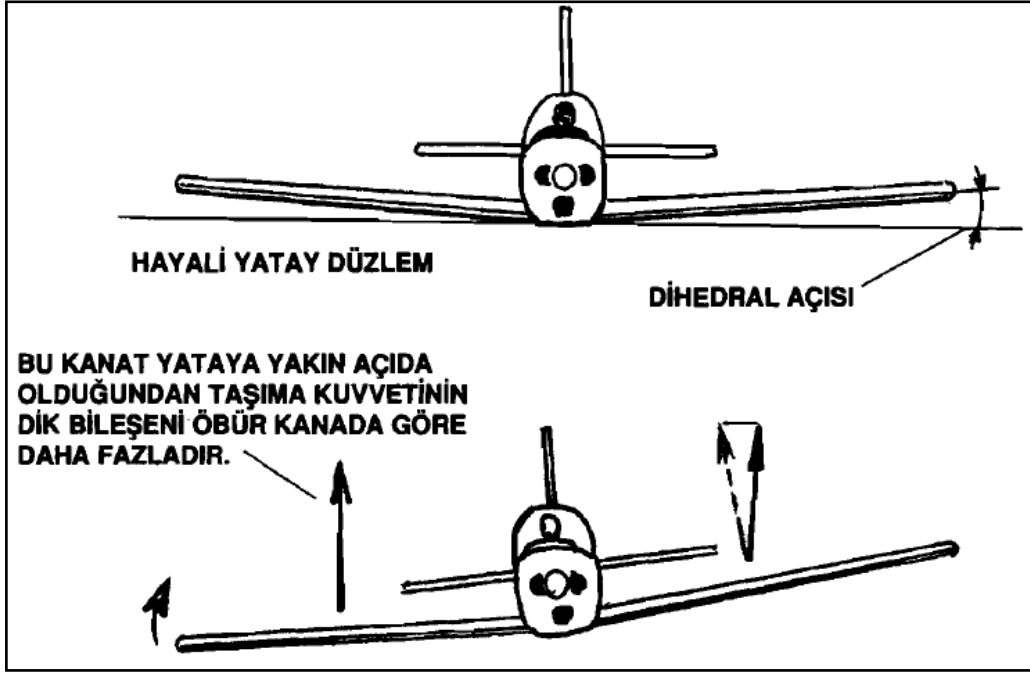
Dönme/sapma hareketi uçak burnunun sağa ve sola yaptığı dönüş hareketine denir. Yalpa ekseni ve yunuslama eksenine dik olan hayali eksene dönme ekseni denir [6].

3.2. Uçuş Kararlılığı

Uçuş esnasında rüzgâr, türbülans gibi hava karışıklıkları yüzünden ortaya çıkan istenmeyen hareketlerde (sağa/sola yatış; burun aşağı/yukarı hareketler, gidilen istikametten sapma) , pilot uçağa herhangi bir kumanda hareketi vermeden uçağın kendi kendine uçuş haline gelmesine, düzelmesine “Doğal Kararlılık” denir. Doğal kararlılık üç ayrı bölümden oluşur [6].

3.2.1 Yatay Kararlılık

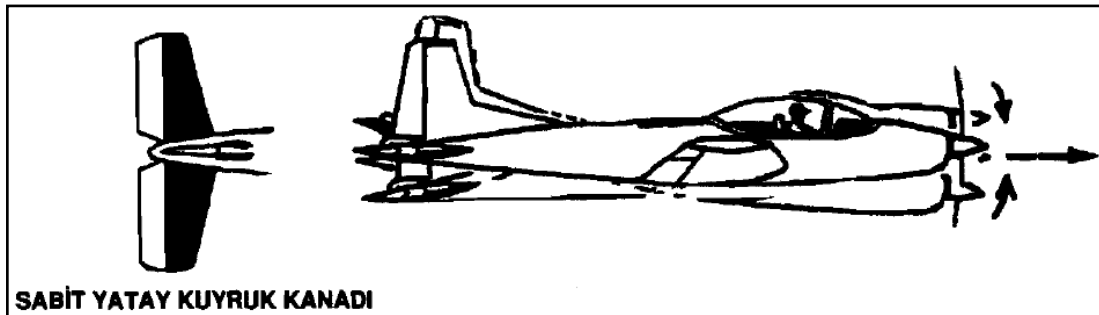
Yalpa hareketi olduğu zaman uçak yatılan kanat tarafına doğru kaymak ister. İşte bu kaymaya engel olan olay “Yatay Kararlılık” olarak isimlendirilir. Yatay olarak kararlı bir uçak, uçuş sırasında üzerine bir kuvvet uygulanmadıkça kanat uçları yere paralel olarak uçar. Üzerine bu durumu bozacak bir kuvvet uygulanınca uçak bu kuvvete karşı koyar. Kuvvet kaldırılınca kendi kendine yatay duruma geçer. Bu tip kararlılığı, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi kanatlara ve/veya yatay kuyruk dümenine yukarı (dihedral) veya aşağı doğru (anhedral) verilen açı sağlar [6].



Şekil 3.2. Yatay Kararlılık ve Dihedral Açısı [6]

3.2.2 Boylamsal Kararlılık

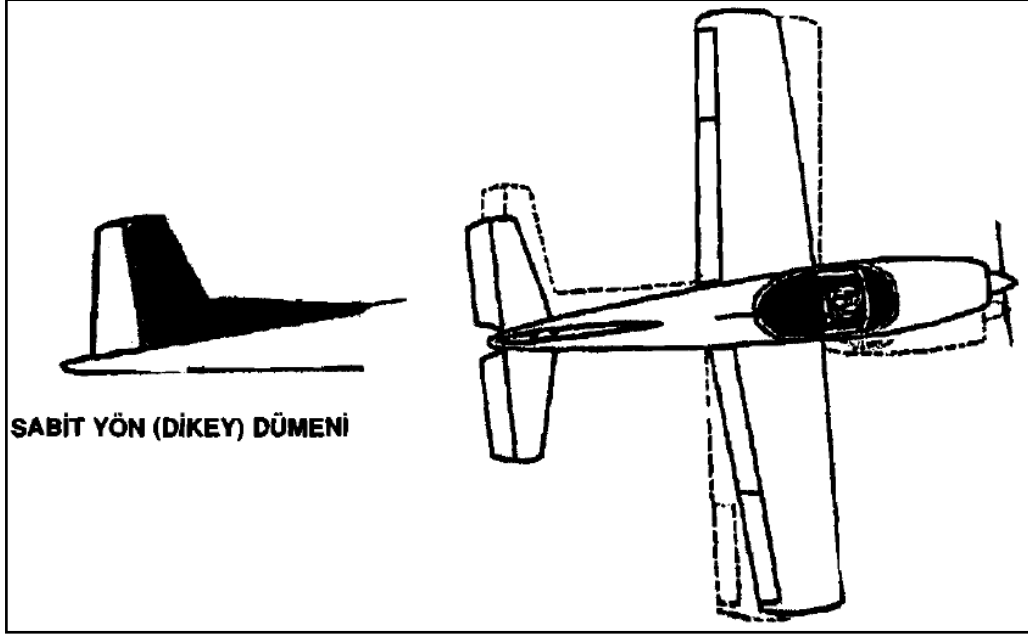
Hava karışıklığı yüzünden oluşabilecek burun aşağı/yukarı istenmeyen hareketleri önlemek için “Yatay Dengeleyici” sabit yatay kuyruk yüzeyleri bulunur. Şekil 3.3 ‘de gösterildiği gibi, uçak kuyruğunun aşağı/yukarı hareketlerinde bu yüzeyin meydana getirdiği hava direnci ile bu yöndeki hareketler önlenir ve boyuna kararlılık sağlanır. Boyuna kararlı bir uçakta pilot, uçağa burun aşağı veya yukarı yaptıracak bir kuvvet uygulayınca uçak buna direnç gösterir ve kuvvet kaldırılınca uçak kendiliğinden yatay konuma geçer. Bu etkiyi yatay dengeleyici sağlar. Normal kararlı uçaklarda uçak gövdesi ön kısmı ağır olacak şekilde tasarlanır ve yapılır. Uçuş sırasında bu ağırlığa karşı koyup uçağın düz uymasını sağlamak için yatay kuyruğun kesit profili ve hücum açısı uçağın kuyruğunu aşağı bastıracak şekilde yapılır. Bu nedenle bu tip uçaklar yavaş uçarken kuyruk yüzeyindeki baskı kuvveti azaldığından burun yere doğru eğimlenir [6].



Şekil 3.3. Boylamsal Kararlılık [6]

3.2.3 Yönsel Kararlılık

Hava şartlarından oluşabilecek uçak burnunun gidiş istikametinin sağa/sola değişmesini önlemek için uçaklarda sabit “Dikey Dengeleyici” kullanılır. Şekil 3.4’te, yönsel kararlılığa yardımcı olan dikey dengeleyici gösterilmiştir. Yönsel kararlı uçaklar burun istikametini değiştirme eğilimi gösterir [6].



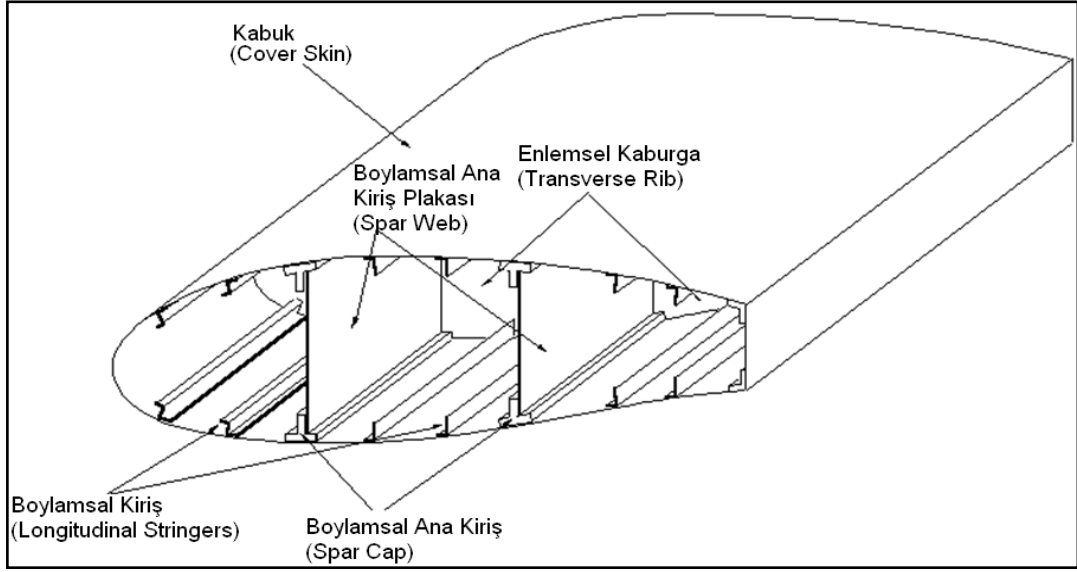
Şekil 3.4. Yönsel Kararlılık [6]

3.3. Yatay Dengeleyici Yapısal Elemanları

Yatay dengeleyiciyi oluşturan yapısal elemanların 2 temel görevi vardır:

1. Yapıya etkiyen kuvvetleri taşımak ve iletmek
2. Yapının aerodinamik şeklini ve içeriğini korumak için bir örtü görevi görmek

Yatay dengeleyici, bu görevleri yerine getiren en başarılı teknik olan yarı – monokok bir yapıya sahiptir. Yarı – monokok yapılar günümüz uçaklarında en yaygın kullanılan yapı metodudur. İnce bir kabuğu, içten boylamsal kirişlerle (Stringer) ve enlemsel çerçevelerle (Rib) güçlendirilerek elde edilir. Boylamsal kirişler ve enlemsel çerçeveler, dış kabuk elemanlarına destek sağladıkları gibi kabuk elemanlarının burulma ve burkulmasını önlerler.



Şekil 3.5. Yarı Monokok Yatay Dengeleyici Profili

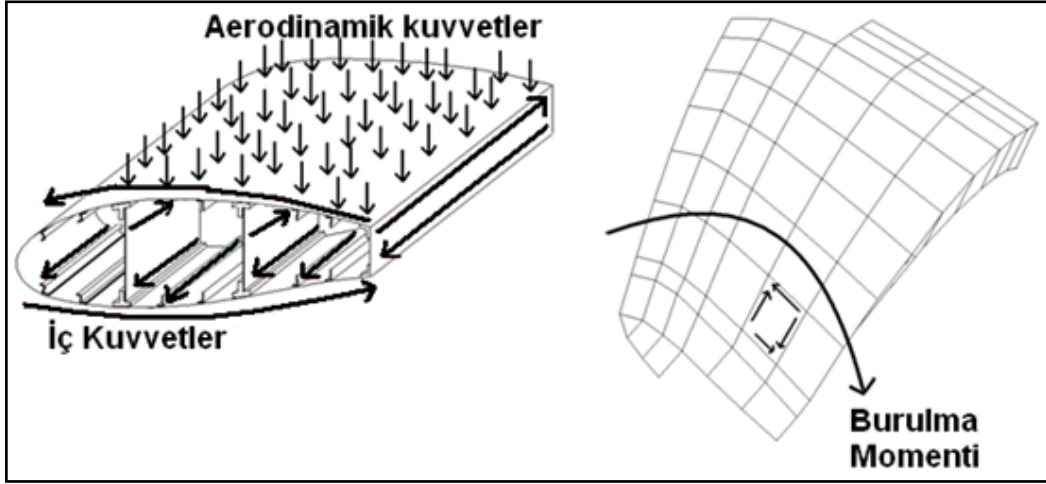
Yatay dengeleyici Şekil 3.5'te görüldüğü gibi 4 ana yapısal elemandan oluşur:

1. Kabuk (Cover Skin)
2. Kiriş Plakası (Spar Web)
3. Boylamsal Kirişler (Stringers, Spar Caps)
4. Enlemsel Kaburga (Rib)

3.3.1 Kabuk

Kabuk elemanı, yatay dengeleyici oluşturan yapısal elemanları dışarıdan bütünüyle saran ince panellerdir. Yatay dengeleyicinin aerodinamik yüzeyini oluşturma'nın yanı sıra üç ana yapısal görevi vardır:

1. Yatay dengeleyicinin maruz kaldığı aerodinamik yükleri boylamsal kirişlere ve enlemsel kaburgalara iletmek.
2. Yatay dengeleyiciye etkiyen burulma momentlerini, kendi düzleminde yarattığı kesme kuvvetleri ile dengelemek.
3. Yatay dengeleyiciye etkiyen bükme momentlerini ve eksenel kuvvetleri, boylamsal kirişlerle birlikte çalışarak dengelemek.



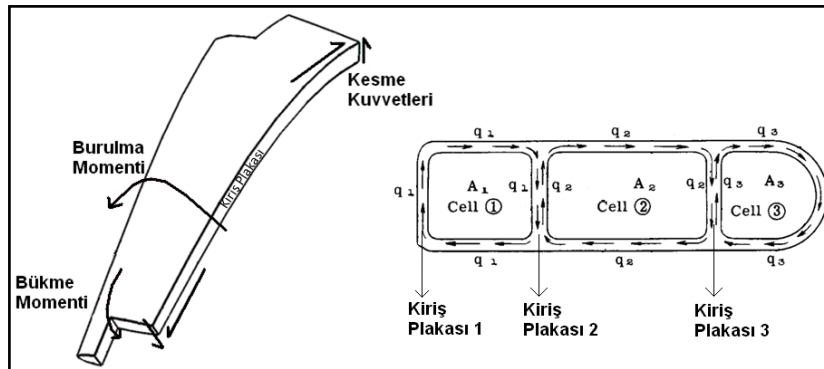
Şekil 3.6. Kabuk Elamanına Etkiyen Kuvvetler

Şekil 3.6'da kabuk elemanı üzerine etkiyen kuvvet çeşitleri gösterilmiştir.

3.3.2 Kiriş Plakası

Kiriş Plakaları, kanat ve yatay dengeleyicide kapalı bölümler (multiple cell thin-walled closed section) oluşturan temel yapısal elemanlardır. Kiriş plakalarının başlıca görevleri:

1. Uygulanan bükme momentlerine, kesme kuvvetlerine ve aksenal kuvvetlere karşı koymak.
2. Uygulanan burulma momentlerini, kendi düzleminde yarattığı kesme kuvvetleri ile dengelemek.



Şekil 3.7. Kiriş Plakasına Etkiyen Kuvvetler

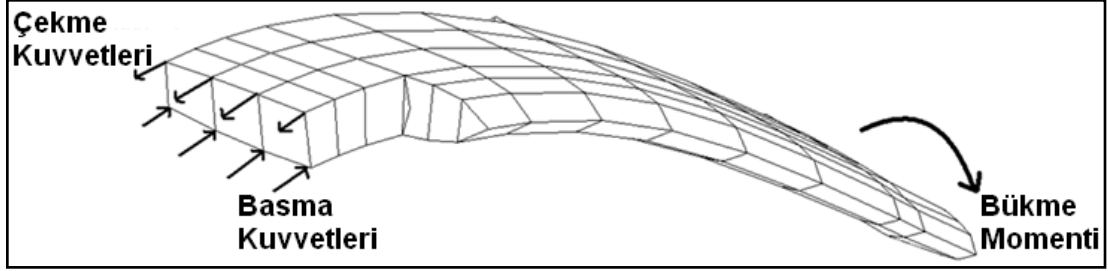
Kiriş plakası üzerine etkiyen kuvvet çeşitleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

3.3.3 Boylamsal Kirişler

Boylamsal kirişler, kabuk elemanlarıyla birlikte çalışarak güçlü kolonlar (beam) oluştururlar. Bükme momentlerini ve aksenal kuvvetleri dengelerler. Kolon içindeki fiberler gibi davranarak, eğilmenin iç tarafındaki kirişler basmaya (compression);

dış tarafındaki kirişler çekmeye (tension) maruz kalırlar. Şekil 3.8'de bükme momentlerini dengeleyen çekme ve basma kuvvetleri gösterilmiştir. Boylamsal kirişlerin başlıca görevleri:

1. Yatay dengeleyiciye etkiyen bükme momentlerini ve eksenel kuvvetleri, boylamsal kirişlerle birlikte çalışarak dengelemek.
2. Kabuk elemanlarını boylamsal yönde bölerek daha stabil bir yapı oluştururlar.

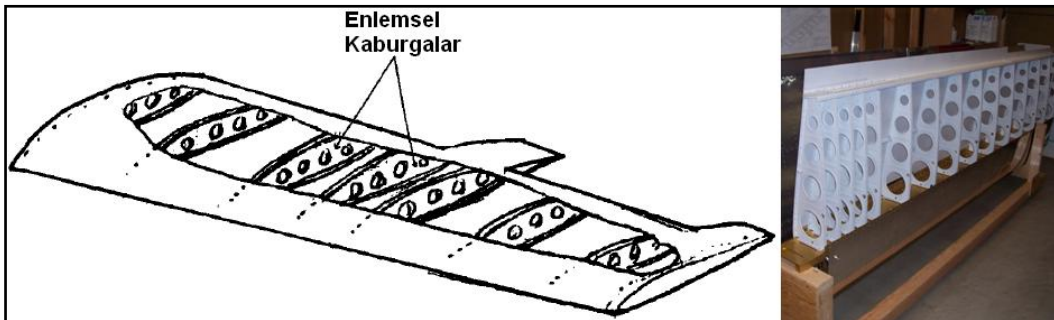


Şekil 3.8. Boylamsal Kirişlere Etkiyen Kuvvetler

3.3.4 Enlemsel Kaburgalar

Aerodinamik sebeplerden ötürü, yatay dengeleyicinin şeklinin bozulmaması gerekmektedir. Bu nedenle, yatay dengeleyicide, aerodinamik şekli korumak ve panelleri enine bölerek; panellerin burkulma (buckling) dayanımlarını artırmak için enlemsel kaburgalar kullanılır. Yatay dengeleyicideki enlemsel kaburgaların dizilimi şekil 3.9'da gösterilmiştir. Enlemsel kaburgaların yatay dengeleyicideki başlıca görevleri:

1. Yapının kesitsel ve aerodinamik şeklini muhafaza etmek.
2. Konsantre gelen noktasal yükleri yapıya dağıtmak.
3. Kabuk ve kiriş elemanlarını yapısal olarak bölerek kirişlerin burkulma (buckling) mukavemetlerini artırmak.
4. Kabuk ve kiriş plakası ile birlikte çalışarak burulma momentlerine karşı koyar.



Şekil 3.9. Enlemsel Kaburgalar

3.4. Uçak Yapılarında Kullanılan Malzemeler

Uçaklar havadan ağır araçlardır. Performansları motor gücüne ve dış şekline göre değişir. Uçakların dış görünüş olarak zarif, ince ve aerodinamik olmaları istenir. Aynı zamanda da yapısal olarak çok dayanıklı olmaları ve en kritik olanı da olabildiğince hafif olması performans ve maliyet açısından çok önemlidir. Bu nedenle uçaklarda kullanılan malzemeler çok önemlidir.

İlk uçaklar tamamen tahtadan yapılmışlardı. Özellikle balsa isimli ağaç çok hafiftir ve hala günümüzde model uçak yapımında kullanılır. Sonraları tahta iskelet üzerine bez kaplamalı uçaklar ortaya çıkmıştır. Bu arada tamamı tahtadan uçaklar da yapılmıştır. Daha sonra da çelik boruların birbirlerine kaynak edilmesi ile yapılan iskelet üzerine önceleri bez germek; daha sonraları da alüminyum sac kaplama suretiyle yapılan uçaklar yaygın olarak kullanılmıştır. Zaman içinde özellikle alüminyum alaşımlarının ve diğer hafif metal alaşımlarının gelişmesiyle tamamen metal uçakların yapımı gerçekleşmiştir.

Alüminyum, yoğunluğu $2560-2640 \text{ kg/m}^3$ olan hafif bir metaldir. Paslanmaya ve korozyona dayanıklıdır. Saf alüminyum hafif olmasına rağmen yumuşak ve mukavemeti yeteri kadar olmadığından başka metallerle karıştırılarak elde edilmiş alaşımları kullanılır. Alüminyum alaşımları alüminyum ile bakır, magnezyum, mangan ve silikon gibi maddeler karıştırılarak elde edilir. Uçaklarda kullanılan alüminyum alaşımları çok sağlam ve dayanıklıdır. Mukavemet, darbeye ve kırılmaya dayanım çok yüksektir.

Uçaklarda kullanılan alüminyum alaşımları başlıca iki ana gruba ayrılır:

1. 2000 serisi alaşımlarda; alüminyum dışındaki ana malzeme bakırdır.
2. 7000 serisi alaşımlarda; alüminyumdan sonraki ana eleman çinkodur.

Alüminyum alaşımlarından en yaygın olarak kullanılanları 2024 ve 7075 olarak tanımlanan alaşımlardır. Kullanım yerine (gereken mukavemet, sertlik, v.s.) ve uygulanacak şekil verme işlemine göre farklı alaşımlar bulunur [6].

4. YAPISAL ELEMANLARIN BOZULMA KRİTERLERİ

Uçak yapılarındaki yapısal elemanların üzerine etkiyen yüklemelere dayanabilmesi gereken birçok bozulma modu (failure mode) mevcuttur. Yapısal elemanlardan beklenen görevlere ve önceden belirlenen tasarım kriterlerine göre, her yapısal elemanın çeşitli bozulma kriterlerine (failure criteria) karşı koyması gereken dayanımları (allowables) hesaplanarak; üzerine etkiyen yüklemelerle karşılaştırılır.

Yatay dengeleyicide bulunan yapısal elemanlar taşıdıkları yüklerin eksen sayılarına göre; bir boyutlu yapısal elemanlar ve iki boyutlu yapısal elemanlar olmak üzere ikiye ayrılır. Bir boyutlu elemanlar (boylamsal kirişler) sadece kendi eksenleri yönünde eksenel yükleri taşıırken; iki boyutlu elemanlar (kabuk, kiriş plakası) kendi düzlemindeki eksenlerde, eksenel yükleri ve kesme yüklerini taşırlar. Bir boyutlu elemanlar ile iki boyutlu elemanların bozulma modları Şekil 4.1’de özetlenmiştir.



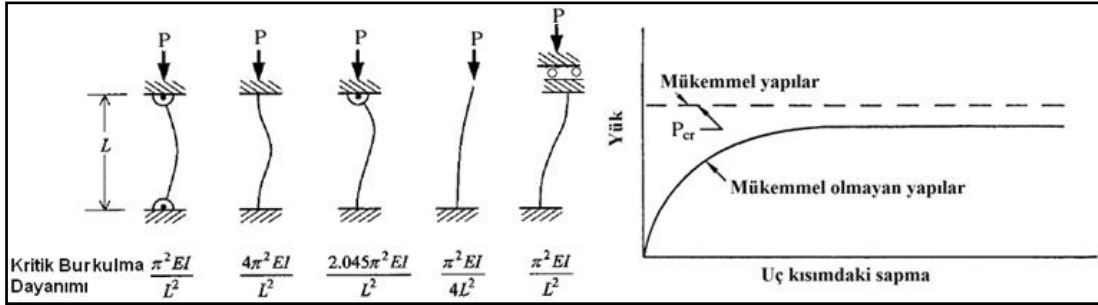
Şekil 4.1. Yapısal Elemanların Bozulma Kriterleri

4.1. Bir Boyutlu Yapısal Elemanlarda Kararsızlık

Kolonlar, basma (compressive) gerilimlerine maruz kalan tek eksenli yapısal elemanlardır. Mükemmel doğrusallıkta ve merkezden yüklenen bir kolon teorik olarak kritik dayanım değerine kadar yüklemeye karşı koyabilecekken; bir tür kararsızlık (instability) olan burkulma (buckling) nedeniyle kolonlar, malzemenin dayanımından daha düşük gerilim değerlerinde bozulma davranışı gösterirler.

Sonuç olarak, kolonlarda, yükteki artışa uymayan, büyük ve ani deformasyonlar meydana gelir [2].

Aslında, geometrik olarak mükemmel ve merkezden yüklenmiş bir kolon, pratikte yoktur. Bu nedenle, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, çeşitli sınır koşullarına sahip kolonlar, basma yüklerini taşıyabilecekleri “Kritik Burkulma Dayanımlarına” sahiptir. Ekseninden kaçık olarak yüklenmiş olan kolonlar, hem basma yükünü hem de bu eksantrikliğin sebep olduğu momenti taşıma kapasitesine sahip olmalıdır ve bu elemanlar kiriş kolonlar gibi analiz edilmelidir. Fakat P_{cr} değerine ulaşıldığında, kolonda, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, yükteki artışa uymayan, büyük ve ani deformasyonlar meydana gelir [2].



Şekil 4.2. Kolon Kararsızlığı [2]

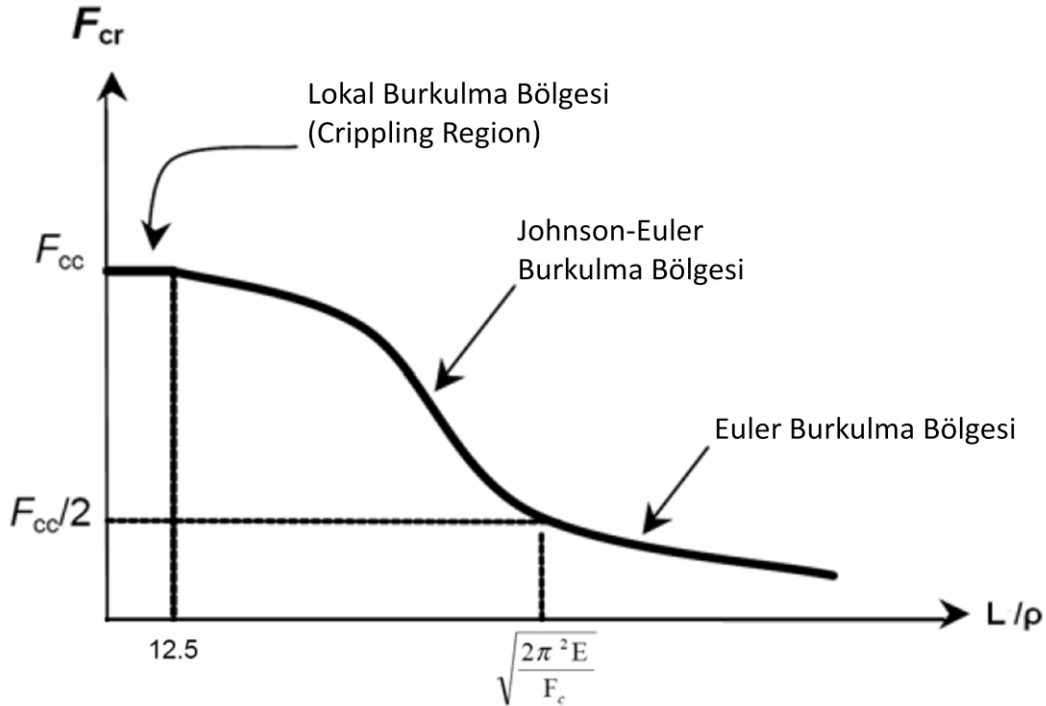
Bir kolon, narinlik oranına (slenderness ratio) göre 2 ayrı düzlemde kararsızlık göstermeye meyilli olabilir. Bunlar, kolonun boylamsal düzlemi ve kolonun kesitsel düzlemindeki kararsızlıktır:

1. Boylamsal düzlemdeki kararsızlıklar, kolonun sınır koşullarına ve yükün geldiği noktaya bağlı olarak, aşağıdaki herhangi bir tipteki başarısızlık olarak tanımlanır. Bu mod, kolonun genel burkulması ile ilgilidir ve kolonun malzemesi, kesiti ve uçlarının sabitleme biçimine bağlıdır.
 - Kolonun ötelenmesi
 - Kolonun dönmesi
 - Kolonun ötelenmesi ve dönmesi
2. Kesit düzlemindeki kararsızlıklar, kolonun enine kesit düzlemindeki lokal şekil bozukluklarını (crippling) içerir. Bir kesit şeklinin lokal şekil bozukluğu (crippling) veya lokal burkulması (local buckling), esas olarak, ekstrüzyon, form verilmiş sac metal şekiller ve ince duvarlı tüplerde (borularda) meydana gelir. Malzeme, kesit geometrisi ve boyutlarına bağlıdır.

3. Boylamsal düzlemdeki kararsızlık (flexural instability) ve kesit düzlemindeki kararsızlık (crippling) arasındaki etkileşim de yapının kesit geometrisi ve boyutlarına bağlıdır. Kritik burkulma gerilmesi, lokal şekil bozukluğu gerilmesinin yarısı bir değere ulaştığında bükülme kararsızlığı ve lokal şekil bozukluğu arasında bazı etkileşimler olabilir.

Genellikle uçak yapılarının pratik tasarım ve boyutlandırılmasında karşılaşılan, değişik tipteki kolonlar için teorik burkulma yükü, formüller, grafikler ve çizelgeler yardımı ile hesaplanır.

Şekil 4.3'te, bir kolonun narinlik oranının, kolonun kararsızlık dayanımına göre çizilmiş olan grafiği gösterilmiştir. Eğer kolonun kesit ve boy ölçülerinden ötürü kolon, “Euler Burkulma Bölgesine” giriyorsa; kolonun bozulma modu “Elastik Euler Burkulma Kararsızlığıdır” (elastic euler buckling instability). Bu bölgedeki narinlik oranına sahip kolonlar genelde uzun kolonlar olarak adlandırılır [2].



Şekil 4.3. Kolon Narinlik Oranı - Kararsızlık Dayanımı Grafiği [2]

Bir kolon, kendi düzlemindeki biçimsel bozukluktan (distortion) ötürü lokal burkulma (crippling) kararsızlık bozulma eğilimine girebilir. Şekil 4.3'teki lokal burkulma bölgesindeki narinlik oranına sahip kolonlar da genelde kısa kolonlar olarak adlandırılır [2].

Kolon bozulma modu analizinin bir başka önemli durumu da; kolon boyları kısaltıldıkça ortaya çıkar. J.B. Johnson tarafından ortaya atılan parabolik eğri uydurma yöntemi ile (parabolic curve fit); Euler burkulma bölgesi ile lokal burkulma bölgesinin arasındaki, geçiş bölgesine giren kolonlar için Johnson-Euler burkulma bölgesi oluşturulmuştur. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, Johnson-Euler burkulma bölgesine geçiş noktası; genellikle malzemenin lokal burkulma (crippling) dayanımının yarısı olarak kullanılır [2].

Şekil 4.3'teki grafiğin narinlik oranına göre formülize edilmiş hali Eşitlik 4.1'deki gibidir.

$$F_{cr} = \begin{cases} F_{cs} & \text{eğer } \frac{L'}{\rho} \leq 12,5 & \text{ise} \\ F_{cs} \left[1 - \frac{F_{cs}}{4\pi^2 E} \left(\frac{L'}{\rho} \right)^2 \right] & \text{eğer } 12,5 < \frac{L'}{\rho} \leq \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_{cs}}} & \text{ise} \\ \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L'}{\rho} \right)^2} & \text{eğer } \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_{cs}}} < \frac{L'}{\rho} & \text{ise} \end{cases} \quad (4.1)$$

Narinlik oranı Eşitlik 4.2'de gösterilmiştir.

$$\rho = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (4.2)$$

L' , kiriş uzunluğunu temsil eden sabittir ve şöyle hesaplanır;

$$L' = \frac{L}{\sqrt{C}} \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3'de yer alan C değeri, tipik kabuk-kiriş bağlantıları için, C=2 olarak alınır.

4.1.1 Euler Burkulma Denklemi

Gelişen teknoloji ile birlikte uçak yapısında daha yüksek mukavemetli malzemelerinin kullanılmasıyla birlikte yapısal elemanların kesit talanları da küçüldü. Kesit alanının küçülmesi, büyük ve ağır eleman kullanımını engellerken; yapısal elemanlarının çok daha kolay burkulma dezavantajı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle günümüzde uçak yapılarının analizi ve boyutlandırılmasında burkulma bozulma modu çok önem kazanmıştır

Bir kolonda, enine (kesit alanında) ötelenme, malzemenin basma yükünü taşıma sınırı olan kritik burkulma yükü P_E , Euler formülü ile hesaplanır. Euler formülü,

uçları basitçe pinlenmiş bir kolondaki burkulma yükü için Eşitlik 4.4'deki gibi yazılabilir [2].

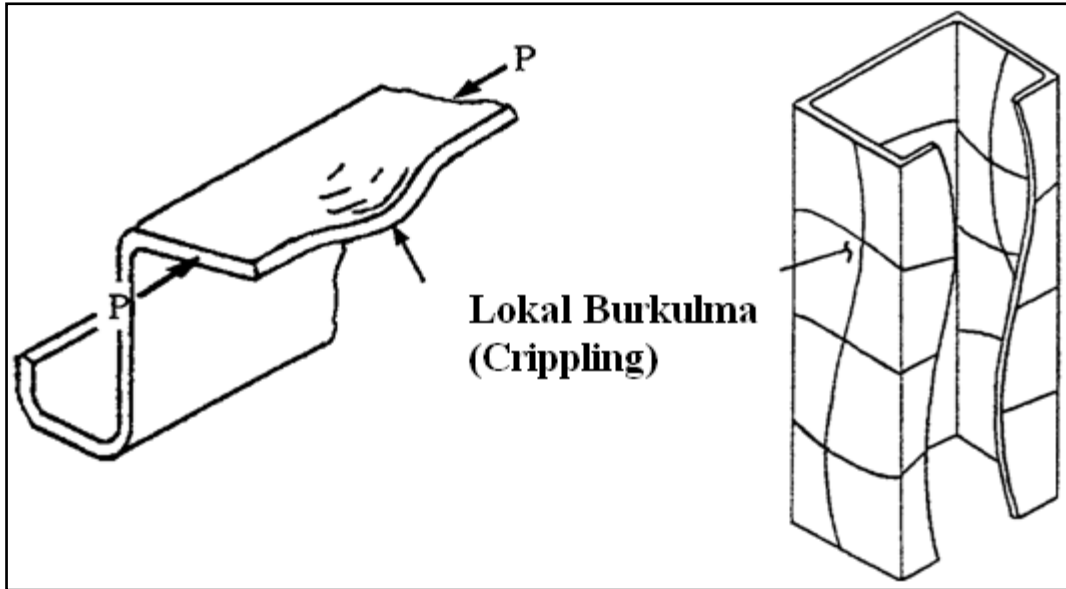
$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (4.4)$$

Euler burkulma kararsızlığı yapının enine ötelenmesi ile ilgili olduğu için; formülde kullanılan parametreler, bir malzemenin eğilme direngenliğini hesaplarken kullanılan parametreler ile aynıdır.

- * Malzeme elastiklik modülü
- * Atalet momenti
- * Kolonun uzunluğu

4.1.2 Lokal Şekil Bozukluğu Denklemi (Crippling)

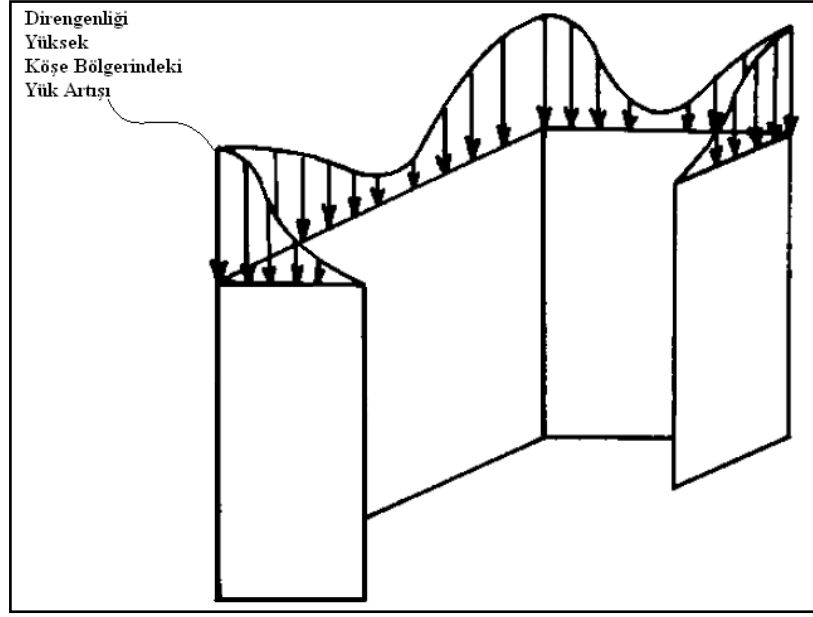
İnce düz plakalar, burkulma dayanımları düşük olduğu için basma yüklerini taşıma kapasiteleri çok düşüktür. Bu nedenle, plakalar büküm yöntemiyle form verilerek burkulmaya karşı dirençleri geliştirilir. Uçak yapılarında bu form verilmiş veya extürüzyon yöntemiyle üretilmiş flanşlı yapılar, kiriş elemanları olarak yaygın bir şekilde kullanılır [2].



Şekil 4.4. Kısa Kolonlarda Lokal Burkulma (Crippling) [2]

Kısa kolonlarda yaygın olarak görülen kararsızlık modu olan lokal burkulma Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Kısa kolonlarda, lokal burkulması gerçekleşmiş olsa bile; kolon üzerine etkiyen basma yükü arttırılmaya devam edilmesi halinde kolonun yük

taşımaya devam ettiği yapılan testlerde görülmüştür. Başka bir deyişle, kolon burkulması düşük basma gerilimlerinde olmasına rağmen, kolon için bozulma gerilmesi (cripling stress) daha yüksek basma gerilmelerinde gerçekleşmektedir. Kolon burkulmasının gerçekleşmesinin ardından, kolon kesiti üzerindeki yük dağılımı Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Kolon üzerindeki basma yükü arttıkça, kolonun düz kısımlarındaki bölgesel ötelenmelerden dolayı yük taşıma kapasitesi düşerken; direngenliği (stiffness) daha yüksek olan köşe kısımlara doğru yük transferi, lokal bozulma (cripling) gerçekleşene kadar artar.

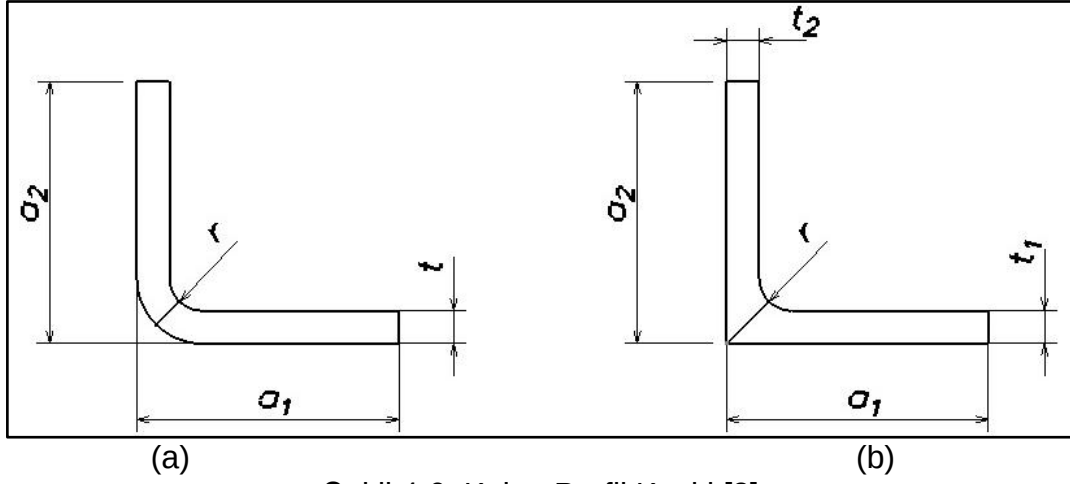


Şekil 4.5. Basma Yüküne Maruz kalan Kolon Kesitinde Yük Dağılımı [2]

Kısa kolonların lokal bozulma geriliminin hesaplanabilmesi için, testlerle doğrulanmış birçok empirik metodu geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında lokal bozulma gerilimin hesaplanabilmesi için, geliştirilen empirik formüller kullanılacak.

Bu hesaplama yöntemine göre kısa kolonların her bir flanşı, sabit kalınlığa sahip dikdörtgen elemanlar olarak idealize edilme varsayımına dayanmaktadır. Her flanşın basma yüküne karşı dayanımı ayrı ayrı hesaplanarak; toplanır. Detayları devam eden bölümlerde anlatılan bu metodun, bütün metaller için uygulanabilir olması için formüllerde, malzemenin çekme dayanımı ve basma yükü altındaki elastisite modülü kullanılmıştır.

Kolonun kesit özelliklerine göre öncelikle flanşların ortalama genişlikleri bulunur. Şekil 4.6'da flanşların ortalama genişlikleri hesaplanırken kullanılan parametreler gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Kolon Profil Kesiti [2]
(a) Büküm ile üretilmiş profil kesiti
(b) Ekstrüzyon ile üretilmiş profil kesiti

Büküm yöntemi ile üretilmiş profiller için ortalama genişlik (b_1) değeri Eşitlik 4.5 ile hesaplanır.

$$b_1 = a_1 - \frac{1}{2} \left(t + \frac{r}{2} \right) , \quad b_2 = a_2 - \frac{1}{2} \left(t + \frac{r}{2} \right) \quad (4.5)$$

Ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş profiller için ortalama genişlik (b_1) değeri Eşitlik 4.6 ile hesaplanır.

$$b_1 = a_1 - \frac{t_2}{2} \left(1 - 0,2 \frac{r^2}{t_1 t_2} \right) , \quad b_2 = a_2 - \frac{t_1}{2} \left(1 - 0,2 \frac{r^2}{t_1 t_2} \right) \quad (4.6)$$

Kolonun her flanşı için burkulma faktörünün " K_i " değeri, kolon uzunluğunun genişliğine oranına $\frac{L}{a_i}$ ve flanşların sınır koşullarına bağlı olan bir fonksiyondur. Hesapları basitleştirmek için burkulma faktörü " K_i " Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8'teki gibi hesaplanır.

Tek tarafından desteklenen flanşlar için;

$$K_i = 0,41 \quad (4.7)$$

Her iki tarafından da desteklenen flanşlar için;

$$K_i = 3,60 \quad (4.8)$$

Hesaplanan burkulma faktörünün “ K_i ” değerine göre, her flanş için x_i değeri Eşitlik 4.9’a göre hesaplanır [7].

$$x_i = \frac{b_i}{t_i} \sqrt{\frac{\sigma_{y0.2}}{K_i E_c}} \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.9’da verilen x_i değerinin alacağı değere göre, y_i değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır [7].

$$y_i = \begin{cases} 1,4 - 0,628 x_i & \text{eğer } x_i \leq 1,095 \text{ ise} \\ \frac{0,78}{x_i} & \text{eğer } 1,095 < x_i \leq 1,633 \text{ ise} \\ \frac{0,69}{x_i^{0,75}} & \text{eğer } 1,633 < x_i \text{ ise} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\sigma_{st,i} = y_i \sigma_{y0.2} \quad (4.11)$$

Böylece, bir kesite uygulanabilecek izin verilebilir basma yükü $F_{cc,i}$ Eşitlik 4.12’a göre hesaplanır [7];

$$F_{cc,i} = b_i t_i \sigma_{st,i} \quad (4.12)$$

Her flanşın, izin verilebilir basma gerilmesi değeri Eşitlik 4.11’e göre hesaplanarak toplanır. Tüm kiriş kesiti için toplam izin verilebilir basma yükü “ $F_{cc,t}$ ” Eşitlik 4.13’a göre hesaplanır [7];

$$F_{cc,t} = \sum F_{cc,i} \quad (4.13)$$

4.1.3 Johnson – Euler Denklemi

Şekil 4.3’te yer alan geçiş bölgesindeki kolon bozulma gerilmesini hesaplamada yaygın olarak kullanılan metotlardan biri Johnson-Euler denklemdir ve lokal şekil bozukluğu gerilmesini (cripling stress) içermektedir. Bu Eşitlik 4.14’e göre hesaplanır [2];

$$F_c = F_{cs} \left[1 - \frac{F_{cs}}{4\pi^2 E} \left(\frac{L'}{\rho} \right)^2 \right] \quad (4.14)$$

4.2. İki Boyutlu Yapısal Elemanlarda Kararsızlık (Düz Plakalarda Burkulma)

Euler formülünün veya diğer deyişle P_E Euler burkulma yükünün, kolonun kesit alanına bölünmesi ile burkulma gerilmesi elde edilebilir. Euler formülünden türetilen, plaka burkulması denklemi şu şekilde yazılabilir [5]:

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu_e^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4.15)$$

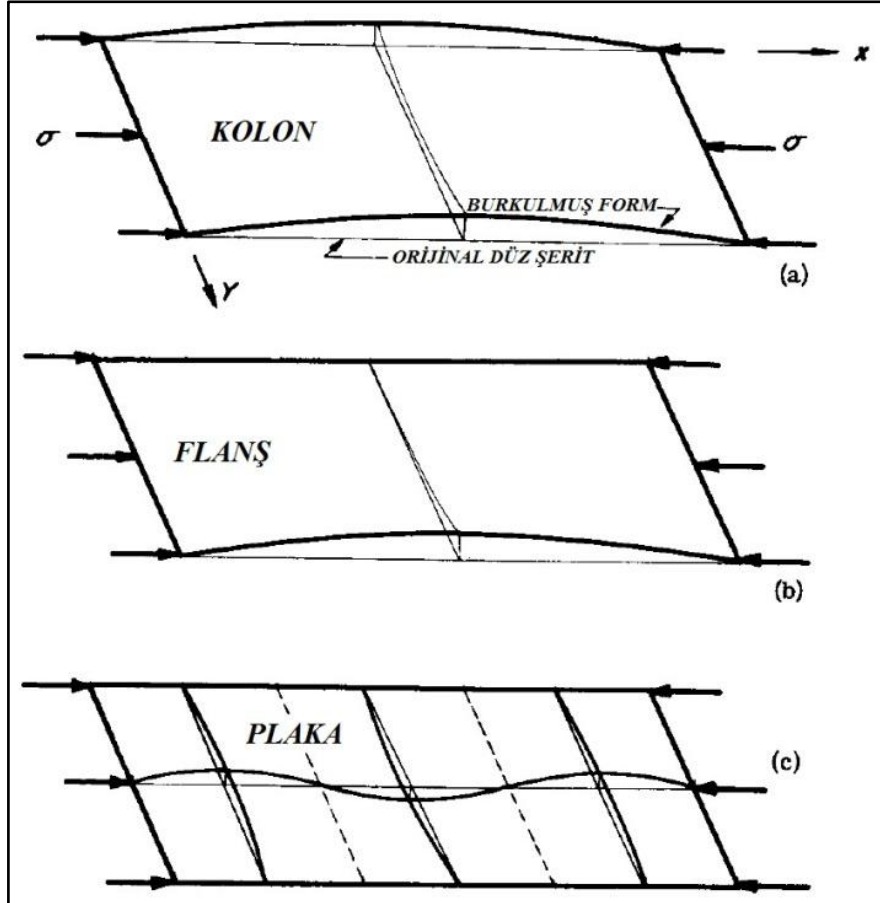
$$F_{cr} = KE \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4.16)$$

$$K = \frac{k\pi^2}{12(1-\nu_e^2)} \quad (4.17)$$

Poisson oranı $\nu_e \approx 0,3$ olan alüminyum alaşımlar için, modifiye edilmiş burkulma katsayısı $K \cong 0,904k$ olarak alınabilir. Eşitlik 4.15 halen Euler denklemleridir, fakat bir kolon gibi yüklenmiş plakalara uygulanır ve panel boyutlarına göre modifiye edilmiş burkulma katsayısı grafikleri oluşturulmuştur [5].

Düz bir plakaya, kendi düzleminde kuvvet uygulandığı zaman; plakanın kalınlık, kenar oranı ve kenar sınır şartlarına bağlı olan bir kritik P_{cr} yükünde, plaka burkulma kararsızlığı gösterir.

- Şekil 4.7 (a)'da, yüklenmemiş her iki kenar da serbest olduğu için, plaka “kolon” gibi davranmaktadır.
- Şekil 4.7 (b)'de, yüklenmemiş kenarlardan birisi sınırlandırılmış ve diğeri serbest olduğu için, bu plakalar “serbest flanş” olarak adlandırılır.
- Şekil 4.7 (c)'de, yüklenmemiş her iki kenar da sınırlandırılmış olduğu için, bu plaka “plaka” (plate) olarak adlandırılır.



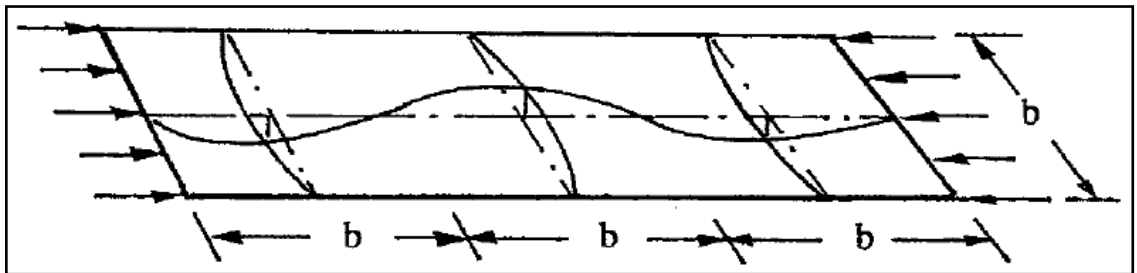
Şekil 4.7. Çeşitli Sınır Koşullarındaki Plakaların Yükleme altındaki Davranışları [2]

4.2.1 Düz Plakaların Basma Yükleri Altında Elastik Burkulma Denklemi

Düz plakaların basma yükleri altında “elastik kararsızlık denklemi” Eşitlik 4.18’deki gibidir [5].

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 k_c E}{12 (1 - \nu_e^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (4.18)$$

Yükleme yönünde uzunluğu artırılan bir plakanın, burkulmaya karşı koyan başlıca sınırlaması, plakanın kısa kenarı boyunca bükülme sınırlamasıdır. Şekil 4.8’de, basma yükü altındaki düz plakanın, üç adet kare dalga oluşturmuş olan burkulma kararsızlık davranışındaki plaka gösterilmiştir [5].



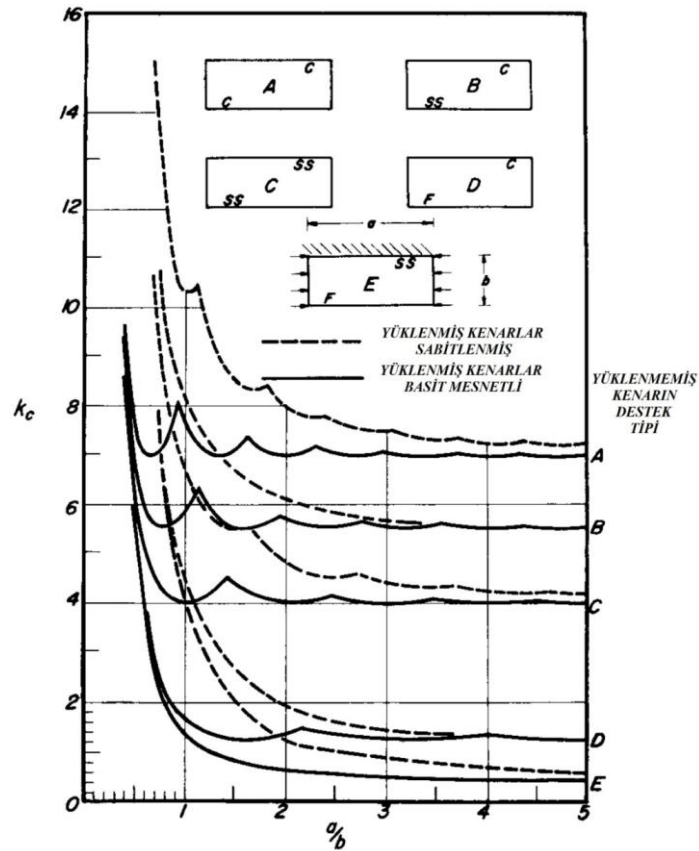
Şekil 4.8. Dört Kenarı Mesnetli Düz Plakanın Basma Burkulması [2]

4.2.1.1 Basma Burkulma Katsayısı (k_c)

Eşitlik 4.17'deki burkulma katsayısının, değişik kenar oranı (a/b) ve kenar sınır koşullarına bağlı grafiği Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Grafikteki kenar destek tiplerinin anlamı şu şekildedir [2]:

- “C” harfi, sabitlenmiş (clamped) veya dönmeye karşı engellenmiş anlamına gelmektedir.
- F harfi, bir serbest kenarı ifade etmektedir
- SS harfleri ise basit mesnetli (simply supported) anlamına gelmektedir.

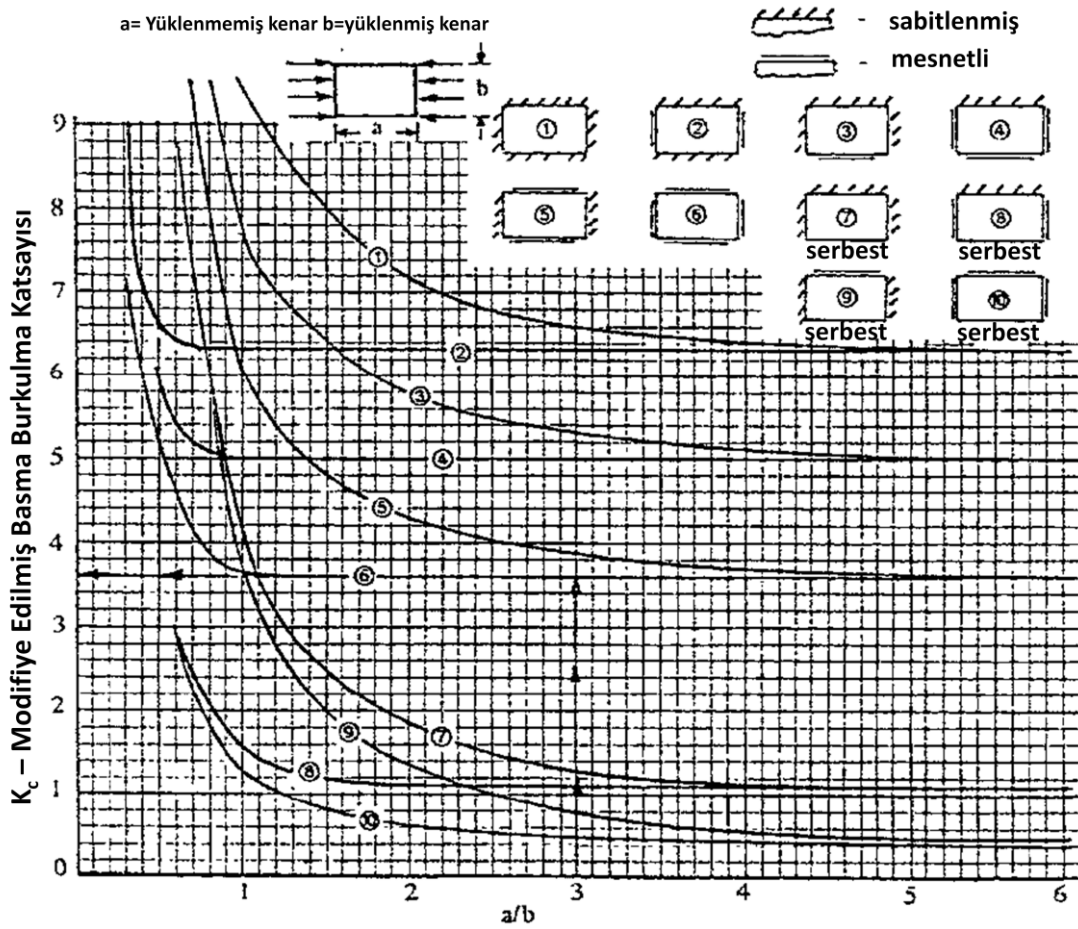


Şekil 4.9. Düz Plakalar için Basma Burkulma Katsayıları [2]

Bu tez çalışmasında; Şekil 4.9'daki düz plakalar için basma burkulma katsayıları grafiğinden faydalanılarak; eğri uydurma yöntemiyle (curve fitting) Eşitlik 4.19'da elde edilen dördüncü dereceden polinom ifadesi kullanılmıştır.

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (4.19)$$

Eşitlik 4.15'deki modifiye edilmiş basma burkulma katsayısının, değişik kenar oranı (a/b) ve kenar sınır koşullarına bağlı grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir [5].



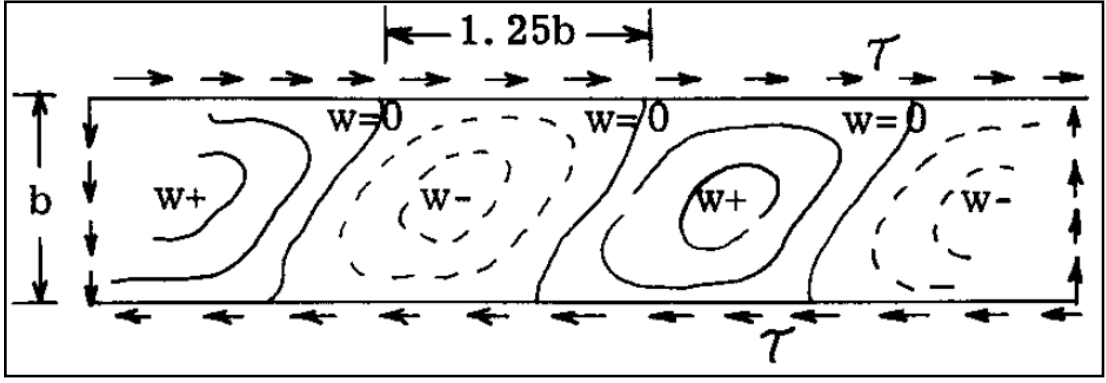
Şekil 4.10. Düz Plakalar için Modifiye Edilmiş Basma Burkulma Katsayıları [2]

4.2.2 Düz Plakaların Kesme Yükleri Altında Elastik Burkulma Denklemi

Düz plakaların kesme yükleri altında “elastik kararsızlık denklemi” Eşitlik 4.20’deki gibidir [5].

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 k_s E}{12(1-\nu_e^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4.20)$$

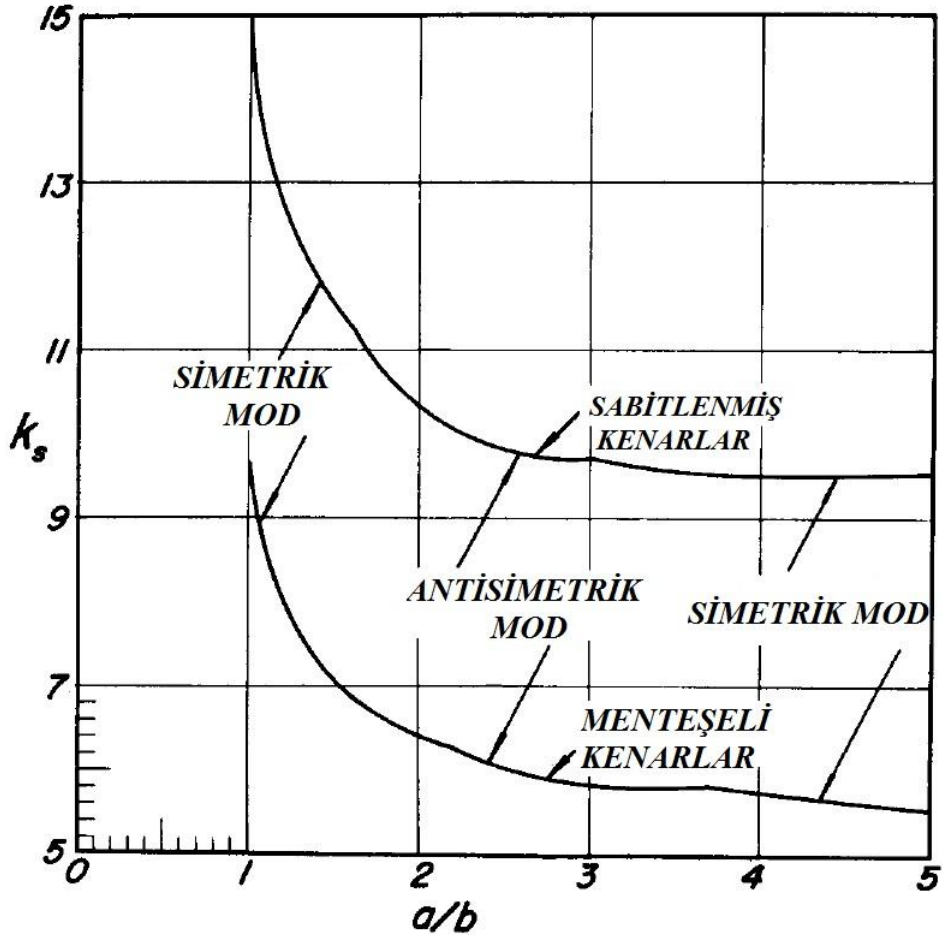
Kesme yüküne maruz kalmış uzun düz dikdörtgen plakalar, plaka kenarlarına 45 derecelik açılardaki düzlemlerde, kendi içlerinde basma gerilimleri yaratırlar. Bu içsel basma gerilimleri, plakanın açılı bir şekilde burkulmasına sebep olur. Şekil 4.11’de, yarım dalga boyu $1.25xb$ olan burkulma şekillerde burkulma kararsızlığı gösterilmiştir [2].



Şekil 4.11. Dört Kenarı Mesnetli Düz Plakanın Kesme Burkulması [2]

4.2.2.1 Kesme Burkulma Katsayısı (k_s)

Eşitlik 4.20'deki burkulma katsayısının, değişik kenar oranı (a/b) ve kenar sınır koşullarına bağlı grafiği Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

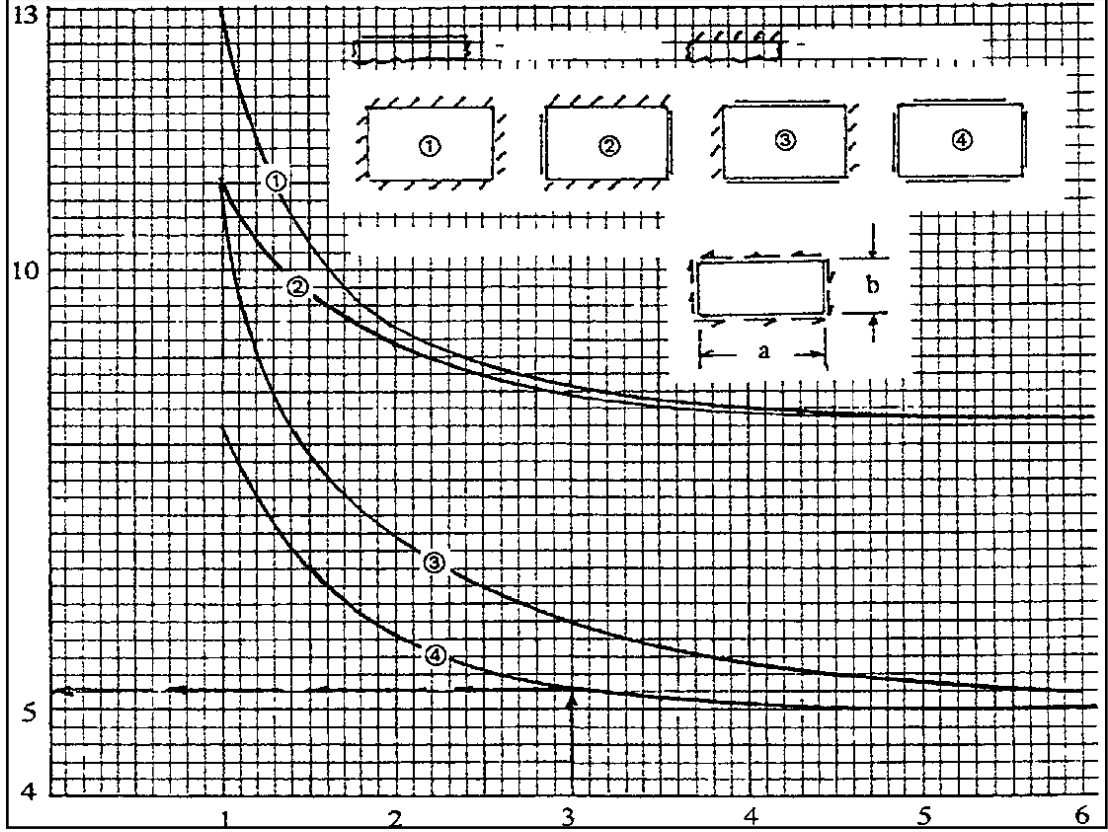


Şekil 4.12. Düz Plakalar için Kesme Burkulma Katsayıları [2]

Bu tez çalışmasında; Şekil 4.12'deki düz plakalar için kesme burkulma katsayıları grafiğinden faydalanılarak; eğri uydurma yöntemiyle (curve fitting) Eşitlik 4.20'de elde edilen altıncı dereceden polinom ifadesi kullanılmıştır.

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (4.20)$$

Eşitlik 4.15'deki modifiye edilmiş kesme burkulma katsayısının, değişik kenar oranı (a/b) ve kenar sınır koşullarına bağlı grafiği Şekil 4.13'de gösterilmiştir [5].



Şekil 4.13. Düz Plakalar için Modifiye Edilmiş Kesme Burkulma Katsayıları [2]

4.2.3 Düz Plakaların Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu

Düz plakalar, basma ve kesme yüklerine aynı anda maruz kalırlar. Bu nedenle, plaka üzerine etkiyen basma ve kesme gerilim değerleri ile plakanın basma ve kesme dayanımları ilişkilendirilerek Şekil 4.14'deki grafiğe göre kombine edilir [2].

Şekil 4.14'de gösterilen basma ve kesme burkulma kombinasyon eğrilerinin denklemi Eşitlik 4.21 ve 4.22'deki gibidir [2].

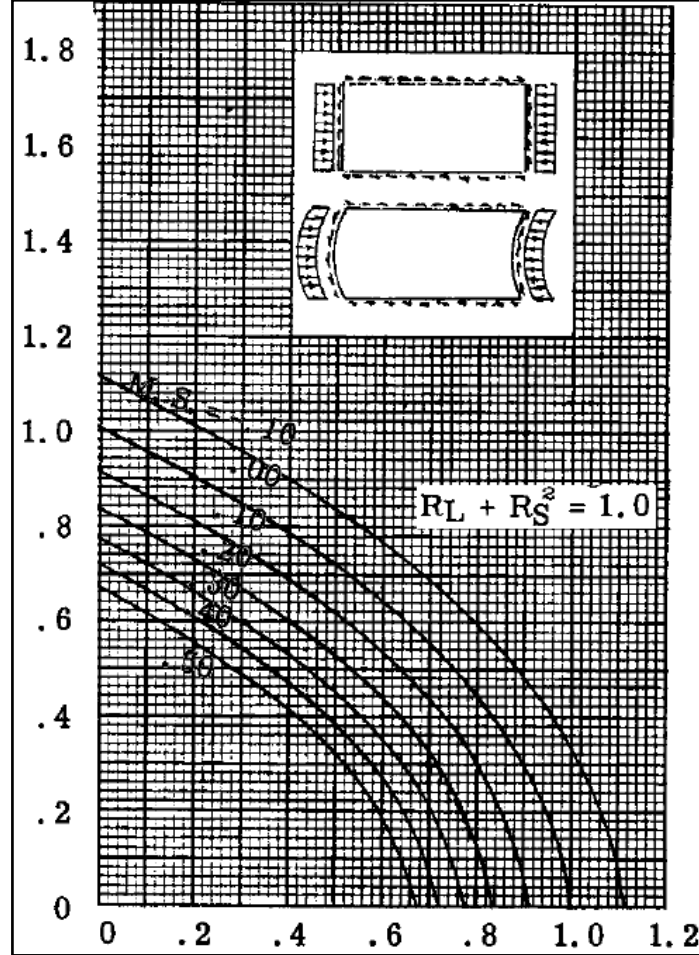
$$R_c + R_s^2 = 1 \quad (4.21)$$

$$G.F. = \frac{2}{\left(R_c + \sqrt{R_c^2 + 4R_s^2}\right)} \quad (4.22)$$

Eşitlik 4.21 ve 4.22’de kullanılan burkulma faktörlerinin denklemi Eşitlik 4.23 ve 4.24’de gösterilmiştir [2]:

$$R_c = \frac{f_c}{F_c} \quad (4.23)$$

$$R_s = \frac{f_s}{F_s} \quad (4.24)$$



Şekil 4.14. Basma ve Kesme Faktörleri Kombinasyonu Grafiği [2]

5. GERİLME ANALİZLERİ ve BOYUTLANDIRMA

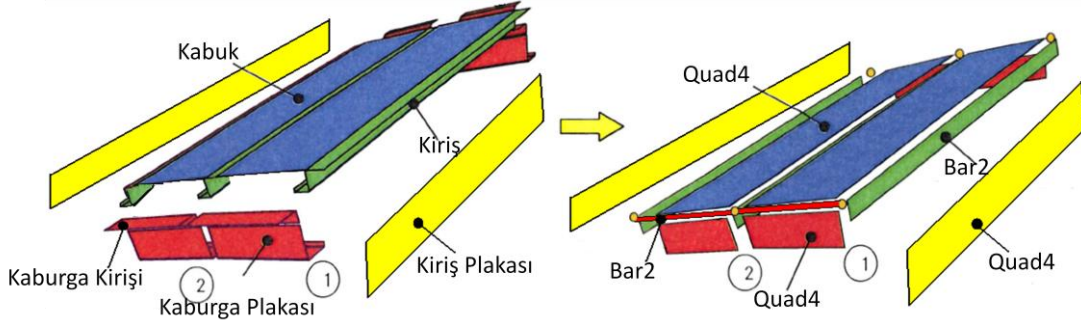
Bu çalışmada gerilme analizlerini gerçekleştirmek için “Sonlu Elemanlar Metodu” ve “Analitik Yöntemler” birlikte kullanılmıştır. Yatay dengeleyiciyi oluşturan yapısal elemanların (Kirişler, Kabuklar vb.) geometrik özelliklerine göre, her yapısal elemanın üzerindeki eksenel gerilimler, kesme gerilimleri ve bükme gerilmeleri analitik yöntemlerle hesaplanarak; her yapısal elemanın minimum bozulma kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, her yapısal elemanın güvenlik faktörü hesaplanarak boyutlandırması iteratif bir şekilde gerçekleştirildi.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanılması esnasında; “Genel Sonlu Elemanlar Modeli” ve “Detay Sonlu Elemanlar Modeli” olmak üzere iki çeşit sonlu elemanlar modeli yaratılmıştır. Devam eden bölümlerde detaylı olarak anlatılan “Genel Sonlu Elemanlar Modeli”, analitik yöntemlerde gerilim hesaplamasında kullanılacak olan statik yüklerin hesaplanabilmesi için kullanılmıştır. Başka bir deyişle, statik olarak belirsiz olan (statically indeterminate) olan yatay dengeleyici modeli; uygulanan aerodinamik yükler ve sınır koşullarına göre sonlu elemanlar metodu ile statik olarak çözdürülerek; her yapısal elemanın üzerine etkiyen kuvvetler (Free Body Forces) elde edilmiştir. “Detay Sonlu Elemanlar Modeli” ise; analitik yöntemlere göre gerçekleştirilen gerilim hesaplarının ve boyutlandırmaların doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri, MSC PATRAN/NASTRAN paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

“Genel Sonlu Elemanlar Modelinin” statik çözüm sonuçlarından elde edilen kuvvetler kullanılarak mukavemet analizleri gerçekleştirilmiştir. Mukavemet analizleri esnasında, her yapısal elemanın kalınlık, kesit ve malzeme özelliğine göre elemanların geometrik özellikleri (eksenel alan, kesme alanı, atalet vb.) hesaplanmıştır. Yapısal elemanların üzerine etkiyen kuvvetlere ve geometrik özelliklerine göre, eleman üzerindeki gerilimler hesaplanmış; elemanın minimum bozulma kriteri ile karşılaştırılmıştır. Analitik hesaplamalar, Microsoft Visual Basic ve Microsoft Excel programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.1. Genel Sonlu Elemanlar Modeli

Bu çalışmada kullanılan yatay dengeleyici, ön taraftan 2 adet ve arka taraftan 2 adet olmak üzere toplam 4 noktadan uçak gövdesine bağlanır. Genel SEM modelinde her yapısal eleman bağlayıcı (perçin) noktaları sınır olacak şekilde, bir eleman olarak modellenmiştir. Başka bir deyişle, yapısal elemanların kesişme noktaları düğüm noktaları olacaktır. Şekil 5.1'de yapısal elemanların, genel sonlu elemanlar modeline uyarlanması gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Genel Sonlu Elemanlar Model Uyarlaması [9]

Yatay dengeleyiciyi oluşturan 1 boyutlu yapısal elemanlar (kirişler ve ana kirişler) sonlu elemanlar modelinde, sadece aksenal direngenliği (axial stiffness) olan 2 düğüm noktalı (node) Bar2 elemanları (lineer eleman) kullanılarak modellenmiştir. 2 boyutlu yapısal elemanlar (kiriş plakaları, kabuklar ve kaburga plakaları) sonlu elemanlar modelinde, aksenal direngenliği (axial stiffness) ve kesme direngenliği (shear stiffness) olan 4 düğüm noktalı (node) Quad4 elemanları (lineer eleman) kullanılarak modellenmiştir.

Bar Eleman Topolojisi [14]:

MSC. Patran üç çeşit bar eleman topolojisi içerir; Bar2, Bar3 ve Bar4.

Genel Bilgi

Şekil = Kolon

Eleman boyutluluğu = 1

Köşe düğüm noktası sayısı = 2

Kenar sayısı = 1

Yüzey sayısı = 0

Yüzey kenar sayısı = 0

Bar2'ye Özgü Bilgi

Eleman ismi = Bar2

Düğüm noktası sayısı = 2

Mertebe = Lineer

Dejenere eleman ismi = <hiç>

Tablo 5.1. Bar2 Köşe Numaralandırması [14]

Kenar Numarası	Düğüm Noktası 1	Düğüm Noktası 2
1	1	2

Tablo 5.2. Bar2 Düğüm Noktası Parametrik Koordinatları [14]

Düğüm Noktası Numarası	Xi
1	-1.0
2	1.0

Bu tez çalışmasında kullanılan Bar2 elemanının sonlu elemanlar topolojisi Tablo 5-1 ve Tablo 5-2’de gösterilmiştir. Bar2 elemanın genel görünümü Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. “Bar” eleman [14]

Quad Eleman Topolojisi [14]:

MSC. Patran altı çeşit Quad eleman topolojisi içerir; Quad4, Quad5, Quad8, Quad9, Quad12 ve Quad16.

Genel Bilgi

Şekil = Dörtgen

Eleman boyutluluğu = 2

Köşe düğüm noktası sayısı = 4

Kenar sayısı = 4

Yüzey sayısı = 1

Yüzey kenar sayısı = 4

Quad4'a Özgü Bilgi

Eleman ismi = Quad4

Düğüm noktası sayısı = 4

Mertebe = Lineer

Dejenere eleman ismi = Tria3

Tablo 5.3. Quad4 Yüzey Numaralandırması [14]

Yüzey Kimliği	Anlam	Kenar 1	Kenar 2	Kenar 3	Kenar 4
1	1	1	2	3	4

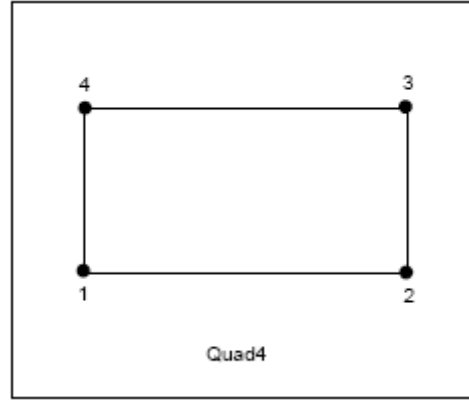
Tablo 5.4. Quad4 Kenar Numaralandırması [14]

Kenar Numarası	Düğüm Noktası 1	Düğüm Noktası 2
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	1

Tablo 5.5. Quad4 Düğüm Noktası Parametrik Koordinatları [14]

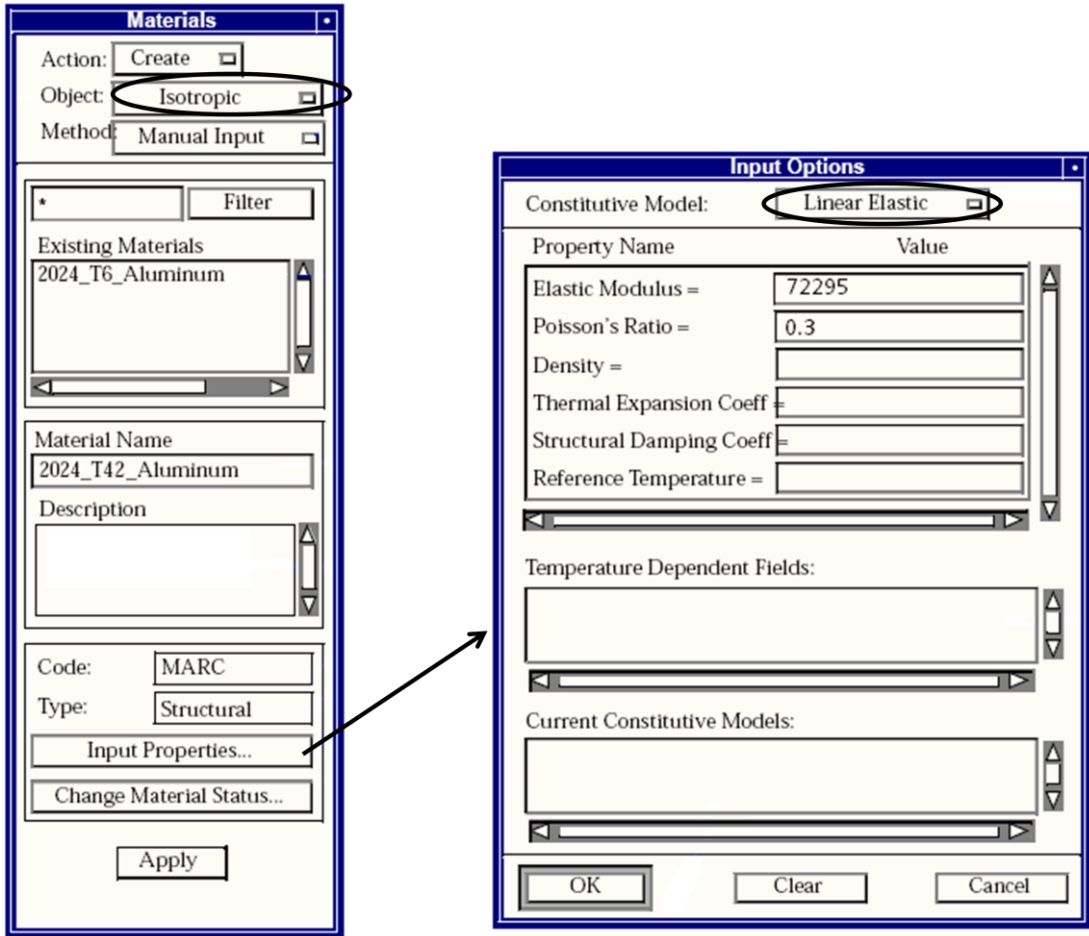
Düğüm Noktası Numarası	Xi/Eta
1	-1.0, -1.0
2	1.0, -1.0
3	1.0 1.0
4	-1.0, 1.0

Bu tez çalışmasında kullanılan Quad4 elemanın sonlu elemanlar topolojisi Tablo 5-3, Tablo 5-4 ve Tablo 5-5'de gösterilmiştir. Quad4 elemanın genel görünümü Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



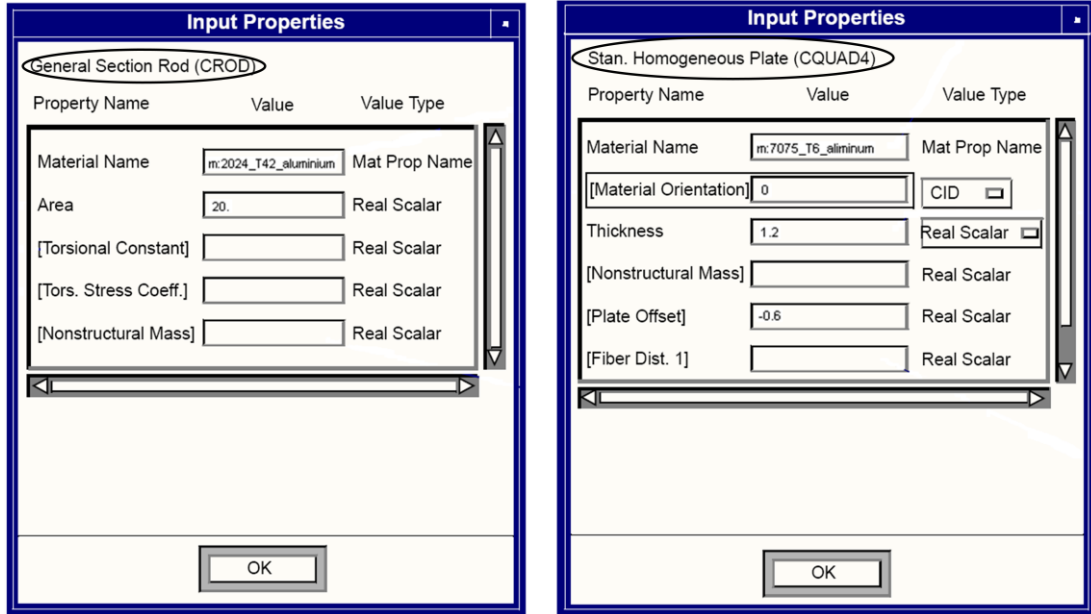
Şekil 5.3. “Quad” eleman [14]

Bu çalışmadaki yatay dengeleyiciyi oluşturan yapısal elemanların tamamı, “İzotropik” ve “Lineer Elastik” olan alüminyum alaşım malzemeden üretilmiştir. Genel sonlu elemanlar modelindeki yapısal elemanların, malzeme bilgisi şekil 5.4’te gösterildiği gibi MSC. Patran programının “Materials” modülü kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 5.4. MSC. Patran “Materials” modülü

Yatay dengeleyicinin yapısal elemanlarının (kabuk, kiriş plakası, kiriş vb.) genel sonlu elemanlar modeli hazırlanırken; yaratılan “Bar2” ve Quad4” elemanlarının geometrik özellikleri (kalınlık, kesit bilgileri, malzeme vb.), MSC. Patran programının “Properties” modülü kullanılmıştır. Yatay dengeleyicideki bir boyutlu elemanlardan kirişler, uzun yapılar olduğundan dolayı, bükme direngenliği çok düşük olacaktır. Bu nedenle “Bar2” elemanları için; sadece eksenel yük taşıma kapasitesi olan “Rod” özelliği kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, yatay dengeleyicideki iki boyutlu elemanlardan kabuklar ve kiriş plakaları hem eksenel yük, hem de kesme yüklerine mukavemet gösterecektir. Bu nedenle “Quad4” elemanları için; hem eksenel direngenliği olan, hem de kesme direngenliği olan “Shell” özelliği kullanılmıştır. Analitik analiz sonuçlarına göre geometrik özellikleri değişen (kalınlık artışı, kesit artışı vb.) yapısal elemanların yeni geometrik özellikleri her iterasyon başlangıcında sonlu elemanlar modelinde değiştirildi. Şekil 5.5’de, bir boyutlu elemanlar için yenilenen geometrik özellik olan “Alan” değeri ve iki boyutlu elemanlar için yenilenen geometrik özellik olan “Kalınlık” değerleri gösterilmiştir.



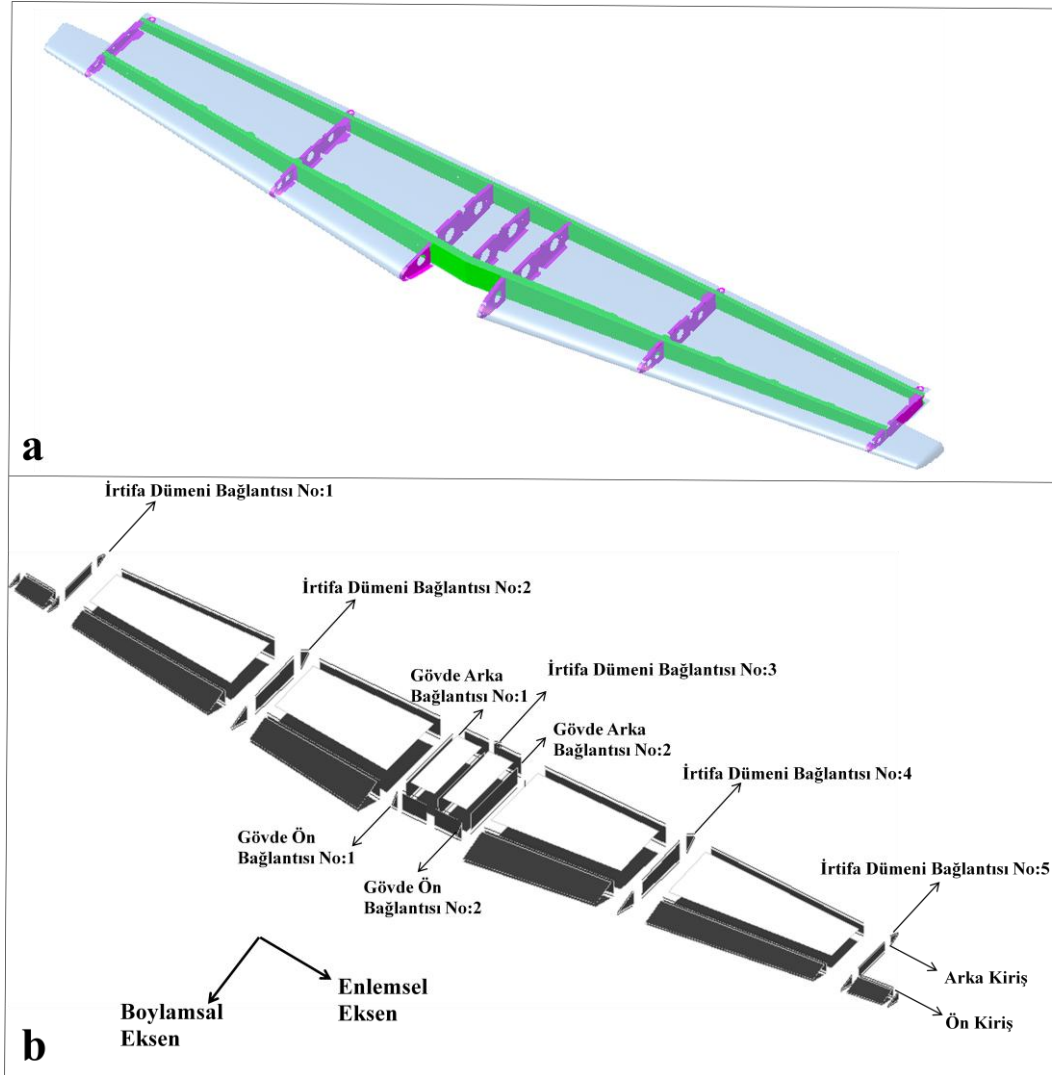
Şekil 5.5. MSC. Patran “Properties” modülü

5.2. Genel Sonlu Elemanlar Modeli Numaralandırma Metodolojisi

Yatay dengeleyicinin başlangıç sonlu elemanlar modeli şekil 5.6’da gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yatay dengeleyici, boylamsal yönde gövdeye 2 farklı düzlemde bağlanıyor. Aynı zamanda, hareketli bir komponent olan “İrtifa Dümeni” ise boylamsal yönde, 5 farklı düzlemde yatay dengeleyiciye bağlanıyor. Başka bir deyişle, yatay dengeleyici uçağın 2 farklı komponentine (gövde ve irtifa dümeni),

boylamsal yönde 7 farklı düzlemde bağlanarak bir köprü görevi görüyor (Şekil 5.2). Bağlantı düzlemleri, yatay dengeleyiciye lokal yük uygulama bölgeleri olacağı için; her bağlantı düzlemine bir kaburga elemanı (rib) yerleştirilmiştir. Bu nedenle yatay dengeleyicinin ilk modeli, boylamsal yönde 7 düzlemde bölündüğü için, 8 bölümden oluşuyor.

Aynı şekilde, yatay dengeleyici enlemsel yönde, gövdeye 2 farklı düzlemde (ön ve arka bağlantılar) bağlanıyor. Bu nedenle, yatay dengeleyicinin kiriş plakları bu 2 düzleme yerleştirilerek; yatay dengeleyici enlemsel yönde 2 bölümden oluşuyor.



Şekil 5.6. Yatay Dengeleyici Başlangıç Modeli
a) CAD Modeli
b) Genel Sonlu Elemanlar Modeli

Tekrarlanan analitik analiz sonuçlarına göre, yapısal elemanlarının başarısızlık durumları göz önünde bulundurularak, her yeni iterasyonda yatay dengeleyiciye yeni kaburga elemanları ve/veya kiriş elemanları eklenmiştir. Bu nedenle yatay

dengeleyiciyi iteratif bir şekilde daha fazla düzlemede bölünerek yatay dengeleyicinin yapısal tasarımı tamamlanmıştır.

Her iterasyonda, genel sonlu elemanlar modeli geliştirilerek değiştirildiği için, model veri tabanını ve modeldeki elemanlar ile düğüm noktalarını isimlendirme (numaralandırma) metodolojisi geliştirilmiştir (Şekil 5.7). Numaralandırma metodolojisi aynı zamanda, analitik çözümlerin gerçekleştirildiği Microsoft Visual Basic programlama dilinde yazılan program kodunun ana mantığını oluşturuyor.

MSC. Patran Model Veri Tabanı :

Sonlu elemanlar modelinin iterasyonlar için numaralandırma metodolojisi aşağıdaki gibidir.

Numara Formatı: Yatay_Dengeleyici_VV

VV: Modelin versiyon numarasını gösteren iki haneli sayı.

Düğüm Noktaları:

Düğüm noktaları bulunduğu konuma göre aşağıdaki metodolojiye göre numaralandırılmıştır.

Numara Formatı: ABCC

A: Düğüm noktasının boylamsal yöndeki (kiriş sayısına bağlı olarak) konumunu belirten tek haneli sayıdır.

Hücum Kenarı için:

A="1"

İlk Kirişten Son Kirişe Kadar:

A="2" ve artan değerler

B: Düğüm noktasının dikey yöndeki (üst veya alt yüzeydeki) konumunu belirten tek haneli sayıdır.

Üst Yüzey:

B="0"

Alt Yüzey:

B="1"

CC: Dügüm noktasının enlemsel yöndeki (kaburga sayısına bağlı olarak) konumunu belirten çift haneli sayıdır.

İlk Kaburgadan Son Kaburgaya Kadar:

C="01" ve artan değerler

Elemanlar:

Elemanlar bulunduğu konuma ve eleman tipine göre aşağıdaki metodolojiye göre numaralandırılmıştır.

Numara Formatı: ABCC

A: Elemanın tipini belirten tek haneli sayıdır.

Kiriş Plaka Elemanları için:

A="1"

Üst Kabuk Elemanları için:

A="2"

Alt Kabuk Elemanları için:

A="3"

Kaburga Elemanları için:

A="4"

Üst Kiriş Elemanları için:

A="5"

Alt Kiriş Elemanları için:

A="6"

Üst Kabuk Kiriş Elemanları için:

A="7"

Alt Kabuk Kiriş Elemanları için:

A="8"

B: Elemanın boylamsal yöndeki (kiriş sayısına bağlı olarak) konumunu belirten tek haneli sayıdır.

Hücum Kenarı için:

B="1"

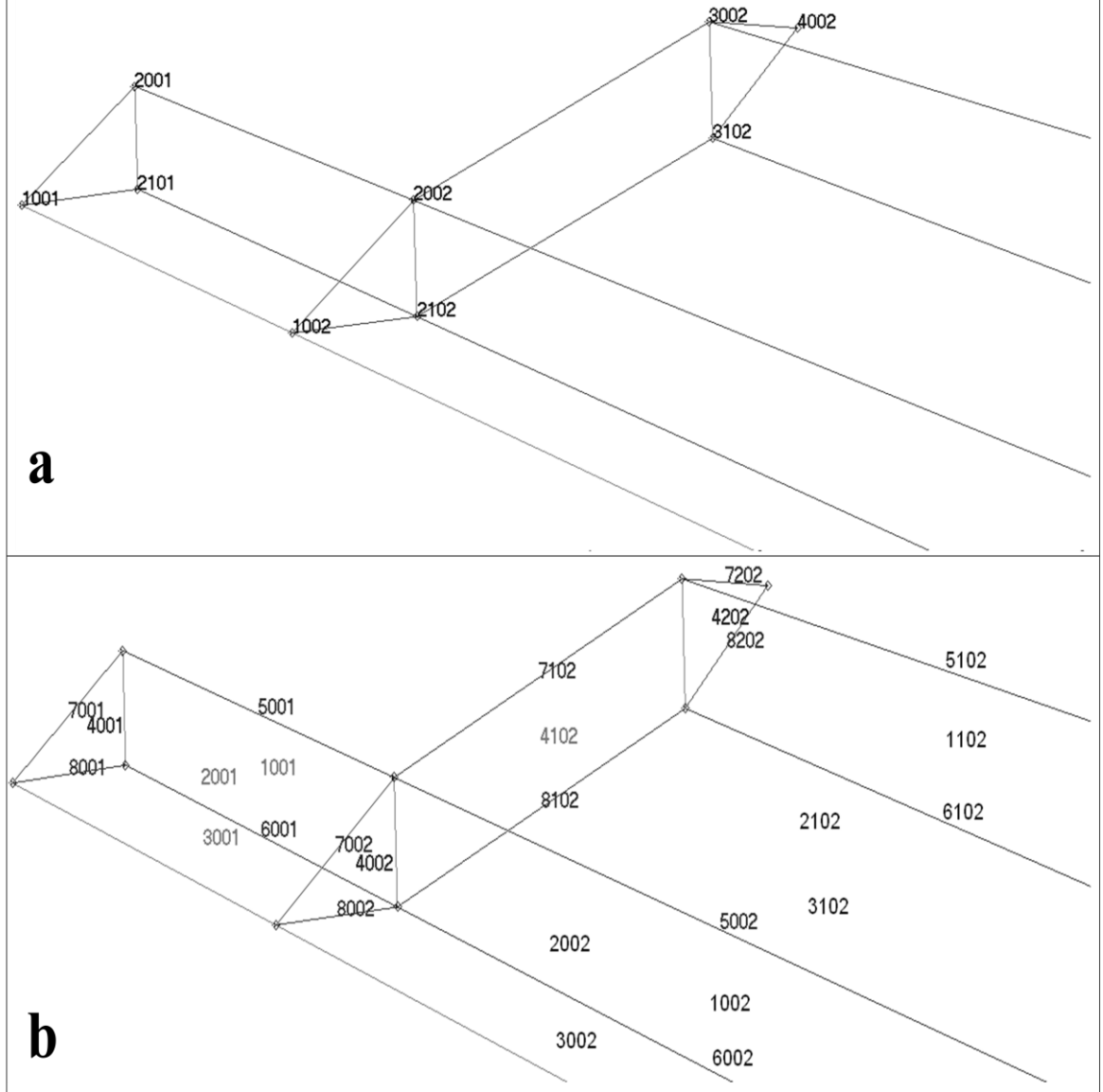
İlk Kirişten Son Kirişe Kadar:

B="2" ve artan değerler

CC: Elemanın enlemsel yöndeki (kaburga sayısına bağlı olarak) konumunu belirten çift haneli sayıdır.

İlk Kaburgadan Son Kaburgaya Kadar:

C="01" ve artan değerler



Şekil 5.7. Sonlu Elemanlar Modeli 1. Ve 2. Kısımın Numaraları

- a) Düğüm Noktası Numaraları
- b) Eleman Numaraları

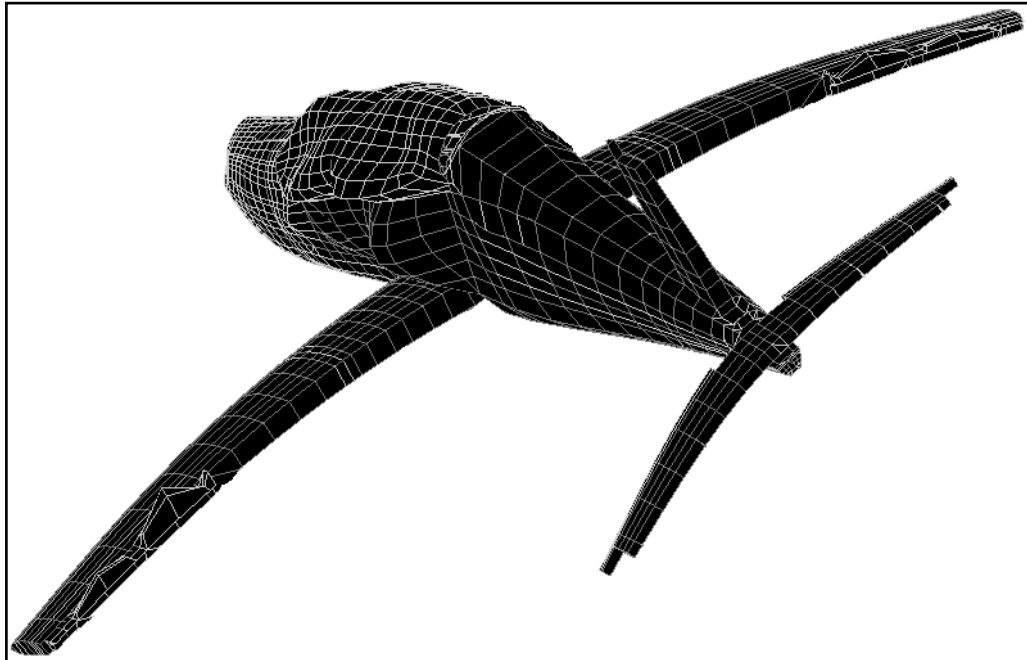
5.3. Tasarım Yükleri

Uçak manevraları uçak üzerinde üç eksen de oluşan hareketlerle saptanır. Bu çalışmada, uçağın bu üç eksenindeki manevra hareketlerine göre kritik yük durumları belirlendi. Buna göre, akrobasi uçağının yatay dengeleyicisi için 4 ayrı kritik yük senaryosu yaratıldı:

1. Yalpa manevrası,
2. Yunuslama manevrası,
3. Dönme manevrası ve
4. Yana yatarak dönüş manevrası

5.3.1 Yalpa Manevrası

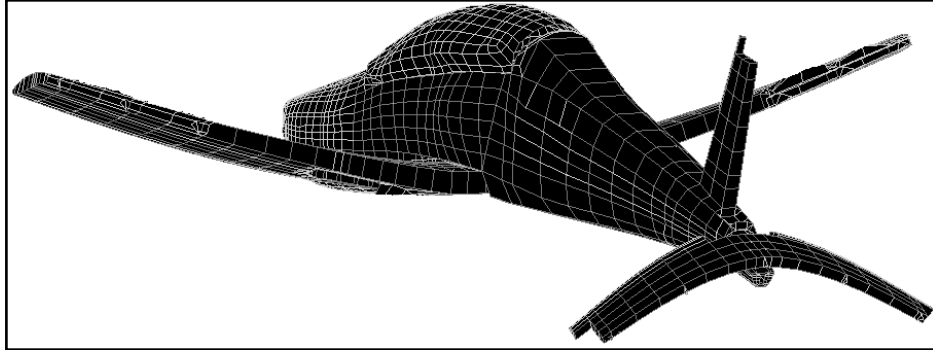
Uçağın boyuna olan eksen etrafındaki dönme hareketi yalpalama olarak tanımlanır. Yalpalama(sağa-sola yatma) hareketini kontrolü kanat kaçış kenarında bulunan kanatçıklar(aileron) ile sağlanır. Pilot kabini içinde bulunan kontrol levyesinin sağa sola hareketi ile kumanda edilir. Örneğin, sol yalpa kanatçığını aşağıya indirmek sol kanadı yukarıya, sağ kanadı ise aşağıya iter[13]. Yalpa manevrası esnasında uçak üzerine etkiyen yükler sonucu oluşan deformasyon Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Yalpa Manevrası Esnasında Uçağın Deformasyonu

5.3.2 Yunuslama Manevrası

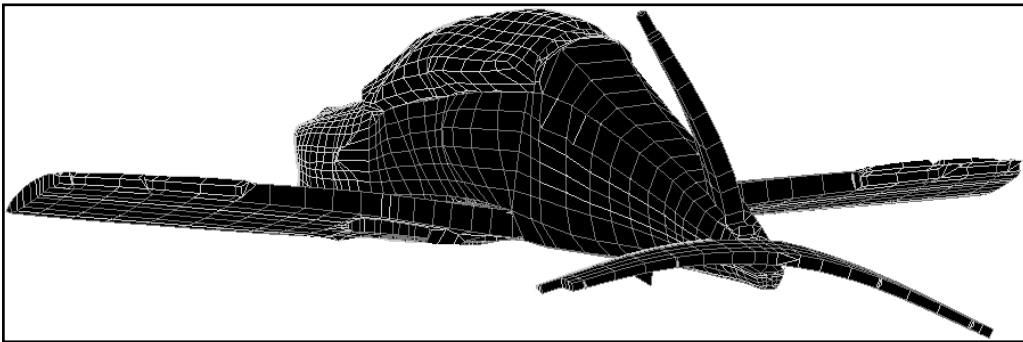
Uçağın kanat boyuna olan eksenini etrafındaki dönme hareketi yunuslama olarak tanımlanır. Yunuslama(dalış-tırmanış) hareketi yatay kuyrukta bulunan irtifa dümeni (elevator) ile sağlanır levyenin ileri geri hareketi ile kumanda edilir. Örneğin, irtifa dümenini aşağıya indirmek uçağın kuyruğunu yukarıya doğru kaldırarak dalış geçmesini sağlar[13]. Yunuslama manevrası esnasında uçak üzerine etkiyen yükler sonucu oluşan deformasyon Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Yunuslama Manevrası Esnasında Uçağın Deformasyonu

5.3.3 Dönme Manevrası

Uçak gövdesinin üst ve alt yönünde yükseklik olarak belirtilen eksenini etrafındaki dönme hareketi sapma veya dönüş olarak tanımlanır. Dönüş (sağa-sola sapma) hareketi dikey kuyrukta bulunan istikamet dümeni (rudder) ile sağlanır. Pilot kabini tabanında bulunan pedallara sağ-sol ileri basarak kumanda edilir. Örneğin, istikamet dümenini sola çevirmek uçağın burnunu da sola çevirecektir[13]. Dönme manevrası esnasında uçak üzerine etkiyen yükler sonucu oluşan deformasyon Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

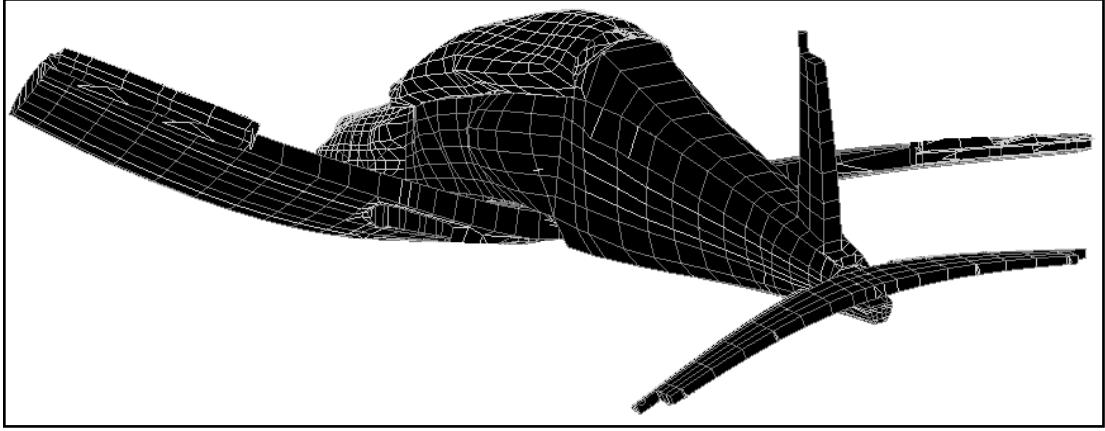


Şekil 5.10. Dönme Manevrası Esnasında Uçağın Deformasyonu

5.3.4 Yana Yatarak Dönüş Manevrası

Yana yatarak dönebilmek için kontrol yüzeyleri aynı anda kullanılabilir. Düzgün bir şekilde, belirli bir açıda dönmek için, yalpa kanatçıkları ve istikamet dümeni,

sapma ve yalpa hareketlerini yaratırlar[13]. Yana yatarak dönüş manevrası esnasında uçak üzerine etkiyen yükler sonucu oluşan deformasyon Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



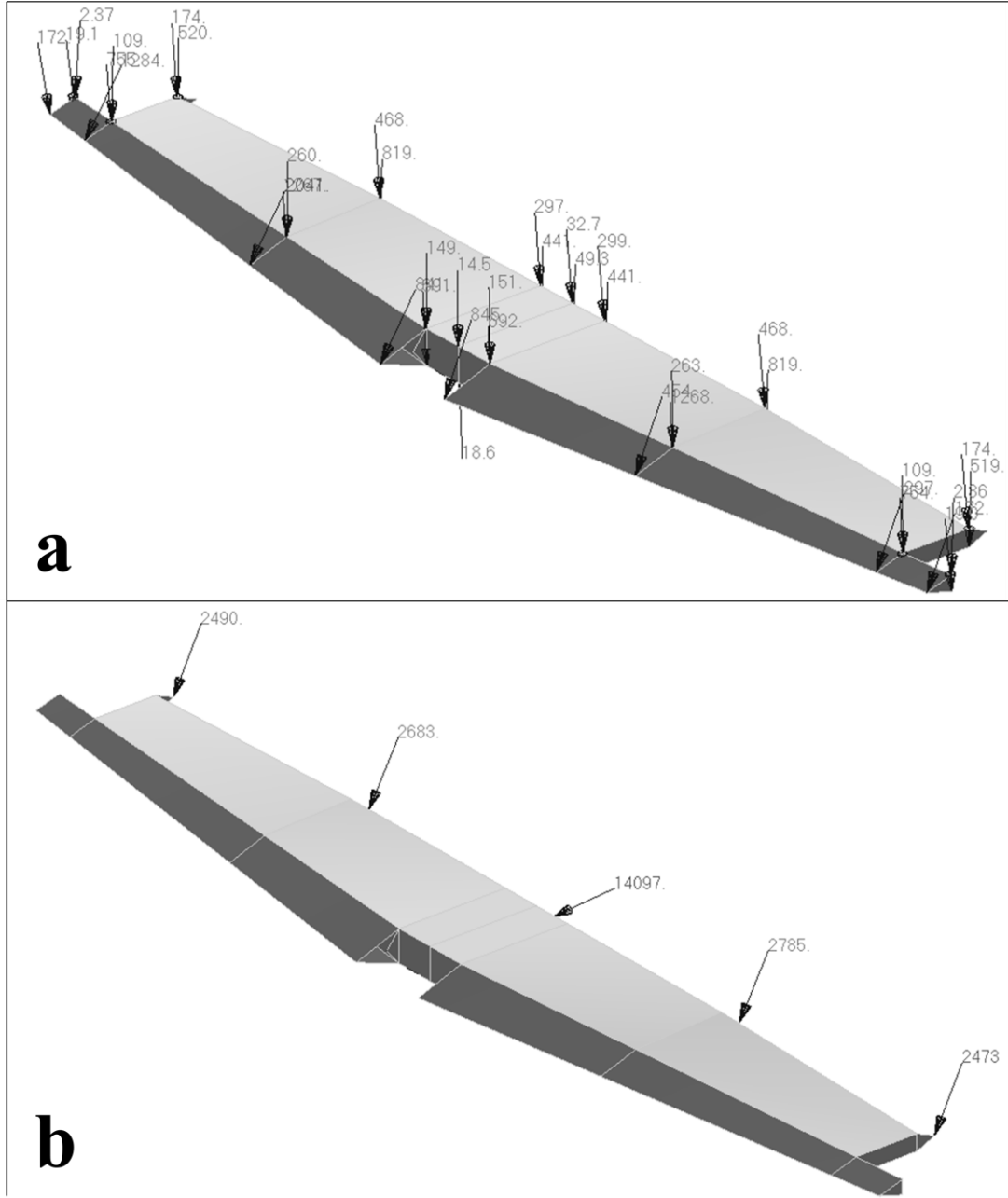
Şekil 5.11 Yana Yatarak Dönüş Manevrası Esnasında Uçağın Deformasyonu

5.3.5 Genel Sonlu Elemanlar Modeli Yük ve Sınır Koşulları

Yatay dengeleyici üzerine etkiyen 2 çeşit yük mevcuttur:

1. Üst ve alt kabuğa etkiyen aerodinamik yükler
2. Manevra esnasında irtifa dümeninin tepki kuvvetleri

Aerodinamik yükler, sonlu elemanlar modelinde üst ve alt kabuk üzerindeki düğüm noktalarına noktasal kuvvet olarak her yük durumu için yüklenmiştir. Ayrıca her yük durumu için, irtifa dümeninin tepki kuvvetleri, yatay dengeleyici üzerinde beş bağlantı noktasına noktasal kuvvet olarak yüklenmiştir. Sonlu elemanlar modelindeki aerodinamik kuvvetler ve tepki kuvvetleri Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Sonlu Elemanlar Modeli Yükleri

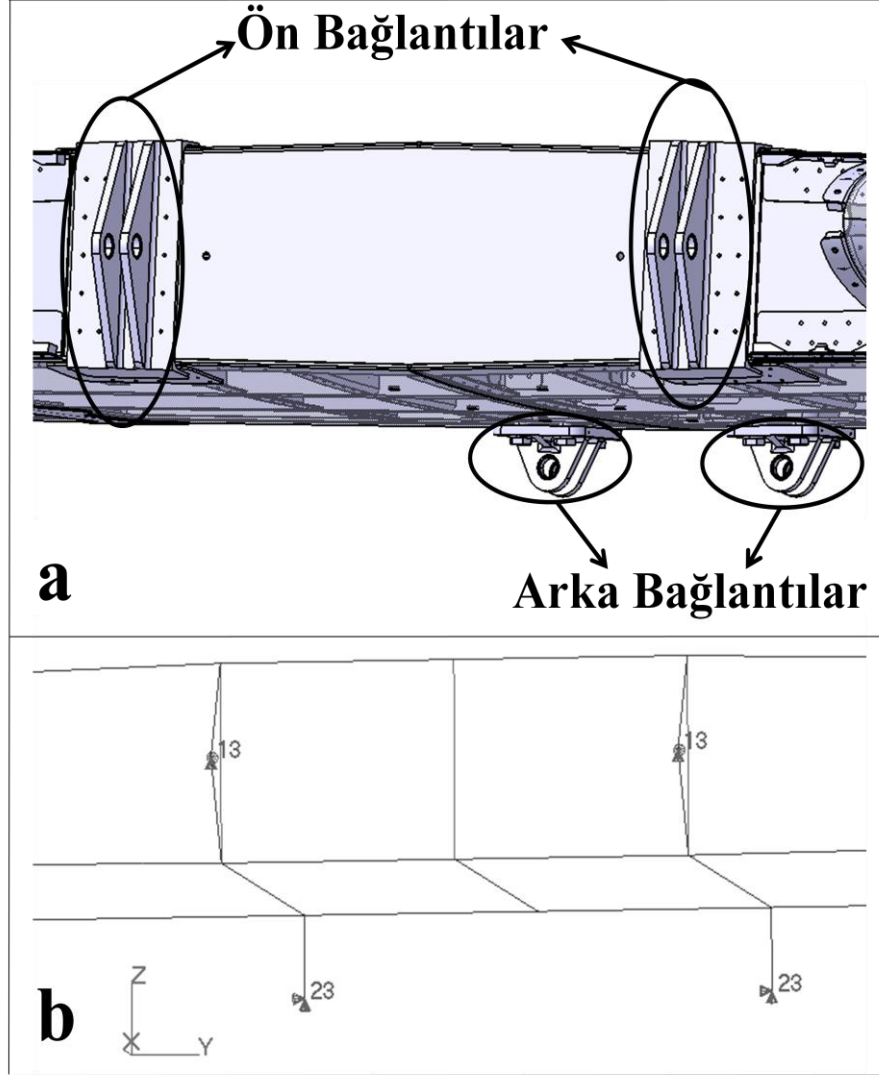
a) Aerodinamik Yükler

b) İrtifa Dümeni Tepki Kuvvetleri

Yatay dengeleyici, uçak gövdesine dört noktadan rulmanlar aracılığıyla bağlanır. Rulman bağlantıları, bağlayıcılar rulman deliğinin eksenine hareket serbestliği olacak şekilde yapılır. Başka bir deyişle, yatay dengeleyicinin bağlantı noktaları, rulman düzleminde sınırlandırılmış ve rulman deliği ekseninde serbesttir.

Bu çalışmada kullanılan yatay dengeleyicinin öndeki iki bağlantısının rulman düzlemi "XZ" düzleminde (boylamsal eksen ve yükseklik eksen düzlemi) olduğu için, sonlu elemanlar modeli sınır koşulları Şekil 5.13'de olduğu gibi

oluşturulmuştur. Aynı zamanda yatay dengeleyicinin arkadaki iki bağlantısının rulman düzlemi “YZ” düzleminde (enlemsel eksen ve yükseklik eksen düzlemi) olduğu için, sonlu elemanlar modeli sınır koşulları Şekil 5.13’de olduğu gibi oluşturulmuştur.



Şekil 5.13. Yatay Dengeleyici Bağlantısı

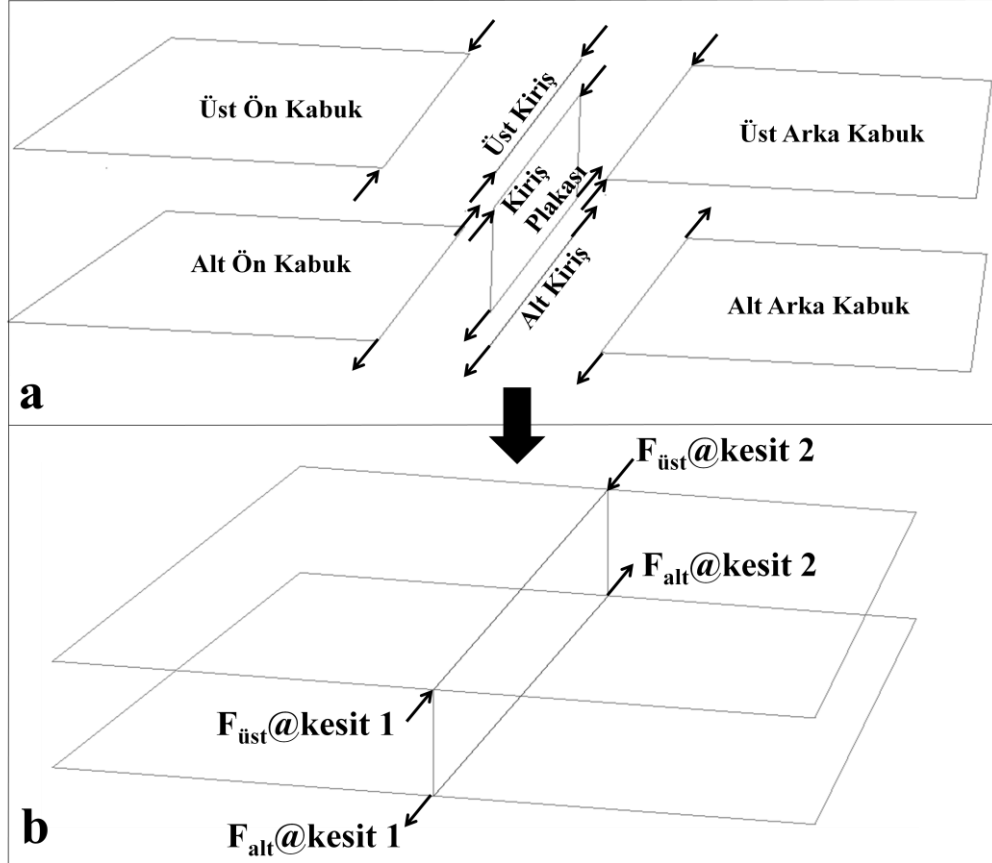
a) CAD Modeli

b) Genel Sonlu Elemanlar Modeli Sınır Koşulları

5.4. Genel Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Yatay dengeleyiciyi oluşturan yapısal elemanlar, geometrik ve malzeme özelliklerine göre MSC. Patran programında modellendikten sonra; yük ve sınır koşulları modele uygulanarak MSC. Nastran programı aracılığıyla “Lineer Statik Sonlu Elemanlar Analizi” bütün yük durumları için gerçekleştirilmiştir. Çözdürülen sonlu elemanlar modelinin analiz sonuçlarına göre, her kolon ve plaka için bütün yük durumlarına göre düğüm noktalarındaki tepki kuvvetleri (free body forces) elde edildi.

Uçaktaki yapısal elemanlar, üzerlerine etkiyen kuvvetlere birlikte karşı koydukları için, yapısal elemanlar üzerindeki gerilim değerleri kesitteki bütün yapısal elemanlar için birlikte hesaplanmıştır. Başka bir deyişle, üst kabuk ve alt kabuktaki düğüm noktalarına bağlı bütün elemanların tepki kuvvetleri Şekil 5.14'de gösterildiği gibi toplanarak, kiriş kesitinin üst ve alt düğüm noktalarındaki toplam tepki kuvvet hesaplanmıştır.



Şekil 5.14. Birinci ve İkinci Kesitlerin Düğüm Noktalarındaki Toplam Kuvvetler

Şekil 5.15'te gösterildiği gibi, kiriş-kabuk birlikte analiz edilmiştir. Her kiriş – kabuk kesitinde bulunan, tepki kuvvetleri toplanarak toplam kuvvetin hesaplandığı yapısal elemanlar şunlardır:

1. Üst kiriş
2. Alt Kiriş
3. Kiriş Plakası
4. Üst Ön Kabuk
5. Üst Arka Kabuk
6. Alt Ön Kabuk
7. Alt Arka Kabuk

Modeldeki bütün kiriş-kabuk kesitlerindeki kuvvetler, MSC. Patran programı kullanılarak; “Text” dosyalarına yazdırıldı. Her kiriş düzlemi için ayrı ayrı “Text” dosyaları oluşturuldu. Analizi gerçekleştirilen yatay dengeleyicinin ilk iterasyon modeli iki kiriş düzleminden oluştuğu için, ön ve arka kiriş için tepki kuvvet bilgilerini içeren iki adet “Text” dosyası oluşturuldu. Şekil 6.8’de gösterilen bu “Text” dosyaları, bütün yük durumları için lokal koordinat sistemine göre düğüm noktalarındaki tepki kuvvetlerinin özetini içeriyor.

Düğüm Noktası No	Lokal Koordinat Sistem No	$F_{bileske}$	$M_{bileske}$	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
1001	4	91.47	2.28	-4.13	-57.42	2.26	0.05	-0.23	
1002	4	151.68	63.15	101.94	-81.96	-76.79	60.03	-6.01	-18.66
2001	4	99.94	6.20	-54.33	-4.99	83.73	5.78	1.60	1.56
2002	4	352.48	81.87	-76.71	-241.05	245.46	83.77	1.73	3.83
2101	4	65.24	7.05	33.37	3.21	-55.97	-6.96	-0.23	-1.15
2102	4	419.94	63.69	-75.40	325.92	-253.85	-12.59	-6.29	-62.12
Totals	4	0.00	0.26	-0.00	0.00	0.00	0.05	-0.14	0.21
1001	4	152.46	2.54	-16.21	3.48	-151.56	-2.47	-0.55	-0.13
1002	4	103.90	84.65	66.58	54.20	58.52	-70.71	3.71	-46.38
2001	4	118.91	5.23	29.06	2.48	-115.28	-4.10	-1.20	-3.02
2002	4	690.59	173.60	-184.77	591.02	-305.72	-141.15	1.76	-101.04
2101	4	84.16	5.34	-37.84	-2.89	75.12	-4.34	-1.28	2.84
2102	4	795.88	107.38	143.18	-648.29	438.92	-107.07	-1.60	7.99
Totals	4	0.00	0.38	0.00	-0.00	0.00	-0.08	-0.16	-0.34
1001	4	122.83	0.29	-7.71	2.78	-122.55	-0.21	0.19	-0.06
1002	4	61.76	11.24	46.91	38.20	-12.44	-8.20	-0.65	-7.65
2001	4	17.66	0.73	-10.56	-0.92	-14.12	0.31	-0.19	-0.63
2002	4	443.20	31.59	-217.28	386.12	11.19	-24.60	1.67	-19.75
2101	4	8.65	1.53	0.31	0.38	8.63	-1.35	-0.33	0.64
2102	4	483.88	31.70	188.33	-426.56	129.29	-31.70	0.09	0.14
Totals	4	0.00	0.29	-0.00	0.00	-0.00	0.02	-0.20	0.22
1001	4	151.61	0.77	-12.02	3.22	-151.10	-0.73	0.22	-0.14
1002	4	66.69	22.93	47.91	45.22	-10.36	-22.61	0.64	-3.74
2001	4	32.02	2.22	-9.25	-0.91	-30.64	2.02	-0.27	-0.86
2002	4	557.05	38.89	-257.03	493.77	-20.88	-23.62	4.24	-30.60
2101	4	18.96	3.39	-0.50	0.36	18.95	-3.17	-0.69	0.99
2102	4	619.96	58.52	230.89	-541.66	194.02	-58.39	0.93	3.70
Totals	4	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.27	0.04

Şekil 5.15. MSC. Patran Tepki Kuvvet Veri Çıktısı

Kesit üzerindeki eksenel kuvvetleri hesaplamak için bu “Text” dosyaları kullanıldı. Bunun yanı sıra, MSC. Patran programı kullanılarak iki boyutlu elemanların (kabuklar ve kiriş plakası) kesme gerilim değerleri başka bir “Text” dosyasına yazdırıldı. Sonlu elemanlar programından veri çıktısı (output) olarak alınan bu eksenel kuvvetler ve kesme gerilimleri, analitik hesapların veri girişi (input) olarak kullanıldı.

5.5. Analitik Yöntemlerle Analiz Sonuçları

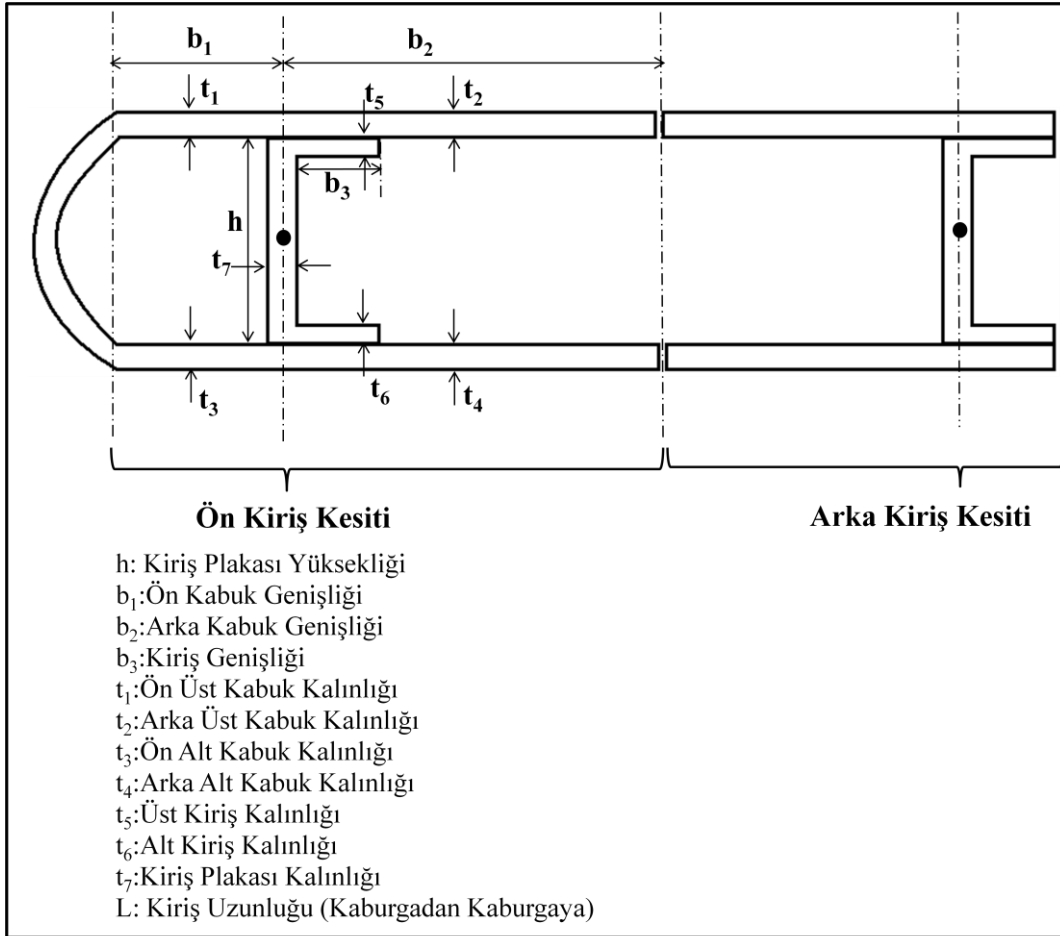
Sonlu elemanlar programının analiz sonuçlarına göre düğüm noktalarında elde edilen eksenel kuvvetler ve iki boyutlu elemanların kesme gerilimleri; analitik hesaplamalar için hazırlanan Microsoft Excel programına veri girişi olarak girildi.

Kiriş - kabuk yapısal birliktelik analiz programı beş çeşit hesap sayfası içeriyor:

1. Geometrik Girdiler Sayfası
2. Eksenel Kuvvet Girdiler Sayfaları
3. Kesme Gerilim Girdiler Sayfası
4. Analiz Sayfalar
5. Minimum Güvenlik Faktörleri Özet Sayfası

5.5.1 Geometrik Girdiler Sayfası

Yatay dengeleyiciyi oluşturan yapısal elemanların kalınlık, uzunluk ve genişlik gibi geometrik özellikleri Microsoft Excel programındaki bu sayfa her kesit için girilir. Ayrıca, elastisite modülüsü, akma dayanımları ve Poisson oranı gibi malzeme özellikleri de bu sayfaya hesaplamalarda kullanılmak üzere girilir. Hazırlanan Microsoft Excel programının “Geometrik Girdiler” sayfasına girilen geometrik özellikler Şekil 5.16’da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Geometrik Girdiler

Girilen parametrelere göre kesitin ağırlık merkezi, alanı ve atalet hesaplamaları, her kaburga istasyonundaki kiriş – kabuk kesiti için gerçekleştirilerek; kiriş istasyonu ve kaburga istasyon sırasına göre listelenmiştir. Kiriş ve kaburga istasyon numaraları, sonlu elemanlar programının eleman ve düğüm noktası numaralandırma metodolojisine göre gerçekleştirilmiştir. Birinci iterasyon analizlerinde kullanılan geometrik Şekil 5.17’da gösterilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	O
1	Kiriş İstasyonu	Kaburga İstasyonu	Ön Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Ön Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Kiriş Plakası Kalınlık (mm)	Kiriş Kalınlık (mm)	Ön Kabuk Genişlik (mm)	Arka Kabuk Genişlik (mm)	Kiriş Uzunluk (mm)	Kiriş Plakası Yükseklik (mm)	Kiriş Genişlik (mm)	E (M)
2	2	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	100.00	0.00	200.00	56.50	20.00	710
3	2	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	125.60	290.30	953.00	77.00	20.00	710
4	2	3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	163.60	380.30	756.70	107.00	20.00	710
5	2	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	420.00	150.00	120.00	20.00	710
6	2	5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	420.00	150.00	120.00	20.00	710
7	2	6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	163.60	380.30	756.70	107.00	20.00	710
8	2	7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	125.60	290.30	953.00	77.00	20.00	710
9	2	8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	100.00	0.00	200.00	56.50	20.00	710
10	3	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	290.30	0.00	950.50	90.00	20.00	710
11	3	3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	380.30	0.00	750.00	120.00	20.00	710
12	3	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	420.00	0.00	150.00	120.00	20.00	710
13	3	5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	420.00	0.00	150.00	120.00	20.00	710
14	3	6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	380.30	0.00	750.00	120.00	20.00	710
15	3	7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	290.30	0.00	950.50	90.00	20.00	710
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														

```

graph LR
    A[Gerilim Hesapla] --> B[Analiz]
    B --> C[Güvenlik Faktörler]

```

Şekil 5.17. İlk İterasyon “Geometrik Girdiler” Sayfası

5.5.2 Eksenel Kuvvetler Girdiler Sayfaları

Sonlu elemanlar programı ile bütün yük durumlarına göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, düğüm noktalarındaki tepki kuvvetlerinin değerleri; her kiriş istasyonu için ayrı Excel Sayfalarına aktarıldı. Başka bir deyişle ön kiriş kesitinin kuvvetleri, ön kiriş eksenel kuvvetler sayfasına; arka kiriş kesitinin kuvvetleri de, arka kiriş eksenel kuvvetler sayfasına girildi.

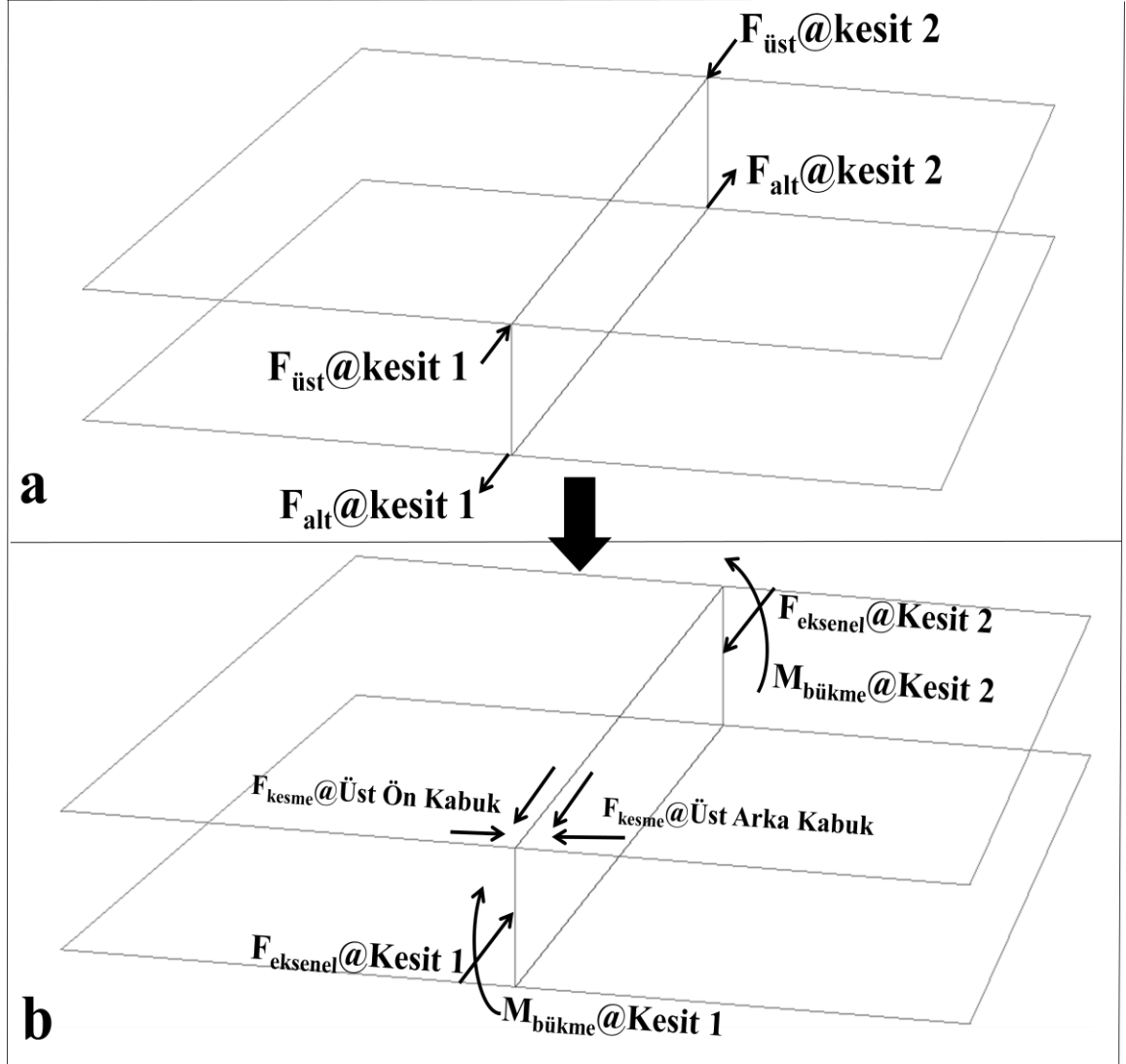
5.5.3 Kesme Gerilim Girdiler Sayfası

Sonlu elemanlar programı ile bütün yük durumlarına göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, iki boyutlu elemanların kesme gerilim değerleri bu sayfaya girildi.

5.5.4 Analiz Sayfaları

Her yük durumu için bir analiz sayfası yaratılarak yapısal elemanların analizleri gerçekleştirildi. Microsoft Visual Basic programlama dilinde hazırlanmış olan “Gerilim Hesapla” kodu kullanılarak, düğüm noktalarındaki kuvvetler Şekil 5.18’deki gibi her kesitin ağırlık merkezine bileşke kuvvet ve moment olarak taşınmıştır. Aynı zamanda “Kesme Gerilim Girdiler” sayfasındaki gerilim değerleri

de, her yük durumu için ayıklanarak; ilgili yük durumunun “Analiz Sayfasına” yazdırılmıştır.



Şekil 5.18. Kesit Ağırlık Merkezinde Bileşke Kuvvet ve Moment

Her kesitin ağırlık merkezindeki eşdeğer eksenel kuvvet ve momentin hesaplanmasının ardından; kesitin üst ve alt noktalarındaki gerilim değerleri Eşitlik 5.1 ve 5.2'deki gerilim formüllerine göre hesaplanmıştır. Microsoft Visual Basic programlama dilinde hazırlanmış olan “Gerilim Hesapla” kodu kullanılarak, gerilim hesaplama işlemi bütün kiriş istasyonlarının kesitlerindeki üst ve alt noktaları için hesaplanmıştır; ilgili yük durumunun “Analiz Sayfalarında” listelenmiştir.

$$\sigma_{eksenel} = \frac{F_{eksenel}}{A} \quad (5.1)$$

$$\sigma_{bükme} = \frac{Mc}{I} \quad (5.2)$$

Kesitlerdeki eksenel ve kesme değerlerinin hesaplanmasının ardından; Microsoft Visual Basic programlama dilinde hazırlanmış olan “Analiz” kodu kullanılarak, kesitteki bütün yapısal elemanların izin verilebilir dayanımı, bozulma kriterlerine göre hesaplanmıştır. Analizi gerçekleştirilecek olan her yapısal elemanın birden fazla izin verilebilir dayanımı olduğu için; hesaplanan izin verilebilir dayanımlardan minimum olanı “Analiz Sayfasına” listelenmiştir. Sonuç olarak, gerilim değerleri ve izin verilen dayanımları hesaplanmış olan yapısal elemanların, güvenlik faktörleri her yük durumu için hesaplanarak ilgili yük durumunun “Analiz Sayfalarında” bozulma kriterinin ismi ile birlikte listelenmiştir.

5.5.5 Minimum Güvenlik Faktörleri Özet Sayfası

Her yapısal elemanın, güvenlik faktörleri bütün yük durumlarına göre hesaplandıktan sonra; Microsoft Visual Basic programlama dilinde hazırlanmış olan “Güvenlik Faktörler” kodu kullanılarak en düşük güvenlik faktörleri, “Güvenlik Faktörleri Sayfasında” listelenmiştir. Böylece, yatay dengeleyiciyi oluşturan bütün yapısal elemanların güvenlik faktörleri, kritik bozulma modu ve kritik yük durumu elde edilmiştir.

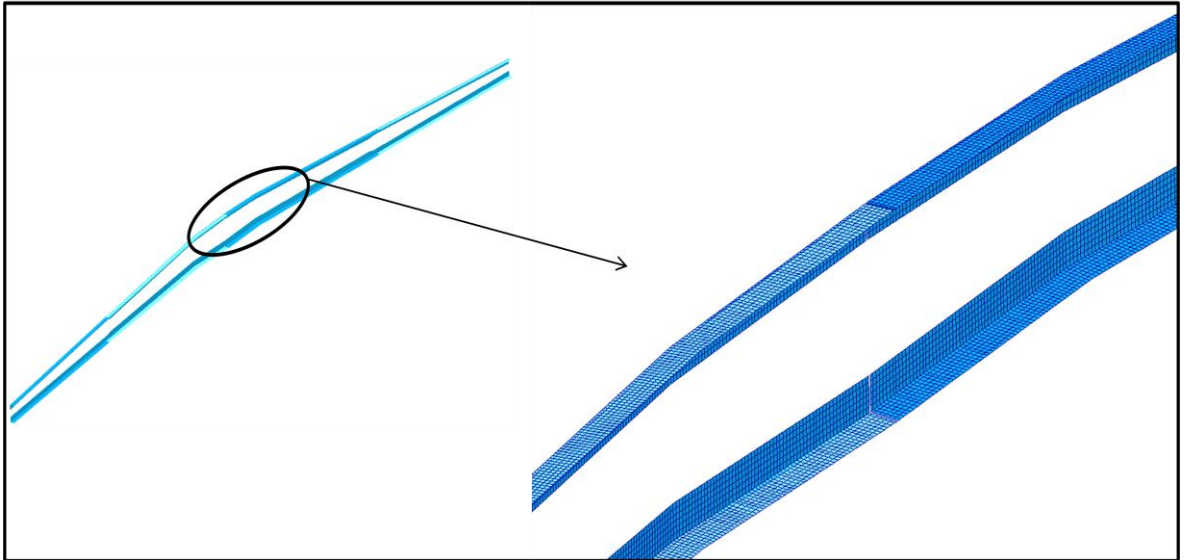
Güvenlik faktör değerleri kritik olan (1’in altında) olan yapısal elemanlar için tasarım iyileştirmesi (kalınlık artışı, boyutların küçültülmesi vb.) yapılarak analizler tekrarlanmıştır. En hafif çözüm olacak tasarım iyileştirmesine göre, “Genel Sonlu Elemanlar Modeli” yeniden güncellenerek; yapısal elemanlar üzerindeki tepki kuvvetleri yeni tasarım modeli için elde edilmiştir. Elde edilen tepki kuvvetleri, analitik analizler için hazırlanmış olan Excel programında yeniden analiz edilerek yeni güvenlik faktörleri elde edilmiştir. Bu iterasyon döngüsü, bütün yapısal elemanların güvenlik faktörleri hedef edilen değere ulaşana kadar devam etmiştir.

6. DETAY SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

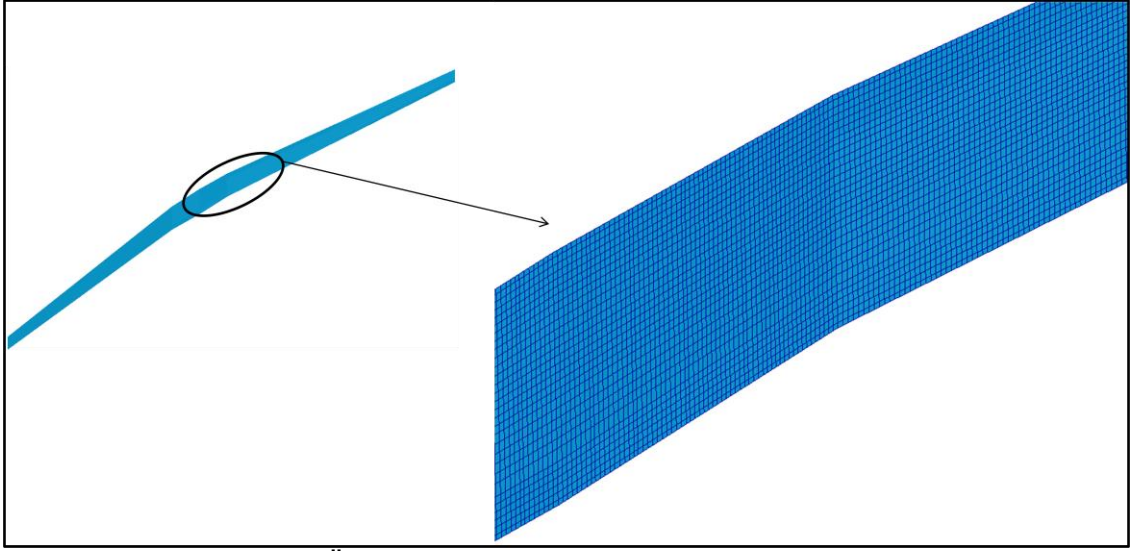
Yatay dengeleyicinin, analitik hesaplamalara göre iteratif olarak optimize edilen modeli, detay sonlu elemanlar analizi (fine meshed finite element analysis) gerçekleştirilerek; analitik hesaplamalar doğrulanmıştır.

6.1. Detay Sonlu Elemanlar Modeli

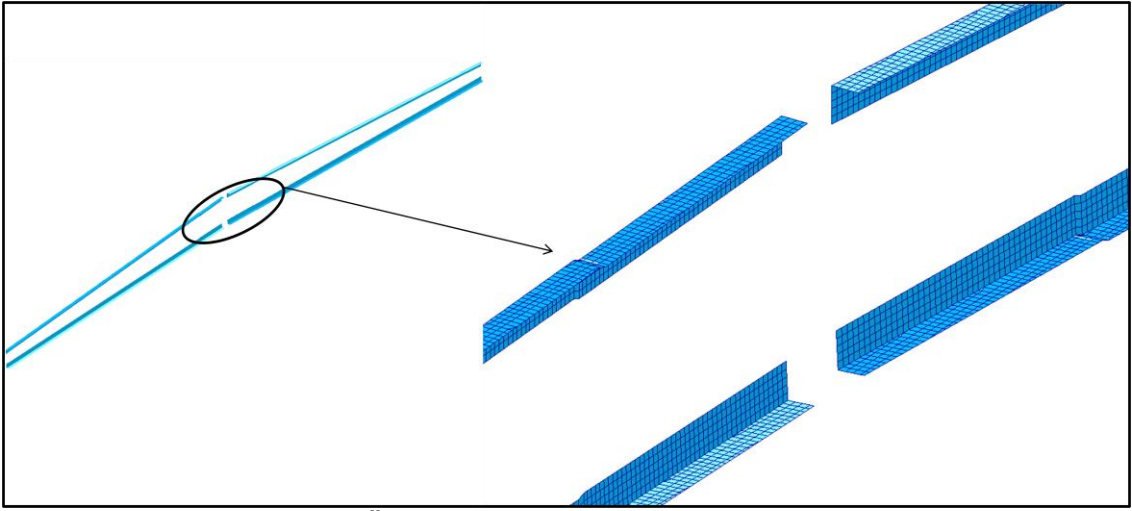
Detay sonlu elemanlar analizine, analizi yapılacak modelin modellenmesi ile başlandı. Yatay dengeleyiciyi oluşturan birincil yapılar ince duvarlı yapılar (thin walled structures) olduğu için; detay analizin 2 boyutlu lineer sonlu elemanlar (Quad4 veya Tria3) kullanılarak yapılması uygun görülmüştür. Bu nedenle yatay dengeleyicinin 3 boyutlu CAD ortamındaki katı modelindeki yapısal elemanların orta yüzeyleri (mid surfaces) çıkarılmıştır. CAD ortamında elde edilen bu yüzeyler, MSC. Patran programına “import” komutu ile transfer edilmiştir. Her yapısal eleman (kirişler, kiriş plakaları, kabuklar, kaburgalar ve bağlantı elemanları) ayrı gruplar halinde sonlu elemanlar modeline transfer edilerek; MSC. Patran’ın “Mesh” komutu ile bütün yapılar sonlu elemanlara ayrılmıştır. Her yapısal elemanın ayrı ayrı ağ modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlara ayrılmış ağ modeller Şekil 6.1’den Şekil 6.10’a kadar gösterilmiştir.



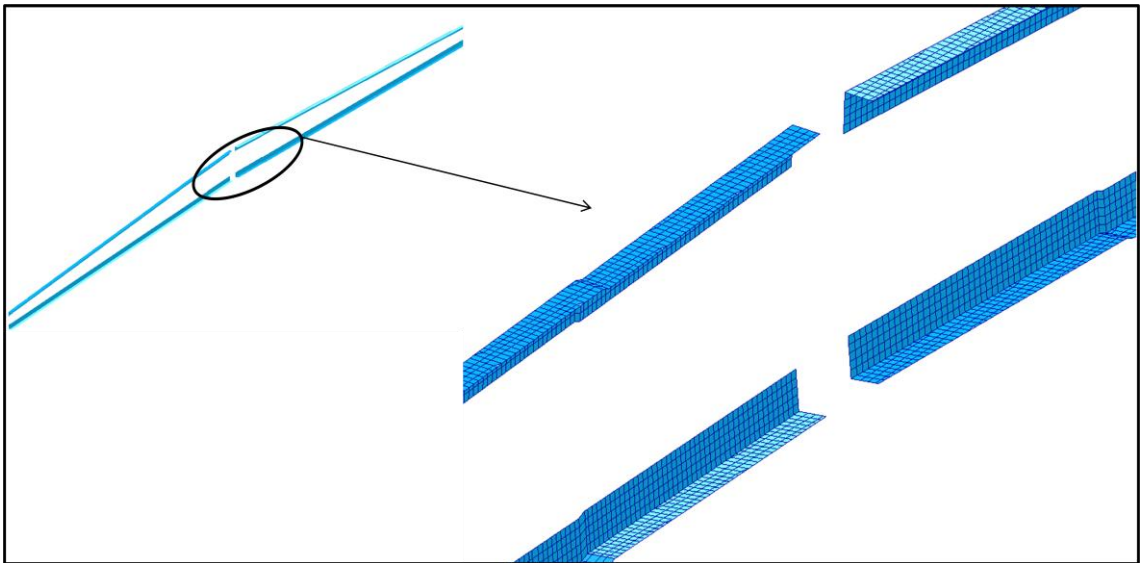
Şekil 6.1. Ön Ana Kirişler Sonlu Elemanlar Ağ Modeli



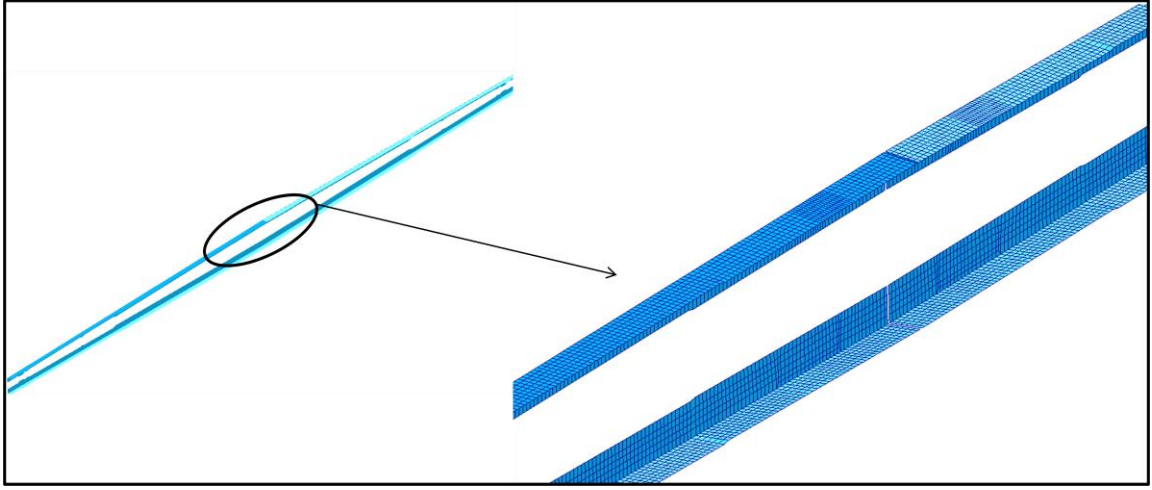
Şekil 6.2. Ön Kiriş Plakası Sonlu Elamanlar Ağ Modeli



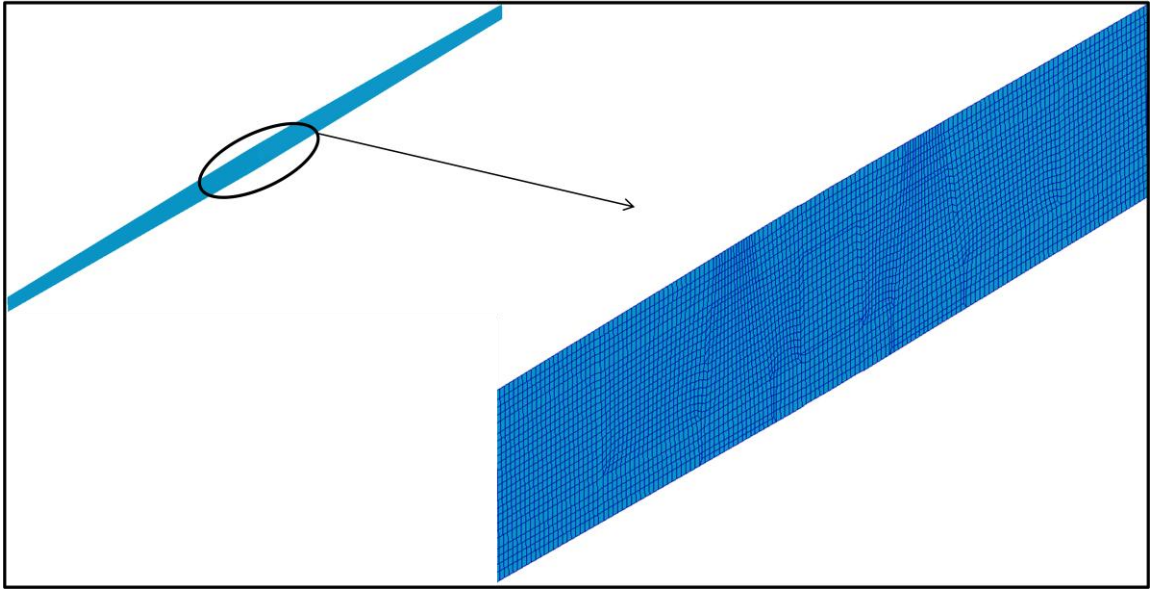
Şekil 6.3. Ön Kirişler Sonlu Elamanlar Ağ Modeli



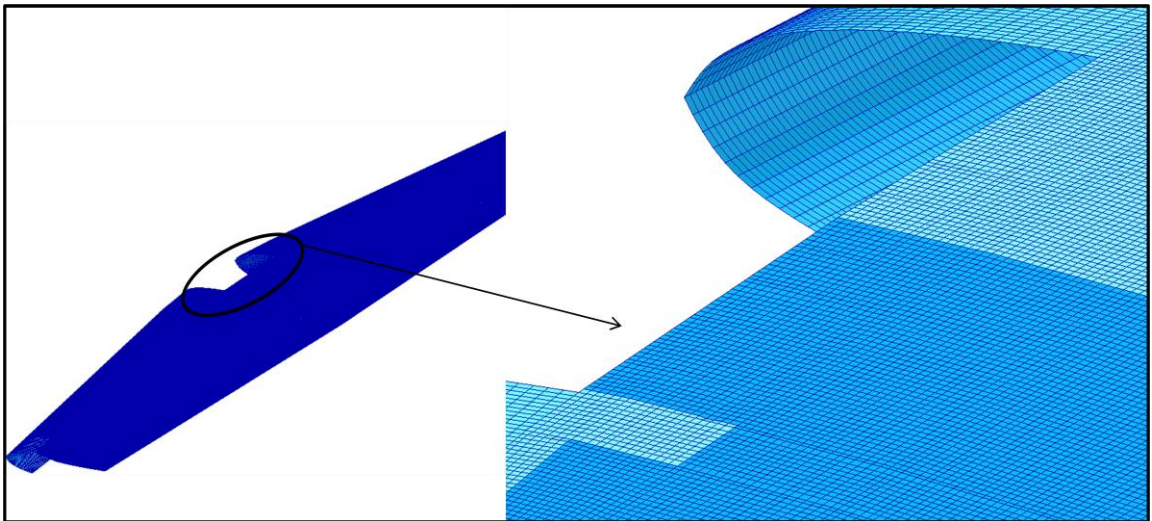
Şekil 6.4. Arka Kirişler Sonlu Elamanlar Ağ Modeli



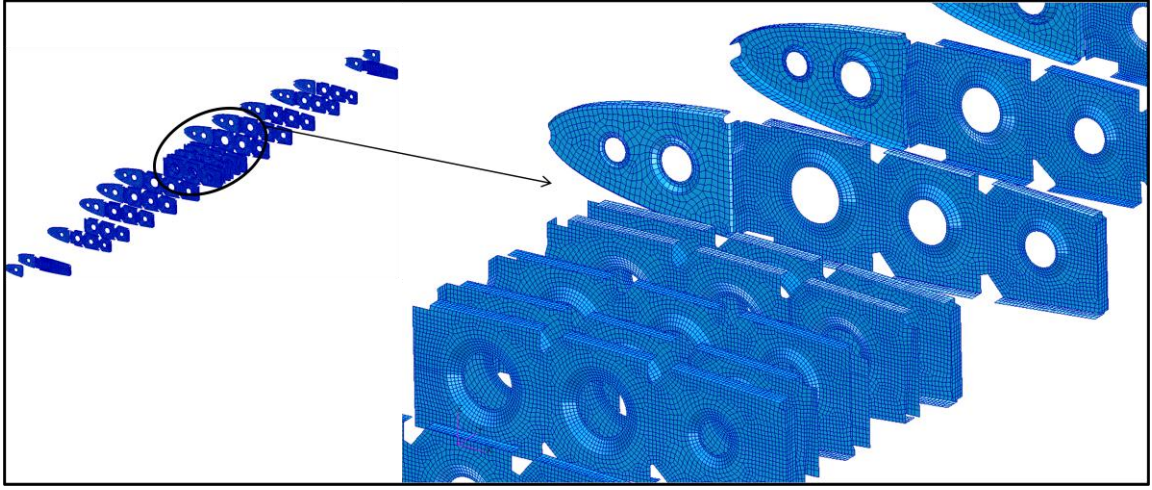
Şekil 6.5. Arka Ana Kirişler Sonlu Elamanlar Ağ Modeli



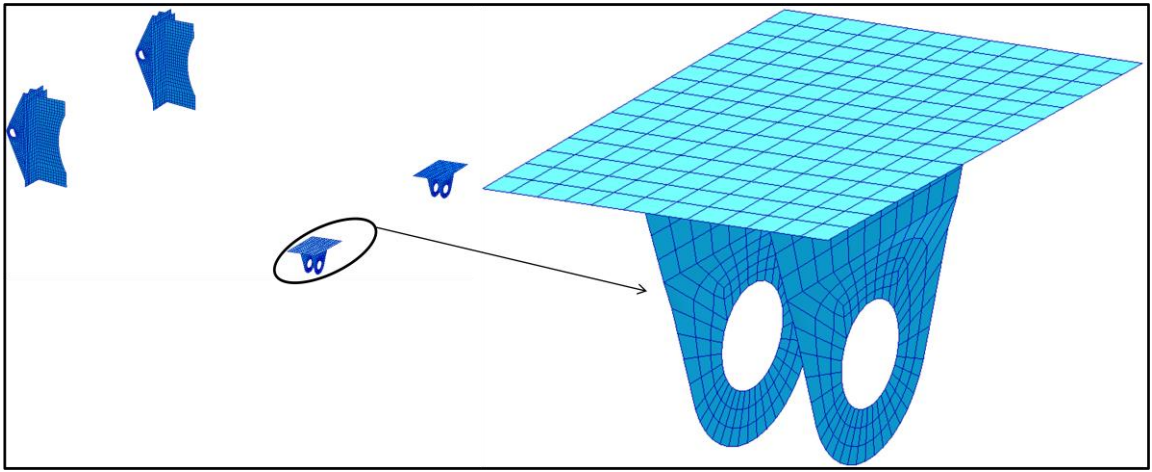
Şekil 6.6. Arka Kiriş Plakası Sonlu Elamanlar Ağ Modeli



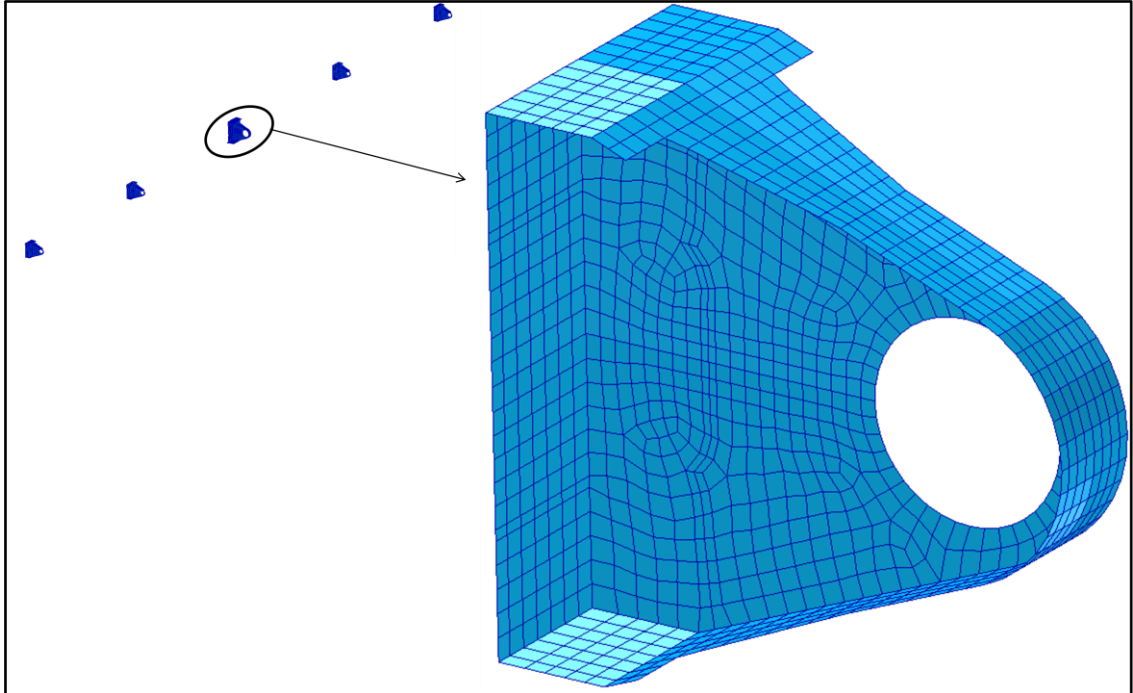
Şekil 6.7. Kabuk Sonlu Elamanlar Ağ Modeli



Şekil 6.8. Kaburgalar Sonlu Elamanlar Ağ Modeli

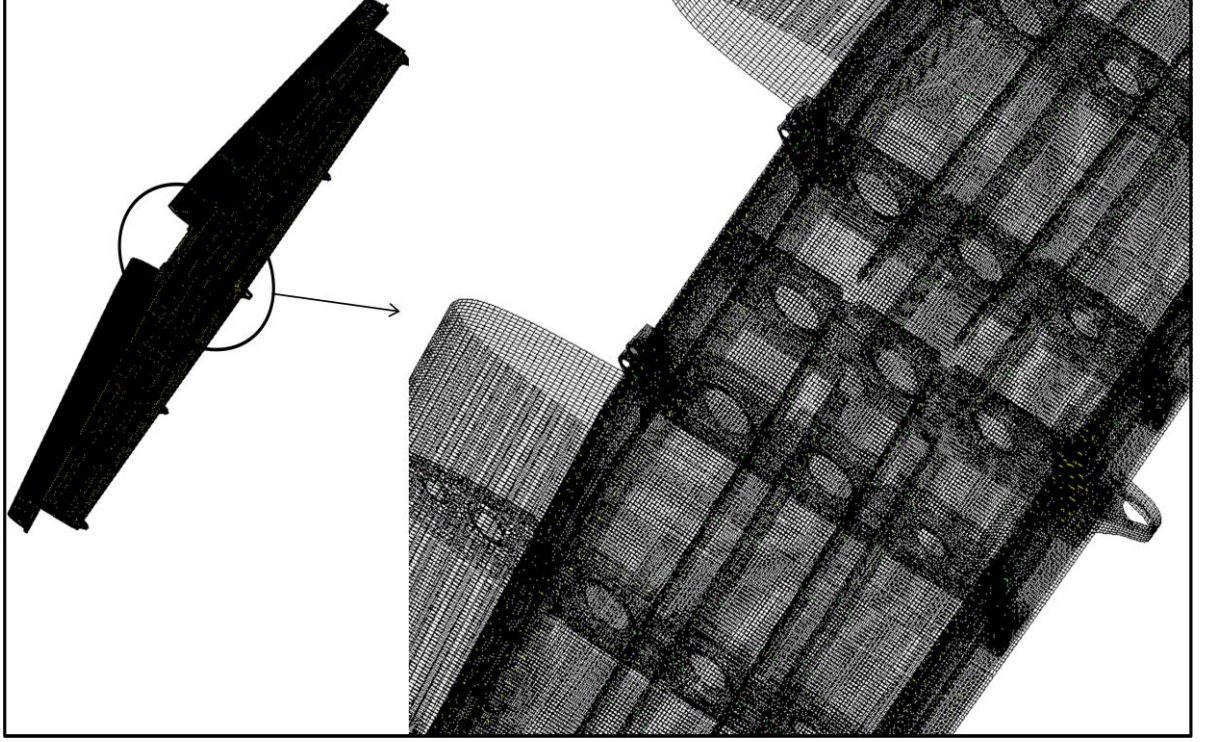


Şekil 6.9. Gövde Bağlantıları Sonlu Elamanlar Ağ Modeli



Şekil 6.10. İrtifa Dümeni Bağlantıları Sonlu Elamanlar Ağ Modeli

Yatay dengeleyicinin MSC. Patran programı ile sonlu elemanlarına ayrılan bütün yapısal elemanları, perçin bağlantı yerlerinden birbirine bağlanmıştır. Yapısal elemanların arasındaki bağlantı, bir boyutlu “BAR2” elemanları kullanılarak sağlanmıştır. “BAR2” elemanlarıyla birleştirilerek bir araya getirilen yatay dengeleyici modeli şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Birleştirilmiş Yatay Dengeleyici Sonlu Elemanlar Ağ Modeli

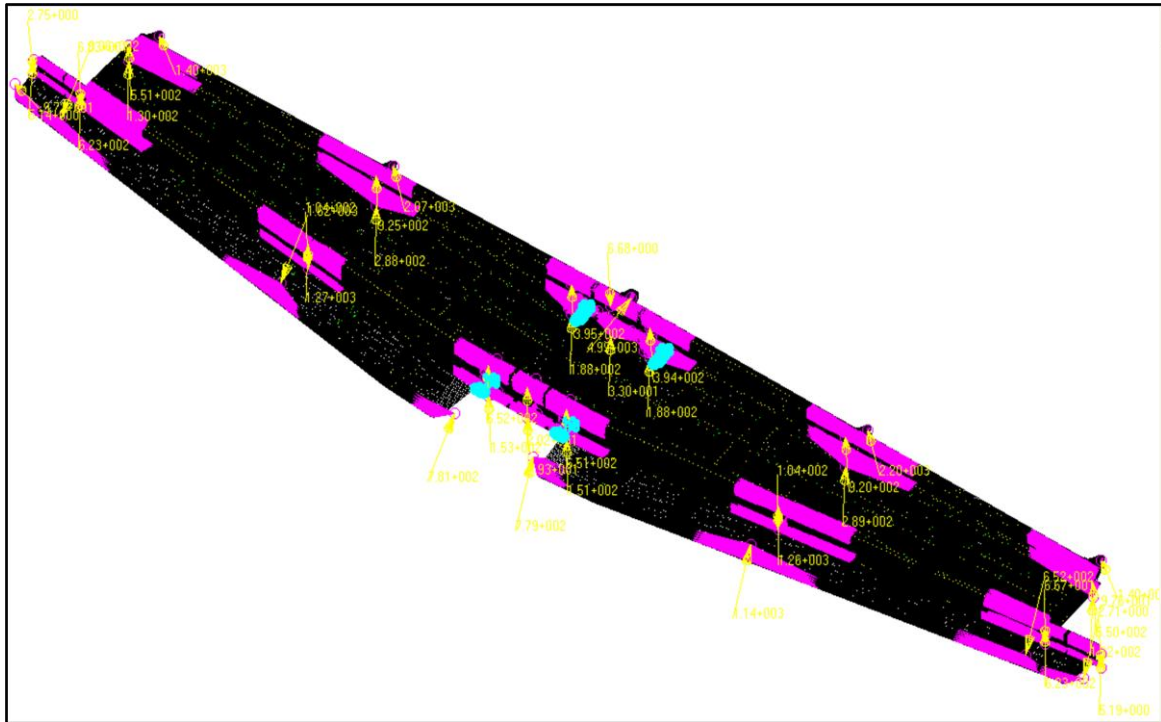
Genel sonlu elemanlar modelinde olduğu gibi, MSC. Patran programının “Materials” modülü kullanarak yapısal elemanların malzeme bilgileri oluşturulmuştur.

Bunun yanı sıra, yatay dengeleyicideki bütün yapısal komponentler, iki boyutlu elemanlar kullanılarak modellendiği için; hem eksenel direngenliği olan, hem de kesme direngenliği olan “Shell” özelliği kullanılmıştır. Her yapısal komponentin kalınlık değerleri ile malzeme çeşidi bilgileri, MSC. Patran programının “Properties” modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca, komponentlerin bağlantısını sağlayan bir boyutlu elemanlar için, perçin boyutlarına ve özelliklerine göre, eksenel direngenliği ve kesme direngenliği olan “Bush” özelliği kullanılmıştır.

6.2. Detay Sonlu Elemanlar Uygulanan Kuvvetler ve Sınır Koşulları

Genel sonlu elemanlar modelinde olduğu gibi, dört farklı yük durumu için elde edilmiş olan aerodinamik ve irtifa dümeni bağlantı kuvvetleri detay sonlu elemanlar modeline de uygulanmıştır. Fakat noktasal olan bu kuvvetler, yapı üzerinde belli bölgelere, interpolasyon yaparak yükü dağıtan bir sonlu eleman olan “RBE3” elemanı kullanılarak yüklenmiştir. Başka bir deyişle, genel sonlu elemanlar modelinden farklı olarak, bu modelde çok daha fazla düğüm noktası olduğu için, noktasal yükler “RBE3” interpolasyon elemanı ile daha geniş bir alandaki düğüm noktalarına dağıtılmıştır.

Şekil 5.13’de gösterildiği gibi yatay dengeleyicinin öndeki iki gövde bağlantısının rulman düzlemi “XZ” düzleminde (boylamsal eksen ve yükseklik eksen düzlemi) ve arkadaki iki gövde bağlantısının rulman düzlemi “YZ” düzleminde (enlemsel eksen ve yükseklik eksen düzlemi) olduğu için; detay sonlu elemanlar modeli gövde bağlantı noktalarından bu düzlemlerde sınırlandırılmıştır. Şekil 6.12’de detay yatay dengeleyici modeline, “RBE3” elemanlarıyla dağıtılan noktasal yükler ve sınır koşulları gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Uygulanan Kuvvetler ve Sınır Koşulları

6.3. Detay Sonlu Elemanlar Analiz

Sonlu elemanlar modelinin tamamlanmasının ardından, “Lineer Statik Analiz” ve “Burkulma Analizi” gerçekleştirilmiştir. “Lineer Statik Analiz” sonuçları ve “Burkulma Analiz” sonuçları analitik hesaplamalarla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Analizi gerçekleştirilen modelin özeti:

Genel Eleman Boyutu	= 6 mm
Eleman Sayısı	= 436 144
Düğüm Noktası Sayısı	= 448 309

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

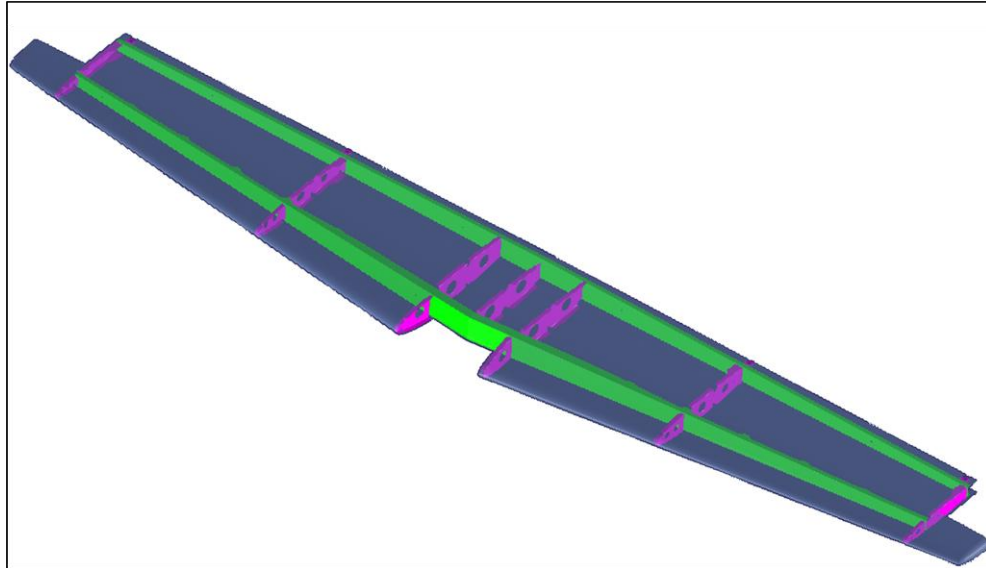
Bu tez çalışmasında her analitik analiz iterasyonu sonucuna göre, bir sonraki iterasyon için gerekli optimum tasarım çözüm belirlenerek; yeni iterasyona başlandı. Belirlenen optimum tasarım çözümlere göre, her yeni iterasyon başlangıcında genel sonlu elemanlar modeli güncellendi. Ayrıca, analitik hesaplamalar için hazırlanmış olan Excel dosyasının girdiler (input) sayfası geometrik özellik değişim ve / veya yeni kaburga istasyon eklenme durumuna göre her iterasyon başlangıcında yenilendi.

Detay sonlu elemanlar analizi; gerek model hazırlama esnasında gerekse çözüm yaptırma esnasında çok uzun süre gerektiren işlem olduğu için; sadece analitik hesaplamalar sonucunda elde edilen son iterasyondaki optimum tasarım çözümü için gerçekleştirilmiştir.

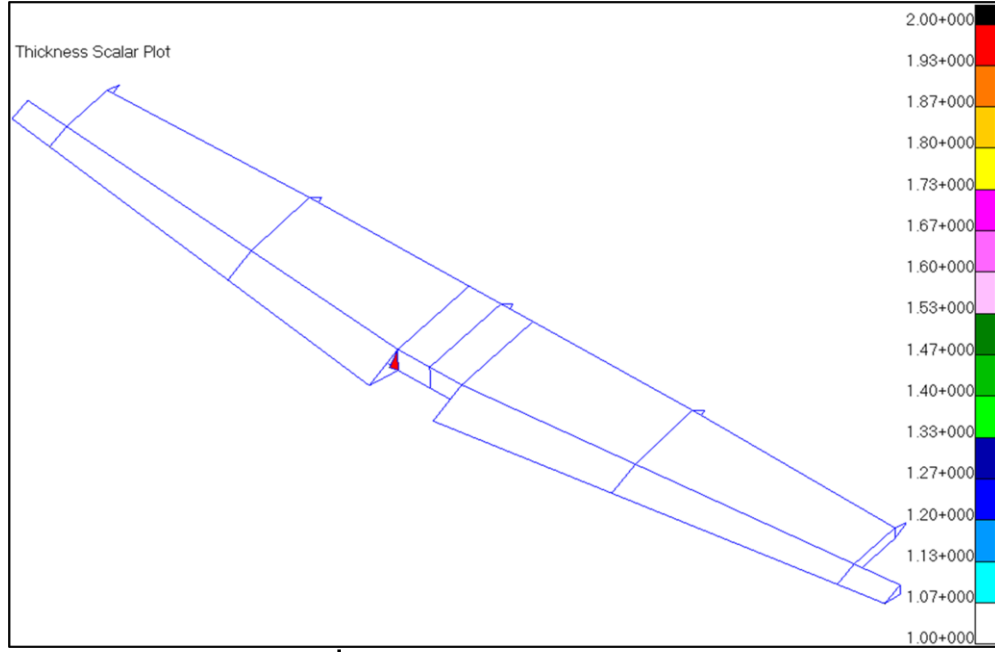
Devam eden bölümlerde, her iterasyonun işlem basamakları ve belirlenen optimum tasarım çözümleri işlem basamakları ile ilgili bilgi verilmiştir.

7.1. Birinci İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları

Yatay dengeleyici tasarımı başlangıç modeli olarak kullanılan CAD modeli ve genel sonlu elemanlar modeli sırasıyla şekil 7.1’de ve şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Birinci İterasyon CAD Modeli



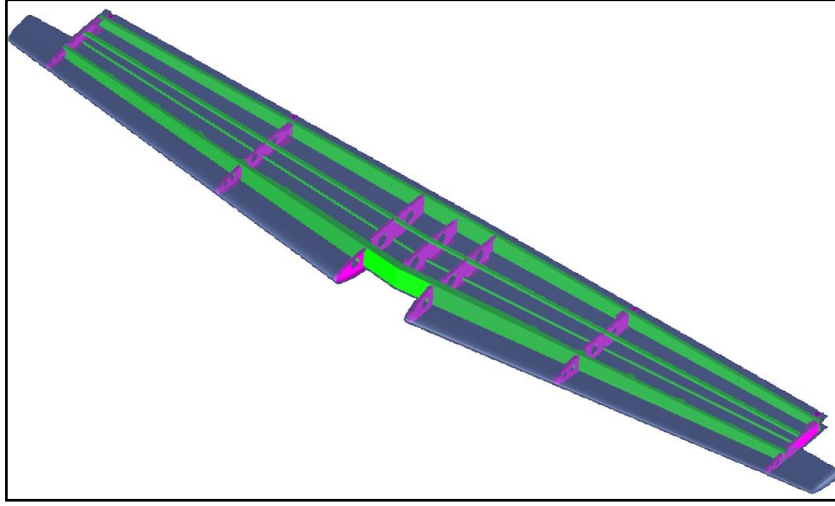
Şekil 7.2. Birinci İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli

İlk iterasyona, minimum sayıda yapısal elamandan oluşan model ile başlamak hedeflenmiştir. Bu nedenle, gövde bağlantı elemanlarının bulunduğu iki düzleme; ön ve arka kiriş plakaları yerleştirilmiştir. Aynı şekilde, ön ve arka gövde bağlantı elemanlarının arasına simetrik olacak şekilde iki adet kaburga koyulmuştur. Bunun yanı sıra, her bir irtifa dümeni bağlantı elemanın bulunduğu düzleme, bir adet kaburga konulmuştur. Başka bir deyişle, irtifa dümeni bağlantı elemanlarının düzlemlerine toplam simetrik olacak şekilde beş adet kaburga koyulmuştur.

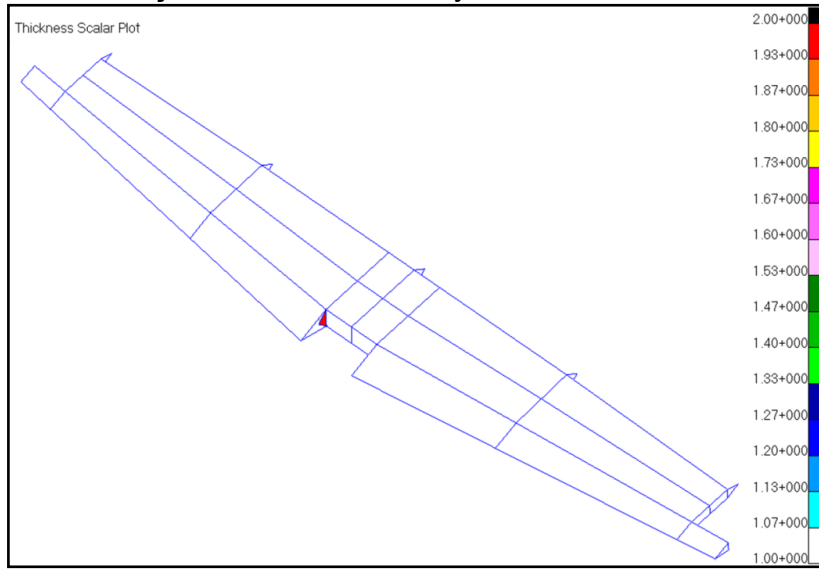
7.2. İkinci İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları

Yatay dengeleyici tasarımı ikinci iterasyon modeli olarak kullanılan CAD modeli ve genel sonlu elemanlar modeli sırasıyla şekil 7.3’de ve şekil 7.4’de gösterilmiştir. 1. iterasyon analizi sonuçlarına göre hemen hemen bütün istasyonların güvenlik faktörleri kritik çıkmıştır. Bu nedenle, gerçekleştirilen tasarım iyileştirmeleri;

1. Kirişler arasına üçüncü kiriş yerleştirilerek; yapısal elemanların burkulma dayanımlarının artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 7.3. İkinci İterasyon CAD Modeli



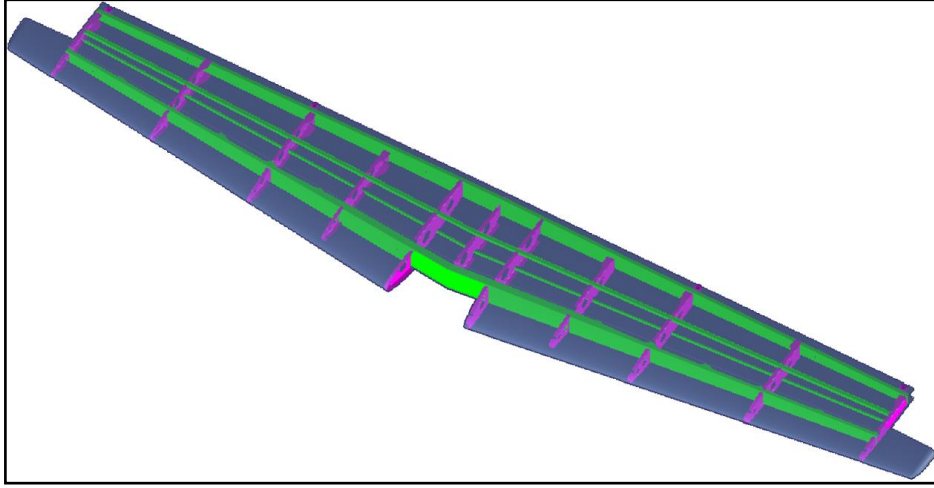
Şekil 7.4. İkinci İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli

7.3. Üçüncü İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları

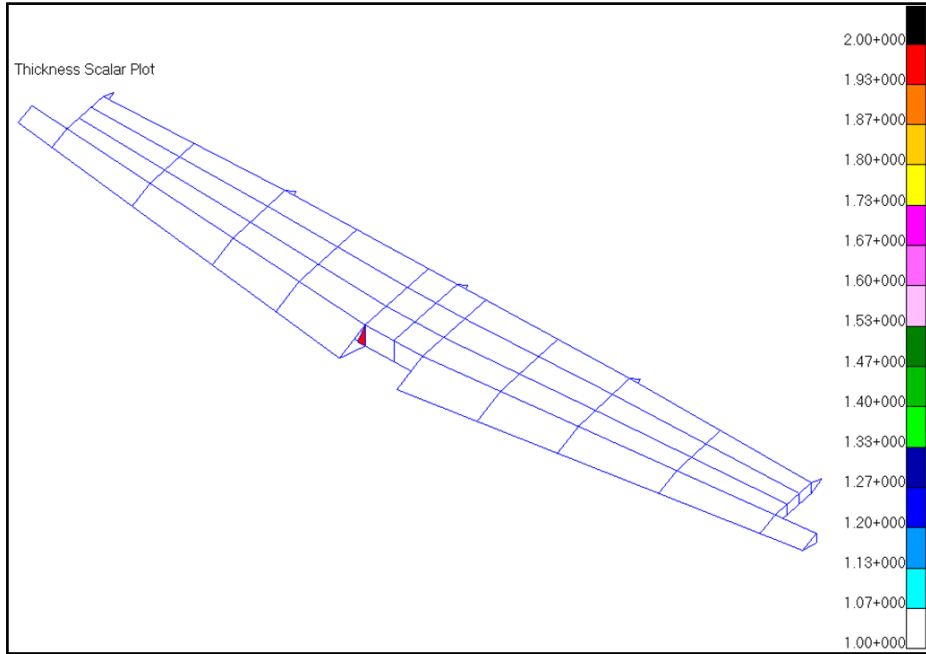
Yatay dengeleyici tasarımı üçüncü iterasyon modeli olarak kullanılan CAD modeli ve genel sonlu elemanlar modeli sırasıyla şekil 7.5’de ve şekil 7.6’da gösterilmiştir. İkinci iterasyon analizi sonuçlarına göre, güvenlik faktörleri kritik olan istasyonlar için tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır.

Bu nedenle, gerçekleştirilen tasarım iyileştirmeleri;

1. İkinci ve üçüncü kaburga istasyonları arasına yeni bir kaburga eklenmiştir.
2. Üçüncü ve dördüncü kaburga istasyonları arasına yeni bir kaburga eklenmiştir.
3. Altıncı ve yedinci kaburga istasyonları arasına yeni bir kaburga eklenmiştir.
4. Yedinci ve sekizinci kaburga istasyonları arasına yeni bir kaburga eklenmiştir.



Şekil 7.5. Üçüncü İterasyon CAD Modeli



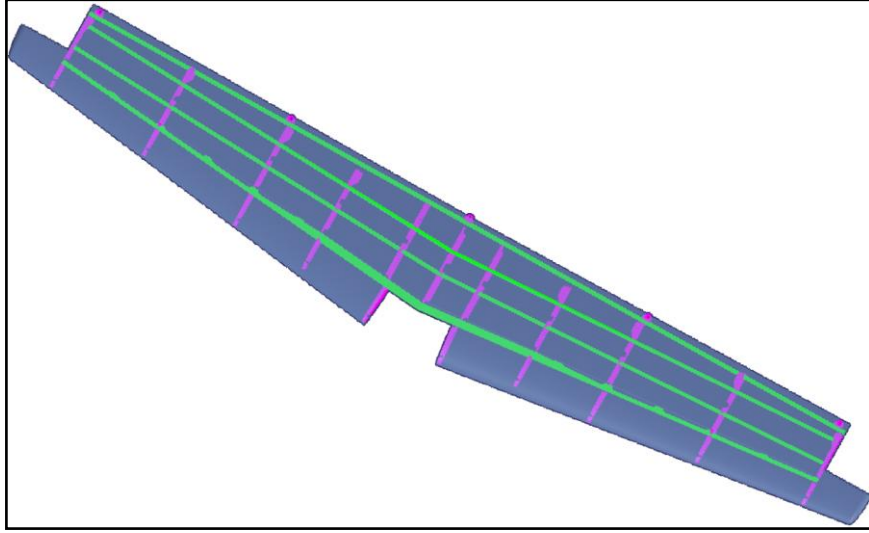
Şekil 7.6. Üçüncü İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli

7.4. Dördüncü İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları

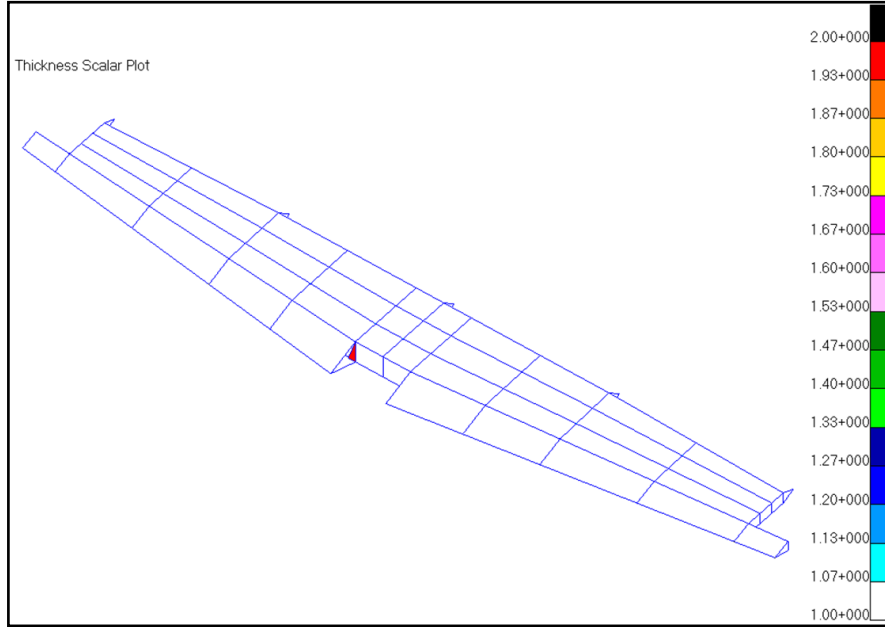
Yatay dengeleyici tasarımı dördüncü iterasyon modeli olarak kullanılan CAD modeli ve genel sonlu elemanlar modeli sırasıyla şekil 7.7’de ve şekil 7.8’de gösterilmiştir. Üçüncü iterasyon analizi sonuçlarına göre, güvenlik faktörleri kritik olan istasyonlar için tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır.

Bu nedenle, gerçekleştirilen tasarım iyileştirmeleri;

1. Kirişler arasında dördüncü kiriş yerleştirilerek; yapısal elemanların burkulma dayanımlarının artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 7.7. Dördüncü İterasyon CAD Modeli



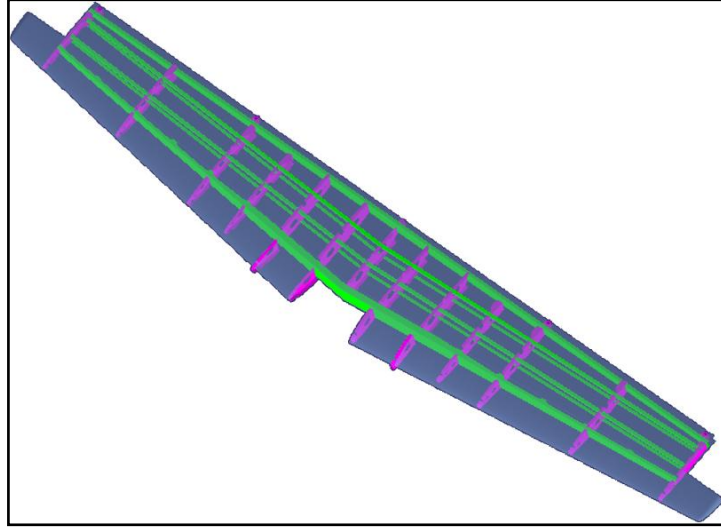
Şekil 7.8. Dördüncü İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli

7.5. Beşinci İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları

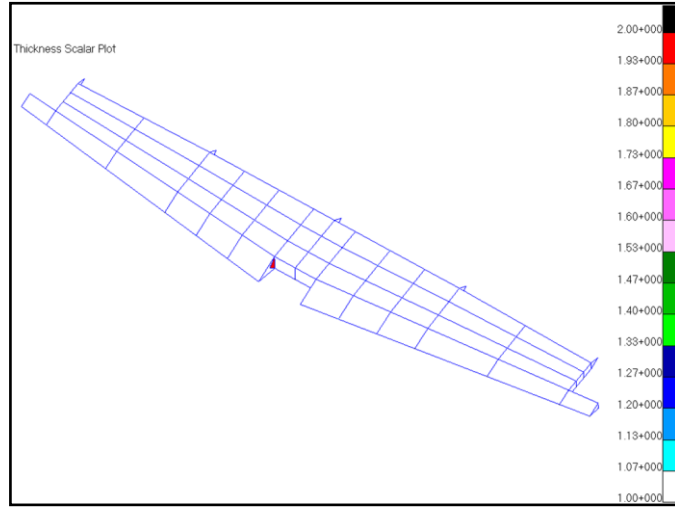
Yatay dengeleyici tasarımı beşinci iterasyon modeli olarak kullanılan CAD modeli ve genel sonlu elemanlar modeli sırasıyla şekil 7.9'da ve şekil 7.10'da gösterilmiştir. Dördüncü iterasyon analizi sonuçlarına göre, güvenlik faktörleri kritik olan istasyonlar için tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır.

Bu nedenle, gerçekleştirilen tasarım iyileştirmeleri;

1. Beşinci ve altıncı kaburga istasyonları arasına yeni bir kaburga eklenmiştir.
2. Sekizinci ve dokuzuncu kaburga istasyonları arasına yeni bir kaburga eklenmiştir.



Şekil 7.9. Beşinci İterasyon CAD Modeli



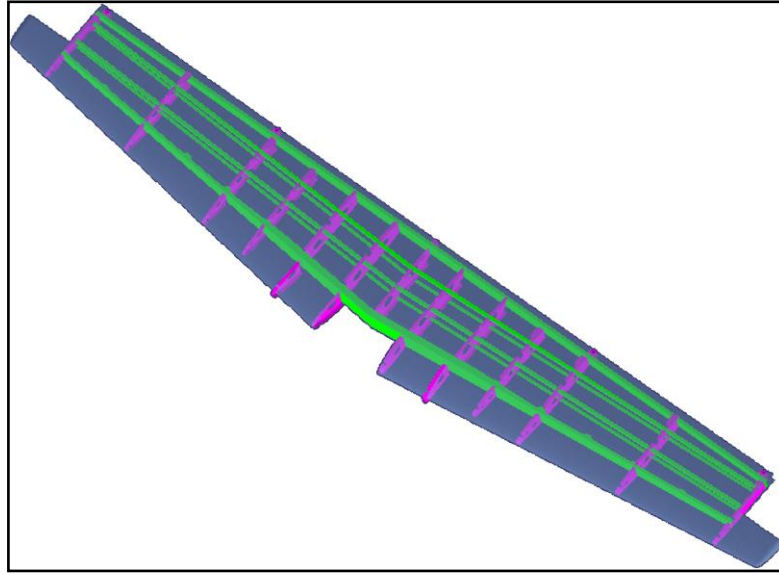
Şekil 7.10. Beşinci İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli

7.6. Altıncı İterasyon Hesap Detayları ve Sonuçları

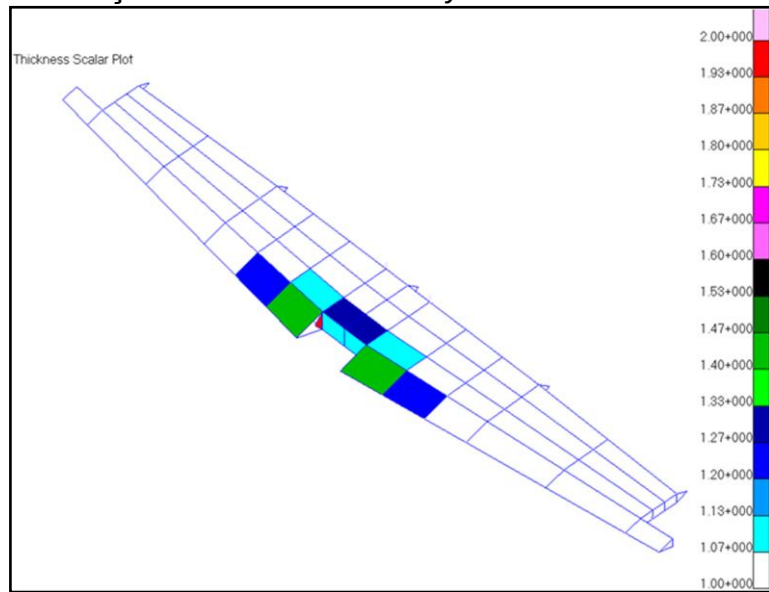
Yatay dengeleyici tasarımı altıncı iterasyon modeli olarak kullanılan CAD modeli ve genel sonlu elemanlar modeli sırasıyla şekil 7.11'de ve şekil 7.12'de gösterilmiştir. Beşinci iterasyon analizi sonuçlarına göre, güvenlik faktörleri kritik olan istasyonlar için tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır.

Bu nedenle, gerçekleştirilen tasarım iyileştirmeleri;

1. Burkulmaya uğrayan kabuk ve kiriş plakla elemanlarının kalınlıkları artırılmıştır.



Şekil 7.11. Altıncı İterasyon CAD Modeli



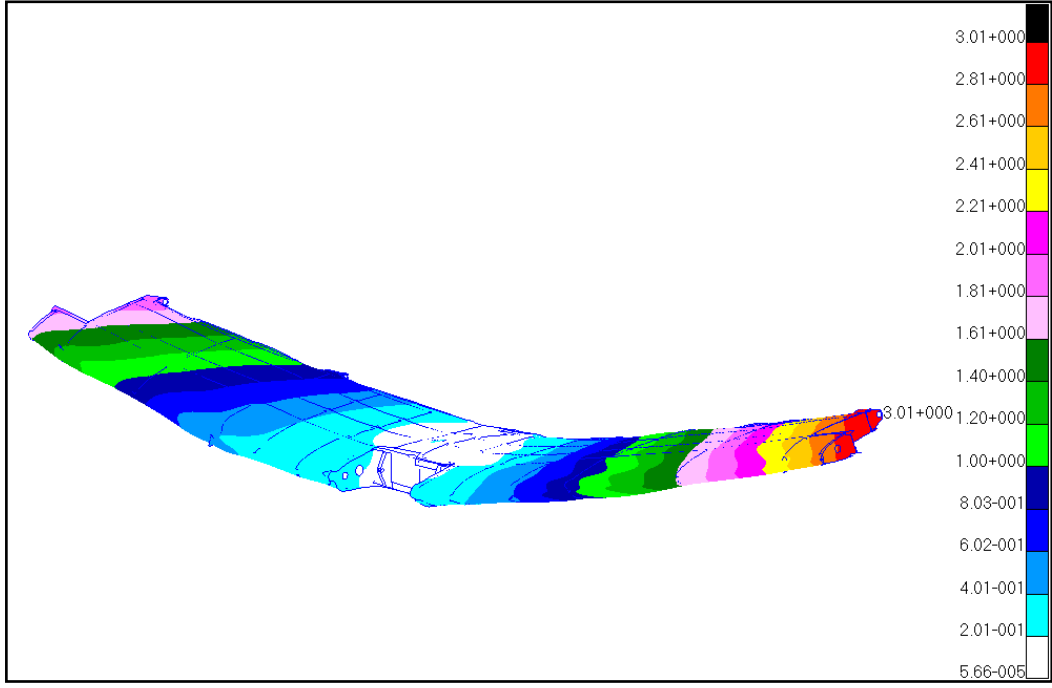
Şekil 7.12. Altıncı İterasyon Genel Sonlu Elemanlar Modeli

7.7. Detay Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Detay sonlu elemanlar analizi, bütün yük durumları için gerçekleştirildi. “Statik Analiz” ve “Burkulma Analizi” sonuçları devam eden bölümlerde özetlenmiştir.

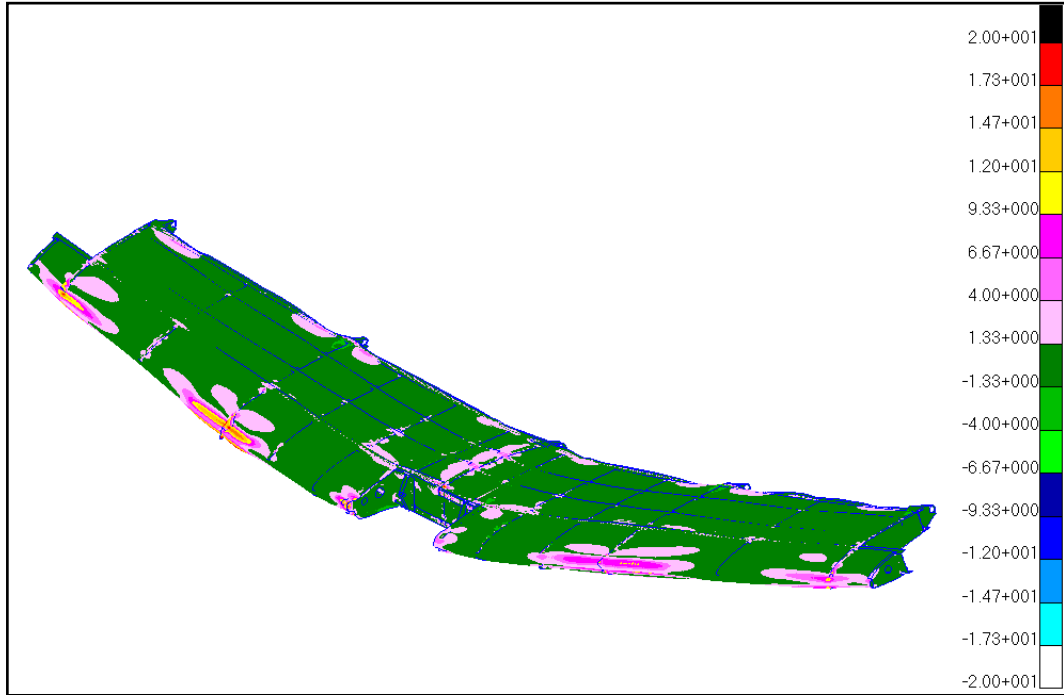
7.7.1 Birinci Yük Durumu için Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Yalpa manevrası olan birinci yük durumu için sonlu elemanlar analizi deplasman sonucu “mm” cinsinden Şekil 7.13’te gösterilmiştir.



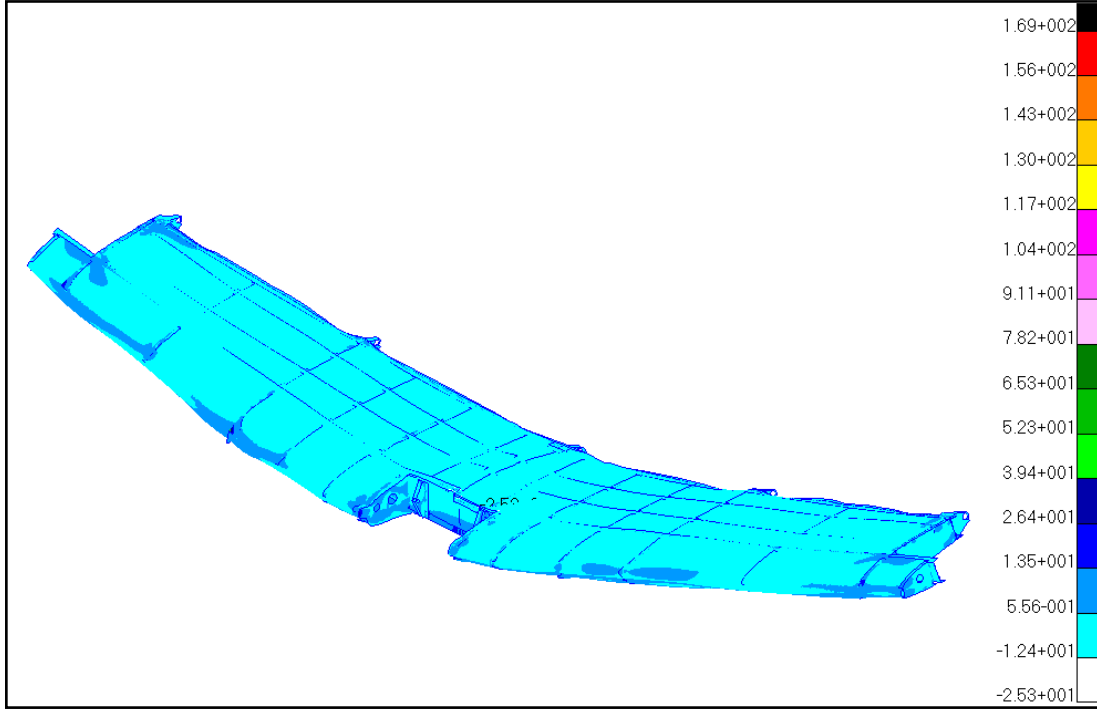
Şekil 7.13. Birinci Yük Durumu Deplasman Sonucu

Birinci yük durumu için uçağın boylamsal yönündeki (önden arakaya doğru uzanan eksen) eksenel gerilimler “MPa” cinsinden Şekil 7.14’de gösterilmiştir. Bu yük durumunda, irtifa dümeninden yüksek yükler gelmediği için boylamsal yöndeki eksenel gerilimler düşüktür.



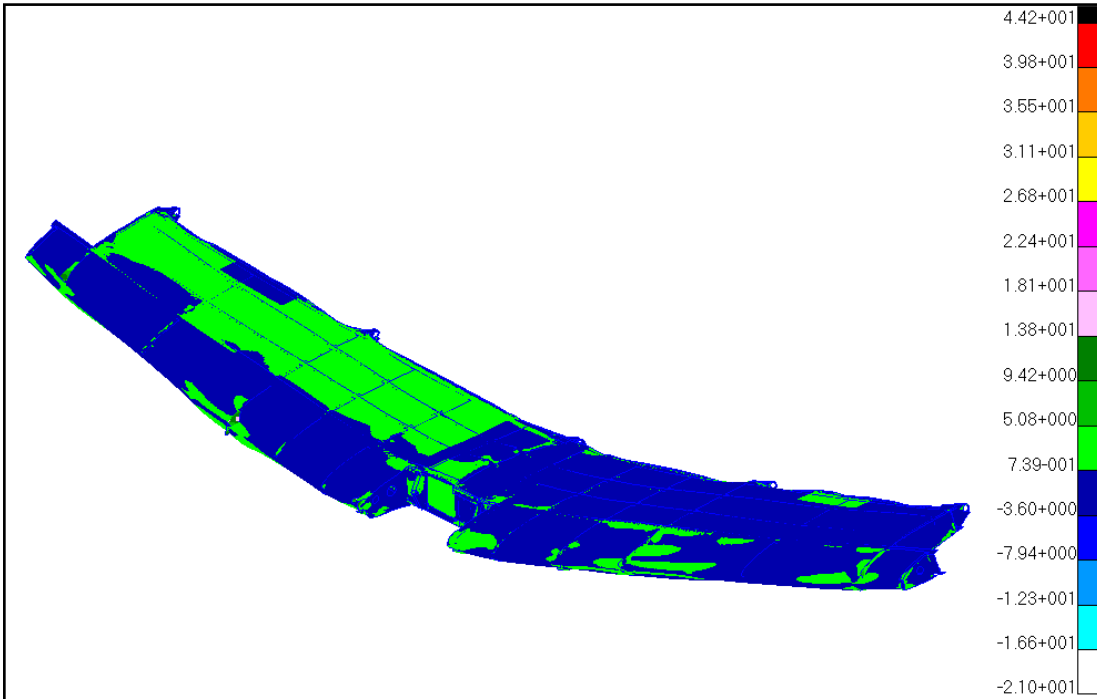
Şekil 7.14. Birinci Yük Durumu Boylamsal Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuçları

Birinci yük durumu için uçağın enlemsel yönündeki (soldan sağa doğru uzanan eksen) aksenal gerilimler “MPa” cinsinden Şekil 7.15’de gösterilmiştir.



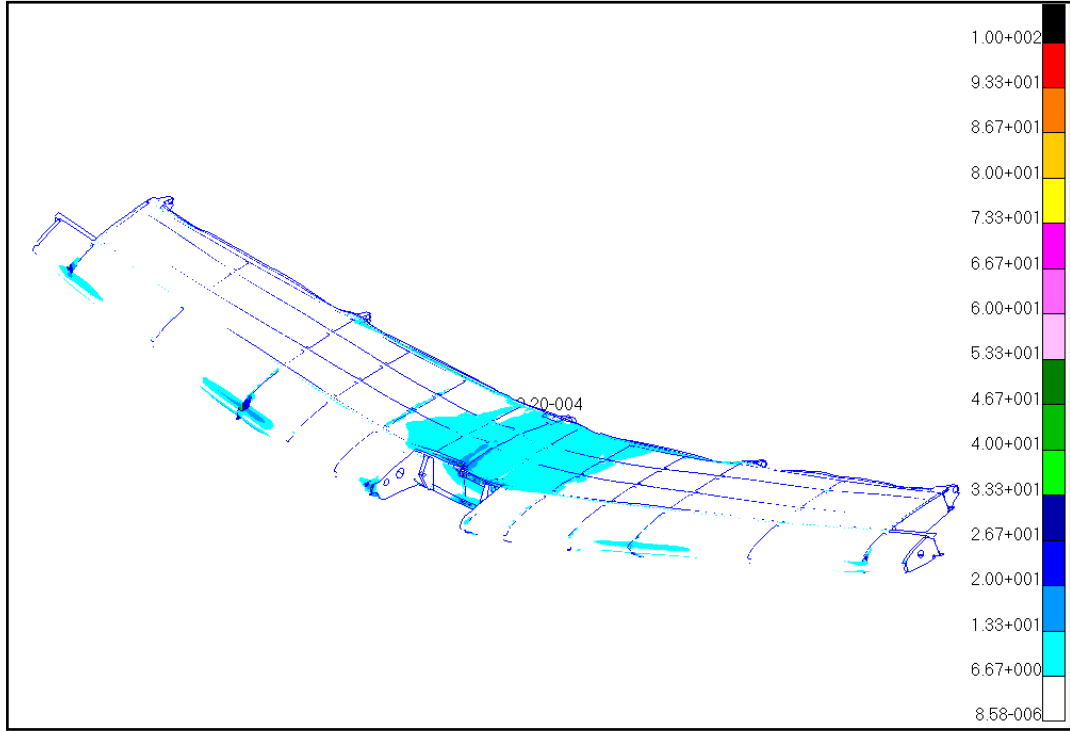
Şekil 7.15. Birinci Yük Durumu Enlemsel Yöndeki Aksenal Gerilim Sonuçları

Birinci yük durumu için yatay dengeleyici üzerindeki kesme gerilimleri “MPa” cinsinden Şekil 7.16’da gösterilmiştir.



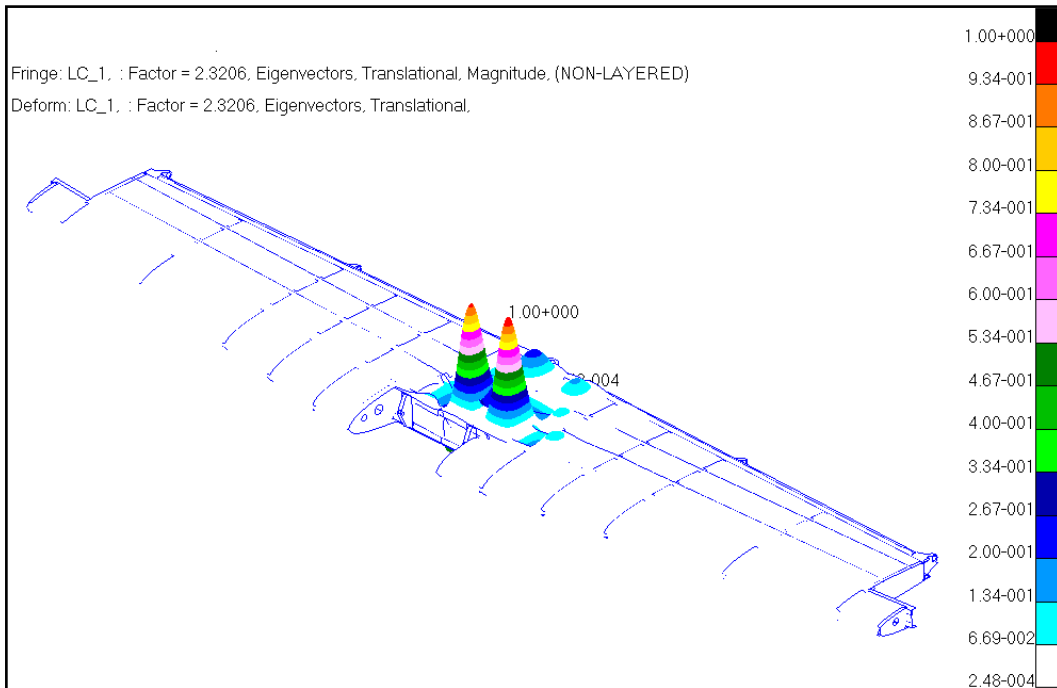
Şekil 7.16. Birinci Yük Durumu Kesme Gerilim Sonuçları

Birinci yük durumu için yatay dengeleyici üzerindeki Von Mises gerilimleri “MPa” cinsinden Şekil 7.17’de gösterilmiştir.



Şekil 7.17. Birinci Yük Durumu Von Mises Gerilim Sonuçları

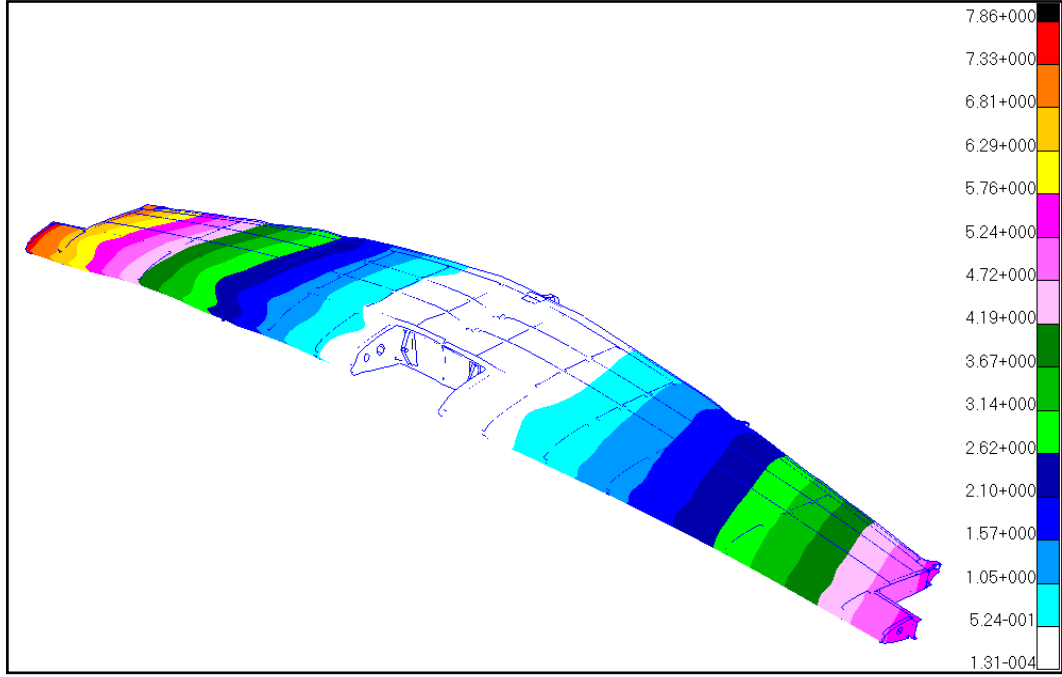
Birinci yük durumu için yatay dengeleyicinin ilk burkulma modu Şekil 7.18’de gösterilmiştir. Buna göre burkulma açısından en kritik bölge orta istasyondaki üst kabuk elemanlarıdır.



Şekil 7.18. Birinci Yük Durumu İlk Burkulma Modu

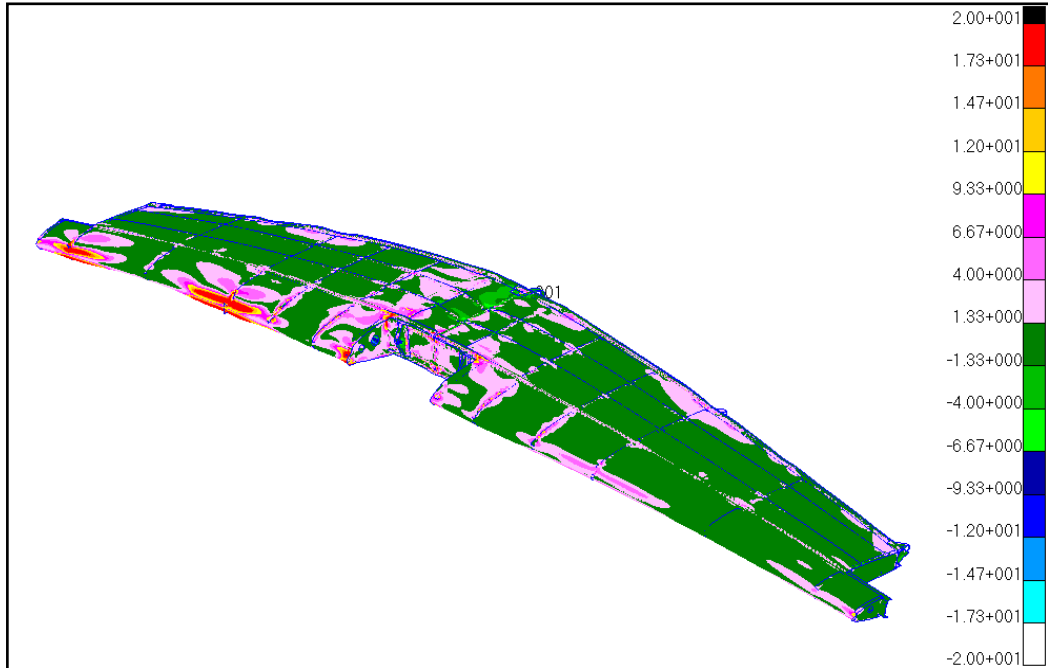
7.7.2 İkinci Yük Durumu için Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Yunuslama manevrası olan ikinci yük durumu için sonlu elemanlar analizi deplasman sonucu “mm” cinsinden Şekil 7.19’de gösterilmiştir.



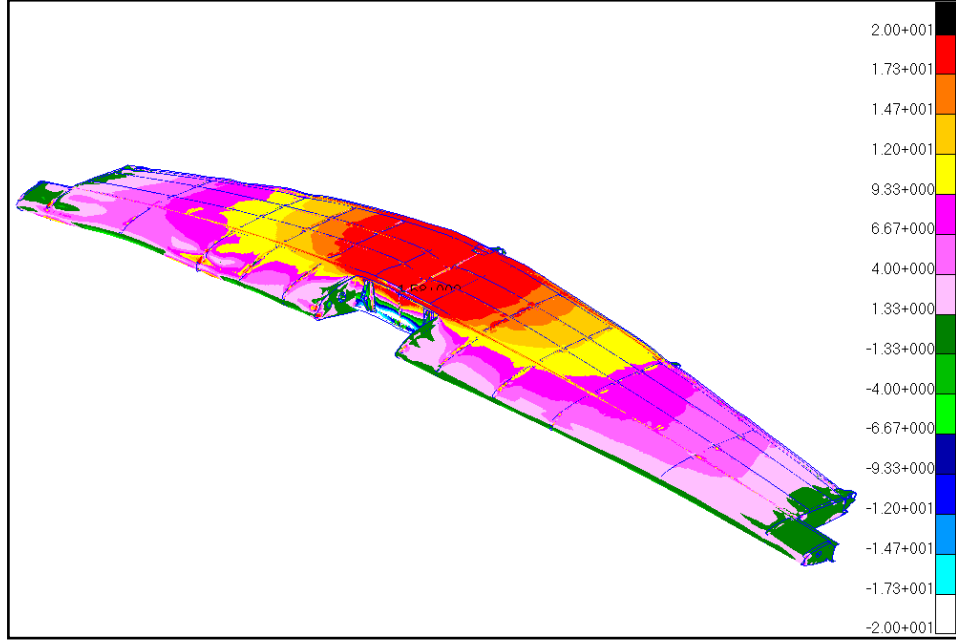
Şekil 7.19. İkinci Yük Durumu Deplasman Sonucu

İkinci yük durumu için uçağın boylamsal yönündeki (önden arakaya doğru uzanan eksen) eksenel gerilimler “MPa” cinsinden Şekil 7.20’de gösterilmiştir. Bu yük durumunda, irtifa dümeninden yüksek yükler geldiği için boylamsal yöndeki eksenel gerilimler yüksektir.



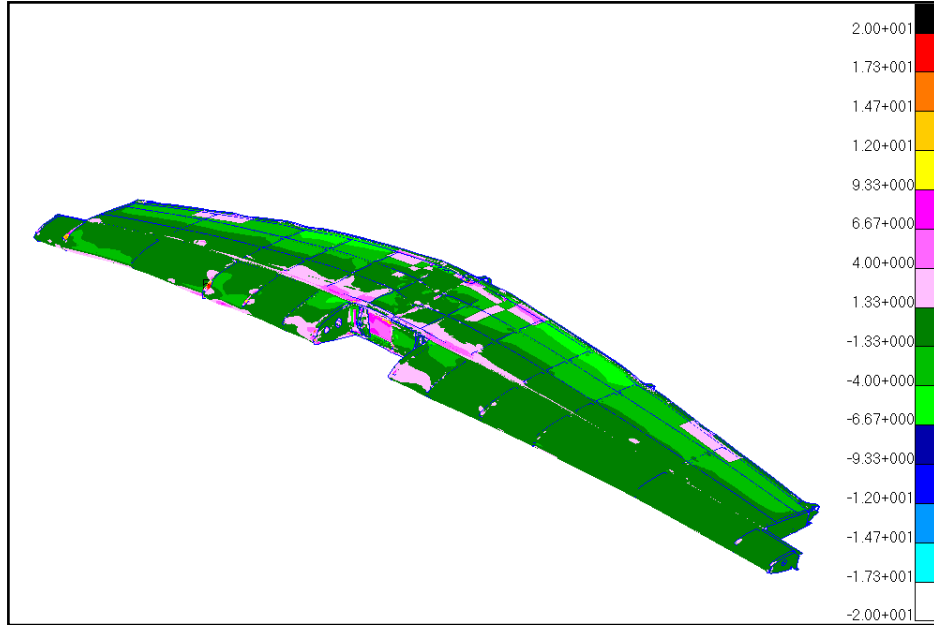
Şekil 7.20. İkinci Yük Durumu Boylamsal Yöndeki Eksenel Gerilim Sonuçları

İkinci yük durumu için uçağın enlemsel yönündeki (soldan sağa doğru uzanan eksen) aksenal gerilimler “MPa” cinsinden Şekil 7.21’de gösterilmiştir.



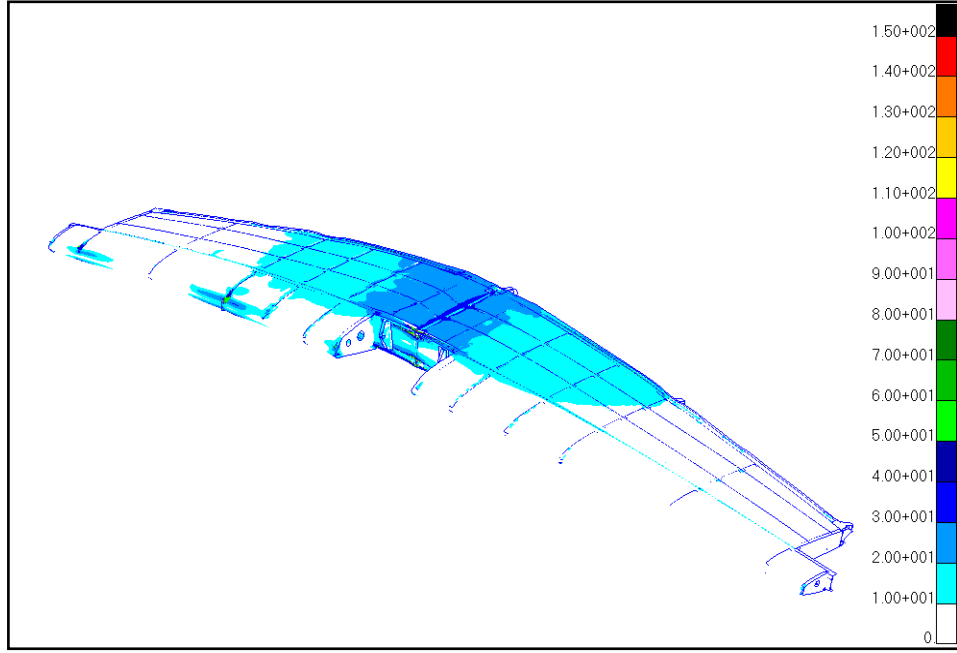
Şekil 7.21. İkinci Yük Durumu Enlemsel Yöndeki Aksenal Gerilim Sonuçları

İkinci yük durumu için yatay dengeleyici üzerindeki kesme gerilimleri “MPa” cinsinden Şekil 7.22’de gösterilmiştir.



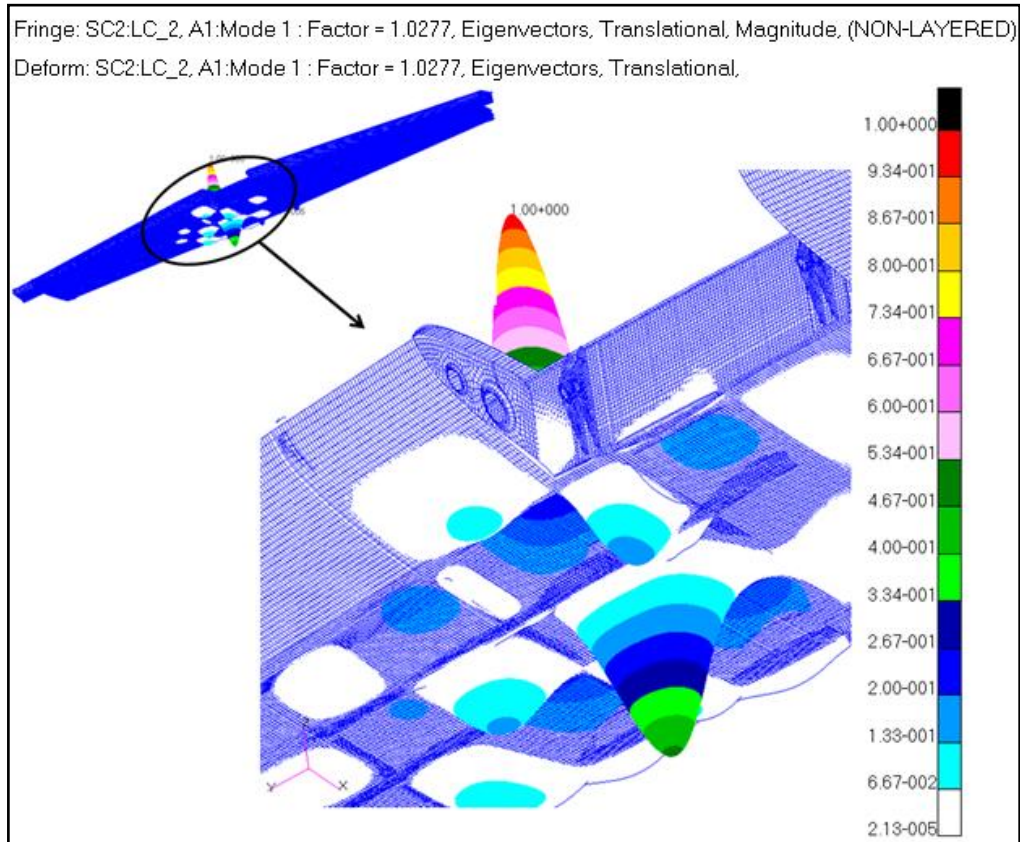
Şekil 7.22. İkinci Yük Durumu Kesme Gerilim Sonuçları

İkinci yük durumu için yatay dengeleyici üzerindeki Von Mises gerilimleri “MPa” cinsinden Şekil 7.23’te gösterilmiştir.



Şekil 7.23. İkinci Yük Durumu Von Mises Gerilim Sonuçları

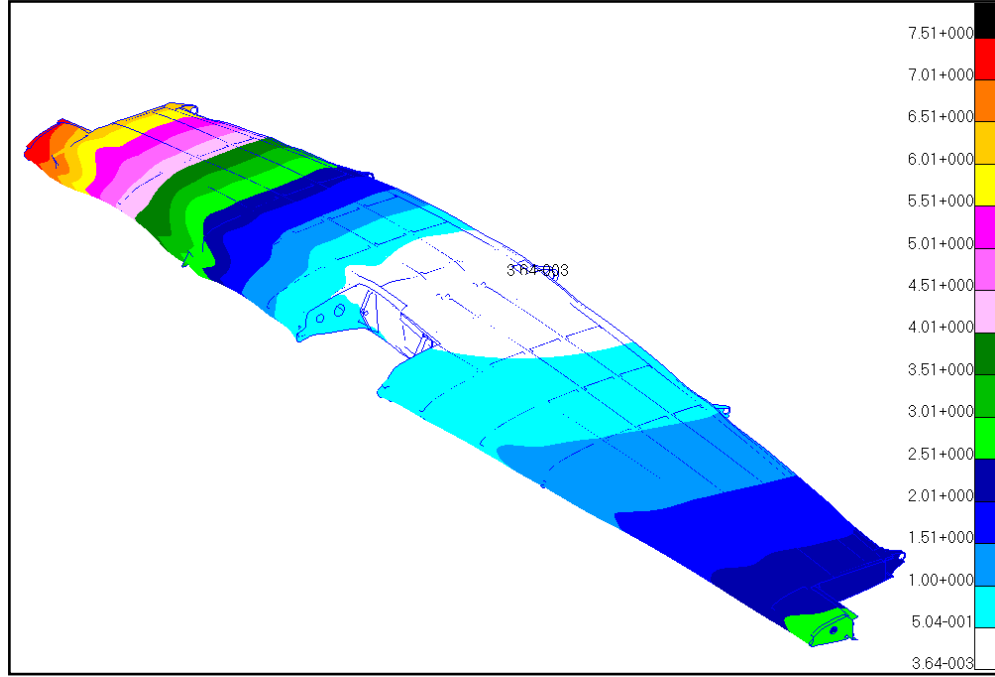
İkinci yük durumu için yatay dengeleyicinin ilk burkulma modu Şekil 7.24'te gösterilmiştir. Buna göre burkulma açısından en kritik bölge orta istasyondaki alt kabuk elemanlarıdır.



Şekil 7.24. İkinci Yük Durumu İlk Burkulma Modu

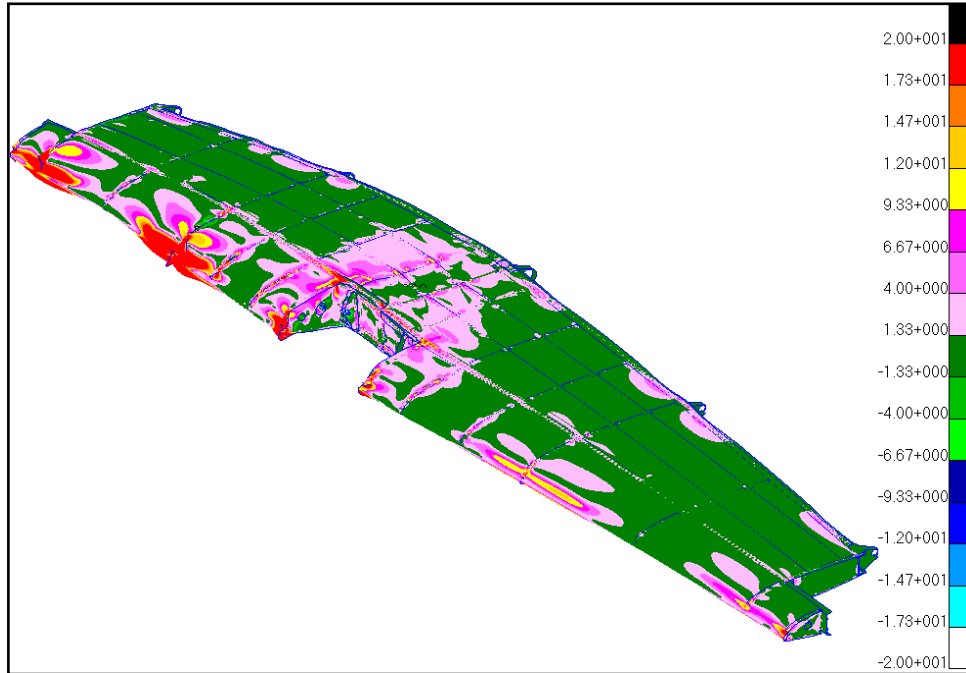
7.7.3 Üçüncü Yük Durumu için Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Dönme manevrası olan üçüncü yük durumu için sonlu elemanlar analizi deplasman sonucu “mm” cinsinden Şekil 7.25’de gösterilmiştir.



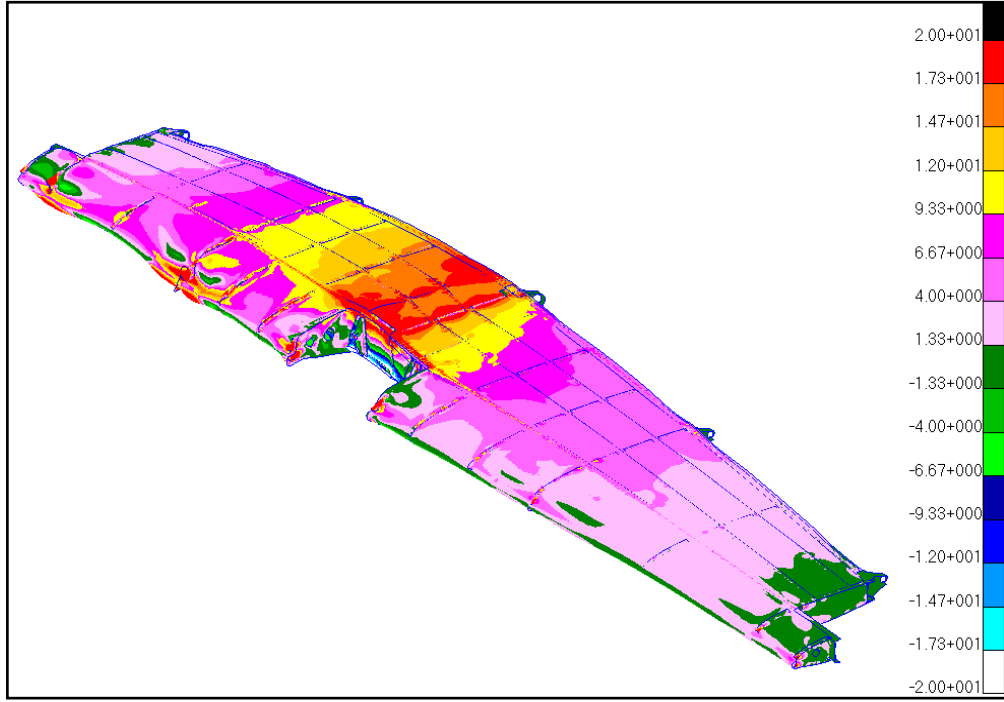
Şekil 7.25. Üçüncü Yük Durumu Deplasman Sonucu

Üçüncü yük durumu için uçağın boylamsal yönündeki (önden arakaya doğru uzanan eksen) aksenal gerilimler “MPa” cinsinden Şekil 7.26’da gösterilmiştir. Bu yük durumunda, irtifa dümeninden yüksek yükler geldiği için boylamsal yöndeki aksenal gerilimler yüksektir.



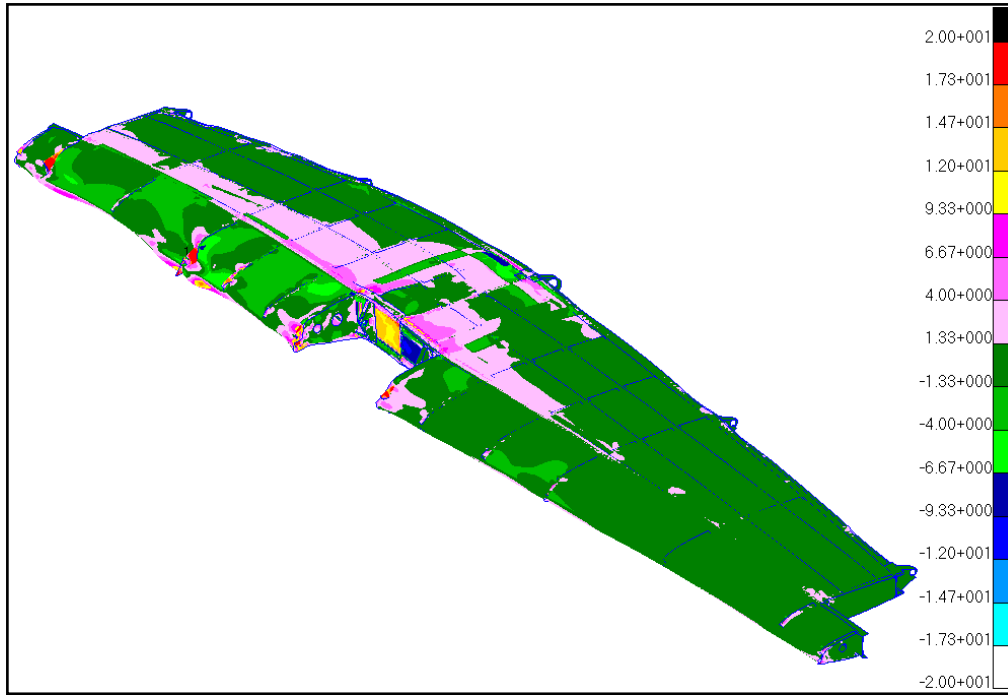
Şekil 7.26. Üçüncü Yük Durumu Boylamsal Yöndeki Aksenal Gerilim Sonuçları

Üçüncü yük durumu için uçağın enlemsel yönündeki (soldan sağa doğru uzanan eksen) aksenal gerilimler “MPa” cinsinden Şekil 7.27’de gösterilmiştir.



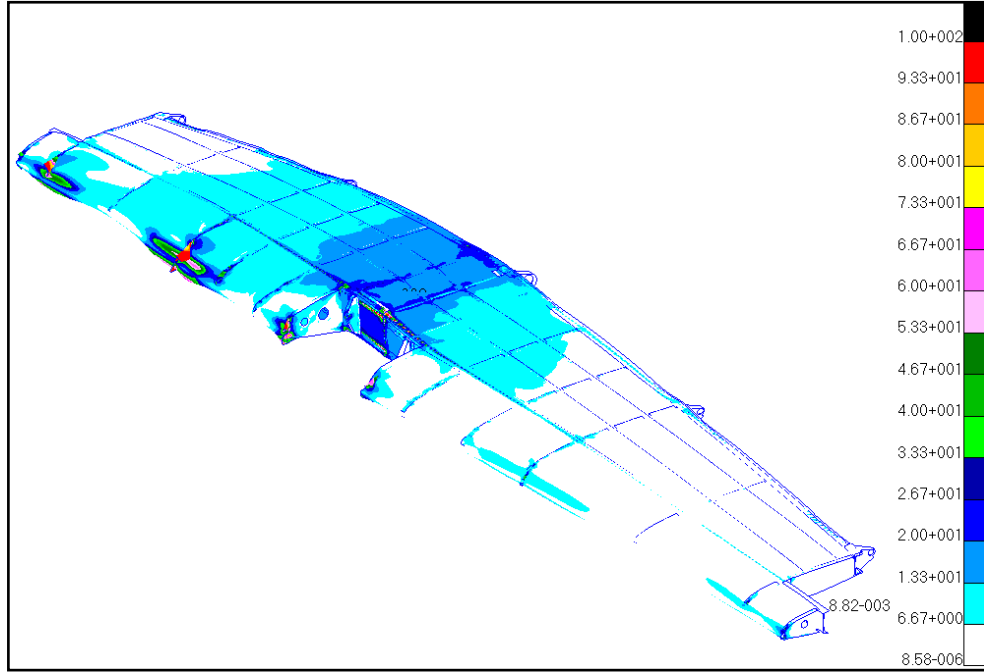
Şekil 7.27. Üçüncü Yük Durumu Enlemsel Yöndeki Aksenal Gerilim Sonuçları

Üçüncü yük durumu için yatay dengeleyici üzerindeki kesme gerilimleri “MPa” cinsinden Şekil 7.28’de gösterilmiştir.



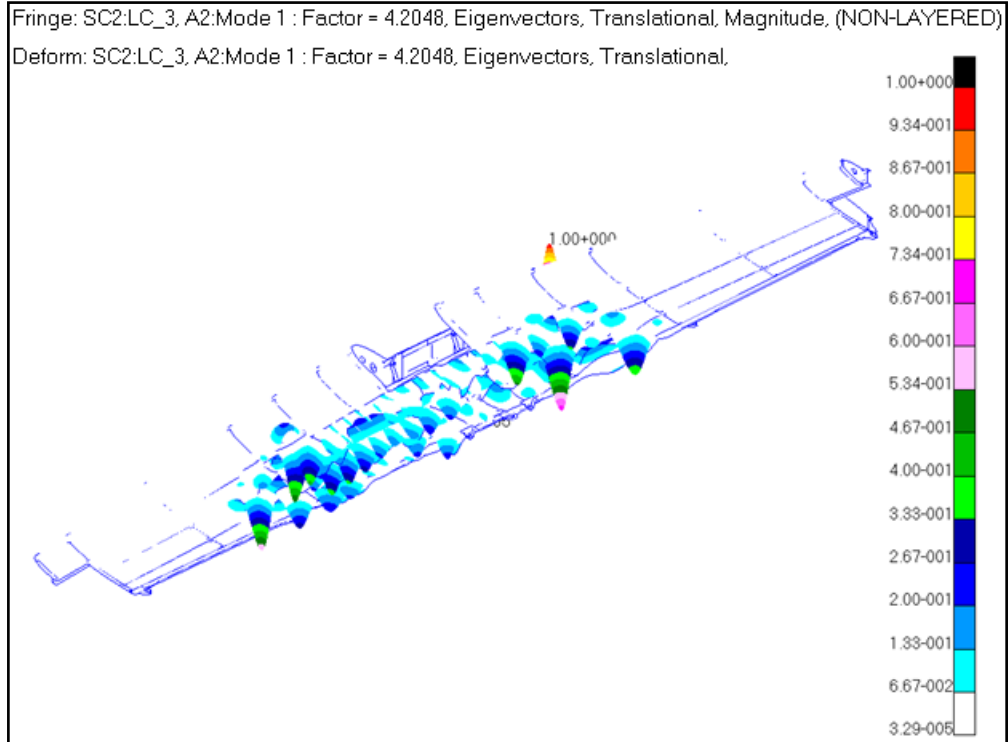
Şekil 7.28. Üçüncü Yük Durumu Kesme Gerilim Sonuçları

Üçüncü yük durumu için yatay dengeleyici üzerindeki Von Mises gerilimleri “MPa” cinsinden Şekil 7.29’da gösterilmiştir.



Şekil 7.29. Üçüncü Yük Durumu Von Mises Gerilim Sonuçları

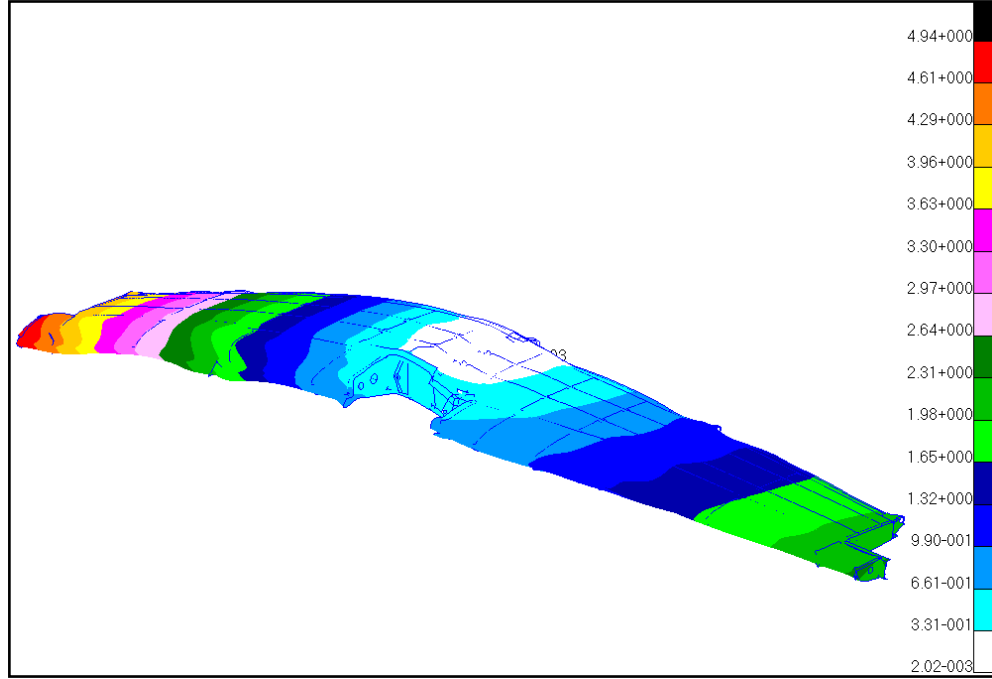
Üçüncü yük durumu için yatay dengeleyicinin ilk burkulma modu Şekil 7.30’da gösterilmiştir. Bu yük durumunda yatay dengeleyici üzerinde düşük basma ve kesme gerilimleri olduğu için burkulma güvenlik faktörü yüksektir.



Şekil 7.30. Üçüncü Yük Durumu İlk Burkulma Modu

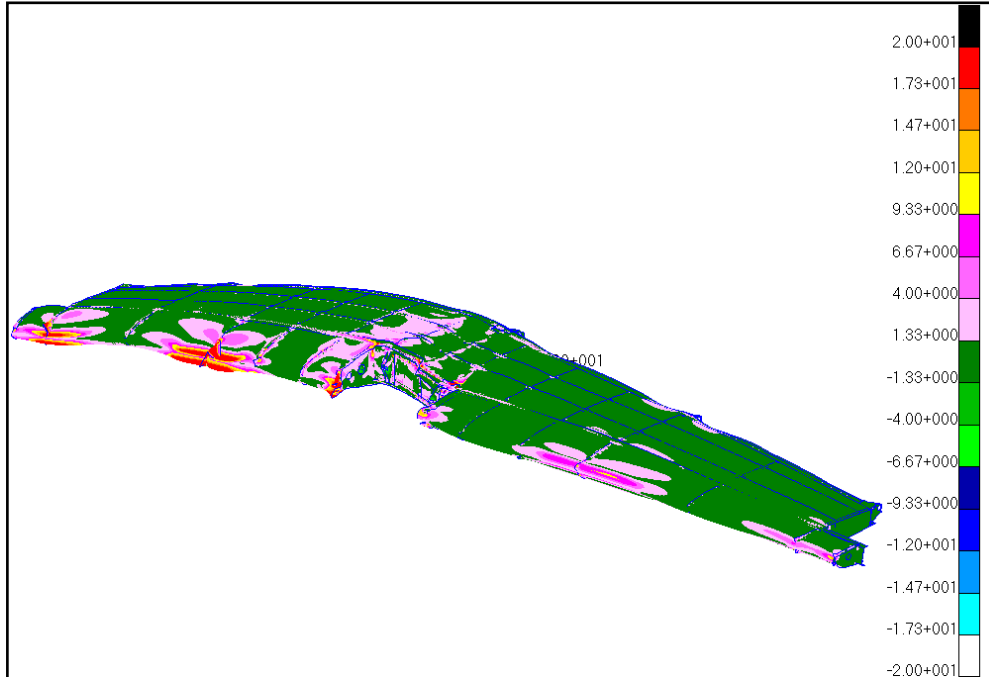
7.7.4 Dördüncü Yük Durumu için Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Yana dönerek dönüş manevrası olan dördüncü yük durumu için sonlu elemanlar analizi deplasman sonucu “mm” cinsinden Şekil 7.31’de gösterilmiştir.



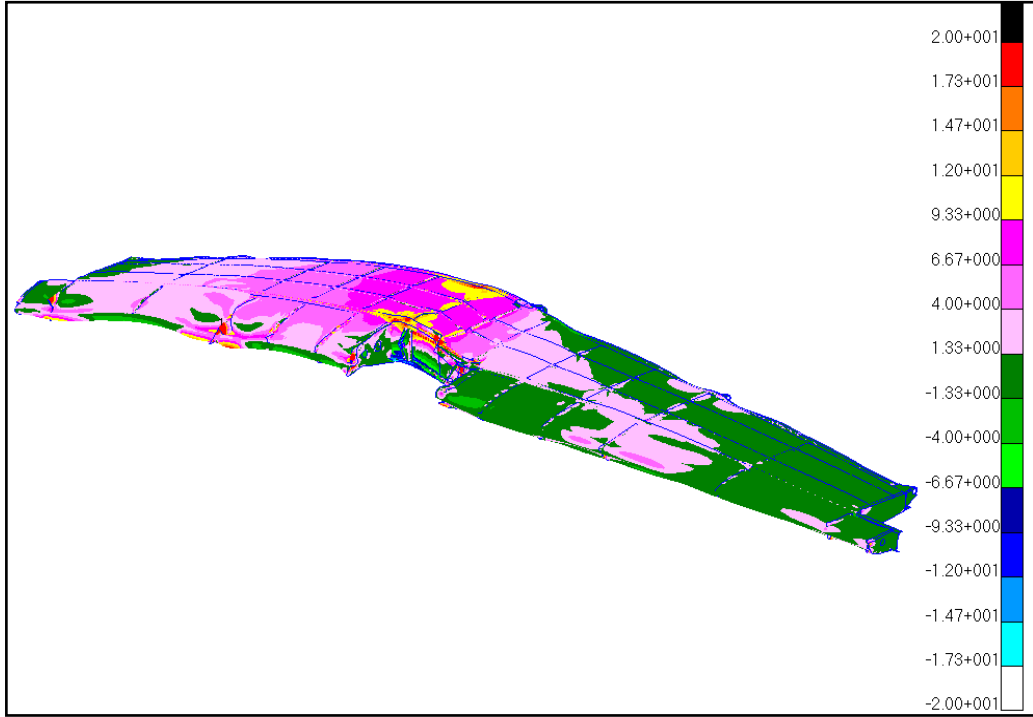
Şekil 7.31. Dördüncü Yük Durumu Deplasman Sonucu

Dördüncü yük durumu için uçağın boylamsal yönündeki (önden arakaya doğru uzanan eksen) aksenal gerilimler “MPa” cinsinden Şekil 7.32’de gösterilmiştir. Bu yük durumunda, irtifa dümeninden yüksek yükler geldiği için boylamsal yöndeki aksenal gerilimler yüksektir.



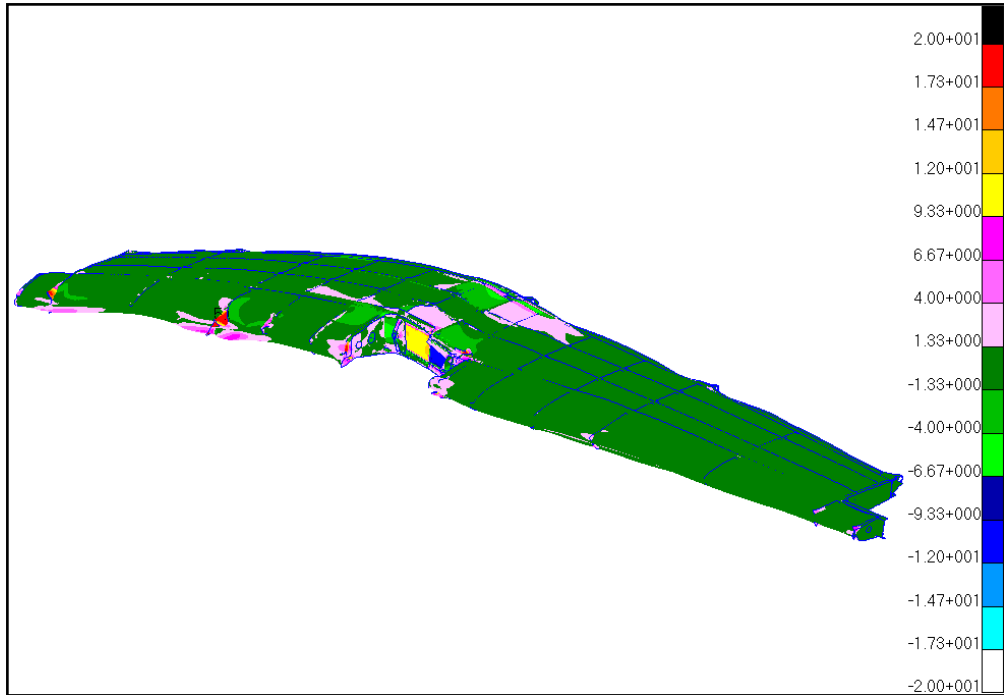
Şekil 7.32. Dördüncü Yük Durumu Boylamsal Yöndeki Aksenal Gerilim Sonuçları

Dördüncü yük durumu için uçağın enlemsel yönündeki (soldan sağa doğru uzanan eksen) aksenal gerilimler “MPa” cinsinden Şekil 7.33’de gösterilmiştir.



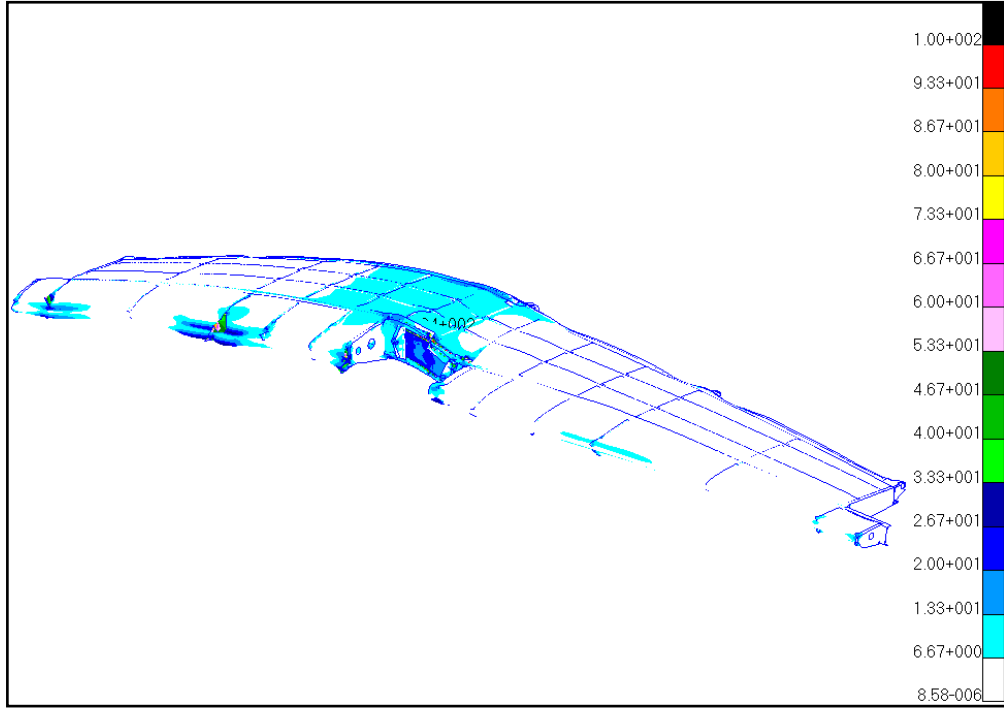
Şekil 7.33. Dördüncü Yük Durumu Enlemsel Yöndeki Aksenal Gerilim Sonuçları

Dördüncü yük durumu için yatay dengeleyici üzerindeki kesme gerilimleri “MPa” cinsinden Şekil 7.134’de gösterilmiştir.



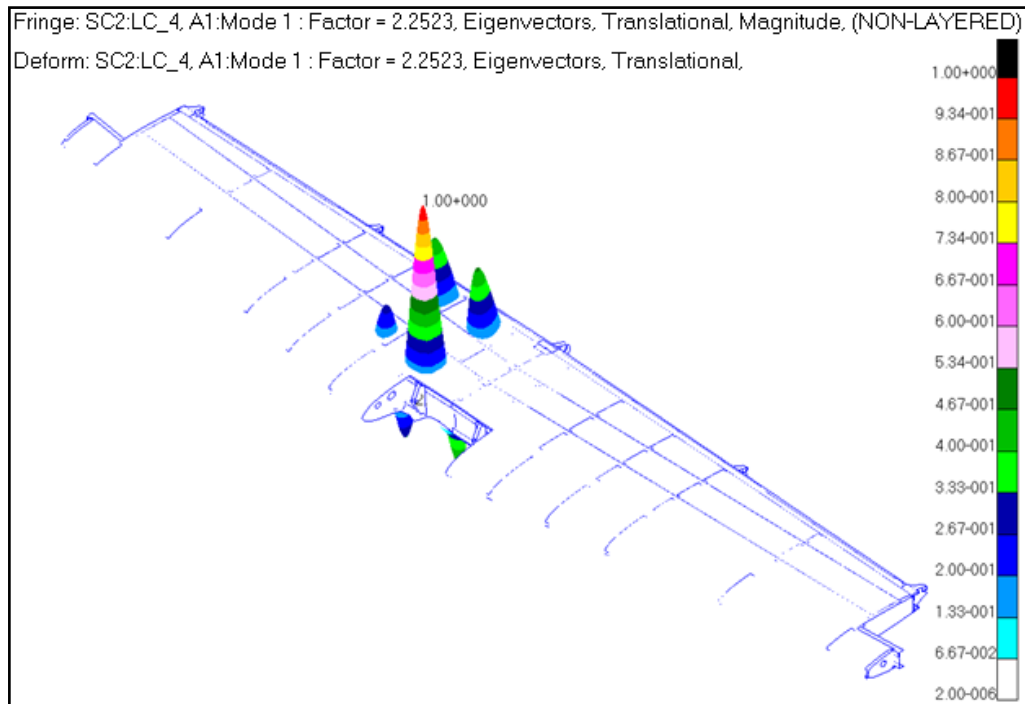
Şekil 7.34. Dördüncü Yük Durumu Kesme Gerilim Sonuçları

Dördüncü yük durumu için yatay dengeleyici üzerindeki Von Mises gerilimleri “MPa” cinsinden Şekil 7.35’de gösterilmiştir.



Şekil 7.35. Dördüncü Yük Durumu Von Mises Gerilim Sonuçları

Dördüncü yük durumu için yatay dengeleyicinin ilk burkulma modu Şekil 7.36’da gösterilmiştir. Buna göre burkulma açısından en kritik bölge orta istasyondaki alt kabuk elemanlarıdır.



Şekil 7.36. Dördüncü Yük Durumu İlk Burkulma Modu

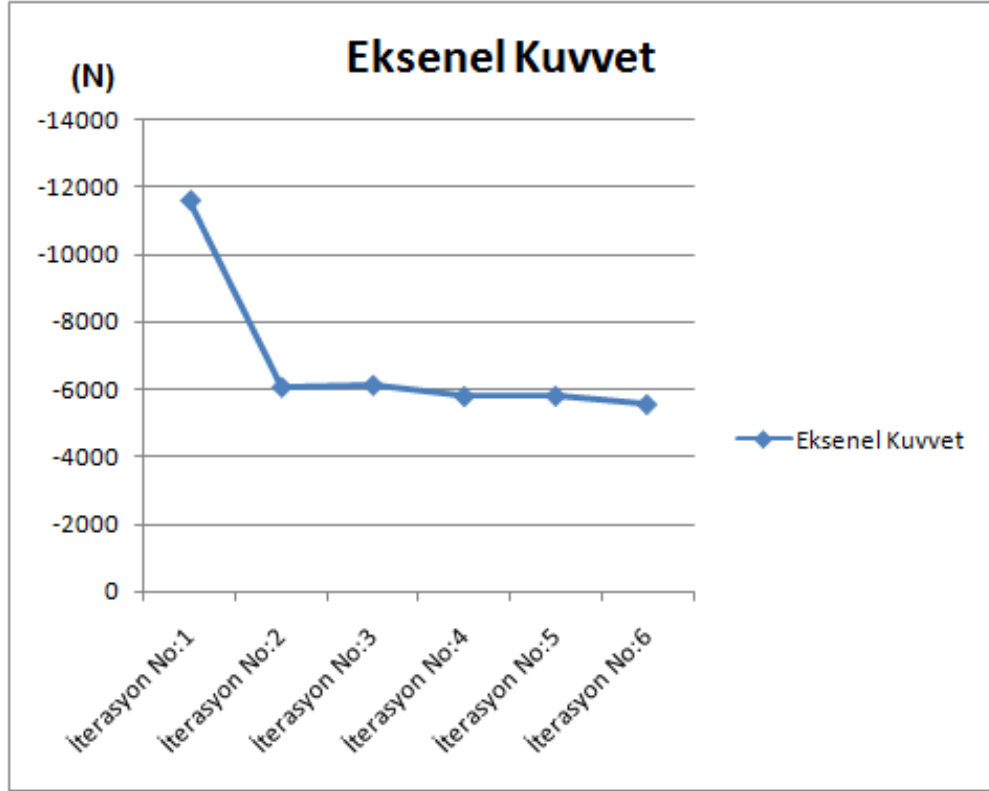
7.8. Sonuç

Bu tez çalışmasında, yarı monokok bir uçak komponenti olan yatay dengeleyici için tasarım optimizasyon prosedürü geliştirilmiştir. Literatür çalışmasıyla başlayan çalışmada, öncelikle mevcut uçak yapıları araştırılmış; yatay dengeleyicinin yapısal elemanları belirlenmiştir.

Boyutlandırma ve tasarım tasarımı gerçekleştirilecek olan yatay dengeleyici yapısal elemanlarının görevleri tanımlanmış ve tasarım gereksinimleri belirlenmiştir. Belirlenen tasarım kriterlerine göre, yapısal elemanların birçok farklı mukavemet dayanım değerleri analitik olarak hesaplanmıştır. Yapısal elemanlar üzerine etkiyen yüklemeler, hesaplanmış olan dayanımlarla karşılaştırılıp; iteratif bir şekilde boyutlandırma ve optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Analitik hesaplamalar sonucu ortaya çıkan optimum tasarım, detay sonlu elemanlar analiz programıyla analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

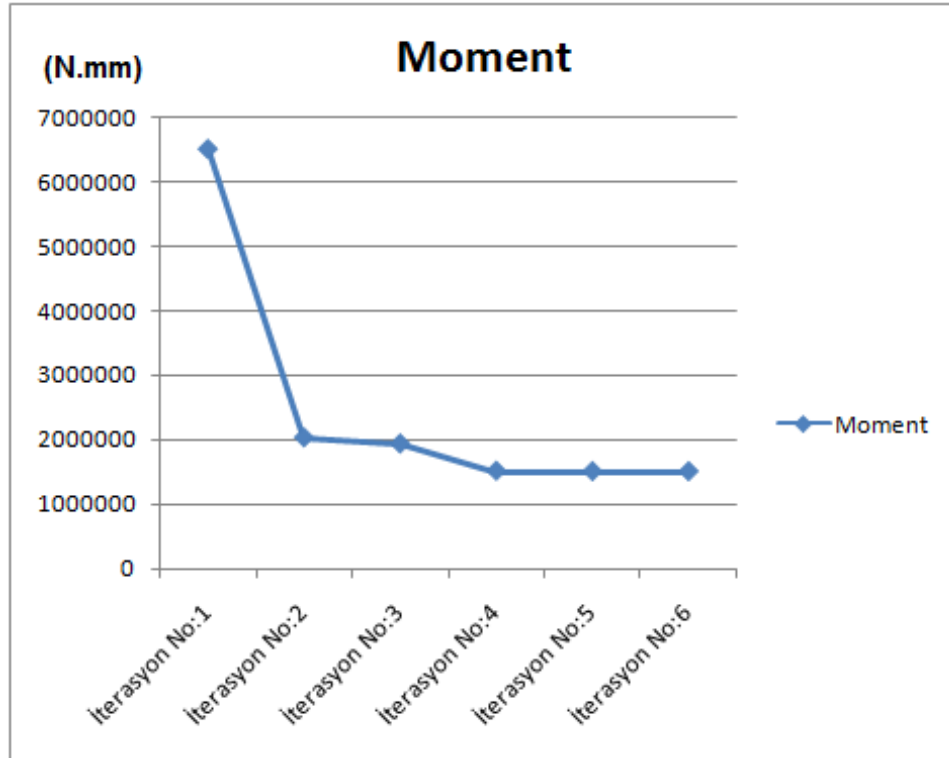
Sonuç olarak, akrobasi uçağına ait bir yatay dengeleyici yapısı, üzerine etkiyen yüklemelere dayanabilecek kadar mukavemetli ve uçağın performansını olumsuz yönde etkilemeyecek kadar hafif olacak şekilde bir tasarım optimizasyon yöntemi geliştirilerek optimize edilmiştir.

Tasarım iterasyonları sırasında parametrelerin değişimini gözlemleyebilmek için, yatay dengeleyicinin orta kesitindeki alt kabuğa ait parametrelerin değişim grafikleri Şekil 7.37'den Şekil 7.43'e kadar gösterilmiştir. Şekil 7.37'de kritik kesit üzerine etkiyen basma yükünün iterasyonlara göre değişimi gösterilmiştir. Her iterasyonda yeni yapısal elemanlar eklendiği için, yatay dengeleyici üzerinde yük yolları değişmekte ve Şekil 7.37'de görüldüğü gibi kritik kesit üzerindeki basma yükü azalmaktadır.



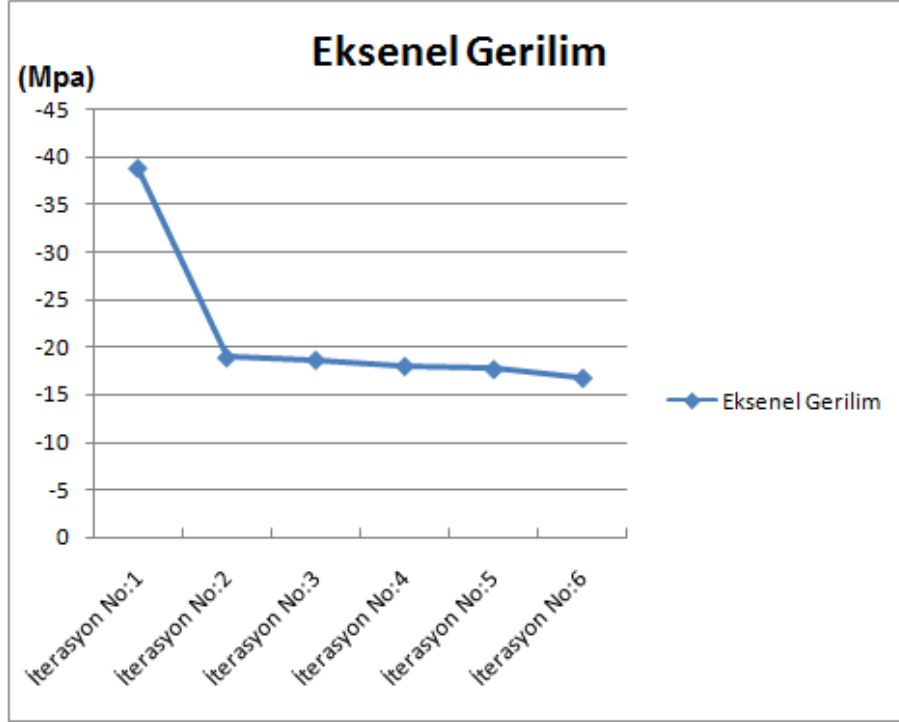
Şekil 7.37. Eksenel Kuvvet – İterasyon Döngü Grafiği

İterasyonlar sürecinde yeni yapısal elemanların eklenmesi ile kritik kesit üzerindeki eksenel kuvvetlerin azalmasına bağlı olarak; kritik kesit üzerine etkiyen moment değeri de Şekil 7.38’de görüldüğü gibi azalmaktadır.



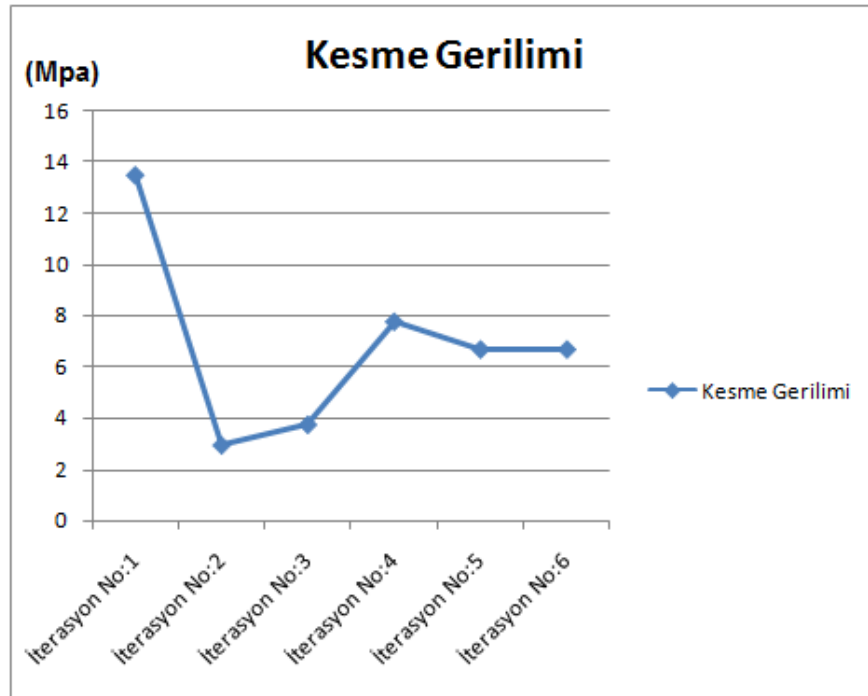
Şekil 7.38. Moment – İterasyon Döngü Grafiği

Kritik kesit üzerine etkiyen aksenal kuvvetlerin ve momentlerin azalmasına bağılı olarak, Şekil 7.39'da görüldüğü gibi kritik kesit üzerine etkiyen aksenal gerilimler iterasyon sürecinde azalmaktadır.



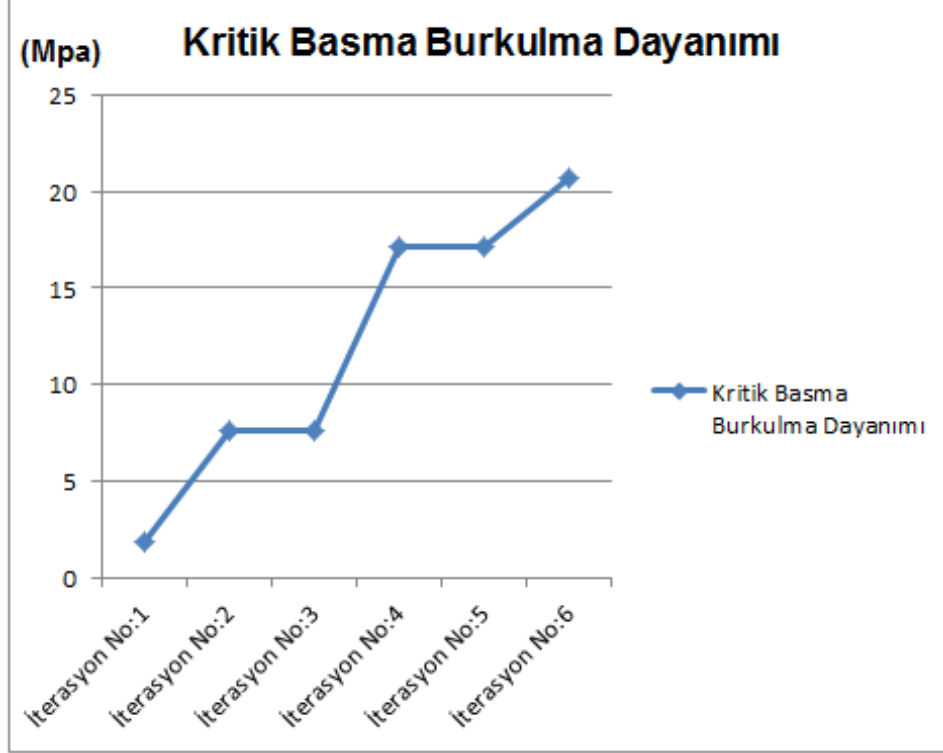
Şekil 7.39. Eksenal Gerilim – İterasyon Döngü Grafiği

İterasyonlar sürecinde yeni yapısal elemanların eklenmesi yatay dengeleyici üzerindeki kesme gerilimleri Şekil 7.40'ta görüldüğü gibi değişmektedir.

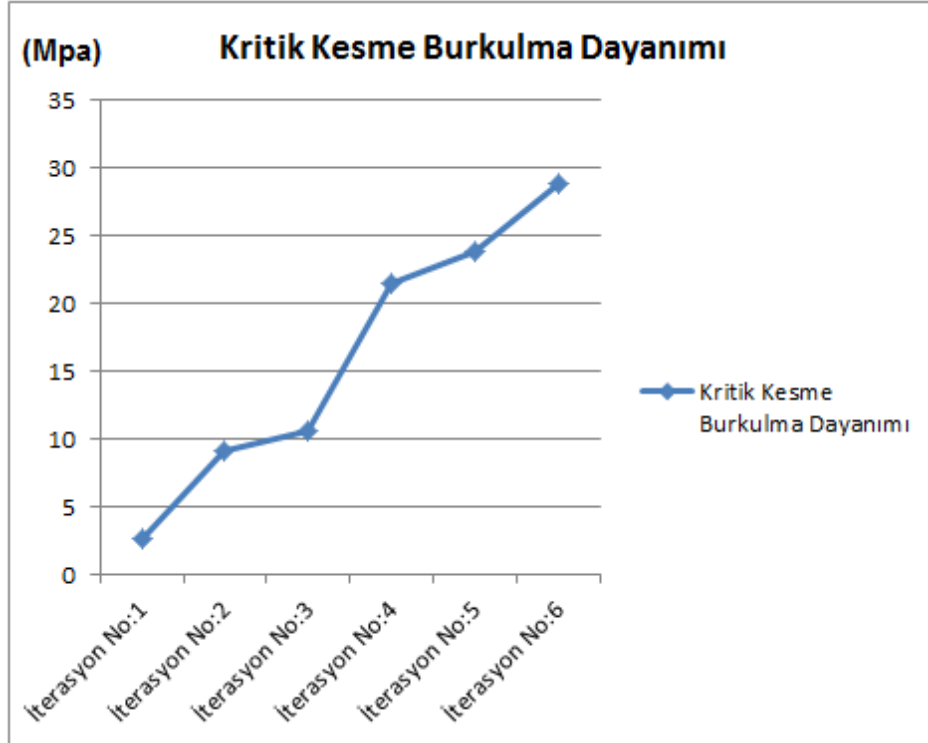


Şekil 7.40. Kesme Gerilimi – İterasyon Döngü Grafiği

İterasyonlar sürecinde yeni yapısal elemanların eklenmesi ile yapısal elemanın panel boyutunun değişmesine bağlı olarak; kabuk elemanının kritik basma burkulma dayanımı ve kritik kesme burkulma dayanımı, Şekil 7.41 ve Şekil 7.42’de görüldüğü gibi artmaktadır.



Şekil 7.41. Kritik Basma Burkulma Dayanımı – İterasyon Döngü Grafiği



Şekil 7.42. Kritik Kesme Burkulma Dayanımı – İterasyon Döngü Grafiği

Tasarım iterasyonları sonucunda, panel üzerine etkiyen gerilimleri azalması ve dayanımlarının artması sonucu, Şekil 7.43'te görüldüğü gibi güvenlik faktörleri artmaktadır.



Şekil 7.43. Güvenlik Faktörü – İterasyon Döngü Grafiği

KAYNAKLAR

Kitaplar:

1. Beer, Ferdinand P., 1992, Mechanics of Materials 2nd Ed., McGraw-Hill, Berkshire, 377p
2. Bruhn, E. F., 1973, Analysis and Design of Flight Vehicle Structure, Tri-State Offset Company, U.S.A., 999p.
3. Flabel, Jean-Claude, 1997., Practical Stress Analysis for Desing Engineers 1st Ed., Lake City Publishing Company, Idaho, 700p.
4. Megson, T. H. G., 2003, Aircraft Structures for Engineering Students 3rd Ed., Butterworth-Heinemann, London, 248p.
5. Niu, Michael C. Y., 1999, Airframe Structural Design 2nd Ed., Hong Kong Conmilit Press Ltd., Hong Kong, 313p.
6. Şahin, Kaya, 1999, Uçaklar ve Helikopterler 3. Baskı İnkılap Kitabevi Yayın Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul. 345s.
7. Peery, David J. 198., Aircraft Structures 2nd Ed., McGraw-Hill, U.S.A., 232p.
8. Timoshenko, Stephen P. ve Gere, James M., 1985, Theory of Elastic Stability. 17th Printing McGraw-Hill Book Co-Singapore, 280pp.

Raporlar:

9. ESASG, O., 2007, Erdmann Static Strength Analysis of Stiffened Shells,; AIRBUS Report, 47p.
10. Spaink, A.W., 1976, Examination of the procedure used at FOKKER for calculating allowable com-pressive loads of short sections: FOKKER-Report, 139p.

Tezler:

11. Çakır, M. K., 2008, Structural Optimization of a Trainer Aircraft Wing by Using Genetic Algorithm, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 148s.
12. Dehneliler, S., 2011, Bir Uçağın Yatay Dengeleyicisinin Genetik Algoritma Yöntemi ile Yapısal Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 125s.
13. Taşkınoğlu, E. E., 2006, A Genetic Algorithm for Structural Optimization, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 90s.

CD-ROM:

- 14.** MSC Software Corporation, 2005, The MSC Combined Documentation. [CD-Rom]

Elektronik Ansiklopedi ve Kitaplar:

- 15.** Internet: Aerobasi, 2011, In Vikipedi Online. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Aerobasi>

İnternet (www/ftp) kaynakları:

- 16.** Güneş, D., 2011, Uçak Nasıl Kumanda Edilir, <http://www.aktifbir.com/f87/ucak-nasil-kumanda-edilir-17181/#ixzz1uHKBESFW>.

EK AÇIKLAMALAR

Sonlu elemanlar analizi sonucunda yunuslama manevrası (yük durumu 2) için elde edilen enlemsel yöndeki eksenel gerilimler ve kabuk üzerindeki kesme gerilimler sırasıyla Şekil 7.21 ve 7.22’de gösterilmiştir. Buna göre kritik kesit olan, yatay dengeleyicinin orta kısmında yer alan alt kabuk üzerindeki ortalama eksenel gerilim ve ortalama kesme gerilimi şöyledir:

$$\sigma_{\text{eksenel}} = -17 \text{ MPa} \quad (7.1)$$

$$\tau_{\text{kesme}} = 7 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

Sonlu elemanlar analizi sonucunda yunuslama manevrası (yük durumu 2) için elde edilen burkulma güvenlik faktörü Şekil 7.24’te gösterilmiştir ve şöyledir:

$$G.F. = 1.0277 \quad (7.3)$$

Sonlu elemanlar analizi sonucuna göre elde edilen veriler, basma ve kesme burkulma güvenlik faktörü hesabı için kullanılan denklemlere yerleştirilirse;

$$\frac{17}{F_c} + \left(\frac{7}{F_s}\right)^2 = 1 \quad (7.4)$$

$$1.0277 = \frac{2}{\left(\frac{17}{F_c} + \sqrt{\left(\frac{17}{F_c}\right)^2 + 4\left(\frac{7}{F_s}\right)^2}\right)} \quad (7.5)$$

Yukarıdaki iki bilinmeyenli iki denklemini, sonlu elemanlar metodunun sonuçlarına göre sağlayan basma ve kesme burkulma dayanımları şöyledir:

$$F_c = 18.03 \text{ MPa} \quad (7.6)$$

$$F_s = 29.29 \text{ MPa} \quad (7.7)$$

Kritik kabuk istasyonun, yunuslama yük durumu (yük durumu 2) için (1. kiriş istasyonu ve 6. kaburga) altıncı iterasyon analitik metot sonuçları ile detay sonlu elemanlar metodu sonuçları Tablo 7.1’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.1. Analitik Analiz ve Detay Sonlu Elemanlar Karşılaştırması

	Eksenel Gerilim (MPa)	Kesme Gerilimi (MPa)	Basma Burkulma Dayanımı (MPa)	Kesme Burkulma Dayanımı (MPa)	Burkulma Güvenlik Faktörü
Analitik Sonuçlar	-16.75	6.69	20.7	28.8	1.15
Detay Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	-17.00	7.00	18.03	29.29	1.03

Buna göre, analitik metotlarla detay sonlu elemanlar metodu karşılaştırılarak; tasarım sürecinde izlenen metodolojinin doğrulanması sağlanmıştır.

Ekler bölümünde, kritik yük durumu 2 (yunuslama manevrası) için bütün iterasyonlara ait hesap detaylarını gösteren tablolar gösterilmiştir. Sırasıyla,

1. Kalınlık Girdileri Tablosu
2. Panel Boyut Girdileri Tablosu
3. Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler Tablosu
4. Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler Tablosu
5. Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri Tablosu
6. Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri Tablosu
7. Üst Kabuk G.F. Değerleri Tablosu
8. Alt Kabuk G.F. Değerleri Tablosu

her iterasyon süreci için gösterilmiştir.

EKLER

EK – A 1. İTERASYON KRİTİK YÜK DURUMU 2 İÇİN HESAP DETAYLARI

Tablo A.1. Birinci İterasyon Kalınlık Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Ön Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Kiriş Plakası Kalınlık (mm)	Kiriş Kalınlık (mm)
2	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1
2	3	1	1	1	1	1	1
2	4	1	1	1	1	1	1
2	5	1	1	1	1	1	1
2	6	1	1	1	1	1	1
2	7	1	1	1	1	1	1
2	8	1	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1	1	1
3	3	1	1	1	1	1	1
3	4	1	1	1	1	1	1
3	5	1	1	1	1	1	1
3	6	1	1	1	1	1	1
3	7	1	1	1	1	1	1

Tablo A.2. Birinci İterasyon Panel Boyut Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Kabuk Genişlik (mm)	Arka Kabuk Genişlik (mm)	Kiriş Uzunluk (mm)	Kiriş Plakası Yükseklik (mm)	Kiriş Genişlik (mm)	Kiriş Atalet (mm ⁴)
2	1	100	0	200	56.5	20	1547.61
2	2	125.6	290.3	953	77	20	1547.61
2	3	163.6	380.3	756.7	107	20	1547.61
2	4	0	420	150	120	20	1547.61
2	5	0	420	150	120	20	1547.61
2	6	163.6	380.3	756.7	107	20	1547.61
2	7	125.6	290.3	953	77	20	1547.61
2	8	100	0	200	56.5	20	1547.61
3	2	290.3	0	950.5	90	20	1547.61
3	3	380.3	0	750	120	20	1547.61
3	4	420	0	150	120	20	1547.61
3	5	420	0	150	120	20	1547.61
3	6	380.3	0	750	120	20	1547.61
3	7	290.3	0	950.5	90	20	1547.61

Tablo A.3. Birinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler

Kiriş No	Kaburga No	Kuvvet 1. Kesit Merkezi	Moment 1. Kesit Merkezi	Kuvvet 2. Kesit Merkezi	Moment 2. Kesit Merkezi
2	1	0.41	-157.07	-57.27	36249.82
2	2	-100.81	47515.74	-588.93	1888599.7
2	3	-608.18	2619943.6	-11575.95	6503305.7
2	4	-10961.95	7295748.2	-7063.43	6648293
2	5	-7063.41	6648271.1	-8185.57	5942298.5
2	6	-8459.87	5326143.9	-779.01	2198819.4
2	7	-744.98	1583445.2	136.11	44637.77
2	8	167.46	32158.04	-1.4	-243.95
3	2	-4.31	-1137.58	3643.45	1981059.5
3	3	3639.32	2626894.2	11253.52	6754170.1
3	4	11323.26	6750546.7	7424.75	6062968.7
3	5	7422.27	6062641.8	8544.42	5596175.4
3	6	8283.19	5613088.9	2899.61	2152833.4
3	7	2904.02	1623397	-4.31	-1091.58

Tablo A.4. Birinci İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler

Kiriş No	Kaburga No	Eksenel Gerilim Üst 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Üst 2. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 2. Kesit Merkezi
2	1	0	0	-0.07	-0.41
2	2	0.02	-0.37	6.73	-8.78
2	3	8.41	-10.07	7.1	-38.78
2	4	8.05	-43.41	12.06	-34.84
2	5	12.06	-34.84	7.76	-34.16
2	6	7.22	-30.36	6.69	-8.82
2	7	5.2	-7.8	0.42	0.05
2	8	0.86	0.56	-0.01	0
3	2	-0.01	0	16.08	-0.25
3	3	15.7	-3.15	43.62	-4.84
3	4	42.07	-5.55	33.36	-9.41
3	5	33.35	-9.41	33.52	-5.96
3	6	34.41	-5.86	12.72	-2.73
3	7	13	-0.38	-0.01	0

Tablo A.5. Birinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri

Kiriş No	Kaburga No	Kesme Gerilim Kiriş Plakası	Kesme Gerilim Ön Üst Kabuk	Kesme Gerilim Arka Üst Kabuk	Kesme Gerilim Ön Alt Kabuk	Kesme Gerilim Arka Alt Kabuk
2	1	0.39	2.76		2.72	
2	2	16.53	7.02	1.33	3.26	5.38
2	3	29.37	10.28	3.12	13.95	13.47

2	4	35.78		13.21		12.58
2	5	38.01		4.31		2.81
2	6	22	4.01	8.24	7.16	16.2
2	7	12.29	3.83	4.4	1.77	7.42
2	8	0.39	3.23		2.06	
3	2	26.01	1.33		5.38	
3	3	51.07	3.12		13.47	
3	4	37.25	13.21		12.58	
3	5	26.06	4.31		2.81	
3	6	48.9	8.24		16.2	
3	7	25.39	4.4		7.42	

Tablo A.6. Birinci İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Kiriş Plakası GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Kiriş GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	146.51	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	391.51	Lokal Burkulma	2
2	2	5.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	18.32	Lokal Burkulma	2
2	3	0.59	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.15	Lokal Burkulma	2
2	4	0.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	3.71	Lokal Burkulma	2
2	5	0.36	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	4.62	Lokal Burkulma	2
2	6	0.76	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.3	Lokal Burkulma	2
2	7	5.94	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	20.62	Lokal Burkulma	2
2	8	79.01	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	153.63	Lokal Burkulma	4
3	2	29.15	Çekme Akma	2	29.15	Çekme Akma	2
3	3	0.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	10.75	Çekme Akma	2
3	4	0.42	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	11.14	Çekme Akma	2
3	5	0.43	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	13.99	Çekme Akma	2
3	6	0.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	13.63	Çekme Akma	2
3	7	13.11	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	36.06	Çekme Akma	2

Tablo A.7. Birinci İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Üst Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Üst Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	13.59	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	4.47	Basma ve Kesme Burkulma	1	0.32	Basma ve Kesme Burkulma	1

			Kombinasyonu			Kombinasyonu	
2	3	0.58	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	0.08	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.13	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	5	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.13	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	6	0.58	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	0.1	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	7	4.08	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	0.34	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	8	9.06	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	0.41	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	3	0.15	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	4	1.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	5	0.39	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	6	0.17	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	7	0.45	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

Tablo A.8. Birinci İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Alt Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Alt Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	12.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	1.97	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	0.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.05	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.07	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.08	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	6	0.33	Basma ve Kesme Burkulma	2	0.06	Basma ve Kesme Burkulma	2

			Kombinasyonu			Kombinasyonu	
2	7	2.23	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.29	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	8	14.2	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	0.54	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	3	0.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	4	0.3	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	5	0.3	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	6	0.13	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	7	0.53	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

EK – B 2. İTERASYON KRİTİK YÜK DURUMU 2 İÇİN HESAP DETAYLARI

Tablo B.1. İkinci İterasyon Kalınlık Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Ön Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Kiriş Plakası Kalınlık (mm)	Kiriş Kalınlık (mm)
2	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1
2	3	1	1	1	1	1	1
2	4	1	1	1	1	1	1
2	5	1	1	1	1	1	1
2	6	1	1	1	1	1	1
2	7	1	1	1	1	1	1
2	8	1	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1	1	1
3	3	1	1	1	1	1	1
3	4	1	1	1	1	1	1
3	5	1	1	1	1	1	1
3	6	1	1	1	1	1	1
3	7	1	1	1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1
4	5	1	1	1	1	1	1
4	6	1	1	1	1	1	1
4	7	1	1	1	1	1	1

Tablo B.2. İkinci İterasyon Panel Boyut Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Kabuk Genişlik (mm)	Arka Kabuk Genişlik (mm)	Kiriş Uzunluk (mm)	Kiriş Plakası Yükseklik (mm)	Kiriş Genişlik (mm)	Kiriş Atalet (mm ⁴)
2	1	100	0	200	56.5	20	1547.61
2	2	125.6	145.15	953	77	20	1547.61
2	3	163.6	190.15	756.7	107	20	1547.61
2	4	0	210	150	120	20	1547.61
2	5	0	210	150	120	20	1547.61
2	6	163.6	190.15	756.7	107	20	1547.61
2	7	125.6	145.15	953	77	20	1547.61
2	8	100	0	200	56.5	20	1547.61
3	2	145.15	145.15	950.5	0	0	1547.61
3	3	190.15	190.15	750	0	0	1547.61
3	4	210	210	150	0	0	1547.61
3	5	210	210	150	0	0	1547.61
3	6	190.15	190.15	750	0	0	1547.61

3	7	145.15	145.15	950.5	0	0	1547.61
4	2	145.15	0	950.5	90	20	1547.61
4	3	190.15	0	750	120	20	1547.61
4	4	210	0	150	120	20	1547.61
4	5	210	0	150	120	20	1547.61
4	6	190.15	0	750	120	20	1547.61
4	7	145.15	0	950.5	90	20	1547.61

Tablo B.3. İkinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler

Kiriş No	Kaburga No	Kuvvet 1. Kesit Merkezi	Moment 1. Kesit Merkezi	Kuvvet 2. Kesit Merkezi	Moment 2. Kesit Merkezi
2	1	0.32	-33.35	-29.2	17984.07
2	2	-56.82	23812.97	-645.47	560703.7
2	3	-629.57	778472	-6055.29	2027007
2	4	-5609.09	2288319	-3803.2	1987819
2	5	-3803.19	1987958	-4059.84	1759905
2	6	-4268.45	1565639	-691.68	683134.6
2	7	-693.22	491795.5	63.72	22281.95
2	8	83.41	16047.43	-0.64	-113.49
3	2	13.16	-9.9	631.75	18977.43
3	3	583.49	19013.53	505.15	45114.01
3	4	256.2	44887.2	542.94	43858.4
3	5	542.97	43852.95	-65.91	39713.67
3	6	39.99	39871.73	577.35	14994.11
3	7	608.31	14947.73	8.04	17.56
4	2	-2.17	-307.74	1403.78	556918.3
4	3	1398.43	738416.6	5498.66	1998604
4	4	5537.2	1996338	3444.58	1691995
4	5	3443.32	1691984	4308.83	1586463
4	6	4174.55	1595397	1078.38	625298.8
4	7	1083.09	471391	-2.15	-553.38

Tablo B.4. İkinci İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler

Kiriş No	Kaburga No	Eksenel Gerilim Üst 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Üst 2. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 2. Kesit Merkezi
2	1	0	0	-0.04	-0.21
2	2	-0.03	-0.24	0.9	-3.92
2	3	1.79	-4.12	-3.49	-18.9
2	4	-4.82	-22.54	-1.58	-16.97
2	5	-1.58	-16.97	-3.09	-16.71
2	6	-1.94	-13.84	1.32	-3.88
2	7	0.5	-3.74	0.24	0.05

2	8	0.43	0.28	0	0
3	2	0.05	0.05	2.18	2.17
3	3	1.54	1.53	1.35	1.31
3	4	0.63	0.59	1.31	1.27
3	5	1.31	1.27	-0.14	-0.17
3	6	0.12	0.09	1.52	1.51
3	7	2.1	2.09	0.03	0.03
4	2	-0.01	-0.01	6.88	2.03
4	3	6.47	0.7	21.9	6.28
4	4	21.23	5.78	14.95	1.85
4	5	14.95	1.85	16.65	4.37
4	6	16.93	4.47	5.21	0.32
4	7	5.49	1.38	-0.01	0

Tablo B.5. Birinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri

Kiriş No	Kaburga No	Kesme Gerilim Kiriş Plakası	Kesme Gerilim Ön Üst Kabuk	Kesme Gerilim Arka Üst Kabuk	Kesme Gerilim Ön Alt Kabuk	Kesme Gerilim Arka Alt Kabuk
2	1	0.2	1.39		1.37	
2	2	8.25	3.29	4.51	1.47	1.89
2	3	15.2	5.36	7.55	7.14	2.96
2	4	18.28		7.8		4.2
2	5	19.16		5.84		7.45
2	6	11.33	2.17	5	3.71	1.29
2	7	6.1	1.79	1.92	0.79	0.22
2	8	0.19	1.6		1.03	
3	2		4.51	5.83	1.89	7.36
3	3		7.55	8.55	2.96	14.09
3	4		7.8	5.32	4.2	8.45
3	5		5.84	9.9	7.45	4.41
3	6		5	11.18	1.29	15.59
3	7		1.92	6.42	0.22	7.55
4	2	13.11	5.83		7.36	
4	3	24.83	8.55		14.09	
4	4	18.26	5.32		8.45	
4	5	12.88	9.9		4.41	
4	6	23.9	11.18		15.59	
4	7	12.8	6.42		7.55	

Tablo B.6. İkinci İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Kiriş Plakası GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Kiriş GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	290.1	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	776.48	Lokal Burkulma	2

2	2	11.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	41.0 2	Lokal Burkulma	2
2	3	1.21	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	8.51	Lokal Burkulma	2
2	4	0.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	7.14	Lokal Burkulma	2
2	5	0.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	9.48	Lokal Burkulma	2
2	6	1.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	11.6 2	Lokal Burkulma	2
2	7	12.41	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	43.0 5	Lokal Burkulma	2
2	8	158.89	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	308. 04	Lokal Burkulma	4
3	2	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	214. 66	Çekme Akma	2
3	3	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	304	Çekme Akma	2
3	4	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	357. 62	Çekme Akma	2
3	5	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	357. 6	Çekme Akma	2
3	6	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	307. 56	Çekme Akma	2
3	7	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	223. 08	Çekme Akma	2
4	2	68.14	Çekme Akma	2	68.1 4	Çekme Akma	2
4	3	1.53	Kesme Burkulma	2	21.4 1	Çekme Akma	2
4	4	0.9	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	22.0 8	Çekme Akma	2
4	5	0.87	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	28.1 6	Çekme Akma	2
4	6	1.59	Kesme Burkulma	2	27.6 9	Çekme Akma	2
4	7	24.23	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	85.3 9	Çekme Akma	2

Tablo B.7. İkinci İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Üst Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Üst Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	27	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	8.76	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4.96	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	3	1.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	0.75	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.95	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	5	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.98	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1

2	6	1.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.05	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	7	7.96	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	5.06	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	8	18.38	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	6.62	Kesme Burkulma	4	4.88	Kesme Burkulma	1
3	3	1.21	Kesme Burkulma	2	0.72	Kesme Burkulma	1
3	4	2.07	Kesme Burkulma	4	4.21	Kesme Burkulma	4
3	5	1.77	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.76	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	6	1.83	Kesme Burkulma	2	0.82	Kesme Burkulma	2
3	7	12.18	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4.9	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
4	2	4.87	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	3	0.72	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	4	4.21	Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	5	2.8	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	6	0.82	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	7	4.91	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

Tablo B.8. İkinci İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Alt Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Alt Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	25.19	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	4.42	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.21	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	0.5	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.4	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.48	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.62	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	6	0.71	Basma ve Kesme Burkulma	2	0.55	Basma ve Kesme Burkulma	2

			Kombinasyonu			Kombinasyonu	
2	7	4.66	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.49	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	8	28.85	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	7.86	Kesme Burkulma	4	4.29	Kesme Burkulma	2
3	3	2.37	Kesme Burkulma	4	0.65	Kesme Burkulma	2
3	4	6.03	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.29	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
3	5	3.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.02	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
3	6	4.09	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	3	0.59	Kesme Burkulma	2
3	7	25.53	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4.18	Kesme Burkulma	2
4	2	4.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	3	0.65	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	4	2.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	5	1.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	6	0.59	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	7	4.17	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

EK – C 3. İTERASYON KRİTİK YÜK DURUMU 2 İÇİN HESAP DETAYLARI

Tablo C.1. Üçüncü İterasyon Kalınlık Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Ön Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Kiriş Plakası Kalınlık (mm)	Kiriş Kalınlık (mm)
2	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1
2	3	1	1	1	1	1	1
2	4	1	1	1	1	1	1
2	5	1	1	1	1	1	1
2	6	1	1	1	1	1	1
2	7	1	1	1	1	1	1
2	8	1	1	1	1	1	1
2	9	1	1	1	1	1	1
2	10	1	1	1	1	1	1
2	11	1	1	1	1	1	1
2	12	1	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1	1	1
3	3	1	1	1	1	1	1
3	4	1	1	1	1	1	1
3	5	1	1	1	1	1	1
3	6	1	1	1	1	1	1
3	7	1	1	1	1	1	1
3	8	1	1	1	1	1	1
3	9	1	1	1	1	1	1
3	10	1	1	1	1	1	1
3	11	1	1	1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1
4	5	1	1	1	1	1	1
4	6	1	1	1	1	1	1
4	7	1	1	1	1	1	1
4	8	1	1	1	1	1	1
4	9	1	1	1	1	1	1
4	10	1	1	1	1	1	1
4	11	1	1	1	1	1	1

Tablo C.2. Üçüncü İterasyon Panel Boyut Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Kabuk Genişlik (mm)	Arka Kabuk Genişlik (mm)	Kiriş Uzunluk (mm)	Kiriş Plakası Yükseklik (mm)	Kiriş Genişlik (mm)	Kiriş Atalet (mm ⁴)
2	1	100	0	200	56.5	20	1547.61
2	2	125.6	145.15	476.5	77	20	1547.61
2	3	125.6	145.15	476.5	77	20	1547.61
2	4	163.6	190.15	378.35	107	20	1547.61
2	5	163.6	190.15	378.35	107	20	1547.61
2	6	0	210	150	120	20	1547.61
2	7	0	210	150	120	20	1547.61
2	8	163.6	190.15	378.35	107	20	1547.61
2	9	163.6	190.15	378.35	107	20	1547.61
2	10	125.6	145.15	476.5	77	20	1547.61
2	11	125.6	145.15	476.5	77	20	1547.61
2	12	100	0	200	56.5	20	1547.61
3	2	145.15	145.15	476.5	0	0	1547.61
3	3	145.15	145.15	476.5	0	0	1547.61
3	4	190.15	190.15	378.35	0	0	1547.61
3	5	190.15	190.15	378.35	0	0	1547.61
3	6	210	210	150	0	0	1547.61
3	7	210	210	150	0	0	1547.61
3	8	190.15	190.15	378.35	0	0	1547.61
3	9	190.15	190.15	378.35	0	0	1547.61
3	10	145.15	145.15	476.5	0	0	1547.61
3	11	145.15	145.15	476.5	0	0	1547.61
4	2	145.15	0	476.5	90	20	1547.61
4	3	145.15	0	476.5	90	20	1547.61
4	4	190.15	0	378.35	120	20	1547.61
4	5	190.15	0	378.35	120	20	1547.61
4	6	210	0	150	120	20	1547.61
4	7	210	0	150	120	20	1547.61
4	8	190.15	0	378.35	120	20	1547.61
4	9	190.15	0	378.35	120	20	1547.61
4	10	145.15	0	476.5	90	20	1547.61
4	11	145.15	0	476.5	90	20	1547.61

Tablo C.3. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler

Kiriş No	Kaburga No	Kuvvet 1. Kesit Merkezi	Moment 1. Kesit Merkezi	Kuvvet 2. Kesit Merkezi	Moment 2. Kesit Merkezi
2	1	0.94	223.47	41.9	-8664.44
2	2	32.71	-13481.8	-473.08	-125379
2	3	-475.22	-125307	-918.91	-238079

2	4	-943.44	-334537	-1142.39	-622684
2	5	-1141.14	-620778	-3446.87	-646034
2	6	-3410.54	-718620	-2835.18	-943105
2	7	-2835.18	-942971	-1838.73	-1140003
2	8	-1693.89	-1011177	-811.57	-789093
2	9	-791.35	-788268	-767.65	-286800
2	10	-752.67	-206388	-441.6	-139008
2	11	-438.21	-138932	35.87	8060.77
2	12	44.81	7047.2	0.45	136.6
3	2	-6.94	-53.08	146.47	-4137.99
3	3	141.93	-4134.61	408.83	-7513.63
3	4	392.15	-7591.19	339.5	-12636
3	5	306.78	-12584.6	480	-19947.8
3	6	506.62	-19764.9	-192.19	-22341
3	7	-192.22	-22344	12.59	-23538.2
3	8	-102.84	-23700.1	385.27	-16088.7
3	9	394.35	-16157.4	292.7	-7901.5
3	10	305.97	-7833.45	125.9	-3891.56
3	11	130.06	-3912.18	-5.97	-57.19
4	2	-2.63	3.22	613.39	-168693
4	3	613.63	-168619	989.14	-172695
4	4	984.95	-229196	1775.63	-511711
4	5	1776.19	-511699	2950.93	-833769
4	6	2855.74	-827153	2979.21	-899125
4	7	2980.2	-899279	1778.95	-1164358
4	8	1749.26	-1161900	1035.6	-618327
4	9	1034.7	-618658	882.43	-249405
4	10	886.53	-187897	537.89	-160105
4	11	537.49	-160191	-2.62	-26.68

Tablo C.4. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler

Kiriş No	Kaburga No	Eksenel Gerilim Üst 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Üst 2. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 2. Kesit Merkezi
2	1	0.01	0	0.14	0.22
2	2	0.02	0.13	-1.65	-0.57
2	3	-1.65	-0.57	-3.17	-1.12
2	4	-3.02	-0.47	-4.48	0.25
2	5	-4.47	0.25	-8.83	-3.92
2	6	-11.1	-5.54	-10.57	-3.26
2	7	-10.57	-3.26	-8.9	-0.07
2	8	-6.98	0.71	-4.5	1.5

2	9	-4.46	1.53	-2.51	-0.33
2	10	-2.65	-0.87	-1.63	-0.43
2	11	-1.62	-0.43	0.12	0.05
2	12	0.22	0.16	0	0
3	2	-0.02	-0.02	0.5	0.51
3	3	0.49	0.49	1.41	1.41
3	4	1.03	1.03	0.89	0.9
3	5	0.8	0.81	1.25	1.27
3	6	1.2	1.21	-0.47	-0.45
3	7	-0.47	-0.45	0.02	0.04
3	8	-0.28	-0.26	1.01	1.02
3	9	1.03	1.04	0.77	0.77
3	10	1.05	1.06	0.43	0.44
3	11	0.45	0.45	-0.02	-0.02
4	2	-0.01	-0.01	1.21	2.68
4	3	1.21	2.68	2.39	3.89
4	4	1.63	3.42	2.55	6.55
4	5	2.55	6.55	4.31	10.82
4	6	3.76	10.17	3.79	10.75
4	7	3.79	10.75	-0.17	8.85
4	8	-0.06	9.02	0.24	5.07
4	9	0.23	5.07	1.29	3.24
4	10	1.99	3.63	1.01	2.4
4	11	1.01	2.4	-0.01	-0.01

Tablo C.5. Üçüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri

Kiriş No	Kaburga No	Kesme Gerilim Kiriş Plakası	Kesme Gerilim Ön Üst Kabuk	Kesme Gerilim Arka Üst Kabuk	Kesme Gerilim Ön Alt Kabuk	Kesme Gerilim Arka Alt Kabuk
2	1	0.03	0.52		0.75	
2	2	2.23	2.1	3.4	1.37	1.76
2	3	1.57	1.07	2.99	0.41	1.6
2	4	4.47	2.76	6.05	0.96	3.95
2	5	2.07	0.51	2.87	3.22	0.54
2	6	15.61		5.25		1.29
2	7	13.48		5.98		0.69
2	8	6.33	2.38	1.6	0.85	2.13
2	9	10.31	2.41	0.13	3.05	0.58
2	10	1.4	1.09	1.75	0.43	0.56
2	11	2.65	1.9	3.54	1.3	2.08
2	12	0	0.67		0.43	
3	2		3.4	7.51	1.76	6.18

3	3		2.99	5.99	1.6	5.23
3	4		6.05	12.57	3.95	10.42
3	5		2.87	12.15	0.54	9.32
3	6		5.25	5.62	1.29	5.05
3	7		5.98	2.69	0.69	5.31
3	8		1.6	8.71	2.13	6.66
3	9		0.13	10.79	0.58	10.46
3	10		1.75	5.73	0.56	4.96
3	11		3.54	7.32	2.08	6.17
4	2	10.76	7.51		6.18	
4	3	5.8	5.99		5.23	
4	4	17.58	12.57		10.42	
4	5	17.47	12.15		9.32	
4	6	9.21	5.62		5.05	
4	7	15.8	2.69		5.31	
4	8	19.39	8.71		6.66	
4	9	18.64	10.79		10.46	
4	10	6.11	5.73		4.96	
4	11	10.57	7.32		6.17	

Tablo C.6. Üçüncü İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Kiriş Plakası GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Kiriş GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	280.17	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	726.8 2	Lokal Burkulma	2
2	2	6.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	45.64	Lokal Burkulma	2
2	3	6.36	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	26.51	Lokal Burkulma	2
2	4	1.16	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	15.94	Lokal Burkulma	2
2	5	1.06	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	8.63	Lokal Burkulma	2
2	6	0.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	7.13	Lokal Burkulma	2
2	7	0.73	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	9.68	Lokal Burkulma	2
2	8	1.45	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	11.85	Lokal Burkulma	2
2	9	1.53	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	19.72	Lokal Burkulma	2

2	10	8.04	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	33.2	Lokal Burkulma	2
2	11	8.03	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	53.13	Lokal Burkulma	2
2	12	159.3	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	310.0 3	Lokal Burkulma	4
3	2	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	623.4 1	Çekme Akma	2
3	3	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	181.9 9	Çekme Akma	2
3	4	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	244.2	Çekme Akma	2
3	5	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	228.5 6	Çekme Akma	2
3	6	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	316.5 1	Çekme Akma	2
3	7	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	384.4 1	Çekme Akma	2
3	8	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	404.4 8	Çekme Akma	2
3	9	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	333.5 5	Çekme Akma	2
3	10	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	247.6 6	Çekme Akma	2
3	11	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	779.0 4	Çekme Akma	2
4	2	2.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	92.21	Çekme Akma	2
4	3	4.63	Kesme Burkulma	2	59.98	Çekme Akma	2
4	4	0.97	Kesme Burkulma	2	35.16	Çekme Akma	2
4	5	0.91	Kesme Burkulma	2	21.57	Çekme Akma	2
4	6	0.87	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	22.32	Çekme Akma	2
4	7	0.84	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	28.32	Çekme Akma	2
4	8	0.96	Kesme Burkulma	2	27.72	Çekme Akma	2
4	9	0.99	Kesme Burkulma	2	45.73	Çekme Akma	2
4	10	4.81	Kesme Burkulma	2	75.85	Çekme Akma	2
4	11	2.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	111.0 4	Çekme Akma	2

Tablo C.7. Üçüncü İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Üst Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Üst Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	26.59	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	5.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	5.12	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	2.91	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	4	1.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.07	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	5	1.16	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	0.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	6	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.94	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	7	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.98	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	8	1.39	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.06	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	9	2.01	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	10	5.96	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	11	6.75	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.44	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	12	18.05	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	3.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.14	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	3	3.8	Kesme Burkulma	2	2.69	Kesme Burkulma	1
3	4	1.54	Kesme Burkulma	4	0.84	Kesme Burkulma	1
3	5	1.16	Kesme Burkulma	2	0.87	Kesme Burkulma	1
3	6	1.98	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	4.22	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
3	7	1.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	3.01	Kesme Burkulma	2
3	8	1.49	Kesme Burkulma	2	1.02	Kesme Burkulma	2
3	9	4.06	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	0.89	Kesme Burkulma	2

3	10	8.18	Kesme Burkulma	2	2.76	Kesme Burkulma	2
3	11	4.53	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	2.11	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	2	2.14	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	3	2.69	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	4	0.84	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	5	0.87	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	6	4.22	Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	7	2.88	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	8	1.02	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	9	0.89	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	10	2.76	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	11	2.11	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

Tablo C.8. Üçüncü İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Alt Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Alt Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	24.55	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	4.01	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.2	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	2.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.03	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	0.88	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	0.5	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.4	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	6	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.48	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	7	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	8	0.73	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.55	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	9	1.18	Basma ve Kesme Burkulma	2	0.92	Basma ve Kesme Burkulma	2

			Kombinasyonu			Kombinasyonu	
2	10	3.54	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	11	5.5	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.29	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	12	27.99	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	4	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	1.77	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	3	4.95	Kesme Burkulma	4	2.65	Kesme Burkulma	2
3	4	1.84	Kesme Burkulma	4	0.71	Kesme Burkulma	2
3	5	2.82	Kesme Burkulma	2	0.87	Kesme Burkulma	2
3	6	6.06	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.41	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
3	7	3.85	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.02	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
3	8	2.78	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	0.69	Kesme Burkulma	2
3	9	4.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	0.72	Kesme Burkulma	2
3	10	15.56	Kesme Burkulma	3	2.34	Kesme Burkulma	2
3	11	7.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	2	1.78	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	3	2.65	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	4	0.71	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	5	0.87	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	6	2.38	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	7	1.92	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	8	0.69	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	9	0.72	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	10	2.34	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
4	11	1.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

EK – D 4. İTERASYON KRİTİK YÜK DURUMU 2 İÇİN HESAP DETAYLARI

Tablo D.1. Dördüncü İterasyon Kalınlık Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Ön Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Kiriş Plakası Kalınlık (mm)	Kiriş Kalınlık (mm)
2	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1
2	3	1	1	1	1	1	1
2	4	1	1	1	1	1	1
2	5	1	1	1	1	1	1
2	6	1	1	1	1	1	1
2	7	1	1	1	1	1	1
2	8	1	1	1	1	1	1
2	9	1	1	1	1	1	1
2	10	1	1	1	1	1	1
2	11	1	1	1	1	1	1
2	12	1	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1	1	1
3	3	1	1	1	1	1	1
3	4	1	1	1	1	1	1
3	5	1	1	1	1	1	1
3	6	1	1	1	1	1	1
3	7	1	1	1	1	1	1
3	8	1	1	1	1	1	1
3	9	1	1	1	1	1	1
3	10	1	1	1	1	1	1
3	11	1	1	1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1
4	5	1	1	1	1	1	1
4	6	1	1	1	1	1	1
4	7	1	1	1	1	1	1
4	8	1	1	1	1	1	1
4	9	1	1	1	1	1	1
4	10	1	1	1	1	1	1
4	11	1	1	1	1	1	1
5	2	1	1	1	1	1	1
5	3	1	1	1	1	1	1
5	4	1	1	1	1	1	1
5	5	1	1	1	1	1	1

5	6	1	1	1	1	1	1
5	7	1	1	1	1	1	1
5	8	1	1	1	1	1	1
5	9	1	1	1	1	1	1
5	10	1	1	1	1	1	1
5	11	1	1	1	1	1	1

Tablo D.2. Dördüncü İterasyon Panel Boyut Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Kabuk Genişlik (mm)	Arka Kabuk Genişlik (mm)	Kiriş Uzunluk (mm)	Kiriş Plakası Yükseklik (mm)	Kiriş Genişlik (mm)	Kiriş Atalet (mm ⁴)
2	1	100	0	200	56.5	20	1547.61
2	2	125.6	96.77	476.5	77	20	1547.61
2	3	125.6	96.77	476.5	77	20	1547.61
2	4	163.6	126.77	378.35	107	20	1547.61
2	5	163.6	126.77	378.35	107	20	1547.61
2	6	0	140	150	120	20	1547.61
2	7	0	140	150	120	20	1547.61
2	8	163.6	126.77	378.35	107	20	1547.61
2	9	163.6	126.77	378.35	107	20	1547.61
2	10	125.6	96.77	476.5	77	20	1547.61
2	11	125.6	96.77	476.5	77	20	1547.61
2	12	100	0	200	56.5	20	1547.61
3	2	96.77	96.77	476.5	0	20	1547.61
3	3	96.77	96.77	476.5	0	20	1547.61
3	4	126.77	126.77	378.35	0	20	1547.61
3	5	126.77	126.77	378.35	0	20	1547.61
3	6	140	140	150	0	20	1547.61
3	7	140	140	150	0	20	1547.61
3	8	126.77	126.77	378.35	0	20	1547.61
3	9	126.77	126.77	378.35	0	20	1547.61
3	10	96.77	96.77	476.5	0	20	1547.61
3	11	96.77	96.77	476.5	0	20	1547.61
4	2	96.77	96.77	476.5	0	20	1547.61
4	3	96.77	96.77	476.5	0	20	1547.61
4	4	126.77	126.77	378.35	0	20	1547.61
4	5	126.77	126.77	378.35	0	20	1547.61
4	6	140	140	150	0	20	1547.61
4	7	140	140	150	0	20	1547.61
4	8	126.77	126.77	378.35	0	20	1547.61
4	9	126.77	126.77	378.35	0	20	1547.61
4	10	96.77	96.77	476.5	0	20	1547.61

4	11	96.77	96.77	476.5	0	20	1547.61
5	2	96.77	0	476.5	90	20	1547.61
5	3	96.77	0	476.5	90	20	1547.61
5	4	126.77	0	378.35	120	20	1547.61
5	5	126.77	0	378.35	120	20	1547.61
5	6	140	0	150	120	20	1547.61
5	7	140	0	150	120	20	1547.61
5	8	126.77	0	378.35	120	20	1547.61
5	9	126.77	0	378.35	120	20	1547.61
5	10	96.77	0	476.5	90	20	1547.61
5	11	96.77	0	476.5	90	20	1547.61

Tablo D.3. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler

Kiriş No	Kaburga No	Kuvvet 1. Kesit Merkezi	Moment 1. Kesit Merkezi	Kuvvet 2. Kesit Merkezi	Moment 2. Kesit Merkezi
2	1	1.44	108.23	-32.86	17571.65
2	2	-43.15	22618.1	-723.72	320238.4
2	3	-721.31	321657.6	-1630.83	412714.6
2	4	-1659.48	571888.1	-1962.72	1287406
2	5	-1908.73	1290329	-5781.6	1509533
2	6	-5448.13	1709673	-3268.73	1434308
2	7	-3268.71	1434468	-3817.44	1246964
2	8	-3958.26	1106772	-1545.72	1073116
2	9	-1574.37	1072839	-1246.04	495027.9
2	10	-1224.97	355769.8	-671.54	256058
2	11	-671.94	255351.7	73.14	21573.32
2	12	83.49	15894.16	-0.2	-52.07
3	2	-8.15	9.75	-142.3	6991.34
3	3	-144.55	6985.97	200.91	12991.65
3	4	190.85	13066.37	-719.97	21049.81
3	5	-768.44	20960.74	-865.05	30178.73
3	6	-943.84	30137.68	-1474.78	29920.12
3	7	-1474.77	29917.51	-997.77	26776.61
3	8	-983.09	26688.71	-410.77	17063.43
3	9	-382.78	17139.28	93.52	10961.1
3	10	103.39	10890.31	-105.47	5750.27
3	11	-104.55	5752.59	-6.48	22.2
4	2	-8.19	19.73	441.11	7802.85
4	3	437	7778.54	792.47	13170.37
4	4	777.39	13220.95	1338.96	22837.12
4	5	1287.81	22761.51	1891.61	31021.27
4	6	1788.71	30914.15	2160.52	29404.16

4	7	2160.58	29401.48	1169.18	27592.6
4	8	1204.65	27798.51	976.88	18478.62
4	9	1014.65	18529.51	624.95	11010.09
4	10	635.8	10961.06	336.76	6536.66
4	11	340.1	6557.4	-6.54	29.56
5	2	-2.17	-217.58	923.05	295952.5
5	3	921.99	295704.1	1471.08	407973.1
5	4	1465.44	541018.8	2810.24	928894.6
5	5	2807.72	928321.2	4749.03	1592923
5	6	4750.22	1593088	2729.95	1306255
5	7	2728.64	1306194	3791.75	1209892
5	8	3694.83	1216733	2036.55	795333.3
5	9	2038.56	795592.5	1142.74	426585.2
5	10	1147.72	321677.1	760.87	256139.5
5	11	761.75	256332.7	-2.16	-197.8

Tablo D.4. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler

Kiriş No	Kaburga No	Eksenel Gerilim Üst 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Üst 2. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 2. Kesit Merkezi
2	1	0.01	0.01	-0.06	-0.22
2	2	-0.01	-0.21	-0.51	-3.31
2	3	-0.49	-3.31	-2.49	-6.1
2	4	-1.25	-5.71	0.91	-9.13
2	5	1.04	-9.03	-6.22	-18
2	6	-9.18	-22.86	-3.87	-15.35
2	7	-3.87	-15.35	-6.24	-16.22
2	8	-3.97	-12.61	0.95	-7.42
2	9	0.89	-7.48	-0.68	-4.54
2	10	-1.67	-4.79	-0.65	-2.89
2	11	-0.65	-2.89	0.29	0.1
2	12	0.43	0.28	0	0
3	2	-0.03	-0.03	-0.52	-0.52
3	3	-0.52	-0.53	0.74	0.73
3	4	0.58	0.56	-2.15	-2.17
3	5	-2.29	-2.32	-2.58	-2.61
3	6	-2.6	-2.64	-4.08	-4.11
3	7	-4.08	-4.11	-2.76	-2.79
3	8	-2.93	-2.96	-1.22	-1.24
3	9	-1.14	-1.16	0.29	0.27
3	10	0.38	0.37	-0.38	-0.39
3	11	-0.38	-0.39	-0.02	-0.02

4	2	-0.03	-0.03	1.62	1.61
4	3	1.6	1.59	2.9	2.89
4	4	2.34	2.32	4.03	4
4	5	3.87	3.85	5.69	5.65
4	6	4.99	4.95	6.02	5.98
4	7	6.02	5.99	3.26	3.23
4	8	3.63	3.6	2.94	2.92
4	9	3.05	3.03	1.88	1.87
4	10	2.33	2.32	1.23	1.23
4	11	1.25	1.24	-0.02	-0.02
5	2	-0.01	-0.01	4.77	2.15
5	3	4.77	2.14	7.33	3.7
5	4	6.66	2.31	12.34	4.86
5	5	12.33	4.85	20.95	8.12
5	6	20.35	7.6	13.26	2.8
5	7	13.25	2.8	15.99	6.31
5	8	16.21	6.41	9.44	3.03
5	9	9.44	3.03	5.21	1.78
5	10	5.73	2.87	3.99	1.71
5	11	3.99	1.72	-0.01	-0.01

Tablo D.5. Dördüncü İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri

Kiriş No	Kaburga No	Kesme Gerilim Kiriş Plakası	Kesme Gerilim Ön Üst Kabuk	Kesme Gerilim Arka Üst Kabuk	Kesme Gerilim Ön Alt Kabuk	Kesme Gerilim Arka Alt Kabuk
2	1	0.2	1.4		1.39	
2	2	10.38	3.47	6.54	2.21	3.79
2	3	5.67	2.87	6.18	1.83	3.57
2	4	18.28	8.08	8.54	5.81	5.41
2	5	11.69	3.87	12.65	7.88	7.77
2	6	17.66		9.79		4.71
2	7	18.96		6.87		10.41
2	8	8.73	0.47	11	3.55	7.09
2	9	13.34	4.47	3.37	3	1.39
2	10	4.38	1.52	3.61	0.75	1.67
2	11	7.69	1.33	3.56	0.74	1.36
2	12	0.19	1.52		0.98	
3	2		6.54	0.48	3.79	3.48
3	3		6.18	0.41	3.57	2.29
3	4		8.54	0.68	5.41	6
3	5		12.65	1.73	7.77	4.18
3	6		9.79	7.33	4.71	3.63

3	7		6.87	1.99	10.41	1.68
3	8		11	0.94	7.09	6.11
3	9		3.37	4.09	1.39	7.48
3	10		3.61	2.03	1.67	3.52
3	11		3.56	2.38	1.36	4.74
4	2		0.48	8.97	3.48	10.97
4	3		0.41	6.14	2.29	7.3
4	4		0.68	14.05	6	17.7
4	5		1.73	9.16	4.18	14.27
4	6		7.33	3.49	3.63	9.8
4	7		1.99	11.27	1.68	4.53
4	8		0.94	13.28	6.11	17.99
4	9		4.09	14.5	7.48	16.82
4	10		2.03	7.03	3.52	7.9
4	11		2.38	9.54	4.74	11.12
5	2	16.88	8.97		10.97	
5	3	9.66	6.14		7.3	
5	4	24.22	14.05		17.7	
5	5	26.05	9.16		14.27	
5	6	18.87	3.49		9.8	
5	7	13.08	11.27		4.53	
5	8	24.62	13.28		17.99	
5	9	23.75	14.5		16.82	
5	10	9.29	7.03		7.9	
5	11	16.47	9.54		11.12	

Tablo D.6. Dördüncü İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Kiriş Plakası GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Kiriş GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	280.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	728.8	Lokal Burkulma	2
2	2	6.34	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	48.63	Lokal Burkulma	2
2	3	6.35	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	26.36	Lokal Burkulma	2
2	4	1.19	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	17.61	Lokal Burkulma	2
2	5	1.08	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	8.94	Lokal Burkulma	2
2	6	0.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	7.04	Lokal Burkulma	2

2	7	0.73	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	9.92	Lokal Burkulma	2
2	8	1.52	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	12.76	Lokal Burkulma	2
2	9	1.57	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	21.5	Lokal Burkulma	2
2	10	8.14	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	33.62	Lokal Burkulma	2
2	11	8.12	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	55.7	Lokal Burkulma	2
2	12	159.18	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	309.8 4	Lokal Burkulma	4
3	2	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	306.9 5	Lokal Burkulma	2
3	3	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	302.2 1	Lokal Burkulma	2
3	4	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	74.13	Lokal Burkulma	2
3	5	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	61.63	Lokal Burkulma	2
3	6	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	39.11	Lokal Burkulma	2
3	7	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	39.11	Lokal Burkulma	2
3	8	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	54.31	Lokal Burkulma	2
3	9	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	139.0 3	Lokal Burkulma	2
3	10	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	413.8	Lokal Burkulma	2
3	11	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	417.4 1	Lokal Burkulma	2
4	2	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	289.9 4	Çekme Akma	2
4	3	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	161.4 2	Çekme Akma	2
4	4	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	116.4 2	Çekme Akma	2
4	5	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	82.41	Çekme Akma	2
4	6	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	77.91	Çekme Akma	2
4	7	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	77.91	Çekme Akma	2
4	8	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	112.7 5	Lokal Burkulma	4
4	9	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	153.5 9	Çekme Akma	2
4	10	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	201.1 7	Çekme Akma	2
4	11	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	375.9 7	Çekme Akma	2

5	2	2.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	98.2	Çekme Akma	2
5	3	4.6	Kesme Burkulma	2	63.99	Çekme Akma	2
5	4	0.98	Kesme Burkulma	2	37.99	Çekme Akma	2
5	5	0.91	Kesme Burkulma	2	22.38	Çekme Akma	2
5	6	0.87	Kesme Burkulma	4	23.04	Çekme Akma	2
5	7	0.84	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	29.31	Çekme Akma	2
5	8	0.96	Kesme Burkulma	2	28.93	Çekme Akma	2
5	9	1	Kesme Burkulma	2	49.65	Çekme Akma	2
5	10	4.79	Kesme Burkulma	2	81.81	Çekme Akma	2
5	11	2.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	117.3 9	Çekme Akma	2

Tablo D.7. Dördüncü İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Üst Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Üst Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	26.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	5.55	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.25	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	4.44	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.56	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	1.52	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.29	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	1.2	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.25	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	6	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.47	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
2	7	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.41	Kesme Burkulma	4
2	8	1.56	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.56	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	9	2.09	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	10	6.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	7.53	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	11	6.64	Basma ve	1	8.7	Basma ve Kesme	1

			Kesme Burkulma Kombinasyonu			Burkulma Kombinasyonu	
2	12	18.03	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	5.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	3	5.53	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	7.3	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	4	2.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	5	1.49	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.44	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	6	1.54	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	7	1.39	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	3.77	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	8	1.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.91	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	9	5.16	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.41	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	10	9.34	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	8.59	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	11	9.48	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.76	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
4	2	6.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4.01	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	3	7.43	Kesme Burkulma	1	5.71	Kesme Burkulma	1
4	4	2.41	Kesme Burkulma	1	1.53	Kesme Burkulma	2
4	5	2.86	Kesme Burkulma	1	1.58	Kesme Burkulma	1
4	6	3.61	Kesme Burkulma	2	2.51	Kesme Burkulma	4
4	7	4.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.35	Kesme Burkulma	2
4	8	5.63	Kesme Burkulma	1	1.62	Kesme Burkulma	2
4	9	4.62	Kesme Burkulma	1	1.48	Kesme Burkulma	2
4	10	8.78	Kesme Burkulma	1	5.12	Kesme Burkulma	2
4	11	6.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.77	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
5	2	4.01	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	3	5.71	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

5	4	1.53	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	5	1.58	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	6	2.51	Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	7	2.25	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	8	1.62	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	9	1.48	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	10	5.12	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	11	3.77	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

Tablo D.8. Dördüncü İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Alt Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Alt Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	24.56	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	4.23	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	2.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.04	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	0.94	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.58	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	0.52	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.86	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	6	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.98	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	7	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.14	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	8	0.78	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.16	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	9	1.27	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	10	3.58	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	11	5.79	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	8.99	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	12	27.97	Basma ve Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

			Kombinasyonu				
3	2	7.37	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	9.44	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	3	8.96	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	9.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	4	2.66	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.85	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	5	2.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.5	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	6	3.46	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	3.96	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	7	2.03	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.05	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	8	2.34	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.6	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	9	8.27	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	2.6	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	10	18.66	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	9.56	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	11	22.21	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	7.23	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	2	9.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	3	9.85	Kesme Burkulma	1	4.93	Kesme Burkulma	2
4	4	3.34	Kesme Burkulma	1	1.21	Kesme Burkulma	2
4	5	5.14	Kesme Burkulma	2	1.5	Kesme Burkulma	2
4	6	7.18	Kesme Burkulma	4	1.88	Kesme Burkulma	4
4	7	5.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	1.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
4	8	3.51	Kesme Burkulma	2	1.19	Kesme Burkulma	2
4	9	2.87	Kesme Burkulma	2	1.28	Kesme Burkulma	2
4	10	10.23	Kesme Burkulma	2	4.56	Kesme Burkulma	2
4	11	7.57	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.23	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
5	2	3.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	3	4.93	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	4	1.21	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	5	1.5	Kesme Burkulma	2	Kabuk	Kabuk Yok	4

					Yok		
5	6	1.88	Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	7	1.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	8	1.19	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	9	1.28	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	10	4.56	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	11	3.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

EK – E 5. İTERASYON KRİTİK YÜK DURUMU 2 İÇİN HESAP DETAYLARI

Tablo E.1. Beşinci İterasyon Kalınlık Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Ön Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Kiriş Plakası Kalınlık (mm)	Kiriş Kalınlık (mm)
2	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1
2	3	1	1	1	1	1	1
2	4	1	1	1	1	1	1
2	5	1	1	1	1	1	1
2	6	1	1	1	1	1	1
2	7	1	1	1	1	1	1
2	8	1	1	1	1	1	1
2	9	1	1	1	1	1	1
2	10	1	1	1	1	1	1
2	11	1	1	1	1	1	1
2	12	1	1	1	1	1	1
2	13	1	1	1	1	1	1
2	14	1	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1	1	1
3	3	1	1	1	1	1	1
3	4	1	1	1	1	1	1
3	5	1	1	1	1	1	1
3	6	1	1	1	1	1	1
3	7	1	1	1	1	1	1
3	8	1	1	1	1	1	1
3	9	1	1	1	1	1	1
3	10	1	1	1	1	1	1
3	11	1	1	1	1	1	1
3	12	1	1	1	1	1	1
3	13	1	1	1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1
4	5	1	1	1	1	1	1
4	6	1	1	1	1	1	1
4	7	1	1	1	1	1	1
4	8	1	1	1	1	1	1
4	9	1	1	1	1	1	1
4	10	1	1	1	1	1	1
4	11	1	1	1	1	1	1

4	12	1	1	1	1	1	1
4	13	1	1	1	1	1	1
5	2	1	1	1	1	1	1
5	3	1	1	1	1	1	1
5	4	1	1	1	1	1	1
5	5	1	1	1	1	1	1
5	6	1	1	1	1	1	1
5	7	1	1	1	1	1	1
5	8	1	1	1	1	1	1
5	9	1	1	1	1	1	1
5	10	1	1	1	1	1	1
5	11	1	1	1	1	1	1
5	12	1	1	1	1	1	1
5	13	1	1	1	1	1	1

Tablo E.2. Beşinci İterasyon Panel Boyut Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Kabuk Genişlik (mm)	Arka Kabuk Genişlik (mm)	Kiriş Uzunluk (mm)	Kiriş Plakası Yükseklik (mm)	Kiriş Genişlik (mm)	Kiriş Atalet (mm ⁴)
2	1	104.4	0	200	56.5	20	1547.61
2	2	125.58	96.75	476.5	77	20	1547.61
2	3	146.79	113.53	476.5	77	20	1547.61
2	4	157.95	122.33	252.23	107	20	1547.61
2	5	158.6	126.77	252.23	107	20	1547.61
2	6	159.3	126.77	252.23	107	20	1547.61
2	7	0	140	150	120	20	1547.61
2	8	0	140	150	120	20	1547.61
2	9	159.3	126.77	252.23	107	20	1547.61
2	10	158.6	126.77	252.23	107	20	1547.61
2	11	157.95	122.33	252.23	107	20	1547.61
2	12	146.79	113.53	476.5	77	20	1547.61
2	13	125.58	96.75	476.5	77	20	1547.61
2	14	104.4	0	200	56.5	20	1547.61
3	2	96.75	96.75	476.5	0	20	1547.61
3	3	113.53	113.53	476.5	0	20	1547.61
3	4	122.33	122.33	252.23	0	20	1547.61
3	5	131.15	131.15	252.23	0	20	1547.61
3	6	140	140	252.23	0	20	1547.61
3	7	140	140	150	0	20	1547.61
3	8	140	140	150	0	20	1547.61
3	9	140	140	252.23	0	20	1547.61
3	10	131.15	131.15	252.23	0	20	1547.61

3	11	122.33	122.33	252.23	0	20	1547.61
3	12	113.53	113.53	476.5	0	20	1547.61
3	13	96.75	96.75	476.5	0	20	1547.61
4	2	96.75	96.75	476.5	0	20	1547.61
4	3	113.53	113.53	476.5	0	20	1547.61
4	4	122.33	122.33	252.23	0	20	1547.61
4	5	131.15	131.15	252.23	0	20	1547.61
4	6	140	140	252.23	0	20	1547.61
4	7	140	140	150	0	20	1547.61
4	8	140	140	150	0	20	1547.61
4	9	140	140	252.23	0	20	1547.61
4	10	131.15	131.15	252.23	0	20	1547.61
4	11	122.33	122.33	252.23	0	20	1547.61
4	12	113.53	113.53	476.5	0	20	1547.61
4	13	96.75	96.75	476.5	0	20	1547.61
5	2	96.75	0	476.5	90	20	1547.61
5	3	113.53	0	476.5	90	20	1547.61
5	4	122.33	0	252.23	120	20	1547.61
5	5	131.15	0	252.23	120	20	1547.61
5	6	140	0	252.23	120	20	1547.61
5	7	140	0	150	120	20	1547.61
5	8	140	0	150	120	20	1547.61
5	9	140	0	252.23	120	20	1547.61
5	10	131.15	0	252.23	120	20	1547.61
5	11	122.33	0	252.23	120	20	1547.61
5	12	113.53	0	476.5	90	20	1547.61
5	13	96.75	0	476.5	90	20	1547.61

Tablo E.3. Beşinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler

Kiriş No	Kaburga No	Kuvvet 1. Kesit Merkezi	Moment 1. Kesit Merkezi	Kuvvet 2. Kesit Merkezi	Moment 2. Kesit Merkezi
2	1	1	219.38	41.56	-8652.74
2	2	33.52	-13156.7	-470.52	-99915.3
2	3	-472.53	-99815.3	-861.08	-187405
2	4	-882.6	-263417	-1145.68	-408741
2	5	-1149.04	-409207	-1647.85	-537306
2	6	-1644.06	-535610	-3197.08	-460872
2	7	-3175.1	-513707	-2537.35	-702873
2	8	-2537.33	-702722	-1572.16	-896832
2	9	-1429.33	-792339	-999.78	-724708
2	10	-985.09	-723837	-871.01	-497307
2	11	-864.23	-495897	-706.88	-214585

2	12	-692.31	-154904	-441.42	-115218
2	13	-438.29	-115068	36.78	8391.38
2	14	44.56	7058.03	0.5	133.38
3	2	-5.46	-33.26	-14.59	-2508.57
3	3	-15.85	-2515.49	-30.88	-5132.04
3	4	-44.79	-5171.65	-34.68	-7276.68
3	5	-40.24	-7291.72	-375.62	-9609.68
3	6	-401.49	-9537.79	-621.27	-12793.8
3	7	-612.52	-12770.9	-948.57	-14812.1
3	8	-948.55	-14813.6	-721.27	-15347.6
3	9	-769.61	-15420.8	-3.95	-12204.7
3	10	0.92	-12275.4	-43.48	-8812.52
3	11	-38.54	-8797.78	-16.64	-5284.58
3	12	-7.11	-5254.83	-30.82	-2356.7
3	13	-29.4	-2361.8	-4.79	-36.31
4	2	-3.94	-35.42	242.81	-3054.65
4	3	240.23	-3047.47	483.57	-5013.73
4	4	473.76	-5048.26	644.12	-7420.2
4	5	631.38	-7447.8	830.09	-10577.4
4	6	808.17	-10524.2	1238.44	-14003.2
4	7	1278.58	-13810.3	715.31	-15147.8
4	8	715.24	-15149.1	661.63	-16238.4
4	9	572.3	-16336.3	472.69	-13368.7
4	10	485.66	-13438.4	474.64	-8902.1
4	11	480.68	-8879.08	396.25	-5399.17
4	12	402.29	-5370.79	213.01	-2866.29
4	13	215.62	-2883.58	-3.34	-38.4
5	2	-2.63	22.54	526.1	-133981
5	3	526.36	-133870	874.81	-113259
5	4	870.85	-150511	1302.35	-334355
5	5	1302.47	-334032	1903.27	-427842
5	6	1903.6	-427889	2556.05	-623513
5	7	2467.86	-617202	2729.41	-675374
5	8	2730.43	-675568	1591.57	-917269
5	9	1554.9	-914253	1027.01	-546401
5	10	1026.41	-546728	897.52	-394328
5	11	897.06	-394630	756.8	-161965
5	12	760.68	-121925	468.86	-127759
5	13	468.48	-127856	-2.62	18.4

Tablo E.4. Beşinci İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler

Kiriş No	Kaburga No	Eksenel Gerilim Üst 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Üst 2. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 2. Kesit Merkezi
2	1	0.01	0	0.13	0.21
2	2	0.03	0.15	-1.68	-0.8
2	3	-1.56	-0.7	-2.87	-1.25
2	4	-2.92	-0.86	-4.05	-0.85
2	5	-3.95	-0.77	-5.47	-1.29
2	6	-5.3	-1.18	-8.08	-4.53
2	7	-11.39	-7.28	-10.28	-4.65
2	8	-10.27	-4.65	-8.21	-1.04
2	9	-5.87	0.24	-4.76	0.82
2	10	-4.83	0.79	-3.72	0.14
2	11	-3.79	0.09	-2.35	-0.67
2	12	-2.33	-0.99	-1.56	-0.56
2	13	-1.66	-0.65	0.13	0.06
2	14	0.22	0.15	0	0
3	2	-0.02	-0.02	-0.05	-0.05
3	3	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
3	4	-0.14	-0.14	-0.11	-0.1
3	5	-0.12	-0.11	-1.1	-1.09
3	6	-1.12	-1.11	-1.73	-1.72
3	7	-1.71	-1.69	-2.64	-2.63
3	8	-2.64	-2.63	-2.01	-1.99
3	9	-2.15	-2.13	-0.02	0
3	10	0	0.01	-0.13	-0.12
3	11	-0.12	-0.11	-0.05	-0.05
3	12	-0.03	-0.02	-0.1	-0.1
3	13	-0.11	-0.11	-0.02	-0.02
4	2	-0.01	-0.01	0.89	0.89
4	3	0.78	0.78	1.57	1.58
4	4	1.46	1.46	1.98	1.99
4	5	1.84	1.85	2.42	2.43
4	6	2.24	2.25	3.43	3.45
4	7	3.54	3.56	1.98	2
4	8	1.98	2	1.83	1.85
4	9	1.58	1.6	1.31	1.32
4	10	1.41	1.43	1.38	1.39
4	11	1.48	1.49	1.22	1.22
4	12	1.31	1.31	0.69	0.7
4	13	0.79	0.79	-0.01	-0.01

5	2	-0.01	-0.01	1.38	2.57
5	3	1.27	2.45	2.59	3.59
5	4	2.09	3.31	2.69	5.39
5	5	2.59	5.28	4.03	7.47
5	6	3.89	7.31	5.02	10.01
5	7	4.79	9.73	5.33	10.73
5	8	5.33	10.73	1.01	8.35
5	9	0.92	8.23	0.83	5.21
5	10	0.9	5.3	1.13	4.29
5	11	1.19	4.38	1.69	3
5	12	2.15	3.22	1.09	2.22
5	13	1.19	2.32	-0.01	-0.01

Tablo E.5. Beşinci İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri

Kiriş No	Kaburga No	Kesme Gerilim Kiriş Plakası	Kesme Gerilim Ön Üst Kabuk	Kesme Gerilim Arka Üst Kabuk	Kesme Gerilim Ön Alt Kabuk	Kesme Gerilim Arka Alt Kabuk
2	1	0.03	0.52		0.76	
2	2	2.25	2.12	2.69	1.4	1.05
2	3	1.58	1.06	2.21	0.4	0.97
2	4	4.63	3.22	4.78	1.42	2.27
2	5	3.69	1.66	4.11	1.29	2.14
2	6	1.68	0.47	0.14	3.63	3.05
2	7	15.56		7.32		2.95
2	8	13.64		6.19		0.28
2	9	5.51	2.37	3.93	0.41	3.4
2	10	9.34	1.98	2.1	2.43	2.74
2	11	10.25	2.39	1.72	2.84	2.59
2	12	1.5	1.22	0.91	0.5	0.21
2	13	2.65	1.91	2.91	1.31	1.47
2	14	0	0.67		0.44	
3	2		2.69	5.39	1.05	3.7
3	3		2.21	4.82	0.97	3.6
3	4		4.78	8.86	2.27	6.45
3	5		4.11	9.14	2.14	5.97
3	6		0.14	6.93	3.05	2.97
3	7		7.32	0.58	2.95	2.77
3	8		6.19	5.2	0.28	2.82
3	9		3.93	3.72	3.4	1.03
3	10		2.1	4.47	2.74	3.98
3	11		1.72	5.24	2.59	4.39
3	12		0.91	3.96	0.21	2.9

3	13		2.91	5.33	1.47	3.86
4	2		5.39	8.2	3.7	7.07
4	3		4.82	6.5	3.6	5.75
4	4		8.86	13.05	6.45	11.41
4	5		9.14	14.8	5.97	12.32
4	6		6.93	12.75	2.97	10.55
4	7		0.58	6.88	2.77	5.47
4	8		5.2	1.36	2.82	6.23
4	9		3.72	9.02	1.03	6.66
4	10		4.47	13.28	3.98	12.87
4	11		5.24	11.88	4.39	11.32
4	12		3.96	6.4	2.9	5.77
4	13		5.33	8	3.86	7
5	2	10.77	8.2		7.07	
5	3	5.78	6.5		5.75	
5	4	18.18	13.05		11.41	
5	5	16.58	14.8		12.32	
5	6	17.79	12.75		10.55	
5	7	9.26	6.88		5.47	
5	8	15.63	1.36		6.23	
5	9	19.79	9.02		6.66	
5	10	17.98	13.28		12.87	
5	11	19.21	11.88		11.32	
5	12	6.07	6.4		5.77	
5	13	10.57	8		7	

Tablo E.6. Beşinci İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Kiriş Plakası GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Kiriş GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	281.36	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	734.88	Lokal Burkulma	2
2	2	6.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	47.57	Lokal Burkulma	2
2	3	6.72	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	29.18	Lokal Burkulma	2
2	4	1.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	18.85	Lokal Burkulma	2
2	5	1.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	13.95	Lokal Burkulma	2
2	6	1.17	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	9.1	Lokal Burkulma	2
2	7	0.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	6.98	Lokal Burkulma	2
2	8	0.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	9.88	Lokal Burkulma	2
2	9	1.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	13.01	Lokal Burkulma	2

2	10	1.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	18.0 2	Lokal Burkulma	2
2	11	1.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	23.4 2	Lokal Burkulma	2
2	12	8.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	36.9 6	Lokal Burkulma	2
2	13	8.09	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	54.7 2	Lokal Burkulma	2
2	14	161.52	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	314. 74	Lokal Burkulma	4
3	2	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	729. 61	Basma Akma	1
3	3	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	729. 61	Basma Akma	1
3	4	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	729. 61	Basma Akma	1
3	5	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	51.5 4	Lokal Burkulma	2
3	6	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	51.5 8	Lokal Burkulma	2
3	7	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	37.4 4	Lokal Burkulma	2
3	8	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	37.4 4	Lokal Burkulma	2
3	9	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	60.6 6	Lokal Burkulma	2
3	10	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	81.4 6	Lokal Burkulma	2
3	11	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	729. 61	Basma Akma	1
3	12	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	729. 61	Basma Akma	1
3	13	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	729. 61	Basma Akma	1
4	2	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	322. 12	Çekme Akma	2
4	3	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	164. 51	Çekme Akma	2
4	4	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	141. 37	Çekme Akma	2
4	5	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	104. 41	Çekme Akma	2
4	6	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	88.8 1	Çekme Akma	2
4	7	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	76.9 5	Çekme Akma	2
4	8	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	76.9 5	Çekme Akma	2
4	9	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	118. 21	Lokal Burkulma	4
4	10	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	141. 14	Çekme Akma	2
4	11	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	184. 06	Çekme Akma	2
4	12	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	211. 39	Çekme Akma	2
4	13	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	404. 66	Çekme Akma	2

5	2	2.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	97.8 8	Çekme Akma	2
5	3	4.67	Kesme Burkulma	2	66.7 2	Çekme Akma	2
5	4	1.04	Kesme Burkulma	2	43.5 9	Çekme Akma	2
5	5	1.09	Kesme Burkulma	2	31.4 4	Çekme Akma	2
5	6	0.97	Kesme Burkulma	2	23.1 7	Çekme Akma	2
5	7	0.87	Kesme Burkulma	4	23.2	Çekme Akma	2
5	8	0.84	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	29.3 8	Çekme Akma	2
5	9	1.03	Kesme Burkulma	2	29.8 1	Çekme Akma	2
5	10	1.13	Kesme Burkulma	2	41.6 4	Çekme Akma	2
5	11	1.06	Kesme Burkulma	2	55.8 8	Çekme Akma	2
5	12	4.84	Kesme Burkulma	2	85.6 2	Çekme Akma	2
5	13	2.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	117. 14	Çekme Akma	2

Tablo E.7. Beşinci İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Üst Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Üst Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	24.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	5.44	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.12	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	3.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	1.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.49	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	1.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	2.52	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	6	1.07	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.36	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	7	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.44	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
2	8	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.4	Kesme Burkulma	4
2	9	1.41	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	10	1.86	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1

2	11	2.53	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4.41	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	12	4.75	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	6.35	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	13	6.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	8.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	14	16.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	5.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	3	4.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.22	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	4	2.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	5	1.97	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.27	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	6	1.35	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.45	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	7	1.52	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	8	1.37	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	3.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	9	1.51	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	10	3.75	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	11	5.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	12	7.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.34	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	13	9.58	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
4	2	6.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4.05	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	3	5.29	Kesme Burkulma	1	3.92	Kesme Burkulma	1
4	4	2.85	Kesme Burkulma	1	1.94	Kesme Burkulma	1
4	5	2.47	Kesme Burkulma	1	1.52	Kesme Burkulma	1
4	6	2.93	Kesme Burkulma	1	1.6	Kesme Burkulma	1
4	7	3.76	Kesme Burkulma	2	2.48	Kesme Burkulma	4
4	8	4.68	Basma ve	4	2.35	Basma ve Kesme	4

			Kesme Burkulma Kombinasyonu			Burkulma Kombinasyonu	
4	9	5.47	Kesme Burkulma	1	1.64	Kesme Burkulma	2
4	10	5.05	Kesme Burkulma	1	1.44	Kesme Burkulma	2
4	11	4.82	Kesme Burkulma	1	1.86	Kesme Burkulma	2
4	12	6.44	Kesme Burkulma	1	3.51	Kesme Burkulma	2
4	13	6.75	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.8	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
5	2	4.05	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	3	3.92	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	4	1.94	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	5	1.52	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	6	1.6	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	7	2.48	Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	8	2.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	9	1.64	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	10	1.44	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	11	1.86	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	12	3.51	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	13	3.8	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

Tablo E.8. Beşinci İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Alt Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Alt Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	22.88	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	4.17	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	2.17	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	1.11	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.85	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	0.75	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2

2	6	0.47	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	0.91	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	7	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	0.97	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	8	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.13	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	9	0.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.2	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	10	1.02	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.84	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	11	1.52	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	12	2.88	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.53	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	13	5.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	8.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	14	26.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	7.45	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	9.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	3	6.33	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	6.96	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	4	3.6	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	3.86	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	5	2.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.54	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	6	2.18	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.06	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	7	3.26	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.88	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	8	1.97	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.85	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	9	2.16	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.57	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	10	5.13	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.42	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	11	9.46	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.26	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	12	15.51	Basma ve Kesme Burkulma	2	6.92	Basma ve Kesme Burkulma	2

			Kombinasyonu			Kombinasyonu	
3	13	22.72	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	3	7.42	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	2	9.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	3	7.08	Kesme Burkulma	1	3.31	Kesme Burkulma	2
4	4	3.92	Kesme Burkulma	1	1.58	Kesme Burkulma	2
4	5	3.57	Kesme Burkulma	2	1.19	Kesme Burkulma	2
4	6	5.4	Kesme Burkulma	2	1.64	Kesme Burkulma	2
4	7	7.18	Kesme Burkulma	4	1.9	Kesme Burkulma	4
4	8	5.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	1.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
4	9	3.59	Kesme Burkulma	2	1.18	Kesme Burkulma	2
4	10	2.89	Kesme Burkulma	2	1.22	Kesme Burkulma	2
4	11	3.31	Kesme Burkulma	2	1.57	Kesme Burkulma	2
4	12	7.12	Kesme Burkulma	2	3.13	Kesme Burkulma	2
4	13	7.59	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.25	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
5	2	3.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	3	3.31	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	4	1.58	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	5	1.19	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	6	1.64	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	7	1.9	Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	8	1.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	9	1.18	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	10	1.22	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	11	1.57	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	12	3.13	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	13	3.25	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

EK – F 6. İTERASYON KRİTİK YÜK DURUMU 2 İÇİN HESAP DETAYLARI

Tablo F.1. Altıncı İterasyon Kalınlık Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Üst Kabuk Kalınlık (mm)	Ön Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Arka Alt Kabuk Kalınlık (mm)	Kiriş Plakası Kalınlık (mm)	Kiriş Kalınlık (mm)
2	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1
2	3	1	1	1	1	1	1
2	4	1	1	1	1	1	1
2	5	1	1	1.2	1	1	1
2	6	1	1	1.3	1.1	1	1
2	7	0	1	0	1.3	1.1	1
2	8	0	1	0	1.3	1.1	1
2	9	1	1	1.3	1.1	1	1
2	10	1	1	1.2	1	1	1
2	11	1	1	1	1	1	1
2	12	1	1	1	1	1	1
2	13	1	1	1	1	1	1
2	14	1	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1	1	1
3	3	1	1	1	1	1	1
3	4	1	1	1	1	1	1
3	5	1	1	1	1	1	1
3	6	1	1	1	1	1	1
3	7	1	1	1	1	1	1
3	8	1	1	1	1	1	1
3	9	1	1	1	1	1	1
3	10	1	1	1	1	1	1
3	11	1	1	1	1	1	1
3	12	1	1	1	1	1	1
3	13	1	1	1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1
4	5	1	1	1	1	1	1
4	6	1	1	1	1	1	1
4	7	1	1	1	1	1	1
4	8	1	1	1	1	1	1
4	9	1	1	1	1	1	1
4	10	1	1	1	1	1	1
4	11	1	1	1	1	1	1

4	12	1	1	1	1	1	1
4	13	1	1	1	1	1	1
5	2	1	1	1	1	1	1
5	3	1	1	1	1	1	1
5	4	1	1	1	1	1	1
5	5	1	1	1	1	1	1
5	6	1	1	1	1	1	1
5	7	1	1	1	1	1	1
5	8	1	1	1	1	1	1
5	9	1	1	1	1	1	1
5	10	1	1	1	1	1	1
5	11	1	1	1	1	1	1
5	12	1	1	1	1	1	1
5	13	1	1	1	1	1	1

Tablo F.2. Altıncı İterasyon Panel Boyut Girdileri

Kiriş No	Kaburga No	Ön Kabuk Genişlik (mm)	Arka Kabuk Genişlik (mm)	Kiriş Uzunluk (mm)	Kiriş Plakası Yükseklik (mm)	Kiriş Genişlik (mm)	Kiriş Atalet (mm ⁴)
2	1	104.4	0	200	56.5	20	1547.61
2	2	125.58	96.75	476.5	77	20	1547.61
2	3	146.79	113.53	476.5	77	20	1547.61
2	4	157.95	122.33	252.23	107	20	1547.61
2	5	158.6	126.77	252.23	107	20	1547.61
2	6	159.3	126.77	252.23	107	20	1547.61
2	7	0	140	150	120	20	1547.61
2	8	0	140	150	120	20	1547.61
2	9	159.3	126.77	252.23	107	20	1547.61
2	10	158.6	126.77	252.23	107	20	1547.61
2	11	157.95	122.33	252.23	107	20	1547.61
2	12	146.79	113.53	476.5	77	20	1547.61
2	13	125.58	96.75	476.5	77	20	1547.61
2	14	104.4	0	200	56.5	20	1547.61
3	2	96.75	96.75	476.5	0	20	1547.61
3	3	113.53	113.53	476.5	0	20	1547.61
3	4	122.33	122.33	252.23	0	20	1547.61
3	5	131.15	131.15	252.23	0	20	1547.61
3	6	140	140	252.23	0	20	1547.61
3	7	140	140	150	0	20	1547.61
3	8	140	140	150	0	20	1547.61
3	9	140	140	252.23	0	20	1547.61
3	10	131.15	131.15	252.23	0	20	1547.61

3	11	122.33	122.33	252.23	0	20	1547.61
3	12	113.53	113.53	476.5	0	20	1547.61
3	13	96.75	96.75	476.5	0	20	1547.61
4	2	96.75	96.75	476.5	0	20	1547.61
4	3	113.53	113.53	476.5	0	20	1547.61
4	4	122.33	122.33	252.23	0	20	1547.61
4	5	131.15	131.15	252.23	0	20	1547.61
4	6	140	140	252.23	0	20	1547.61
4	7	140	140	150	0	20	1547.61
4	8	140	140	150	0	20	1547.61
4	9	140	140	252.23	0	20	1547.61
4	10	131.15	131.15	252.23	0	20	1547.61
4	11	122.33	122.33	252.23	0	20	1547.61
4	12	113.53	113.53	476.5	0	20	1547.61
4	13	96.75	96.75	476.5	0	20	1547.61
5	2	96.75	0	476.5	90	20	1547.61
5	3	113.53	0	476.5	90	20	1547.61
5	4	122.33	0	252.23	120	20	1547.61
5	5	131.15	0	252.23	120	20	1547.61
5	6	140	0	252.23	120	20	1547.61
5	7	140	0	150	120	20	1547.61
5	8	140	0	150	120	20	1547.61
5	9	140	0	252.23	120	20	1547.61
5	10	131.15	0	252.23	120	20	1547.61
5	11	122.33	0	252.23	120	20	1547.61
5	12	113.53	0	476.5	90	20	1547.61
5	13	96.75	0	476.5	90	20	1547.61

Tablo F.3. Altıncı İterasyon Yük Durumu 2 için Kuvvet ve Momentler

Kiriş No	Kaburga No	Kuvvet 1. Kesit Merkezi	Moment 1. Kesit Merkezi	Kuvvet 2. Kesit Merkezi	Moment 2. Kesit Merkezi
2	1	1.48	118.17	-33.07	17540.93
2	2	-43.82	22538.7	-759.16	316116.1
2	3	-757.12	317696.1	-1531.54	426362.2
2	4	-1554.39	589848.6	-2064.78	1069559
2	5	-2064.57	1079701	-3150.1	1489000
2	6	-2915.8	1412251	-5545.13	1528299
2	7	-5304.61	1686704	-2981.7	1405809
2	8	-3172	1495721	-3967.32	1313609
2	9	-4065.26	1194917	-2336.56	1214057
2	10	-2363.83	1206008	-1636.02	893730.3
2	11	-1633.96	885777.6	-1170.12	509686.2

2	12	-1152.93	367127.6	-697.66	253186.3
2	13	-697.71	252279	72.81	21471.81
2	14	83.36	15862.86	-0.17	-41.83
3	2	-8.3	8.48	-55.11	7121.51
3	3	-56.4	7121.38	-46.06	12744.14
3	4	-61.83	12795.33	-66.73	18584.45
3	5	-78.43	18601.73	-1063.96	24202.76
3	6	-1118.05	24093.89	-804.65	30066.87
3	7	-850.79	30068.03	-1540.82	29816.12
3	8	-1540.82	29813.74	-950.56	26695.48
3	9	-949.5	26589.36	-703.77	20065.15
3	10	-672.2	20162.98	-63.47	15332.07
3	11	-54.04	15316.06	-53.34	10759.82
3	12	-40.66	10710.46	-51.79	5839.37
3	13	-51.36	5837.14	-6.59	21.03
4	2	-7.42	19.62	396.9	7656.42
4	3	392.59	7636.77	872.77	13517.93
4	4	854.64	13547.74	1073.23	19001.11
4	5	1050.32	19021.74	1531.99	26136.91
4	6	1481.24	26029.92	1894.17	31024.75
4	7	1821.31	30949.19	2187.33	29481.95
4	8	2187.38	29479.62	1170.97	27618.49
4	9	1187.31	27797.15	1092.19	21626.51
4	10	1132.9	21704.3	809.11	15771.35
4	11	824.12	15748.1	664.87	11192.45
4	12	679.1	11159.88	312.79	6449.11
4	13	315.89	6466.49	-6.16	29.14
5	2	-2.17	-233.22	921.37	300853.3
5	3	920.32	300599	1503.33	391057.5
5	4	1497.54	518653.7	2353.52	855692.1
5	5	2351.18	855132.2	3499.28	1081801
5	6	3497.43	1081398	4696.36	1604177
5	7	4687.31	1605048	2723.88	1318031
5	8	2722.56	1317927	3764.65	1221024
5	9	3677.96	1227376	2532.45	897421.6
5	10	2533.93	897537.5	1777.18	710997.7
5	11	1778.99	711540	1159.27	411690.8
5	12	1164.42	310343.6	759.08	259542.1
5	13	759.93	259767.1	-2.17	-182.62

Tablo F.4. Altıncı İterasyon Yük Durumu 2 için Eksenel Gerilimler

Kiriş No	Kaburga No	Eksenel Gerilim Üst 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 1. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Üst 2. Kesit Merkezi	Eksenel Gerilim Alt 2. Kesit Merkezi
2	1	0.01	0.01	-0.06	-0.22
2	2	-0.02	-0.21	-0.62	-3.38
2	3	-0.44	-3.19	-1.83	-5.51
2	4	-1.02	-5.64	-0.23	-8.61
2	5	-0.25	-8.26	-0.95	-11.99
2	6	-0.87	-10.63	-5.29	-15.84
2	7	-8.54	-20.72	-3.26	-13.41
2	8	-3.46	-14.27	-6.21	-15.7
2	9	-3.64	-11.89	-0.44	-8.83
2	10	-0.4	-9.34	-0.07	-6.69
2	11	-0.03	-6.97	-0.51	-4.5
2	12	-1.18	-4.35	-0.58	-2.77
2	13	-0.74	-2.94	0.29	0.1
2	14	0.42	0.27	0	0
3	2	-0.03	-0.03	-0.2	-0.21
3	3	-0.18	-0.19	-0.14	-0.16
3	4	-0.18	-0.2	-0.2	-0.22
3	5	-0.22	-0.24	-3.09	-3.12
3	6	-3.09	-3.12	-2.22	-2.25
3	7	-2.35	-2.38	-4.26	-4.3
3	8	-4.26	-4.3	-2.63	-2.66
3	9	-2.62	-2.65	-1.94	-1.97
3	10	-1.95	-1.98	-0.18	-0.19
3	11	-0.16	-0.18	-0.16	-0.17
3	12	-0.13	-0.14	-0.17	-0.17
3	13	-0.18	-0.19	-0.02	-0.02
4	2	-0.03	-0.03	1.46	1.45
4	3	1.28	1.27	2.85	2.83
4	4	2.64	2.62	3.32	3.3
4	5	3.08	3.06	4.49	4.46
4	6	4.13	4.1	5.28	5.24
4	7	5.08	5.04	6.09	6.06
4	8	6.09	6.06	3.27	3.24
4	9	3.31	3.28	3.05	3.02
4	10	3.32	3.3	2.37	2.35
4	11	2.55	2.53	2.05	2.04
4	12	2.22	2.21	1.02	1.02
4	13	1.16	1.15	-0.02	-0.02

5	2	-0.01	-0.01	4.79	2.12
5	3	4.57	1.92	7.03	3.58
5	4	6.74	2.55	10.75	3.85
5	5	10.54	3.66	14.91	6.22
5	6	14.61	5.96	20.23	7.39
5	7	20.21	7.36	13.29	2.74
5	8	13.28	2.73	15.96	6.19
5	9	15.73	5.91	11.04	3.86
5	10	11.26	4.05	8.22	2.51
5	11	8.39	2.65	5.26	1.94
5	12	5.48	2.74	3.82	1.53
5	13	4	1.7	-0.01	-0.01

Tablo F.5. Altıncı İterasyon Yük Durumu 2 için Kesme Gerilimleri

Kiriş No	Kaburga No	Kesme Gerilim Kiriş Plakası	Kesme Gerilim Ön Üst Kabuk	Kesme Gerilim Arka Üst Kabuk	Kesme Gerilim Ön Alt Kabuk	Kesme Gerilim Arka Alt Kabuk
2	1	0.2	1.4		1.4	
2	2	10.33	3.48	6.65	2.21	3.82
2	3	5.93	2.79	5.8	1.84	3.5
2	4	18.2	8.5	9.4	5.74	5.12
2	5	16.17	6.31	9.01	6.61	6.07
2	6	10.23	3.41	12.6	7.94	6.69
2	7	17.66		10.14		5.09
2	8	18.89		6.71		10.69
2	9	7.84	0.31	11.46	3.3	7.26
2	10	11.54	3.43	4.42	3.43	2.66
2	11	13.55	4.24	4.32	2.54	1.26
2	12	4.52	1.42	3.23	0.7	1.54
2	13	7.66	1.36	3.64	0.76	1.41
2	14	0.19	1.51		0.97	
3	2		6.65	0.61	3.82	3.52
3	3		5.8	0.07	3.5	2.29
3	4		9.4	1.65	5.12	6.01
3	5		9.01	0.21	6.07	6.32
3	6		12.6	1.67	6.69	3.77
3	7		10.14	7.04	5.09	3.6
3	8		6.71	1.69	10.69	1.71
3	9		11.46	0.65	7.26	5.66
3	10		4.42	3.59	2.66	7.82
3	11		4.32	4.54	1.26	7.63
3	12		3.23	1.89	1.54	3.58

3	13		3.64	2.46	1.41	4.73
4	2		0.61	8.88	3.52	10.88
4	3		0.07	6.48	2.29	7.71
4	4		1.65	12.47	6.01	15.93
4	5		0.21	14.37	6.32	18.98
4	6		1.67	7.82	3.77	12.41
4	7		7.04	3.33	3.6	9.6
4	8		1.69	11.23	1.71	4.67
4	9		0.65	12.38	5.66	17.29
4	10		3.59	15.64	7.82	18.56
4	11		4.54	13.55	7.63	16.09
4	12		1.89	7.26	3.58	8.14
4	13		2.46	9.47	4.73	11.06
5	2	16.91	8.88		10.88	
5	3	9.53	6.48		7.71	
5	4	25.07	12.47		15.93	
5	5	23.84	14.37		18.98	
5	6	26.87	7.82		12.41	
5	7	18.86	3.33		9.6	
5	8	13.16	11.23		4.67	
5	9	25.22	12.38		17.29	
5	10	23.08	15.64		18.56	
5	11	24.56	13.55		16.09	
5	12	9.18	7.26		8.14	
5	13	16.49	9.47		11.06	

Tablo F.6. Altıncı İterasyon Kiriş ve Kiriş Plakası G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Kiriş Plakası GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Kiriş GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	281.42	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	735.14	Lokal Burkulma	2
2	2	6.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	47.54	Lokal Burkulma	2
2	3	6.72	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	29.19	Lokal Burkulma	2
2	4	1.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	18.69	Lokal Burkulma	2
2	5	1.21	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	13.18	Lokal Burkulma	2
2	6	1.21	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	9.6	Lokal Burkulma	2
2	7	1.1	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	8.1	Lokal Burkulma	2
2	8	1.25	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	10.69	Lokal Burkulma	2
2	9	1.6	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	12.74	Lokal Burkulma	2

2	10	1.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	17	Lokal Burkulma	2
2	11	1.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	23.0 9	Lokal Burkulma	2
2	12	8.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	37	Lokal Burkulma	2
2	13	8.09	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	54.6 7	Lokal Burkulma	2
2	14	161.51	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	314. 72	Lokal Burkulma	4
3	2	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	733. 17	Basma Akma	1
3	3	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	733. 17	Basma Akma	1
3	4	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	733. 17	Basma Akma	1
3	5	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	51.5 4	Lokal Burkulma	2
3	6	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	51.5 8	Lokal Burkulma	2
3	7	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	37.4 4	Lokal Burkulma	2
3	8	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	37.4 4	Lokal Burkulma	2
3	9	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	60.6 6	Lokal Burkulma	2
3	10	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	81.4 6	Lokal Burkulma	2
3	11	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	733. 17	Basma Akma	1
3	12	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	733. 17	Basma Akma	1
3	13	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	733. 17	Basma Akma	1
4	2	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	322. 12	Çekme Akma	2
4	3	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	164. 51	Çekme Akma	2
4	4	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	141. 37	Çekme Akma	2
4	5	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	104. 41	Çekme Akma	2
4	6	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	88.8 1	Çekme Akma	2
4	7	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	76.9 5	Çekme Akma	2
4	8	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	76.9 5	Çekme Akma	2
4	9	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	118. 21	Lokal Burkulma	4
4	10	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	141. 14	Çekme Akma	2
4	11	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	184. 06	Çekme Akma	2
4	12	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	211. 39	Çekme Akma	2
4	13	Kiriş Plakası Yok	Kiriş Plakası Yok	4	404. 66	Çekme Akma	2

5	2	2.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	97.8 8	Çekme Akma	2
5	3	4.67	Kesme Burkulma	2	66.7 2	Çekme Akma	2
5	4	1.04	Kesme Burkulma	2	43.5 9	Çekme Akma	2
5	5	1.09	Kesme Burkulma	2	31.4 4	Çekme Akma	2
5	6	1.17	Kesme Burkulma	2	23.7 3	Çekme Akma	2
5	7	1.06	Kesme Burkulma	4	23.7 6	Çekme Akma	2
5	8	1.02	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	30.1	Çekme Akma	2
5	9	1.25	Kesme Burkulma	2	30.5 3	Çekme Akma	2
5	10	1.13	Kesme Burkulma	2	41.6 4	Çekme Akma	2
5	11	1.06	Kesme Burkulma	2	55.8 8	Çekme Akma	2
5	12	4.84	Kesme Burkulma	2	85.6 2	Çekme Akma	2
5	13	2.69	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	117. 14	Çekme Akma	2

Tablo F.7. Altıncı İterasyon Üst Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Üst Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Üst Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	24.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	5.43	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.12	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	3.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	1.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.49	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	2.08	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	2.43	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	6	1.37	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.37	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	7	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.46	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
2	8	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.4	Kesme Burkulma	4
2	9	1.81	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	1.63	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	10	2.33	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.56	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1

2	11	2.54	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4.43	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
2	12	4.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	6.35	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	13	6.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	8.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	14	16.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	5.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	3	4.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.22	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	4	2.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	5	1.97	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.27	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	6	1.35	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.45	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	7	1.52	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	8	1.37	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	3.82	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	9	1.51	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.64	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	10	3.75	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.32	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	11	5.7	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	12	7.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.34	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	13	9.58	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
4	2	6.67	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	4.05	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	3	5.29	Kesme Burkulma	1	3.92	Kesme Burkulma	1
4	4	2.85	Kesme Burkulma	1	1.94	Kesme Burkulma	1
4	5	2.47	Kesme Burkulma	1	1.52	Kesme Burkulma	1
4	6	2.93	Kesme Burkulma	1	1.6	Kesme Burkulma	1
4	7	3.76	Kesme Burkulma	2	2.48	Kesme Burkulma	4

4	8	4.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	2.35	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
4	9	5.47	Kesme Burkulma	1	1.64	Kesme Burkulma	2
4	10	5.05	Kesme Burkulma	1	1.44	Kesme Burkulma	2
4	11	4.82	Kesme Burkulma	1	1.86	Kesme Burkulma	2
4	12	6.44	Kesme Burkulma	1	3.51	Kesme Burkulma	2
4	13	6.75	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.8	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
5	2	4.05	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	3	3.92	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	4	1.94	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	5	1.52	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	6	1.6	Kesme Burkulma	1	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	7	2.48	Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	8	2.24	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	9	1.64	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	10	1.44	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	11	1.86	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	12	3.51	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	13	3.8	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

Tablo F.8. Altıncı İterasyon Alt Kabuk G.F. Değerleri

Kiriş No	Kaburga No	Alt Ön Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu	Alt Arka Kabuk GF	Bozulma Modu	Yük Durumu
2	1	22.88	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
2	2	4.17	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	5.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	3	2.17	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	4	1.1	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.84	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	5	1.16	Basma ve Kesme Burkulma	2	1.26	Basma ve Kesme Burkulma	2

			Kombinasyonu			Kombinasyonu	
2	6	1.01	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	7	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	1.88	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	8	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4	2	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	9	1.41	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.43	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	10	1.58	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	1.74	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	11	1.5	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.59	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	12	2.89	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.54	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	13	5.68	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	8.8	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
2	14	26.15	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
3	2	7.45	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	9.65	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	3	6.33	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	6.96	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	4	3.6	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	3.86	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1
3	5	2.61	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.54	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	6	2.18	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.06	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	7	3.26	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.88	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	8	1.97	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	4.85	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	9	2.16	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.57	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	10	5.13	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	2.42	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	11	9.46	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.26	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2

3	12	15.51	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	6.92	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
3	13	22.72	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	3	7.42	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	2	9.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	1	3.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
4	3	7.08	Kesme Burkulma	1	3.31	Kesme Burkulma	2
4	4	3.92	Kesme Burkulma	1	1.58	Kesme Burkulma	2
4	5	3.57	Kesme Burkulma	2	1.19	Kesme Burkulma	2
4	6	5.4	Kesme Burkulma	2	1.64	Kesme Burkulma	2
4	7	7.18	Kesme Burkulma	4	1.9	Kesme Burkulma	4
4	8	5.28	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	1.71	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4
4	9	3.59	Kesme Burkulma	2	1.18	Kesme Burkulma	2
4	10	2.89	Kesme Burkulma	2	1.22	Kesme Burkulma	2
4	11	3.31	Kesme Burkulma	2	1.57	Kesme Burkulma	2
4	12	7.12	Kesme Burkulma	2	3.13	Kesme Burkulma	2
4	13	7.59	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	3.25	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2
5	2	3.31	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	3	3.31	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	4	1.58	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	5	1.19	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	6	1.64	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	7	1.9	Kesme Burkulma	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	8	1.72	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	4	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	9	1.18	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	10	1.22	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	11	1.57	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	12	3.13	Kesme Burkulma	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4
5	13	3.25	Basma ve Kesme Burkulma Kombinasyonu	2	Kabuk Yok	Kabuk Yok	4

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Yaşartekin
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi : 21.06.1983
Sürücü Belgesi : B sınıfı – 04.01.2007
Medeni Durum : Bekar

EĞİTİM DURUMU

2009 -

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ

Makina Mühendisliği Yüksek Lisans Eğitimi

2001– 2007

ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Makina Mühendisliği Lisans Eğitimi

ÇALIŞMA DENEYİMİ

04.2008 -.....

Şirket: TAI

Pozisyon: Yapısal Analiz Mühendisi

02.2007 – 03.2008

Şirket: Yeditepe Üniversitesi

Pozisyon: “Yapay Kalp Pompası” Proje Asistanlığı

08.2005 – 09.2005

Şirket: BRISA Bridgestone Sabancı Lastik Endüstrisi

Pozisyon: Yaz Stajı (Mühendislik Departmanı)

08.2004 – 09.2004

Şirket: Ford Otosan Otomotiv Endüstrisi

Pozisyon: Yaz Stajı (Takım – Kalıp Departmanı)

BİLGİSAYAR BİLGİLERİ

CAD Programları:

CATIA, SOLIDWORKS, PRO ENGINEER, CADKEY

SEA Programları:

Msc. Patran, Msc.Nastran, ANSYS, ABAQUS

Diğer Programlar:

Microsoft Office, VBA, C, Matlab, Mathcad

YABANCI DİLLER

İngilizce:

Çok iyi seviyede – TOEFL IBT Puan: 91

Almanca:

Başlangıç seviyesinde

KATILDIĞI EĞİTİM VE KURSLAR

YAPISAL TEST EĞİTİMİ 12.07.2010 – 30.07.2010 (3 hafta)

KAI Havacılık Güney Kore tesislerinde 3 haftalık yapısal test eğitimi

ABAQUS EĞİTİMİ

08.03.2007 – 09.03.2007 (10 saat)

A-Ztech şirketi tarafından Abaqus analiz programı temel modülleri Yeditepe Üniversitesi'nde tanıtıldı

CATIA V5 KURSU

09.09.2006 -05.11.2006 (54 saat)

Ankara Tasarım Teknik Eğitim Kurslarında Catia programının detaylı eğitimi