

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PORTAL KREN GÖVDESİNİN SONLU
ELEMANLARLA MODELLENMESİ VE STATİK
GERİLME ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Atıl ERDİK**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONSTRÜKSİYON

ŞUBAT 2006

**PORTAL KREN GÖVDESİNİN SONLU ELEMANLARLA
MODELLENMESİ VE STATİK GERİLME ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Atıl ERDİK
503031216**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Şubat 2006**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. C. Erdem İMRAK
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Murat VURAL
Yrd.Doç.Dr. İsmail GERDEMELİ**

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında bilgi, düşünce ve görüşlerinden sıkça faydalandığım çalışmamı yöneten ve yönlendiren yüksek lisans tez danışmanım Sayın Doç.Dr. C.Erdem İMRAK'a, tez aşamasında bilgilerinden faydalandığım Sayın Dr. Hafez KEYPOUR'a, hayatım boyunca hiçbir zaman desteklerini benden esirgemeyen çok değerli anneme, babama ve sevgili kardeşime teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 2005

Atıl ERDİK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KATI MODELLEME	2
2.1. Sınır (B-Rep) Gösterimi	6
2.2. Konstrüktif Katı Geometrisi	7
2.3. Süpürme (Sweep) Gösterimi	8
2.4. Analitik Katı Modelleme (ASM)	9
3. SONLU ELEMANLAR METODU	10
3.1. Genelleme	10
3.2. Sonlu Eleman Kavramı	10
3.3. Niçin Sonlu Elemanlar	15
3.4. Direngenlik Elemanı: Kiriş Eleman	16
3.4.1. Varsayımlar	16
3.4.2. Yay Sabiti	17
3.4.3. Serbestlik Derecesi	18
3.4.4. Uç Ve Düğüm Vektörleri	18
3.4.5. Eleman Direngenlik Matrisi	21
3.4.5.1. Sistem Denklemlerinin Çözümü	22
3.4.6. Eleman Rijitlik Matrisi	22
3.4.7. Rijitlik Matrisinin Türetilmesi	24
3.4.8. Yer Değiştirme Fonksiyonu	26
3.4.9. İzoparametrik Dörtgen Eleman	30
3.4.10. İzoparametrik Eşleme	30
3.4.11. Eleman Rijitlik Matrisinin Eldesi	35
3.4.12. Sayısal İntegrasyon	35
3.5. İki Boyutlu Modelleme	36

4. KRENİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE MODELLENMESİ	39
4.1. Köprülü Kren Konstrüksiyonu	39
4.2. Kaldırma Makinalarının Sınıflandırılması	40
4.2.1. Sistem Sınıflandırması	40
4.2.2. Kullanım Sınıflandırılması	40
4.2.3. Yük Dağılımı	41
4.2.4. Kaldırma Makinalarının Grup Sınıflandırması	42
4.2.5. Kaldırma Makinalarının Sınıflandırılması	43
4.2.6. Yükleme Tiplerinin Sınıflandırılması	45
4.2.7 Yüklemenin H (Ana Yük) Hali	45
4.2.8. Yüklemenin HZ (Ana Ve Ek Yükler) Hali	45
4.2.9. Yüklemenin HS (Ana ve Özel Yükler) Hali	46
4.2.10. Yükseltme Katsayısının Seçilmesi	46
4.2.11 Kaldırma Yüğü Katsayısının Seçilmesi	47
4.3. Krenin Üç Boyutlu İskelet Modeli	47
4.3.1. Üç Boyutlu Çerçeve Elemanlar	48
4.3.2. Üç Boyutlu Elemanların Özellikleri	49
4.3.3. Üç Boyutlu Elemanların Kullanılma Yerleri	50
4.4. Dörtgen Kabuk Elemanları	51
4.4.1. Dörtgen Kabuk Elemanlarının Özellikleri	53
4.5. Bir, İki Ve Üç Boyutlu Elemanların Karşılaştırması	55
4.5.1. Örnek Konik Kiriş Karşılaştırması	55
4.6. Kullanılan Analiz Programları Hakkında Bilgilendirme	57
4.6.1. Msc.Patran/Nastran	57
4.6.2. Faydaları	57
4.6.3. Uygulama Alanları	58
4.7. Kreni Oluşturan Elemanların Malzeme Özellikleri	58
4.8. Standartlar ve Spesifikasyonlar	58
4.9. Analiz Üzerine Genel Varsayımlar	59
4.10. Kren Sisteminin Sınıflandırılması	59
4.11. Data Dosyaları	60
4.12. Kren Sisteminin Sonlu Elemanlarla Modelinde Kullanılan Eleman Tipleri	62
4.13. Modelin Genel Görünümleri	63
5. KRENİN GEOMETRİK KARAKTERİSTİKLERİ	65
5.1. Modelin Genel Kısımları (AutoCAD Çizimi)	65
5.2. Ana Kiriş	65
5.3. Rijit Ayak Sütun Parçası	67
5.4. Rijit Ayak Eğik Elemanları	70
5.5. Rijit Ayak Uç Taşıyıcısı	73
5.6. Mafsallı Ayak	74
5.7. Kiriş	76

5.8. Mafsallı Ayak Uç Taşıyıcısı	79
6. KREN SİSTEMİNE UYGULANAN YÜKLERİN TANIMI	81
6.1. Krenin Ölü Ağırlığı	81
6.2. Tambur Yüğü	81
6.3. Tamburun Kendi Ağırlığı	81
6.4. Kancanın Kendi Ağırlığı	81
6.5. Rüzgar Yüğü	82
6.6. Dinamik Yüğü	82
6.7. Kayma Hareketinden Dolayı Oluşan Enine Reaksiyonlar	83
6.8. Temel Yüğü Durumu Tabloları	83
6.9. Yüğü Kombinasyonları ve Gruplandırma	85
7. LİNEER STATİK ANALİZ SONUÇLARI	87
7.1. Deformasyon Analiz Sonuçları	87
7.1.1. Temel Yüğü Durumlarından Dolayı Deformasyona Uğramış Kren Şekilleri	87
7.1.2. Maksimum ve Minimum Deplasman Değerleri	90
7.2. Gerilme Analizi Sonuçları	98
7.2.1. Mukavemet ve Stabilité Açısından Kren Elemanlarının Tasarımı	99
7.2.2. Kren Bileşenlerinin Kapasite Araştırması Ve Eleman Gerilmeleri	100
7.2.3. Ana Kirişteki Gerilme Değerleri	103
7.2.4. İkinci Alt Dengeleyici Kirişteki Gerilme Değerleri	106
7.2.5. Birinci Üst Dengeleyici Kirişteki Gerilme Değerleri	108
7.2.6. Birinci Alt Dengeleyici Kirişteki Gerilme Değerleri	111
7.2.7. Rijit Ayak Kolonundaki Gerilme Değerleri	113
7.2.8. Rijit Ayak Alt Kısımının Gerilme Değerleri	115
7.2.9. Rijit Ayak Eğik Elemanlarının Gerilme Değerleri	118
7.2.10. Rijit Menteşeli Ayaklardaki Uç Taşıyıcısının Gerilme Değerleri	122
7.2.11. Menteşeli Ayak Gerilme Değerleri	125
7.2.12. Boji (Kren Alt Düzeni) Gerilme	128
7.2.13. Kren Sol Üst Parçasının Gerilme Değerleri	131
7.2.14. Krenin Birinci Sağ Üst Parçasının Gerilme Değerleri	133
7.2.15. Krenin İkinci Sağ Üst Parçasının Gerilme Değerleri	136
8. KRENİN NONLİNEER STATİK ANALİZİ	139
8.1. Nonlinear Analiz	139
8.2. Nonlinearite Parametreleri	141
8.2.1. Malzeme Kaynaklı Nonlinearite	141
8.2.2. Geometrik Nonlinearite	141
8.2.3. Sınır Koşullarının Değişmesinden Dolayı Oluşan Nonlinearite	142
8.3. Linear Statik Analiz – Nonlinear Statik Analiz Karşılaştırması	143
8.4. Nonlinear Statik Analiz	144
8.5. Nonlinear Statik Analiz Sonuçları	147

9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	150
KAYNAKLAR	154
EKLER	155
ÖZGEÇMİŞ	172

KISALTMALAR

AKM	: Analitik Katı Modelleme
CSG	: Constructive Solid Geometry
B-REP	: Boundary Representation
CAD	: Computer Aided Design
FEM	: Finite Element Modeling
SEM	: Sonlu Elemanlar Modeli
SE	: Sonlu Elemanlar
YD	: Yük Durumu
YK	: Yük Kombinasyonu

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1	Krenler için toplam kullanım süresi 41
Tablo 4.2	Yük dağılım faktörü tablosu 42
Tablo 4.3	Kaldırma makinalarının grup sınıflandırması 43
Tablo 4.4	Kaldırma makinalarının sınıflandırılması için rehber tablo 44
Tablo 4.5	Kaldırma grubuna göre yükseltme katsayısı 46
Tablo 4.6	Kiriş eleman işaret dağılımı 48
Tablo 4.7	Kabuk elemanlar için işaret dağılımı 52
Tablo 4.8	Kiriş, tabak ve katı eleman modellerinin konik kiriş için karşılaştırılması..... 55
Tablo 4.9	Elastik malzeme özellikleri 58
Tablo 4.10	Mukavemet özellikleri 58
Tablo 4.11	Modelde kullanılan elemanlar 62
Tablo 5.1	Ana I-profilli putrelin fiziksel özellikleri 66
Tablo 5.2	Rijit ayak sütun kısmının fiziksel özellikleri 68
Tablo 5.2a	Rijit ayağın eğimli kısımlarının fiziksel özellikleri 71
Tablo 5.2b	Rijit ayağın eğimli kısımlarının fiziksel özellikleri 72
Tablo 5.3	Rijit ayak uç taşıyıcısının fiziksel özellikleri 73
Tablo 5.4	Kirişin fiziksel özellikleri 77
Tablo 5.5	Mafsallı ayak uç taşıyıcısının fiziksel özellikleri 80
Tablo 6.1	Analizde kullanılan temel yük şartları 84
Tablo 6.2	Yük kombinasyonları ve ilgili yük faktörleri 86
Tablo 7.1	Global eksene göre toplam yer değiştirme miktarları..... 93
Tablo 7.2	Kren komponentlerinin maksimum Von Mises gerilme değerleri..... 101
Tablo 7.3	Kren komponentlerinin maksimum Von Mises gerilme değerleri. 102
Tablo 7.4	Ana kiriş üzerindeki maksimum Von Mises gerilme değerleri ... 105
Tablo 7.5	Rijit ayağın eğik elemanlarındaki maksimum gerilme değerleri.. 121
Tablo 7.6	Menteşeli ayakta tüm kombinasyonlardaki Von Mises gerilmeleri..... 128
Tablo 8.1	Lineer ve nonlinear çözüm tekniklerinin karşılaştırılması..... 143
Tablo 8.2	Çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme verileri 144
Tablo 8.3	Ana kiriş üzerindeki lineer ve nonlinear analiz sonucunda deplasman miktarlarının karşılaştırılması..... 147
Tablo 8.4	Ana kirişte üzerinde lineer ve nonlinear statik analizler sonucunda oluşan gerilme değerinin karşılaştırılması..... 149
Tablo 9.1	Başlıca hata kaynakları 152

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : En yaygın primatifler	4
Şekil 2.2 : En yaygın primatifler	5
Şekil 2.3 : Bir katıya ait yarım uzay gösterimi	6
Şekil 2.4 : Sınırlanmış ve sınırlanmamış primitifler	7
Şekil 2.5 : Tipik bir katı ve bu yapıyı oluşturan primitifler	8
Şekil 2.6 : Süpürme çeşitleri	9
Şekil 3.1a : Bir boyutlu elemanların düğümlerle sonlu elemanlara ayrılması .	11
Şekil 3.1b : İki boyutlu elemanların çizgilerle sonlu elemanlara ayrılması	11
Şekil 3.1c : Üç boyutlu elemanların çizgilerle sonlu elemanlara ayrılması	11
Şekil 3.2 : Elemanların düğüm noktalarıyla uçlarından bağlanmaları	12
Şekil 3.3 : İki boyutlu (düzlem) elemanlar:	
(a) üçgen, (b) dikdörtgen ve (c) dörtgen	14
Şekil 3.4 : Üç boyutlu elemanlar: (a) dörtyüzlü ve (b) dikdörtgen prizma ...	14
Şekil 3.5 : Üçgen ve Dörtgen elemanlara bölünmüş bir düzlemsel cisim	15
Şekil 3.6 : Köşeli ve/veya çok bölgeli cisimler	16
Şekil 3.7 : Eksenel bir kuvvet etkisindeki, üniform prizmatik giriş	17
Şekil 3.8 : (a) Her iki ucu sabitlenmiş bir giriş, (a)'nın sonlu elemanlar	
metodu, (c) 2 elemanın uçlarındaki kuvvetler ve	
yer değiştirmeler (oklar pozitif yönleri göstermektedir)	19
Şekil 3.9 : Elemanın fiziksel koordinatlara eşlenmesi	31
Şekil 3.10 : Sekiz düğüm noktalı izoparemetrik sonlu eleman	32
Şekil 3.11 : Gauss Kareleştirme için optimum örnekleme noktası konumları .	36
Şekil 3.12 : Sekiz düğüm noktalı eleman için örnekleme noktaları	36
Şekil 3.13 : İki boyutlu katı geometrisi	37
Şekil 3.14 : Lamelli kanca (Düzlem gerilme hali)	38
Şekil 4.1 : Krenlerin sınıflandırılması	39
Şekil 4.2 : Yük dağılım grafikleri	41
Şekil 4.3 : Kaldırma yükü katsayısı	47
Şekil 4.4 : Altı serbestlik derecesine haiz üç boyutlu iskelet eleman	49
Şekil 4.5 : Her bir düğüm noktasındaki 6 serbestlik dereceli kabuk eleman .	53
Şekil 4.6 : İki boyutlu tabaka elemanın boyutlandırılması	54
Şekil 4.7 : Konik girişin katı haldeki sonlu elemanlar modeli	56
Şekil 4.8 : Analizde kullanılan sonlu elemanlar modelleme programının	
arayüzü	57

Şekil 4.9	: Krenin genel ağ yapısı katı modelinin izoparametrik görünüşü-1.	63
Şekil 4.10	: Krenin genel ağ yapısı katı modelinin izoparametrik görünüşü-2.	63
Şekil 4.11	: Krenin genel ağ yapısı kabuk halinin izoparametrik görünüşü-1...	64
Şekil 4.12	: Krenin genel ağ yapısı kabuk halinin izoparametrik görünüşü-2 ..	64
Şekil 5.1	: Ana geniş I-profilli putrelin kesiti.....	65
Şekil 5.2	: Bir no'lu yapı	66
Şekil 5.3	: İki no'lu yapı	67
Şekil 5.4	: Sütunun Kesiti	67
Şekil 5.5	: Bir no'lu yapı	68
Şekil 5.6	: İki no'lu yapı	69
Şekil 5.7	: İki nolu yapı sağlamlaştırıcı	69
Şekil 5.8	: Rijit Ayak sütun yapısı kesiti (iskelet aralığı =1.500mm)	69
Şekil 5.9	: Üst kesit	70
Şekil 5.10	: Alt kesit	71
Şekil 5.11	: İskelet Örneği	72
Şekil 5.12	: Sağlamlaştırıcı Kesit (iskelet aralığı = 1.4300mm)	72
Şekil 5.13	: Kesit alanı	73
Şekil 5.14	: Mafsallı ayak, kesit -1, t=14mm Uzunluk = 16.000mm (üstten başlayarak)	74
Şekil 5.15	: Mafsallı ayak, kesit -2, t=10mm	74
Şekil 5.16	: İskelet	75
Şekil 5.17	: Sağlamlaştırıcı Kesit	75
Şekil 5.18	: Mafsallı ayak yapısının kesiti (iskelet aralığı = 1.500mm)	76
Şekil 5.19	: Kiriş kesiti	76
Şekil 5.20	: Mafsallı konstrüksiyonun genel boyutlandırılması	78
Şekil 5.21	: Ana kiriş bağlantı parçası kesitinin genel boyutlandırılması	78
Şekil 5.22	: Mafsallı genel boyutlandırılması	79
Şekil 5.23	: Kesit Alanı	79
Şekil 7.1	: Krenin kendi ağırlığından ötürü oluşan deformasyon	87
Şekil 7.2	: Tambur krenin sol tarafında iken oluşan deformasyon	88
Şekil 7.3	: Tambur krenin ortasında iken oluşan deformasyon	88
Şekil 7.4	: Tambur krenin solunda iken oluşan deformasyon	89
Şekil 7.5	: Krenin kendi ağırlığının yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon	89
Şekil 7.6	: Krenin deplasman değerleri için alan numaraları	90
Şekil 7.7a	: Ana Kiriş	91
Şekil 7.7b	: Alt Dengeleyici Kiriş	91
Şekil 7.7c	: Üst Dengeleyici Kiriş -1.....	91
Şekil 7.7d	: Üst Dengeleyici Kiriş -2	91
Şekil 7.7e	: Rijit Ayak Kolonu	91
Şekil 7.7f	: Rijit Ayak Eğik Elemanları	91
Şekil 7.7g	: Rijit Kolon Uç Taşıyıcı	92
Şekil 7.7h	: Menteşeli Ayak	92
Şekil 7.7j	: Boji	92

Şekil 7.8	: Ana kirişin kren üzerindeki yeri	103
Şekil 7.9	: Ana kiriş YK-122	103
Şekil 7.10	: Ana kiriş YK-131	104
Şekil 7.11	: Ana kiriş YK-141	104
Şekil 7.12	: Ana kiriş YK-156	105
Şekil 7.13	: İki no'lu alt dengeleyici kirişin kren üzerindeki yeri	106
Şekil 7.14	: İki No'lu alt dengeleyici kiriş YK-122	106
Şekil 7.15	: İki No'lu alt dengeleyici kiriş YK-131	107
Şekil 7.16	: İki No'lu alt dengeleyici kiriş YK-141	107
Şekil 7.17	: İki No'lu alt dengeleyici kiriş YK-156	108
Şekil 7.18	: Bir no'lu üst dengeleyici kirişin kren üzerindeki yeri	108
Şekil 7.19	: Bir no'lu üst dengeleyici kiriş YK-122	109
Şekil 7.20	: Bir no'lu üst dengeleyici kiriş YK-131	109
Şekil 7.21	: Bir no'lu üst dengeleyici kiriş YK-141	110
Şekil 7.22	: Bir no'lu üst dengeleyici kiriş YK-156	110
Şekil 7.23	: Bir no'lu alt dengeleyici kirişin kren üzerindeki yeri	111
Şekil 7.24	: Bir no'lu alt dengeleyici kiriş YK-122	111
Şekil 7.25	: Bir no'lu alt dengeleyici kiriş YK-131	112
Şekil 7.26	: Bir no'lu alt dengeleyici kiriş YK-141	112
Şekil 7.27	: Bir no'lu alt dengeleyici kiriş YK-156	113
Şekil 7.28	: Rijit ayak kolonunun kren üzerindeki yeri	113
Şekil 7.29	: Rijit ayak kolonu YK-122	114
Şekil 7.30	: Rijit ayak kolonu YK-131	114
Şekil 7.31	: Rijit ayak kolonu YK-141	115
Şekil 7.32	: Rijit ayak kolonu YK-156	115
Şekil 7.33	: Rijit ayak alt kısmının kren üzerindeki yeri	116
Şekil 7.34	: Rijit ayak alt kısmı YK-122	116
Şekil 7.35	: Rijit ayak alt kısmı YK-131	117
Şekil 7.36	: Rijit ayak alt kısmı YK-141	117
Şekil 7.37	: Rijit ayak alt kısmı YK-156	118
Şekil 7.38	: Rijit ayak eğik elemanlarının kren üzerindeki yeri	118
Şekil 7.39	: Rijit ayakların eğik kısımları YK-122	119
Şekil 7.40	: Rijit ayakların eğik kısımları YK-131	119
Şekil 7.41	: Rijit ayakların eğik kısımları YK-141	120
Şekil 7.42	: Rijit ayakların eğik kısımları YK-156	120
Şekil 7.43	: Menteşeli rijit ayağın kren üzerindeki yeri	122
Şekil 7.44	: Rijit ayak uç taşıyıcısı YK-122	122
Şekil 7.45	: Rijit ayak uç taşıyıcısı YK-131	123
Şekil 7.46	: Rijit ayak uç taşıyıcısı YK-141	123
Şekil 7.47	: Rijit ayak uç taşıyıcısı YK-156	124
Şekil 7.48	: Menteşeli ayağın kren üzerindeki yeri	125
Şekil 7.49	: Menteşeli ayak YK-122	125
Şekil 7.50	: Menteşeli ayak YK-131	126
Şekil 7.51	: Menteşeli ayak YK-141	126

Şekil 7.52	: Menteşeli ayak YK-156	127
Şekil 7.53	: Bojinin kren üzerindeki yeri	128
Şekil 7.54	: Boji YK-122	129
Şekil 7.55	: Boji YK-131	129
Şekil 7.56	: Boji YK-141	130
Şekil 7.57	: Boji YK-156	130
Şekil 7.58	: Rijit ayak sol üst parçasının kren üzerindeki yeri	131
Şekil 7.59	: Rijit ayak sol üst parçası YK-122	131
Şekil 7.60	: Rijit ayak sol üst parçası YK-131	132
Şekil 7.61	: Rijit ayak sol üst parçası YK-141	132
Şekil 7.62	: Rijit ayak sol üst parçası YK-156	133
Şekil 7.63	: Kren sağ üst -1 parçasının kren üzerindeki yeri	133
Şekil 7.64	: Ana giriş sağ üst parçası -1 YK-122	134
Şekil 7.65	: Ana giriş sağ üst parçası -1 YK-131	134
Şekil 7.66	: Ana giriş sağ üst parçası -1 YK-141	135
Şekil 7.67	: Ana giriş sağ üst parçası -1 YK-156	135
Şekil 7.68	: Kren sağ üst -2 parçasının kren üzerindeki yeri	136
Şekil 7.69	: Menteşeli ayak sağ üst -2 parçası YK-122	136
Şekil 7.70	: Menteşeli ayak sağ üst -2 parçası YK-131	137
Şekil 7.71	: Menteşeli ayak sağ üst -2 parçası YK-141	137
Şekil 7.72	: Menteşeli ayak sağ üst -2 parçası YK-156	138
Şekil 8.1	: Lineer kuvvet oryantasyonu	139
Şekil 8.2	: Nonlinear kuvvet oryantasyonu	140
Şekil 8.3	: Lineer, nonlinear ve plastik deformasyon etki bölgeleri	140
Şekil 8.4	: Sürünme	141
Şekil 8.5	: Lineer ve nonlinear çözümde geometrinin davranışı	142
Şekil 8.6	: İzleyici kuvvetin takip ettiği yol	142
Şekil 8.7	: Çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ve değerleri	144
Şekil 8.8	: Çerçeve bir yapı için dayanım-deformasyon ilişkisi	145
Şekil 8.9	: Nonlinear statik analiz parametreleri	146
Şekil 8.10	: Msc.Patran'da oluşturulmuş gerilme-şekil değiştirme tablosu ve grafiği	146
Şekil A.1	: Modelin izometrik görünüşü	155
Şekil A.2	: Modelin üstten görünüşü	156
Şekil A.3	: Mafsallı ayaklar	158
Şekil A.4	: Modelin genel görünüşü	156
Şekil A.5	: Eğik elemanların bağlantı parçasının orta kesitteki izometrik görünüşü	157
Şekil A.6	: Rijit ayak ve ana giriş bağlantı parçasının izometrik görünüşü	157
Şekil A.7	: Mafsallı ayak ve ana girişin bağlantı parçasının izometrik görünüşü	158
Şekil A.8	: Mafsallı ayağın giriş bölgesinin izometrik görünüşü	158
Şekil A.9	: Mafsallı ayak girişinin izometrik görünüşü	159
Şekil A.10	: Mafsallı ayak girişinin genel görünüşü	159

Şekil A.11	: Ana giriş ve mafsallı ayak destek levhasının genel görünüşü	159
Şekil A.12	: Mafsal konstrüksiyonun bir kısmının izometrik görünüşü	160
Şekil A.13	: Mafsal konstrüksiyonun izometrik görünüşü	160
Şekil A.14	: Mafsal konstrüksiyonun üstten görünüşü	161
Şekil A.15	: Mafsal konstrüksiyonun kesit görünüşü	161
Şekil A.16	: Uç taşıyıcının izometrik görünüşü	162
Şekil A.17	: Uç taşıyıcı destek levhalarının izometrik görünüşü	162
Şekil A.18	: Uç taşıyıcı ve dengeleyici 1 no'lu I- profilin izometrik görünüşü	162
Şekil A.19	: Uç taşıyıcı ve dengeleyici 1 ve 2 no'lu I- profilin izometrik görünüşü	163
Şekil A.20	: Gezer konstrüksiyonun izometrik görünüşü	163
Şekil A.21	: 2 nolu dengeleyici I-profilin ve bojilerin (Kren alt düzeneği) izometrik görünüşü	163
Şekil B.1	: Krenin solunda iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon YD-31	164
Şekil B.2	: Krenin ortasında iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon YD-32	165
Şekil B.3	: Krenin sağında iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon YD-33	165
Şekil B.4	: Krenin solunda iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon YD-35	166
Şekil B.5	: Krenin ortasında iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon YD-36	166
Şekil B.6	: Krenin ortasında iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon YD-37	167
Şekil B.7	: Krende rüzgar yükünden dolayı oluşan deplasman YD-41 (Sağ taraf %60, sol taraf %100)	167
Şekil B.8	: Krende rüzgar yükünden dolayı oluşan deplasman YD-45 (Sağ taraf %60, sol taraf %100)	168
Şekil B.9	: Krenin alt kısmında halat makarasından dolayı oluşan deformasyon YD-71	168
Şekil B.10	: Kayma hareketinde meydana gelen çapraz reaksiyondan dolayı oluşan deformasyon YD-81	169
Şekil C.1	: Ana giriş sağ ayak birleşim yeri, YD-122	170
Şekil C.2	: Ana giriş sağ ayak birleşim yeri, YD-131	170
Şekil C.3	: Ana giriş sağ ayak birleşim yeri, YD-141	171
Şekil C.4	: Ana giriş sağ ayak birleşim yeri, YD-156	171

SEMBOL LİSTESİ

X_L, Y_L, Z_L	: Yerel koordinat sistemleri
W, H, D	: Kutunun relatif konumu
R, H, W, D	: Yarıçap, boy, genişlik, taban derinliği
H	: Boy
W	: Genişlik
D	: Taban derinliği
$[K]$	: Cismin tümel direngenlik matrisi
$\{P\}$	: Düğümlere uygulanan dış kuvvet
$\{\delta\}$	: Yerdeğiştirme
F, Q, M	: Eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti
U_{bi}	: i no'lu elemanın b ucundaki dönme
F_{a2}	: İki numaralı elemanın a ucundaki eksenel iç kuvvet
$P_{ai}, P_{bi}, P_{ci} \dots$	: $a, b, c \dots$ uçlarındaki bütün iç kuvvetler
$\{ \}^T$	: Transpoze edilmiş vektör
δ_{ai}	: i tane sonlu elemanın uç yer değiştirme vektörü
A_{11}, A_{12}	: Direngenlik katsayıları
δU_e	: İç gerilmelerin virtüel şekil değiştirme enerjisi
δW_e	: Dış kuvvetlerin virtüel işi
$[N]$	: İnterpolasyon fonksiyonu
$[B]$	: Gradyan matrisi
$\{\epsilon\}$,	: Birim şekil değiştirme sütun matrisi
$[J]$	: Jakobien matrisi
$[J]^{-1}$	: Jakobien matrisinin eşleniği
$ J $	: Jakobien determinantı
σ_x, σ_y	: Normal gerilme bileşenleri
τ_{xy}	: Kayma gerilmesi
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
ϵ_x, γ_y	: Birim şekil değiştirme bileşenleri
m_1	: Normal yük
m_{1maks}	: Emniyetli çalışma yükü
n	: Gerçek kaldırma katsayısı
n_{maks}	: Toplam kaldırma süresince toplanan kaldırma sayısı
k_p	: Yük dağılım faktörü
$Q1, Q2 \dots$	: Yük dağılım sınıfları
$U1, U2 \dots$	: Kullanım sınıfları
H	: Ana yük
HZ	: Ana ve ek yükler
HS	: Ana ve özel yükler
HZ	: Ana ve ek yükler
γ_c	: Yükseltme katsayısı

ψ	: Kaldırma yükü katsayısı
G	: Kesme modülü
A_x, A_y, A_z	: Kesme alanları
I_{yy}, I_{zz}	: Atalet momentleri
J_r	: Burulma momenti
U	: x yönünde öteleme
V	: y yönünde öteleme
W	: z yönünde dönme
θ_x	: x yönünde dönme
θ_y	: y yönünde dönme
θ_z	: z yönünde dönme
t	: Kalınlık
ρ	: Öz ağırlık
σ	: Elastik limit
Q	: Rüzgar esas hızı
K_{dw}	: Rüzgarın esas hızının dinamik etkilere olan tepkisine izin vermek için oluşturulmuş katsayı
c	: Aerodinamik katsayı
u	: Rüzgar hızı
k	: Homojenlik faktörü
S_n	: İzin verilen kuvvet
M_n	: İzin verilen moment
σ_x	: İzin verilen mukavemet
r_1	: Kren emniyet faktörü
r_2	: Hasar lokalizasyon faktörü
r_3	: Konstrüksiyon hata faktörü
R_z	: Tabaka katılık faktörü
W_t	: Kütle konversiyonu

PORTAL KREN GÖVDESİNİN SONLU ELEMANLARLA MODELLENMESİ VE STATİK GERİLME ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada transport tekniğinde sıklıkla kullanılan kaldırma ekipmanlarından biri olan portal krenler incelenecektir. Limanlarda, tersanelerde ve depolarda geniş çapta kullanma alanları bulan portal krenlere, işletim sırasında bir çok yük etkimektedir; bu yüklerin en önemlileri olarak, sistem elemanlarının kendi ağırlıklarından meydana gelen yükler ve hareketten dolayı oluşan işletme yükü sayılabilir. Ayrıca özellikle açık alanlarda çalışan portal krenlere etkiyen rüzgar ve iklim şartlarından oluşan ek zorlanmalar da göz önüne alınırsa; portal krenlerde ve özellikle de portal kreni taşıyan gövdesinde ciddi anlamda gerilmelerin ortaya çıkacağı açıktır. Mühendislik problemlerin çözümünde bilgisayar ortamında sayısal metotlar ile problemin analizi son yıllarda sıklıkla uygulanmaktadır. En çok bilinen ve kullanılan yöntem sonlu elemanlar metodudur. Bu metot günümüzde otomotiv sanayinde ve ağır makina sanayinde seri üretime geçilmeden tasarım hakkında fikir vermesi açısından oldukça sıklıkla başvurulmaktadır. Çalışmada portal kren, bilgisayar destekli tasarım yazılımları (AutoCAD) kullanılarak modellenecek ve modellenen yapı sonlu elemanlar metodu kullanarak hesap yapan yazılımlar (Msc.Patran ve Msc.Nastran) kullanılarak sonlu kabuk elemanlarına ayrılacak, lineer statik ve nonlinear statik gerilme analizi yapılacaktır. Lineer statik analiz ve nonlinear statik analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılıp, doğrulukları hakkında yorum yapılmaya çalışılacaktır. Bunun yanında elde edilen sonuçların teorik sonuçlarla uyumuyla çalışma tamamlanacaktır. Yapılacak analizler sonunda malzeme kazancına yönelik optimum tasarım teklif edilmesiyle çalışmanın literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Portal Kren, Sonlu Elemanlar Metodu, Gerilme Analizi

FINITE ELEMENT MODELING AND STATIC ANALYSIS OF A PORTAL CRANE

SUMMARY

In this study, a portal crane, which is one of the lifting equipments, frequently used in materials handling is investigated. Portal cranes which are affected by a number of load combinations can be used in seaports, shipyards and warehouses with a wide range of usage areas during the operation. Most important loads are self weight of the system elements and the movement of operating load. Moreover, it is considered that, additional forces act on the portal crane, particularly operating in open-air, arise from wind and climate conditions, the great stress values can be observed on portal crane, especially on its body. Finite element analysis and its applications is frequently utilized by otomotive industry and industry of heavy working machines prior to mass production. It is completely modeled utilizing computer aided design program named AutoCAD in 3-D solid modeling environment. Finite element model of the portal crane is generated by using Msc.Patran with full details. Then linear static and nonlinear static stress analyses of the finite element model of the crane are computed by Msc.Nastran solver under certain load combinations and boundary conditions. In this study, results from linear and nonlinear static analysis are compared and verified according to nonlinear analysis. This study is ended up with doing a comparison between FEA results and theoratical results.

Keywords : Portal Crane, Finite Element Method, Stress Analysis

1. GİRİŞ

Portal krenler, yükleri yalnız kaldırmakla kalmayıp onları yatay olarak da hareket ettiren iş veya tesir alanları geniş kaldırma makinalarıdır. Bu krenler, tersanelerde gemilerden yük veya konteyner indirilmesinde kullanılırlar.

Krenler, yüksekte bulunan raylar üzerinde hareket eden arabalı köprülerden ibarettir. Araba yükleri kaldırır veya indirir ve köprü boyunca taşır. Köprü, yükleri kren boyunca götürür. Bu suretle, yükün birbirine dik üç doğrultuda hareket etme imkanı vardır.

Bölüm 2’de katı modelleme ve katı modelleme teknikleri konularında araştırma yapılmıştır. Mevcut olan birçok katı modelin hangi katı modelleme tekniğiyle oluşturulduğu ve kren köprüsünün hangi katı modelleme tekniği ile modelleneceği bu araştırma çerçevesinde incelenmiştir.

Bölüm 3’de sonlu elemanlar metodu ve bu metotla yapılan analiz tipleri incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz basamakları ve hazır paket programları araştırılmıştır. Bu çalışma doğrultusunda lineer statik ve nonlineer statik analiz hakkında bilgi verilip, sonlu elemanlar ve kullanıldığı alanlar hakkında bilgi edinilmiştir.

Son on yılda, yapısal analiz için geliştirilen bilgisayar programlarında oldukça büyük ilerlemeler kaydedildi. Farklı yapısal modellerde yapılan statik ve dinamik analizlerde, sonlu elemanlar metodu doğruluğunu kanıtladı. Sonlu elemanlar ile hazırlanan portal kren analizinde iki boyutlu kabuk elemanlar kullanıldı. Sistem davranışı lineer elastik olarak düşünüldü ve MSC.Patran/Nastran paket programı bu çalışma için kullanıldı.

2. KATI MODELLEME

Katı modelleme teknikleri tamamıyla bilgilendirme üzerine kurulmuştur. Yani nesnelerin tereddütsüz şekilde gösterimini sağlar. Basitçe nesnenin üzerinde, içinde ve dışında olan bir noktanın konumunun verilebilmesi olarak düşünülebilir. Eğer modelleme tekniği ile tam olarak tanımlama, geçerlilik ve tereddütsüzlük sağlanamaz ise kullanıcı devreye girerek modelleme ile etkileşimde bulunarak modelin yapılandırılmasını gerçekleştirebilir. Tereddütlü modeller, kütle özellikleri hesaplarında, sonlu elemanlar modellemesinde, BDİP’da (CAPP-Computer Aided Process Planning- bilgisayara destekli işlem planlama) ve sayısal kontrol (NC) programlamada kullanılamazlar [1].

Katı modelleyiciler tel kafes ve yüzey (geometri) modelleyicilerinden daha fazla bilgi (Geometrik ve topolojik) saklarlar. Tel kafes ve yüzey modellere göre daha avantajlı olmalarına rağmen bazı sınırlamalar vardır. Katı tanımından ne diğer modellerin otomatik olarak yaratılması ne de diğer modellerin yaratılmasında kullanılmış verilerin otomatik olarak katı modelin yaratılmasında kullanılması mümkün değildir. Buna ek olarak büyük ölçekli imalat uygulamalarında katı modelleme tercih edilmektedir. Kaplama ve hesaplamaların yavaş olması gelişen teknoloji ile problem olmaktan çıkmaktadır. Katı modelleme hacimsel modelleme olarak da anılmaktadır.

Geçerli BDK/BDİ sisteminde katı modeller yaratmak için kullanıcı tarafında veri girişi yapılmalıdır. Örnek olarak B-rep (boundary representation – sınır gösterimi) veri gösterimine sahip bir sistem CSG (Constructive Solid Geometry-Konstrüktif Katı Geometrisi) temelli kullanıcı bağlantısı sağlanabilir. Yani model primitif objelerden oluşturulabilir. Kullanıcı bağlantısı olarak çoğu sistem blok-yapısı yaklaşımı (CSG) ve süpürme (sweep) işlemleri kullanılmaktadır [1].

Bir nesnenin katı modeli, yüzey model gösteriminden daha karmaşıktır. Topolojik ve geometrik bilgiler daha sonraki kütle özelliklerinin hesabı, sonlu elemanlar ağ üretme gibi işlemlerin otomatik olarak yapılmasında kullanılabilir. Bunda teorik olarak kullanıcının doğrudan bir katkısının olmadığı düşünülebilir.

Katı modelleme ile bir nesnenin tanımlanması eğri, yüzey ve katı gibi tekniklerin kullanılması ile çok kolay yapılabilmektedir. Bazı durumlarda katı modeller tel kafes yüzey modellemeden daha basit ve kolay olmaktadır.

Katı modeller otomasyon ve integrasyon maksatları için kullanılacak ise kusursuz olmalıdır. Kavramsal konstrüksiyon aşamasında kusursuz modele ihtiyaç olmadığından bu modellere analiz ve uygulama algoritmalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Modelin doğruluk ve hızı, kullanılan gösterim şemasına ve kullanılan veri tabanında saklanan verilere bağlıdır. B-rep modelleyiciler genel şekilleri daha iyi sunarken daha fazla işlem zamanı gerektirmektedirler. CSG modelleyiciler yapılandırma açısından daha basit ve ekranda görüntüleme açısından daha uygundur. Fakat karmaşık bir şeklin tanımlanmasında zorluklar olabilir.

Katı modeller tam ve tereddütsüz olmalarına rağmen tek bir çözüm yoktur. Bir nesne çeşitli yollarla yapılandırılabilir.

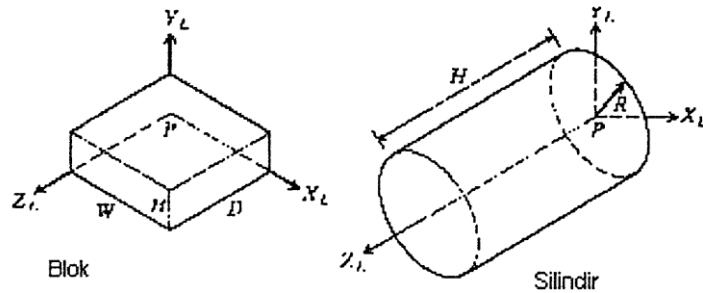
Çoğu ticari katı modelleme paketleri CSG ile uyumludur. Kullanıcının blok yapılarının (primitifler diye adlandırılır) kullanılmasına imkan sağlar. Primitifler basit temel şekiller olup, matematiksel boolean işlemleriyle bir araya getirilmeleri ile karmaşık katı modeller oluşturulabilir.

Bazı paketler ise süpürme (sweep) işlemleri ile katı modeller oluşturmaktadır. Bunun için katının yüzeyleri oluşturulur ve daha sonra süpürme işlemleri ile katı modeller elde edilirler.

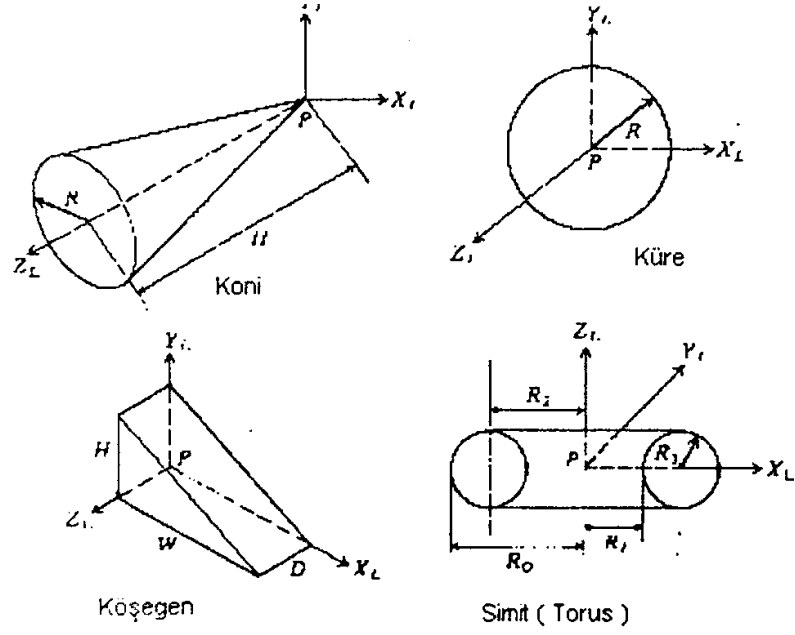
Çok çeşitli primitif nesneler ticari olarak kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılanlar ise blok, silindir, koni ve kürelerdir. Düzlemler, silindirler, koniler ve küreler dördüncü doğal kuadratik elemanı göstermektedir [2].

Yaygın şekilde kullanılan primitifler aşağıdaki gibidir;

1. Blok: Genişliği, uzunluğu ve derinliği gibi geometrik verileri verilmiş kutudur. şekil 2.1'de yerel koordinat sistemi X_L, Y_L, Z_L gösterilmiştir. P noktası X_L, Y_L, Z_L sisteminin orijin noktasıdır. W, H ve D kutunun relatif konumunu koordinat sistemine göre tanımlar.
2. Silindir: Bu primitif R yarıçap ve H boyu ile tanımlanmıştır. H genellikle Z_L ekseninde alınır ve negatif ya da pozitif olabilir.
3. Koni: Taban yarıçap ve H boyu ile tanımlanmıştır. H genellikle Z_L ekseninde alınır ve negatif ya da pozitif olabilir.
4. Küre: Yerel koordinat sistemine göre bir merkez noktası ve verilen yarıçap ya da çap ile tanımlanır.
5. Üçgen Kama: yüksekliği H, genişliği W ve taban derinliği D ile tanımlanan bir geometrik şekildir.
6. Simit (Torus): Çemberin düzlemde kalarak bir eksen etrafında döndürülmesi ile oluşan şekildir. R_1 (Simitin yarıçapı), R_2 (simit gövdesinin yarıçapı) ile tanımlanır. Simitin i apı R_1 ve dış apı R_0 'dır.



şekil 2.1: En yaygın primitifler



Şekil 2.2: En yaygın primitifler

İki ya da daha çok primitif bir araya getirilerek katı oluşturulabilir. Sonuç katının geçerliliği boolean işlemleri ile sağlanır. Birleştirme, kesişim ve fark işlemleri boolean işlemleri ile gerçekleştirilmektedir. Birleştirme operatörü iki nesne ya da primitifi bir araya getirmek için kullanılırlar. Kesişim operatörü ise iki nesnenin ortak hacmini bularak bu kesişim kümesi ile ifade edilen yeni nesneyi tanımlar. Fark operatörü ise bir nesneden bir başka nesneyi çıkararak yeni bir nesne elde edilmesini sağlar.

Bilgisayarda ve mühendislik uygulamalarında katı model gösteriminin başarısı bu modellerin şema gösteriminin başarısına bağlıdır. Katı modelleme teorisi, gerçek nesnenin matematiksel bir model gösterimini tanımlar. Katı modellerin matematiksel özellikleri aşağıdaki gibi verilebilir [2].

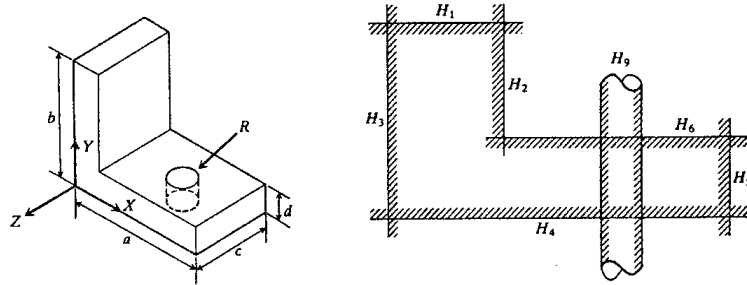
1. Rijitlik; katı modelin şekli, modelin uzaydaki konumuna veya oryantasyonuna bağlı olmamalıdır.
2. Homojen 3 boyutluluk; Katı sınırları iç bölgeye temas etmelidir. Uyuşmayan, sarkan yüzeyler ve kenarlar olmamalıdır.
3. Sonluluk ve tanımlanabilir sonluluk; Sınırlı sayıda bilgi ile katının boyutları belirlenebilmelidir. Çünkü bilgisayarın kapasitesi sınırlıdır. Örnek olarak,

sonlu yarıçap ve yükseklikle tanımlanabilen bir silindir, sonsuz sayıda düzlemsel yüzle tanımlanabilir.

4. Katı hareketler ve düzenli boolean operasyonları ile model oluşturma; Katıları uzayda hareket ettirerek, çeşitli manipulasyonlar yapmak veya boolean operasyonları ile yeni geçerli nesneler yaratılabilmesi.
5. Sınır belirleme; Katının sınırları katıyı içermeli ve katının iç bölgesini belirleyebilmelidir.

2.1 Sınır (B-Rep) Gösterimi

B-rep model veya sınır model, bir yüzey kümesi ile sınırlı fiziksel bir nesnenin topolojik ifadesidir. Bu yüzeyler bölgeler veya kapalı yüzeyler alt kümesidir. Kapalı bir yüzey kırılmalar olmayan sürekli bir yüzeydir. Sınır modeli ile bir nesnenin yüz, kenar ve köşelerinin bir araya getirilmesi ile topolojik olarak modelin geçerliliği garanti altına alınır [1].



Şekil 2.3: Bir katıya ait yarım uzay gösterimi

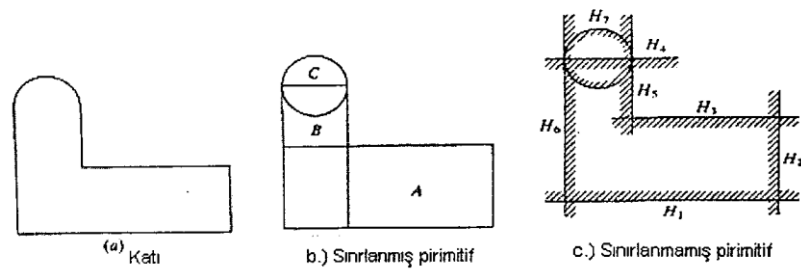
Sınır model veri tabanı hem topolojiyi hem de geometriyi içerir. Topoloji Euler işlemleri ile yaratılır. Geometri ise Euclid hesapları ile elde edilir. Euler işlemleri primitif CSG modellere ait yüzeylerde, kenarlarda ve köşelerde düzeltmeler ve manipulasyonlar yaratmak için kullanılır. Euler işlemleri (Boolean işlemleri) sınır modellerin doğruluğu ve bütünlüğünü (kapalılık, uyuşmaz yüz ve kenarların olmamasını) sağlar. Bunlar aynı zamanda modelin geçerliliğini kontrol eden mekanizmalardır. Daha başka geçerlilik kontrolleri uygulanabilir. Geometri köşelerin koordinatlarını, rijit hareket ve transformasyonları (öteleme ve dönme vs.) ve metrik bilgileri ihtiva eder. Topoloji ve geometri iç içe geçmiştir ve birbirinden ayrılamaz. İkisi de birbirine uyumlu olmalıdır. Yoksa saçma bir şekil elde edilebilir.

2.2 Konstrüktif Katı Geometrisi

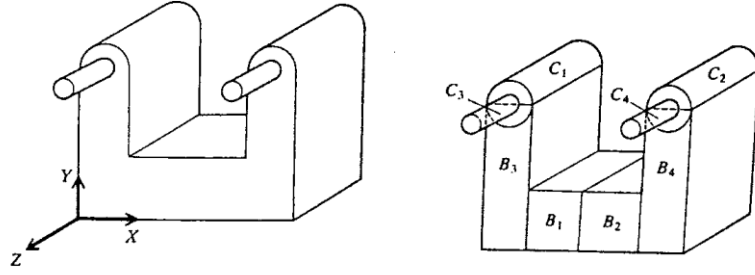
CSG ve B-rep şemaları, fiziksel nesnelerin katı modellerinin yaratılmasında kullanılan en popüler şemalardır. CSG, gösterimin az ve öz olmasından söz konusu nesnenin yaratılması ve saklanması çok daha kolaydır. Ayrıca geçerlilik kontrolü de oldukça kolaydır. Fark ve kesişim işlemleri kolayca yapılabilmektedir [1].

CSG model, fiziksel bir nesnenin primitif kümelerine bölünerek ve belirli kuralların izlenmesi (boolean işlemleri) ile bu primitiflerin bir araya getirilmesi sonucunda oluşturulur. Primitifler geçerli CSG modelleri olarak kabul edilebilir. Her primitif bir yüzey kümesi ile sınırlanmış ve genellikle kapalıdır. Primitif yüzeyleri, sınır değerlendirme işleminden faydalananak bulunan yüzler, kenarlar ve köşeler eksplisit olarak hesaplanmaz bunun yerine ne zaman gerekiyorsa o zaman üretilirler. CSG modeller yüzler, köşeleri ve kenarları yeniden değerlendirmesine karşın konstrüksiyon ve imalat açısından çok uygundur [1].

İki ana CSG şeması vardır. Birinci gruptaki CSG modeller sınırlanmış katı primitiflerini (r-kümeleri) esas alırlar. İkinci grup daha az popüler olup sınırlanmamış yarım uzayları (2-kümeler olmayan) esas alırlar. Sınırlanmış katı primitifler aslında yarım uzayların ve bunun primitiflerin sınırlarının karışımı olarak düşünülebilir.



Şekil 2.4: Sınırlanmış ve sınırlanmamış primitifler

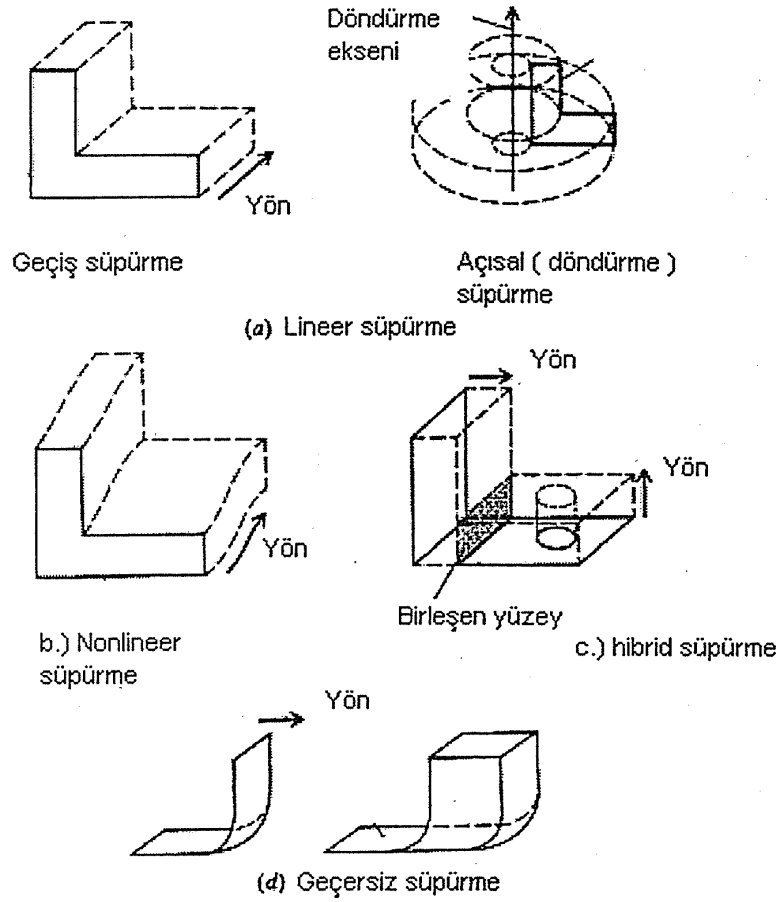


Şekil 2.5: Tipik bir katı ve bu yapıyı oluşturan primitifler

2.3 Süpürme (Sweep) Gösterimi

Süpürme gösterimi şemaları iki buçuk boyutlu katı nesnelerin yaratılmasında çok kullanışlıdır. İki buçuk boyutlu nesneler sınıfı, verilen doğrultuda üniform kalınlık ve asimetrik katıları ihtiva eder. Extürize katılar olarak bilinirler, doğrusal ve süpürme işlemleri ile yaratılırlar. Dönel katılar, dönel süpürme ile oluşturulur. B-rep ve CSG temelli modelleyicilerle kullanılırlar. Bunun sebebi süpürme teorisindeki eksiklikler ve modelleme alanının sınırlı olmasıdır. Süpürme gösterimi için genel geçerlilik ve düzgünlük şartları bilinmediğinden bunlar kullanıcıya bırakılmıştır. Süpürme, verilen bir yol (patika, doğru) lineer veya çembersel olup parametrik denklemlerle verilir. Nonlinear süpürmede ise daha yüksek dereceden bir polinom (kuadratik, kübik veya daha yüksek dereceden) ile tanımlanır. Karma süpürme ise lineer ve/veya nonlinear süpürmenin (küme işlemleri yardımıyla) karışımından oluşur [1].

Lineer süpürme öteleme ve dönel süpürme olarak ikiye ayrılabilir (Şekil 2.6a). öteleme süpürmede, sınırlarla tanımlanmış düzlemsel ve iki boyutlu nokta kümesi uzayda bir mesafe boyunca dik olarak hareket ettirilir. Nokta kümesi sınırı kapatılmış olmalıdır. Aksi takdirde geçersiz katılar (açık küme) elde edilir. Dönel süpürmede, düzlemsel iki boyutlu nokta kümesi bir eksen etrafında (simetri eksenini) verilen açıda döndürülmesi ile oluşur. Şekil 2.6a Nonlinear süpürmede ise vektör yerine bir eğri kullanılır (Şekil 2.6b). Karma süpürmede ise küme işlemlerinden faydalanılır (Şekil 2.6c) Şekil 2.6a’da görülen nesne karma süpürme ile oluşturulan iki farklı katı birbirine yapıştırılması ile elde edilmiştir. Geçersiz katılar veya düzensiz kümeler, süpürme doğrultusunun uygun seçilmemesinden kaynaklanabilir (Şekil.2.6d).



Şekil 2.6: Süpürme çeşitleri

2.4 Analitik Katı Modelleme (ASM)

AKM sonlu elemanlar modellemeye çok yakındır. AKM, sonlu elemanlar analizi (FEA) için sekizden yirmiye kadar noktalara sahip hekzahedral elemanların üç boyutlu parametrik izoparametrik formülasyonun matematiksel temelini izler. AKM üretim maksadından çok gösterim şeması için kullanılmaktadır. B-rep veya CSG'nin sahip olduğu oryante yüzeyleri içermezler [1].

Sonlu elemanlar problemlerini çözmek için geliştirilen AKM kütle özelliklerinin hesaplanması ve ağ yapısı üretme gibi alanlarda kullanılmaktadır.

3. SONLU ELEMENLAR METODU

3.1 Genelleme

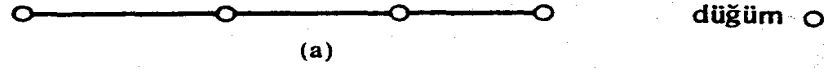
Bilim adamları ve mühendisler alışılmış analitik metotlarla çözümü çok zor hatta imkansız fiziksel problemlerle sık sık karşılaşır. Örneğin bir dış kuvvet takımı etkisinde üç boyutlu bir elastik cisim düşünelim. Bu kuvvetlere cismin "kesin" tepkisini hesaplamak için deformasyonlar cinsinden yazılmış denklemlerin bir "kapalı form" çözümünü aramak zorundayız. Bununla birlikte genellikle kompleks geometrik şekilli uygulama problemlerinin böyle bir çözümünü elde etmek aşırı ölçüde zor ve çoğunlukla imkansızdır. Bu tip problemler mühendislik ve diğer bilim dallarında çok sık ortaya çıkmaktadır. Böyle bir problemle karşılaşan çözümleyici doğal olarak "sayısal" adı verilen çözüme başvuracaktır. Başka metotlarla çözülemeyen problemlerin çözümünde kullanılabilen çok sayıda sayısal yol vardır. Sonlu eleman metodu bunlardan biridir. Sonlu eleman metodu yeni bir çözüm yöntemi olup kendisini diğerlerine üstün kılan seçkin özelliklere sahiptir [3].

3.2 Sonlu Eleman Kavramı

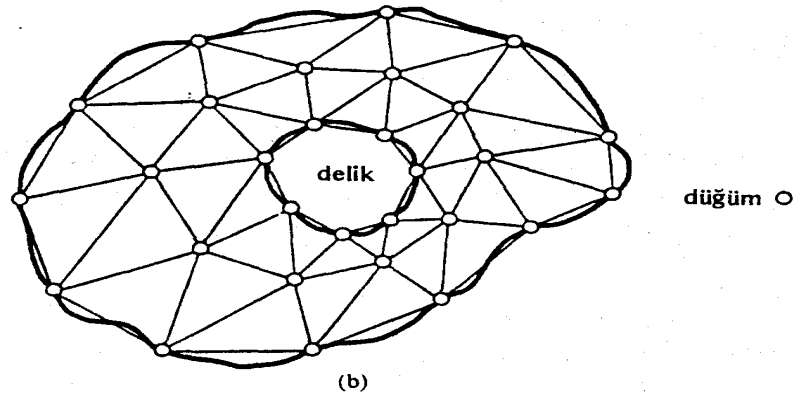
Bu metotta cismin "sonlu" boyutta çok sayıda "elemana" ayrıldığı tasavvur edilir. Metodun adı da buradan gelmektedir. Cisim uzayda n ($= 1, 2, 3$) boyuta sahibe, n -boyutlu sonlu elemanlar sistemine ayrılır.

Bir-boyutlu cisimler Şek.3.1a'daki gibi düğümlerle; iki-boyutlu cisimler Şek.3.1b'deki gibi çizgilerle; üç-boyutlu cisimler Şek.3.1c'deki gibi düzlemlerle sonlu elemanlara ayrılacaktır. Bir-boyutlu cisimlerde sonlu elemanlar farklı uzunlukta olabilirler. Ancak iki veya üç-boyutlularda elemanlar, eşit olmayan boyutlarda olabileceği gibi farklı şekillerde de olabilirler. Bununla birlikte, bütün durumlarda cismi temsil eden sonlu elemanlar Şek.3.1a, b ve c'de görüldüğü gibi düğümlerle bağlanacaktır. Sonuçta cisim, sonlu elemanlar ve onları birbirine bağlayan düğümlerden oluşan bir sistemle yer değiştirmiş olacaktır.

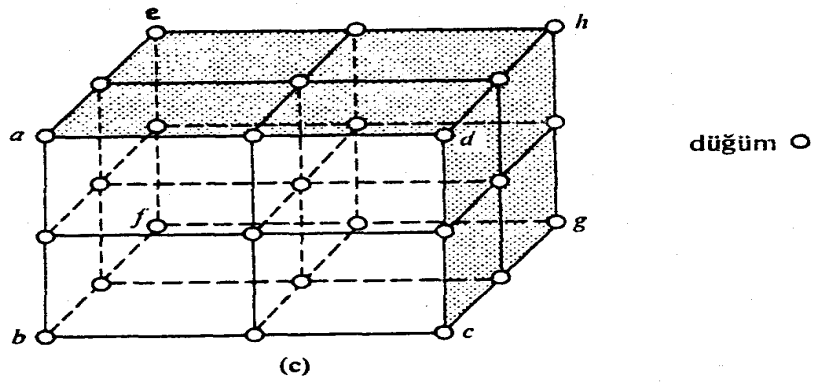
Sonlu elemanların düğümlerle bağlantı durumu Şekil 3.2'deki gösterimde en iyi şekilde anlaşılmaktadır. Burada düzgün, birim kalınlıktı biri-üçgen diğeri dikdörtgen iki düzlem sonlu eleman vardır [3].



Şekil 3.1a: Bir boyutlu elemanların düğümlerle sonlu elemanlara ayrılması



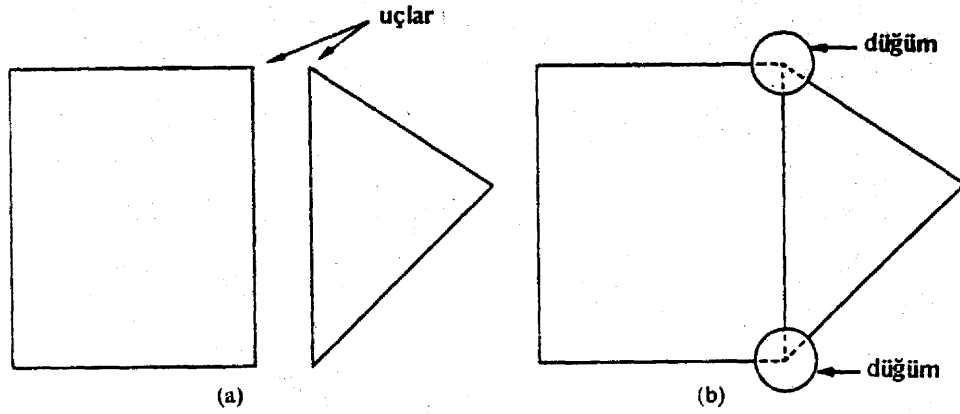
Şekil 3.1b: İki boyutlu elemanların çizgilerle sonlu elemanlara ayrılması



Şekil 3.1c: Üç boyutlu cisimlerin düzlemlerle sonlu elemanlara ayrılması

Şekil 3.1’de (a) Üç doğrusal sonlu elemana ayrılmış bir boyutlu bir cisim, (b) Üçgen elemanlar sistemi haline getirilmiş iki boyutlu delikli bir cisim, (c) a, b, c, d, e, f, g, b şeklinde 8 özdeş dikdörtgen prizma elemana ayrılmış üç boyutlu bir cisim.

Şekil 3.2.a’da elemanlar ayrı ayrı, birbirine bağlanmamış biçimde gösterilmiştir. Düğümleri Şekil 3.2b’deki gibi komşu sonlu elemanları uçlarından birbirine bağlayan ve onları bir arada tutan "somun – cıvata" bağlantısı gibi düşünebiliriz, öyle ki düğümler kaldırıldığında elemanlar birbirinden ayrılırlar.



Şekil 3.2: Elemanların düğüm noktalarıyla uçlarından bağlanmaları

(a) Birim üniform kalınlıklı iki düzlem sonlu eleman. (b) (a) 'daki sonlu elemanların düğümlerle bağlantısı.

Düğümler kaldırıldığında elemanlar birbirinden ayrılacağından komşu sonlu elemanlar arasında fiziksel süreklilik yoktur.

Metodun çözümlemesinde bundan sonraki adım, cismi temsil eden elemanların her birinin "eleman direngenlik matrisi"ni (element stiffness matrix) tanımlamaktır. Daha sonra eleman direngenlik matrisleri, "parçalara ayrılmış cismin tamamına ait "tümel direngenlik matrisi"ni (overall stiffness matrix) oluşturmak üzere toplanır. Bu toplamada, cismin sonlu eleman modelindeki bütün düğümlerde kuvvetlerin dengesi ve yer değiştirmelerinin sürekliliği sağlanır. Buradan şu matris denkleminine ulaşılır.

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (3.1)$$

$[K]$, cismin tümel direngenlik matrisini tanımlar. Tümel kuvvet vektörü $\{P\}$, bütün düğümlere uygulanan dış kuvvetleri; $\{\delta\}$ ise, bütün düğümlerin yer değiştirmelerini göstermektedir. Bu kitapta $[]$ işareti kare (veya dikdörtgen) matrisleri, $\{ \}$ İşareti vektörü gösterecektir.

Denklem (3.1) incelenirse, $[K]$ nitelik bakımından, parçalara ayrılmış cisimde birim yer değiştirme oluşturacak kuvveti ifade eder. Buradan cismin sonlu eleman modelini bir yaya eşdeğer olarak düşünersek cismin "direngenliği" $[K]$ 'nın "yay sabitine" karşılık olacağı açıktır. Dolayısıyla sonlu eleman metodu, esas itibariyle, cismin "direngenlik" açısından analizinin yapıldığı bir metottur.

Cisme etkiyen belirli bir dış kuvvetler ve belirli bir sınır şartları takımı için, Denklem (3.1)'den yegane çözüm olarak düğüm yer değiştirmeleri $\{\delta\}$ bulunur. Yer değiştirmelerden de, gerilmeler ve zorlanmalar hesaplanabilir.

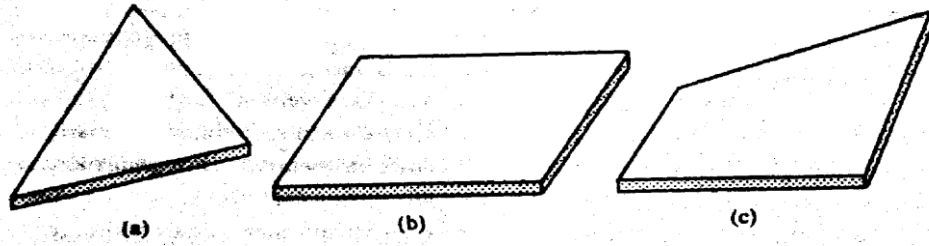
Özetlenirse, verilen bir problemin sonlu eleman metodu ile çözmek için sırası işte aşağıdaki işlemlerin uygulanması gerekir:

1. Cismi bir sonlu elemanlar sistemi halinde "parçalama" (bölme).
2. Cismi temsil eden elemanların her birinin "eleman direngenlik matrisi" ve diğer özelliklerinin çıkarılması.
3. "Tümel direngenlik matrisi" $[K]$ ve "tümel kuvvet vektörü" $\{P\}$ nin toplama işlemi.
4. $\{\delta\}$ yi tayin etmek için, belirlenmiş sınır şartlarıyla Denklem (3.1)'in çözümü.
5. Hesaplanan düğüm yer değiştirmeleri $\{\delta\}$ dan elemanların zorlanmalarının ve gerilmelerinin hesaplanması.

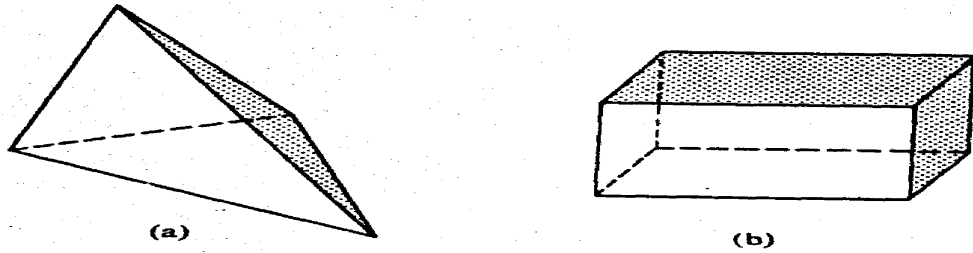
Uygulamada bilimsel ve mühendislik problemlerinde, genellikle, büyük $[K]$ matrisleri doğar. Bu yüzden, Denklem (3.1)'i çözmek için bilgisayar kullanılması kaçınılmaz hale gelir. Yukarıdaki İşlemleri otomatik hale getirmek için basit programlar yazılabilir. Gerçekten sonlu eleman metodu, otomatik hesaplama ile

birleştirilmekle, çözümünü çok zor hatta olanaksız karmaşık fiziksel problemleri hassas olarak çözmekte çok etkin ve zarif bir araç oluşturur.

Şekil 3.3 ve 3.4, tipik bazı eleman biçimlerini göstermektedir. Verilen bir cismin nasıl bölüneceğinin (elemanlara ayırma) belirlenmesinde cismin geometrisi, özellikle iç ve dış sınırlarının biçimi (Şekil 3.1b'deki deliğin çevresi tipik bir iç sınırdır), geniş Ölçüde yol gösterici olacaktır. İki-boyutlu cisimlerde, elemanın biçimi, cismin biçimine bağlı olarak bulunur. Eğri ve düzgün olmayan sınırlarda, üçgen ve dörtgen elemanlar, dikdörtgen elemanlardan daha elverişlidir. Üç büyüttü cisimlerde, dört-yüzlü (üçgen prizma), dikdörtgen prizmadan daha elverişlidir (Şekil 3.4). Cismin şekline bağlı olarak, uygulamada karışık bölme yapma belli bir eleman kullanmaktan daha uygun olabilir. Şekil 3.4 bir düzlem cismi temsil eden böyle bir kombinasyonu göstermektedir [3].



Şekil 3.3: İki boyutlu (düzlem) elemanlar: (a) üçgen, (b) dikdörtgen ve (c) dörtgen

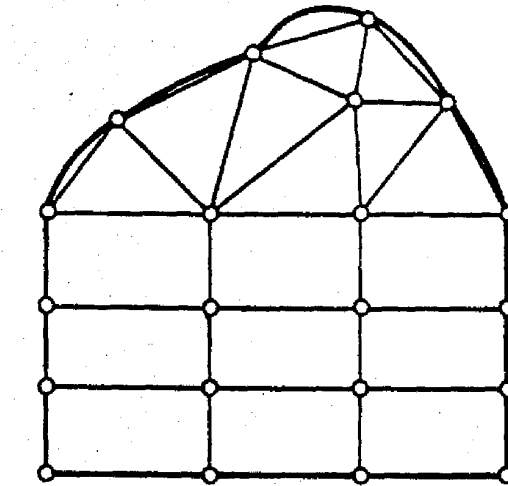


Şekil 3.4: Üç boyutlu elemanlar: (a) dört-yüzlü ve (b) dikdörtgen prizma

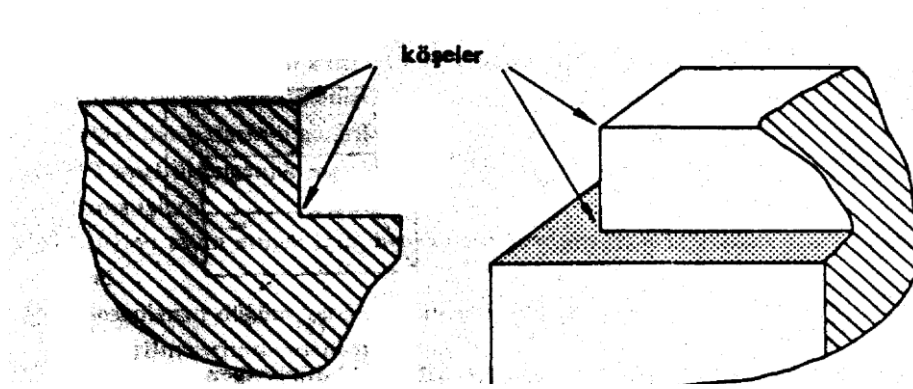
3.3 Niçin Sonlu Elemanlar?

Diğer sayısal metotlar özellikle sonlu farklar metodu daha eski ve güvenilir olduğu halde, sonlu eleman metodu kullanımı neden tercih edilmelidir? Sonlu eleman metodunu, diğer metotlara üstün kılan başlıca hususlar şunlardır:

1. Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeniyle, verilen bir cismi temsil edebilir, hatta karmaşık şekilli bir cisimde daha güvenilir olabilir.
2. Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler (Şekil 3.5) zorluk çekilmeksizin incelenebilir.
3. Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzeme nonlineeriteleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri, kolaylıkla göz önüne alınabilir.
4. Sebep-sonuç bağıntılarına ait problemler tümel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş "kuvvetler" ve "yer değiştirmeler" cinsinden formüle edilebilir. Sonlu eleman metodunun bu özelliği problemin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir [3].



Şekil 3.5: Üçgen ve dörtgen elemanlara bölünmüş bir düzlemsel cisim



Şekil 3.6: Köşeli ve/veya çok bölgeli cisimler

5. Sınır şartları kolayca uygulanır.

6. Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli Ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilir. Analitik ve deneysel metotlardan daha hassas sonuç verir.

Yukarıda 1, 3, 5 ve özellikle 2. şıkkın sonlu farklar işlemi önemli ölçüde zorluk gösterir [3].

3.4 Direngenlik Kavramı: Kiriş Eleman

3.4.1 Varsayımlar

1. Şekil değiştiren cisimde, yer değiştirmeler, Hooke kanunu uyarınca, kuvvetlerle lineer bağımlıdır.

2. Yer değiştirmeler küçük ve zorlanmalarla lineer bağımlıdır.

3. Bir sonlu elemanın geometrik ve malzeme özellikleri her yerinde sabittir.

(1) varsayımına uymayan cisimlere "malzeme bakımından lineer olmayan" (nonlinear) cisimler denir. Bu tür davranış, nonlinear elastik ve plastik veya visko-elastik malzemelerde görülür.

(2) varsayımına uyan cisimlere "geometrik olarak lineer" cisimler denir. Ancak, yer değiştirmeler, cismin geometrisinde hesaba katılır ölçüde bir değişiklik oluşturacak kadar büyük ise, "geometrik nonlinear" tarzda davranıyor demektir.

(3) varsayımı, cismin malzeme ve/ya geometrik özelliklerinin noktadan noktaya değişmesi halinde, her bir eleman için bu özelliklerin ortalama değerlerinin o elemanın her yerinde sabit kaldığının varsayılacağını ifade etmektedir. Böylece, cismin temsil eden elemanların her biri farklı fakat özellikleri sabit olacaktır. Bu özelliklerin değişimi sürekli fonksiyonlarla ifade edilebiliyorsa bu varsayım, genelde, kaldırılır.

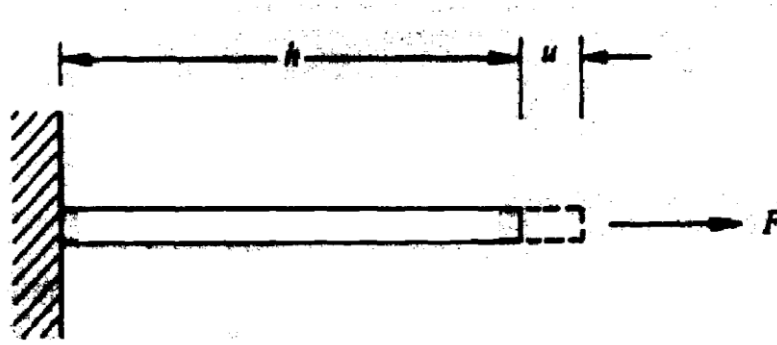
3.4.2 Yay Sabiti

Mühendislikte, çeşitli teknik disiplinlerde "yay sabiti" terimiyle sık sık karşılaşmış olunabilir. Bu kavram sonlu eleman metodunun temelidir. Bu metot esası bakımından bir "direngenlik" metodudur.

Şekil 3.7'deki prizmatik üniform kirişe aksenal F kuvveti etkidiğinde, elastik uzaması u olsun. Tanıma göre, "yay sabiti" birim yer değiştirme oluşturmak için gerekli kuvvettir. Burada, lemsin kesiti a , elastisite modülü E ile gösterilirse, o takdirde,

$$\text{Yay sabiti} = F/u = aE/h \quad (3.2)$$

olacaktır.



Şekil 3.7: Aksenal bir kuvvet etkisindeki, üniform prizmatik kiriş

(1) varsayımından dolayı kesim 2.1, aE/h büyüklüğü belli bir kiriş için daima sabit kalır. Aynı şekilde kirişin serbest ucuna, her biri kendine özgü yer değiştirmeler doğuran moment, kesme kuvveti ve benzer kuvvetler ayrı ayrı uygulanabilir. Her bir duruma karşı gelen yay sabiti kuvvet / yer değiştirme oranı şeklinde hesaplanabilir.

"Yay sabiti" terimi yerine daha uygun bulduğumuz, "direngenlik" (stiffness) terimini kullanacağız. Böylece Denklem (3.2)'deki yay sabiti kirişin "eksenel direngenliği" olacaktır. Benzer şekilde "eğilme direngenliği", "burulma direngenliği" olacaktır.

3.4.3 Serbestlik Derecesi

Şekil 3.8a'daki kirişin, Şekil 3.8b'de gösterilen sonlu elemanlara bölünmesini düşünelim. Daire içine alınmış sayılar, "düğüm numaralarını"; kare içine alınmış sayılar, "eleman numaralarını" göstermektedir. Buna ek olarak, her bir elemanın uçları a, b harfleriyle gösterilmiştir (uygunluk olsun diye, uçlar harf yerine sayılarla tanımlanabilir).

Şimdi, bu kiriş bir dış kuvvet takımı etkisinde bulunsun (kuvvetler şekilde gösterilmiştir). Bu dış kuvvetler, üç tür iç (reaksiyon) kuvvet yani, eksenel kuvvet F , kesme kuvveti Q eğilme momenti M 'i doğuracaktır. Yer değiştirmeler sırasıyla u , v ve ψ olsun. Bundan sonra; bir elemanı, diyelim 2 numaralı elemanı, izole ederek, Şekil 3.8c'de gösterildiği gibi elemanın uçlarındaki iç kuvvetleri gösterebiliriz.

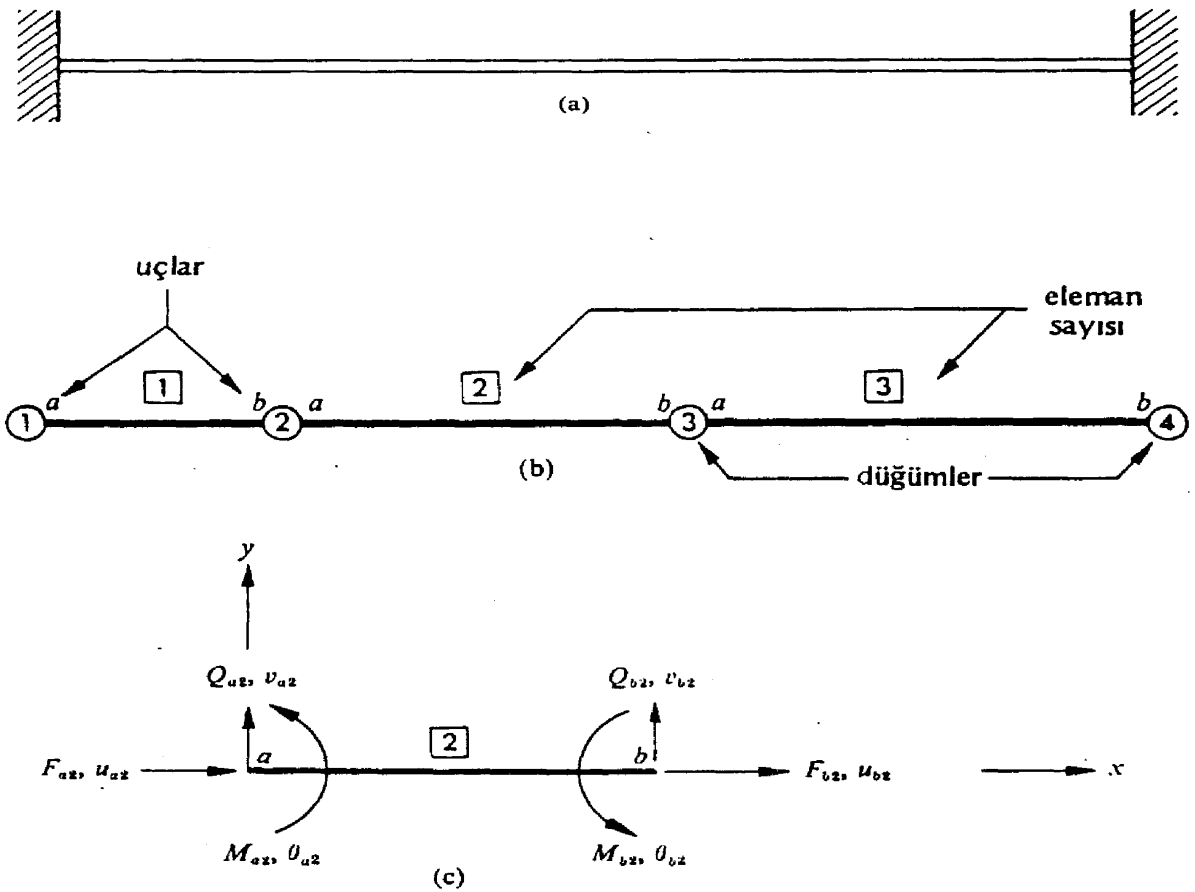
Notasyon. Şekil 3.8c'deki birinci indis elemanın ucunu, ikincisi o ucun ait olduğu elemanı tanımlıyor, örneğin F_{a2} , iki numaralı elemanın a ucundaki eksenel iç kuvvettir. Benzer şekilde, ψ_{bi} , i nolu elemanın b ucundaki dönmeyi gösteriyor.

Şekil 3.8b'deki elemanlarda, her bir uçta, üç tür kuvvet ve bunlara karşı gelen yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu nedenle bu kirişin her bir elemanı üç serbestlik derecelidir. Bu sonlu elemanın serbestlik derecesi, uçlarının her birinde oluşan kuvvet sayısı ve bunun sonucu olarak yer değiştirmelerin sayıyı şeklinde tanımlanacaktır.

3.4.4 Uç Ve Düğüm Vektörleri

Bir sonlu elemanın uç vektörleri, onun uçlarına aittir, i nolu sonlu elemanın uçları a , b , c , ..., ise, o takdirde elemanın "uç kuvvet vektörleri", $\{P_{ai}\}$, $\{P_{bi}\}$, $\{P_{ci}\}$, ...; şeklinde tanımlanacaktır. Örneğin $\{P_{ai}\}$, i elemanının a ucundaki bütün iç kuvvetleri kapsar; benzer olarak $\{P_{bi}\}$, i nin b ucundakileri kapsar, v.b. Şekil 3.4.4.1.c'deki özel durumda, eleman a ve b uçlarına sahip ve $i = 2$ 'dir. Sonuç olarak, elemanın "uç kuvvet vektörleri"

$$\{P_{a2}\} = \begin{Bmatrix} F_{a2} \\ Q_{a2} \\ M_{a2} \end{Bmatrix} = \{F_{a2} Q_{a2} M_{a2}\}^T \quad (3.3)$$



Şekil 3.8: (a) Her iki ucu sabitlenmiş bir kiriş, (b) (a)'nın sonlu eleman metodu, (c) 2 elemanın uçlarındaki kuvvetler ve yer değiştirmeler

(oklar pozitif yönleri göstermektedir)

$$\{P_{b2}\} = \{F_{b2} Q_{b2} M_{b2}\} \quad (3.4)$$

Notasyon. $\{ \}^T$ Sembolü, "transpoze edilmiş" bir vektörü (satırlar sütunlar yerine yazılmış) tanımlıyor. Yerden tasarruf etmek için, uzun vektörleri, genellikle bu şekilde transpoze edilmiş formda yazacağız.

Uçları a, b, c,..., olan i sonlu elemanın uç yer değiştirme vektörleri $\{\delta_{ai}\}$, $\{\delta_{bi}\}$, $\{\delta_{ci}\}$, ..., şeklinde tanımlanacaktır. Örneğin, $\{\delta_{ai}\}$, i elemanının a ucunda oluşan bütün yer değiştirmeleri kapsıyor. Benzer şekilde $\{\delta_{bi}\}$, i elemanının b ucundaki yer değiştirmeleri kapsamaktadır ve v.b. Şekil 3.4.4.1.c'deki özel durumda

$$\begin{aligned} \{\delta_{a2}\} &= \{u_{a2} v_{a2} \theta_{a2}\}^T \\ \{\delta_{b2}\} &= \{u_{b2} v_{b2} \theta_{b2}\}^T \end{aligned} \quad (3.5)$$

yazabiliriz.

Öte yandan, düğüm vektörleri bölünmüş cismin düğümlerine aittir. Böylece "düğüm kuvvet vektörü" $\{P_k\}$, k düğüme uygulanmış bütün dış kuvvetleri; yer değiştirme vektörü $\{\delta_k\}$, k düğümünde olsun bütün yer değiştirmeleri kapsıyor. Şekil 3.8b'deki özel durumda, $k = 1, 2, 3, 4$; k düğüme eksenel kuvvet F_k kesme kuvveti Q_k ve eğilme momenti M_k uygulandığını tasavvur edelim. Tanımdan,

$$\{P_k\} = \{F_k Q_k M_k\}^T \quad (3.6)$$

olur.

Yine u_k , v_k ve θ_k , k düğümündeki sırasıyla eksenel, kayma ve dönme yer değiştirmeleri ise tanımda,

$$\{\delta_k\} = \{u_k v_k \theta_k\}^T \quad (3.7)$$

Uç ve düğüm vektörlerinin diziliş solarının özdeş olmak zorunda bulunduklarının göz önünde tutulması önemlidir. Denklem (3.4) ve (3.6)'de, Şekil 3.4.4.1.a'daki

kiriş e ait büyüklükler aksenal, kesme ve eğilme diziminde sıralanmıştır. Bu dizim kabul edildiğinde $\{\delta_k\}$ 'yi aşağıdaki gibi yazmak yanlış olacaktır.

$$\{\delta_k\} = \{\theta_k u_k v_k\} \quad (3.8)$$

Çünkü buradaki dizim, giriş için kabul edilen dizimden farklıdır. Yine, bütün uç kuvvetlerin iç kuvvetler olduğuna, düğüm kuvvetlerinin uygulanan dış kuvvetler olduğuna dikkat edilmelidir.

3.4.5 Eleman Direngelik Matrisi

(1) varsayımına göre, kuvvetler yer değiştirmelerle lineer bağımlıdır. Bu lineer oluşun çok önemli bir sonucu "süper pozisyon prensibi"dir. Bu prensibi kullanarak birkaç "sebebin" aynı andaki toplam "etki"si, her bir sebebin ayrı ayrı etkilerinin toplamıdır, seklinde ifade edilebilir. Şimdi, i numaralı üniform bir giriş elemanı düşünelim ve serbestlik derecesi Şekil 3.8c'de gösterilen girişle aynı olsun. Bu prensibi kullanarak, i giriş elemanı için, uç yer değiştirmeleri sebep ve kuvvetleri sonuç olarak ele alıp, aşağıdaki kuvvet – yer değiştirme bağıntılarını yazabiliriz.

$$\begin{aligned} Q_{ai} &= A_{11}v_{ai} + A_{12}\theta_{ai} + A_{13}v_{bi} + A_{14}\theta_{bi} \\ M_{ai} &= A_{21}v_{ai} + A_{22}\theta_{ai} + A_{23}v_{bi} + A_{24}\theta_{bi} \\ Q_{bi} &= A_{31}v_{ai} + A_{32}\theta_{ai} + A_{33}v_{bi} + A_{34}\theta_{bi} \\ M_{bi} &= A_{41}v_{ai} + A_{42}\theta_{ai} + A_{43}v_{bi} + A_{44}\theta_{bi} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Buradaki A_{11} , A_{12} vb., i elemanının “direngelik katsayıları”dır. Denklem (3.9)'a aksenal yer değiştirmeler ve aksenal kuvvetler bilerek dahil edilmemişlerdir. Çünkü varsayılan geometrik lineerlik nedeniyle, Denklem (3.5)'deki kesme direngelikleri, aksenal kuvvetlerden etkilenmezler. Aksenal ve burulma direngelikleri biraz sonra görüleceği üzere, bağımsız olarak çıkarılacaktır.

Yukarıdaki eşitlikler matris formunda yazılarak,

$$\begin{Bmatrix} Q_{ai} \\ M_{ai} \\ Q_{bi} \\ M_{bi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_{ai} \\ \theta_{ai} \\ v_{bi} \\ \theta_{bi} \end{Bmatrix} \quad (3.10a)$$

elde edilir.

Denklem (3.10a)'daki, i elemanının direngenlik katsayılarından oluşan kare matrise, kiriş elemanı i'nin eleman direngenlik matrisi denir. Bu matrisi $[K_i]$ ile göstererek, Denklem (3.10a) sembolik formda,

$$\begin{Bmatrix} \bar{P} \end{Bmatrix} = [K_i] \{\delta\} \quad (3.10b)$$

Şeklinde yazılabilir. $\begin{Bmatrix} \bar{P} \end{Bmatrix}$ elemanının bütün uç kuvvetlerini, $\{\delta\}$ bütün uç yer değiştirmelerini kapsamaktadır. Şimdi, herhangi bir i sonlu elemanının “eleman direngenlik matrisi” $[K_i]$ 'yi denklem (3.10b)'ye göre, elemanın uç kuvvetlerini, uç yer değiştirmelerine bağlayan bir matris olarak tanımlayıp, genelleştirebiliriz. $[K_i]$, lineer sistemlerde, sebep ve sonuç ilişkilerinden doğan, daima simetrik bir matristir. Eğer i elemanının, n ucu varsa ve m serbestlik dereceli ise, o takdirde $[K_i]$, nxm sütun ve nxm satırlı olacaktır.

F = (eksenel direngenlik) şeklinde yazılıp, Denk(3.10b) ile karşılaştırılırsa, her iki denklemin tanımladığı direngenlik kavramının, aynı fiziksel yoruma ulaştığı açıktır. Ancak üstteki denklem, bir tek kuvvetle ilgili olduğu halde, Denklem (3.10b) direngenliğin çeşitli kuvvetlerle bağlanışını matris formunda göstermektedir

3.4.5.1 Sistem Denklemlerinin Çözümü

Birleştirme prosesi neticesinde alan değişkeninin bilinmeyen düğüm noktası değerlerini elde etmek için çözülmesi gereken simultane denklem seti elde edilir. Eğer denklemler lineer ise standart çözüm teknikleri kullanılabilir.

Denklemlerin çözümü neticesinde birincil bilinmeyenlerin (alan değişkeni) değerleri bulunur. Elastik gerilme-deformasyon analizinde birincil bilinmeyen yer değiştirmelerdir. Birim şekil değiştirmeler elastisite teorisindeki bağıntıları kullanarak elde edilir. Gerilmeler de Hooke Kanunu yardımıyla birim şekil değiştirmelerden elde edilir.

Düğüm noktası değerleri ve interpolasyon fonksiyonlarını kullanarak, eleman içinde birim şekil değiştirme ve gerilmeler hesaplanabilir.

3.4.6 Eleman Rijitlik Matrisi

Sonlu elemanlar metodunda, incelenen yapı birbirlerine düğüm noktalarından bağlanan elemanlar topluluğu (eleman ağı) ile modellenir. Çözüm, temel gerilme-birim şekil değiştirme (strain) ifadelerini ve komşu elemanlardan düğüm noktaları üzerinden aktarılan kuvvetler sistemini kullanarak her bir elemandaki çökmelerin hesaplanmasıyla elde edilir. Gerilmeler birim şekil değiştirmelerden elde edilir. Her düğüm noktasındaki kuvvet diğer düğüm noktalarındaki kuvvetlere bağlıdır. Elemanlar yay sistemine benzer davranır ve tüm kuvvetler dengede olana kadar şekil değiştirirler. Bu da aynı zamanda çözülmesi gereken lineer denklemler sistemini ifade eder.

Rijitlik matrisi tatbik edilen kuvvetler nedeniyle düğüm noktalarının ne kadar yer değiştirdiğini tanımlayan bir yay sabiti olarak düşünülebilir. Matris formunda aşağıda ifade edilmiştir.

$$\{f\} = [k]\{u\} \quad (3.11)$$

Burada $\{f\}$ elemana etki eden kuvvetler vektörü, $[k]$ elemanın rijitlik matrisi ve $\{u\}$ da elemanın düğüm noktalarındaki yer değiştirme vektörüdür. Rijitlik matrisi düğüm noktalarının koordinatları ve malzemenin elastik sabitlerinden oluşur.

Sistemi oluşturan bütün elemanlar için genel rijitlik matrisi aşağıdaki gibidir;

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (3.12)$$

$\{F\}$: Her bir düğüm noktasındaki dış kuvvetler $\{F\} = \sum_e \{f\}$

$[K]$: Tüm elemanlardaki rijitlik matrislerinin birleştirilmesi ile oluşan sistemin rijitlik matrisi $[K] = \sum_e [k]$

$\{U\}$ = Yer değiştirme vektörü

Bu ifadede bilinmeyenler, yer değiştirmelerdir. Uygun matris işleminin tatbiki ile yer değiştirme vektörü eşitliğin bir tarafında yalnız bırakılır. Gauss eliminasyonu yöntemi ile her bir düğüm noktasındaki yer değiştirmeler hesaplanır.

Yer değiştirmeler vektörü, $[B]$ gradyen matrisi ve $[D]$ elastik sabitler matrisi ile çarpıldığında her bir düğüm noktasındaki gerilmeler hesaplanır [3].

$$[U] = [K]^{-1} \{F\} \quad (3.13)$$

$$\{\sigma\} = [D][B]\{u\}^e \quad (3.14)$$

3.4.7 Rijitlik Matrisinin Türetilmesi

Eleman rijitlik matrisini elde etmek için virtüel işler prensibinden faydalanılabilir. Bu prensibe göre, tatbik edilen kuvvetler ile dengede olan bir yapının virtüel yer değiştirmesi halinde dış kuvvetlerin virtüel işi yapıdaki iç gerilmelerin virtüel şekil değiştirme enerjisine eşittir.

$$\partial U_e = \partial W_e \quad (3.15)$$

∂U_e = iç gerilmelerin virtüel şekil değiştirme enerjisi

∂W_e = dış kuvvetlerin virtüel işi

Yapıdaki gerilme ve birim şekil değiştirme dağılımlarını hesaplamak için öncelikle birim şekil değiştirmeler ile yer değiştirmeler arasındaki bağıntıyı tesis etmek gerekmektedir. Eleman içindeki herhangi bir noktanın yer değiştirmesi o noktanın koordinatlarının bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon düğüm noktalarının koordinatları cinsinden ifade edilebilir. Bu polinom ifadesi ile, düğüm noktalarındaki değerlerden

eleman içindeki herhangi bir noktanın yer değıştirmesi tayin edilebilir. Bu fonksiyon interpolasyon fonksiyonu olarak adlandırılır.

$$\{u\} = [N]\{u\}^e \quad (3.16)$$

$\{u\}$ = yer değıştirme bileşenleri $u(x,y)$ ve $v(x,y)$

$[N]$ = interpolasyon fonksiyonu

$\{u\}^e$ = düğüm noktasındaki yer değıştirme bileşenleri

Birim şekil değıştirme yer değıştirme bağıntısı bu durumda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\{\varepsilon\} = [\delta]\{u\} = [\delta][N]\{u\}^e = [B]\{u\}^e \quad (3.17)$$

$[B]$ = Gradyen matrisi

$\{\varepsilon\}$ = birim şekil değıştirme sütun matrisi

$[\delta]$ = diferansiyel operatör matrisi

Gradyen matrisi birim şekil değıştirme bileşenleri ile düğüm noktası yer değıştirme bileşenlerini birbirine bağlamaktadır.

Gerilme matrisi aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\{\sigma\} = [E][B]\{u\}^e \quad (3.18)$$

Virtüel düğüm noktası yer değıştirmeleri $\{\partial u^e\}$ için virtüel birim şekil değıştirme enerjisi;

$$\delta U_e = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (3.19)$$

dir. Dış kuvvetlerin virtüel işi,

$$\delta W_e = \{\delta u^e\}^T \{f\} \quad (3.20)$$

Virtüel işler prensibinden aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\int_v \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \{\delta u^e\}^T \{f\} \quad (3.21)$$

Gerilme ve birim şekil değiştirme ifadeleri yerine eşitlikleri konursa,

$$\int_v \{\delta u^e\}^T [B]^T [E][B] \{u^e\} dV = \{\delta u^e\}^T \{f\} \quad (3.22)$$

Virtüel ve gerçek yer değiştirmeler hacimsel integralden bağımsız olduğundan aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\{\delta u^e\}^T \left(\int_v [B]^T [E][B] dV \right) \{u^e\} = \{\delta u^e\}^T \{f\} \quad (3.23)$$

Eşitliğin her iki tarafından $\{\delta u^e\}^T$ silinirse, düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri tatbik edilen kuvvetlere bağlayan aşağıdaki ifade elde edilir.

$$[k] \{u^e\} = \{f\} \quad (3.24)$$

Bu ifadede eleman rijitlik matrisi

$$[k] = \int_v [B]^T [E][B] dV \quad (3.25)$$

İki boyutlu problemde,

$$[k] = \int_v [B]^T [E][B] t dA \quad (3.26)$$

T eleman kalınlığı, A ise eleman alanıdır.

Bu şekilde kabul edilen yer değiştirme fonksiyonunu esas alan herhangi bir elemanın genel matematik ifadesi elde edilmiş olur. Eleman rijitlik matrisi interpolasyon fonksiyonlarının formuna ve gradyen matrisini oluşturan türevlerine bağlıdır [4].

3.4.8 Yer Değiştirme Fonksiyonu

Eleman boyunca yer değiştirmeleri kartezyen koordinatların (düzlemsel problemde x ve y) sürekli fonksiyonları olarak ifade etmekle, sonlu elemanın fiziksel davranışının matematiksel ifadesini elde etmek için ilk adım atılmış olur.

Yer değiştirme fonksiyonları sonlu elemanlar içinde sürekli ve tüm elemanlarla uyumlu olacak şekilde seçilir. Polinom ifadeler sürekliliği sağlarlar. Uyumluluk şartı, yük altında deformasyon neticesinde komşu elemanların her biri üstüne binmemesi veya arada süreksiz olmamasıdır. Bu nedenle seçilen polinom ifadesinin derecesine karşılık gelen tüm terimleri ihtiva etmesi istenir.

Polinom ifadeler üçgen ve dörtgen elemanların yer değiştirme fonksiyonları olarak kullanılırlar. Matematiksel olarak ele alınmaları kolaydır. Yakınsama için herhangi bir dereceden polinom kullanılabilir.

Düzlem eleman içindeki herhangi bir noktanın yer değiştirmesi **u** fonksiyonu matris formda aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\{u\} = [u(x, y) v(x, y)]^T \quad (3.27)$$

Değişim bir polinomla ifade edilebilir. Aşağıdaki polinom, dikdörtgen elemanın yer değişimini ifade etmektedir.

$$u = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy \quad (3.28a)$$

$$v = a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 xy \quad (3.28b)$$

Yer değiştirmenin düğüm noktalarındaki değerleri ise aşağıdaki ifadelerden bulunur.

$$u(x_1, y_1) = a_1 + a_2 x_1 + a_3 y_1 + a_4 x_1 y_1 = u_1 \quad (3.29a)$$

$$u(x_2, y_2) = a_1 + a_2 x_2 + a_3 y_2 + a_4 x_2 y_2 = u_2 \quad (3.29b)$$

$$u(x_3, y_3) = a_1 + a_2 x_3 + a_3 y_3 + a_4 x_3 y_3 = u_3 \quad (3.29c)$$

$$u(x_4, y_4) = a_1 + a_2 x_4 + a_3 y_4 + a_4 x_4 y_4 = u_4 \quad (3.29d)$$

Benzer şekilde yer değiştirmenin v bileşeni için ifadeler yazılabilir.

Bundan sonra yapılacak iş, yer değiştirme fonksiyonunu düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade etmektir.

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \quad (3.30a)$$

$$v = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 + N_4 v_4 \quad (3.30b)$$

Neticede matris formda aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\{u\} = \{N\}\{u\}^e \quad (3.32)$$

N_i interpolasyon fonksiyonları aşağıdaki eşitlikte verilir. N_i fonksiyonu i numaralı düğüm noktasında 1 diğerlerinde 0 değerindedir. Buna göre şekilden aşağıdaki ifadeler çıkarılabilir.

$$N_1 = \frac{1}{4ab}(b-x)(a-y) \quad (3.33a)$$

$$N_2 = \frac{1}{4ab}(b+x)(a-y) \quad (3.33b)$$

$$N_3 = \frac{1}{4ab}(b+x)(a+y) \quad (3.33c)$$

$$N_4 = \frac{1}{4ab}(b-x)(a+y) \quad (3.33d)$$

N_i fonksiyonları iki adet birinci dereceden polinom ifadenin çarpımı olduğundan bu eleman iki doğrusal (bilineer) olarak adlandırılır [9].

Birim şekil değıştirmeler ile yer değıştirmeler arasındaki ifade,

$$\{\varepsilon\} = [\partial]\{u\} = [\partial][N]\{u\}^e = [B]\{u\}^e \quad (3.34)$$

$$[\partial] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Bu matrislerden elde edilmesinden sonra eleman rijitlik matrisi virtüel işler prensibinin tatbiki ile elde edilmektedir.

Birim şekil değıştirme bileşenleri aşağıda verilmiştir.

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_2 + a_4 y \\ a_6 + a_8 y \\ a_3 + a_4 y + a_6 + a_8 y \end{Bmatrix} \quad (3.37)$$

Birim şekil değıştirmeler eleman içinde x ve y'ye bağılı olarak değışmektedir. Gerilme birim şekil değıştirme bağları sabit olduğundan gerilme bileşenleri de eleman içinde şekil değıştirmelerle benzer değışecektir. Bu şekilde çözüme iyi bir yaklaşım sağlanır.

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{sabit} \\ \text{sabit} \\ \text{sabit} \end{Bmatrix} \quad (3.38)$$

Denklem (3.33)'de ise üç düğüm noktalı elemandaki şekil değişimini veren ifade verilmiştir. Eleman boyunca şekil değişimi bileşenleri sabit olduğundan performansı dörtgen elemandan düşüktür [5].

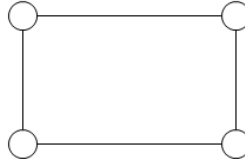
3.4.9 İzoparametrik Dörtgen Eleman

Karmaşık geometrilerin modellenmesinde iki doğrusal dikdörtgen eleman iyi bir performans göstermez. Genel dörtgen (quadrilateral) elemanlar karmaşık geometriyi daha iyi temsil eder. Bu eleman daha önce ele alınan iki doğrusal dikdörtgen eleman gibi formüle edilebilirse de gerekli integral işlemleri hayli karmaşıktır. İntegral sınırlarının tanımlanmasında zorluk vardır. Kartezyen koordinatlarda koordinat interpolasyonu elemanın uzaydaki konumuna son derece hassastır. Elemanın bazı konumlarında ara matrisler hesaplanamaz veya sistem denklemleri kötü sonuç verecek şekilde tesis edilir. İzoparametrik (Eşparametrik) elemanların kullanılması bu dezavantajları gidermektedir. İzoparametrik elemanlar doğal koordinatlarda kare elemanlar olarak formüle edilir ve fiziksel koordinatlara yer değiştirme enterpolasyon fonksiyonlara benzeyen koordinat enterpolasyon fonksiyonları yardımı ile eşlenir.

Kullanılan izoparametrik elemanın tipine bağlı olarak elemanın fiziksel koordinatlardaki konfigürasyonu genel dörtgen ve eğri kenarlı olabilir. Koordinat enterpolasyonu için kullanılan şekil fonksiyonları yer değiştirme enterpolasyonu için kullanılanlara özdeş ise eleman izoparametriktir. İzoparametrik elemanlar çok yönlü kullanılabildiklerinden ve daha güvenilir sayısal netice verdiklerinden sonlu elemanlar programlarının temel elemanlarıdır [5].

3.4.9.1 İzoparametrik Eşleme

Şekil 3.9’de dört düğüm noktalı dörtgen elemanın (s,t) doğal koordinatlardaki (x,y) koordinat sistemine dönüştürülmesi görülmektedir. Doğal koordinatlarda eleman bir karedir ve koordinat sisteminin orijini merkezdedir. Kartezyen koordinatlarda eleman keyfi dörtgen şeklindedir. Şekil fonksiyonları ile, herhangi bir P(x,y) noktasının koordinatları düğüm noktalarının (x,y) koordinatları cinsinden ifade edilebilir.



Şekil 3.9: Elemanın fiziksel koordinatlara eşlenmesi

$$u(s,t) = a_1 + a_2s + a_3t + a_4st \quad (3.39a)$$

$$v(s,t) = b_1 + b_2s + b_3t + b_4st \quad (3.39b)$$

$$x(s,t) = \sum_{i=1}^4 N_i(s,t)x_i \quad (3.40a)$$

$$y(s,t) = \sum_{i=1}^4 N_i(s,t)y_i \quad (3.40b)$$

$$\begin{Bmatrix} x(s,t) \\ y(s,t) \end{Bmatrix} = [N] \{x_i\} \quad (3.41)$$

$$\{x_i\} = [x_1 \quad y_1 \quad x_2 \quad y_2 \quad x_3 \quad y_3 \quad x_4 \quad y_4]^T \quad (3.42)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$N_1(s,t) = \frac{(1-s)(1-t)}{4} \quad (3.44a)$$

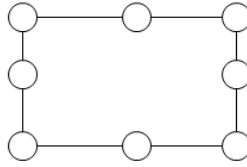
$$N_2(s,t) = \frac{(1+s)(1-t)}{4} \quad (3.44b)$$

$$N_3(s,t) = \frac{(1+s)(1+t)}{4} \quad (3.34c)$$

$$N_4(s,t) = \frac{(1-s)(1+t)}{4} \quad (3.44d)$$

Eleman doğal koordinatlardan kartezyen (fiziksel) koordinatlara eşlendikten sonra s ve t eksenlerinin birbirine dik olması şart değildir.

Analizde kullanılan bir eleman tipi olan, ikinci dereceden yer değiştirme fonksiyonlu 8 düğüm noktalı elemana ait şekil fonksiyonları aşağıda verilmiştir. Bu eleman yapıdaki gerilme değişimini lineer eleman nazaran daha iyi temsil etmektedir. Şekil 3.10'da eleman görülmektedir.



Şekil 3.10: Sekiz düğüm noktalı izoparemetrik sonlu eleman

Bu elemanın yer değişim fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$u = a_1 + a_2s + a_3t + a_4s^2 + a_5st + a_6t^2 + a_7s^2t + a_8st^2 \quad (3.45a)$$

$$v = b_1 + b_2s + b_3t + b_4s^2 + b_5st + b_6t^2 + b_7s^2t + b_8st^2 \quad (3.45b)$$

Benzer şekilde eleman içindeki herhangi bir noktanın yer değiştirmesi ve koordinatları düğüm noktasındaki değerler cinsinden şekil fonksiyonları yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i(s,t)u_i \quad (3.46a)$$

$$v = \sum_{i=1}^8 N_i(s,t)v_i \quad (3.46b)$$

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i(s,t)x_i \quad (3.47a)$$

$$y = \sum_{i=1}^8 N_i(s,t)y_i \quad (3.47b)$$

$$\{u\} = [N]\{u\}^e \quad (3.48)$$

Şekil fonksiyonunun düğüm noktasındaki değerlerini veren ifadeler aşağıdadır.

$$N_1(s,t) = -\frac{(1-s)(1-t)(1+s+t)}{4} \quad (3.49a)$$

$$N_2(s,t) = -\frac{(1+s)(1-t)(1-s+t)}{4} \quad (3.49b)$$

$$N_3(s,t) = -\frac{(1+s)(1+t)(1-s-t)}{4} \quad (3.49c)$$

$$N_4(s,t) = -\frac{(1-s)(1+t)(1+s-t)}{4} \quad (3.49d)$$

$$N_5(s,t) = \frac{(1-s^2)(1-t)}{2} \quad (3.49e)$$

$$N_6(s,t) = \frac{(1+s)(1-t^2)}{2} \quad (3.49f)$$

$$N_7(s,t) = \frac{(1-s^2)(1+t)}{2} \quad (3.49g)$$

$$N_8(s,t) = \frac{(1-s)(1-t^2)}{2} \quad (3.49h)$$

İzoparametrik elemanların tercih edilmesinin ana nedeni fiziksel koordinatlarda integral işlemlerinden kaçınmaktır. Bununla birlikte, (3.20) rijitlik matrisi fiziksel koordinatlarda ifade edilmiştir. Bu nedenle, dx ve dy diferansiyel uzunlukları ds ve dt doğal koordinat diferansiyel uzunlukları cinsinden ifade edilmelidir. Şekil değişimi fiziksel koordinatları bağlı olarak şekil fonksiyonlarının türevi cinsinden ifade edilir.

Bu türevler [B] matrisinin elemanlarıdır ve doğal koordinatlara bağlı olarak dönüştürülmelidir.

(dx,dy) diferansiyelleri ile (ds, dt) arasındaki bağıntı aşağıdaki ifadede verilmiştir.

$$dx = \frac{\partial x}{\partial s} ds + \frac{\partial x}{\partial t} dt \quad (3.50a)$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial s} ds + \frac{\partial y}{\partial t} dt \quad (3.50b)$$

Bu ifadede de,

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \sum \frac{N_i}{\partial s} x_i, \frac{\partial y}{\partial s} = \sum \frac{N_i}{\partial s} y_i, \frac{\partial x}{\partial t} = \sum \frac{N_i}{\partial t} x_i, \frac{\partial y}{\partial t} = \sum \frac{N_i}{\partial t} y_i$$

Koordinat türevleri matris formunda ifade edilir,

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

[J] matrisi dönüşümün jacobiyenidir.

İki koordinat sisteminin diferansiyelleri aşağıdaki formda yazılabilir;

$$\begin{Bmatrix} dx \\ dy \end{Bmatrix} = [J]^T \begin{Bmatrix} ds \\ dt \end{Bmatrix} \quad (3.52)$$

Yukarıda yapılan işlemlere benzer olarak, (i) düğüm noktası için şekil fonksiyonun türevleri aşağıdaki formda elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (3.53)$$

$[J]^{-1}$ var ise (s,t) koordinatlarından (x,y) koordinatlarına birebir eşleme yapma mümkün olmaktadır. İşlem tersinirdir. $|J|$ determinanı sıfırdan büyük ise, elemanın alanı muhafaza edilmekte ve eşleme fiziksel olarak bir anlam taşımaktadır. $|J|$ elemanının herhangi bir noktasında A_{xy}/A_{st} diferansiyel alan oranıdır.

[J] sabit bir kalınlık için diferansiyel hacimde, düzlem elastisite elemanı için $h dx dy$ 'nin $h |J| ds dt$ dönüşümü sağlanmalıdır. İntegral sabitleri s için -1'den 1'e ve t

için 1'den 1'e dir. Bu şekilde, herhangi bir $F(x,y)$ fonksiyonunun integrali doğal koordinatlara aşağıdaki ifade ile dönüştürülür.

$$\int_A F(x,y) dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(x(s,t), y(s,t)) |J| ds dt \quad (3.54)$$

3.4.9.2 Eleman Rijitlik Matrisinin Eldesi

(3.16) ifadesi izoparametrik lineer dörtgen eleman içinde kullanır. Koordinat dönüşümü neticesinde eleman rijitlik matrisi aşağıda ifade edilmiştir.

$$[K] = h \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] J | \partial s \partial t \quad (3.55)$$

3.4.9.3 Sayısal İntegrasyon

Sonlu elemanlar programlarında integral alma işlemleri sayısal olarak yapılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan sayısal integrasyon metodu Gauss Kareleştirme (Quadrature) metodudur. Bu metoda diğerlerine nazaran daha az örnekleme noktası ile istenen yaklaşım elde edilir.

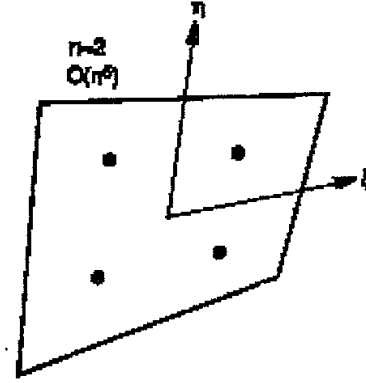
Bu metotta verilen bir $F(s,t)$ fonksiyonunun integral alma işlemi aşağıdaki forma dönüşür.

$$I = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(s,t) ds dt = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n W_k W_l F(s_k, s_l) \quad (3.56)$$

Bu ifadede m ve n , s ve t yönündeki örnekleme noktaları sayılarıdır. S_k ve t_l k ve l örnekleme noktalarının konumları, w_k ve w_l örnekleme noktalarında $F(s,t)$ 'ye tatbik edilen ağırlıklardır. Genelde $m = n$ 'dir [4].

Gauss Kareleştirme metodu ile elde edilen isabetli yaklaşım örnekleme noktalarının yerleri ve ağırlıklarının uygun seçimine bağlıdır. Optimal örnekleme noktaları konumları ve ağırlıkları şekilde verilmiştir. Şekil 3.11'da 4 örnekleme noktası vardır.

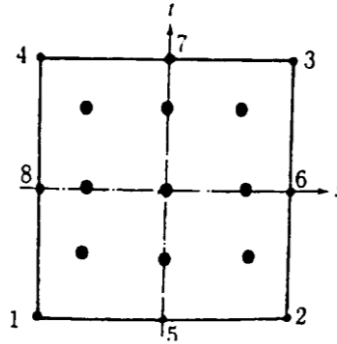
Bu noktalar s ve t referans eksenlerine göre ± 0.577350269 konumlarındadır. Ağırlık faktörleri 1'dir.



Şekil 3.11: Gauss Kareleştirme için optimum örnekleme noktası konumları

İntegrasyon noktaları sayısı, elemanın performansına etki etmektedir. Tam integrasyon distorte olmamış eleman için rijitliği tam olarak integral alma için gerekli integrasyon derecesidir. Lineer izoparametrik dörtgen eleman için şekilde gösterildiği gibi 4 örnekleme noktası tam integrasyonu sağlamaktadır.

İkinci dereceden dörtgen eleman için örnekleme noktaları Şekil 3.12'de görülmektedir [4].

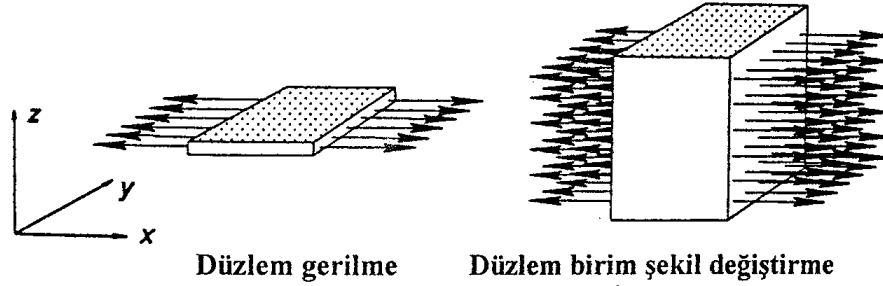


Şekil 3.12: 8 düğüm noktalı eleman için örnekleme noktaları

3.5 İki Boyutlu Modelleme

Problem geometrisi bir düzlemde tanımlanabilir ve tatbik edilen yüklerde aynı düzlemde ise, bu durumda problem düzlemsel (2 boyutlu) olarak incelenebilir. İki boyutlu problemlerin iki genel hali vardır: düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme. Düzlem gerilme, yapıların düzlemdeki boyutlarına nazaran küçük

kalınlıkta olması durumunda söz konusudur. Bu durumda düzlem dışı koordinata bağlı gerilme bileşenlerinin tümü sıfırdır. Kalınlık düzlemdeki boyutlardan son derece büyükse bu durumda düzlem şekil değiştirme hali vardır. Düzlem şekil değiştirme halinde düzlem dışı doğrultuda birim şekil değiştirmeler sıfırdır.



Şekil 3.13: İki boyutlu katı geometrisi

Teorik olarak düzlem gerilme halinde kalınlık sıfıra, düzlem şekil değiştirme halinde kalınlık sonsuza gider. Kalınlık sonlu değerde ve aşağı yukarı düzlemdeki boyutlarla aynı ise bur durumda 3 boyutlu hal söz konusudur. Bununla birlikte pratikte sadece düzlem yükleri varsa, düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme çözümleri genelde benzer ve bazı durumlarda ise aynı neticeyi vermektedir [4].

Elastisite teorisinde üretilen ifadeler iki boyutlu problemlerin çözümünü sağlar. Bu ifadeler yer değiştirme, birim şekil değiştirme ve gerilme bileşenlerinin birbirine bağlamaktadır. Lineer elastisite mühendislik problemlerin incelenmesinde esas alınmaktadır. Malzeme homojen ve izotropiktir. Küçük deformasyonlara izin verilmiştir. Gerilme ve birim şekil değiştirme, veya kuvvet ve deformasyon arasında lineer bir bağ vardır. Tatbik edilen kuvvetler kaldırıldığında deformasyonlar da ortadan kalkar.

İki boyutlu yapıda, düzlemde herhangi bir noktanın hareketini tanımlayan iki yer değiştirme bileşeni vardır. Bir cisim x,y koordinat sistemine yerleştirildiğinde x yönündeki yer değiştirme bileşeni $u(x,y)$ ve y yönündeki yer değiştirme bileşeni $v(x,y)$ 'dir. Düzlem çözümde birim şekil değiştirme bileşenleri $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 'dir. Birim şekil değiştirme – yer değiştirme bağıntıları aşağıda verilmiştir.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.57)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.58)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Bu birim şekil değiştirmelerine karşılık gelen gerilmeler σ_x, σ_y ve τ_{xy} 'dir. Düzlem gerilmede σ_z, τ_{yz} ve τ_{xz} sıfırdır. Düzlem gerilme hali için;

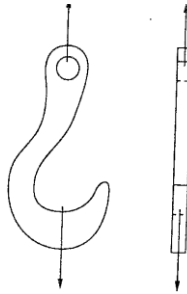
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.59)$$

Bu ifadede σ_x ve σ_y normal gerilme bileşenleri, τ_{xy} kayma gerilmesi, E elastisite modülü ve ν poisson oranıdır.

Düzlem şekil değiştirme durumunda, birim değiştirme bileşenleri $\varepsilon_z, \gamma_{xz}$ ve γ_{yz} sıfırdır. Gerilme bileşenleri $\sigma_z, \tau_{xz}, \gamma_{yz}$ sıfırdan farklı ve σ_z belirgin bir değerde olabilir. $\sigma_z, \varepsilon_z = 0$ şartının sağlanması durumunda düzlemdeki bileşenlerden doğrudan hesaplanabilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.60)$$

Aşağıdaki şekilde iki boyutlu modellenebilen problem görülmektedir.

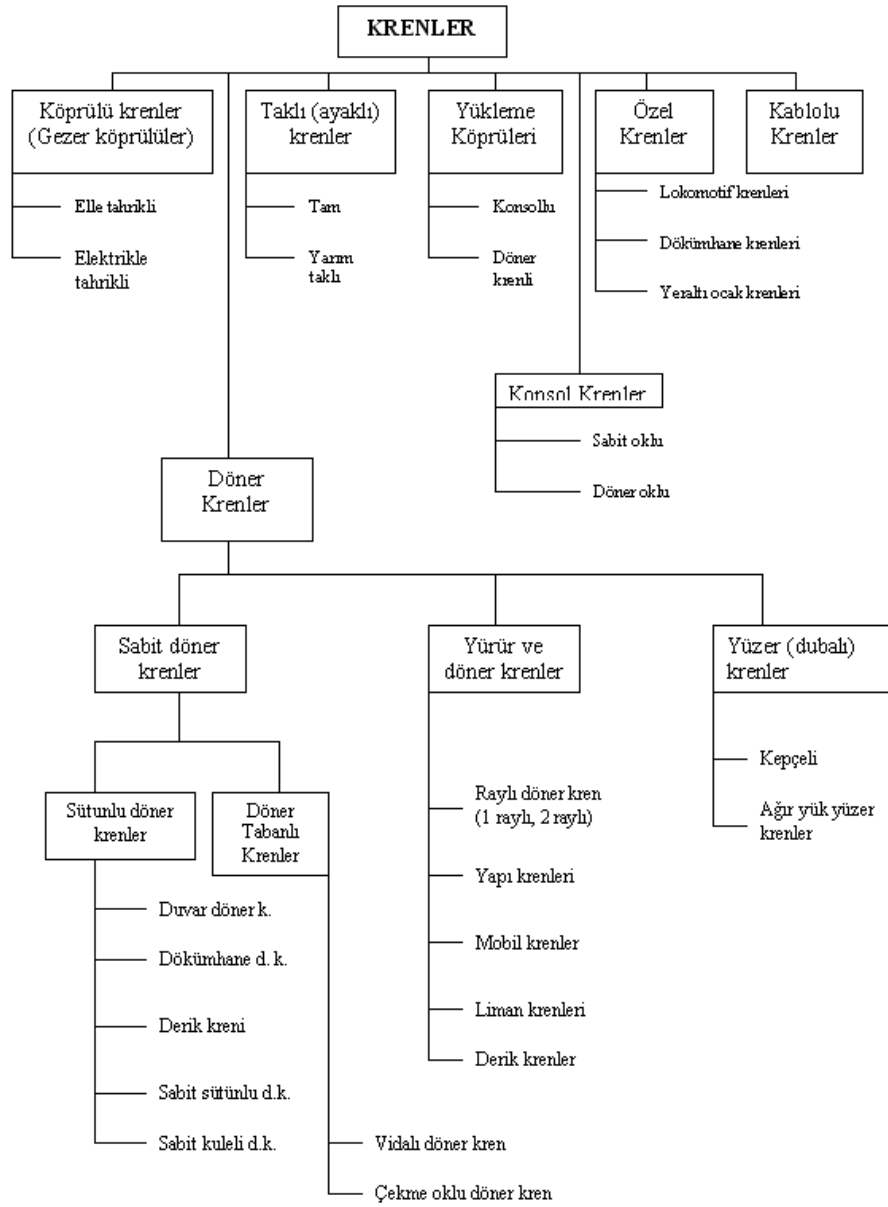


Şekil 3.14: Lamelli kanca (Düzlem gerilme hali)

4. KRENİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE MODELLENMESİ

4.1 Köprülü Kren Konstrüksiyonu

Krenler endüstride yüklerin kaldırılıp, indirilmesi veya bir yerden başka bir yere taşınması için kullanılırlar. Şekil 4.1’de krenler detaylı bir şekilde sınıflandırılmıştır [6].



Şekil 4.1: Krenlerin sınıflandırılması

Kaldırma makinaları ve parçalarının konstrüksiyonunda, sistemin kullanım süresince istenen performansta görevini yerine getirmesi dikkate alınması gereken en önemli özelliktir [6]. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak dizaynı yapılacak olan kaldırma makinasının ve parçalarının FEM (federation Europenne de la Manutention) standardına göre belirlenen çalışma grubu ve süresi belirlenmelidir. FEM standardına göre kaldırma makinalarının sınıflandırılması üç gruba göre yapılmıştır. Bunlar;

- Kaldırma makinası bütün olarak,
- Özel ekipman ve mekanizmalar bütün olarak,
- Yapısal ve mekanik parçalar.

Bu sınıflandırma yapılırken 2 kriter esas alınmıştır. Bunlar;

- Hesaba katılan parçaların toplam kullanım süresi
- Kanca yükü, yükleme veya herhangi bir parçadaki gerilim dağılımı

4.2 Kaldırma Makinalarının Sınıflandırılması

4.2.1 Sistem Sınıflandırması

Kaldırma makinaları bütün olarak A1, A2, ... A8'e kadar olan sembollerle 8 grup halinde, 10 adet kullanım süresine göre ve 4 adet de yük dağılımına göre sınıflandırılırlar.

4.2.2 Kullanım Sınıflandırılması

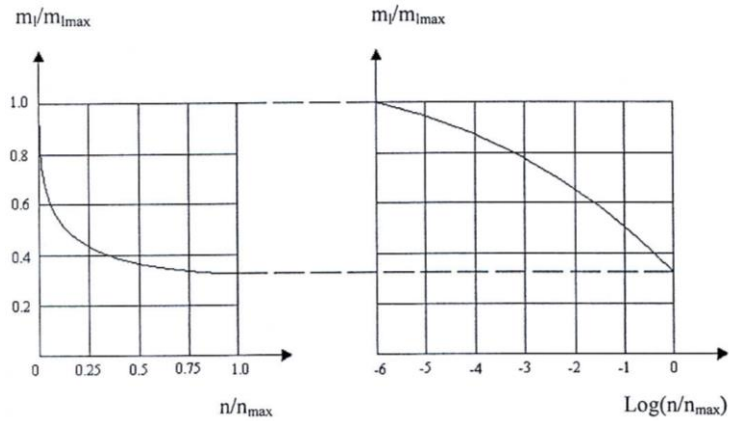
Kullanım sınıflandırılmasının anlamı, kaldırma makinasının çalışma süresi boyunca yapacağı kaldırma iş sayısıdır. Kaldırma işi bütün olarak bir dizi operasyonlar içerisinde gerçekleşir. Bunlar kaldırmanın başlaması, hareket yönü ve işlem sonudur [6].

Tablo 4.1: Krenler için toplam kullanım süresi

Sembol	Toplam Kullanım (n_{maks} ; maksimum kaldırma sayısı)
U0	$n_{maks} \leq 16000$
U1	$16000 \leq n_{maks} \leq 32000$
U2	$32000 \leq n_{maks} \leq 63000$
U3	$63000 \leq n_{maks} \leq 125000$
U4	$125000 \leq n_{maks} \leq 250000$
U5	$250000 \leq n_{maks} \leq 500000$
U6	$500000 \leq n_{maks} \leq 1000000$
U7	$1000000 \leq n_{maks} \leq 2000000$
U8	$2000000 \leq n_{maks} \leq 4000000$
U9	$4000000 \leq n_{maks}$

4.2.3 Yük Dağılımı

Yük dağılımı, kaldırma makinasının toplam kullanım süresince kaldırdığı yüklerin toplamı $y = f(x)$ dağılım fonksiyonu ile ifade edilir. Burada x ($0 \leq x \leq 1$) süresi ve y ($0 \leq y \leq 1$) aralığındaki Şekil 4.2’de yük dağılımı grafikleri görülmektedir. Burada y değeri kaldırılan emniyetli çalışma yükü oranını, x değeri ise toplam kullanım süresini belirtmektedir.

**Şekil 4.2:** Yük dağılım grafikleri

Burada;

m_1 : Yükleri,

m_{1maks} : Emniyetli çalışma yükü

n : Gerçek kaldırma sayısı

n_{maks} : Toplam kaldırma süresince toplanan kaldırma sayısı

Her bir dağılım, k_p dağılım faktörü ile hesaplanır. Burada k_p yaklaşık olarak;

$$k_p = (m_{11} / m_{1maks})^3 . n_1 / n_{maks} + (m_{12} / m_{1maks})^3 . n_2 / n_{maks} + ... + (m_{1r} / m_{1maks})^3 . n_r / n_{maks}$$

$$k_p = \sum (m_{1i} / m_{1maks})^3 . n_i / n_{maks}$$

olarak bulunur.

Yük dağılımına göre kaldırma makinası, Tablo 4.2’de görülen Q1,Q2,Q3 ve Q4 ile tanımlanan 4 dağılım sınıfından birine yerleştirilir [6].

Tablo 4.2: Yük dağılım faktörü tablosu

Sembol	Kp Yük Dağılım Faktörü
Q1	$k_p \leq 0.125$
Q2	$0.125 \leq k_p \leq 0.250$
Q3	$0.250 \leq k_p \leq 0.500$
Q4	$0.500 \leq k_p \leq 1.000$

4.2.4 Kaldırma Makinalarının Grup Sınıflandırması

Kaldırma makinaları Tablo 4.3’te gösterildiği gibi A1 ile A8 arasında 8 grup halinde sınıflandırılmıştır [6].

Tablo 4.3: Kaldırma makinalarının grup sınıflandırması

Yük Dağılım Sınıfı	Kullanım Sınıflandırması									
	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Q1	A1	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8
Q3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8
Q4	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8	A8

4.2.5 Kaldırma Makinalarının Sınıflandırılması

Tablo 4.4’de kaldırma makinalarının sınıflandırılması ile ilgili rehber bilgiler verilmiştir. Aynı tipteki kaldırma makinaları değişik yollarla kullanılabilirler, ancak ayırt etmek için bir gruplandırma yapmak gerekir. Bu gruplandırma yapılırken kaldırma makinasının tipi, yükleme grubu ve kaldırma tipi kriterleri dikkate alınmalıdır. Kaldırma makinalarının sınıflandırılmasında kullanılan ve kren tipine göre sınıflandırma Tablo 4.5’de görülmektedir.

Yapılan sınıflandırma belirlenen kaldırma makinası grubu ve bu gruba göre kaldırma şekli esas alınmıştır. Kaldırma şeklinin kancalı, tutucu veya magnet olması kaldırma makinasının grup sınıflandırmasını etkilemektedir.

Tablo 4.4: Kaldırma makinalarının sınıflandırılması için rehber tablo

Referans	Kren Tipi	Kaldırma Şekli	Vinç Grubu
1	El ile tahrik vinçler		A1-A2
2	Tahrikli krenler		A1-A2
3	Güç istasyonları ve atelyeler için tahrikli ve demontaj krenleri		A2-A4
4	Depolama ve hurda taşıyıcıları	Kancalı	A5
5	Depolama ve hurda taşıyıcıları	Tutucu veya magnet	A6-A8
6	Atelye krenleri		A3-A5
7	Gezer köprülü krenler	Tutucu veya magnet	A6-A8
8	Kepçeli krenler		A6-A8
9	Yer altı fırın köprüsü		A8
10	Kazıyıcı kren, fırın besleme kreni		A8
11	Demir ocağı krenleri		A6-A8
12.a	Yük boşaltma ve konteynırlar için köprülü krenler		A5-A6
12.b	Diğer köprü vinçleri		A4
13	Yük boşaltma için köprü krenleri		A6-A8
14	Havuz krenleri, tersane krenleri (yük boşaltmak için)		A3-A5
15	Dok vinçleri, yüzer veya sahil krenleri		A5-A6
16	Dok vinçleri, yüzer veya sahil krenleri		A6-A8
17	Ağır yükler için yüzer veya sahil krenleri		A2-A3
18	Güverte krenleri		A3-A4
19	Güverte krenleri		A4-A5
20	İnşaat için kule krenleri		A3-A4
21	Vinçler		A2-A3
22	Tren rayında çalışan raylı krenler		A4

4.2.6 Yükleme Tiplerinin Sınıflandırılması

Bir kaldırma makinasının konstrüksiyonunda ilk olarak yapılacak işlem DIN 15018 standardına göre yükleme tipinin belirlenmesidir [7]. Bunlar;

- Yüklemenin H (ana yük) hali
- Yüklemenin HZ (ana ve ek yükler) hali
- Yüklemenin HS (ana ve özel yükler) hali

4.2.7 Yüklemenin H (Ana Yük) Hali

DIN 15018 standardına göre yüklemenin H hali ‘ana yük’ anlamına gelen ‘Hauptlast’ kelimesinin ilk harfi olarak isimlendirilmiştir. Yapılan hesaplarda sadece ana yükten ileri gelen kuvvetler dikkate alınış ve hesaplar buna göre yapılmış demektir. Genel olarak ana yük, işletmede vince ait olan sabit ve hareketli parçalar ile yükün kaldırılması için gerekli elemanların kütleleridir. Bu kütle değerleri yerçekimi ivmesi, ‘kaldırma yükü katsayısı ψ ve yükseltme katsayısı γ ile çarpılarak büyütülürler [7].

Ana yük denilince anlaşılması gereken kısımlar ve kuvvetler;

- Kaldırma makinasının öz ağırlığının kuvveti (Kiriş, araba, kanca, travers, elik, halatlar, kepçe ve magnetler ... vb.)
- Kaldırma yükü kuvveti
- Tahrik ivmesi ve frenlemesinden kaynaklanan kütle kuvvetleri
- Yük darbeleri sonucu oluşan kuvvet
- Platform z ağırlığından ileri gelen kuvvet

4.2.8 Yüklemenin HZ (Ana ve Ek Yükler) Hali

DIN 15018 standardına göre yüklemenin HZ hali ‘ana ve ek’ yükler anlamına gelen ‘Haupt und Zusatzlasten’ ifadesinin ilk harfleri olarak isimlendirilmiştir. Yani yapılan hesaplarda ana yükten ileri gelen kuvvetlerin yanında ek yüklerde dikkate alınmış ve hesaplar bunlarla yapılmış demektir [7].

Ek yük denilince anlaşılması gereken kuvvetler;

- Rüzgar kuvveti
- Kasılmadan ve çarpık hareketlerden ileri gelen kuvvetler
- Isıdan ileri gelen kuvvetler
- Kar yükünden ileri gelen kuvvetler
- Merdivenler, raflar ve korkulukların yük ağırlığından ileri gelen kuvvetler

4.2.9 Yüklemenin HS (Ana ve Özel Yükler) Hali

DIN 15018 standardına göre yüklemenin HS hali ‘ana ve özel’ yükleme anlamına gelen ‘Haupt und Sonderlasten’ ifadesinin ilk harfleri olarak isimlendirilmiştir. Yani yapılan hesaplarda ana yükten ileri gelen kuvvetlerin yanında özel yüklerde dikkate alınmış ve hesaplar bunlarla yapılmış demektir [7].

Özel yük denilince anlaşılması gereken kuvvetler;

- Kaldırma makinasının işletmeye kullanılan kontrol yüklerinden ileri gelen kuvvetler
- Tampon kuvvetleri
- İki araba veya vinç beraberce bir rayda çalışıyorlarsa, bunların çarpışma kuvveti

4.2.10 Yükseltme Katsayısının ‘ γ ’ Seçilmesi

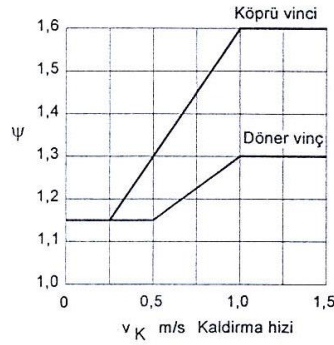
Kaldırma makinasının çalışma tipine göre FEM ve DIN standartlarına uygun olarak çeşitli tablolar oluşturulmuştur. Yükseltme katsayısının kaldırma grubuna göre seçimi Tablo 4.5’de görülmektedir [7].

Tablo 4.5: Kaldırma grubuna göre yükseltme katsayısı

Kaldırma grubu	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Yükseltme katsayısı (γ_c)	1.00	1.02	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17	1.20

4.2.11 Kaldırma Yüğü Katsayısının ‘ ψ ’ Seçilmesi

Kaldırma yüğü katsayısı kaldırma makinasının (kren veya vincin) kaldırma hızıyla ilgili tayin edilmiş bir katsayıdır. Kaldırma yüğü katsayısı ‘ ψ ’ 1.15 değerinden daha küçük seçilemez. Şekil 4.6’de kaldırma yüğü katsayısının kaldırma hızına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 4.3: Kaldırma yüğü katsayısı

4.3 Krenin Üç Boyutlu İskelet Modeli

Kren sistemi, genel bir yer değiştirme ve gerilme kontrolünün çabuk ve hızlı yapılabilmesi için 6 serbestlik derecesine haiz düğüm noktalarından oluşan 3 boyutlu iskelet elemanlarla modellenmiş ve idealleştirilmiştir. Krenin geometrik karakteristiği ve onu oluşturan çok çeşitli eleman tipinden ötürü yapı, planlanmış geometrik yerleşimin temel prensiplerine dayanılarak modellenmiş hazırlanmıştır. Kren sistemindeki her bir elemanın geometrik ve atalet ilgili özelliklerinden dolayı bir bütün olarak düşünülmüş ve o şekilde analizi yapılmıştır. Krenin dayanak yerlerinden ikisi mafsallı olarak düşünülmüş, diğer dayanaklar ise krenin ray üstünde kaydığı ekseninde serbest olarak hareketine izin verilmiştir. Yüğü arabası ve yüğü hareketli yükler olarak ele alınmıştır. Hareketli yüklerin analizi, geniş I profilli putrel boyunca hareket eden yükten dolayı herhangi bir eylemin değeri izlenerek yapılmıştır. Tüm kren sistemi, 3 boyutlu iskelet modeline göre yapılmış analizinden elde edilen yer değiştirme ve gerilme değeri elde edildikten sonra 2 boyutlu kabuk elemanlarla tekrar modellenmiş, komple bir analiz koşturulmuş ve sonuçları elde edilmiştir .

4.3.1 Üç Boyutlu Çerçeve Elemanlar

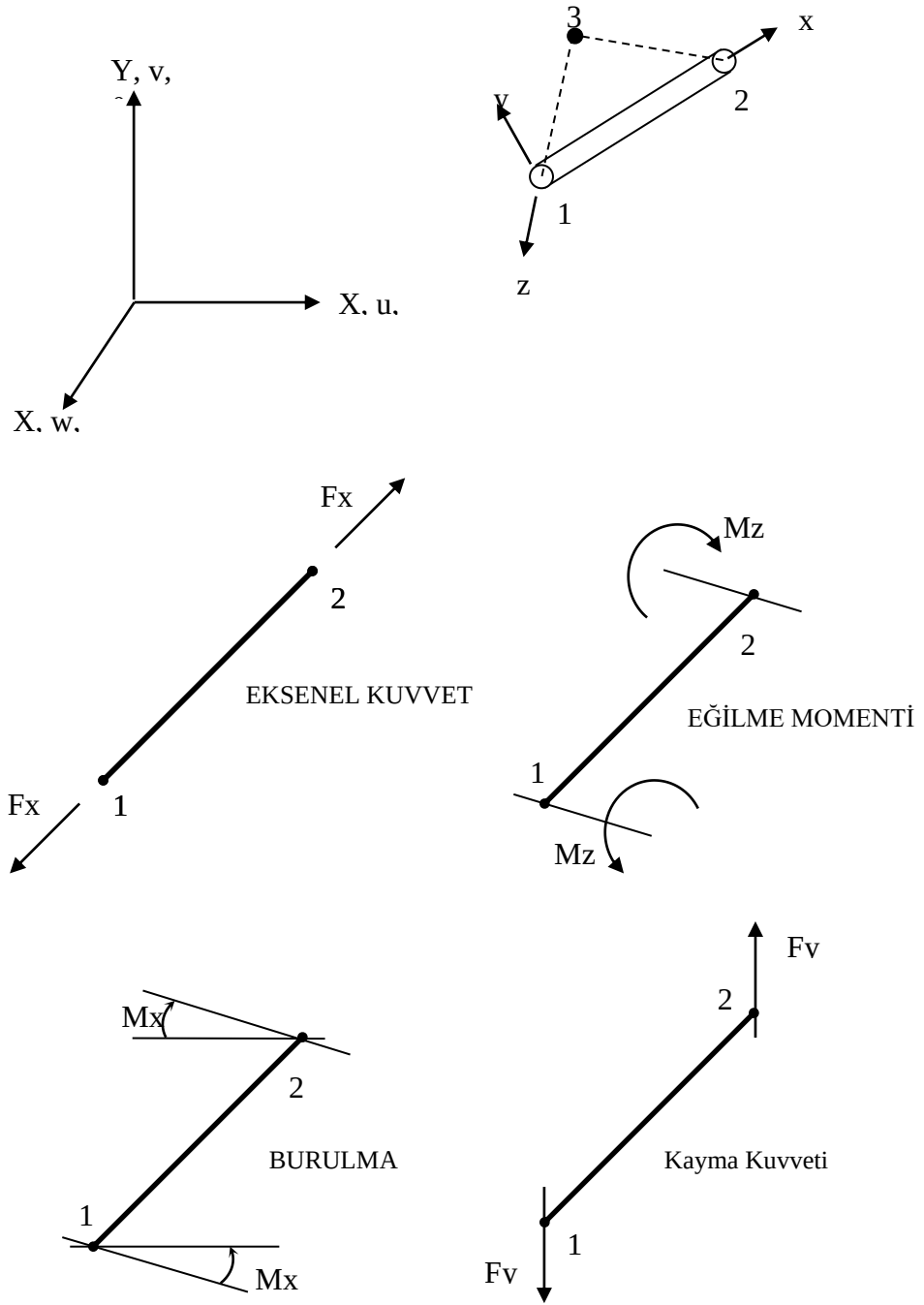
3 Boyutlu iskelet elemanlar, iki düğüm noktasından oluşan prizmatik lineer eleman olup, 3 boyutlu kiriş-sütun formülasyonuna dayanmaktadır. 12 serbestlik derecesine haiz bu elemanlar, kesitindeki düzlemde, iki temel eksendeki eksenel kuvvetlere, kesme kuvvetlerine, eğilme momentine ve boyuna eksendeki bükülme momentine de dayanıklılık gösterir. Kiriş-sütun elemanlarının malzeme özellikleri ise elastik modül (E) ve kesme modülüdür (G). Malzemelerin geometrik özellikleri ise lokal olarak kesit alanı A_x , kesme alanı A_y , A_z , atalet momentleri I_{yy} , I_{zz} ve burulma momenti J_r 'dir. İskelet elemanlar için kullanılan lokal koordinat sistemleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şayet I_{yy} , I_{zz} ve $J_r = 0$ ise eleman bozularak **kiriş** elemana dönüşür.

Elemana yerel koordinat sisteminde uygulanan lokal kuvvetler aşağıdaki gibidir [8]:

- F_x : Eksenel Kuvvet (kN)
 F_y : Y-yönündeki kesme kuvveti (kN)
 F_z : Z-yönündeki kesme kuvveti (kN)
 M_x : Burulma (kN.m)
 M_y : xy-düzlemindeki moment (kN.m)
 M_z : yz-düzlemindeki moment (kN.m)

Tablo 4.6: Kiriş Eleman İşaret Dağılımı

Kiriş Elemanın İşaret Eğilimi		
Eksenel Kuvvet	(pozitif)	Eksenel Çeki
	(negatif)	Eksenel Bası
Eğilme Momenti	(pozitif)	Yatıklık momenti
	(negatif)	Sarkıklık momenti
Burulma	(pozitif)	Saat yönü tersi (1. düğüm noktası), Saat yönü (3. düğüm noktası)
	(negatif)	Saat yönü (1. düğüm noktası), saat yönü tersi (3. düğüm noktası)



Şekil 4.4: Altı serbestlik derecesine haiz üç boyutlu iskelet eleman

4.3.2 Üç Boyutlu Elemanların Özellikleri

Her ne kadar CHEXA ve CPENTA katı elemanları ince kabuk elemanları kadar iyi sonuç versin diye tasarlanmış olsalar da katı elemanların bu kapasitede kullanılmaları

pek tavsiye edilmez. Yüksek oranda uzama rijitliği enine kayma rijitliğine elemanın normalı yönünde etki ederek oldukça yüksek yuvarlama hataları üretir.

Tabaka elemanlarında eğer orta taraf düğüm noktaları katı elemanı temsil etmek için kullanılmışlarsa bu düğüm noktaları köşenin orta noktasına mümkün olduğunca yakın yerleştirilmelidir. Yine eğer orta taraf düğüm noktaları isteniyorsa genel tavsiye bir kısmının değil de tümünün alınmasıdır. En iyi sonucu elde etmek için uygun eleman tipinin ve eleman sayısının seçimi kullanıcının kendi sorumluluğundadır. Şayet iki boyutlu tabaka yapısını modellemek için tek boyutlu elemanlar kullanırsanız oldukça kötü sonuçlar elde edersiniz.

Diğer yandan aynı tabaka yapısını modellemek için iki boyutlu elemanlar seçerseniz sonuçlar gözle görünür biçimde iyileşecektir. Bu tercih mühendislik yeteneği gerektirir. Çok sayıda elemandan oluşan kullanımı kolay bir pre-prosesör ile oluşturulmuş iyi gibi gözüken bir model belki de analiz için oldukça kötü bir modeldir. Günümüzün post- prosesörleri bu problemi ele alıp, en anlamsız sonuçları bile oldukça ikna edici bir şekilde sunabilirler [8].

4.3.3 Üç Boyutlu Elemanların Kullanılma Yerleri

Yük altındaki kiriş veya tabaka gibi davranmayan, bir başka deyişle kiriş veya kabuk eleman olarak modellenemeyen bir yapıyı modellemek istediğinizde bir ya da daha fazla üç boyutlu elemana ihtiyaç duyarsınız. 3 boyutlu elemanlar genellikle katı elemanlar olarak adlandırılır. Motor blokları, braketler ve dişliler katı eleman modellemesine örnek teşkil eder.

Msc.Nastran'da kullanılan katı eleman tipleri aşağıdaki gibidir.

- CHEXA, CPENTA ve CTETRA: genel amaçlı katı elemanlardır. Bu katı model ailesi birçok katı model uygulamalarında tavsiye edilir.
- CTRIAX6: Dönme elemanının eksenel - simetrik katısıdır. Bu eleman eksenel simetrik analizlerde kullanılır.
- CRAC3D: Çatlaktan ötürü süreksizliğe sahip katıları modellemede kullanılan bir elemandır [8].

Kren modelinin tümünde halatlar da dahil olmak üzere 2 boyutlu kabuk elemanlar kullanılmıştır. Bu analizde 3 boyutlu iskelet eleman yoktur.

4.4 Dörtgen Kabuk Elemanları

Dörtgen kabuk elemanları, her bir düğüm noktasında 6 serbestlik derecesine haiz, modellemede yüksek performans veren yapı elemanlardır. Bu elemanlar aynı zamanda membran ve bükülmeye ait deformasyonları da göz önünde bulundururlar. Kabuk eleman formülasyonları, membran matrislerinin standart izoparametrik yaklaşımına, bükülgen matrislerin de izofleks yaklaşımına dayanarak oluşturulur. İnce tabaka teorisine dayanarak, enine kesme deformasyonları bu formülasyonun dışında kalmıştır. Her bir element için ortalama kalınlık değeri belirlenmiş nodal kalınlıktan elde edilir. Elemanlar lokal element eksenlerine göre formüle edildiği için yönsel malzeme özellikleri eleman oryantasyonuna bağlı olarak tayin edilebilir. Elemanlar saat yönünün tersine olacak şekilde 3 veya 4 düğüm noktasından oluşur. Her bir düğüm noktasını U, V, W, θ_x , θ_y , θ_z olmak üzere 6 serbestlik derecesine haizdir [8].

Kabuk elemanlar için kullanılan yerel koordinat sistemi Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

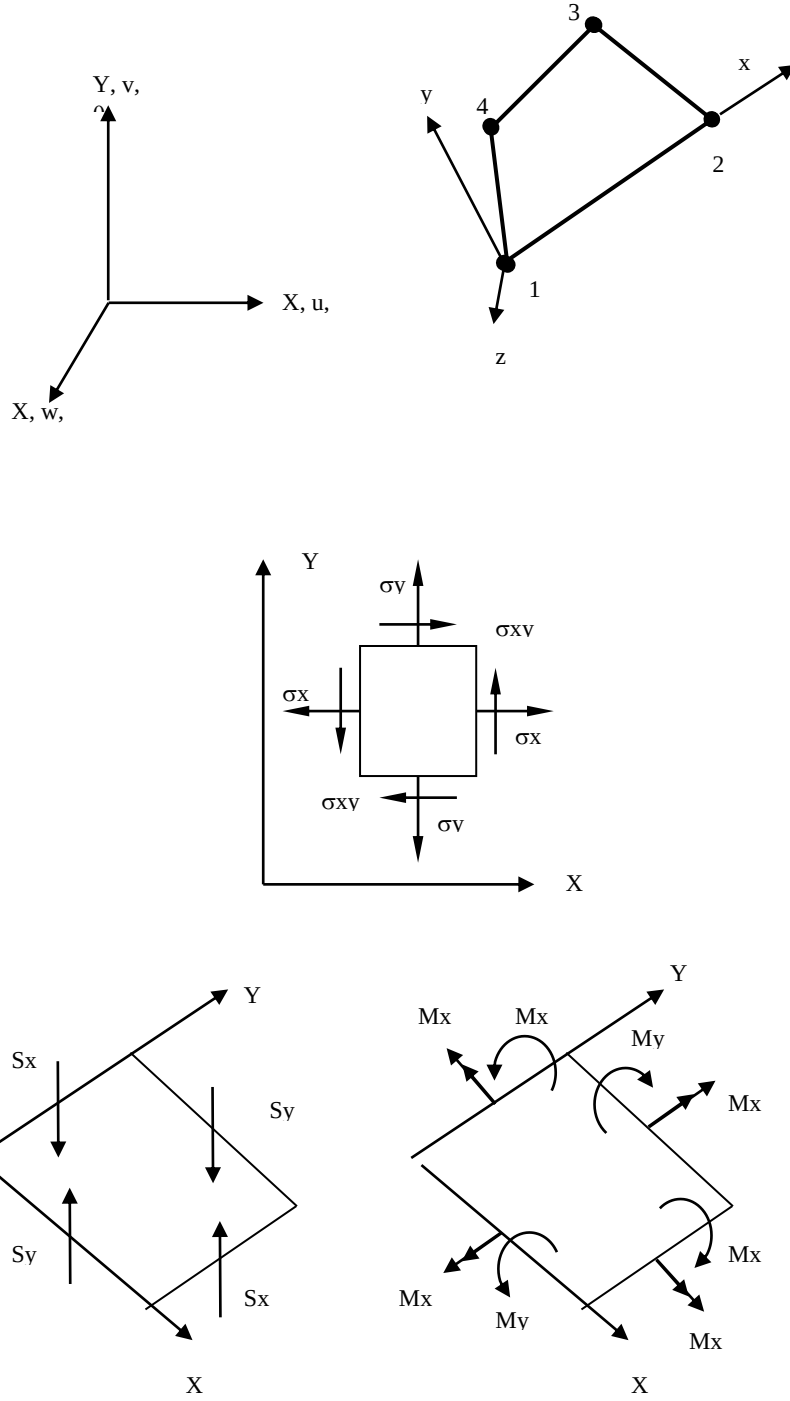
Eleman çıkış gerilimi aşağıdaki gibidir:

- Membran hareketinden dolayı oluşan gerilmeler
- Eğilme hareketinden dolayı üst yüzeyde oluşan gerilmeler
- Eğilme ve membran hareketinden dolayı üst yüzeyde oluşan gerilmeler
- Eğilme ve membran hareketinden dolayı alt yüzeyde oluşan gerilmeler

Analizde kullanılan kabuk elemanlar için işaret dağılımı aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Tablo 4.7: Kabuk elemanlar için işaret dağılımı

Kabuk elemanın işaret dağılımı		
Direkt Gerilme	(pozitif)	Çeki
	(negatif)	Bası
Kesme Gerilmesi	(pozitif)	xy, yz ve zx kadrantlarındaki kesme
	(negatif)	xy, yz ve zx kadrantlarındaki kesme
Direkt Gerilme	(pozitif)	Çeki
	(negatif)	Bası
Bükülgen Gerilme	(pozitif)	Hogging moment (eleman üst yüzeyinde pozitif gerilme yaratır)
	(negatif)	Sagging moment (eleman üst yüzeyinde negatif gerilme yaratır)

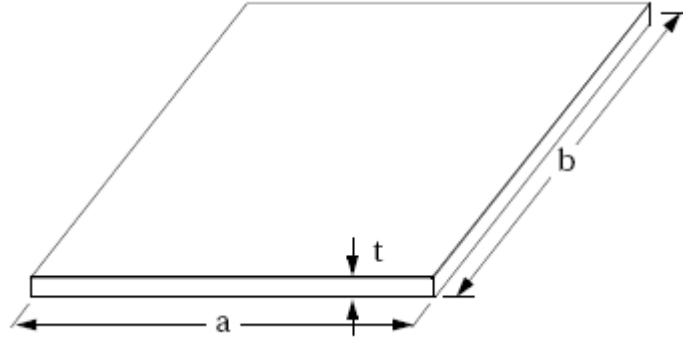


Şekil 4.5: Her bir düğüm noktasındaki 6 serbestlik dereceli kabuk eleman

4.4.1 Dörtgen Kabuk Elemanlarının Özellikleri

İki boyutlu elemanlar tabaka ve kabuk elemanları olarak bilinirler, bunlar üç boyutlu bir elemanın bir boyutunun diğer iki boyutuna nazaran oldukça küçük olması nedeniyle küçük olan alanın kalınlık olarak göstererek iki boyutlu olarak modellenir.

Şekil 4.6’de kalınlığın t diğer iki boyuta a ve b ’ye nazaran ne kadar küçük olduğu gösterilmektedir.



Şekil 4.6: İki boyutlu tabaka elemanın boyutlandırılması

Sonlu elemanlarda iki boyutlu elemanların membran rijitliği, düzlem gerilimi (plane stress) veya düzlem şekil değişimi (plane strain) teorilerinden birini kullanarak hesaplanabilir. Tabaka uzunluk değişimi teorisinde t kalınlığı boyunca, uzama değişiminin sabit olması esasına dayanır. İki boyutlu bir eleman düzlem gerilimi veya düzlem şekil değişimi biri olabilir.

MSC.Nastran’da düzlem gerilim elemanları ön değer olarak kullanılmaktadır. Bu iki formülasyon, düzlem gerilme ve düzlem şekil değişirme problemlerin kısımlara ayrılmasında kullanılır. Şayet düzlem gerilme ve düzlem şekil değişirme teorilerine aşına değilseniz muhtemelen düzlem gerilme formülasyonunu kullanmaya ihtiyacınız vardır. Alüminyum ve çelik gibi genel mühendislik malzemelerinden üretilen çoğu ince yapılar, düzlem gerilimi kullanılarak efektif olarak modellenebilir. Bir başka deyişle başka bir sebebiniz olmadıkça muhakkak düzlem gerilimi formülasyonunu kullanınız. Aşağıda MSC.Nastran’da kullanılan iki boyutlu elemanlar verilmiştir.

- CSHEAR: Kesme panel elemanıdır. Eleman sadece düzlem içindeki kesme kuvvetlerini iletir.
- CQUAD4, CTRIA3: Genel amaçlı tabaka elemanları olup düzlem içi kuvvetleri, eğilme kuvvetlerini ve enine kesme kuvvetlerini iletebilirler. Bu eleman ailesi MSC.Nastran eleman kütüphanesinde en yaygın olarak kullanılan iki boyutlu elemanlardır.

- CQUAD8, CTRIA6: Daha yüksek mertebeden elemanlar olup eğimli yüzeylerin daha az eleman kullanılarak modellenmesinde CQUAD4 ve CTRIA3'e nazaran daha kullanışlılardır. Genelde CQUAD4 ve CTRIA3 elemanları CQUAD8 ve CTRIA6'e nazaran daha fazla tercih edilirler.
- CQUADR, CTRIAR: Bu iki boyutlu eleman ailesi CQUAD4, CTRIA3 elemanlarını tamamlayıcıdır.
- CRAC2D: Bu eleman çatlak oluşumundan ötürü süreksiz yüzeylerin modellenmesinde kullanılır [8].

4.5 Bir İki Ve Üç Boyutlu Elemanların Karşılaştırması

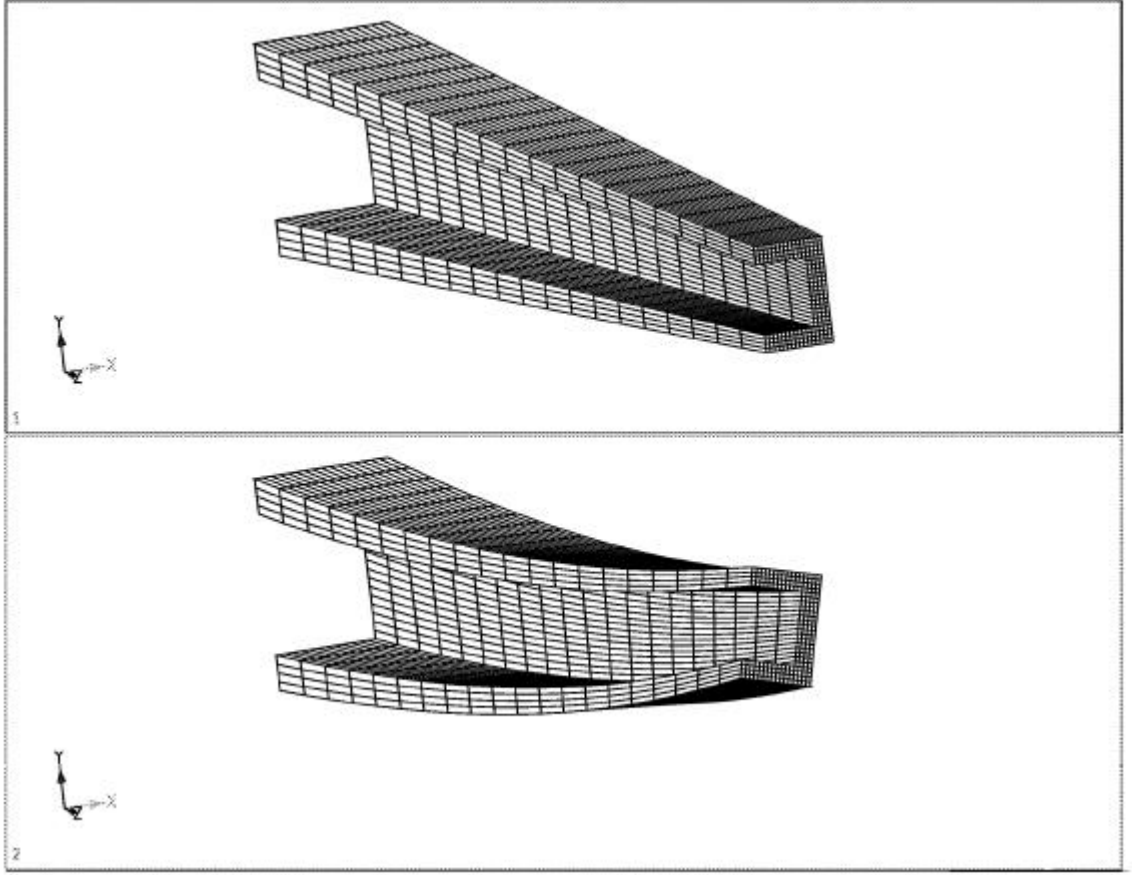
Modelleme tekniği konusunda hangi eleman tipinin ne gibi durumlarda kullanıldığını yani daha verimli sonuçlar verdiğini anlamak için aşağıdaki örnek konik kiriş modellemesi incelenmiştir.

4.5.1 Örnek Konik Kiriş Karşılaştırması

Örnek konik kiriş 3 farklı şekilde modellenip (Şekil 4.7) sonuçları karşılaştırılmıştır (Tablo.8).

Tablo 4.8: Kiriş, tabak ve katı eleman modellerinin konik kiriş için karşılaştırılması

Eleman Tipi	Eleman Sayısı	Serbestlik Derecesi	Serbest uçta Y'de Yer Değiştirmesi [$\times 10^{-2}$ mm]	Serbest uçta $\theta_z \times 10^3$ radyan	Maksimum Normal Gerilme [MPa]
CBEAM	1	14	1.02	1.36	4,20
CQUAD4	960	6174	0.99	0.67	4,89
CHEXA	3840	15435	1.08	0.97	4,29

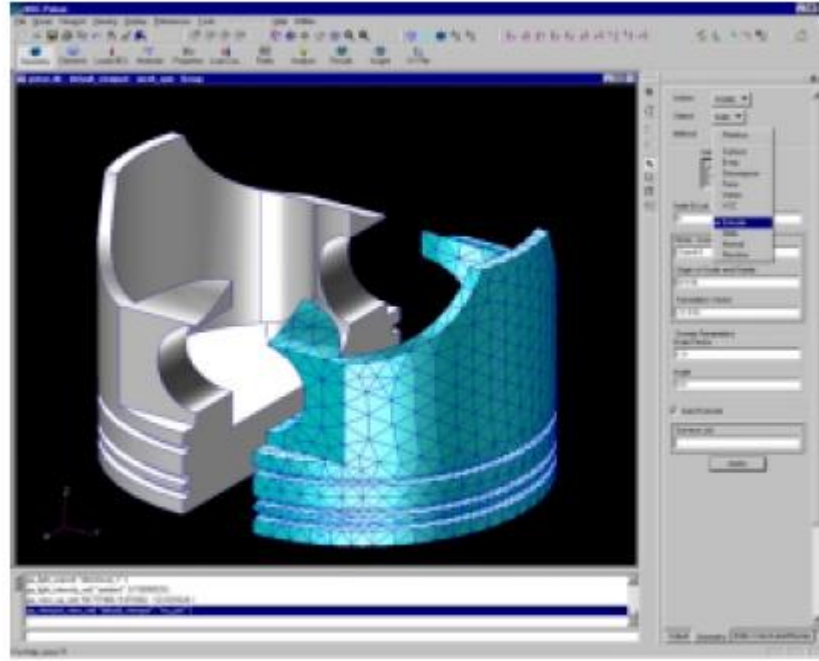


Şekil 4.7: Konik kirişin katı haldeki sonlu elemanlar modeli

14 serbestlik derecesine sahip bir boyutlu tek kiriş eleman, 15435 serbestlik derecesine sahip katı modelle yakın sonuçlar veriyor. CQUAD4 kabuk elemanı ise eksiksiz olmasına karşın, bu tip yapılarda tabaka elemanın kullanılması doğru değildir. Çünkü flanşlar ve kiriş gövdesi oldukça kalın ve kabuk eleman gibi davranmamaktadır [8].

4.6 Kullanılan Analiz Programları Hakkında Bilgilendirme

4.6.1 Msc.Patran/Nastran



Şekil 4.8: Analizde kullanılan sonlu elemanlar modelleme programının arayüzü

Msc.Patran, mühendislik analiz sonuçlarına interaktif, 3 boyutlu ve görsel erişim sağlayan genel amaçlı bilgisayar destekli mühendislik çözümüdür. Msc.Patran'ın basit arayüzü, CAD erişim araçları ve kapsamlı uyarlanabilir yetenekleri sayesinde, eksiksiz, endüstri standartlarını sağlamış simülasyon ortamı mevcuttur [9].

4.6.2 Faydaları

- Fiziksel denemelerin yerine daha az ucuz dijital simülasyonlar sunarak maliyeti düşürür.
- Modelleme ortamını standardize ederek, çok yönlü çözücü teknolojilere erişim sağlar.
- Modelleme ortamını ihtiyaca göre düzenleyerek, simülasyon proseslerini uygun hale getirir [9].

4.6.3 Uygulama Alanları

- Uzay Bilimleri
- Otomotiv Sanayi
- Gemi Sanayi
- Tıbbi Ürünler
- Tüketici Ürünleri

4.7 Kreni Oluşturan Elemanların Malzeme Özellikleri

Tüm kren elemanları aşağıdaki tablolarda özellikleri verilen çelik malzemeden imal edilmiştir;

Tablo 4.9: Elastik malzeme özellikleri

Kren Parçası	Elastisite Modülü, E, [kN/m ²]	Poisson Oranı [v]
Tüm çelik yapı	210*10 ⁶	0.3

Tablo 4.10: Mukavemet özellikleri

Kren Parçası	Öz ağırlığı, ρ [Ton/m ³]	Elastik Limit σ [kg/cm ²]
Tüm Çelik Yapı	8.1	2600

4.8 Standartlar ve Spesifikasyonlar

Kren, aşağıdaki uluslararası standart enstitülerinin standartları ve yönergeleri doğrultusunda tasarlanmıştır.

- Kren Tasarım Spesifikasyonları: Federation European De La Manutention (FEM)
- Kren Tasarım Spesifikasyonları : British Standards Institution (BSI)

- Uluslararası Standartlar - Kren ve kaldırma cihazları (ISO4301)
- Uluslararası Standartlar - Hareketli büyük transport teçhizatları için Yapı, Mekanizma tasarım spesifikasyonları (ISO5049)

4.9 Analiz Üzerine Genel Varsayımlar

Kren, çalışır ve çalışmaz durumda maksimum yük altında kendi mukavemet ve stabilitesi bu yüke dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yükler sırasıyla krenin hareketsiz ağırlığı, yürütülen yükün ağırlığı, harekete karşı gösterilen direnç, dinamik etkiler ve rüzgar yükü olmak üzere 5 çeşittir.

Tasarım, belirtilen standartlar altında çeşitli büyüklüklerin (gerilmeler, kuvvetler, momentler ve servis ömrü) hesaplanmış değerlerinin bir karşılaştırmasını içerir. Mukavemet ve stabilite için yapılan tasarım, çeşitli yük koşulları altında, yürütülen yükün en az uygun olanak veren durumları için, belirtildiği üzere analiz yapılarak gerçekleştirilmiştir.

4.10 Kren Sisteminin Sınıflandırılması

Krenin genel karakteristik özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Kren Tipi : Liman Vinci

1- Kaldırma Sistemi

Kaldırma Kapasitesi : 400 ton

Kaldırma Yüksekliği : 56 m

Kaldırma Hızı : 7.0 m/d

2- Liman Vinci Hareket Sistemi

Elektrik Motoru

- İlk durum : 750 d/d
- Son durum : 3000 d/d

Hareket Hızı

- İlk durum : 4.5 m/d
- Son durum : 18.0 m/d

3- Tambur Hareket Sistemi

Elektrik Motoru

- İlk durum: 750 d/d
- Son durum: 3000 d/d

Hareket Hızı

- İlk durum: 8.0 m/d
- Son durum: 30.0 m/d

4.11 Data Dosyaları

Modele ait data dosyaları oldukça büyük boyutlarda olup, burada tamamının gösterilmesi imkansızdır. Genel dosya formatını anlamak için data dosyasının küçük bir bölümü burada gösterilecektir.

```
PROBLEM TITLE SEDEF TERSANESI 400 TON CRANE
OPTION      2   48   61  117  118  123  146  157  235  250  253  278
82
```

```
BMS3 ELEMENT TOPOLOGY
      1      2      5  42559
      2      5      6  42560
      3      6      4  42561
      4      1     12  42556

      5     12     13  42557
      6     13     10  42558
     19     60     70  42562
     20     70     71  42563
     21     71     68  42564
     31     10     93  42565
     32     93     94  42566
     33     94     92  42567
     34      4    100  42568

      ...      ...      ...
      ...      ...      ...
      ...      ...      ...

    3970  10128  10297  43155
    3973  10141  10307  43156
    3975  10148  10312  43157
    3979  10162  10323  43159
```

3980	10164	10325	43158
3985	10177	10335	43160
3990	10188	10343	43161
4010	10325	10395	43166
4015	10335	10405	43168
4039	10393	10463	43175
4040	10395	10465	43174
4057	10431	10501	43178
4060	10437	10219	43179
4063	10447	10231	43180
4065	10452	10235	43181
...	...	...	
...	...	...	
...	...	...	
6262	15016	15203	43665
6263	15203	15204	43666
6264	15204	15127	43667
6283	15133	15241	43671
6284	15241	15242	43672
6285	15242	15240	43673
6286	15127	15248	43668

LOAD CASE 61

PDSP 6

37687	0	0	.01*164/63	0	0	0	0	0
37688	0	0	.01*164/63	0	0	0	0	0
37697	0	0	.01*164/63	0	0	0	0	0
37698	0	0	.01*164/63	0	0	0	0	0
37707	0	0	.01*164/63	0	0	0	0	0
37725	0	0	.01*164/63	0	0	0	0	0
37743	0	0	.01*164/63	0	0	0	0	0
37761	0	0	.01*164/63	0	0	0	0	0
39269	0	0	-.01*164/63	0	0	0	0	0
39270	0	0	-.01*164/63	0	0	0	0	0
39279	0	0	-.01*164/63	0	0	0	0	0
39280	0	0	-.01*164/63	0	0	0	0	0
39289	0	0	-.01*164/63	0	0	0	0	0
39307	0	0	-.01*164/63	0	0	0	0	0
39325	0	0	-.01*164/63	0	0	0	0	0
39343	0	0	-.01*164/63	0	0	0	0	0
42209	0	0	-.01*196/43	0	0	0	0	0
42210	0	0	-.01*196/43	0	0	0	0	0
42219	0	0	-.01*196/43	0	0	0	0	0
42220	0	0	-.01*196/43	0	0	0	0	0
42229	0	0	-.01*196/43	0	0	0	0	0
42247	0	0	-.01*196/43	0	0	0	0	0
42265	0	0	-.01*196/43	0	0	0	0	0
42378	0	0	-.01*196/43	0	0	0	0	0

ELEMENT OUTPUT

1	17969	1	0
---	-------	---	---

NODE OUTPUT

1	45155	1	0
---	-------	---	---

PLOT FILE

END

4.12 Kren Sisteminin Sonlu Elemanlarla Modelinde Kullanılan Eleman Tipleri

Daha doğru sonuçlar elde etmek için, krenin yapısal elemanları kabuk ve kiriş (2 boyutlu ve tek boyutlu) elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu model statik, dinamik ve doğal frekans analizlerini yapmak amacıyla kullanılabilir. Krenin geometrik karakteristikleri ve çeşitli eleman tipleri, krenin planlanmış geometrik yerleşim temeli göz önüne alınarak modellenmiş ve hesaplanmıştır. Krenin destek uçları ise basit kirişler olarak değerlendirilmiştir. Bu uçlar çoğunlukla tekerleklerin zemin ile temas yüzeyi olarak alınmıştır. Sonlu elemanlar modelinin nümerik özellikleri Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11: Modelde kullanılan elemanlar

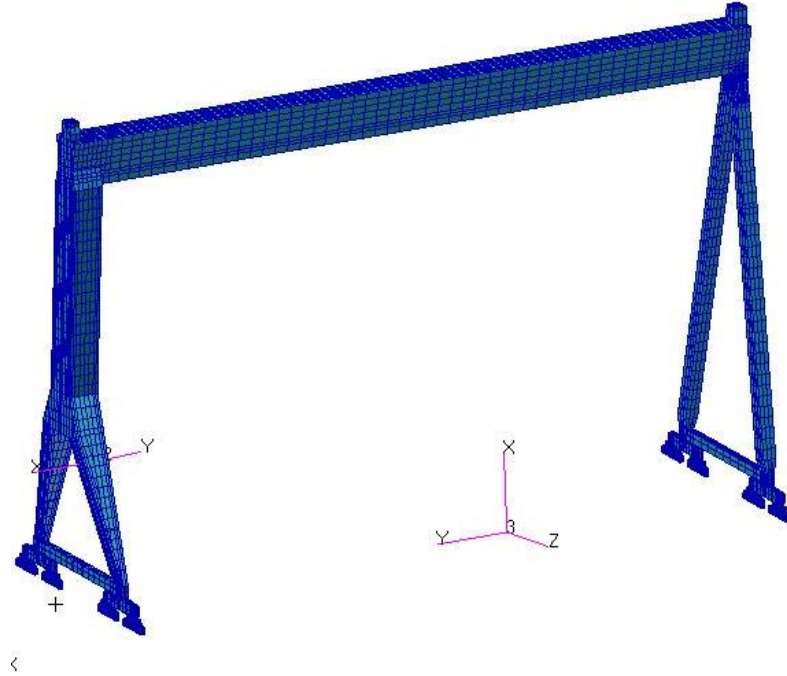
Modelde Kullanılan Elemanlar	Adedi
Düğüm Noktası	26126
Eleman Tipi	32
1. Tek Boyutlu (Doğrusal) - Kiriş	
2. İki Boyutlu (Kabuk) - Üçgensel - Dörtgensel	27187
Malzeme Türleri	
- Çelik	20
Eleman Özellik Grupları	157
Grup (Kren komponentleri)	70
Serbestlik Derecesi	156653

4.13 Modelin Genel Görünümleri

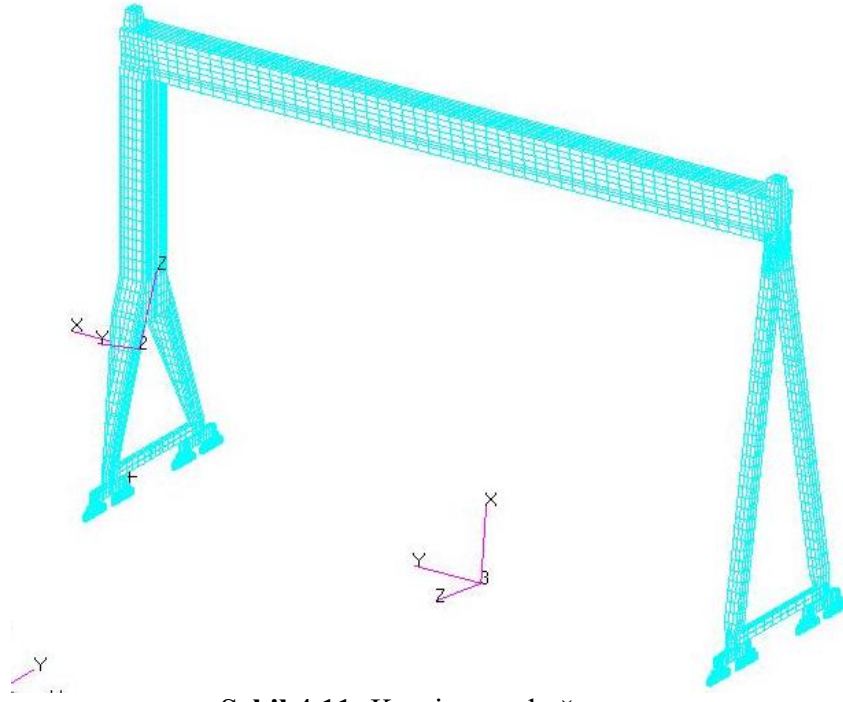
Krenin üç boyutlu modelinin farklı görünüşleri aşağıda gösterilmiştir.



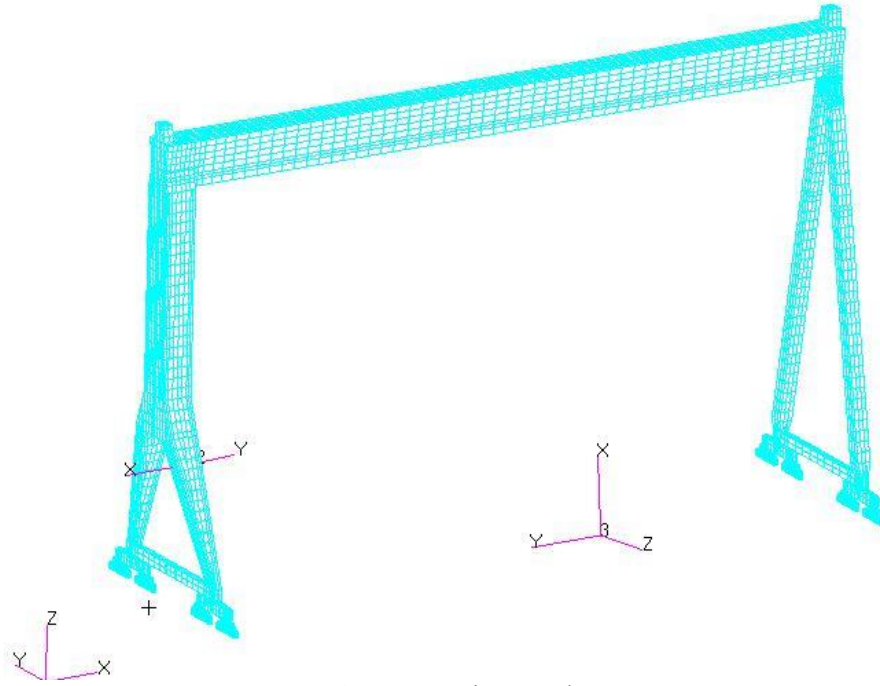
Şekil 4.9: Krenin genel ağ yapısı
katı modelinin izoparametrik görünüşü -1



Şekil 4.10: Krenin genel ağ yapısı
katı modelinin izoparametrik görünüşü -2



Şekil 4.11: Krenin genel ağ yapısı
kabuk halinin izoparametrik görünüşü -1

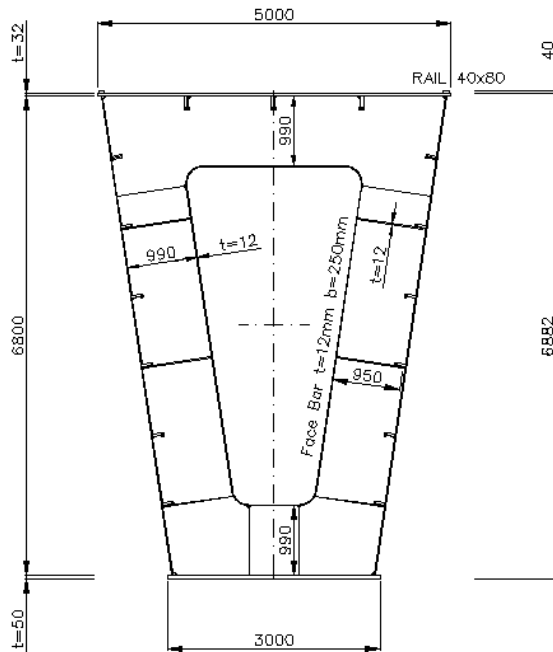


Şekil 4.12: Krenin genel ağ yapısı
kabuk halinin izoparametrik görünüşü -2

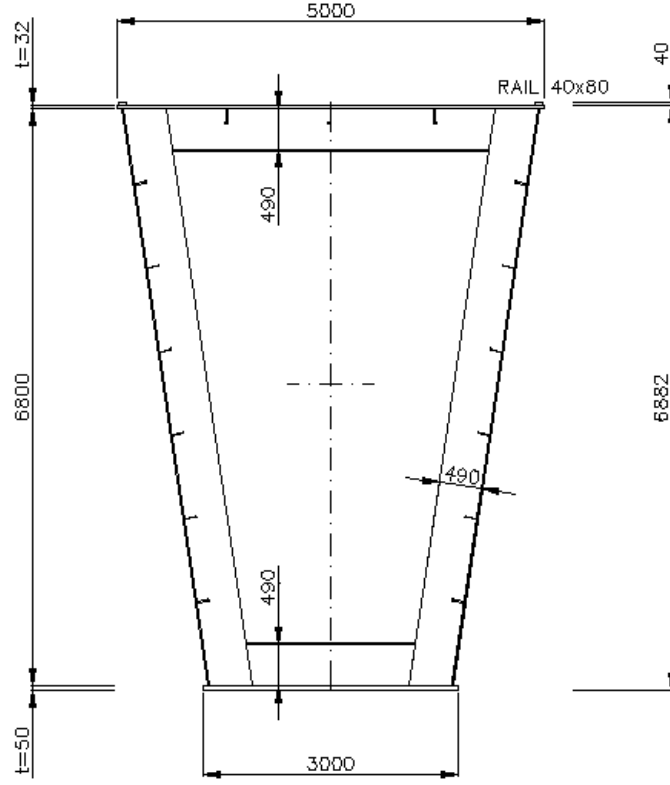
Tablo 5.1: Ana I-profilli putrelin fiziksel özellikleri

Bölgeler (mm)		
Alan		: 559 706.62
Çevre Uzunluğu		: 48 618.46
Bounding box	X	: 0.00
	Y	: -257.02
Kitle Merkezi	X	: -0.01
	Y	: 0.00
Atalet Momentleri	X	: 4 659 779 485 812.44
	Y	: 1 391 840 197 379.58
Atalet çarpımı	XY	: -21 241 264.02
Dönme yarıçapı	X	: 2 885.38
	Y	: 1 576.94
Kitle Merkezi civarındaki ana moment ve X-Y yönleri		
	I	: 1 391 840 197 157.06
	J	: 4 659 779 485 947.77

Ana kirişe ait iki farklı yapı Şekil 5.2 ve 5.3’de ayrı ayrı boyutlandırılarak verilmiştir.



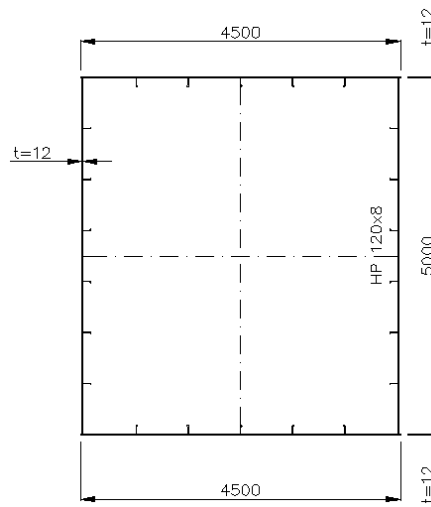
Şekil 5.2: Bir no'lu yapı



Şekil 5.3: İki no'lu yapı

5.3 Rijit Ayak Sütun Parçası

Kren geometrisinde kullanılan rijit ayak sütun parçası kaynaklı konstrüksiyon olarak Şekil 5.3.1'de gösterilen ölçülerde yapılmış olup, profile ait gerekli fiziksel özellikler ise AutoCAD ortamında Tablo 5.2'de görüldüğü şekilde elde edilmiştir.

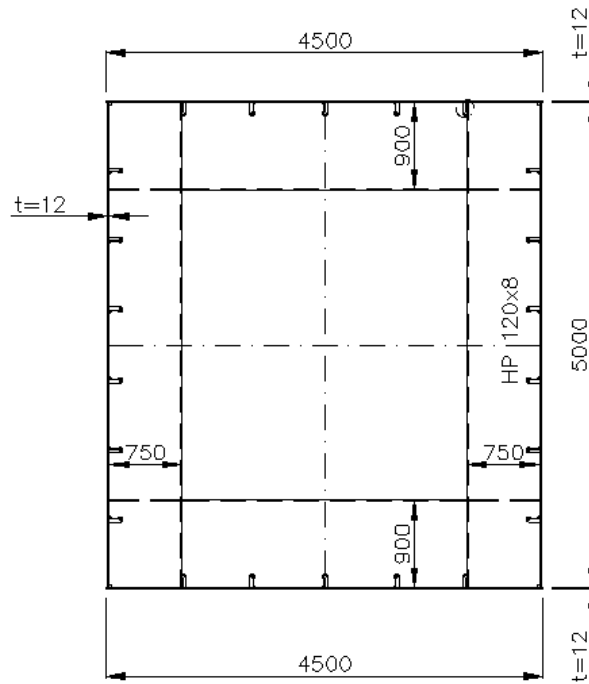


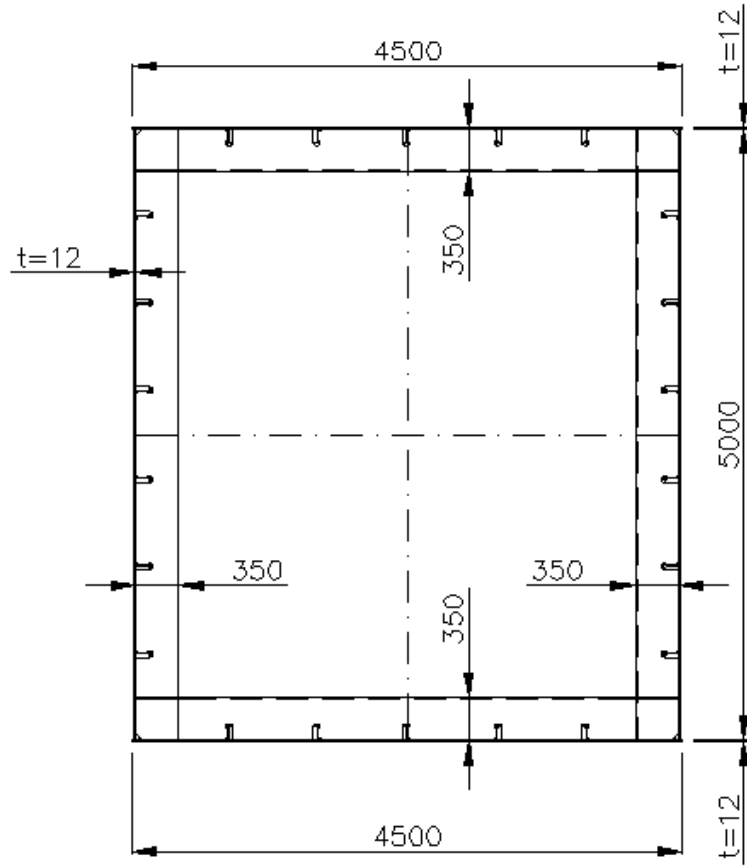
Şekil 5.4: Sütunun Kesiti

Tablo 5.2: Rijit ayak sütun kısmının fiziksel özellikleri

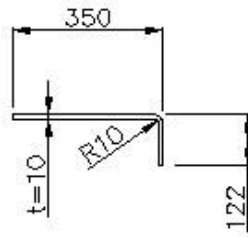
Bölgeler (mm)		
Alan		:253 668.61
Çevre Uzunluğu		:43 751.87
Bounding box	X	:0.00
	Y	:0.00
Kitle Merkezi	X	:0.00
	Y	:0.00
Atalet Momentleri	X	:1 018 128 726 498.76
	Y	:852 938 985 258.61
Atalet çarpımı	XY	: -9 972 732.14
Dönme yarıçapı	X	:2 003.40
	Y	:1 833.69
Kitle Merkezi civarındaki ana moment ve X-Y yönleri		
	I	:852 938 985 170.07
	J	:1 018 128 726 498.76

Rijit ayak sütun parçasına ait altı farklı yapı aşağıdaki şekillerde ayrı ayrı boyutlandırılarak verilmiştir.

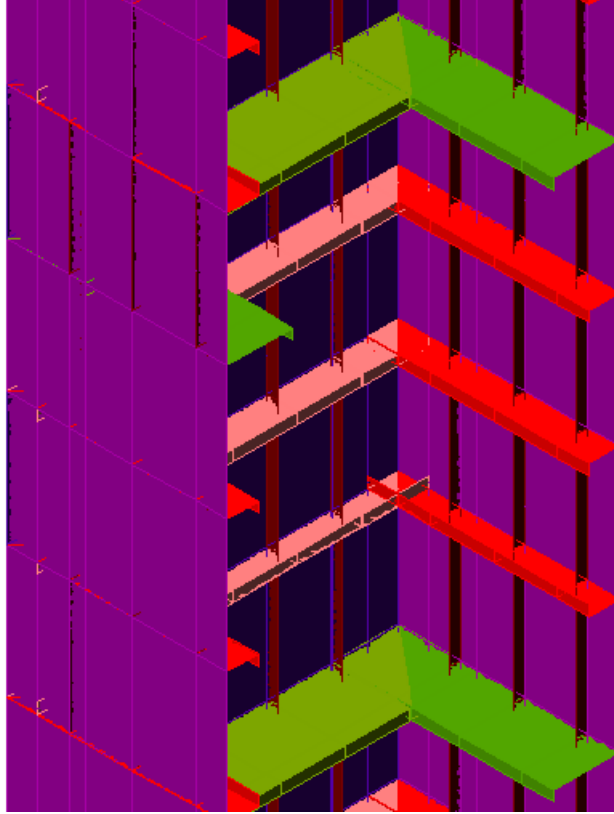
**Şekil 5.5:** Bir no'lu yapı



Şekil 5.6: İki no'lu yapı



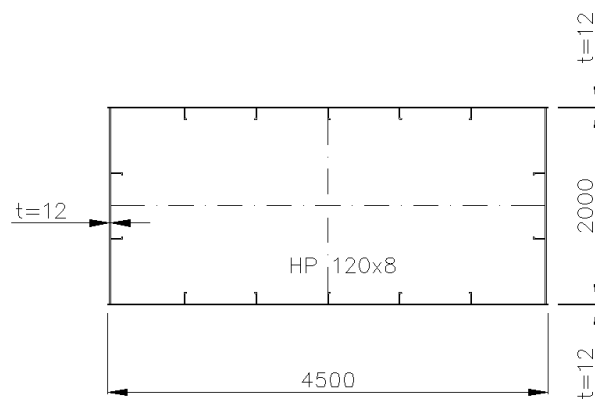
Şekil 5.7: İki nolu yapı sağlamlaştırıcı kesit



Şekil 5.8: Rijit Ayak sütun yapısı kesiti (iskelet aralığı =1.500mm)

5.4 Rijit Ayağın Eğik Elemanları

Kren geometrisinde kullanılan rijit ayağın eğik elemanlarının kaynaklı konstrüksiyon olarak Şekil 5.9’de gösterilen ölçülerde yapılmış olup, profile ait gerekli fiziksel özellikler ise AutoCAD ortamında Tablo 5.2a ve 5.2b’de görüldüğü şekilde elde edilmiştir.

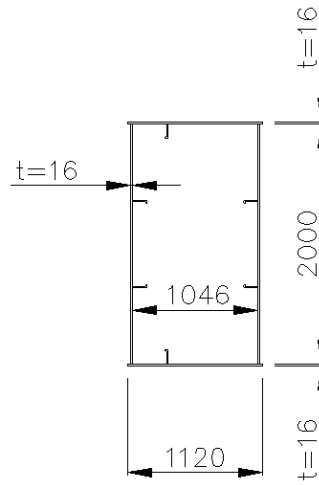


Şekil 5.9: Üst kesit

Tablo 5.2a: Rijit ayağın eğimli kısımlarının fiziksel özellikleri

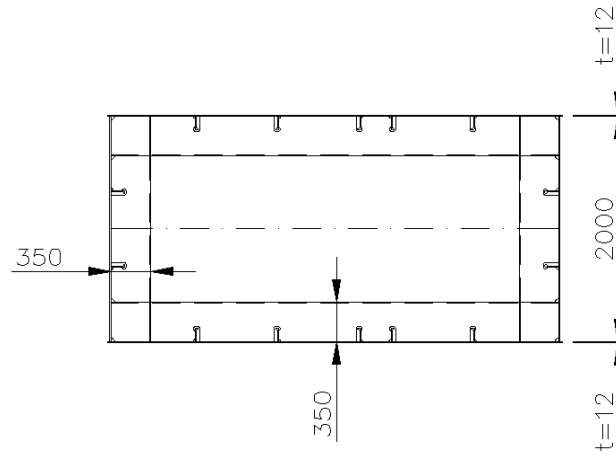
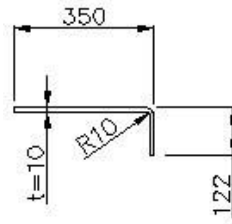
Bölgeler [mm]		
Alan		: 172 334.57
Çevre Uzunluğu		: 29 660.28
Bounding box	X	: 0.00
	Y	: 0.00
Kitle Merkezi	X	: 0.03
	Y	: 0.00
Atalet Momentleri	X	: 135 942 895 399.99
	Y	: 453 709 156 667.48
Atalet çarpımı	XY	: 0.00
Dönme yarıçapı	X	: 888.16
	Y	: 1 622.57
Kitle Merkezi civarındaki ana moment ve X-Y yönleri		
	I	: 135 942 895 399.99
	J	: 453 709 156 537.15

Rijit ayak sütun parçasına ait üç farklı yapı Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12’de ayrı ayrı boyutlandırılarak verilmiştir.

**Şekil 5.10:** Alt kesit

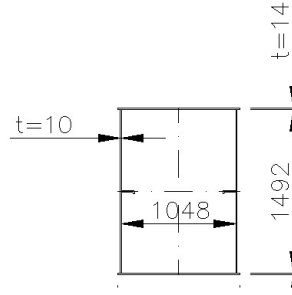
Tablo 5.2b: Rijit ayağın eğimli kısımlarının fiziksel özellikleri

Bölgeler (mm)		
Alan		: 106 840.53
Çevre Uzunluğu		: 14 048.69
Bounding box	X	: 0.00
	Y	: 0.00
Kitle Merkezi	X	: -5.09
	Y	: 0.00
Atalet Momentleri	X	: 60 365 917 307.83
	Y	: 22 886 991 077.32
Atalet çarpımı	XY	: 0.00
Dönme yarıçapı	X	: 751.67
	Y	: 462.84
Kitle Merkezi civarındaki ana moment ve X-Y yönleri		
	I	: 22 884 223 433.18
	J	: 60 365 917 307.83

**Şekil 5.11:** İskelet Örneği**Şekil 5.12:** Sağlamlaştırıcı Kesit (iskelet aralığı = 1.4300mm)

5.5 Rijit Ayak Uç Taşıyıcısı

Kren geometrisinde kullanılan rijit ayak uç taşıyıcısının kaynaklı konstrüksiyon olarak Şekil 5.13’de gösterilen ölçülerde yapılmış olup, profile ait gerekli fiziksel özellikler ise AutoCAD ortamında Tablo 5.3’de görüldüğü şekilde elde edilmiştir.

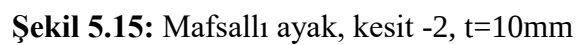
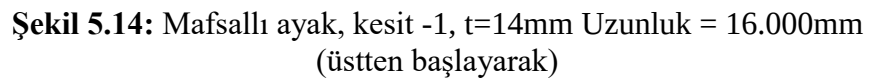


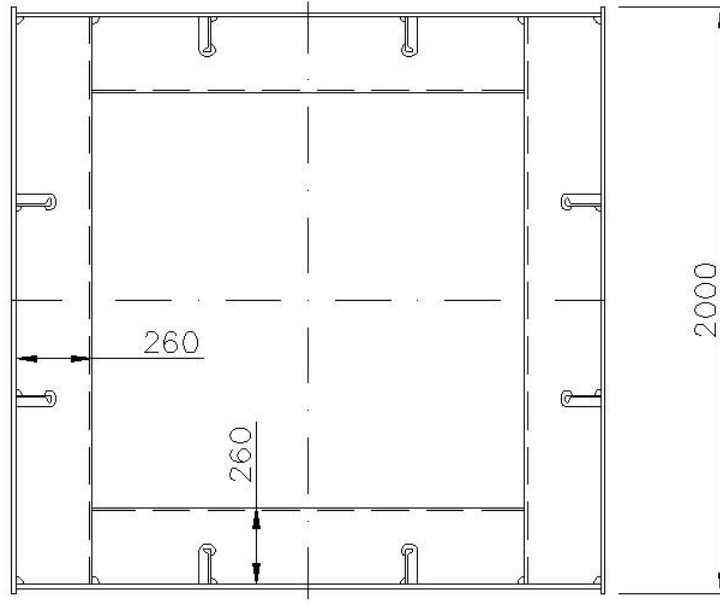
Şekil 5.13: Kesit alanı

Tablo 5.3: Rijit ayak uç taşıyıcısının fiziksel özellikleri

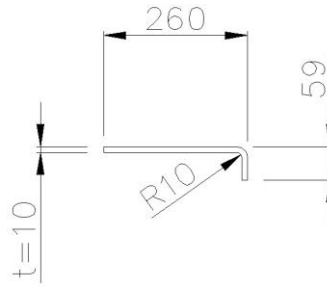
Bölgeler (mm)		
Alan		: 63 533.51
Çevre Uzunluğu		: 10 986.90
Bounding box	X	: -560.00-560.00
	Y	: -760.00-760.00
Kitle Merkezi	X	: 0.00
	Y	: 0.00
Atalet Momentleri	X	: 23317465 040.11
	Y	: 12114422 700.12
Atalet çarpımı	XY	: 0.00
Dönme yarıçapı	X	: 605.81
	Y	: 436.67
Kitle Merkezi civarındaki ana moment ve X-Y yönleri		
	I	: 12114422 700.12
	J	: 23317464 686.61

Kren geometrisinde kullanılan mafsallı ayağın kaynaklı konstrüksiyon olarak Şekil 5.14 'de gösterilen ölçülerde yapılmış olup, mafsallı ayağa ait dört farklı yapı Şekil 5.15, 5.16, 5.17 ve 5.18'de ayrı ayrı boyutlandırılarak verilmiştir.

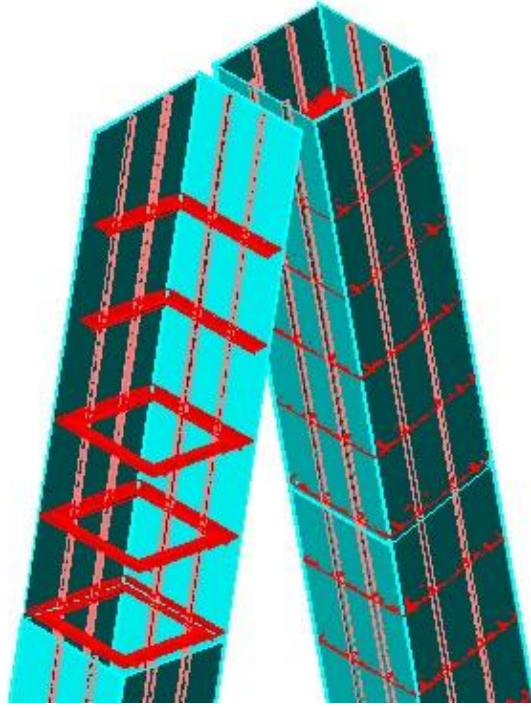




Şekil 5.16: İskelet



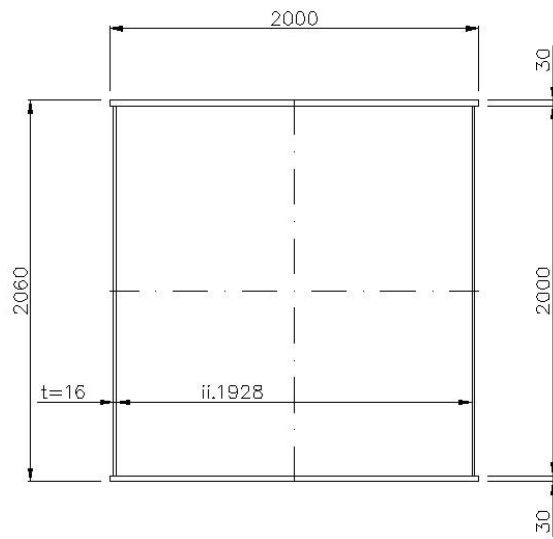
Şekil 5.17: Sağlamlaştırıcı Kesit



Şekil 5.18: Mafsallı ayak yapısının kesiti (iskelet aralığı = 1.500mm)

5.7 Kiriş

Kren geometrisinde kullanılan kiriş elemanının konstrüksiyon olarak Şekil 5.19’de gösterilen ölçülerde yapılmış olup, profile ait gerekli fiziksel özellikler ise AutoCAD ortamında Tablo 5.4’de görüldüğü şekilde elde edilmiştir.

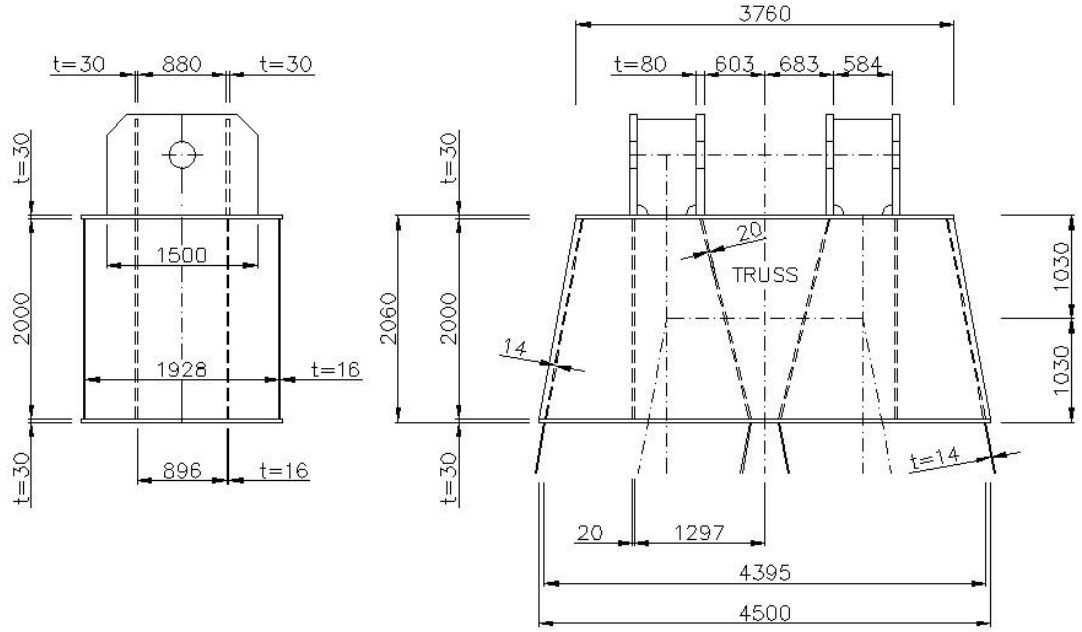


Şekil 5.19: Kiriş kesiti

Tablo 5.4: Kirişin fiziksel özellikleri

Bölgeler (mm)		
Alan		: 184 000.00
Çevre Uzunluğu		: 16 056.00
Bounding box	X	: -1000.00 -- 1000.00
	Y	: -1030.00 -- 1030.00
Kitle Merkezi	X	: 0.00
	Y	: 0.00
Atalet Momentleri	X	: 144 969 333 333.33
	Y	: 100 467 541 333.33
Atalet çarpımı	XY	: 0.00
Dönme yarıçapı	X	: 887.62
	Y	: 738.93
Kitle Merkezi civarındaki ana moment ve X-Y yönleri		
	I	: 144 969 333 333.33
	J	: 100 467 541 333.33

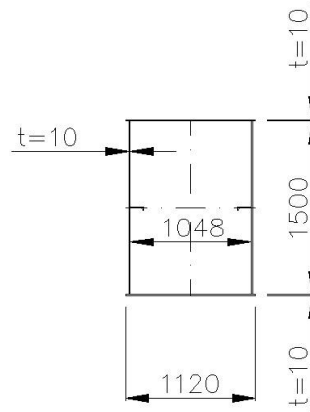
Kiriş elemanına ait üç farklı yapı Şekil 5.20, 5.21 ve 5.22’de ayrı ayrı boyutlandırılarak verilmiştir.



Şekil 5.21: Mafsalın genel boyutlandırılması

5.8 Mafsalı Ayak Uç Taşıyıcısı

Kren geometrisinde mafsalı ayak uç taşıyıcısı, kaynaklı konstrüksiyon olarak Şekil 5.22’de gösterilen ölçülerde yapılmış olup, profile ait gerekli fiziksel özellikler ise AutoCAD ortamında Tablo 5.5’de görüldüğü şekilde elde edilmiştir.



Şekil 5.22: Kesit Alanı

Tablo 5.5: Mafsallı ayak uç taşıyıcısının fiziksel özellikleri

Bölgeler		
Alan	A=	63 533.51
Çevre Uzunluğu	P=	10 986.90
Bounding box	X=	-560.00 -- 560.00
	Y=	-760.00 -- 760.00
Kitle Merkezi	X=	0.00
	Y=	0.00
Atalet Momentleri	X=	23 317 465 040.11
	Y=	12 114 422 700.12
Atalet çarpımı	XY	0.00
Dönme yarıçapı	X=	605.81
	Y=	436.67
Kitle Merkezi civarındaki ana moment ve X-Y yönleri		
	I=	:12 114 422 700.12
	J=	:23 317 464 686.61

6. KREN SİSTEMİNE UYGULANAN YÜKLERİN TANIMI

Liman vincine farklı tip iç ve dış yükler gelmektedir. Liman vincinin işletimli ve işletimsiz hallerinde krenin her bir parçasının hareketi ve kütlesinden ötürü ölü ağırlığına, rüzgar yüküne ve dinamik yüklere maruz kalmaktadır. İşletim halinde, kuvvetlere ilaveten yürütülen yük ağırlığı, krenin hareketine direnç olarak eyleme geçirilmiştir diye öngörülmüştür.

6.1 Krenin Ölü Ağırlığı

Krenin ölü ağırlığının hesabı, yüklerin tüm işletim koşullarında krene olan etkisinden ötürü daha ilk tasarım aşamasında şekillenmeye başlar. Tamburin ölü ağırlığı da dahil olmak üzere tüm ölü yüklerin ana kiriş boyunca hareket ettiği düşünülmüştür.

6.2 Tambur Yüğü

İki taşıyıcı tamburun her biri 200 ton yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bu yükler hareketli olup ana kiriş boyunca gezmektedir. İki taşıyıcı arasındaki mesafe 10 metredir. Her bir tamburun 8 tekerleği vardır ve tekerlekler ana kirişe 2 köşeden temas etmektedir. Bu sebepten dolayı, 200 ton kirişe 8 özdeş yük olarak dağıtılmaktadır.

6.3 Tamburun Kendi Ağırlığı

Tamburların kendi ağırlıkları olup, bu ağırlıklar değişmemektedir. Farklı yük faktörlerinden dolayı, Tamburlar temel yük şartı olarak tanımlanmışlardır. Bu yük aynı zamanda tekerlek dokunma pozisyonuna 8 özdeş yük olarak dağıtılmıştır.

6.4 Kancanın Kendi Ağırlığı

Kancanın ağırlığı çelik halatın ucuna yerleştirilmiş olup bu ağırlık, temel yük durumu olarak düşünülmüştür. Bunun sebebi dinamik yük faktörünün, statik yük faktöründen farklı olmasıdır. Kanca ağırlığı çelik halat tarafından karşılandığı ve

elik halat da tambura bağlı olduğu için, aynı yük uygulaması Tambur içinde kullanılmıştır. Bu, yükün aynı zamanda tekerlek dokunma pozisyonuna 8 özdeş yük olarak dağıtılmış olması anlamına gelmektedir.

6.5 Rüzgar Yükü

Rüzgar yükünün yatay yönde hareket ettiği ve krenin tüm noktalarına eşit kuvvet uyguladığı farz edilir. Krenin her hangi bir parçasına veya yürütülen yüke uygulanan rüzgar yükü aşağıdaki gibidir:

$$Q_w = q.k.d_w.c.A \quad (6.1)$$

- Q : rüzgarın esas hızı
K_{dw} : rüzgarın esas hızının dinamik etkilere olan tepkisine izin vermek için oluşturulmuş katsayı
c : aerodinamik katsayı
A : yürütülen yükün ya da kren parçasının rüzgara maruz kalan alanı.

Rüzgarın esas hızı aşağıdaki rüzgar hızı formülasyonundan elde edilmektedir;

$$q = u^2 / 16 \quad (6.2)$$

- u : Rüzgar hızı

Krenin işletimsiz durumundaki rüzgarın esas hızı q ve ilgili rüzgar hızı u, krenin işletim halindeki bölgesinden seçilir.

Bu analizde 20 metre ykseklіęe kadar 80kg/m², 20 metreden sonraki yksekliliklerde ise 110 kg/m² alınmıştır.

6.6 Dinamik Yükler

Kren üstündeki ivmelenme ve frenleme mekanizmaları dinamik yükler hazırlar. Bu dinamik yükler hareketin krenin herhangi bir ivmeye sahip hareketli parçalarının kütlelerinin çarpımıyla hesaplanabilir. Bu değer krenin kendi ağrılığının 30 da 1'i olarak verilmiştir. Bu yük sadece global y-ekseni boyunca uygulanmaktadır. Bunun sebebi ise, krenin yalnızca y-ekseni üzerinde hareket etmesidir (Yük Durumu 30).

400 tonluk gezici yüklerin yatay etkileri 2 yatay yöndedir. Bu yönler global X ve Y eksenleridir. Yük durum numaraları ise sırasıyla X için 31'den 33'e Y için ise 35'den 37'yedir. Daha önce bahsedildiği üzere bu yük 400 tonun 1/30'u olup, 16 tekerlek dokunma pozisyonuna özdeş yükler olarak uygulanmaktadır.

6.7 Kayma Hareketinden Dolayı Oluşan Enine Reaksiyonlar

400 tonluk krenin, tekerleklerin farklı yuvarlanma hızlarından dolayı tekerleklerden diğerine doğru izafi bir deformasyon oluşur. Bu da ana tekerlekler üzerinde bir burulma etkisine yol açar. Standartlara göre bu da düşey yükün yatayda hareketinin %8'ini geçemez. Bu durumdan ötürü model sadece bu yük için çözdürülmüştür. Daha sonra her bir destekteki düşey yük sonucu bulunup, bu sonucun %8'lik kısmı aynı pozisyonda yatay olarak uygulanmıştır. Bu yeni değerler ise yeni bir yük durumu olarak ana data dosyasına yazdırılıp o şekilde çözdürülmüştür (yük durumu 81).

6.8 Temel Yük Durumu Tabloları

Tablo 6.1'de temel yükler, uygun bir isimlendirme ve numaralandırma ile gösterilmiştir. Program modeli işte bu temel yük durumları ile koşturacaktır. Data dosyasını program koşturduktan sonra, post-prosesör sonuçları yük kombinasyonlarına ve eleman gruplarına göre ayrı ayrı gösterecektir. Temel yükler aşağıdaki gibidir;

Tablo 6.1: Analizde kullanılan temel yük şartları

LOAD NO	LOAD CASE	LOAD NAME	EXPANATIONS	LOAD VALUE	GLOBAL DIRECTION	UNIT	APPLYING POSITION	TOTAL LOAD
10	10	DL0	SELF WEIGHT DEAD WEIGHT OF THE CRANE	-9,81	Z			ALL
1	1	HD1	HOOK DEAD LOAD AT POSITION 1 (AT RIGID LEG -- LEFT)	17,50	Z	kN	2x8 POINT	140
1	2	HD1	HOOK DEAD LOAD AT POSITION 2 (AT THE MIDDLE)	17,50	Z	kN	2x8 POINT	140
1	3	HD1	HOOK DEAD LOAD AT POSITION 3 (AT THE HINGED LEG -- RIGHT)	17,50	Z	kN	2x8 POINT	140
11	11	TD1	TROLLEY DEAD LOAD AT POSITION 1 (AT RIGID LEG -- LEFT)	28,13	Z	kN	2x8 POINT	225
11	12	TD1	TROLLEY DEAD LOAD AT POSITION 2 (AT THE MIDDLE)	28,13	Z	kN	2x8 POINT	225
11	13	TD1	TROLLEY DEAD LOAD AT POSITION 3 (AT THE HINGED LEG -- RIGHT)	28,13	Z	kN	2x8 POINT	225
21	21	TR1	WORKING LOAD TROLLEY LOAD AT POSITION 1 (WORKING LOAD)	250,00	Z	kN	2x8 POINT	2000
21	22	TR1	TROLLEY LOAD AT POSITION 2	250,00	Z	kN	2x8 POINT	2000
21	23	TR1	TROLLEY LOAD AT POSITION 3	250,00	Z	kN	2x8 POINT	2000
30	30	SHgy	HORIZONTAL EFFECT : DUE TO HORIZONTAL MOTION OF CRANE IN Y-DIR.	9,81/30	Y	kN	ALL CRANE	ALL / 30
31	31	THx1	DUE TO HORIZONTAL MOTION OF TROLLEY IN X-DIR. POSITION 1	8,33	X	kN	2x8 POINT	66,67
31	32	THx2	DUE TO HORIZONTAL MOTION OF TROLLEY IN X-DIR. POSITION 2	8,33	X	kN	2x8 POINT	66,67
31	33	THx3	DUE TO HORIZONTAL MOTION OF TROLLEY IN X-DIR. POSITION 3	8,33	X	kN	2x8 POINT	66,67
35	35	THy1	DUE TO HORIZONTAL MOTION OF TROLLEY IN Y-DIR. POSITION 1	8,33	Y	kN	2x8 POINT	66,67
35	36	THy2	DUE TO HORIZONTAL MOTION OF TROLLEY IN Y-DIR. POSITION 2	8,33	Y	kN	2x8 POINT	66,67
35	37	THy3	DUE TO HORIZONTAL MOTION OF TROLLEY IN Y-DIR. POSITION 3	8,33	Y	kN	2x8 POINT	66,67
41	41	Wk1	WIND LOAD WORKING WIND ON THE LOAD POSITION 1 (X-DIR)	8,10	X	kN	2x8 POINT	60,00
41	42	Wk2	WORKING WIND ON THE LOAD POSITION 2 (X-DIR)	8,10	X	kN	2x8 POINT	60,00
41	43	Wk3	WORKING WIND ON THE LOAD POSITION 3 (X-DIR)	8,10	X	kN	2x8 POINT	60,00
45	45	Wly1	WORKING WIND ON THE LOAD POSITION 1 (Y-DIR)	8,10	Y	kN	2x8 POINT	60,00
45	46	Wly2	WORKING WIND ON THE LOAD POSITION 2 (Y-DIR)	8,10	Y	kN	2x8 POINT	60,00
45	47	Wly3	WORKING WIND ON THE LOAD POSITION 3 (Y-DIR)	8,10	Y	kN	2x8 POINT	60,00
51	51	Wocx	WIND ON THE CRANE (WORKING WIND) X-DIR	0,40	X	kN/m2	FRONT face	
53	52	Womx	WIND ON THE CRANE (MAXIMUM WIND -0-20m) X-DIR	1,31	X	kN/m2	FRONT	
54	52	Womx	WIND ON THE CRANE (MAXIMUM WIND -20m & above) X-DIR	1,79	X	kN/m2	FRONT	
55	55	Wocy	WIND ON THE CRANE (WORKING WIND) Y-DIR	0,40	Y	kN/m2	FRONT face	
57	56	Womy	WIND ON THE CRANE (MAXIMUM WIND -0-20m) Y-DIR	1,31	Y	kN/m2	FRONT	
58	56	Womy	WIND ON THE CRANE (MAXIMUM WIND -20m & above) Y-DIR	1,79	Y	kN/m2	FRONT	
71	71	PRI	WIRE PULLEY LOAD WIRE ROPE TENSION BETWEEN LEGS UPWARD	600	+Z	kN	6 POINTS	600
72	71	PRI	AT TOP CONNECTION PART DOWNWARD & HORIZONTAL	600	+X, -Z	kN	6 POINTS	600
73	71	PRI	AT CANTILEVER TIP HORIZONTAL (TOTAL 600 kN)	600	-X	kN	6 POINTS	600
81,82	81	DSx	RELATIVE DISPLACEMENT OF ROLLING WHEELS TRANSVERSE REACTIONS DUE TO ROLLING ACTION		+X, -X	m	2x2x8 POINTS	%8 P

6.9 Yük Kombinasyonları ve Gruplandırma

Uygulanan yük kombinasyonları belirlenene standart spesifikasyonlarına göre seçilmelidir. Model koşturulduktan sonra, her bir yük durumunun sonuçlarına sahip data dosyası uygun faktörlerle çarpılır. Bu faktörler ve kombinasyonları aşağıdaki tabloda verilmiştir. Yük numaraları ve kombinasyonları kolay hatırlanabilecek şekilde seçilmiştir. Örneğın 10 numaralı yük durumu l ağırlığı, 30 ise yatay etkiyi sembolize etmektedir.

Yük kombinasyon numaraları aynı şekilde seçilmiş olup, benzer yükler 100 katları şeklinde numaralandırılmıştır. Mesela rüzgar yükü 31-37 arasında değişirken ilgili yük kombinasyonu da 131-137 arasındadır.

Yük durumlarının sonuçlarını hazırladıktan sonra, program tüm yük gruplarındaki her bir elemanın maksimum değerlerini bulur. Bu işleme ‘envelope’ denir. III. nolu gruba ait torba numarası 130’dur ve bu şekilde Msc.Patran her bir gruba ait maksimum gerilme değerlerini tek bir resimde toplayabilir.

Tablo 6.2’de yük kombinasyonları ve uygulanan faktörler verilmiştir.

		DL										TROLLEY LOAD										HORIZONTAL LOAD (HD)										WIND LOAD (WL)																					
		DEAD WEIGHT										TROLLEY (TR)										DUE TO :										ON THE :																					
		HOOK					TROLLEY					POSITION:					DL					Working Load X					Working Load Y					Load in X-Dir					Load in Y-Dir					Crane X-Dir					Crane Y-Dir						
CRN		1	2	3	11	12	13	21	22	23	30	31	32	33	35	35	35	35	35	35	SHfgy	SHx1	SHx2	SHx3	SHy1	SHy2	SHy3	Wk1	Wk2	Wk3	Wly1	Wly2	Wly3	Wocx	Wocy	Wcmx	Wcmx	PULL	Rel.														
Load Case No	Comb	HD1	HD1	HD1	TD1	TD1	TD1	TR1	TR1	TR1	SHfgy	SHx1	SHx2	SHx3	SHy1	SHy2	SHy3																																				
0	101							1			1,08																																										
0	102								1		1,08																																										
0	103									1																																											
1	110	1									1,08																																										
1	111	1	1		1			1			1,08																																										
1	112	1		1		1			1		1,08																																										
1	113	1					1			1																																											
II	121	1,08	1,242		1,08			1,242			1,08	1,08																																									
II	122	1,08		1,242			1,08		1,242		1,08																																										
II	123	1,08					1,08			1,242	1,08																																										
II	125	1,08	1,242				1,08	1,242			1,08	-1,08																																									
II	126	1,08		1,242			1,08		1,242		1,08	-1,08																																									
II	127	1,08					1,08			1,242	1,08																																										
III	131	1,08	1,242		1,08			1,242			1,08	1,08																																									
III	132	1,08		1,242			1,08	1,242			1,08	1,08																																									
III	133	1,08					1,08			1,242	1,08																																										
III	135	1,08	1,242		1,08			1,242			1,08	1,08				</																																					

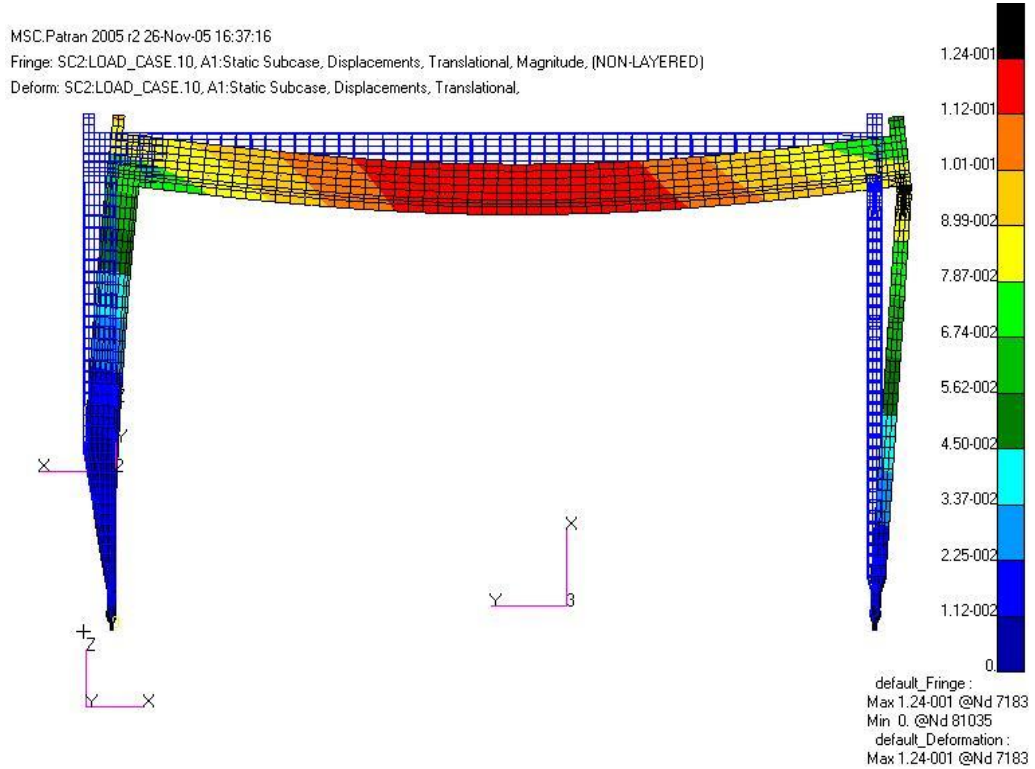
7. LİNEER STATİK ANALİZ SONUÇLARI

7.1 Deformasyon Analiz Sonuçları

Üç boyutu modele ait farklı yükleme durumlarından dolayı oluşan genel deformasyonlar bu bölümde belirtilecektir. Bu değerler sadece temel yük şartlarından dolayı meydana gelen deformasyonları gösterir. Tambur ana kiriş üzerinde gezdiğinden şekillerdeki tambura ait deformasyonlar ana kiriş üzerinde farklı yerlerde olacaktır. Maksimum ve minimum yer değiştirmeler ilgili tablolarda verilmiştir.

7.1.1 Temel Yük Durumlarından Dolayı Deformasyona Uğramış Kren Şekilleri

Temel yük durumlarının sonuçlarına ait krenin farklı açılardaki genel deformasyon davranışı burada gösterilecektir. Bu yük durumlarında yük faktörleri mevcut olmayıp sadece kontrol amacıyla deformasyon incelenmiştir.

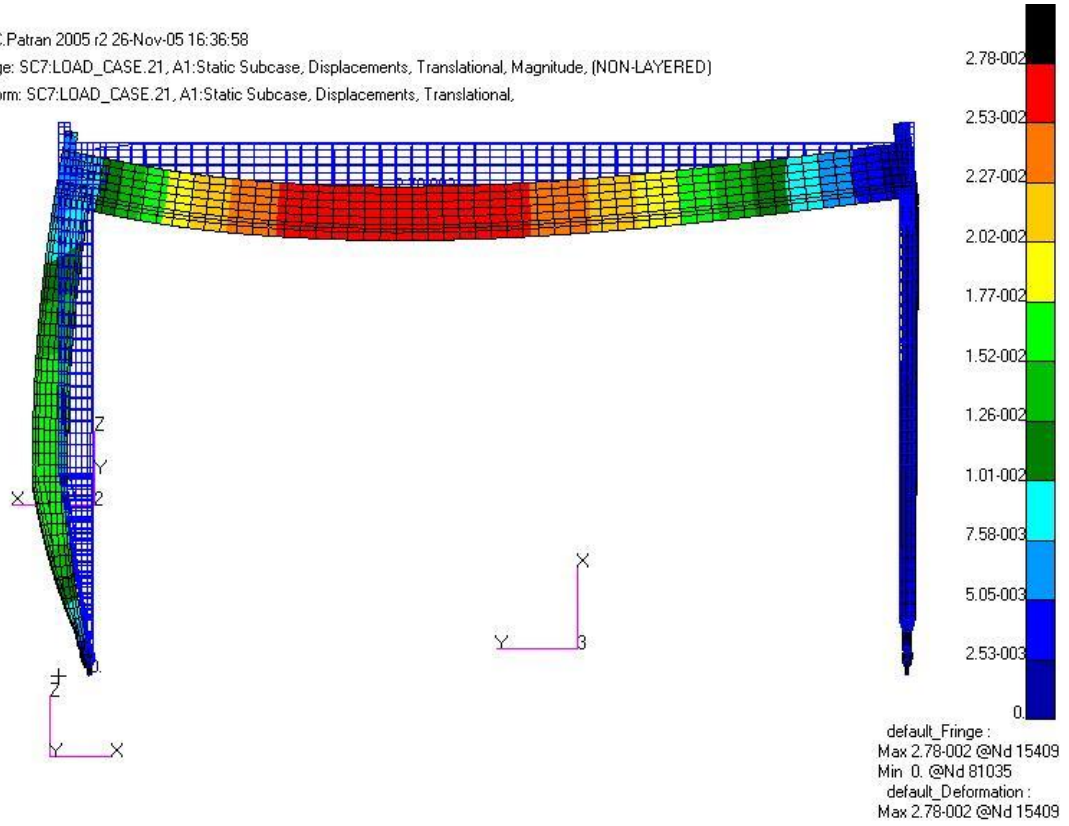


Şekil 7.1: Krenin kendi ağırlığından ötürü oluşan deformasyon

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 16:36:58

Fringe: SC7:LOAD_CASE.21, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC7:LOAD_CASE.21, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

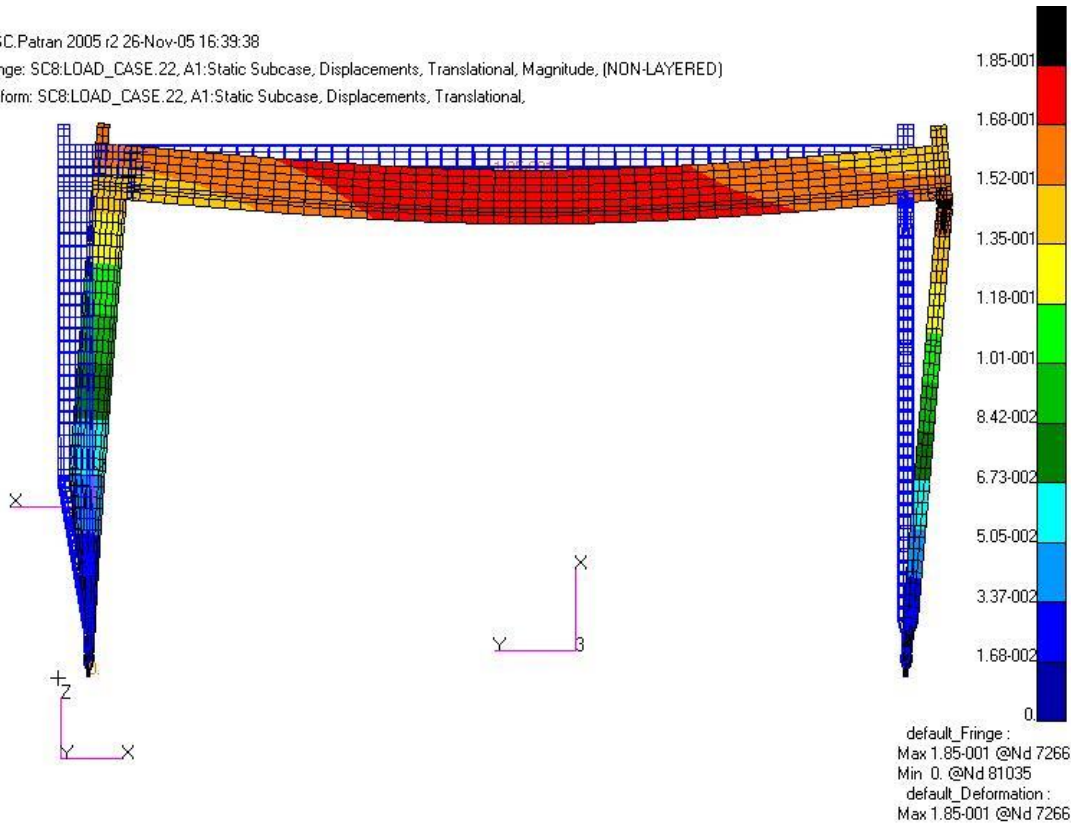


Şekil 7.2: Tambur krenin sol tarafında iken oluşan deformasyon

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 16:39:38

Fringe: SC8:LOAD_CASE.22, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC8:LOAD_CASE.22, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

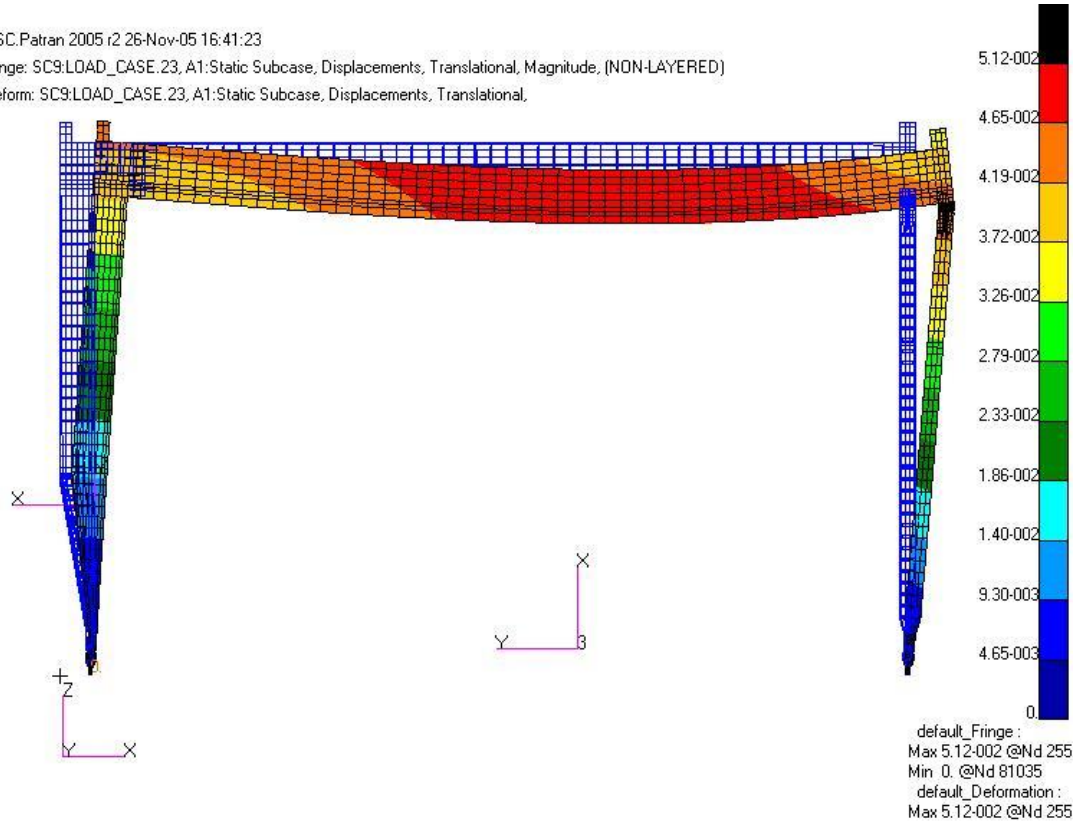


Şekil 7.3: Tambur krenin ortasında iken oluşan deformasyon

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 16:41:23

Fringe: SC9:LOAD_CASE.23, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC9:LOAD_CASE.23, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

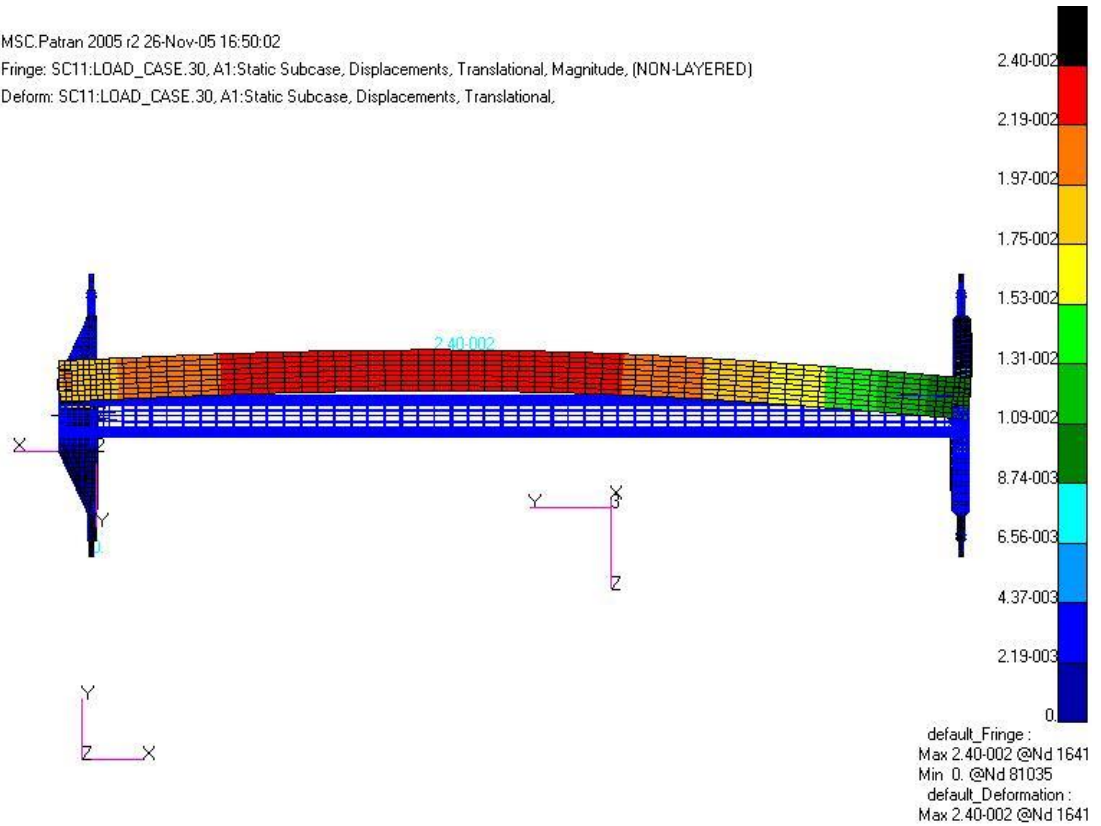


Şekil 7.4: Tambur krenin solunda iken oluşan deformasyon

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 16:50:02

Fringe: SC11:LOAD_CASE.30, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC11:LOAD_CASE.30, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

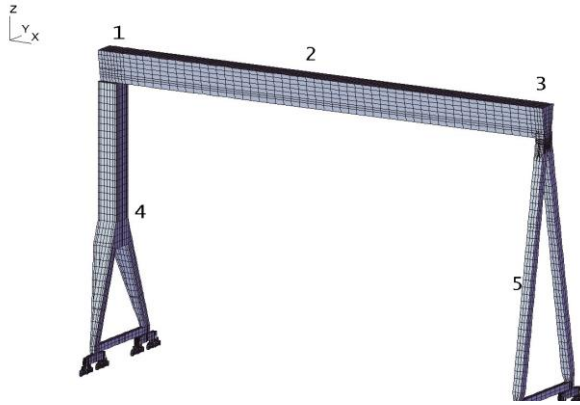


Şekil 7.5: Krenin kendi ağırlığının yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon

Krene ait diğer deformasyon analizi sonuçları **Ek-B'de** sunulmuştur.

7.1.2 Maksimum ve Minimum Yer Değiştirme Değerleri

Yükleme durumlarının daha iyi anlaşılması için krenin beş kısma ayrılmıştır. Bu kısımlara ait yüklem kombinasyonları bu rakamlarla ifade edilecektir (Şekil 7.6). Farklı yüklem koşulları altındaki modelin tüm detayları ile birlikte deformasyon değerleri aşağıdaki tablodadır (Tablo 7.1).

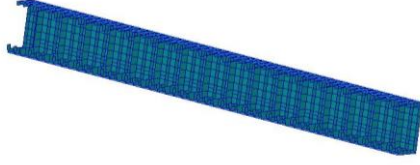
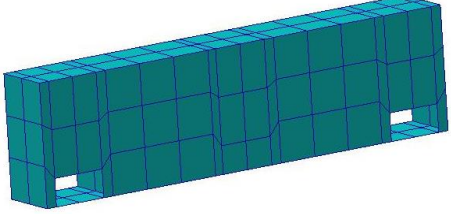
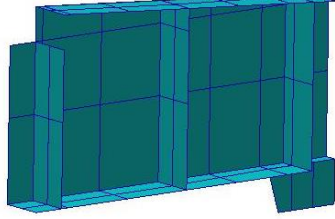
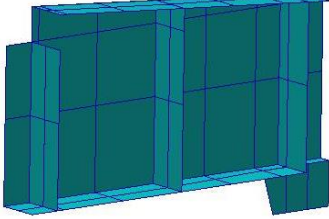
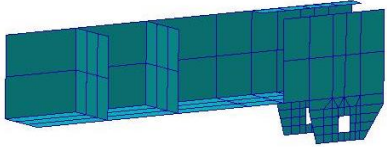


Şekil 7.6: Krenin yer değiştirme değerleri için alan numaraları

Krene ait tüm veriler çok büyük yer kaplayacağı için burada sadece önemli kren parçalarının yer değiştirme ve gerilme değerleri verilecektir.

İsmlendirilen kren parçaları Şekil 7.7'de gösterilmiştir;

- | | |
|---------------|---|
| - R-Ana Kiriş | : Ana Kiriş (Şekil 7.7a) |
| - R-M20 | : Alt Dengeleyici Kiriş (Şekil 7.7b) |
| - R-M30 | : Üst Dengeleyici Kiriş -1 (Şekil 7.7c) |
| - R-M30B | : Üst Dengeleyici Kiriş -2 (Şekil 7.7d) |
| - R-M40 | : Rijit Ayak Kolonu (Şekil 7.7e) |
| - T-M50 | : Rijit Ayak Eğik Elemanları (Şekil 7.7f) |
| - R-M60 | : Rijit Kolon Uç Taşıyıcı (Şekil 7.7g) |
| - R-M80 | : Menteşeli Ayak (Şekil 7.7h) |
| - R-M90 | : Boji (Şekil 7.7j) |

 Şekil 7.7a: Ana Kiriş	 Şekil 7.7b: Alt Dengeleyici Kiriş
 Şekil 7.7c: Üst Dengeleyici Kiriş -1	 Şekil 7.7d: Üst Dengeleyici Kiriş -2
 Şekil 7.7e: Rijit Ayak Kolonu	 Şekil 7.7f: Rijit Ayak Eğik Elemanları
 Şekil 7.7g: Rijit Kolon Uç Taşıyıcı	 Şekil 7.7h: Menteşeli Ayak

Şekil 7.7: Önemli kren parçaları



Şekil 7.7: Önemli kren parçaları (devamı)

Tablo 7.1 Global eksene göre toplam yer değiştirme miktarları

Yük Durumu	KREN BÖLÜMÜ	Maksimum Yer değiştirme [m]			Minimum Yer değiştirme [m]		
		DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
1	R-Ana-Kiriş	0,00018	0,0000928	-0,000169	-0,000222	0,00000846	-0,00194
	R-M20	-0,0000392	0,000129	1,27E-05	-0,000104	0,000111	-0,0000545
	R-M30	-0,0000642	0,0000146	-0,000033	-0,000253	-0,0000172	-0,000155
	R-M30B	-0,0000708	0,000121	-0,000051	-0,000249	0,0000607	-0,000176
	R-M40	-0,000224	0,0000941	-0,000354	-0,00114	0,0000446	-0,000607
	T-M50	-0,000362	0,0000898	-0,000103	-0,00115	-4,43E-07	-0,000369
	R-M60	-0,0002	0,0000848	-0,000109	-0,000407	0,0000526	-0,00021
	R-M80	0,000162	0,0000095	-0,00001	0,0000145	-2,97E-06	-0,000041
	R-M90	0,0000311	0,000126	1,67E-05	-0,0000655	0,000123	-0,0000234
2	R-Ana-Kiriş	0,0112	0,0000647	-0,000862	0,00984	0,000036	-0,00746
	R-M20	0,000188	0,0000706	2,57E-05	0,0000807	0,0000609	-0,0000472
	R-M30	0,000423	8,01E-06	5,52E-05	0,000146	-9,47E-06	-0,0000642
	R-M30B	0,000423	0,0000663	0,000057	0,000147	0,0000333	-0,0000757
	R-M40	0,00984	0,000054	0,000451	0,00438	0,0000247	-0,000421
	T-M50	0,00353	0,000049	0,000449	0,000623	-39500000	-0,000285
	R-M60	0,000634	0,0000465	-1,53E-05	0,000342	0,0000289	-0,000161
	R-M80	0,0109	0,0000626	9,82E-05	0,000969	-0,0000184	-0,000445
	R-M90	0,000131	0,000069	3,08E-05	-0,0000503	0,0000677	-0,0000333
3	R-Ana-Kiriş	0,00306	0,0000793	-0,000246	0,00258	0,0000158	-0,0022
	R-M20	0,0000547	0,000012	7,73E-06	0,0000235	0,0000103	-0,0000114
	R-M30	0,000127	0,000001	0,000020	0,000044	-0,000002	-0,000011
	R-M30B	0,000125	0,000011	0,000020	0,000043	0,000006	-0,000013
	R-M40	0,002635	0,000014	0,000139	0,001226	0,000005	-0,000080
	T-M50	0,001003	0,000008	0,000139	0,000185	-0,000000	-0,000057
	R-M60	0,000186	0,000008	0,000006	0,000101	0,000005	-0,000036
	R-M80	0,00298	0,000116	-0,00011	0,000278	-0,0000346	-0,000536
	R-M90	0,000038	0,000012	0,000009	-0,000015	0,000012	-0,000009
10	R-Ana-Kiriş	0,086927	0,002374	-0,015604	0,069243	0,001868	-0,095181
	R-M20	0,000011	0,003163	-0,000027	-0,000236	0,002769	-0,000911
	R-M30	0,000205	0,000313	-0,000748	-0,000770	-0,000369	-0,002786
	R-M30B	0,000029	0,002987	-0,000837	-0,000750	0,001699	-0,003230
	R-M40	0,069298	0,002266	-0,001633	0,014742	0,001254	-0,012034
	T-M50	0,008363	0,001749	-0,002504	-0,002257	0,000424	-0,007935
	R-M60	-0,000553	0,002270	-0,003010	-0,001848	0,001217	-0,005436
	R-M80	0,084691	0,007095	-0,001224	0,007747	-0,004469	-0,008998
	R-M90	0,000125	0,003101	0,000022	-0,000094	0,003046	-0,000176

Tablo 7.1 Global eksene göre toplam yer değiştirme miktarları (Devamı)

Yük Durumu	Kren Bölümü	Maksimum Yer değiştirme [m]			Minimum Yer değiştirme [m]		
		DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
11	R-Ana-Kiriş	0.000289	0.000149	-0.000272	-0.000357	0.000014	-0.003126
	R-M20	-0.000063	0.000207	0.000020	-0.000167	0.000178	-0.000088
	R-M30	-0.000103	0.000023	-0.000053	-0.000406	-0.000028	-0.000250
	R-M30B	-0.000114	0.000194	-0.000082	-0.000400	0.000098	-0.000282
	R-M40	-0.000360	0.000151	-0.000570	-0.001837	0.000072	-0.000976
	T-M50	-0.000581	0.000144	-0.000165	-0.001856	-0.000001	-0.000592
	R-M60	-0.000321	0.000136	-0.000175	-0.000654	0.000085	0.000136
	R-M80	0.000260	0.000015	-0.000066	0.000023	-0.000005	-0.000066
	R-M90	0.000050	0.000202	0.000027	-0.000105	0.000198	-0.000038
12	R-Ana-Kiriş	0.018064	0.000104	-0.001386	0.015822	0.000058	-0.011999
	R-M20	0.000303	0.000113	0.000041	0.000130	0.000098	-0.000076
	R-M30	0.000679	0.000013	0.000089	0.000235	-0.000015	-0.000103
	R-M30B	0.000680	0.000107	0.000092	0.000236	0.000054	-0.000122
	R-M40	0.015818	0.000087	0.000725	0.007033	0.000040	-0.000676
	T-M50	0.005670	0.000079	0.000722	0.001002	-0.000001	-0.000458
	R-M60	0.001019	0.000075	-0.000025	0.000549	0.000046	-0.000259
	R-M80	0.017459	0.000101	0.000158	0.001557	-0.000030	-0.000715
	R-M90	0.000211	0.000111	0.000050	-0.000081	0.000109	-0.000054
13	R-Ana-Kiriş	0.004925	0.000127	-0.000395	0.004142	0.000025	-0.003536
	R-M20	0.000088	0.000019	0.000012	0.000038	0.000017	-0.000018
	R-M30	0.000205	0.000002	0.000032	0.000070	-0.000003	-0.000017
	R-M30B	0.000201	0.000018	0.000031	0.000069	0.000009	-0.000021
	R-M40	0.004236	0.000023	0.000224	0.001970	0.000007	-0.000129
	T-M50	0.001612	0.000012	0.000224	0.000297	-0.000001	-0.000092
	R-M60	0.000299	0.000013	0.000009	0.000163	0.000008	0.000013
	R-M80	0.004784	0.000187	-0.000177	0.000446	-0.000056	-0.000861
	R-M90	0.000061	0.000018	0.000015	-0.000024	0.000018	-0.000015
21	R-Ana-Kiriş	0.002571	0.001325	-0.002415	-0.003170	0.000121	-0.027777
	R-M20	-0.000560	0.001836	0.000181	-0.001480	0.001583	-0.000778
	R-M30	-0.000917	0.000209	-0.000472	-0.003613	-0.000246	-0.002218
	R-M30B	-0.001011	0.001724	-0.000728	-0.003559	0.000868	-0.002509
	R-M40	-0.003200	0.001345	-0.005063	-0.016325	0.000637	-0.008673
	T-M50	-0.005167	0.001282	-0.001471	-0.016497	-0.000006	-0.005265
	R-M60	-0.002857	0.001211	-0.001552	-0.005812	0.000751	-0.002995
	R-M80	0.002312	0.000136	-0.000143	0.000207	-0.000042	-0.000586
	R-M90	0.000444	0.001797	0.000238	-0.000936	0.001762	-0.000334

Tablo 7.1 Global eksene göre toplam yer değiştirme miktarları (Devamı)

Yük Durumu	Kren Bölümü	Maksimum Yer değiştirme [m]			Minimum Yer değiştirme [m]		
		DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
22	R-Ana-Kiriş	0.160543	0.000925	-0.012316	0.140617	0.000514	-0.106640
	R-M20	0.002690	0.001008	0.000367	0.001152	0.000869	-0.000675
	R-M30	0.006037	0.000114	0.000789	0.002091	-0.000135	-0.000918
	R-M30B	0.006047	0.000947	0.000814	0.002096	0.000476	-0.001082
	R-M40	0.140582	0.000771	0.006442	0.062506	0.000353	-0.006009
	T-M50	0.050389	0.000700	0.006413	0.008906	-0.000006	0.000700
	R-M60	0.009055	0.000664	-0.000219	0.004882	0.000413	-0.002304
	R-M80	0.155164	0.000895	0.001403	0.013840	0.000263	-0.006358
	R-M90	0.001872	0.000986	0.000440	-0.000718	0.000967	-0.000476
23	R-Ana-Kiriş	0.043772	0.001132	-0.003510	0.036811	0.000226	-0.031429
	R-M20	0.000781	0.000171	0.000110	0.000335	0.000148	-0.000163
	R-M30	0.001818	0.000019	0.000281	0.000626	-0.000023	-0.000155
	R-M30B	0.001783	0.000161	0.000279	0.000609	0.000081	-0.000184
	R-M40	0.037648	0.000206	0.001993	0.017511	0.000067	-0.001146
	T-M50	0.014323	0.000111	0.001987	0.002643	-0.000006	-0.000814
	R-M60	0.002661	0.000112	0.000081	0.001445	0.000070	-0.000511
	R-M80	0.042516	0.001662	-0.001575	0.003964	-0.000494	0.001662
	R-M90	0.000539	0.000167	0.000130	-0.000211	0.000164	-0.000136
30	R-Ana-Kiriş	0.000882	0.024017	0.000733	-0.000585	0.008380	-0.001297
	R-M20	-0.000016	0.000611	0.000006	-0.000097	0.000560	-0.000119
	R-M30	0.000190	0.000131	0.000374	-0.000024	0.000052	0.000050
	R-M30B	0.000006	0.000583	-0.000110	-0.000179	0.000406	-0.000431
	R-M40	0.000470	0.015634	0.001236	-0.000505	0.000984	-0.001356
	T-M50	0.000897	0.000313	0.001175	-0.000895	-0.001067	-0.001328
	R-M60	0.000056	0.000523	-0.000298	-0.000215	0.000256	-0.000715
	R-M80	0.001353	0.006820	0.006820	-0.001372	0.000528	0.006820
	R-M90	0.000036	0.000601	0.000014	-0.000067	0.000592	-0.000031
31	R-Ana-Kiriş	0.093612	0.000040	0.000923	0.091439	-0.000053	-0.005417
	R-M20	0.004638	-0.000021	0.000631	0.002164	-0.000046	-0.000625
	R-M30	0.010422	0.000040	0.001759	0.003732	-0.000027	0.000011
	R-M30B	0.010411	0.000007	0.001759	0.003726	-0.000063	0.000017
	R-M40	0.091251	0.000086	0.006316	0.059753	-0.000130	0.000033
	T-M50	0.015473	0.000041	0.006512	0.015473	-0.000065	-0.001237
	R-M60	0.015718	.000010	0.001410	0.008548	0.015718	-0.001311
	R-M80	0.089035	0.000027	0.001460	0.007881	-0.000023	-0.001677
	R-M90	0.003333	-0.000025	0.000726	-0.001148	0.003333	-0.000025

Tablo 7.1 Global eksene göre toplam yer değiştirme miktarları (Devamı)

Yük Durumu	KREN BÖLÜMÜ	Maksimum Yer değiştirme [m]			Minimum Yer değiştirme [m]		
		DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
32	R-Ana-Kiriş	0.092646	0.000040	0.000977	0.090570	-0.000053	-0.005112
	R-M20	0.004617	-0.000021	0.000628	0.002154	-0.000046	-0.000622
	R-M30	0.010373	0.000040	0.001750	0.003715	-0.000027	0.000011
	R-M30B	0.010362	0.000007	0.001750	0.003710	-0.000063	0.000017
	R-M40	0.059317	0.059317	0.006260	0.059317	0.059317	0.000040
	T-M50	0.052058	0.000041	0.006456	0.015400	0.052058	-0.001230
	R-M60	0.015646	0.015646	0.001402	0.008508	0.015646	-0.001304
	R-M80	0.088181	0.000027	0.001445	0.007805	-0.000023	-0.001662
	R-M90	-0.001143	-0.000025	0.000723	-0.001143	-0.000046	-0.000722
33	R-Ana-Kiriş	0.092240	0.000040	0.001000	0.090205	-0.000053	-0.004820
	R-M20	0.004608	-0.000021	0.000627	0.002151	-0.000046	-0.000621
	R-M30	0.010353	0.000040	0.001746	0.003708	-0.000027	0.000011
	R-M30B	0.010342	0.000007	0.001746	0.003703	-0.000063	0.000017
	R-M40	0.090018	0.000086	0.006237	0.059134	-0.000130	0.000043
	T-M50	0.051906	0.000041	0.006432	0.015370	-0.000065	-0.001226
	R-M60	0.008491	0.000010	0.001399	0.008491	-0.000043	-0.001301
	R-M80	0.087803	0.000027	0.001439	0.007772	-0.000023	-0.001656
	R-M90	0.003313	-0.000025	0.000721	-0.001140	-0.000046	-0.000721
35	R-Ana-Kiriş	0.000577	0.021298	0.000934	-0.000392	0.001169	-0.001572
	R-M20	0.000195	0.000405	0.000010	0.000121	0.000359	-0.000107
	R-M30	-0.000175	0.000096	0.000307	-0.000360	0.000038	0.000058
	R-M30B	0.000360	0.000384	-0.000070	0.000175	0.000232	-0.000359
	R-M40	0.000056	0.017211	0.001523	-0.000098	0.000056	-0.001613
	T-M50	0.000528	0.000034	0.001374	-0.000520	-0.001715	0.000034
	R-M60	0.000529	0.000339	-0.000266	0.000276	-0.000000	-0.000732
	R-M80	0.000819	-0.000058	0.000738	-0.000844	-0.002888	-0.000757
	R-M90	0.000173	0.000396	0.000020	0.000028	0.000389	0.000396
36	R-Ana-Kiriş	0.000912	0.020686	0.000610	-0.000575	0.004616	-0.001037
	R-M20	-0.000101	0.000233	0.000023	-0.000247	0.000201	-0.000082
	R-M30	0.000468	0.000052	0.000225	0.000177	0.000007	0.000035
	R-M30B	-0.000184	0.000213	-0.000075	0.000456	0.000116	-0.000255
	R-M40	0.000563	0.010936	0.000959	-0.000562	-0.000021	-0.001010
	T-M50	0.001067	0.000042	0.000042	-0.001062	-0.001430	0.000042
	R-M60	-0.000115	0.000213	-0.000107	-0.000610	-0.000035	-0.000463
	R-M80	0.001321	0.002931	0.000623	-0.001320	-0.000509	0.002931
	R-M90	0.000051	0.000227	0.000032	-0.000199	0.000220	-0.000041

Tablo 7.1 Global eksene göre toplam yer değiştirme miktarları (Devamı)

Yük Durumu	KREN BÖLÜMÜ	Maksimum Yer değiştirme [m]			Minimum Yer değiştirme [m]		
		DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
37	R-Ana-Kiriş	0.000221	0.009991	0.000394	-0.000221	0.003771	-0.000717
	R-M20	-0.000056	0.000047	0.000012	-0.000125	0.000038	-0.000026
	R-M30	0.000239	0.000011	0.000064	0.000101	-0.000004	0.000010
	R-M30B	-0.000100	0.000040	-0.000019	-0.000231	0.000015	-0.000071
	R-M40	0.000271	0.003458	0.000340	-0.000216	-0.000156	-0.000350
	T-M50	0.000471	-0.000006	0.000283	-0.000457	-0.000568	-0.000292
	R-M60	-0.000075	0.000049	-0.000011	-0.000313	-0.000042	-0.000137
	R-M80	0.000420	0.006009	-0.000671	-0.000391	0.000371	-0.000671
	R-M90	0.000024	0.000045	0.000016	-0.000103	0.000043	-0.000018
41	R-Ana-Kiriş	0.091027	0.000039	0.000897	0.088914	-0.000051	-0.005268
	R-M20	0.004510	-0.000021	0.000613	0.002104	-0.000045	-0.000608
	R-M30	0.010135	0.000039	0.001711	0.003629	-0.000026	0.000011
	R-M30B	0.010124	0.000007	0.001710	0.003623	-0.000062	0.000016
	R-M40	0.088731	0.000084	0.006142	0.058103	-0.000126	0.000032
	T-M50	0.050973	0.000040	0.006332	0.015046	-0.000063	-0.001203
	R-M60	0.015284	0.000009	0.001371	0.008312	-0.000042	-0.001275
	R-M80	0.086576	0.000026	0.001419	0.007663	-0.000023	-0.001631
	R-M90	0.003241	-0.000025	0.000706	-0.001117	-0.000045	-0.000706
42	R-Ana-Kiriş	0.090088	0.000039	0.000950	0.088069	-0.000051	-0.004971
	R-M20	0.004490	-0.000021	0.000610	0.002095	-0.000045	-0.000605
	R-M30	0.010087	0.000039	0.001702	0.003613	-0.000026	0.000011
	R-M30B	0.010076	0.000007	0.001702	0.003607	-0.000062	0.000016
	R-M40	0.087887	0.000084	0.000039	0.057679	-0.000126	0.000039
	T-M50	0.050621	0.000040	0.006277	0.014975	-0.000063	-0.001196
	R-M60	0.015214	0.000009	0.001363	0.008273	-0.000042	-0.001268
	R-M80	0.085746	0.000026	0.001405	0.007590	-0.000023	-0.001617
	R-M90	0.003227	-0.000025	0.000703	-0.001111	0.003227	-0.000702
43	R-Ana-Kiriş	0.089693	0.000039	0.000972	0.087715	-0.000051	-0.004687
	R-M20	0.004481	-0.000021	0.000609	0.002091	-0.000045	-0.000604
	R-M30	0.010067	0.000039	0.001698	0.003606	-0.000026	0.000011
	R-M30B	0.010056	0.000007	0.001698	0.003601	-0.000062	0.000016
	R-M40	0.087532	0.000084	0.006064	0.057501	-0.000126	0.000042
	T-M50	0.050473	0.000040	0.006254	0.014945	-0.000063	-0.001192
	R-M60	0.015184	0.000009	0.001360	0.008257	-0.000042	-0.001265
	R-M80	0.085379	0.000026	0.001399	0.007557	-0.000023	-0.001610
	R-M90	0.003221	-0.000025	0.000701	-0.001109	-0.000045	-0.000701

Tablo 7.1 Global eksene göre toplam yer değiştirme miktarları (Devamı)

Yük durumu	Kren parçası	Maksimum Yer değiştirme [m]			Minimum Yer değiştirme [m]		
		DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
45	R-Ana-Kiriş	0.000561	0.020710	0.000908	-0.000382	0.001137	-0.001529
	R-M20	0.000190	0.000393	0.000010	0.000118	0.000349	-0.000104
	R-M30	-0.000170	0.000093	0.000299	-0.000350	0.000037	0.000057
	R-M30B	0.000350	0.000373	-0.000068	0.000170	0.000225	-0.000349
	R-M40	0.000055	0.016736	0.001481	-0.000095	0.000713	-0.001568
	T-M50	0.000514	-0.001668	0.001336	-0.000505	-0.001668	-0.001440
	R-M60	0.000514	0.000330	-0.000259	0.000268	-0.000000	-0.000711
	R-M80	0.000796	-0.000057	0.000717	-0.000820	-0.002808	-0.000737
	R-M90	0.000168	0.000385	0.000019	-0.000027	0.000378	-0.000030
46	R-Ana-Kiriş	0.000887	0.020114	0.000594	-0.000560	0.004489	-0.001008
	R-M20	-0.000099	0.000227	0.000023	-0.000240	0.000196	-0.000080
	R-M30	0.000456	0.000050	0.000218	0.000172	0.000007	0.000034
	R-M30B	-0.000179	0.000207	-0.000073	-0.000443	0.000112	-0.000248
	R-M40	0.000547	0.010634	0.000933	-0.000546	-0.000021	-0.000982
	T-M50	0.001038	0.000041	-0.000924	-0.001033	-0.001391	-0.000924
	R-M60	-0.000112	0.000207	-0.000104	-0.000593	-0.000034	-0.000450
	R-M80	0.001284	0.002850	0.002850	-0.001283	-0.000495	0.002850
	R-M90	0.000049	0.000220	0.000032	-0.000193	0.000214	-0.000040
47	R-Ana-Kiriş	0.000215	0.009715	0.000383	-0.000215	0.003667	-0.000697
	R-M20	-0.000054	0.000046	0.000012	-0.000122	0.000037	-0.000025
	R-M30	0.000232	0.000010	0.000062	0.000098	-0.000004	0.000009
	R-M30B	-0.000097	0.000039	-0.000018	-0.000224	0.000014	-0.000069
	R-M40	0.000264	0.003362	0.000330	-0.000210	0.000152	-0.000340
	T-M50	0.000458	-0.000553	0.000275	-0.000444	-0.000553	-0.000284
	R-M60	-0.000073	0.000048	-0.000011	-0.000304	-0.000041	-0.000133
	R-M80	0.000408	0.005843	0.005843	-0.000380	.000360	0.005843
	R-M90	0.000024	0.000024	0.000024	-0.000100	0.000024	0.000024
51	R-Ana-Kiriş	0.095631	0.000040	0.001240	0.093706	-0.000046	-0.004524
	R-M20	0.005588	-0.000009	0.000743	0.002660	-0.000043	-0.000736
	R-M30	0.012435	0.000057	0.002034	0.004526	-0.000036	0.000010
	R-M30B	0.012425	0.000023	0.002033	0.004521	-0.000074	0.000015
	R-M40	0.093539	0.000110	0.006353	0.063994	-0.000145	0.000211
	T-M50	0.056803	0.000055	0.006588	0.018364	-0.000072	-0.001392
	R-M60	0.018822	0.000033	0.001590	0.010244	-0.000054	-0.001502
	R-M80	0.092598	0.000056	0.001997	0.012487	-0.000050	-0.002097
	R-M90	0.004063	-0.000012	0.000858	-0.001343	0.004063	-0.000858

7.2 Gerilme Analizi Sonuçları

Statik analiz belki de mühendisler tarafından kullanılan en yaygın analiz türüdür. Yüklerin anlık olarak uygulandığı farz edildiğı için, zamana bağılı herhangi bir etki

ihmal edilmiştir. Lineer statik analizde yüklü yapının uygulanan toplam gerilmeyi dengelemek için anlık olarak bir iç gerilme yarattığı düşünülür. Lineer analizde tüm yapısal cevaplar statik olup, dolayısıyla geometri ve malzemenin cevapları da lineerdir. Yani Hook kanununda olduğu üzere malzeme lineer olarak davranır [3].

Sonlu elemanlar programlarının çoğu statik analiz için aşağıdaki eşitliği kullanırlar;

$$[K] \{U\} = \{R\} \quad (7.1)$$

Burada;

$[K]$: Rijitlik matrisi

$\{U\}$: Yer değiştirme vektörü

$\{R\}$: Uygulanan yük vektörü

7.2.1 Mukavemet ve Stabilité Açısından Kren Elemanlarının Tasarımı

Metal yapı parçalarının mukavimliği ve stabil olması kadar krenin bir bütün olarak da mukavemeti ve stabilitesi önemlidir. Bununla beraber krendeki mekanizmalar şayet aşağıdaki şartları sağladığı takdirde güvenlidir;

Kuvvetlerin eşitliği

$$S = r.S_n \quad (7.2)$$

Momentlerin eşitliği

$$M = r.M_n \quad (7.3)$$

Gerilmelerin Eşitliği

$$\sigma = r.k.\sigma_n \quad (7.4)$$

S : Uygulanan yükler tarafından oluşturulan kuvvet

M : Uygulanan yüklerin meydana getirdiği moment

σ : Uygulanan yükler tarafından meydana çıkan gerilme

R : İşletme şartları faktörü

k : Homojenlik faktörü

S_n : İzin verilen kuvvet

M_n : İzin verilen moment

σ_n : İzin verilen mukavemet; çelikler için çekme ve eğilme durumlarında akma mukavemeti olarak alınır [10].

Uygulanan yükler belli yüklerin aşırı yükleme faktörüyle çarpımından elde edilirler. Bu aşırı yükleme faktörü ise krenin işletme koşullarına ve mekanizmalarına bağlıdır .

İşletme koşulları faktörü r ise;

$$r = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \text{ 'dir.} \quad (7.5)$$

r_1 : Kren emniyet faktörü

r_2 : Hasar lokalizasyon faktörü

r_3 : Konstrüksiyon hata faktörü

7.2.2 Kren Bileşenlerinin Kapasite Araştırması Ve Eleman Gerilmeleri

Belirlenen yük kombinasyonları altında tüm kren ve komponentlerinin maksimum normal, minimum normal ve kayma gerilmeleri Von Mises metoduna göre hesaplanmıştır. Fakat data dosyası çok büyük olacağı için önemli kren komponentleri için bir tablo oluşturulmuş ve gerilme değerleri verilmiştir (Tablo 7.2). Bu kren komponentleri sırasıyla şunlardır;

- | | |
|---------------|------------------------------|
| - R-Ana Kiriş | : Ana Kiriş |
| - R-M20 | : Alt Dengeleyici Kiriş |
| - R-M30 | : Üst Dengeleyici Kiriş |
| - R-M30B | : Üst Dengeleyici Kiriş – 2 |
| - R-M40 | : Rijit Ayak Kolonu |
| - T-M50 | : Rijit Ayak Eğik Elemanları |
| - R-M60 | : Rijit Kolon Uç Taşıyıcı |
| - R-M80 | : Menteşeli Ayak |
| - R-M90 | : Boji |

Tablo 7.2: Kren komponentlerinin maksimum Von Mises gerilme değerleri

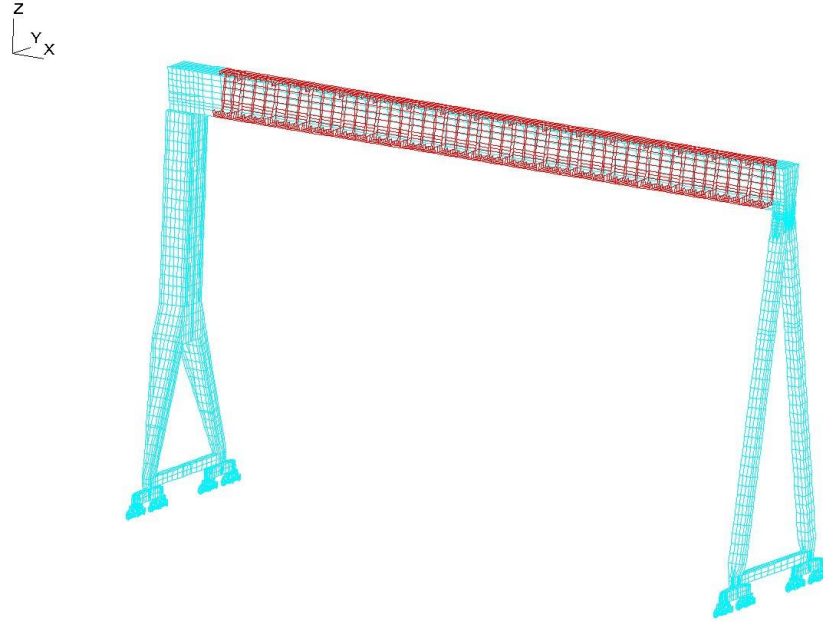
Yük Kombinasyon No	Önemli Kren Komponentlerinin Tüm Yük Kombinasyonlarına Göre Maksimum Von Mises Gerilme Dağılımları [kN/m ²]			
	R-Ana Kiriş	R-M20	R-M30	R-M30B
101	2,093E+04	3,992E+04	5,461E+04	5,579E+04
102	6,404E+04	2,192E+04	2,999E+04	3,061E+04
103	2,271E+04	3,720E+03	5,102E+03	5,166E+03
110	4,688E+04	6,212E+04	8,041E+04	8,211E+04
111	6,016E+04	1,095E+05	1,453E+05	1,483E+05
112	1,232E+05	8,817E+04	1,161E+05	1,185E+05
113	6,351E+04	6,665E+04	8,672E+04	8,844E+04
121	7,363E+04	1,416E+05	1,515E+05	2,049E+05
122	1,504E+05	1,157E+05	1,159E+05	1,684E+05
123	7,629E+04	8,952E+04	8,001E+04	1,316E+05
125	6,620E+04	1,420E+05	1,321E+05	1,856E+05
126	1,435E+05	1,161E+05	9,667E+04	1,491E+05
127	7,104E+04	9,010E+04	6,116E+04	1,123E+05
131	8,029E+04	1,449E+05	1,807E+05	2,324E+05
132	1,563E+05	1,190E+05	1,475E+05	1,986E+05
133	8,118E+04	9,277E+04	1,141E+05	1,644E+05
135	7,712E+04	1,600E+05	1,236E+05	2,330E+05
136	1,559E+05	1,307E+05	9,397E+04	1,905E+05
137	7,967E+04	1,015E+05	6,246E+04	1,494E+05
141	6,531E+04	1,270E+05	1,693E+05	1,728E+05
142	1,232E+05	8,817E+04	1,161E+05	1,185E+05
143	6,980E+04	6,829E+04	8,896E+04	9,072E+04
151	7,547E+04	1,457E+05	1,653E+05	2,209E+05
152	1,519E+05	1,196E+05	1,343E+05	1,894E+05
153	7,506E+04	9,343E+04	1,065E+05	1,578E+05
155	6,468E+04	1,524E+05	1,451E+05	2,009E+05
156	1,421E+05	1,265E+05	1,176E+05	1,664E+05
157	7,008E+04	1,004E+05	9,399E+04	1,326E+05

Tablo 7.3: Kren komponentlerinin maksimum Von Mises gerilme değerleri

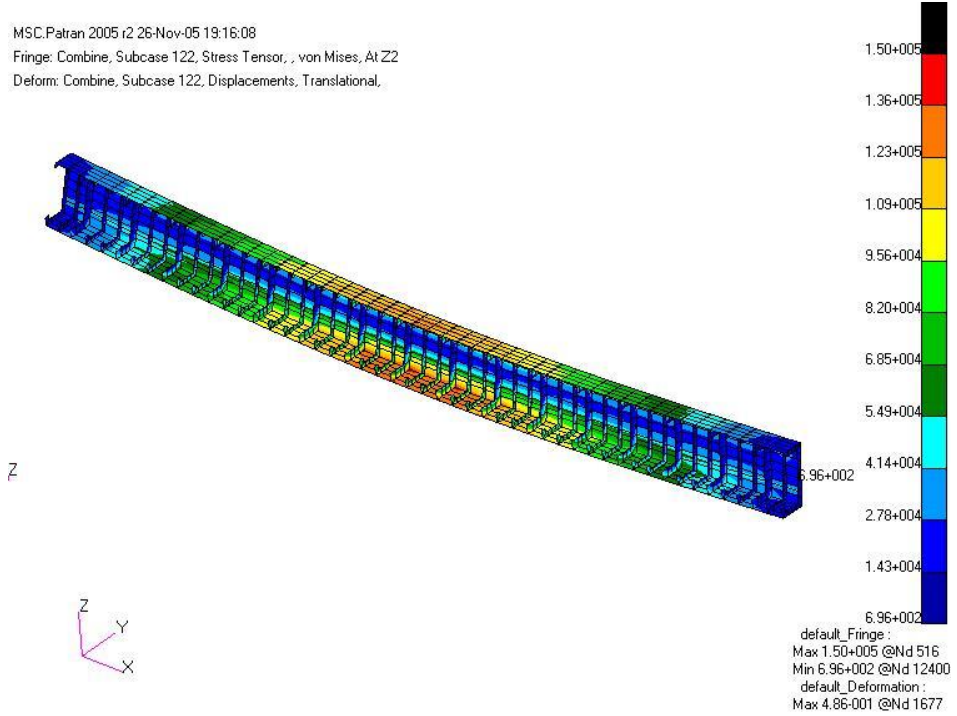
Yük Kombinasyon No	Önemli Kren Komponentlerinin Tüm Yük Kombinasyonlarına Göre Maksimum Von Mises Gerilme Dağılımları [kN/m ²]				
	R-M40	T-M50	R-M60	R-M80	R-M90
101	2,575E+04	3,222E+04	5,312E+04	2,892E+03	4,187E+04
102	1,413E+04	1,766E+04	2,909E+04	1,953E+04	2,295E+04
103	2,371E+03	3,027E+03	5,078E+03	3,637E+04	3,817E+03
110	2,859E+04	4,626E+04	7,686E+04	4,278E+04	6,632E+04
111	6,335E+04	9,043E+04	1,409E+05	4,600E+04	1,151E+05
112	4,961E+04	7,343E+04	1,125E+05	6,568E+04	9,268E+04
113	3,572E+04	5,790E+04	8,384E+04	8,559E+04	7,007E+04
121	6,695E+04	9,678E+04	2,382E+05	6,131E+04	1,583E+05
122	5,373E+04	7,931E+04	2,036E+05	8,544E+04	1,309E+05
123	4,038E+04	6,783E+04	1,688E+05	1,098E+05	1,032E+05
125	9,399E+04	1,209E+05	2,170E+05	5,946E+04	1,447E+05
126	7,719E+04	1,003E+05	1,829E+05	8,359E+04	1,185E+05
127	6,023E+04	8,146E+04	1,484E+05	1,080E+05	9,209E+04
131	6,358E+04	1,118E+05	3,411E+05	6,840E+04	1,805E+05
132	6,351E+04	1,007E+05	3,080E+05	9,253E+04	1,535E+05
133	6,338E+04	8,981E+04	2,757E+05	1,169E+05	1,266E+05
135	8,510E+04	1,135E+05	2,743E+05	7,529E+04	1,780E+05
136	6,916E+04	9,293E+04	2,275E+05	1,028E+05	1,441E+05
137	5,248E+04	7,645E+04	1,884E+05	1,301E+05	1,140E+05
141	7,467E+04	1,046E+05	1,643E+05	4,728E+04	1,335E+05
142	4,961E+04	7,343E+04	1,125E+05	6,568E+04	9,268E+04
143	3,676E+04	5,895E+04	8,607E+04	1,016E+05	7,175E+04
151	5,975E+04	1,073E+05	4,059E+05	9,979E+04	9,719E+04
152	4,677E+04	8,776E+04	3,774E+05	1,219E+05	7,004E+04
153	3,356E+04	7,627E+04	3,503E+05	1,393E+05	4,629E+04
155	9,542E+04	1,461E+05	3,948E+05	8,976E+04	2,028E+05
156	7,950E+04	1,255E+05	3,653E+05	1,113E+05	1,754E+05
157	6,633E+04	1,047E+05	3,374E+05	1,339E+05	1,477E+05

7.2.3 Ana Kirişteki Gerilme Değerleri

Ana kirişe ait 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.9-10-11 ve 12'de gösterilmiştir.



Şekil 7.8: Ana kirişin kren üzerindeki yeri

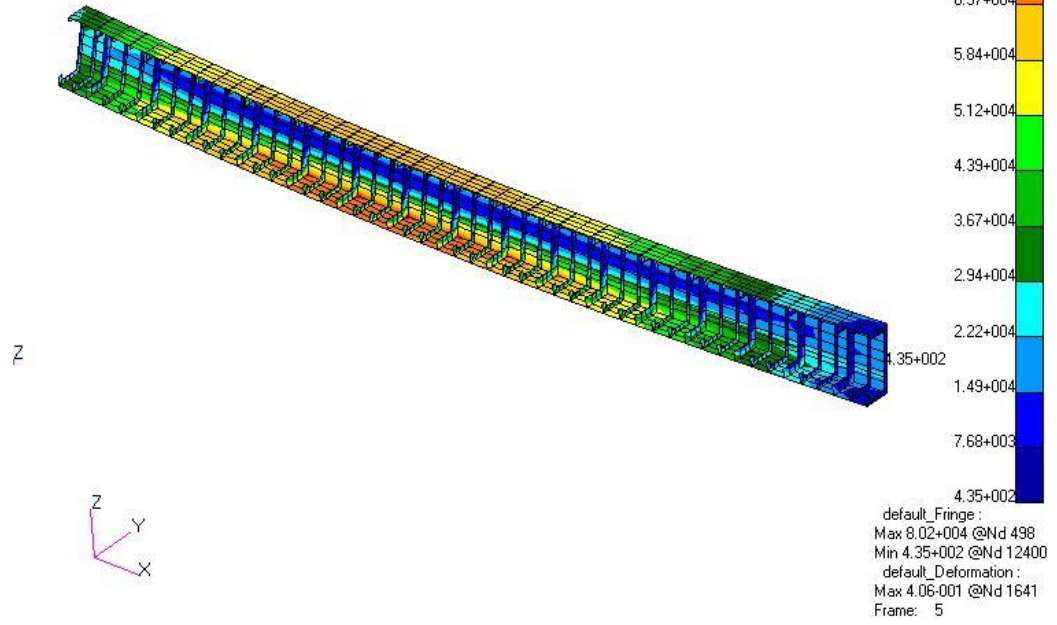


Şekil 7.9: Ana kiriş YK-122

MSC.Patran 2005 (2 26-Nov-05 19:20:15)

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,

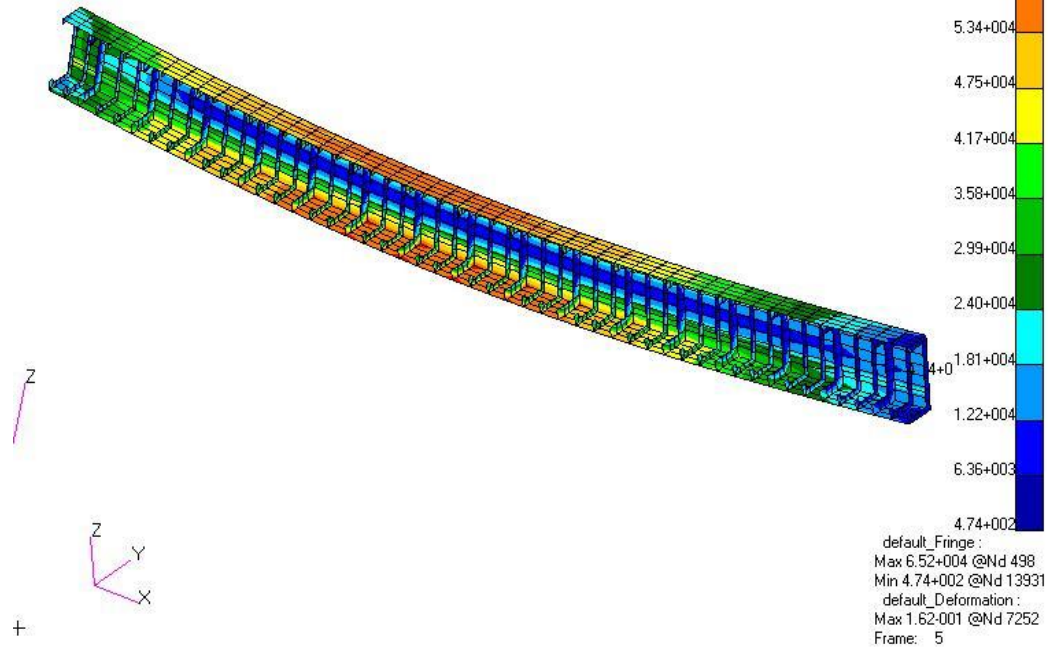


Şekil 7.10: Ana kiriş YK-131

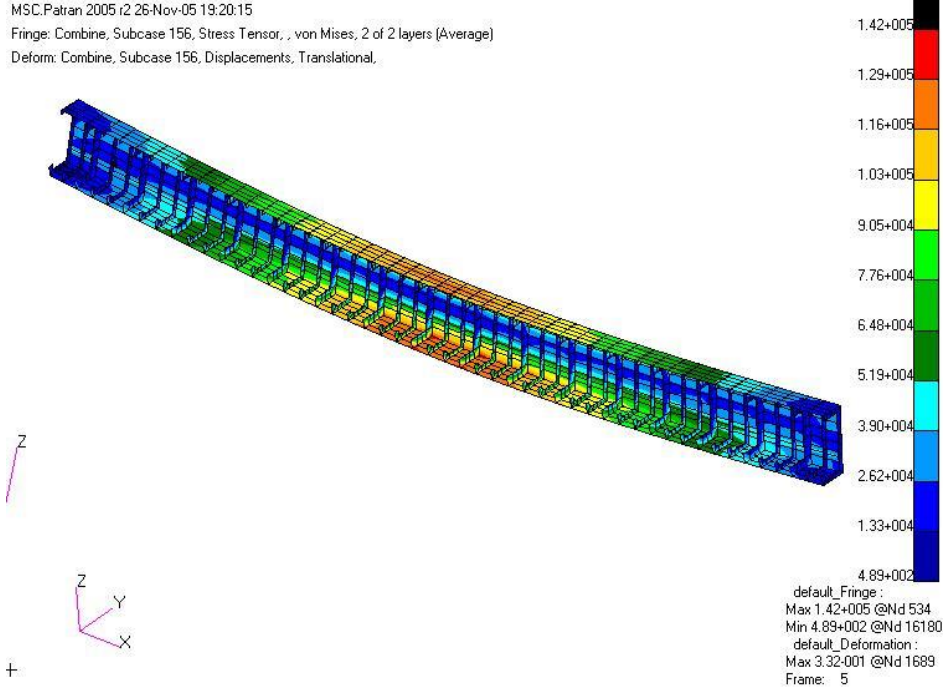
MSC.Patran 2005 (2 26-Nov-05 19:20:15)

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,



Şekil 7.11: Ana kiriş YK-141



Şekil 7.12: Ana kiriş YK-156

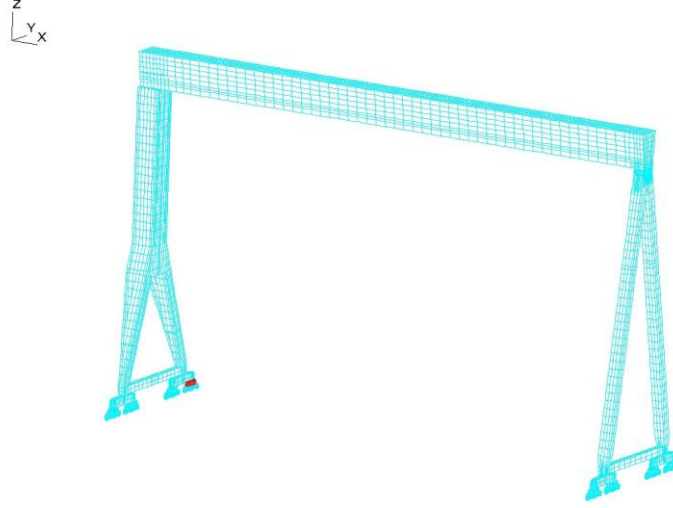
Ana kirişe ait maksimum Von Mises gerilme değerleri tüm yük kombinasyonları için Tablo 7.3’de verilmiştir.

Tablo 7.4: Ana kiriş üzerindeki maksimum Von Mises gerilme değerleri

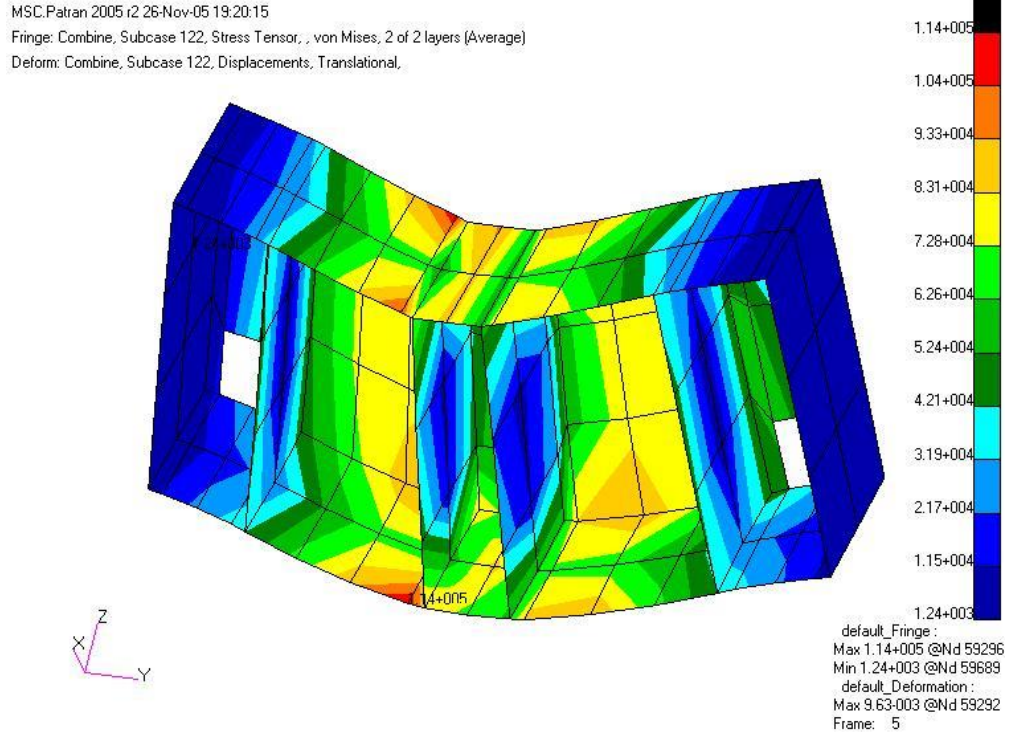
Grup	Kombinasyon	Maksimum Gerilme [kN/m ²]	Düğüm Noktası
0	101	20926	13604
0	102	64045	516
0	103	22706	12316
I	110	46878	534
I	111	60165	516
I	112	123207	516
I	113	63513	134
II	121	73632	498
II	122	150367	516
II	123	76287	552
II	125	66205	516
II	126	143546	516
II	127	71036	552
III	131	80287	498
III	132	156325	516
III	133	81175	534
III	135	77116	498
III	136	155863	516
III	137	79674	552
IV	141	65307	498
IV	142	123207	516
IV	143	69800	134
V	151	75468	498
V	152	151930	516
V	153	75055	534
V	155	64683	516
V	156	142126	534
V	157	70083	552

7.2.4 İkinci Alt Dengeleyici Kirişteki Gerilme Değerleri

İkinci alt dengeleyici kirişe ait 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.14-15-16 ve 17'dedir.



Şekil 7.13: 2 no'lu alt dengeleyici kirişin kren üzerindeki yeri

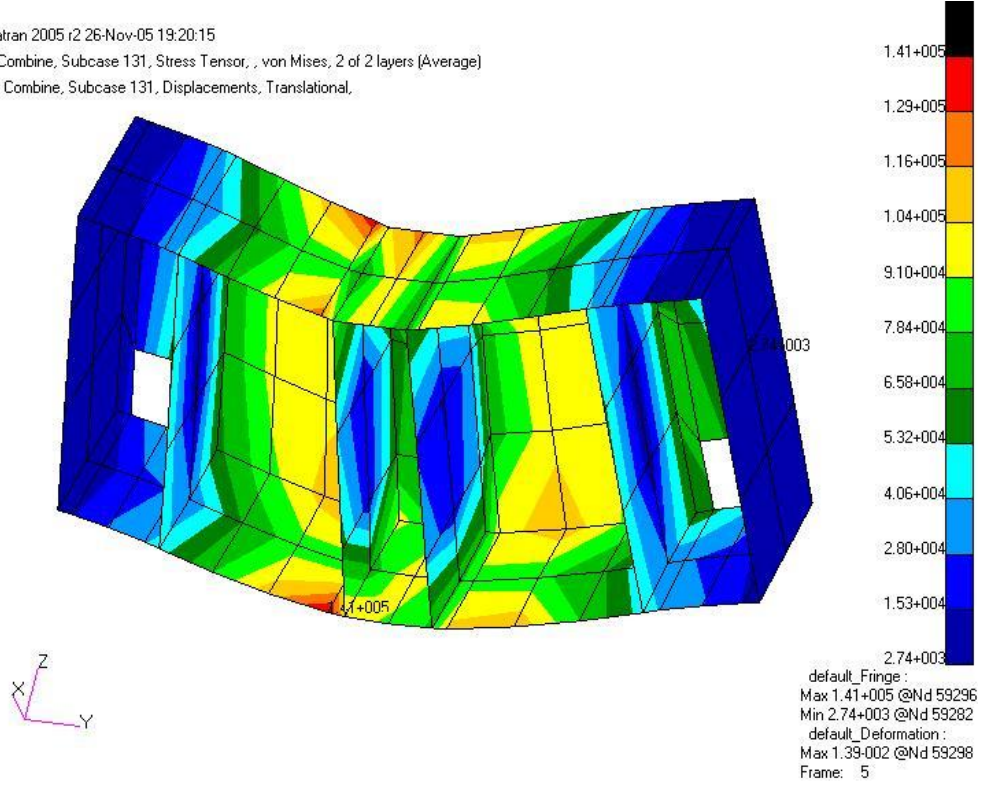


Şekil 7.14: 2 No'lu alt dengeleyici kiriş YK-122

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 19:20:15

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,

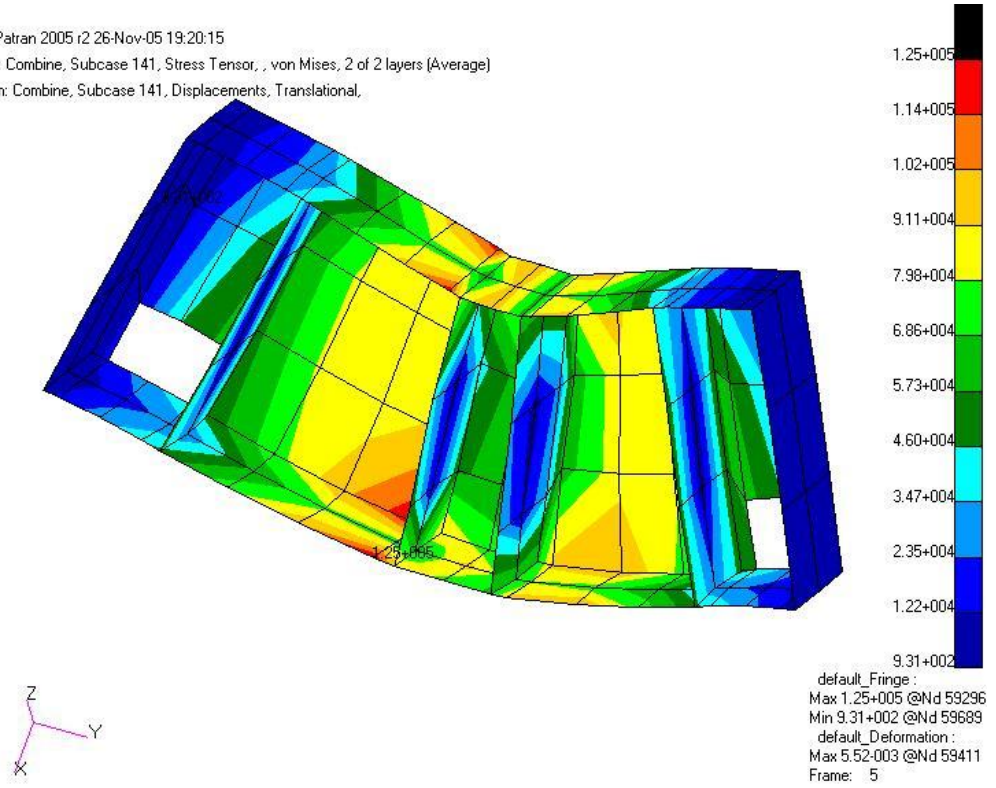


Şekil 7.15: 2 No'lu alt dengeleyici kiriş YK-131

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 19:20:15

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,

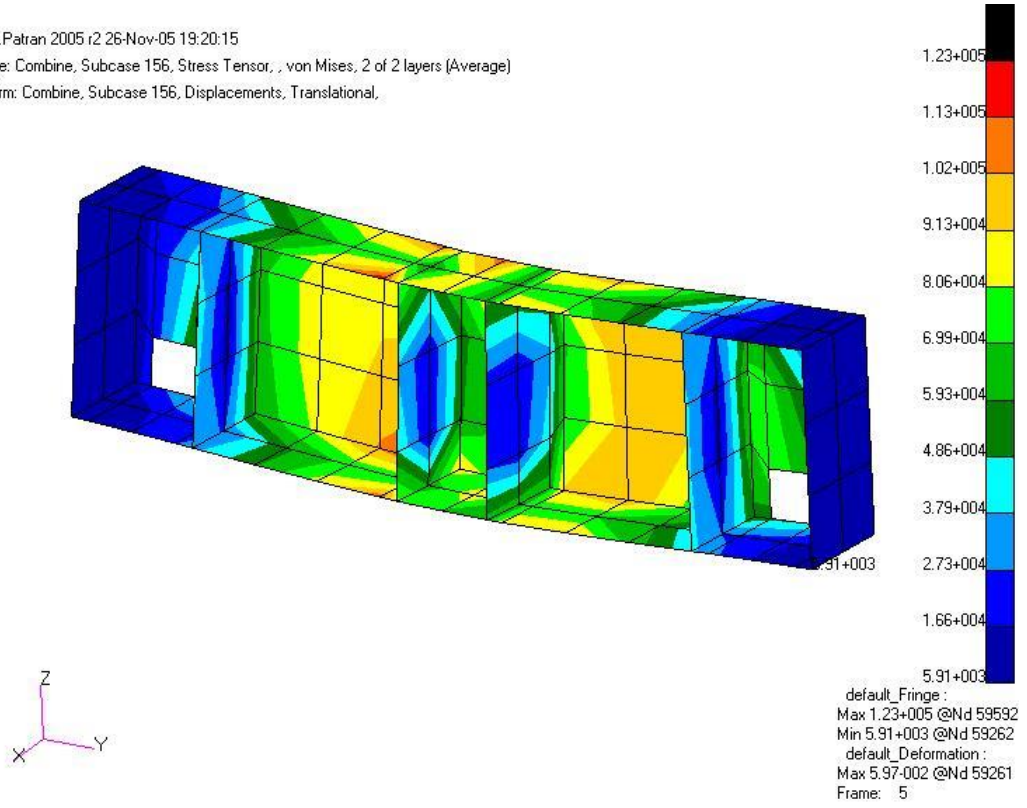


Şekil 7.16 2 No'lu alt dengeleyici kiriş YK-141

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 19:20:15

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

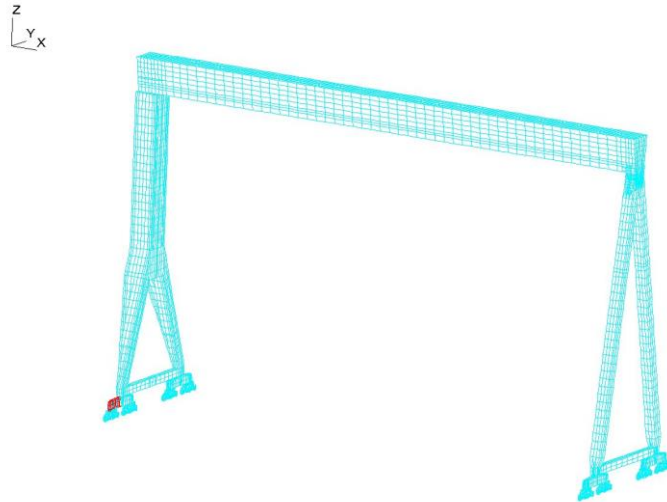
Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



Şekil 7.17: 2 No'lu alt dengeleyici kiriş YK-156

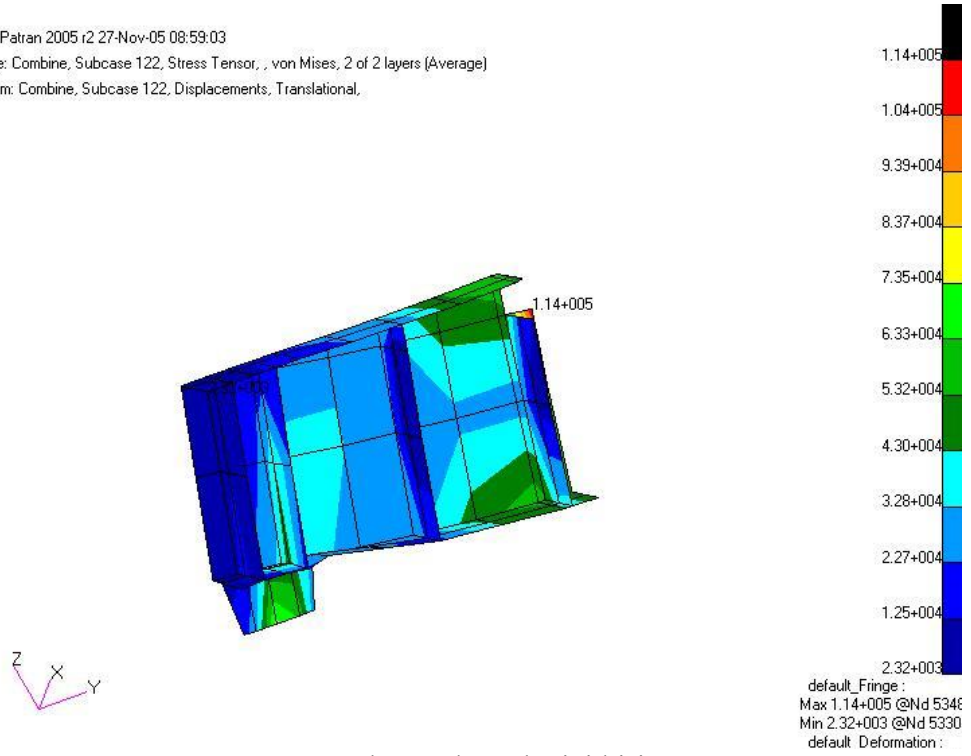
7.2.5 Birinci Üst Dengeleyici Kirişteki Gerilme Değerleri

Birinci üst dengeleyici kirişe ait 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.19-20-21 ve 22'de verilmiştir.



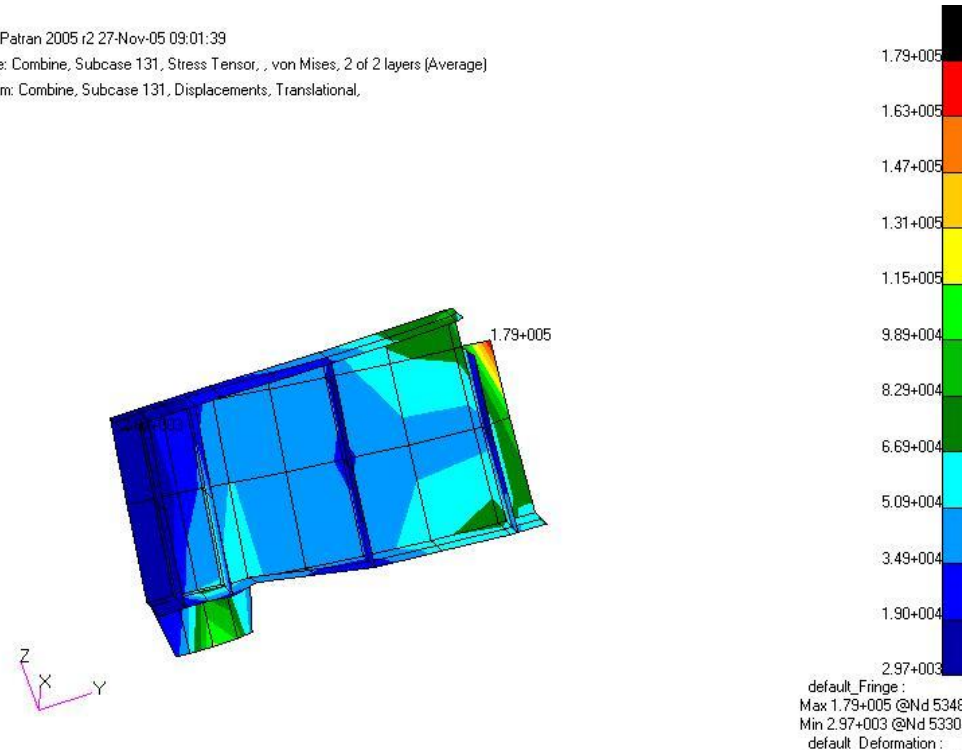
Şekil 7.18: 1 no'lu üst dengeleyici kirişin kren üzerindeki yeri

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 08:59:03
 Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)
 Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational,



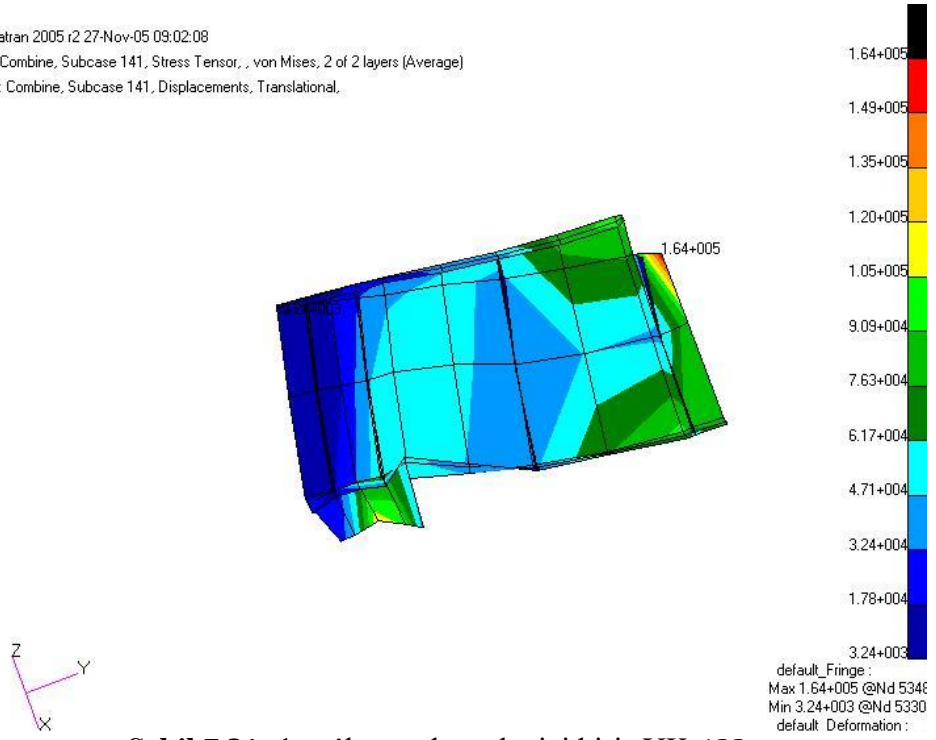
Şekil 7.19: 1 no'lu üst dengeleyici kiriş YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:01:39
 Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)
 Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,



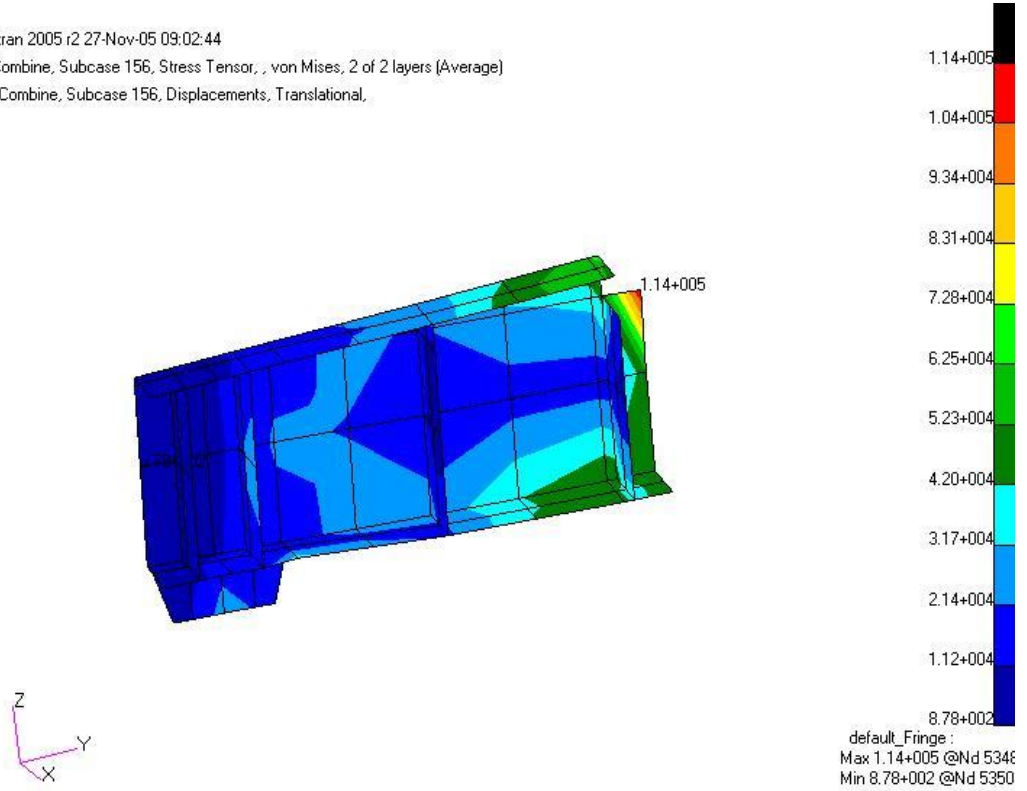
Şekil 7.20: 1 no'lu üst dengeleyici kiriş YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:02:08
 Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)
 Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,



Şekil 7.21: 1 no'lu üst dengeleyici giriş YK-122

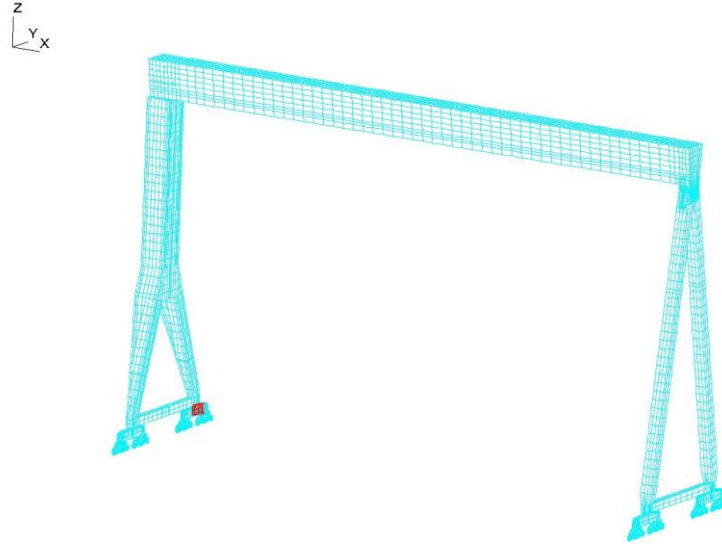
MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:02:44
 Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)
 Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



Şekil 7.22: 1 no'lu üst dengeleyici giriş YK-122

7.2.6 Birinci Alt Dengeleyici Kirişteki Gerilme Değerleri

Birinci alt dengeleyici kirişe ait 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.24-25-26 ve 27'de gösterilmiştir.

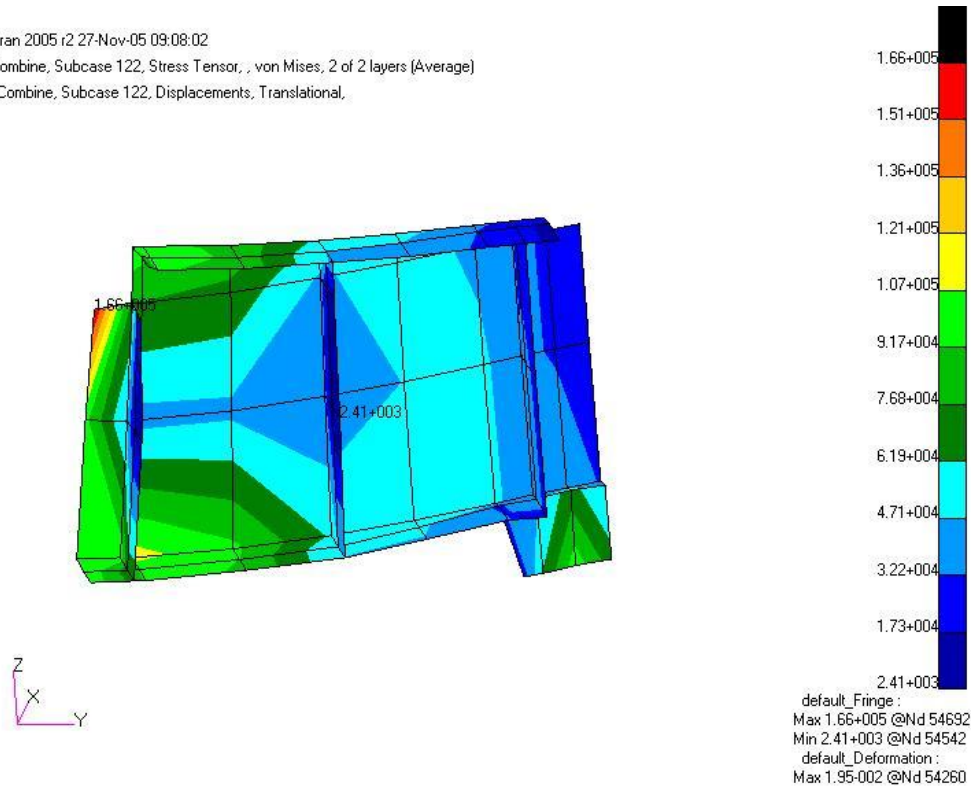


Şekil 7.23: 1 No'lu alt dengeleyici kirişin kren üzerindeki yeri

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:08:02

Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational,

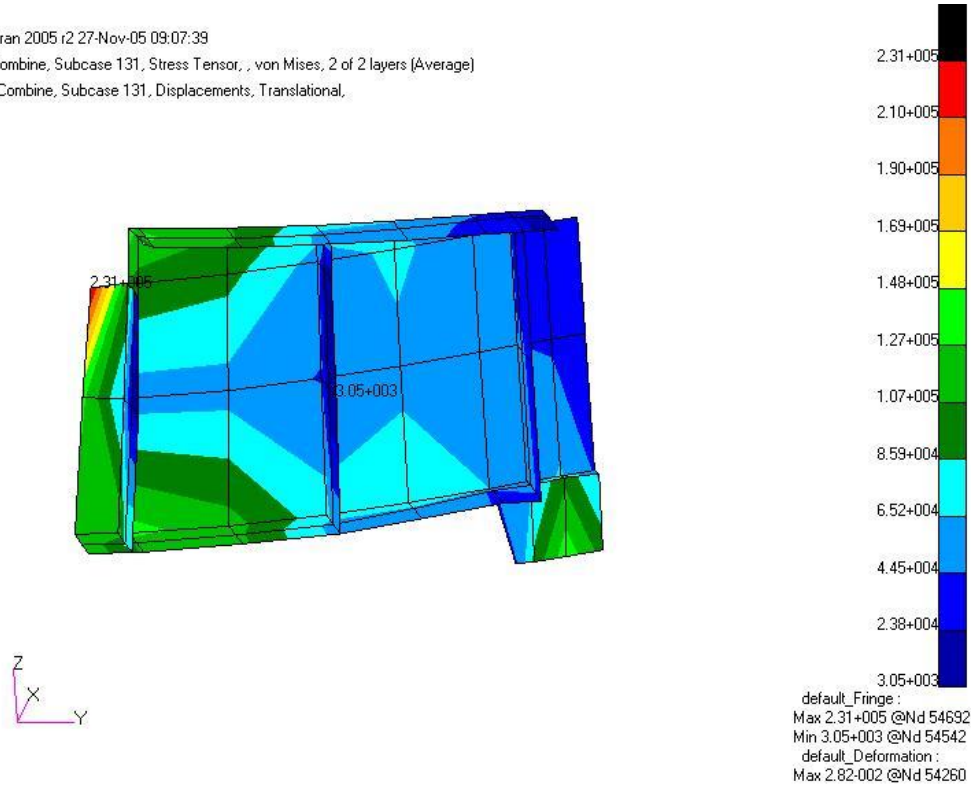


Şekil 7.24: 1 No'lu alt dengeleyici kiriş YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:07:39

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,

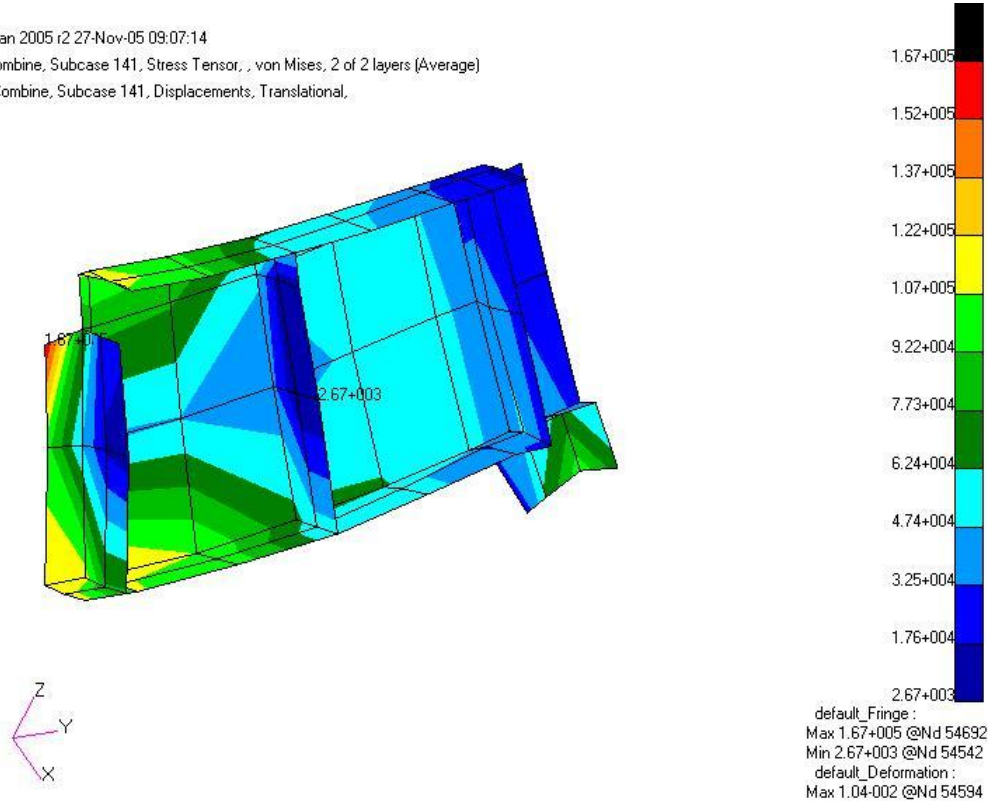


Şekil 7.25:1 No'lu alt dengeleyici kiriş YK-131

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:07:14

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,

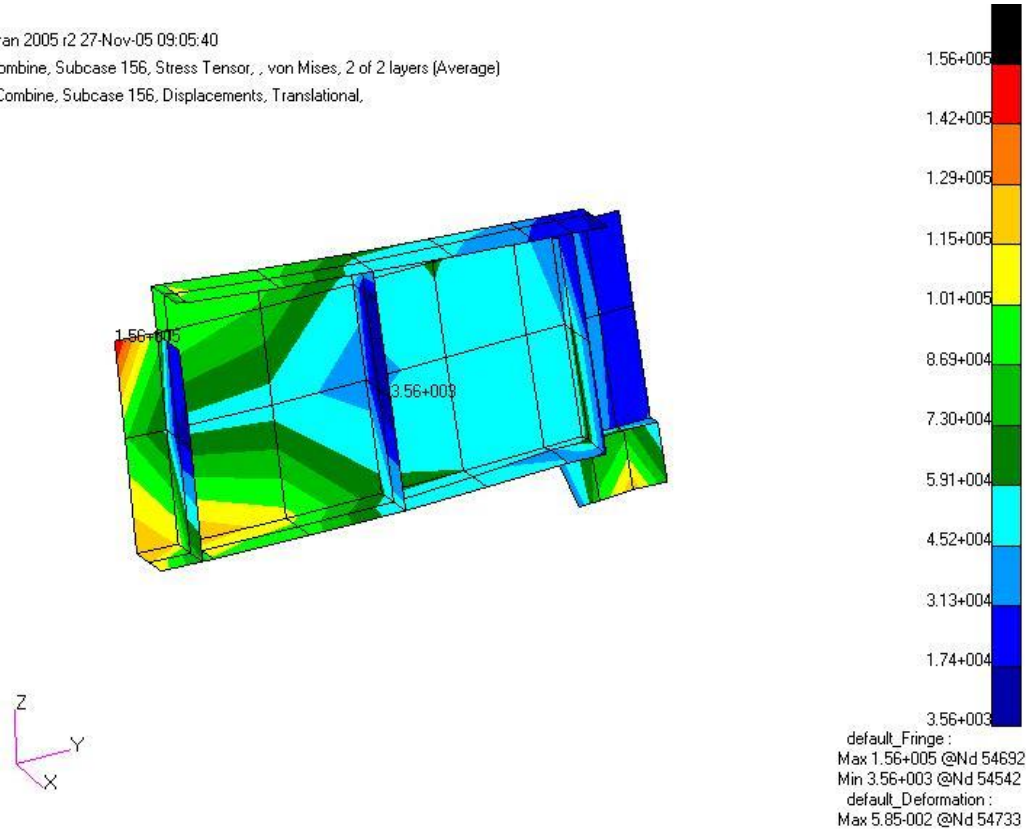


Şekil 7.26: 1 No'lu alt dengeleyici kiriş YK-141

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:05:40

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

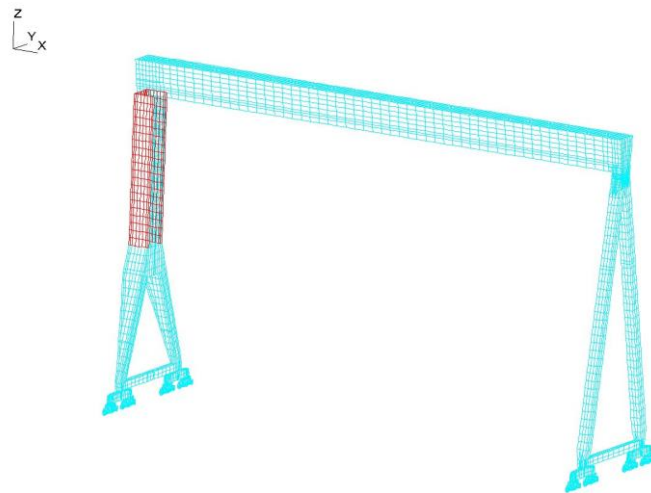
Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



Şekil 7.27: 1 No'lu alt dengeleyici kiriş YK-156

7.2.7 Rijit Ayak Kolonundaki Gerilme Değerleri

Rijit ayak kolonuna ait 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.29-30-31 ve 32'de gösterilmiştir.

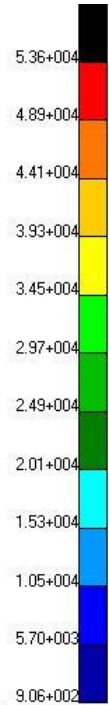
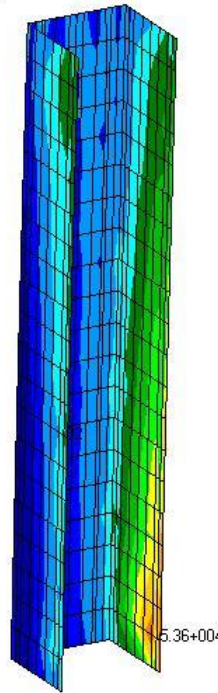


Şekil 7.28: Rijit ayak kolonunun kren üzerindeki yeri

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:09:24

Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational,



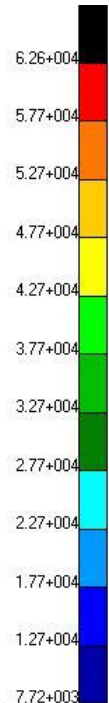
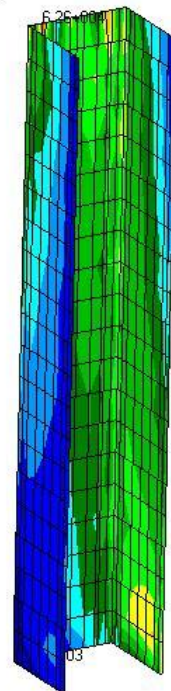
default_Fringe :
Max 5.36+004 @Nd 25684
Min 9.06+002 @Nd 23240
default_Deformation :
Max 3.76-001 @Nd 18236

Şekil 7.29: Rijit ayak kolonu YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:10:14

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,



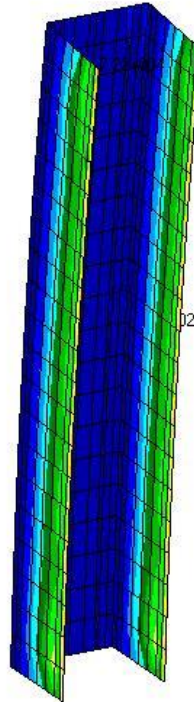
default_Fringe :
Max 6.26+004 @Nd 18305
Min 7.72+003 @Nd 22289
default_Deformation :
Max 3.51-001 @Nd 18236

Şekil 7.30: Rijit ayak kolonu YK-131

MSC.Patran 2005 i2 27-Nov-05 09:10:25

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,



7.22+004

6.57+004

5.92+004

5.27+004

4.62+004

3.97+004

3.32+004

2.68+004

2.03+004

1.38+004

7.29+003

7.99+002

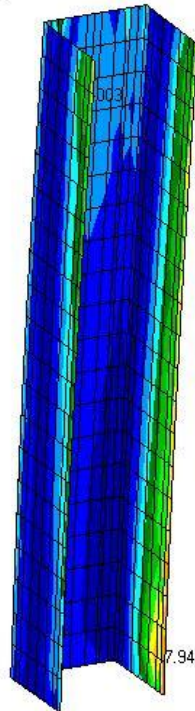
default_Fringe :
Max 7.22+004 @Nd 18236
Min 7.99+002 @Nd 27836
default_Deformation :
Max 6.71+002 @Nd 18465

Şekil 7.31: Rijit ayak kolonu YK-141

MSC.Patran 2005 i2 27-Nov-05 09:10:35

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



7.94+004

7.27+004

6.61+004

5.94+004

5.28+004

4.61+004

3.95+004

3.28+004

2.62+004

1.95+004

1.29+004

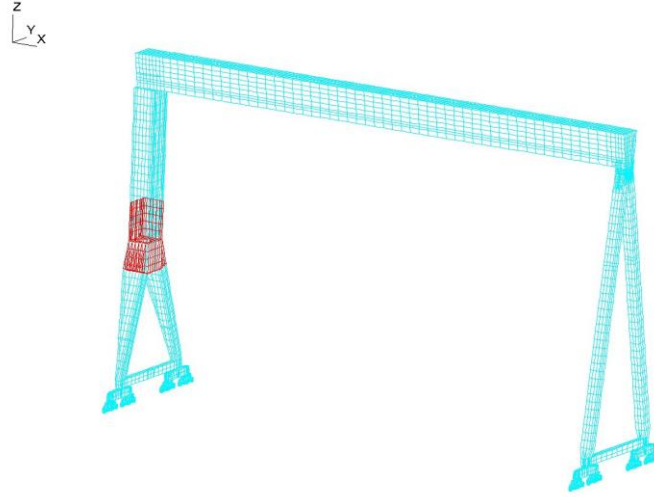
6.23+003

default_Fringe :
Max 7.94+004 @Nd 25684
Min 6.23+003 @Nd 21293
default_Deformation :
Max 1.90+001 @Nd 18465

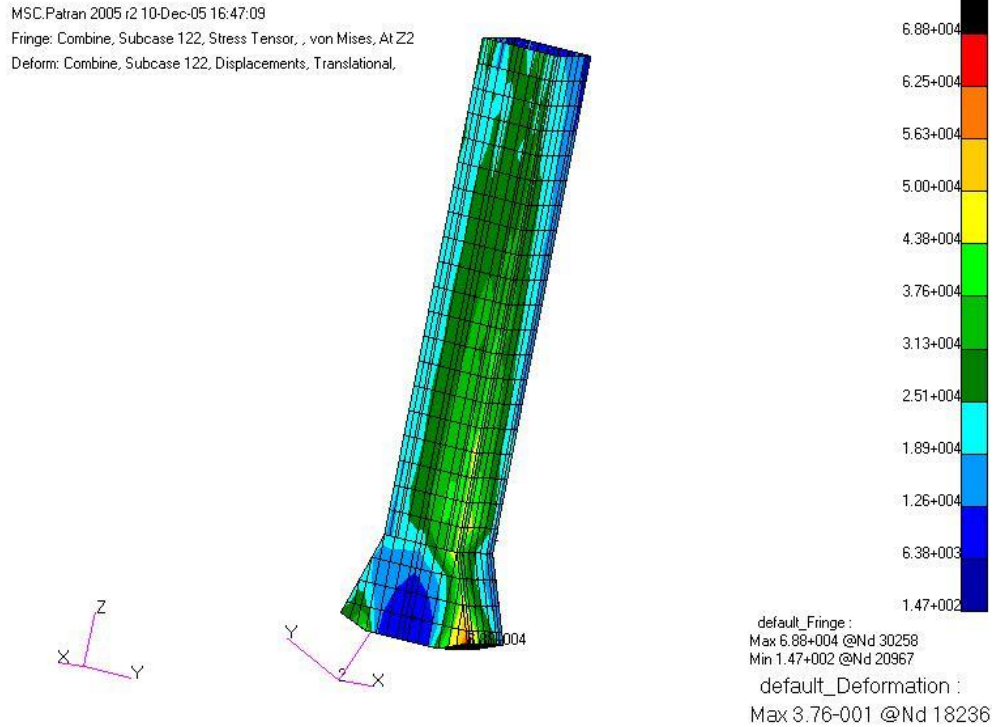
Şekil 7.32: Rijit ayak kolonu YK-156

7.2.8 Rijit Ayak Alt Kısımının Gerilme Değerleri

Rijit ayak alt kısmının ait 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.34-35-36 ve 37'de gösterilmiştir.



Şekil 7.33: Rijit ayak alt kısmının kren üzerindeki yeri

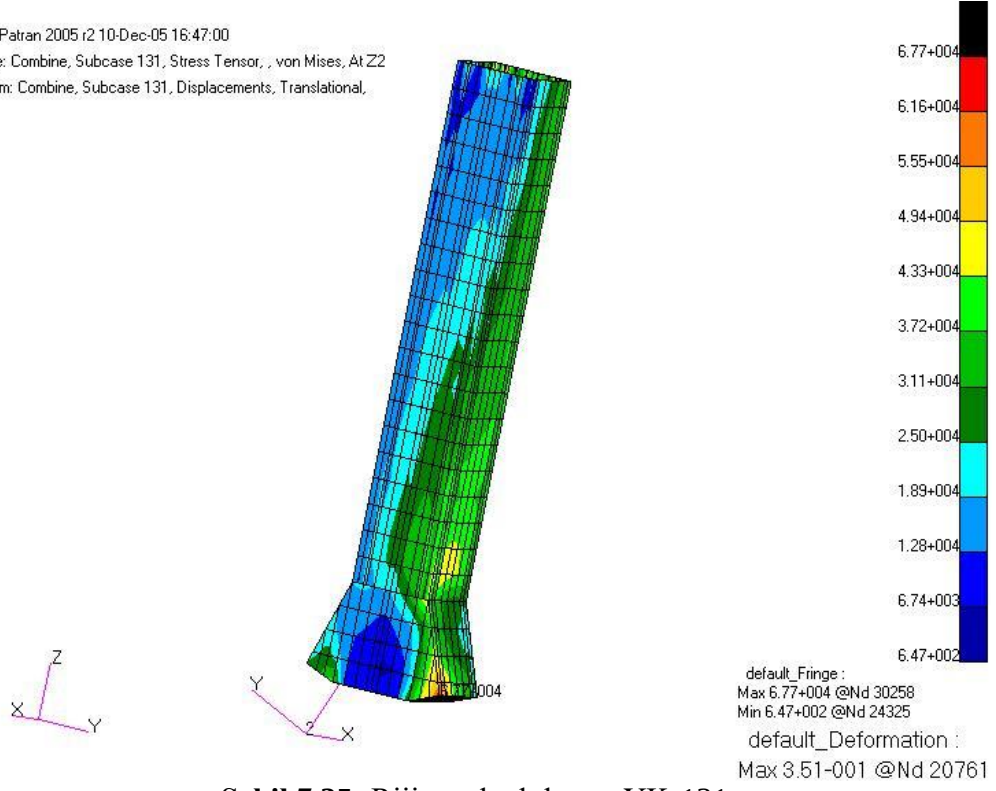


Şekil 7.34: Rijit ayak alt kısmı YK-122

MSC.Patran 2005 r2 10-Dec-05 16:47:00

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, At Z2

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,

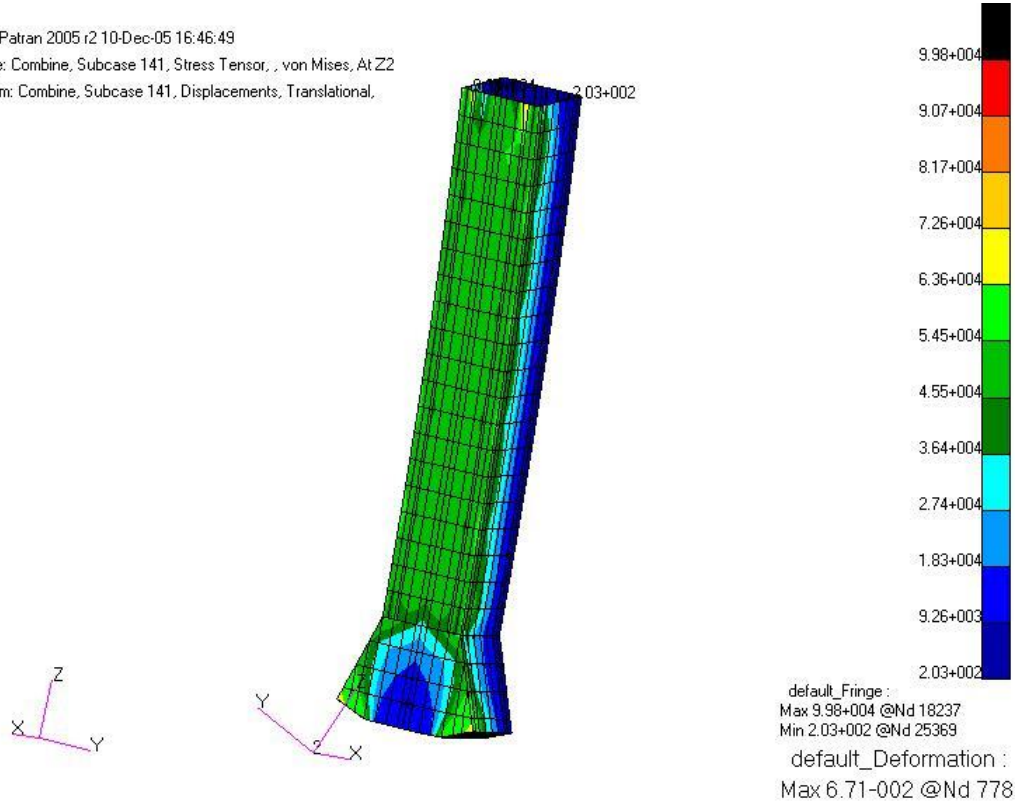


Şekil 7.35: Rijit ayak alt kısmı YK-131

MSC.Patran 2005 r2 10-Dec-05 16:46:49

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, At Z2

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,

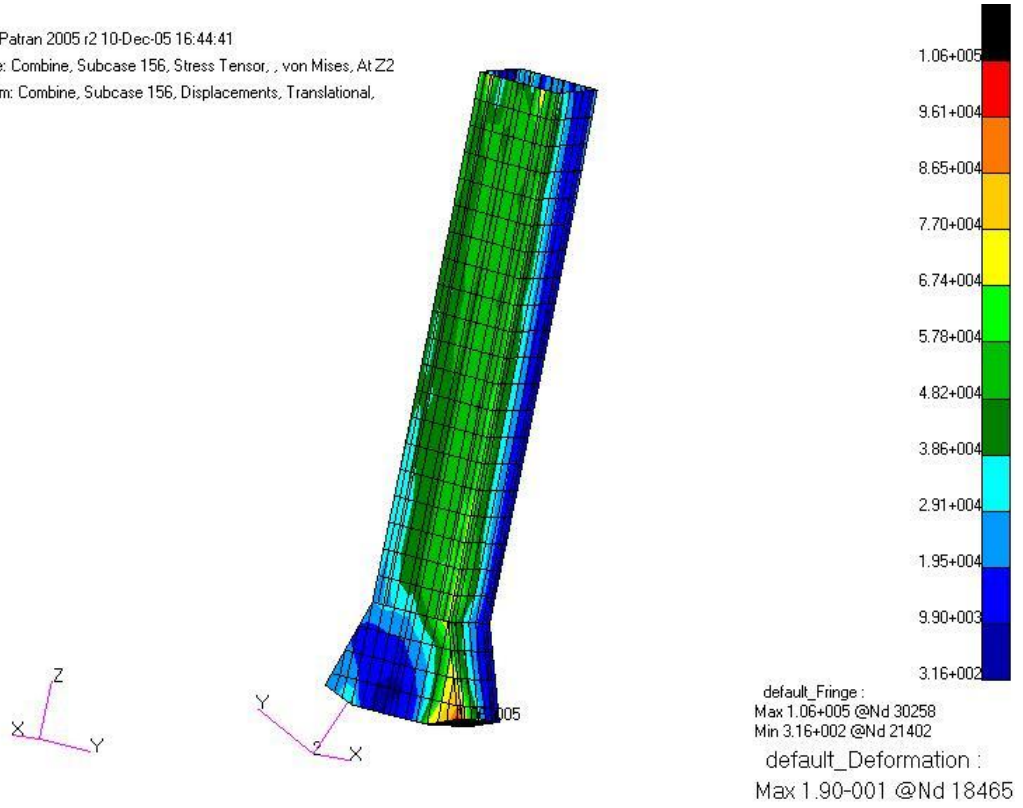


Şekil 7.36: Rijit ayak alt kısmı YK-141

MSC.Patran 2005 r2 10-Dec-05 16:44:41

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, At Z2

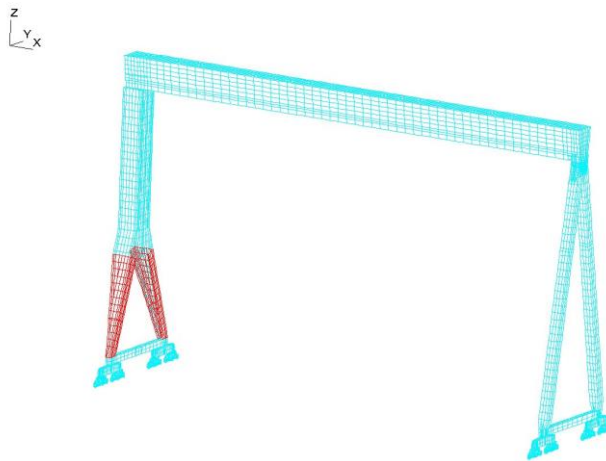
Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



Şekil 7.37: Rijit ayak alt kısmı YK-156

7.2.9 Rijit Ayak Eğik Elemanlarının Gerilme Değerleri

Rijit ayak eğik elemanlarının 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.39-40-41 ve 42'de gösterilmiştir.

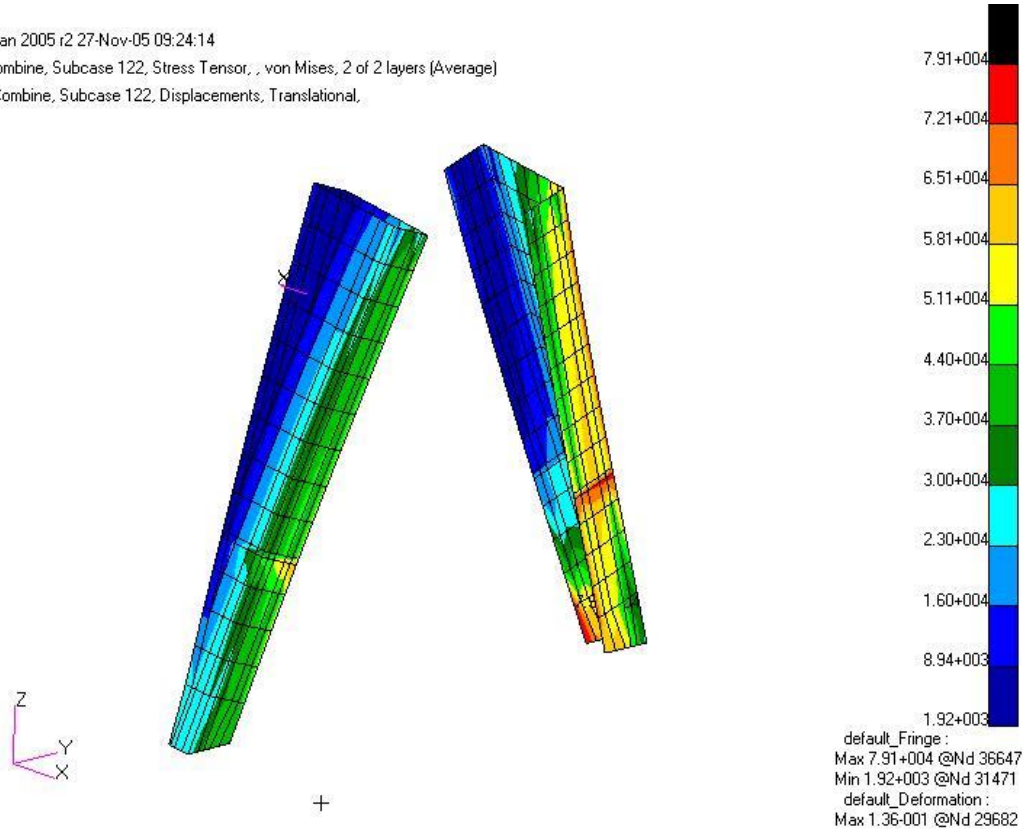


Şekil 7.38: Rijit ayak eğik elemanlarının kren üzerindeki yeri

MSC.Patran 2005 i2 27-Nov-05 09:24:14

Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational,

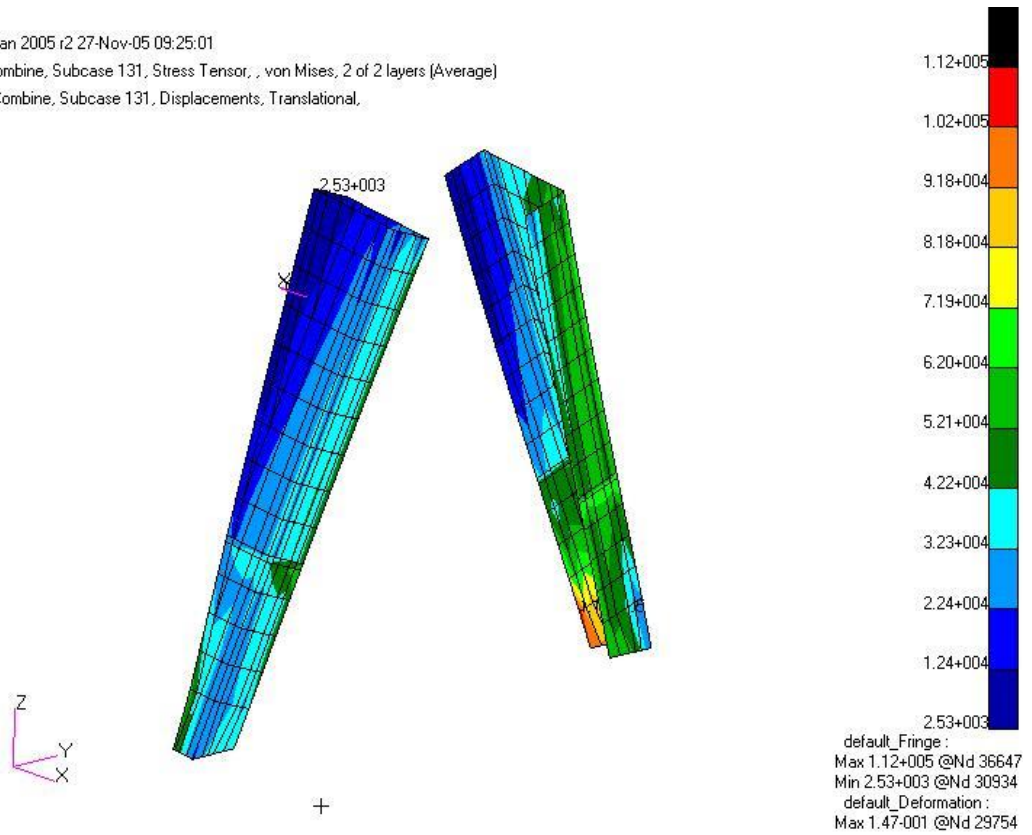


Şekil 7.39: Rijit ayakların eğik kısımları YK-122

MSC.Patran 2005 i2 27-Nov-05 09:25:01

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,

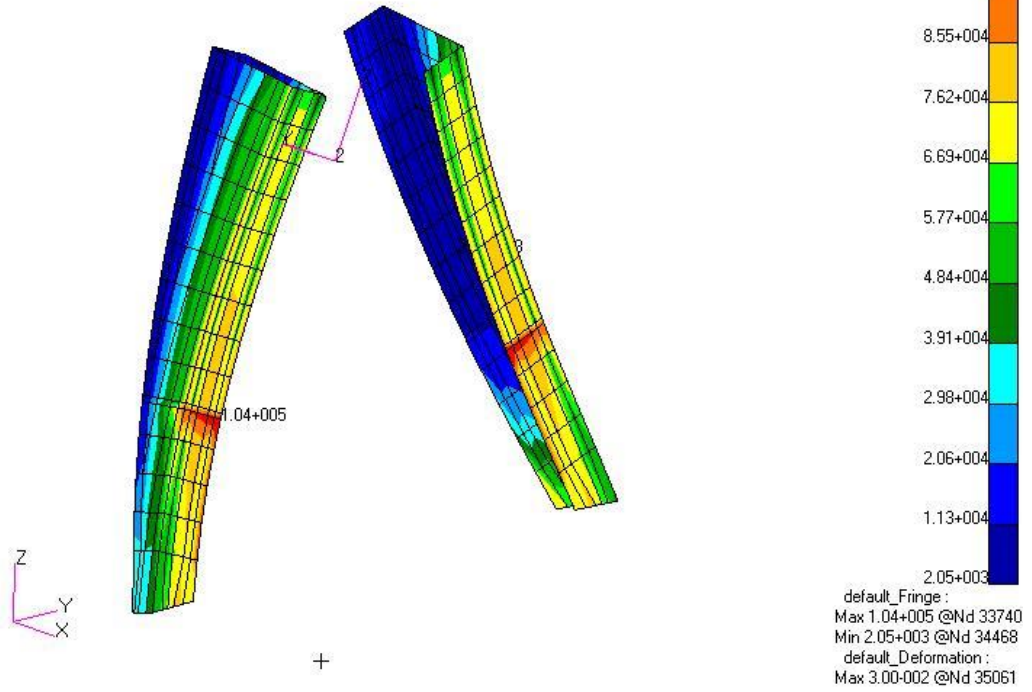


Şekil 7.40: Rijit ayakların eğik kısımları YK-131

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:25:11

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,

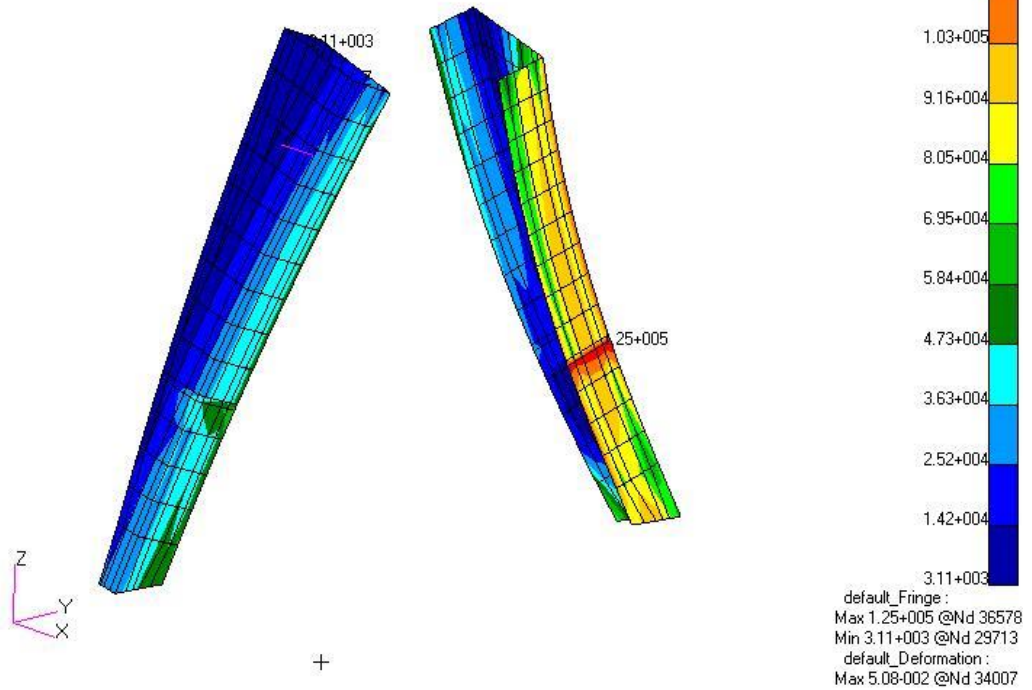


Şekil 7.41: Rijit ayakların eğik kısımları YK-141

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:25:57

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



Şekil 7.42: Rijit ayakların eğik kısımları YK-156

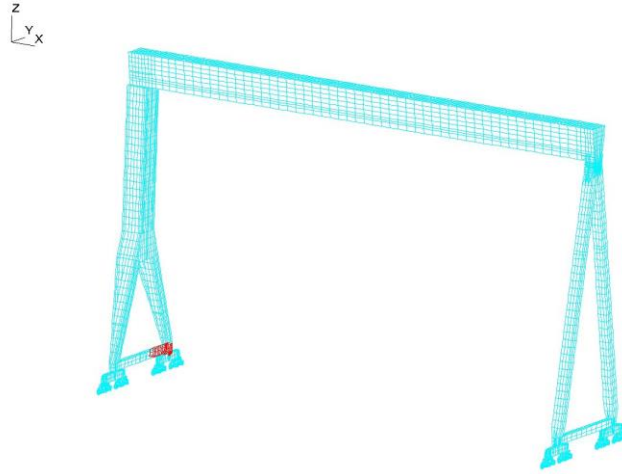
Rijit ayağın eğik elemanlarının her bir yük kombinasyonundaki maksimum Von Mises gerilmeleri Tablo 7.5’de gösterilmiştir.

Tablo 7.5: Rijit ayağın eğik elemanlarındaki maksimum gerilme değerleri

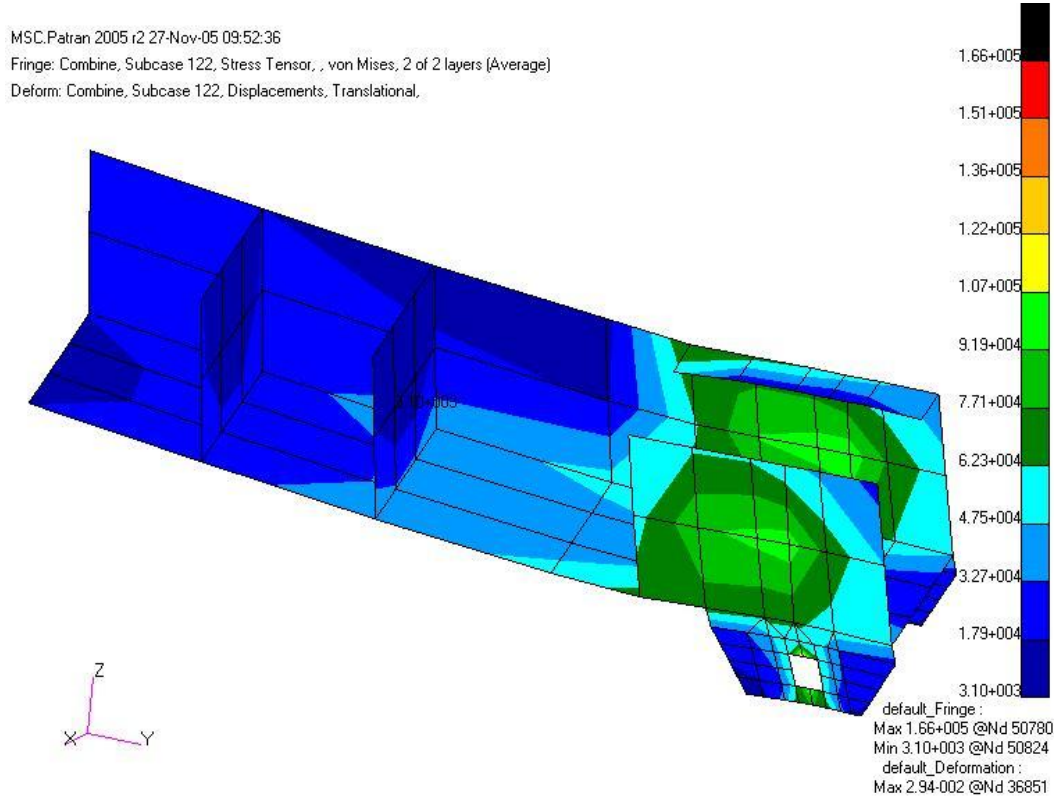
Grup	Kombinasyon	Maksimum Von Mises Gerilmesi [kN/m ²]	Düğüm Noktası No
0	101	43228	11215
0	102	23715	11215
0	103	4035	12190
I	110	62067	11215
I	111	129010	12448
I	112	109584	12448
I	113	90013	11473
II	121	178793	12448
II	122	155290	12448
II	123	131690	12448
II	125	158865	11341
II	126	130927	11215
II	127	104456	11552
III	131	211926	12448
III	132	188994	12448
III	133	166101	12448
III	135	204651	12448
III	136	174817	12448
III	137	147165	12448
IV	141	145038	12448
IV	142	109584	12448
IV	143	91502	11473
V	151	179911	12448
V	152	156878	12448
V	153	133401	12448
V	155	180684	11552
V	156	158286	11552
V	157	135645	11552

7.2.10 Rijit Menteşeli Ayaklardaki Uç Taşıyıcısının Gerilme Değerleri

Rijit menteşeli ayaklardaki uç taşıyıcısının 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.44-45-46 ve 47'dedir.



Şekil 7.43: Menteşeli rijit ayağın kren üzerindeki yeri

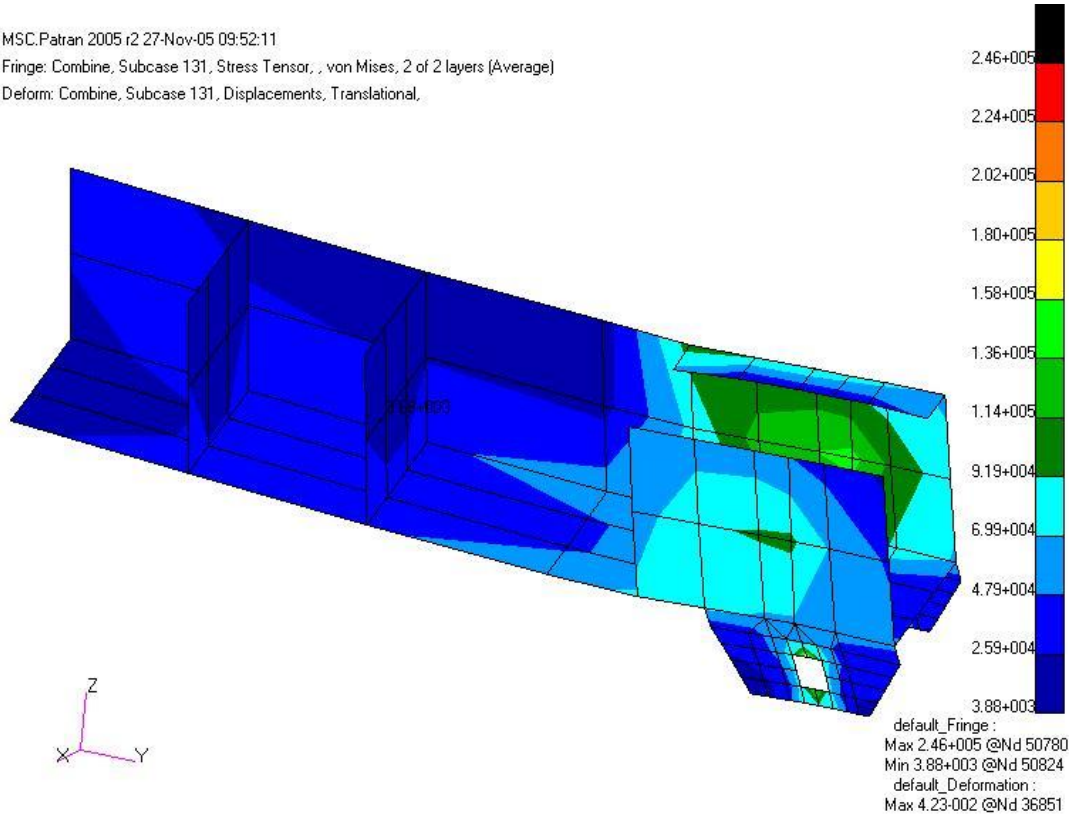


Şekil 7.44: Rijit ayak uç taşıyıcısı YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:52:11

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,

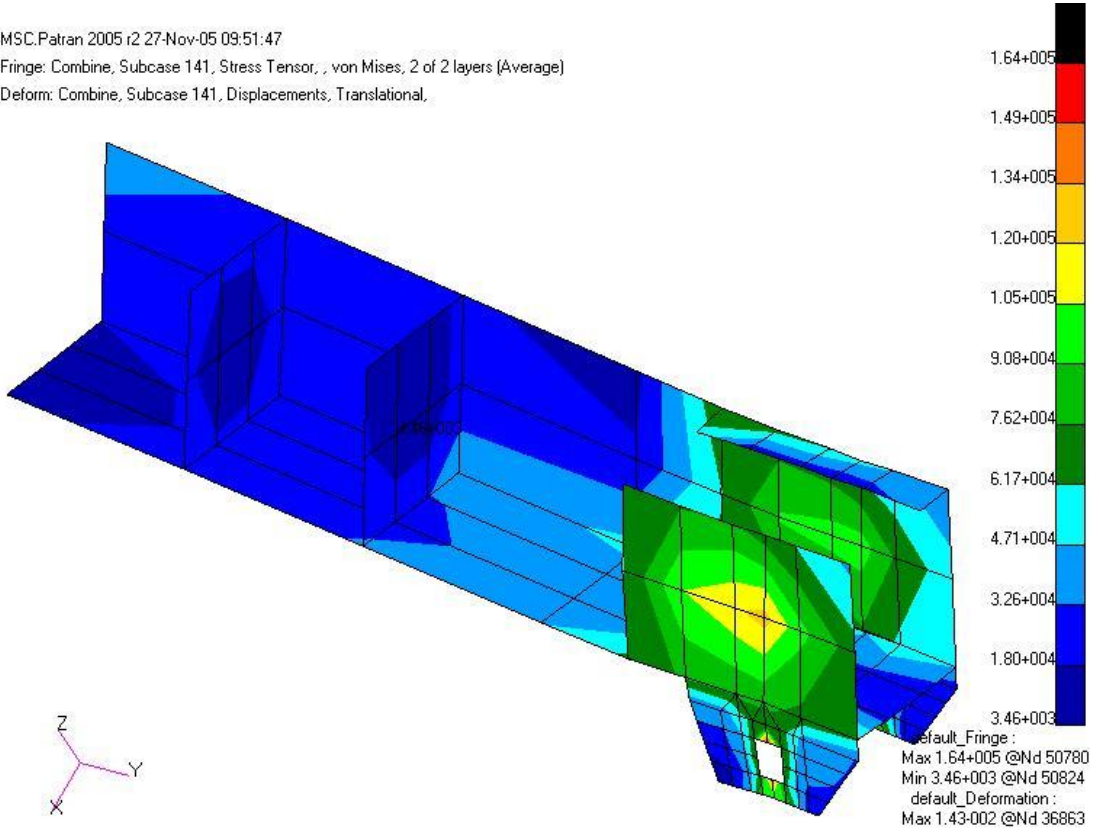


Şekil 7.45: Rijit ayak uç taşıyıcısı YK-131

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:51:47

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,

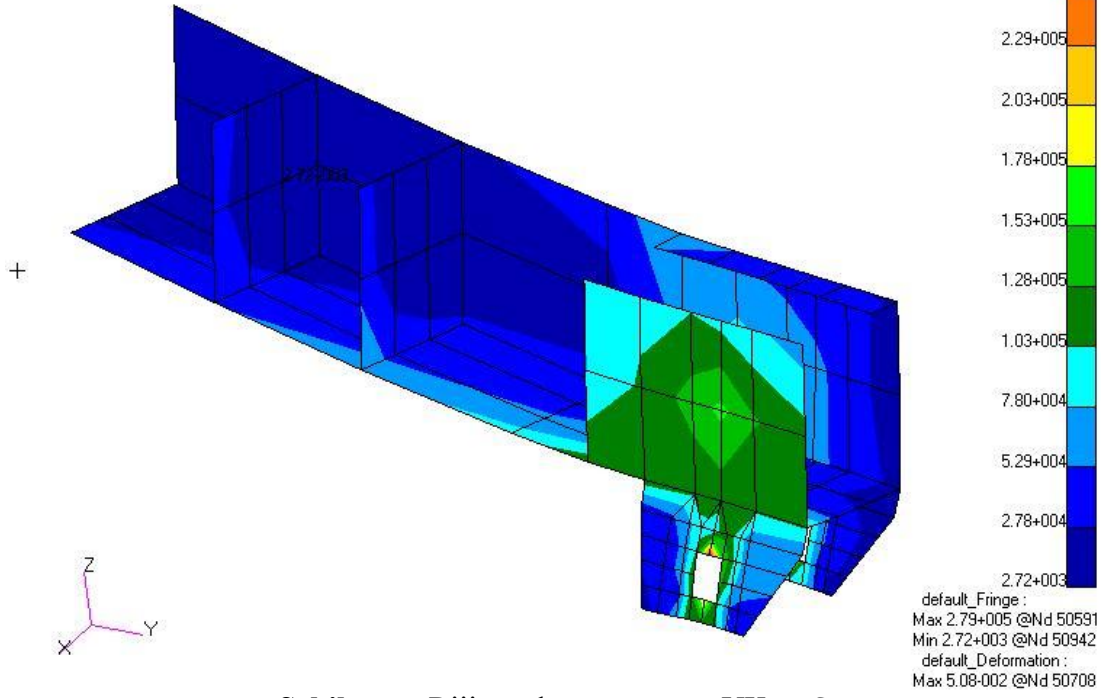


Şekil 7.46: Rijit ayak uç taşıyıcısı YK-141

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:51:01

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

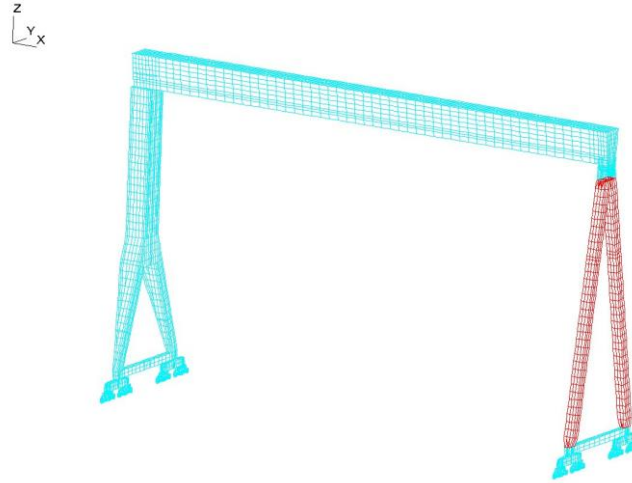
Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



Şekil 7.47: Rijit ayak uç taşıyıcısı YK-156

7.2.11 Menteşeli Ayak Gerilme Değerleri

Menteşeli ayağın 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.49-50-51 ve 52'de gösterilmiştir.



Şekil 7.48: Menteşeli ayağın kren üzerindeki yeri

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:54:40

Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational, 1.38+003



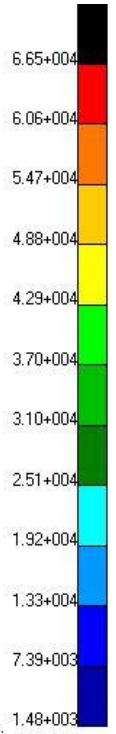
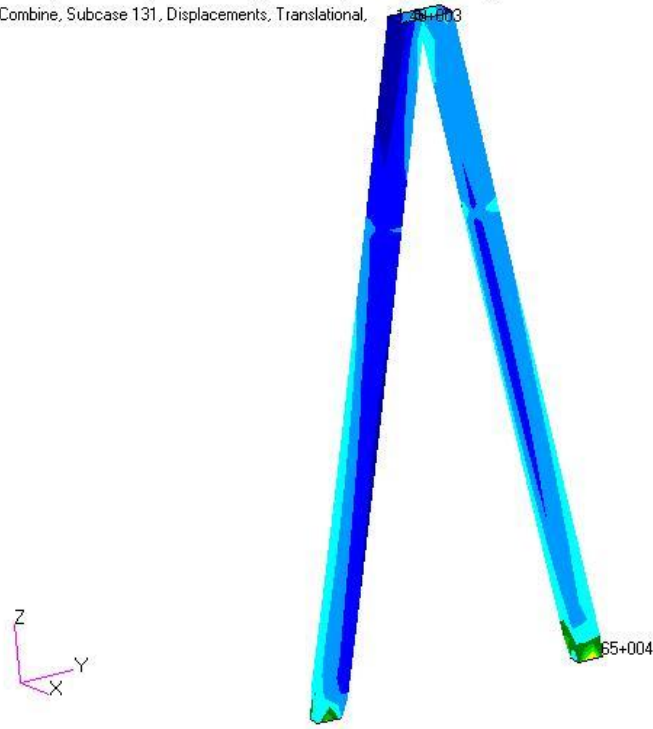
default_Fringe :
Max 8.30+004 @Nd 46081
Min 4.39+003 @Nd 36881
default_Deformation :
Max 4.12+001 @Nd 38525

Şekil 7.49: Menteşeli ayak YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:56:29

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,



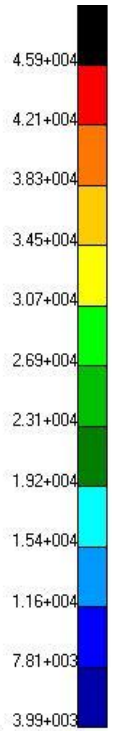
default_Fringe :
Max 6.65+004 @Nd 46081
Min 1.48+003 @Nd 36880
default_Deformation :
Max 3.70+001 @Nd 38525

Şekil 7.50: Menteşeli ayak YK-131

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:56:43

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,



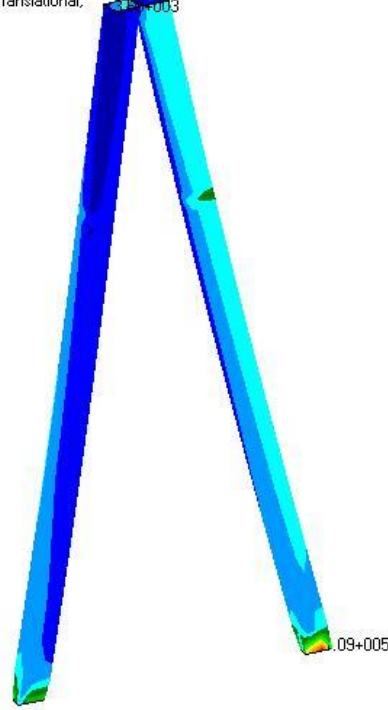
default_Fringe :
Max 4.59+004 @Nd 46081
Min 3.99+003 @Nd 38276
default_Deformation :
Max 8.68+002 @Nd 38525

Şekil 7.51: Menteşeli ayak YK-141

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:56:59

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational, .09+005



default_Fringe :
Max 1.09+005 @Nd 46092
Min 3.68+003 @Nd 37127
default_Deformation :
Max 2.22+001 @Nd 38525

Şekil 7.52: Menteşeli ayak YK-156

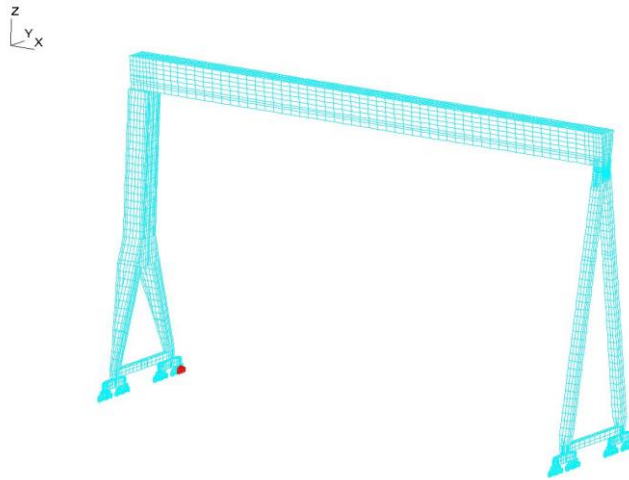
Menteşeli ayağa ait maksimum Von Mises gerilmeleri Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6: Menteşeli ayakta tüm kombinasyonlardaki Von Mises gerilmeleri

Grup	Kombinasyon	Maksimum Gerilme [kN/m ²]	Düğüm Noktası No
0	101	3137	45992
0	102	21261	41102
0	103	39594	41102
I	110	44140	41119
I	111	47630	41102
I	112	69077	41102
I	113	90754	41102
II	121	63248	45992
II	122	89442	45992
II	123	115921	45992
II	125	61218	45992
II	126	87411	45992
II	127	113891	45992
III	131	68395	46081
III	132	93146	45991
III	133	119697	45991
III	135	75909	46008
III	136	103838	46008
III	137	131857	45992
IV	141	49004	41102
IV	142	69077	41102
IV	143	108175	41102
V	151	99787	46081
V	152	121867	46081
V	153	139264	46081
V	155	89755	46092
V	156	111283	46092
V	157	133880	46092

7.2.12 Boji (Kren Alt Düzeni) Gerilme Değerleri

Bojinin 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.54-55-56 ve 57'dedir.

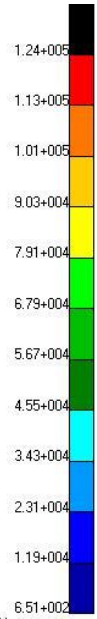
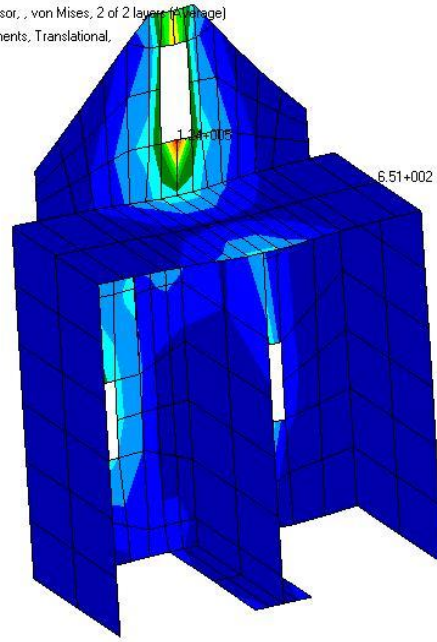


Şekil 7.53: Bojinin kren üzerindeki yeri

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:21:56

Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational.



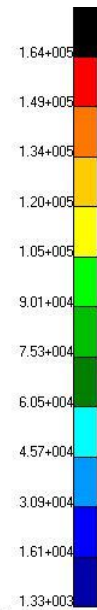
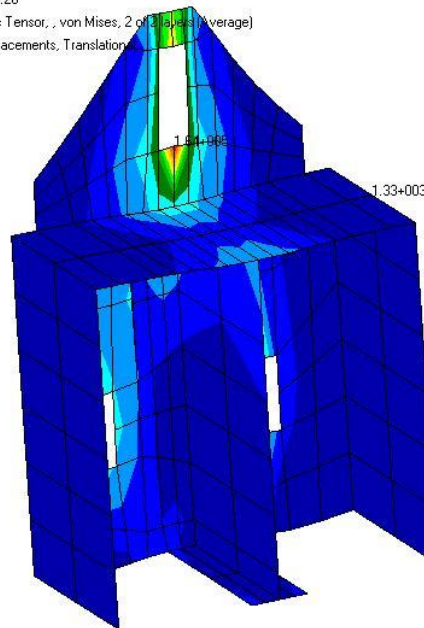
default_Fringe :
Max 1.24+005 @Nd 67975
Min 6.51+002 @Nd 67625
default_Deformation :
Max 7.40+003 @Nd 68607

Şekil 7.54: Boji YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:21:28

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational.



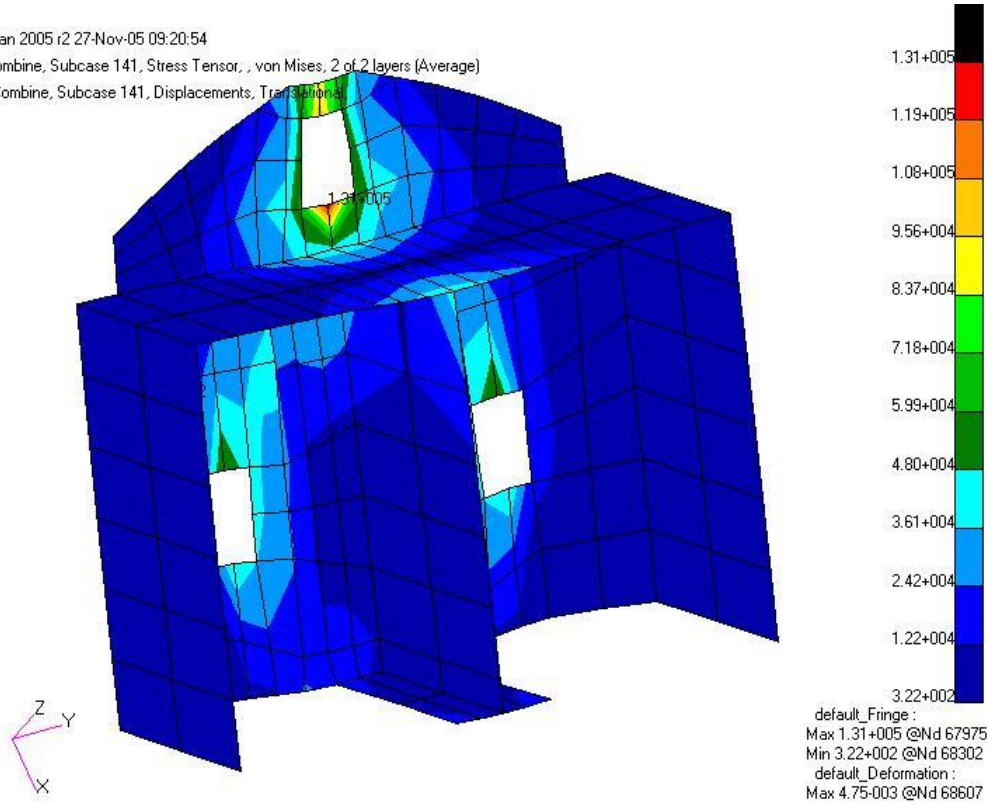
default_Fringe :
Max 1.64+005 @Nd 67975
Min 1.33+003 @Nd 67625
default_Deformation :
Max 1.08+002 @Nd 68607

Şekil 7.55: Boji YK-131

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:20:54

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational

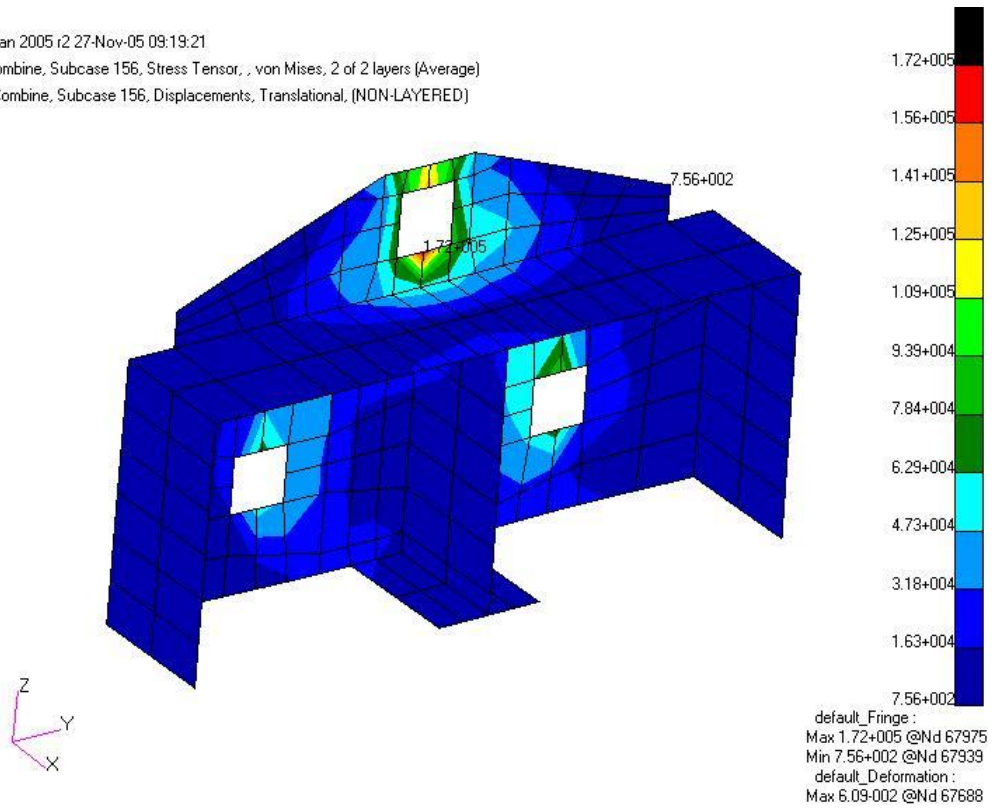


Şekil 7.56: Boji YK-141

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:19:21

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

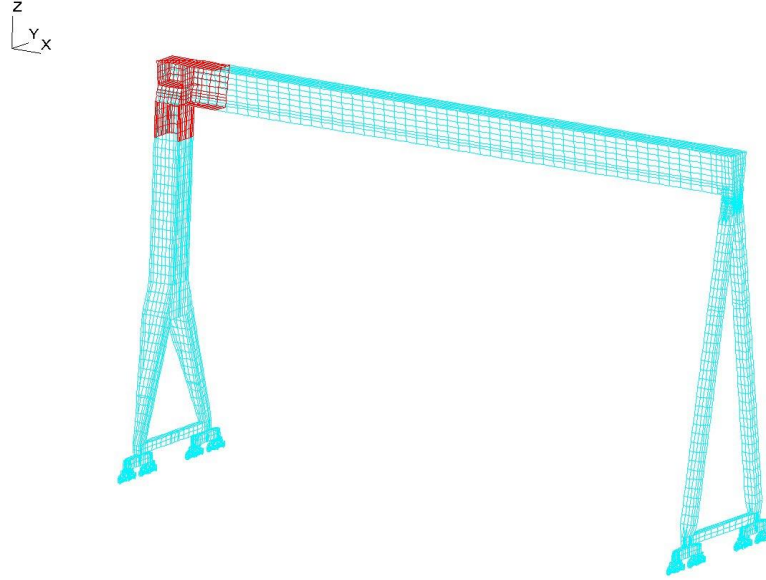
Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



Şekil 7.57: Boji YK-156

7.2.13 Kren Sol Üst Parçasının Gerilme Değerleri

Kren sol üst parçasının gerilme değerlerini 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.59-60-61 ve 62'dedir.

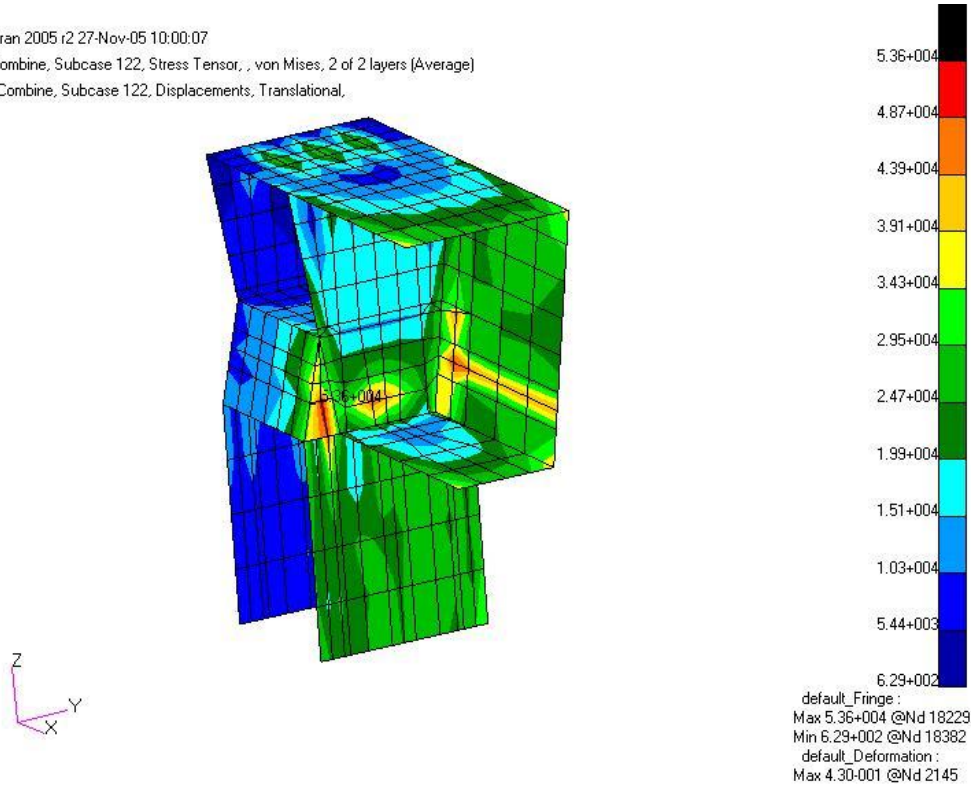


Şekil 7.58: Rijit ayak sol üst parçasının kren üzerindeki yeri

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:00:07

Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational,

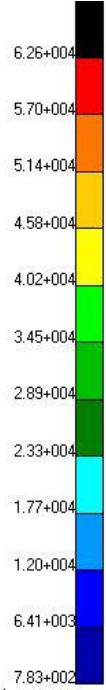
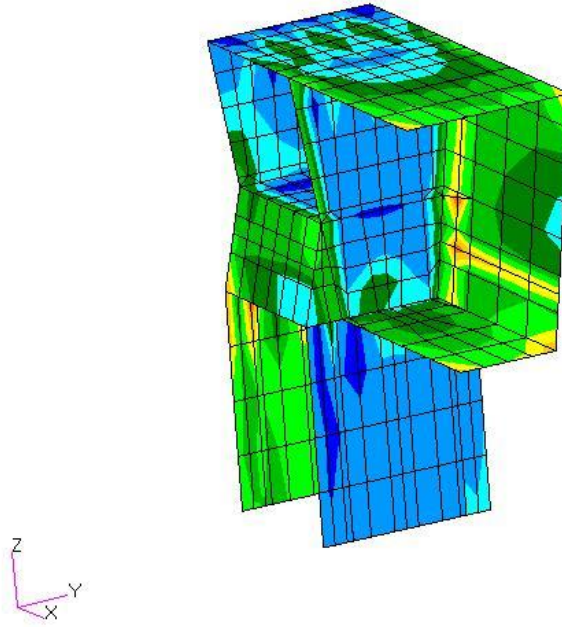


Şekil 7.59: Rijit ayak sol üst parçası YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:59:58

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,



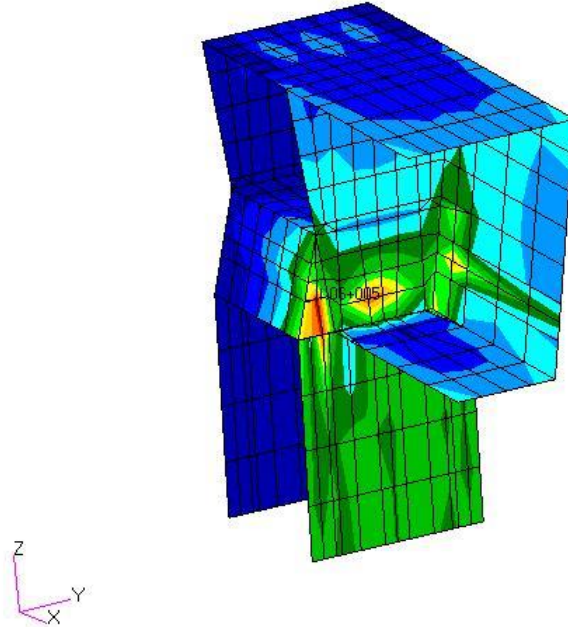
default_Fringe :
Max 6.26+004 @Nd 18305
Min 7.83+002 @Nd 18405
default_Deformation :
Max 3.88+001 @Nd 2145

Şekil 7.60: Rijit ayak sol üst parçası YK-131

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:59:45

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

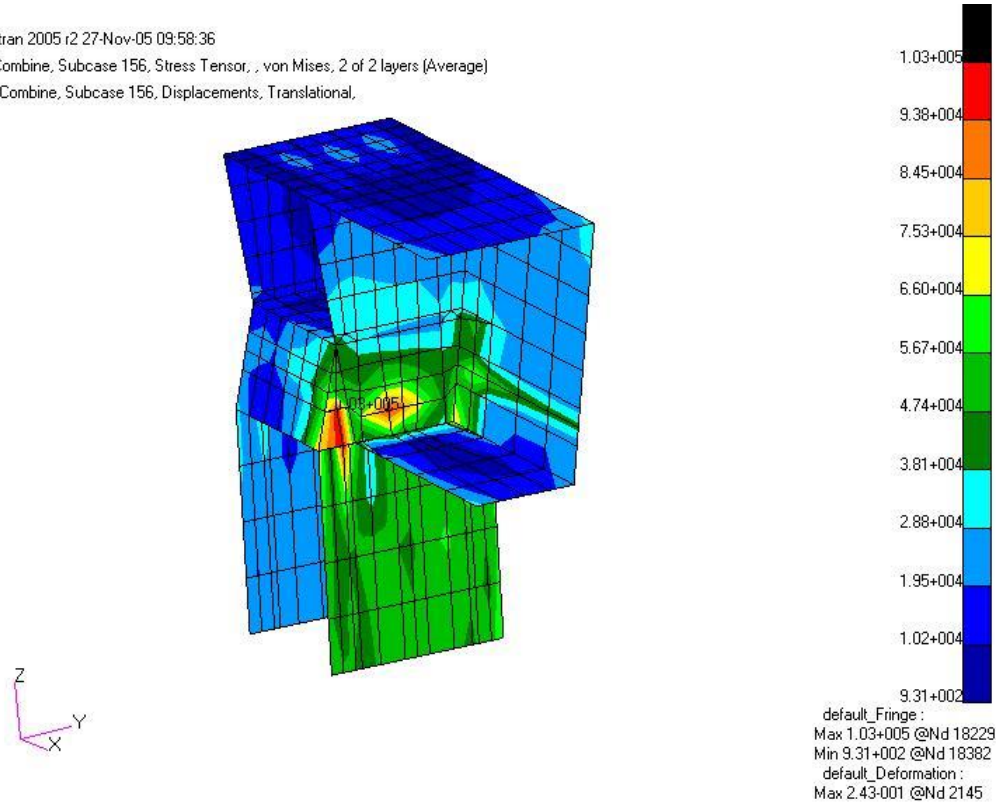
Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,



default_Fringe :
Max 1.06+005 @Nd 18229
Min 4.10+002 @Nd 18382
default_Deformation :
Max 1.04+001 @Nd 2145

Şekil 7.61: Rijit ayak sol üst parçası YK-141

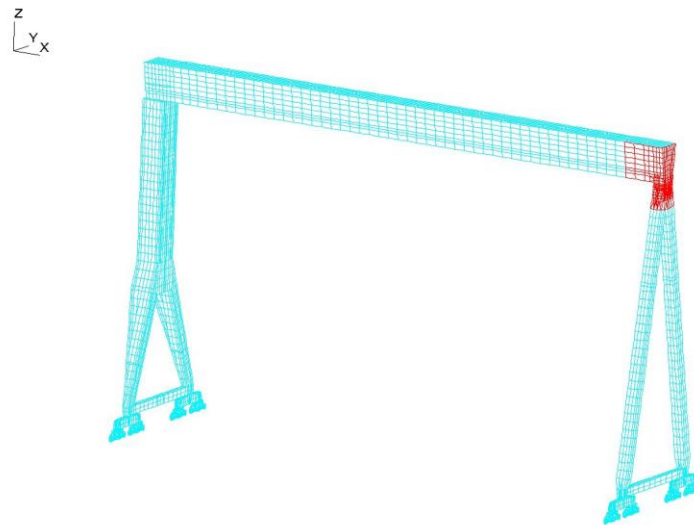
MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 09:58:36
Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)
Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



Şekil 7.62: Rijit ayak sol üst parçası YK-156

7.2.14 Krenin Birinci Sağ Üst Parçasının Gerilme Değerleri

Kren sağ üst-1 parçasının gerilme değerlerini 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.64-65 66 ve 67'dedir.

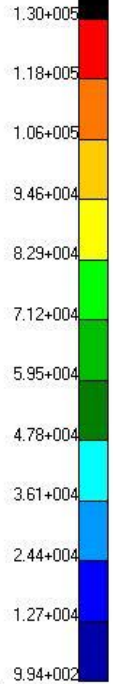
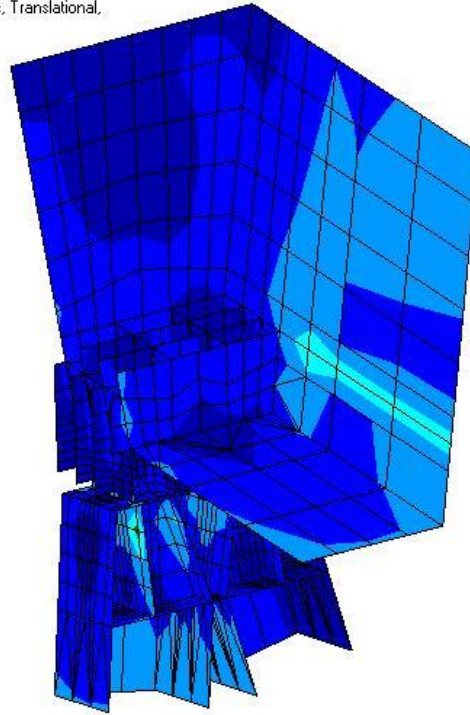


Şekil 7.63: Kren sağ üst -1 parçasının kren üzerindeki yeri

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:01:15

Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational,



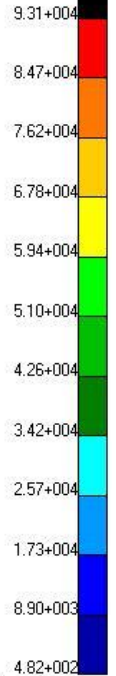
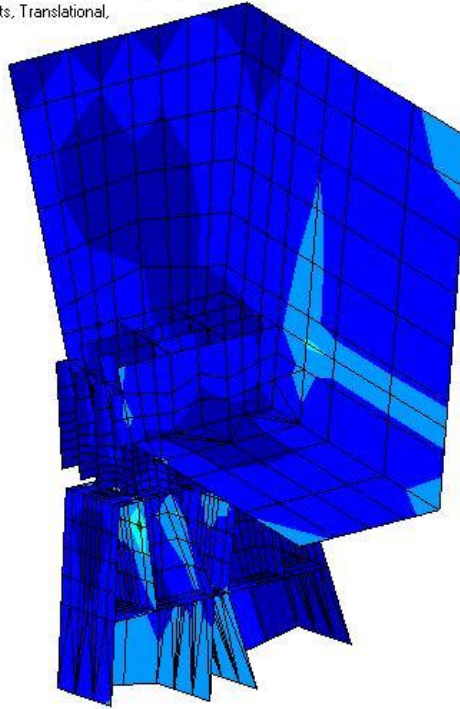
default_Fringe :
Max 1.30+005 @Nd 39441
Min 9.94+002 @Nd 18722
default_Deformation :
Max 4.33+001 @Nd 19752

Şekil 7.64: Ana kiriş sağ üst parçası -1 YK-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:02:05

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,



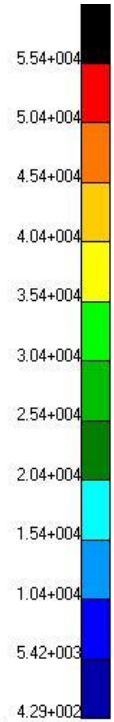
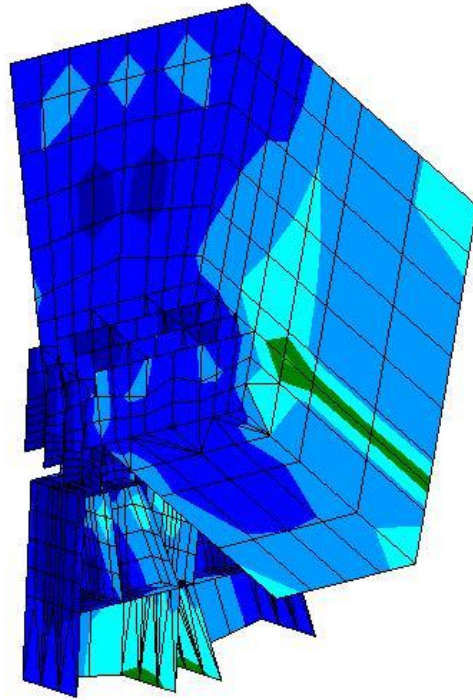
default_Fringe :
Max 9.31+004 @Nd 39441
Min 4.82+002 @Nd 37636
default_Deformation :
Max 3.87+001 @Nd 38708

Şekil 7.65: Ana kiriş sağ üst parçası -1 YK-131

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:02:21

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,



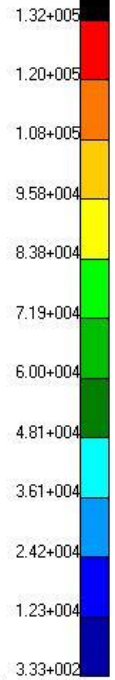
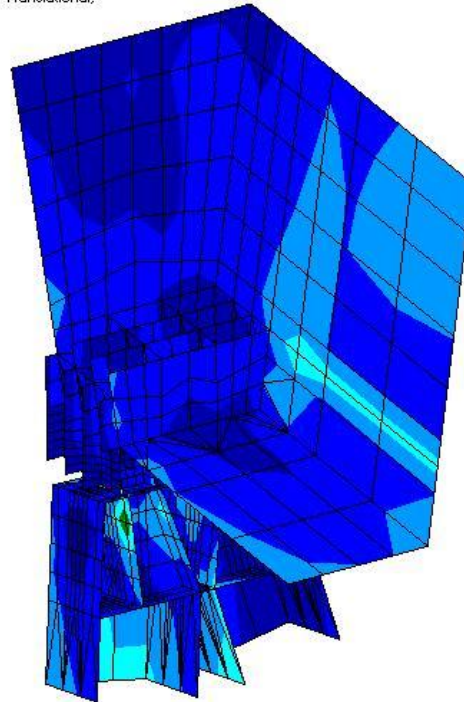
default_Fringe :
Max 5.54+004 @Nd 38094
Min 4.29+002 @Nd 18620
default_Deformation :
Max 9.45+002 @Nd 670

Şekil 7.66: Ana kiriş sağ üst parçası -1 YK-141

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:02:32

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,

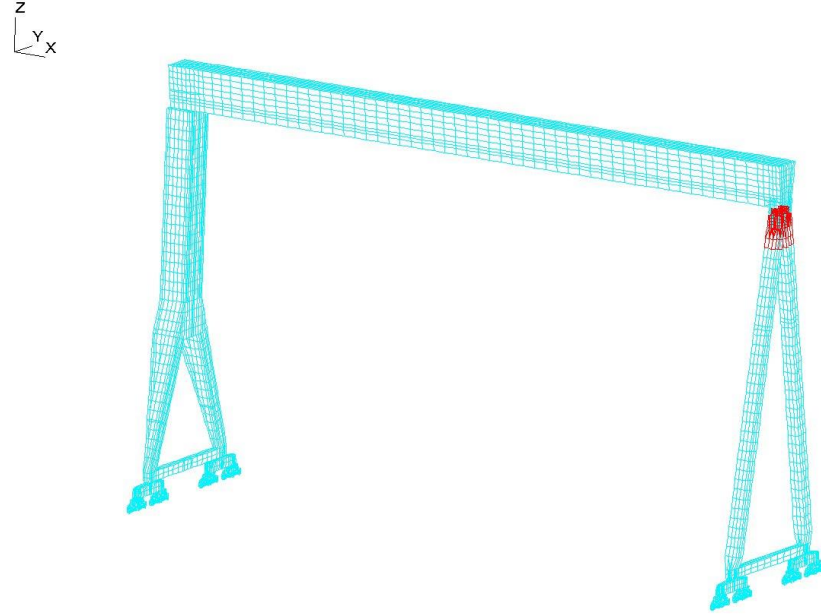


default_Fringe :
Max 1.32+005 @Nd 39441
Min 3.33+002 @Nd 18606
default_Deformation :
Max 2.35+001 @Nd 670

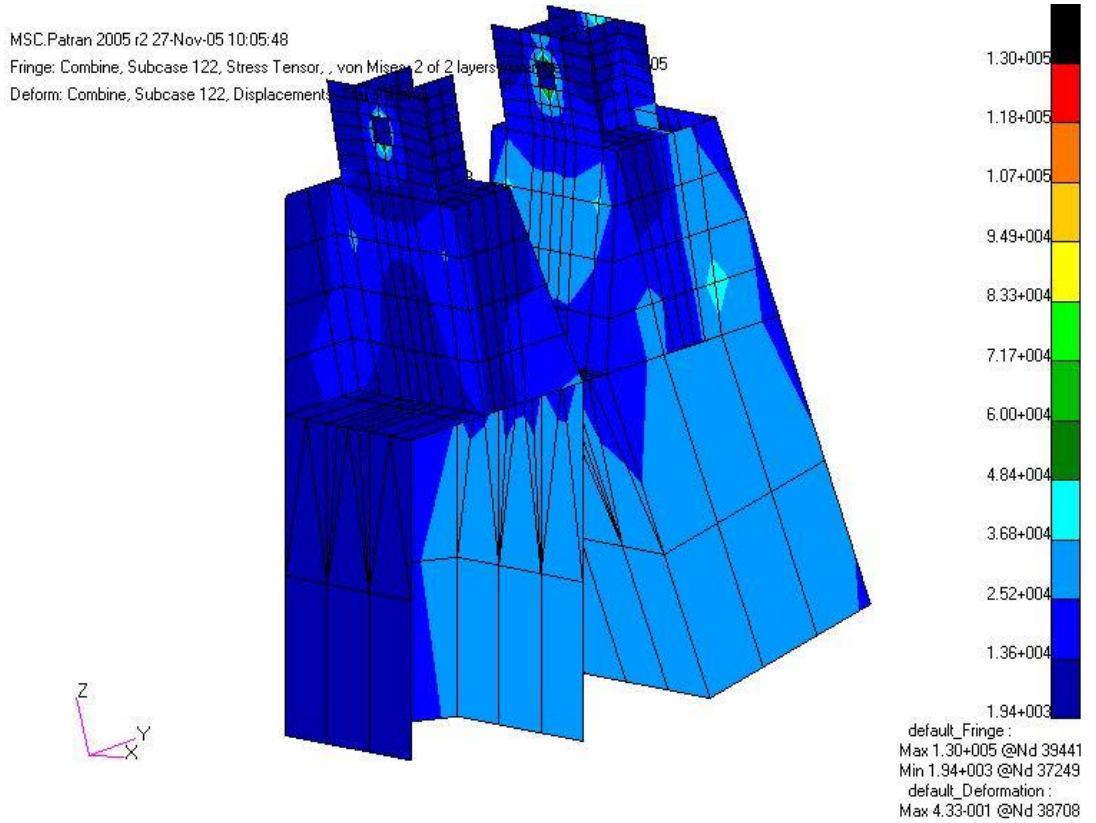
Şekil 7.67: Ana kiriş sağ üst parçası -1 YK-156

7.2.15 Krenin İkinci Sağ Üst Parçasının Gerilme Değerleri

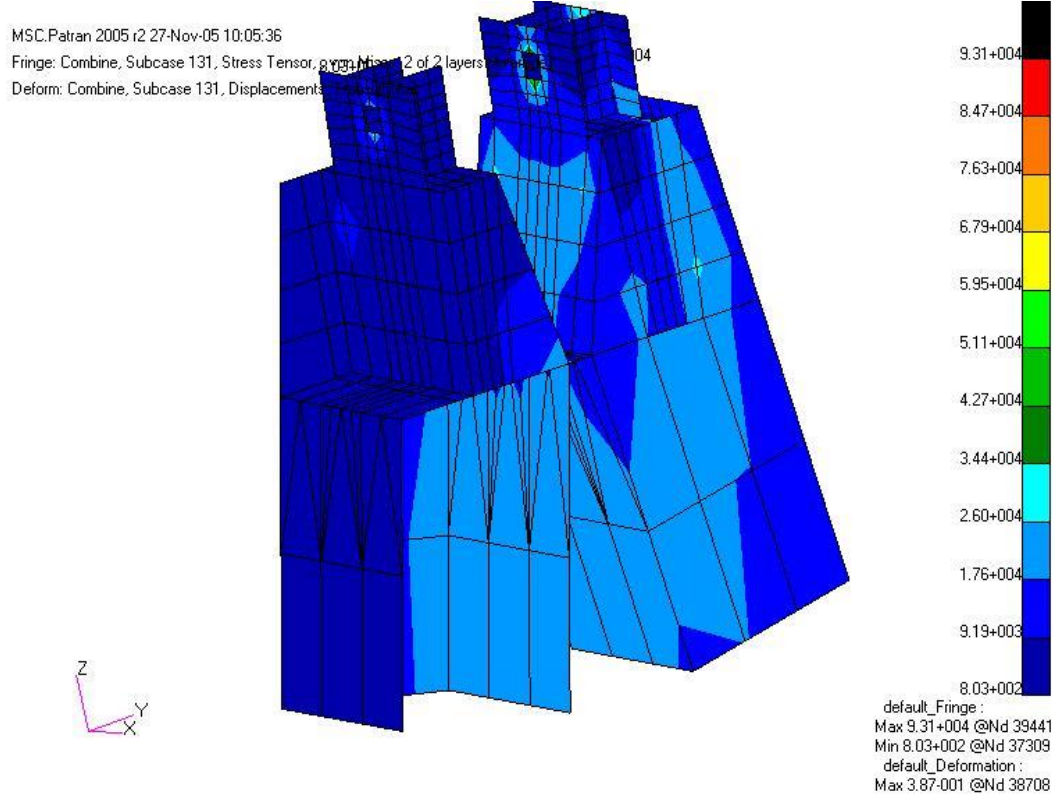
Kren sağ üst-2 parçasının gerilme değerlerini 122, 131, 141 ve 156 no'lu yük kombinasyonlarındaki gerilme değerleri Şekil 7.69-70-71 ve 72'dedir.



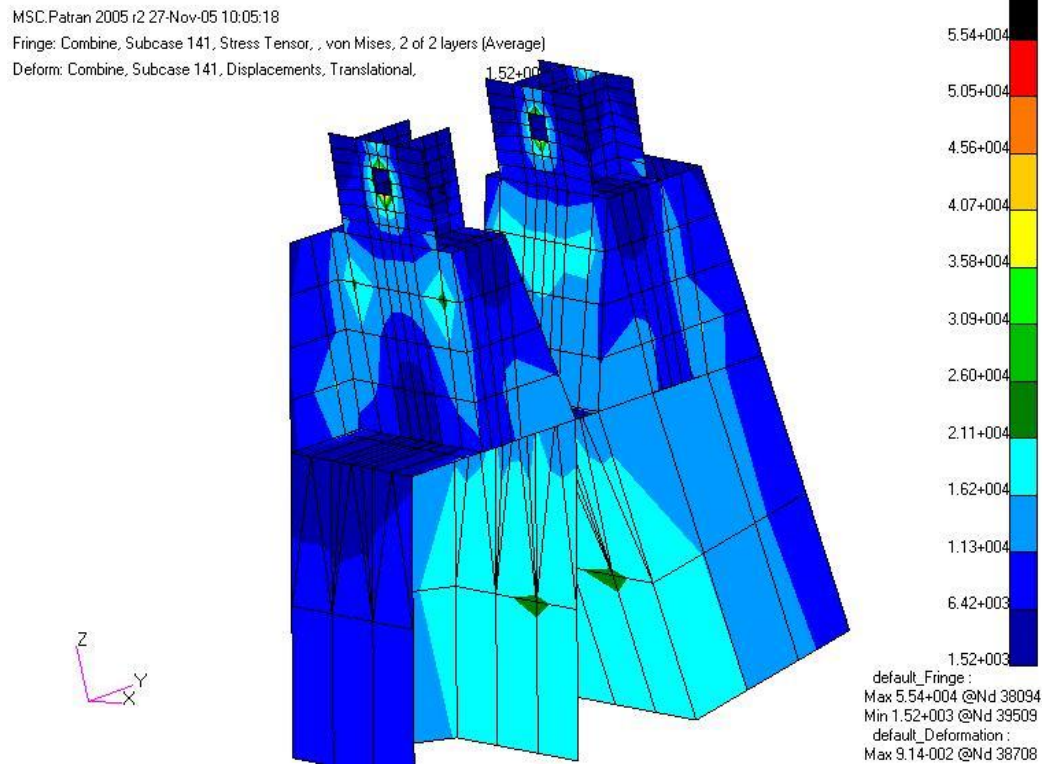
Şekil 7.68: Kren sağ üst -2 parçasının kren üzerindeki yeri



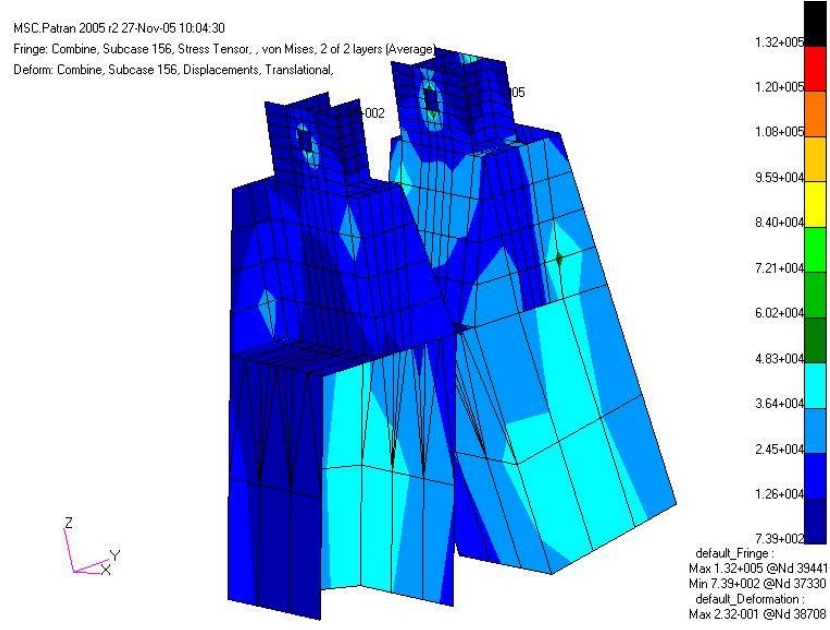
Şekil 7.69: Menteşeli ayak sağ üst -2 parçası YK-122



Şekil 7.70: Menteşeli ayak sağ üst -2 parçası YK-131



Şekil 7.71: Menteşeli ayak sağ üst parçası -2 YK-141



Şekil 7.72: Menteşeli ayak sağ üst parçası 2 YK-156

Ana kiriş sağ ayak birleşimine ait yer değiştirme grafiği **Ek-C**'de sunulmuştur.

8. KRENİN NONLINEER STATİK ANALİZİ

Nonlinear statik analizi daha iyi anlayabilmek için ilk olarak nonlinear analiz, temel hatlarıyla tanıtılacaktır.

8.1 Nonlinear Analiz

Nonlinear analiz, nonlinear davranan yapıları analiz etmek için uygulanır. Herhangi bir analize başlamadan önce ilk önce o yapının nonlinear davranıp davranmadığına bakılır. Yapıya, davranışına ve malzemesine bağlı olarak çok çeşitli nonlinear davranış mümkündür.

Şayet yapı belli bir derecedeki büyüklükte yer değiştirme uğruyor ise daha yüksek dereceden etkiler bu yapıyı sertleştirme eğiliminde olabilir. Eğer yapı malzemesi akma sınırının üstünde yüklenmiş ise, o zaman da yapı daha az katı olma eğilimine geçer ve sürekli deformasyona uğrar.

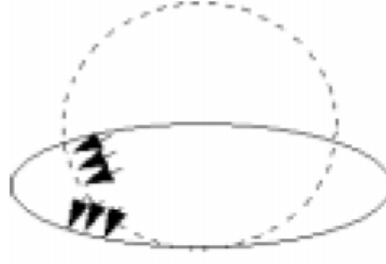
Nonlinear davranış birçok nedenden kaynaklanabilir. Bazı yapılarda, kinematik bağlantı nonlinear'dir bu yüzden ötelenme ve dönme hareketleri büyük olabilir. Bu hareket geometrik nonlinear ya da büyük deplasman davranışı olarak bilinir [9].



Şekil 8.1: Lineer kuvvet oryantasyonu

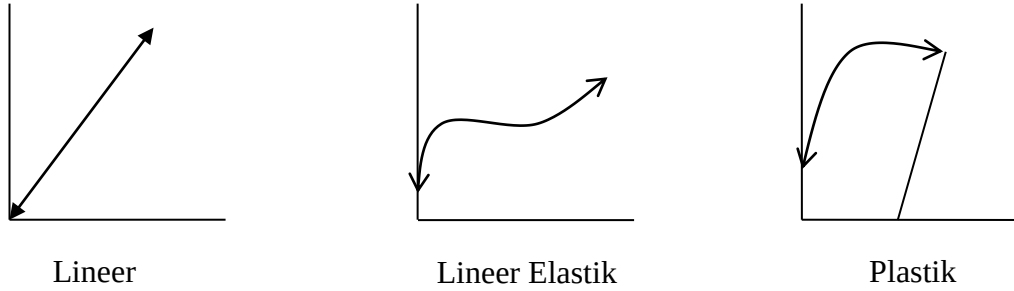
Geometrik nonlinear analizde ilgili etki izleyici kuvvet (follower force) etkileridir. Küçük deplasman analizinde, kuvvet daima kendi oryantasyonunu sürdürme

abasındadır. İzleyici kuvvet ise kendi oryantasyonunu yapı deforme olunca değiştirir.



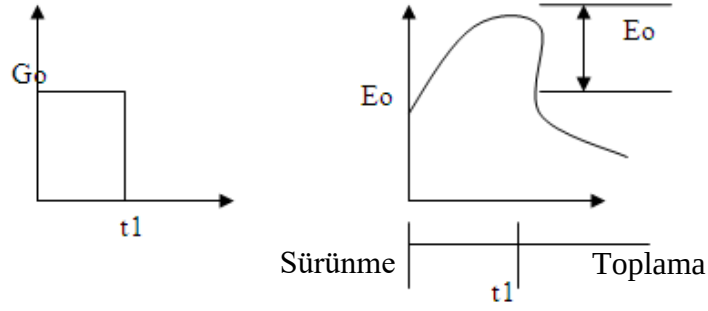
şekil 8.2: Nonlinear kuvvet oryantasyonu

Daha açık nonlinear etkiler, eğer malzemenin oluşum ilişkisi nonlinear ise malzeme nonlinearitesinden kaynaklanır. Bu durumda kuvvetler ve yer değiştirmeler arasında linear bir ilişki söz konusu olamaz. Nonlinear oluşum ilişkisiyle birlikte, malzeme katılığı da analiz süresince değişebilir ve malzeme akabilir. Belki de sürekli deformasyon ile sonuçlanabilir.



şekil 8.3: Linear, nonlinear ve plastik deformasyon etki bölgeleri

Uzun süreli yükleme uygulamalarındaki zamana bağlı etkiler malzemenin sürünme özellikleri tanımlandığında hesaba katılabilirler. Sabit bir gerilme altında şekil değiştirme meydana geliyor ise, sürünme zamana bağlı bir olgudur. Eğer sürünmenin oranı hem yüke ve/veya sıcaklığa bağlı ise bu malzemeye ait gevşemedir [9].



Şekil 8.4: Sürünme

8.2 Nonlineerite Parametreleri

Nonlineerliğin üç farklı parametreye bağlıdır;

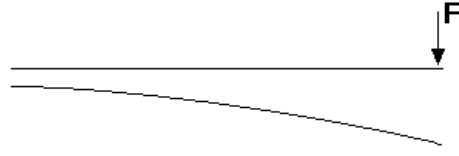
8.2.1 Malzeme Kaynaklı Nonlineerite

- Plastik deformasyon oluşur. Zamana bağlı değildir. (elastik-plastik davranış)
- Zamana bağlı olarak, gerilme – şekil değiştirme ilişkisi değişiklik gösterir.
- Viskoelastik - viskoplastik özellik, hem sürünme hem de plastisite mevcut.
- Geometrideki değişiklikler, hem dengeyi hem de kinematiğini (gerilim-şekil değiştirme ilişkisi) etkiler.
- Büyük uzamalar, büyük şekil değiştirmeler, büyük dönmeler [8]

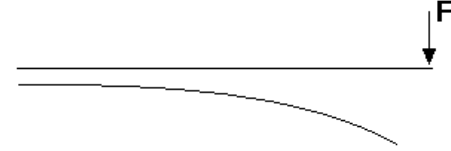
8.2.2 Geometrik Nonlineerite

Yük altında yapı büyük şekil değiştirme veya uzamalara maruz kalıyorsa, bir sonraki adımda, yapının ilk durumu değil, deforme olduktan sonraki durumu referans alınmalıdır. Bu da iterasyonlu bir çözüm, yani nonlineer bir çözüm gerektirir [8].

Lineer Davranış



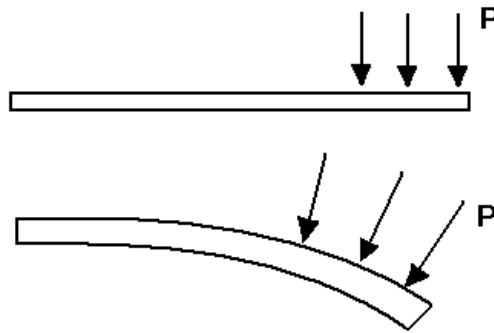
**Nonlinear İtaratif
Çözüm**



Şekil 8.5: Lineer ve nonlinear çözümde geometrinin davranışı

8.2.2 Sınır Koşullarının Değişmesinden Dolayı Oluşan Nonlineerite

- Temas problemlerinde sıklıkla karşılaşılır.
- Yük altında, yapılar temas ederler ve bu olay sırasında temas yüzeyleri ve temas kuvvetleri değişiklik gösterir. Her ilerlemede yeni temas yüzeyi ve temas kuvveti hesaplanmalıdır.
- Sürtünme de düşünüldüğünde, nonlinear bir etki daha göz önüne alınmalıdır.
- İzleyici Kuvvet (Follower Force) özelliği. Yükün, deforme olmuş geometriyi takip etmesi [8].



Şekil 8.6: İzleyici kuvvetin takip ettiği yol

8.3 Linear Statik Analiz – Nonlinear Statik Analiz Karşılaştırması

Tablo 8.1: Linear ve nonlinear çözüm tekniklerinin karşılaştırılması

Lineer - Nonlinear Karşılaştırması		
F,u ilişkisi	$u = F \times \alpha$	$u=f(F)$ (genellikler nonlinear fonksiyon)
σ, ε ilişkisi	$\sigma = E \times \varepsilon$	$\sigma = f(\varepsilon, d\varepsilon/dt, t)$
u Miktarı	Geometri değişikliği ~ 0 ilk hal referans halidir	Geometrik değişiklik > 0 Bir önceki hal, referans halidir
Malzeme Özellikleri	Lineer elastik malzeme özellikleri (kolay bulunur)	Nonlinear malzeme özellikleri Deneysel çalışma gerektirir
Eski Duruma Dönme	Yapı, yük kalktığında, ilk duruma dönüşür	Yapının, yük kalktığında, döndüğü durum, ilk durum değildir.
Sınır Koşulları	Analiz süresinde sınır koşulları aynı kalır	Analiz sırasında sınır koşulları değişebilir, (temas yüzeyi değişir)
Yükleme Sırası	Yükleme sırası önemli değildir. Son durum yükleme tarihçesiyle değişmez.	Yükleme tarihçesine göre son durum değişiklik gösterir.
İterasyon ve İlerleme	Yük, tek bir adımda uygulanır. İterasyon yoktur	Yük, ufak ilerlemelerle verilir ve böylece denge hali sağlanmış olur.
Hesaplama Zamanı	Oldukça azdır.	İterasyon ve ilerlemelerden dolayı oldukça uzundur.
Çözüme Ulaşım	Kolaylıkla çözüm elde edilir.	FE analizi ırsamayabilir. Bu durumda kullanıcının müdahale etmesi gerekir.
Sonuçların Kullanımı	Süperpozisyon ve orantı yapılabilir.	Orantı ve sonuçların toplanması mümkün değildir.
Gerilme - Şekil Değiştirme İlk Durumu	İlk durum önemli değildir	İlk durum, özellikle malzeme kaynaklı nonlinear problemler için önemli.

8.4 Nonlinear Statik Analiz

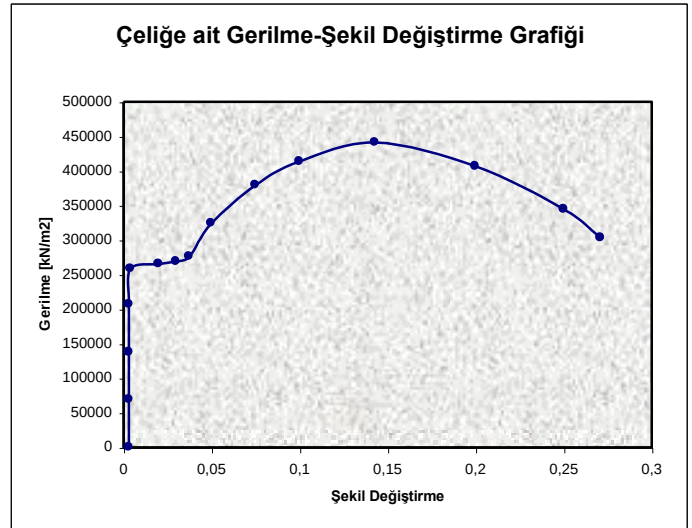
Nonlinear statik prosedürü yapının, elastik cevabından hata mekanizmasının gelişimine ve çökme oluşumuna kadar geçen zamandaki farklı seviyelerdeki yer değiştirmelerde nonlinear cevap davranışının direkt olarak bulunması için uygulanan basitleştirilmiş bir yaklaşımdır. Cevap davranışı yapının yer değiştirmelerinin farklı artımlarındaki mukavemetinin ölçümünün değerlendirilmesidir.

Her ne kadar tüm yapının akmasıyla ilişkili olmamasına rağmen, genellikle ‘Elastik Mukavemet’ olarak tanımlanan yapının ilk elemanı, sistem tarafından kesmeye karşı direnç gösterir. Tasarımın geleneksel lineer metotları uygulandığı zaman (R faktörleri kullanıldığında), elastik mukavemet tasarımın esas kesmesinden daha az olmayacaktır [9].

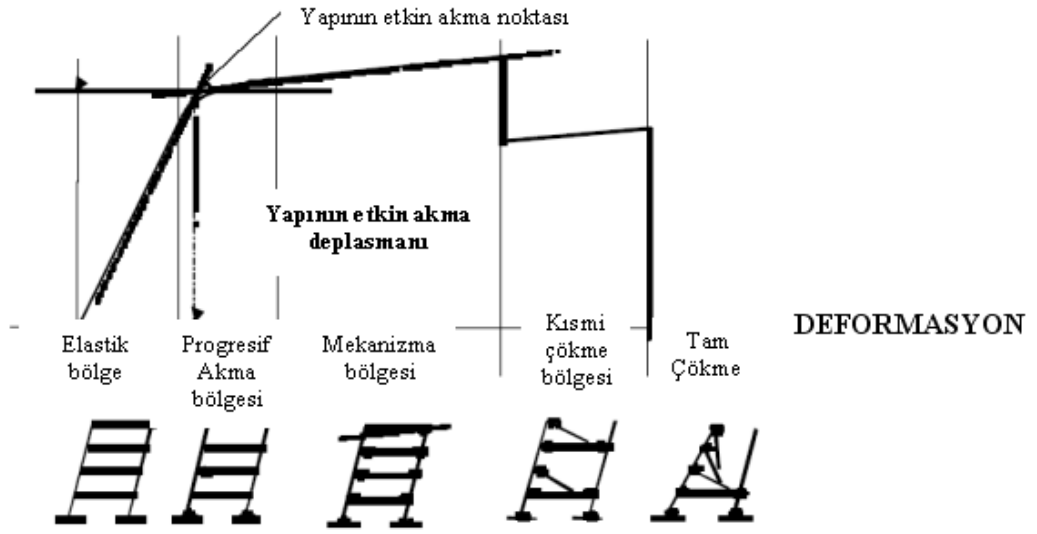
Msc. Patrande nonlinear statik analiz yapmak için gerekli tek veri malzemenin gerilme – şekil değiştirme eğrisidir. Bu eğriye ait veriler aşağıdaki tablodadır.

Tablo 8.2: Çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme verileri

Şekil Değiştirme [Birimsiz]	Gerilme [kN/m ²]
0	0
0,001	68951
0,002	137902
0,003	206853
0,004	258567
0,02	265462
0,03	268909
0,0375	275804
0,05	324070
0,075	379231
0,1	413707
0,143	441287
0,2	406812
0,25	344756
0,271	303385



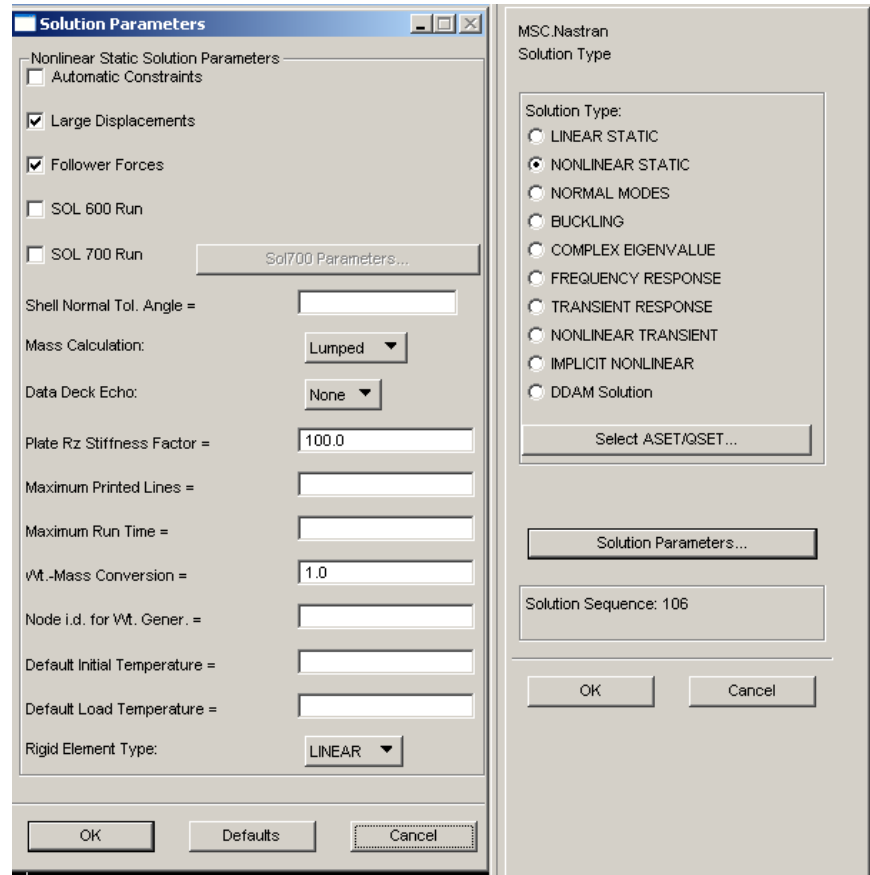
Şekil 8.7: Çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ve değerleri

DAYANIM**Yapının etkin akma mukavemeti**

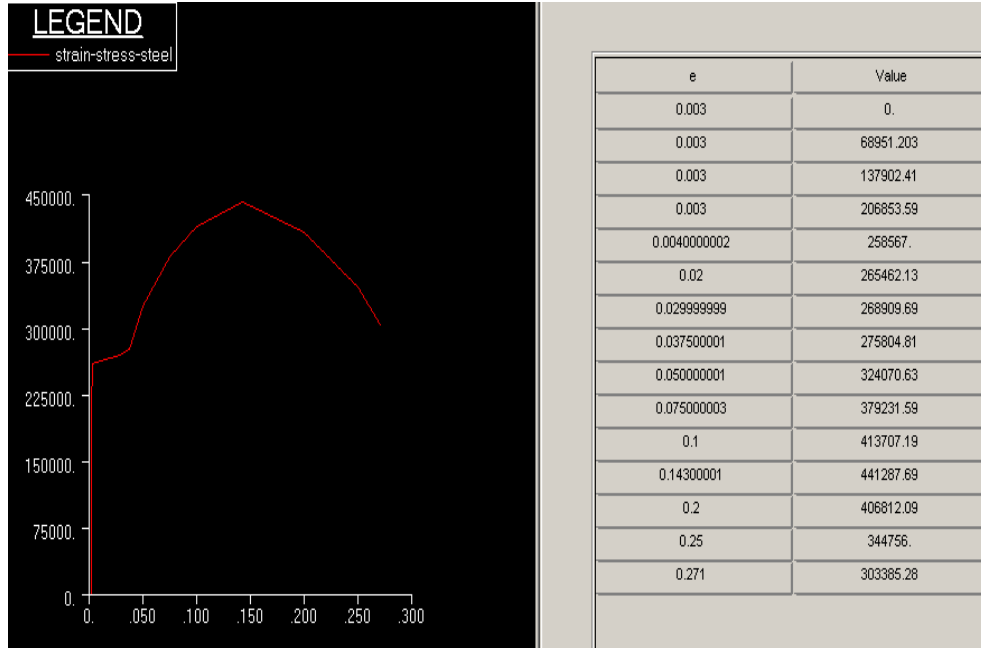
Şekil 8.8: Çerçeve bir yapı için dayanım-deformasyon ilişkisi

Msc.Patran'da nonlineer statik analiz kodu SOL106 olup, analiz için gerekli değişkenler aşağıdadır. Bunlar sırasıyla;

- Gerilme – şekil değiştirme eğrisi : var
- Yük artışının sayısı : 10
- Büyük deplasman : var
- İzleyici kuvvet : var
- Tabaka Rz Katılık Faktörü : 100.0
- Wt-Kütle Konversiyonu : 1.0



Şekil 8.9: Nonlineer statik analiz parametreleri



Şekil 8.10: Msc.Patran'da oluşturulmuş gerilme–şekil değiştirme tablosu ve grafiği

8.5 Nonlinear Statik Analiz Sonuçları

Yapılan nonlinear statik analiz sonucunda ana kirişteki yer değiştirme miktarları Tablo 8.5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 8.3: Ana kiriş üzerindeki lineer ve nonlinear analiz sonucunda yer değiştirme miktarlarının karşılaştırılması

Ana Kiriş Üzerindeki Yer Değiştirme Miktarları [m]							
Yük Durumu	Analiz Türü	DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
YD-1	Lineer	0.00018	9.28E-05	-0.00017	-0.00022	8.46E-06	-0.00194
	Nonlinear	0.000779	0.000265	-0.000506	-0.000438	0.000024	-0.005842
YD-2	Lineer	0.0112	6.47E-05	-0.00086	0.00984	0.000036	-0.00746
	Nonlinear	0.034369	0.000185	-0.002593	0.030160	0.000100	-0.022559
YD-3	Lineer	0.00306	7.93E-05	-0.00025	0.00258	1.58E-05	-0.0022
	Nonlinear	0.009341	0.000221	-0.000736	0.007865	0.000044	-0.006621
YD-10	Lineer	0.086927	0.002374	-0.015604	0.069243	0.001868	-0.095181
	Nonlinear	0.347324	0.006808	-0.048134	0.293716	0.005306	-0.293040
YD-11	Lineer	0.000289	0.000149	-0.000272	-0.000357	0.000014	-0.003126
	Nonlinear	0.001254	0.000426	-0.000814	-0.000703	0.000038	-0.009395
YD-12	Lineer	0.018064	0.000104	-0.001386	0.015822	0.000058	-0.011999
	Nonlinear	0.055541	0.000297	-0.004181	0.048778	0.000161	-0.036291
YD-13	Lineer	0.004925	0.000127	-0.000395	0.004142	0.000025	-0.003536
	Nonlinear	0.015104	0.000356	-0.001183	0.012731	0.000071	-0.010650
YD-21	Lineer	0.002571	0.001325	-0.002415	-0.003170	0.000121	-0.027777
	Nonlinear	0.004412	0.003832	-0.007251	-0.012954	0.000343	-0.083723
YD-22	Lineer	0.160543	0.000925	-0.012316	0.140617	0.000514	-0.106640
	Nonlinear	0.556853	0.002671	-0.040215	0.497112	0.001455	-0.328780
YD-23	Lineer	0.043772	0.001132	-0.003510	0.036811	0.000226	-0.031429
	Nonlinear	0.153455	0.003180	-0.010495	0.132109	0.000626	-0.096048
YD-30	Lineer	0.000882	0.024017	0.000733	-0.000585	0.008380	-0.001297
	Nonlinear	0.002602	0.070935	0.002136	-0.001775	0.024415	-0.003874
YD-31	Lineer	0.093612	0.000040	0.000923	0.091439	-0.000053	-0.005417
	Nonlinear	0.277024	0.000098	0.001946	0.270471	-0.000152	-0.017104
YD-32	Lineer	0.092646	0.000040	0.000977	0.090570	-0.000053	-0.005112
	Nonlinear	0.274096	0.000098	0.002122	0.267838	-0.000151	-0.016167
YD-33	Lineer	0.092240	0.000040	0.001000	0.090205	-0.000053	-0.004820
	Nonlinear	0.272867	0.000096	0.002196	0.266734	-0.000151	-0.015281
YD-35	Lineer	0.000577	0.021298	0.000934	-0.000392	0.001169	-0.001572
	Nonlinear	0.001739	0.062616	0.002717	-0.001127	0.003517	-0.004692
YD-36	Lineer	0.000912	0.020686	0.000610	-0.000575	0.004616	-0.001037
	Nonlinear	0.002687	0.061257	0.001771	-0.001747	0.013533	-0.003099
YD-37	Lineer	0.000221	0.009991	0.000394	-0.000221	0.003771	-0.000717
	Nonlinear	0.000660	0.029321	0.001169	-0.000656	0.011041	-0.002118

Tablo 8.3: Ana kiriş üzerindeki lineer ve nonlinear analiz sonucunda yer değiştirme miktarlarının karşılaştırılması (Devamı)

Ana Kiriş Üzerindeki Yer Değiştirme Miktarları [m]							
Yük Durumu	Analiz Türü	DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
YD-41	Lineer	0.091027	0.000039	0.000897	0.088914	-0.000051	-0.005268
	Nonlinear	0.269378	0.000095	0.001911	0.263006	-0.000148	-0.016614
YD-42	Lineer	0.090088	0.000039	0.000950	0.088069	-0.000051	-0.004971
	Nonlinear	0.266531	0.000095	0.002082	0.260445	-0.000147	-0.015703
YD-43	Lineer	0.089693	0.000039	0.000972	0.087715	-0.000051	-0.004687
	Nonlinear	0.265336	0.000094	0.002154	0.259372	-0.000147	-0.014842
YD-45	Lineer	0.000561	0.020710	0.000908	-0.000382	0.001137	-0.001529
	Nonlinear	0.001690	0.060887	0.002644	-0.001097	0.003420	-0.004561
YD-46	Lineer	0.000887	0.020114	0.000594	-0.000560	0.004489	-0.001008
	Nonlinear	0.002613	0.059565	0.001723	-0.001698	0.013160	-0.003012
YD-47	Lineer	0.000215	0.009715	0.000383	-0.000215	0.003667	-0.000697
	Nonlinear	0.000641	0.028513	0.001137	-0.000638	0.010738	0.028513
YD-51	Lineer	0.095631	0.000040	0.001240	0.093706	-0.000046	-0.004524
	Nonlinear	.281950	0.000089	0.002812	0.276150	-0.000132	0.014487
YD-52	Lineer	0.427947	0.000178	0.005547	0.419333	-0.000204	-0.020244
	Nonlinear	1,263,668	0.000373	0.000354	1,237,795	-0.000617	0.000373
YD-55	Lineer	0.000401	0.035980	0.001560	-0.001961	0.012725	-0.001751
	Nonlinear	0.001289	0.001289	0.004508	-0.005762	0.001289	-0.005268
YD-56	Lineer	0.001796	0.161009	0.006983	-0.008773	0.056944	-0.007836
	Nonlinear	-0.023655	0.475659	0.017972	-0.023655	0.165484	-0.025059
YD-71	Lineer	-0.001981	0.000010	-0.000442	-0.003473	-0.000971	-0.004079
	Nonlinear	-0.006022	0.000034	-0.001341	-0.010176	-0.002648	-0.012349
YD-81	Lineer	0.001018	0.002740	0.000819	-0.001372	-0.015924	-0.000544
	Nonlinear	0.001065	0.002749	0.000806	-0.001434	-0.016494	-0.000615

Yer değiştirmeler, cismin geometrisinde hesaba katılır ölçüde değişiklik oluşturacak kadar büyük ise, "geometrik nonlinear" tarzda davranıyor demektir. Bu modelde bazı yük durumları için geometrik olarak nonlineerdir. Bu durumda yine ana kiriş üzerindeki gerilme değerleri aşağıdaki tabloda görüldüğü üzere akma sınırının oldukça altında kalmıştır (Tablo 8.4).

Tablo 8.4: Ana kirişte üzerinde lineer ve nonlinear statik analizler sonucunda oluşan gerilme değerin karşılaştırılması

Yük Kombinasyonları	Maksimum Von Mises Gerilmesi [kN/m ²]		
	Ana Kiriş		
	Lineer Analiz	Nonlinear Analiz	Değişim [%]
121	7.363E+04	6.692E+04	9.11
122	1.504E+05	1.364E+05	9.03
123	7.629E+04	6.933E+04	9.12
125	6.620E+04	5.823E+04	12.04
126	1.435E+05	1.303E+05	9.21
127	7.104E+04	6.458E+04	9.09

Nonlinear statik analiz sonucunda tüm yük kombinasyonlarındaki gerilme %9 azalmıştır.

9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tasarım aşamasında olan iş makinaları çelik yapılarının, seri üretime geçmeden önce bilgisayar ortamında modellenmesi ve mukavemet analizlerinin yapılması, tasarımın doğrulanması ve yapılan iş makinasının güvenilirliği açısından çok önemlidir. S.E. analizleri sonucunda bulunan mukavemet bilgileri, kullanılan malzemenin akma mukavemetine göre, çelik yapı montajının yorulma ömrü gereksinimlerine göre ya da tasarımcının önemli gördüğü diğer kriterlere (üretim kolaylığı, makinanın çalışma ortamı vb.) göre değerlendirilir. Bu değerlendirilmeler doğrultusunda tasarımcı tasarımında mukavemet açısından kritik gördüğü yerleri belirler ve seri üretimden önce bu bölgelerde değişiklik yapabilme imkanı bulur. İlk tasarımda yapılan hatalar ya da gözden kaçan ayrıntılar düzeltilebilir.

S.E analiz sonuçları, sadece mukavemet açısından kritik görülen yerlerin düzeltilmesi anlamına gelmemelidir. Aynı zamanda aşırı güvenli görülen yerlerde optimum tasarımı yakalayabilmek için sadeleştirmeler de yapılabilir. Yapı geometrisinin değiştirilmesi ya da kesit alanlarının azaltılması ile aşırı güvenli olan bölgeler, güvenilirlik, ağırlık ve malzeme sarfıyatı kavramları göz önünde bulundurularak optimum hale getirilebilir.

Sonuç olarak tasarımcı güvenilirlik, dayanıklılık, ağırlık, malzeme kullanımı ve hacim gereksinimleri doğrultusunda optimum tasarımı bulana kadar tasarımını bilgisayar ortamında değiştirebilir ve sonuçlarını değerlendirebilir.

Belirli bir noktadaki gerilim değeri S.E modelindeki toplam eleman sayısı artıkça gerilme değerinin doğruluk oranı artmakta, eleman sayısı düştükçe azalmaktadır. S.E metodunun güvenilir bir sonuç vermesi için belirli bir eleman sayısının kullanılması gerekmektedir. Ancak, bir aşamadan sonra eleman sayısındaki artış çok büyük gerilme değişimlerine sebep olmaz. Bu aşamadaki eleman sayısından daha fazla eleman kullanmak gereksizdir.

İş makinası çelik yapısı üzerinde daha güvenilir sonuçlar alınması istenen bölgelerde, bölgesel yoğunluğu arttırabilir. Bu sayede bütün yapının eleman sayısını arttırmaktansa, sadece ilgilenilen bölgenin eleman sayısı artırılarak iş yükü azaltılabilir.

Yukarıda belirtilen önlemler alındıktan sonra bile, S.E analiz sonuçları doğrulanmalıdır. Bu doğrulanmanın işlemi, en iyi deneysel mukavemet analizleri ile yapılabilir. Deneysel mukavemet analiz sonuçları ile S.E modeli sonuçları örtüşene kadar S.E modeli üzerindeki değişiklik çalışmaları yapılmalıdır.

S.E metodu sırasıyla model oluşturma ve özellikle çözüm aşaması bilgisayarda yapıldığı için, bu yöntemin etkili ve güvenilir sonuçlar vermesi bilgisayar kapasitesine bağlıdır.

S.E yöntemi ile mukavemet analizleri yapılabilmesi konunun teorisine hakim, eğitilmiş iş gücüne ihtiyaç duyulması da S.E yönteminin eksikleri arasına girebilir.

Eksik yönleri;

Tasarımın gidişatının ve güvenilirliğinin, mukavemet hesaplamaları sonuçları doğrultusunda yönlendiği düşünüldüğü zaman, yapılan hesaplamaların sonuçlarının da çok güvenilir olması gerekmektedir.

S.E yöntemi her ne kadar klasik mukavemet hesaplamaları ile yapılan hesaplamalardan daha iyi sonuçlar verse de hata yapma olasılığı ya da hata oranının yüksek olma olasılığı her zaman vardır.

Bu tez çalışmasında yapılan lineer statik ve nonlineer statik analizler neticesinde krenin yapısal özellikleri hakkında çok önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

Lineer statik yükleme durumlarında kren üzerinde oluşan gerilme değerleri, krenin tasarım aşamasında istenilen ve aşılmaması gereken gerilme değerlerinin oldukça altındadır. Yani tüm krenin emniyet katsayısı 2-20 arasında değişmektedir. Yapı üzerinde ortaya çıkan en yüksek gerilme değeri 200 MPa seviyelerindedir. Bu da çeliğin akma mukavemetinin altında kalmaktadır.

Lineer statik analizde elde edilen sonuçların doğruluğunu hem kontrol etmek hem de arttırmak adına bu çalışmada sonlu elemanlar modelinin nonlinear statik analizi de yapılmıştır. Nonlinear statik analizin yapılmasındaki en büyük amaç, çözücünün nümerik hata oranını düşürmektir. Yapılan nonlinear statik analiz sonucunda nonlinearin doğası gereği yer değiştirme değerleri artmıştır. Tüm kren üzerindeki gerilme değerlerinin hepsinde %9'luk bir düşüş gözlenmiştir. Tüm yük durumlarındaki gerilme değerlerinin aynı oranda azalması yapılan nonlinear statik analizin doğruluğunun bir nevi ispatıdır. Nonlinear analiz ile gerçeğe daha yakın sonuç edilmiştir.

Sonlu elemanlar modelinin klasik yöntemlerle çözümünde bir takım hatalar oluşmaktadır. Bu çalışmada mümkün mertebe bu hatalardan kaçınılmaya çalışılmıştır. Bu iki durumun karşılaştırılması aşağıdaki tablodaki gibi özetlenebilir (Tablo 9.1).

Tablo 9.1: Başlıca hata kaynakları

HATA KAYNAKLARI		
Hata Sebepleri	Klasik Analizlerde	Bu Analizde
S.E modeli ile gerçek yapı arasındaki farklılıklar	Var	Var
Sınır şartlarının doğru bir şekilde belirlenememesi	Var	Yok
Malzeme özellikleri ve geometrik özelliklerin yanlış belirlenmesi	Var	Yok
Çözüm esnasında sayısal hatalar	Var	Var
Yeterli sayıda eleman kullanılmaması	Var	Yok

Bu şartlar göz önüne alındığı zaman, S.E ile analiz yönteminde de hata olasılığının olduğu görülmüş olur.

Sonuç olarak S.E ile mukavemet analizleri sonuçları da doğrudan kabullenilmemeli belirli doğrulama prosedürlerinden geçirilmelidir. Bu doğrultuda,

- Katı modelin gerçek yapı ile olan uyumluluğu kontrol edilmeli,
- Sınır şartlarının doğruluğundan emin olunmalı,
- Malzeme özellikleri ve geometrik özellikler kontrol edilmeli,
- Eleman sayısı yeterliliği kontrol edilmelidir. Bölgesel eleman yoğunlukları arttırılabilir.

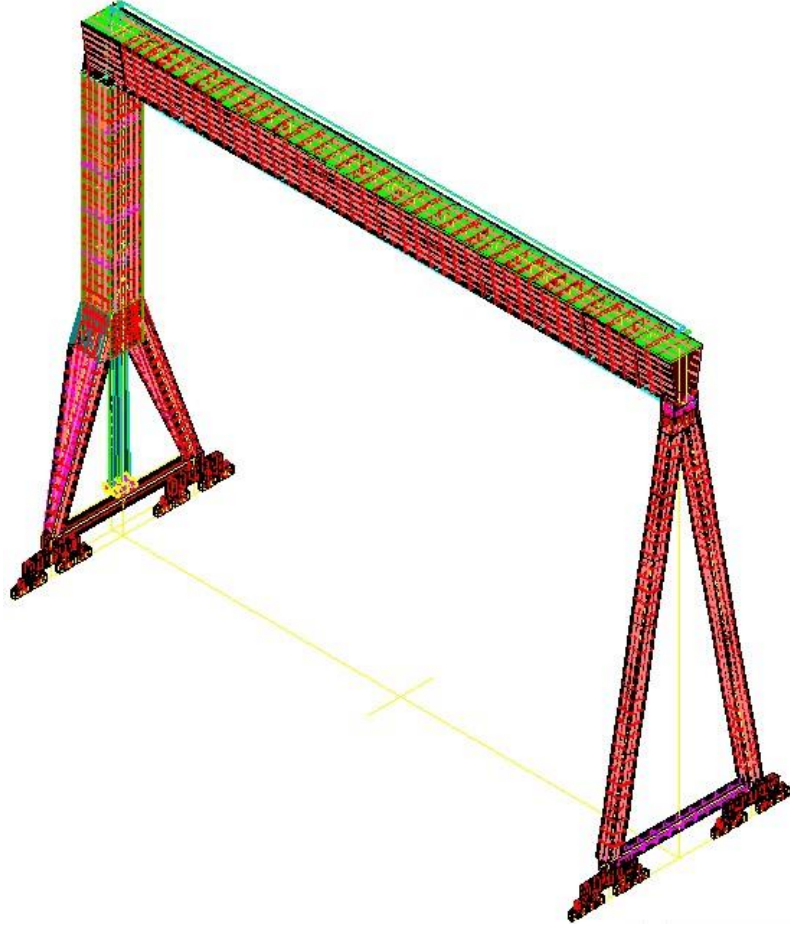
Bu çalışmada yapılan S.E yöntemi ile mukavemet analizleri tasarım aşaması esnasında zaman harcanması gerektirdiği halde, sonuçlarının deneysel mukavemet analizleri ile doğrulanmasından sonra tasarımcının başvuracağı ve sonuçları ile tasarım değişikliklerine gidebileceği en güvenilir ve hızlı yöntemdir. Tasarım sırasında bu yöntemle başvurulması, seri üretimden sonra karşılaşılabilecek ve çok büyük kayıplara sebep olabilecek tasarım hatalarının düzeltilmesi ve ekonomik açıdan da en optimum tasarımın yapılması açısından önemli bir kazanç sağlar. Uzun vadede düşünüldüğü zaman, iş zamanı açısından da önemli katkıları vardır. Rekabet ortamının günden güne arttığı ve zorlaştığı şu günlerde, tercih edilen bir marka olabilmek için iş makinası üreticilerinin tasarım ve ürün geliştirme safhalarında S.E yöntemine sıkça başvurmaları gerekmektedir.

KAYNAKLAR

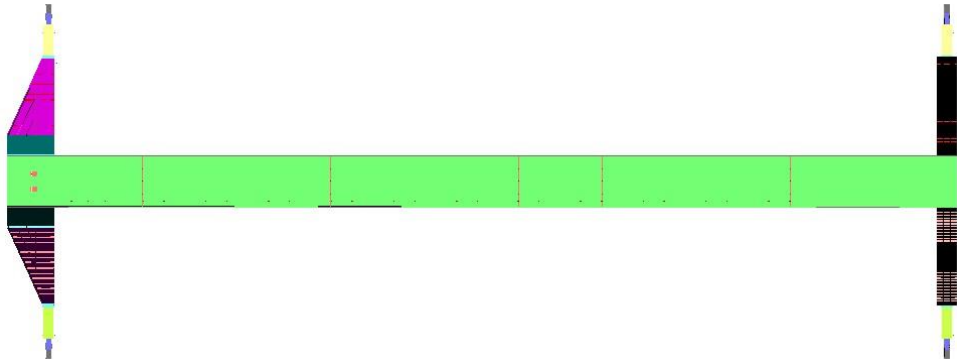
- [1] **Zeid I.**, 1991. CAD/CAM Theory and Practice, USA
- [2] **McMahon C., Browne J.**, 1993. CAD/CAM from Principles to Practice, USA
- [3] **Zienkiewicz O.C.**, 1978 The Finite Element Method, Mc Graw-Hill, London
- [4] **Knight C.E.**, 1993. The Finite Element Method in Mechanical Design, PWS-KENT Publishing Company, Boston.
- [5] **Moaveni S.**, 1999. Finite Element Analysis, Minnesota State University, Mankato.
- [6] **F.E.M.**, 1998. Rules for the design of hoisting appliances, booklet 2 and booklet 3, *Federation de la Manutention*
- [7] **Kutay M.G.**, 1993. Gezerköprü Vinç Dolu Kiriş Hesapları, Almanya
- [8] **Nelson J.**, 2005. Msc.Nastran User Guide, Msc.Software Corporation, Santa Ana
- [9] **Nelson J.**, 2005. Msc.Patran User Guide, Msc.Software Corporation, Santa Ana
- [10] **Kadioğlu N., Engin H., Bakioğlu M.**, 1996. Mukavemet Problemleri Cilt 2, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi

EKLER

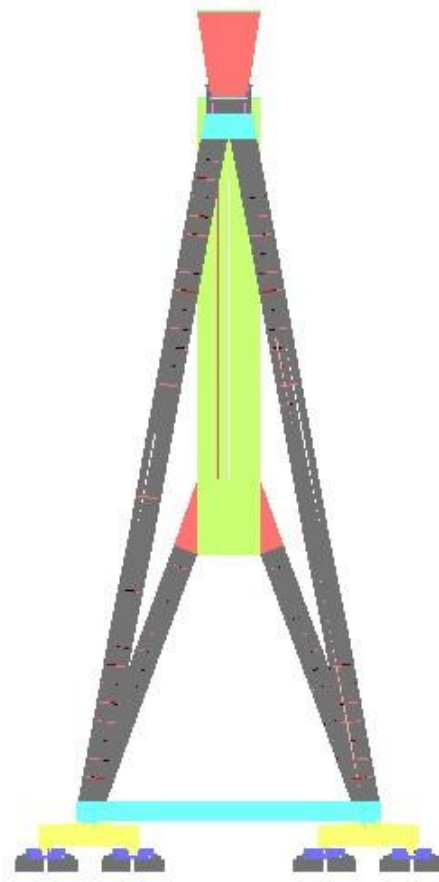
EK-A



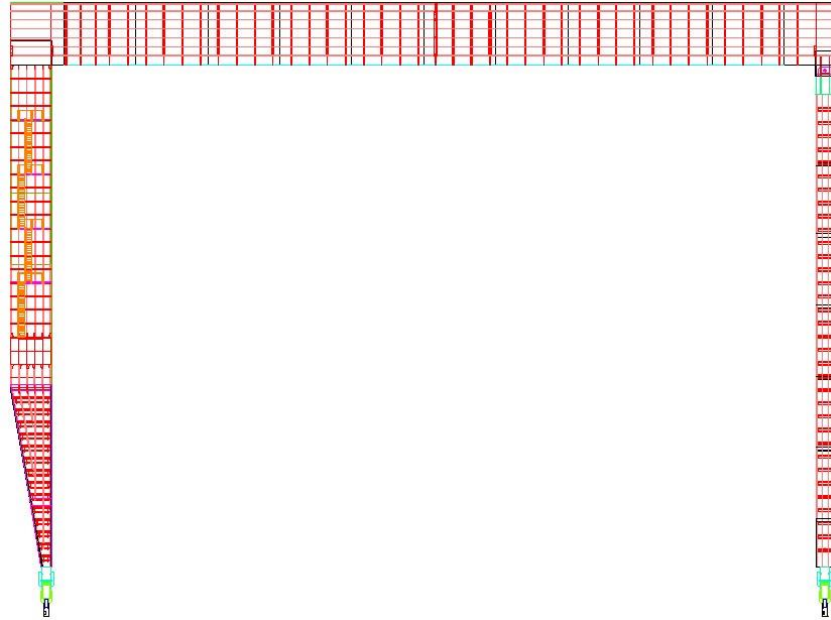
Şekil A.1: Modelin İzometrik görünüşü



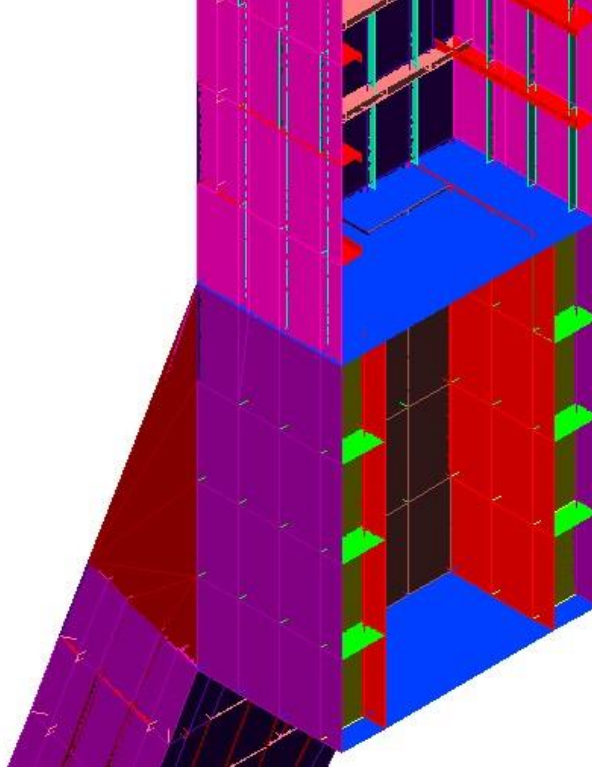
Şekil A.2: Modelin üstten görünüşü



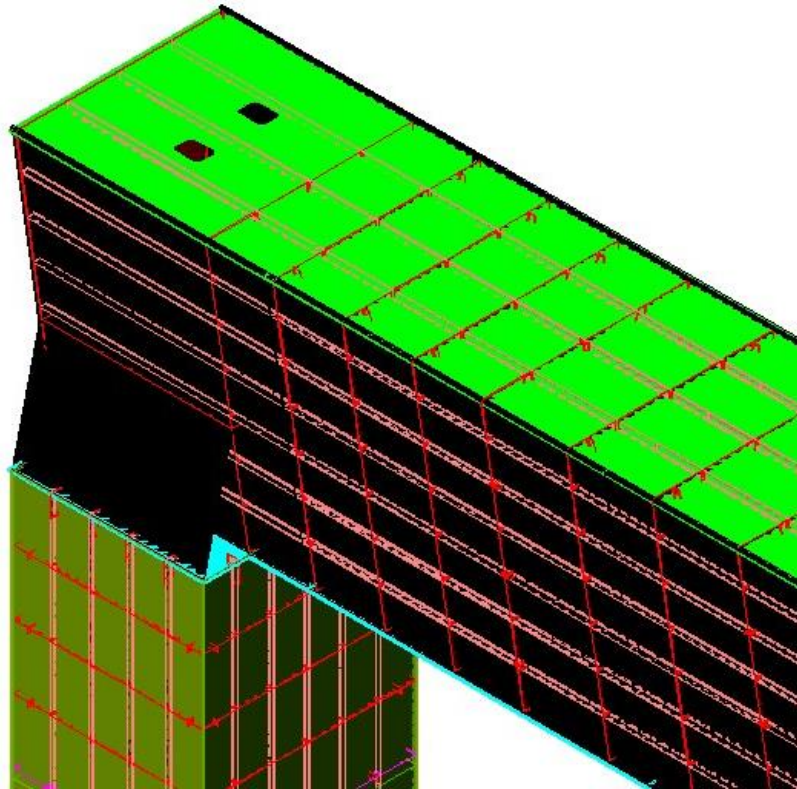
Şekil A.3: Mafsallı ayaklar



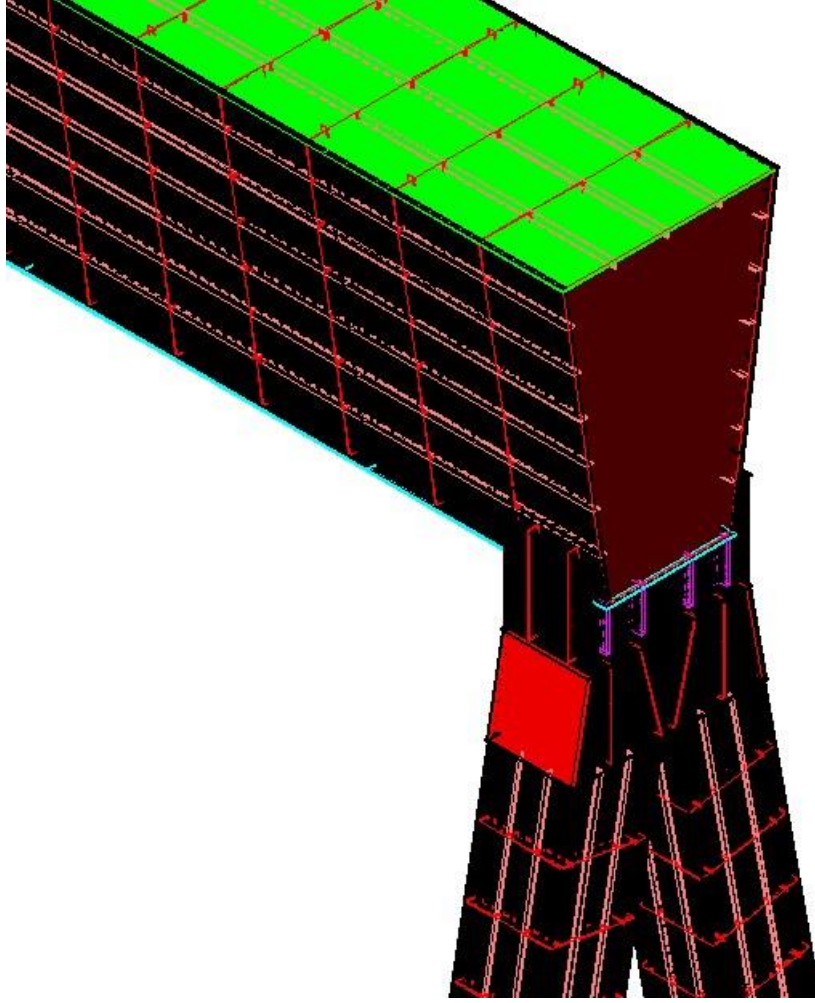
Şekil A.4: Modelin genel görünüşü



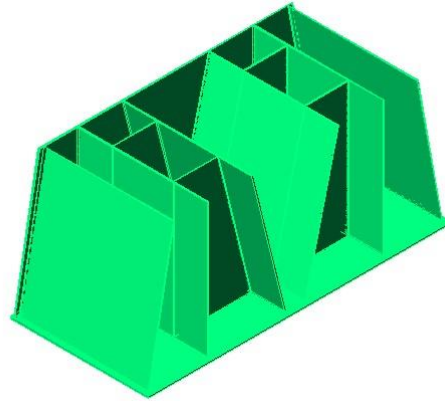
Şekil A.5: Açılı elemanların bağlantı parçasının orta kesitteki isometrik görünüşü



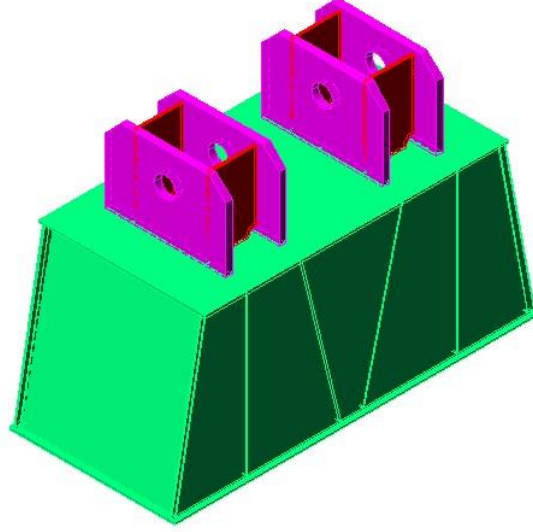
Şekil A.6: Rijit ayak ve ana kiriş bağlantı parçasının izometrik görünüşü



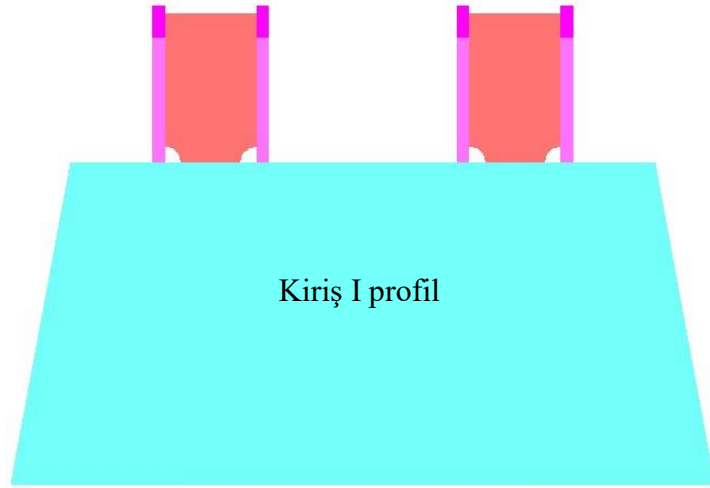
Şekil A.7: Mafsallı ayak ve ana kirişin bağlantı parçasının izometrik görünüşü



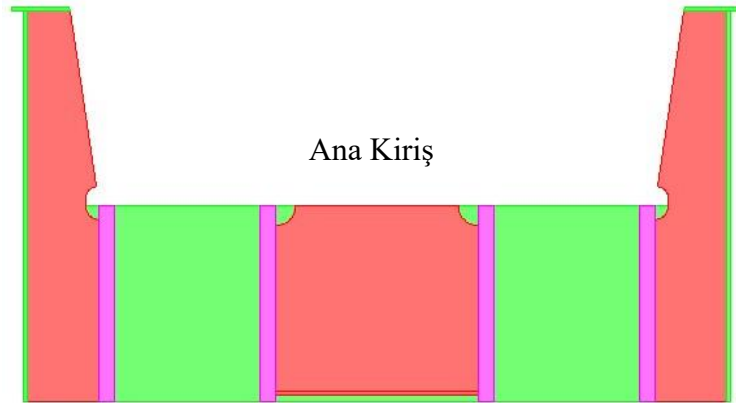
Şekil A.8: Mafsallı ayağın kiriş bölgesinin izometrik görünüşü



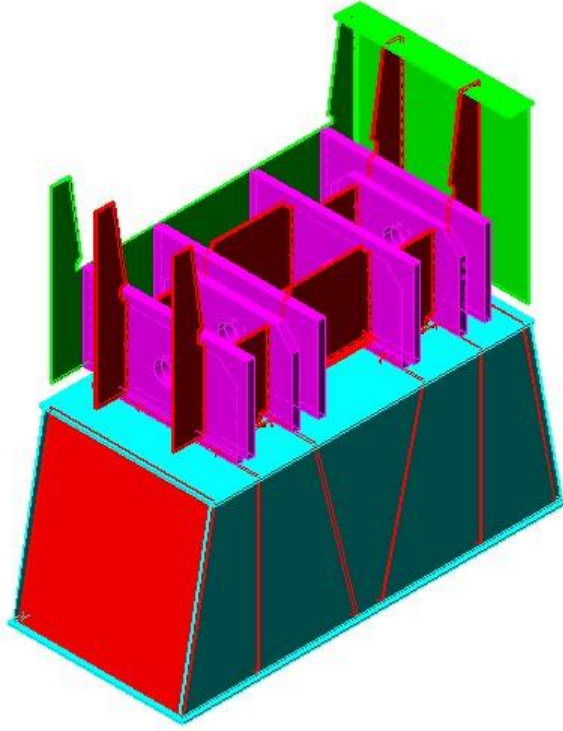
Şekil A.9: Mafsallı ayak kirişinin isometrik görünüşü



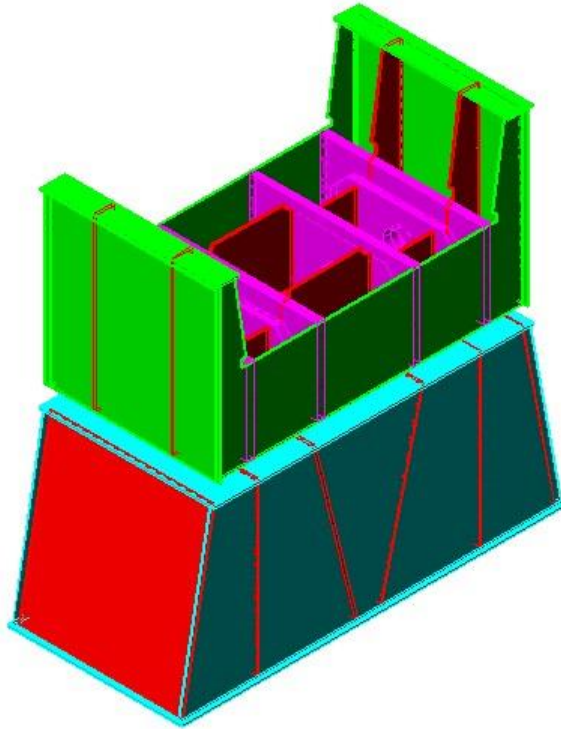
Şekil A.10: Mafsallı ayak kirişinin genel görünüşü



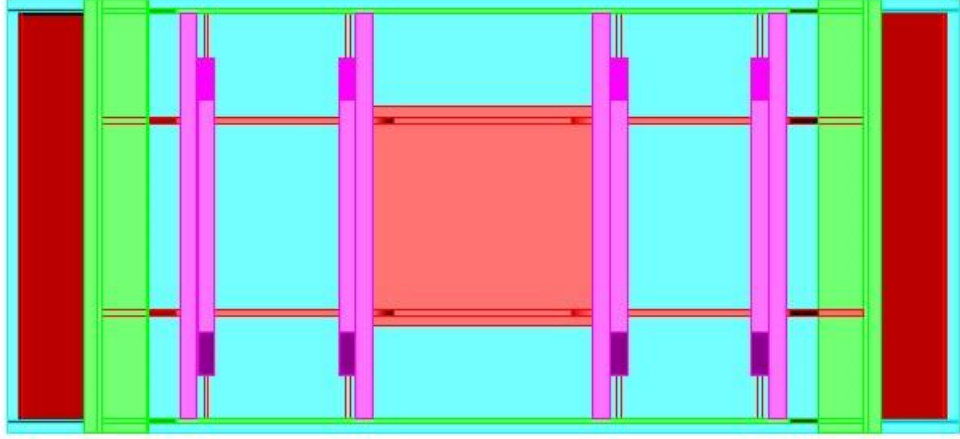
Şekil A.11: Ana kiriş ve Mafsallı ayak destek levhasının genel görünüşü



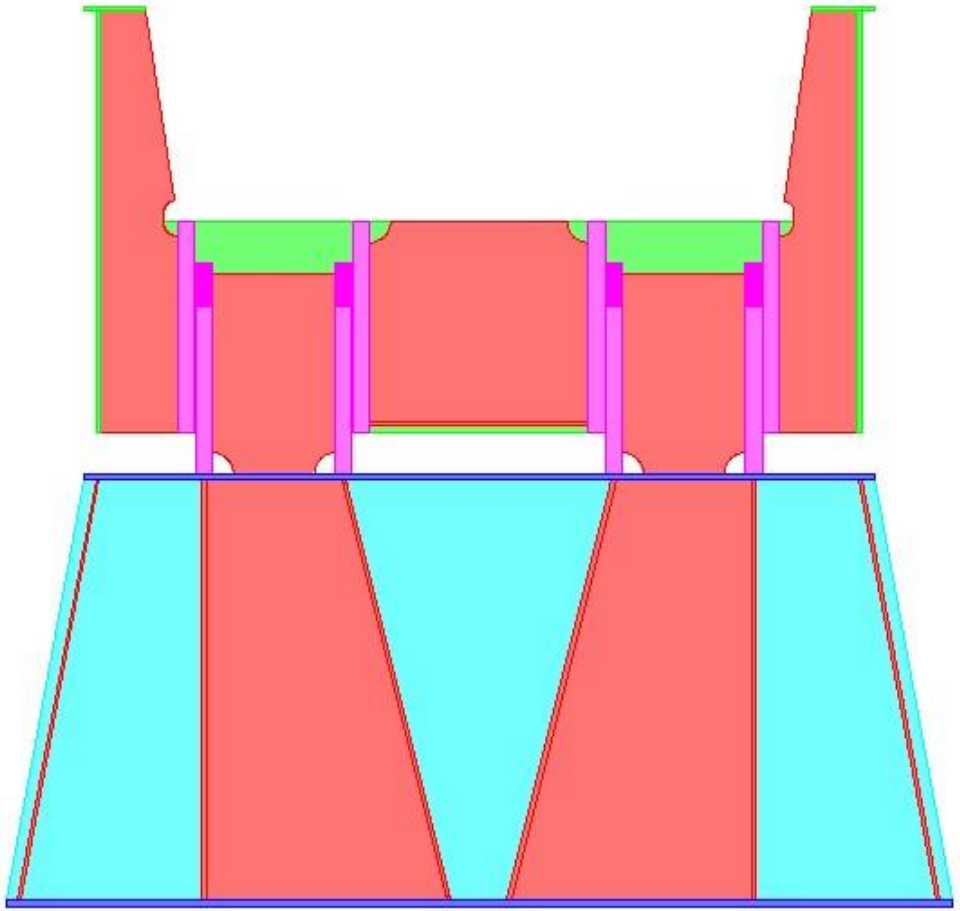
Şekil A.12: Mafsal konstrüksiyonun bir kısmının isometrik görünüşü



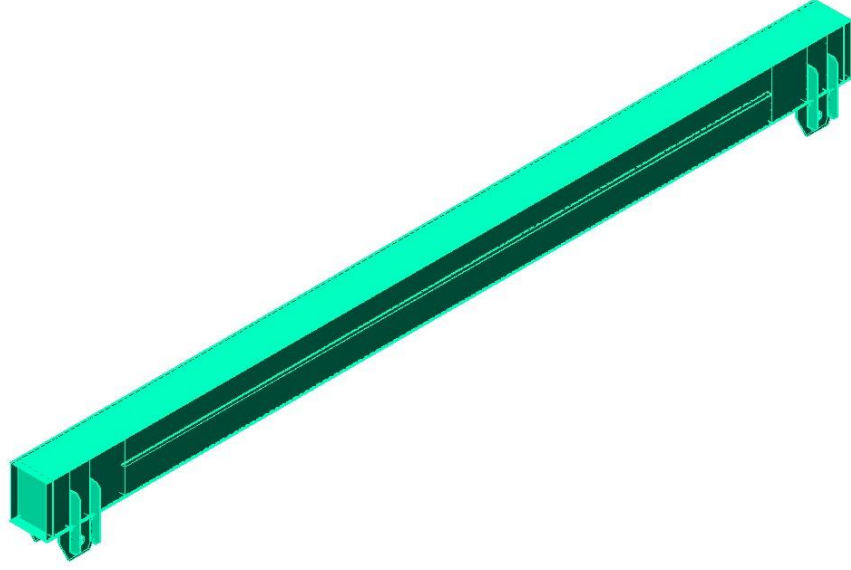
Şekil A.13: Mafsal konstrüksiyonun isometrik görünüşü



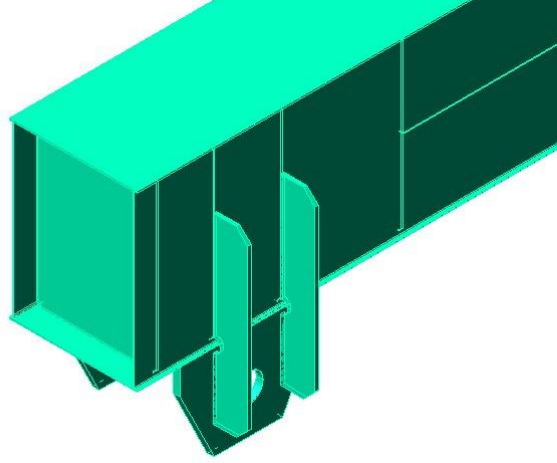
Şekil A.14: Mafsal konstrüksiyonun üstten görünüşü



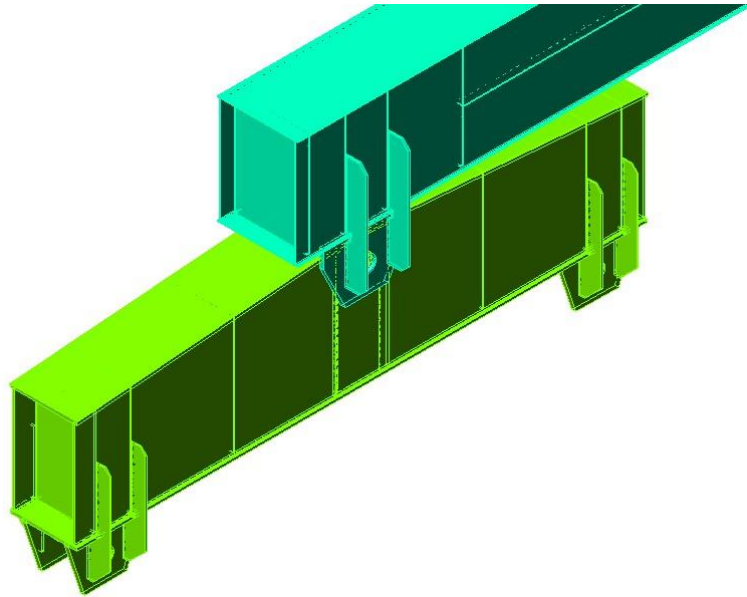
Şekil A.15: Mafsal konstrüksiyonun kesit görünüşü



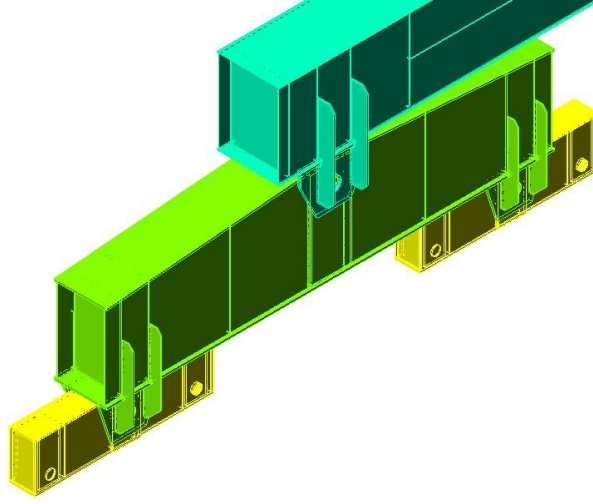
Şekil A.16: Uç taşıyıcının izometrik görünüşü



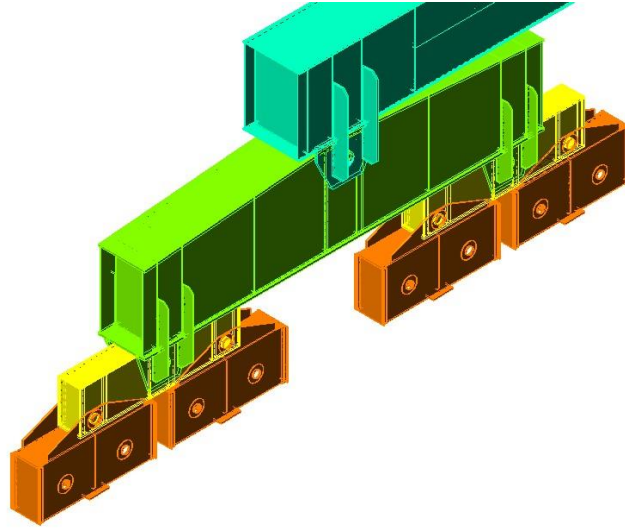
Şekil A.17: Uç taşıyıcı destek levhalarının izometrik görünüşü



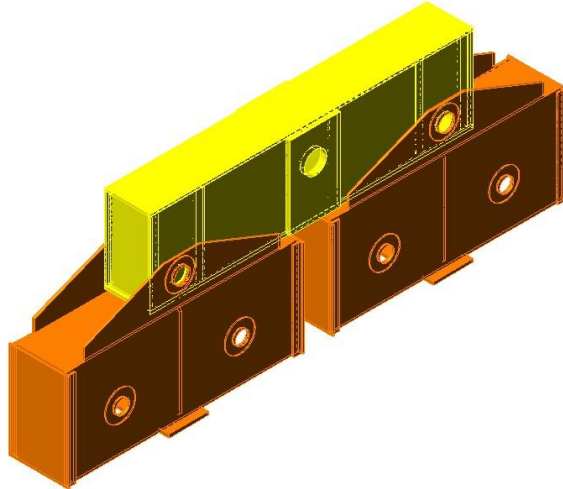
Şekil A.18: Uç taşıyıcı ve dengeleyici 1 no'lu I- profilin izometrik görünüşü



Şekil A.19: Uç taşıyıcı ve dengeleyici 1 ve 2 no'lu I- profilin izometrik görünüşü

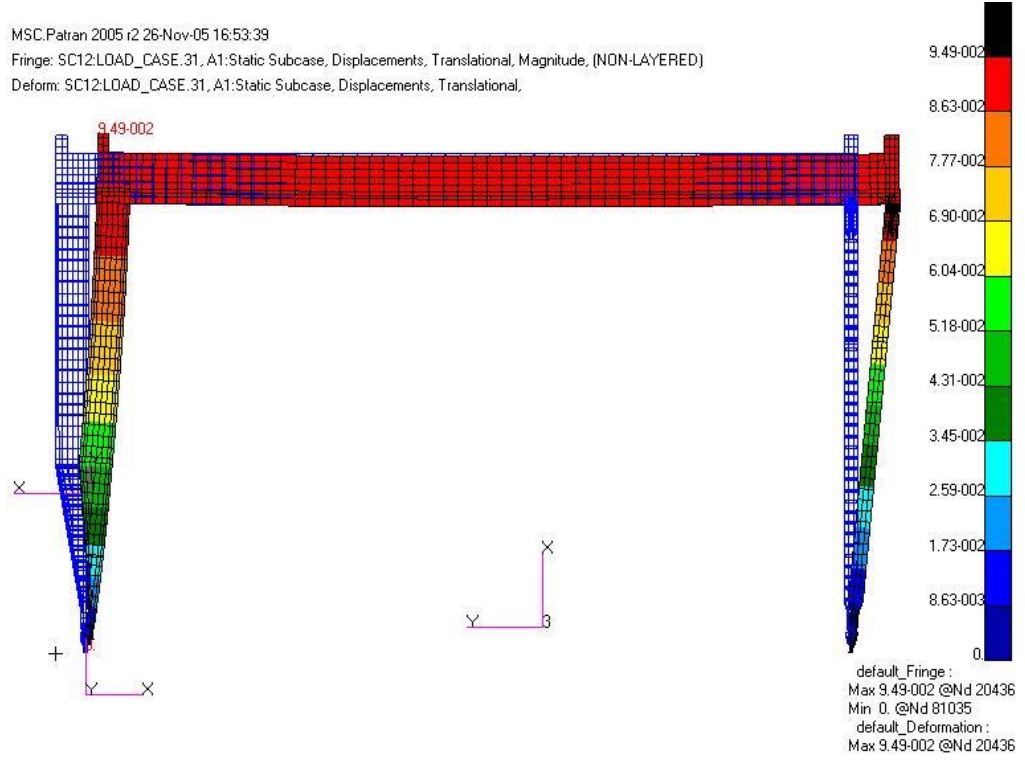


Şekil A.20: Gezer konstrüksiyonun izometrik görünüşü

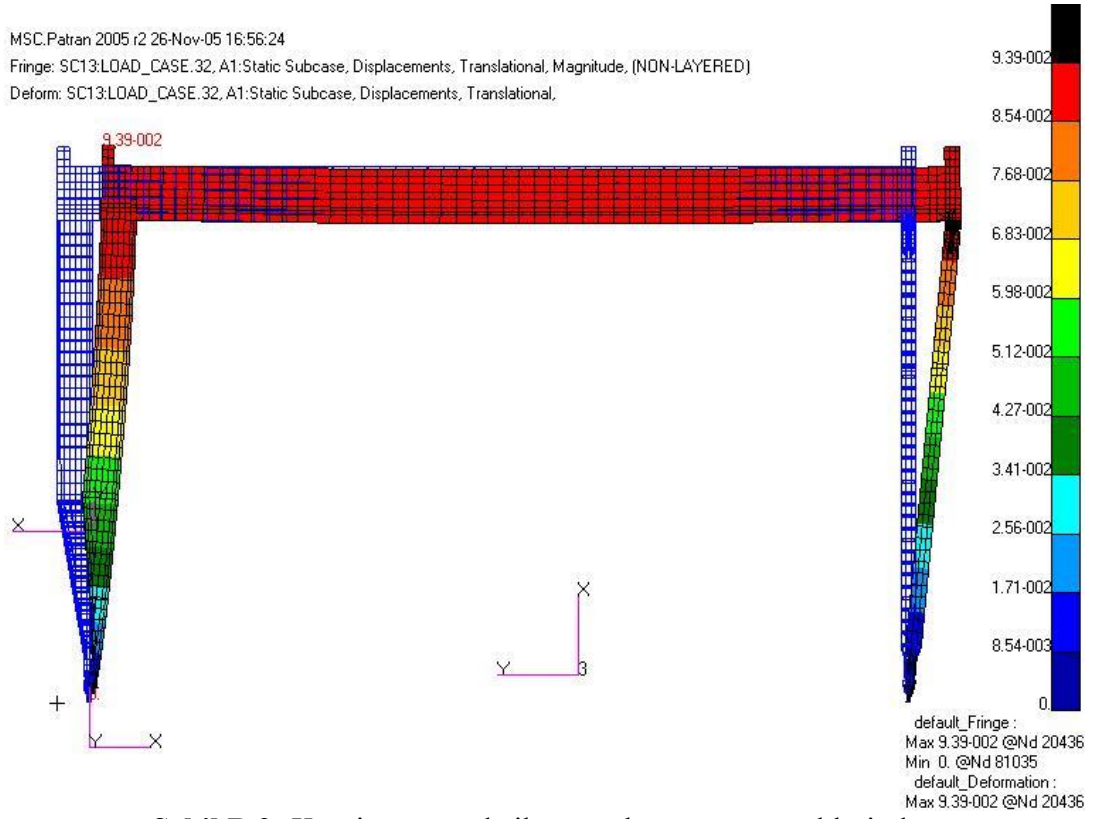


Şekil A.21: 2 nolu dengeleyici I-profilin ve bojilerin (Kren alt düzeneği) izometrik görünüşü

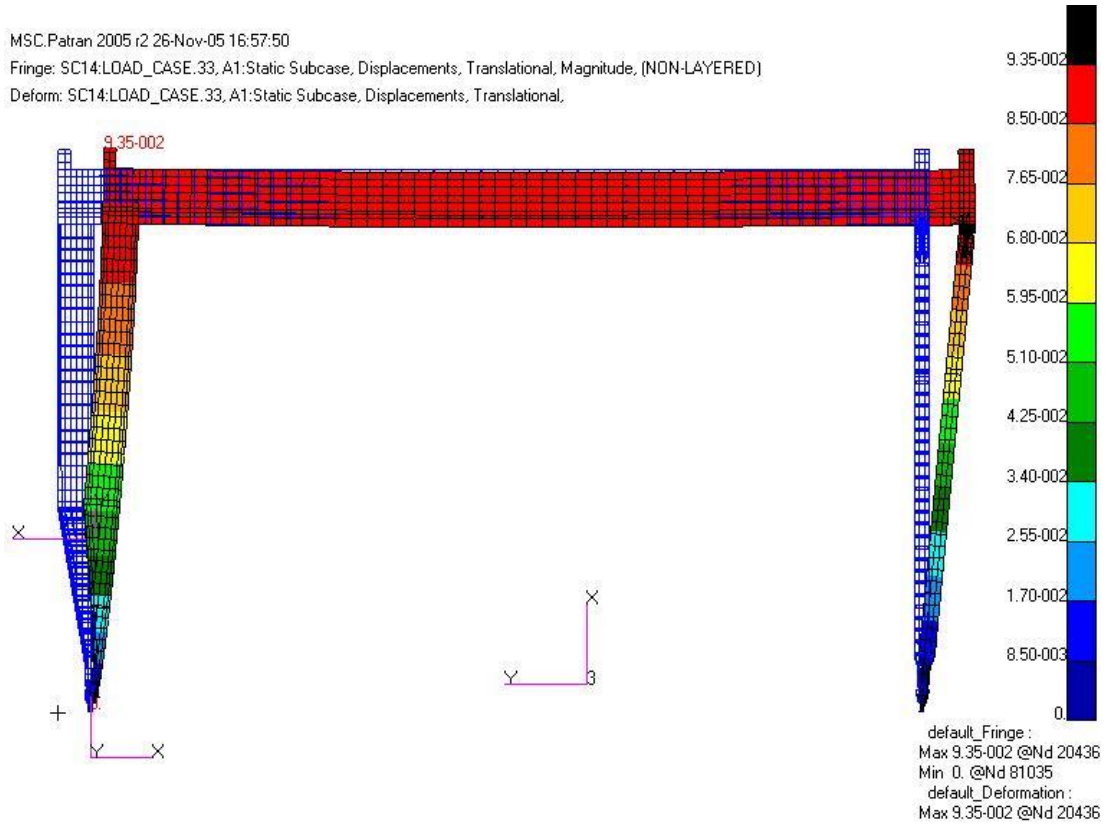
EK-B



Şekil B.1: Krenin solunda iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon



Şekil B.2: Krenin ortasında iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon

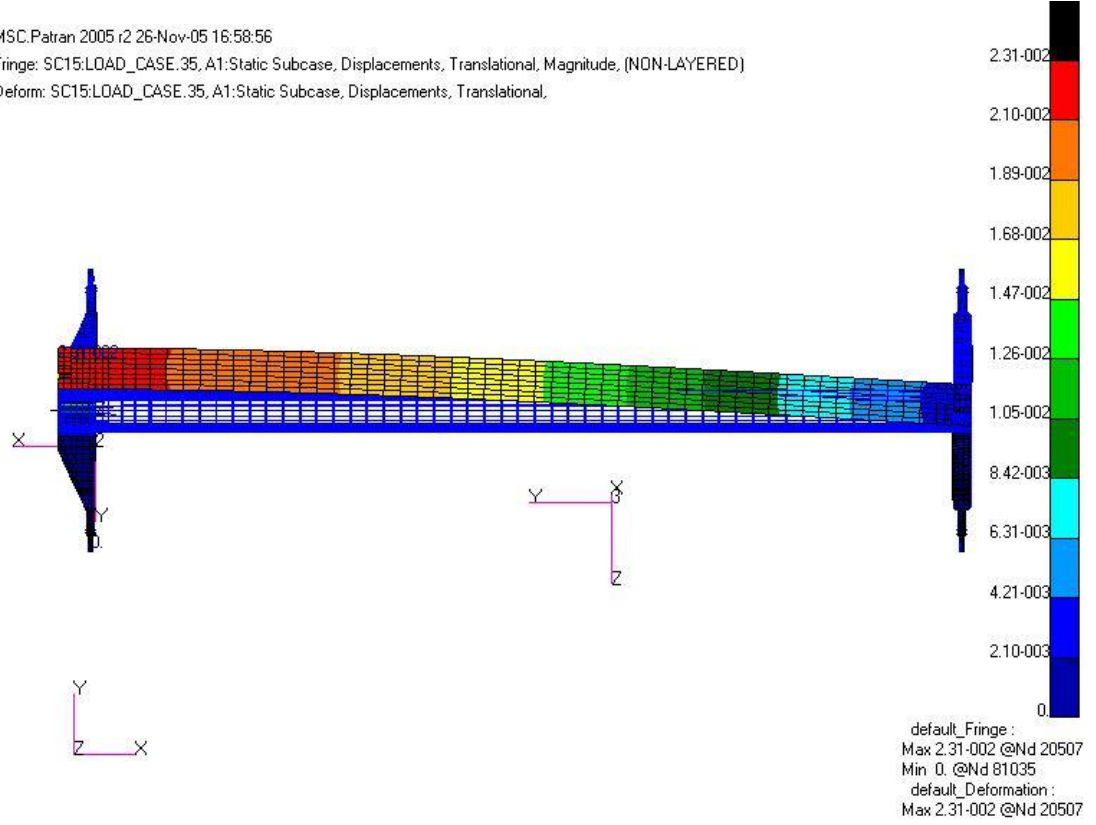


Şekil B.3: Krenin sağında iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 16:58:56

Fringe: SC15:LOAD_CASE.35, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC15:LOAD_CASE.35, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

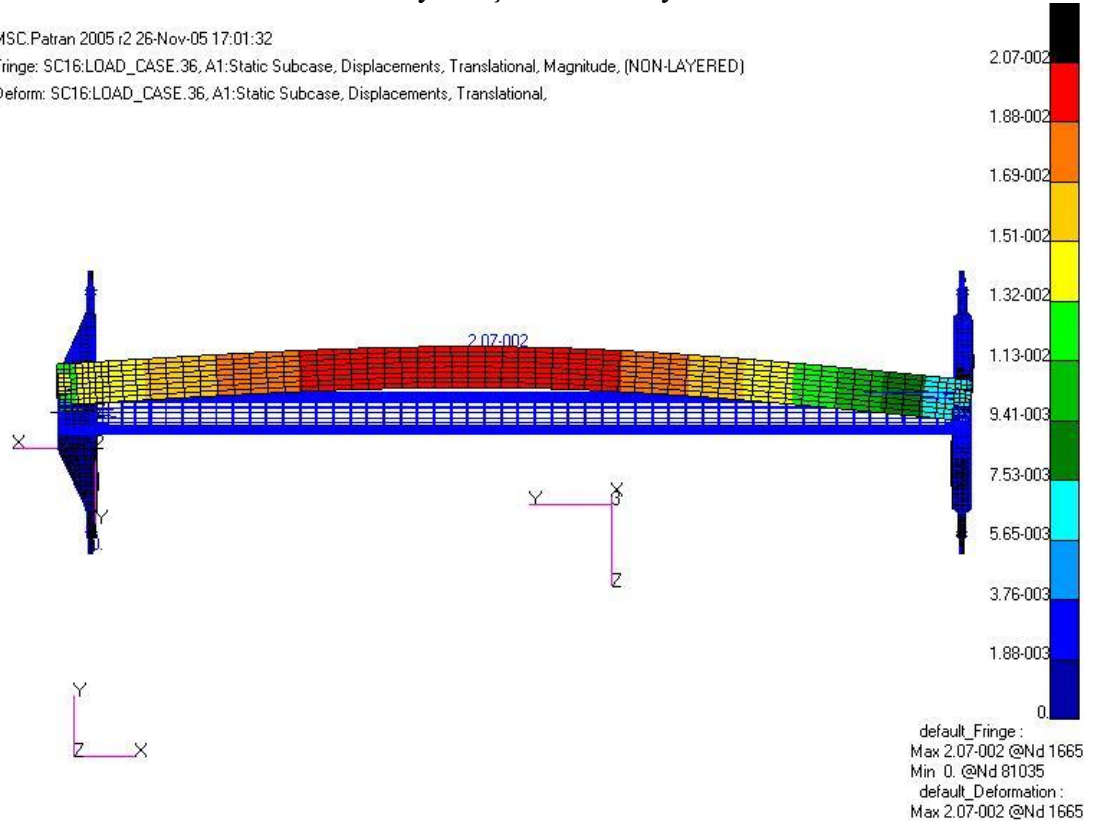


Şekil B.4: Krenin solunda iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 17:01:32

Fringe: SC16:LOAD_CASE.36, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC16:LOAD_CASE.36, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

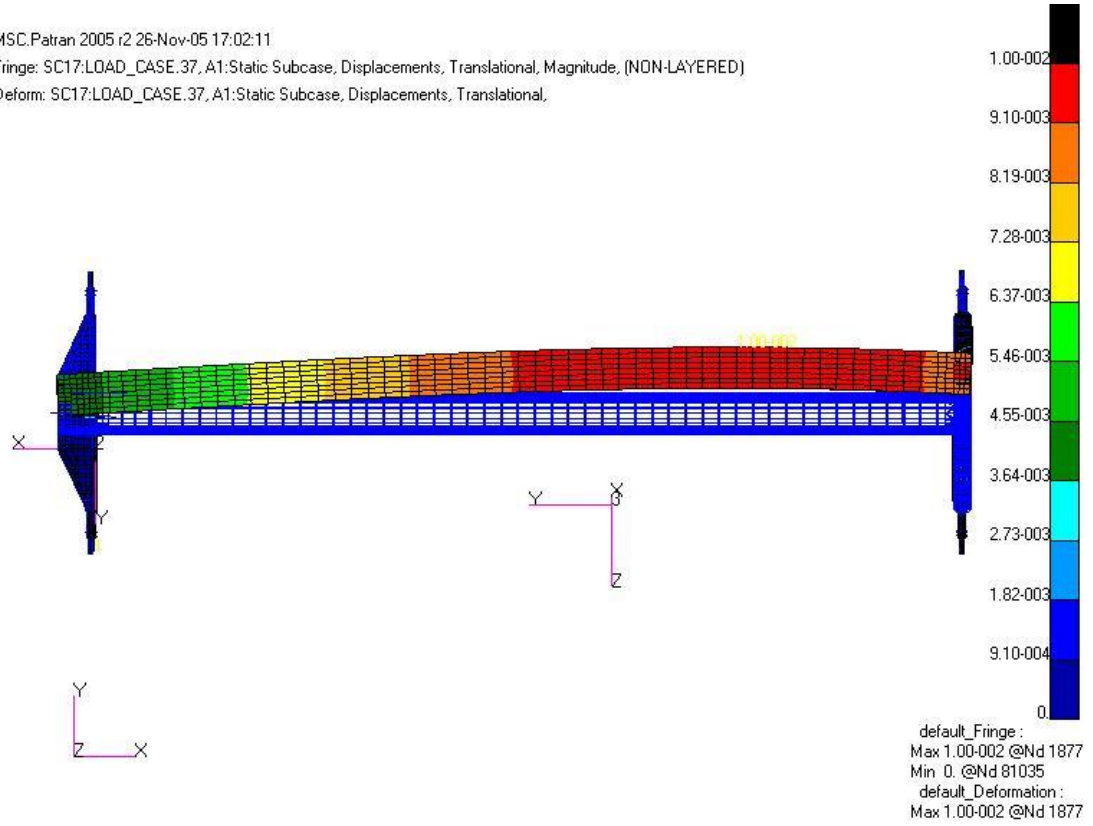


Şekil B.5: Krenin ortasında iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 17:02:11

Fringe: SC17:LOAD_CASE.37, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC17:LOAD_CASE.37, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

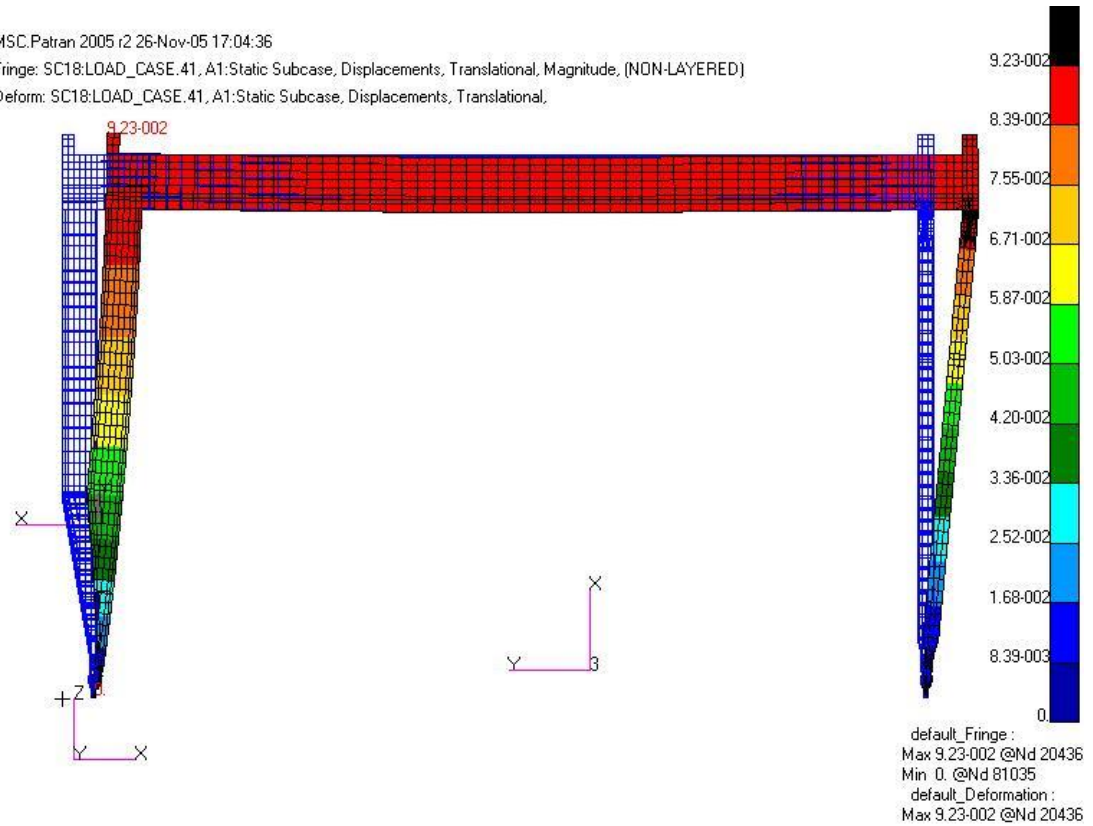


Şekil B.6: Krenin ortasında iken tamburun yatay yüklerinden dolayı oluşan deformasyon YD-37

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 17:04:36

Fringe: SC18:LOAD_CASE.41, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC18:LOAD_CASE.41, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

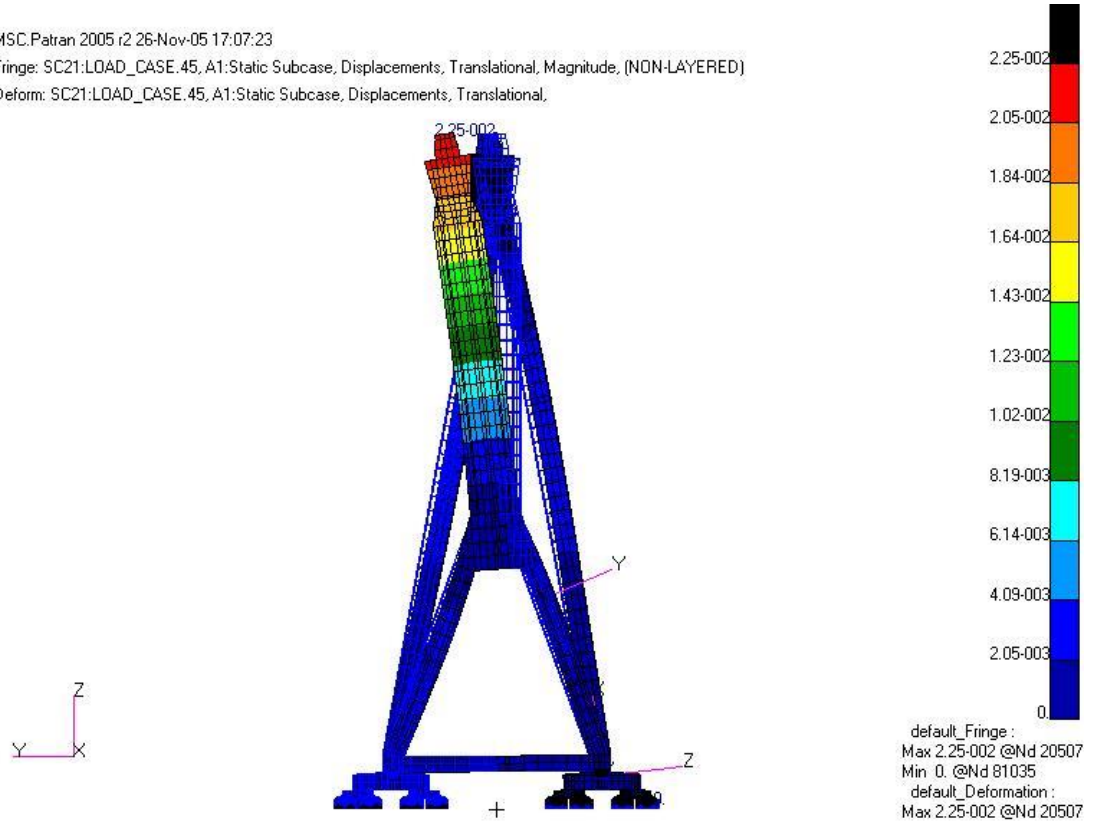


Şekil B.7: Krende rüzgar yükünden dolayı oluşan yer değiştirme YD-41
(Sağ taraf %60, sol taraf %100)

MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 17:07:23

Fringe: SC21:LOAD_CASE.45, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC21:LOAD_CASE.45, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

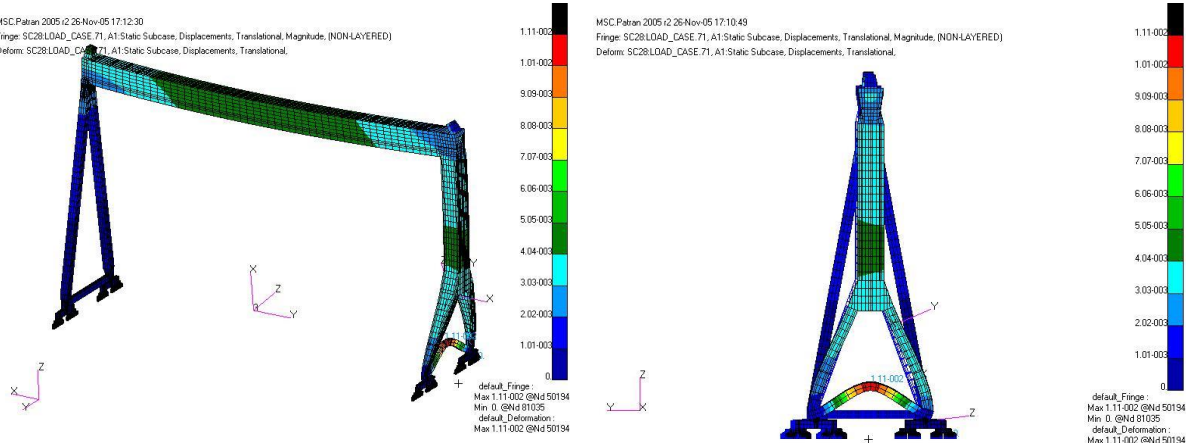


Şekil B.8: Krende rüzgar yükünden dolayı oluşan yer değiştirme YD-45
(Sağ taraf %60, sol taraf %100)

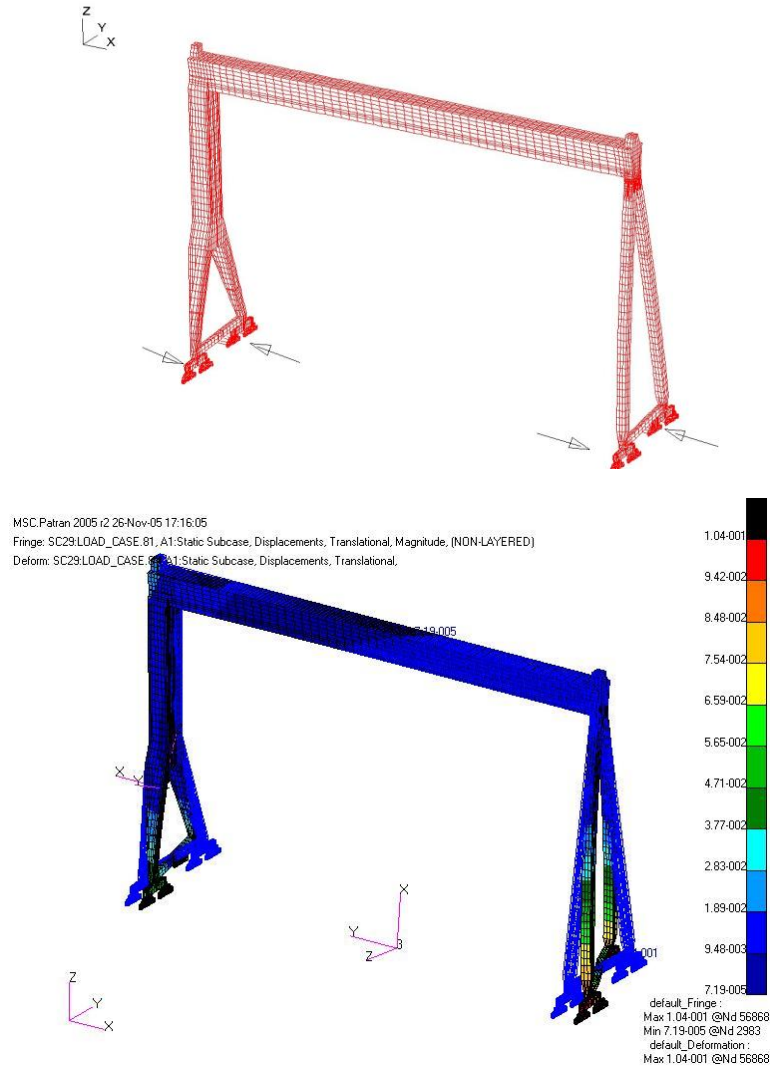
MSC.Patran 2005 r2 26-Nov-05 17:12:30

Fringe: SC28:LOAD_CASE.71, A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: SC28:LOAD_CASE.71, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,



Şekil B.9: Krenin alt kısmında halat makarasından
dolayı oluşan yer değiştirme YD-71



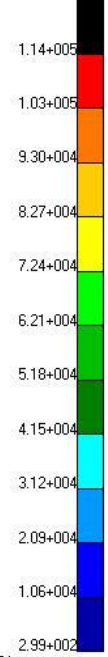
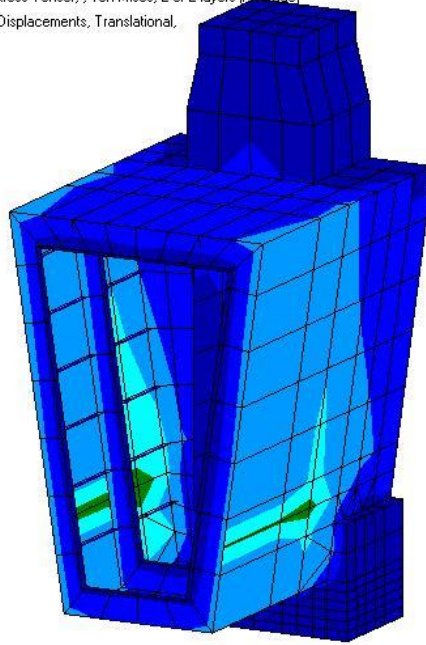
Şekil B.10: Kayma hareketinde meydana gelen çapraz reaksiyondan dolayı oluşan yer değiştirme YD-81

Ek-C

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:07:50

Fringe: Combine, Subcase 122, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 122, Displacements, Translational,



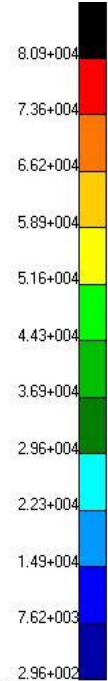
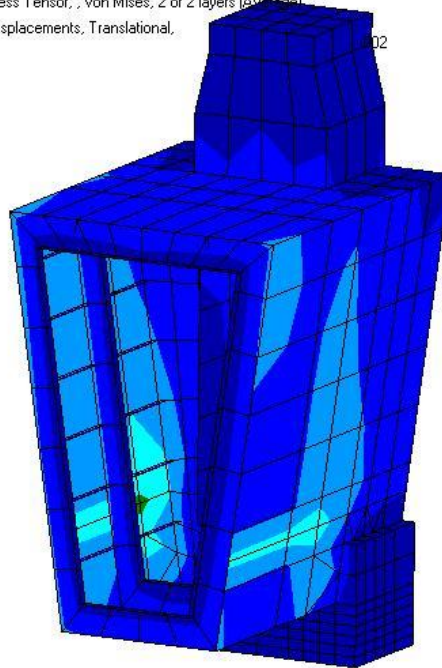
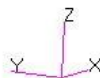
default_Fringe :
Max 1.14+005 @Nd 20325
Min 2.99+002 @Nd 20692
default_Deformation :
Max 4.33+001 @Nd 19530

Şekil C.1: Ana kiriş sağ ayak birleşim yeri YD-122

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:08:25

Fringe: Combine, Subcase 131, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (Average)

Deform: Combine, Subcase 131, Displacements, Translational,



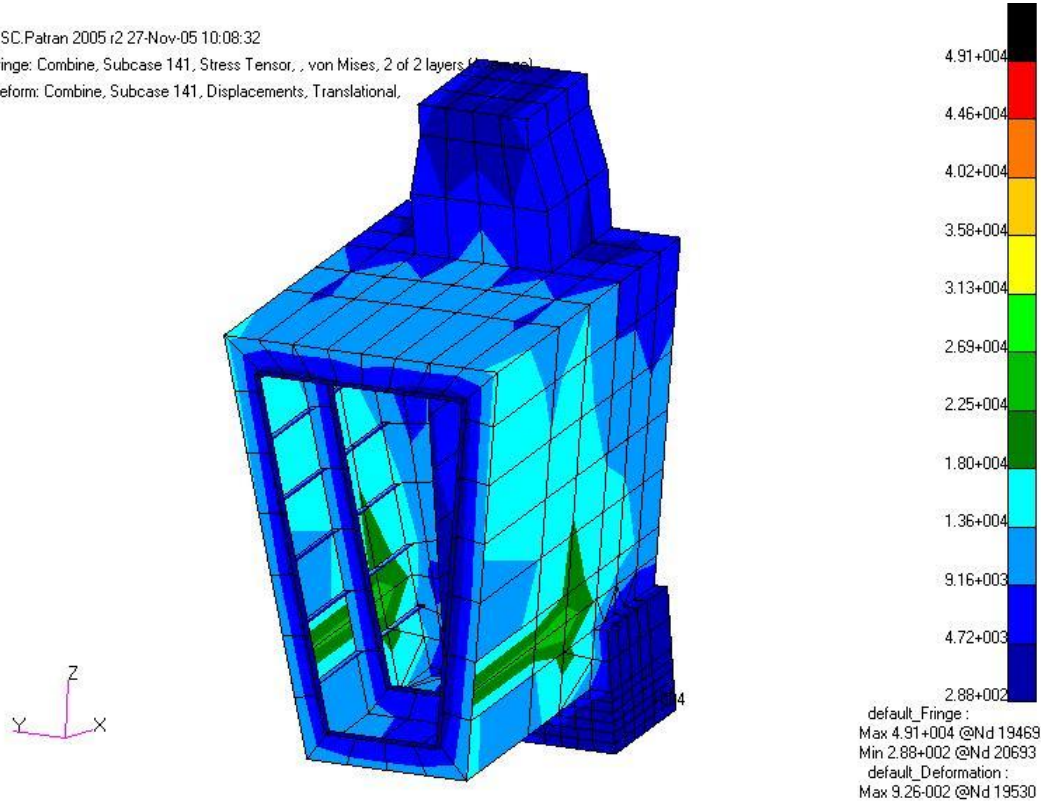
default_Fringe :
Max 8.09+004 @Nd 20325
Min 2.96+002 @Nd 20598
default_Deformation :
Max 3.87+001 @Nd 19530

Şekil C.2: Ana kiriş sağ ayak birleşim yeri YD-131

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:08:32

Fringe: Combine, Subcase 141, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (2 of 2)

Deform: Combine, Subcase 141, Displacements, Translational,

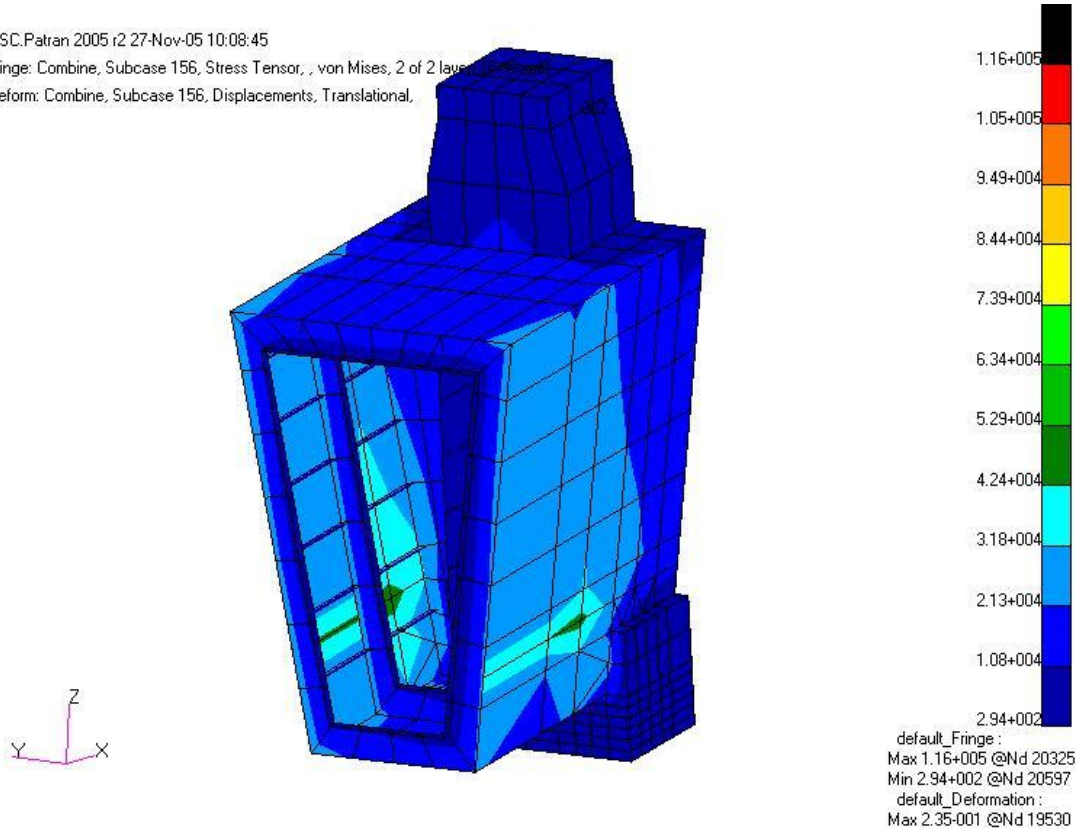


Şekil C.3: Ana kiriş sağ ayak birleşim yeri YD-141

MSC.Patran 2005 r2 27-Nov-05 10:08:45

Fringe: Combine, Subcase 156, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 2 layers (2 of 2)

Deform: Combine, Subcase 156, Displacements, Translational,



Şekil C.4: Ana kiriş sağ ayak birleşim yeri YD-156