

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TESİR ÇİZGİLERİNİN HESABINDA ENDİREKT MÜLLER-BRESLAU
PRENSİBİ VE BAZI UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Turgay TAHTACI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

OCAK 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TESİR ÇİZGİLERİNİN HESABINDA ENDİREKT MÜLLER-BRESLAU
PRENSİBİ VE BAZI UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Turgay TAHTACI
(501191097)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN

OCAK 2022

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**INDIRECT MÜLLER-BRESLAU PRINCIPLE FOR CONSTRUCTION OF
INFLUENCE LINES AND SOME APPLICATIONS**

M.Sc. THESIS

**Turgay TAHTACI
(501191097)**

Department of Civil Engineering

Structure Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN

JANUARY 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501191097 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Turgay TAHTACI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TESİR ÇİZGİLERİNİN HESABINDA ENDİREKT MÜLLER-BRELASU PRENSİBİ VE BAZI UYGULAMALARI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Burcu GÜNEŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Hasan ÖZKAYNAK
Beykent Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 ARALIK 2022
Savunma Tarihi : 12 Ocak 2023





Değerli Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bana bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren sayın danışman hocam Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN'e, bütün hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen annem Bilgi TAHTACI ve babam Naci TAHTACI'ya saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2022

Turgay TAHTACI
(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 Literatür Araştırması	2
2. YÜKLERİN SINIFLANDIRILMASI	3
2.1 Birinci Tür Sınıflandırma	3
2.2 İkinci Tür Sınıflandırma	3
2.3 Üçüncü Tür Sınıflandırma	3
2.4 Dördüncü Tür Sınıflandırma	3
3. TESİR ÇİZGİSİ KAVRAMI	5
3.1 Tesir Çizgilerinin Bazı Özellikleri	5
3.2 İzostatik Sistemlerin Tesir Çizgileri	6
3.2.1 İzostatik sistemlerin tesir çizgisi fonksiyonlarının denge denklemleri ile bulunması	6
3.2.2 İzostatik sistemlerin tesir çizgilerinin Müller-Breslau Prensibi ile elde edilmesi	8
3.3 Hiperstatik Sistemlerin Tesir Çizgilerinin Bulunması	11
3.3.1 Kuvvet yöntemi	11
3.3.1.1 Tesir çizgisi ordinatlarının elde edilmesi	13
3.3.1.2 Herhangi bir kesit zoruna veya mesnet tepkisine ait tesir çizgisinin şeklinin belirlenmesi	15
3.3.2 Kuvvet yöntemi ile tesir çizgilerinin elde edilmesine ait sayısal örnek	16
4. ENDİREKT MÜLLER-BRESLAU PRENSİBİ İLE TESİR ÇİZGİLERİNİN ELDE EDİLMESİ	27
4.1 Düzlem Kafes Sistemde Tesir Çizgisinin Endirekt Müller-Breslau Prensibi ile Elde Edilmesi	29
4.2 Sürekli Kiriş Tesir Çizgilerinin Endirekt Müller-Breslau Prensibi ile Elde Edilmesi	32
4.2.1 M8 tesir çizgisi	35
4.2.2 T7 tesir çizgisi	38
4.2.3 R3 tesir çizgisi	41
4.3 İzostatik Çerçeve Sistemin Tesir Çizgilerinin Endirekt Müller-Breslau Prensibi ile Elde Edilmesi	45

4.3.1 R1 tesir çizgisi	48
4.3.2 M5 tesir çizgisi.....	50
4.3.3 T5 tesir çizgisi.....	52
4.4 Teorik Parabolik Kemerli Çerçeve Sisteminin Tesir Çizgilerinin Elde Edilmesi	54
4.4.1 SAP2000 programında sistem modelinin oluşturulması	55
4.4.2 M_{BA} tesir çizgisinin hesabı	63
4.4.3 N_{BA} tesir çizgisinin hesabı.....	67
4.4.4 M_m tesir çizgisinin hesabı.....	74
4.4.5 Plastik dönme tesir çizgisi ϕ_m elde edilmesi.....	77
4.5 Kuvvet Yöntemiyle Çözülen Çerçeve Sistemin Tesir Çizgisinin EMBP'yle Elde Edilmesi.....	78
4.6 Kare Geometrisine Sahip Izgara Sistemde Burulma Momenti Tesir Çizgisinin Elde Edilmesi.....	82
4.7 L Şeklinde Izgara Sistemde Burulma Momenti Tesir Çizgisinin Elde Edilmesi	90
5. SONUÇ	99
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	104

KISALTMALAR

SAP : Structural Analysis Program

EMBP : Endirekt Müller-Breslau Prensibi





SEMBOLLER

G	: Sabit yük
Q	: Hareketli yük
I	: Atalet momenti
N	: Normal kuvvet
R	: Mesnet tepkisi
M	: Moment
F	: Kuvvet
u, v, w	: Dorusal yerdeğiştirme
φ	: Dönme
$\Delta\varphi$	: Rölatif dönme



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: R3-9 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	32
Çizelge 4.2: M8 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	37
Çizelge 4.3: T7 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	40
Çizelge 4.4: T3-2 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	43
Çizelge 4.5: T3-4 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	44
Çizelge 4.6: R3 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	45
Çizelge 4.7: R1 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	50
Çizelge 4.8: M5 tesir çizgisi hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.....	52
Çizelge 4.9: T5 tesir çizgisi hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.....	54
Çizelge 4.10: Eğri eksenli çubuk üzerindeki düğüm noktalarının koordinatları	57
Çizelge 4.11: Sistem üzerindeki bütün düğüm noktalarının koordinatları	58
Çizelge 4.12: Çubuk elemanların uç nokta bilgileri.....	61
Çizelge 4.13: Teorik parabolik kemeri oluşturan çubukların atalet momentleri	62
Çizelge 4.14: M_{BA} tesir çizgisi hesabı sonucu elde edilen tesir çizgisi ordinatları	66
Çizelge 4.15: X_{BA} tesir çizgisi hesabında elde edilen yerdeğiştirmeler	70
Çizelge 4.16: Y_{BA} tesir çizgisi hesabında elde edilen yerdeğiştirmeler	72
Çizelge 4.17: N_{BA} hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	73
Çizelge 4.18: M_m tesir çizgisi hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.....	76
Çizelge 4.19: M_5 tesir çizgisi hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları	81
Çizelge 4.20: Kare ızgara sistemde burulma momenti tesir çizgisi ordinatları	88
Çizelge 4.21: Kare ızgara sistemde rastgele seçilen noktalara yapılan yüklemeler sonucu oluşan burulma momentleri	89
Çizelge 4.22: L şeklinde ızgara sistemde burulma momenti tesir çizgisi ordinatları ..	96
Çizelge 4.23: L şeklinde ızgara sistemde rastgele seçilen noktalara yapılan yüklemeler sonucu oluşan burulma momentleri.....	97



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil.3.1: Basit kiriş sistemi ve tesir çizgisi diyagramları.....	6
Şekil 3.2: Basit kiriş sol parça.....	7
Şekil 3.3: Basit kiriş sağ parça	7
Şekil 3.4: İzostatik sistem, mekanizma durumları ve tesir çizgileri [1]	9
Şekil 3.5: Ankastre çerçeve sistemi.....	12
Şekil 3.6: Betti teoreminin uygulanması	12
Şekil 3.7: Çubuk üzerindeki tesir çizgisi ordinatlarının süperpozisyonla elde edilmesi.....	14
Şekil 3.8: Bir mesnedi ankastre, diğer mesnedi mafsallı çerçeve	16
Şekil 3.9: Hiperstatik çerçeve sistemi	16
Şekil 3.10: İzostatik esas sistem ve hiperstatik bilimeyenler.....	17
Şekil 3.11: X_1 birim yüklemesi ve moment diyagramı	17
Şekil 3.12: X_2 birim yüklemesi ve moment diyagramı	18
Şekil 3.13: M_{w1} moment diyagramı.....	18
Şekil 3.14: A ve C noktalarına uygulanan birim kuvvetler ve moment diyagramları.....	19
Şekil 3.15: X_1 tesir çizgisi ($w_1 = 1$ mesnet çökmesi yüklemesi)	21
Şekil 3.16: M_{w2} moment diyagramı.....	22
Şekil 3.17: X_2 tesir çizgisi ($w_2 = 1$ mesnet çökmesi yüklemesi)	24
Şekil 3.17 M_{0m} ve M_m tesir çizgisi diyagramları.....	25
Şekil 4.1: EMBP'nin Betti Karşıtlık Teoremi ile ispatı	28
Şekil 4.2: Düzlem kafes sistem	29
Şekil 4.3: Kafes sistem SAP2000 modeli [10].....	30
Şekil 4.4: Düğüm noktası ayırma işlemi sonrası.....	30
Şekil 4.5: Düğüm noktası birleştirme işlemi sonrası.....	30
Şekil 4.6: Kısıtlama tanımlaması	31
Şekil 4.7: 14 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.....	31
Şekil 4.8: 15 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.....	31
Şekil 4.9: 9-3 çubuğuna ait normal kuvvet tesir çizgisi diyagramı	32
Şekil 4.10: Sürekli kiriş [2].....	33
Şekil 4.11: SAP2000 üzerinde tanımlanan malzeme özellikleri.....	34
Şekil 4.12: SAP2000'de oluşturulan sistem modeli.....	35
Şekil 4.13: Kısıtlama tanımlaması	35
Şekil 4.14: Düğüm noktası ayırma işlemi sonrası oluşan sistem ve yapılan yüklemeler	36
Şekil 4.15: SAP2000 programında yapılan yüklemeler	36
Şekil 4.16: 8 numaralı düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirmeler	36
Şekil 4.17: 11 numaralı düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirmeler	37
Şekil 4.18: M8 tesir çizgisi diyagramı.....	38
Şekil 4.19: T7 için tanımlanan kısıtlama	38

Şekil 4.20: Düğüm noktası ayırma işlemi sonrası oluşan sistem ve yapılan yüklemeler	39
Şekil 4.21: SAP2000 programında yapılan birim yüklemeler	39
Şekil 4.22: 7 numaralı düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirmeler	39
Şekil 4.23: 11 numaralı düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirmeler	40
Şekil 4.24: T7 tesir çizgisi diyagramı	41
Şekil 4.25: T2-3 hesabında oluşturulan sistem modeli	41
Şekil 4.26: 3 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	42
Şekil 4.27: 11 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	42
Şekil 4.28: T34 hesabında oluşturulan sistem modeli	43
Şekil 4.29: 3 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	43
Şekil 4.30: 11 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	44
Şekil 4.31: R3 mesnet tepkisi tesir çizgisi diyagramı	45
Şekil 4.32: İzostatik çerçeve sistem	46
Şekil 4.33: Malzeme özellikleri	47
Şekil 4.34: Kesit özellikleri	48
Şekil 4.35: İzostatik çerçeve SAP2000 sistem modeli	48
Şekil 4.36: R1 tesir çizgisi hesabında yapılan birim yükleme	49
Şekil 4.37: 1 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	49
Şekil 4.38: R1 tesir çizgisi diyagramı	50
Şekil 4.39: M5 tesir çizgisi hesabında birim yüklemeler	51
Şekil 4.40: 5 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	51
Şekil 4.41: 9 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	51
Şekil 4.42: M5 tesir çizgisi diyagramı	52
Şekil 4.43: T5 tesir çizgisi hesabında birim yüklemeler	53
Şekil 4.44: 5 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	53
Şekil 4.45: 9 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	53
Şekil 4.46: T5 tesir çizgisi diyagramı	54
Şekil 4.47: Eğik eksenli çubuklu çerçeve sistemi	55
Şekil 4.48: SAP2000 şablon seçimi	55
Şekil 4.49: Malzeme özelliklerinin tanımlanması	56
Şekil 4.50: SAP2000 etkileşimli veritabanı düzenleme penceresi	59
Şekil 4.51: SAP2000 düğüm noktası koordinatları tablosu	59
Şekil 4.52: SAP2000 çubuk eleman isim ve uç nokta bilgileri tablosu	60
Şekil 4.53: Kesit özelliklerinin tanımlanması	63
Şekil 4.54: SAP2000 sistem modeli	63
Şekil 4.55: Düğüm noktası ayırma ve birleştirme işlemleri	64
Şekil 4.56: SAP2000 birim yükleme uygulaması	64
Şekil 4.57: 21 noktası yerdeğiştirmeleri	65
Şekil 4.58: 34 noktası yerdeğiştirmeleri	65
Şekil 4.59: M_{BA} tesir çizgisi diyagramı	67
Şekil 4.60: N_{BA} hesabında yapılan yüklemelerin yönleri	68
Şekil 4.61: X_{BA} yüklemesinde 21 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	68
Şekil 4.62: X_{BA} yüklemesinde 34 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	69
Şekil 4.63: Y_{BA} yüklemesinde 21 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	71
Şekil 4.64: Y_{BA} yüklemesinde 34 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	71
Şekil 4.65: N_{BA} tesir çizgisi diyagramı	74
Şekil 4.66: 26 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	75
Şekil 4.67: 34 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri	75
Şekil 4.68: M_m tesir çizgisi diyagramı	77

Şekil 4.69: Plastik dönme tesir çizgisi diyagramı	78
Şekil 4.70: Malzeme özelliklerinin programa girilmesi	79
Şekil 4.71: Kesit özelliklerinin programa girilmesi	80
Şekil 4.72: Hiperstatik çerçeve sistem SAP2000 modeli	80
Şekil 4.73: 3 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.....	81
Şekil 4.74: 7 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.....	81
Şekil 4.75: M_5 tesir çizgisi diyagramı	82
Şekil 4.76: Çubuk elemanlardan oluşan kare ızgara sistem.....	83
Şekil 4.77: Kare ızgara sistem malzeme özellikleri	84
Şekil 4.78: Kare ızgara sistem çubuk kesit özellikleri	85
Şekil 4.79: Kare ızgara sistem SAP2000 modeli	85
Şekil 4.81: Düğüm noktası ayırma ve birleştirme işlemleri sonrası düğüm noktaları	86
Şekil 4.81: 124 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.....	87
Şekil 4.82: 122 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.....	87
Şekil 4.83: 25 numaralı düğüm noktasına uygulanan birim yükleme sonucu oluşan burulma momenti.....	90
Şekil 4.84: Çubuk elemanlardan oluşan L şeklinde ızgara sistem	91
Şekil 4.85: L şeklinde ızgara sistem malzeme özellikleri	92
Şekil 4.86: L şeklinde ızgara sistem çubuk elemanlarının kesit özellikleri.....	93
Şekil 4.87: L şeklinde çubuk ızgara sistem SAP2000 modeli	93
Şekil 4.89: Düğüm noktası ayırma ve birleştirme işlemi sonrası düğüm noktaları ...	94
Şekil 4.89: 99 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.....	95
Şekil 4.90: 97 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.....	95
Şekil 4.91: 28 numaralı düğüm noktasına uygulanan birim yükleme sonucu oluşan burulma momenti	98



TESİR ÇİZGİLERİNİN HESABINDA ENDİREKT MÜLLER-BRESLAU PRENSİBİ VE BAZI UYGULAMALARI

ÖZET

Bu çalışmada tesir çizgilerinin hazır bir yapı analizi yazılımı ile belirlenmesinde Müller-Breslau Prensibi'nin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Müller-Breslau Prensibi'ne göre, sistem üzerindeki herhangi bir kesite yapılacak rölatif yerdeğiştirme yüklemesi, mesnetlere uygulanacak yerdeğiştirme yüklemesi dışında kolaylıkla yapılamamaktadır. Bu sebeple söz konusu yerdeğiştirmeyi oluşturan kuvvetin sisteme uygulandığı Endirekt Müller-Breslau Prensibi adında alternatif bir yöntem sunulmuştur. Bu alternatif yöntemde, hazır yazılım kullanılarak aynı koordinatlara sahip ancak farklı sınır koşullarına sahip iki ayrı düğüm noktasına iki ayrı yükleme yapılması mümkün olmaktadır. Endirekt Müller-Breslau Prensibi, çalışma kapsamında farklı yapı sistemleri üzerinde denenmiş ve yöntemin çeşitli sistemler üzerinde geçerli ve uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Çalışma beş bölüm halinde sunulmuş ve birinci bölümünde çalışmanın amacı, kapsamı ve literatürdeki çalışmalar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde yapı sistemlerine etkiyen yükler hakkında genel bilgi verilerek bu yüklerin sınıflandırması yapılmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde tesir çizgisi kavramının tanımı yapılarak genel özelliklerinden bahsedilmiştir. İzostatik sistemlerin tesir çizgilerinin hesaplanması anlatılarak örnek bir basit mesnetli kiriş için tesir çizgisi fonksiyonları oluşturulmuştur. Yine bu bölümde hiperstatik sistemlerin tesir çizgilerinin özelliklerinden bahsedilerek tesir çizgilerinin hesaplanmasında kuvvet yöntemi detaylı bir şekilde anlatılarak bu yöntem ile örnek bir hiperstatik çerçeve sisteminin tesir çizgisi hesaplanmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde Endirekt Müller-Breslau Prensibi detaylı bir şekilde anlatılarak yöntemin SAP2000 programında nasıl uygulanacağından bahsedilmiştir. Bu kısımda düzlem kafes, sürekli kiriş, izostatik çerçeve, eğri eksenli çubuklu çerçeve, çubuk elemanlardan oluşan kare ızgara, yine çubuk elemanlardan oluşan L şeklinde ızgara gibi sistemler SAP2000 programında modellenerek, eğilme momenti, kesme kuvveti, mesnet tepkisi, plastik dönme, burulma momenti gibi tesir çizgileri Endirekt Müller-Breslau Prensibi ile elde edilmiştir. Endirek Müller-Breslau Prensibi ile elde edilen tesir çizgileri, yapı sistemlerine birim yüklemeler yapılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda Endirek Müller-Breslau Prensibi'nin doğruluğu ispatlanmıştır. Çalışma kapsamında literatürde kullanılan bazı sayısal örneklere ait tesir çizgileri Endirek Müller-Breslau Prensibi ile elde edilmiştir.

Son bölümde çalışmada elde edilen sonuçlar ile ilgili düşüncelere yer verilerek, Endirekt Müller-Breslau Prensibi'nin kullanılabileceği çalışmalardan bahsedilmiştir.



INDIRECT MÜLLER-BRESLAU PRINCIPLE FOR CONSTRUCTION OF INFLUENCE LINES AND SOME APPLICATIONS

SUMMARY

In this thesis, the applicability of the Müller-Breslau Principle was investigated in determining the influence lines with a structure analysis program. Müller-Breslau Principle is one of the effective method for construction of influence lines. On the other side, commercial computer codes are effective tools for analysis and design of structures such as SAP2000 and these packages may also be used for construction of influence lines according to Müller-Breslau Principle. However, analysis of the structure for displacement applied to the system in accordance with the Müller-Breslau Principle is not an easy task, except in special cases corresponding to support settlements. For this reason, an alternative method called Indirect Müller-Breslau Principle, in which the force corresponds to unit displacement is applied to the system, is presented. Indirect Müller-Breslau Principle has applied to different structural systems within the scope of the study and it has been seen that the method is valid and applicable on various systems.

The study is presented in five parts and in the first part, information on subject of the study and studies in the literature are given.

In the second part, general information about the live loads acting on the structural systems is given and the classification of these loads is made.

In the third part of the study, the definition of the influence line is given and its general characteristics are mentioned. By explaining the finding of the influence lines of statically determinate structures, influence line functions are created on a sample simply supported beam. Again in this section, the characteristics of the influence lines of statically indeterminate structures are mentioned and the force method in the construction of the influence lines is presented in detail and illustrated with a numerical example.

In the fourth part of the study, the Indirect Müller-Breslau Principle is explained in detail and how the method will be applied in the SAP2000 program is mentioned. In this section, systems such as truss, continuous beam, statically determinate frame, frame with arch, square and L shaped grillages are modeled in the SAP2000 program and such as bending moment, shear force, support force, plastic rotation, torsion moment influence lines were obtained by the Indirect Müller-Breslau Principle. The influence line ordinates obtained by using Indirect Müller-Breslau Principle were compared by applying unit loadings to the structural systems. In the comparisons made, it was observed that the constructed influence lines by using Indirect Müller-Breslau Principle were correct. In order to make the method comparable, numerical examples that have been used before in the literature are also included in the study.

Flow chart in the construction of influence lines with Indirect Müller-Breslau Principle is as follows:

1- Initially the structural system is modeled in the SAP2000 program, the nodal point (joint) on the cross section which influence line is investigated is disconnected by the joint disconnection feature of SAP2000.

2- After the nodal joint disconnection, two nodal points will be formed on the said cross- section. The coordinates of these two nodes are the same. In addition, more points may occur on this cross-section, depending on the number of connected elements on this cross-section. The nodal points of other elements except the element whose influence line is calculated are merged. Finally at this cross-section two nodal points must be remain. This situation is explained in more detail in the truss, frame with arch, square and L shaped grillages examples used in the study.

According to Müller-Breslau Principle, the internal force component which influence line constructed is eliminated first by cutting at the direction of internal force and an unit displacement is applied at inverse direction. The elastic curve of the structure due to this displacement yields to the influence line of related internal force. In the construction of influence lines by the Indirect Müller-Breslau Principle, a unit force couple or a unit moment couple will be applied to these two joints at the beginning. The reason for the joint disconnection is to apply unit loads in opposite directions on the same section.

3- These two nodes will be free in all directions after joint disconnection. A constraint is assigned to these two points in such a way that the eliminates the internal force component which influence line constructed and their all other displacements are equal.

4- After this process, unit force or unit moment couple is applied to these two points according to the internal force component of constructed influence line and system analysis is made. As a result of the analysis, the displacements in the direction of this internal force component are read at these two points. Using these displacements and Betti's Reciprocal Theorem, a constant coefficient is calculated.

5- The influence line is obtained by multiplying this constant coefficient with the elastic curve obtained as a result of unit loading. This process is equivalent to multiplying the displacement values obtained as a result of the unit loading apply in the SAP2000 program and the mentioned constant number.

By using the method, the influence lines of plastic rotations can also be constructed easily. If the rotational influence line ordinates of the potential plastic hinges on the structure, obtained by the method proposed in the study, are collected in a database, the database can be used in the nonlinear analysis of the system or in the structural health monitoring algorithm. Thus, these influence lines are very useful for structural monitoring since the plastic rotations can be calculated by other tools after an earthquake or an impact loading. Plastic hinge rotations which come from structural health monitoring system can be used to evaluate the structure for new internal force distribution.

The Indirect Müller-Breslau Principle can also be used to obtain the influence line ordinates of the plates if the plates are idealized as a grid frame system and appropriate transformations are made.

In the last section, conclusions on comparisons of the results from SAP2000 and the other methods.



1. GİRİŞ

Yapı sistemlerinin öngörülen kullanım süresi boyunca işlevlerini güvenli bir şekilde yerine getirebilmeleri için tasarım aşamasında, yapının bu kullanım süresince elemalarında oluşabilecek en büyük gerilmeler araştırılır. Yapı elemanlarında oluşan bu en büyük gerilmelerin değeri ve yapı üzerindeki konumu, yapı sistemine uygulanan yüklerin büyüklüğü ve uygulama noktasının değişmesi ile değişmektedir. Tesir çizgileri hareketli yüklerden meydana gelen gerilmelerin belirlenmesinde kullanılan etkin yöntemlerden biridir. Özellikle köprü, viyadük, kreyn gibi yapı sistemlerinde oluşan etkiler araştırılırken tesir çizgileri çok kullanışlı olmaktadır. Tesir çizgilerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan Müller-Breslau Prensibi uygulaması kolay, pratik bir yöntemdir.

Günümüzde yapı sistemlerinin analizinde yaygın olarak kullanılan hazır yapı analiz programları, yapı sistemlerinin çeşitli etkiler altındaki davranışını çok hızlı ve hassas bir şekilde hesaplayan araçlardır. Bu özellikleri nedeniyle yapı analiz programları araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada tesir çizgilerinin bir yapı analiz programı ile elde edilmesinde Müller-Breslau Prensibi'nin dolaylı olarak uygulanabilirliği araştırılmış ve Endirekt Müller-Breslau Prensibi adı altında dolaylı bir yöntem kullanılarak tesir çizgilerinin pratik bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır. Yöntem, çeşitli yapı sistemlerinde geçerliliğini araştırmak için izostatik ve hiperstatik olmak üzere çeşitli sayısal örnekler üzerinde denenmiştir. Çalışmada kullanılan sayısal örneklerin bir kısmı karşılaştırma amacıyla literatürde bulunan çalışmalardan seçilmiştir.

Tez kapsamında ilk olarak yapı sistemlerine etki eden hareketli yükler sınıflandırılmış ve tesir çizgisi kavramı anlatılmıştır. İzostatik sistemlerde tesir çizgisi fonksiyonlarından bahsedilerek sayısal örnek üzerinde hesaplar verilmiştir. Hiperstatik sistemlerin tesir çizgilerinin hesaplanmasında kuvvet yöntemi anlatılarak sayısal örnek ile hesap adımları gösterilmiştir. Çalışmanın temel konusu olan

Endirekt Müller-Breslau Prensibi dördüncü bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Yöntem, izostatik ve hiperstatik çeşitli yapı sistemlerine SAP2000 programı kullanılarak uygulanmış ve elde edilen tesir çizgisi diyagramları verilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Tesir çizgilerinin hesaplanması üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Birim yükün sistem üzerindeki değişen konumu için ayrı ayrı analiz yaparak araştırılan tesir çizgisini bulmak uzun zaman alacağından araştırmacılar daha kullanışlı ve hızlı yöntemler geliştirmeye çalışmışlardır.

Müller-Breslau Prensibi'nin açıklandığı bu çalışmada, yöntemin uygulamaları çeşitli örneklerle verilmiştir [1].

Bu çalışmada, Müller-Breslau Prensibi'ne dayanan, çerçeve, kafes sistem, kabuk gibi sistemlerinin çeşitli tesir çizgisi ve tesir yüzeylerini sonlu elemanlar ile bulmak için yöntem verilmiştir. Çalışmadaki örnekler MSC/NASTRAN yapı analiz programı kullanılarak çözülmüştür. Fakat yöntem analiz programında uygulanırken sisteme birim deplasman uygulayabilmek için yeni düğüm noktaları, düğüm noktası kısıtlamaları gibi girdiler atamak gerekmektedir [2].

Adjoint yönteminde bitişik denklemler kullanılarak bitişik değişken eleman vektörü hesaplanmasından sonra tesir çizgisi ordinatları denge denklemleri ile çözümlenerek elde edilir [3].

Birleşik değer vektörleri için bir düzeltme ortaya konmuştur. Bu düzeltme sistemdeki serbestlik dereceleri yönünde bir tepki fonksiyonu araştırıldığında gereklidir [4].

Müller-Breslau Prensibi'ni sonlu elemanlara uygulamak için eleman yükleme matrisleri tanımlanmıştır. Yükleme matrisleri Betti Teoremi ve sonlu eleman denklemleri ile elde edilmiştir. Tesir çizgisi ordinatları, birim deplasman ya da birim yük uygulama teknikleri yerine eleman yükleme matrislerinin kullanılmasıyla yapılan yapısal analiz sonucu elde edilir [5].

Birim deplasman sabitlerinin sisteme uygulanması ile elde edilen global eksenlerdeki yerdeğiştirmelere, süreksizliğe sahip elemanlardaki yerel eksenlerde oluşan yerdeğiştirmelerin ilave edilmesiyle tesir çizgileri bulunmuştur [6].

Hiperstatik sistemlerin kesit zoru ve mesnet reaksiyonu tesir çizgilerinin hesabı için yük, yerdeğiştirme diferansiel ilişkisine bağlı kinematik bir yöntem önerilmiştir [7].

2. YÜKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Bir yapı sisteminde iç kuvvet, yerdeğiştirme ve şekil değiştirmeye neden olan etkilere yük denir. Bu etkiler, dış yük, ısı değişimi, rötre, sünme, mesnet çökmesi olabilir. Dış yüklerin başlıca sınıflandırılması dört başlık altındadır [8]. Bu çalışmada ikinci tür sınıflandıma kapsamındaki yükler kullanılmıştır.

2.1 Birinci Tür Sınıflandırma

- a-) Yapı yükleri (g, G) – (ölü yükler; özağırlık): Yapının kendi ağırlığından oluşan yüklerdir.
- b-) İlave yükler (q, Q) – (canı yükler; insan, eşya, kar, araç): Yapının taşımakla görevli olduğu yüklerdir.
- c-) Toplam yükler ($p=g+q, P=G+Q$) – (Yapı + İlave Yükler)

2.2 İkinci Tür Sınıflandırma

- a-) Sabit yükler (yapı yükleri, insan, kar): Yapı üzerinde konu değiştirmeyen yüklerdir.
- b-) Hareketli yükler (araç, vinç, vb): Yapı üzerinde konum değiştiren yüklerdir.

2.3 Üçüncü Tür Sınıflandırma

- a-) Tekil yükler: Sistem üzerinde tekil bir noktaya etki eden yüklerdir.
- b-) Yayılı yükler: Bir çubuk ekseni boyunca yapı sistemine etki eden, çeşitli geometrik şekillerle tanımlanan yüklerdir. Örnek olarak; düzgün yayılı yükler, üçgen yayılı yükler, trapez yayılı yükler verilebilir.
- c-) Yük katarı: Şiddetleri ve ara mesafeleri değişmeyen yayılı ve tekil yüklerden oluşan yük gruplarıdır.

2.4 Dördüncü Tür Sınıflandırma

- a-) Dolaysız yükler: Yapıya doğrudan etki eden yüklerdir.

b-) Dolaylı yükler: Yapıya doğrudan etki etmeyen yüklerdir. Örnek olarak; köprülerde döşeme yüklerinin esas taşıyıcı kirişe enleme kirişleri ile atarılması durumu verilebilir.



3. TESİR ÇİZGİSİ KAVRAMI

Bir yapı sistemine etki eden herhangi bir yükten dolayı yapı sisteminde kesit zorları, mesnet tepkileri, yerdeğiştirme ve şekil değiştirme gibi etkiler oluşur. Yapı sisteme etki eden yükün konumu ve büyüklüğü değiştikçe sistemde oluşan kesit zorları ve diğer etkiler de değişir. Yapı sisteminin tasarımı aşamasında sistemde çeşitli kesitlerde maksimum gerilmeler araştırılır. Yapı sistemine hareketli yüklerin etkimesi durumunda, yükün konumuna ve büyüklüğüne göre sistemde oluşan maksimum gerilmelerin de konumu ve büyüklüğü değişecektir. Tasarım aşamasında yükün her konumu ve büyüklüğü için ayrı ayrı analiz yapmak çok uzun süreceğinden araştırılan kesit büyüklüğü için ilgili büyüklüğün tesir çizgisinden faydalanmak daha hızlı bir yol olacaktır. Köprü gibi üzerindeki yüklerin genelde hareketli olduğu yapıların tasarımında tesir çizgilerinin kullanımı büyük kolaylık sağlamaktadır.

Bir yapı sistemi üzerinde belirli bir doğrultuda hareket eden bir birimlik kuvvetten dolayı sistemin herhangi bir kesitinde oluşan kesit zorlarının veya mesnet tepkilerinin değerini yükün bulunduğu konumdaki ordinat olarak veren diyagrama o kesit zoruna ait tesir çizgisi diyagramı denir.

Tesir çizgilerinin çizimi için uygulanan klasik yolda bir birimlik kuvvet sistemin herhangi bir noktasına etki ettirilir ve belirlenen bir başlangıç noktasına uzaklığı x ile ifade edilerek araştırılan kesit tesirinin değeri x 'e bağlı olarak ifade edilir. Bu yöntem fonksiyonlar yöntemi denir. Çoğu zaman tesir çizgisi tek bir fonksiyon ile gösterilemez.

3.1 Tesir Çizgilerinin Bazı Özellikleri

Tesir çizgileri birim yükün sistem üzerinde hareket ettiği hat boyunca hareketli yüke dik olarak çizilir.

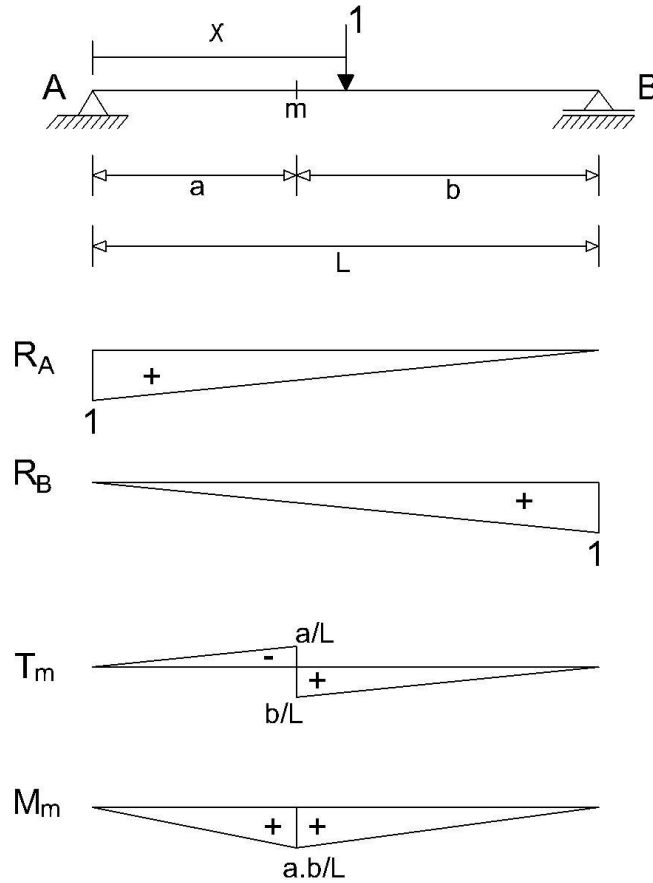
Tesir çizgisi diyagramlarının ordinatı, birim yükün uygulandığı yönde pozitiftir. Sıfır çizgisi altında kalan alan genelde pozitif olarak alınır. Bazı kaynaklarda bu yön seçimi farklılık göstermektedir.

3.2 İzostatik Sistemlerin Tesir Çizgileri

İzostatik sistemler, dış etkiler sonucu oluşan mesnet tepkisi, kesit zoru, yer değiştirme ve şekil değiştirmelerin yalnızca denge denklemleri kullanılarak hesaplanabilen sistemlerdir. Sistemdeki bilinmeyen sayısı denge denklemi sayısına eşittir. İzostatik sistemlerde malzemenin lineer elastik olduğu kabul edilir. Düzlem sistemler yüklemeden sonra da düzlem kaldığı kabul edilmektedir.

3.2.1 İzostatik sistemlerin tesir çizgisi fonksiyonlarının denge denklemleri ile bulunması

Şekil 3.1 de verilen A, B basit mesnetli kirişi üzerinde 1 birimlik kuvvet A noktasından B noktasına doğru gezdirilmiştir. Kuvvetin A noktasına olan uzaklığı x ile ifade edilmiştir.



Şekil.3.1: Basit kiriş sistemi ve tesir çizgisi diyagramları.

Şekil 3.1’de R_A ve R_B ile gösterilen A ve B mesnet tepkilerinin tesir çizgisi diyagramı fonksiyonları hesaplanırsa:

$$M_B = 0 \quad R_A \cdot L - 1 \cdot (L - x) = 0 \#(3.1)$$

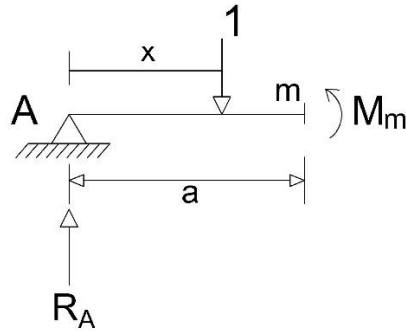
$$R_A = \frac{L-x}{L}$$

$$M_A = 0 \quad R_B \cdot L - 1 \cdot x = 0 \#(3.2)$$

$$R_B = \frac{x}{L}$$

Şekil 3.1’de M_m ile gösterilen m noktasındaki eğilme momenti tesir çizgisi diyagramının belirlenebilmesi için iki fonksiyon hesaplanması gerekir.

$0 \leq x \leq a$ bölgesi için:

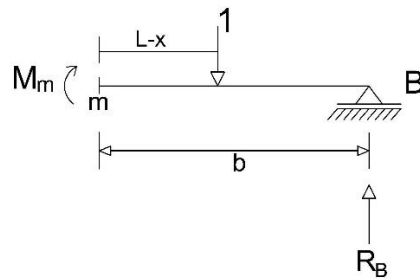


Şekil 3.2: Basit kiriş sol parça.

$$M_m = \frac{a \cdot (L - x)}{L} - 1 \cdot (a - x) \#(3.3)$$

$$M_m = \frac{L \cdot x - x \cdot a}{L} = \frac{x \cdot b}{L}$$

$a \leq x \leq L$ bölgesi için:



Şekil 3.3: Basit kiriş sağ parça.

$$M_m = \frac{x \cdot b}{L} - 1 \cdot (x - a) \#(3.4)$$

$$M_m = \frac{x \cdot b - x \cdot L + a \cdot L}{L} = \frac{a \cdot (L - x)}{L}$$

Şekil 3.1 de T_m ile gösterilen m noktasındaki kesme kuvveti tesir çizgisi diyagramının fonksiyonu hesaplanırsa:

$0 \leq x \leq a$ için:

$$T_m = \frac{(L - x)}{L} - 1 = -\frac{x}{L} \quad \#(3.5)$$

$a \leq x \leq L$ için:

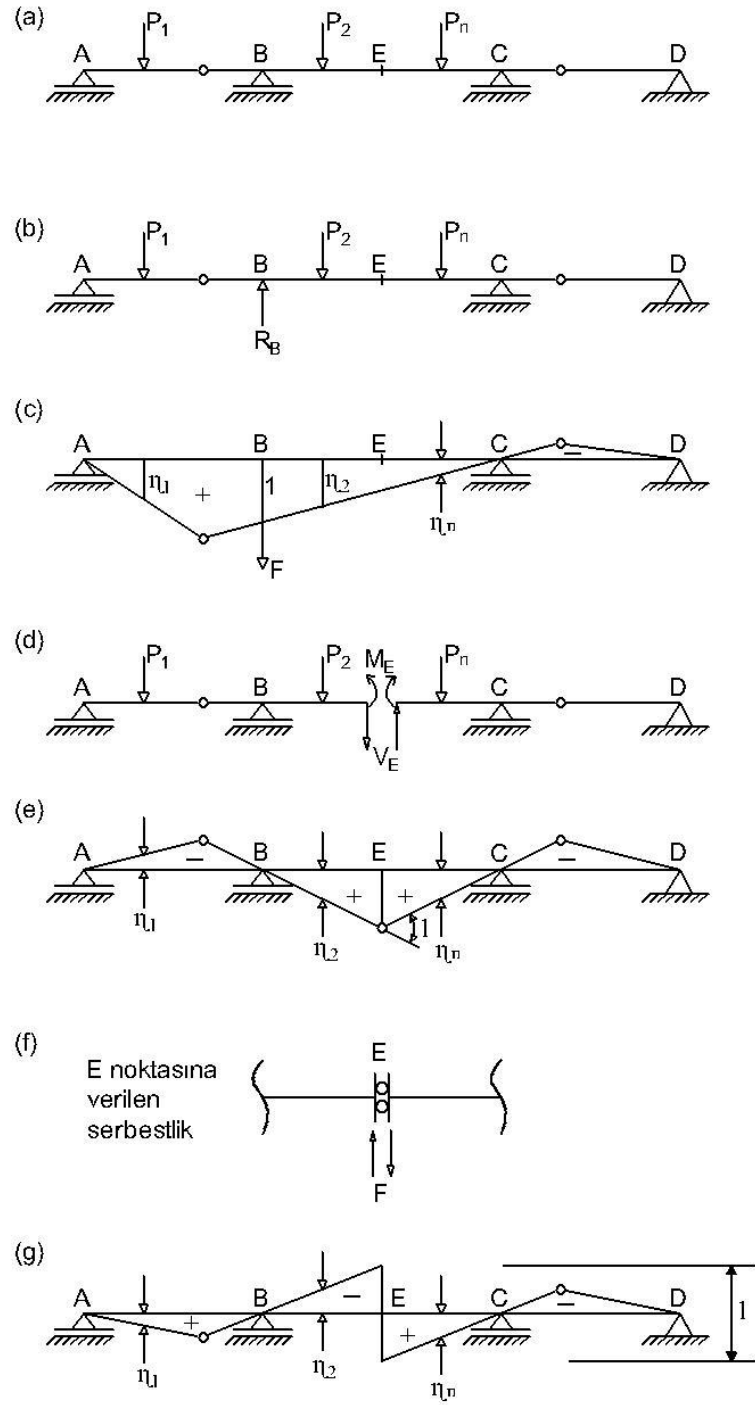
$$T_m = \frac{1 - x}{L} \quad \#(3.6)$$

3.2.2 İzostatik sistemlerin tesir çizgilerinin Müller-Breslau Prensibi ile elde edilmesi

Müller-Breslau Prensibi 'ne göre tesir çizgisi araştırılan büyüklüğün bulunduğu noktada o büyüklüğü ortadan kaldıracak bir kesim yapıp yerine birim yer değiştirmeye neden olacak yükleme uygulanmasıyla elde edilen elastik eğri, araştırılan tesir çizgisini vermektedir. Müller-Breslau Prensibi tesir çizgilerinin bulunmasında kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir ve izostatik sistemlerin tesir çizgilerinin belirlenmesinde denge denklemleri ile hesaba göre daha hızlı bir yoldur.

İzostatik sistemlerin tesir çizgileri Müller-Breslau Prensibi ile hesaplanırken tesir çizgisi çizilmek istenen kesit zoru veya mesnet tepkisinin bulunduğu noktada kesim yapılır ve sistem mekanizma durumuna getirilir. Örneğin basit kirişli bir sistemin mesnet tepkisi tesir çizgisi çizilmek istenirse ilgili mesnet kaldırılıp yerine negatif yönde birim deplasmana neden olacak yükleme uygulanır. Herhangi bir kesitin eğilme momenti tesir çizgisini bulmak için ise ilgili noktaya mafsal eklenir ve birim dönmeye neden olacak moment etki ettirilir. Bu yükleme sonrası oluşan şekil değiştirme diyagramı o kesitin eğilme momenti tesir çizgisine özdeştir.

Şekil 3.4'de izostatik sistemin mesnet tepkisi, eğilme momenti ve kesme kuvveti tesir çizgileri gösterilmiştir [1]. Şekil 3.4'de (b) durumunda B noktasındaki mesnet kaldırılıp yerine birim yerdeğiştirmeye neden olacak bir F yükü uygulanırsa kiriş (c) durumundaki şekil değiştirmiş hali alacaktır.



Şekil 3.4: İzostatik sistem, mekanizma durumları ve tesir çizgileri [1].

Betti Karşılıklı Teoremi'ne göre doğrusal elastik bir sisteme etkiyen iki yükleme durumunda birincinin ikinciye ait yerdeğiştirmelerde yaptığı işin ikincinin birinciye ait yerdeğiştirmelerde yaptığı işe eşit olmalıdır. Şekil 3.4 durum (b) ve (c) üzerinde Betti Teoremi uygulandığında denklem 3.7 elde edilir.

$$\eta_1 P_1 + \eta_2 P_2 \pm \dots + \eta_n P_n - 1 \cdot R_B = F \cdot 0 \quad (3.7)$$

Denklem 3.7 ile Şekil 3.4 (b) durumundaki yük grubunun Şekil 3.4 (c) durumundaki yerdeğiştirmeler ile yaptığı işin, (c) durumundaki yük grubunun (b) durumundaki yerdeğiştirmelerle yaptığı işe eşit olduğu gösterilmiştir. F kuvveti sıfır ile çarpılmıştır çünkü (b) durumunda B noktasında herhangi bir yerdeğiştirme oluşmaz.

Denklem 3.7 aşağıdaki şekilde denklem 3.8'deki gibi yazılabilir.

$$R_B = \sum_{i=1}^n \eta_i P_i \#(3.8)$$

Şekil 3.4'de verilen B mesnet tepkisine ait tesir çizgisinde, B noktasında oluşan yerdeğiştirme değerı 1 birimdir. Buradan da görüleceği üzere, B mesnet tepkisinin tesir çizgisinin belirlenmesi için araştırılan etkiyi ortadan kaldıran bir serbestlik verilir yani B mesneti kaldırılır ve o noktada sisteme aşağı yönde yani mesnet tepkisine zıt yönde birim deplasman verilir.

Müller-Breslau Prensibi ile E kesitine ait eğilme momenti tesir çizgisi çizilmek istenirse, E noktasındaki eğilme momentini ortadan kaldırmak için söz konusu noktaya mafsalları eklenir ve birim dönme oluşturacak F kuvvet çifti E noktasında birleşen iki çubuk ucuna uygulanır. Şekil 3.4 (d) ve (e) durumlarına Betti Teoremi uygulanırsa denklem 3.9 elde edilir.

$$\eta_1 P_1 + \eta_2 P_2 \pm \dots + \eta_n P_n - 1.M_E = F.0 \#(3.9)$$

$$M_E = \sum_{i=1}^n \eta_i P_i$$

Şekil 3.4'te (e) durumunda verilen M_E tesir çizgisi diyagramında görüleceği üzere E noktasında eğilme momentine ters yönde birim dönme oluşmuştur.

E kesitine ait kesme kuvveti tesir çizgisini belirlenirken E noktasındaki kesme kuvvetini ortadan kaldırmak için o noktaya bir serbestlik verilir ve kesme kuvvetine ters yönde birim deplasman oluşturacak F kuvvet çifti E noktasında birleşen çubuk uçlarına uygulanır. Sistemde kesme kuvvetini ortadan kaldıran kesim sonrası oluşan kesit ve uygulanan kuvvet çifti Şekil 3.4'te (f) durumunda gösterilmiştir. Kesme kuvveti tesir çizgisi fonksiyonunun elde edilmesi denklem 3.10'da Betti Teoremi yardımı ile gösterilmiştir.

$$\eta_1 P_1 + \eta_2 P_2 \pm \dots + \eta_n P_n - 1.M_E = F.0 \#(3.10)$$

$$V_E = \sum_{i=1}^n \eta_i P_i$$

E noktasına uygulanan F kuvvet çifti sonucu E noktasında oluşması gereken birim deplasman değeri, Şekil 3.4 (g) durumunda verilen V_E tesir çizgisi diyagramında E noktasının hemen solundaki ve hemen sağındaki ordinat değerlerinin toplamının 1 olması ile izah edilebilir. Oluşan tesir çizgisi diyagramı, sistemde kesme kuvvetini ortadan kaldıran kesim yapıldıktan sonra o noktaya uygulanan birim deplasman oluşturacak kuvvet çifti sonucu oluşan şekil değiştirme diyagramına özdeştir.

3.3 Hiperstatik Sistemlerin Tesir Çizgilerinin Bulunması

Dış etkilerden dolayı oluşan kesit zorları ve mesnet tepkilerini denge denklemleri ile bulmak mümkün değilse bu tür sistemlere hiperstatik sistemler denir. Hiperstatik sistemlerin çözümü için denge denklemlerine ek olarak geometrik süreklilik koşullarından faydalanmak gerekir. Bu geometrik süreklilik koşulları kuvvet esaslı ise çözüm yöntemine kuvvet yöntemi, deplasman esaslı ise deplasman yöntemi denir.

Hiperstatik sistemlerde tesir çizgilerini bulmak için izostatik sistemlerdeki ile benzer uygulamalar yapılır. Hiperstatik sistemlerin tesir çizgileri ile izostatik sistemlerin tesir çizgileri arasındaki en belirgin fark, izostatik sistemlerde kritik noktalar arasında tesir çizgilerinin doğrusal çizgilerden oluşurken, hiperstatik sistemlerde kritik noktalar arasında tesir çizgilerinin eğri parçalarından oluşmasıdır.

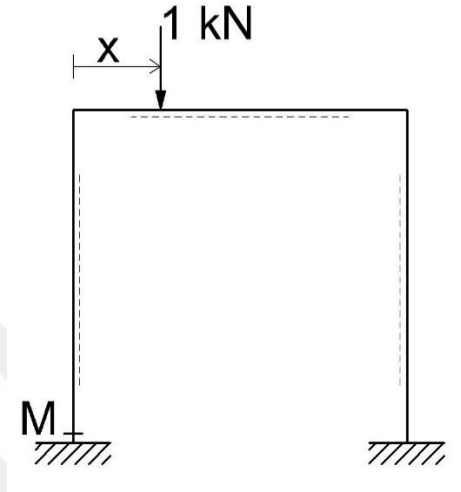
3.3.1 Kuvvet yöntemi

Yapı sistemlerindeki herhangi kesit zorunun veya mesnet tepkisinin tesir çizgisinin kuvvet yöntemi ile çizilebilmesi için, Betti Teoreminden yararlanılabilir [9]. Bu teoreme göre, tesir çizgisi çizilecek büyüklükle aynı doğrultuda ve ters yöndeki birim yerdeğiştirme yüklemeyle oluşan elastik eğri, söz konusu büyüklüğün tesir çizgisine özdeştir.

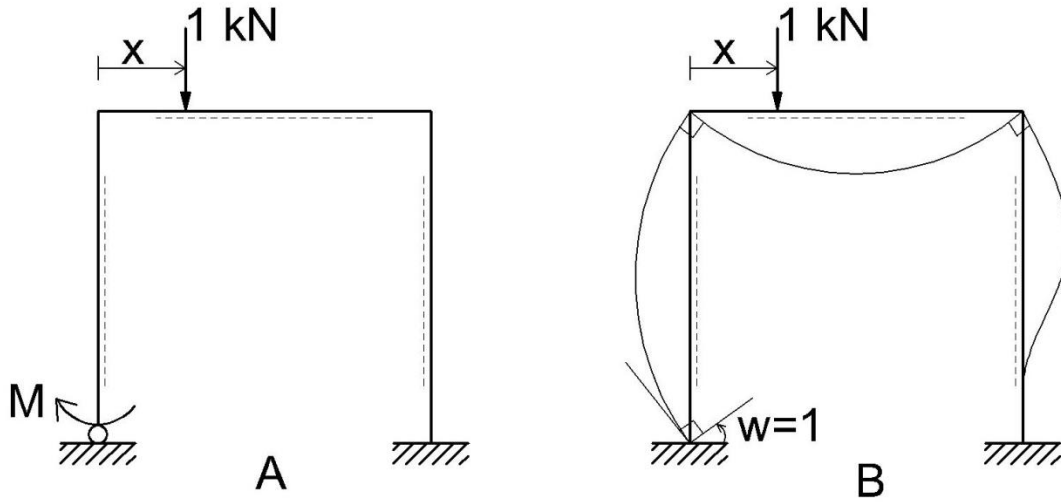
Şekil 3.5'teki her iki mesneti de ankastre olan hiperstatik sistemde sol mesnetteki M eğilme momenti tesir çizgisini çizmek üzere Betti Karşılıklı Teoremi uygulanır. Her iki mesneti de ankastre olan başlangıçtaki sistem, soldaki mesnedin mafsallı mesnet olarak alındığı ve o kesitteki eğilme momentinin dışarıdan yük olarak yüklendiği, Şekil 3.6'da A durumu olarak verilen sisteme eşdeğerdir. Şekil 3.6'da B durumu

olarak verilen sisteme ise, M eğilme momenti ile ters yönde olacak şekilde birim yerdeğiştirme uygulanır.

Betti Karşılıklı Teoremi uyarınca, A durumundaki dış kuvvetlerin B durumundaki yerdeğiştirmelerde yaptığı iş, B durumundaki dış kuvvetlerin A durumundaki yerdeğiştirmelerde yaptığı işe eşit olmalıdır. Yani denklem 3.11 geçerli olmalıdır.



Şekil 3.5: Ankastre çerçeve sistemi.



Şekil 3.6: Betti teoreminin uygulanması.

$$1 \times v - M \times w = 0 \quad (3.11)$$

B durumundaki sistemde, mesnet tepkileri dışında dış kuvvet bulunmadığından ifadenin sağ tarafı sıfıra eşit olmaktadır. w yerdeğiştirmesi de birim değer aldığından iş ifadesi, denklem 3.12'deki hali alır.

$$M = v \quad (3.12)$$

Bu durum, 1 kN luk tekil kuvvetin bütün konumları için geçerli olduğundan, M tesir çizgisi, $w = 1$ durumundaki elastik eğriye (yerdeğiştirme diyagramına) eşdeğerdir.

Tesir çizgileri, kuvvet yöntemi ile doğrudan çizilemez. Önce, hiperstatik sistemde birim yerdeğiştirme yüklemesinden meydana gelen M eğilme momenti diyagramı çizilir (uzama ve kayma şekildeğiştirmelerinin de gözönüne alınması durumunda, δ katsayılarının hesabında bunlara ait işler de hesaba katılmalıdır). Bu diyagramın çizilmesi için hesap, kuvvet yöntemi ile mesnet çökmelerine göre hesaba benzer şekilde yapılır. Tesir çizgisi çizilecek büyüklüğün kesit zoru olması durumunda, kesit zorunun bulunduğu noktaya ters yönde rölatif birim yerdeğiştirme verimelidir.

3.3.1.1 Tesir çizgisi ordinatlarının elde edilmesi

Tesir çizgisi ordinatlarının elde edilmesi için birim yerdeğiştirme durumunda, sistemin istenen noktalarındaki yerdeğiştirmelerin bulunması gerekmektedir. Bu yüzden, öncelikle birim yerdeğiştirme yüklemesinden meydana gelen eğilme momenti diyagramı $M_{(w=1)}$ kuvvet yöntemi ile çizilir. Bunun ardından, seçilmiş olan izostatik esas sisteme tesir çizgisi ordinatı hesaplanacak doğrultuda ve yönde birim yükleme yapılarak $\bar{M}_0$ veya $(\bar{M}_0)$ diyagramı çizilir. Araştırılan tesir çizgisi ordinatı Virtüel İş Teoremi ile denklem 3.13 veya denklem 3.14 şeklinde hesaplanır.

V+ birim yerdeğiştirmenin işi:

$$\int M_{(w=1)} \bar{M}_0 \left[\frac{l_c}{l} \right] ds \# (3.13)$$

V+ birim yerdeğiştirmenin işi:

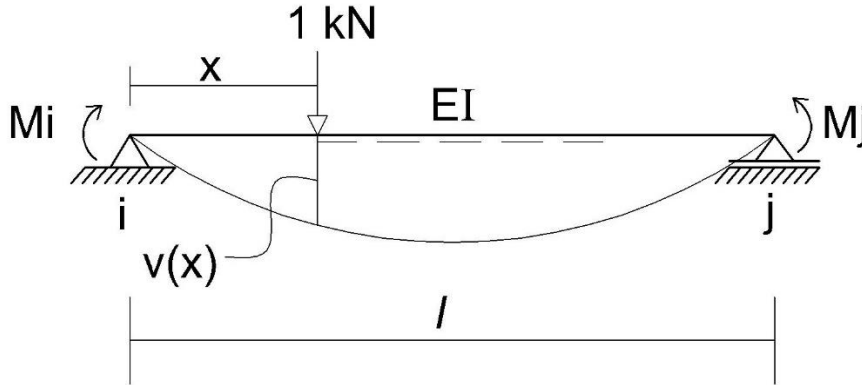
$$\int M_{(w=1)} (\bar{M}_0) \left[\frac{l_c}{l} \right] ds \# (3.14)$$

Denklem 3.13 ve denklem 3.14'te görüldüğü gibi, yerdeğiştirme ifadesinde, uygulanan birim yerdeğiştirmenin yaptığı iş de dikkate alınmalıdır. Bu denklemlerde bulunan integral ifadelerindeki $\bar{M}_0$ veya $(\bar{M}_0)$ diyagramlarının, 1 kN luk kuvvetin konumuna bağlı olarak, fonksiyon şeklinde yazılması tesir çizgisi ordinatlarının bulunmasında kolaylık sağlamaktadır. Böylece tesir çizgisi fonksiyonu direkt olarak elde edilebilir. Herhangi bir kesite ait farklı bir kesit zorunun tesir çizgisi için de benzer adımlar uygulanır. Tesir çizgisi çizilecek kesite, ters yönlü birim rölatif doğrusal yerdeğiştirme uygulanır ve bu duruma ait eğilme momenti diyagramı kuvvet yöntemi ile çizilir. Daha sonra tesir çizgisi aranan noktalara sırasıyla birim

yüklemeler yapılarak Virtüel İş Teoremi ile ordinatlar hesaplanır. Birim yüklemelerde kesme kuvvetlerinin kesitin sağında ve solunda farklı değerler alabileceği ve ordinatların hesabındaki birim yerdeğiştirmenin işlerinde, bu durumun gözönüne alınması gerektiği unutulmamalıdır. Kesme kuvveti tesir çizgileri, bu şekilde elde edilebileceği gibi, çubuğun sol ve sağ uçlarındaki eğilme momenti tesir çizgileri çizildikten sonra, çubuk denge denklemleri ile de elde edilebilir. Bu durumda, aynı açıklıklı basit kirişin aynı kesitindeki kesme kuvveti tesir çizgisi de denklem 3.15’de verildiği gibi denge denklemlerinde gözönünde bulundurulmalıdır.

$$T_m(t. \zeta.) = T_{om}(t. \zeta.) + \frac{M_i(t. \zeta.) + M_j(t. \zeta.)}{L} \#(3.15)$$

Tesir çizgisi ordinatları elde edilecek Şekil 3.7’deki çubuğun her iki ucundaki doğrusal uç yerdeğiştirmelerinin sıfır olması özel durumunda (düğüm noktası sabit sistemlerde) tesir çizgisi ordinatları (çökmeler) çubuğun uçlarındaki birim yerdeğiştirme yüklemesinden meydana gelen eğilme momentlerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilebilir.



Şekil 3.7: Çubuk üzerindeki tesir çizgisi ordinatlarının süperpozisyonla elde edilmesi.

ε terimi denklem 3.16 ile ifade edilmek üzere, doğru eksenli prizmatik çubuğun herhangi bir noktasındaki tesir çizgisi ordinatı denklem 3.17 ile hesaplanır.

$$\varepsilon = \frac{x}{l} \#(3.16)$$

$$v(x) = M_i \frac{l^2}{6EI} (2\varepsilon - 3\varepsilon^2 + \varepsilon^3) + M_j \frac{l^2}{6EI} (\varepsilon - \varepsilon^3) \#(3.17)$$

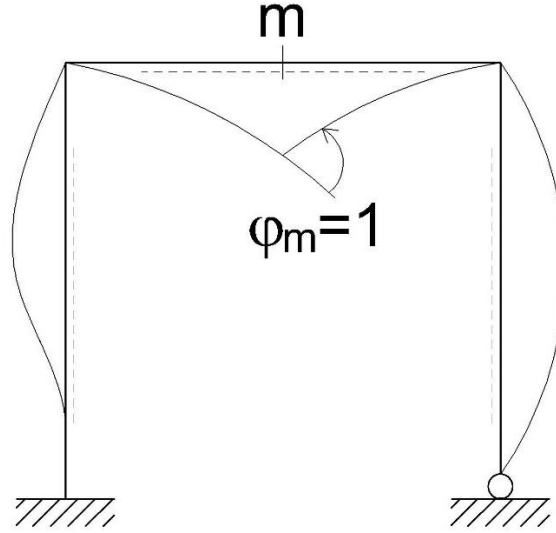
Hesaplarda EI eğilme rijitlikleri yerine $\left[\frac{I_c}{I}\right]$ atalet momenti oranları kullanılırsa, tesir çizgisi ordinatları denklem 3.18 ile hesaplanır.

$$v(x) = M_i \frac{l^2}{6} \left[\frac{I_c}{I}\right] (2\varepsilon - 3\varepsilon^2 + \varepsilon^3) + M_j \frac{l^2}{6} \left[\frac{I_c}{I}\right] (\varepsilon - \varepsilon^3) \quad (3.18)$$

Yukarıda verilen formüller, düğüm noktaları hareketli sistemlerde de ara noktalarındaki ordinatların hesaplanmasında kullanılabilir. Düğüm noktaları hareketli sistemlerde çubuk uçlarındaki doğrusal yerdeğiştirmelerden bazıları sıfırdan farklı olacağından, önce yukarıda açıklanan birim yüklemeler yapılarak sözkonusu uç yerdeğiştirmeleri, yani çubuk uçlarındaki tesir çizgisi ordinatları elde edilir. Daha sonra, birim yerdeğiştirme yüklemesinden meydana gelen eğilme momentlerine bağlı olarak yukarıdaki formüller yardımıyla ara noktalarındaki değerler hesaplanır. Son olarak, ara noktalarda hesaplanan bu değerler, çubuk doğrusal uç yerdeğiştirmelerinden aynı ara noktalarda meydana gelen değerlerle toplanarak tesir çizgisinin çubuk üzerindeki ordinatları elde edilir. Hesaplarda uzama ve kayma şekil değiştirmelerinin etkilerinin de dikkate alınması durumunda, virtüel iş ifadelerinde, N normal kuvvetlerinin ve T kesme kuvvetlerinin işleri de dikkate alınmalıdır.

3.3.1.2 Herhangi bir kesit zoruna veya mesnet tepkisine ait tesir çizgisinin şeklinin belirlenmesi

Sistem üzerinde verilmiş belirli bir m kesitine ait herhangi bir kesit zoru veya mesnet tepkisine ait tesir çizgisinin şeklinin belirlenmesi için, Bölüm 3.3.1.1’de verilen yöntemden yararlanılır. Buna göre, tesir çizgisi aranan büyüklüğe aynı doğrultuda ve ters yönde birim yerdeğiştirme yüklemesi yapılması sonucunda oluşacak elastik eğrinin şekli tahmin edilir. Örnek olarak, Şekil 3.8’de gösterilen, bir mesnedi ankastre diğer mesnedi mafsallı olan çerçevede, m ile gösterilen kesitteki eğilme momenti tesir çizgisinin şekli belirlenmek istenirse bunun için m noktasına şekilde gösterildiği gibi rölatif birim yerdeğiştirme uygulanarak, elastik eğri tahmin edilir.



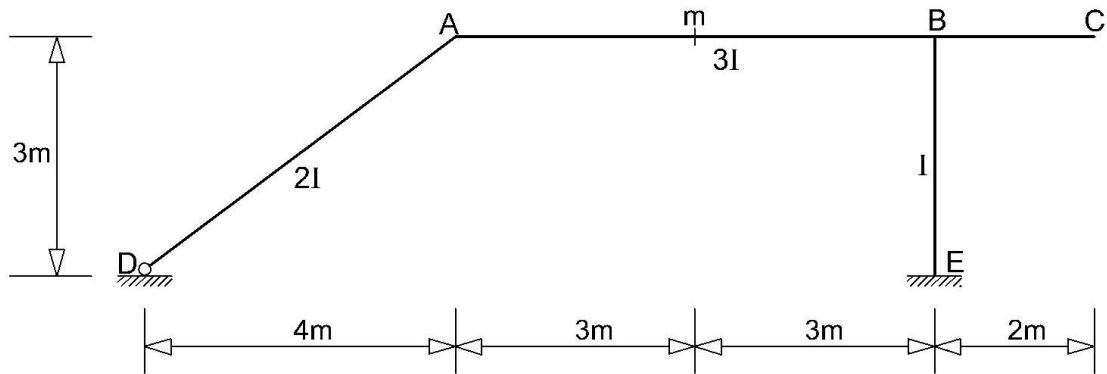
Şekil 3.8: Bir mesnedi ankastre, diğer mesnedi mafsallı çerçeve.

Birim yerdeğiştirme yüklemesinden meydana gelen elastik eğrinin (tesir çizgisinin) şekli tahmin edilirken, birbirine rijit olarak birleşen düğüm noktalarının, şekil değiştirme sonrasında da rijit kaldıkları yani düğüm noktasında birleşen bütün çubukların uçlarının aynı miktarda döndükleri unutulmamalıdır.

Tesir çizgisi şeklinin belirlenmesi ile birlikte, ordinatlarının da sayısal olarak hesabı istenirse, Bölüm 3.3.1.1’de açıklaması yapılan yol kullanılarak ordinatlar ayrı ayrı hesaplanır.

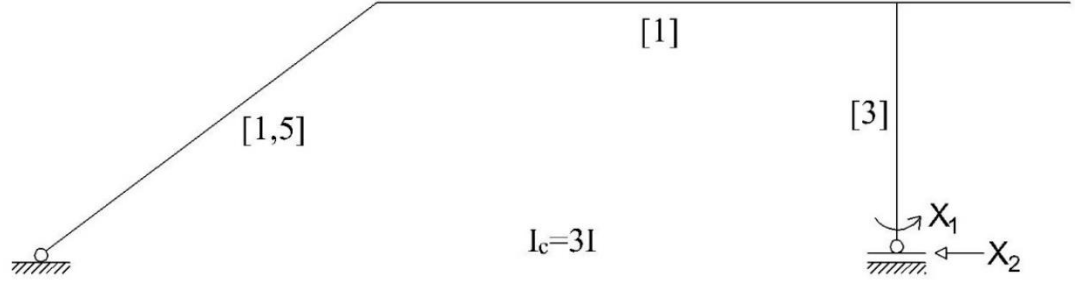
3.3.2 Kuvvet yöntemi ile tesir çizgilerinin elde edilmesine ait sayısal örnek

Şekil 3.9’da verilen hiperstatik sistemin, hiperstatik bilinmeyenleri ve m noktasındaki eğilme momenti tesir çizgileri kuvvet yöntemi ile hesaplanmıştır.



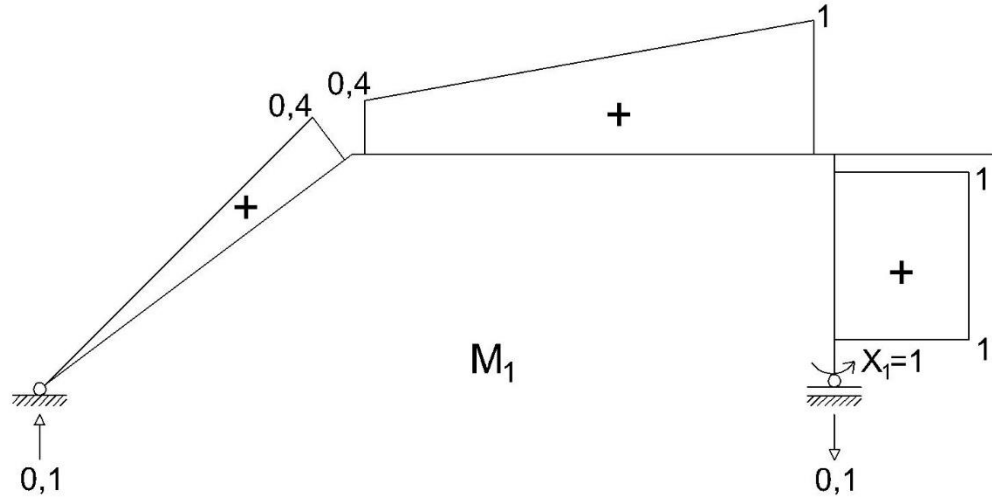
Şekil 3.9: Hiperstatik çerçeve sistemi.

Şekil 3.10'da izostatik esas sistem, hiperstatik bilinmeyenler ve $\left[\frac{I_c}{I}\right]$ atalet momenti oranları verilmiştir.

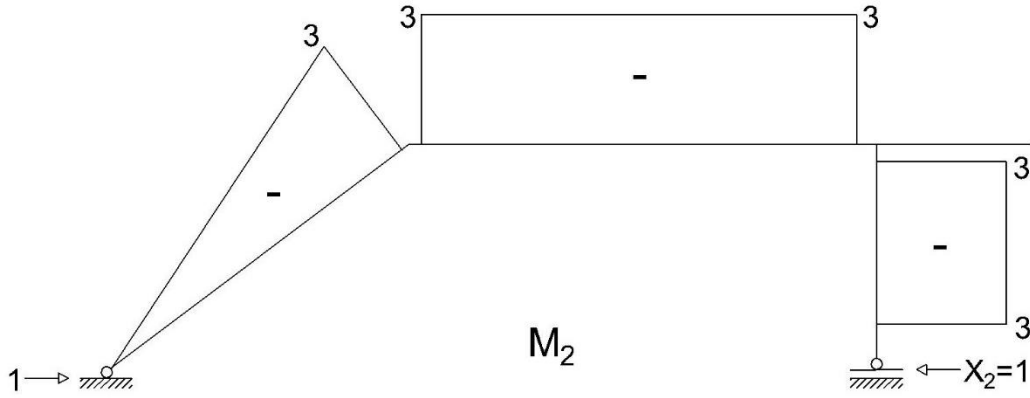


Şekil 3.10: İzostatik esas sistem ve hiperstatik bilinmeyenler.

İzostatik esas sisteme hiperstatik bilinmeyenler birim yük olarak uygulanmış ve elde edilen moment diyagramları Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.11: X_1 birim yükleme ve moment diyagramı.



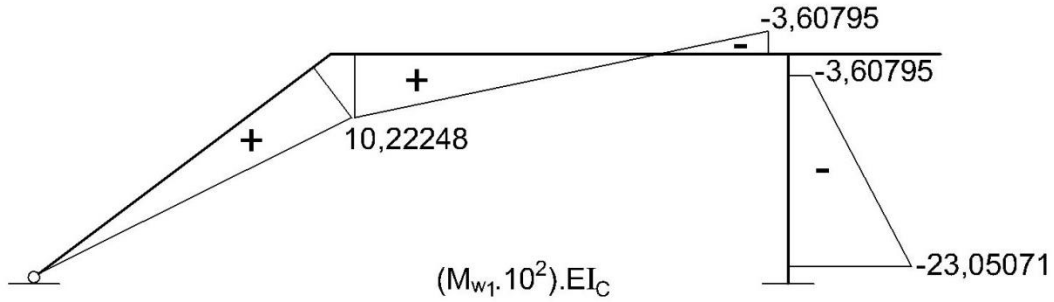
Şekil 3.12: X_2 birim yüklemesi ve moment diyagramı.

$$EI_c[\delta] = \begin{bmatrix} 12,52 & -29,10 \\ -29,10 & 103,50 \end{bmatrix} \quad \frac{[\beta]}{EI_c} = \begin{bmatrix} -23,05071 & -6,48092 \\ -6,48092 & -2,78836 \end{bmatrix} \times 10^{-2}$$

X_1 tesir çizgisi ($w_1=1$ mesnet çökmesi yüklemesi):

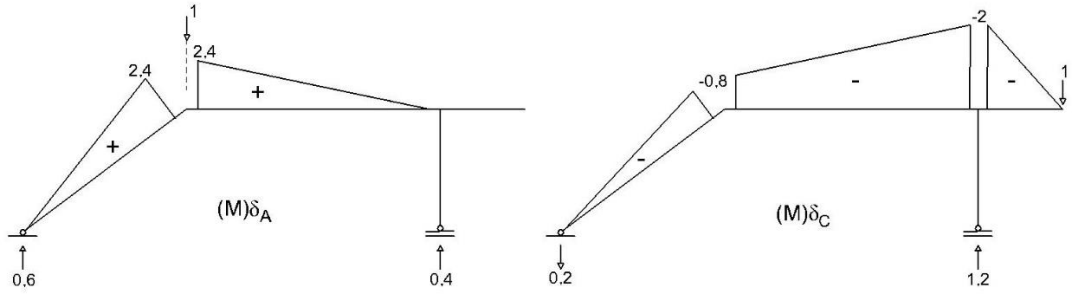
Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilen moment diyagramlarının denklem 3.19’da kullanılması ile Şekil 3.13’teki birim yerdeğiştirme yüklemesinden gelen moment diyagramı çizilir.

$$M_{w_1} = \beta_{11}M_1 + \beta_{21}M_2 \quad (X_1 = \beta_{11}, \quad X_2 = \beta_{21}) \# (3.19)$$



Şekil 3.13: M_{w_1} moment diyagramı.

A ve C noktalarındaki düşey deplasmanların bulunması için izostatik esas sistem üzerinde, A ve C noktalarına ayrı ayrı olarak düşey birim kuvvet uygulanır ve moment grafikleri Şekil 3.14’deki gibi çizilir.



Şekil 3.14: A ve C noktalarına uygulanan birim kuvvetler ve moment diyagramları.

A ve C noktalarındaki düşey deplasmanların hesabı denklem 3.20 ve denklem 3.21 ile yapılır.

$$EI_c \delta_A = \int M_{w_1} (\bar{M})_{\delta_A} \left[\frac{I_c}{I} \right] ds \# (3.20)$$

$$EI_c \delta_A = \frac{1}{3} \times 5 \times 10,22248 \times 2,4 \times [1,5] \times 10^{-2} + \frac{1}{6} \times 6 \times 2,4 \times (2 \times 10,22248 - 3,60795) \times 10^{-2} = 1,01744$$

$$EI_c \delta_C = \int M_{w_1} (\bar{M})_{\delta_C} \left[\frac{I_c}{I} \right] ds \# (3.21)$$

$$\begin{aligned} EI_c \delta_C &= \frac{1}{3} \times 5 \times 10,22248 \times (-0,8) \times [1,5] \times 10^{-2} + \frac{1}{6} \times 6 \times \\ &\times (2 \times 10,22248 \times (-0,8) + 10,22248 \times (-2) + (-3,60795) \times (-0,8) + 2 \times (-3,60795) \times (-2)) \times 10^{-2} \\ &= -0,20445 - 0,19483 = -0,39928 \end{aligned}$$

AB çubuğundaki uç momentlerinden oluşan elastik eğri ordinatları denklem 3.22 ile elde edilir.

$$\begin{aligned} v(x) &= (10,22248 \times \frac{6^2}{6} [1] (2\varepsilon - 3\varepsilon^2 + \varepsilon^3) \\ &+ 3,60795 \times \frac{6^2}{6} [1] (\varepsilon - \varepsilon^3)) \times 10^{-2} \# (3.22) \end{aligned}$$

$$v(x) = (61,33488(2\varepsilon - 3\varepsilon^2 + \varepsilon^3) - 21,64770(\varepsilon - \varepsilon^3)) \times 10^{-2}$$

$$v(x) = (101,02206 \cdot \varepsilon - 184,00464 \cdot \varepsilon^2 + 82,98258 \cdot \varepsilon^3) \times 10^{-2}$$

$$0,25 \rightarrow v(x = 1,5) = (101,02206 \times 0,25 - 184,00464 \times 0,25^2 + 82,98258 \times 0,25^3) \times 10^{-2} = 0,15052$$

$$0,25 \rightarrow v(x = 3,0) = (101,02206 \times 0,50 - 184,00464 \times 0,50^2 + 82,98258 \times 0,50^3) \times 10^{-2} = 0,14883$$

$$0,25 \rightarrow v(x = 4,5) = (101,02206 \times 0,75 - 184,00464 \times 0,75^2 + 82,98258 \times 0,75^3) \times 10^{-2} = 0,07272$$

DA çubuğundaki uç momentlerden oluşan elastik eğri ordinatları denklem 3.23 ile hesaplanır.

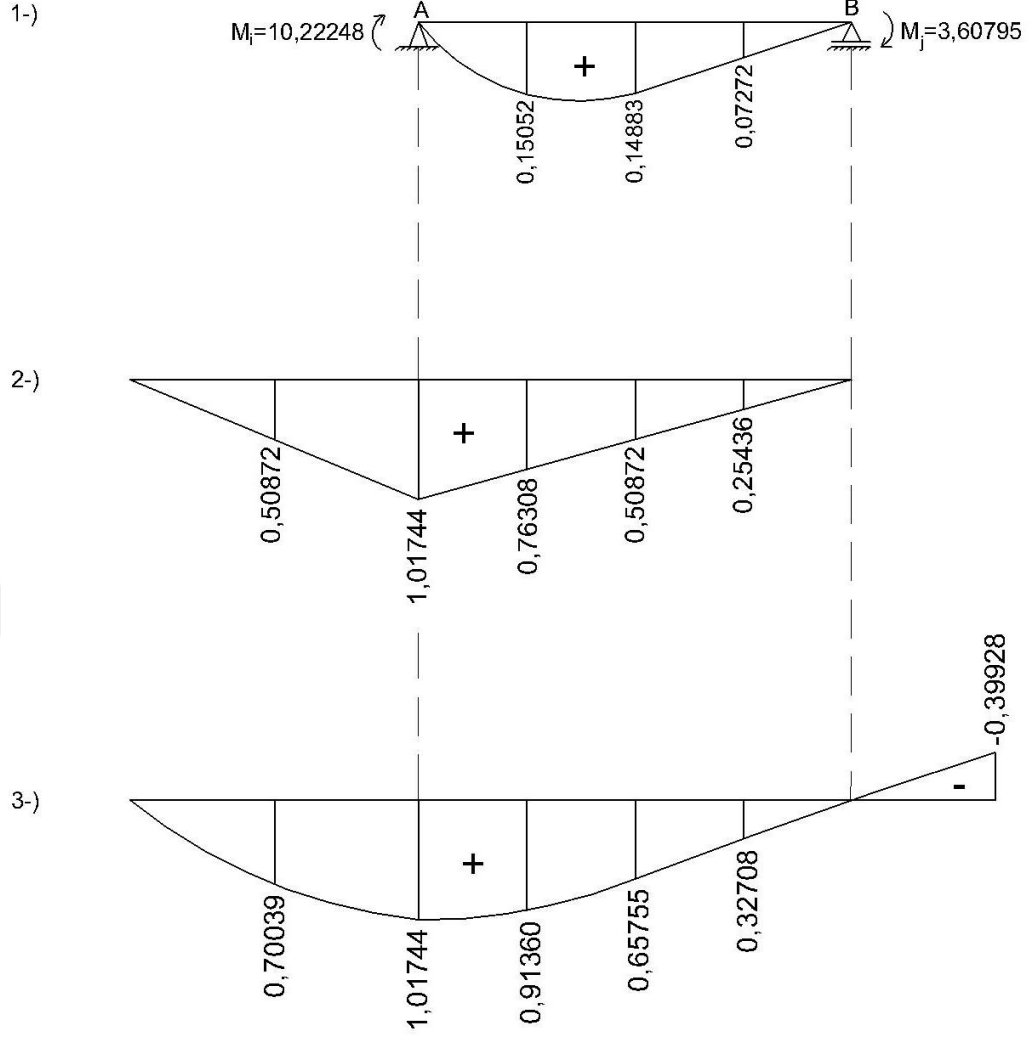
$$v(x) = 10,22248 \times \frac{25}{6} \times [1,5] \times (\varepsilon - \varepsilon^3) \times 10^{-2} \#(3.23)$$

$$0,50 \rightarrow v(x) = 63,8905 \times (0,50 - 0,50^3) \times 10^{-2} = 0,23959$$

1 kN doğrultusundaki çökme değeri denklem 3.24 ile hesaplanır.

$$v = 0,23959 \times \cos \alpha = 0,23959 \times 0,8 = 0,19167 \#(3.24)$$

Şekil 3.15’de 1-) durumunda AB çubuğundaki uç momentlerinden oluşan elastik eğri, 2-) durumunda A ve C noktalarında hesaplanan düşey deplasmanların hesabı ile elde edilen tesir çizgisi, 3-) durumunda ise toplam tesir çizgisi verilmiştir.

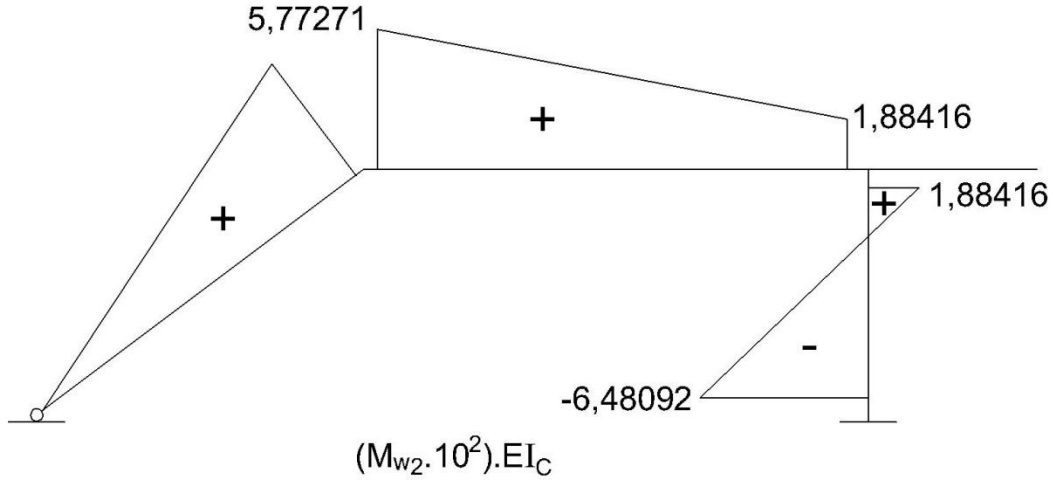


Şekil 3.15: X1 tesir çizgisi ($w_1 = 1$ mesnet çökmesi yüklemesi).

X2 tesir çizgisi ($w_2 = 1$ mesnet çökmesi yüklemesi):

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilen moment diyagramlarının denklem 3.25’te kullanılması ile Şekil 3.16’daki birim yerdeğiştirme yüklemesinden gelen moment diyagramı çizilir.

$$M_{w_2} = \beta_{12}M_1 + \beta_{22}M_2 \quad (X_1 = \beta_{12}, \quad X_2 = \beta_{22}) \# (3.25)$$



Şekil 3.16: M_{w2} moment diyagramı.

A ve C noktalarında düşey deplasmanların hesabı, yapılacak birim yüklemeler ve bunlara karşı gelen $(\bar{M})_{\delta_A}$ ve $(\bar{M})_{\delta_C}$ moment diyagramları X_1 tesir çizgisi bölümündekilerle aynıdır, denklem 3.26 ve denklem 3.27 ile yapılır.

$$EI_c \delta_A = \int M_{w_2} (\bar{M})_{\delta_A} \left[\frac{I_c}{I} \right] ds \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} EI_c \delta_A &= \frac{1}{3} \times 5 \times 5,77271 \times 2,4 \times [1,5] \times 10^{-2} + \frac{1}{6} \times 6 \times 2,4 \\ &\times (2 \times 5,77271 + 1,88416) \times 10^{-2} = 0,34636 + 0,32231 \\ &= 0,66867 \end{aligned}$$

$$EI_c \delta_C = \int M_{w_1} (\bar{M})_{\delta_C} \left[\frac{I_c}{I} \right] ds \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} EI_c \delta_C &= \frac{1}{3} \times 5 \times 5,77271 \times (-0,8) \times [1,5] \times 10^{-2} + \frac{1}{6} \times 6 \\ &\times (2 \times 5,77271 \times (-0,8) + 5,77271 \times (-2) + 1,88416 \times (-0,8) \\ &+ 2 \times 1,88416 \times (-2)) \times 10^{-2} = -0,11545 - 0,29826 \\ &= -0,41371 \end{aligned}$$

AB çubuğundaki uç momentlerinden oluşan elastik eğri ordinatlarının hesabı denklem 3.28 ile yapılır.

$$\begin{aligned} v(x) &= (5,77271 \times \frac{6^2}{6} [1] (2\varepsilon - 3\varepsilon^2 + \varepsilon^3) \\ &+ 1,88416 \times \frac{6^2}{6} [1] (\varepsilon - \varepsilon^3)) \times 10^{-2} \quad (3.28) \end{aligned}$$

$$v(x) = (34,63626(2\varepsilon - 3\varepsilon^2 + \varepsilon^3) + 11,30496(\varepsilon - \varepsilon^3)) \times 10^{-2}$$

$$v(x) = (80,57748.\varepsilon - 103,90878.\varepsilon^2 + 23,3313.\varepsilon^3) \times 10^{-2}$$

$$0,25 \rightarrow v(x = 1,5) = (80,57748 \times 0,25 - 103,90878 \times 0,25^2 + 23,3313 \times 0,25^3) \times 10^{-2} = 0,14015$$

$$0,50 \rightarrow v(x = 3,0) = (80,57748 \times 0,50 - 103,90878 \times 0,50^2 + 23,3313 \times 0,50^3) \times 10^{-2} = 0,17228$$

$$0,75 \rightarrow v(x = 4,5) = (80,57748 \times 0,75 - 103,90878 \times 0,75^2 + 23,3313 \times 0,75^3) \times 10^{-2} = 0,11827$$

DA çubuğundaki elastik eğri ordinatları denklem 3.29 ile bulunur.

$$v(x) = 5,77271 \times \frac{25}{6} \times [1,5] \times (\varepsilon - \varepsilon^3) \# (3.29)$$

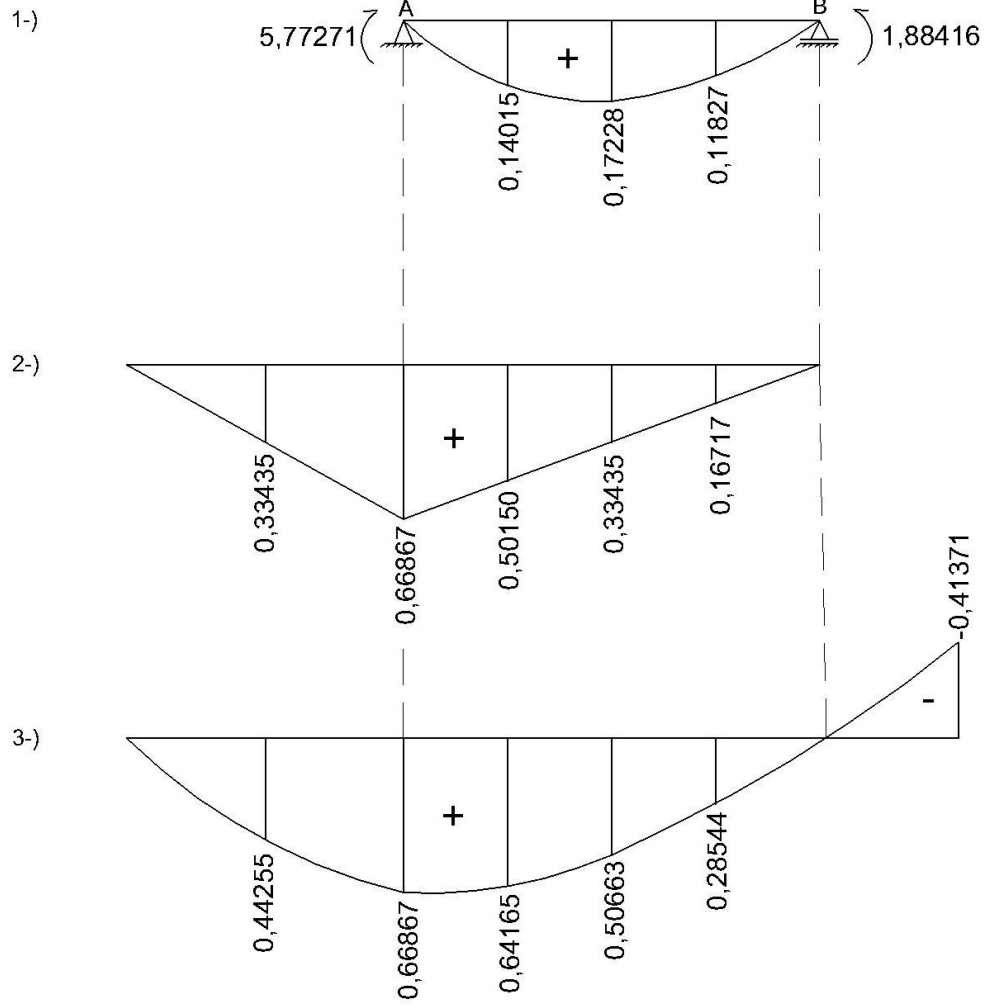
$$0,50 \rightarrow v(x) = 36,07944 \times 10^{-2} (0,50 - 0,50^3) = 0,13530$$

1 kN doğrultusundaki çökme hesabı denklem 3.30'da verilmiştir.

$$v = 0,1353 \times \cos \alpha \# (3.30)$$

$$v = 0,1353 \times 0,8 = 0,1082$$

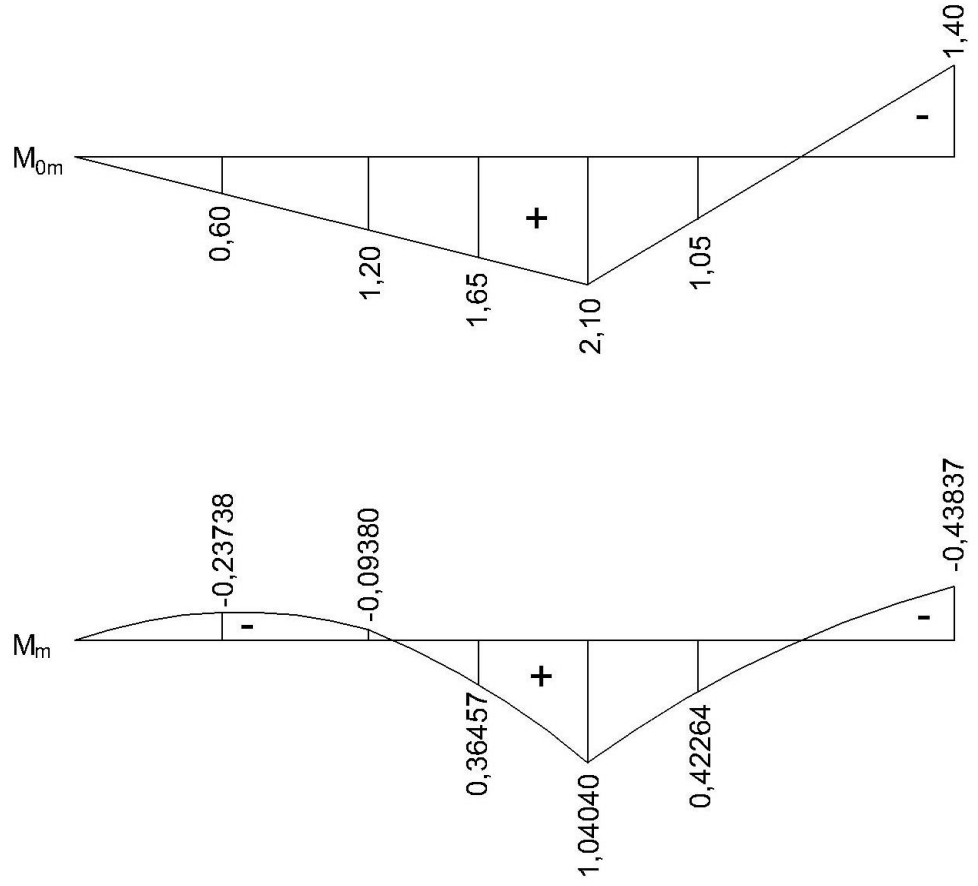
Şekil 3.17'de 1-) durumunda AB çubuğundaki uç momentlerinden oluşan elastik eğri, 2-) durumunda A ve C noktalarında hesaplanan düşey deplasmanların hesabı ile elde edilen tesir çizgisi, 3-) durumunda ise toplam tesir çizgisi verilmiştir.



Şekil 3.17: X2 tesir çizgisi ($w_2 = 1$ mesnet çökmesi yükleme).

Mm tesir çizgisinin çizimi denklem 3.31'e uygun olarak yapılır. Elde edilen tesir çizgisi Şekil 4.18'de verilmiştir.

$$M_m = M_{0_m} + M_{1_m}X_1 + M_{2_m}X_2 = M_{0_m} + 0,7X_1 - 3,0X_2 \#(3.31)$$



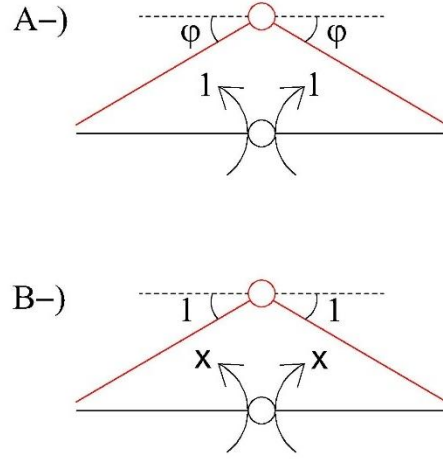
Şekil 3.17 M_{0m} ve M_m tesir çizgisi diyagramları.



4. ENDİREKT MÜLLER-BRESLAU PRENSİBİ İLE TESİR ÇİZGİLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Müller-Breslau Prensibi tesir çizgilerinin elde edilmesinde en uygun yöntemlerden biridir. Müller-Breslau Prensibi'ne göre bir kesit zoruna ait tesir çizgisi, siseme o kesit zorunu ortadan kaldıracak bir serbestlik verilmesi ve ortadan kaldırılan iç kuvvete ters yönde birim yer değiştirme uygulanması ile elde edilen elastik eğriye özdeştir. Müller-Breslau Prensibi kullanılarak bir yapı analiz programı ile tesir çizgilerinin bulunması mümkündür. Ancak bir yapının, uygulanan yer değiştirmeler için analizi mesnet çökmesi gibi birkaç özel durum haricinde oldukça zor bir iştir. Çalışmanın bu aşamasında, Endirekt Müller-Breslau Prensibi (EMBP) olarak adlandırılan alternatif bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu yaklaşımda, serbest bırakılan düğüm noktasına rölatif bir yer değiştirme uygulamak yerine, ortadan kaldırılan kuvvete ters yönde birim kuvvet etki ettirilir. Bu etki sonucunda elde edilen elastik eğri, Betti Karşılıklı Teoremi kullanılarak hesaplanan sabit bir değer in düğüm noktası yer değiştirmeleriyle çarpılması ile düzeltilir ve araştırılan tesir çizgisi elde edilir. Söz konusu yöntem, çeşitli izostatik ve hiperstatik sistemlerin tesir çizgilerinin bulunmasında SAP2000 yapı analiz programı yardımıyla denenmiştir. Çalışmanın sonraki bölümlerinde verilen sayısal örneklerin bazıları, kullanılan yöntemin karşılaştırılabilirlik açısından daha elverişli olacağı düşüncesi ile literatürde bulunan çalışmalarla aynı tutulmuştur.

Betti Teoremi gereği Şekil 4.1'de A durumundaki kuvvetlerin B durumundaki yerdeğiştirmelerle yaptığı işin, B durumundaki kuvvetlerin A durumundaki yerdeğiştirmelerle yaptığı işe eşit olması gerekir. Denklem 4.1 de bu durum gösterilmiştir. EMBP ile yapılan hesaplamalarda kullanıcak olan birim deplasman meydana getiren kuvveti bulmak için denklem 4.2 kullanılacaktır.



Şekil 4.1: EMBP'nin Betti Karşıtlık Teoremi ile ispatı.

$$1 \times 1 = x \times \varphi \#(4.1)$$

$$x = \frac{1}{\varphi} \#(4.2)$$

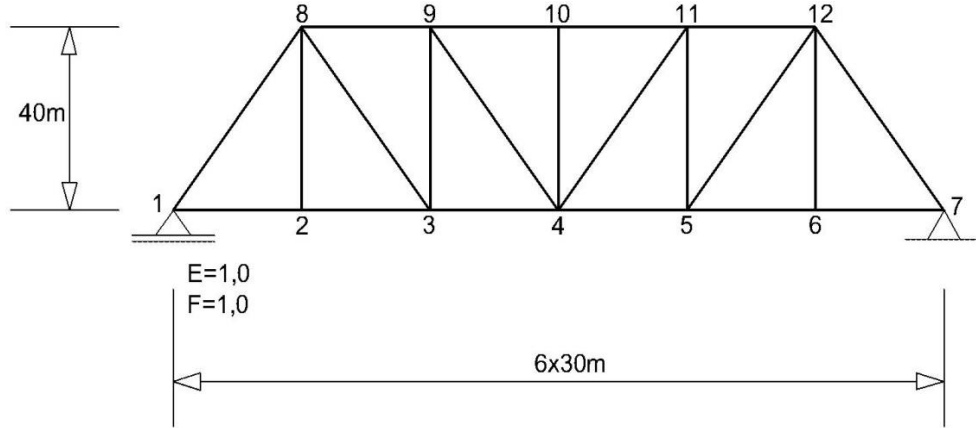
EMBP ile hesapta izlenecek adımlar:

Yapı sistemi SAP2000 programında modellendikten sonra, EMBP gereği sisteme tesir çizgisi araştırılan kesit zoru yönünde serbestlik verilmesi gerektiğinden, söz konusu kesit üzerinde bulunan düğüm noktası, düğüm noktası ayırma işlemi ile ayrılır. Bu kesitte oluşan yeni noktalar artık bütün yönlerde serbesttir ve koordinatları aynıdır. Bu noktalardaki serbestliğin sadece söz konusu kesit zorunun iş yaptığı yerdeğiştirme yönünde olması gerektiğinden, bu noktalara ilgili kesit zoruna ait yerdeğiştirme serbest diğer yerdeğiştirmeler birbirine eşit olacak şekilde bir constraint(kısıtlama) atanır. Daha sonra bu iki noktaya tesir çizgisi araştırılan kesit zoruna göre birim kuvvet çifti ya da birim moment çifti uygulanır. Sistem analizi yapılır ve bu iki noktada oluşan rölatif yerdeğiştirmeler denklem 4.3'te kullanılır. Denklem 4.3 ile elde edilen değer, analiz sonucu elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmeleri ile çarpılır ve araştırılan tesir çizgisi ordinatları elde edilir.

$$M = -\frac{1}{\Delta_{\varphi}} \quad F = -\frac{1}{\Delta_u} \#(4.3)$$

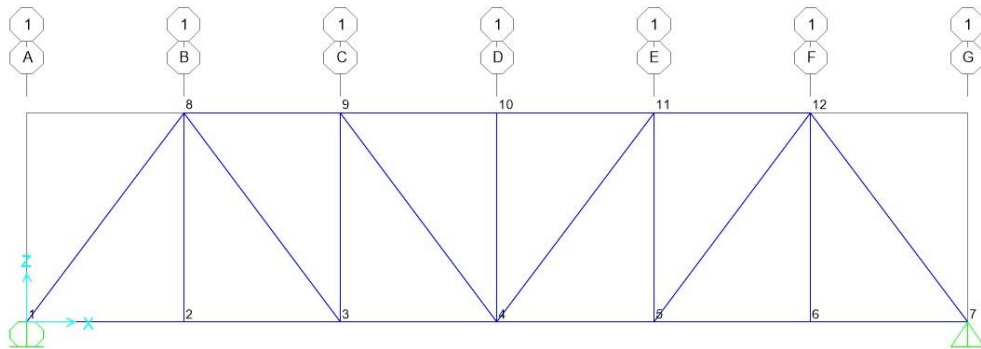
4.1 Düzlem Kafes Sistemde Tesir Çizgisinin Endirekt Müller-Breslau Prensibi ile Elde Edilmesi

Literatürde yapılan bir çalışmadan [3] alınan Şekil 4.2’de görülen düzlem kafes sistem örneğinde 3-9 çubuğunun normal kuvvet tesir çizgisi EMBP ile hesaplanmıştır.

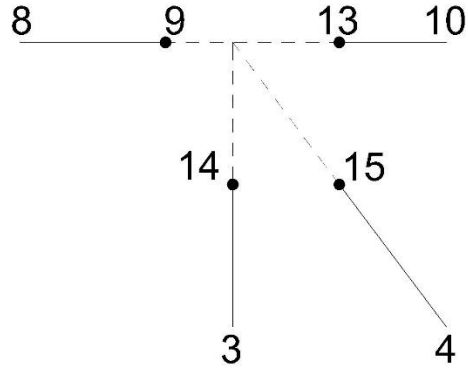


Şekil 4.2: Düzlem kafes sistem.

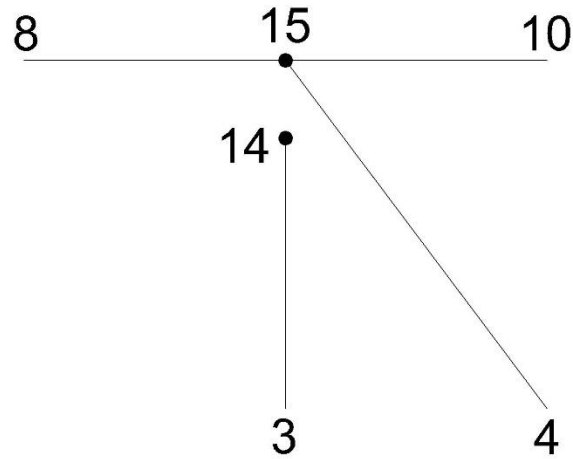
SAP2000 programında oluşturulan sistem modeli Şekil 4.3’te verilmiştir. 9-3 çubuğunun normal kuvvet tesir çizgisinin bulunabilmesi için 9 numaralı nokta, düğüm noktası ayırma işlemi ile ayrılır. Bu ayırma işleminden sonra ayrılan dört nokta Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Bu her bir nokta aynı koordinatlara sahiptir ve 9 numaralı düğüm noktasında birleşen dört çubuğa aittir. 9-3 çubuğunun 9 numaralı ucunu artık 14 numaralı nokta temsil etmektedir. Diğer üç nokta düğüm noktası birleştirme işlemi ile birleştirilir. Birleştirme işlemi sonrası oluşan ilgili kesitin yeni hali Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Kafes sistem SAP2000 modeli [10].

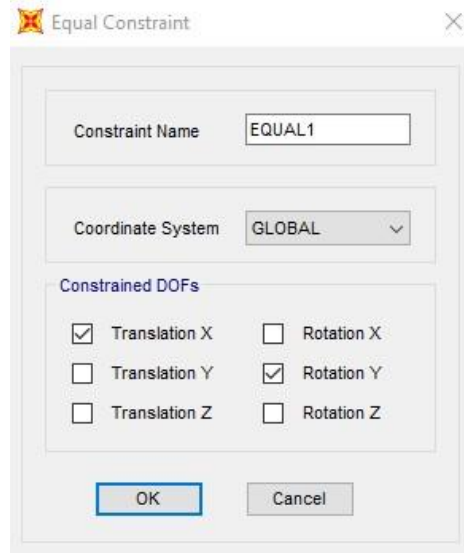


Şekil 4.4: Düğüm noktası ayırma işlemi sonrası.



Şekil 4.5: Düğüm noktası birleştirme işlemi sonrası.

14 ve 15 numaralı düğüm noktalarına x eksenindeki yerdeğiştirmeleri eşit, y eksenindeki dönmeleri eşit, z eksenindeki yerdeğiştirmeleri serbest olacak şekilde kısıtlama tanımlanır. Şekil 4.6’da gösterilen kısıtlama bu iki noktaya atanır.



Şekil 4.6: Kısıtlama tanımlaması.

14 ve 15 numaralı noktalara z ekseninde birbirine zıt yönde bir birimlik kuvvetler uygulanır ve sistem analizi yapılır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki 14 ve 15 numaralı noktalarda oluşan z eksenindeki rölatif deplasmanlar denklem 4.4'te kullanılarak birim yerdeğiştirme oluşturacak kuvvet değeri bulunur.

Joint	Object	14	Joint Element	14
		1	2	3
Trans		-2175,159	0,	3315,14
Rotn		164,07214	-35,27659	-245,5391

Şekil 4.7: 14 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

Joint	Object	15	Joint Element	15
		1	2	3
Trans		-2175,159	0,	-6555,15
Rotn		16,26007	-35,27659	57,64985

Şekil 4.8: 15 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

$$\#F = -\frac{1}{\Delta_{u3}} \quad (4.4)$$

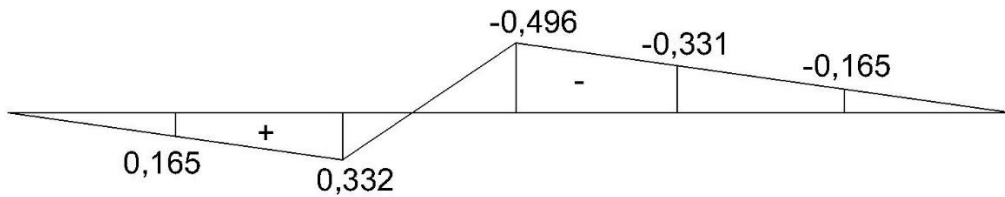
$$F = -\frac{1}{3315,14 - (-6555,15)} = -1,013 \cdot 10^{-4}$$

Elde edilen F değeri ile birim kuvvet çifti yüklemesi sonucu oluşan düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu değerler işaret farkı ile 9-3 çubuğunun normal kuvvet tesir çizgisi ordinatlarına eşittir. Bu işaret farkının sebebi SAP2000 programının tesir çizgisi altında kalan bölgeyi z ekseninin negatif yönü olarak almasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.1: R3-9 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

Nokta No	U3(m)
1	0,00000
2	0,16479
3	0,33177
4	-0,49559
5	-0,33051
6	-0,16526
7	0,00000
8	0,16462
10	-0,49573
11	-0,33050
12	-0,16525
14	0,33582
15	-0,66404

Düğüm noktası yerdeğiştirmeleri kullanılarak elde edilen, 9-3 çubuğuna ait normal kuvvet tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.9’da verilmiştir.

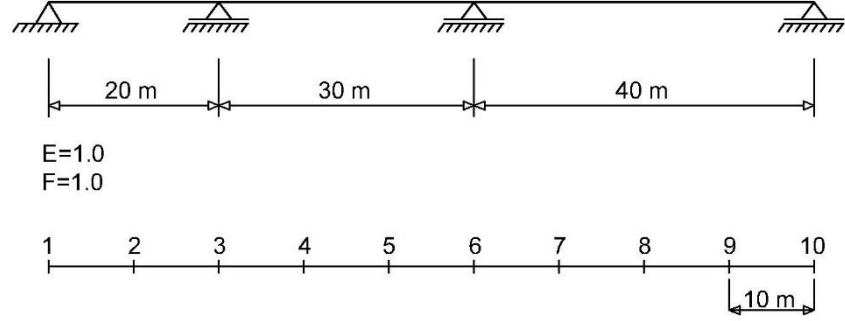


Şekil 4.9: 9-3 çubuğuna ait normal kuvvet tesir çizgisi diyagramı.

4.2 Sürekli Kiriş Tesir Çizgilerinin Endirekt Müller-Breslau Prensibi ile Elde Edilmesi

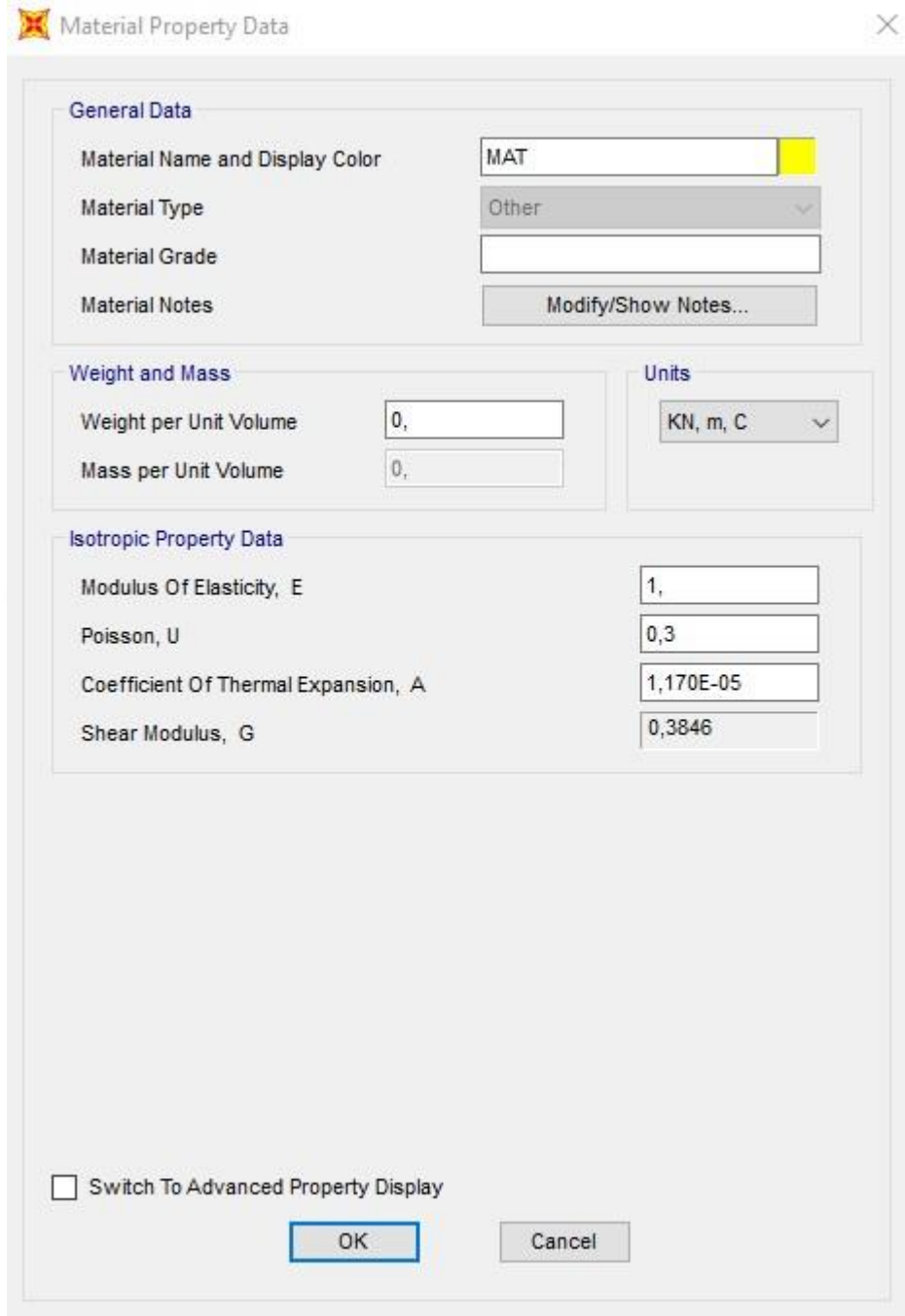
Daha önce yapılan bir çalışmadan [2] alınan Şekil 4.10’da gösterilen sürekli kiriş örneği SAP2000 programında modellenerek 8 numaralı nokta üzerindeki eğilme momenti tesir çizgisi (M8), 7 numaralı nokta üzerinde kesme kuvvet tesir çizgisi

(T7) ve 3 numaralı noktadaki mesnet tepkisine ait tesir çizgisi (R3) EMBP ile elde edilmiştir.



Şekil 4.10: Sürekli kiriş [2].

Sistem modeli SAP2000 programında oluşturulurken tanımlanan malzeme ve kesit özellikleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



The image shows a 'Material Property Data' dialog box with the following sections and fields:

- General Data**
 - Material Name and Display Color: MAT (with a yellow color swatch)
 - Material Type: Other (dropdown menu)
 - Material Grade: (empty text box)
 - Material Notes: Modify/Show Notes... (button)
- Weight and Mass**
 - Weight per Unit Volume: 0, (text box)
 - Mass per Unit Volume: 0, (text box)
- Units**
 - Units: KN, m, C (dropdown menu)
- Isotropic Property Data**
 - Modulus Of Elasticity, E: 1, (text box)
 - Poisson, U: 0,3 (text box)
 - Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,170E-05 (text box)
 - Shear Modulus, G: 0,3846 (text box)
- ☐ Switch To Advanced Property Display
- OK (button) and Cancel (button)

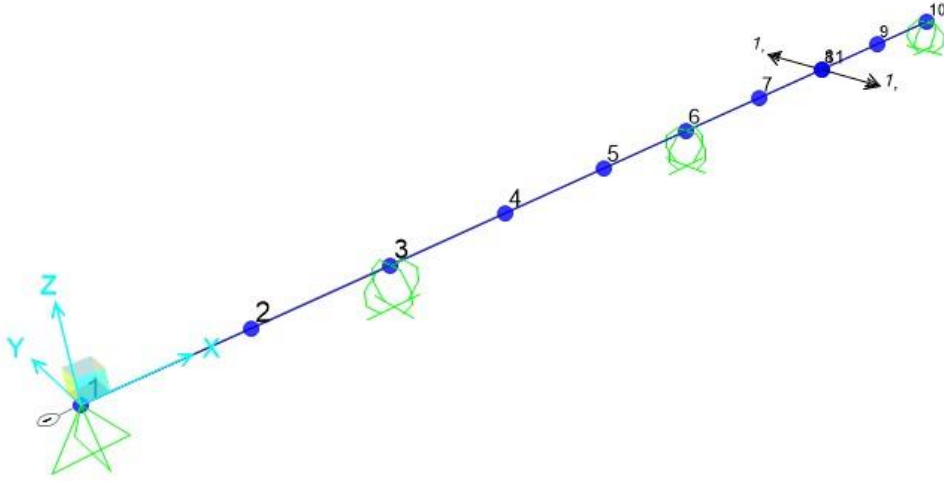
Şekil 4.11: SAP2000 üzerinde tanımlanan malzeme özellikleri.

Malzeme ve kesit özellikleri tanımlandıktan sonra oluşturulan sürekli kiriş modeli Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

ters yönde birim My momenti Şekil 4.15'te gösterildiği şekilde uygulanır. Yapılan işlem Şekil 4.14'te sistem ilgili noktadan iki parçaya ayrılarak yüklemeler gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Düğüm noktası ayırma işlemi sonrası oluşan sistem ve yapılan yüklemeler.



Şekil 4.15: SAP2000 programında yapılan yüklemeler.

Yüklemeden sonra sistem analizi yapılır ve bu iki noktada oluşan rölatif yer değiştirmeler bulunur, bulunan yerdeğıştirmeler Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir. Elde edilen rölatif yer değıştirmeler denklem 4.5'te kullanılarak birim dönme oluşturacak moment değeri hesaplanır.

Joint Displacements			
Joint	Object	Joint Element	
	8	8	
	1	2	3
Trans	0,	0,	-673,333
Rotn	0,	47,	0,

Şekil 4.16: 8 numaralı düğüm noktasında oluşan yerdeğıştirmeler.

Joint Displacements			
Joint	Object	11	
Joint	Element	11	
	1	2	3
Trans	0,	0,	-673,333
Rotn	0,	-40,33333	0,

Şekil 4.17: 11 numaralı düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirmeler.

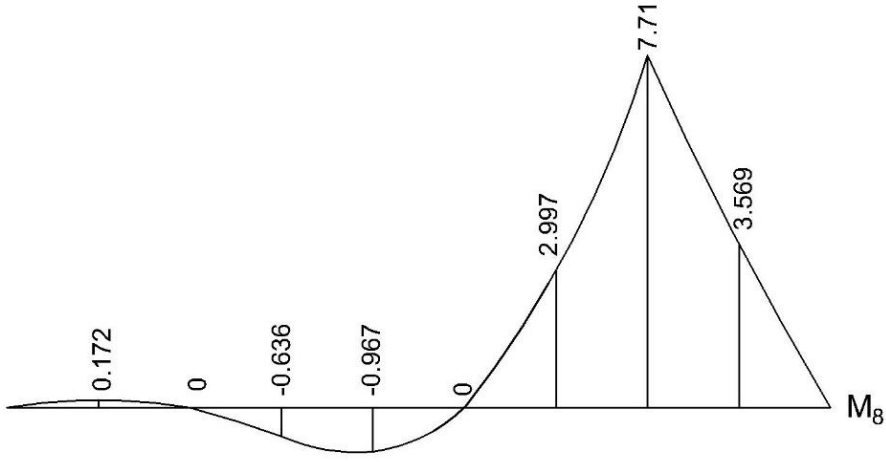
$$M = -\frac{1}{47 - (-40,333)} = -0,011451 \#(4.5)$$

Denklem 4.2 ile elde edilen y eksenini etrafında birim dönme oluşturan moment değeri M ile birim moment çifti yüklemesiyle elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu değerler M8 tesir çizgisi ordinatlarına eşittir.

Elde edilen ordinatların kullanılması ile çizilen M8 tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: M8 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

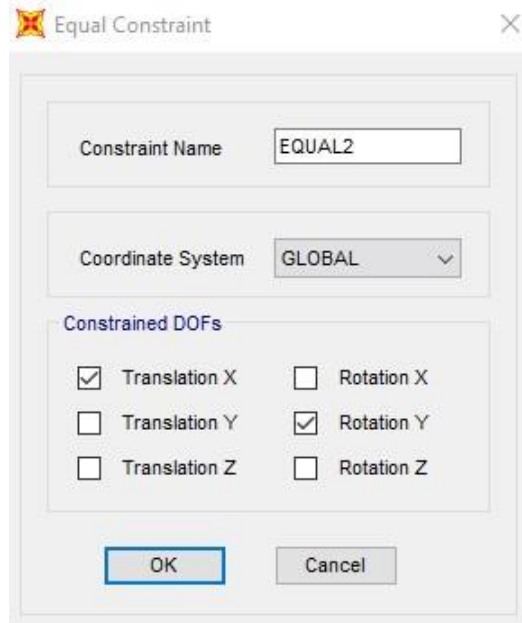
Nokta	u3(m)
1	0,00000
2	0,17177
3	0,00000
4	-0,63617
5	-0,96697
6	0,00000
7	2,99635
8	7,71034
9	3,56890
10	0,00000
11	7,71034



Şekil 4.18: M8 tesir çizgisi diyagramı.

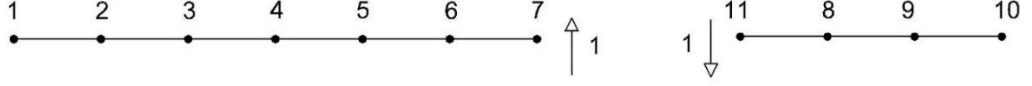
4.2.2 T7 tesir çizgisi

T7 tesir çizgisi hesaplanırken M8 tesir çizgisinin hesabına benzer adımlarla ilerlenir. Öncelikle 7 numaralı düğüm noktası düğüm noktası ayırma işlemi ile ayrılır. Ayırma işleminden sonra soldaki çubuk parçasının sağ ucu 7 numaralı, sağdaki çubuk parçasının sol ucu 11 numaralı düğüm noktası olmuştur. Elde edilen bu iki düğüm noktasına x yönündeki yer değiştirmeler ve y yönündeki dönmeler eşit, z yönündeki yer değiştirmeler serbest olacak şekilde bir kısıtlama atanır. Atanan bu kısıtlamanı tanımlaması Şekil 4.219'da gösterilmiştir.

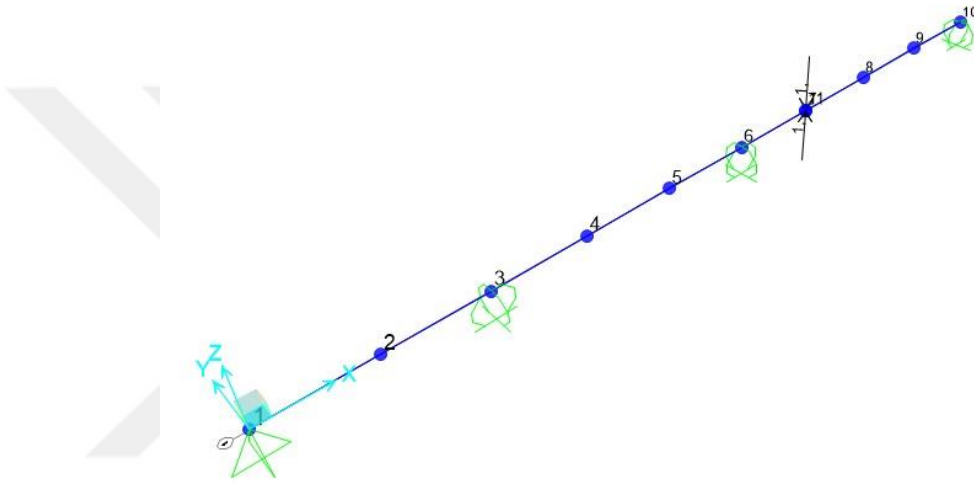


Şekil 4.19: T7 için tanımlanan kısıtlama.

Kısıtlama atandıktan sonra bu iki noktaya z ekseninde birbirine zıt yönde bir birimlik kuvvet Şekil 4.20'deki gibi uygulanır. SAP2000 üzerinde yapılan yükleme Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20: Düşüm noktası ayırma işlemi sonrası oluşan sistem ve yapılan yüklemeler.



Şekil 4.21: SAP2000 programında yapılan birim yüklemeler.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te, birim yükleme sonucu sistem analizi ile elde edilen rölatif yerdeğiştirmeler verilmiştir. Bu rölatif yerdeğiştirmeler denklem 4.6'da kullanılarak z ekseninde birim yer değıştirme oluşturan kuvvet değeri elde edilir.

Joint Displacements			
Joint Object 7		Joint Element 7	
	1	2	3
Trans	0,	0,	5233,333
Rotn	0,	-690,	0,

Şekil 4.22: 7 numaralı düşüm noktasında oluşan yerdeğiştirmeler.



Joint Object	11	Joint Element	11	1	2	3
Trans				0,	0,	-29700,
Rotn				0,	-690,	0,

Şekil 4.23: 11 numaralı düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirmeler.

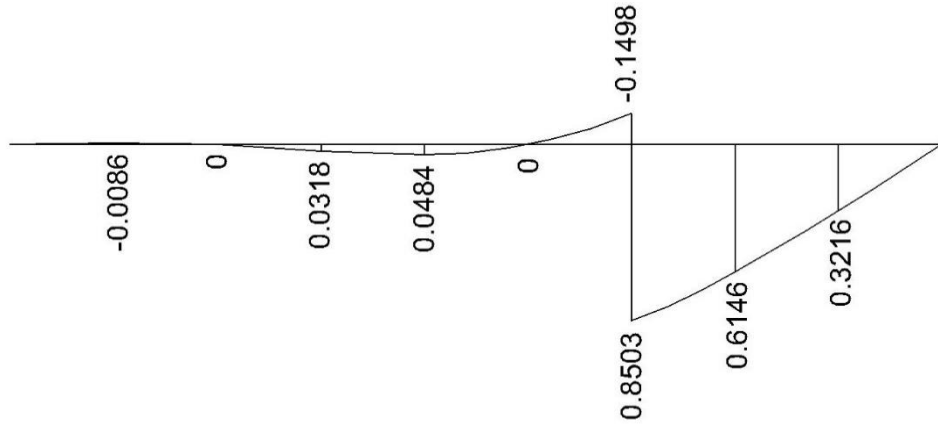
$$F = -\frac{1}{5233,33 - (-29700)} = -2,863 \cdot 10^{-5} \#(4.6)$$

Elde edilen F değeri ile birim kuvvet çifti yüklemeinden elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılması sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Bu değerler T7 tesir çizgisi ordinatlarına eşittir.

Elde edilen ordinat değerlerinin kullanılmasıyla çizilen T7 tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.24'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: T7 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

Nokta	U3(m)
1	0,00000
2	-0,00859
3	0,00000
4	0,03181
5	0,04835
6	0,00000
7	-0,14983
8	0,61459
9	0,32161
10	0,00000
11	0,85031

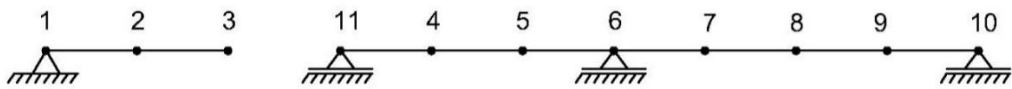


Şekil 4.24: T7 tesir çizgisi diyagramı.

4.2.3 R3 tesir çizgisi

R3 tesir çizgisi 3-4 çubuğunun kesme kuvveti tesir çizgisi ile 3-2 çubuğunun kesme kuvveti tesir çizgisi farkına eşittir.

T3-2 tesir çizgisi çizilirken, 3 numaralı düğüm noktası, düğüm noktası ayırma işlemi ile ayrılır. Ayırma işleminden sonra soldaki çubuk parçasının sağ ucu 3 numaralı, sağdaki çubuk parçasının sol ucu 11 numaralı düğüm noktası olmuştur. Sistemin ilk halinde olduğu gibi ayırma işleminden sonra da bu konumda mesnet bulunmaktadır ve bu iki düğüm noktasının z ekseninde yer değiştirmesini engellemektedir. T3-2 kesme kuvvetini aradığımız için bu mesnet koşulu 3 numaralı düğüm noktasından kaldırılır ve sadece 11 numaralı düğüm noktasına atanır. Yapılan işlem sonrası oluşan sistem Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25: T2-3 hesabında oluşturulan sistem modeli.

3 ve 11 numaralı düğüm noktasına x yönündeki yer değiştirmeler ve y yönündeki dönmeler eşit, z yönündeki yer değiştirmeler serbest olacak şekilde bir kısıtlama atanır. Daha sonra z ekseninde birbirine zıt yönde bir birimlik kuvvetler uygulanır ve sistem analizi yapılır. Analiz sonucunda sadece 3 numaralı düğüm noktasında z ekseninde yer değiştirme oluşur ve bu yer değiştirme denklem

4.7’de kullanılarak birim yerdeğiştirme oluşturacak kuvvet değeri hesaplanır. 3 ve 11 numaralı noktaların yerdeğiştirme değerleri şekil 4.26 ve şekil 4.27’de verilmiştir.



	Joint Object 3	Joint Element 3	1	2	3
Trans			0,	0,	6238,095
Rotn			0,	-178,5714	0,

şekil 4.26: 3 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.



	Joint Object 11	Joint Element 11	1	2	3
Trans			0,	0,	0,
Rotn			0,	-178,5714	0,

şekil 4.27: 11 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

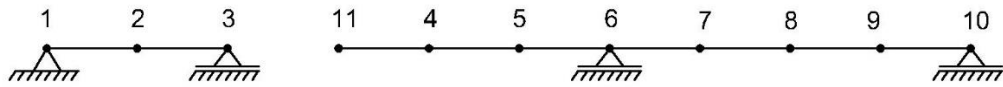
$$F = -\frac{1}{6238,1} = -1,603 \cdot 10^{-4} \#(4.7)$$

Denklem 4.6 ile elde edilen birim yerdeğiştirme oluşturacak olan kuvvet değeri F ile birim kuvvet çifti yüklemeinden elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılması sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.4’te verilmiştir. Bu değerler T3-2 tesir çizgisi ordinatlarına eşittir ve ileri aşamada R3 tesir çizgisi hesabında kullanılacaktır.

Çizelge 4.4: T3-2 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

Nokta	U3(m)
1	0,00000
2	-0,58013
3	-0,99997
4	-0,14758
5	-0,10432
6	0,00000
7	0,06011
8	0,06870
9	0,04294
10	0,00000
11	0,00000

Bu aşamada T3-4 tesir çizgisi hesabına geçilir. T3-2 hesabında yapılan düğüm noktası ayırma işlemi ve kısıtlama ataması değiştirilmeden kullanılır. 11 numaralı düğüm noktasında bulunan mesnet şartı buradan kaldırılır ve 3 numaralı düğüm noktasına atanır. Yapılan bu işlem sonrası oluşan sistem modeli Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.28: T34 hesabında oluşturulan sistem modeli.

Bu işlemden sonra 3 ve 11 numaralı düğüm noktalarına z ekseninde bir birimlik kuvvet yüklemeleri birbirine zıt yönlü olacak şekilde uygulanır ve sistem analizi yapılır. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da yapılan analiz sonucu oluşan yerdeğiştirmeler verilmiştir. Bu yerdeğiştirmeler denklem 4.8’de kullanılır ve birim yerdeğiştirme oluşturacak kuvvet değeri hesaplanır.

Joint Displacements				
Joint	Object	3	Joint Element	3
	1	2	3	
Trans	0,	0,	0,	
Rotn	0,	-113,3333	0,	

Şekil 4.29: 3 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.



Joint Object	11	Joint Element	11	1	2	3
Trans				0,	0,	-6550,
Rotn				0,	-113,3333	0,

Şekil 4.30: 11 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

$$F = -\frac{1}{0 - (-6550)} = -1,52672 \cdot 10^{-4} \#(4.8)$$

Denklem 4.7 ile elde edilen F değeri, birim kuvvet çifti yükleme sonucu oluşan düğüm noktası yerdeğiştirmesi değerleri ile çarpılır ve tesir çizgisi ordinatları elde edilir. Bu hesap ile elde edilen ordinat değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bu değerler T3-4 tesir çizgisi ordiatlarına eşittir.

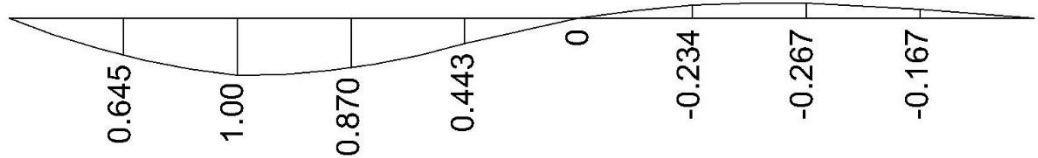
Çizelge 4.5: T3-4 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

Nokta	U3(m)
1	0,00000
2	0,06489
3	0,00000
4	0,72265
5	0,33842
6	0,00000
7	-0,17366
8	-0,19847
9	-0,12405
10	0,00000
11	1,00000

R3 tesir çizgisi ordinatları, T3-4 ile T3-2 tesir çizgisi ordinatlarının farkına eşittir. Çizelge 4.6'da verilen değerler, T3-4 ve T3-2 değerleri olduğu gibi kullanıldığından yine R3 tesir çizgisi ordinatlarına eşittir. Bu ordinatların kullanılmasıyla çizilen R3 tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.31'de verilmiştir.

Çizelge 4.6: R3 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

Nokta No	U3(m)
1	0,00000
2	0,64502
3	0,99997
4	0,87023
5	0,44275
6	0,00000
7	-0,23378
8	-0,26717
9	-0,16698
10	0,00000
11	1,00000

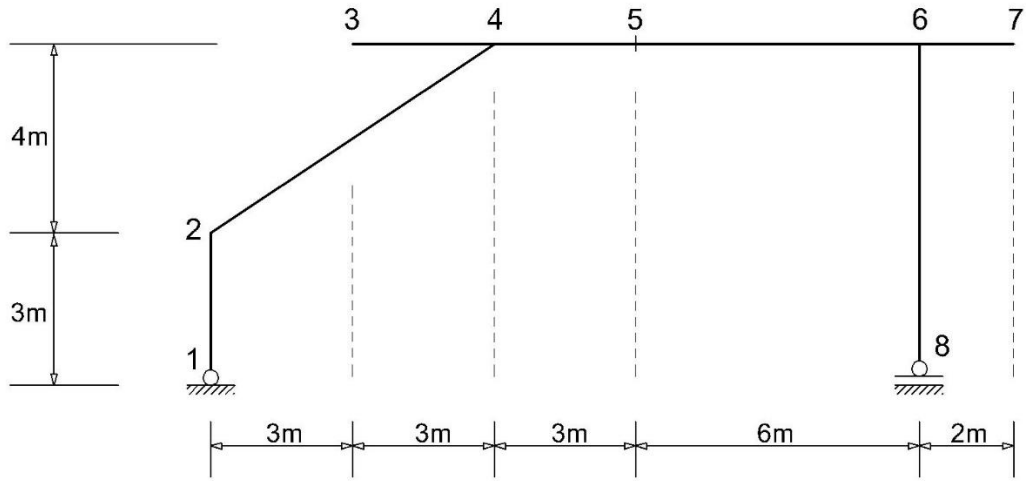


Şekil 4.31: R3 mesnet tepkisi tesir çizgisi diyagramı.

4.3 İzostatik Çerçeve Sistemin Tesir Çizgilerinin Endirekt Müller-Breslau Prensibi ile Elde Edilmesi

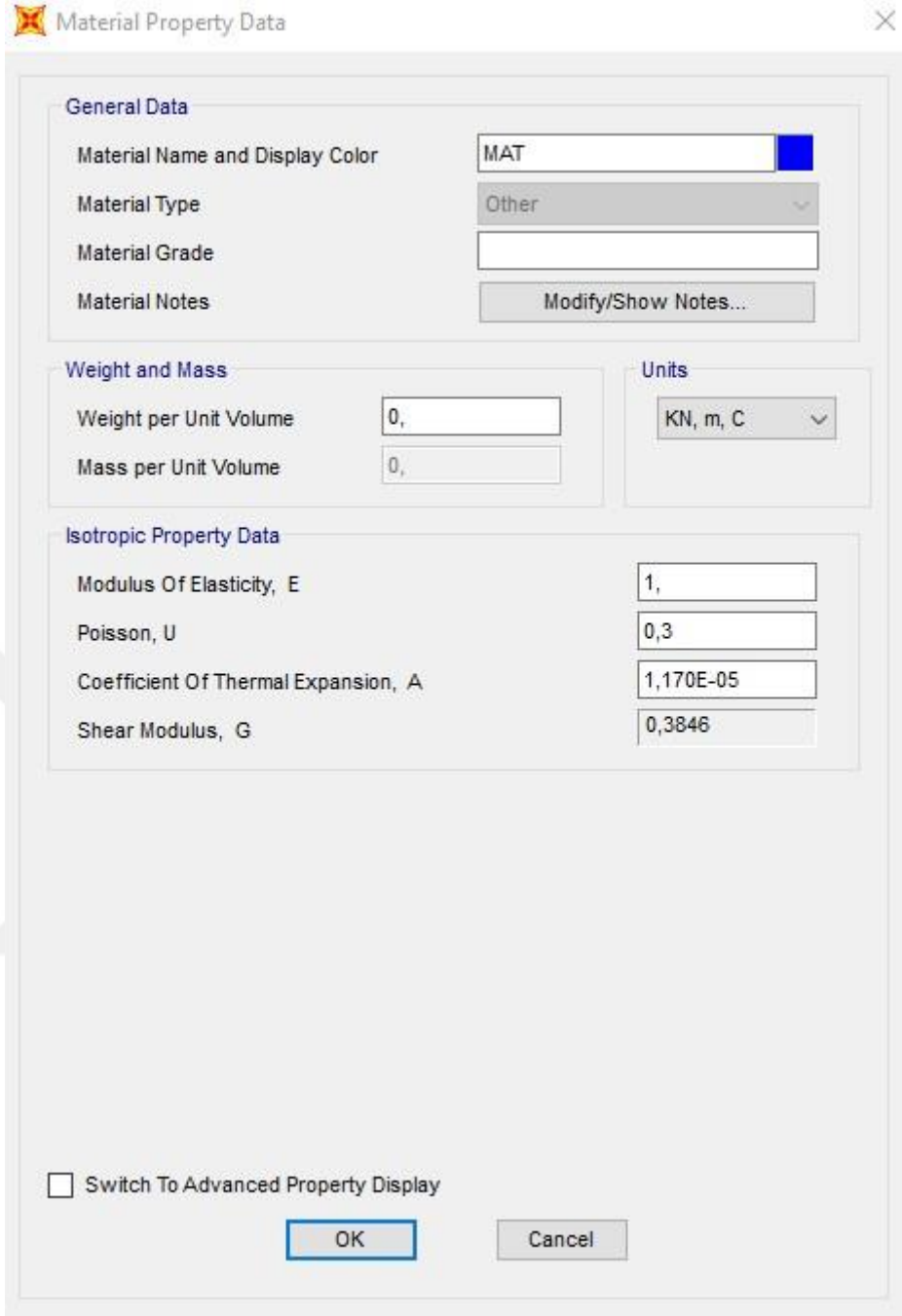
İzostatik sistemlerin tesir çizgilerinin EMBP ile hesaplanması yine oldukça pratik bir yoldur. Müller-Breslau Prensibi gereğince sisteme, tesir çizgisi araştırılan kesit zoru veya mesnet tepkisini ortadan kaldıracak bir serbestlik verilmesi, başlangıçta izostatik olan sistemi mekanizma(labil) haline getirecektir. Sistemin mekanizma haline gelmesi, EMBP ile hesap için bir engel değildir. Labil hale gelen sisteme uygulanan birim yüklemeler sonucu büyük yerdeğiştirmeler oluşmaktadır ancak bu yerdeğiştirmeler ilgili denklemde kullanılarak EMBP ile hesaba devam edildiğinde tesir çizgisinin doğru çıktığı gözlemlenir.

Şekil 4.32’de gösterilen [8] izostatik çerçeve sisteminin 1 numaralı noktasındaki mesnet tepkisi (R1), 5 numaralı noktasında eğilme momenti (M5) ve kesme kuvveti (T5) tesir çizgileri EMBP ile SAP2000 programı kullanılarak çözülmüştür. Hareketli yükün 3 ve 7 noktaları arasında dolaştığı düşünülmüştür bu sebeple çizilen tesir çizgisi diyagramları da 3 ile 7 noktaları arasındaki bölge içindir.



Şekil 4.32: İzostatik çerçeve sistem.

Sistem modeli oluşturulurken tanımlanan malzeme özellikleri Şekil4.33'te, çubuk kesit özellikleri Şekil 4.34'te gösterilmiştir.

The image shows a software dialog box titled "Material Property Data". It is organized into three main sections: "General Data", "Weight and Mass", and "Isotropic Property Data". The "General Data" section includes fields for "Material Name and Display Color" (containing "MAT" and a blue color swatch), "Material Type" (a dropdown menu showing "Other"), "Material Grade" (an empty text field), and "Material Notes" (a button labeled "Modify/Show Notes..."). The "Weight and Mass" section has two input fields: "Weight per Unit Volume" and "Mass per Unit Volume", both containing "0,". To the right of these is a "Units" dropdown menu showing "KN, m, C". The "Isotropic Property Data" section contains four input fields: "Modulus Of Elasticity, E" (containing "1,"), "Poisson, U" (containing "0,3"), "Coefficient Of Thermal Expansion, A" (containing "1,170E-05"), and "Shear Modulus, G" (containing "0,3846"). At the bottom left, there is a checkbox labeled "Switch To Advanced Property Display" which is currently unchecked. At the bottom center are "OK" and "Cancel" buttons.

General Data	
Material Name and Display Color	MAT 
Material Type	Other
Material Grade	
Material Notes	Modify/Show Notes...

Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	0,
Mass per Unit Volume	0,

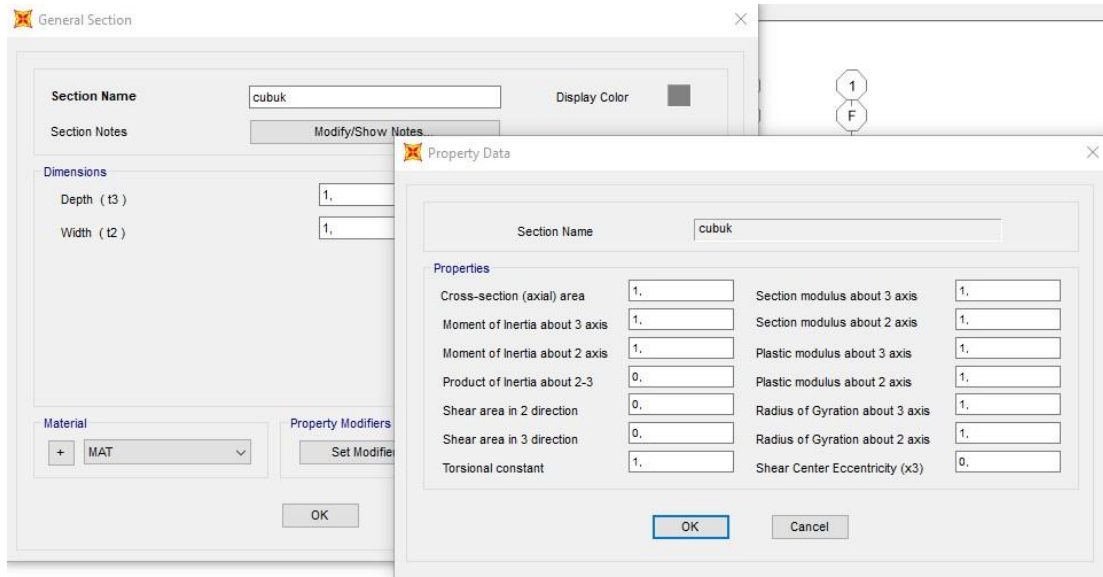
Units	
	KN, m, C

Isotropic Property Data	
Modulus Of Elasticity, E	1,
Poisson, U	0,3
Coefficient Of Thermal Expansion, A	1,170E-05
Shear Modulus, G	0,3846

☐ Switch To Advanced Property Display

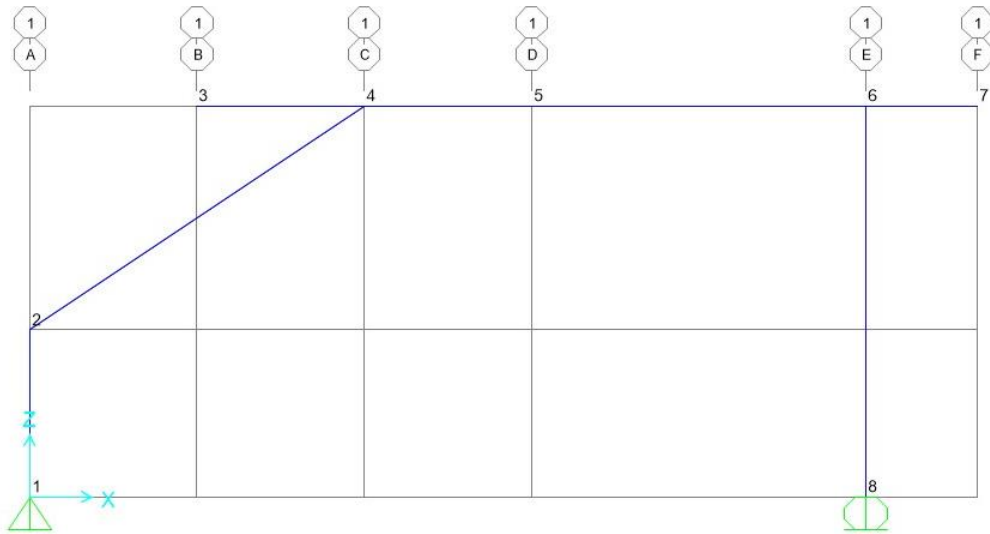
OK Cancel

Şekil 4.33: Malzeme özellikleri.



Şekil 4.34: Kesit özellikleri.

Bu malzeme ve kesit özelliklerini tanımladıktan sonra oluşturulan sistem modeli Şekil 4.35'te verilmiştir.

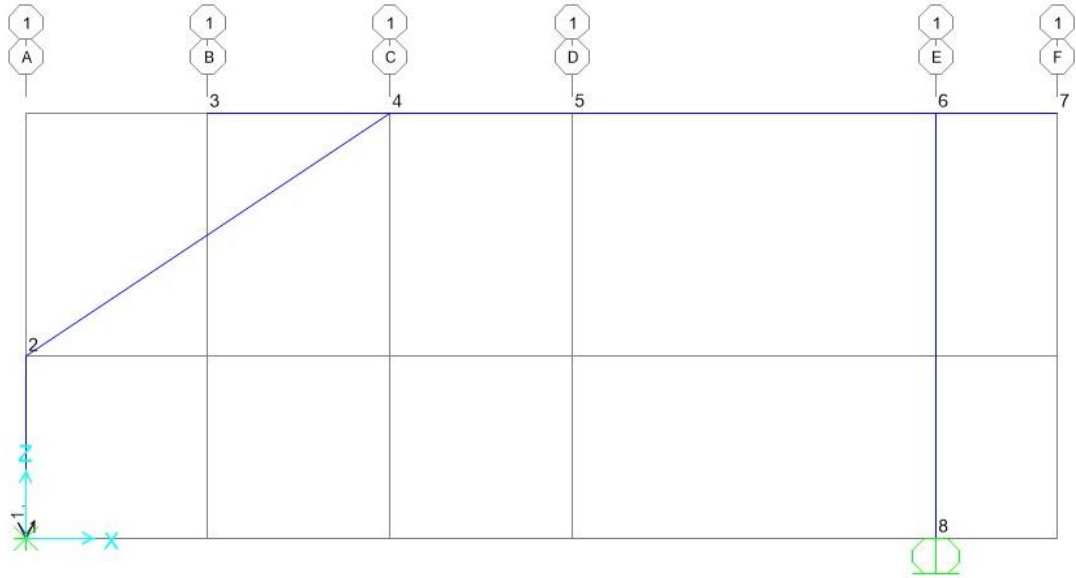


Şekil 4.35: İzostatik çerçeve SAP2000 sistem modeli.

4.3.1 R1 tesir çizgisi

R1 tesir çizgisini bulmak için Müller-Breslau Prensibi gereği sisteme o noktada araştırılan kesit zoru veya mesnet tepkisini ortadan kaldıracak bir serbestlik verilmesi gerektiğinden ilk olarak 1 numaralı düğüm noktası üzerindeki mesnet şartı değiştirilmelidir. Bu maksatla 1 numaralı düğüm noktasına x ve y eksenlerinde

tutulu, z ekseninde serbest olacak şekilde yeniden bir mesnet şartı atanır. 1 numaralı düğüm noktasına verilen bu serbestlik ile sistem labil hale gelmiştir. Bu işlemten sonra 1 numaralı düğüm noktasına z ekseninde bir birimlik kuvvet Şekil 4.36'da gösterildiği gibi uygulanır.



Şekil 4.36: R1 tesir çizgisi hesabında yapılan birim yükleme.

Bir birimlik yükleme sonrası sistem analizi yapılır. Şekil 4.37'de verilen, analiz sonucu 1 numaralı düğüm noktasında z ekseninde oluşan yerdeğiştirme denklem 4.9'da kullanılarak birim yerdeğiştirme oluşturan kuvvet değeri hesaplanır.

Joint Displacements			
Joint	Object	Joint Element	
	1	2	3
Trans	0,	0,	-2,702E+17
Rotn	0,	-1,801E+16	0,

Şekil 4.37: 1 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

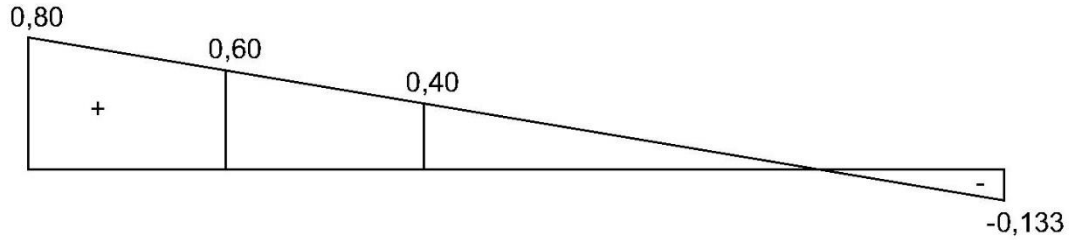
$$F = -\frac{1}{0 - (-2,702.10^{17})} = -3,7001.10^{-18} \#(4.9)$$

Elde edilen F kuvveti, birim yükleme sonucu elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmeleri ile çarpılır ve tesir çizgisi ordinatları elde edilir. Bu ordinat

değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Bu ordinatların kullanılmasıyla çizilen R1 tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.38’de verilmiştir.

Çizelge 4.7: R1 hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

Nokta	U3(m)
1	0,99983
2	0,99983
3	0,79986
4	0,59990
5	0,39993
6	0,00000
7	-0,13331
8	0,00000



Şekil 4.38: R1 tesir çizgisi diyagramı.

4.3.2 M5 tesir çizgisi

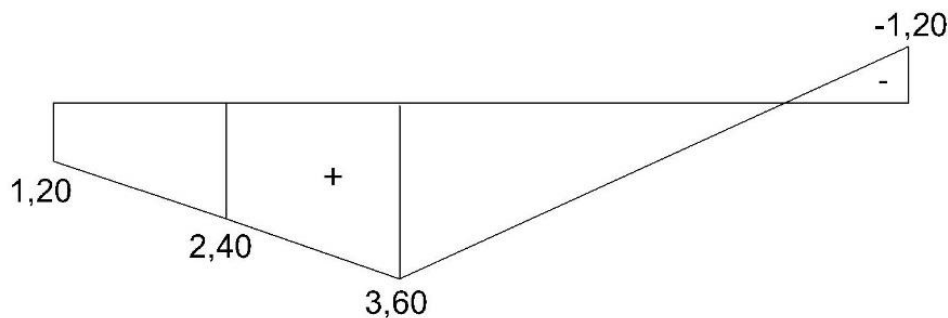
M5 tesir çizgisi hesaplanırken 5 numaralı düğüm noktası, düğüm noktası ayırma işlemi ile ayrılır. Bu kesitte artık sol çubuk ucunda 5, sağ çubuk ucunda 9 numaralı düğüm noktası vardır. Aynı kesitte elde edilen 5 ve 9 numaralı düğüm noktalarına x ve z eksenlerindeki yerdeğiştirmeleri eşit, y eksenindeki dönmeleri serbest olacak şekilde bir kısıtlama atanır. 5 ve 9 numaralı noktalara y ekseninde birbirine zıt yönde bir birimlik momentler Şekil 4.39’daki gibi uygulanır ve sistem analizi yapılır. Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de verilen, analiz sonucu 5 ve 9 numaralı düğüm noktalarında oluşan y eksenindeki dönmeler denklem 4.10’da kullanılır ve birim dönme oluşturacak moment değeri bulunur.

$$M = -\frac{1}{1,047 \cdot 10^{15} - (-1,57 \cdot 10^{15})} = -3,82117 \cdot 10^{-16} \# (4.10)$$

Denklem 4.9 ile elde edilen y eksenı etrafında birim dönme oluşturan moment değeri M ile birim moment çifti yüklemeyle elde edilen düğüm noktası yerdeğıştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.8’de verilmiştir. Bu değerler M5 tesir çizgisi ordinatlarına eşittir.

Çizelge 4.8: M5 tesir çizgisi hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

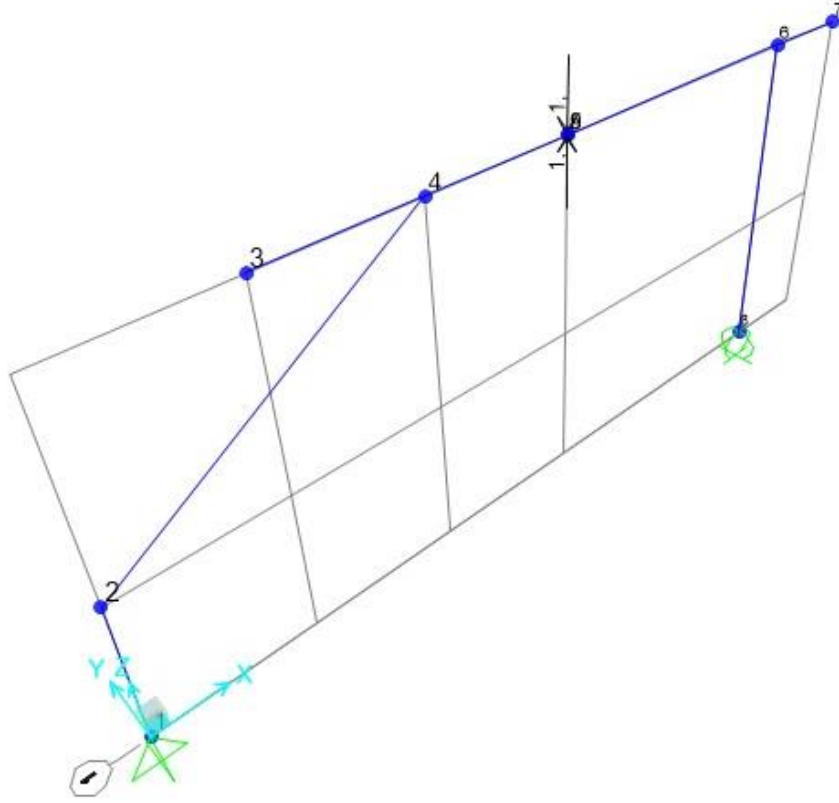
Nokta	U3(m)
1	0,00000
2	0,00000
3	1,19976
4	2,39952
5	3,59927
6	0,00000
7	-1,19976
8	0,00000
9	3,59927



Şekil 4.42: M5 tesir çizgisi diyagramı.

4.3.3 T5 tesir çizgisi

T5 tesir çizgisi bulunurken M5 tesir çizgisi hesabında yapılan düğüm noktası ayırma işlemi aynı şekilde tekrarlanır. 5 ve 9 numaralı düğüm noktalarına x eksenindeki yerdeğiştirmeleri eşit, y eksenindeki dönmeleri eşit, z eksenindeki yerdeğiştirmeleri serbest olacak şekilde bir kısıtlama atanır. Bu işlemden sonra 5 ve 9 numaralı noktalara Şekil 4.43'teki gibi z ekseninde birbirine zıt yönlerde birim yüklemeler uygulanır. Bu birim yüklemelerden dolayı 5 ve 9 noktalarında oluşan yerdeğiştirmeler Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'te verilmiştir. Bu yerdeğiştirmeler denklem 4.11'de kullanılır ve birim yerdeğiştirme oluşturan kuvvet değeri hesaplanır.



Şekil 4.43: T5 tesir çizgisi hesabında birim yüklemeler.

Joint Displacements			
Joint Object	5	Joint Element	5
	1	2	3
Trans	-8,224E+16	0,	1,057E+17
Rotn	0,	-1,175E+16	0,

Şekil 4.44: 5 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

Joint Displacements			
Joint Object	9	Joint Element	9
	1	2	3
Trans	-8,224E+16	0,	-7,049E+16
Rotn	0,	-1,175E+16	0,

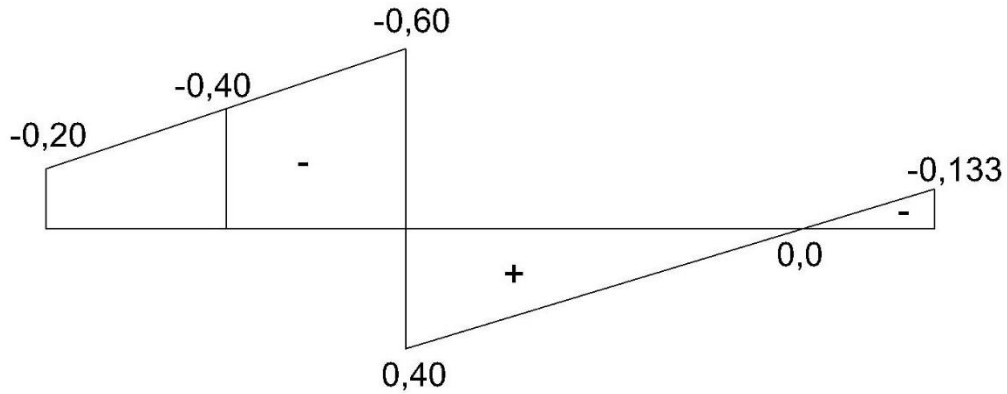
Şekil 4.45: 9 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

$$F = -\frac{1}{1,057 \cdot 10^{17} - (-7,049 \cdot 10^{16})} = -5,6757 \cdot 10^{-18} \#(4.11)$$

Denklem 4.0 ile elde edilen F değeri ile birim kuvvet çifti yüklemeyle elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.9’da verilmiştir. Bu değerler T5 tesir çizgisi ordinatlarına eşittir.

Çizelge 4.9: T5 tesir çizgisi hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

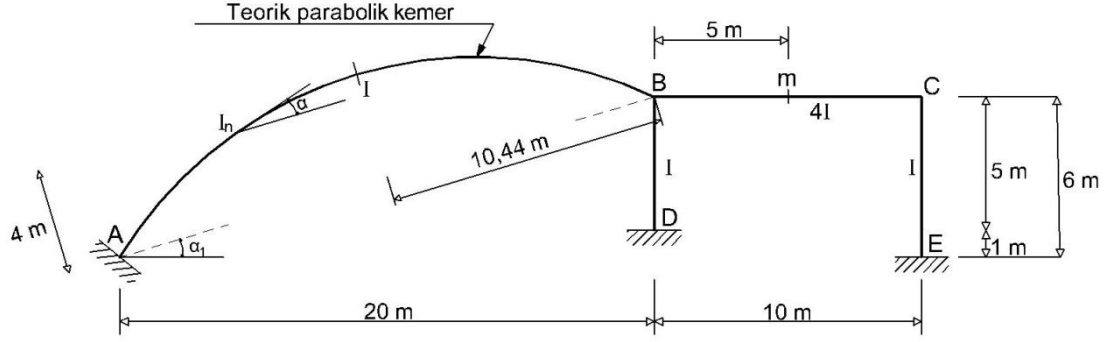
Nokta	U3(m)
1	0,00000
2	0,00000
3	-0,20004
4	-0,40009
5	-0,60013
6	0,00000
7	-0,13336
8	0,00000
9	0,40009



Şekil 4.46: T5 tesir çizgisi diyagramı.

4.4 Teorik Parabolik Kemerli Çerçeve Sisteminin Tesir Çizgilerinin Elde Edilmesi

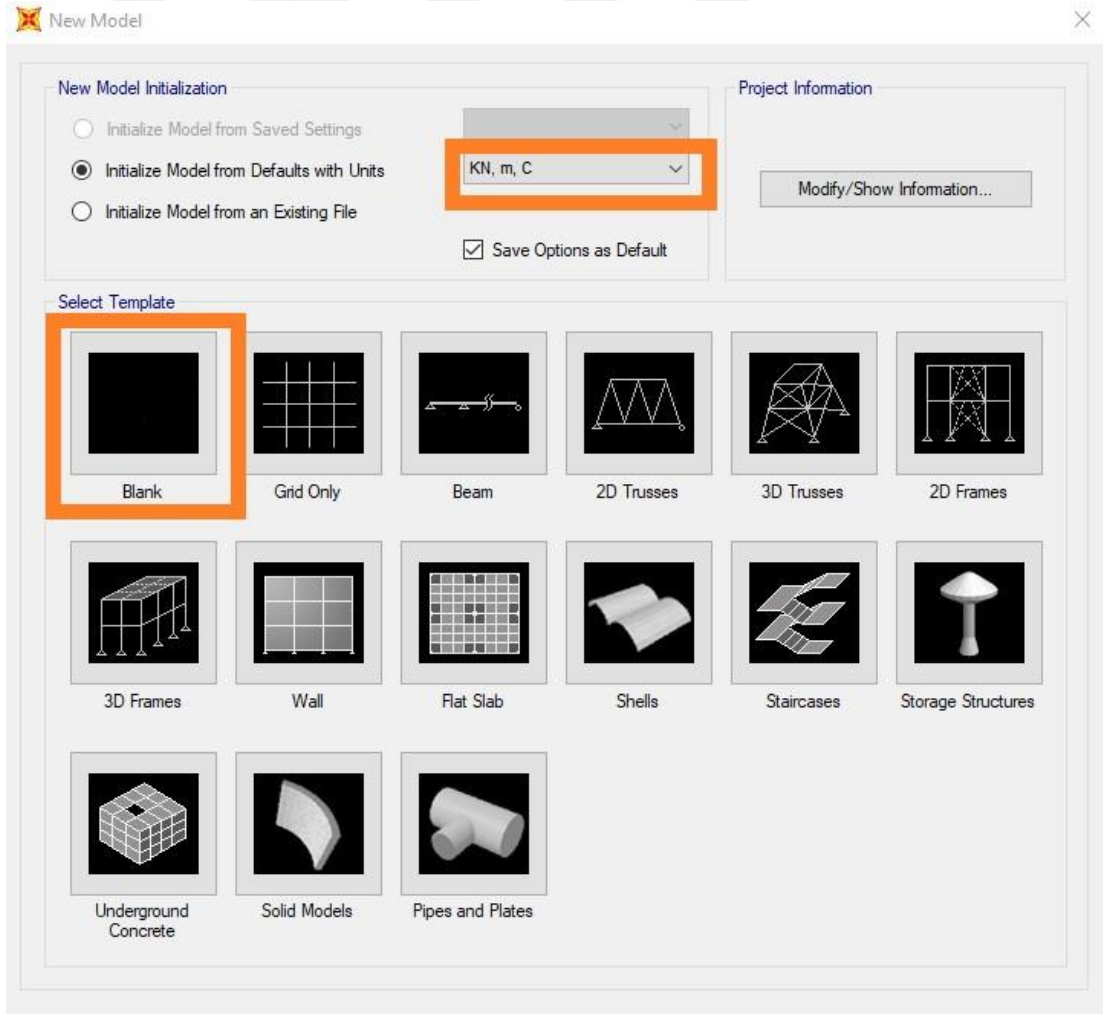
Şekil 4.47’de verilen [11], eğri eksenli çubuk barındıran çerçeve sisteminin M_{BA} , N_{BA} , M_m ve m kesiti için plastik dönme tesir çizgileri EMBP ile hesaplanmıştır.



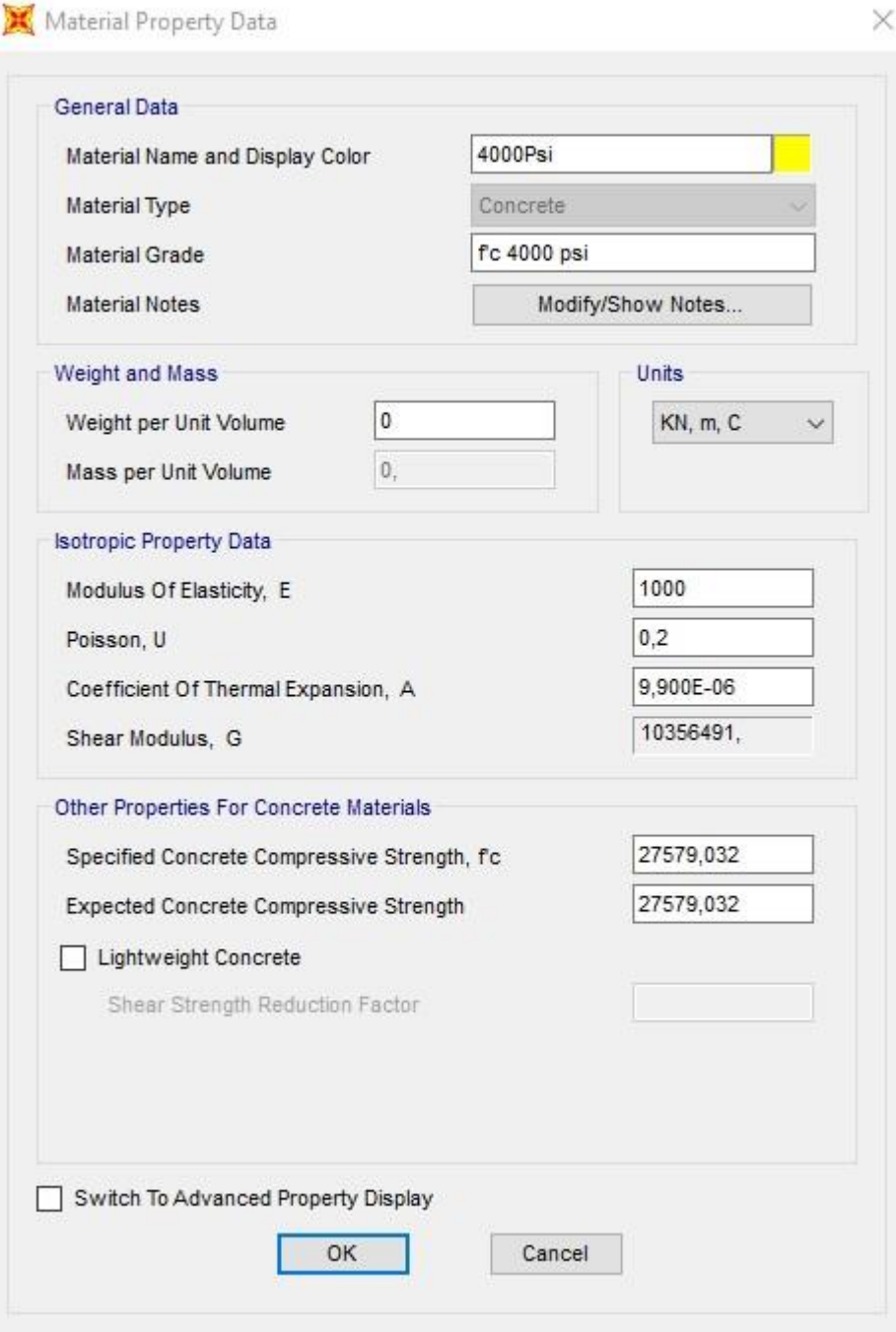
Şekil 4.47: Eğik eksenli çubuklu çerçeve sistemi.

4.4.1 SAP2000 programında sistem modelinin oluşturulması

SAP2000 programında sistem modeli oluşturulurken Şekil 4.48’de gösterilen şablon ve birimler seçilir. Daha sonra Şekil 4.49’da verilen malzeme özelliklerini tanımlama işlemi yapılır.



Şekil 4.48: SAP2000 şablon seçimi.



Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: 4000Psi

Material Type: Concrete

Material Grade: f'c 4000 psi

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 0

Mass per Unit Volume: 0,

Units

KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 1000

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 10356491,

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 27579,032

Expected Concrete Compressive Strength: 27579,032

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Şekil 4.49: Malzeme özelliklerinin tanımlanması.

Çerçeve sistemin SAP2000 modelinde teorik parabolik kemer çubuk 20 eşit parça halinde tanımlanacaktır. Kemer üzerindeki bu 20 eşit çubuğun uç noktası koordinatları hesaplanırken, önce kemerin yatay eksen ile yaptığı açının sıfır olması durumu için düğüm noktalarının $\bar{x}$ ve $\bar{z}$ koordinatları denklem 4.12 ile bulunarak Çizelge 4.10'da verilmiştir. Daha sonra örnekte olduğu gibi kemerin yatay eksenle α_1 açısı yapması durumu için X ve Z koordinatları denklem 4.14 ile hesaplanmış ve Çizelge 4.10'da verilmiştir.

$$z = \frac{4f}{L^2} x(L - x) \#(4.12)$$

Kemerin yatay eksen ile yaptığı α_1 açısı denklem 4.13 ile hesaplanmıştır.

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{6}{20}\right) = 16,6992^\circ \#(4.13)$$

$$X = \bar{x} \cdot \cos(\alpha_1) - \bar{z} \cdot \sin(\alpha_1) \#(4.14)$$

$$Z = \bar{x} \cdot \sin(\alpha_1) + \bar{z} \cdot \cos(\alpha_1)$$

Çizelge 4.10: Eğri eksenli çubuk üzerindeki düğüm noktalarının koordinatları.

Nokta	$\bar{x}(m)$	$\bar{z}(m)$	$X(m)$	$Z(m)$
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	1,0440	0,7600	0,7816	1,0279
3	2,0880	1,4400	1,5862	1,9793
4	3,1320	2,0400	2,4137	2,8539
5	4,1760	2,5600	3,2643	3,6520
6	5,2200	3,0000	4,1378	4,3734
7	6,2640	3,3600	5,0343	5,0182
8	7,3080	3,6400	5,9538	5,5864
9	8,3520	3,8400	6,8963	6,0780
10	9,3960	3,9600	7,8618	6,4929
11	10,4400	4,0000	8,8503	6,8312
12	11,4840	3,9600	9,8618	7,0929
13	12,5280	3,8400	10,8962	7,2779
14	13,5720	3,6400	11,9537	7,3864
15	14,6160	3,3600	13,0341	7,4182
16	15,6600	3,0000	14,1375	7,3733
17	16,7040	2,5600	15,2639	7,2519
18	17,7480	2,0400	16,4133	7,0538
19	18,7920	1,4400	17,5857	6,7791
20	19,8360	0,7600	18,7811	6,4278
21	20,8800	0,0000	20,0000	6,0000

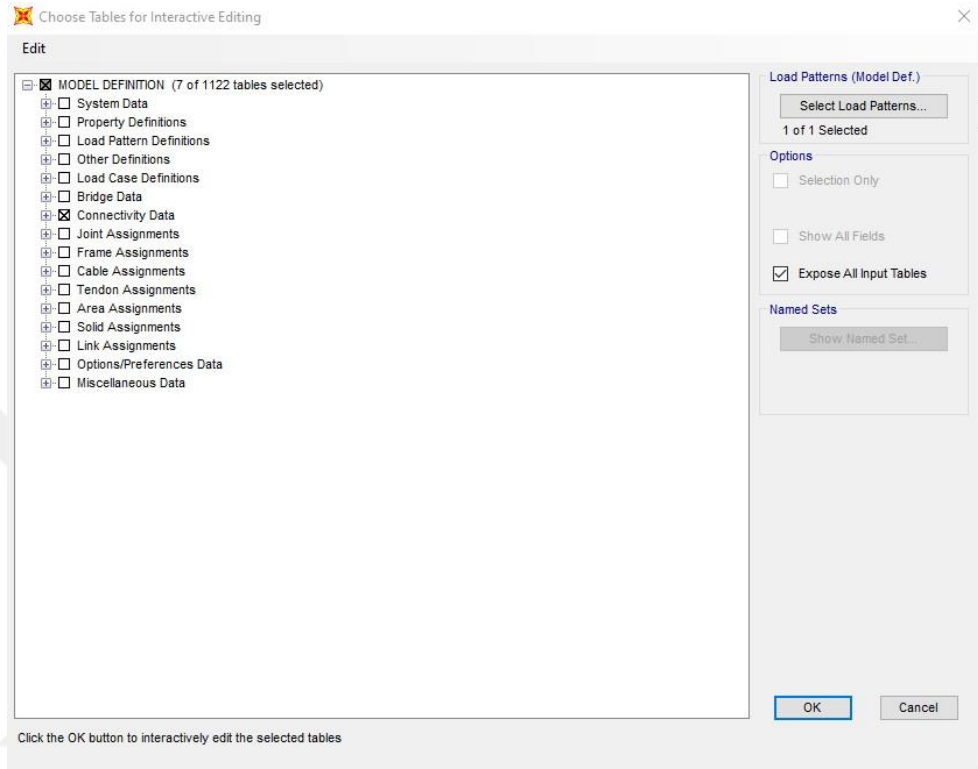
Sistem üzerindeki diğer düğüm noktalarının koordinatlarını da içeren bütün düğüm noktalarının koordinatları Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11: Sistem üzerindeki bütün düğüm noktalarının koordinatları.

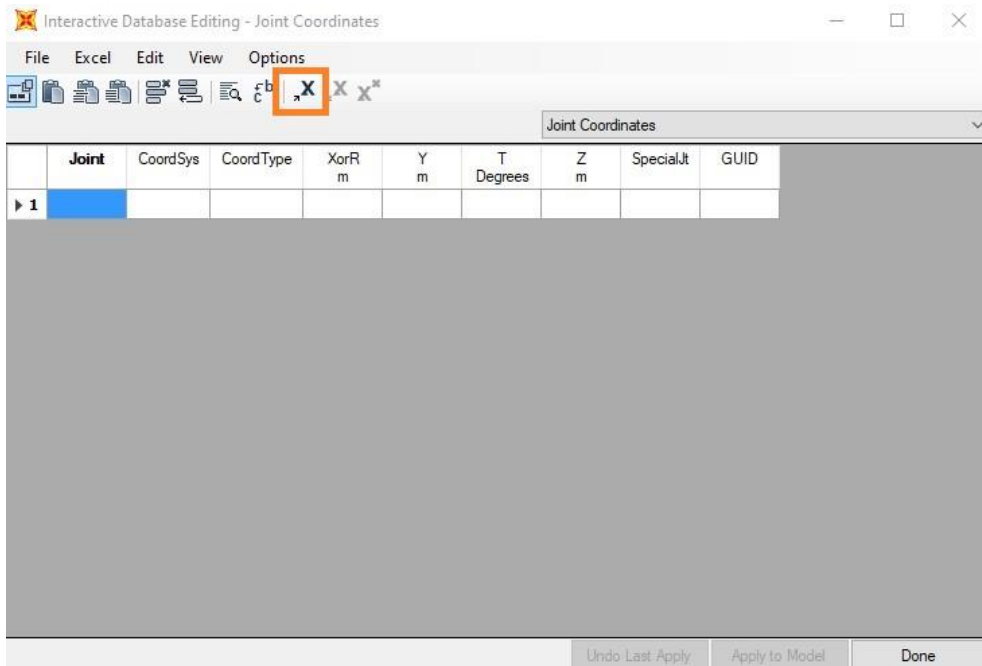
Nokta No	X(m)	Z(m)
1	0,00000	0,00000
2	0,78159	1,02794
3	1,58616	1,97925
4	2,41372	2,85394
5	3,26427	3,65200
6	4,13781	4,37343
7	5,03433	5,01824
8	5,95385	5,58643
9	6,89635	6,07798
10	7,86184	6,49291
11	8,85031	6,83122
12	9,86178	7,09290
13	10,89623	7,27795
14	11,95367	7,38637
15	13,03410	7,41817
16	14,13752	7,37335
17	15,26392	7,25189
18	16,41331	7,05382
19	17,58569	6,77911
20	18,78106	6,42778
21	20,00000	6,00000
22	21,00000	6,00000
23	22,00000	6,00000
24	23,00000	6,00000
25	24,00000	6,00000
26	25,00000	6,00000
27	26,00000	6,00000
28	27,00000	6,00000
29	28,00000	6,00000
30	29,00000	6,00000
31	30,00000	6,00000
32	20,00000	1,00000
33	30,00000	6,00000

Bu aşamada, düğüm noktası koordinatlarının SAP2000 programına aktarılması gerekmektedir. Bu aktarma işlemi için SAP2000 programının Microsoft Excel programı ile etkileşimli çalışması özelliğinden faydalanılabilir. Programın ‘Edit’ bölümünden ‘Interactive Database Editing’ penceresi açılır. Şekil 4.510’de verilen seçimler yapılarak ilerlenir ve düğüm noktası koordinatlarının tablo şeklinde bulunduğu bir pencere açılır. Açılan pencerede, Şekil 4.51’de turuncu kare içine alınarak gösterilen buton, tabloyu Excel’e aktarmaya yaramaktadır. Bu işlem ile

tablo Excel programına aktarılır. Excel sayfasındaki tabloya düğüm noktası numaraları ve koordinatları yazılır ve SAP2000 programına geri dönülür. Excel tablosunu SAP2000'e geri aktarmaya yarayan diğer butona basılır ve işleme onay verilir. Böylece düğüm noktası koordinatları SAP2000 programına aktarılmış olur.

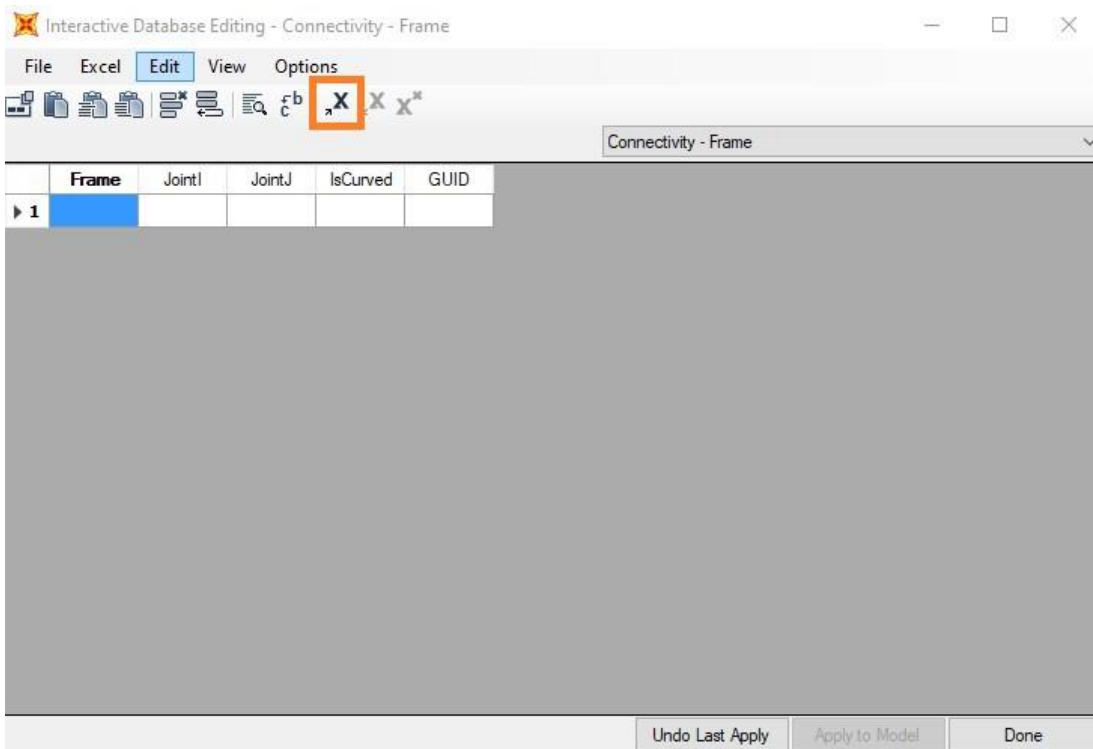


Şekil 4.50: SAP2000 etkileşimli veritabanı düzenleme penceresi.



Şekil 4.51: SAP2000 düğüm noktası koordinatları tablosu.

Düğüm noktası koordinatlarının aktarımından sonra çubuk elemanların isim ve uç nokta bilgilerinin benzer adımlarla programa girilmesi gerekmektedir. Bu aşamada yine ‘Interactive Database Editing’ penceresi açılır ve Şekil 4.50’de verilen seçimler yapılarak ilerlenir. Açılan pencerenin sağ kısmından ‘Connectivity-Frame’ tablosu seçilir ve Şekil 4.52’deki tablo açılır. Bu tablo Excel programına aktarılır ve Çizelge 4.12’deki verilere uygun şekilde doldurulur. Daha sonra SAP2000 programına geri dönülür ve Excel tablosunu geri getir işlemiyle Excel’de düzenlenen tablo geri getirilir. Bu tablo modele uygulanıp, işlem onaylandığında oluşturulan nokta ve çubuk elemanlar otomatik olarak SAP2000 çalışma ekranına gelir.



Şekil 4.52: SAP2000 çubuk eleman isim ve uç nokta bilgileri tablosu.

Çizelge 4.12: Çubuk elemanların uç nokta bilgileri.

Çubuk No	i ucu	j ucu
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	5
5	5	6
6	6	7
7	7	8
8	8	9
9	9	10
10	10	11
11	11	12
12	12	13
13	13	14
14	14	15
15	15	16
16	16	17
17	17	18
18	18	19
19	19	20
20	20	21
21	21	22
22	22	23
23	23	24
24	24	25
25	25	26
26	34	27
27	27	28
28	28	29
29	29	30
30	30	31
31	32	21
32	31	33

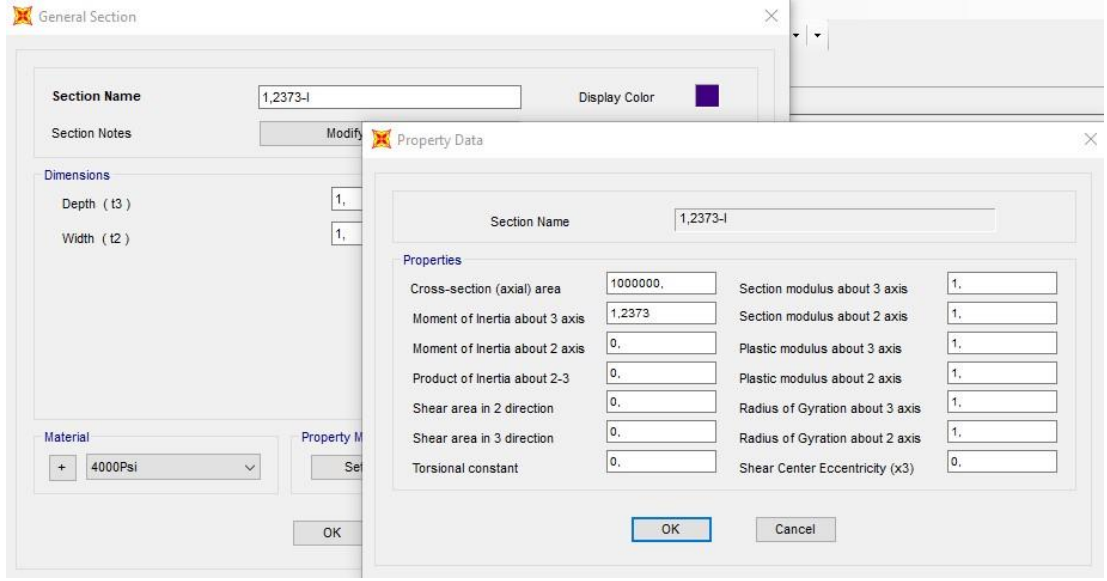
Düğüm noktası ve çubuk eleman uç noktası bilgilerinin sisteme aktarılmasından sonra çubuk elemanların kesit özelliklerinin tanımlanmasına geçilir. Kemer oluşturulan çubuk elemanların atalet momentleri tanımlanırken, başlangıçta kemer elemanın kilit noktası için verilen I atalet momenti, kemer üzerindeki 21 çubuk uç noktası için denklem 4.15'te kullanılır ve I_n atalet momentleri hesaplanır. Ancak kemeri oluşturan 20 eşit çubuk elemanın kesit özellikleri tanımlanırken atalet momenti olarak, çubukların i ve j uçlarındaki I_n atalet momenti değerlerinin ortalaması alınmıştır. Hesaplanan bu değerler de Çizelge 4.13'te verilmiştir.

$$I_n = \frac{I}{\cos(\alpha_n)} \#(4.15)$$

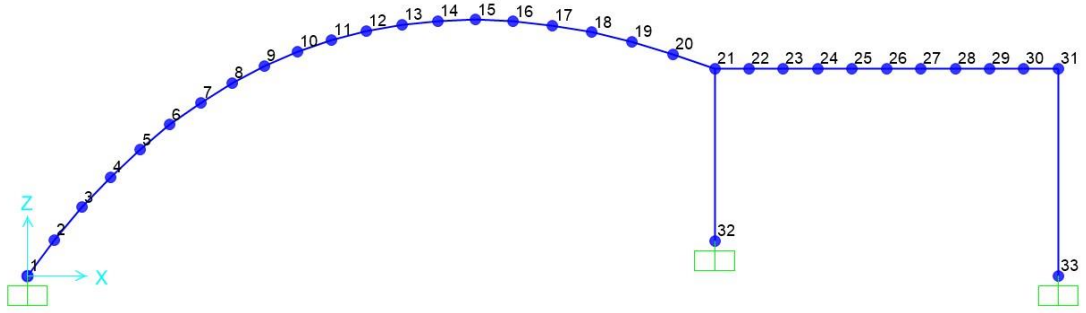
Çizelge 4.13: Teorik parabolik kemeri oluşturan çubukların atalet momentleri.

Nokta No	$\tan(\alpha)$	(α°)	$\cos(\alpha)$	I_n	Çubuk No	Çubuk ortalama atalet momenti
1	0,6538	37,4624	0,7938	1,2598	1	1,2373
2	0,6037	34,5923	0,8232	1,2148	2	1,1938
3	0,5499	31,5094	0,8526	1,1729	3	1,1539
4	0,4923	28,2090	0,8812	1,1348	4	1,1177
5	0,4309	24,6916	0,9086	1,1006	5	1,0858
6	0,3659	20,9639	0,9338	1,0709	6	1,0584
7	0,2974	17,0410	0,9561	1,0459	7	1,0360
8	0,2260	12,9465	0,9746	1,0261	8	1,0189
9	0,1521	8,7132	0,9885	1,0117	9	1,0073
10	0,0765	4,3819	0,9971	1,0029	10	1,0015
11	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	11	1,0015
12	-0,0765	-4,3819	0,9971	1,0029	12	1,0073
13	-0,1521	-8,7132	0,9885	1,0117	13	1,0189
14	-0,2260	-12,9465	0,9746	1,0261	14	1,0360
15	-0,2974	-17,0410	0,9561	1,0459	15	1,0584
16	-0,3659	-20,9639	0,9338	1,0709	16	1,0858
17	-0,4309	-24,6916	0,9086	1,1006	17	1,1177
18	-0,4923	-28,2090	0,8812	1,1348	18	1,1539
19	-0,5499	-31,5094	0,8526	1,1729	19	1,1938
20	-0,6037	-34,5923	0,8232	1,2148	20	1,2373
21	-0,6538	-37,4624	0,7938	1,2598		

Bu aşamada çubuk elemanların kesit özelliklerinin SAP2000 programında tanımlanmasına geçilir. Elde edilen atalet momenti değerleri ile uygun çubuk eleman kesitleri Şekil 4.53'te gösterildiği gibi tanımlanır ve çubuklara atanır. BC çubuğu için atalet momenti $4I$, BD ve CE çubukları için atalet momenti I olan kesitler tanımlanır ve bu çubuklara atanır. Bu atama işlemlerinden sonra gerekli noktalara uygun mesnet koşulları atanır ve sistem modeli tamamlanmış olur. Oluşturulan sistem modeli Şekil 4.54'te verilmiştir.



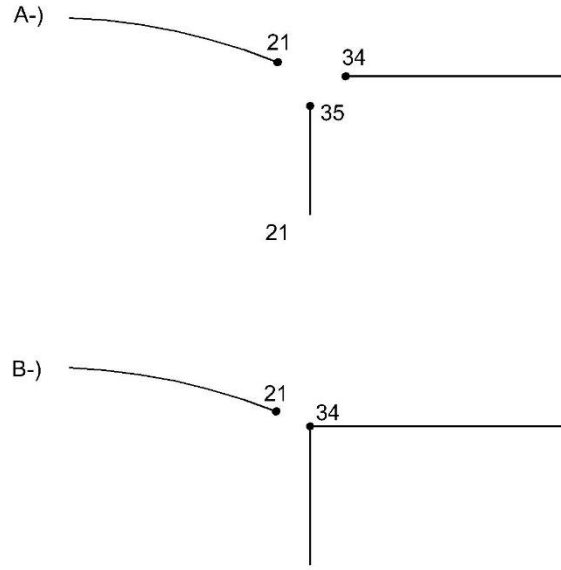
Şekil 4.53: Kesit özelliklerinin tanımlanması.



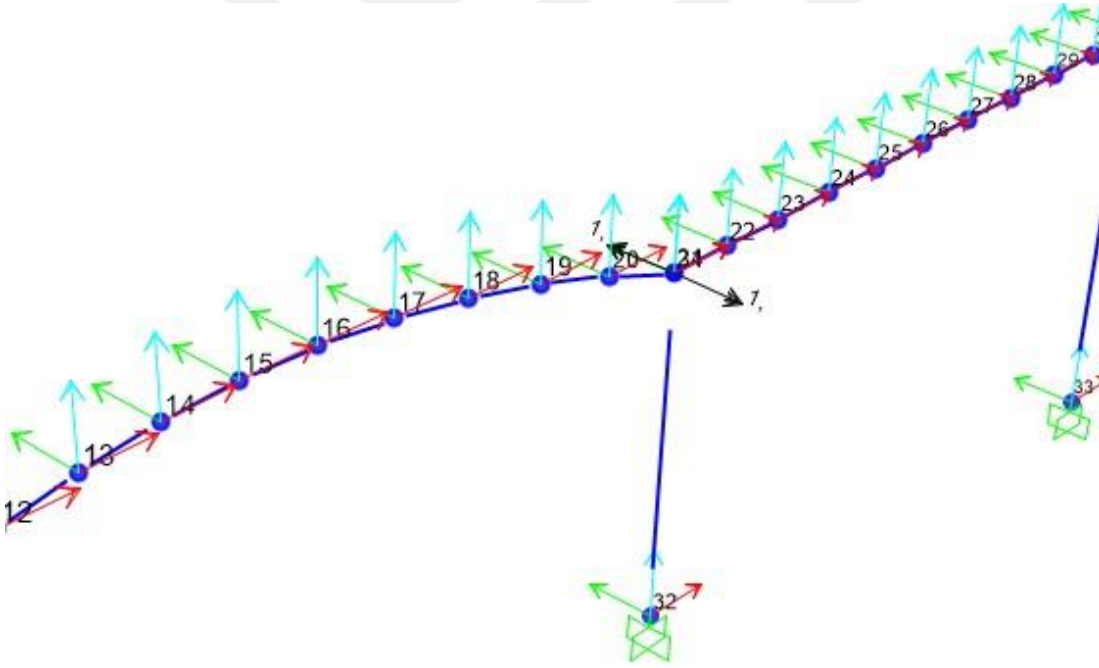
Şekil 4.54: SAP2000 sistem modeli.

4.4.2 M_{BA} tesir çizgisinin hesabı

M_{BA} tesir çizgisi EMBP ile hesaplanırken 21 numaralı düğüm noktası, düğüm noktası ayırma işlemi ile ayrılır. Bu işlemden sonra 21 numaralı düğüm noktasının olduğu kesitte artık 21, 34, 35 numaralı üç nokta bulunmaktadır. 21 numaralı nokta soldaki çubuğa, 34 numaralı nokta sağdaki çubuğa, 35 numaralı nokta ise alttaki çubuğa aittir. 34 ve 35 numaralı düğüm noktalarına ayrı ayrı bir işlem yapılmayacaktır, bu iki noktanın başlangıçta olduğu gibi tek nokta gibi hareket etmesi istenmektedir. Bu maksatla 34 ve 35 numaralı noktalar düğüm noktası birleştirme işlemi ile birleştirilir. Şekil 4.55'te A durumunda düğüm noktası ayırma işleminden sonra oluşan noktalar, B durumunda da düğüm noktası birleştirme işleminden sonraki noktalar gösterilmiştir. Daha sonra bu iki noktaya y ekseninde birbirine zıt yönlerde birim momentler Şekil 4.56'daki gibi uygulanır ve sistem analizi yapılır.



Şekil 4.55: Düğüm noktası ayırma ve birleştirme işlemleri.



Şekil 4.56: SAP2000 birim yükleme uygulaması.

Analiz sonucu bu iki noktada oluşan yerdeğiştirmeler Şekil 4.57 ve Şekil 4.58’de verilmiştir. Bu yerdeğiştirmelerden y eksenindeki dönmeler denklem 4.16’da kullanılır ve birim dönme oluşturacak moment değeri hesaplanır.



Joint Object 21		Joint Element 21		
	1	2	3	
Trans	-0,00198	0,	0,	
Rotn	0,	0,0027	0,	

Şekil 4.57: 21 noktası yerdeğiştirmeleri.



Joint Object 34		Joint Element 34		
	1	2	3	
Trans	-0,00198	0,	0,	
Rotn	0,	-6,418E-04	0,	

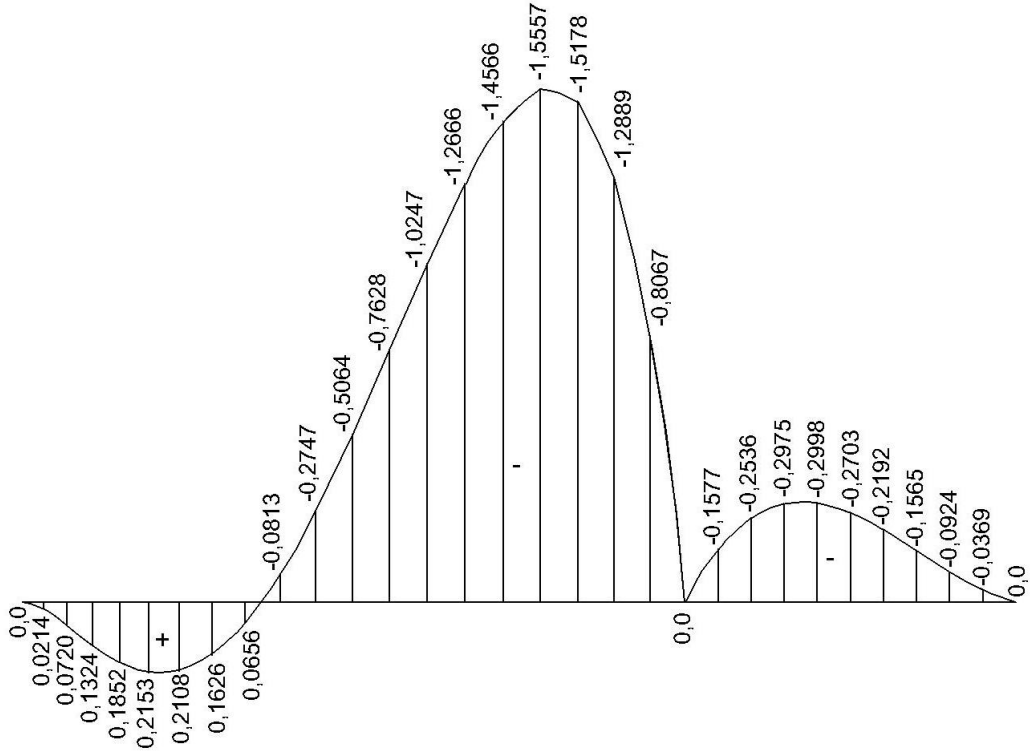
Şekil 4.58: 34 noktası yerdeğiştirmeleri.

$$M = -\frac{1}{0,0027 - (-6,418 \cdot 10^{-4})} = -299,24 \# (4.16)$$

Denklem 4.15 ile elde edilen y ekseninde birim dönme oluşturan moment değeri M ile birim moment çifti yüklemeyle elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.14’te verilmiştir. Bu değerler M_{BA} tesir çizgisi ordinatlarına eşittir. Söz konusu ordinatların kullanılmasıyla çizilen M_{BA} tesir çizgisi Şekil 4.59’da verilmiştir.

Çizelge 4.14: M_{BA} tesir çizgisi hesabı sonucu elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

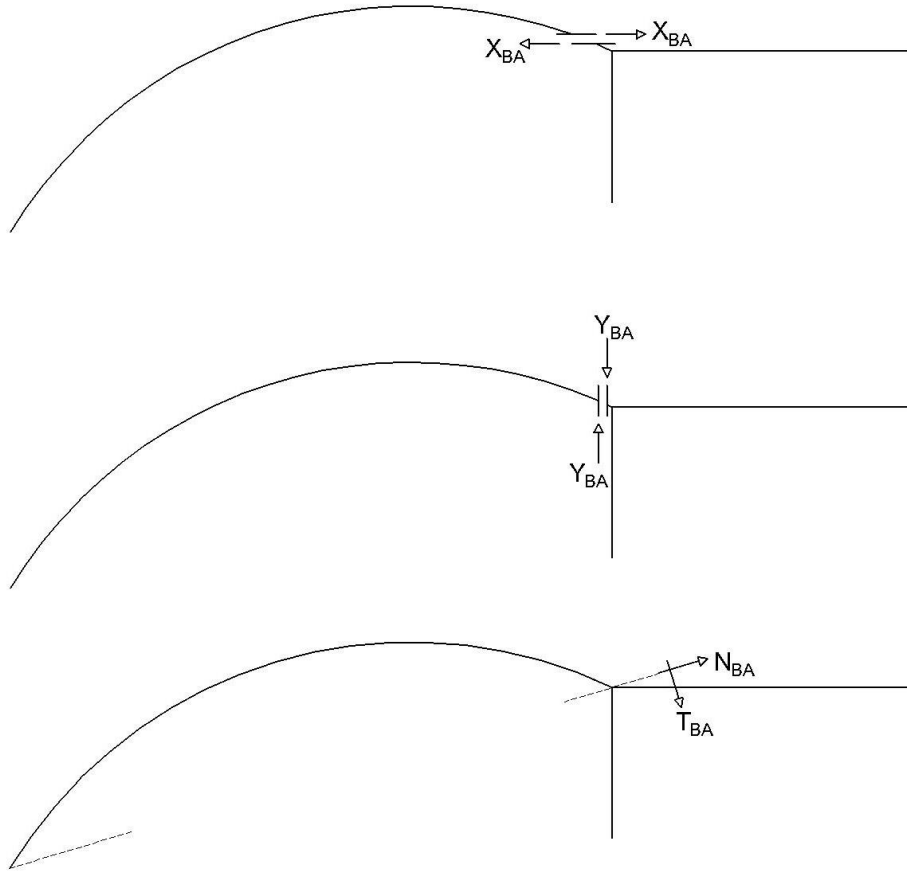
Nokta No	U3(m)
1	0,00000
2	0,02140
3	0,07202
4	0,13242
5	0,18518
6	0,21533
7	0,21075
8	0,16257
9	0,06559
10	-0,08129
11	-0,27472
12	-0,50643
13	-0,76285
14	-1,02470
15	-1,26659
16	-1,45655
17	-1,55572
18	-1,51784
19	-1,28890
20	-0,80670
21	0,00000
22	-0,15774
23	-0,25356
24	-0,29754
25	-0,29976
26	-0,27028
27	-0,21918
28	-0,15653
29	-0,09240
30	-0,03686
31	0,00000
32	0,00000
33	0,00000
34	0,00000



Şekil 4.59: M_{BA} tesir çizgisi diyagramı.

4.4.3 N_{BA} tesir çizgisinin hesabı

N_{BA} tesir çizgisi hesaplanırken 21 ve 34 numaralı noktalara global eksenlerde normal kuvvet ve kesme kuvveti yönlerinde ayrı ayrı yüklemeler yapılır. Bu iki ayrı yükleme durumundan elde edilen yerdeğiştirmeler kullanılarak izdüşüm yöntemi ile N_{BA} ve T_{BA} tesir çizgisilerinin ordinatları elde edilir. Şekil 4.60'ta bu yüklemelerin yönleri ve yüklemeye göre ilgili kesite verilen serbestlikler gösterilmiştir.



Şekil 4.60: N_{BA} hesabında yapılan yüklemelerin yönleri.

21 ve 34 numaralı düğüm noktalarına y eksenindeki dönmeler ve z eksenindeki yerdeğiştirmeler eşit, x eksenindeki yerdeğiştirmeler serbest olacak şekilde bir kısıtlama atanır. Bu işlem den sonra 21 ve 34 numaralı noktalara x ekseninde birbirine zıt yönlerde bir birimlik kuvvetler uygulanır ve sistem analizi yapılır. Analiz sonrası 34 ve 21 numaralı noktalarda elde edilen Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’deki yerdeğiştirmeler denklem 4.17’de kullanılır ve birim yerdeğiştirme oluşturacak kuvvet değeri bulunur.

Joint Displacements				
Joint	Object	21	Joint Element	21
		1	2	3
Trans		0,0372	0,	0,
Rotn		0,	-0,00188	0,

Şekil 4.61: X_{BA} yüklemesinde 21 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

Joint Displacements			
Joint	Object	34	
		1	2
		2	3
Trans		-0,00962	0,
Rotn		0,	-0,00188

Şekil 4.62: X_{BA} yüklemesinde 34 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

$$F = -\frac{1}{0,0372 - (-0,00962)} = -21,3584\#(4.17)$$

Denklem 4.16 ile elde edilen F değeri ile birim kuvvet çifti yüklemesinden elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılması sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.15'te verilmiştir. Bu ordinatlar X_{BA} değerleri olarak daha sonra N_{BA} tesir çizgisi hesabı için kullanılacaktır.

Çizelge 4.15: X_{BA} tesir çizgisi hesabında elde edilen yerdeğiştirmeler.

Nokta No	U3(m)
1	0,00000
2	0,02437
3	0,08998
4	0,18545
5	0,29979
6	0,42261
7	0,54430
8	0,65616
9	0,75059
10	0,82129
11	0,86334
12	0,87349
13	0,85022
14	0,79396
15	0,70727
16	0,59499
17	0,46439
18	0,32540
19	0,19071
20	0,07599
21	0,00000
22	-0,03244
23	-0,05109
24	-0,05843
25	-0,05691
26	-0,04901
27	-0,03719
28	-0,02391
29	-0,01164
30	-0,00285
31	0,00000
32	0,00000
33	0,00000
34	0,00000

X_{BA} değerleri elde edildikten sonra 21 ve 34 numaralı noktalardaki mevcut yük ve kısıtlamalar kaldırılır. Bu iki noktaya x eksenindeki yerdeğiştirmeler ve y eksenindeki dönmeler eşit, z eksenindeki yerdeğiştirmeler serbest olacak şekilde bir kısıtlama atanır. Daha sonra bu iki noktaya z ekseninde birbirine zıt yönde bir birimlik kuvvetler uygulanır ve sistem analizi yapılır. Analiz sonrası 21 ve 34 numaralı noktalarda okunan, şekil 4.63 ve şekil 4.64'teki z eksenindeki

yerdeşiftirmeler denklem 4.18’de kullanılır ve birim yerdeşiftirme oluşturan kuvvet değeri hesaplanır.



Joint Object 21		Joint Element 21		
	1	2	3	
Trans	-0,02284	0,	0,36455	
Rotn	0,	-0,00646	0,	

şekil 4.63: Y_{BA} yüklemesinde 21 numaralı düğüm noktası yerdeşiftirmeleri.



Joint Object 34		Joint Element 34		
	1	2	3	
Trans	-0,02284	0,	0,	
Rotn	0,	-0,00646	0,	

şekil 4.64: Y_{BA} yüklemesinde 34 numaralı düğüm noktası yerdeşiftirmeleri.

$$F = -\frac{1}{0,36455 - 0} = -2,7431\#(4.18)$$

Denklem 4.17 ile elde edilen F değeri ile birim kuvvet çifti yüklemesinden elde edilen düğüm noktası yerdeşiftirmelerinin çarpılması sonucu elde edilen değerler izelge 4.16’da verilmiştir. Bu ordinatlar Y_{BA} değerleri olarak N_{BA} tesir çizgisi hesabında kullanılacaktır.

Çizelge 4.16: Y_{BA} tesir çizgisi hesabında elde edilen yerdeğişirmeler.

Nokta No	$u_3(m)$
1	0,00000
2	0,00132
3	0,00349
4	0,00393
5	0,00028
6	-0,00957
7	-0,02743
8	-0,05473
9	-0,09254
10	-0,14145
11	-0,20158
12	-0,27250
13	-0,35321
14	-0,44206
15	-0,53674
16	-0,63420
17	-0,73062
18	-0,82137
19	-0,90095
20	-0,96294
21	-1,00000
22	-0,01451
23	-0,02321
24	-0,02709
25	-0,02711
26	-0,02422
27	-0,01939
28	-0,01359
29	-0,00778
30	-0,00293
31	0,00000
32	0,00000
33	0,00000
34	0,00000

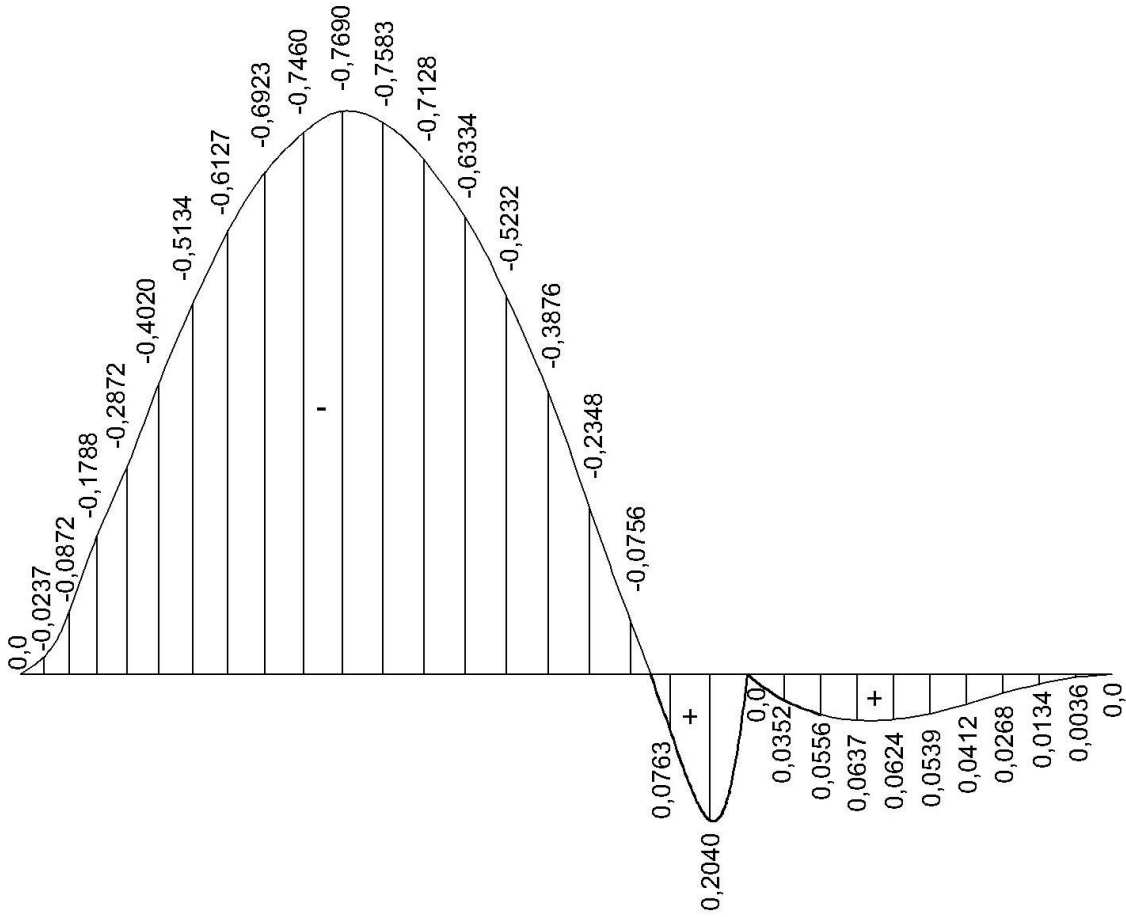
Çizelge 4.17’de verilen, denklem 4.19 ile elde edilen N_{BA} değerleri N_{BA} normal kuvveti tesir çizgisinin ordinatlarına, T_{BA} değerleri de T_{BA} kesme kuvveti tesir çizgisinin ordinatlarına eşittir. N_{BA} ordinatlarının kullanılmasıyla çizilen N_{BA} tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.65’te verilmiştir.

$$N_{BA} = X_{BA} \cdot \cos(\alpha_1) - Y_{BA} \cdot \sin(\alpha_1) \#(4.19)$$

$$T_{BA} = X_{BA} \cdot \sin(\alpha_1) + Y_{BA} \cdot \cos(\alpha_1)$$

Çizelge 4.17: N_{BA} hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

Nokta No	NBA	TBA
1	0,00000	0,00000
2	-0,02372	-0,00574
3	-0,08719	-0,02252
4	-0,17875	-0,04953
5	-0,28722	-0,08589
6	-0,40203	-0,13063
7	-0,51345	-0,18270
8	-0,61274	-0,24100
9	-0,69232	-0,30435
10	-0,74598	-0,37152
11	-0,76898	-0,44120
12	-0,75831	-0,51204
13	-0,71282	-0,58266
14	-0,63340	-0,65159
15	-0,52316	-0,71736
16	-0,38761	-0,77843
17	-0,23482	-0,83325
18	-0,07561	-0,88022
19	0,07627	-0,91773
20	0,20397	-0,94414
21	0,28740	-0,95780
22	0,03524	-0,00457
23	0,05561	-0,00755
24	0,06375	-0,00916
25	0,06230	-0,00961
26	0,05390	-0,00911
27	0,04119	-0,00788
28	0,02681	-0,00615
29	0,01339	-0,00411
30	0,00357	-0,00199
31	0,00000	0,00000
32	0,00000	0,00000
33	0,00000	0,00000
34	0,00000	0,00000



Şekil 4.65: N_{BA} tesir çizgisi diyagramı.

4.4.4 M_m tesir çizgisinin hesabı

Sistem üzerinde m ile gösterilen kesit SAP2000 modelinde 26 numaralı düğüm noktası ile ifade edilmiştir. Bu kesitin eğilme momenti tesir çizgisinin hesaplanması için 26 numaralı düğüm noktası düğüm noktası ayırma işlemi ile ayrılır. Bu işlemden sonra bu kesit üzerinde 26 ve 34 numaralı iki nokta oluşur. 26 numaralı nokta soldaki çubuğa, 34 numaralı nokta sağdaki çubuğa aittir. Bu iki noktaya x ve z eksenindeki yerdeğiştirmeler eşit, y eksenindeki dönmeler serbest olacak şekilde bir kısıtlama atanır. Daha sonra bu iki noktaya y ekseninde birbirine zıt yönde bir birimlik momentler uygulanır ve sistem analizi yapılır. Analiz sonucu 26 ve 34 numaralı noktalarda okunan y eksenindeki dönme değerleri Şekil 4.66 ve Şekil 4.67’de verilmiştir. Bu dönme değerleri, denklem 4.20’de kullanılır ve birim dönme oluşturacak moment değeri hesaplanır.

Joint Displacements			
Joint Object	26	Joint Element	26
	1	2	3
Trans	-2,334E-04	0,	-0,00856
Rotn	0,	0,00239	0,

Şekil 4.66: 26 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

Joint Displacements			
Joint Object	34	Joint Element	34
	1	2	3
Trans	-2,334E-04	0,	-0,00856
Rotn	0,	-0,00228	0,

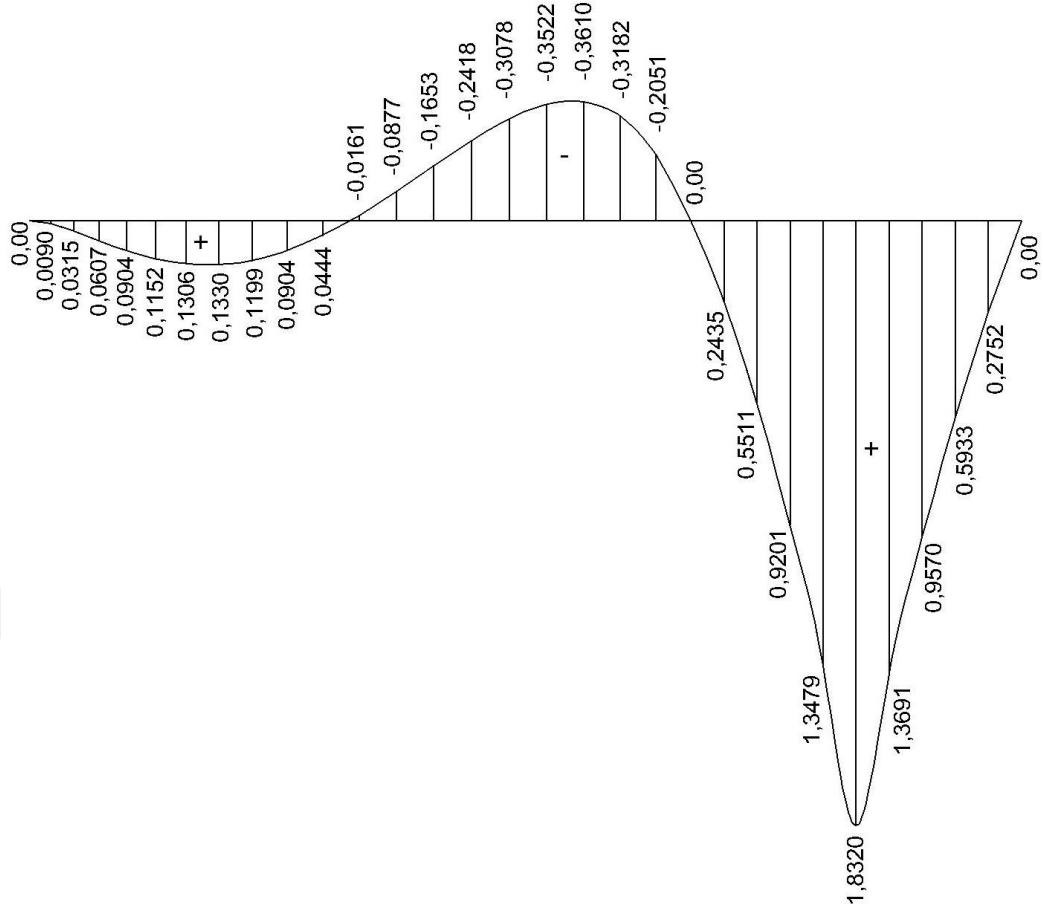
Şekil 4.67: 34 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

$$M = -\frac{1}{0,00239 - (-0,00228)} = -214,1328\#(4.20)$$

Denklem 4.19 ile elde edilen M değeri ile birim moment çifti yüklemesiyle elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.18’de verilmiştir. Bu değerler M_m tesir çizgisi ordinatlarına eşittir. Bu ordinatların kullanılmasıyla çizilen M_m tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.68’de verilmiştir.

Çizelge 4.18: Mm tesir çizgisi hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

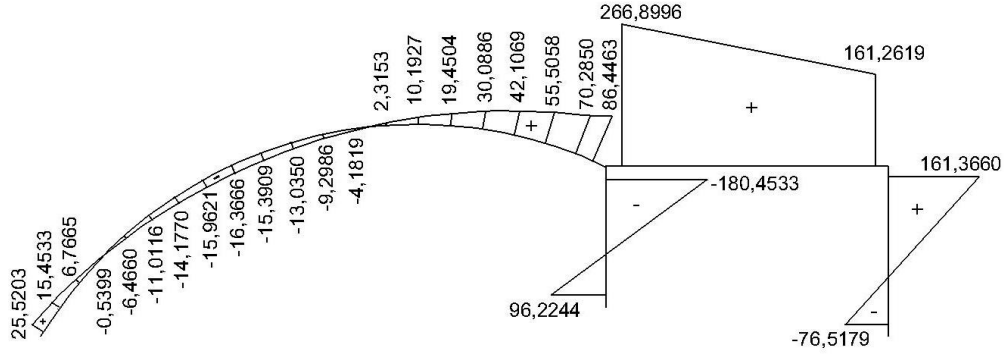
Nokta No	U3(m)
1	0,00000
2	0,00903
3	0,03145
4	0,06054
5	0,09016
6	0,11491
7	0,13027
8	0,13267
9	0,11972
10	0,09016
11	0,04421
12	-0,01632
13	-0,08800
14	-0,16562
15	-0,24200
16	-0,30795
17	-0,35212
18	-0,36081
19	-0,31794
20	-0,20490
21	0,00000
22	0,24333
23	0,55077
24	0,91968
25	1,34740
26	1,83130
27	1,36855
28	0,95669
29	0,59307
30	0,27506
31	0,00000
32	0,00000
33	0,00000
34	1,83130



Şekil 4.68: M_m tesir çizgisi diyagramı.

4.4.5 Plastik dönme tesir çizgisi ϕ_m elde edilmesi

Betti Karşılıklı Teoremi uyarınca kesit dönmeleri söz konusu momentler üzerinde iş yaptığından, Bölüm 4.4.4'te yapılan sistem analizi ile elde edilen M_y moment diyagramı, m kesitine ait plastik dönme tesir çizgisi diyagramını vermektedir. Bölüm 4.4.4'te SAP2000 programında yapılan birim moment çifti yüklemesi sonucu oluşan y eksenini etrafındaki moment değerlerinin, denklem 4.20'de hesaplanan M değeri ile çarpılması sonucu plastik dönme tesir çizgisi ordinatları elde edilmiştir. Bu ordinatların kullanılmasıyla çizilen plastik dönme tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.69'da verilmiştir. Plastik dönme tesir çizgileri literatürdeki bir çalışmada farklı bir yöntemle, birim deplasmanlardan oluşan ankastrelik uç kuvvetleri yüklenerek elde edilmiştir [12].

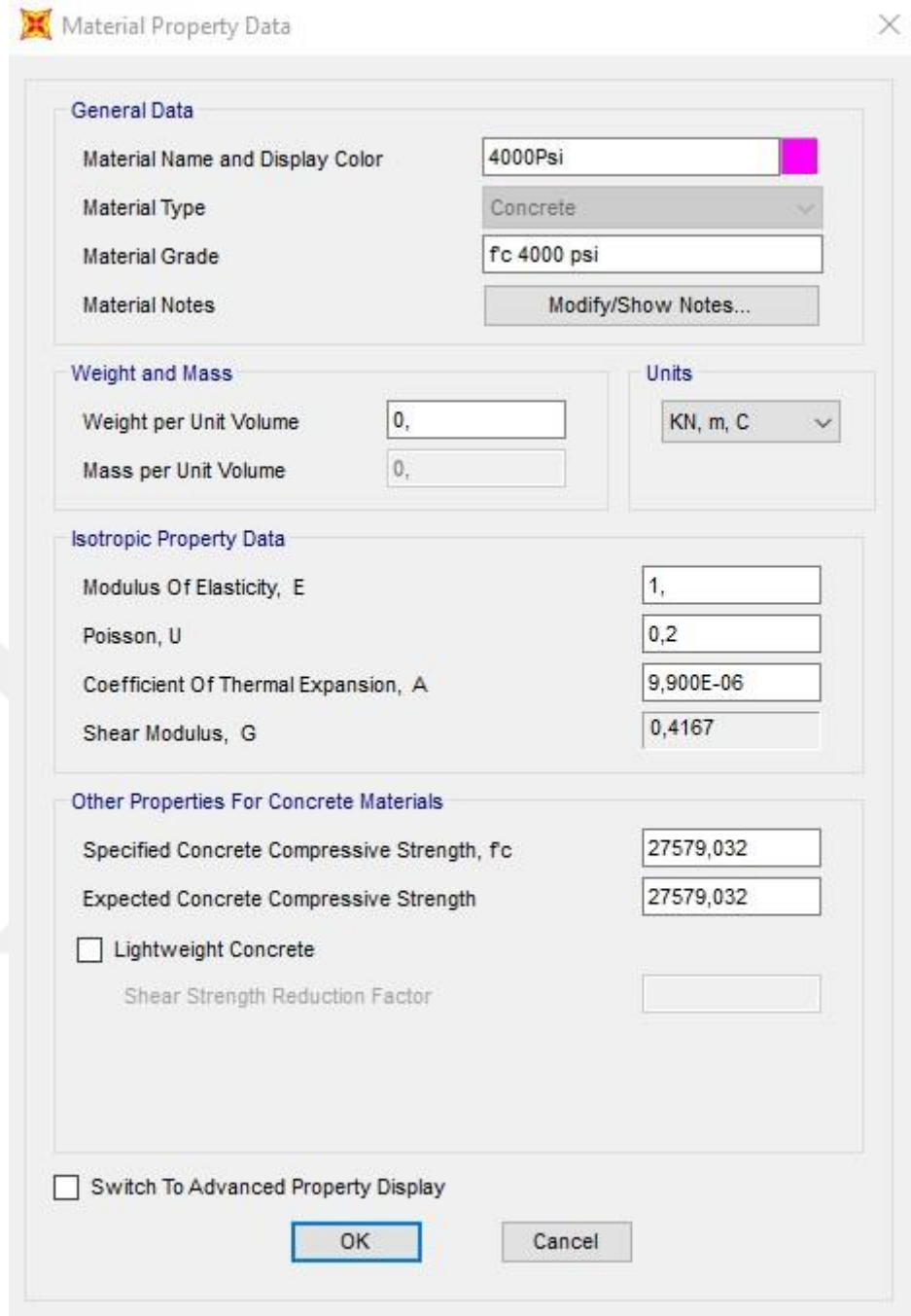


Şekil 4.69: Plastik dönme tesir çizgisi diyagramı.

4.5 Kuvvet Yöntemiyle Çözülen Çerçeve Sistemin Tesir Çizgisinin EMBP'yle Elde Edilmesi

Bölüm 3.3.2'de m noktasındaki eğilme momenti tesir çizgisi kuvvet yöntemi ile hesaplanan hiperstatik çerçeve sistemin söz konusu tesir çizgisi bu bölümde EMBP ile hesaplanmıştır.

Şekil 3.9'da verilen sistem SAP2000 programında modellenirken tanımlanan malzeme özellikleri Şekil 4.70'te gösterilmiştir.



Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: 4000Psi

Material Type: Concrete

Material Grade: f_c 4000 psi

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 0,

Mass per Unit Volume: 0,

Units

KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 1,

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 0,4167

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 27579,032

Expected Concrete Compressive Strength: 27579,032

☐ Lightweight Concrete

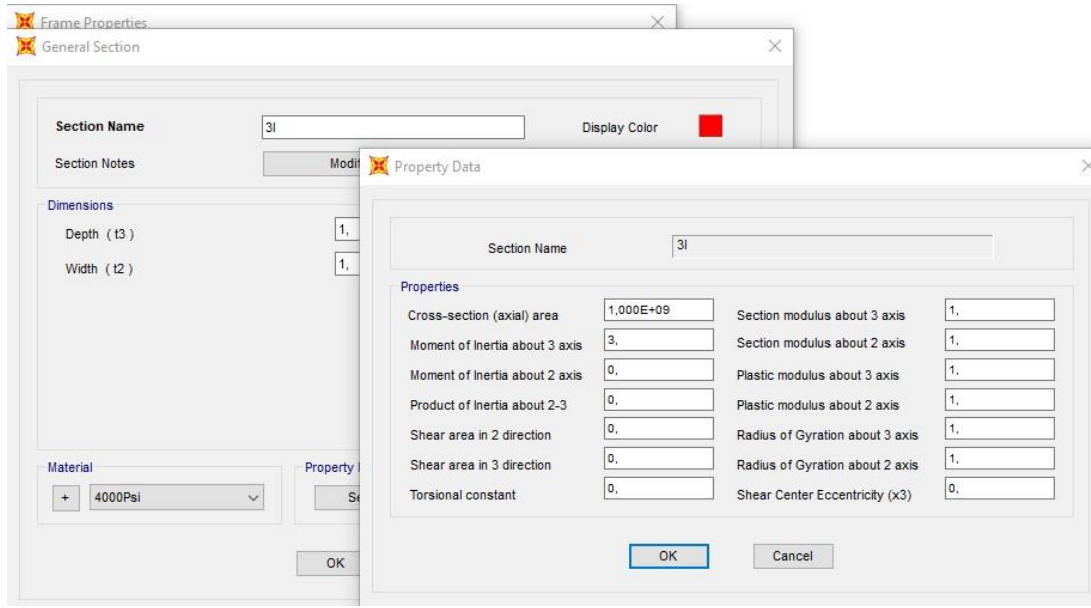
Shear Strength Reduction Factor:

☐ Switch To Advanced Property Display

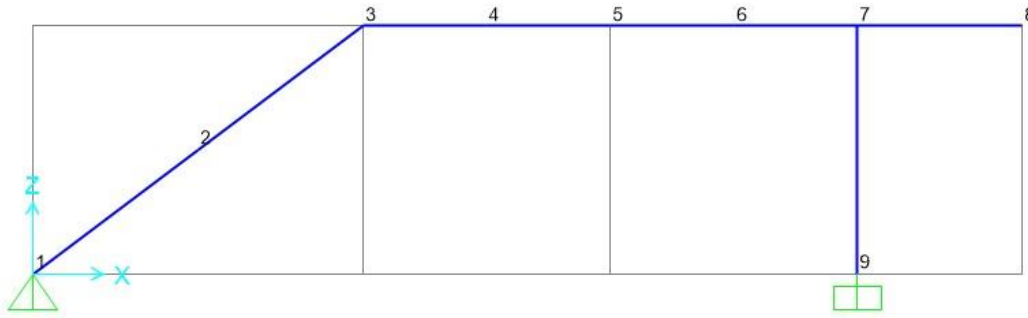
OK Cancel

Şekil 4.70: Malzeme özelliklerinin programa girilmesi.

Atalet momenti 3I olan çubuk elemanın kesit özelliklerinin programa girilmesi Şekil 4.71’de gösterilmiştir. Diğer elemanların kesit özellikleri de buna benzer olarak girilir ve bu kesit özellikleri, oluşturulan çubuk elemanlara atanır. Daha sonra gerekli mesnet koşulları da atanır ve sistem modeli tamamlanır. Oluşturulan sistem modeli Şekil 4.72’de verilmiştir. Çubuk ortalarında görülen düğüm noktaları o kesitlerde oluşacak yerdeğştirmeleri okuyabilmek için oluşturulmuştur.



Şekil 4.71: Kesit özelliklerinin programa girilmesi.



Şekil 4.72: Hiperstatik çerçeve sistem SAP2000 modeli.

Bölüm 3.3.2'deki sistemde m ile gösterilen kesit bu bölümde 5 numaralı nokta ile ifade edilmiştir. 5 numaralı noktadaki eğilme momenti M_5 tesir çizgisini EMBP ile hesaplayabilmek için bu noktayı düğüm noktası ayırma işlemi ile ayırmak gerekir. Düğüm noktası ayırma işleminden sonra bu noktada, söz konusu kesit üzerinde birleşen soldaki çubuğun sağ ucu 5, sağdaki çubuğun sol ucu 10 numaralı olmak üzere iki nokta oluşur. Bu iki noktaya, y eksenindeki dönmeler serbest, x ve z eksenlerindeki yerdeğiştirmeler eşit olacak şekilde bir kısıtlama atanır. Daha sonra bu iki noktaya y ekseninde birbirine zıt yönde birim momentler uygulanır ve sistem analizi yapılır. Analiz sonucu bu iki noktada oluşan dönmeler Şekil 4.73 ve Şekil 4.74'te verilmiştir.

Joint Displacements			
Joint	Object	5	
			Joint Element
			5
	1	2	3
Trans	-0,25574	0,	-3,78197
Rotn	0,	1,89235	0,

Şekil 4.73: 3 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

Joint Displacements			
Joint	Object	10	
			Joint Element
			10
	1	2	3
Trans	-0,25574	0,	-3,78197
Rotn	0,	-1,74262	0,

Şekil 4.74: 7 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

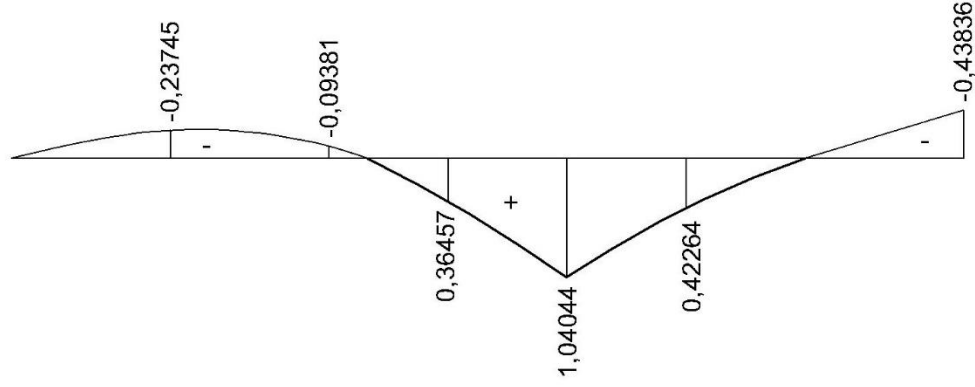
Bu yerdeğiştirmeler denklem 4.21’de kullanılarak birim dönme oluşturacak moment değeri hesaplanır.

$$M = -\frac{1}{1,89235 - (-1,74262)} = -0,275105\#(4.21)$$

Denklem 4.20 ile elde edilen M değeri ile birim moment çifti yüklemeyle elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.19’da verilmiştir. Bu değerler M_5 tesir çizgisi ordinatlarına eşittir. Bu ordinatların kullanılmasıyla çizilen M_5 tesir çizgisi diyagramı Şekil 4.75’te verilmiştir.

Çizelge 4.19: M_5 tesir çizgisi hesabında elde edilen tesir çizgisi ordinatları.

Nokta No	U3(m)
1	0,000000
2	-0,237447
3	-0,093806
4	0,364571
5	1,040438
6	0,422636
7	0,000000
8	-0,438364
9	0,000000
10	1,040438

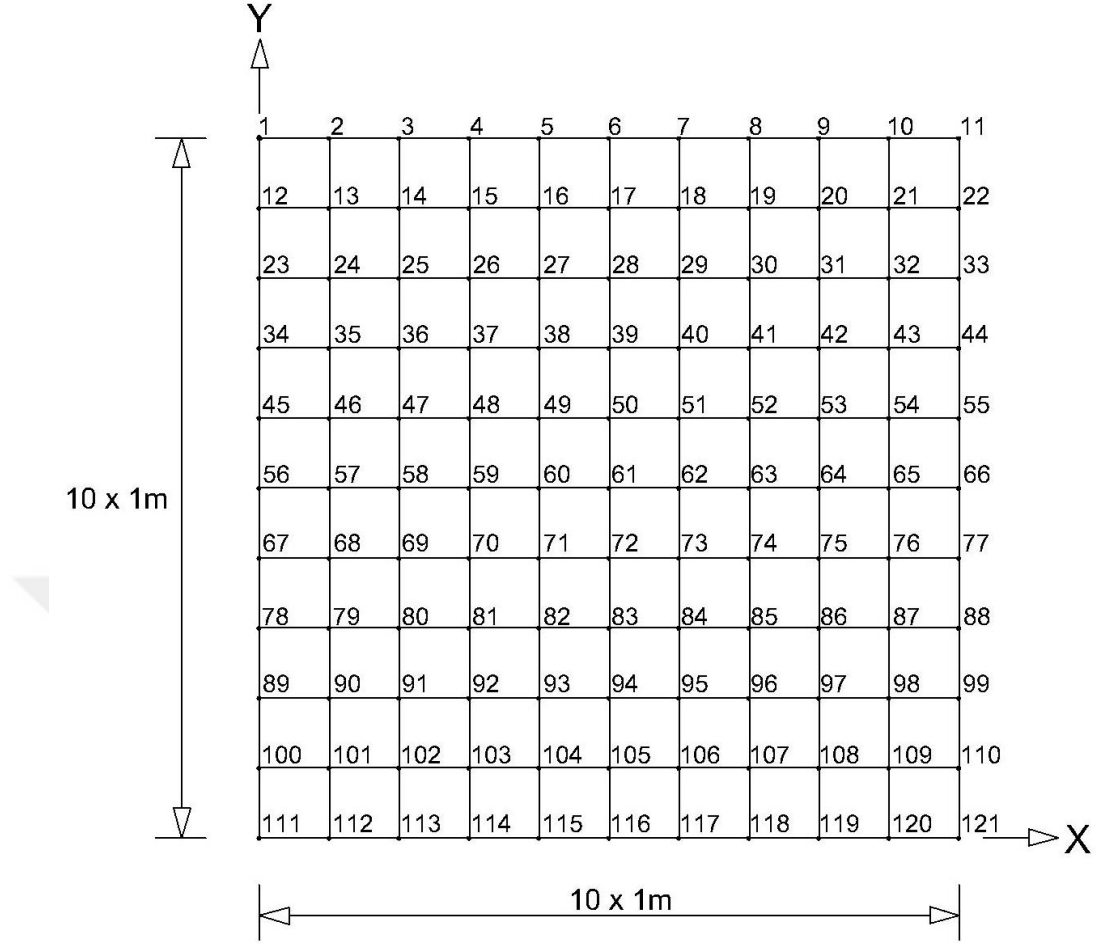


Şekil 4.75: M_5 tesir çizgisi diyagramı.

4.6 Kare Geometrisine Sahip Izgara Sistemde Burulma Momenti Tesir Çizgisinin Elde Edilmesi

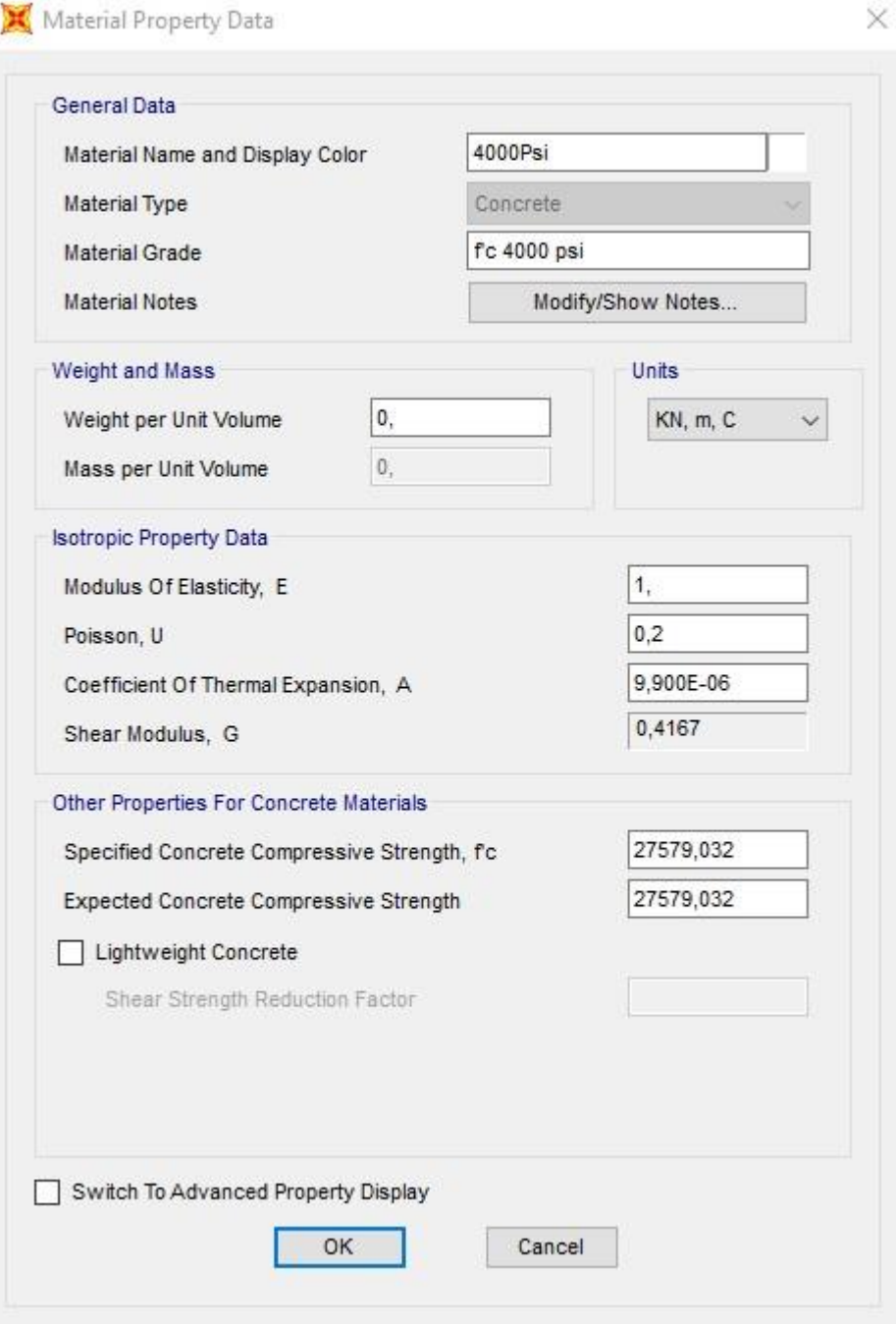
Çubuk elemanlardan oluşan kare ızgara sistem örneğinde herhangi bir çubuk eleman üzerindeki burulma momenti tesir çizgisi araştırılmıştır. EMBP ile çubuk sistemlerin burulma momenti tesir çizgisini hesaplamak yine oldukça pratik bir yöntemdir. EMBP ile burulma momenti tesir çizgisi hesabında burulma momenti araştırılan kesit üzerinde kesim yapılır ve söz konusu kesit üzerinde burulmaya neden olacak doğrultuda birim moment çifti uygulanır. Örneğin eksen x doğrultusundaki bir çubuk elemanın burulma momenti tesir çizgisi araştırılırken bu çubuğun herhangi bir ucuna ve sistemde o uç ile birleşen diğer eleman ucuna x doğrultusu üzerinde dönme hareketi serbestliği verilir ve x eksen doğrultusunda birim dönme oluşturacak moment çifti zıt yönlü olarak uygulanır. Analiz sonucu elde edilen z eksenindeki yerdeğiştirmeler araştırılan tesir çizgisi ordinatlarını verir.

Şekil 4.76’da verilen özdeş çubuk elemanlardan oluşan kare geometrisine sahip ızgara sisteminde 61 ve 62 numaralı düğüm noktalarına sahip çubuğun 61 numaralı düğüm noktasında burulma momenti tesir çizgisi EMBP ile hesaplanmıştır.



Şekil 4.76: Çubuk elemanlardan oluşan kare ızgara sistem.

Çubuk elemanlardan oluşan kare ızgara sistemi SAP2000 programında modellerken programın aks tanımlayarak modelleme özelliğinden yararlanılmıştır. X ve Y düzleminde gerekli koordinat bilgileri programa girilir ve açılan pencerede koordinat eksenleri üzerinde çubuk elemanlar çizilir. Çubuk elemanların malzeme özellikleri Şekil 4.77’de gösterildiği gibi programa girilir. Çubuk elemanların kesit özelliklerinin tanımlanması Şekil 4.78’de verilmiştir. Tanımlanan bu kesit özellikleri bütün çubuklara atanır. Kare ızgara sistemin dış kenarlarında bulunan bütün düğüm noktalarında ankastre mesnet şartı bulunmaktadır. Bu mesnet şartı ilgili noktalara atanır. Yapılan işlemler sonucu oluşan sistem modeli Şekil 4.79’da verilmiştir.

The image shows a software dialog box titled "Material Property Data". It contains several sections for inputting material properties. The "General Data" section includes fields for "Material Name and Display Color" (4000Psi), "Material Type" (Concrete), "Material Grade" (f'c 4000 psi), and a "Material Notes" button labeled "Modify/Show Notes...". The "Weight and Mass" section has fields for "Weight per Unit Volume" and "Mass per Unit Volume", both with a "0," prefix. A "Units" dropdown menu is set to "KN, m, C". The "Isotropic Property Data" section includes fields for "Modulus Of Elasticity, E" (1,), "Poisson, U" (0,2), "Coefficient Of Thermal Expansion, A" (9,900E-06), and "Shear Modulus, G" (0,4167). The "Other Properties For Concrete Materials" section has fields for "Specified Concrete Compressive Strength, f'c" and "Expected Concrete Compressive Strength", both with the value 27579,032. There is a checkbox for "Lightweight Concrete" and a field for "Shear Strength Reduction Factor". At the bottom, there is a checkbox for "Switch To Advanced Property Display" and "OK" and "Cancel" buttons.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: 4000Psi

Material Type: Concrete

Material Grade: f'c 4000 psi

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 0,

Mass per Unit Volume: 0,

Units

KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 1,

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 0,4167

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 27579,032

Expected Concrete Compressive Strength: 27579,032

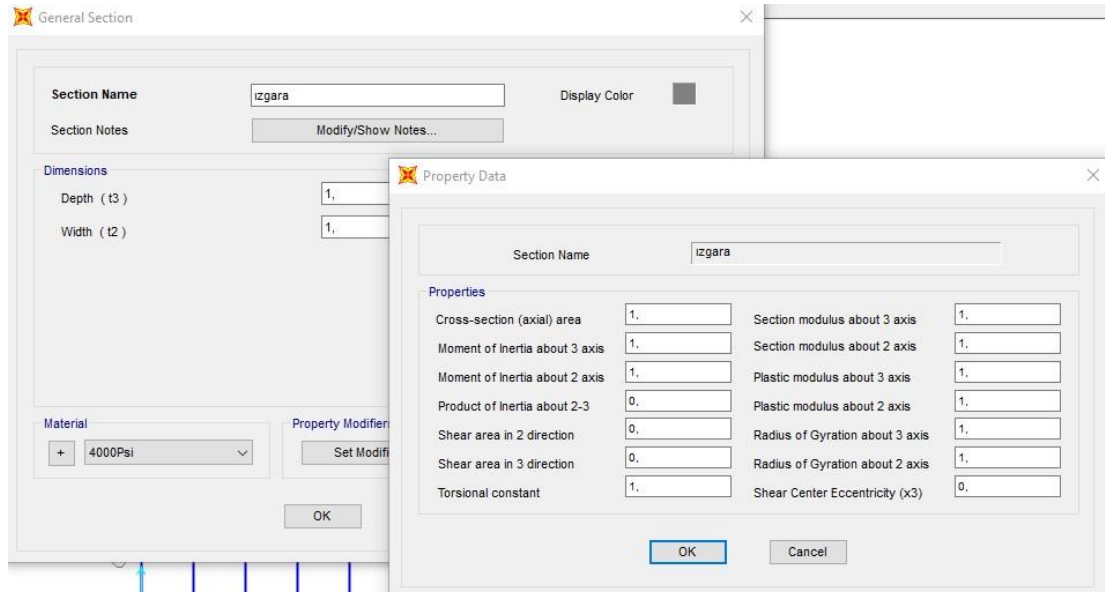
☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

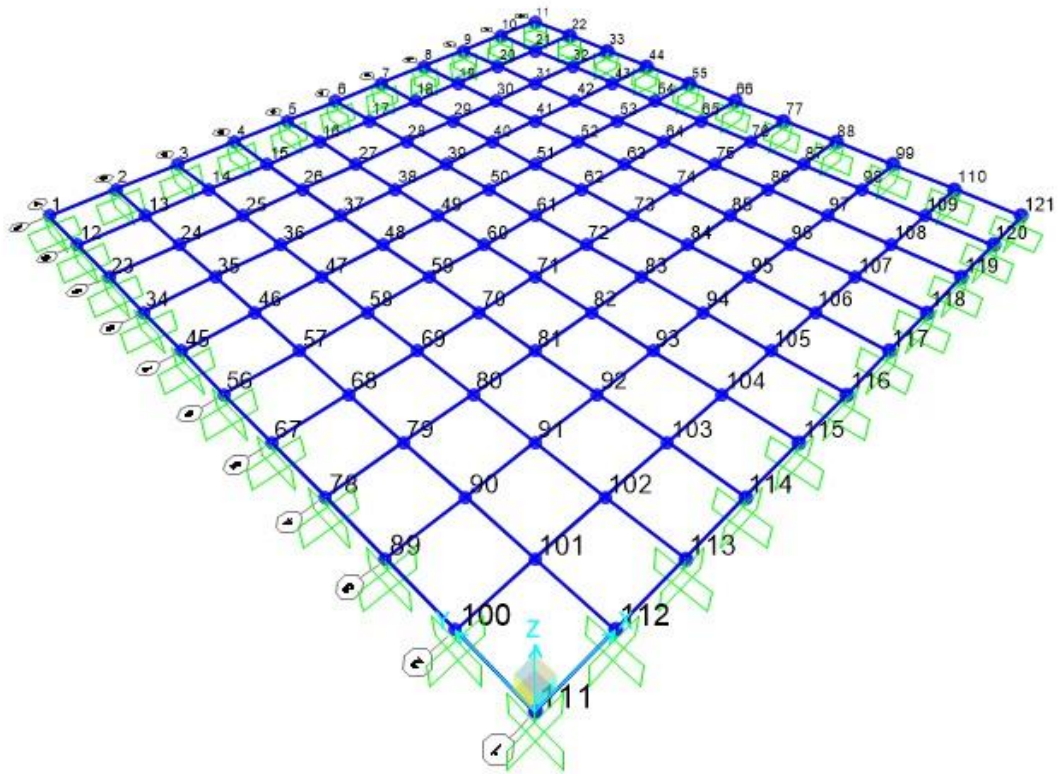
☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Şekil 4.77: Kare ızgara sistem malzeme özellikleri.



Şekil 4.78: Kare ızgara sistem çubuk kesit özellikleri.

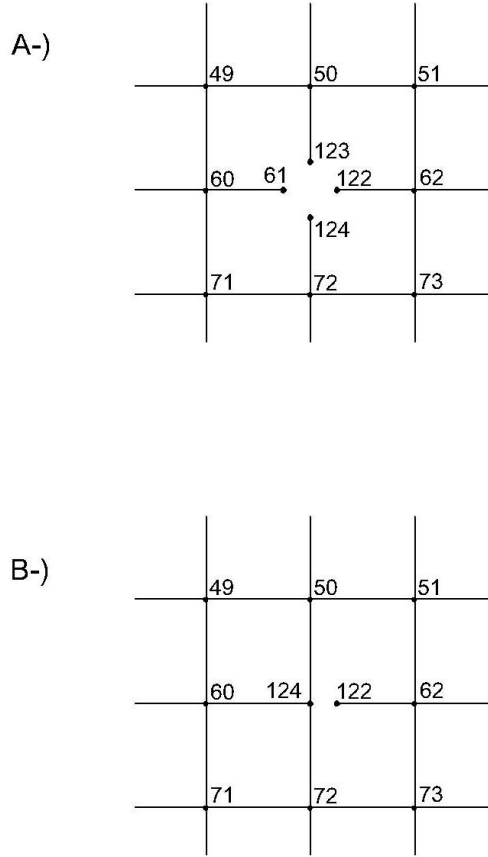


Şekil 4.79: Kare ızgara sistem SAP2000 modeli.

M_{61} tesir çizgisinin hesaplanması:

M_{61} tesir çizgisi, 61 noktasının sağındaki yani i ucu 61, j ucu 62 numaralı düğüm noktası olan çubuğun burulma momentini ifade etmektedir. M_{61} tesir çizgisini EMBP ile hesaplayabilmek için 61 numaralı düğüm noktası, düğüm noktası ayırma işlemi

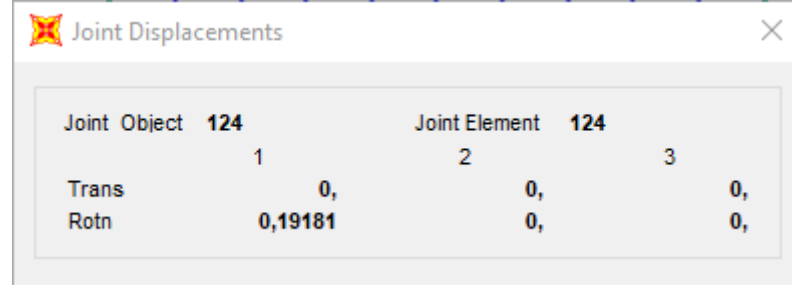
ile ayrılır. Bu ayırma işleminden sonra söz konusu kesitte artık 61, 122, 123, 124 numaralı dört nokta bulunmaktadır. Bu noktalar Şekil 4.80’de A durumunda gösterildiği gibi o noktada birleşen 4 çubuğa aittir. Burulma momenti araştırılan kesit sağdaki çubuğa ait olduğundan o çubuğun sol ucundaki 122 numaralı nokta hariç aynı konumdaki diğer üç nokta düğüm noktası birleştirme işlemi ile birleştirilir. Birleştirme işleminden sonra oluşan düğüm noktaları Şekil 4.80’de B durumunda verilmiştir.



Şekil 4.81: Düğüm noktası ayırma ve birleştirme işlemleri sonrası düğüm noktaları.

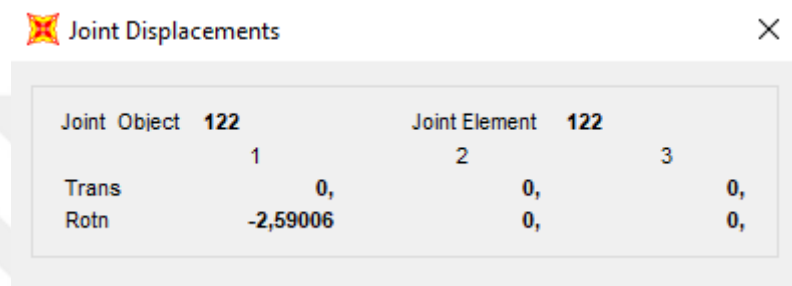
Başlandıda 61 numaralı düğüm noktasının bulunduğu kesitte artık solda 124 sağda 122 numaralı noktalar bulunmaktadır. Bu iki noktaya atanmak üzere x eksenini üzerindeki dönme hareketi serbest, kalan bütün yerdeğiştirme ve dönmeleri eşit olacak şekilde bir kısıtlama tanımlanır. Ardından bu iki noktaya x eksenini üzerinde birbirine zıt yönlerde birim momentler uygulanır ve sistem analizi yapılır. Analiz sonucu bu iki noktada oluşan yerdeğiştirmeler Şekil 4.81 ve Şekil 4.82’de verilmiştir.

X eksenindeki dönme değerleri denklem 4.22’de kullanılır ve birim dönme oluşturan moment değeri bulunur.



Joint Object		Joint Element		
124		1	2	3
Trans	0,	0,	0,	0,
Rotn	0,19181	0,	0,	0,

Şekil 4.81: 124 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.



Joint Object		Joint Element		
122		1	2	3
Trans	0,	0,	0,	0,
Rotn	-2,59006	0,	0,	0,

Şekil 4.82: 122 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

$$M = -\frac{1}{-2,59006 - (0,19181)} = 0,35947\#(4.22)$$

Denklem 4.21 ile hesaplanan M değeri ile birim moment çifti yükleme sonucu elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.20’de verilmiştir. Bu değerler burulma momenti tesir çizgisi ordinatlarına eşittir.

Çizelge 4.20: Kare ızgara sistemde burulma momenti tesir çizgisi ordinatları.

Nokta No	U3(m)	Nokta No	U3(m)	Nokta No	U3(m)
1	0,000000	42	-0,008737	84	0,006000
2	0,000000	43	-0,002843	85	0,012377
3	0,000000	44	0,000000	86	0,008737
4	0,000000	45	0,000000	87	0,002843
5	0,000000	46	0,001042	88	0,000000
6	0,000000	47	0,003938	89	0,000000
7	0,000000	48	0,008950	90	-0,001244
8	0,000000	49	0,016039	91	-0,004130
9	0,000000	50	0,014568	92	-0,006931
10	0,000000	51	-0,014011	93	-0,006952
11	0,000000	52	-0,015149	94	-0,002986
12	0,000000	53	-0,007503	95	0,002360
13	0,000453	54	-0,002098	96	0,005925
14	0,001442	55	0,000000	97	0,005234
15	0,002189	56	0,000000	98	0,001967
16	0,001975	57	0,000000	99	0,000000
17	0,000835	58	0,000000	100	0,000000
18	-0,000610	59	0,000000	101	-0,000453
19	-0,001592	60	0,000000	102	-0,001442
20	-0,001542	62	0,000000	103	-0,002189
21	-0,000621	63	0,000000	104	-0,001975
22	0,000000	64	0,000000	105	-0,000835
23	0,000000	65	0,000000	106	0,000610
24	0,001244	66	0,000000	107	0,001592
25	0,004130	67	0,000000	108	0,001542
26	0,006931	68	-0,001042	109	0,000621
27	0,006952	69	-0,003938	110	0,000000
28	0,002986	70	-0,008950	111	0,000000
29	-0,002360	71	-0,016039	112	0,000000
30	-0,005925	72	-0,014568	113	0,000000
31	-0,005234	73	0,014011	114	0,000000
32	-0,001967	74	0,015149	115	0,000000
33	0,000000	75	0,007503	116	0,000000
34	0,000000	76	0,002098	117	0,000000
35	0,001548	77	0,000000	118	0,000000
36	0,005535	78	0,000000	119	0,000000
37	0,010845	79	-0,001548	120	0,000000
38	0,013668	80	-0,005535	121	0,000000
39	0,006801	81	-0,010845	122	0,000000

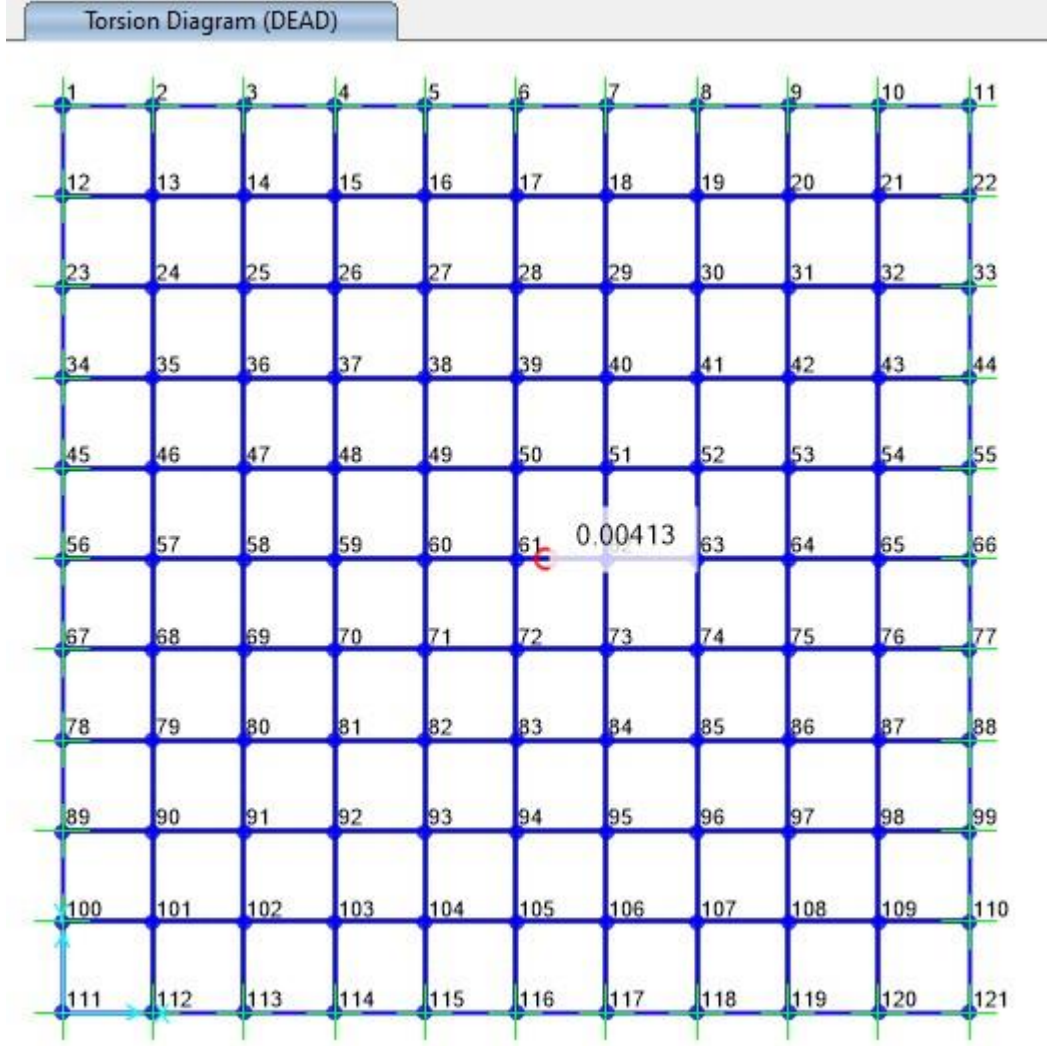
40	-0,006000	82	-0,013668	124	0,000000
41	-0,012377	83	-0,006801		

Elde edilen tesir çizgisi ordinatlarını karşılaştırmak amacıyla sistem üzerinde rastgele seçilen noktalara tek tek birim yüklemeler yapılmış ve 61 numaralı noktada burulma momenti değeri okunmuştur. Yükleme yapılan bu noktalar ve elde edilen burulma momentleri Çizelge 4.21’de verimiştir. Örnek olarak 25 numaralı düğüm noktasına yapılan yükleme sonrası 61 ve 62 numaralı uç noktalarına sahip çubuğun 61 numaralı ucunda okunan burulma momenti değeri Şekil 4.83’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.21: Kare ızgara sistemde rastgele seçilen noktalara yapılan yüklemeler sonucu oluşan burulma momentleri.

Nokta No	61 Noktasındaki Burulma Momenti(kNm)
17	0,000835
25	0,004130
35	0,015480
38	0,013668
51	-0,014011
70	-0,008950
92	-0,006931
109	0,000621

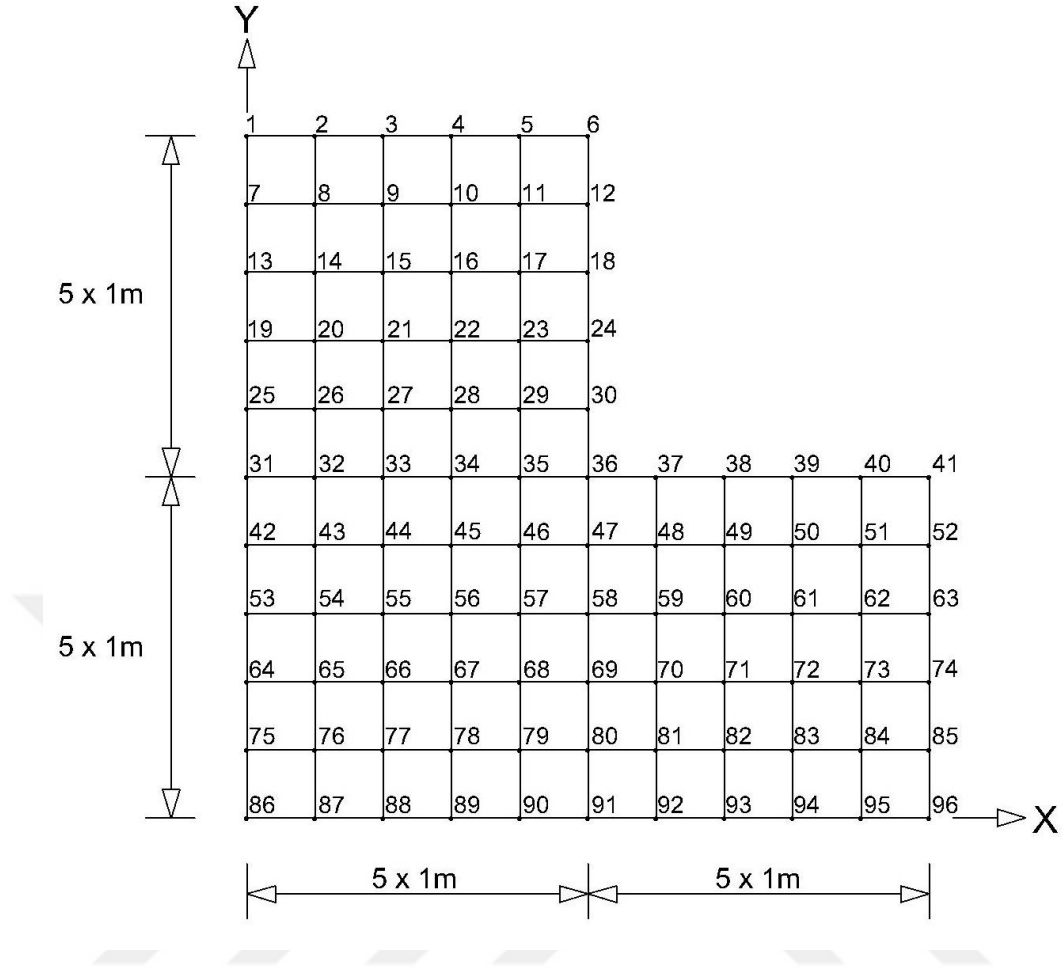
Çizelge 4.21’den de görüldüğü gibi EMBP ile elde edilen tesir çizgisi ordinatları birim yüklemeden elde edilen ordinatlara eşittir.



Şekil 4.83: 25 numaralı dğüm noktasına uygulanan birim yükleme sonucu oluşan burulma momenti.

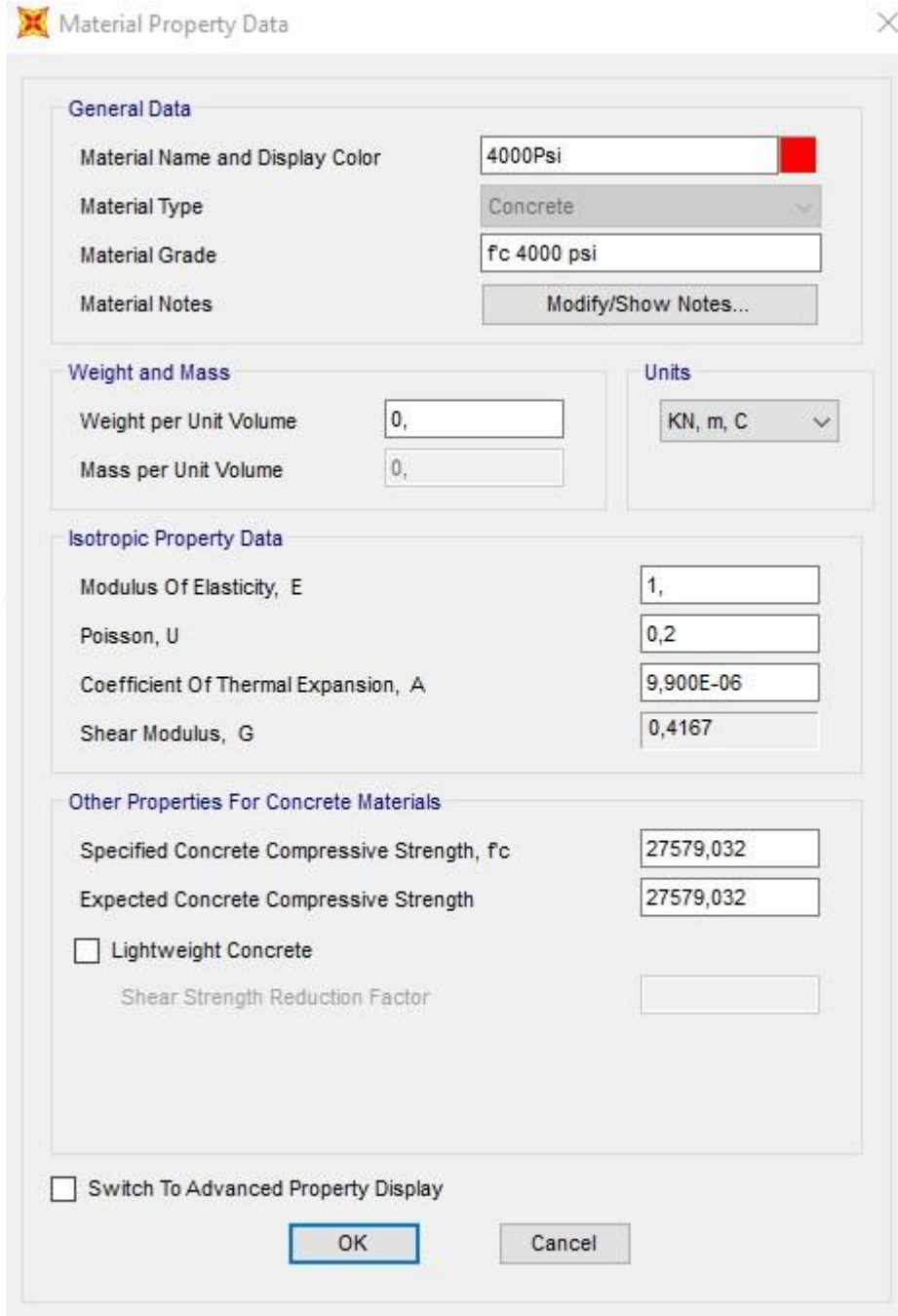
4.7 L Şeklinde ızgara Sistemde Burulma Momenti Tesir Çizgisinin Elde Edilmesi

Şekil 4.84’te verilen, çubuk elemanlardan oluşan L şeklinde ızgara sistemin herhangi bir noktasındaki burulma momenti tesir çizgisi yine EMBP ile bulunabilir. Uç noktaları 56 ve 57 numaralı noktalar olan çubuk elemanın burulma momenti tesir çizgisi 56 numaralı noktada araştırılmıştır.



Şekil 4.84: Çubuk elemanlardan oluşan L şeklinde ızgara sistem.

Sistem modeli SAP2000 programında oluşturulurken kullanılan malzeme özellikleri Şekil 4.85'te, çubuk elemanların kesit özellikleri de Şekil 4.86'da verilmiştir.

 Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: 4000Psi 

Material Type: Concrete

Material Grade: f'c 4000 psi

Material Notes: [Modify/Show Notes...](#)

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 0,

Mass per Unit Volume: 0,

Units

KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 1,

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 0,4167

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 27579,032

Expected Concrete Compressive Strength: 27579,032

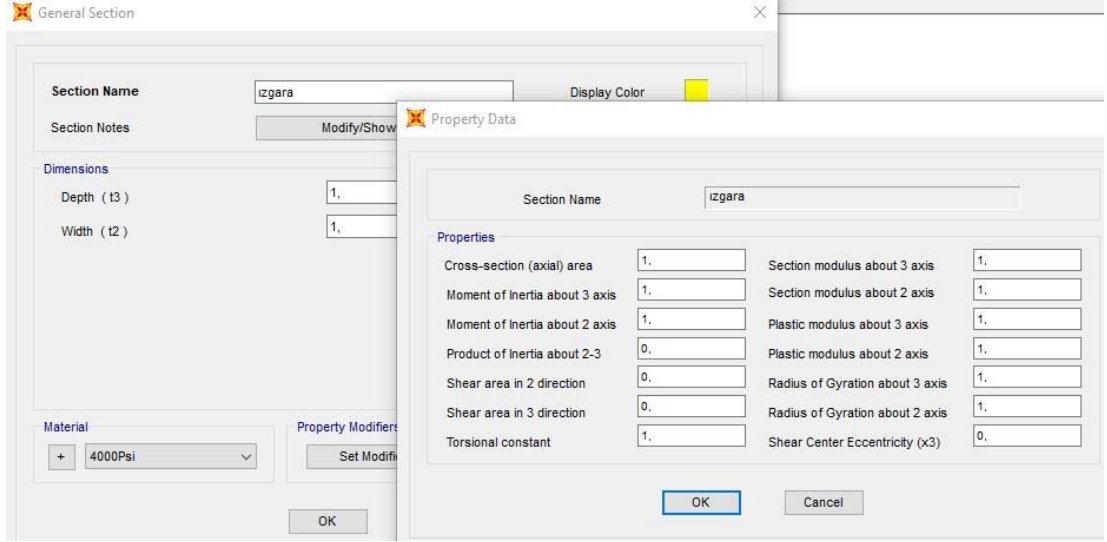
☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

☐ Switch To Advanced Property Display

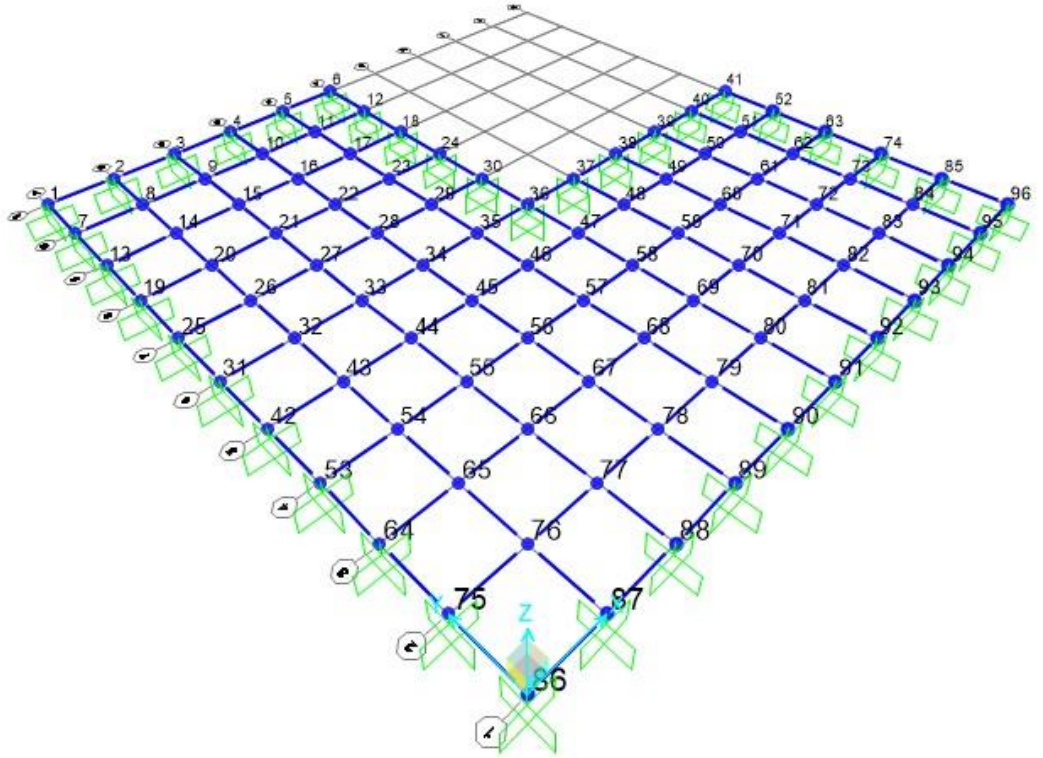
[OK](#) [Cancel](#)

Şekil 4.85: L şeklinde ızgara sistem malzeme özellikleri.



Şekil 4.86: L şeklinde ızgara sistem çubuk elemanlarının kesit özellikleri.

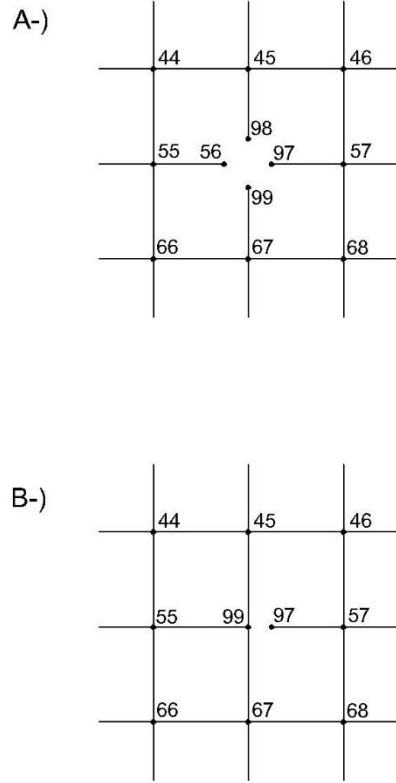
Bütün kenar noktalarından ankastre mesnetli olarak tanımlanan sistem modeli Şekil 4.87’de verilmiştir.



Şekil 4.87: L şeklinde ızgara sistem SAP2000 modeli.

56 numaralı düğüm noktası, düğüm noktası ayırma işlemi ile ayrılır. Artık 56 numaralı düğüm noktasının olduğu konumda 56, 97, 98, 99 numaralı 4 düğüm noktası bulunmaktadır. Düğüm noktası ayırma işleminden sonra elde edilen

noktaların hangi çubuklara ait oldukları Şekil 4.88’de A durumu ile gösterilmiştir. Burulma momenti araştırılan kesit sağdaki çubuğa ait olduğundan o çubuğun sol ucundaki 97 numaralı nokta hariç aynı konumdaki diğer üç nokta düğüm noktası birleştirme işlemi ile birleştirilir. Birleştirme işleminden sonra oluşan düğüm noktaları Şekil 4.88’de B durumunda verilmiştir.



Şekil 4.89: Düğüm noktası ayırma ve birleştirme işlemi sonrası düğüm noktaları.

99 ve 97 numaralı düğüm noktalarına x eksenini üzerindeki dönme hareketi serbest, kalan bütün yerdeğiştirme ve dönmeleri eşit olacak şekilde bir kısıtlama tanımlanır. Ardından bu iki noktaya x eksenini üzerinde birbirine zıt yönlerde birim momentler uygulanır ve sistem analizi yapılır. Analiz sonucu bu iki noktada oluşan yerdeğiştirmeler Şekil 4.89 ve Şekil 4.90’da verilmiştir. Bu yerdeğiştirmelerden x eksenindeki dönme değerleri denklem 4.22’de kullanılır ve birim dönme oluşturan moment değeri bulunur.

Joint Displacements			
Joint Object	99	Joint Element	99
	1	2	3
Trans	0,	0,	0,01502
Rotn	0,19128	-0,00512	0,

Şekil 4.89: 99 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

Joint Displacements			
Joint Object	97	Joint Element	97
	1	2	3
Trans	0,	0,	0,01502
Rotn	-2,57785	-0,00512	0,

Şekil 4.90: 97 numaralı düğüm noktası yerdeğiştirmeleri.

$$M = -\frac{1}{-2,57785 - (0,19128)} = 0,361124\#(4.22)$$

Denklem 4.22 ile hesaplanan M değeri ile birim moment çifti yüklemesi sonucu elde edilen düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin çarpılmasıyla elde edilen değerler Çizelge 4.22’de verilmiştir. Bu değerler M_{56} burulma momenti tesir çizgisi ordinatlarına eşittir.

Çizelge 4.22: L şeklinde ızgara sistemde burulma momenti tesir çizgisi ordinatları.

Nokta No	U3(m)	Nokta No	U3(m)	Nokta No	U3(m)
1	0,000000	43	0,005023	86	0,000000
2	0,000000	44	0,016100	87	0,000000
3	0,000000	45	0,019674	88	0,000000
4	0,000000	46	-0,004131	89	0,000000
5	0,000000	47	-0,003110	90	0,000000
6	0,000000	48	0,000956	91	0,000000
7	0,000000	49	0,001028	92	0,000000
8	-0,000033	50	0,000352	93	0,000000
9	-0,000054	51	0,000043	94	0,000000
10	-0,000048	52	0,000000	95	0,000000
11	-0,000027	53	0,000000	96	0,000000
12	0,000000	54	0,001048	97	0,005424
13	0,000000	55	0,003248	99	0,005424
14	0,000064	57	0,006772		
15	0,000235	58	0,006523		
16	0,000272	59	0,004673		
17	0,000101	60	0,002305		
18	0,000000	61	0,000697		
19	0,000000	62	0,000081		
20	0,000705	63	0,000000		
21	0,001691	64	0,000000		
22	0,001751	65	-0,002659		
23	0,000779	66	-0,009407		
24	0,000000	67	-0,009493		
25	0,000000	68	0,016309		
26	0,002442	69	0,015157		
27	0,005412	70	0,006968		
28	0,005060	71	0,002382		
29	0,002367	72	0,000540		
30	0,000000	73	0,000032		
31	0,000000	74	0,000000		
32	0,004893	75	0,000000		
33	0,011978	76	-0,001908		
34	0,010566	77	-0,004847		
35	0,003049	78	-0,002299		
36	0,000000	79	0,004356		
37	0,000000	80	0,006720		
38	0,000000	81	0,003627		
39	0,000000	82	0,001073		
40	0,000000	83	0,000155		
41	0,000000	84	-0,000014		

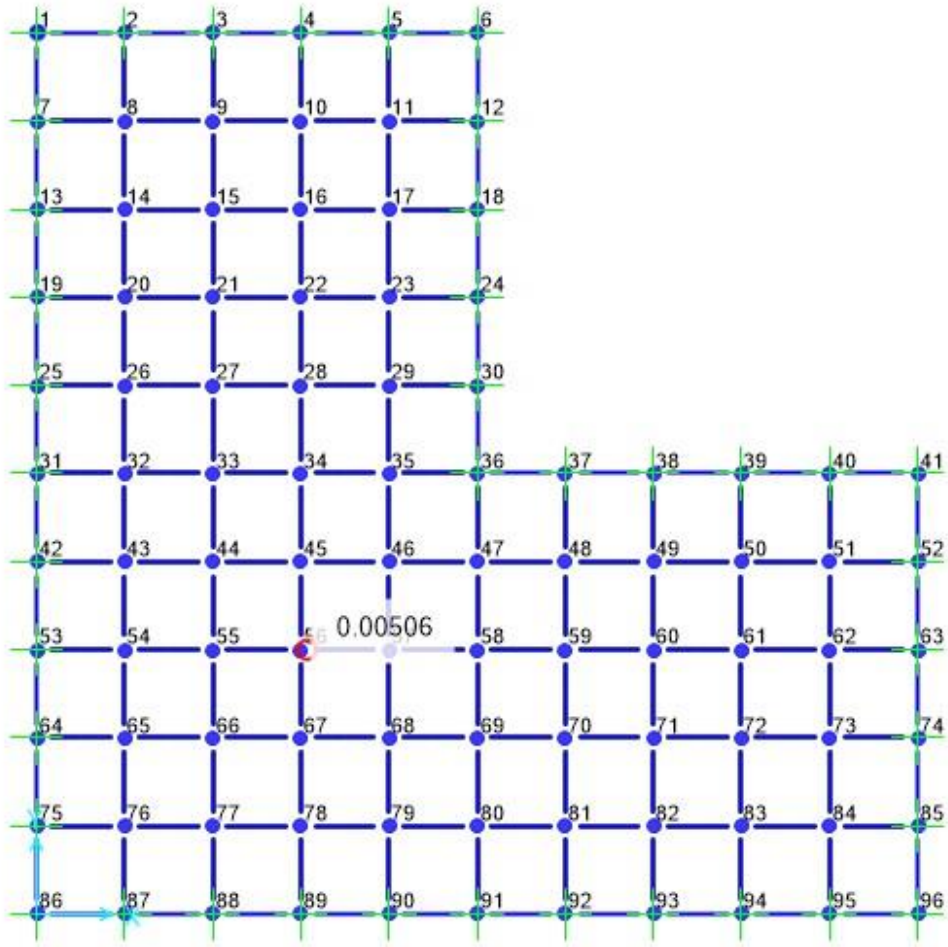
42	0,000000	85	0,000000
----	----------	----	----------

Elde edilen tesir çizgisi ordinatlarını karşılaştırmak amacıyla sistem üzerinde rastgele seçilen noktalara tek tek birim yüklemeler yapılmış ve 56 numaralı noktada burulma momenti değeri okunmuştur. Yükleme yapılan bu noktalar ve elde edilen burulma momentleri Çizelge 4.23'te verimiştir. Örnek olarak 28 numaralı düğüm noktasına yapılan yükleme sonrası 56 ve 57 numaralı uç noktalarına sahip çubuğun 56 numaralı ucunda okunan burulma momenti değeri Şekil 4.91'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.23: L şeklinde ızgara sistemde rastgele seçilen noktalara yapılan yüklemeler sonucu oluşan burulma momentleri.

Nokta No	56 Noktasındaki Burulma Momenti(kNm)
8	-0,000033
15	0,000235
23	0,000779
28	0,005060
47	-0,003110
57	0,006771
73	0,000032
80	0,006720

Çizelge 4.23'ten de görüldüğü gibi EMBP ile elde edilen tesir çizgisi ordinatları birim yüklemeden elde edilen ordinatlara eşittir.



Şekil 4.91: 28 numaralı düğüm noktasına uygulanan birim yükleme sonucu oluşan burulma momenti.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında çeşitli yapı sistemlerinin kesit zoru, mesnet tepkisi ve plastik dönme tesir çizgileri, EMBP'yle bir yapı analiz programı olan SAP2000 kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen tesir çizgileri gerek diğer çalışmalarla gerekse SAP2000 programında rastgele kesitlere birim kuvvet uygulayarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, önerilen yöntemle elde edilen tesir çizgilerinin doğruluğunu göstermiştir. Çalışmadaki sayısal örnekler EMBP'nin birçok yapı sisteminde kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Müller-Breslau Prensibi'nin tesir çizgilerinin hesabında çok kullanışlı bir yöntem olması, yapı analiz programlarının da sistem analizi için hızlı bir araç olması, tesir çizgilerinin bulunmasında EMBP'yi etkin ve hızlı bir yöntem haline getirmiştir.

Önerilen yöntemle elde edilen, yapı üzerindeki potansiyel plastik mafsallara ait dönme tesir çizgileri ordinatları bir veri tabanında toplanırsa, söz konusu veri tabanı sistemin doğrusal olmayan analizinde veya yapı sağlığı izleme algoritması içinde kullanılabilir.

Yöntem ayrıca, plakaların, ızgara çubuk sistem olarak idealleştirilmesi ve uygun dönüşümlerin yapılması durumunda plakaların tesir çizgisi ordinatlarının elde edilmesinde de kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Ghali, A., and Neville, A. M.** (1978). *Structural Analysis*, Chapman and Hall London, U.K.
- [2] **Cifuentes, A. and Paz, M.** (1991). A note on the determination of influence lines and surfaces using finite elements, *Finite Elements in Analysis and Design*, 7, 299-305.
- [3] **Belegundu, A. D.** (1988). The adjoint method for determining influence lines, *Computers and Structures*, 29(2), 345-350.
- [4] **Memari, A. M., West, H. H.** (1991). Computations of bridge design forces from influence surfaces, *Computers and Structures*, 38 (5/6), 547-556.
- [5] **Orakdöğen, E. and Girgin, K.** (2005). Direct determination of influence lines and surfaces by F.E.M., *Structural Engineering and Mechanics*, 20(3), 279-292.
- [6] **Jepsen, M. S., Damkilde, L.** (2016). A direct and fully general implementation of influence lines/surfaces in finite element software, *Advances in Engineering Software*, 120, 55-6.
- [7] **Yang, D., Chen G., Du. Z.** (2015). Direct kinematic method for exactly constructing influence lines of forces of statically indeterminate structures, *Structural Engineering and Mechanics*, 54(4), 793-807.
- [8] **Girgin, K., Aksoylu, M.G., Durgun Y., Darılmaz K.** (2017) *Yapı Statiği - İzostatik Sistemler* İstanbul, Türkiye.
- [9] **Orakdöğen, E.** Yapı Statiği-2 ders notu, İTÜ İnşaat Fakültesi. İstanbul, Türkiye.
- [10] **SAP 2000 V21.** Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc.
- [11] **Özer, E. ve Orakdöğen, E.** (2009). İleri yapı statik ders notları, İTÜ İnşaat Fakültesi. İstanbul, Türkiye.
- [12] **Orakdöğen, E.** (2002). A Matrix Displacement Formulation for Minimum Weight Design of Frames, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 14(4), 473-489.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Turgay TAHTACI
Doğum Tarihi ve Yeri :
E-posta :

VESİKALIK
FOTO

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği