

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİRİNCİ VE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKÜN HESABI
İÇİN BİR YÜK ARTIMI YÖNTEMİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nursel KÜTÜK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ARALIK 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİRİNCİ VE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKÜN HESABI
İÇİN BİR YÜK ARTIMI YÖNTEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nursel KÜTÜK
(501171033)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN

ARALIK 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501171033 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Nursel KÜTÜK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİRİNCİ VE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKÜN HESABI İÇİN BİR YÜK ARTIMI YÖNTEMİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ercan YÜKSEL**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Melih SÜRMELE

Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 14 Kasım 2019
Savunma Tarihi : 09 Aralık 2019





Değerli Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve sürekli destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN'e, tüm hayatım boyunca en büyük desteği ve sevgiyi vererek, her zaman yanımda olan annem Yüksel KÜTÜK'e ve babam Şaban KÜTÜK'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Aralık 2019

Nursel KÜTÜK
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	1
1.2 Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar	4
2. BİRİNCİ VE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKÜN HESABI İÇİN BİR YÜK ARTIMI YÖNTEMİ	7
2.1 Varsayımlar	7
2.2 Yöntemin Esasları	8
2.2.1 Birinci mertebeli limit yükün hesabı için yük artımı yönteminin esasları.....	9
2.2.1.1 Birinci mertebeli limit yükün hesabında yük parametresinin bulunması.....	9
2.2.1.2 Akma koşullarının yazılması ve bir sonraki yük parametresinin elde edilmesi.....	9
2.2.1.3 Hesabın sonlandırılması	11
2.2.2 İkinci mertebeli limit yükün hesabı için yük artımı yönteminin esasları	11
2.2.2.1 İkinci mertebeli limit yükün hesabında yük parametresinin bulunması	11
2.2.2.2 Akma koşullarının yazılması ve bir sonraki yük parametresinin elde edilmesi.....	12
2.2.2.3 Hesabın sonlandırılması	14
3. SAYISAL ÖRNEKLER.....	15
3.1 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Çerçeve	15
3.2 Tek Katlı ve Farklı Yükseklikte Kolonlardan Oluşan Tek Açıklıklı Çerçeve	28
3.3 Tek Katlı ve Farklı Mesnetlenen Kolonlardan Oluşan Tek Açıklıklı Çerçeve	38
3.4 İki Katlı ve Tek Açıklıklı Çerçeve	49
3.5 Tek Katlı Çerçevenin İkinci Mertebeli Limit Yükünün Hesabı.....	76
4. SONUÇLAR.....	91
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ	95



KISALTMALAR

API : Application Programming Interface





SEMBOLLER

M	: Eğilme momenti
M_p	: Plastik moment
N	: Normal kuvvet
Φ	: Dönme
E	: Elastisite modülü
I	: Atalet momenti
a	: Malzeme ve kesit karakteristiklerine bağlı sabit katsayı
L	: Eleman boyu
β	: Şekil fonksiyonu



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Limit yük parametresi ve dönme değerleri.....89





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Birinci mertbe teorisine göre limit yük – yerdeğiştirme diyagramı.....	2
Şekil 1.2 : İkinci mertbe teorisine göre limit yük – yerdeğiştirme diyagramı.	3
Şekil 2.1 : Birim mafsâl dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	10
Şekil 2.2 : İdealleştirilmiş akma eğrisi	13
Şekil 3.1 : Tek katlı, tek açıklıklı çerçeve.....	15
Şekil 3.2 : Yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı.	16
Şekil 3.3 : Birinci adımda elde edilen yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.	17
Şekil 3.4 : Birinci plastik mafsâlın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.	17
Şekil 3.5 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.....	18
Şekil 3.6 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.	18
Şekil 3.7 : Birinci plastik mafsâlın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı. .	19
Şekil 3.8 : Birinci plastik mafsâlın dönmesinden oluşan moment diyagramı.	20
Şekil 3.9 : İkinci adım sonunda elde edilen moment diyagramı.	21
Şekil 3.10 : Kolon sağ alt ucundaki plastik mafsâlın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	22
Şekil 3.11 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.....	22
Şekil 3.12 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.	23
Şekil 3.13 : Sağ kolon alt ucundaki plastik mafsâlın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.....	23
Şekil 3.14 : Kirişin orta noktasındaki plastik mafsâlın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	24
Şekil 3.15 : Kiriş orta noktası için yüklemeler.....	24
Şekil 3.16 : Kiriş sağ ucu için yüklemeler.....	25
Şekil 3.17 : Kirişteki plastik mafsâlın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.	25
Şekil 3.18 : Toplam dönmelerden oluşan moment diyagramı.	26
Şekil 3.19 : Limit yüke karşı gelen moment diyagramı.	27
Şekil 3.20 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.	28
Şekil 3.21 : Tek katlı ve farklı yükseklikte kolonlardan oluşan tek açıklıklı çerçeve.....	28
Şekil 3.22 : Yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı.	29
Şekil 3.23 : Birinci adımdaki yük parametresi ile elde edilen moment diyagramı. ...	30
Şekil 3.24 : Birinci plastik mafsâlın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.	30
Şekil 3.25 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.....	31
Şekil 3.26 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.	31

Şekil 3.27 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.....	32
Şekil 3.28 : Birinci plastik mafsalın dönmesinden oluşan moment diyagramı.	33
Şekil 3.29 : İkinci adım sonunda elde edilen moment diyagramı.....	34
Şekil 3.30 : İkinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	34
Şekil 3.31 : Kiriş sol ucu için yüklemeler.	35
Şekil 3.32 : Kiriş sağ ucu için yüklemeler.....	35
Şekil 3.33 : İkinci plastik mafsalın birim dönmesi ile oluşan moment diyagramı. ...	36
Şekil 3.34 : Toplam dönmelerden oluşan moment diyagramı.	37
Şekil 3.35 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.....	37
Şekil 3.36 : Tek katlı ve farklı mesnetlenen kolonlardan oluşan tek açıklıklı çerçeve.....	38
Şekil 3.37 : Yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı.	39
Şekil 3.38 : Birinci yük parametresi ile elde edilen moment diyagramı.	40
Şekil 3.39 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	40
Şekil 3.40 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.	41
Şekil 3.41 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.	41
Şekil 3.42 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.....	42
Şekil 3.43 : Birinci plastik mafsalın dönmesinden oluşan moment diyagramı.	43
Şekil 3.44 : Limit yük parametresinden oluşan moment diyagramı.	44
Şekil 3.45 : İkinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	44
Şekil 3.46 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.	45
Şekil 3.47 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.	45
Şekil 3.48 : İkinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı..	46
Şekil 3.49 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.	47
Şekil 3.50 : Toplam limit yük parametresinden elde edilen moment diyagramı.	48
Şekil 3.51 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.....	48
Şekil 3.52 : İki katlı ve tek açıklıklı çerçeve.	49
Şekil 3.53 : Yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı.	50
Şekil 3.54 : Birinci adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.....	51
Şekil 3.55 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	51
Şekil 3.56 : İkinci kat sağ kolon üst ucu için yüklemeler.....	52
Şekil 3.57 : İkinci kat sağ kolon alt ucu için yüklemeler.	52
Şekil 3.58 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.....	53
Şekil 3.59 : Birinci plastik mafsalın dönmesinden oluşan moment diyagramı.	54
Şekil 3.60 : İkinci adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.....	55
Şekil 3.61 : İkinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	55
Şekil 3.62 : Birinci kat sağ kolon üst ucu için yüklemeler.....	56
Şekil 3.63 : Birinci kat sağ kolon alt ucu için yüklemeler.	56

Şekil 3.64 : İkinci plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı. .	57
Şekil 3.65 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.....	58
Şekil 3.66 : Üçüncü adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.	59
Şekil 3.67 : Üçüncü plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.	59
Şekil 3.68 : Birinci kat sol kolon üst ucu için yüklemeler.	60
Şekil 3.69 : Birinci kat sol kolon alt ucu için yüklemeler.	60
Şekil 3.70 : Üçüncü plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.	61
Şekil 3.71 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.....	62
Şekil 3.72 : Dördüncü adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.	63
Şekil 3.73 : Dördüncü plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.	63
Şekil 3.74 : İkinci kat sağ kolon üst ucu için yüklemeler.	64
Şekil 3.75 : İkinci kat sağ kolon alt ucu için yüklemeler.....	64
Şekil 3.76 : Dördüncü plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.	65
Şekil 3.77 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.....	66
Şekil 3.78 : Beşinci adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.	67
Şekil 3.79 : Beşinci plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.	67
Şekil 3.80 : İkinci kat sol kolon üst ucu için yüklemeler.....	68
Şekil 3.81 : İkinci kat sol kolon alt ucu için yüklemeler.	68
Şekil 3.82 : Beşinci plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.	69
Şekil 3.83 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.....	70
Şekil 3.84 : Altıncı adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.	71
Şekil 3.85 : Altıncı plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.	71
Şekil 3.86 : Birinci kat sağ kolon üst ucu için yüklemeler.	72
Şekil 3.87 : Birinci kat sağ kolon alt ucu için yüklemeler.....	72
Şekil 3.88 : Altıncı plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.	73
Şekil 3.89 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.....	74
Şekil 3.90 : Toplam limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.	75
Şekil 3.91 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.	75
Şekil 3.92 : Tek katlı çerçeve.....	76
Şekil 3.93 : Düşey yükler için eğilme momenti diyagramı.	77
Şekil 3.94 : Yatay yükler için eğilme momenti diyagramı.	77
Şekil 3.95 : Birinci limit yük parametresinden oluşan moment diyagramı.	78
Şekil 3.96 : Birinci plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.	78
Şekil 3.97 : Giriş sağ ucu için yüklemeler.	79
Şekil 3.98 : Giriş sol ucu için yüklemeler.....	79
Şekil 3.99 : Kolonlar için yüklemeler (P-Delta).	80

Şekil 3.100 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.....	80
Şekil 3.101 : Birinci plastik mafsalın dönmesinden oluşan moment diyagramı.	81
Şekil 3.102 : İkinci limit yük parametresinden oluşan moment diyagramı.....	82
Şekil 3.103 : İkinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	82
Şekil 3.104 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.....	83
Şekil 3.105 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.	83
Şekil 3.106 : İkinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.....	84
Şekil 3.107 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.	85
Şekil 3.108 : Üçüncü limit yük parametresinden oluşan moment diyagramı.....	85
Şekil 3.109 : Üçüncü plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.....	86
Şekil 3.110 : Sol kolon üst ucu için yüklemeler.	87
Şekil 3.111 : Sol kolon alt ucu için yüklemeler.	87
Şekil 3.112 : Üçüncü plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.....	88
Şekil 3.113 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.....	89

BİRİNCİ VE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKÜN HESABI İÇİN BİR YÜK ARTIMI YÖNTEMİ

ÖZET

Bu çalışmada; düzlem çerçeve sistemlerde birinci ve ikinci mertebe limit yükün hesabı için geliştirilen bir yük artımı yöntemi verilmiştir. Yöntem sistemin özelliklerinden bağımsız olup, Bölüm 2.1'deki varsayımlar kısmındaki koşulları sağlayan bütün düzlem çerçeve sistemlere uygulanabilmektedir. Yöntemin [1]'de verilen yöntemden farkı plastik kesit oluşumlarını izleyen analizlerin, özel bir yazılıma gerek kalmaksızın doğrusal hesap yapabilen yazılımlar kullanılarak yapılabilmesi, oluşan plastik kesitlerdeki akma koşullarının da plastik dönmeye ait eğilme momenti tesir çizgisi yardımı ile ayrı olarak denge denklemlerini de içerecek şekilde yazılabilesidir.

Yöntemin geliştirilmesinde, malzemenin elastoplastik davranışı ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi gözönüne alınmıştır. Birinci mertebe limit yükün hesabında sadece eğilme momentinin akma koşuluna etkisi gözönüne alınmıştır. İkinci mertebe limit yükün hesabında ise eğilme momenti ile birlikte normal kuvvetin akma koşuluna etkisi de gözönüne alınmıştır.

Verilen yöntemde ikinci mertebe limit yükün hesabı için sistem sabit yükler ve bu yüklere karşı gelen, denge denklemleri ile yeterli yaklaşıklıkta tahmin edilebilen sabit normal kuvvetler altında hesaplandığından, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi doğrusallaştırılabilmektedir.

Sistemde ilk adımda henüz plastik mafsallarda bulunmadığı için, dış yüklerin yük parametresi birim değer alınarak SAP2000 programı yardımı ile analiz edilmiş ve plastik mafsallarda oluşabilecek her kritik kesit için araştırma yapılmıştır. Bunun sonucunda ilk plastik kesitin olduğu yer saptanarak yük parametresi elde edilmiştir.

Plastik mafsallardaki veya plastik kesitlerdeki eğilme momentleri, çerçevenin önceki adımda plastik mafsallarda oluşan noktalarında tanımlanan adi mafsallardaki birim mafsallarda dönmeleri ve dış yükler için ayrı ayrı yapılan hesaplar sonucunda bulunan eğilme momentlerinin süperpozisyonu ile elde edilmiştir. Birim mafsallarda dönmelerinden meydana gelen birim dönmelerden oluşan eğilme momenti tesir çizgisi kavramından yararlanılarak elde edilmiştir. Hesaplarda birim mafsallarda dönmeleri için yani deplasman yüklemesi için hesap yapmak yerine, birim mafsallarda dönmelerden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri dış yük olarak tanımlanmıştır. Sisteme tanımlanan dış yükler için SAP2000 programı yardımı ile analiz yapılarak plastik mafsallarda birim dönmelerine karşılık gelen moment diyagramı elde edilmiştir.

Plastik mafsalların olduğu kesitlerde akma koşullarını sağlayan denklemler birim dönme yüklemelerinden ve dış yüklerden elde edilen kesit zorlarına bağlı, ayrı olarak yazılmış ve plastik mafsallarda dönmeleri hesaplanmıştır. Her adımda elde edilen yük parametresi ile akma koşulunu sağlayan dönmelerden oluşan kesit zorlarının birleştirilmesi ile yeni adıma ait kesit zorları diyagramları oluşturulmuştur. Oluşan her plastik mafsallarda için işlemler tekrarlanarak sistem mekanizma durumuna gelene kadar

veya ikinci mertebe limit yük hesabında sistem denklem takımının stabilitesi bozuluncaya kadar işlemlere devam edilmiştir.

Sistemin mekanizma durumuna kadar her adımda bulunan yük parametreleri toplanarak toplam yük parametresi elde edilmiştir. Bu yük parametresine karşılık gelen sistemin yani ikinci mertebe limit yüke ait moment diyagramı elde edilerek işlem sonlandırılır.

Son bölümde verilen sayısal örnekler ile yöntemin birinci ve ikinci mertebe limit yüklerinin hesabının nasıl yapılacağı ayrıntılı olarak açıklanmış ve literatürden örneklerle doğrulanmıştır.



A LOAD INCREMENT METHOD FOR THE CALCULATION OF FIRST AND SECOND ORDER LIMIT LOAD

SUMMARY

The analysis and design methods of non - linear structures gain much importance due to the fact that these methods yield both more accurate and more economical Solutions.

The elastic - plastic design methods enable engineers to design more slender structures by taking advantage of the load carrying capacity of the material beyond the elastic limit. In this case however, the second - order effects due to the geometrical changes become significant. Therefore, the development of methods to include both the material nonlinearity and the geometric nonlinearity is of great importance.

As the gravity and lateral loads are increased starting from the initial State, plastic sections form at locations where the internal forces reach the ultimate values defined by the yield condition. After the formation of a plastic section, finite plastic deformations occur while the state of internal forces remains on the yield curve.

In this thesis, a new load increment method has been given for the calculation of first and second order limit load of plane frames, assuming the plastic hinge concept. The load increment method is applicable to all plane frames under the certain assumptions. The main differences between the methods developed here and the method given in [6] is that the given method doesn't need any special software and the yield conditions can be written separately and also they include the equilibrium equations indirectly. Moreover, the yield conditions have been directly obtained by revised Muller Breslau principle in terms of plastic hinge rotations [8].

In the method, elasto-plastic behavior of the material and the effect of geometrical changes on equilibrium equations have been considered. The effect of axial force on yield condition is neglected in the first order limit load analysis while the effect of those in second order limit load analysis is considered. The bending moments in any load increment step are obtained by superposing the bending moments due to the external loads in un-hinged frame and due to the unit rotations of plastic hinges developed until the current load increment step. According the Muller Breslau principle, the bending moment diagram due to the unit hinge rotations is equal to the influence line of bending moments due to the unit rotation of the frame. In this thesis, Muller Breslau principle is revised by substituting an element load vector for the unit hinge rotation. The fixed end forces due to the unit hinge rotation are obtained from element stiffness matrices. In SAP2000, fixed end forces can not be defined externally, opposite sign of those have been given as nodal forces. Therefore a correction of bending moments at the element with plastic hinges is necessary.

When the external load parameter reaches the ultimate value the structure collapses as it transforms into the mechanism state, according to the first order theory or it collapses through the loss of stability according to the second order theory. These load parameters will be referred to as the first or second - order limit load, herein.

In some cases, the structure may be considered as being collapsed due to the excessive deflections and plastic deformations or the rupture of critical sections, as especially is the case for reinforced concrete structures.

The second - order, elastic - plastic analysis methods generally have two practical goals:

- 1- to determine the factor of safety of an existing structure using the second - order limit load (or the collapse load) as the basis for comparison,
- 2- to develop design methods which are based on the collapse load criterion.

In both cases, two different approaches can be followed :

- 1- The structure is analyzed under the proportionally increasing gravity loads,
- 2- The analysis is carried out for constant gravity loads and increasing lateral loads, i.e., for non - proportional loading,

The aim of this study is to develop a method of load increments for the determination of first and second - order limit load of structures subjected to increasing gravity and lateral loads in first order limit load or constant gravity loads and increasing lateral loads in second order limit load. The method accounts for the non - linearities caused by the geometrical changes and the elastic - plastic behavior of material. The effect of the axial force on the yield condition in the second order analysis.

Although the method is developed essentially for non - proportional loading in second order analysis, it is applicable to the analysis of structures subjected to proportional loading as well.

The following assumptions and limitations are imposed throughout the study :

- 1- The stress - strain diagram of the material is assumed to be linearly elastic - perfectly plastic
- 2- Non - linear bending and axial deformations are assumed to be accumulated at certain sections which are defined as plastic sections, while the other portions of the structure remain elastic. This assumption is the extension of the classical plastic hinge concept.
- 3- The effect of the shear force on the yield condition is ignored. Hence, for plane structures, the yield condition is expressed in terms of the bending moment and the axial force. Further, a piecewise linear approximation is made for the yield curve, i.e., this curve is assumed to be composed of line segments.
- 4- The first and the second - order theory is adopted, i.e., the equilibrium equations are formulated for the deformed configuration while the effect of geometrical changes on the compatibility equations are ignored.
- 5- Changes in the direction of loads due to the deflections are assumed to be negligible.
- 6- For the sake of simplicity, the plane structures loaded in their planes are dealt with.

The structure is composed of prismatic members with constant axial forces. The members which do not satisfy these requirements can be divided into smaller segments for which the above conditions are approximately satisfied.

In the application of the conventional elastic - plastic analysis methods for the determination of second - order limit load, several difficulties arise as outlined in the following :

- 1- The behavior of the structural system between the formation of two successive plastic sections is not linear due to the second - order effects. Therefore, the load level at which a plastic section forms can only be determined either by successive approximations or by sufficiently small load increments.
- 2- The behavior of the structural system changes due to the formation of plastic sections. Therefore, at each step of the analysis, the stiffness and loading matrices of the structure should be revised to account for the last plastic section. Moreover, the revised set of equations must be solved again to determine the unknowns and the internal forces.
- 3- As the loads are increased, the internal forces at the plastic sections continuously change and must be controlled to satisfy the yield condition.

In the proposed method, the structure is analyzed under factored constant gravity loads and increasing lateral loads, i.e., the non - proportional loading is adopted.

This approach is considered more realistic as compared with the analysis for proportional loading. Because, the probability of change of lateral loads which generally represent the wind and earthquake effects is more than that of the gravity loads which include the un- altered dead loads.

In second order analysis, limit load calculations are performed for stationary dead loads and monotonically increasing lateral forces depending on a load parameter. In the calculation of second order limit load, the effect of axial forces on yield condition is considered together with the bending moment. In the analysis, equilibrium equations are nonlinear as the axial forces are changing depending on load increments. As, the dead loads are stationary and the sum of the axial forces at the story remains unchanged, the axial forces are assumed to be stationary at any load increment. Thus the behavior of the frame is assumed to be linear between the developing plastic hinges. On the other hand, the yield conditions can also be idealized by line segments. Thus, the load increment method can be applicable to the second order limit load analysis under the same assumptions which are valid for first order limit load analysis.

The load increment procedure is ended when the frame transforms into total or partly mechanism in first order limit load analysis or the determinant of global stiffness matrix has a negative value in second order limit load analysis.

Five illustrative examples from the literature are given for explanation and application of the proposed load increment method.



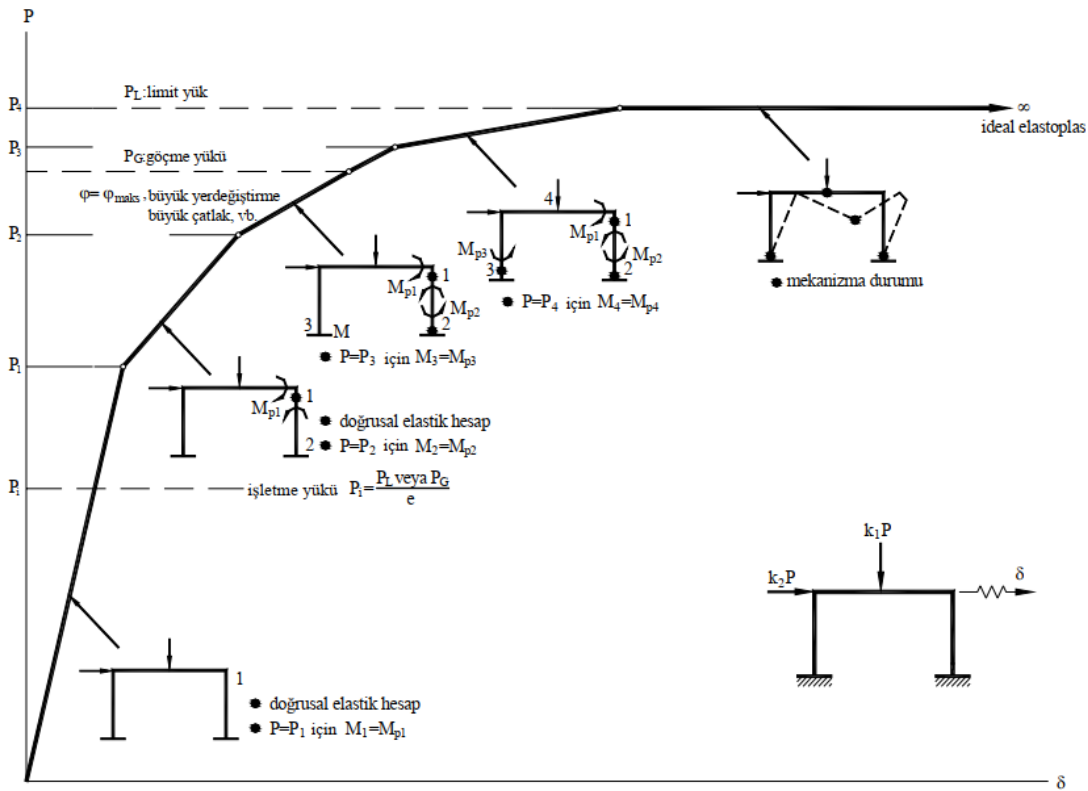
1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Malzeme davranışının ideal elastoplastik olarak kabul edildiği sünek malzemedeki yapılmış yapı sistemlerinde plastik mafsallara hipotezi geçerlidir. Bu teoriye göre doğrusal olmayan şekilde değişimlerin plastik mafsallara adı verilen belirli kesitlerde toplandığı sistemin bu kesitler dışındaki bölgelerinde ise doğrusal elastik davranış olduğu kabul edilmektedir. Yumuşak çelikten yapılmış yapı sistemleri sünek kabul edilmekle birlikte, betonarme sistemlerin sünek davranış göstermesi için belirli koşulların gerçekleşmesi gerekmektedir. Bunlardan en önemlileri, betonun sargılanması ve betonarme kesitlerde beton basınç bölgesi derinliğinin(a) kesit yüksekliğine(h) oranının 0.25'ten küçük olması gerekmektedir. Bilindiği gibi basınç donatısı sünekliği artırırken kesitteki normal kuvvetin büyüklüğü sünekliği azaltmaktadır.

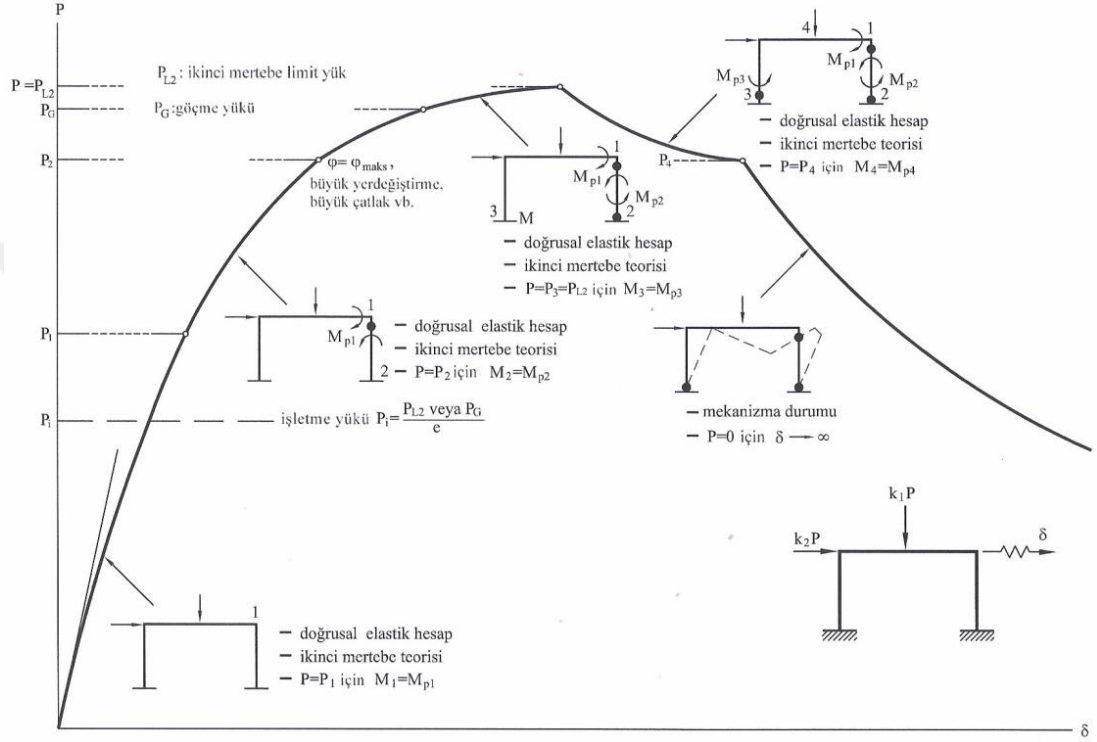
İdeal elastoplastik malzemedeki yapılmış sünek yapı sistemleri limit yüke ulaşmaya kadar geçmeden yükleri taşıyabilmektedir. Limit yükün hesabında genellikle iki yoldan yararlanılmaktadır. Birinci yolda, mekanizma durumu bilinen veya tahmin edilen sistemlerde üst sınır teoremine göre ve virtüel iş prensibi ile limit yük doğrudan hesaplanabilmektedir. Ancak bu yöntemlerin olumsuz tarafı büyük yapı sistemlerinde çok sayıda olası mekanizma durumlarının bulunması ve plastik mafsalların hangi sırada oluştuğu bilinmediğinden plastik mafsallara dönmelerinin ve yerdeğişimlerin hesabının zor olmasıdır. Limit yük hesabında en etkin yöntem yük artımı yöntemidir. Bu yöntemde, işletme yükleri verilen bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak hesap yüklerine geçilmekte, daha sonra yükler artırılarak plastik mafsallara oluşumları izlenmektedir. Yöntemin olumlu tarafı hem plastik mafsallara oluşumlarının izlenebilmesi, hem de her adımda plastik mafsallara dönmelerinin ve yerdeğişimlerin kolaylıkla hesaplanabilmesidir. Yük artımı yöntemlerinde yüklerin bir yük parametresi ile orantılı olarak değiştiği kabul edilmektedir. Bazı durumlarda düşey yüklerin değişme olasılığı az olduğundan düşey yükler sabit tutularak artan yatay yükler için de hesap yapılabilmektedir. Limit yük hesabı birinci mertebeye teorisine göre yapılabildiği

gibi ikinci merteye etkilerin önemli olduğu narin yapı sistemlerinde bu etkileri göz önüne alarak da hesap yapılabilmektedir. Birinci merteye teorisine göre yani doğrusal teoriye göre sistemin taşıyabileceği yüke limit yük, yerdeğiştirmelerin denge denklemlerine etkilerinin de dikkate alındığı ikinci merteye teorisine göre bulunan limit yüke de ikinci merteye limit yük denilmektedir. Limit yükün yük artımı yöntemi ile hesabında normal kuvvetin akma koşullarına etkisi de kolaylıkla göz önüne alınabilmektedir. Bu durumda akma koşulları eğilme momenti ile birlikte normal kuvvete de bağlıdır ve bu tip kesitler için çıkarılan karşılıklı etki diyagramları kullanılmaktadır. Aslında doğrusal olmayan söz konusu akma koşulları doğrulardan oluşacak şekilde idealleştirilerek hesaplarda kullanılabilir. Bu durumda her yük artımı adımında oluşan plastik mafsala, normal kuvvetin de etkisini belirtmek üzere plastik kesit adı verilmektedir. Birinci merteye teorisini esas alan limit yük hesabına ilişkin tipik $P-\delta$ bağıntısı Şekil 1.1’de verilmiştir. Buna göre her mafsalın oluşumundan sonra sistemin rijitliği azalmakta, sistem oluşan mafsallar nedeni ile kısmen veya tamamen mekanizma durumuna geldiğinde ise yerdeğiştirmeler sonsuza gitmekte ve limit yüke ulaşılmaktadır.



Şekil 1.1 : Birinci merteye teorisine göre limit yük – yerdeğiştirme diyagramı [2].

İkinci mertebe limit yükün belirlenmesinde yine benzer bir yol izlenmekte olsa da, yerdeğıştirmelerin denge denklemlerine etkisi ve iki yük artımı arasında sistem davranışının normal kuvvetlerin değışmesi nedeni ile doğrusal olmaması nedenleri ile limit yükün hesabı daha karmaşık olmaktadır. İkinci mertebe limit yükün hesabı ile ilgili tipik P- δ diyagramı da Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2 : İkinci mertebe teorisine göre limit yük – yerdeğıştirme diyagramı [2].

Diyagramdaki karakteristik özellik iki mafsallı oluşumu arasındaki davranışın, normal kuvvetin değışimi nedeni ile doğrusal olmaması ve eğrinin bir tepe noktasından geçmesidir. İkinci mertebe limit yükün hesabında P- δ eğrisi, sistem mekanizma durumuna gelmesiyle taşıma gücüne erişerek bir maksimumdan geçebileceği gibi, oluşan belirli sayıda plastik mafsallar nedeni ile rijitliğı azalan sisteme ait denklem takımının determinantının negatif olması ile de limit yüke ulaşabilir. Yapı sistemlerinde normal kuvvetler denge denklemlerine bağılı olduğundan ve hesap yüklerine ait normal kuvvetler de başlangıçta tahmin edilebildiğinden, normal kuvvetlerin sabit alınması durumunda limit yüke karşı gelen normal kuvvetler ve hesap yüküne karşı gelen normal kuvvetler eşit olacaktır. Normal kuvvetlerin sabit alınması ile iki mafsallı oluşumu arasındaki hesap adımı, hesabın ikinci mertebe teorisine göre

yapılması ve normal kuvvetin sabit alınması ile doğrusallaştırılabilmektedir. Ayrıca, düşey yüklerin sabit tutularak artan yatay yükler için hesap yapıldığında, normal kuvvetin bir kattaki toplamı değişmediğinden davranış yine doğrusal olmaktadır.

1.2 Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Konu ile ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalarda,

Özer, E. düzlem çelik yapı sistemlerinin ikinci merteye limit yüklerinin hesabı için bir yöntem önermiştir [1]. Yöntemde sabit düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler için hesap yapılmakta ve iki mafsal oluşumu arasında normal kuvvetin değişmediği kabulü ile doğrusal hesap yapılabilmektedir. Yöntemde, normal kuvvetin akma koşuluna etkisi de dikkate alınmakta ve hesaplarda uzama şekildeğiştirmelerinin etkisi de dikkate alınmaktadır. Yöntemde denge denklemleri düğüm noktalarının yerdeğiştirmelerine bağlı olarak matris yerdeğiştirme yöntemi ile yazılmakta, oluşan her plastik mafsalın oluşumundan sonra mafsalın denge denklemlerine ve akma koşuluna etkisini temsil eden bir denklem mevcut denklem sistemine ilave edilmektedir. Böylece plastik kesit dönmeleri de mevcut bilinmeyenlere ilave edilmekte ve her adımda düğüm noktalarının yerdeğiştirmeleri ile birlikte plastik kesit dönmeleri de elde edilmektedir. Her adımda yeni bir bilinmeyen ve denklem ilavesi nedeni ile denklem takımının boyutu büyümekte ancak tüm denklem takımının indirgenmesine gerek kalmadan sadece yeni ilave edilen denklemin elenmesi ile çözüme ulaşılmaktadır. Her adımda kontrol edilen denklem sisteminin determinantının negatife geçmesi durumunda ikinci merteye limit yüke ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

İrtem, E. ise Özer, E. tarafından geliştirilen yük artımı yöntemini çelik uzay yapı sistemlerine uyarlamış ve uzay çelik yapı sistemlerinde ikinci merteye limit yükün bulunması için bir yük artımı yöntemi önermiştir [3]. Yöntemde iki doğrultudaki eğilme momentleri ile birlikte normal kuvvetin de akma koşullarına etkisi göz önüne alınmaktadır. Üç adet kesit zoruna bağlı karşılıklı etki yüzeyleri düzlemlerden oluşacak şekilde doğrusallaştırılmaktadır.

Girgin, K. ise İrtem, E. tarafından önerilen yük artımı yöntemini uzay betonarme yapı sistemlerinin ikinci merteye limit yüklerini bulmak üzere geliştirmiştir [5]. Yöntemin esasları Özer, E. ve İrtem, E. tarafından verilen yöntemlere benzerdir.

Bu çalışmada önerilen yöntemde ise denge denklemlerinin elde edilmesinde farklılık olmakla birlikte yük artımı yönteminin genel esasları yukarıda verilen çalışmalardaki yöntemlerle benzerdir. Bu çalışmada denge denklemleri matris deplasman yöntemi ile doğrudan yazılması yerine kuvvet yöntemindeki süperpozisyon denklemlerine benzer şekilde elde edilmektedir. Mafsalsız sistemlerde dış yüklerden ve herhangi bir hesap adımında önceden oluşan plastik mafsal dönmelerinin birim değerlerinden oluşan ve denge denklemlerini sağlayan iç kuvvet durumları sistemin sözkonusu yüklemeler için analizi sonucu kolaylıkla elde edilebilmektedir. Denge denklemlerinin ayrıca yazılması yerine sistem hesabının kullanıldığı yöntem, doğrusal yapı analizi yapabilen her hangi bir yazılımdan yararlanmaya açık olduğundan oldukça pratiktir. Denge denklemleri yerine sistem hesabı sonucu elde edilen iç kuvvetlerden yararlanılan yöntemde akma koşulları da bu iç kuvvetlere bağlı olarak süperpozisyon ile kolaylıkla yazılabilmektedir. Her adımda akma koşullarını içeren denklem sayısı artmakta ancak yeni çözüm önceki adımda indirgenen denklem sisteminden yararlanılarak kolayca elde edilmektedir. Akma koşullarını içeren denklemler, sistem analizlerinden elde edilen iç kuvvetlere bağlı olarak ve ayrı olarak yazılabildiğinden, yük artımı yönteminin otomatik olarak yapılması API (Application Program Interface) kodlu bir yazılım da kullanılarak daha etkin hale getirilebilir. Yöntemde her adımda akma koşullarını içeren ve plastik mafsal dönmelerine bağlı olarak yazılan denklemlerin determinantının negatife geçmesi ile ikinci mertebe limit yüke ulaşıldığı anlaşılmaktadır. İlerleyen bölümlerde, bir yük artımına ait hesap adımında, sistemin analizi ile denge denklemlerinin nasıl yazıldığı ve plastik mafsal birim dönmeleri ile dış yüklere bağlı olarak akma koşullarının nasıl elde edildiği açıklanmıştır. Daha önce yapılan çalışmalardaki denge denklemlerinin elenmesi ile bu çalışmadaki akma koşullarını içeren denklem takımı aynen elde edilebilmektedir. Bu da yöntemin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Literatürde verilen hem birinci hem de ikinci mertebe limit yükün bulunmasına ilişkin örnekler, bu çalışmada verilen yöntemle çözümlenerek sayısal olarak da doğrulanmıştır. Yöntem, İrtem, E. ve Girgin, K. tarafından uzay sistemler için önerilen yöntemlere de direkt olarak uygulanabilir [3, 5].



2. BİRİNCİ VE İKİNCİ MERTEBE LİMİT YÜKÜN HESABI İÇİN BİR YÜK ARTIMI YÖNTEMİ

2.1 Varsayımlar

Bu bölümde, yapı sistemlerinde birinci ve ikinci mertebe limit yükün hesabı amacıyla geliştirilen bir yük artımı yönteminin esasları ve uygulanması açıklanacaktır. Yöntem aşağıda sıralanan varsayımlara dayanmaktadır.

- a- Yapı sistemi düzlem çubuk sistemdir.
- b- Malzeme ideal elastoplastik davranış göstermektedir.
- c- Sistemin doğru eksenli, sabit enkesitli çubuklardan oluştuğu ve normal kuvvetin çubuk boyunca değişmediği kabul edilmiştir. Sistemde eğri eksenli ve değişken kesitli çubukların bulunması durumunda, söz konusu çubuklar doğru eksenli küçük parçalardan oluşacak şekilde idealleştirilebilir.
- d- Lineer olmayan eğilme ve uzama şekildeğştirmelerinin plastikleşen kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde sistemin lineer-elastik davrandığı (plastik mafsal teorisi) kabul edilmiştir.
- e- Plastik mafsallar sadece çubuk uçlarında veya tekil yüklerin olduğu noktalarda oluşmaktadır.
- f- Birinci mertebe limit yük hesabında düşey ve yatay yüklerin aynı yük parametresi ile arttığı, ikinci mertebe limit yükün hesabında ise düşey yüklerin sabit kalarak yatay yüklerin bir yük parametresi ile arttığı kabul edilmiştir.
- g- Birinci ve ikinci mertebe teorisi ayrı ayrı uygulanmaktadır. İkinci mertebe teorisinde; geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi gözönüne alınmakta, geometrik uygunluk koşullarına etkisi terkedilmektedir.
- h- Birinci mertebe limit yükün hesabında akma koşullarında sadece eğilme momentinin etkisi gözönüne alınırken; ikinci mertebe limit yükün hesabında normal kuvvetin etkisi de dikkate alınmıştır. Ayrıca akma eğrisi doğru parçalarından oluşacak şekilde idealleştirilmiştir.
- i- Sistemin şekildeğştirmesi sırasında yüklerin doğrultularının değişmediği kabul edilmiştir.

2.2 Yöntemin Esasları

Üzerinde belirli sayıda plastik mafsalları oluşan yapı sisteminde herhangi bir kesitteki eğilme momenti kuvvet yöntemindeki süperpozisyon ifadesine benzeyen bir ifade ile

$$M = M_{\Phi=0} + \sum (M_{\Phi_i=0} * \Phi_i) \quad (2.1)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada,

$M_{\Phi=0}$: Bütün mafsalları dönmeleri sıfır iken dış yüklerden meydana gelen moment diyagramını

$M_{\Phi_i=0}$: Dış yükler sıfır iken, plastik mafsalları dönmelerinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramını

Φ_i : Bilinmeyen plastik mafsalları dönmelerini, göstermektedir.

Dış yüklerden ve oluşan plastik mafsalları dönmelerinin birim değerlerinden meydana gelen kesit zorları herhangi bir yapı analizi programı ile kolayca elde edilebilir. Plastik mafsallarda birim dönme yüklemesi yapmak yerine, mafsalları bulunduğu çubukta mafsalları birim dönmelerinden meydana gelen ankastrelik uç kuvvetlerinin yüklenmesi daha pratik olmaktadır. SAP2000 programında çubuk ankastrelik uç kuvvetleri dışarıdan girilemediğinden, sözkonusu uç kuvvetler ters işaretli düğüm noktası yükü olarak girilmiş, kesit zorları diyagramları elde edildikten sonra, plastik mafsalları bulunduğu çubuğun uç momentlerinde düzeltme yapılmıştır. Böylelikle sistemin geometrisi, mekanik özellikleri ve yükleri programa bir kez tanıtıldıktan sonra plastik mafsalları dönmelerinden meydana gelen düğüm noktası yükleri farklı yüklenme durumları olarak tanımlanmıştır. Böylece sistemin sadece yüklemeleri değişmekte, farklı yüklenme durumları tanıtılması ile çözüm tek seferde elde edilmektedir. İkinci mertebeye teorisinin uygulandığı durumlarda sabit düşey yükler ve artan yatay yükler kattaki normal kuvvetlerin toplamı değişmediğinden, normal kuvvetlerde doğrusallaştırılabilmektedir. Normal kuvvetler büyük ölçüde denge denklemlerine bağlı olduğundan hesap yüküne karşı gelen normal kuvvetler için hesap yapıldığında sonuç çok fazla değişmemektedir. Bu durumda, söz konusu normal kuvvetler ikinci mertebeye etkilerinin önemli olduğu çubuklara P-Delta kuvveti olarak girilerek ikinci mertebeye teorisine göre hesap yapılmaktadır. Birim dönmelerden meydana gelen etkiler

için normal kuvvete bağlı ikinci merteye teoriye ait ankastrelik uç kuvvetlerinin dış yük olarak verilmesi yeterli olmaktadır [1], [6]. Aşağıdaki bölümlerde yöntemin esasları ve uygulanması birinci merteye limit yük ve ikinci merteye limit yük için ayrı ayrı açıklanmıştır.

2.2.1 Birinci merteye limit yükün hesabı için yük artımı yönteminin esasları

2.2.1.1 Birinci merteye limit yükün hesabında yük parametresinin bulunması

Bu bölümde, birinci merteye limit yükün hesabı için önerilen yük artımı yöntemi aşamaları ile açıklanacaktır. Yük artımı yönteminde belirtilen adımlar bütün düzlem çerçeve sistemlerin birinci merteye limit yükü hesabında geçerlidir.

Yöntemin ilk adımında plastik mafsalsız sistemde düzlem çerçeve yük parametresinin birim değerinden meydana gelen bir moment diyagramı elde edilir ($M_{\Delta\rho=1}$). Elde edilen moment diyagramında plastik mafsallara oluşabilecek her kesit için (2.2)'de verilen ifade ile araştırma yapılarak, en küçük yük parametresi ile ilk plastik kesitin yeri ve oluştuğu yük parametresi bulunur.

$$|M_{\Delta\rho=1} * \Delta\rho_1| = |M_p| \quad (2.2)$$

Sistemin yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı ($M_{\Delta\rho=1}$) ile elde edilen yük parametresi çarpılarak ilk adımdaki eğilme moment diyagramı elde edilir ($M_{\Delta\rho 1}$).

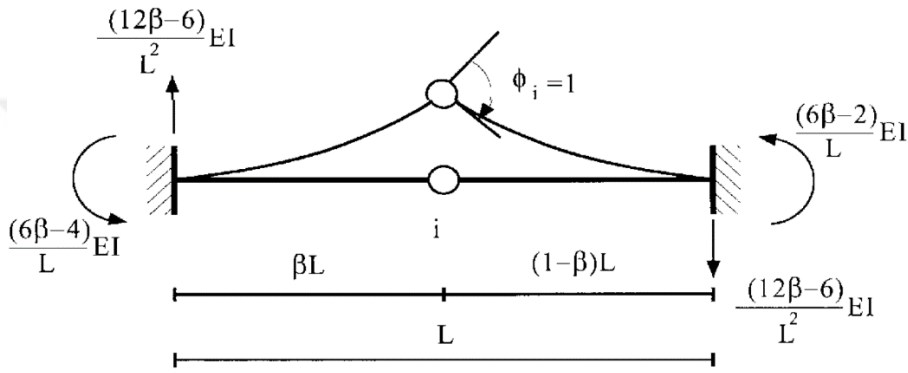
2.2.1.2 Akma koşullarının yazılması ve bir sonraki yük parametresinin elde edilmesi

Akma koşulları, sistemdeki bütün plastik mafsallara oluşabilecek noktalardaki (kritik kesitlerdeki), eğilme momentlerinin, kritik kesitlerin bulunduğu çubukların çubuk plastik moment kapasitelerinden daha büyük olamayacağını gösteren eşitsizliklerdir.

$$|M| - |M_p| \leq 0 \quad (2.3)$$

Kritik kesitlerdeki eğilme momentleri, dış yükler ve herhangi bir adımda oluşan plastik mafsallardaki dönmeler cinsinden superpozisyonla elde edilebilir. Bu çalışmada, düzlem çerçeve sistemde plastik mafsallardaki dönmelerden oluşan iç kuvvetler SAP2000 programı ile elde edilmiştir. Ancak, birim dönme yüklemesi yerine, birim

dönmede çubuk uçlarında oluşacak ankastrelik uç kuvvetlerinin yük olarak verilmesi daha uygun olmaktadır. SAP2000 programı ile yapılan çözümde, ankastrelik uç kuvvetleri doğrudan verilemediğinden, sözkonusu uç kuvvetleri ters işaretli düğüm noktası yükü olarak tanımlanır. Ancak bu durumda da ankastrelik uç momenti süperpozisyonlarında gözönüne alınmadığından plastik mafsallın bulunduğu çubuğun uç kuvvetleri doğru olarak elde edilememekte, bu çubuklarda bir uç momenti düzeltmesi yapılması gerekmektedir. Bu işlem programdan elde edilen uç kuvvetlerine, birim dönmeden meydana gelen ankastrelik uç kuvvetlerinin cebrik olarak ilave edilmesi suretiyle kolayca yapılabilir.



Şekil 2.1 : Birim mafsall dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri [4].

Birinci plastik mafsallın oluştuğu kesite ait akma koşulu,

$$M_{\Phi_1=1} * \Phi_1 + M_{\Phi=0} = 0 \quad (2.4)$$

olmalıdır. Bu koşul yazılarak düzlem çerçeve sistemde birinci plastik mafsallın oluştuğu kesitteki mafsall dönmesi (Φ_1) bulunur. Bulunan birinci plastik mafsallın dönmesi (Φ_1) ile plastik mafsallın birim dönmesinden elde edilen eğilme moment diyagramı ($M_{\Phi_1=1}$) çarpılarak, düzlem çerçeve sistemin plastik mafsall oluşmadan önceki hali için yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı ($M_{\Delta\rho=1}$) ile aşağıda belirtildiği gibi toplanarak elde edilen moment diyagramı çizilir.

$$M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1} \quad (2.5)$$

Birim yüklerden ve bir mafsallı sistemin birim mafsall dönmesinden oluşan moment diyagramları ile o adıma kadar olan toplam yük parametresinden elde edilen moment

diyagramları üzerinde yeni bir araştırma yapılarak ikinci plastik mafsalin oluştuğu kesit, yük parametresi ($\Delta\rho_2$) ile birlikte aşağıdaki ifade ile bulunur.

$$|M_{\Delta\rho_1} + \Delta\rho_2 * (M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1})| = |M_p| \quad (2.6)$$

Bulunan yeni yük parametresinden oluşan eğilme momentleri ile önceki adımda elde edilen toplam yük parametresinden oluşan eğilme momentleri aşağıda gösterildiği gibi toplanarak ikinci adımdaki moment diyagramı çizilir.

$$M_{\Delta\rho_1} + \Delta\rho_2 * (M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1}) \quad (2.7)$$

Yük artımının herhangi bir adımında plastik mafsallardan oluşan tüm kesitlerde ($i=1, n$) akma koşullarının sağlanması için,

$$\sum_{j=1}^n (M_{i,\Phi_j=1} * \Phi_j) + M_{i,\Phi=0} = 0 \quad (2.8)$$

olmalıdır. Burada (i) plastik mafsalin olduğu kesit numarasını, (n) ise o adıma kadar oluşan toplam plastik mafsallardan oluştuğu kesit numarasını göstermektedir. Her plastik mafsallardan oluşumundan sonra, mafsallara yapılan birim dönme yüklemelerinden elde edilen eğilme momentlerine ve plastik mafsallardan dönmeleri sıfır iken elde edilen eğilme momentlerine bağlı olarak yazılan yukarıdaki akma koşulları, plastik mafsallardan dönmeleri cinsinden doğrusal bir denklem sistemi vermektedir. Söz konusu denklem sisteminin çözülmesi ile akma koşullarını sağlayan plastik mafsallardan dönmeleri elde edilir.

2.2.1.3 Hesabın sonlandırılması

Herhangi bir yük artımı adımında oluşan plastik mafsallar nedeniyle sistem kısmen veya tamamen mekanizma durumuna geldiğinde birinci mertbe limit yüke ulaşılır ve hesaba son verilir.

2.2.2 İkinci mertbe limit yükün hesabı için yük artımı yönteminin esasları

2.2.2.1 İkinci mertbe limit yükün hesabında yük parametresinin bulunması

İkinci mertbe limit yükün hesabı için önerilen yöntem birinci mertbe limit yükün hesabında geçerli hesap adımlarını içermektedir. Buna ek olarak bazı kısımlarda (kolonun dahil olduğu hesaplarda) farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar aşağıda

detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Yine bu yük artımı yönteminde belirtilenler tüm düzlem çerçeve sistemlerin ikinci mertbe limit yükü hesabında geçerlidir.

İlk adımda düzlem çerçeve sistemin plastik mafsallardan oluşmadan önceki hali için yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı sistemdeki düşey ve yatay yükler için ayrı ayrı olmak üzere iki şekilde elde edilir ($M_{\Delta\rho=1}$). Elde edilen moment diyagramlarına göre plastik mafsallardan oluşabilecek her kesit için aşağıda kolon ve kiriş için verilen ifadelerle araştırma yapılarak, en küçük yük parametresi ile ilk plastik kesitin yeri ve oluştuğu yük parametresi bulunur. Yük parametresinin tayini için,

Kolonlarda,

$$|M_d + M_{y,\Delta\rho=1} * \Delta\rho_1| + a * |N_d + N_{y,\Delta\rho=1} * \Delta\rho_1| = |M_p| \quad (2.9)$$

Kirişlerde,

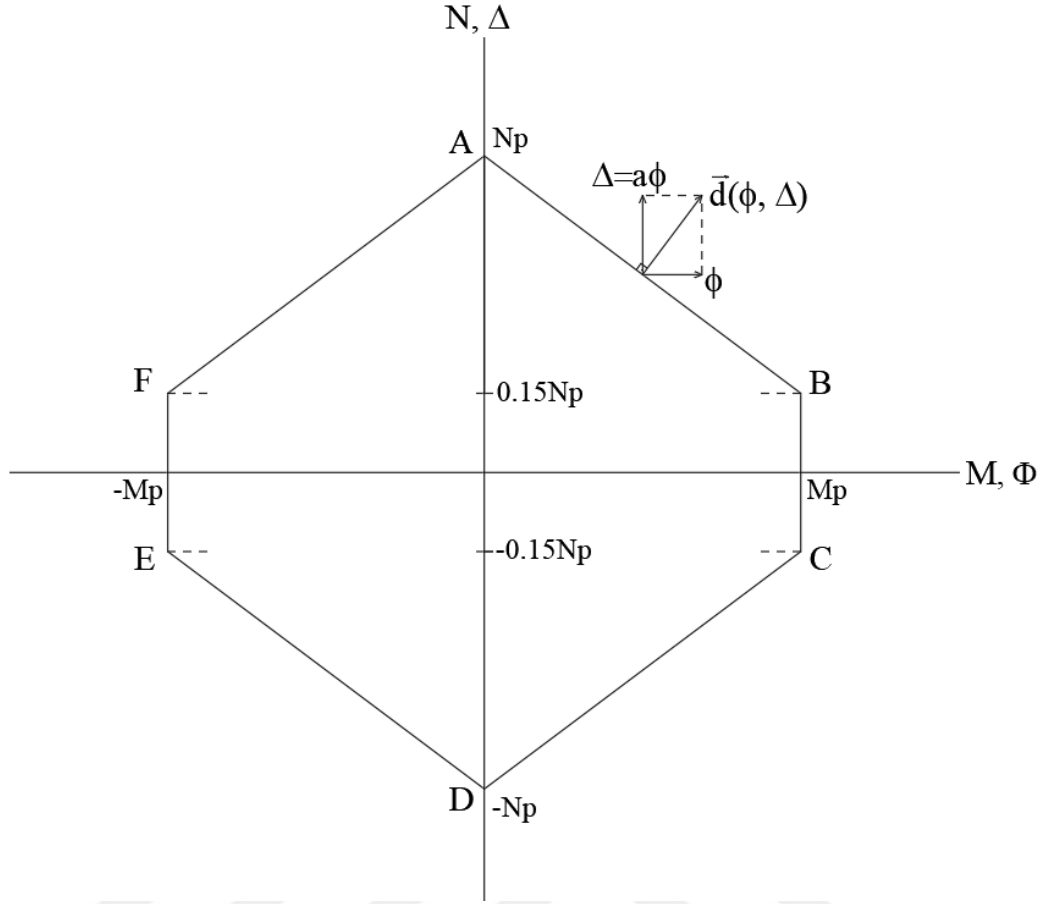
$$|M_d + M_{y,\Delta\rho=1} * \Delta\rho_1| = |M_p| \quad (2.10)$$

ifadeleri kullanılır.

Bulunan yük parametresi ile sistemin yatay yükleme için yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı ($M_{\Delta\rho=1}$) çarpılarak, sistemin düşey yükleme için yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı toplanarak ilk adımdaki eğilme moment diyagramı oluşturulur.

2.2.2.2 Akma koşullarının yazılması ve bir sonraki yük parametresinin elde edilmesi

Plastik mafsallardan oluşmayan sistem için yine SAP2000 programında ankastrelik uç kuvvetleri ters işaretli halleriyle birlikte tanımlanır. Buna ek olarak kolonlarda SAP2000 programında P-Delta kuvvet yükleme kullanılarak oluşan normal kuvvetler için yük tanımlaması yapılır. Bu yüklemeler sonucunda çözüm yapılarak plastik mafsallardan oluşmayan sistemden oluşan eğilme moment diyagramı elde edilir. SAP2000 programında yine ankastrelik uç momenti süperpozisyonlarında gözönüne alınmadığından plastik mafsallardan bulunduğu çubuğun uç kuvvetleri doğru olarak elde edilemediği için bu çubuklarda bir uç momenti düzeltmesi yapılır. Birim dönmeden meydana gelen ankastrelik uç kuvvetlerinin ilave edilmesi ile düzeltme gerçekleştirilir.



Şekil 2.2 : İdealleştirilmiş akma eğrisi [1].

Akma koşulu için yazılan denklem takımlarındaki a değeri malzeme ve kesit karakteristiklerine bağlı sabit bir katsayı olup Şekil 2.2’de verilen doğrusallaştırılmış M-N karşılıklı etki diyagramından elde edilir.

Birinci plastik mafsalsın oluştuğu kesite ait akma koşulu,

Kolonlarda,

$$M_{\Phi_1=1} + a * N * \Phi_1 + M_{\Phi=0} = 0 \quad (2.11)$$

Kirişlerde,

$$M = M_{\Phi_1=1} * \Phi_1 + M_{\Phi=0} = 0 \quad (2.12)$$

olmalıdır. Birinci plastik mafsalsın dönmesi (Φ_1) ile plastik mafsalsın birim dönmesinden elde edilen eğilme moment diyagramı ($M_{\Phi_1=1}$) çarpılarak, düzlem çerçeve sistemin plastik mafsals oluşmadan önceki hali için yatay yüklemenden dolayı yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı ($M_{y,\Delta\rho=1}$) ile

aşağıdaki ifadede belirtildiği gibi toplanarak elde edilen eğilme momenti diyagramı çizilir.

$$M_d + M_{y,\Delta\rho=1} + M_{\Phi 1} \quad (2.13)$$

Yukarıda birinci plastik mafsala veya plastik kesite ait akma koşulu kolonlar ve kirişler için ayrı ayrı genelleştirilirse,

Kolonlarda genel akma koşulu ($i=1, n$),

$$\sum_{j=1}^n (M_{i,\Phi_j=1} + a N_{i,\Phi_j=1}) * \Phi_j + (M_{i,\Phi=0} + a N_{i,\Phi=0}) = 0 \quad (2.14)$$

Kirişlerde genel akma koşulu ($i=1, n$),

$$\sum_{j=1}^n (M_{i,\Phi_j=1} * \Phi_j) + M_{i,\Phi=0} = 0 \quad (2.15)$$

şeklinde verilebilir.

Herhangi bir yük artımı adımımda, akma koşullarını sağlayan (Φ) plastik dönmeleri bulunduktan sonra, sistemin herhangi bir k kesitindeki toplam eğilme momenti değeri ise,

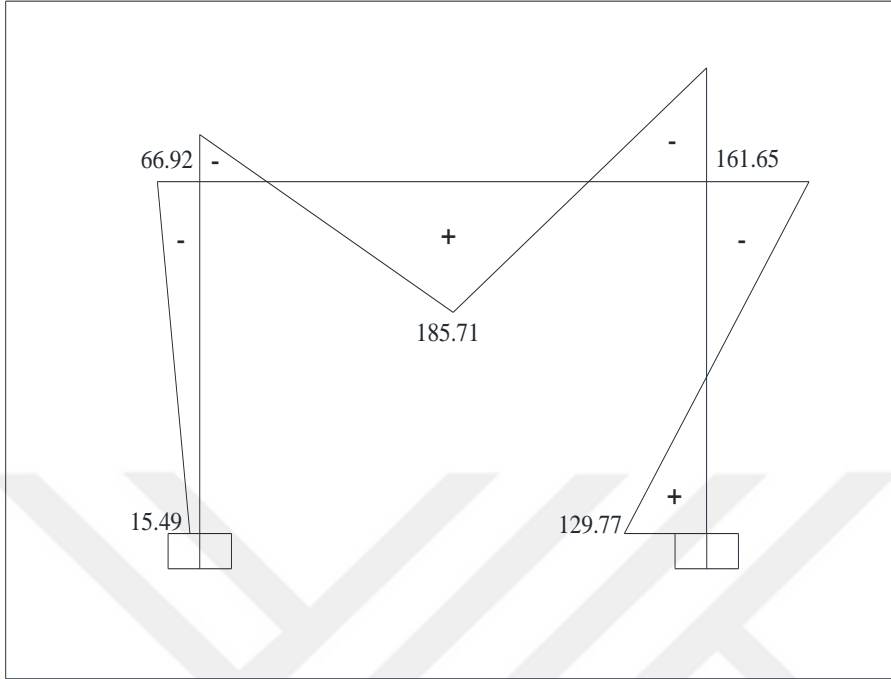
$$M_k = M_{d,k} + M_{y,k,\Delta\rho=1} + \sum_{j=1}^n (M_{k,\Phi_j=1} * \Phi_j) \quad (2.16)$$

süperpozisyon ifadesi ile hesaplanabilir.

2.2.2.3 Hesabın sonlandırılması

Herhangi bir yük artımı adımımda bulunan plastik mafsal dönmeleri, bir önceki adımdakilerle ters işaretli ise sistemin ikinci mertbe limit yüke ulaştığı anlaşılır ve hesaba son verilir.

kesitlerdeki eğilme momentleri ($M_{\Delta\rho=1}$) elde edilmiştir. Söz konusu değerler Şekil 3.2’de verilmiştir.



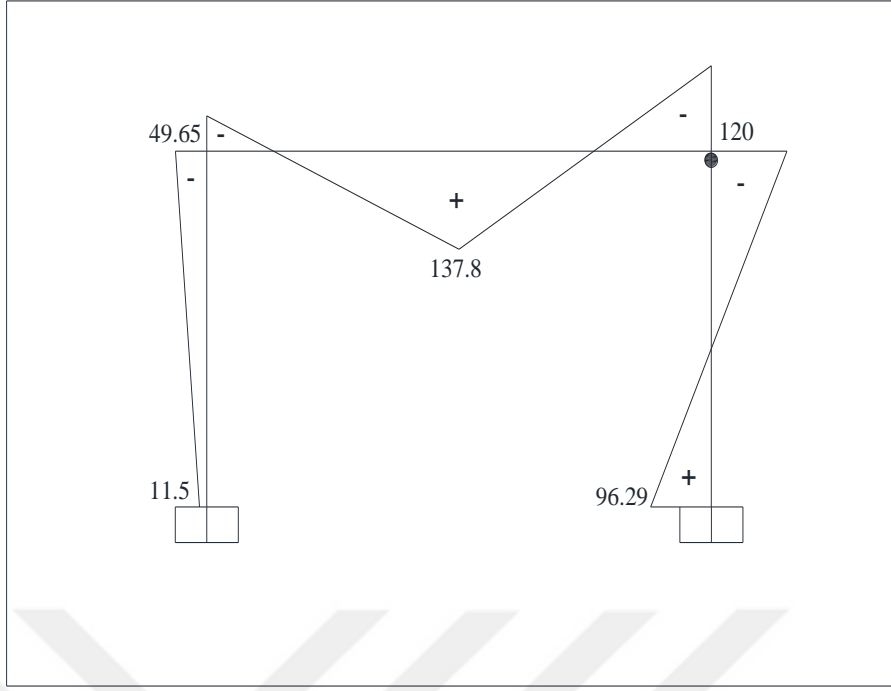
Şekil 3.2 : Yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı.

Verilen yönteme göre birinci plastik mafsalsal sağ kolonun üst ucunda oluşmakta ve bunu oluşturan yük parametresi,

$$161.65 \Delta\rho_1 = 120$$

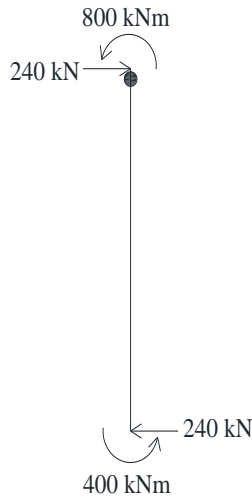
$$\Delta\rho_1 = 0.742$$

olarak elde edilmiştir. Bu adımdaki eğilme momentleri diyagramı ($M_{\Delta\rho=0.742}$) Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3 : Birinci adımda elde edilen yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.

Birinci plastik mafsalsal için SAP2000 programı ile yapılan çözümde, ankastrelik uç kuvvetleri doğrudan verilemediğinden, söz konusu uç kuvvetleri ters işaretli düğüm noktası yükü olarak Şekil 3.4'teki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.4 : Birinci plastik mafsalsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Söz konusu yüklemelerin SAP2000 programına nasıl girileceği, sağ kolon üst ucu için Şekil 3.5'te, sağ kolon alt ucu için Şekil 3.6'da verilmiştir. SAP2000 programı ile yapılan çözümde Şekil 3.7'de verilen eğilme momenti diyagramı elde edilmiştir.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	240	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	-800	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.5 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	-240	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	-400	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

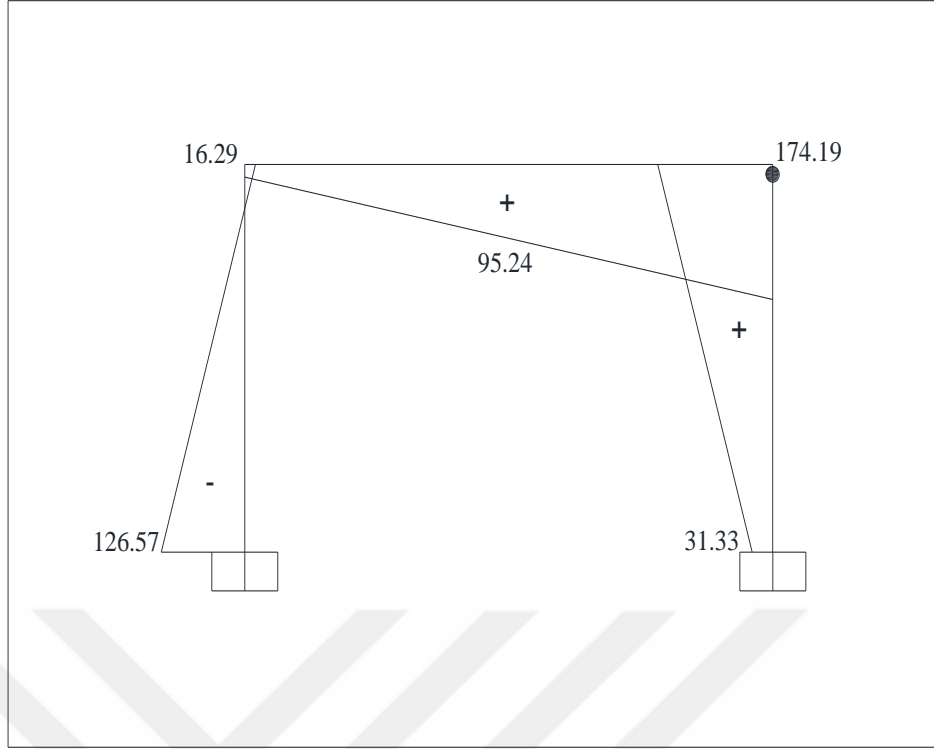
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.6 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.7 : Birinci plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

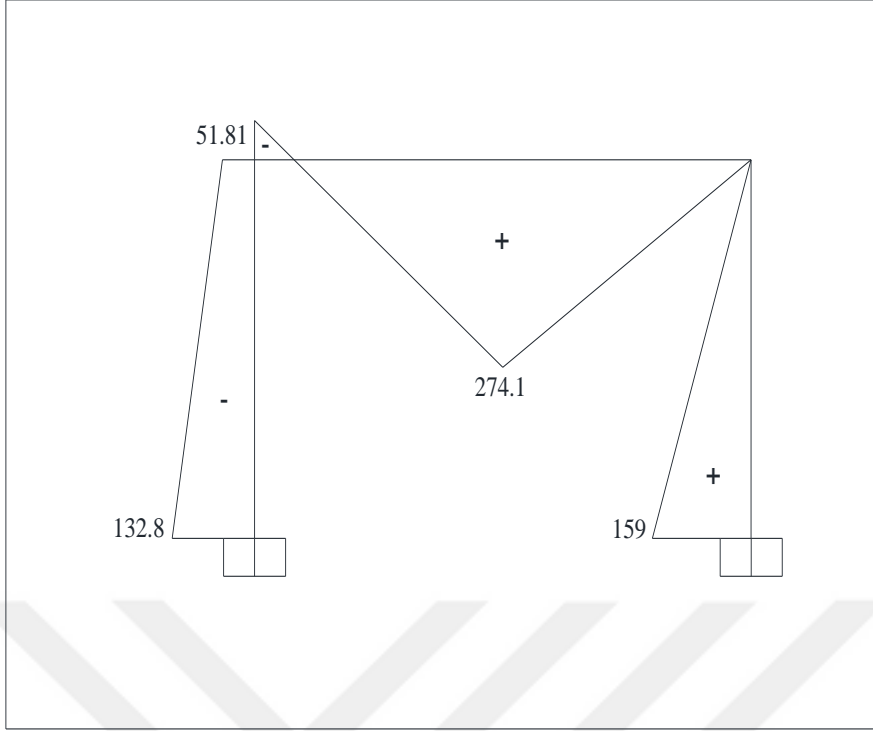
Birinci plastik mafsalsın oluştuğu kesit için yüklemeler yapıldığında Şekil 3.7’de görüldüğü gibi mafsalsın birim dönmesinden oluşan eğilme momentleri ($M_{\Phi_1=1}$) elde edilmiştir. Söz konusu mafsaldaki akma koşulu, Şekil 3.7’de verilen sağ kolonun üst ucundaki plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$174.19 \Phi_1 - 161.65 = 0$$

$$\Phi_1 = 0.928$$

olarak elde edilmiştir.

Bir sonraki plastik mafsalsı oluşturan yük parametresinin hesabı için birim yük parametresinden ve plastik mafsals dönmesinden meydana gelen moment diyagramları toplanarak Şekil 3.8 elde edilmiştir.



Şekil 3.8 : Birinci plastik mafsalın dönmesinden oluşan moment diyagramı.

Sistemin yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı ile elde edilen dönmeden dolayı oluşan moment değerleri toplanarak Şekil 3.8'deki moment diyagramı oluşturulur ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=0.928}$).

İkinci plastik mafsalı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

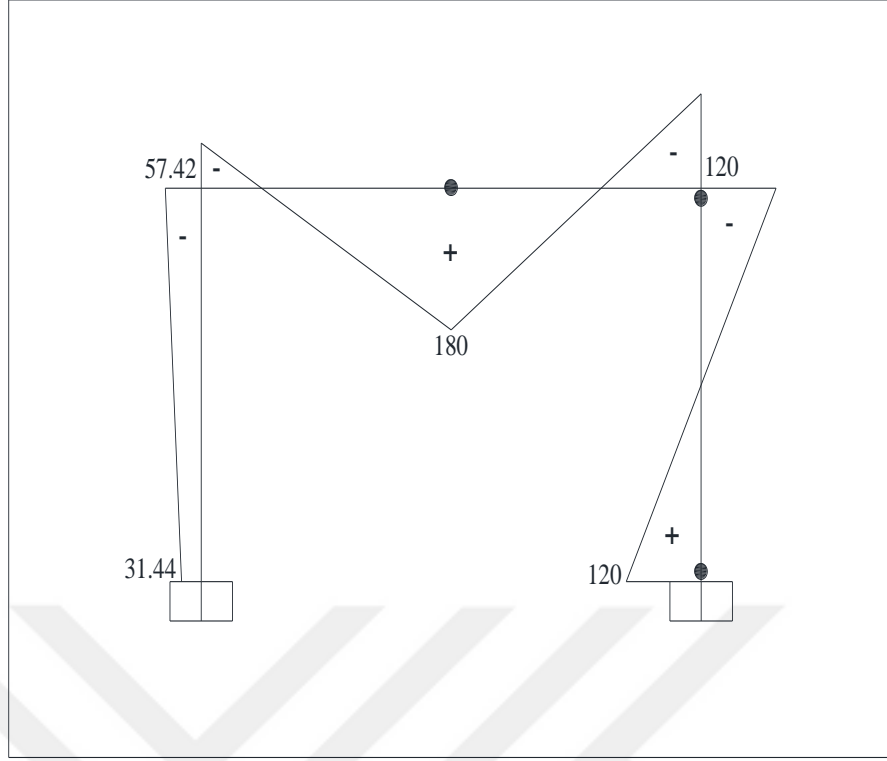
$$137.8 + 274.1 \Delta\rho_2 = 180$$

$$\Delta\rho_2 = 0.15$$

$$96.29 + 159 \Delta\rho_2 = 120$$

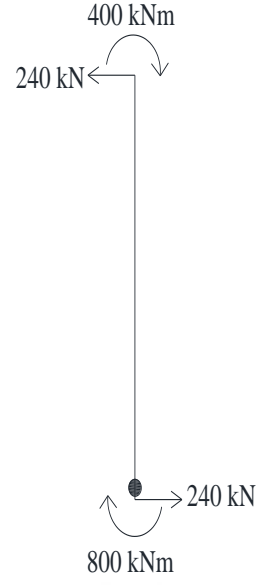
$$\Delta\rho_2 = 0.15$$

şeklinde hesaplanmıştır. Sistemin iki ayrı kritik kesiti için aynı yük artımları bulunduğundan söz konusu iki kesit aynı anda plastikleşmektedir. Bu kesitler, sağ kolonun alt ucu ve kirişin orta kesitidir. Bu durumdaki limit yük parametresine karşılık gelen eğilme momenti diyagramı Şekil 3.9' da verilmiştir ($M_{\Delta\rho=0.742} + 0.15 [M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=0.928}]$).



Şekil 3.9 : İkinci adım sonunda elde edilen moment diyagramı.

Yük artımına devam edildiğinde, akma koşullarının plastik mafsalları oluşan üç noktadaki dönmelere bağlı yazılması gerekmektedir. Bunun için aynı anda plastikleşen iki kesitin birim dönmelerinden oluşan eğilme momentlerine ihtiyaç vardır. Sağ kolonun alt ucu için ankastrelik uç kuvvetleri Şekil 3.10'da verilmiştir. Bu yüklemeler SAP2000 programında Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Diğer kesit için kirişin orta noktasında oluşan plastik mafsalları ankastrelik uç kuvvetleri Şekil 3.14'teki gibi olup, SAP2000 programında Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'daki yüklemeler sisteme verilmiştir. Bu iki plastik mafsalları dönmesi ile oluşan eğilme momentleri diyagramları Şekil 3.13 ($M_{\phi_2=1}$) ve Şekil 3.17 ($M_{\phi_3=1}$) şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 3.10 : Kolon sağ alt ucundaki plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	-240	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	400	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.11 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 240 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 800 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

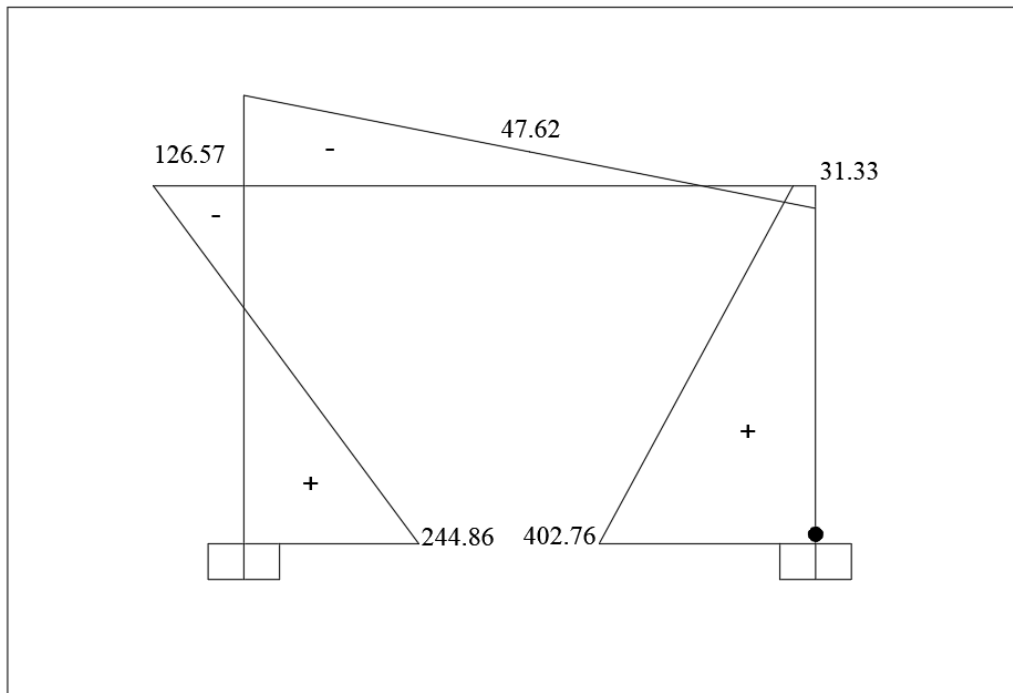
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.12 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.13 : Sağ kolon alt ucundaki plastik mafsalmın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.



Şekil 3.14 : Kirişin orta noktasındaki plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelük uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces [X]

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	0	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	375	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	-1000	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.15 : Kiriş orta noktası için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 0 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: -375 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -500 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

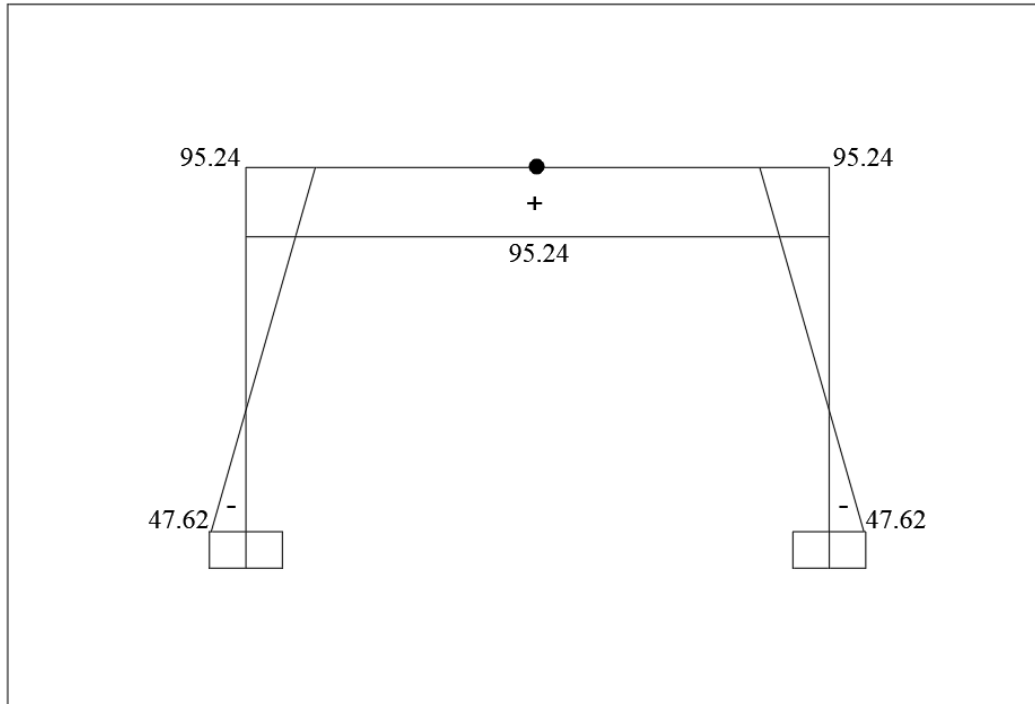
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.16 : Kiriş sağ ucu için yüklemeler.



Şekil 3.17 : Kirişteki plastik mafsalmın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

Sistemin son durumundaki akma koşulları ve akma koşullarını sağlayan dönme değerleri de,

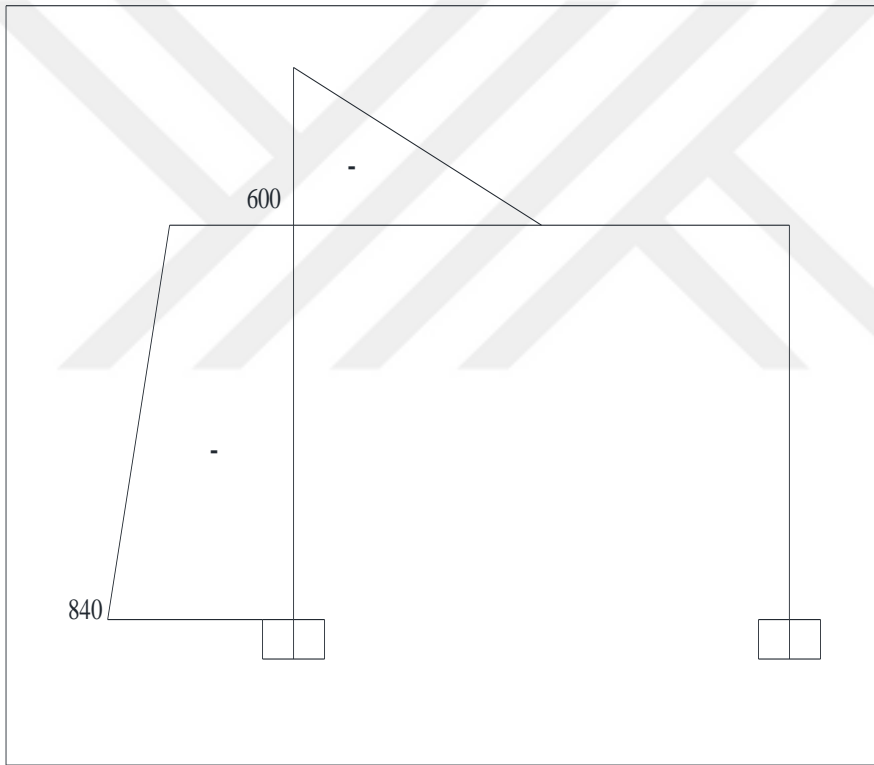
$$174.19 \Phi_1 + 31.33 \Phi_2 + 95.24 \Phi_3 - 161.65 = 0$$

$$31.33 \Phi_1 + 402.76 \Phi_2 - 47.62 \Phi_3 + 129.77 = 0$$

$$95.24 \Phi_1 - 47.62 \Phi_2 + 95.24 \Phi_3 + 185.71 = 0$$

$$\Phi_1 = +6.303; \Phi_2 = -1.901; \Phi_3 = -9.202$$

şeklinde elde edilmiştir. Sistemi mekanizma durumuna getiren yük parametresinin değeri Şekil 3.18’de verilen eğilme momenti diyagramı ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+6.303} + M_{\Phi_2=-1.901} + M_{\Phi_3=-9.202}$) üzerinde araştırma yapılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.18 : Toplam dönmelerden oluşan moment diyagramı.

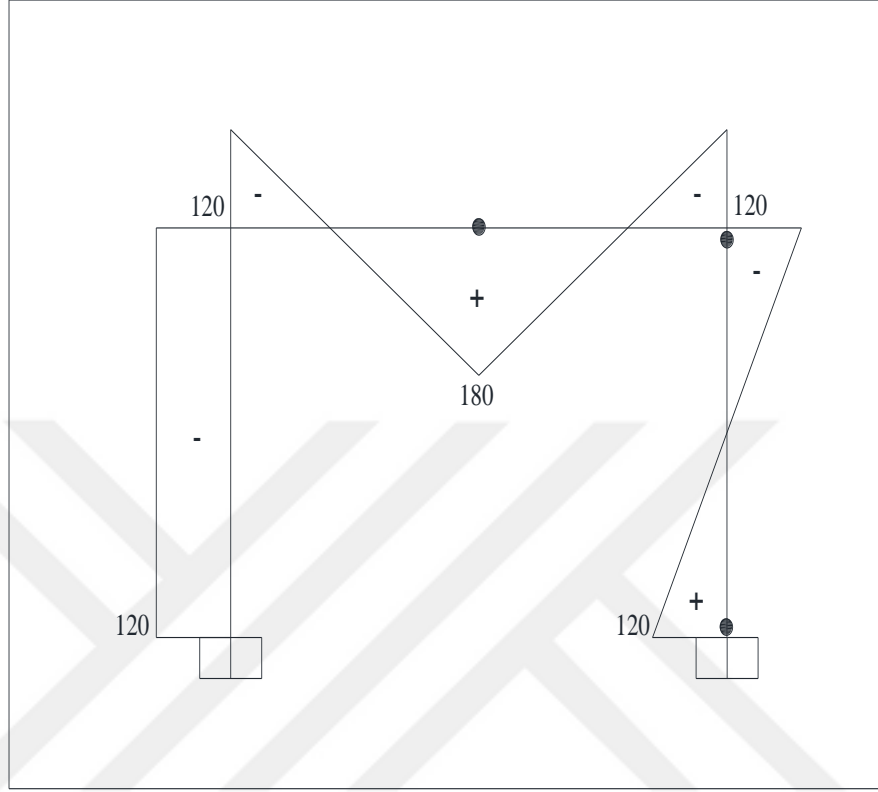
$$-57.42 - 600 \Delta\rho = -120$$

$$\Delta\rho = 0.104$$

$$-31.44 - 840 \Delta\rho = -120$$

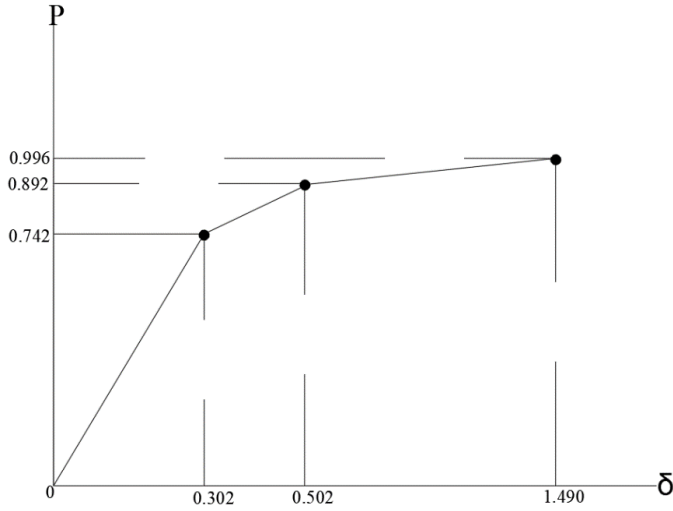
$$\Delta\rho = 0.105$$

Sistem dördüncü plastik mafsal oluştuğu anda birinci merteye limit yüke ulaşmaktadır. Birinci merteye limit yüke karşı gelen geometrik uygunluk koşullarından son oluşan plastik mafsalın dönmesi sıfırdır.



Şekil 3.19 : Limit yüke karşı gelen moment diyagramı.

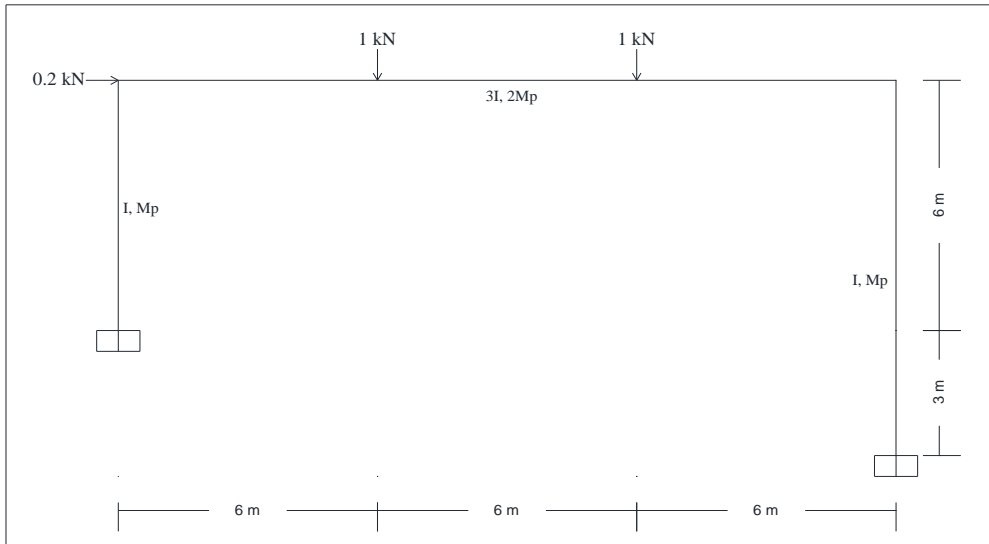
Sistemin birinci merteye limit yüke ulaştığı durumdaki moment diyagramı Şekil 3.19'da ($M_{\Delta\rho}=0.895 + 0.104 [M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi1}=+6.303 + M_{\Phi2}=-1.901 + M_{\Phi3}=-9.202]$) verilmiştir. Hesaplanan limit yüke karşılık gelen yerdeğişirmeler Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.

3.2 Tek Katlı ve Farklı Yükseklikte Kolonlardan Oluşan Tek Açıklıklı Çerçeve

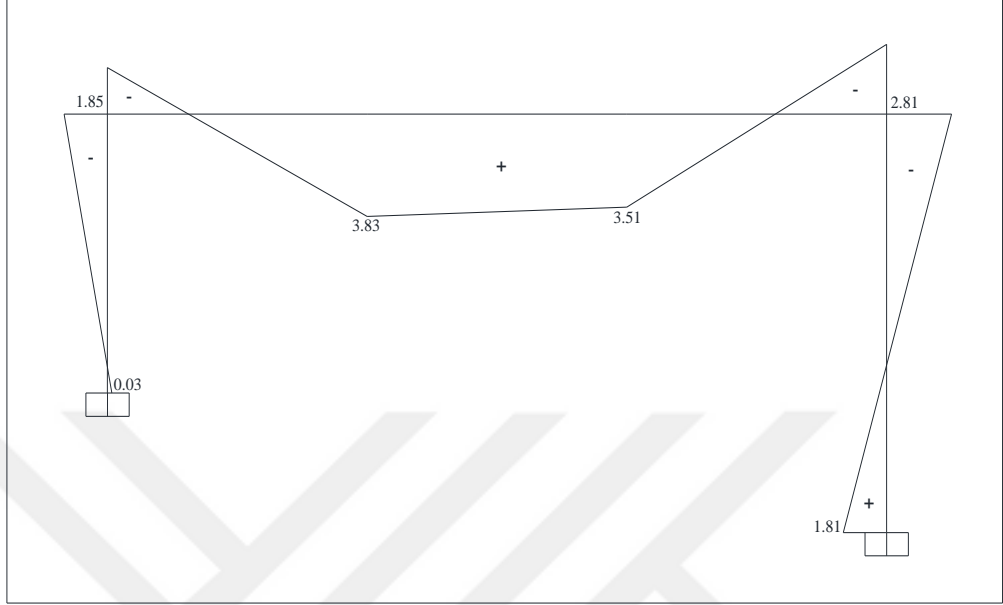
[2]'de verilen bu örnekte, tek katlı ve farklı yükseklikte kolonlardan oluşan tek açıklıklı çerçeve için birinci mertebe limit yük verilen yöntemle elde edilmiştir. Çerçeveye ait geometrik boyutlar, dış yükler, plastik moment değerleri ve kritik kesitler Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 : Tek katlı ve farklı yükseklikte kolonlardan oluşan tek açıklıklı çerçeve.

Plastik moment değeri; $M_p = 20 \text{ kNm}$, $EI = 1000 \text{ kNm}^2$

Birinci adımda çerçevenin dış yük parametresinin birim değeri için çözüm SAP2000 programı ile yapılmış ve kritik kesitlerdeki eğilme momentleri elde edilmiştir. Şekil 3.22'de ($M_{\Delta\rho=1}$) bu değerler gösterilmiştir.



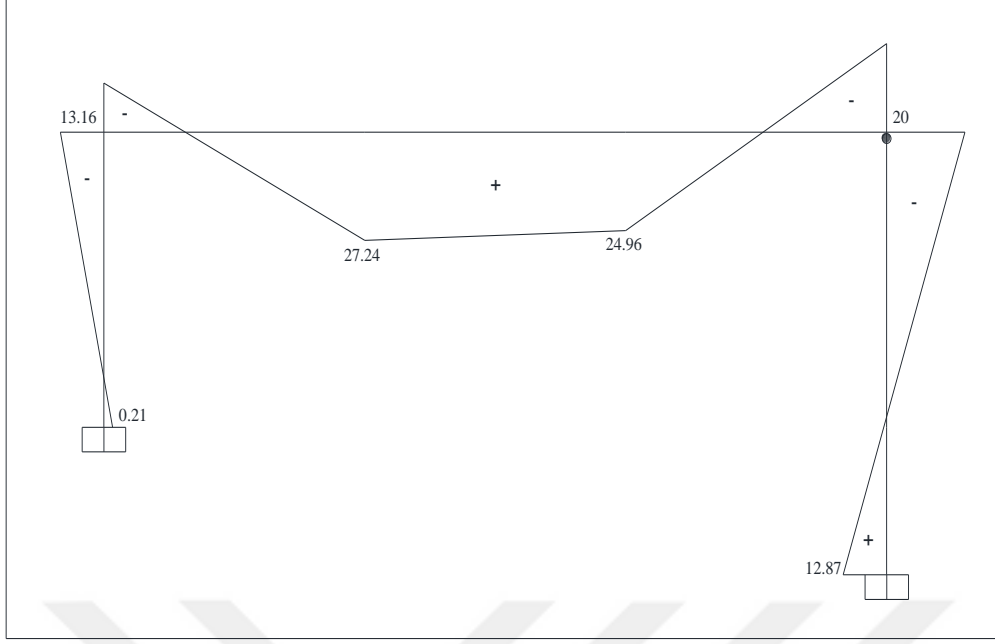
Şekil 3.22 : Yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı.

Birinci plastik mafsals sağ kolonun üst ucunda oluşmakta ve bunu oluşturan yük parametresi,

$$2.81 \Delta\rho_1 = 20$$

$$\Delta\rho_1 = 7.112$$

olarak elde edilmiştir. Bu adımdaki eğilme momenti diyagramı ($M_{\Delta\rho=7.112}$) Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23 : Birinci adımdaki yük parametresi ile elde edilen moment diyagramı.



Şekil 3.24 : Birinci plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Birinci plastik mafsalsın oluştuğu kesit için yüklemeler SAP2000 programında Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da verildiği gibi gerçekleştirilmiştir.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	74.074	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	-444.44	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.25 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	-74.074	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	-222.22	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

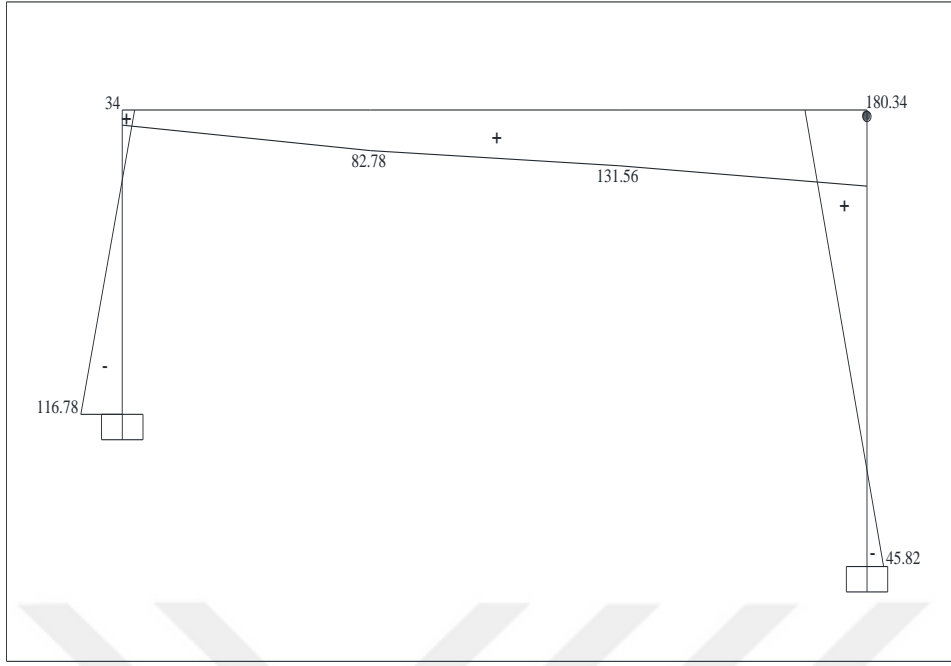
Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.26 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.

Birinci plastik mafsall için SAP2000 programı ile yapılan çözümde Şekil 3.27'de verilen eğilme momenti diyagramı ($M_{\phi 1=1}$) elde edilmiştir.



Şekil 3.27 : Birinci plastik mafsalmın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

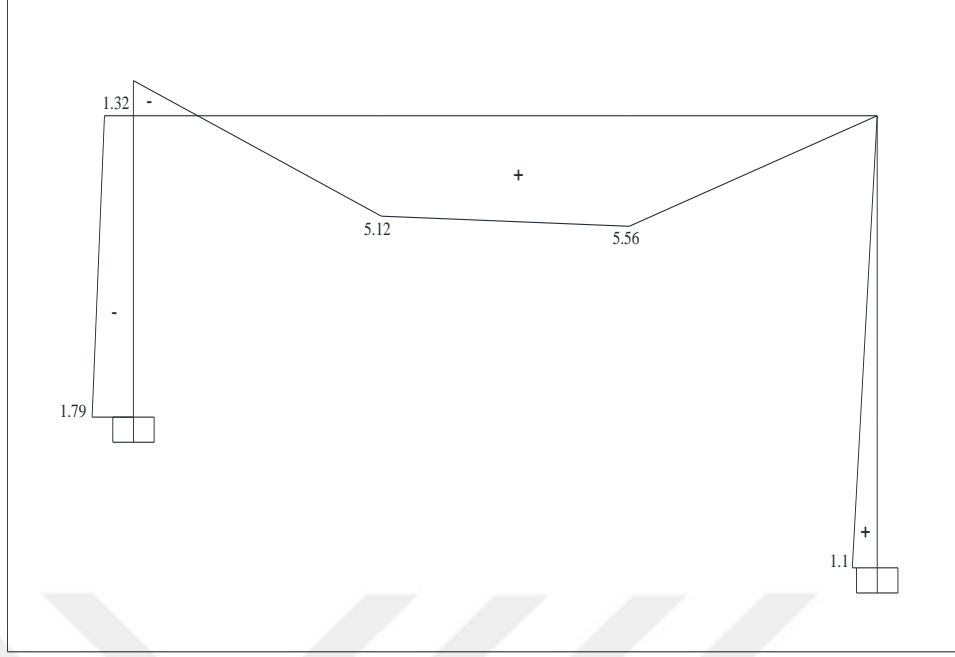
Birinci plastik mafsalmın oluştuğu kesit için akma koşulu, Şekil 3.27’de verilen sağ kolonun üst ucundaki plastik mafsalmın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$180.34 \Phi_1 - 2.81 = 0$$

$$\Phi_1 = 0.0156$$

olarak elde edilmiştir.

Bir sonraki plastik mafsalı oluşturan yük parametresinin hesabı için birim yük parametresinden meydana gelen ve plastik mafsalmın dönmesinden meydana gelen moment diyagramı toplanarak Şekil 3.28 elde edilmiştir ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=0.0156}$).



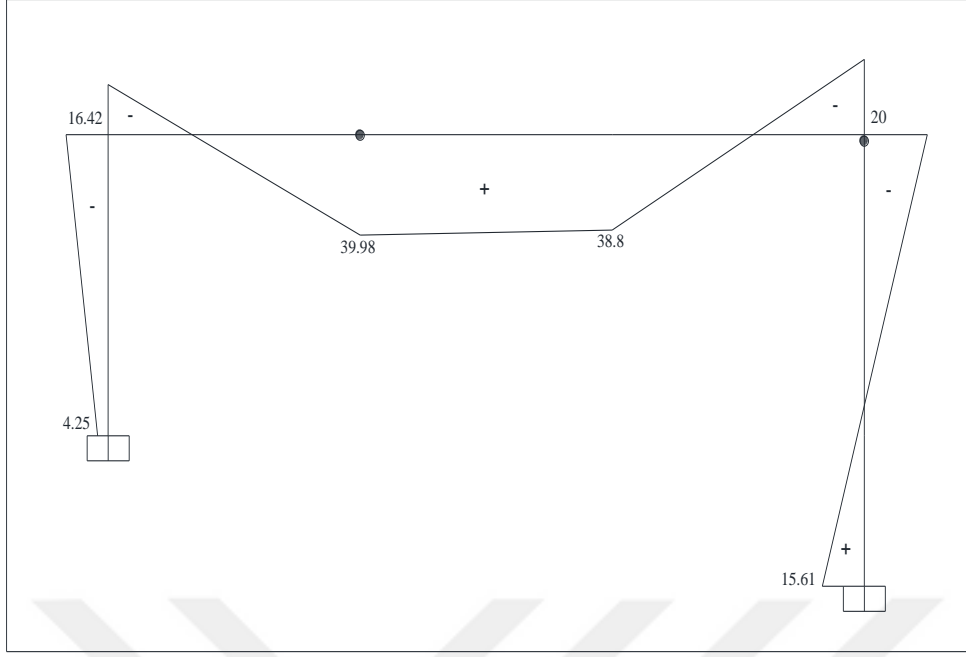
Şekil 3.28 : Birinci plastik mafsalin dönmesinden oluşan moment diyagramı.

İkinci plastik mafsalı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

$$27.24 + 5.12 \Delta\rho_2 = 40$$

$$\Delta\rho_2 = 2.49$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde ikinci plastik mafsal kirişte oluşmaktadır. Bu durumdaki eğilme momenti diyagramı Şekil 3.29'da verilmiştir ($M_{\Delta\rho=7.112} + 2.49 [M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=0.0156}]$).



Şekil 3.29 : İkinci adım sonunda elde edilen moment diyagramı.

Sistemde oluşan ikinci plastik mafsallık için yükleme yapılarak SAP2000 programı ile çözüme ulaşılmıştır. İkinci plastik mafsallık oluştuğu kesitte yüklemeler Şekil 3.30'da gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de verilmiştir.



Şekil 3.30 : İkinci plastik mafsallık birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 0 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: -500 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 2000 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.31 : Kiriş sol ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 0 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 500 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 1000 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

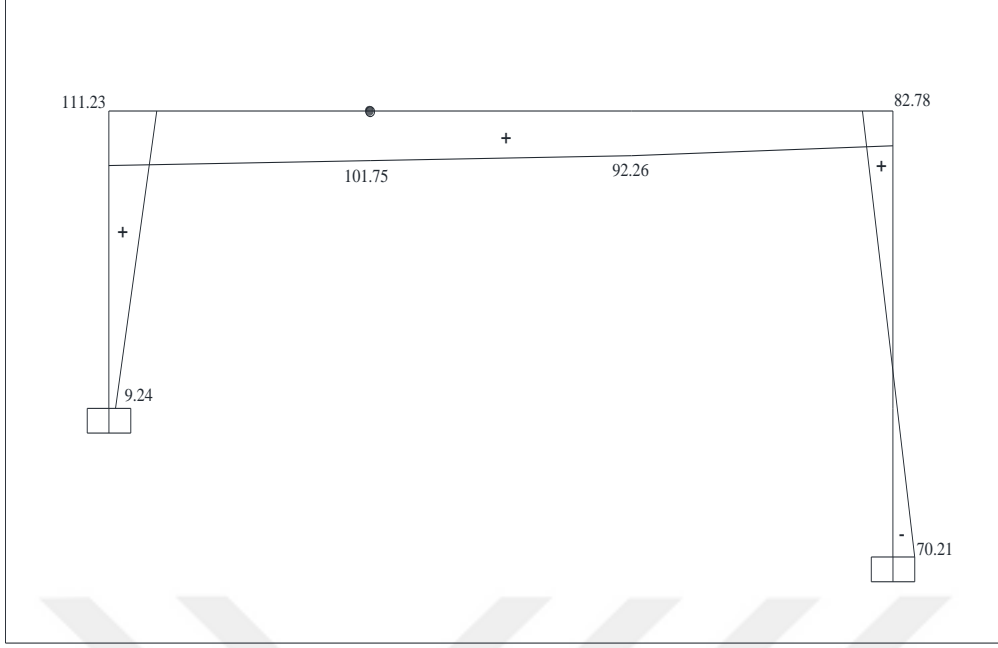
Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.32 : Kiriş sağ ucu için yüklemeler.

İkinci plastik mafsaldaki birim dönmesi için SAP2000’de yapılan yüklemeler sonucunda Şekil 3.33’te verilen eğilme momenti diyagramı ($M_{\phi_2=1}$) elde edilmiştir.



Şekil 3.33 : İkinci plastik mafsalsın birim dönmesi ile oluşan moment diyagramı.

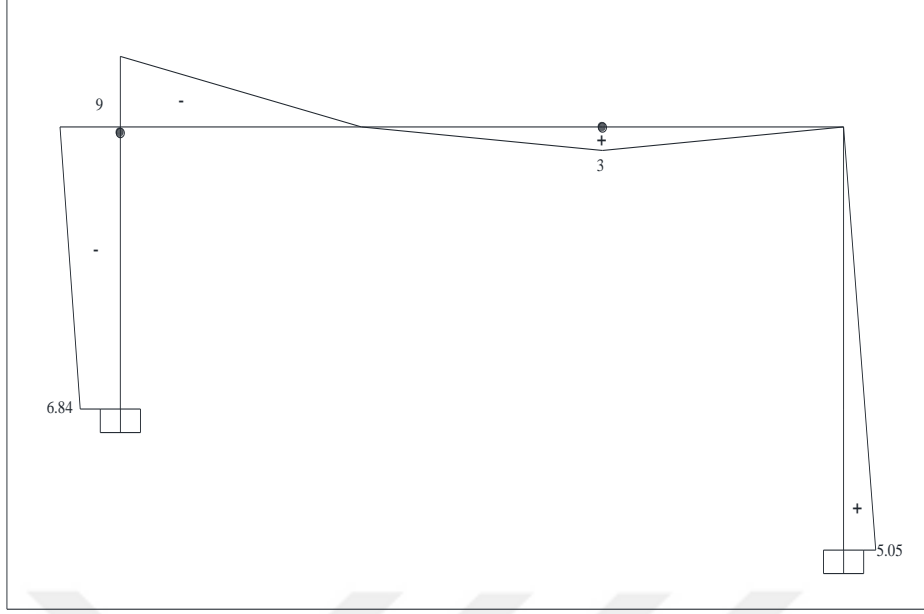
İkinci plastik mafsalsın oluştuğu kesit için akma koşulu plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$180.34 \Phi_1 + 82.78 \Phi_2 - 2.81 = 0$$

$$82.78 \Phi_1 + 101.75 \Phi_2 + 3.83 = 0$$

$$\Phi_1 = +0.05245; \Phi_2 = -0.08031$$

şeklinde elde edilmiştir. Sistemin birim yüklemesinden meydana gelen moment diyagramı ile elde edilen dönmelerden oluşan moment değerleri toplanarak Şekil 3.34 oluşturulmuştur ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+0.05245} + M_{\Phi_2=-0.08031}$).



Şekil 3.34 : Toplam dönmelerden oluşan moment diyagramı.

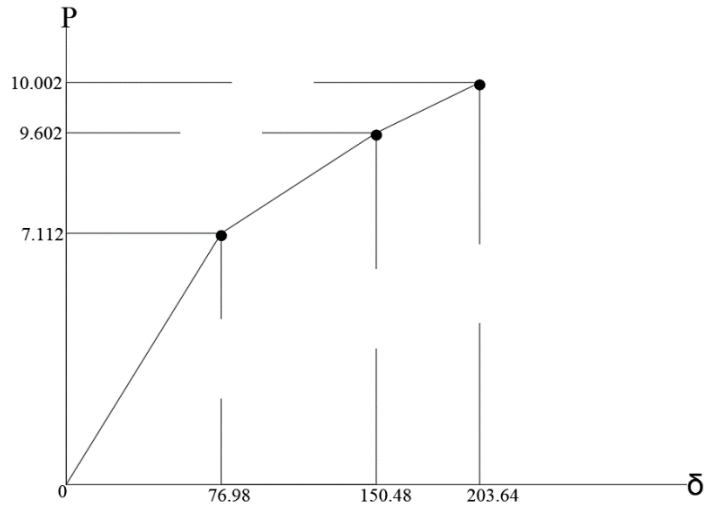
$$38.80 - 3 \Delta\rho = 40$$

$$\Delta\rho = 0.4$$

$$-16.42 - 9 \Delta\rho = -20$$

$$\Delta\rho = 0.4$$

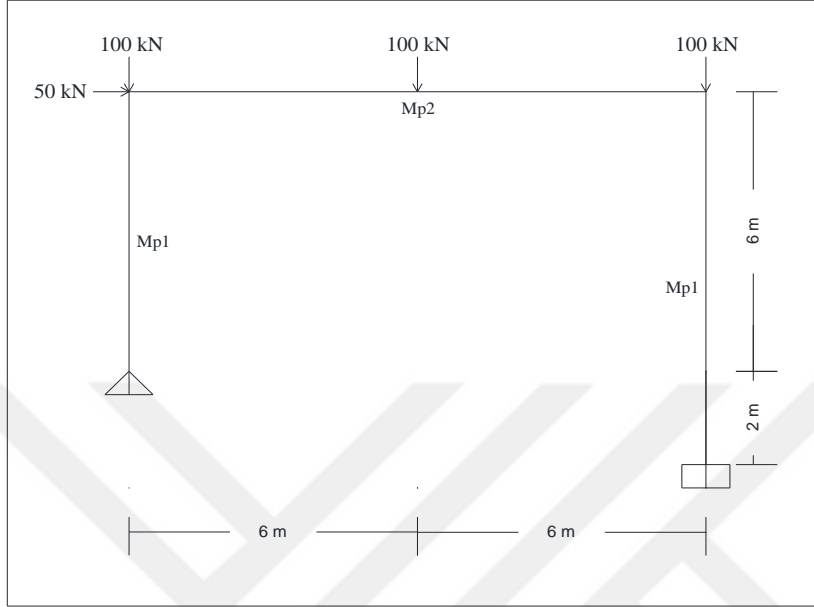
Sistemde sol kolonun üst ucunda ve kirişte Şekil 3.34’te görüldüğü gibi üçüncü ve dördüncü plastik mafsallar aynı anda oluşmaktadır. Sisteme ait elde edilen limit yüklere karşı gelen yerdeğiştirmeler Şekil 3.35’te gösterilmiştir.



Şekil 3.35 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.

3.3 Tek Katlı ve Farklı Mesnetlenen Kolonlardan Oluşan Tek Açıklıklı Çerçeve

[2]'de verilen örnekte incelenen sistemde, tek katlı ve farklı mesnetlenen kolonlardan oluşan tek açıklıklı çerçeve Şekil 3.36'da verilmiştir.

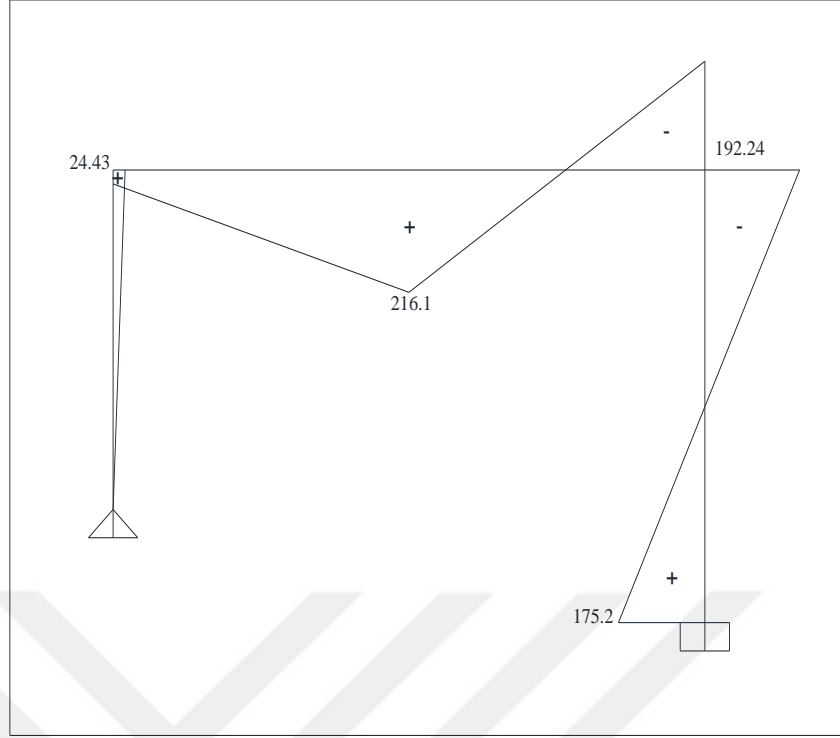


Şekil 3.36 : Tek katlı ve farklı mesnetlenen kolonlardan oluşan tek açıklıklı çerçeve.

Plastik moment değerleri; $M_{p(kolon)} = 325 \text{ kNm}$, $M_{p(kiriş)} = 515.6 \text{ kNm}$

$EI_{(kolon)} = 38346 \text{ kNm}^2 = EI_0$, $EI_{(kiriş)} = 101220 \text{ kNm}^2 = 2.64EI_0$

Sistemin dış yük parametresinin birim değeri için çözüm SAP2000 programı ile yapılmış ve kritik kesitlerdeki eğilme momentleri elde edilmiştir. Şekil 3.37'de bu değerler gösterilmiştir ($M_{\Delta\rho=1}$).

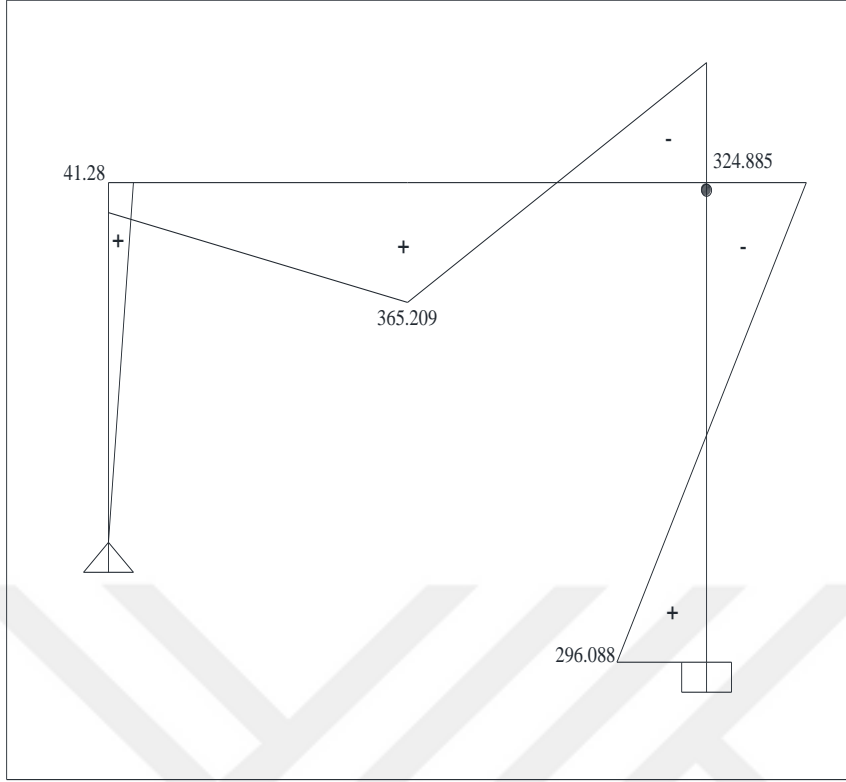


Şekil 3.37 : Yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı.

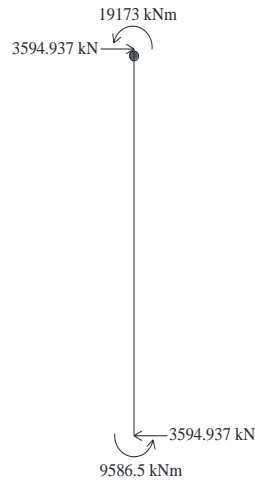
Birinci plastik mafsall sağ kolonun üst ucunda oluşmakta ve yük parametresi,
 $192.24 \Delta\rho_1 = 325$

$$\Delta\rho_1 = 1.69$$

olarak elde edilmiştir. Bu adımdaki eğilme momenti diyagramı Şekil 3.38'de verilmiştir ($M_{\Delta\rho=1.69}$).



Şekil 3.38 : Birinci yük parametresi ile elde edilen moment diyagramı.



Şekil 3.39 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Yüklemeler birinci plastik mafsalın olduğu kesit için SAP2000 programında Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Birinci plastik mafsal için SAP2000 programı ile yapılan çözümde Şekil 3.42’de verilen eğilme momenti diyagramı ($M_{\phi_1=1}$) elde edilmiştir.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	3594.937	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	-19173	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.40 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	-3594.937	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	-9586.5	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

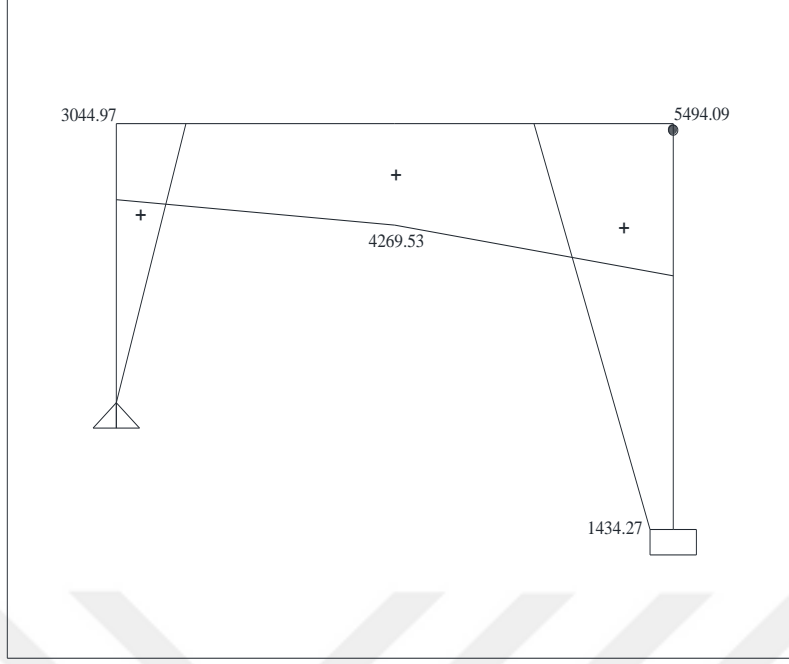
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.41 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.42 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

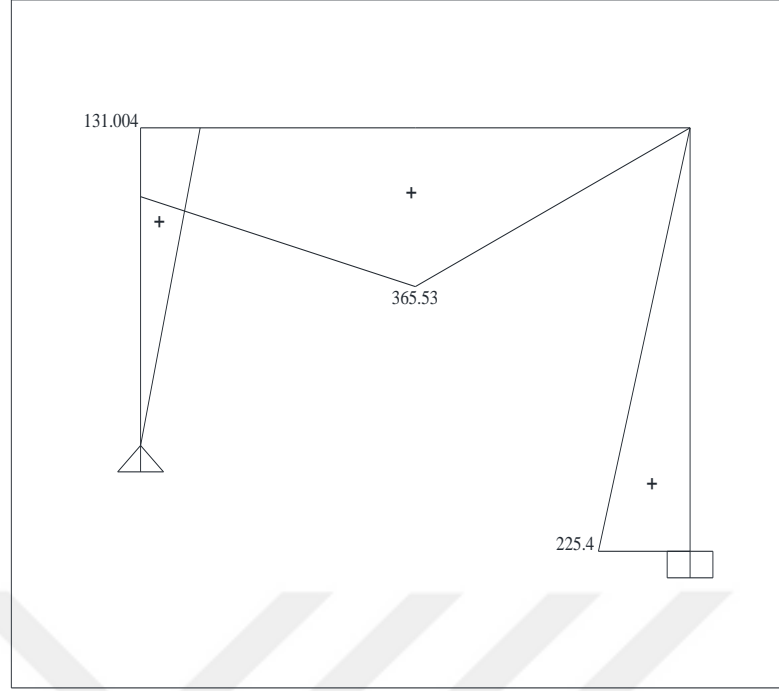
Birinci plastik mafsalın oluştuğu kesit için akma koşulu, Şekil 3.42’de verilen sağ kolonun üst ucundaki plastik mafsalın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$5494.09 \Phi_1 - 192.24 = 0$$

$$\Phi_1 = +0.035$$

olarak elde edilmiştir.

Bir sonraki plastik mafsalı oluşturan yük parametresinin hesabı için birim yük parametresinden meydana gelen ve plastik mafsal dönmesinden meydana gelen moment diyagramı toplanarak Şekil 3.43 elde edilmiştir ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=0.035}$).



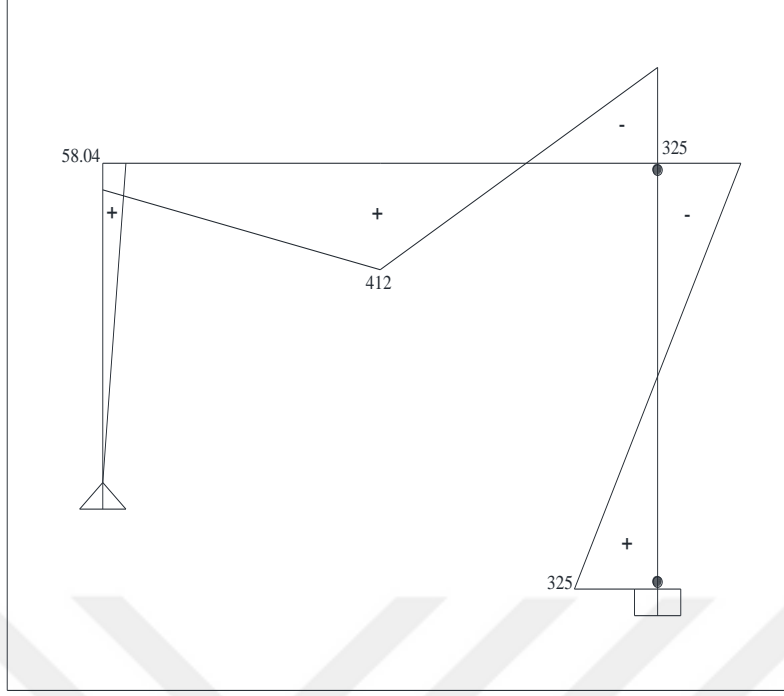
Şekil 3.43 : Birinci plastik mafsalsın dönmesinden oluşan moment diyagramı.

İkinci plastik mafsalı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

$$296.008 + 225.4 \Delta\rho_2 = 325$$

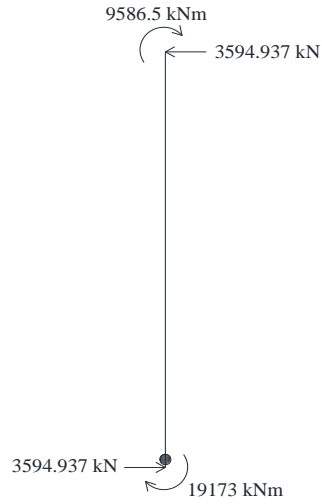
$$\Delta\rho_2 = 0.128$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde ikinci plastik mafsal sağ kolonun alt ucunda oluşmaktadır. Bu durumdaki eğilme momenti diyagramı Şekil 3.44'te verilmiştir ($M_{\Delta\rho=1.69} + 0.128 [M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+0.035}]$).



Şekil 3.44 : Limit yük parametresinden oluşan moment diyagramı.

Sistemde oluşan ikinci plastik mafsal için yükleme yapılarak SAP2000 programı ile çözüm elde edilmiştir. İkinci plastik mafsalın oluştuğu kesitte yüklemeler Şekil 3.45'te gösterildiği gibi yapılmıştır. SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de verildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.45 : İkinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	-3594.937	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	9586.5	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.46 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	3594.937	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	19173	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

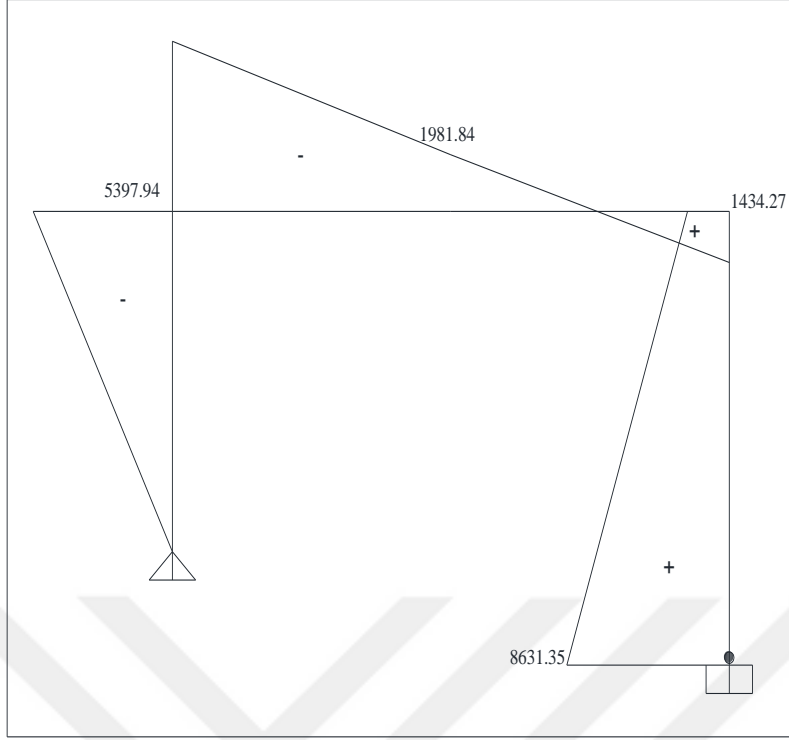
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.47 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.48 : İkinci plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

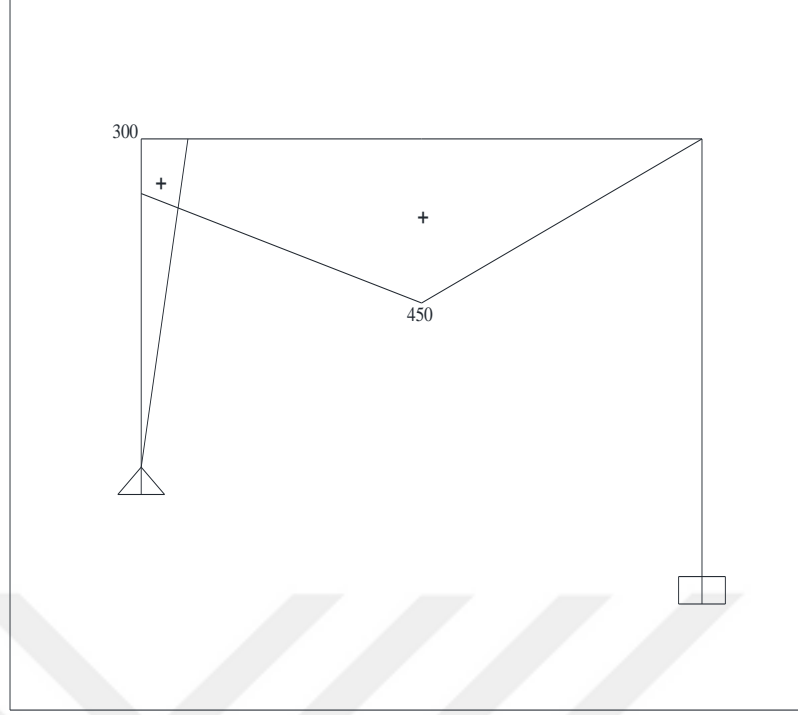
İkinci plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment değerleri ($M_{\Phi_2=1}$) Şekil 3.48'de gösterilmiştir. İkinci plastik mafsalsın oluştuğu kesit için akma koşulu plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$5494.09 \Phi_1 + 1434.27 \Phi_2 - 192.24 = 0$$

$$1434.27 \Phi_1 + 8631.35 \Phi_2 + 175.2 = 0$$

$$\Phi_1 = +0.042; \Phi_2 = -0.027$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu dönmelerden oluşan moment değerleri Şekil 3.49'da verilmiştir ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+0.042} + M_{\Phi_2=-0.027}$).



Şekil 3.49 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.

Üçüncü plastik mafsallı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

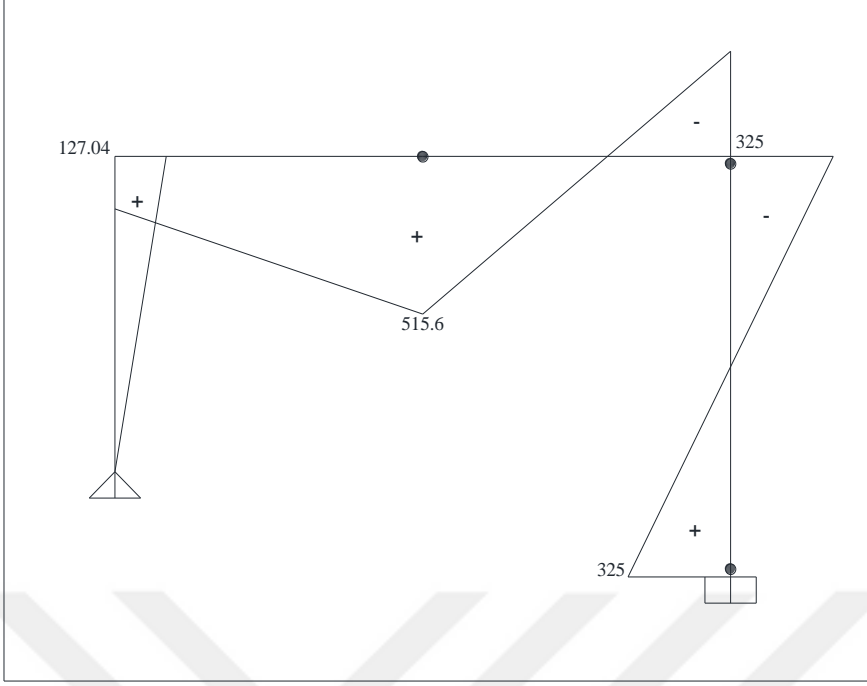
$$412 - 450 \Delta\rho_3 = 515.6$$

$$\Delta\rho_3 = 0.23$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde kirişin orta noktasında Şekil 3.50'de görüldüğü gibi

üçüncü plastik mafsallı oluşmuştur ($M_{\Delta\rho=1.69} + 0.128 [M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+0.035}] +$

$0.23[M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+0.042} + M_{\Phi_2=-0.027}]$).



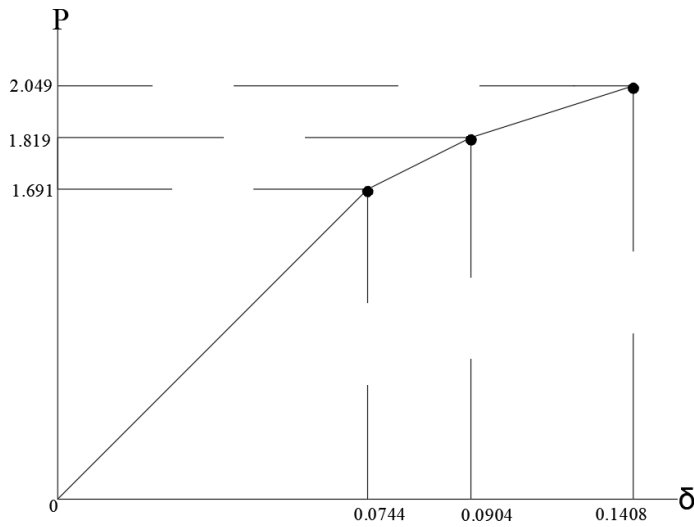
Şekil 3.50 : Toplam limit yük parametresinden elde edilen moment diyagramı.

Üçüncü plastik mafsalm oluşumundan sonra, sistem mekanizma durumuna geldiğinden limit yük parametresi,

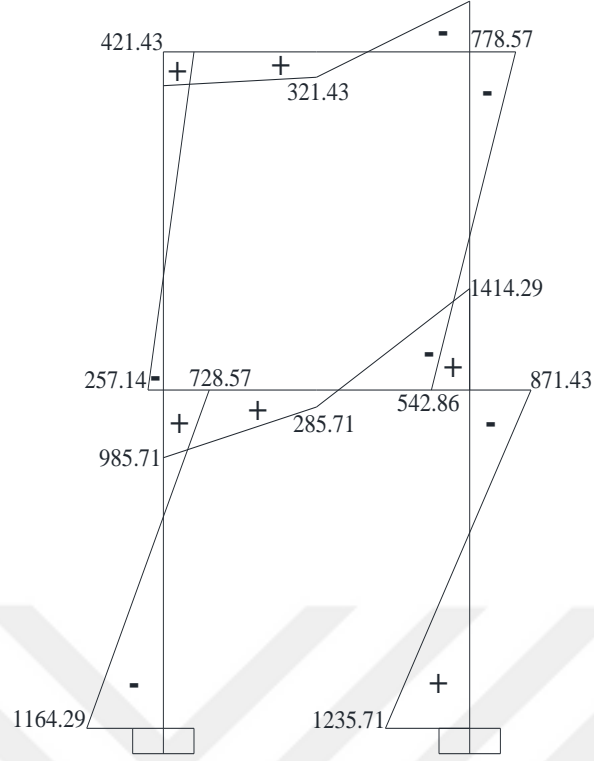
$$P_L = 2.049$$

olarak elde edilmiştir.

Sistemin limit yüküne karşılık gelen yatay yerdeğıştirmesi Şekil 3.51’de gösterilmiştir.



Şekil 3.51 : Limit yük - yerdeğıştirme diyagramı.



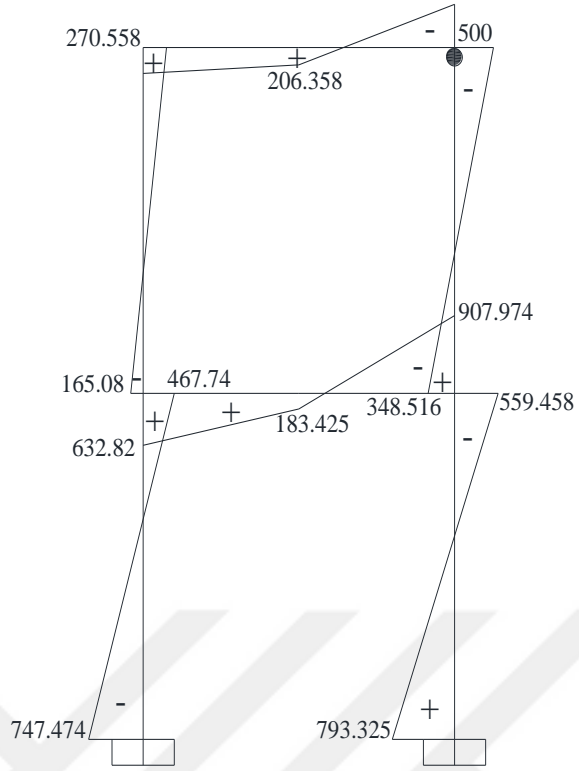
Şekil 3.53 : Yük parametresinin birim değerinden meydana gelen moment diyagramı.

Yönteme göre birinci plastik mafsallık ikinci katta sağ kolonun üst ucunda oluşmakta ve yük parametresi,

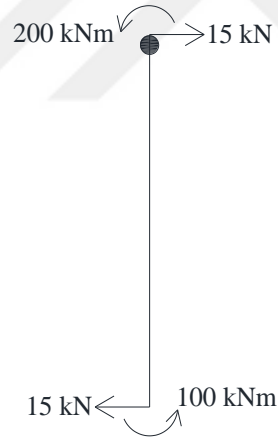
$$778.57 \Delta \rho_1 = 500$$

$$\Delta \rho_1 = 0.642$$

olarak elde edilmiştir. Bu adımdaki eğilme momenti diyagramı Şekil 3.54'te verilmiştir ($M_{\Delta \rho=0.642}$).



Şekil 3.54 : Birinci adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.



Şekil 3.55 : Birinci plastik mafsalin birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Birinci plastik mafsalin oluştuğu kesit için yüklemeler SAP2000 programında Şekil 3.56 ve Şekil 3.57’de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiş ve yapılan çözümde Şekil 3.58’de verilen eğilme momenti diyagramı ($M_{\phi_1=1}$) elde edilmiştir.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -200 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.56 : İkinci kat sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: -15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -100 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

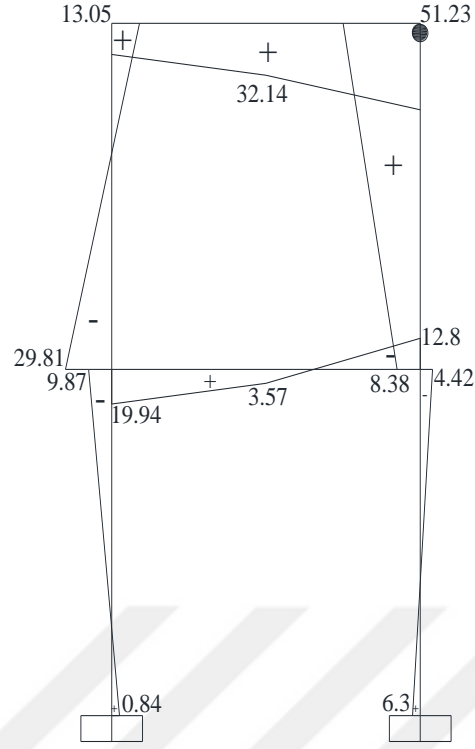
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.57 : İkinci kat sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.58 : Birinci plastik mafsalın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

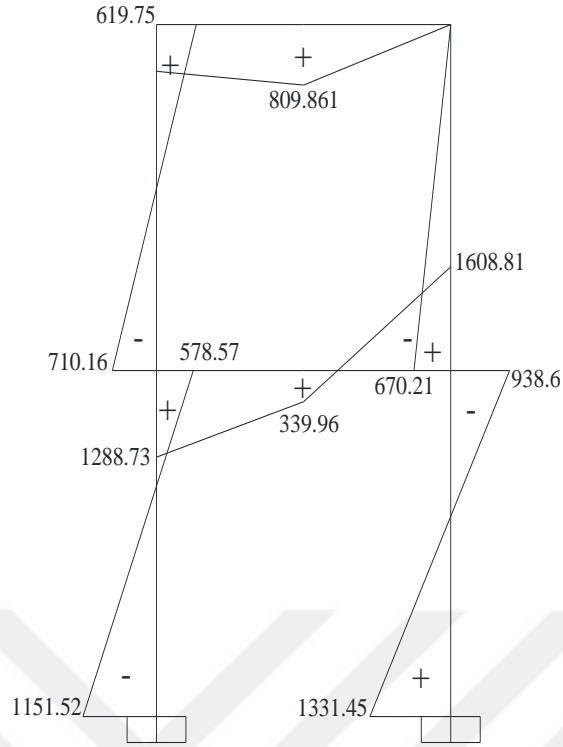
Birinci plastik mafsalın oluştuğu kesit için akma koşulu, Şekil 3.58’de verilen ikinci kattaki sağ kolonun üst ucundaki plastik mafsalın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$51.23 \Phi_1 - 778.57 = 0$$

$$\Phi_1 = +15.197$$

olarak elde edilmiştir.

İkinci plastik mafsalı oluşturan yük parametresinin hesabı için birim yük parametresinden meydana gelen ve plastik mafsal dönmesinden meydana gelen moment diyagramı toplanarak Şekil 3.59 elde edilmiştir ($M_{\Phi_1=+15.197}$).



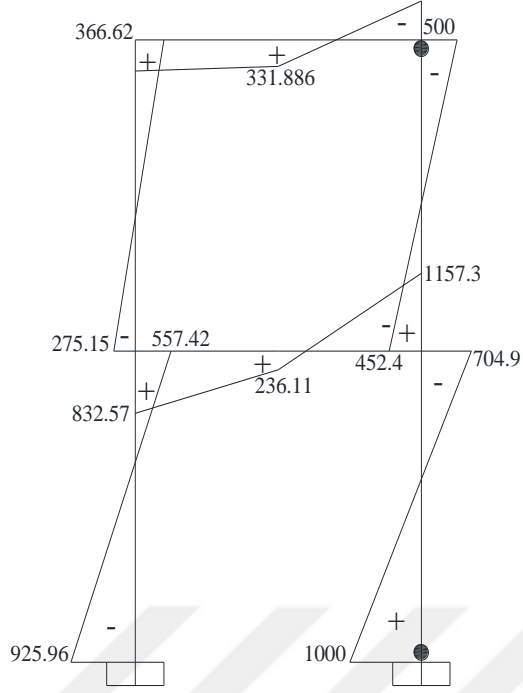
Şekil 3.59 : Birinci plastik mafsalın dönmesinden oluşan moment diyagramı.

İkinci plastik mafsalı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

$$793.325 + 1331.45 \Delta\rho_2 = 1000$$

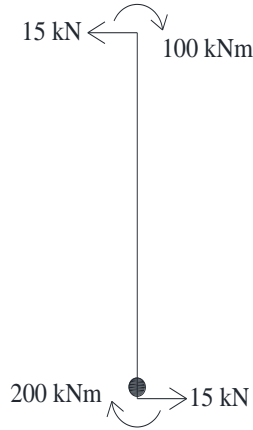
$$\Delta\rho_2 = 0.155$$

şeklinde hesaplanmıştır. Sistemde ikinci plastik mafsal birinci katta sağ kolonun alt ucunda oluşmaktadır. Bu durumdaki eğilme momenti diyagramı Şekil 3.60'da verilmiştir ($M_{\Delta\rho=0.642} + 0.155[M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+15.197}]$).



Şekil 3.60 : İkinci adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.

Sistemde oluşan ikinci plastik mafsallık için yüklemeler Şekil 3.61’de gösterildiği gibi yapılmıştır. SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.62 ve Şekil 3.63’te verildiği gibi gerçekleştirilerek, Şekil 3.64’te verilen plastik mafsallığın birim dönmesinden oluşan eğilme momenti diyagramı ($M_{\phi_2=1}$) elde edilmiştir.



Şekil 3.61 : İkinci plastik mafsallığın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: -15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 100 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.62 : Birinci kat sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 200 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

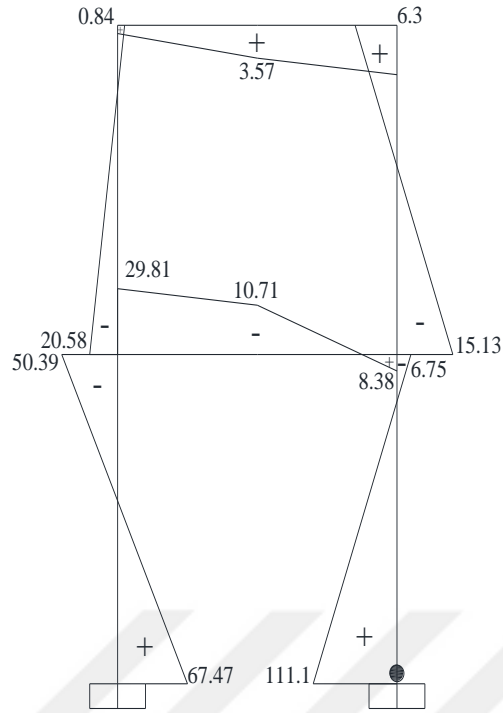
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.63 : Birinci kat sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.64 : İkinci plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

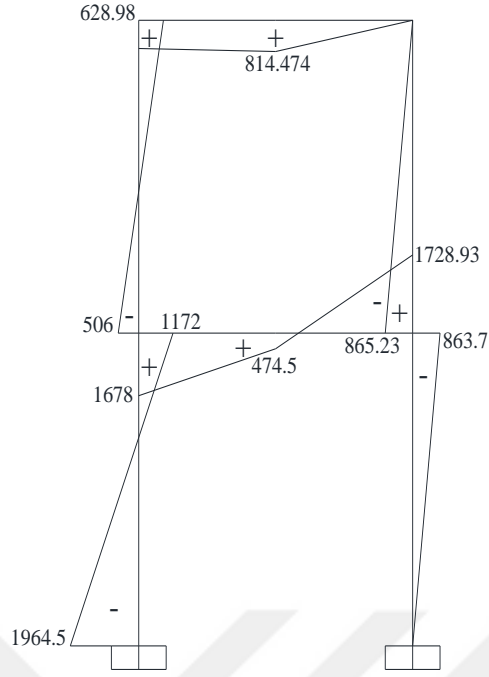
İkinci plastik mafsalsın oluştuğu kesit için akma koşulu plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$51.23 \Phi_1 + 6.3 \Phi_2 - 778.57 = 0$$

$$6.3 \Phi_1 + 111.1 \Phi_2 - 1235.71 = 0$$

$$\Phi_1 = +16.681; \Phi_2 = -12.068$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu dönmelerden oluşan moment değerleri Şekil 3.65'te verilmiştir ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+16.681} + M_{\Phi_2=-12.068}$).



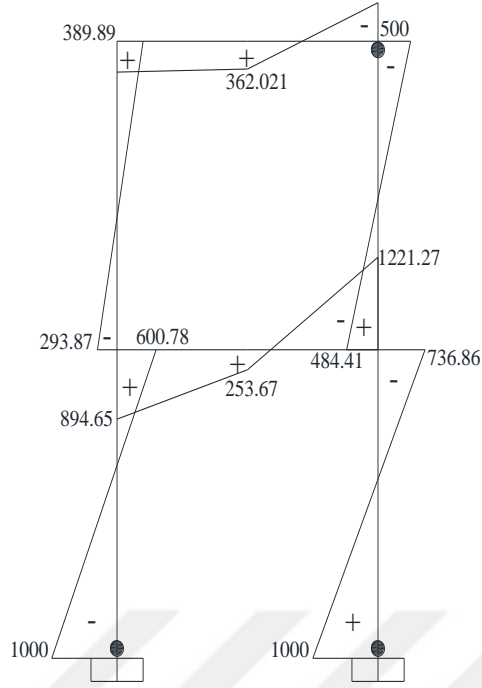
Şekil 3.65 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.

Üçüncü plastik mafsalı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

$$-925.96 - 1964.5 \Delta\rho_3 = -1000$$

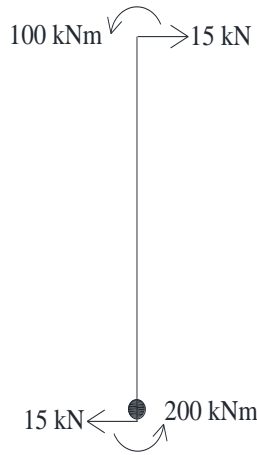
$$\Delta\rho_3 = 0.037$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde birinci katın sol kolon alt ucunda Şekil 3.66'da görüldüğü gibi üçüncü plastik mafsal oluşmuştur ($M_{\Delta\rho=0.797} + 0.037[M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi1=+16.681} + M_{\Phi2=-12.068}]$).



Şekil 3.66 : Üçüncü adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.

Üçüncü plastik mafsallık için yüklemeler Şekil 3.67’de gösterildiği gibi yapılmıştır. SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.68 ve Şekil 3.69’da verildiği gibi gerçekleştirilerek, Şekil 3.70’te verilen plastik mafsallık birim dönmelerinden oluşan eğilme momenti diyagramı elde edilmiştir ($M_{\phi_3=1}$).



Şekil 3.67 : Üçüncü plastik mafsallık birim dönmelerinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -100 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.68 : Birinci kat sol kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: -15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -200 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

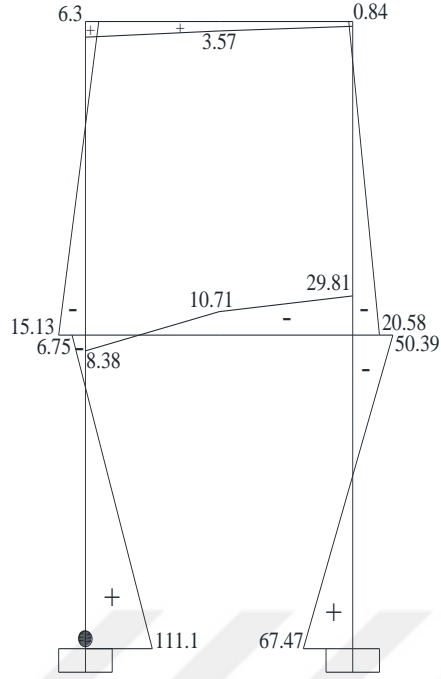
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.69 : Birinci kat sol kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.70 : Üçüncü plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

Üçüncü plastik mafsalsın oluştuğu kesit için akma koşulu plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

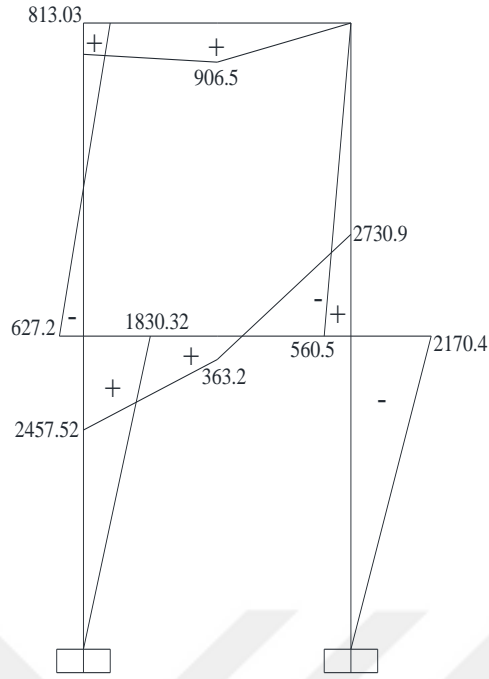
$$51.23 \Phi_1 + 6.3 \Phi_2 + 0.84 \Phi_3 - 778.57 = 0$$

$$6.3 \Phi_1 + 111.1 \Phi_2 + 67.47 \Phi_3 - 1235.71 = 0$$

$$0.84 \Phi_1 + 67.47 \Phi_2 + 111.1 \Phi_3 - 1164.29 = 0$$

$$\Phi_1 = +18.33; \Phi_2 = -29.217; \Phi_3 = +28.085$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu dönmelerden oluşan moment değerleri Şekil 3.71’de verilmiştir ($M_{\Delta p=1} + M_{\Phi_1=+18.33} + M_{\Phi_2=-29.217} + M_{\Phi_3=+28.085}$).



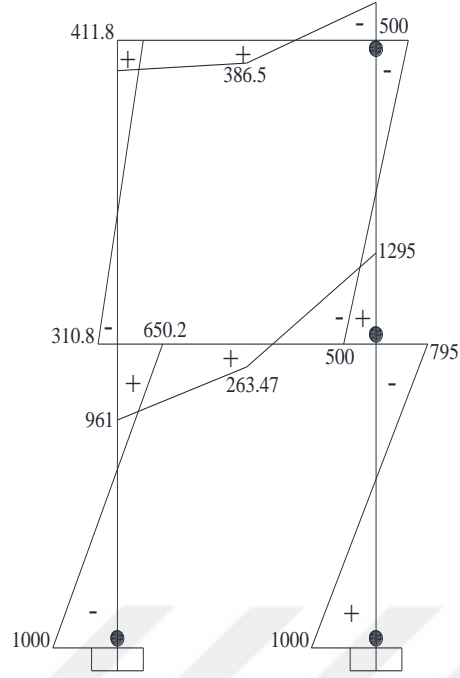
Şekil 3.71 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.

Dördüncü plastik mafsallı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

$$484.41 - 560.5 \Delta\rho_4 = 500$$

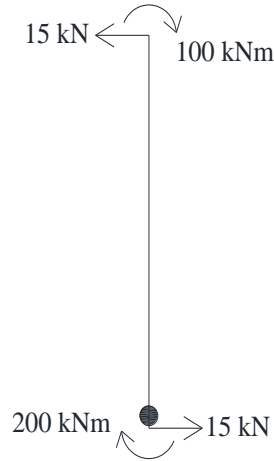
$$\Delta\rho_4 = 0.027$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde ikinci katın sağ kolon alt ucunda Şekil 3.72’de görüldüğü gibi dördüncü plastik mafsallı oluşmuştur.



Şekil 3.72 : Dördüncü adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.

Dördüncü plastik mafsallık için yüklemeler Şekil 3.73'te gösterildiği gibi yapılarak, SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.74 ve Şekil 3.75'te verildiği gibi gerçekleştirilmiştir. SAP2000 programında Şekil 3.76'da verilen plastik mafsallık birim dönmelerinden oluşan eğilme momenti diyagramı elde edilmiştir ($M_{\phi=1}$).



Şekil 3.73 : Dördüncü plastik mafsallık birim dönmelerinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: -15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 100 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.74 : İkinci kat sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 200 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

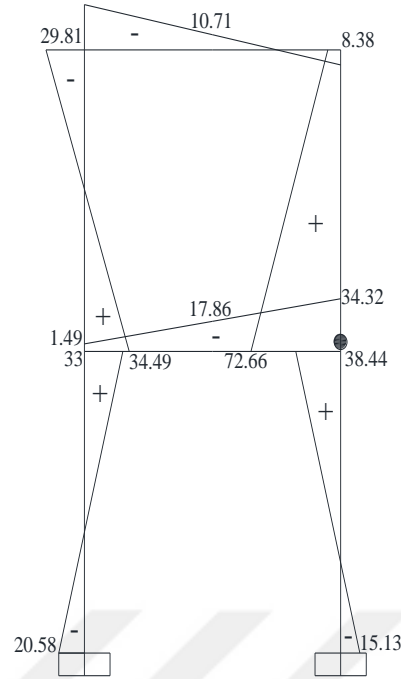
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.75 : İkinci kat sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.76 : Dördüncü plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

Dördüncü plastik mafsalsın oluştığı kesit için akma koşulu plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$51.23 \Phi_1 + 6.3 \Phi_2 + 0.84 \Phi_3 + 8.38 \Phi_4 - 778.57 = 0$$

$$6.3 \Phi_1 + 111.1 \Phi_2 + 67.47 \Phi_3 - 15.13 \Phi_4 + 1235.71 = 0$$

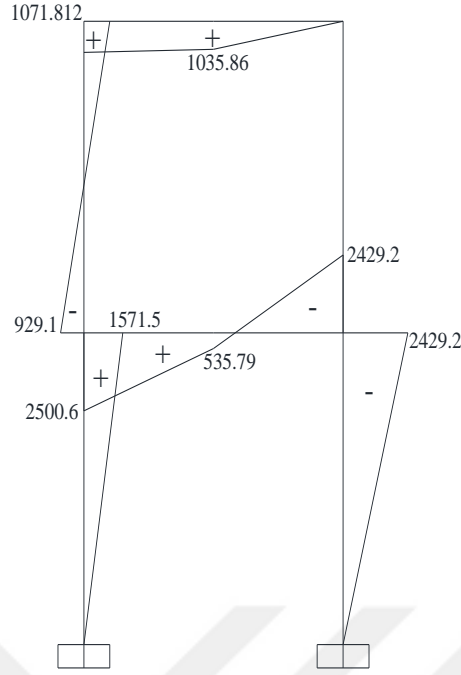
$$0.84 \Phi_1 + 67.47 \Phi_2 + 111.1 \Phi_3 - 20.58 \Phi_4 - 1164.29 = 0$$

$$8.38 \Phi_1 - 15.13 \Phi_2 - 20.58 \Phi_3 + 72.66 \Phi_4 + 542.86 = 0$$

$$\Phi_1 = +19.768; \Phi_2 = -29.65; \Phi_3 = +26.792; \Phi_4 = -8.337$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu dönmelerden oluşan moment değerleri Şekil 3.77’de

verilmiştir ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+19.768} + M_{\Phi_2=-29.65} + M_{\Phi_3=+26.792} + M_{\Phi_4=-8.337}$).



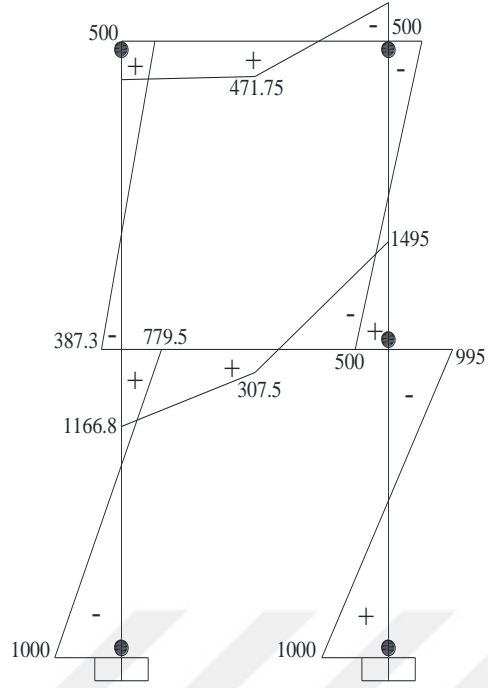
Şekil 3.77 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.

Beşinci plastik mafsallı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

$$411.8 + 1071.812 \Delta\rho_5 = 500$$

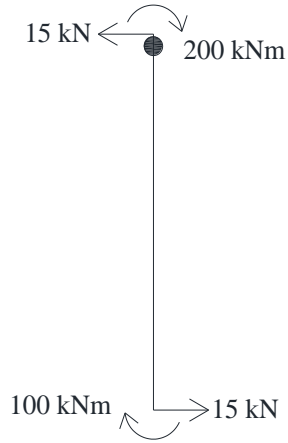
$$\Delta\rho_5 = 0.0823$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde beşinci plastik mafsallı Şekil 3.78'de görüldüğü gibi ikinci katın sol kolon üst ucunda oluşmuştur ($M_{\Delta\rho=0.861} + 0.0823[M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi1=+19.768} + M_{\Phi2=-29.65} + M_{\Phi3=+26.792} + M_{\Phi4=-8.337}]$).



Şekil 3.78 : Beşinci adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.

Beşinci plastik mafsallık için yüklemeler Şekil 3.79’da gösterildiği gibi yapılarak, SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.80 ve Şekil 3.81’de verildiği gibi gerçekleştirilmiştir. SAP2000 programında Şekil 3.82’de verilen plastik mafsallık birim dönmelerinden oluşan eğilme momenti diyagramı elde edilmiştir ($M_{\phi 5=1}$).



Şekil 3.79 : Beşinci plastik mafsallık birim dönmelerinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	-15	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	200	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.80 : İkinci kat sol kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	15	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	100	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

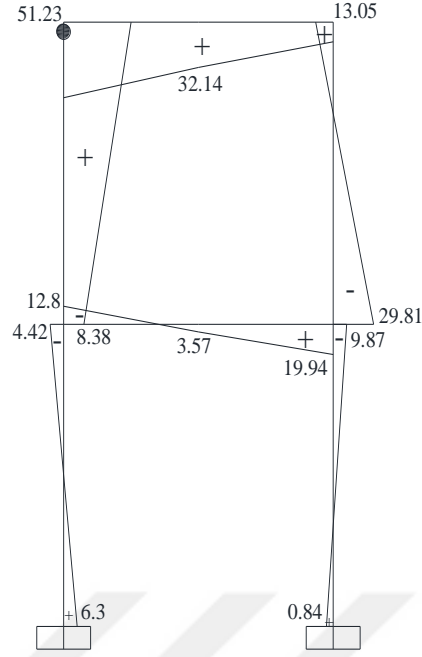
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.81 : İkinci kat sol kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.82 : Beşinci plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

Beşinci plastik mafsallın oluştuğu kesit için akma koşulu plastik mafsallın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$51.23 \Phi_1 + 6.3 \Phi_2 + 0.84 \Phi_3 + 8.38 \Phi_4 + 13.05 \Phi_5 - 778.57 = 0$$

$$6.3 \Phi_1 + 111.1 \Phi_2 + 67.47 \Phi_3 - 15.13 \Phi_4 + 0.84 \Phi_5 + 1235.71 = 0$$

$$0.84 \Phi_1 + 67.47 \Phi_2 + 111.1 \Phi_3 - 20.58 \Phi_4 + 6.3 \Phi_5 - 1164.29 = 0$$

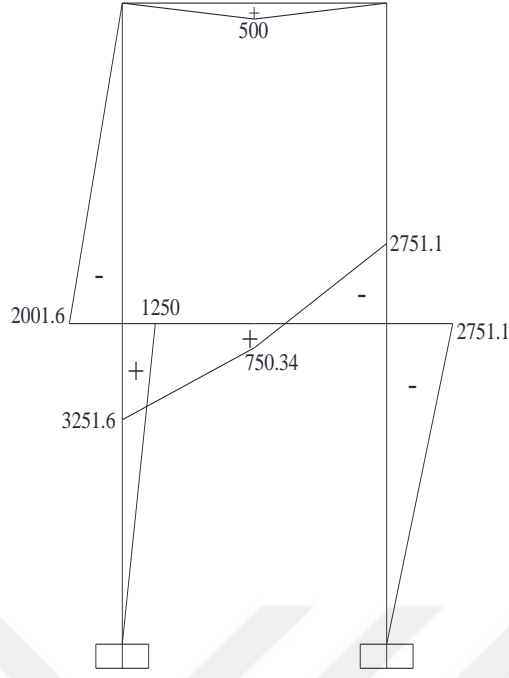
$$8.38 \Phi_1 - 15.13 \Phi_2 - 20.58 \Phi_3 + 72.66 \Phi_4 - 29.81 \Phi_5 + 542.86 = 0$$

$$13.05 \Phi_1 + 0.84 \Phi_2 + 6.3 \Phi_3 - 29.81 \Phi_4 + 51.23 \Phi_5 + 421.43 = 0$$

$$\Phi_1 = +30.848; \Phi_2 = -32.512; \Phi_3 = +27.51; \Phi_4 = -23.35; \Phi_5 = -32.521$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu dönmelerden oluşan moment değerleri Şekil 3.83'te

verilmiştir ($M_{\Delta p=1} + M_{\Phi_1=+30.848} + M_{\Phi_2=-32.512} + M_{\Phi_3=+27.51} + M_{\Phi_4=-23.35} + M_{\Phi_5=-32.521}$).



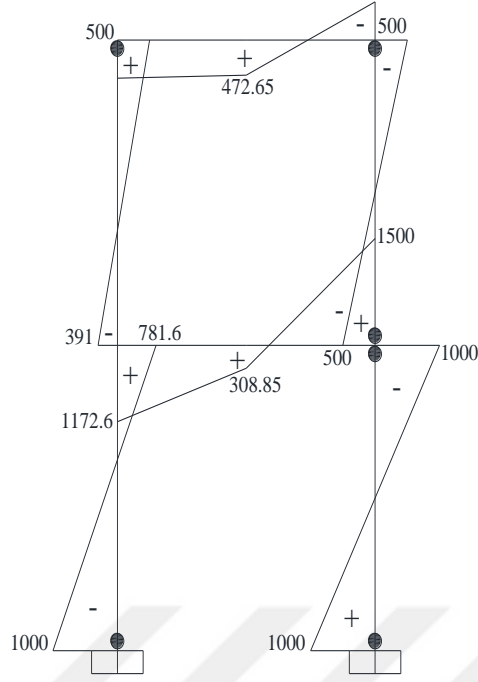
Şekil 3.83 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.

Altıncı plastik mafsallı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

$$-995 - 2751.1 \Delta\rho_6 = -1000$$

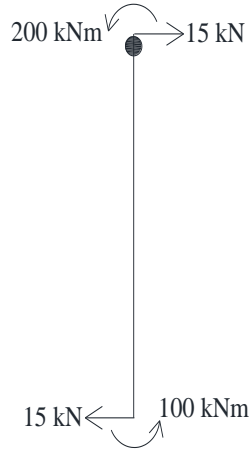
$$\Delta\rho_6 = 0.0018$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde altıncı plastik mafsallı Şekil 3.84'te görüldüğü gibi birinci katın sağ kolon üst ucunda oluşmuştur ($M_{\Delta\rho=0.9433} + 0.0018[M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi1=+30.848} + M_{\Phi2=-32.512} + M_{\Phi3=+27.51} + M_{\Phi4=-23.35} + M_{\Phi5=-32.521}]$).



Şekil 3.84 : Altıncı adımdaki limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.

Altıncı plastik mafsallık için yüklemeler Şekil 3.85’te gösterildiği gibi yapılarak, SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.86 ve Şekil 3.87’de verildiği gibi gerçekleştirilmiştir. SAP2000 programında Şekil 3.88’de verilen plastik mafsallık birim dönmesinden oluşan eğilme momenti diyagramı elde edilmiştir ($M_{\phi 6=1}$).



Şekil 3.85 : Altıncı plastik mafsallık birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -200 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.86 : Birinci kat sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: -15 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 0 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -100 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

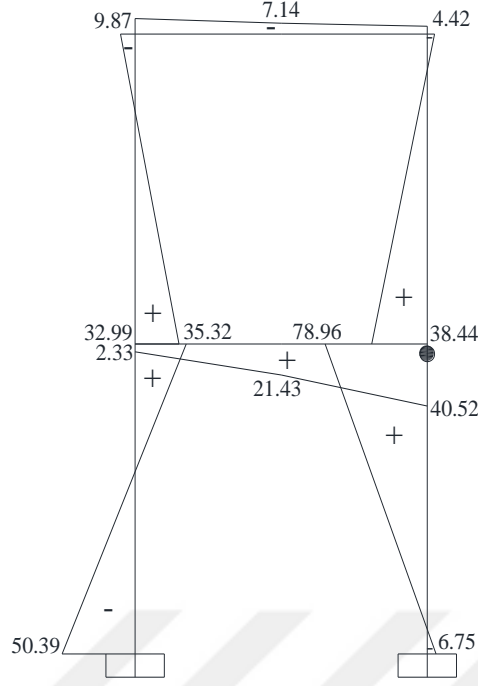
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.87 : Birinci kat sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.88 : Altıncı plastik mafsaldan birim dönmelerden oluşan moment diyagramı.

Altıncı plastik mafsaldan oluşan kesit için akma koşulu plastik mafsaldan birim dönmelerden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$51.23 \Phi_1 + 6.3 \Phi_2 + 0.84 \Phi_3 + 8.38 \Phi_4 + 13.05 \Phi_5 - 4.42 \Phi_6 - 778.57 = 0$$

$$6.3 \Phi_1 + 111.1 \Phi_2 + 67.47 \Phi_3 - 15.13 \Phi_4 + 0.84 \Phi_5 - 6.75 \Phi_6 + 1235.71 = 0$$

$$0.84 \Phi_1 + 67.47 \Phi_2 + 111.1 \Phi_3 - 20.58 \Phi_4 + 6.3 \Phi_5 - 50.39 \Phi_6 - 1164.29 = 0$$

$$8.38 \Phi_1 - 15.13 \Phi_2 - 20.58 \Phi_3 + 72.66 \Phi_4 - 29.81 \Phi_5 + 38.4 \Phi_6 + 542.86 = 0$$

$$13.05 \Phi_1 + 0.84 \Phi_2 + 6.3 \Phi_3 - 29.81 \Phi_4 + 51.23 \Phi_5 - 9.87 \Phi_6 + 421.43 = 0$$

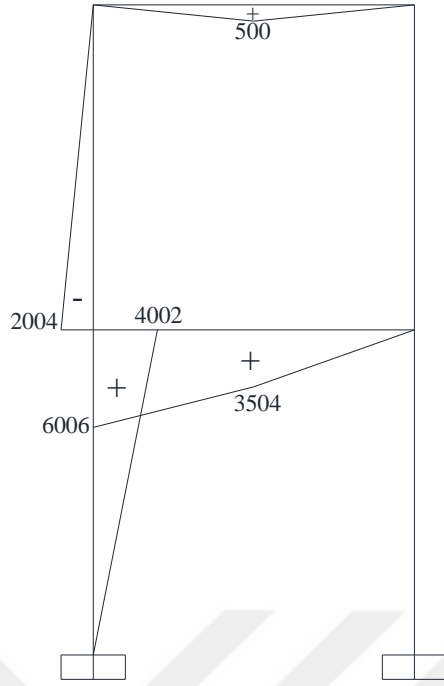
$$-4.42 \Phi_1 - 6.75 \Phi_2 - 50.39 \Phi_3 + 38.4 \Phi_4 - 9.87 \Phi_5 + 78.96 \Phi_6 - 871.43 = 0$$

$$\Phi_1 = +58.41; \Phi_2 = -69.238; \Phi_3 = +82.583; \Phi_4 = -78.43; \Phi_5 = -60.084;$$

$$\Phi_6 = -91.761$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu dönmelerden oluşan moment değerleri Şekil 3.89’da

verilmiştir ($M_{\Delta p=1} + M_{\Phi_1=+58.41} + M_{\Phi_2=-69.238} + M_{\Phi_3=+82.583} + M_{\Phi_4=-78.43} + M_{\Phi_5=-60.084} + M_{\Phi_6=-91.761}$).



Şekil 3.89 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.

Yedinci plastik mafsalı oluşturan yük parametresi için araştırma yapıldığında,

$$781.6 + 4002 \Delta\rho_7 = 1000$$

$$\Delta\rho_7 = 0.054$$

$$-391 - 2004 \Delta\rho_7 = -500$$

$$\Delta\rho_7 = 0.054$$

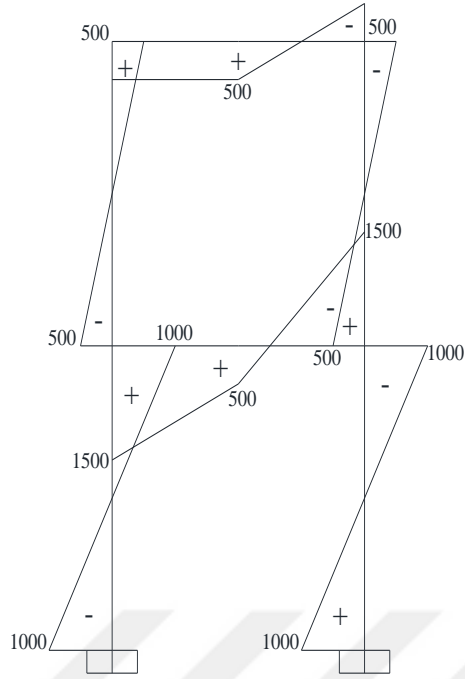
$$472.65 + 500 \Delta\rho_7 = 500$$

$$\Delta\rho_7 = 0.054$$

$$1172.6 + 6006 \Delta\rho_7 = 1500$$

$$\Delta\rho_7 = 0.054$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde yedinci plastik mafsallık ikinci katın kiriş orta noktasında ve sistemin sol kısmında birinci katın kolon üst ucu ile ikinci katın kolon alt ucunun kirişle birleştiği noktada aynı anda oluşarak sistem mekanizma durumuna gelmektedir. Sistemin birinci mertebeli limit yüke ulaştığı durumdaki moment diyagramı Şekil 3.90'da verilmiştir ($M_{\Delta\rho=0.9451} + 0.054[M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi1=+58.41} + M_{\Phi2=-69.238} + M_{\Phi3=+82.583} + M_{\Phi4=-78.43} + M_{\Phi5=-60.084} + M_{\Phi6=-91.761}]$).



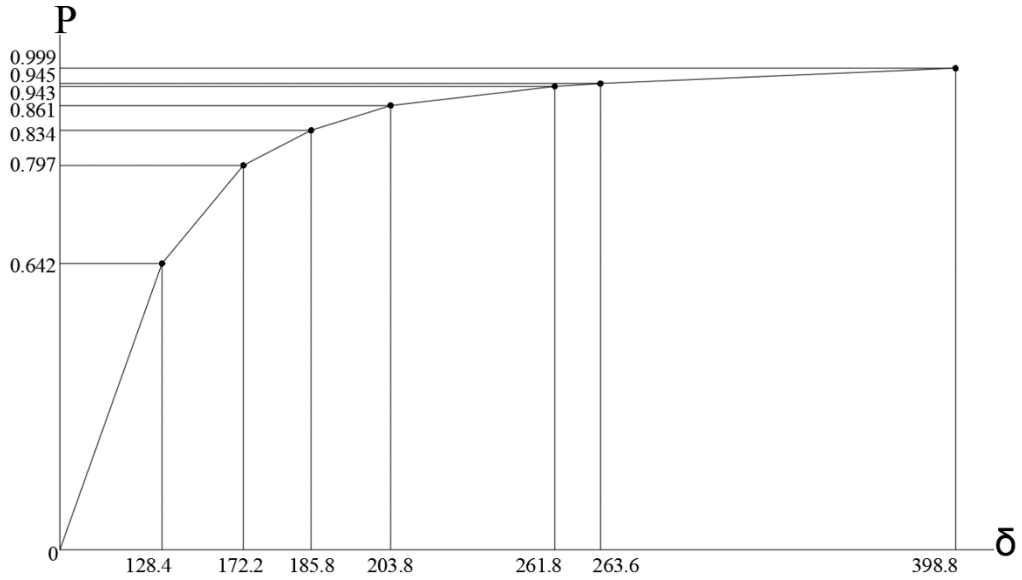
Şekil 3.90 : Toplam limit yük parametresine karşı gelen moment diyagramı.

Sistemin limit yük parametresi,

$$P_L = 0.999$$

olarak elde edilmiştir.

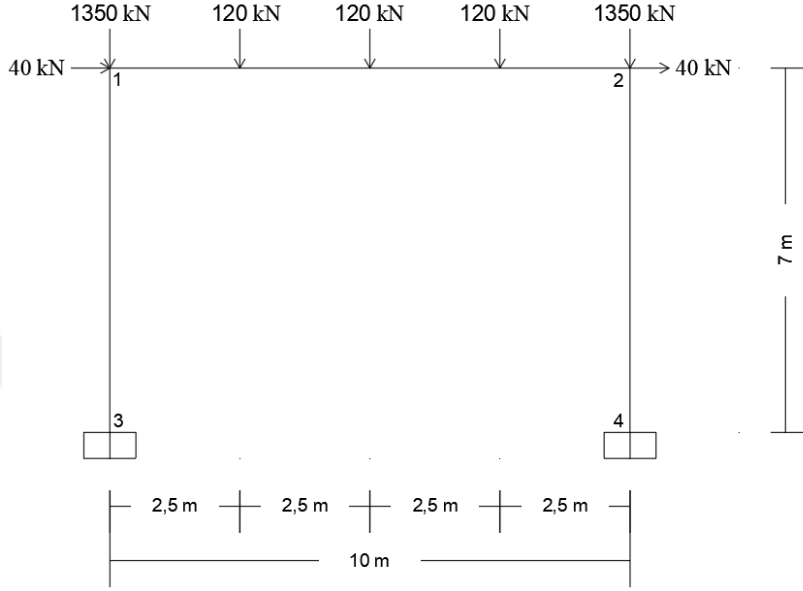
Sistemin limit yüküne karşılık gelen yatay yerdeğiştirmesi Şekil 3.91’de gösterilmiştir.



Şekil 3.91 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.

3.5 Tek Katlı Çerçevenin İkinci Mertebe Limit Yükünün Hesabı

[1]'de verilen tek katlı çerçevenin ikinci mertebe limit yükü, verilen yöntemle elde edilmiştir. Çerçeveye ait geometrik boyutlar, dış yükler, plastik moment değerleri ve kritik kesitler Şekil 3.92'de gösterilmiştir.



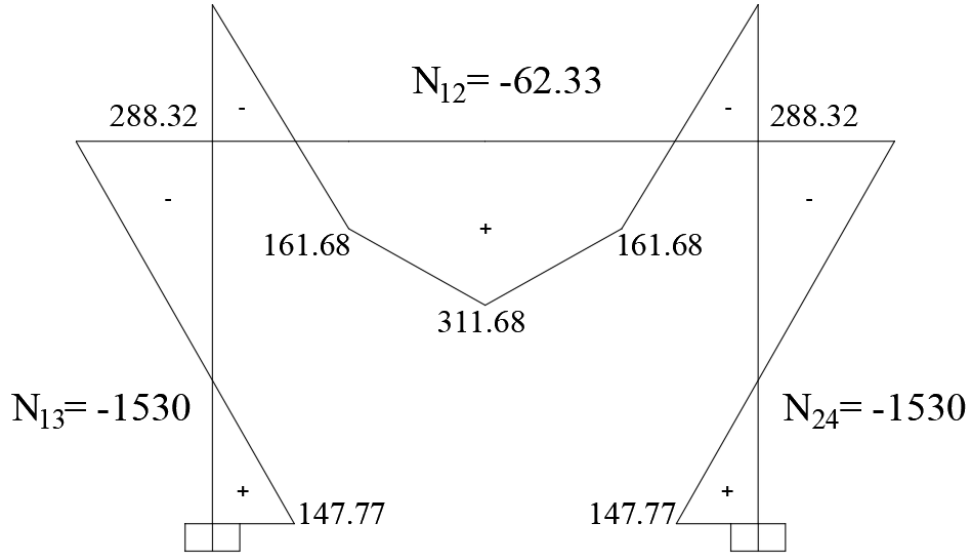
Şekil 3.92 : Tek katlı çerçeve.

Plastik moment değerleri; $M_{p(\text{kolon})} = 775.7 \text{ kNm}$, $M_{p(\text{kiriş})} = 526.6 \text{ kNm}$

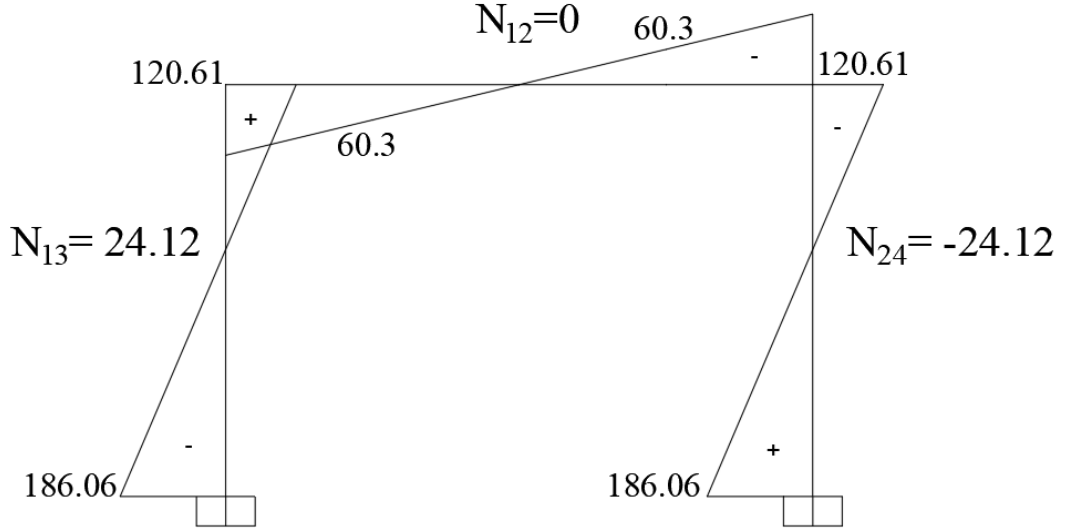
$EI_{(\text{kolon})} = 121130 \text{ kNm}^2$, $EI_{(\text{kiriş})} = 101220 \text{ kNm}^2$

İkinci mertebe limit yük parametresinin hesabı için gerekli moment diyagramları SAP2000 yardımı ile çözümlenerek elde edilmiştir [7].

Sistemin dış yük parametresinin birim değeri için çözüm SAP2000 programı ile düşey yükler için ayrı yatay yükler için ayrı yapılarak kritik kesitlerdeki eğilme momentleri elde edilmiştir. Düşey yüklemeler Şekil 3.93'te ve yatay yüklemeler Şekil 3.94'te gösterildiği gibi çözüme ulaşmıştır ($M_{\Delta p=1}$).



Şekil 3.93 : Düşey yükler için eğilme momenti diyagramı.



Şekil 3.94 : Yatay yükler için eğilme momenti diyagramı.

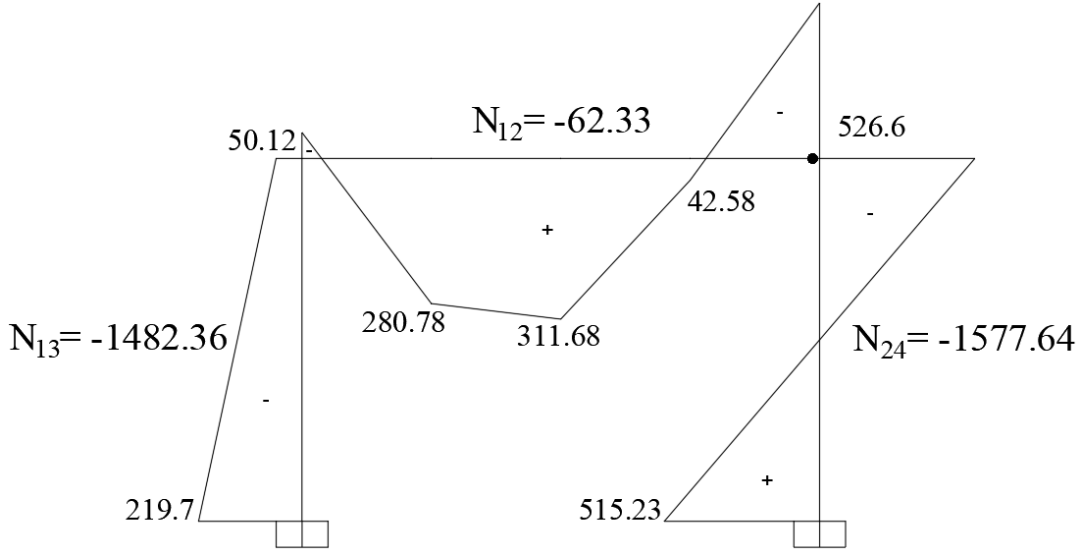
Birinci plastik mafsallık kirişin sağ ucunda oluşmakta ve yük parametresi,

$$|M_d - M_y \Delta\rho_1| = M_p$$

$$|-288.32 - 120.61\Delta\rho_1| = 526.6$$

$$\Delta\rho_1 = 1.975$$

olarak elde edilmiştir. Bu adımdaki eğilme momenti diyagramı Şekil 3.95'te verilmiştir ($M_{\Delta\rho=1.975}$).



Şekil 3.95 : Birinci limit yük parametresinden oluşan moment diyagramı.

Birinci plastik mafsallık için kirişte yüklemeler Şekil 3.96’da gösterildiği gibi yapılmıştır. SAP2000 programında yüklemeler kiriş için Şekil 3.97 ve Şekil 3.98’de verildiği gibi gerçekleştirilmiştir. İkinci merteye etkilerden dolayı kolonlar için SAP2000 programında yükleme yapılırken Şekil 3.99’da gösterildiği gibi ayrı bir yük tanımlanmıştır. Yapılan bu yüklemeler sonucunda birinci plastik mafsallık birim dönmelerinden dolayı oluşan eğilme momenti diyagramı Şekil 3.100’de görüldüğü gibi elde edilmiştir ($M_{\phi 1=1}$).



Şekil 3.96 : Birinci plastik mafsallık birim dönmelerinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	0	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	6073.2	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	40488	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.97 : Kiriş sağ ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X	0	kN
Force Global Y	0	kN
Force Global Z	-6073.2	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	20244	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.98 : Kiriş sol ucu için yüklemeler.

Assign Frame Initial P-Delta Forces

P-Delta Force Type

Force

X Projection

Y Projection

Z Projection

Coordinate System for Projected Forces

Direction

Initial Force

Force kN

Options

Add to Existing Forces

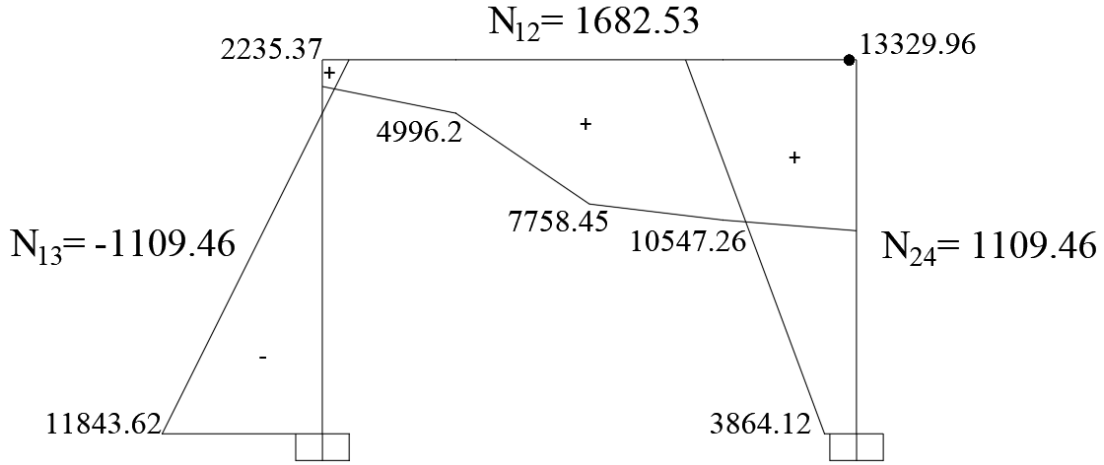
Replace Existing Forces

Delete Existing Forces

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.99 : Kolonlar için yüklemeler (P-Delta).



Şekil 3.100 : Birinci plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

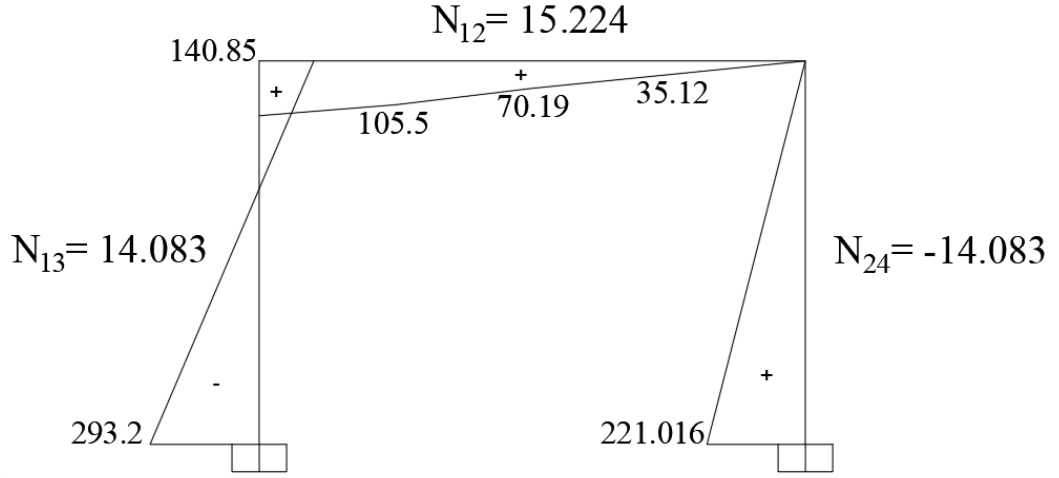
Birinci plastik mafsalsın olduğu kesit için akma koşulu, Şekil 3.100'de verilen kirişin sağ ucundaki plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$|M_{\Phi_1=1} \Phi_1 + M_y| = 0$$

$$13329.96 \Phi_1 - 120.61 = 0$$

$$\Phi_1 = +9.047 * 10^{-3}$$

olarak elde edilmiştir. Bu dönmeye karşılık gelen moment değerleri Şekil 3.101’de verilmiştir ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi 1=+9.047*10^{-3}}$).



Şekil 3.101 : Birinci plastik mafsalmın dönmelerinden oluşan moment diyagramı.

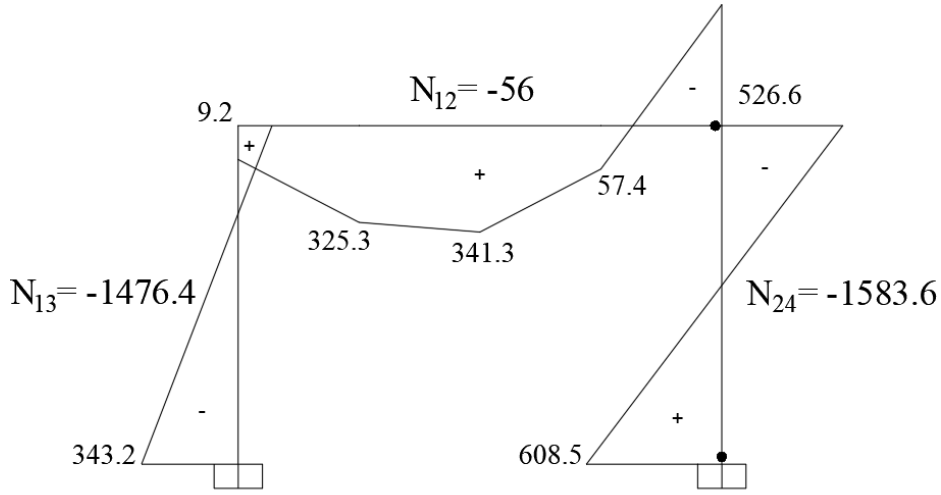
İkinci plastik mafsalı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

$$| M_{\Delta\rho=1.975} + (M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi 1=+9.047*10^{-3}})\Delta\rho_2 | + a | N_{\Delta\rho=1.975} + (N_{\Delta\rho=1} + N_{\Phi 1=+9.047*10^{-3}})\Delta\rho_2 | = M_p$$

$$| 515.23 + 221.016 \Delta\rho_2 | + 0.192 | - 1577.64 - 14.083 \Delta\rho_2 | = 912.6$$

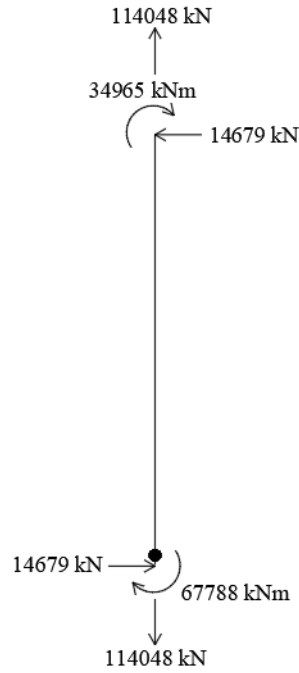
$$\Delta\rho_2 = 0.422$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde sağ kolonun alt ucunda Şekil 3.102’de görüldüğü gibi ikinci plastik mafsall oluşmuştur ($M_{\Delta\rho=1.975} + 0.422[M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi 1=+9.047*10^{-3}}]$).



Şekil 3.102 : İkinci limit yük parametresinden oluşan moment diyagramı.

İkinci plastik mafsall için yüklemeler Şekil 3.103'te gösterildiği gibi yapılmıştır. SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.104 ve Şekil 3.105'te verildiği gibi gerçekleştirilmiştir. İkinci mertebeye etkilerden dolayı kolonlar için SAP2000 programında yine Şekil 3.99'da gösterildiği gibi ayrı bir yük tanımları yapılmıştır. Yapılan bu yüklemeler sonucunda ikinci plastik mafsallın birim dönmesinden dolayı oluşan eğilme momenti diyagramı Şekil 3.106'da görüldüğü gibi elde edilmiştir ($M_{\phi 2=1}$).



Şekil 3.103 : İkinci plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: -14679 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 114048 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 34965 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.104 : Sağ kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 14679 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: -114048 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: 67788 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

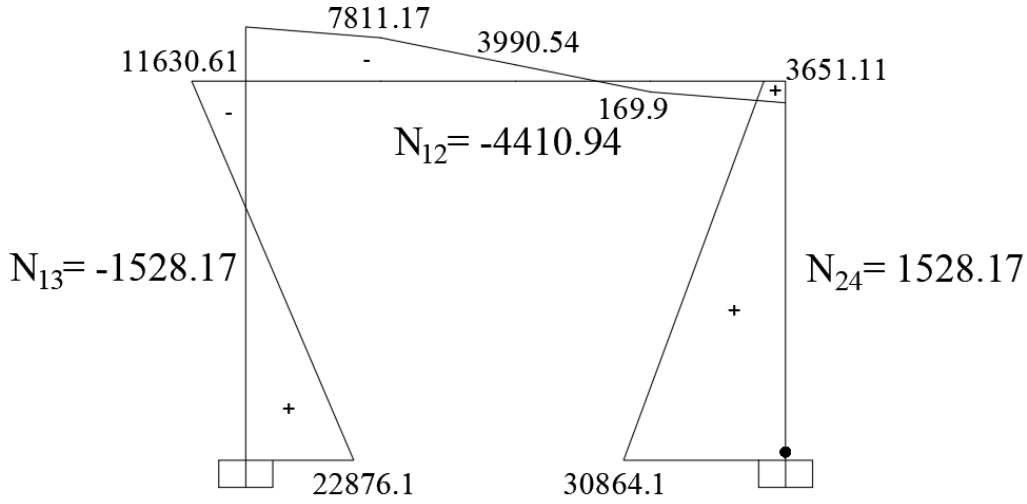
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.105 : Sağ kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.106 : İkinci plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

İkinci plastik mafsalsın oluştuğu kesit için akma koşulu plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$|M_{\Phi_1=1} \Phi_1 + M_{\Phi_2=1} \Phi_2 + M_y| = 0$$

$$13329.96 \Phi_1 + 3651.11 \Phi_2 - 120.61 = 0$$

$$|(M_{\Phi_1=1} + a N_{\Phi_1=1}) \Phi_1 + (M_{\Phi_2=1} + a N_{\Phi_2=1}) \Phi_2 + (M_y + a N_y)| = 0$$

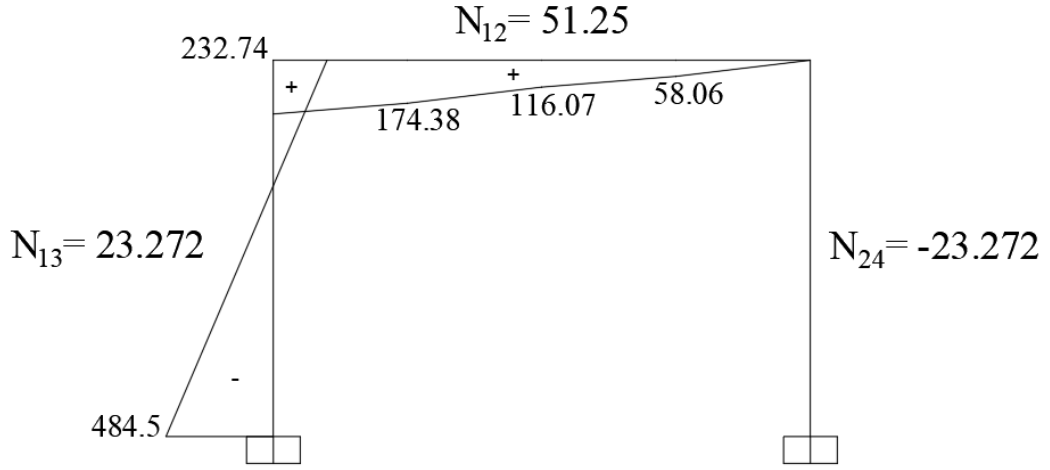
$$|(3864.12 - 0.192 * 1109.46) \Phi_1 + (30864.1 - 0.192 * 1528.17) \Phi_2 + (186.06 + 0.192 * 24.12)| = 0$$

$$3651.11 \Phi_1 + 30570.69 \Phi_2 + 190.68 = 0$$

$$\Phi_1 = +11.1 * 10^{-3}; \Phi_2 = -7.56 * 10^{-3}$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu dönmelere karşılık gelen moment değerleri Şekil

3.107'de verilmiştir ($M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi_1=+11.1*10^{-3}} + M_{\Phi_2=-7.56*10^{-3}}$).



Şekil 3.107 : Dönmelerden elde edilen moment diyagramı.

Üçüncü plastik mafsalı oluşturan yük parametresi araştırma ile,

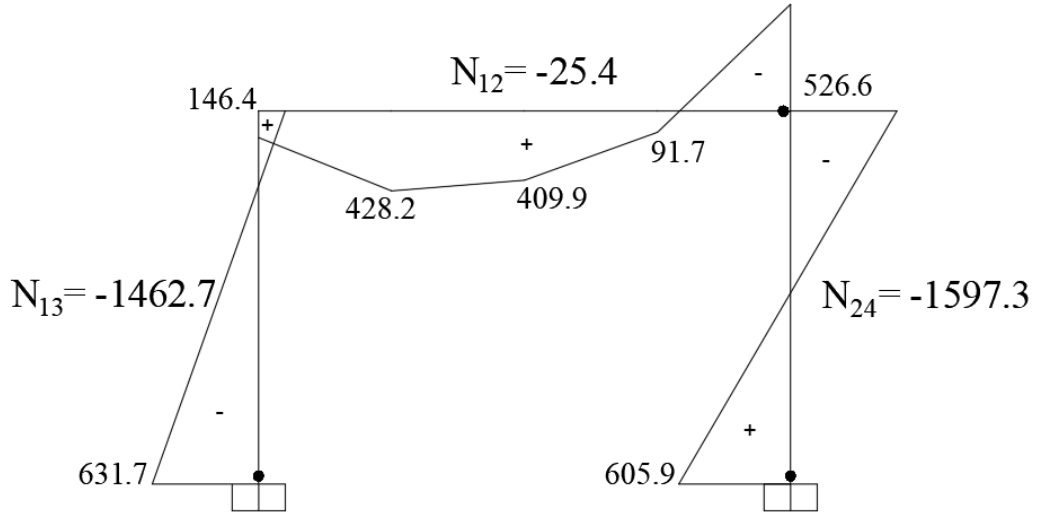
$$|M_{\Delta\rho=1.975} + (M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi1=+11.1*10^{-3}} + M_{\Phi2=-7.56*10^{-3}}) \Delta\rho_2| + a |N_{\Delta\rho=1.975}$$

$$+ (N_{\Delta\rho=1} + N_{\Phi1=+11.1*10^{-3}} + N_{\Phi2=-7.56*10^{-3}}) \Delta\rho_2| = M_p$$

$$|-343.2 - 484.5 \Delta\rho_3| + 0.192 |-1476.4 + 23.272 \Delta\rho_3| = 912.6$$

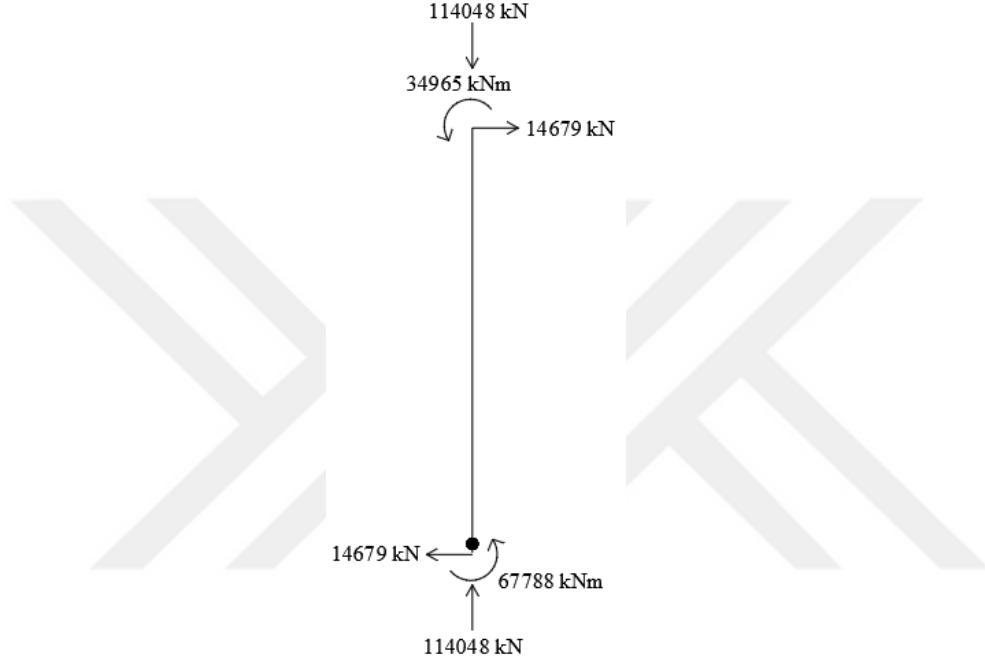
$$\Delta\rho_3 = 0.588$$

olarak elde edilmiştir. Sistemde sol kolonun alt ucunda Şekil 3.108’de görüldüğü gibi üçüncü plastik mafsall oluşmuştur ($M_{\Delta\rho=2.397} + 0.588[M_{\Delta\rho=1} + M_{\Phi1=+11.1*10^{-3}} + M_{\Phi2=-7.56*10^{-3}}]$).



Şekil 3.108 : Üçüncü limit yük parametresinden oluşan moment diyagramı.

Üçüncü plastik mafsall için yüklemeler Şekil 3.109'da gösterildiği gibi yapılmıştır. SAP2000 programında yüklemeler Şekil 3.110 ve Şekil 3.111'de verildiği gibi gerçekleştirilmiştir. İkinci merteye etkilerden dolayı kolonlar için SAP2000 programında yine Şekil 3.99'da gösterildiği gibi ayrı bir yük tanımlı yapılmıştır. Yapılan bu yüklemeler sonucunda üçüncü plastik mafsallın birim dönmesinden dolayı oluşan eğilme momenti diyagramı Şekil 3.112'de görüldüğü gibi elde edilmiştir ($M_{\phi 3=1}$).



Şekil 3.109 : Üçüncü plastik mafsallın birim dönmesinden oluşan ankastrelik uç kuvvetleri.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 14679 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: -114048 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -34965 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.110 : Sol kolon üst ucu için yüklemeler.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: -14679 kN

Force Global Y: 0 kN

Force Global Z: 114048 kN

Moment about Global X: 0 kN-m

Moment about Global Y: -67788 kN-m

Moment about Global Z: 0 kN-m

Options

Add to Existing Loads

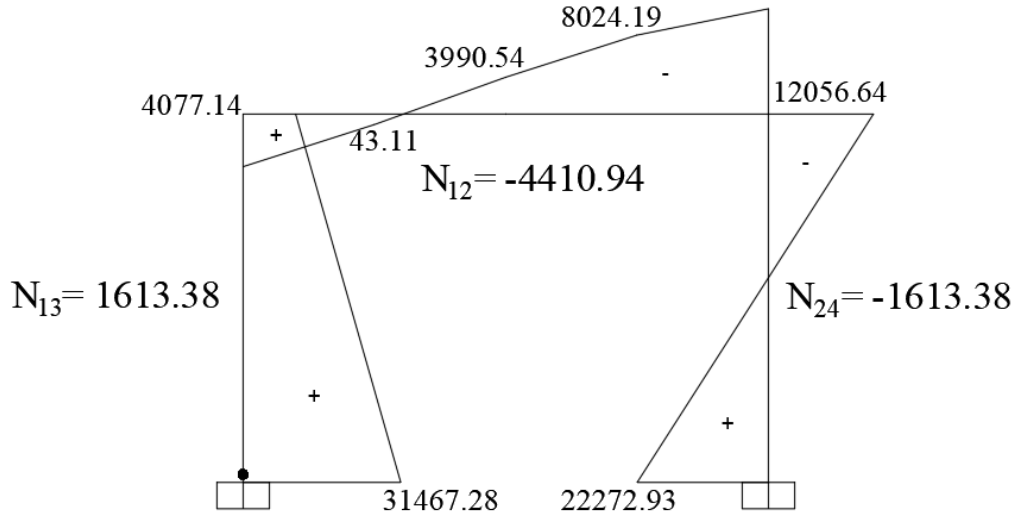
Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.111 : Sol kolon alt ucu için yüklemeler.



Şekil 3.112 : Üçüncü plastik mafsalsın birim dönmesinden oluşan moment diyagramı.

Üçüncü plastik mafsalsın oluştuğu kesit için akma koşulu plastik mafsalsın birim dönmesinden meydana gelen momentlere bağlı olarak yazılırsa,

$$|M_{\Phi_1=1} \Phi_1 + M_{\Phi_2=1} \Phi_2 + M_{\Phi_3=1} \Phi_3 + M_y| = 0$$

$$13329.96 \Phi_1 + 3651.11 \Phi_2 - 12056.64 \Phi_3 - 120.61 = 0$$

$$|(M_{\Phi_1=1} + a N_{\Phi_1=1}) \Phi_1 + (M_{\Phi_2=1} + a N_{\Phi_2=1}) \Phi_2 + (M_{\Phi_3=1} + a N_{\Phi_3=1}) \Phi_3 + (M_y + a N_y)| = 0$$

$$|(3864.12 - 0.192 * 1109.46) \Phi_1 + (30864.1 - 0.192 * 1528.17) \Phi_2 + (22272.93 + 0.192 * 1613.38) \Phi_3 + (186.06 + 0.192 * 24.12)| = 0$$

$$3651.11 \Phi_1 + 30570.69 \Phi_2 + 22582.7 \Phi_3 + 190.68 = 0$$

$$|(M_{\Phi_1=1} + a N_{\Phi_1=1}) \Phi_1 + (M_{\Phi_2=1} + a N_{\Phi_2=1}) \Phi_2 + (M_{\Phi_3=1} + a N_{\Phi_3=1}) \Phi_3 + (M_y + a N_y)| = 0$$

$$|(-11843.62 - 0.192 * 1109.46) \Phi_1 + (22876.1 - 0.192 * 1528.17) \Phi_2 + (31467.28 + 0.192 * 1613.38) \Phi_3 + (-186.06 + 0.192 * 24.12)| = 0$$

$$-12056.64 \Phi_1 + 22582.7 \Phi_2 + 31777.05 \Phi_3 - 181.41 = 0$$

$$\Phi_1 = -0.3; \Phi_2 = +0.23; \Phi_3 = -0.27$$

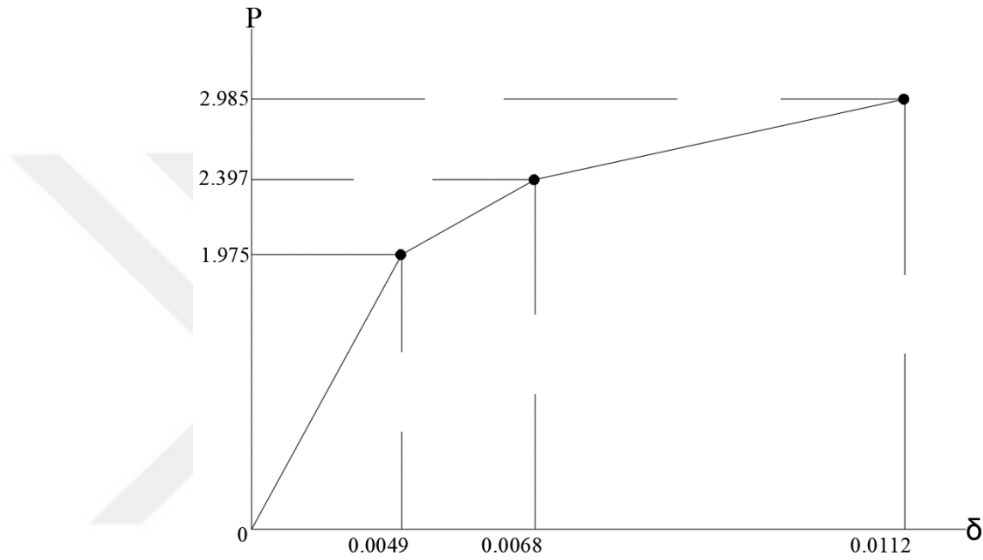
şeklinde elde edilmiştir.

Düzlem çerçeve sistem, son adımdaki dönmelerin önceki adımlardaki dönmelerden farklı yani ters işaretlisi çıkmasından da anlaşılacağı üzere ikinci merteye limit yüküne ulaştığı gözlemlenmiştir. Sistemin limit yük parametresi,

$$P_L = 2.985$$

olarak elde edilmiştir.

Sistemin limit yüküne karşılık gelen yatay yerdeğiştirme Şekil 3.113'te gösterilmiştir.



Şekil 3.113 : Limit yük - yerdeğiştirme diyagramı.

Literatürden alınan bu örnek için elde edilen değerler Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi karşılaştırılabilir [1].

Çizelge 3.1 : Limit yük parametresi ve dönme değerleri.

Adım No	Bu Çalışmada Limit Yük Parametresi	Erkan Özer [1] Limit Yük Parametresi	Bu Çalışmada Dönme Değerleri	Erkan Özer [1] Dönme Değerleri
1	1.975	1.975	+9.047*10 ⁻³	+9.0411*10 ⁻³
2	0.422	0.422	+11.1*10 ⁻³ -7.56*10 ⁻³	+11.1069*10 ⁻³ -7.5563*10 ⁻³
3	0.588	0.588	-300*10 ⁻³ +230*10 ⁻³ -270*10 ⁻³	-306.855*10 ⁻³ +235.707*10 ⁻³ -278.113*10 ⁻³



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, düzlem çerçeve sistemlerin birinci ve ikinci mertebeli limit yüklerinin hesabı için yeni bir yük artımı yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde, [2]'de verilen yöntemden farklı olarak, denge denklemleri düğüm noktası yerdeğiştirmeleri ve plastik mafsallı dönmeleri cinsinden direkt olarak yazılmamış, kuvvet yöntemindeki süperpozisyon denklemine benzer bir ifade ile mafsalsız sistemde dış yüklerden ve birim plastik mafsallı dönmeleri cinsinden, sistemin dış yükler ve plastik mafsalların birim dönmeleri için analizinden elde edilmiştir. Akma koşulları da analizlerden elde edilen kesit zorlarına bağılı olarak direkt ve denge denklemlerini de içerecek şekilde elde edilmiştir. Böylece birinci ve ikinci mertebeli limit yükün hesabı özel bir yazılıma gerek olmadan yapılabilmektedir. Yöntemin bazı avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- 1- Akma koşulları sistemin çok sayıda yük vektörü için analizinden elde edildiğinden işlem hızı yüksektir.
- 2- SAP2000 gibi ticari yazılımların çoğunda API (Application Programming Interface) desteğı olduğundan ardışık olarak yapılacak analiz ve akma koşullarının yazılarak çözülmesi işlemleri kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.
- 3- Akma koşullarının ve normal kuvvetin denge denklemlerine etkilerinin doğrusallaştırılması nedeni ile yöntem ikinci mertebeli limit yük hesabına da aynen uygulanabilmektedir.
- 4- Yöntem akma koşullarının ve normal kuvvetin denge denklemlerine etkisinin doğrusallaştırılabildiğı üç boyutlu çerçevelerin birinci ve ikinci mertebeli limit yüklerinin hesabına da uygulanabilir.
- 5- Bilindiğı gibi, yüksek modların hesaba etkisinin fazla olduğu sistemlerde kullanılmak üzere çok modlu yük artımı yöntemleri geliştirilmiştir. Yöntem, Bölüm 2.1'de verilen varsayımlar altında düzlem veya üç boyutlu sistemler için çok modlu yük artımı yöntemlerine de uygulanacak şekilde geliştirilebilir.

6- Sistemdeki mafsallar dışında kalan düğüm noktalarının yerdeğıştirmeleri de, her adımda plastik dönmeler belli olduğundan, kesit zorlarında olduğu gibi, süperpozisyonla kolaylıkla elde edilebilir.

7- Bu çalışmadan sonraki hedef, API yazılımı kullanarak verilen yük artımı yönteminin otomatik hale getirilmesidir.



KAYNAKLAR

- [1] **Özer, E.** (1985). İkinci mertebe limit yükün hesabı için bir yük artımı yöntemi, Profesörlük tezi.
- [2] **Özer, E. ve Orakdöğen, E.** (2009). İleri yapı statığı ders notları, İTÜ İnşaat Fakültesi.
- [3] **İrtem, E.** (1991). Uzay çubuk sistemlerde ikinci mertebe limit yükün hesabı için bir yük artımı yöntemi, Doktora tezi.
- [4] **Orakdöğen, E.** (1993). A matrix displacement formulation for minimum weight design of frames, Structural Engineering and Mechanics, 14(4), 473-489.
- [5] **Girgin, K.** (1996). Betonarme yapı sistemlerinde ikinci mertebe limit yükün ve göçme güvenliliğinin belirlenmesi için bir yük artımı yöntemi, Doktora tezi.
- [6] **Özer, E.** (1987). Determination of second order limit load by a method of load increments, Bulletin of Technical University of Istanbul, Vol.40, Number.4, 815-836.
- [7] **SAP2000 V20.** Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc.
- [8] **Türkmen, G.** (2011). Tesir çizgilerinin ve tesir yüzeylelerinin mevcut bir yapı analizi programıyla doğrudan elde edilmesi, Yüksek lisans tezi.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Nursel KÜTÜK
Doğum Tarihi ve Yeri : 13.08.1994, GAZİANTEP
E-posta : kutuknursel@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği