

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇELİK YAPILARIN ELASTOPLASTİK TASARIMI

Yüksek Lisans Tezi

Onur ONAT

(07215103)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Mekanik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet ÜLKER

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:10.12.2010

OCAK-2011

ÇELİK YAPILARIN ELASTOPLASTİK TASARIMI

Müh. Onur ONAT

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Prof. Dr. Mehmet ÜLKER
OCAK-2011**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇELİK YAPILARIN ELASTOPLASTİK TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Onur ONAT

(07215103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10.12.2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 07.01.2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet ÜLKER (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ragıp İNCE (F.Ü)

Doç Dr. Ömer KELEŞOĞLU (F.Ü)

OCAK-2011

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca, engin bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren, özellikle tez çalışmam esnasında karşılaştığım güçlüklerde kıymetli zamanını benimle paylaşan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet ÜLKER'e; üzerimde danışman hocam kadar emeği olan, başımın sıkıştığı her an yanımda olan, ANSYS konusunda bilgilerini benimle paylaşmaktan çekinmeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Muhammet KARATON'a; tez çalışmalarım esnasında beni bu teze motive eden, tüm zorluklarda sıkıntılarımı benimle paylaşan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen değerli dostlarım Arş. Gör. Dr. Erkut SAYIN'a, Arş. Gör. Burak YÖN'e ve Arş. Gör. Mesut GÖR'e teşekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım.

Ayrıca, bu günlere ulaşmamı sağlayan ve hala desteğini benden hiç eksik etmeyen sevgili anneme de sonsuz teşekkür ederim.

Onur ONAT
ELAZIĞ-2011

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
1.GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2. Konuyla İlgili Literatür Çalışmalarının İncelenmesi	2
2. MATERYAL VE METOD	4
2.1. Yapıların Doğrusal Olmayan Analizi	4
2.1.1. Limit Analiz	4
2.1.2. Çelik Yapı Elemanlarının Akma Sınırından Sonraki Durumu	6
2.1.3. İdeal Diagram Modelleri	7
2.1.4. Eğilme Momenti Eğrilik Bağlantısı	7
2.1.5. Kirişin Eğilmesi ve Şekil Faktörü	9
2.1.6. İdeal Malzemeler	10
2.2. Kesit İçin Tam Plastik Momentin Hesaplanması	11
2.3. TS 4561 Çelik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesap Kuralları	13
2.3.1. Plastik Taşıma Yükünün Hesabı	13
2.3.2. Kesitlerin Taşıma Gücü	13
2.3.3. Normal Kuvvet Durumu	14
2.3.4. Basit Eğilme Durumu	14
2.4. Heyman Formüllerine Göre Plastik Hesap	16
2.5. Majid Formüllerine Göre Plastik Hesap	18
2.5.1. Çok Açıklıklı Çerçeveler	18
2.5.2. Tek Açıklıklı Çerçeveler	19
2.6. Projelendirme Kriterleri	19
2.6.1. Projelendirme İşlemlerinin Özeti	20
2.7. ANSYS Programı İle Sonlu Elemanlar Analizi	22
2.7.1. Modellemede Kullanılan Eleman BEAM23	22
2.7.1.1. İntegrasyon Noktaları	22
2.7.1.2. Plastisite İçin Tanjant Rijitlik Matrisi	27
2.7.1.2.1. Eğilmeye Karşı Rijitlik Matrisi	27
2.7.1.2.2. Kesmeye Karşı Rijitlik Matrisi	28
2.7.1.2.3. Eksenel Rijitlik Matrisi	29
2.7.1.2.4. Burulmaya Karşı Rijitlik Matrisi	29
2.7.1.3. Newton-Raphson Yük Vektörü	29
2.7.1.3.1. Eğilme Kuvvet Vektörü	30
2.7.1.3.2. Kesme Deplasman Kuvvet Vektörü	30
2.7.1.3.3. Eksenel Kuvvet Vektörü	31
2.7.1.3.4. Burulma Kuvvet Vektörü	31
2.7.1.4 Gerilme ve Uzama Hesabı	31
2.7.2. Bilineer Kinematik Pekleşme (BKIN)	32
3. BULGULAR	34

3.1. Plastik Analizle İlgili Sayısal İlk Örnek VM24 Tek Açıklıklı Basit Kiriş.....	34
3.1.1. Sistemin Tasarımı ve Sistem Hakkında Genel Bilgiler	34
3.1.2. $\lambda=1$ Durumuna Göre Analiz Sonuçları	37
3.1.3. $\lambda=2$ Durumuna Göre Analiz Sonuçları	39
3.1.4. $\lambda=3$ Durumuna Göre Analiz Sonuçları	41
3.1.5. $\lambda=4$ Durumuna Göre Analiz Sonuçları	44
3.2. Plastik Analizle İlgili İkinci Örnek Tek Katlı Tek Açıklık Çelik Çerçeve	47
3.2.1. Sistemin Tasarımı ve Sistem Hakkında Genel Bilgiler	47
3.2.2. $P=63.6$ kN Kuvvet Değerindeki Analiz Değerleri	50
3.2.3. $P=70.7$ kN Kuvvet Değerindeki Analiz Değerleri	52
3.2.4. $P=83.2$ kN Kuvvet Değerindeki Analiz Değerleri	54
3.2.5. $P=83.3$ kN Kuvvet Değerindeki Analiz Değerleri	56
3.3. Plastik Analizle İlgili Üçüncü Örnek Dört Katlı Tek Açıklık Çelik Çerçeve	59
3.3.1. Dört Katlı Tek Açıklıklı Çerçevenin Genel Bilgileri ve Tasarımı	59
3.3.2. Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçevenin ANSYS ile Analizi	59
3.4. Plastik Analizle İlgili Dördüncü Örnek Altı Katlı İki Açıklık Çelik Çerçeve	65
3.4.1. Altı Katlı İki Açıklıklı Çelik Çerçevenin Genel Bilgileri ve Tasarımı	65
3.4.2. Altı Katlı İki Açıklıklı Çelik Çerçevenin ANSYS ile Analizi	69
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	73
KAYNAKLAR	74
EK: DÖRT KATLI TEK AÇIKLIKLIL ÇELİK ÇERÇEVENİN ANALİZİNE AİT	
PROGRAM KODLARI	75
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ÖZET

Bu çalışmada; çelik çerçevelerin statik ve rüzgar yükleri altında plastik mafsallaşmalarının, literatürdeki çalışmalara göre oluşup oluşmadığı ve mafsallaşmalara sebep olan yük katsayılarının literatürle olan doğruluğu bir sonlu elemanlar metodu olan ANSYS ile irdelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma yapılırken, ANSYS programının kendi plastik analiz modülü olan Verification Manual 24'ten faydalanılarak, bu örnekteki eksiklikler, literatür çalışmaları ile geliştirilmiştir. Bu çalışmada 4 tane sayısal örneğe yer verilmiş ve bu örnekler; ANSYS, sonlu elemanlar metoduyla analiz edilmiştir. Sayısal örneklerden ilki, ANSYS programında kayıtlı olan ve tek bir açıklıklı kirişi analiz eden VM24 eğitim modülüdür ve ANSYS mantığına göre analiz edilmiştir. İkinci örnekte tek açıklıklı çelik bir çerçeve analiz edilmiş, üçüncü örnekte tek açıklıklı dört katlı bir çelik yapı analiz edilmiş ve dördüncü örnekte ise iki açıklıklı altı katlı bir çelik yapının tasarımı ve analizi yapılmış ayrıca bunların sonuçları literatürde yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik Mafsal, Doğrusal Olmayan Davranış, ANSYS, Sonlu Elemanlar Metodu, Çelik Yapılar

SUMMARY

Design of Steel Structures Under Elasto-Plastic Theory

Hereby, this study presents an efficient computer method for elastic-plastic steel frames based on the plastic zone analysis. The combined responses of material are evaluated by finite element method, ANSYS, under wind and dead loads. This program was used to verify the ultimate moment capacity of steel frames which have been studied previously by other researchers with four examples. First one of the examples is VM 24, education manual, for plastic analysis but not of zone analysis of ANSYS. ANSYS have a capacity of running a plastic evaluation but not sufficient. After second example and rest of others developed with parallel to the researches', second one is one storey and single span structure, third one is four storey steel sway frame but single span and last one is both multi storey and multi span steel sway frame. The results of these examples were compared with previous researches.

Key Words: Plastic Hinge, Nonlinear Behavior, ANSYS, Finite Element Method, Steel Sway Frames

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 :Artan yük altında kafes kiriş	5
Şekil 2.2 :Çeliğin gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	6
Şekil 2.3 :Rijit plastik malzeme eğrisi.....	6
Şekil 2.4 : $\sigma - \varepsilon$ Diyagramlarının idealleştirilmesi	7
Şekil 2.5 :Kiriş için moment-eğrilik bağıntısı	8
Şekil 2.6 :Kiriş kesitinin artan moment altında gerilme dağılımı	9
Şekil 2.7 :İdeal malzemeler	11
Şekil 2.8 :Tam plastik momentin hesabı	12
Şekil 2.9 :Dikdörtgen kesit ve mukavemet momenti formülü	15
Şekil 2.10 :Başlıklarına paralel bir eksene göre eğilen I kesit ve sandık kesitlere ait formüller plastik	16
Şekil 2.11 :Gövdesine paralel bir eksene göre eğilen I kesit ve plastik moment formülü ..	16
Şekil 2.12 :“T” Kesit ve kesite ait formüller	16
Şekil 2.13 :Heyman tarafından yapılan projelendirme.....	17
Şekil 2.14 :2-Boyutlu plastik BEAM23 elemanı	21
Şekil 2.15 :İntegrasyon noktalarının yerleşimi	22
Şekil 2.16 :BEAM23 Elemanında kiriş en kesit genişliğinde integrasyon noktaları	24
Şekil 2.17 :Bilineer kinematik pekleşmeye ait gerilme-akma grafiği.....	33
Şekil 3.1 :VM24 problemine ait şekilsel gösterim.....	34
Şekil 3.2 :Probleme ait kirişim sonlu elemanlar modeli.....	34
Şekil 3.3 :VM24 sistemine ait eleman ve nodların ANSYS’te görünüşü	35
Şekil 3.4 :Tanjant modülü sıfır ideal elasto-plastik malzemeye ait akma gerilme grafiği ..	35
Şekil 3.5 :VM24 basit kiriş örneğine ait 4. iterasyonun sonundaki yakınsama grafiği.....	36
Şekil 3.6 : $\lambda=1$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait moment grafiği	37

Şekil 3.7 : $\lambda=1$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait alt integrasyon noktasına ait gerilme grafiği.....	38
Şekil 3.8 : $\lambda=1$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği.....	38
Şekil 3.9 : $\lambda=2$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait moment grafiği	39
Şekil 3.10 : $\lambda=2$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği.....	40
Şekil 3.11 : $\lambda=2$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait alt integrasyon noktasına ait gerilme grafiği.....	41
Şekil 3.12 : $\lambda=3$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait moment grafiği	42
Şekil 3.13 : $\lambda=3$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği.....	43
Şekil 3.14 : $\lambda=3$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait alt integrasyon noktasına ait gerilme grafiği.....	44
Şekil 3.15 : $\lambda=4$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait moment grafiği	45
Şekil 3.16 : $\lambda=4$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği.....	46
Şekil 3.17 : $\lambda=4$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait alt integrasyon noktasına ait gerilme grafiği.....	47
Şekil 3.18 :Tek açıklıklı tek katlı çerçevenin eleman numaraları.....	48
Şekil 3.19 :Tek açıklıklı tek katlı çerçevede öngörölmüş mafsallık noktaları ve yüklerin uygulama noktaları.....	49
Şekil 3.20 :Tek katlı tek açıklıklı çerçevenin 3-boyutlu görüntüsü	49
Şekil 3.21 : $P=63.6$ kN'a göre ilk plastik mafsallık yeri	50
Şekil 3.22 :ANSYS'teki analize göre $P=63.6$ kN kuvvet değerinde mafsallar	51
Şekil 3.23 : $P=63.6$ kN kuvvet değerinde çelik çerçevenin moment değerlerinin ANSYS'teki moment grafiği	52
Şekil 3.24 : $P=70.7$ kN'da elle hesaba göre ikinci plastik mafsallık yeri.....	52
Şekil 3.25 :ANSYS'teki analize göre $P=70.7$ kN kuvvet değerinde mafsallar	53

Şekil 3.26 :P=70.7 kN kuvvet değerinde çelik çerçevenin moment değerlerinin ANSYS'teki moment grafiği	53
Şekil 3.27 :P=83.2 kN'da Elle Hesaba Göre Üçüncü Plastik Mafsalın Yeri.....	54
Şekil 3.28 :ANSYS'teki Analize Göre P=83.2 kN Kuvvet Değerinde 3. Mafsal	55
Şekil 3.29 :P=83.2 kN Kuvvet Değerinde Çelik Çerçevenin ANSYS'teki Moment Grafiği.....	55
Şekil 3.30 :P=83.3 kN'da Elle Hesaba Göre Üçüncü Plastik Mafsalın Yeri.....	56
Şekil 3.31 :ANSYS'teki Analize Göre P=87 kN Kuvvet Değerinde 4. Mafsal	57
Şekil 3.32 :P=87 kN Kuvvet Değerinde Çelik Çerçevenin ANSYS'teki Gerilme Grafiği .	57
Şekil 3.33 :P=87 kN Kuvvet Değerinde Çelik Çerçevenin ANSYS'teki Moment Grafiği.	58
Şekil 3.34 :Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçevenin Eleman Numaralarının ANSYS'te Gösterimi.....	60
Şekil 3.35 :Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçevenin Malzeme Numaralarının ANSYS'te Gösterimi.....	61
Şekil 3.36 :Majid Tarafından İdealleştirilmiş Yükler Altındaki Dört Katlı Tek Açıklıklı Çerçeve ve Eleman Numaraları	62
Şekil 3.37 :Majid Tarafından Elde Edilmiş Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçeveye Ait Yük Parametresi-Deplasman Grafiği	63
Şekil 3.38 :ANSYS'te Yapılan Analiz Sonuçlarında Elde Edilmiş Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçeveye Ait Kuvvet-Deplasman Grafiği.....	63
Şekil 3.39 :Majid'in Analizine Göre Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçeve de Plastik Mafsalların Oluşum Sırası	64
Şekil 3.40 :ANSYS'teki Analizlere Göre Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçeve de Plastik Mafsalların Oluşum Sırası.....	65
Şekil 3.41 :İki Açıklıklı Altı Katlı Çelik Çerçevenin Tasarımı ve Yükler	66
Şekil 3.42 :İki Açıklıklı Altı Katlı Çelik Çerçeve Elemanlarının ANSYS'te Görünüşü	69
Şekil 3.43 :ANSYS'te yapılan analiz sonuçlarında elde edilmiş altı katlı iki açıklıklı çelik çerçeveye ait kuvvet-deplasman grafiği.....	70

Şekil 3.44 :Majid’in analizine göre altı katlı iki açıklıklı çelik çerçevede plastik mafsalların oluşum sırası71

Şekil 3.45 :ANSYS’teki analizlere göre altı katlı iki açıklıklı çelik çerçevede plastik mafsalların oluşum sırası71

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tabblo 2.1 :BEAM23 elemanı ile ilgili genel bilgiler.....	21
Tabblo 2.2 :En kesit hesaplama faktörleri	25
Tabblo 3.1 : İlk örnekte her bir iterasyona ait akma ve tam plastik moment değerleri...	36
Tabblo 3.2 :Tek katlı tek açıklıklı çerçeveye ait bilgiler	50
Tabblo 3.3 :P=63.6 kN kuvvet değerinde ANSYS'te elemanlarda oluşan moment ve gerilme değerleri	51
Tabblo 3.4 :P=70.7 kN kuvvet değerinde ANSYS'te elemanlarda oluşan moment ve gerilme değerleri	54
Tabblo 3.5 :P=83.2 kN kuvvet değerinde ANSYS'te elemanlarda oluşan moment ve gerilme değerleri	55
Tablo 3.6 :Tek katlı tek açıklıklı çerçeve için Majid formüllerine göre eleman kesitleri	59
Tablo 3.7 :İki açıklıklı altı katlı çelik çerçeve modelinde kullanılan eleman özellikleri	67

KISALTMALAR LİSTESİ

ANSYS	:Mühendislik Sistemleri için Genel Amaçlı Paket Program (Analysis of System)
BKIN	:Bilineer Kinematik Pekleşme (Bilinear Kinematic Hardening)
BEAM23	:Sistem analizlerinde kullanılan eleman çeşidi
COMBIN14	:Yay sönümleyici
KEYOPT(6)=4	:Rastgele kesitlerdeki program girdi değeri
TBDATA	:ANSYS veri komutu
TBTEMP	:ANSYS sıcaklık komutu

SEMBOLLER LİSTESİ

σ	:Gerilme
σ_e	:Akma gerilmesi
σ_p	:Orantı sınırı
σ_k	:Kopma gerilmesi
δ	:Yer değiştirme
ϵ_e	:Elastik yer değiştirme
σ_y	:Akma gerilmesi
ρ	:Kirişin eğrilik yarıçapı
E	:Elastik Modülü
P	:Kiriş eğriliği
A	:Alan
I	:Atalet momenti
L	:Uzunluk
M_y	:Akma momenti
$M_{px,y}$	:x veya y yönündeki tam plastik moment
σ_{em}	:Emniyet gerilmesi
Z	:Kesit modülü
Z_p	:Plastik kesit modülü
$P-\Delta I$	:Yük parametresi – şekil değiştirme
$G_{1,2}$	:Kesitteki plastik kısımların ağırlık merkezleri
$y_{1,2}$	:Bir kesitteki plastik kısımların ağırlık merkezlerinin eşit alan eksenine olan uzaklığı
τ	:Von Misses kıstasına göre kayma gerilmesi
N_p	:Eksenel plastikleşme kuvveti
A_{eff}	:Etkili alan
$W_{px,y}$	:Kesitin plastik mukavemet momenti
$S_{x,y}$	:Kesit parametresi
M_{pb1}	:Heyman ve Majid formüllerine göre çatı katındaki tam plastik moment
M_{pbr}	:Heyman ve Majid formüllerine göre çatı katından itibaren “r” katındaki kirişin tam plastik momenti
M_{pci}	:Heyman ve Majid formüllerine göre içteki bir kolonun tam plastik momenti
M_{pcd}	:Heyman ve Majid formüllerine göre dıştaki bir kolonun tam plastik momenti
λ_1	:Heyman ve Majid formüllerine göre düşey yükleme için minimum yük parametresi
λ_2	:Heyman ve Majid formüllerine göre birleşik yükleme durumu için yük parametresi
$H(i)$	:ANSYS programı için “i” noktasındaki ağırlık faktörünü
$L(i)$	:ANSYS programı için “i” noktasındaki etkili genişliği
$P(i)$	:ANSYS programı için “y” doğrultusunda integrasyon noktalarının lokal noktalarını gösterir

I_{zz}	:ANSYS programı için atalet momenti (R komutundaki IZZ parametresidir)
h	:ANSYS programı için kalınlık (R komutundaki Height parametresi)
t_p	:ANSYS programı için borunun et kalınlığı (R parametresi TKWALL parametresi)
$A(i)$	:ANSYS programı için “i” noktasındaki genişliğe esas etkili alan (R komutundaki A(i) parametreleri)
$[B]$	:BEAM23 elemanı için uzama deplasman matrisi
$[D_N]$	:BEAM23 elemanı için elasto-plastik gerilme uzama matrisi
$[K]^B$	:BEAM23 elemanı için eğilmeye karşı rijitlik matrisi
$[K]^S$	:BEAM 23 elemanı için kesmeye karşı rijitlik matrisi
$[K]^A$	:BEAM23 elemanı için eksenel rijitlik matrisi
$[K]^T$	:BEAM23 elemanı için dönmeye karşı rijitlik matrisi
Φ	:BEAM23 elemanı için kesme-deplasman sabiti (COMBIN14)
$[D]$	:BEAM23 elemanı için elastik gerilme-uzama matrisi
$\{\varepsilon_n^{el}\}$	:BEAM23 elemanı için bir önceki iterasyondan gelen elastik uzama eğrisi
$\{F_B^{nr}\}$	:BEAM23 elemanı için eğilme kuvveti
$\{F_S^{nr}\}$	:BEAM23 elemanı için kesme sehimine yol açan kuvvet
$\{F_A^{nr}\}$	:BEAM23 elemanı için eksenel kuvvet
$\{F_T^{nr}\}$	:BEAM23 elemanı için burulma kuvveti (Torsiyon)
Φ	:BEAM23 elemanı için toplam dönme
ε^a	:BEAM23 elemanı için eksenel deplasmandan kaynaklı toplam uzama
ε^{th}	:BEAM23 elemanı için ısıdan kaynaklı eksenel uzama
ε^{pl}	:BEAM23 elemanı için eksenel plastik uzama
ε^{cr}	:BEAM23 elemanı için sünmeden kaynaklı eksenel uzama
ε^{sw}	:BEAM23 elemanı için şişmeden kaynaklı eksenel uzama
$\{U^A\}$	:BEAM23 elemanı için eksenel deplasmandan kaynaklı toplam uzama $\{u\}$
U_{XI}, U_{XJ}	:BEAM23 elemanı için I ve J noktalarındaki deplasman
γ_T^{el}	:BEAM23 elemanı için elastik burulma uzaması
γ	:BEAM23 elemanı için toplam burulma uzaması
γ^{pl}	:BEAM23 elemanı için plastik kesme uzaması
γ^{cr}	:BEAM23 elemanı için sünme kesme uzaması
$\{B^T\}$	:BEAM23 elemanı için burulma için uzama-deplasman vektörü
$\varnothing^a$	:BEAM23 elemanı için düzeltilmiş toplam eğim
ε^a	:BEAM23 elemanı için eksenel deformasyondan kaynaklı düzeltilmiş toplam uzama
ε_n^{th}	:BEAM23 elemanı için eksenel termal uzama
ε_{n-1}^{pl}	:BEAM23 elemanı için bir önceki altadımdan alınan eksenel plastik uzama
ε_{n-1}^{sw}	:BEAM23 elemanı için bir önceki alt adımdan alınan eksenel şişme uzaması
ε_{n-1}^{cr}	:BEAM23 elemanı için bir önceki alt adımdan alınan büzülme daralması
Φ	:BEAM23 elemanı için
$[B^B]\{u^B\}$	:BEAM23 elemanı için toplam eğim

ϕ^{pa}	:BEAM23 elemanı için eğime olan basınç ve ivme katkısı
$\epsilon = [B^A]\{u^A\}$	:BEAM23 elemanı için toplam eksenel deformasyon uzaması
ϵ^{pa}	:BEAM23 elemanı için eksenel deformasyona basınç ve ivme katkısı
$\Delta\epsilon^{pl}$	:BEAM23 elemanı plastik uzama artışıdır

1. GİRİŞ

Günümüzde çelik taşıyıcı sistemler betonarme yapıların dezavantajları göz önüne alındığı için daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bu durumun sonucu olarak elastik yöntemde artan maliyetlere ve yüksek emniyet katsayılarına istinaden çelik taşıyıcı sistemlerin aslında tam verimle kullanılmadığı ortaya çıkmıştır. Bu durumun sonucu olarak çelik yapıların plastik teoriye göre hesap kuralı önem kazanmaktadır, plastik teoride sistemin göçme yükleri baz alınarak lineer olmayan analizler yük artım yöntemine göre yapıldığı için, tasarımı yapılmış bir sistemin analizi yapılırken kritik yükü belirlenerek çok yüksek emniyet katsayıları kullanılarak fazla malzeme kullanılması da böylece önlenmiş olur.

Gerçekte yapısal elemanların büyük bir kısmı hesaplanan değerlere kıyasla daha düşük gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu durum özellikle çelik yapılarda gereksiz malzeme kullanımına neden olmaktadır. Birçok eleman ise, gerçekte hesaplanan kesit tesirlerine kıyasla daha büyük tesirlere maruz kalmakta, çoğu zaman bu tür analiz ve tasarım hataları yapısal uyum sayesinde yapı tarafından af edilmektedir. Yapıları oluşturan elemanların davranışlarını göz ardı ederek yapılan analizler gerçekçi değildir. Yapı sistemi içinde, daha rijit elemanlar ve birleşimler, zayıf kısımları desteklemelidirler. Yapının genel davranışı tüm elemanların etkileşimiyle (yapısal uyum) gerçekleşecektir. Ancak gerçek yapısal davranışa mümkün olduğunca yaklaşılması durumunda, yapılar hem daha ekonomik, hem de daha emniyetli olacaktır. Bu amaçla doğrusal olmayan analiz yöntemleri daha sık kullanılmaktadır. Bu tür analizleri yapabilen programların çoğu yabancı kaynaklıdır. Ülkemizde de, bağımsız olarak, gerekli bilginin yaygınlaştırılmasına, korunmasına kullanıma sunulmasına ihtiyaç vardır [1].

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada; öncelikle çelik yapılardaki plastik mafsallaşmanın yerlerinin tespiti, tam plastik yük değerlerinin bulunması ve mekanizma durumları ANSYS programıyla irdelenip, literatür çalışmalarıyla karşılaştırılıp programın teorik çalışmalarla olan yakınlığının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma öncelikle ANSYS'in kendi eğitim

modülü olan VM24 ile yapılmış ve literatürdeki eksikliği tamamlayıp tamamlayamayacağı tespit edilmiştir. Bu çalışmadan sonra tek açıklıklı tek katlı bir çerçeve örneği ile uygulamaya devam edildikten sonra uygulama tam anlamıyla tek açıklıklı dört katlı ve düzensiz iki açıklıklı altı katlı bir çelik çerçeveye uygulanmıştır. Bu çalışma ile ANSYS programına elasto-plastik analizde katkı sağlanmaya çalışılarak, program geliştirilmiş ve son iki örnek ile nihai sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Çalışmada aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

- a) Doğrusal olmayan hesap yöntemleri incelenmiştir.
- b) Elasto-plastik kabule göre projelendirme yapılmıştır.
- c) Sonlu elemanlar metodu, ANSYS, tanıtılmış ve modelleme yapılarak örnekler değerlendirilmiştir.
- d) Çalışmada varılan sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.2. Konuyla İlgili Literatür Çalışmaların İncelenmesi

Halen günümüzde, yapı davranışına ait analiz ve tasarımlar, geleneksel bir hal almış olan elastik teoriye göre yapılmaktadır. Bu teori ile yapılan analizlerde ikinci mertebe etkiler göz ardı edilmektedir. Gerçekte yapısal elemanların büyük bir kısmı hesaplanan değerlere kıyasla daha düşük gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu durum özellikle çelik yapılarda gereksiz malzeme kullanımına neden olmaktadır. Birçok eleman ise, gerçekte hesaplanan kesit tesirlerine kıyasla daha büyük tesirlere maruz kalmakta, çoğu zaman bu tür analiz ve tasarım hataları yapısal uyum sayesinde yapı tarafından af edilmektedir. Yapıları oluşturan elemanların davranışlarını göz ardı ederek yapılan analizler gerçekçi değildir. Yapı sistemi içinde, daha rijit elemanlar ve birleşimler, zayıf kısımları destekleyeceklerdir. Yapının genel davranışı tüm elemanların etkileşimiyle (yapısal uyum) gerçekleşecektir. Ancak gerçek yapısal davranışa mümkün olduğunca yaklaşılması durumunda, yapılar hem daha ekonomik, hem de daha emniyetli olacaktır. Bu amaçla doğrusal olmayan analiz yöntemleri daha sık kullanılmaktadır. Bu tür analizleri yapabilen programların çoğu yabancı kaynaklıdır. Ülkemizde de, bağımsız olarak, gerekli bilginin yaygınlaştırılmasına, korunmasına kullanıma sunulmasına ihtiyaç vardır [1].

Majid ve Horne (1968) elastik-plastik bölgede bilgisayar yöntemleri kullanarak mutlak minimum ağırlıklı projelendirme için ekonomik bilgisayar programlarını rijit-plastik teoriyle elde etmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada Majid ve Horne; Heyman'ın formüllerini kullanarak basit değişikliklerle kolon ve kirişlere ait farklı kesitler elde etmiş ve bu kesitlerin piyasa da üretiminin serbest ve daimi olduğunu kabul edilerek çelik çerçevelerde elasto-plastik analiz yapmış ve belirli bir projelendirme akışına göre ekonomik kesitler elde edilmiştir. [2].

Barsan ve Chiorean (1998) esnek bağlantılı çelik yapılarda elastik olmayan ve büyük deplasman yapabilen bir bilgisayar programı geliştirmiş, bu programı da yenilenmiş şekilde ikinci derecede elastik olmayan plastik bölge analizi ile yapmışlardır. Malzemelerin birleşik etkileri, geometrik yapı ve bağlantıların lineer olmayan kaynaklarıyla, obje merkezli Turbo-Pascal programıyla otomatik bir şekilde simüle edilmiştir. Bu program araştırmacılar tarafından daha önce bazı çelik yapıların azami tepkisi üzerine yapılmış olan çalışmaları teyit niteliğindedir. Örnekler üzerindeki kıyaslar ve hesaplar öngörülen analiz metodunun etkili olduğunu göstermiştir [3].

Choi ve Yoo (2008) yaptıkları çalışmaları ile çapraz yüklerin sebep olduğu geometrik düzensizliklerin ve birincil eğilme momentlerin sebep olduğu çatallaşma dengesini çelik çerçevelerin kritik yük temelinde incelemişlerdir. Bu durum limit yük kavramı yerine plastik bölge veya plastik mafsallarda değerlendirilmesini gerektirdiğini ortaya koymuştur. Fakat bu tür analizler, uzun hesap süreleri ve karmaşık teoriler ile pratik tasarımlar için uygun değildir. Bu çalışma çelik yapıların kritik yükünün belirlenmesi için elastik olmayan burkulma analizine yeni bir metod getirmiştir. Bu elastik olmayan analiz, tanjant modülü yaklaşımı ve kolon mukavemet eğrisi yöntemini kullanarak modifiye kırılma stabilitesi temelinde incelemiştir. Kiriş kolon için bağlantı eşitliği kullanılarak, eksenel kuvvetle birlikte, birincil burkulma momentini göz önüne alınması için, değişken özdeğer (eigenvalue) analizi önerilmiştir. Önerilen elastik olmayan burkulma analizinin uygulanabilirliği ve geçerliliği; elastik burkulma analizi ve yenilenmiş plastik mafsallarda analizi açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışma için geometrik olarak düzensiz basit kolon ve dört katlı düz karkas yapı örnek olarak çözülmüştür. Önerilen elastik olmayan burkulma analizinin sonuçları; çelik yapıların göçme modu ve kritik yükü uygun bir şekilde değerlendirilmiş ve çelik

yapılarda kritik yük tasarımının değerlendirilmesi açısından iyi bir alternatif olacağı ortaya konulmuştur [4].

Holmes ve Gandhi (1968); plastik mafsalların yapıdaki yerleri için, standart bir model varsaymış, geçici olarak seçilen kesitler ve yatay yer değiştirmelerden oluşan momentler özellikle hesaplanan stabilite fonksiyonları kullanılarak düzeltilmiştir. El ile projelendirilmede bu yöntem hali hazırda en iyi ve en etkin yöntem olarak gözükmektedir. Fakat bu yöntemin, plastik mafsalların daha önce varsayılan modeldeki yerlerinden başka yerlerde meydana gelmeyeceği konusunda hiçbir güvencenin olmayışı gibi oldukça sakıncalı bir yanı var. Holmes ve Gandhi'nin yönteminde plastisitenin elemanlarda sadece plastik mafsalların bulunduğu kesitlerde meydana geldiği varsayımı yapılmıştır. Bu, moment-eğrilik ilişkisinin elastik ve bunu izleyen tam plastik kısım olmak üzere iki doğru parçasından meydana geldiği anlamını vermektedir [5].

Merchant (1954) ve Wood (1958) çerçeve instabilitesinin elastik plastik bölgedeki etkisini oldukça detaylı incelemiş, instabilite etkeninin göz önüne alınması rijit-plastik yaklaşımın basitliğini yok ettiğini göstermiş ve bununla birlikte projelendirme yönteminin direkt olmasını da ortadan kaldırdığını göstermiştir. Boyutlandırma yönteminde bir dereceye kadar emniyet payı bırakılarak, bazı çerçevelerde instabilite etkisinin giderildiğini göstermiştir [6,7].

Rankine (1955) ve Merchant (1965) Rijit bir çerçevenin göçme yükü alt sınırının yaklaşık değeri Rankine-Merchant yükü ile belirlenmiştir. Orantılı yüklemeler için Rankine-Merchant yük parametresi belirlenmiş ve formülize edilmiştir. Emniyetli rijit plastik teori kullanılmıştır ve elastik kritik yük hesaplanarak sonuç göçme yükünün kontrolü yapılmıştır. Stabilite fonksiyonlarını kullanan bazı basitleştirilmiş yöntemler işi yapılabilir hale getirmesine rağmen bu yöntemin en kötü tarafı elastik kritik yükün el ile hesaplanmasının oldukça zor olmasıdır [8,9].

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Yapıların Doğrusal Olmayan Analizi

2.1.1. Limit Analiz

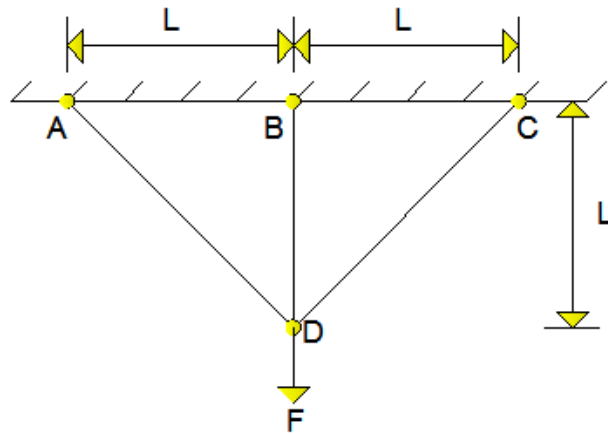
Günümüzde mühendislerin özellikle çelik yapılarda daha fazla kullanmayı gerek gördüğü ve tasarım yaparken göz önüne sık sık aldığı plastik teori; yapının davranışı

hakkında, plastik teoriye nazaran daha az kabullere dayanır. Elastik teoride yapı elemanında gerilme dağılışı eşit olmayabilir ve çeşitli bölgelerde gerilme yoğunluğu yüzünden çelikteki gerilme zaten akma sınırını geçmiş olabilir [10].

Elastik teori, emniyet katsayısı hakkında umumiyetle muhafazakâr davranmamıza sebep olabilir ve bu da malzeme israfına yol açar. Elastik hesap metodunda, genellikle ampirik formüller bulunur ve bundan dolayı bir yapının bir bütün olarak emniyetini hesaplamak güçleşir [10].

Plastik teorinin ilk uygulamalarından biri, 2. Dünya savaşında portatif sığınak olarak kullanılan “Morrison Masası”dır. Sandık şeklinde olan ve gece iki kişinin içinde uyuduğu bu masa 2 m uzunluğunda; 1,20 m genişliğinde ve 0,75 m yüksekliğinde olup bombardımanda çöken çatıların yükünü kaldırabilecek nitelikteydi. Elastik metotlar böyle bir portatif sığınak için 2,5 ton çelik isterken, nispeten büyük deformasyonlara müsaade eden plastik hesaplara göre bu sığınaklar sadece 0,25 ton çelikten yapılırdı.

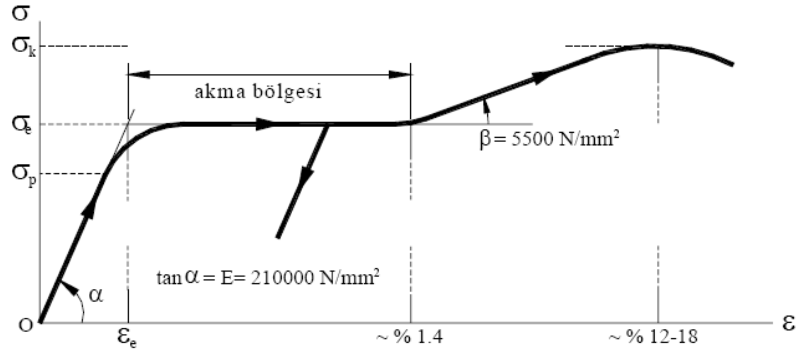
Elastik ve plastik görüşleri yine kıyaslamak için Şekil-2.1’deki basit kafes kirişi inceleyelim. DA veya DC’deki yük, DB’nin taşıdığı yükün yarısıdır. F’nin sürekli olarak artan bir yük olduğunu düşünelim. Belirli bir süre sonra DB’deki gerilme, akma gerilmesine sebep olur. Elastik kurala göre, DB’deki gerilme, akma gerilmesine eşit olur. Elastik kurala göre, DB’deki gerilme normal emniyet gerilmesini aşınca kafes kirişin yük taşıma gücü bitmiştir. Plastik teoriye göre, AD ve DC’deki gerilme akma sınırına vardıkdan sonradır ki kiriş yük altında çökmüş sayılır. DB’deki gerilme akma sınırına varınca; DA ve DC’deki, bunun yarısı kadar olur. Fakat kafes kiriş bu anda çökmüş sayılmaz, elastik teori bu hususu ihmal eder [10].



Şekil 2.1: Artan yük altında kafes kiriş

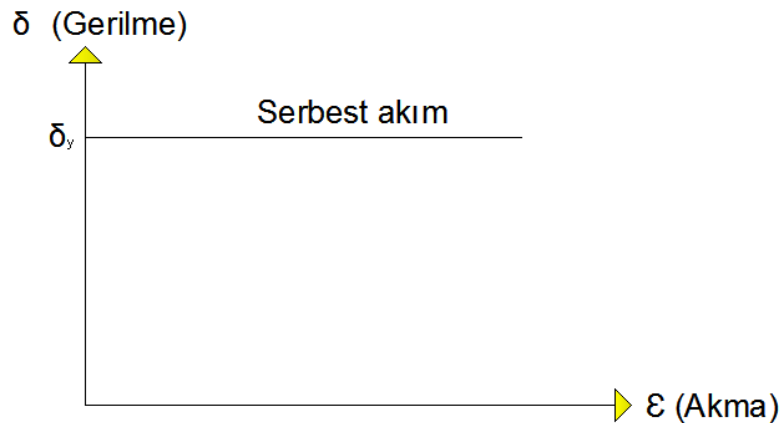
2.1.2. Çelik Yapı Elemanlarının Akma Sınırından Sonraki Durumu

Normal çeliğin çekme deneyine ait gerilme-akma diagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Hesap kriteri olarak bu diagramın kullanılması ancak aşağıda üç madde halinde sıralanan basitleştirmelerle mümkündür.



Şekil 2.2: Çeliğin gerilme-şekil değiştirme diyagramı

- %1,4 ile % 12-18 aralığı, yük taşımayan bir kısım olduğu için ihmal ediliyor.
- ϵ_e ile %1,4 arasında kalan akma platosu, yani pekleşme kısmının ihmal edilmesi, yapının veya malzemenin lehine işliyor, zira ϵ_e ile %1,4 arasında malzeme yük taşıdığı halde biz kabul etmiyoruz.
- Son olarak serbest plastik akımın elastik deformasyona nazaran daha çok büyük olduğunu düşünerek, malzemenin elastik deformasyonunu hesaba katmıyoruz.

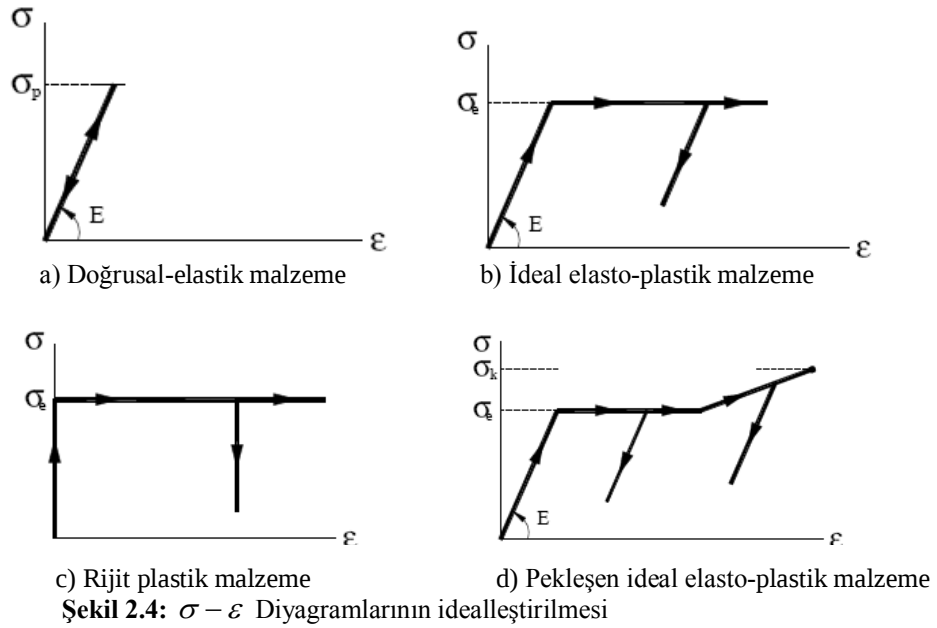


Şekil 2.3: Rijit plastik malzeme eğrisi; σ_y : Akma gerilmesi

Neticede şekil 2.3'teki "Rijit plastik" denilen eğriyi elde ediyoruz [10].

2.1.3. İdeal Diagram Modelleri

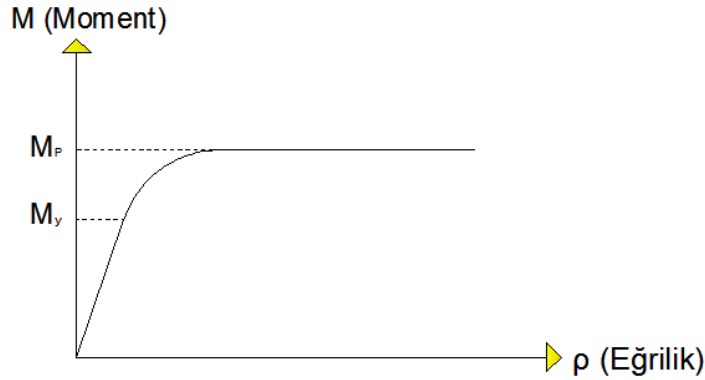
Bir malzeme modeli en kolay biçimde bir eksenli $\sigma - \varepsilon$ gerilme-şekil değiştirme davranışı esas alınarak tanımlanır. Değişik modellere karşı gelen bir eksenli gerilme-şekil değiştirme değişimleri şekil 2.4'te gösterilmiştir. Genellikle küçük gerilmeler için malzeme daima doğrusal elastik kabul edilir. Gerilme-şekil değiştirme arasında "E" elastiklik modülü kullanılarak ilişki tanımlanır. Doğrusal elastik durumda yükleme ve boşalma durumu tek bir bağıntı ile ortaya çıkar. Elastik modelde önemli husus bu davranışın sona erme sınırının tanımlanmasıdır. Şekil 2.4'teki modellerde gerilmenin σ_y akma gerilmesine erişmesi durumunda elastik davranışın sona erdiği kabul edilmiştir [11].



2.1.4. Eğilme Momenti-Eğrilik Bağıntısı

Konumuz itibariyle çerçevelerden bahsedileceğinden dolayı, zira çerçeve düğüm noktalarında momentler; kirişten kolona veya kolondan kirişe aktarılır. Dolayısıyla, çerçeve elemanlarının moment-eğrilik bağıntısı önemli olmaktadır [10].

Sıfırdan arttırılan moment “M” nin etkisi altında simetrik bir çelik çerçeve düşünelim; Moment artınca, kiriş eğriliği “ ρ ” kadar artar. M- ρ bağıntısı, M’nin M_y değerine kadar şekil 2.5’de gösterildiği gibi düz çizgi ile ifade edilir. Bu noktada kirişin dıştaki liflerinin gerilmesi, akma sınırına erişir. M_y ye akma momenti deriz. Momentin değeri M_y ’den de arttırılırsa, eğrilik “ ρ ” eskisinden daha çabuk artar. Bu noktada kirişin dıştaki liflerinin gerilmesi, akma sınırına erişir. M_y ye akma momenti deriz. Momentin değeri M_y ’den de arttırılırsa, eğrilik “ ρ ” eskisinden daha çabuk artar [10].



Şekil 2.5: Kiriş için moment-eğrilik bağıntısı

Artık sadece kirişin dıştaki lifleri değil, içteki lifler de ardışık bir şekilde akma sınırına erişir ve bu akma kesitin ortasına doğru ilerler. Moment bundan sonra belirli bir değere ulaşınca, eğrilik artık sonsuza doğru gider. Momentin bu değeri M_p olarak gösterilir ve buna “Tam Plastik Moment” veya sadece “Plastik Moment” denir [10].

Eğilmeye maruz kirişi incelerken, momentin artı veya eksi işaretli olabileceğini hemen söyleyebiliriz. Sıfırdan M_p ’ye kadar artan bir momentin tesiri altında görüyoruz ki kirişin eğriliği sıfır veya küçük bir değerden sonsuza gidiyor. Kiriş eğriliğinin sonsuza gitmesi, tam plastik momente erişmiş olan kiriş kesitinde bir dönmenin vuku bulmuş olması demektir. Yani kiriş kesiti moment M_p değerine varınca paslı bir mafsal gibi işliyor ve kirişte bahsedilen dönme oluşuyor. Kalın çelik telden yapılmış olan bir palto askısını bükmeğe çalıştığınızda bu basit plastisite olayına rastlamak mümkündür. Bu olaydaki neticeyi şu şekilde özetleyebiliriz;

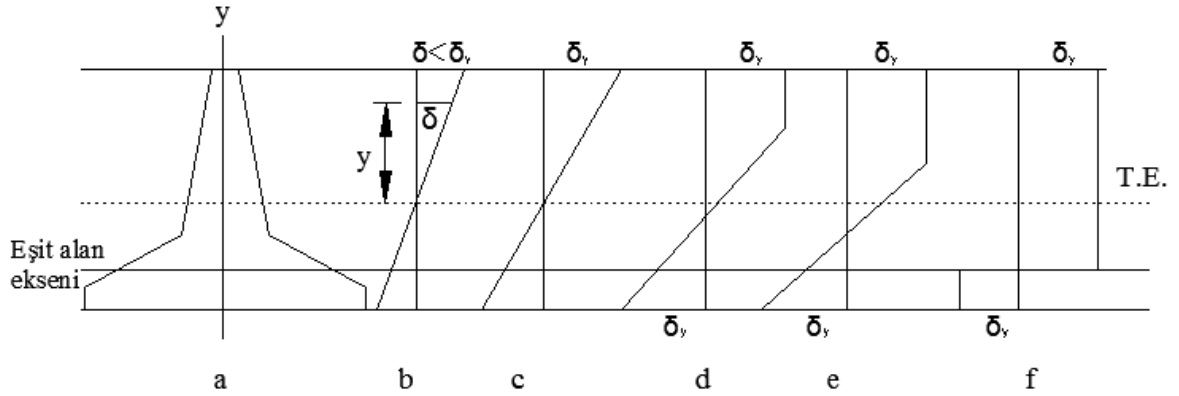
1. Bir kesitteki moment “M” nin değeri hiçbir zaman “ M_p ” den fazla olamaz. Yani;

$$- M_p \leq M \leq + M_p$$
2. Moment “M” nin artmasıyla eğrilik de “ ρ ” kadar artar, yani;

$$\frac{dM}{d\rho} \geq 0$$

2.1.5. Kirişin Eğilmesi ve Şekil Faktörü

Şekil 2.6a’da Y eksenine etrafında simetrik olan bir kiriş kesiti gösterilmiştir. Tercihen çoğalan bir moment “M” nin etkisi altında olan kiriş kesitinin ağırlık merkezi “G” ile gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Kiriş kesitinin artan moment altında gerilme dağılımı

Momentin küçük olduğu hallerde, tarafsız eksenden “y” mesafede olan bir lifin gerilmesi, σ , bilinen elastik formülle hesaplanır;

$$\frac{\sigma}{y} = \frac{E}{\rho} = \frac{M}{I} \quad (2.1)$$

Burada,

E=Malzemenin elastik modülü

ρ =Kirişin eğrilik yarıçapı

I=Tarafsız eksene göre kirişin atalet momenti

Elastik metotlarla hesaplanan bir kirişte, emniyet gerilmesi σ_{em} seçiliyor ve yukarıdaki denklemden;

$$\sigma_{em} = \frac{M \times y_{max}}{I} = \frac{M}{Z} \quad (2.2)$$

yazılabilir.

$$Z = \frac{1}{y_{\max}} \quad (2.3)$$

Burada $y_{\max}$ tarafsız eksen ile kirişteki dış lifler arasındaki mesafedir. σ_{em} ve dış yüklerin oluşturduğu moment “M” yi bildiğimiz için kesit modülü “Z” nin değerine uygun bir kiriş seçebiliriz [10].

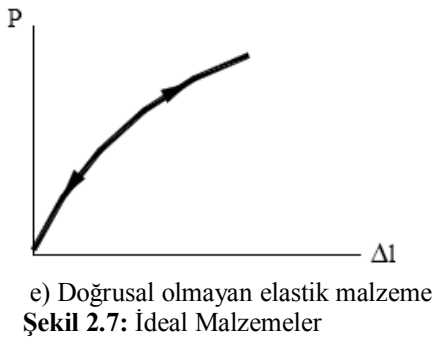
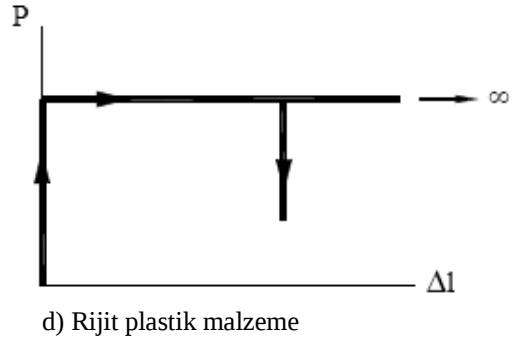
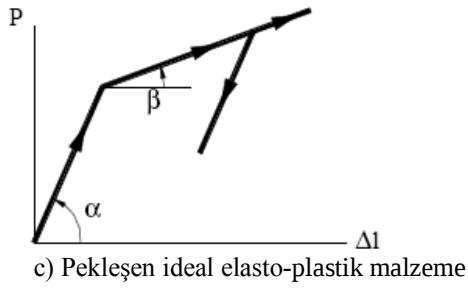
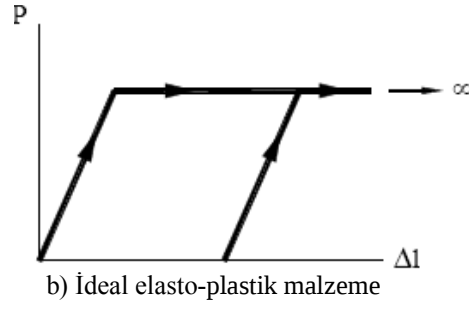
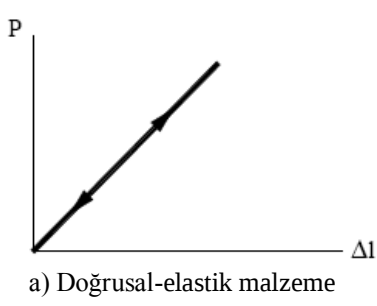
Dış liflerdeki gerilme akma sınırına varmadan önce, şekil 2.6a’daki kirişin gerilme dağıtımı diagramı şekil 2.6b’de çizilmiştir. Şimdi eğer “M”nin değerini arttırmaya devam edersek, $\sigma_{\max}$ (dış liflerdeki gerilme) de artacaktır. $\sigma_{\max} = \sigma_y$ (akma gerilmesi) olunca, M’nin değeri de; M_y , yani akma momentine eşit olur. Kirişin şekli yüzünden, üstteki dış liflerin gerilmesine nazaran σ_y ’ye daha evvel varacaktır. Bu hal şekil 2.6c’de görülecektir [10].

M’nin değeri M_y ’den büyüyünce, plastik akım üstten içerdeki liflere doğru yayılıyor. Şekil 2.6d’de, alt dış liflerin gerilmesi de artık σ_y ‘ye eşit olmuştur. Tarafsız eksen şimdi kesitin ağırlık merkezinden geçmiyor, bilakis kesitin normal gerilmesinin toplamını sıfır yapacak bir durum almış bulunuyor. Dolayısıyla, tarafsız eksen yerine bu eksene artık “Eşit alan ekseni” demek daha doğru olur. Eğer kiriş kesiti x –ekseni etrafında da simetrik olsaydı üst ve alt dış liflerdeki plastik akma aynı zamanda başlardı, plastik bölgelerin alanı eşit olurdu ve netice olarak tarafsız eksen ile eşit alan ekseni çakışır [10].

Moment “M” nin değeri, şekil 2.6e’dekinden geçerek, azami değerini şekil 2.6f’deki gerilme dağılımında bulur. Moment M’nin değeri o anda tam plastik momente denk gelir [10].

2.1.6. İdeal Malzemeler

Yapı sistemlerinde kullanılan gerçek malzemelerin elastik ve plastik özelliklerinin göz önüne alınmasıyla tek eksenli gerilmeye göre bazı idealleştirmeler yapılabilir. Yapılan bazı idealleştirmelere göre ideal malzemeler şekil 2.7’de gösterilmiştir.

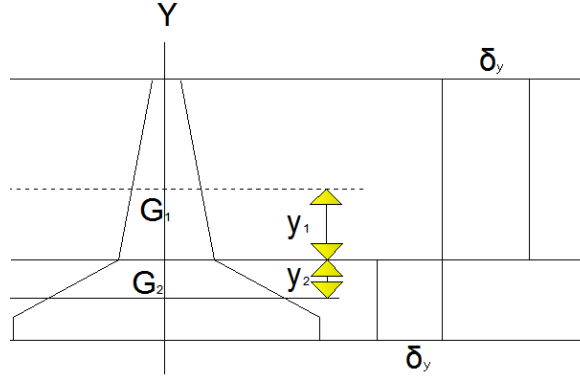


Şekil 2.7: İdeal Malzemeler

Burada (a) doğrusal elastik malzeme akma sınırına kadar doğrusal elastik davranış göstermektedir. (b) İdeal elasto-plastik malzemede akma sınırsız olarak kabul edilmektedir. Pratik uygulamalarda ise belirli bir akma sınırı belirlenmektedir. (c) Pekleşen elasto-plastik malzemede akma halinde gerilmeler sabit değildir, aksine artmaktadır. (d) Rijit plastik malzeme davranışı pekleşen elasto-plastik malzeme davranışına benzemektedir [11].

2.2. Kesit İçin Tam Plastik Momentin Hesaplanması

Kesit alanı “A” olan yukarıdaki kirişin tam plastik momente eriştikten sonraki hali şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Tam plastik momentin hesabı

Kesitteki toplam normal gerilmeyi sıfır kılabilmek için tarafsız eksen artık eşit alan eksenini halini almıştır. Kesitte basınç ve çekme kuvvetlerinin değeri formül 2.4'te gösterilmiştir.

$$\sigma_y = \frac{A}{2} \quad (2.4)$$

İki plastik kısmın ağırlık merkezleri G_1 ve G_2 ile gösteriliyorsa, tam plastik momentin değeri de formül 2.5'de gösterilmiştir.

$$M_p = \frac{A}{2} \times \sigma_y \times (y_1 + y_2) \quad (2.5)$$

Kiriş kesiti de eğer x-eksenine göre de simetrik olursa, $y_1=y_2=y$ yazılabilir ve $M_p=A \cdot \sigma_y \cdot y$ olur. Kirişin kesiti, eni “b”; yüksekliği “t” olan bir dikdörtgen ise, $A=b \cdot t$ ve $y=\frac{1}{2} \cdot \frac{t}{2}$ yazılabilir ve netice olarak formül 2.6'daki eşitlik bulunur.

$$M_p = \frac{\sigma_y \times b \times t^2}{4} \quad (2.6)$$

Elastik teoriyi hatırlayarak, Z_p ile gösterilen bir “Plastik Kesit Modülünü” formüle edebiliriz;

$$M_p = \sigma_y \cdot Z_p \quad (2.7)$$

M_p 'yi akma momenti M_y ile kıyaslarsak, şu neticelere varırız.

$$M_p = \sigma_y \cdot Z \quad (2.8)$$

Dikdörtgen kesit için; $Z = \frac{b \times t^2}{6}$, böylece nihai eşitlik formül 2.9'da görüldüğü gibi olur.

$$M_y = \sigma_y \times \frac{b \times t^2}{6} \quad (2.9)$$

Ayrıca yukarıda gösterdiğimiz gibi, dikdörtgen kesit için, $M_y = \sigma_y \times \frac{b \times t^2}{6}$ yani

$$\frac{M_p}{M_y} = 1,5 = \frac{Z_p}{Z} \quad (2.10)$$

Görüldüğü gibi $\frac{M_p}{M_y}$ oranı $\frac{Z_p}{Z}$ oranına eşit olur, buna “Şekil Faktörü” veya şekil katsayısı denir. Bu faktörün değeri, sadece kesitin geometrik şekline bağlıdır. I-kesitli kirişler için şekil faktörünün değeri, 1,15 civarında olup, dairesel kesitler için ise 1,70’dir [10].

2.3. TS 4561: Çelik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesap Kuralları

Taşıma yükü belirli bir yük bileşimi için yapının taşıyabileceği en büyük yükür. Plastik taşıma yükü ise, yine belirli bir yük bileşimi için, yeterli sayıda plastik mafsall oluşturarak taşıyıcı sistemin tümünü veya bir kısmını yıkılma mekanizmasına ulaştıran yükür. Stabilit kontrollerinin yapılması şartıyla, taşıma yüküyle plastik taşıma yükü eşit alınabilir [12].

2.3.1. Plastik Taşıma Yükünün Hesabı

Daha kesin bir yöntem kullanılmaması halinde, plastik taşıma yükünün hesabında aşağıdaki kabuller de göz önüne alınmalıdır.

- a) Plastik mafsallar taşıyıcı sistem eksenini üzerinde belirli noktalarda konsantre halledir.
- b) Bir ve iki katlı rijit çerçevelerin yıkılma mekanizmasının belirlenmesinde birinci mertebe teorisi kullanılabilir, ancak stabilite kontrolleri yapılmalıdır.
- c) Taşıyıcı sistemin birbirinden bağımsız, değişik kökenli yüklerin etkisi altında olması halinde, her yük seviyesinde bu yükler arasındaki oranın sabit kaldığı kabul edilir [12].

2.3.2. Kesitlerin Taşıma Gücü

Plastik hesapta bir kesitin taşıma gücüne o kesitin bütünüyle plastikleştiğinde erişildiği kabul edilir. Bir kesitin, basit ya da birleşik olarak etkiyen kesit tesirlerine

mukavemeti, kesitte bu kesit tesirlerini dengeleyen, plastik yönden kabul edilebilir bir gerilme dağılımı bulunabildiği sürece mümkündür [12].

Hesap metodunda benimsenen Von Misses kıstasına göre, düzlem gerilme durumu için, plastik olarak kabul edilebilir bölge içindeki gerilmeler;

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \times \sigma_y + 3 \times \tau^2 \leq \tau_a^2 \quad (2.11)$$

şartını sağlar [12].

Benzer olarak, taşıyıcı sistemin bir elemanının bir kesitindeki gerilmeler de belirli bir bölge içinde kalmak zorundadır. Bu şarta uyan bütün kesit tesir durumları kabul edilebilir [12].

Aşağıda açıklanan kurallar, çok karşılaşılan dikdörtgen, I ve sandık kesitler için, kesitin taşıma gücünü, diğer bir deyişle kesit tesirlerinin aşmaması gerekli sınırları belirlemektedir. Elemanda genel ve yanal burkulma ve buruşma gibi kararsızlık durumlarının oluşmadığı ayrıca kontrol edilir [12].

2.3.3. Normal Kuvvet Durumu

Bir kesitte yalnız F normal kuvveti varsa, değeri kesitin N_p plastikleşme kuvvetini aşmamalıdır.

$$N \leq N_p \quad (2.12)$$

$$N_p = A_{eff} \times \sigma_a \quad (2.13)$$

Burada; N_p , σ_a düzgün yayılı gerilmesi altında kesitin çekme ya da basınç etkisi altındaki taşıma kapasitesidir. A_{eff} , çalışan en kesit alanıdır. A_{eff} , çekme türü normal kuvvette net en kesit, basınç türü normal kuvvette de içi boş kalan deliklerden dolayı en kesit kaybı kadar azaltılmış brüt en kesittir. Net en kesit TS 648'de tanımlanan faydalı en kesit alanı gibi hesaplanmalıdır [12].

2.3.4. Basit Eğilme Durumu

Elasto-plastik ortamlarda, elastik ortam için kabul edilen bir çubuğun dik kesitlerinin eğilmeden sonra da düzlem kaldığı, Bernoulli-Navier varsayımının, geçerliliği kabul edilmektedir. Bir kesitteki eğilme momenti, kesitin plastikleşme momentini aşmamalıdır [12].

$$M \leq M_p \quad (2.14)$$

M_p plastikleşme momentinin hesabı için çift dikdörtgen gerilme yayılımı kabul edilir. Kesit çift simetrik ise, tarafsız eksen, kesiti eş alanlı iki parçaya ayırır. Kesitin plastik mukavemet momentleri;

$$W_{px,y} = \int |A_{x,y}| dA \quad (2.15)$$

bağıntılarından hesaplanır ve tarafsız eksenin üst ve altında kalan kesit bölümlerinin bu eksene göre statik momentlerinin toplamına eşittir. Çift simetrik kesitlerde doğrudan;

$$W_{px,y} = 2 \cdot S_{x,y} \quad (2.16)$$

alınabilir.

Basit eğilmenin x-x ya da y-y eksenine göre uygulanmasına bağlı olarak M_{px} ya da M_{py} plastikleşme momentleri;

$$M_{px,y} = W_{px,y} \times \sigma_a \quad (2.17)$$

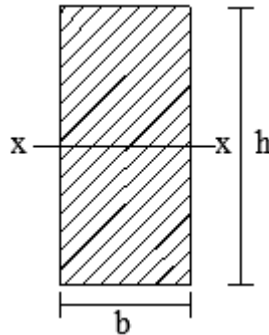
bağıntılarıyla belirlenir.

Elastik ve plastik taşıma güçleri arasındaki “f” oranı kesitin geometrisine bağlı olup biçim faktörü adını alır.

$$f = \frac{M_p}{M_{min}} = \frac{W_p}{W_{min}} \quad (2.18)$$

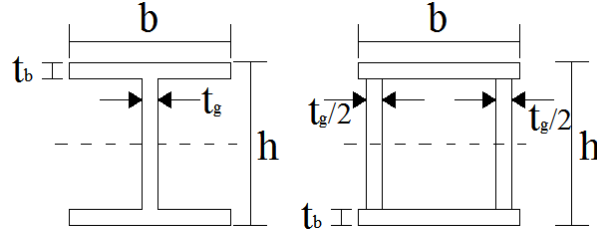
Burada; $M_{min} = W_{min} \times \sigma_a$ olup; W_{min} , ele alınan asal eksene göre minimum mukavemet momentidir.

Çok rastlanılan bazı kesitler için W_p plastik mukavemet, değerleri aşağıda verilmiştir.



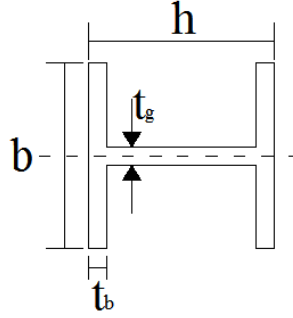
$$W_p = \frac{b \times h^2}{4} \quad (2.19)$$

Şekil 2.9: Dikdörtgen kesit ve mukavemet momenti formülü



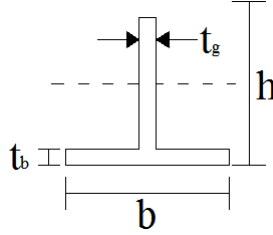
$$W_p = \frac{t_b \times h^2}{4} + (b - t_b) \times (h - t_b) \times t_b \quad (2.20)$$

Şekil 2.10: Başlıklarına paralel bir eksene göre eğilen I kesit, sandık kesit ve kesitlere ait formüller



$$W_p = \frac{t_b \times b^2}{2} + (b - 2 \times t_g) \times \frac{t_g^2}{4} \quad (2.21)$$

Şekil 2.11: Gövdesine paralel bir eksene göre eğilen I kesit ve formül



Eğer $h \times t_g > b \times t_b$ ise;

$$W_p = \frac{(t_g \times h + b \times t_b)^2}{4 \times t_g} - \frac{b \times t_b^2 \times (b - t_g)}{2 \times t_g} \quad (2.22)$$

Eğer $h \times t_g < b \times t_b$ ise,

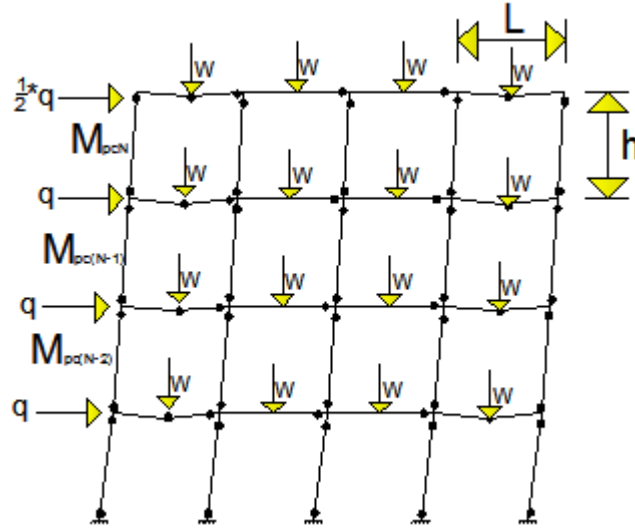
$$W_p = \frac{(t_g \times h + b \times t_b)^2}{4 \times b} - \frac{t_g \times h^2 \times (b - t_g)}{2 \times b} \quad (2.23)$$

Şekil 2.12: “T” Kesit ve kesite ait formüller

2.4. Heyman Formüllerine Göre Plastik Hesap

Heyman, önerdiği projelendirme yöntemine dayanak olarak, plastik mafsalların kabul edilen dağılımını şekil 2.13’de gösterildiği gibi almıştır. Kirişlerin her birinin üzerindeki yüklerin yarısının kiriş açıklıklarının tam ortasına, yüklerin dörtte birinin ise kirişlerin uçlarındaki kolonlara doğrudan doğruya etki ettiği varsayılmıştır. Heyman

yöntemi, her biri W (zati+ek) düşey yükünü taşıyan L uzunluğunda ve q sayıda eşit açıklığı bulunan düzgün çerçevelere uygulanmaktadır. Her bir kat h yüksekliğindedir ve her kat seviyesinde çerçeveye etkiyen deprem yükü şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Heyman tarafından yapılan projelendirme

Kirişlerin tam plastik momenti çatı katında M_{pb1} , çatıdan itibaren r katında M_{pr} olur. İçteki bir kolonun tam plastik momenti M_{pci} , dıştaki bir kolonun tam plastik momenti ise M_{pcd} ($r=1$ durumu en üst kattaki kolonlara karşı gelir). En üstteki kolonlarda plastik mafsalların meydana gelişini sınırlandıran bir ufak değişiklikle Heyman’ın yöntemi çok katlı çerçeveler ise özel işlem gerektirir [13].

$r \neq 1$ katı için;

$$M_{pbr} \geq \lambda_1 \times \left(\frac{W \times L}{12} + \frac{Q \times H}{6 \times q} \times (r-1) \right) \quad (2.24)$$

$$M_{pcr} + M_{pc(r-1)} \geq X_r \text{ burada } X_r = \lambda_2 \times \left(\frac{Q \times H}{q} + (r-1) \right) \quad (2.25)$$

$$M_{pcd} = \frac{1}{2} \times M_{pci} \quad (2.26)$$

$r=1$ katı, yani en üst kat için;

$$M_{pb1} = \lambda_1 \times \left(\frac{W \times L}{12} + \frac{Q \times H}{24 \times q} \right) \quad (2.27)$$

$$M_{pcd} \geq M_{pbd} \quad (2.28)$$

$$M_{pci} \geq M_{pcd} \quad (2.29)$$

2.5. Majid Formüllerine Göre Plastik Hesap

Heyman plastik modüle bağlı olarak, yukarıda gösterildiği gibi uygun kesitler elde etmek için kirişlerde plastik mafsaldaki moment değerleri ise kolonların elastik bölgede taşıyabilecekleri eğilme momentlerinde yapıldığı gibi tayin edilmiştir. Şimdiki projelendirme işlemi için, bir başlangıç noktası olarak, istenen kolon momentleri plastik mafsaldaki değerlerdir ve yeteri kadar dayanıklı kolonlar elde etmek için Heyman tarafından elde edilen değerleri 1,46 katsayısıyla çarpmak oldukça yeterli görülmüştür. Heyman'ın kirişine ait tam plastik moment değerleri oldukça emniyetli bulunmuştur ve bu bakımdan onun formülündeki $\frac{W \times L}{12}$ değerlerinin $\frac{W \times L}{16}$ değerleriyle değiştirilmesi yararlı olabilir. Bu nedenle, aşağıda gösterilen değiştirilmiş Heyman formülleri, düzgün çerçevelerin projelendirilmesinde oldukça uygun bir başlangıç noktası olarak önerilebilir. Bu formüller çok açıklıklı çerçeveler ve tek açıklıklı çerçeveler için aşağıda sırasıyla verilmiştir.

2.5.1. Çok Açıklıklı Çerçeveler

$r \neq 1$ katı için;

$$M_{pbr} \geq \lambda_1 \times \left(\frac{W \times L}{16} \right) \quad (2.30)$$

$$M_{pbr} \geq \lambda_2 \times \left(\frac{W \times L}{16} + \frac{Q \times H}{6 \times q} \times (r-1) \right) \quad (2.31)$$

$$M_{pcr} + M_{pc(r-1)} \geq X_r \quad (2.32)$$

$$\text{burada; } X_r = 1,46 \times \lambda_2 \times \left(\frac{Q \times H}{q} \times (r-1) \right) \quad (2.33)$$

$$M_{pcd} = \frac{1}{2} \times M_{pci} \quad (2.34)$$

$r=1$ katı için;

$$M_{pb1} \geq \lambda_1 \times \left(\frac{W \times L}{16} \right) \quad (2.35)$$

$$M_{pb1} \geq \lambda_2 \times \left(\frac{W \times L}{16} + \frac{Q \times H}{24 \times q} \right) \quad (2.36)$$

$$M_{pci1} \geq M_{pb1} \quad (2.37)$$

$$M_{pcd1} \geq M_{pbi1} \quad (2.38)$$

2.5.2. Tek Açıklıklı Çerçeveler

$r \neq 1$ katı için;

$$M_{pbr} \geq \lambda_1 \times \left(\frac{W \times L}{16} \right) \quad (2.39)$$

$$M_{pbr} \geq \lambda_2 \times \left(\frac{W \times L}{16} + \frac{Q \times H}{6} \times (r-1) \right) \quad (2.40)$$

$$M_{pcr} + M_{pc(r-1)} \geq X_r \text{ burada } X_r = 0,73 \times \lambda_2 \times (Q \times H \times (r-1)) \quad (2.41)$$

$$M_{pcd} = \frac{1}{2} \times M_{pci} \quad (2.42)$$

$r=1$ katı için;

$$M_{pb1} \geq \lambda_1 \times \left(\frac{W \times L}{16} \right) \quad (2.43)$$

$$M_{pb1} = \lambda_2 \times \left(\frac{W \times L}{16} + \frac{Q \times H}{24} \right) \quad (2.44)$$

$$M_{pci1} \geq M_{pbi1} \quad (2.45)$$

$$M_{pcd1} \geq 0,182 \times \lambda_2 \times Q \times H \quad (2.46)$$

2.6. Projelendirme Kriterleri

Orantılı yükler altında, aşağıda yükleme durumları göz önünde tutulduğunda, düzlem çerçeve biçimindeki yapıların projelendirilmesinde kriterin, kabul edilebilir en küçük yük parametresinin erişilmesi olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu yükleme durumları ve yük parametreleri ise;

1. Zati yük + ek düşey yükler, diğer bir deyimle “düşey yükleme” durumu için minimum yük parametresi; λ_1
2. Zatii yük + ek düşey yükler + her iki yönden etkiyen rüzgar ve deprem yükleri, diğer bir deyimle “birleşik yükleme” durumu için minimum yük parametresi; λ_2

Yatay kuşaklamaların ve kompozit davranışın eğilme düzlemi dışında çerçevenin tüm olarak göçmesini önlediği varsayımı yapılmıştır. Yukarıdaki koşullara ek olarak

bireysel elemanlarda plastik mafsalların meydana gelişi sırasında bazı kesin sınırlandırmalar konulmuştur. Analizi birim şekil parametresi üzerine kurarak şunların yerine getirilmesi istenir;

3. Gerek dūřey yūkleme gerekse birleřik yūkleme durumlarında, yūk parametresinin 1'den kūçūk deęerlerinde kiriřlerde plastik mafsal meydana gelmeyecektir.
4. Dūřey yūkleme durumunda yūk parametresinin λ_1 'den kūçūk deęerleri için, kiriřlerde birleřik yūkleme durumunda ise yūk parametresinin λ_2 'den kūçūk deęerleri için kolonlarda plastik mafsal meydana gelmeyecektir [2].

Buradaki “Birim şekil Parametresi” tam plastik momentin, kesitin dış liflerinde akmanın ilk kez meydana gelmesine neden olan eğilme momentine oranı olarak bilinmektedir [2].

Uygulamada kullanılan kesitlerde, gerçekte tam plastik moment değerine erişmeden ōnce sınırlı bir plastik deformasyon meydana gelir. Fakat bōyle plastik deformasyon sınırlı bir değerde olması bunun kirişlerde çalışma yūklerinden daha aşağıdaki bir yūk değerinde muhtemelen meydana gelmesi ve de ōnemsiz olması nedenleriyle gōz ōnūne alınmamıştır. Kolonlarla ilgili olarak, elemanların yanal burulmalı burkulmayı da kapsamına alan instabilite tehlikesini sınırlandırmak için, Heyman'ın kolonları çalışma yūkleri altında elastik kalacak şekilde projelendiren yōntemine karşı gelen bazı sınırlandırmalar kesinlikle kolonlar için yanal stabilite şartlarının ōzel olarak hesaplanmasıyla ilgili olmalıdır. Burada değinilen projelendirme yōnteminde, yanal stabiliteye bağlı olarak seçilen kolon kesitinin uygunluğunu saptamak için, projelendirme bitiminden sonra el ile kontrolūn yapılacağı varsayımı yapılmıştır. Bu çalışmada sunulan sayısal ōrneklerde, dūřey yūkleme için yūk parametresinin $\lambda_1 = 1,75$ ve birleşik yūkleme için yūk parametresinin ise $\lambda_2 = 1,40$ olduğu varsayılmıştır. λ_1 ve λ_2 değerleri ile kiriş ve kolonlarda tam plastik moment değerine erişilmesi konusunda getirilen kesin sınırlandırmalar, temel projelendirme işlemine etkilemeksizin değiştirilebilir [2].

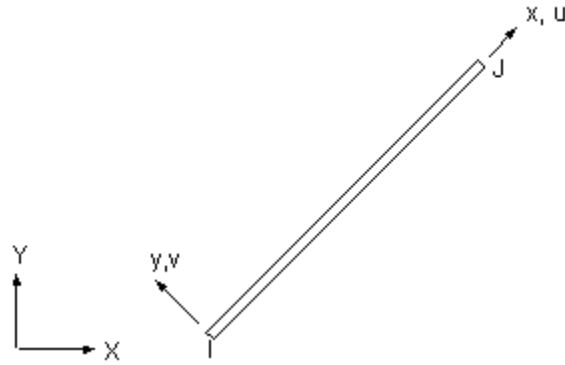
2.6.1. Projelendirme İşlemlerinin Özeti

- a) Elemanlarla ilgili kesit ōzellikleri ve yūk vektōrleri okunur

- b) İlgili formüller kullanarak kesitler seçilir
- c) Çerçeve yük artım yöntemiyle göçünceye kadar analiz edilir
- d) Projelendirme kriterinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir
- e) Çerçeve yeniden projelendirilir
- f) Tekrar göçünceye kadar analiz yapılır
- g) Belirlenen elemanlar için yük parametreleri, kuvvet veya moment değerleri yazdırılır veya grafikleri çizdirilir.

2.7. ANSYS İle Sonlu Elemanlar Analizi

2.7.1. Modellemede Kullanılan Eleman BEAM23



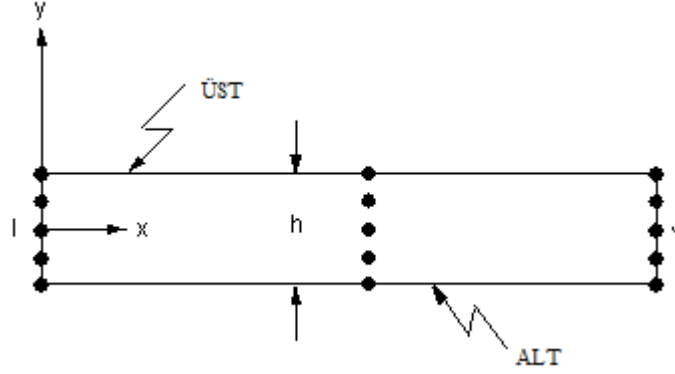
Şekil 2.14: 2-Boyutlu plastik BEAM23 elemanı

Tablo 2.1: BEAM23 ile ilgili genel bilgiler

Matris veya Vektör	İntegrasyon Noktası
Rijitlik Matrisi	Elastik durum yok. Plastik durumla birlikte tanjant modülü matrisi için Newton-Raphson yük vektörünün aynısı
Kütlesel ve gerilme rijitlik matrisi; ve termal yük ve basınç yük vektörü	Hiçbir şey
Newton-Raphson Yük Vektörü ve Gerilme Değerlendirmesi	Uzunluk boyunca 3 nokta En kesit kalınlık boyunca 5 nokta
Yük Çeşidi	Dağılım
Eleman sıcaklığı	En kesit kalınlığı ve eleman boyunca lineer
Noktasal sıcaklık	Kalınlık boyunca sabit, uzunluk boyunca lineer
Basınç	Uzunluk boyunca lineer

2.7.1.1.İntegrasyon Noktaları

Elemanın uzunluğu boyunca üç tane integrasyon noktası vardır. Bu üç nokta ikisi kenarlarda biri de ortada olmak üzere tanımlanmıştır [14].



Şekil 2.15: İntegrasyon noktalarının yerleşimi

h şu şekilde tanımlanmıştır;

h=elemanın yüksekliği veya kalınlığı (Bilgisayar girdisi olarak yükseklik R komutuyla tanıtılır.)

Elemanın en kesiti boyunca tanıtılan beş integrasyon noktasının yerleşimini şu şekilde ifade ederiz; $y = -0.5h, -0.3h, 0.0, 0.3h, \text{ ve } 0.5h$. Bu sayısal integrasyon noktalarının her biri, farklı en kesitlere sahip elemanlarda etkili genişlikle inilti bir integrasyon katsayısıyla bağlantılıdır. Bu integrasyon noktaları elemanda kullanılan yöntemi açıklamak için ve aynı zamanda kodu KEYOPT(6)=4 olan rastgele kesitlerdeki program girdi değerlerini kullanım kolaylığıyla kullanıcıya sunmaktadır [14].

Elemanda kullanılan kriterler:

- Eleman, basit basma veya çekme etkisi altında kaldığı zaman, doğrudan elastik veya plastik duruma geçerek karşı davranış gösterir. Bu durumda alanın (A) mutlaka doğru olması gerekir.
- Birinci mertebe atalet momenti doğru girilmeli. Sadece simetrik olmayan enkesitler için sıfırdan farklıdır.

- c) Sadece moment etkisi altındaki eleman, elastik uzamaya karşı doğrudan tepki geliştirmektedir. Bu durumda da, ikinci mertebe atalet momenti (I) doğru girilmelidir.
- d) Üçüncü mertebe atalet momenti de doğru girilmelidir. Bu parametre sadece simetrik olmayan en kesitler için sıfırdan farklıdır.
- e) Sonuç olarak, sayısal integre edilmiş en kesitler de yaygın olduğu gibi en kesitin dördüncü derece momenti de doğru girilmiştir.

Simetrik en kesitler için ek bir kriter de; kirişin merkez çizgisi ile olan simetrisinin sürdürülmesidir. Dolayısıyla beş bağımsız sabitin haricinde, sadece üç adet vardır. Bu üç adet sabit, daha önce bahsedilen kriterlerden üçünün sağlanması için yeterlidir. Diğer bazı durumlar, çekme ve eğilmeye karşı olan diğer plastik kombinasyonlar, gibi yeteri kadar tatminkar değildir ancak güncel problemlerdeki ayrılıkları tolerans aralıklarındaki kadar küçüktür. Simetrik olmayan en kesit durumları için, kullanıcı beş eşitliği çözmek durumundadır, üç değil. Bu durum için, birinci ve üçüncü derecede atalet momentleri temsil eden iki ek eşitliğin kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu durumun ileri aşamalarına daha fazla burada değinilmemektedir [14].

Bu beş eşitliğin formülasyonu şu şekilde yazılmıştır:

$$A = \int_{AREA} dA \quad (2.47)$$

$$I_1 = \int_{AREA} y dA \quad (2.48)$$

$$I_2 = \int_{AREA} y^2 dA \quad (2.49)$$

$$I_3 = \int_{AREA} y^3 dA \quad (2.50)$$

$$I_4 = \int_{AREA} y^4 dA \quad (2.51)$$

Burada:

dA= Küçük bir alanı,

y= Merkeze olan mesafeyi temsil etmektedir.

Bu beş kriter kiriş eleman üzerindeki beş integrasyon noktasına göre şu şekilde ifade edilir:

$$A = \sum_{i=1}^5 H(i)L(i)h \quad (2.52)$$

$$I_1 = \sum_{i=1}^5 H(i)L(i)h(h(P_i)) \quad (2.53)$$

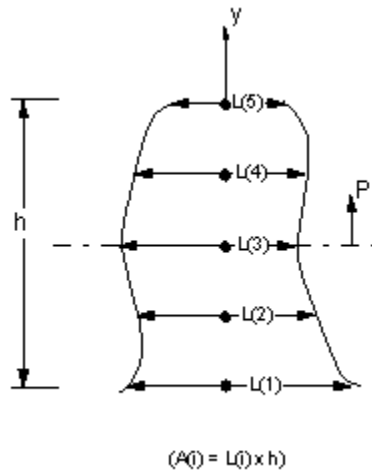
$$I_2 = \sum_{i=1}^5 H(i)L(i)h(h(P_i))^2 \quad (2.54)$$

$$I_3 = \sum_{i=1}^5 H(i)L(i)h(h(P_i))^3 \quad (2.55)$$

$$I_4 = \sum_{i=1}^5 H(i)L(i)h(h(P_i))^4 \quad (2.56)$$

P(i) = y doğrultusunda integrasyon noktalarının lokal noktalarını gösterir (P(1) = -0.5, P(2) = -0.3, gibi)

L(i), kiriş genişliğini gösteren Şekil 3.9'da da görüleceği gibi herhangi bir simetrik olmayan en kesitteki i noktasındaki genişliği verir.



Şekil 2.16: BEAM23 elemanında kiriş en kesit genişliğinde integrasyon noktaları

Dikdörtgen en kesitli kiriş durumuyla başlanacak olunursa, tüm $L(i)$ değerleri kirişin en kesit uzunluğuna eşit olur ve şu şekilde hesaplanır;

$$L(i) = \frac{12 \times I_{zz}}{h^3} \quad (2.57)$$

Burada:

I_{zz} = atalet momenti (R komutundaki IZZ parametresidir)

Unutulmamalıdır ki, alan, bu hesaplamaları yaparken kullanılacak bir parametre değildir. Daha önce de değinildiği gibi, simetri $H(1) = H(5)$ ve $H(2) = H(4)$ olduğu durumlarda kullanılır. Dolayısıyla, $H(1)$, $H(2)$, ve $H(3)$ yukarıdaki üç kriterden türetilmiş integrarlı eşitlikler çözüldüğünde bu üç kriterle ulaşıldığı görülmüş olacaktır. Bu ağırlık faktörü, aynı kriterler temelinde $L(i)$ de uygun düzeltmeler yapıldığında, diğer tüm en kesitler için de kullanılabilir. Sonuçlar tablo 2.2 en-kesit faktörü hesaplama tablosunda gösterilmiştir.

Dikdörtgen en kesitlerde karşılaşılan ilginç sonuçlardan biri de eğilme durumunda tamamıyla plastik duruma gerilmesi. Uygun parametre alanın ilk momenti veya;

$$I_F = \int |y| dA \quad (2.58)$$

Bu da şu şekilde sonuçlanır;

$$I_F = \sum_{i=1}^5 H(i)L(i)h |hP(i)| \quad (2.59)$$

Tablo 2.2: En kesit hesaplama faktörü

Sayısal İntegrasyon Noktası (i)	Kalınlık boyunca İntegrasyon Noktası (P(i))	Sayısal Ağırlık Faktörü (H(i))	Etkili Genişlik (L(i))	
			Dikdörtgen	Boru
1	-.5	.06250000	$12I_{zz}/h^3$	$8.16445t_p$
2	-.3	.28935185	$12I_{zz}/h^3$	$2.64115t_p$
3	.0	.29629630	$12I_{zz}/h^3$	$2.00000t_p$
4	.3	.28935185	$12I_{zz}/h^3$	$2.64115t_p$
5	.5	.06250000	$12I_{zz}/h^3$	$8.16445t_p$

Tablo 2.2'nin devamı

Sayısal İntegrasyon Noktası (i)	Kalınlık boyunca İntegrasyon Noktası (P(i))	Sayısal Ağırlık Faktörü (H(i))	Sayısal İntegrasyon Noktası (i)	Etkili Genişlik (L(i))	
				Yuvarlak Çubuk	Rastgele Kesit
1	-5	.06250000	0.25341D _o	A(-0.5)/h	
2	-.3	.28935185	0.79043D _o	A(-0.3)/h	
3	.0	.29629630	1.00000D _o	A(0.0)/h	
4	.3	.28935185	0.79043D _o	A(0.3)/h	
5	.5	.06250000	0.25341D _o	A(0.5)/h	

Tablo 2.2'deki en kesit hesaplama faktörlerindeki değerlerin yerlerinin değiştirilmesiyle, teorik değer in hesaplanan değere oranı 18/17 olur. Bu da bu değer için % 6'lık bir hata payı anlamına gelir.

Simetrik olmayan genel kesitlerde (KEYOPT(6) = 4) dikkat edilmesi gereken hususlar; simetrik olmayan rastgele kesitlerde girdi parametreleri; h, hL(1)(=A(-50)), hL(2)(=A(-30)), hL(3)(=A(0)), hL(4)(=A(30)), ve hL(5)(=A(50)) olur. Kullanıcının iyi bir sonuç alabilmesi için eşitlik 2.60'den eşitlik 2.64'e kadar olan parametreleri yazması lazım. Bu eşitlikler şu şekilde düzenlenebilir:

$$A = \{0.0625 * \{A(-50) + A(50)\} + 0.2935185 * \{A(-30) + A(30)\} + 0.2962963 * A(0)\} \quad (2.60)$$

$$I_1 = \{0.03125 * \{-A(-50) + A(50)\} + 0.008680556 * \{-A(-30) + A(30)\}\} * h \quad (2.61)$$

$$I_2 = \{0.015625 * \{A(-50) + A(50)\} + 0.0260417 * \{A(-30) + A(30)\}\} * h^2 \quad (2.62)$$

$$I_3 = \{0.0078125 * \{-A(-50) + A(50)\} + 0.0078125 * \{-A(-30) + A(30)\}\} * h^3 \quad (2.63)$$

$$I_4 = \{0.0039063 * \{A(-50) + A(50)\} + 0.00234375 * \{A(-30) + A(30)\}\} * h^4 \quad (2.64)$$

Burada;

$I_1 = I_3 = 0$ ise kesinlikle simetriktir

Yukarıdaki beş eşitliğe alternatif olarak eşitlik 2.65 kullanılabilir. Bu eşitlikler tekrar düzenlenirse;

$$I_F = \{0.03125 * (A(-50) + A(50)) + 0.08680554 * (A(-30) + A(30))\} \quad (2.65)$$

I_2 parametresinin orta noktadan, I_{zz} merkezden alınması gerektiği unutulmamalıdır. Bu ikisi arasındaki ilişki ise;

$$I_{zz} = I_2 - A * d^2 \quad (2.66)$$

Burada;

$$d = \frac{I_1}{A} = \frac{h \sum_{i=1}^5 H(i)L(i)P(i)}{\sum_{i=1}^5 H(i)L(i)} \quad (2.67)$$

2.7.1.2. Plastisite İçin Tanjant Rijitlik Matrisi

Elastik narinlik, kütle ve gerilme rijitlik matrisleri 2-Boyutlu kiriş eleman (BEAM3) ile aynıdır. Plastisite için Tanjant Rijitlik Matrisi sayısal integrasyon ile oluşturulur. Bir sonraki alt bölümün konusu dâhilinde olan ve Newton-Raphson kuvvetlerini de içeren Tanjant Rijitlik Matrisini oluşturan bu konu 3 boyutlu eleman etkisini de içerecek şekilde genelleştirilmiştir. Plastisite için kullanılan Tanjant Rijitlik Matrisinin genel yapısının genel formu;

$$[K_T] = \int_{vol} [B]^T [D_N] [B] dvol \quad (2.68)$$

Genel elemanlar için olan bu rijitlik matrisi formülize edilecek olunursa:

$$[K] = [K]^B + [K]^S + [K]^A + [K]^T \quad (2.69)$$

Uygunluk için n indisi kaldırılır. Bu dört matristen her biri, belirli bir zamandaki, uzamanın sadece bir elemanı için, eşitlik 2.68'ten türevlenen parametre buradan basitleştirilebilir; $[B]^T [D_N] [B]$ 'den $\{B\} D_N^{[B]}$ 'e ulaşılır. Bu matrislerin her biri sırasıyla şu şekilde açıklanabilir.

2.7.1.2.1. Eğilmeye Karşı Rijitlik Matrisi ($[K^B]$)

Z eksenine göre eğilmeye karşı rijitlik matrisi için uzama-deplasman matrisi şu şekilde yazılabilir:

$$[K^B] = y \times [B_x^B] \quad (2.70)$$

Burada $[B_x^B]$ parametresi, $[K^B]$ parametresini içerir ve x'in bir fonksiyonu olur [15].

$$\{K_x^B\} = \frac{1}{L^2 + 12\phi} \begin{bmatrix} \frac{12x}{L} - 6 \\ 6x - 4L - \frac{12\phi}{L} \\ -(\frac{12x}{L} - 6) \\ 6x - 2L + \frac{12\phi}{L} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Burada;

L= Kiriş uzunluğu

Elasto-plastik gerilme-uzama matrisi, bazı parametrelerle yakından ilgilidir. Bunlar eksenel uzama artışından, eksenel gerilme artışına kadar olan parametrelerden sadece birini içerir:

$$D_N = E_T \quad (2.72)$$

Burada, E_T , gerilme-uzama grafiğinden elde edilmiş mevcut tanjant modülüdür. Bu tanımları kullanarak, eşitlik 2.68 şu şekilde kısaltılabilir [15]:

$$[K^B] = \int_{vol} \{B_x^B\} E_T y^2 [B_x^B] d(vol) \quad (2.73)$$

2.7.1.2.2. Kesmeye Karşı Rijitlik Matrisi ($[K^S]$):

Kesme-sehim matrisi için uzama deplasman vektörü aşağıda belirtilmiştir [11];

$$\{B_s\} = \frac{6\phi}{L^2 + 12\phi} \times \left[-\frac{2}{L} - 1 \times \frac{2}{L} - 1 \right] \quad (2.74)$$

Kesme kuvvetinden kaynaklı deplasman için plastisite tanjant matrisi gerekmemektedir, çünkü BEAM23 ve BEAM24 elemanları için kesme uzaması ihmal edilir, PIPE20 elemanı için ise kesme uzaması, Tanjant Rijitlik yaklaşımı yerine Newton-Raphson ilk rijitlik matrisi ile birlikte hesaplanır. Dolayısıyla, $D_n = G$ olduğu için (elastik kesme modülü) formül 2.68 şu şekilde kısaltılır [15]:

$$[K^S] = \int_{vol} \{B^S\} G [B^S] d(vol) \quad (2.75)$$

Bu formül alan üzerinden integre edilirse aşağıdaki eşitlik bulunur:

$$[K^S] = G A^S \int_L \{B^S\} [B^S] dx \quad (2.76)$$

Burada A_s kesme kuvvetine maruz alandır (BEAM3 2 boyutlu elastik eleman). A_s , eşitlik 2.74'da x 'in bir fonksiyonu değildir, 2.76'de eleman uzunluğu boyunca

integre edilen değerler de kolaylıkla uygulanabilir. Fakat eğilme matrisi, $[K^B]$, boyunca Gauss kuralına binaen sayısal olarak integre edilebilir [10].

2.7.1.2.3. Eksenel Rijitlik Matrisi ($[K^A]$)

Eksene karşı uzama-deplasman vektörü;

$$[B^A] = \frac{1}{L}[1-1]^T \quad (2.77)$$

Eğilme matrisi ile birlikte, $D_n = E_T$ eşit olur ve eşitlik 2.68 şu şekilde yazılır:

$$[K^A] = \int_{vol} \{B^A\} E_T [B^A] d(vol) \quad (2.78)$$

Bu formül şu şekilde basitleştirilir;

$$[K^A] = \int_{vol} \{B^A\} \left[\int_{area} E_T d(area) \right] [B^A] dx \quad (2.79)$$

Eğilme matrisinde kullanılan sayısal integrasyon yöntemi, BEAM3 elemanı için de aynı tarzda kullanılır [10].

2.7.1.2.4. Burulmaya Karşı Rijitlik Matrisi ($[K^T]$)

Burulma plastisitesi sadece PIPE20 elemanı için ilk rijitlik matrisi kullanılarak Newton-Raphson yaklaşımıyla hesaplanır. Sadece 3-Boyutlu elemanlar için gerekli olan elastik burulma matrisi ise [10]:

$$[K^T] = \frac{GJ}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

2.7.1.3. Newton-Raphson Yük Vektörü

Newton-Raphson Kuvvet Vektörü;

$$\{F_n^{nr}\} = \int_{vol} [B]^T [D] \{\varepsilon_n^{el}\} d(vol) \quad (2.81)$$

Genel bir kiriş eleman için yük vektörü şu şekilde yazılır;

$$\{F^{nr}\} = \{F_B^{nr}\} + \{F_S^{nr}\} + \{F_A^{nr}\} + \{F_T^{nr}\} \quad (2.82)$$

Bu simgelemede kullanılan indislerden “n” uygunluk açısından kaldırılır. Ve yine dört vektörün her birinde belirli bir zamanda uzamanın sadece bir elemanı kullanılır, eşitlik 2.81’in integrali şu durumdan, $[B]^T [D] \{\varepsilon_n^{el}\}$; şu duruma, $[B]^T D \varepsilon_n^{el}$ sadeleştirilir [10].

2.7.1.3.1. Eğilme Kuvvet Vektörü $\{F_B^{nr}\}$

Bu durumdaki elastisite matrisinde sadece eksenel gerilme-uzama elemanları vardır. Dolayısıyla; $D=E$, elastik modül olur. 2.81'deki eğilme yük vektörü şu şekildedir:

$$[F_{nr}^B] = E \int_L \{B_x^B\} \left[\int_{alan} y \varepsilon^{el} d(alan) \right] dx \quad (2.83)$$

Elastik eksenel uzaman şu şekilde hesaplanır;

$$\varepsilon^{el} = \phi y + \varepsilon^a - \varepsilon^{th} - \varepsilon^{pl} - \varepsilon^{cr} - \varepsilon^{sw} \quad (2.84)$$

Burada toplam dönme;

$$\phi = [B_x^B] \{U^B\} \quad (2.85)$$

Burada; $\{u^B\}$, noktasal deplasman $\{u\}$ vektörünün eğilme elemanıdır. Elemandaki eksenel deplasmandan kaynaklı toplam uzama;

$$\varepsilon_a = [B^A] \{U^A\} = \frac{U_{xJ} - U_{xI}}{L} \quad (2.86)$$

Eşitlik 2.83, bir önceki bölümdeki altı çizili şema kullanılarak sayısal integrasyon yapılır. Lineer olmayan analizde; plastik, büzülme ve şişme uzamaları, kırış boyunca, aynı integrasyon noktalarında olmadığı için lineer bir şekilde interpolate edilir [14].

2.7.1.3.2. Kesme Deplasman Kuvvet Vektörü $\{F_S^{nr}\}$

Kesme deplasmanı içeren kuvvet yük vektöründe $D = G$ kullanılır. Elastik modülü ve uzama vektörü basitçe [10];

$$\varepsilon^{el} = \gamma_s \quad (2.87)$$

Burada, γ_s , elemanda keme kuvvetinden kaynaklı ortalama kesme uzamasını temsil eder.

$$\gamma_s = [B^S] \{U^B\} \quad (2.88)$$

Dolayısıyla yük vektörü;

$$\{F_{nr}^S\} = G A_A \gamma_s \int_L \{B^S\} dx \quad (2.89)$$

2.7.1.3.3. Eksenel Kuvvet Vektörü $\{F_A^{nr}\}$

Eksenel kuvvet vektöründe, eşitlik 2.84'te tanımlanan eksenel elastik uzamanın kullanıldığı ve yük vektör integralinin kısaltıldığı eşitlik aşağıdadır [14];

$$\{F_A^{nr}\} = E \int_L \{B^A\} \left[\int_{area} \varepsilon^{el} d(area) \right] dx \quad (2.90)$$

2.7.1.3.4. Burulma Kuvvet Vektörü $\{F_T^{nr}\}$

Burulma kuvvet yük vektöründe sadece, 3-Boyutlu elemanlarda, D=G olarak kullanılır, bu durumda elastik kesme modülü ve uzama vektörü şu şekilde gösterilebilir;

$$\gamma_T^{el} = \gamma - \gamma^{pl} - \gamma^{cr} \quad (2.91)$$

Toplam burulma kesme uzaması şu şekilde tanımlanır [14],

$$\gamma = \frac{(\theta_{XJ} - \theta_{XI}) p}{L} \quad (2.92)$$

Burada,

θ_{XI}, θ_{XJ} = Sırasıyla I ve J noktaları için $\{u\}$ dan toplam burulma dönmesi.

$$p = \sqrt{y^2 + z^2} \quad (2.93)$$

Yük vektörü ise;

$$\{F_{nr}^T\} = G \int_L \{B^T\} \left[\int_{area} \rho^2 \gamma_T^{el} d(area) \right] dx \quad (2.94)$$

2.7.1.4. Gerilme ve Uzama Hesabı

Elemanın herhangi bir noktasındaki modifiye eksenel uzama şu şekilde tanımlanır;

$$\varepsilon_n' = \phi^a y + \varepsilon^a - \varepsilon_n^{th} - \varepsilon_{n-1}^{pl} - \varepsilon_{n-1}^{sw} \quad (2.95)$$

Uygulanan basınç ve ivmelenen yük vektör terimleri açıklanması için, toplam eğim ve eksenel deformasyon uzamaları onlara göre ayarlanır. Düzeltilmiş eğim ise;

$$\phi^a = \phi - \phi^{pa} \quad (2.96)$$

ϕ^{pa} ise şu şekilde hesaplanır;

$$\phi^{pa} = \frac{M^{pa}}{EI} \quad (2.97)$$

M^{pa} , uygulanan yük vektörleri moment terimlerinden çıkarılır;

$$\{F^{pa}\} = \{F^{pr}\} + \{F^{ac}\} \quad (2.98)$$

$\{F^{pr}\}$ 2-Boyutlu elastik BEAM3 elamanında, $\{F^{ac}\}$ ise Statik analizde verilir. Kullanılan değerler yerel hesap noktalarına bağlıdır;

$$M^{pa} = M_I^{pa} \text{ elemanın "I" ucu} \quad (2.99)$$

$$M^{pa} = \frac{1}{4}(M_I^{pa} - M_J^{pa}) \text{ elemanın ortası} \quad (2.100)$$

$$M^{pa} = M_J^{pa} \text{ elemanın "J" ucu} \quad (2.101)$$

Düzeltilmiş eksenel deformasyon uzaması;

$$\varepsilon^a = \varepsilon - \varepsilon^{pa} \quad (2.102)$$

ε^{pa} , aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır;

$$\varepsilon^{pa} = \frac{F_x^{pa}}{EA} \quad (2.103)$$

Burada F_x^{pa} aynı tarzda hesaplanarak M^{pa} Değeri bulunur. Eşitlik 2.102 kullanılarak, değiştirilmiş toplam uzamadan, plastik uzama artışı hesaplanabilir, elastik uzama çıkartılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilmiş olur;

$$\varepsilon^{el} = \varepsilon' - \Delta\varepsilon^{pl} \quad (2.104)$$

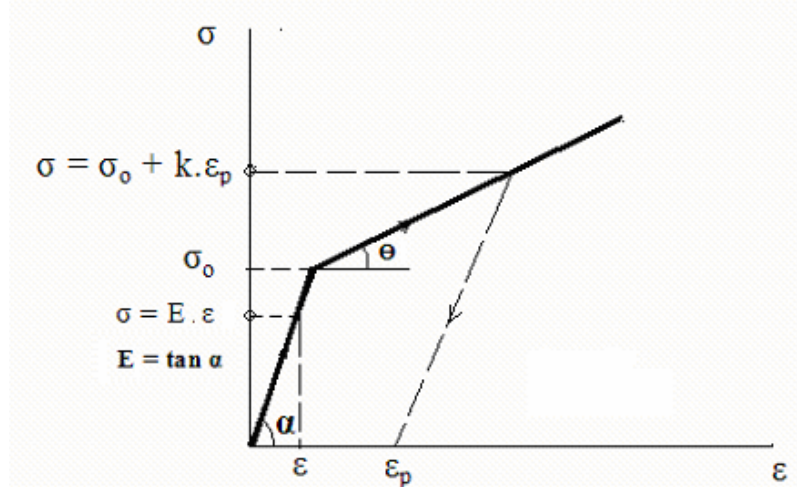
Bu noktadaki gerilme artışı ise;

$$\sigma = E\varepsilon^{el} \quad (2.105)$$

şeklinde hesaplanır [14].

2.7.2. Bilineer Kinematik Pekleşme (BKIN)

Tüm doğrultularda özellikleri aynı olan malzemelere izotropik malzemeler denir. Elasto-Plastik malzemelerde elastik bölgenin yanı sıra kalıcı deformasyonun olduğu plastik bölgede mevcuttur. Yükleme sırasında bir noktadaki gerilme akma gerilmesini aşarsa bu nokta plastik bölgeye girmiştir ve kalıcı deformasyon oluşur. Yük plastik bölgede iken kaldırılırsa malzeme ilk şekline dönmez. Eğer plastik bölge bir eğri şeklindeyse Multilinear, doğru şeklindeyse Bilinear malzeme özelliği mevcuttur [16].



Şekil 2.17:Bilineer kinematik pekleşmeye ait gerilme-akma grafiği

ANSYS'teki Bilineer Kinematik Pekleşme seçeneği, Bauschinger etkisi göz önüne alındığı için toplam akma stresinin iki katı kadar olduğu farz edilerek hesaplamalar yapılır. Bilineer Kinematik Pekleşme, çoğu metali kapsayan, Von Misses Akma Kriterini sağlar. Bilineer toplam gerilme - toplam akma uzaması eğrisi orijinden başlar ve pozitif gerilme ve akma değerine ulaşır. Özelleştirilmiş bir akma gerilmesinde C1'de, eğri, tanjant modülü olarak tanımlanan ikinci eğri boyunca devam eder, C2 (elastik modülle aynı birime sahip). Tanjant modülü sıfırdan küçük ve elastik modülden büyük olamaz [14].

Gerilme - akma tablosunda TB,BKIN ile bunu başlatabiliriz. Her bir gerilme – akma eğrisinde, TBTEMP komutu ile sıcaklık da belirlenir ve C1 ve C2 dataları belirlenir. TB komutunda, en fazla altı tane sıcaklığa bağlı akma – gerilme eğrisi belirlenir. Bu şekilde C1 ve C2 sabitleri belirlenir [10].

Sabit

C1

C2

Anlamı

Akma gerilmesi (Kuvvet/Alan)

Tanjant Modülü (Kuvvet/Alan)

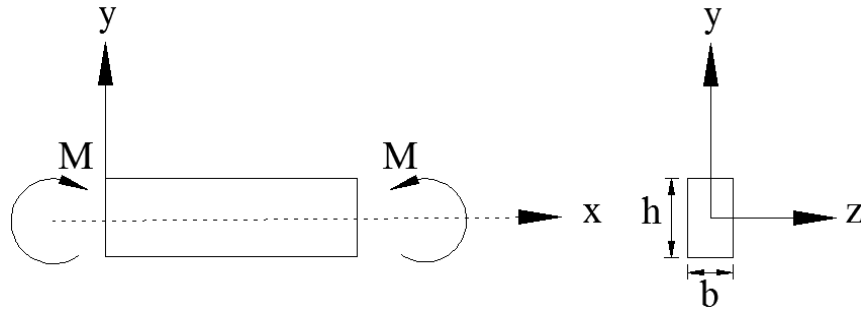
3. BULGULAR

3.1. Plastik Analizle İlgili Sayısal İlk Örnek VM24 Tek Açıklıklı Basit Kiriş

Bu örneğin incelenmesindeki amaç ANSYS paket programının çelik çerçevelerde elasto-plastik analize bakışını anlayıp, eksik taraflarını yorumlayıp geliştirmek. Bu örnekte ANSYS paket programının içinde bulunan VM24 eğitim modülü incelenmiştir.

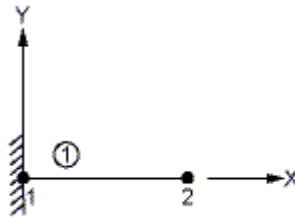
3.1.1. Sistemin Tasarımı ve Sistem Hakkında Genel Bilgiler

Bu problemdeki boyutlandırmalar İngiliz birim sistemine göre yapılmıştır. Sistem 2 tane nodla tanımlanmış basit bir kirişi içermektedir. Bu kirişe ait genel kesit aşağıda gösterilmiştir.



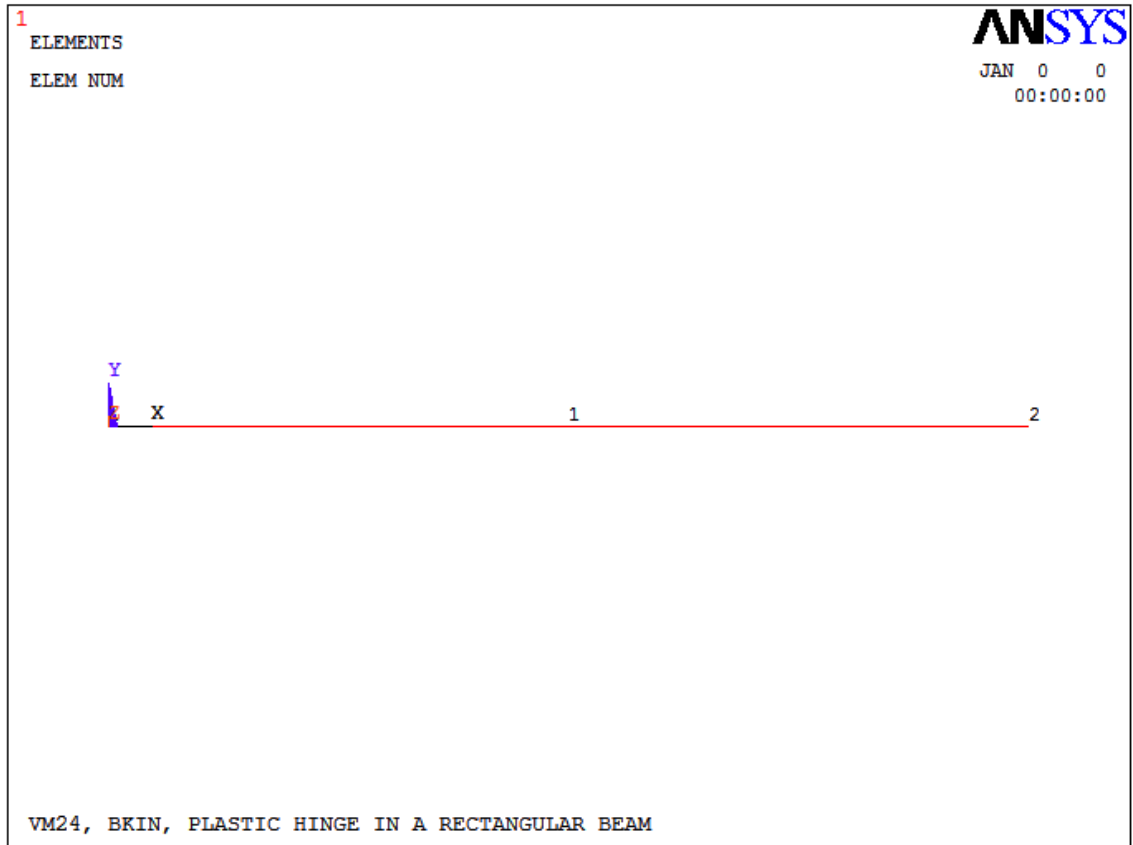
Şekil 3.1: VM24 problemine ait şekilsel gösterim

Bu probleme ait ANSYS tasarım geometrisine göre gösterim ise şu şekildedir;



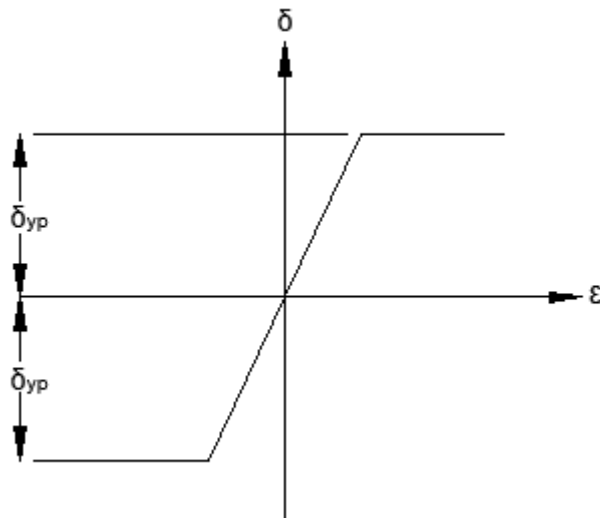
Şekil 3.2: Probleme ait kirişin sonlu elemanlar modeli

Sistem ANSYS'te şu şekilde görünmektedir;



Şekil 3.3: VM24 sistemine ait eleman ve nodların ANSYS'te görünüşü

Bu problemde Bilineer kinematik pekleşme kullanılmıştır, tanjant modülü ise sıfır alınmıştır, dolayısıyla akma gerilmesi sabit olup momentin artması durumunda da değişmemiştir. Bur duruma ait akma-gerilme grafiği ise şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Tanjant modülü sıfır ideal elasto-plastik malzemeye ait akma gerilme grafiği

Bu kirişe ait mühendislik parametreleri de şu şekilde sıralanmıştır;
 $E=30 \times 10^6$ psi, $\nu=0.3$, $b=1$ in, $h=2$ in, $\sigma_{yp}=36000$ psi

$$I_{zz} = \frac{1}{12} * b * h^3 = \frac{1}{12} * 1 * 2^3 = 0.667 \text{ in}^4$$

$$M = M_{ult} = \lambda * M_{yp} = 1.5 * M_{yp}$$

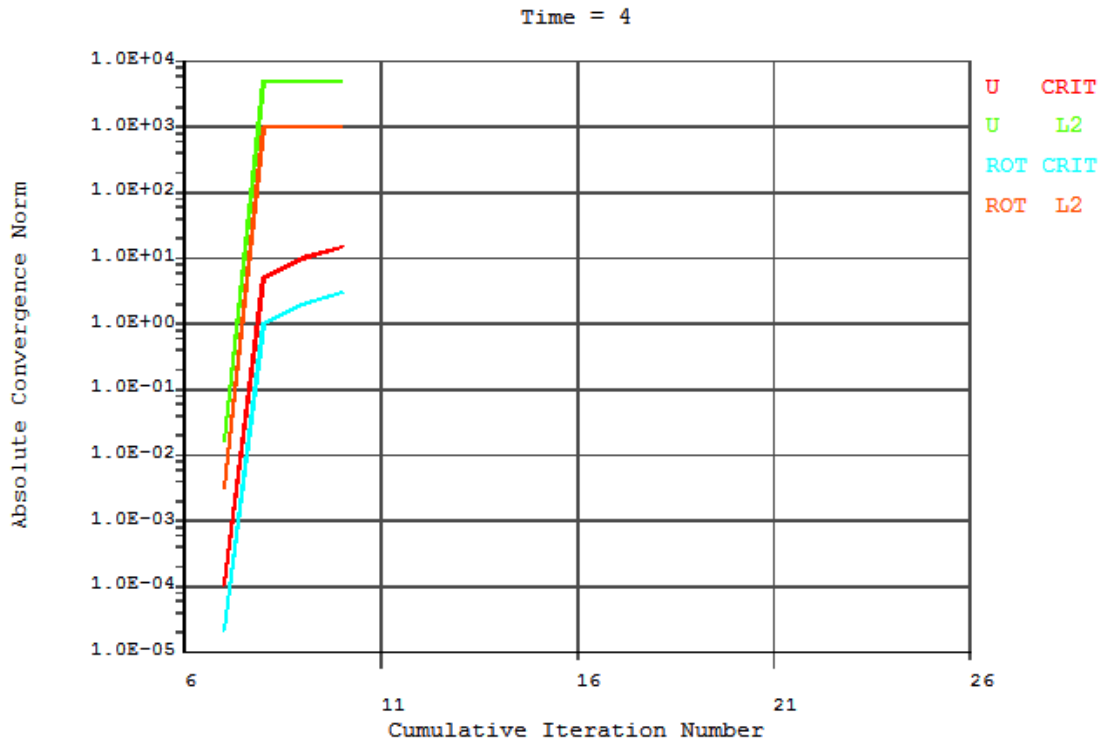
Bu örnekte kirişe ait tam plastik mafsalsal momenti hesaplanmış olup, programda yükleme de buna göre yapılmıştır. Önce yük parametresi $\lambda=1$ 'e eşitlenmiştir, daha sonra şekil katsayısı olan 1.5'e kadar yükleme yapılmıştır.

$$M_{yp} = \sigma_{yp} * \frac{b * h * h}{6} = 36000 * \frac{1 * 2 * 2}{6} = 24000 \text{ in-ib}$$

Tablo 3.1: İlk örnekte her bir iterasyona ait akma ve tam plastik moment değerleri

λ	M_p (in-ib)	M_y (in-ib)	Hedef
1.0	24000	24000	Tam elastik
1.1666	28000	24000	Elastik-plastik
1.3333	32000	24000	Elastik-plastik
1.5	36000	24000	Tam plastik

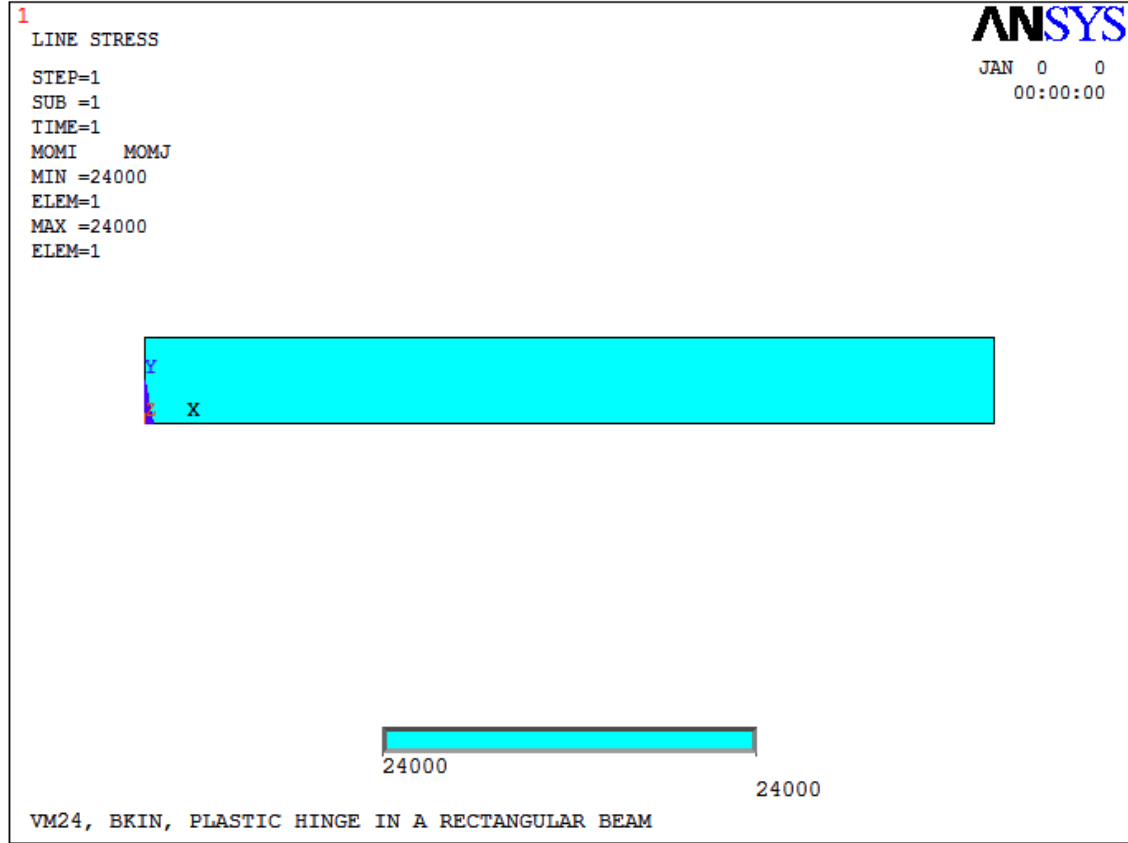
Sistem analiz yaparken kontrollü komutlarla analizi gerçekleştirdiği için, dört adımda yakınsama yapıp, kiriş göçmeden çözümü bitirmiştir. Yakınsama grafiği şu şekildedir;



Şekil 3.5: VM24 basit kiriş örneğine ait 4. iterasyonun sonundaki yakınsama grafiği

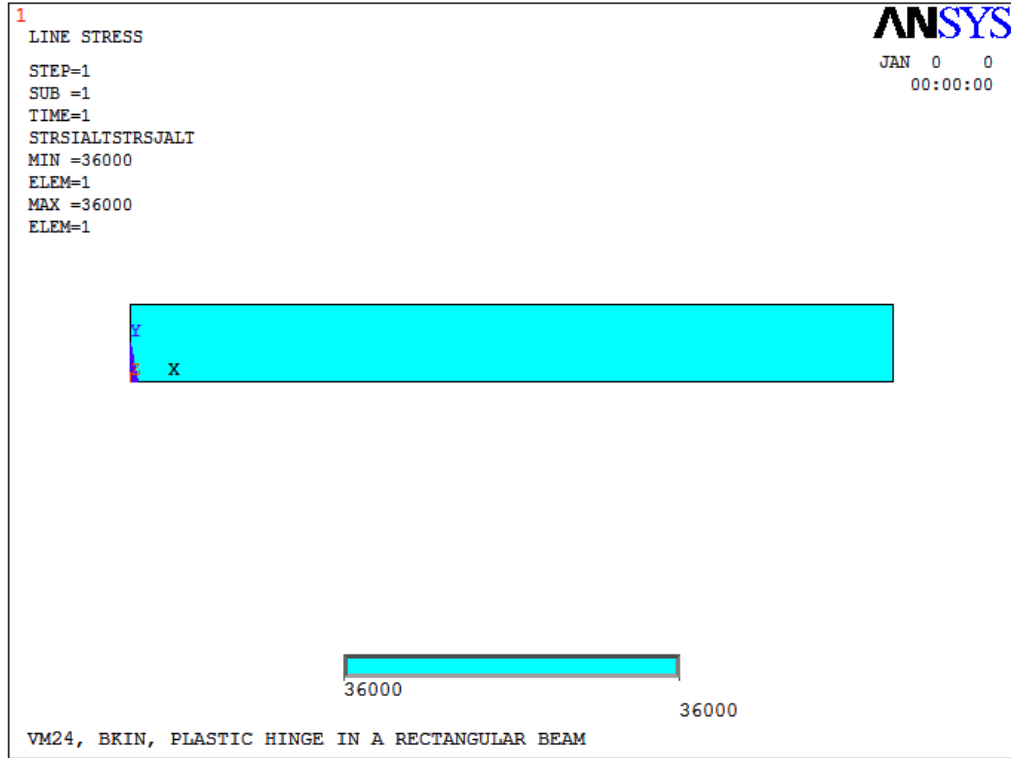
3.1.2. $\lambda=1$ Durumuna Göre Analiz Sonuçları

Sistemdeki ilk iterasyon $\lambda=1$ parametresinde yapılmıştır, plastik moment $M_p=24000$ in-ib'dir ve moment grafiği şu şekilde görülmektedir;



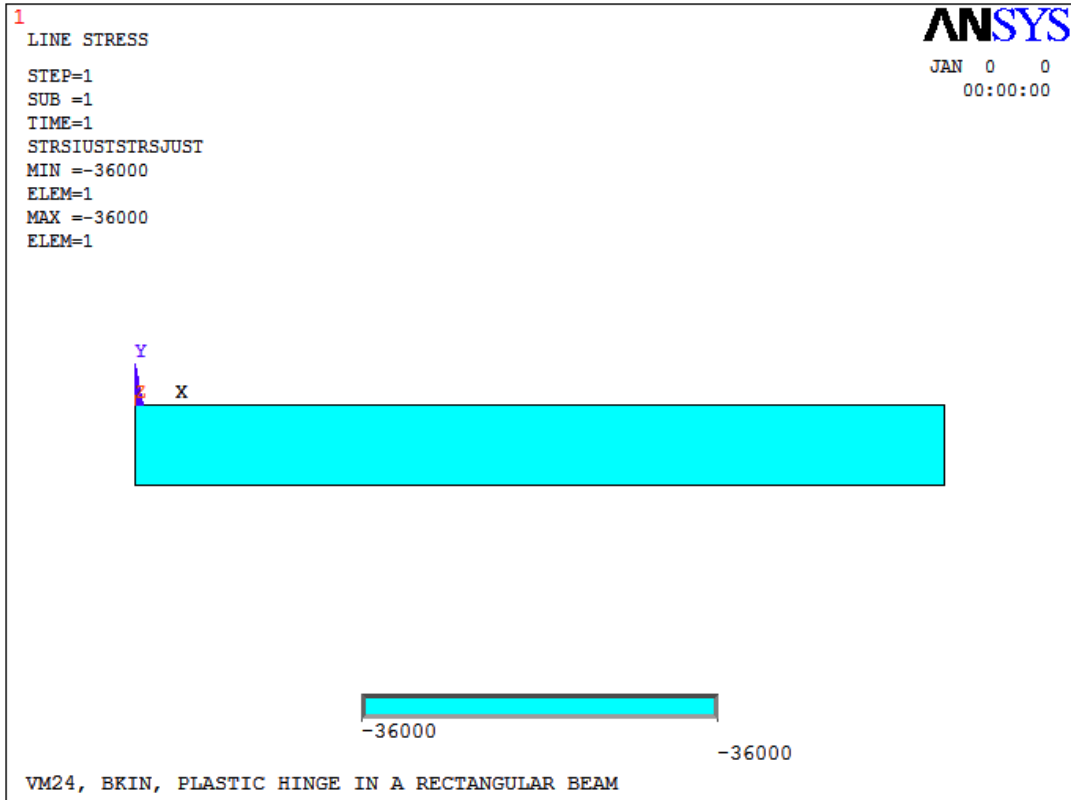
Şekil 3.6: $\lambda=1$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait moment grafiği

Bu iterasyona ait gerilme grafikleri elemanın alt ve üst integrasyon noktalarına ait iki tanedir. Alt integrasyon noktasına göre çizilmiş olan grafik şu şekildedir,



Şekil 3.7: $\lambda=1$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait alt integrasyon noktasına ait gerilme grafiği

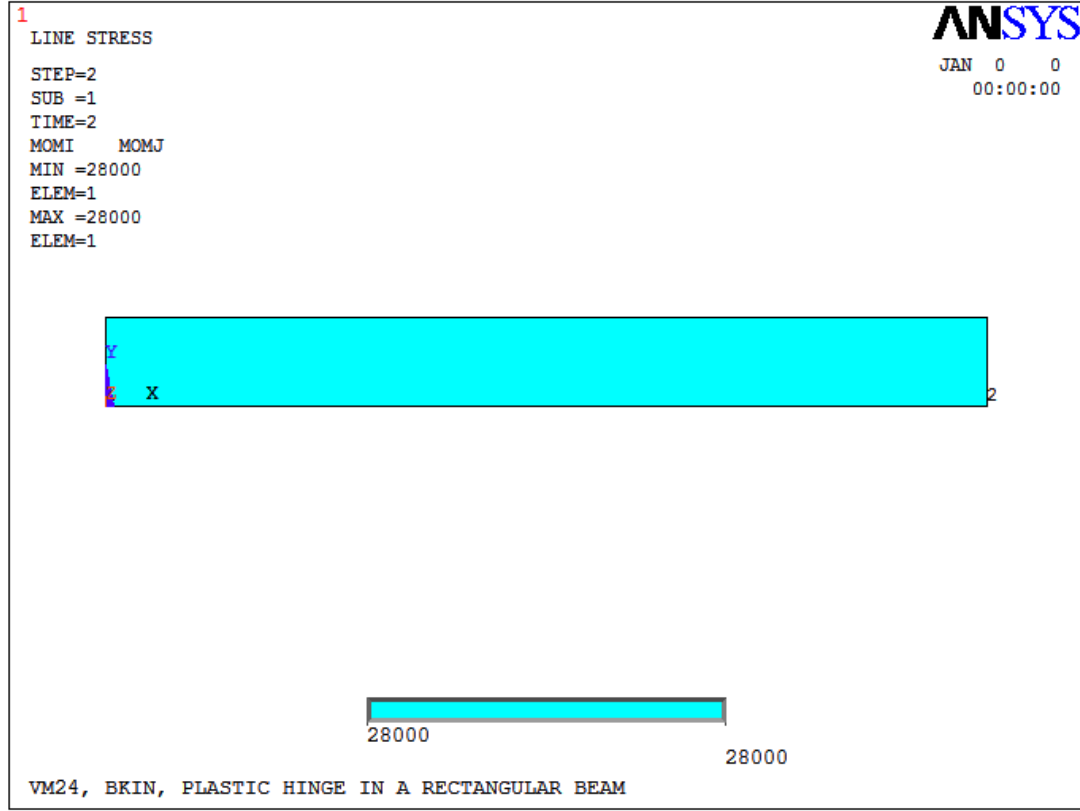
Üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği ise;



Şekil 3.8: $\lambda=1$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği

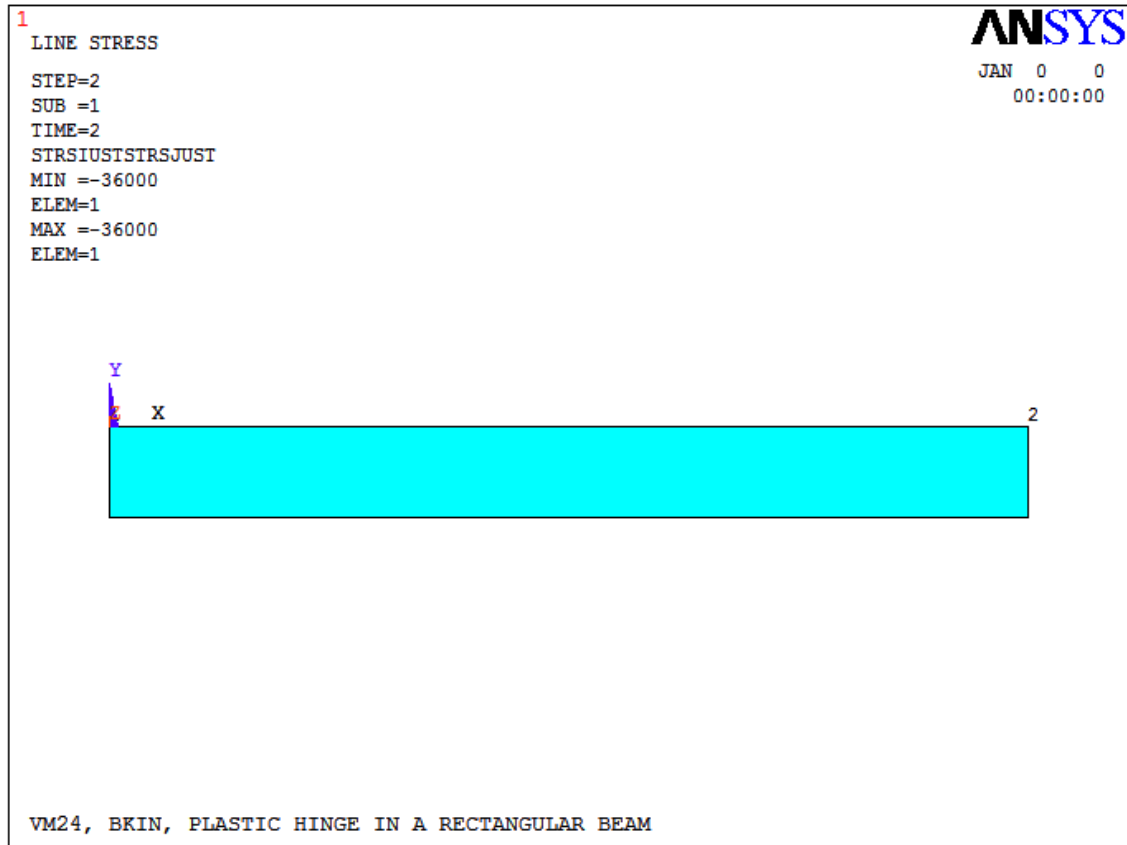
3.1.3. $\lambda=2$ Durumuna Göre Analiz Sonuçları

Sistemdeki ikinci iterasyon $\lambda=2$ parametresinde yapılmıştır, plastik moment $M_p=28000$ in-ib'dir ve moment grafiği şu şekilde görülmektedir;



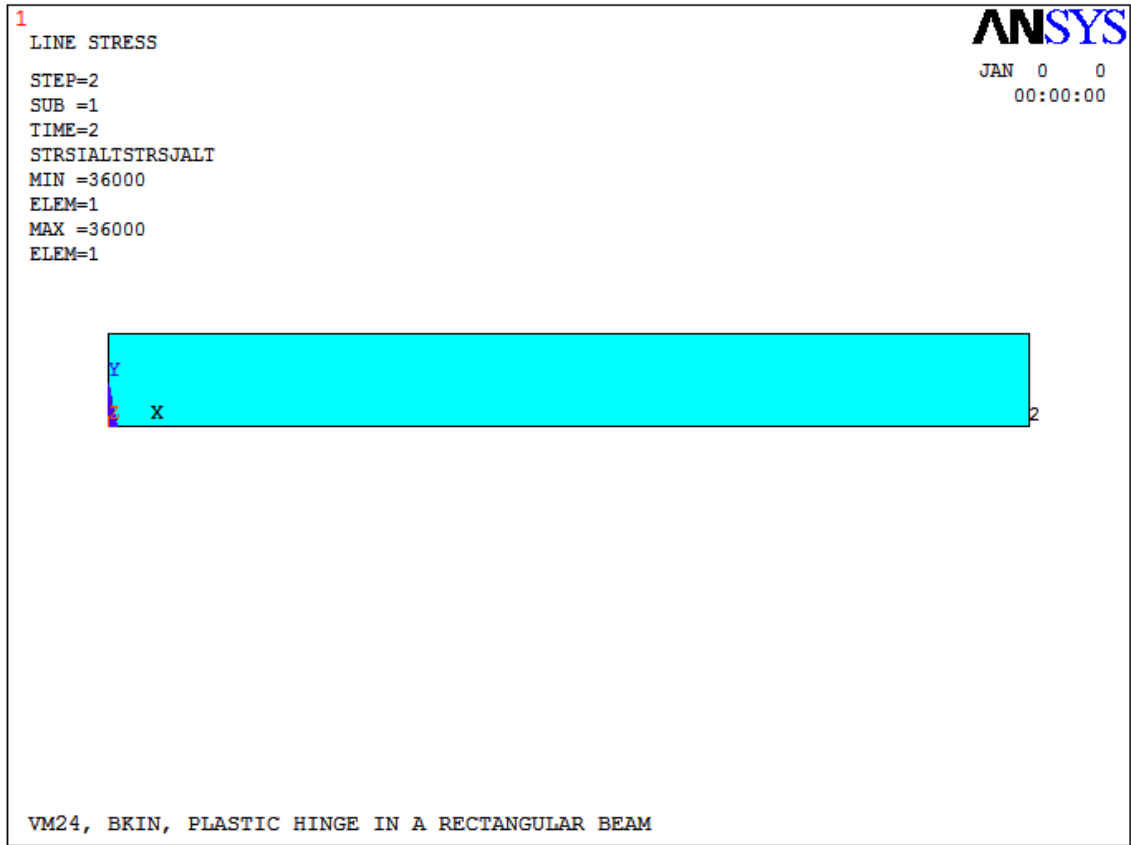
Şekil 3.9: $\lambda=2$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait moment grafiği

Üst integrasyon noktasına göre gerilme grafiği;



Şekil 3.10: $\lambda=2$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği

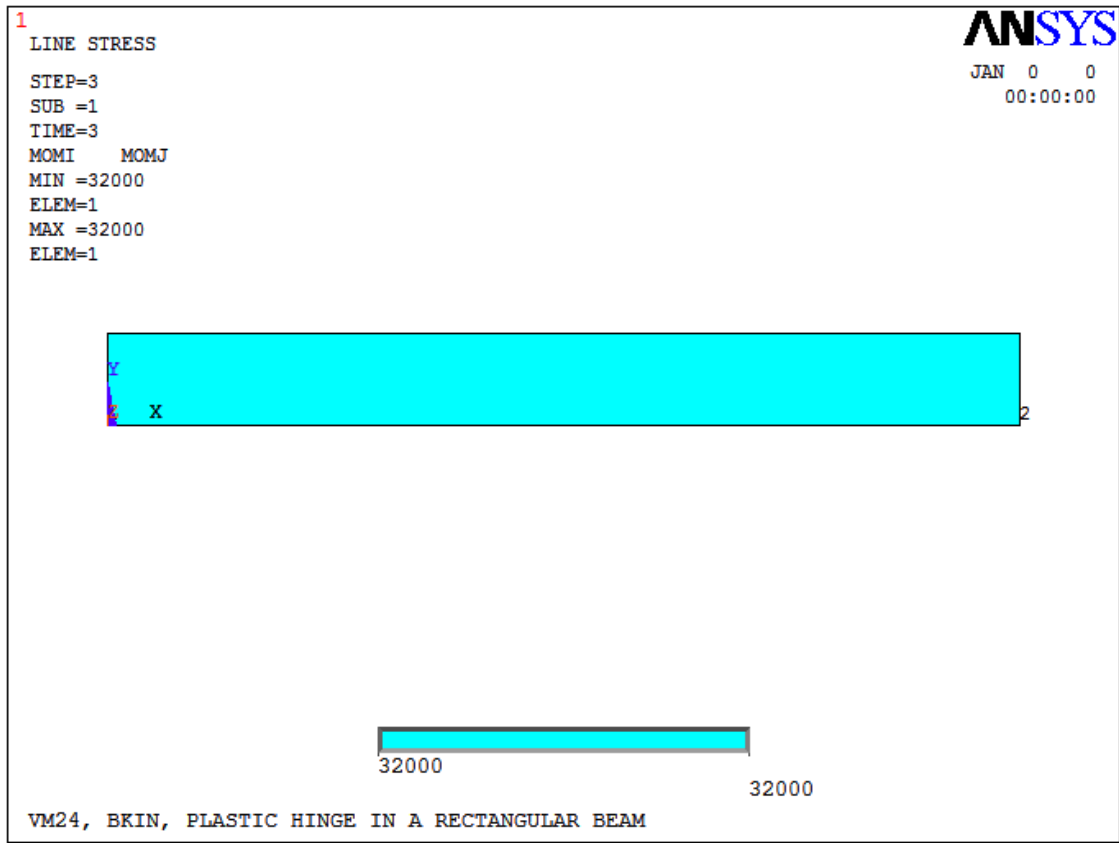
Alt integrasyon noktasına göre gerilme grafiği;



Şekil 3.11: $\lambda=2$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait alt integrasyon noktasına ait gerilme grafiği

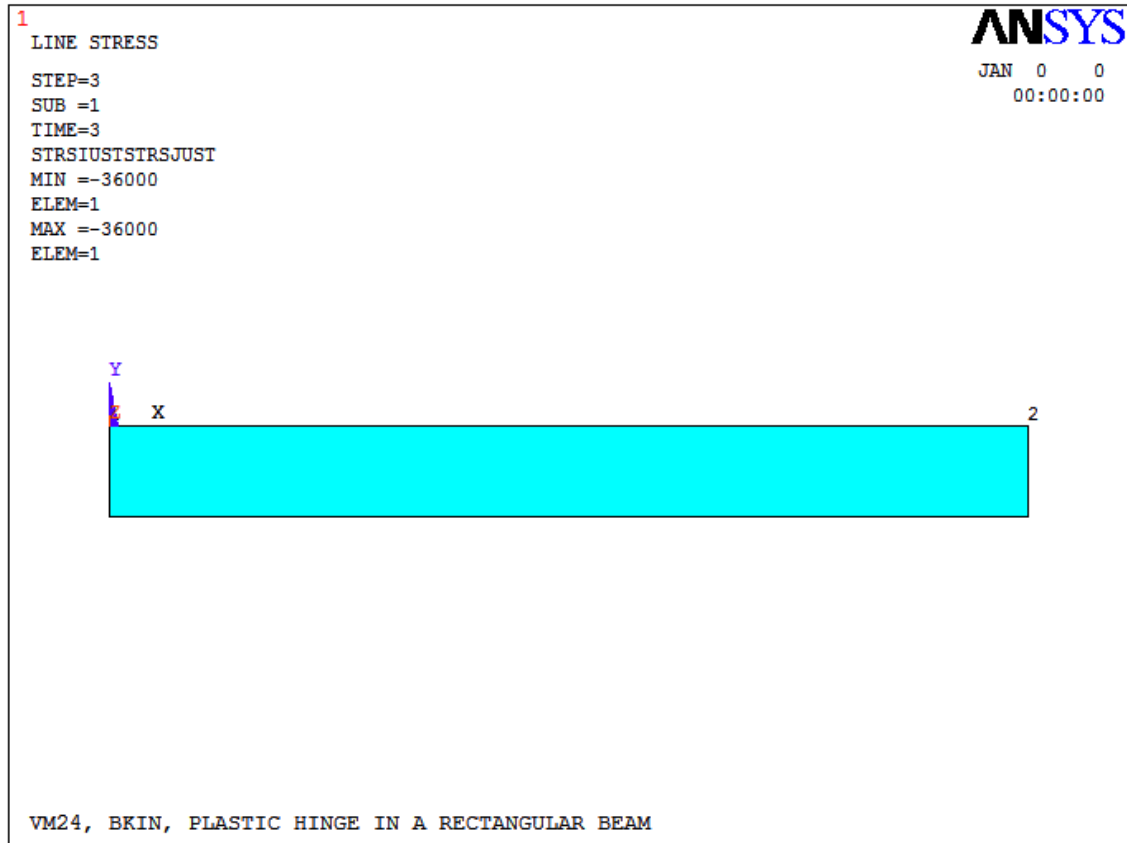
3.1.4. $\lambda=3$ Durumuna Göre Analiz Sonuçları

Sistemdeki ikinci iterasyon $\lambda=3$ parametresinde yapılmıştır, plastik moment $M_p=32000$ in-ib'dir ve moment grafiği şu şekilde görülmektedir;



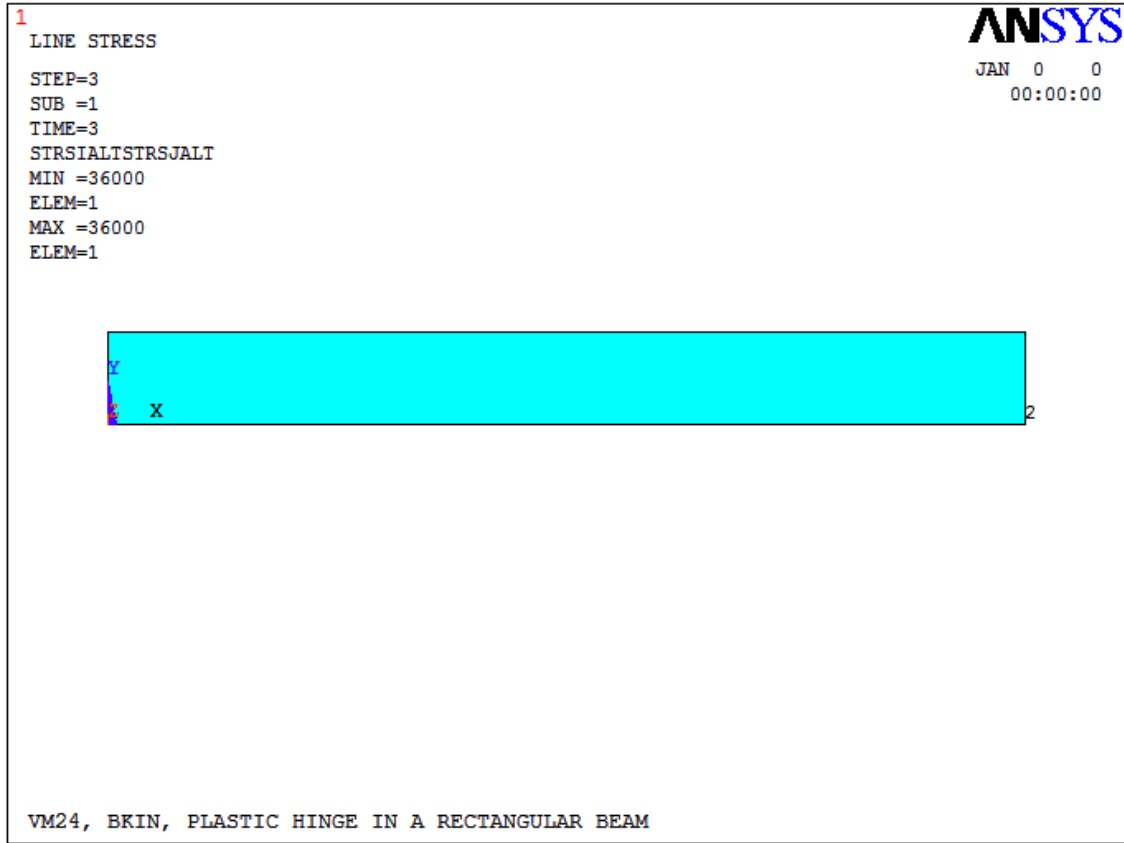
Şekil 3.12: $\lambda=3$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait moment grafiği

Üst integrasyon noktasına göre gerilme grafiği;



Şekil 3.13: $\lambda=3$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği

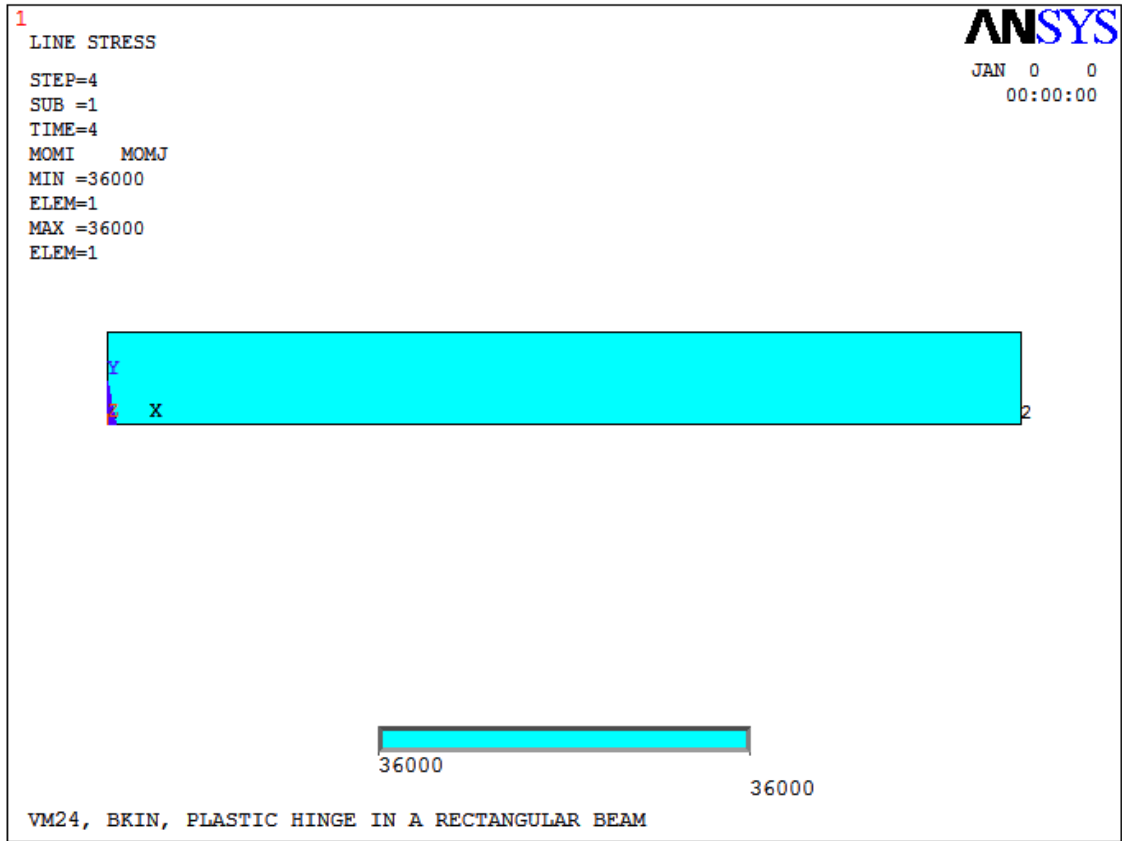
Alt integrasyon noktasına göre gerilme grafiği;



Şekil 3.14: $\lambda=3$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait alt integrasyon noktasına ait gerilme grafiği

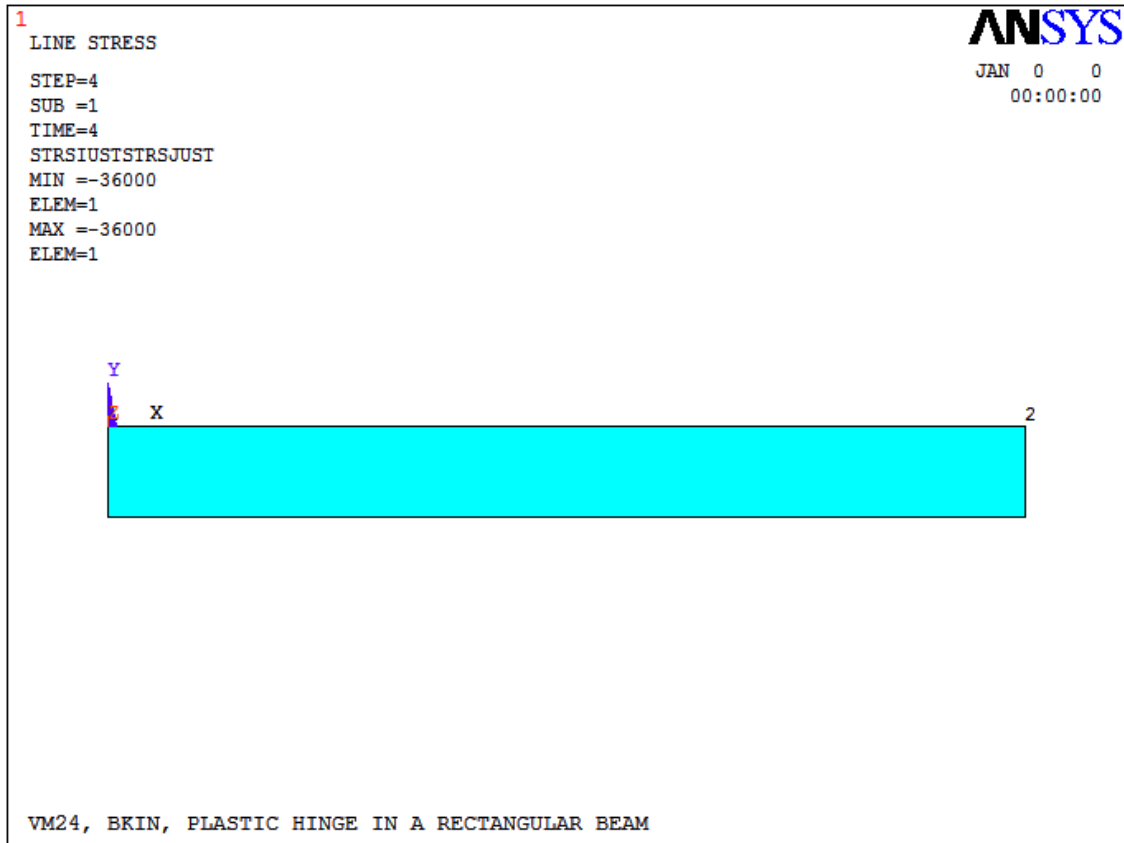
3.1.5. $\lambda=4$ Durumuna Göre Analiz Sonuçları

Sistemdeki ikinci iterasyon $\lambda=4$ parametresinde yapılmıştır, plastik moment $M_p=36000$ in-ib'dir ve moment grafiği şu şekilde görülmektedir;



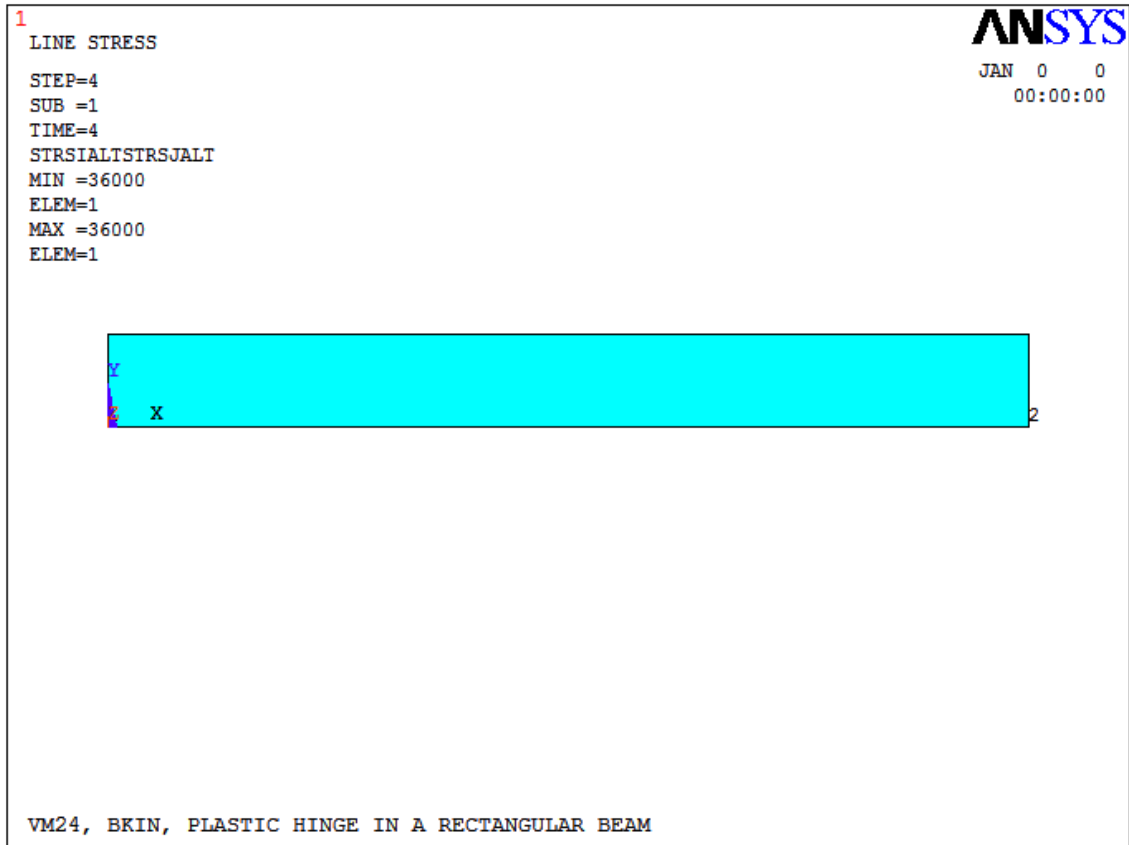
Şekil 3.15: $\lambda=4$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait moment grafiği

Üst integrasyon noktasına göre gerilme grafiği;



Şekil 3.16: $\lambda=4$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait üst integrasyon noktasına ait gerilme grafiği

Alt integrasyon noktasına göre gerilme grafiği;



Şekil 3.17: $\lambda=4$ iterasyonunda VM24 basit kirişine ait alt integrasyon noktasına ait gerilme grafiği

Grafiklerden de görüldüğü gibi sistemin analizi esnasında ve sonrasında herhangi bir şekilde kiriş üzerinde plastik mafsalların oluştuğu noktalar fark edilmemektedir. Sistem analizi için yazılan kodlarda sistem tek bir eleman şeklinde tasarlanmış, önceden mafsal noktaları herhangi bir şekilde öngörülmemiştir aynı zamanda. ANSYS programının VM24 eğitim modülünde plastik mafsal analizi, programa herhangi bir katkı olmadan yapılması çok katlı sistemlerde, sistemin limit yükünün bulunması ve tam plastik momentin bulunması bu örnekten de anlaşılacağı gibi mümkün değildir.

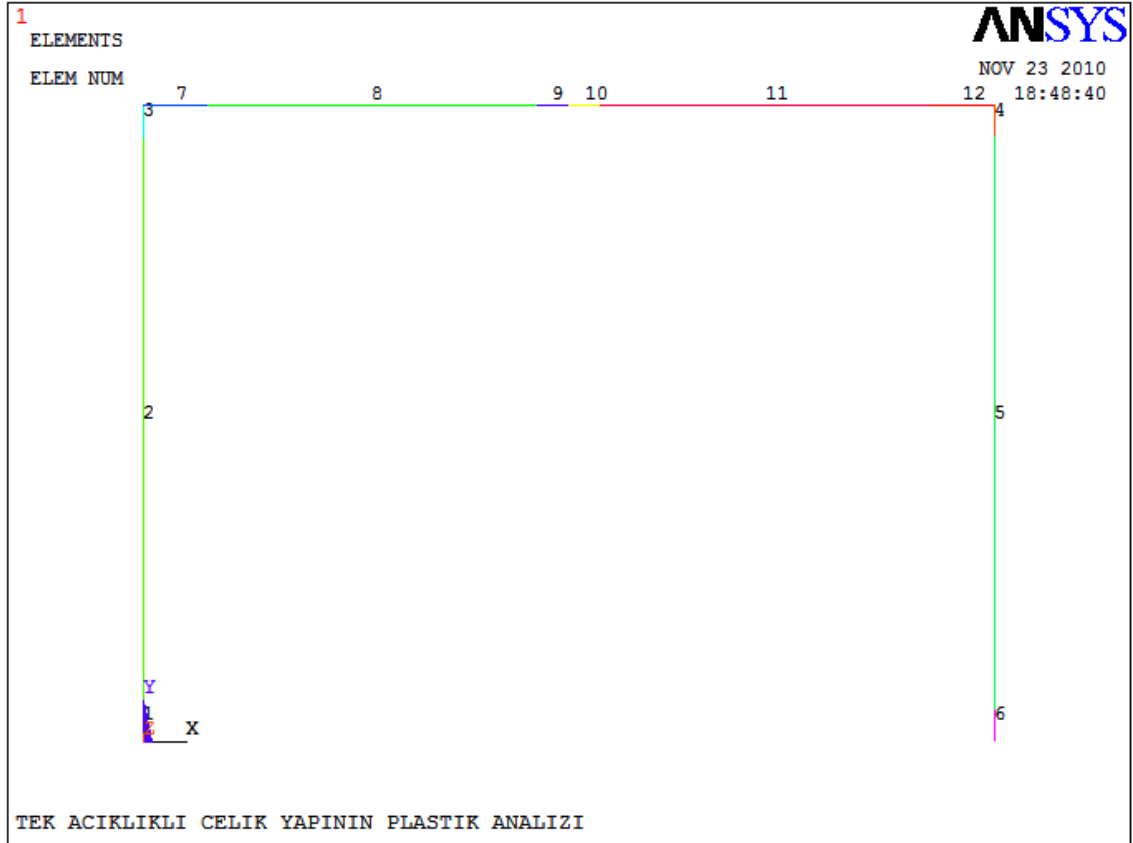
3.2. Plastik Analizle İlgili İkinci Örnek Tek Katlı Tek Açıklık Çelik Çerçeve

3.2.1. Sistemin Tasarımı ve Sistem Hakkında Genel Bilgiler

Bu örnekte ise tek katlı tek açıklık bir çerçevenin tasarımı ve plastik analizi yapılmış olup, bu sistem “Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış

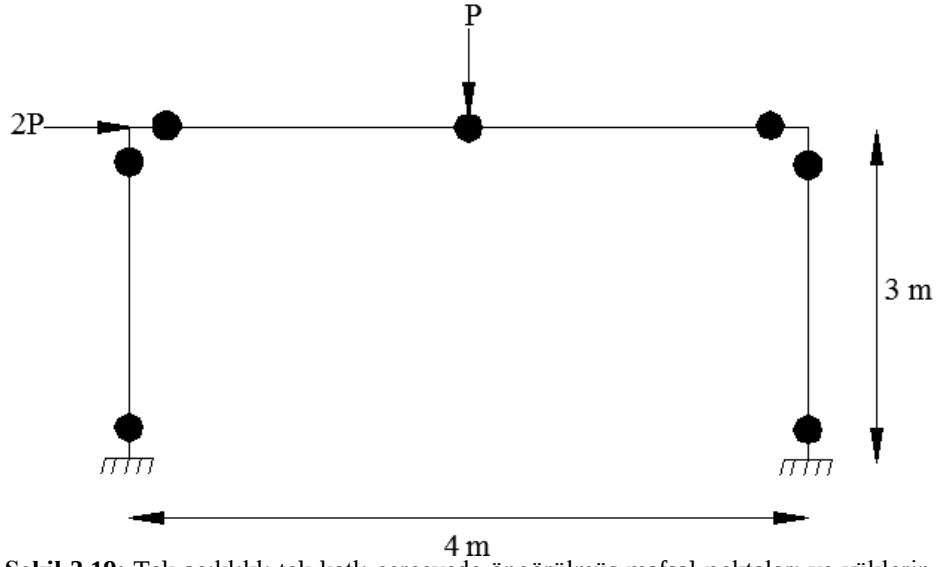
ve Çözümleme” kitabından alınmış, bu sistem ANSYS paket programı ile analiz edilmiş ve elle yapılan çözümleme ile kıyaslanmıştır.

Bu sistem tasarımında 12 tane eleman ve 10 tane düğüm noktası kullanılmıştır. Sistemde plastik mafsalların yerleri önceden tahmin edilmiş; kolon ve kirişlerde bu yer eleman derinliğinin yarısı kadar mesafede öngörülmüştür. Sistem tasarımının genel görünümü şu şekildedir,



Şekil 3.18: Tek açıklıklı tek katlı çerçevenin eleman numaraları

Plastik mafsal noktaları bu analiz için aşağıdaki gibi öngörülmüş ve yerleri belirlenmiştir.

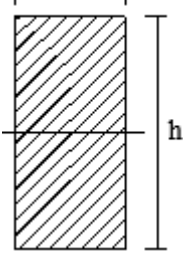
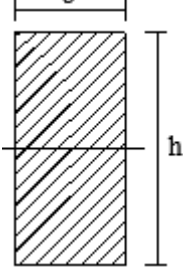


Şekil 3.19: Tek açıklıklı tek katlı çerçevede öngörölmüş mafsallı noktaları ve yüklerin uygulama noktaları



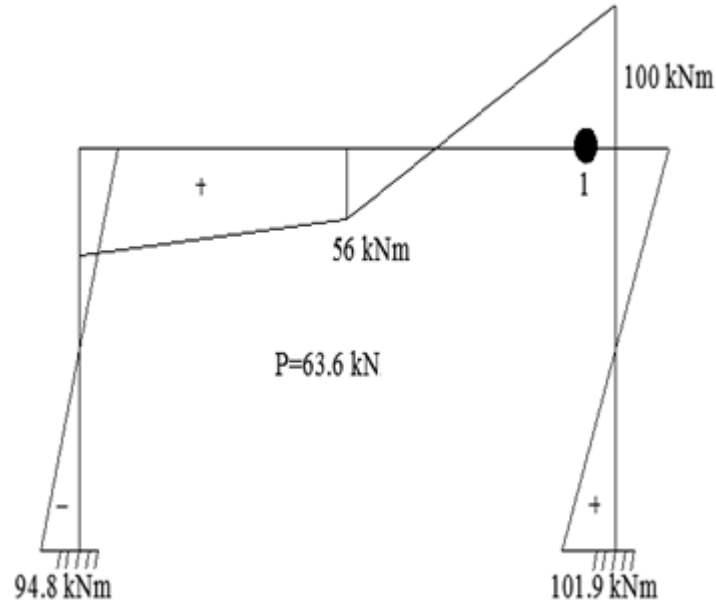
Şekil 3.20: Tek katlı tek açıklıklı çerçevenin 3-boyutlu görüntüsü

Tablo 3.2: Tek katlı tek açıklıklı çerçeveye ait bilgiler

Kesit Özellikleri	Özellik Adı	b (m)	h (m)
Kolonlar 	Kolon Boyutları	0.3	0.6
	Eleman Numaraları	1,2,3,4,5,6	
	Akma Gerilmesi	24000 kN/m ²	
	Elastik Modülü	3x10 ¹⁰ kN/m ²	
	Poisson Oranı	0.3	
	Tam Plastik Moment	150 kNm	
Kirişler 	Kiriş Boyutları	0.3	0.3
	Eleman Numaraları	7,8,9,10,11,12	
	Akma Gerilmesi	24000 kN/m ²	
	Elastik Modülü	3x10 ¹⁰ kN/m ²	
	Poisson Oranı	0.3	
	Tam Plastik Moment	100 kNm	

3.2.2. P=63.6 kN Kuvvet Değerindeki Analiz Değerleri

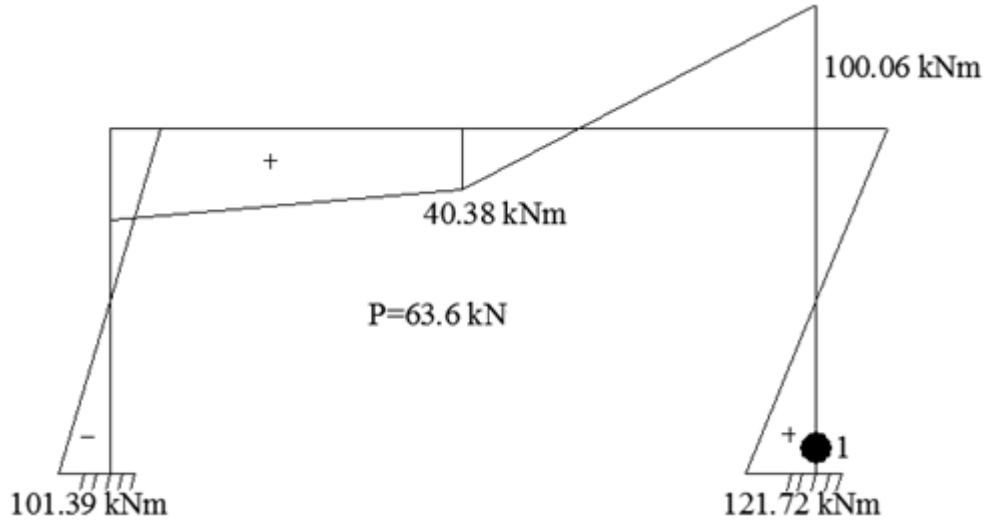
Tasarımı yapılmış olan bu çerçeve için elle yapılan denemelerde ilk plastik mafsalsın olduğu kuvvet P=63.6 kN olarak hesaplanmış, Zekai CELEP'in moment hesaplarına göre yeri ise şekildeki gibi belirlenmiştir.

**Şekil 3.21:** P=63.6 kN'a göre ilk plastik mafsalsın yeri [11]

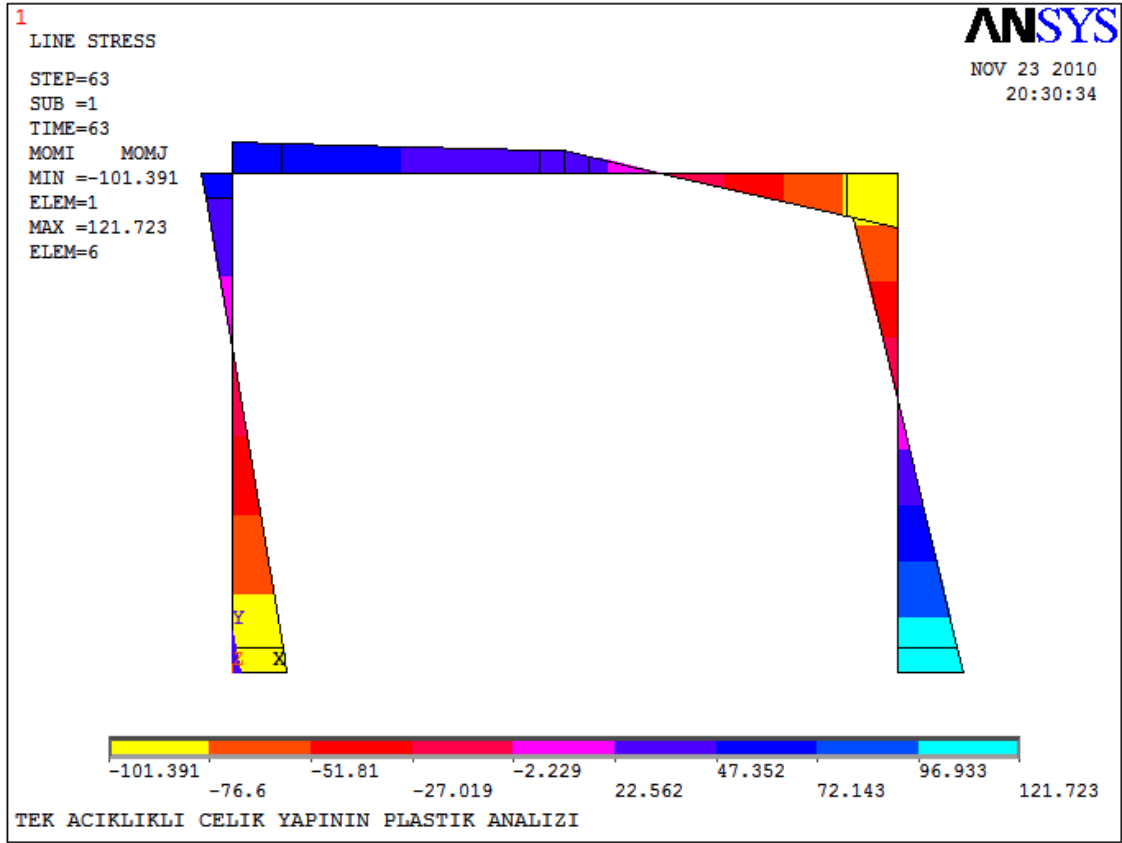
$P=63.6$ kN'a uygulandığında ANSYS'te yapılmış analiz sonuçlarına göre ise, aslında kirişte yine 10 nolu nodda 100.06 kNm ile plastik mafsal moment değerine ulaşılmış olsa bile akma gerilmesine ait değerden de anlaşılacağı gibi aslında mafsallaşma 12 nolu nodda oluşmuştur ve şekil 3.21'deki gibidir. Bu kuvvet parametresindeki moment ve akma gerilmesi değerleri tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3: $P=63.6$ kN kuvvet değerinde ANSYS'te elemanlarda oluşan moment ve gerilme değerleri

ELEMAN NO	MOMENT I	MOMENT J	AKMA GERİLME Sİ I ALT	AKMA GERİLME Sİ I ÜST	AKMA GERİLME Sİ J ALT	AKMA GERİLME Sİ J ÜST
1	-101.39	-93.58	-22451	22611	-20715	20876
2	-93.58	47.015	-20715	20876	10528	10368
3	47.015	54.826	10528	-10368	10264	12103
4	-100.06	88.97	-23016	21455	-20552	18991
5	-88.97	110.63	-20646	19027	24000	-24000
6	110.63	121.72	24000	-24000	24000	-24000
7	54.826	52.66	11362	-13005	10881	-12524
8	52.66	41.466	10881	-12524	8393	-10036
9	41.466	40.383	8393	-10036	8152	-9795
10	40.383	29.85	8152	-9795	5811	7454
11	29.85	-78.994	5811	-7454	-18376	16733
12	-78.994	-100.06	-18376	16733	-23057	21414



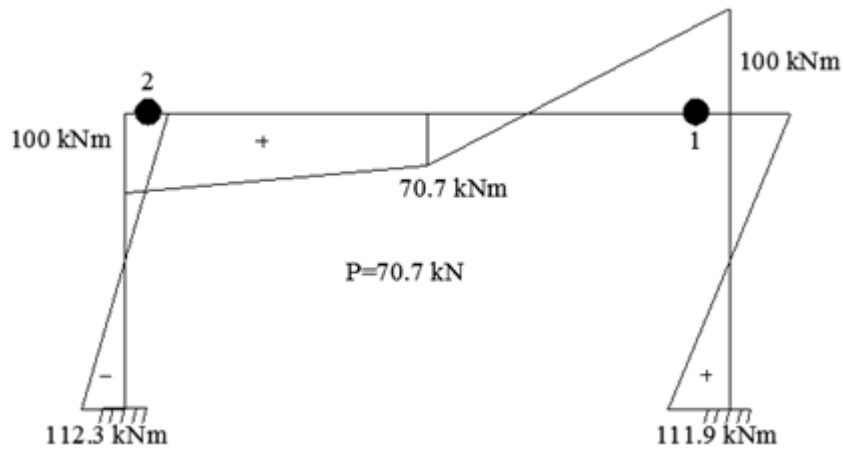
Şekil 3.22: ANSYS'teki analize göre $P=63.6$ kN kuvvet değerinde mafsallar



Şekil 3.23: $P=63.6$ kN kuvvet değerinde çelik çerçevenin moment değerlerinin ANSYS'teki moment grafiği

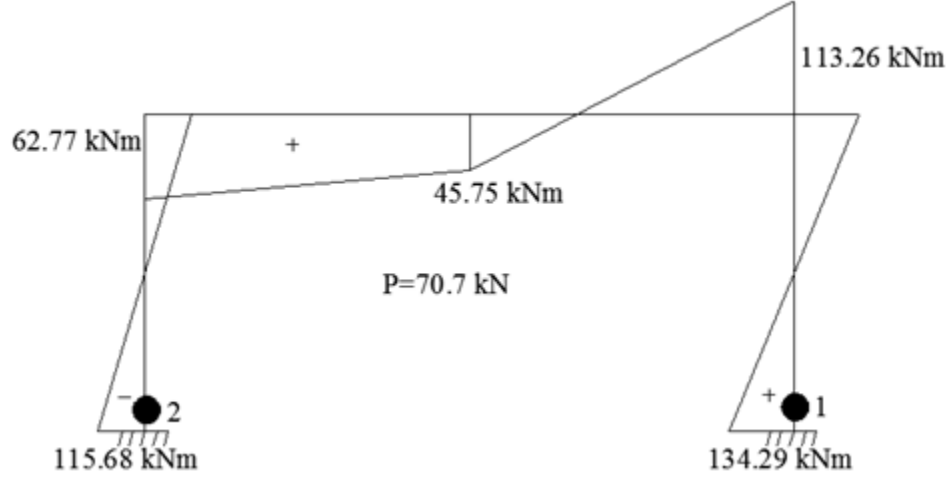
3.2.3. $P=70.7$ kN Kuvvet Değerindeki Analiz Değerleri

$P=70.7$ kN kuvvet değerinde elle yapılmış olan hesaplama göre ikinci plastik mafsallı kirişin "T" ucunda oluşmuş ve aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

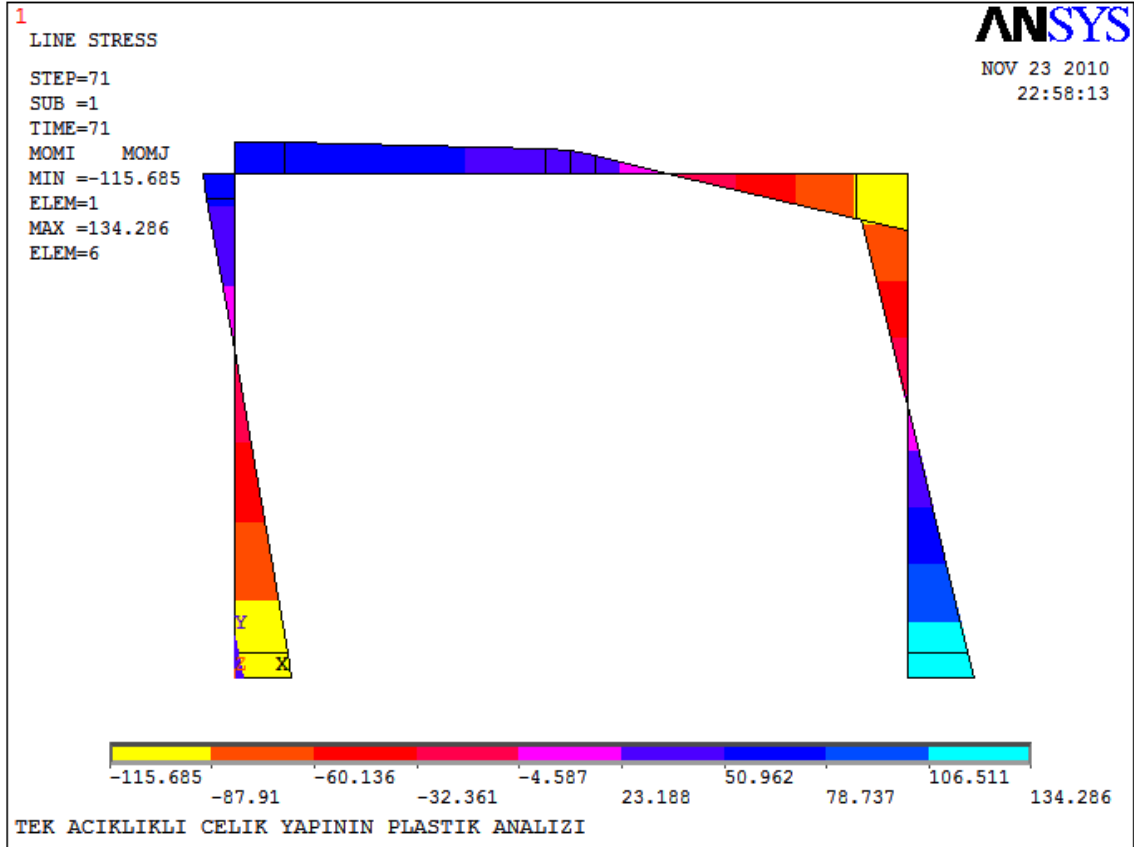


Şekil 3.24: $P=70.7$ kN'da elle hesaba göre ikinci plastik mafsallı yer [11]

ANSYS'teki analize göre ise, 2. mafsal 1 numaralı elemanda mafsallaşmış olup moment değerleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 3.25: ANSYS'teki analize göre $P=70.7$ kN kuvvet değerinde mafsallar



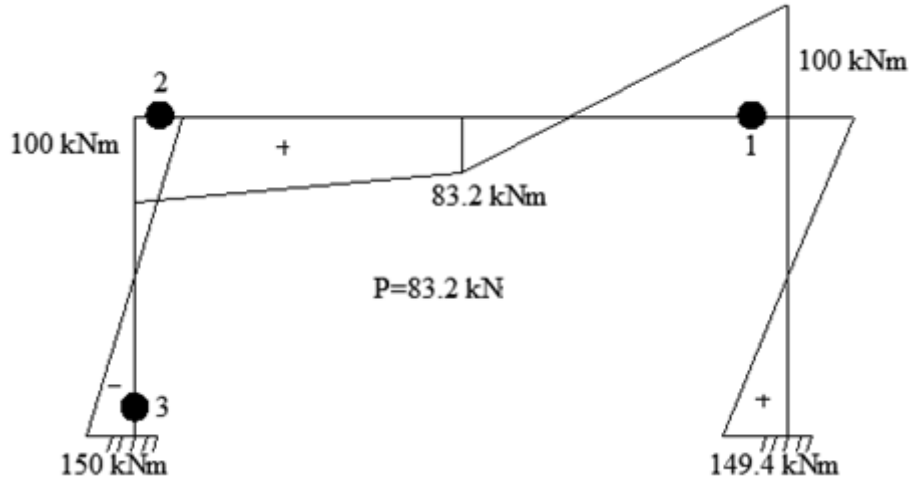
Şekil 3.26: $P=70.7$ kN kuvvet değerinde çelik çerçevenin moment değerlerinin ANSYS'teki moment grafiği

Tablo 3.4: P=70.7 kN kuvvet değerinde ANSYS'te elemanlarda oluşan moment ve gerilme değerleri

ELEMAN NO	MOMENT I	MOMENT J	AKMA GERİLME Sİ I ALT	AKMA GERİLME Sİ I ÜST	AKMA GERİLME Sİ J ALT	AKMA GERİLME Sİ J ÜST
1	-115.68	-106.76	-24000	24000	-23599	23806
2	-106.76	53.847	-23630	23819	12061	-11871
3	53.847	62.77	12061	-11871	14043	-13854
4	-113.26	-100.88	-24000	24000	-23300	21413
5	-100.88	121.91	-23681	21848	24000	-24000
6	121.91	134.29	24000	-24000	24000	-24000
7	62.77	60.218	13032	-14866	12465	-14299
8	60.218	47.031	12465	-14299	9534	-11368
9	47.031	45.755	9534	-11368	9251	-11085
10	45.755	33.829	9251	-11085	6600	-8434
11	33.829	-89.407	6600	-8434	-20785	18951
12	-89.407	-113.26	-20689	18786	-24000	24000

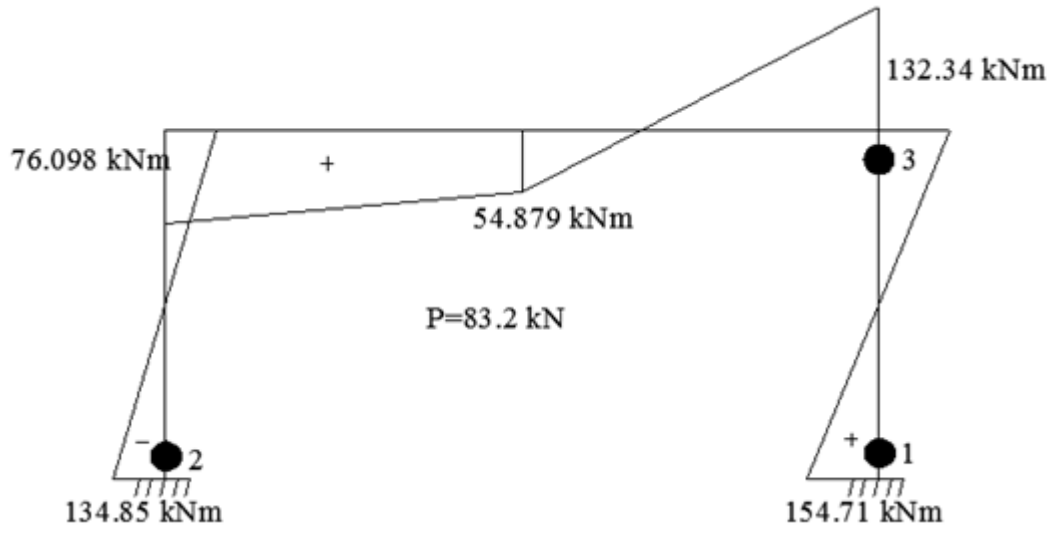
3.2.4. P=83.2 kN Kuvvet Değerindeki Analiz Değerleri

P=83.2 kN kuvvet değerinde elle hesaba göre üçüncü mafsal bir numaralı elemanın sonunda oluşmuş ve şekil 3.26'daki moment değerleriyle gösterilmiştir.

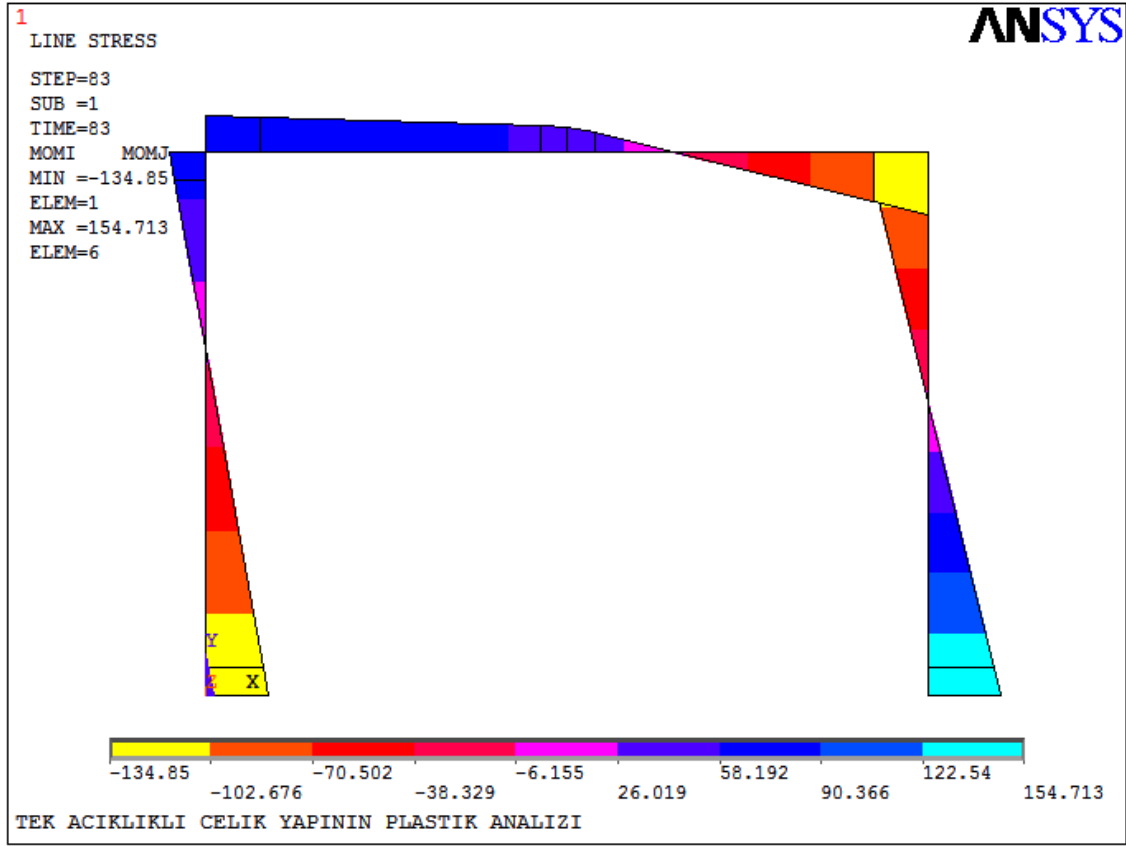


Şekil 3.27: P=83.2 kN'da elle hesaba göre üçüncü plastik mafsalın yeri [11]

ANSYS'teki analize göre ise üçüncü mafsal, dördüncü elemanın sonunda oluşmuş ve moment grafiği ile birlikte şu şekilde gösterilmiştir;



Şekil 3.28: ANSYS'teki analize göre $P=83.2$ kN kuvvet değerinde üçüncü mafsall



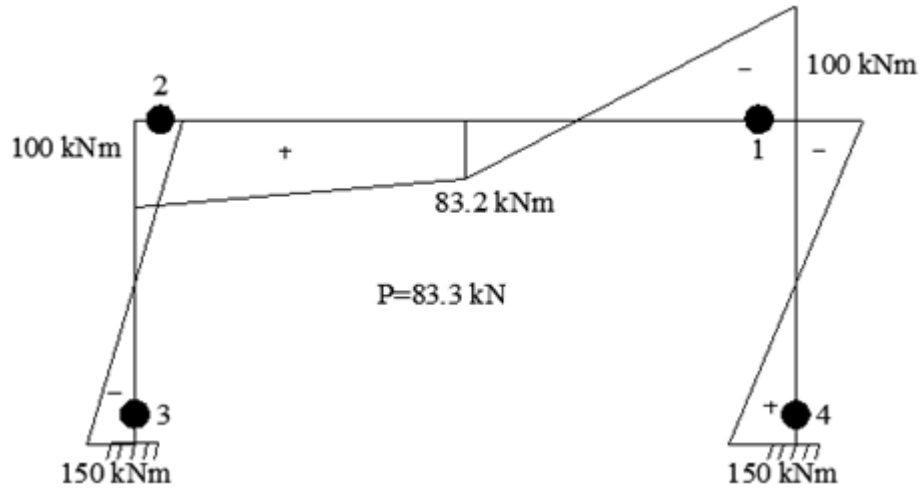
Şekil 3.29: $P=83.2$ kN kuvvet değerinde çelik çerçevenin ANSYS'teki moment grafiği

Tablo 3.5:P=83.2 kN kuvvet değerinde ANSYS’te elemanlarda oluşan moment ve gerilme değerleri

ELEMAN NO	MOMENT I	MOMENT J	AKMA GERİLME Sİ I ALT	AKMA GERİLME Sİ I ÜST	AKMA GERİLME Sİ J ALT	AKMA GERİLME Sİ J ÜST
1	-134.85	-124.30	-24000	24000	-24000	24000
2	-124.30	65.550	-24000	24000	15096	-14851
3	65.550	76.098	14685	-14449	17028	-16793
4	-132.34	-117.99	-24000	24000	-24000	24000
5	-117.99	140.36	-24000	24000	24000	-24000
6	140.36	154.71	23802	-24000	24000	-24000
7	76.098	72.915	15847	-17974	15140	-17266
8	72.915	56.471	15140	-17266	11486	-13612
9	56.471	54.879	11486	-13612	11132	-13259
10	54.879	40.838	11132	-13259	8011	-10138
11	40.838	-104.26	8017	-10154	-24000	22141
12	-104.26	-132.34	-24000	21974	-24000	24000

3.2.5. P=83.3 kN Kuvvet Değerindeki Analiz Değerleri

Zekai CELEP’in yapmış olduğu analiz değerlerine göre dördüncü mafsallık P=83.3 kN değerinde 12 numaralı elemanın “I” ucunda oluşmuştur. Moment değerleri ve mafsallar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir;

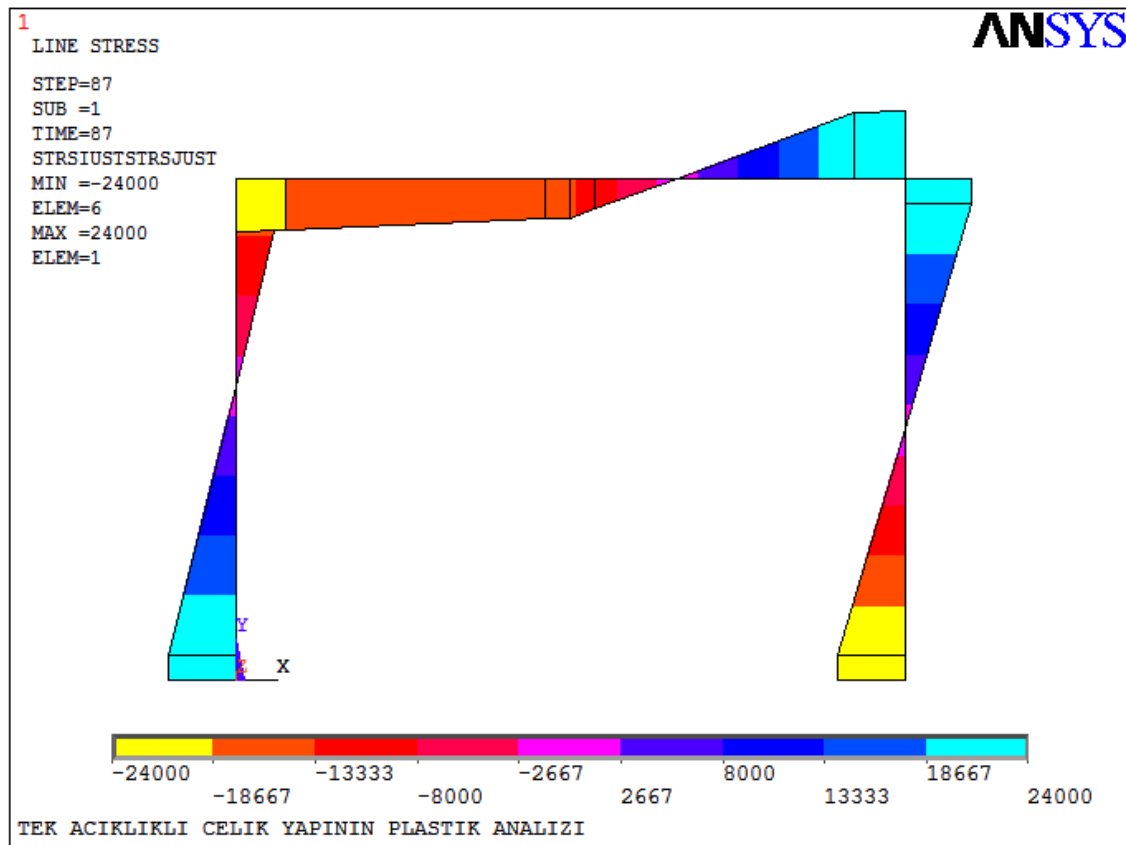


Şekil 3.30: P=83.3 kN’da elle hesaba göre üçüncü plastik mafsallık yeri [11]

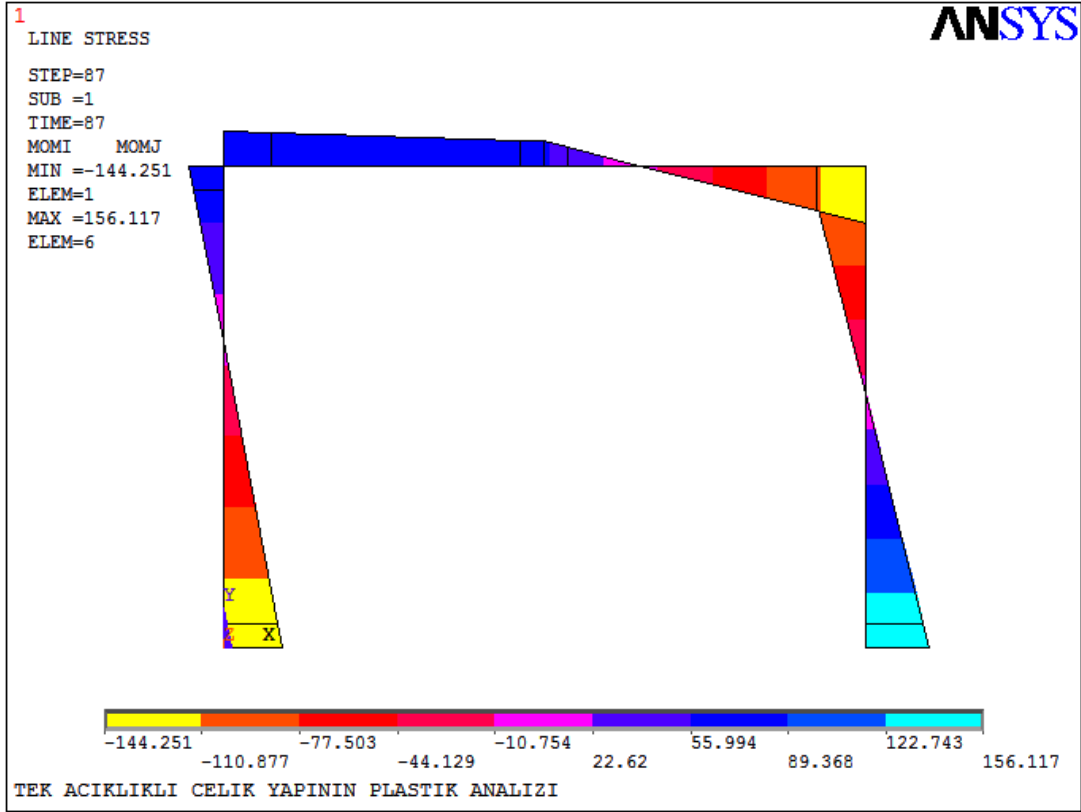
ANSYS’te yapılan bu analizde ise aslında son mafsallık P=87 kN kuvvet değerinde 12 nolu elemanın “I” ucunda oluşmuş bu nokta elle yapılan analizdeki ilk mafsallık yerine

[illegible]

Şekil 3.31: ANSYS'teki analize göre $P=87$ kN kuvvet değerinde dördüncü mafsalsal



Şekil 3.32: P=87 kN kuvvet değerinde çelik çerçevenin ANSYS'teki gerilme grafiği



Şekil 3.33: P=87 kN kuvvet değerinde çelik çerçevenin ANSYS'teki moment grafiği

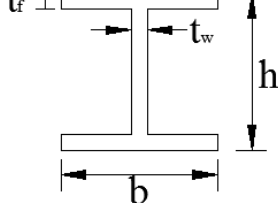
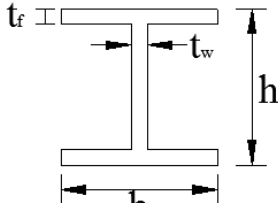
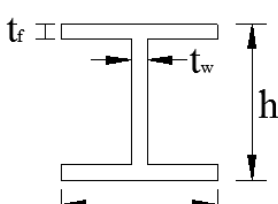
Görüldüğü gibi plastik moment değerleri kolonlarda 150 kNm, kirişlerde 100 kNm olmasına rağmen ANSYS'te yapılan tasarıma göre aslında kolonda ulaşılan azami moment değeri 156.117 kNm, kirişlerde ise 132.24 olarak bulunmuştur. Bu durum aslında elle yapılan hesapların sadece mafsalların tam plastik momentlerinin kalıcı deformasyonlar altında bile sistemin güvenle taşıyacağı yüklerin hesabının yapıldığını gösterir ama sistemin taşıyabileceği limit yük, elle yapılan hesaptan daha fazla olduğu bu analizle gösterilmiştir.

3.3. Plastik Analizle İlgili Üçüncü Örnek Dört Katlı Tek Açıklık Çelik Çerçeve

3.3.1. Dört Katlı Tek Açıklıklı Çerçevenin Genel Bilgileri ve Tasarımı

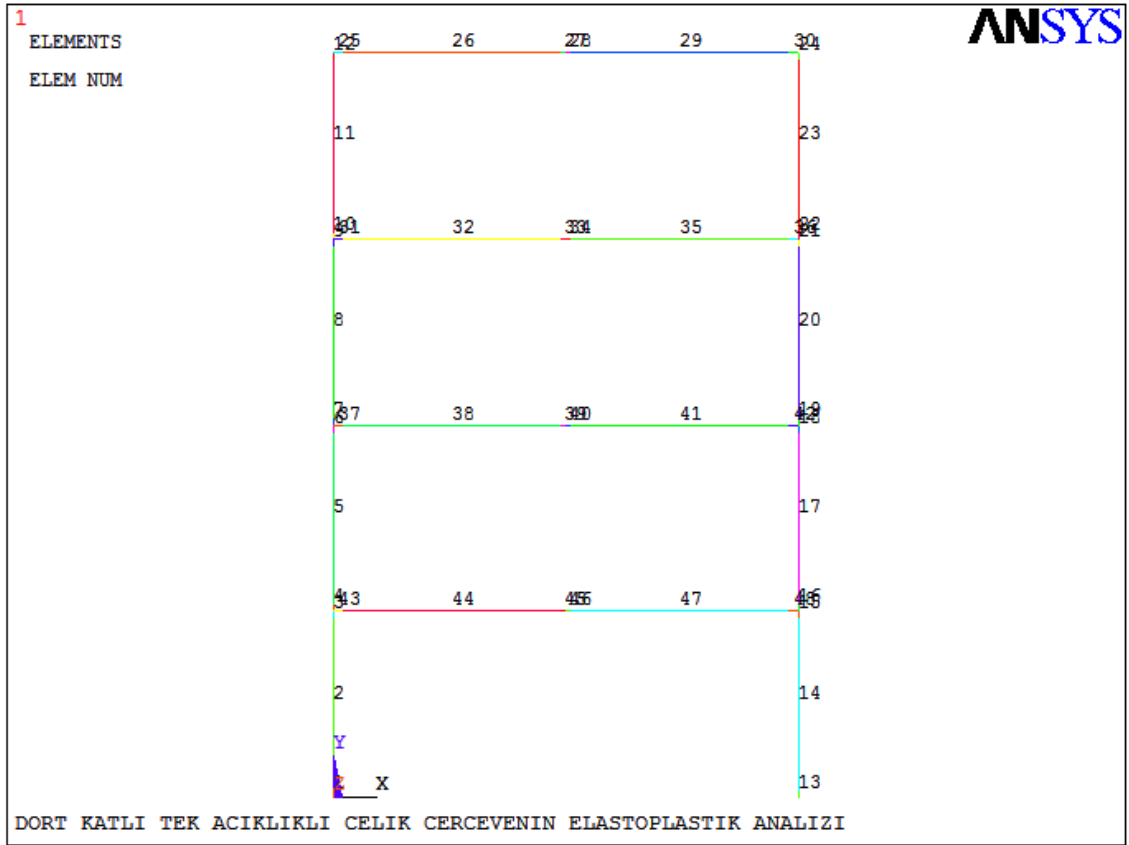
Tek katlı dört açıklıklı bu sistem Majid ve Horne'un (1968) yapmış olduğu çalışmanın ANSYS programında uygulaması olarak tasarlanmıştır. Majid ve Horn'un değiştirilmiş Heyman formüllerinin de aynı zamanda teyidi olmuştur. Tek katlı dört açıklıklı bu sistemde üç farklı eleman kullanılmış olup bu elemanlar İngiliz çelik profillerine ait "I" kirişlerdir. Bu kesitlerin tasarımı 2.39, 2.40, 2.41, 2.42, 2.43, 2.44, 2.45 numaralı formüllere göre yapılmış ve tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6: Tek katlı tek açıklıklı çerçeve için Majid formüllerine göre eleman kesitleri

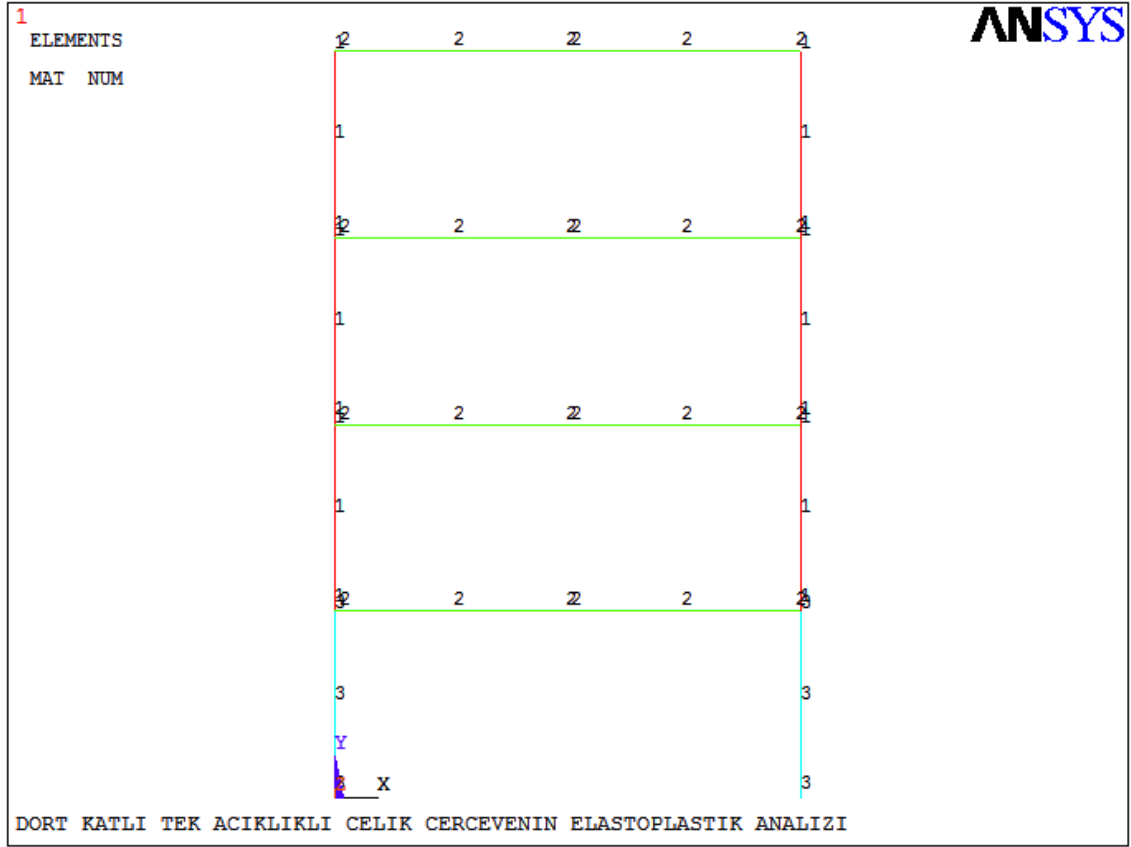
Kesit Özellikleri	Elemanın Yeri	b (m)	h (m)	t _w (m)	t _f (m)
 UC 254x254x89	Boyutlar	0.2563	0.2603	0.0103	0.0173
	Eleman Numaraları	4,5,6,7,8,9,10,11,12,16,17,18,19,20,21,22,23,24			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	1226 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
 UB 406x178x60	Boyutlar	0.1779	0.4064	0.0079	0.0128
	Eleman Numaraları	25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38 39,40,41,42,43,44,45,46,47,48			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	1195 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
 UB 305x305x118	Boyutlar	0.3074	0.3145	0.012	0.0187
	Eleman Numaraları	1,2,3,13,14,15			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	1343 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			

3.3.2. Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçevenin ANSYS ile Analizi

Bu kesitler ANSYS programına kodları yazılarak girilmiş ve sistemin genel eleman numaralarına göre görünümü şekil 3.34'te gösterilmiştir.

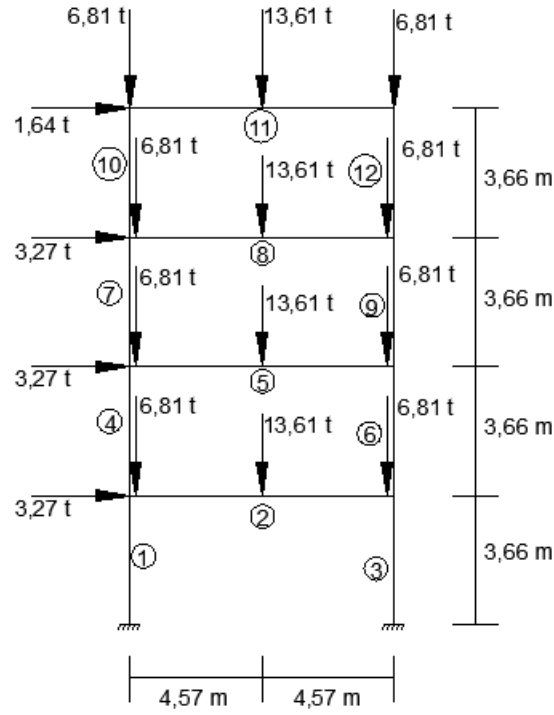


Şekil 3.34: Dört katlı tek açıklıklı çelik çerçevenin eleman numaralarının ANSYS'te gösterimi



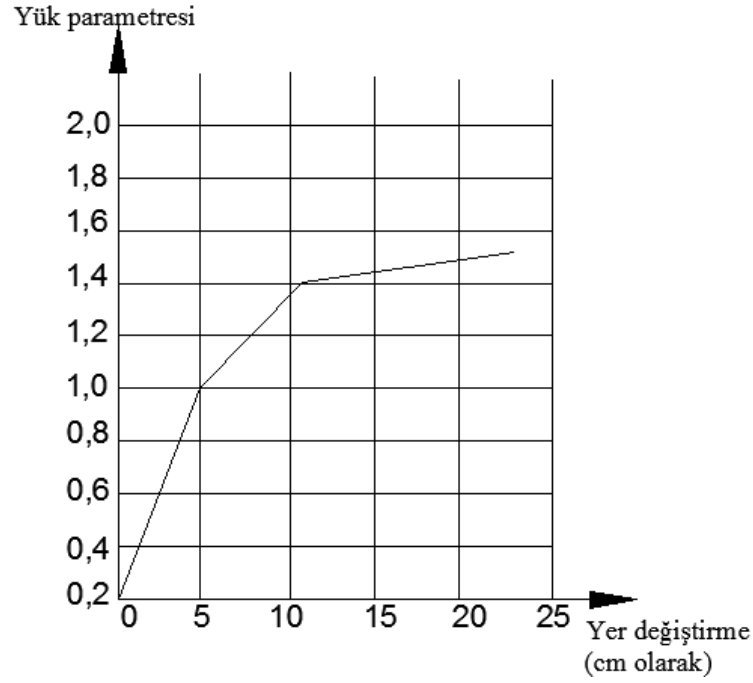
Şekil 3.35: Dört katlı tek açıklıklı çelik çerçevenin malzeme numaralarının ANSYS’te gösterimi

ANSYS’te yapılmış olan bu tasarım da yine mafsallaşma noktaları önceden eleman derinliğinin yarısı kadar noktada öngörülmüş olup, bir tane kolon veya kiriş eleman bu durum öngörülerek üç elemana bölünmüştür. Her bir elemanın “I” ve “J” noktalarına x-y koordinat düzleminde birer nokta tanımlanmış ve kodlar bu şekilde yazılmıştır. Bilineer kinematik pekleşme kullanılarak yükler 150 parçaya bölünerek 50 iterasyon yaptırılmıştır. Çerçeveye etkiyen yükler Majid tarafından idealleştirilen tekil yükler şeklinde çerçeveye uygulatılmış ve eleman numaraları ile birlikte şekil 3.36’te gösterilmiştir.

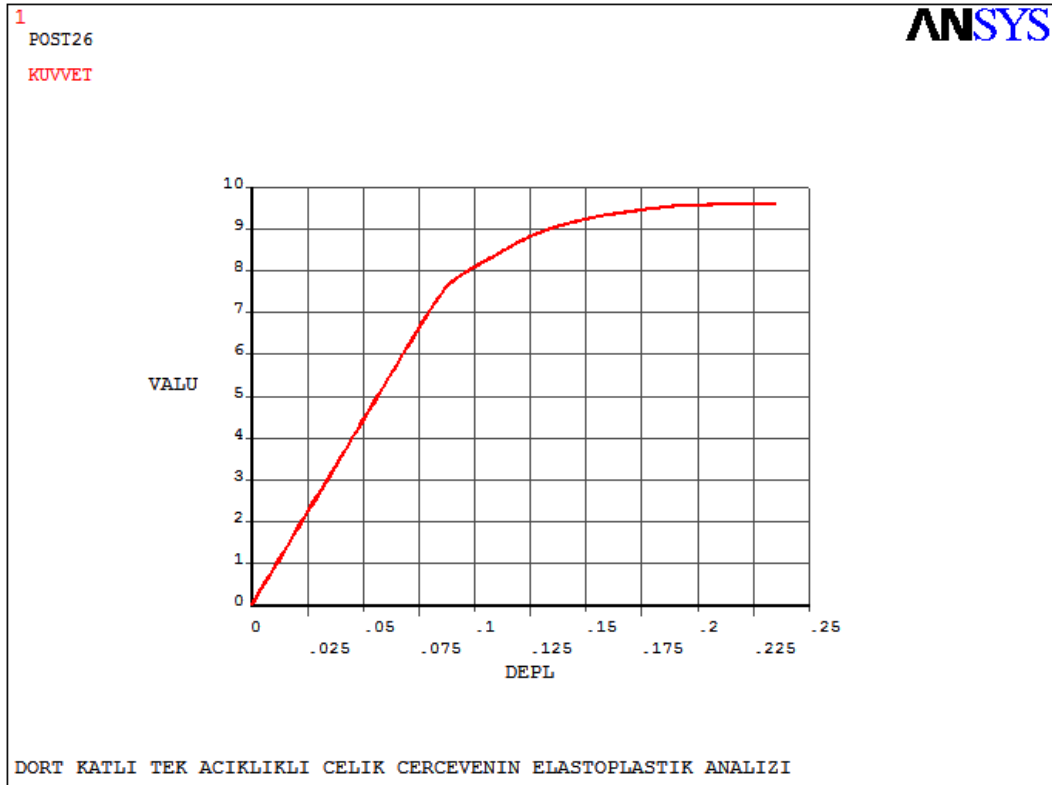


Şekil 3.36: Majid tarafından idealleştirilmiş yükler altındaki tek katlı tek açıklıklı çerçeve ve eleman numaraları [2]

Bu yükler altındaki çerçeve için ANSYS programında APDL komutları kullanılarak bir döngü halinde 150 parçaya bölünerek ve 25 iterasyon yaptırılarak yükler çerçeveye verilmiş ve sekiz plastik mafsıl sonucunda yük-deplasman grafiği elde edilmiştir. Majid'in çalışmasında kıyaslanabilecek herhangi bir sayısal moment değeri olmadığından; ANSYS ile analiz sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği, Majid'in elde ettiği moment parametresi (λ)-deplasman grafiği ile karşılaştırılmış olup deplasman son mafsılın olduğu anda çatı katında oluşan x-yönündeki yatay yer değiştirme oranıyla aynı olduğu, bu değerinde grafikten yaklaşık 23 cm olarak okunduğu görülmüştür. Majid'in elde ettiği grafik şekil 3.37'da, ANSYS'teki analiz sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği ise şekil 3.38'de gösterilmiştir.

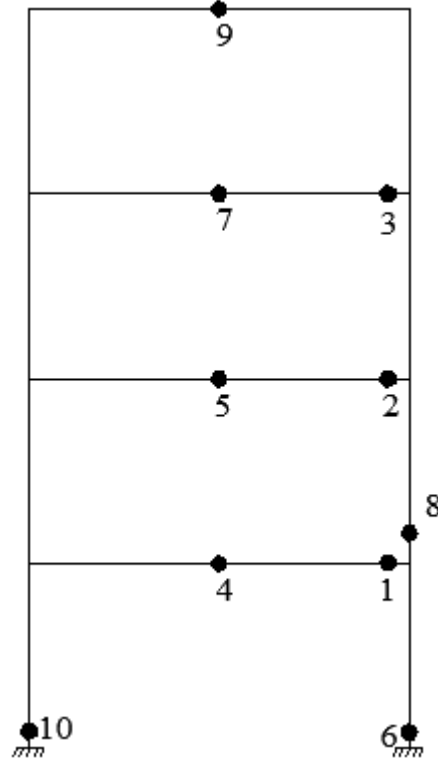


Şekil 3.37: Majid tarafından elde edilmiş tek katlı tek açıklıklı çelik çerçeveye ait yük parametresi-deplasman grafiği [2]



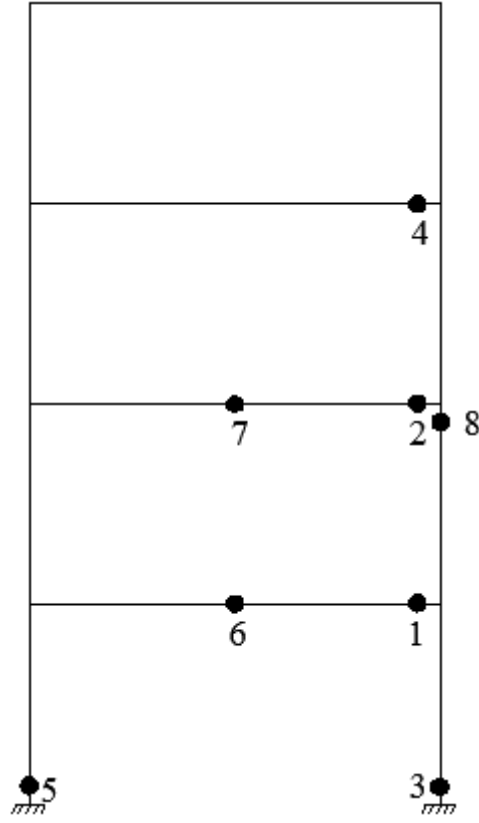
Şekil 3.38: ANSYS'te yapılan analiz sonuçlarında elde edilmiş tek katlı tek açıklıklı çelik çerçeveye ait kuvvet-deplasman grafiği

Her iki grafiğin de gösterdiği sonuç itibarıyla bu analizde en üst çatı katı kirişinin yatay ötelenmesi yaklaşık 23 cm civarındadır. Her ne kadar aynı yerlerde elde edilmiş olsa bile sistemdeki plastik mafsalların oluşma sırası ve değerleri farklılık göstermektedir. Majid'in analizlerindeki oluşum sırası şekil 3.39'de gösterilmiştir.



Şekil 3.39: Majid'in analizine göre tek katlı tek açıklıklı çelik çerçevede plastik mafsalların oluşum sırası [2]

Sistemin, ANSYS'teki analizlerinde, göçme anında sistemde oluşan plastik mafsalların sırası ise şekil 3.40'da gösterilmiştir.



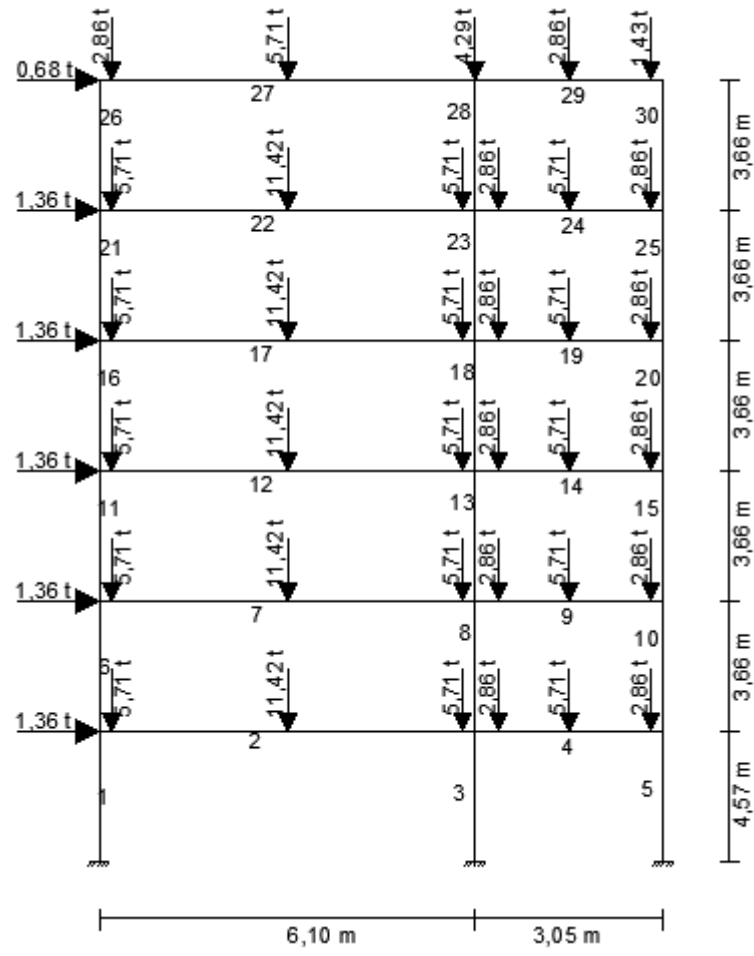
Şekil 3.40:ANSYS'teki analizlere göre dört katlı tek açıklıklı çelik çerçevede plastik mafsalların oluşum sırası

Sonuç olarak Majid'in yapmış olduğu Dört Katlı Tek Açıklıklı Çelik Çerçevenin analizinde plastik mafsalların yerleri ve oluşum sıraları, ANSYS ile yapılan analizle hemen hemen aynı çıkmıştır. ANSYS'te sekiz tane mafsaldın akabinde sistemin plastik momenti 1 nolu mafsalda $M_p=29.534$ tm değerindedir. Bu değerden daha büyük bir değer sonuçlar arasında gözlenmemiştir.

3.4. Plastik Analizle İlgili Dördüncü Örnek Altı Katlı İki Açıklık Çelik Çerçeve

3.4.1. Altı Katlı İki Açıklıklı Çerçevenin Genel Bilgileri ve Tasarımı

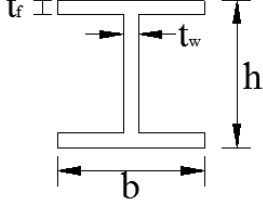
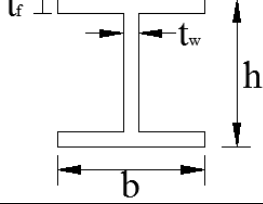
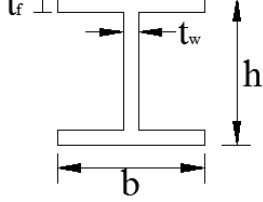
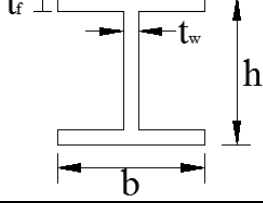
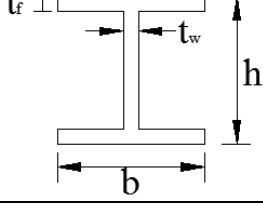
Bu sistemde iki açıklıklı altı katlı çelik çerçeve kullanılmıştır. Bu sistemin tasarımı yine 2.30, 2.31, 2.32, 2.33, 2.34, 2.35, 2.36, 2.37, 2.38 formülleri kullanılarak tasarlanmıştır. Bu tasarım da 11 çeşit "I" kiriş kullanılmış ve şekil 3.41'ta gösterilen yükler etkisi altında analiz aşamasına getirilmiştir.



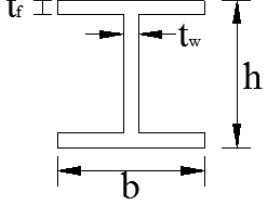
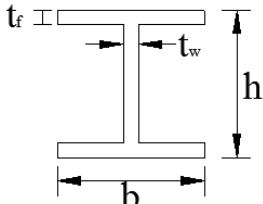
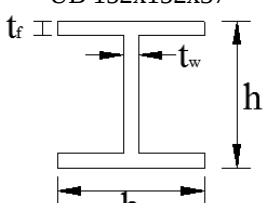
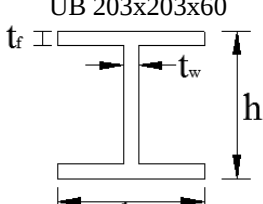
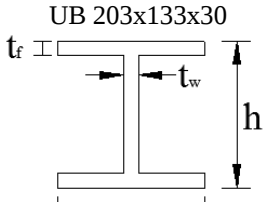
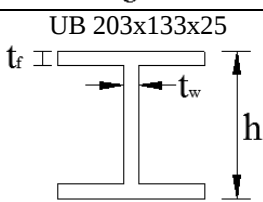
Şekil 3.41: İki açıklıklı altı katlı çelik çerçevenin tasarımı ve yükler [2]

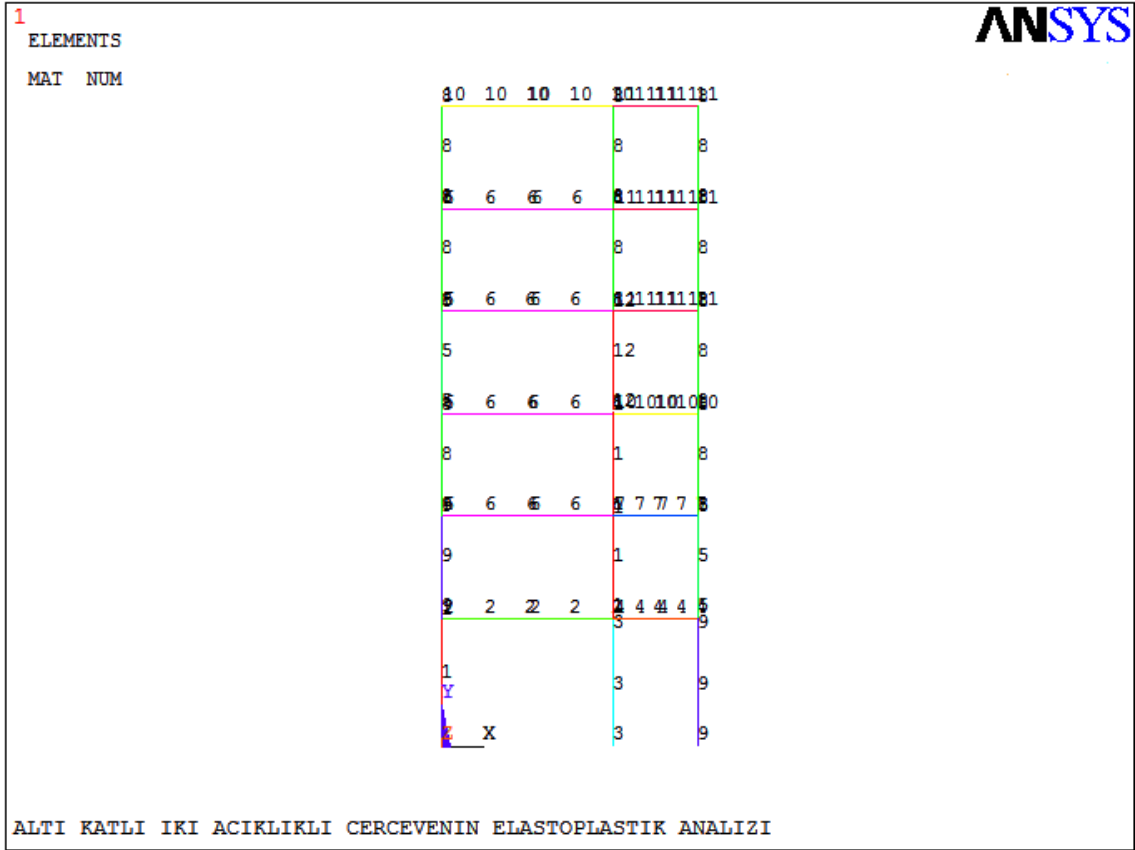
ANSYS'te bu sistemin tasarımı ise 117 tane düğüm noktası ve 126 tane eleman ile yapılmıştır. Tasarımda 11 çeşit eleman kullanılmıştır, bu elemanların karakteristik özellikleri tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7: İki açıklıklı altı katlı çelik çerçeve modelinde kullanılan eleman özellikleri

Kesit Özellikleri	Elemanın Yeri	b (m)	h (m)	t _w (m)	t _f (m)
 UC 254x254x73	Boyutlar	0.2546	0.2541	0.0066	0.0142
	Eleman Numaraları	1,2,3,31,32,33,52,53,54			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	908.5 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
 UB 305x165x40	Boyutlar	0.165	0.3034	0.006	0.0102
	Eleman Numaraları	4,5,6,7,8,9			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	723.1 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
 UB 305x305x97	Boyutlar	0.3053	0.3079	0.0099	0.0154
	Eleman Numaraları	10,11,12			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	1589 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
 UB 254x146x37	Boyutlar	0.1464	0.256	0.0063	0.0109
	Eleman Numaraları	13,14,15,16,17,18			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	484.5 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
 UB 203x203x46	Boyutlar	0.2036	0.2032	0.0072	0.011
	Eleman Numaraları	40,41,42,64,65,66,73,74,75			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	497.4 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			

Tablo 3.7'nin devamı

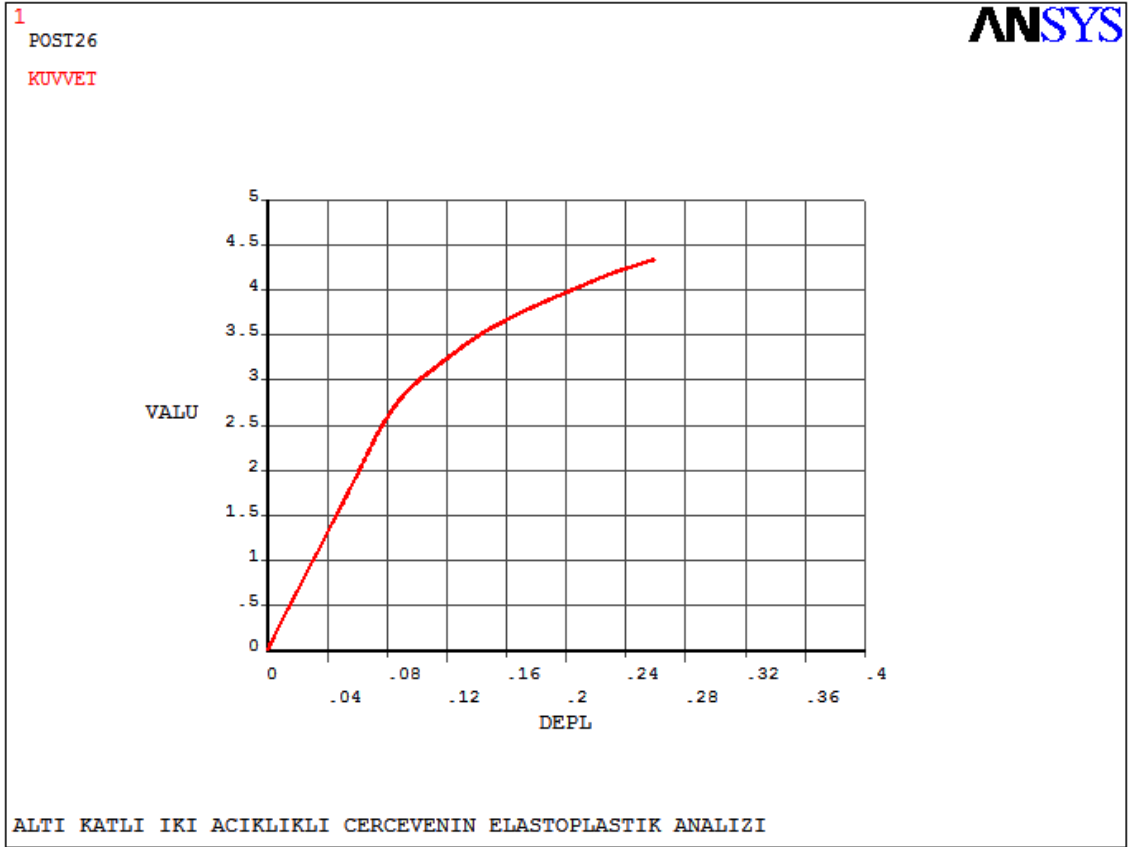
Kesit Özellikleri	Elemanın Yeri	b (m)	h (m)	t _w (m)	t _f (m)
UB 305x165x40 	Boyutlar	0.165	0.3034	0.006	0.0102
	Eleman Numaraları	25,26,27,28,29,30,46,47,48,49,50,51,67,68,69,70,71,72,88,89,90,91,92,93			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	623.1 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
UB 254x146x31 	Boyutlar	0.1461	0.2514	0.006	0.0086
	Eleman Numaraları	34,35,36,37,38,39			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	394.8 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
UB 152x152x37 	Boyutlar	0.1544	0.1618	0.008	0.0115
	Eleman Numaraları	43,44,45,61,62,63,64,65,66,82,83,84,85,86,87,94,95,96,103,104,105,106,107,108,115,116,117,124,125,126			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	310.1 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
UB 203x203x60 	Boyutlar	0.2058	0.2096	0.0094	0.0142
	Eleman Numaraları	52,53,54			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	652 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
UB 203x133x30 	Boyutlar	0.1339	0.2068	0.0064	0.0096
	Eleman Numaraları	55,56,57,58,59,60,109,110,111,112,113,114			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	312.6 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			
UB 203x133x25 	Boyutlar	0.1332	0.2032	0.0057	0.0078
	Eleman Numaraları	76,77,78,79,80,81,97,98,99,100,101,102,118,119,120,121,122,123			
	Akma Gerilmesi	24000 t/m ²			
	Elastisite Modülü	2x10 ⁷ t/m ²			
	Tanjant Modülü	259.1 t/m ²			
	Poisson Oranı	0.3			



Şekil 3.42: İki açıklıklı altı katlı çelik çerçeve elemanlarının ANSYS'te görünüşü

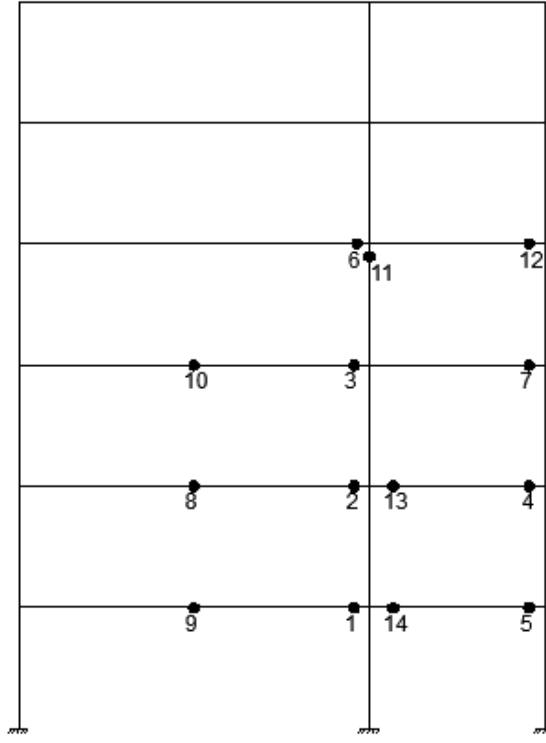
3.4.2. Altı Katlı İki Açıklıklı Çelik Çerçevenin ANSYS ile Analizi

Şekil 3.41'teki yükler altındaki çerçeve için ANSYS programında APDL komutları kullanılarak bir döngü halinde 150 parçaya bölünen yükler, 10'ar iterasyon yaptırılarak çerçeveye etki ettirilmiş ve sonucunda yük-deplasman grafiği elde edilmiştir. Majid'in çalışmasıyla kıyaslanabilecek herhangi bir moment veya kuvvet değeri olmadığından; ANSYS analizi sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği, bu çalışmaya ait nihai ve özgün bir grafik olmuştur. Bu çalışmaya ait Majid'in elde ettiği tek veri plastik mafsalların oluş sırası ve yerleridir. ANSYS'in bu çalışmaya ait en üst çatı katı kirişinin kuvvet-deplasman grafiğinden de görüleceği üzere, sistem yaklaşık 4.3 tm plastik kuvvet değerinde sekiz adet mafsallın oluştuğu gözlenmiştir ve şekil 3.43'den de görüleceği üzere sistemin yaptığı deplasman da yaklaşık 26 cm civarındadır.

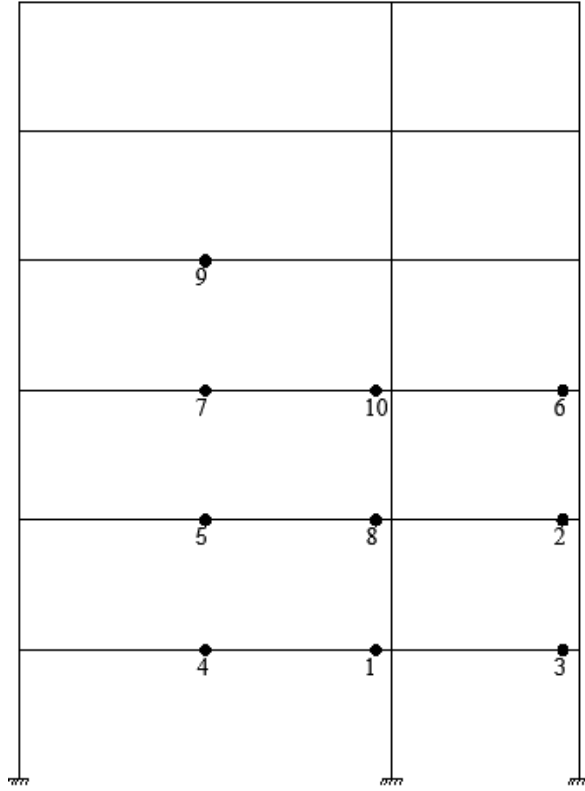


Şekil 3.43: ANSYS’te yapılan analiz sonuçlarında elde edilmiş altı katlı iki açıklıklı çelik çerçeveye ait kuvvet-deplasman grafiği

Majid’in yapmış olduğu analiz sonucunda plastik mafsalların oluşum sırası şekil 3.44’te; ANSYS analizlerine göre mafsalların oluşum sırası ise şekil 3.45’te gösterilmiştir.



Şekil 3.44: Majid'in analizine göre altı katlı iki açıklıklı çelik çerçevede plastik mafsalların oluşum sırası [2]



Şekil 3.45: ANSYS'teki analizlere göre altı katlı iki açıklıklı çelik çerçevede plastik mafsalların oluşum sırası

Sonuç olarak Majid'in yapmış olduğu altı katlı iki açıklıklı çelik çerçevenin analizinde plastik mafsalların yerleri ve oluşum sıraları, ANSYS ile yapılan analizle aynı noktalarda fakat farklı bir sıralamayla çıkmıştır. ANSYS'te sistemde on mafsalin akabinde bir nolu mafsalda oluşan moment $M_p=27.743$ tm değerindedir. Bu değerden daha büyük bir değer sonuçlar arasında gözlenmemiştir. Majid'in yapmış olduğu projelendirmede toplam ondört adet plastik mafsall oluşmuştur fakat ANSYS'te deplasman ve dönme sınırlayıcıları altında yapılmış olan analizde toplamda on plastik mafsala kadar işlem devam ettirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çelik çerçevelerin elastoplastik tasarımı konulu bir tez üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada bir birinden tamamen farklı dört örneğe yer verilmiş. Bu örneklerden ilki; tek açıklıklı basit bir kiriş tasarlanmış ve analizi yapılmıştır. Bu basit kiriş sistemi ANSYS'in kendi eğitim modülü, Verification Manuel 24'tür. Bu analizde görüldüğü gibi sistemde plastik mafsallık noktaları önceden belli olmadığından ve analizden sonra nerelerde ortaya çıktığı anlaşılmadığından program amacına çok da ulaşmamıştır. Diğer örneklerde ise plastik mafsallık noktaları ayrı elemanlar halinde tasarlanarak sisteme işlevsellik katılmış ve bir döngü halinde artan kuvvetler altında yapılan analizlerde mafsallaşma sıraları tam olarak literatürdeki çalışmalarla aynı sırada oluşmasa da tam plastik moment değerleri ve deplasman değerleriyle literatürdeki çalışmalarla aynı sonuçlar bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Damcı E, Coşgun T, Çelik T, Öztörün N K.** 2002. Uzak Çerçeve Sistemlerin Elastik-Plastik Analizi İçin Bir Yöntem, *ECAS Uluslararası Yapı ve Deprem Sempozyumu*, ODTÜ, Ankara, 14 Ekim
- [2] **Horne, M.R., Majid, K.I.** 1966. Elastic-Plastic Design of Rigid Jointed Sway Frames By Computer, *University of Manchester, Department of Civil Engineering*, UK.
- [3] **Barsan, G.M., Chiorean, C.G.** 1999 Computer Program for Large Deflection Elasto-Plastic Analysis of Semi-Rigid Steel Frameworks. *Computers and Structures*, **72**, 699-711
- [4] **Yoo, H; Choi, D.** 2008. New Method of Inelastic Buckling Analysis for Steel Frames, *Journal of Constructional Steel Research*, **64**, 1152-1164
- [5] **Holmes, M; Gandhi, S.N.** 1965. Ultimate Load Design of Tall Steel Building Frames Allowing for Instability, *Proc. Inst. Civ. Engrs.* **30**, p147.
- [6] **Wood, R. H.** 1960. Stability of Tall Buildings *Proc. Inst. Civ. Eng.* **17** p.431
- [7] **Merchant, W.** 1954. Failure of Rigid Jointed Frameworks as Influenced by Stability, *Structural Engineer*, **32**, p.185
- [8] **Horne, M, R; Merchant, W.,** 1965. The Stability of Frames *Pergamon*.
- [9] **Merchant, W.,** 1955. Critical Loads of Tall Building Frames, *Structural Engineer*, **33** p.184
- [10] **Wasti, T. S.** 1968. Limit Analizi (Yapılar İçin Plastik Hesap Metodu), ODTÜ Yayınları, Ankara
- [11] **Celep, Z.** 2007. Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, Beta Dağıtım, İstanbul
- [12] **TS-4561,** 1985. Çelik yapıların plastik teoriye göre hesap kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [13] **Heyman, J.** 1953. Plastic Design of Plane Frames for Minimum Weight, *Structural Engineering*, **31**, p125.
- [14] ANSYS V12 Tutorials
- [15] **Narayanaswami, R; Adelman, H, M.** 1974. Inclusion of Transverse Shear Deformation in Finite Element Displacement Formulations. *NASA Langley Research Center Hampton Va.*
- [16] www.ansysbilgihavuzu.com, ANSYS bilgihavuzu, 4 Kasım 2010

EK: DÖRT KATLI TEK AÇIKLIKLI ÇELİK ÇERVENİN ANALİZİNE AİT PROGRAM KODLARI

/title,DORT KATLI TEK ACIKLIKLI CELIK CERCEVENIN ELASTOPLASTIK ANALIZI

/prep7

N,1,0,0

N,2,0,0.13

N,3,0,3.53

N,4,0,3.66

N,5,0,3.79

N,6,0,7.19

N,7,0,7.32

N,8,0,7.45

N,9,0,10.85

N,10,0,10.98

N,11,0,11.11

N,12,0,14.51

N,13,0,14.64

N,14,9.14,0

N,15,9.14,0.13

N,16,9.14,3.53

N,17,9.14,3.66

N,18,9.14,3.79

N,19,9.14,7.19

N,20,9.14,7.32

N,21,9.14,7.45

N,22,9.14,10.85

N,23,9.14,10.98

N,24,9.14,11.11

N,25,9.14,14.51

N,26,9.14,14.64

N,27,0.2,14.64
 N,28,4.47,14.64
 N,29,4.57,14.64
 N,30,4.67,14.64
 N,31,8.94,14.64
 N,32,0.2,10.98
 N,33,4.47,10.98
 N,34,4.57,10.98
 N,35,4.67,10.98
 N,36,8.94,10.98
 N,37,0.2,7.32
 N,38,4.47,7.32
 N,39,4.57,7.32
 N,40,4.67,7.32
 N,41,8.94,7.32
 N,42,0.2,3.66
 N,43,4.47,3.66
 N,44,4.57,3.66
 N,45,4.67,3.66
 N,46,8.94,3.66
 ET,1,BEAM23
 MP,EX,1,20000000
 MP,PRXY,1,0.3
 MP,DENS,1,7.850
 MPTEMP,,,,,,,,
 KEYOPT,1,6,4
 R,1,0.2603,0.0667,0.00268,0.00268,0.00268,0.0667
 TB,BKIN,1
 TBDATA,1,24000,1226
 TYPE,1

MAT,1
EN,4,4,5
EN,5,5,6
EN,6,6,7
EN,7,7,8
EN,8,8,9
EN,9,9,10
EN,10,10,11
EN,11,11,12
EN,12,12,13
EN,16,17,18
EN,17,18,19
EN,18,19,20
EN,19,20,21
EN,20,21,22
EN,21,22,23
EN,22,23,24
EN,23,24,25
EN,24,25,26
ET,2,BEAM23
MP,EX,2,20000000
MP,PRXY,2,0.3
KEYOPT,2,6,4
R,2,0.4064,0.0723,0.00321,0.00321,0.00321,0.0723
TB,BKIN,2
TBDATA,1,24000,1195
TYPE,2
MAT,2
EN,25,13,27
EN,26,27,28

EN,27,28,29
EN,28,29,30
EN,29,30,31
EN,30,31,26
EN,31,10,32
EN,32,32,33
EN,33,33,34
EN,34,34,35
EN,35,35,36
EN,36,36,23
EN,37,7,37
EN,38,37,38
EN,39,38,39
EN,40,39,40
EN,41,40,41
EN,42,41,20
EN,43,4,42
EN,44,42,43
EN,45,43,44
EN,46,44,45
EN,47,45,46
EN,48,46,17
ET,3,BEAM23
MP,EX,3,20000000
MP,PRXY,3,0.3
KEYOPT,3,6,4
R,3,0.3145,0.09668,0.003774,0.003774,0.003774,0.09668
TB,BKIN,3
TBDATA,1,24000,1343
TYPE,3

MAT,3
EN,1,1,2
EN,2,2,3
EN,3,3,4
EN,13,14,15
EN,14,15,16
EN,15,16,17
D,1,ALL,,,14,13
KEYW,PR_STRUC,1
SAVE
FINISH
/SOLU
SOLCONTROL,ON
NSUBST,150
NEQIT,25
OUTRES,ALL,ALL
*DO,I,1,3
F,13,FX,I
F,10,FX,2*I
F,7,FX,2*I
F,4,FX,2*I
F,13,FY,-4*I
F,29,FY,-8*I
F,26,FY,-4*I
F,10,FY,-4*I
F,34,FY,-8*I
F,23,FY,-4*I
F,7,FY,-4*I
F,39,FY,-8*I
F,20,FY,-4*I

```
F,4,FY,-4*I

F,44,FY,-8*I

F,17,FY,-4*I

SOLVE

*ENDDO

SAVE

FINISH

/POST1

SET,2

ETABLE,MOMI,SMISC,6

ETABLE,MOMJ,SMISC,12

ETABLE,STRSIALT,LS,1

ETABLE,STRSIUST,LS,5

ETABLE,STRSJALT,LS,11

ETABLE,STRSJUST,LS,15

ETABLE,DEPIALT,LEPPL,1

ETABLE,DEPIUST,LEPPL,5

ETABLE,DEPJALT,LEPPL,11

ETABLE,DEPJUST,LEPPL,15

/POST26

NSOL,2,26,U,X,DEPLASMAN26

ESOL,3,30,26,NL,SEPL,GERILME

ESOL,4,30,26,F,X,KUVVET

STORE

XVAR,2,DEPL

PLVAR,4

FINISH
```

ÖZGEÇMİŞ

Onur ONAT, 1983 yılında Tatvan' da doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla, Diyarbakır Fatih İlk okulu, Gazi Ortaokulu ve Ziya Gökalp Ybd.Ağr. Lisesinde tamamlamıştır. 2001 yılında, Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazanmıştır. 2006 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra 2008 yılında F.Ü Fen Bilimleri Enstitüsüne bağlı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Mezun olduğu tarih olan 22 Haziran 2006'dan, 23 Ekim 2009 tarihine kadar özel sektörde çalıştıktan sonra, 23 Ekim 2009 tarihinde Tunceli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne atanmış olup, halen görevini Araştırma Görevlisi olarak devam ettirmektedir.