

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI BASINÇ KUVVETLERİNİN ETKİSİNDEKİ KISA HEA-
KESİTLİ ÇELİK KİRİŞ-KOLONLARIN GÜÇLÜ VE ZAYIF EKSENDE
PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNİN HESAPLANMASI**

NEZAHAT BİLEN DEMİRCİ

KOCAELİ 2021

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI BASINÇ KUVVETLERİNİN ETKİSİNDEKİ KISA HEA-
KESİTLİ ÇELİK KİRİŞ-KOLONLARIN GÜÇLÜ VE ZAYIF EKSENDE
PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNİN HESAPLANMASI**

NEZAHAT BİLEN DEMİRCİ

Doç. Dr. Fuad OKAY
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Seval PINARBAŞI
ÇUHADAROĞLU

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğretim Üyesi Melis GÖKOVA

Jüri Üyesi, Süleyman Demirel Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında çelik yapılarda taşıyıcı eleman olarak sıklıkla tercih edilen kalın başlıklı HEA profillerin hem güçlü hem de zayıf yönleri için eksenel yükün plastik momente etkisi araştırılmıştır. Kesitin malzeme kalitesinden bağımsız olarak gerilmenin alanla ilişkisi göz önüne alınmış ve kesit alanının belli yüzdeleri elemana eksenel yük olarak etkilendiği durumda taşıyabildiği moment kapasiteleri bulunarak tasarım tabloları oluşturulmuştur.

Gerek lisans gerekse yüksek lisans eğitim hayatım boyunca bana çok şey katan ayrıca tez danışmanım olduğu için hep çok şanslı hissettiğim Doç. Dr. Fuad OKAY'a,

Üzerimde çok emeği olan değerli hocalarım Doç. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU ve Dr. Öğretim Üyesi Erkan AKPINAR'a,

Vatana millete hayırlı bir evlat olmam için çalışıp çabalayan, her durumda arkamda duran ve hiçbir koşulda desteğini esirgemeyen canım annem ve babama,

Kocaeli Üniversitesi'nin bana kazandırdığı en güzel şeylerden biri olan Hilal ÇELİK ve Tuba Betül ÖZKAN'a,

Son olarak bu tez çalışmasının son kısımlarında varlığıyla bana güç veren minik oğlum'a ve sadece bu çalışmada değil hayatta da en büyük destekçim ve yol arkadaşım olan biricik eşim Tuncay DEMİRCİ'ye çok teşekkür ederim.

Haziran-2021

Nezahat BİLEN DEMİRCİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ.....	1
1. HEA KESİTLİ ÇELİK PROFİLLERİN ALAN HESAPLAMALARI.....	5
1.1. HEA300 Çelik Profilinin Alan Hesabı.....	5
1.1.1. Başlık alanı hesabı.....	6
1.1.2. Spandrel alanı hesabı.....	6
1.1.3. Gövde alanı hesabı.....	7
1.1.4. Toplam kesit alanı hesabı.....	7
1.2. HEA Profillerin Alan Tabloları.....	8
2. FARKLI BASINÇ KUVVETLERİNİN ETKİSİ ALTINDAKİ HEA PROFİLLERİN GÜÇLÜ YÖNDEKİ PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNİN HESABI.....	9
2.1. Güçlü Eksende Basit Eğilmede Plastik Moment Kapasitesi.....	9
2.2. Eksenel Yük ve Eğilme Momentinin Ortak Etkisinde Plastik Moment Kapasitesi.....	11
2.2.1. Plastik tarafsız eksenin gövdede olduğu durum.....	16
2.2.2. Plastik tarafsız eksenin başlıkta olduğu durum.....	17
2.2.3. Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durum.....	19
2.2.3.1. Spandrelin parçalara ayrılması.....	19
2.2.3.2. Parçaların alan ve merkeze olan uzaklıklarının hesabı.....	20
2.2.3.3. β açısının hesaplanması.....	25
2.2.3.4. Plastik tarafsız eksenin kesitin geometrik merkezine olan uzaklığının ve moment kapasitesinin bulunması.....	26
2.3. Eksenel Yükün Kesite Etkitilmesi.....	27
2.3.1. HEA300 profiline akma yükünün %10'una eşit eksenel yükün etkimesi durumu.....	28
2.3.2. HEA300 profiline akma yükünün %20'sine eşit eksenel yükün etkimesi durumu.....	29
2.3.3. HEA300 profiline akma yükünün %30'una eşit eksenel yükün etkimesi durumu.....	32
2.4. Güçlü Yönde Çalışan HEA Profillere Ait Plastik Moment Kapasite Tabloları.....	33
3. FARKLI BASINÇ KUVVETLERİNİN ETKİSİ ALTINDAKİ HEA PROFİLLERİN ZAYIF YÖNDEKİ PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNİN HESABI.....	42
3.1. Zayıf Eksende Basit Eğilmede Plastik Moment Kapasitesi.....	42
3.2. Eksenel Yük ve Eğilme Momentinin Ortak Etkisinde Plastik Moment Kapasitesi.....	44
3.2.1. Plastik tarafsız eksenin gövdede olduğu durum.....	45
3.2.2. Plastik tarafsız eksenin başlıkta olduğu durum.....	47

3.2.3. Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durum	48
3.2.3.1. Spandrelin parçalara ayrılması.....	49
3.2.3.2. Parçaların alan ve merkeze olan uzaklıklarının hesabı.....	50
3.2.3.3. ϕ açısının hesaplanması	55
3.2.3.4. Plastik tarafsız eksenin kesitin geometrik merkezine olan uzaklığının ve moment kapasitesinin bulunması	55
3.3. Eksenel Yükün Kesite Etkitilmesi	57
3.3.1. HEA300 profiline akma yükünün %10'una eşit eksenel yükün etkimesi durumu	57
3.3.2. HEA300 profiline akma yükünün %30'una eşit eksenel yükün etkimesi durumu	58
3.3.3. HEA300 profiline akma yükünün %50'sine eşit eksenel yükün etkimesi durumu	61
3.4. Zayıf Yönde Çalışan HEA Profillere Ait Plastik Moment Kapasite Tabloları	61
4. GÜÇLÜ VE ZAYIF YÖNDE ÇALIŞAN HEA PROFİLLERİN EKSENEL BASINÇ YÜKÜ ETKİSİYLE PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNDEKİ DEĞİŞİM	72
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	83
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	85
ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	HEA profillerin kesit özellikleri.....	5
Şekil 1.2.	Kesitin bölgelere ayrılması	6
Şekil 1.3.	Spandrelin detaylı gösterimi	7
Şekil 2.1.	Güçlü ekseninde basit eğilmede enkesitteki plastik gerilme dağılımı	9
Şekil 2.2.	Plastik tarafsız eksenin gövdede olduğu durum.....	11
Şekil 2.3.	Plastik tarafsız eksenin başlıkta olduğu durum	11
Şekil 2.4.	Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durum.....	12
Şekil 2.5.	Plastik tarafsız eksen gövdede iken gerilme diyagramı	14
Şekil 2.6.	PTE gövdede iken, kesitin farklı parçalarına etkiyen statikçe eşdeğer kuvvetler	15
Şekil 2.7.	Plastik tarafsız eksen başlıkta iken gerilme diyagramı	17
Şekil 2.8.	Plastik tarafsız eksen spandrelde iken gerilme diyagramı.....	19
Şekil 2.9.	Spandrelin alanlara bölünmesi	19
Şekil 2.10.	A ₄ parçasının detaylı çizimi.....	20
Şekil 2.11.	A ₃ parçasının detaylı çizimi.....	22
Şekil 2.12.	A ₁ ve A ₂ parçalarının detaylı çizimi	23
Şekil 2.13.	A ₂ parçasının detaylı çizimi.....	24
Şekil 2.14.	Güçlü ekseninde sınır durumlar	28
Şekil 3.1.	Zayıf yönde çalışan HEA profili.....	42
Şekil 3.2.	Zayıf ekseninde basit eğilmede enkesitteki plastik gerilme dağılımı	43
Şekil 3.3.	Plastik tarafsız eksenin gövdede olduğu durum.....	44
Şekil 3.4.	Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durum.....	44
Şekil 3.5.	Plastik tarafsız eksenin başlıkta olduğu durum	45
Şekil 3.6.	Plastik tarafsız eksen gövdede iken gerilme diyagramı	45
Şekil 3.7.	Plastik tarafsız eksen başlıkta iken gerilme diyagramı	47
Şekil 3.8.	Plastik tarafsız eksen spandrelde iken gerilme diyagramı.....	49
Şekil 3.9.	Spandrelin alanlara bölünmesi	49
Şekil 3.10.	A ₇ parçasının detaylı çizimi.....	50
Şekil 3.11.	A ₈ parçasının detaylı çizimi.....	51
Şekil 3.12.	A ₅ ve A ₆ parçalarının detaylı çizimi	53
Şekil 3.13.	A ₆ parçasının detaylı çizimi.....	54
Şekil 3.14.	Zayıf ekseninde sınır durumlar	57
Şekil 4.1.	HEA300 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	72
Şekil 4.2.	HEA100 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	73
Şekil 4.3.	HEA120 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	73
Şekil 4.4.	HEA140 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	73
Şekil 4.5.	HEA160 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	74
Şekil 4.6.	HEA180 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	74
Şekil 4.7.	HEA200 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	74

Şekil 4.8. HEA220 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	75
Şekil 4.9. HEA240 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	75
Şekil 4.10. HEA260 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	75
Şekil 4.11. HEA280 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	76
Şekil 4.12. HEA320 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	76
Şekil 4.13. HEA340 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	76
Şekil 4.14. HEA360 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	77
Şekil 4.15. HEA400 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	77
Şekil 4.16. HEA450 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	77
Şekil 4.17. HEA500 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	78
Şekil 4.18. HEA550 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	78
Şekil 4.19. HEA600 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	78
Şekil 4.20. HEA650 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	79
Şekil 4.21. HEA700 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	79
Şekil 4.22. HEA800 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	79
Şekil 4.23. HEA900 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	80
Şekil 4.24. HEA1000 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi	80

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. HEA profillerin kesit alanı tabloları.....	8
Tablo 2.1. Profillerin güçlü yöndeki sınır y_p değerleri.....	33
Tablo 2.2. Kesite %10 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	34
Tablo 2.3. Kesite %20 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	35
Tablo 2.4. Kesite %30 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	36
Tablo 2.5. Kesite %40 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	37
Tablo 2.6. Kesite %50 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	37
Tablo 2.7. Kesite %60 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	38
Tablo 2.8. Kesite %70 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	39
Tablo 2.9. Kesite %80 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	40
Tablo 2.10. Kesite %90 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve güçlü eksenindeki plastik moment kapasitesi	41
Tablo 3.1. Profillerin zayıf yöndeki sınır y_p değerleri.....	62
Tablo 3.2. Kesite %10 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve zayıf eksenindeki plastik moment kapasitesi	63
Tablo 3.3. Kesite %20 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve zayıf eksenindeki plastik moment kapasitesi	64
Tablo 3.4. Kesite %30 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve zayıf eksenindeki plastik moment kapasitesi	64
Tablo 3.5. Kesite %40 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve zayıf eksenindeki plastik moment kapasitesi	65
Tablo 3.6. Kesite %50 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız aksenin yeri ve zayıf eksenindeki plastik moment kapasitesi	66

Tablo 3.7. Kesite %60 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi	68
Tablo 3.8. Kesite %70 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi	68
Tablo 3.9. Kesite %80 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi	69
Tablo 3.10. Kesite %90 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi	70



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: profilin enkesit alanı
A ₁	: güçlü ekseninde spandrel oluşturulan parçalardan biri
A ₂	: güçlü ekseninde spandrel oluşturulan parçalardan biri
A ₃	: güçlü ekseninde spandrel parçalarını bulmak için kullanılan alanlardan biri
A ₄	: güçlü ekseninde spandrel parçalarını bulmak için kullanılan alanlardan biri
A ₅	: zayıf ekseninde spandrel oluşturulan parçalardan biri
A ₆	: zayıf ekseninde spandrel oluşturulan parçalardan biri
A ₇	: zayıf ekseninde spandrel parçalarını bulmak için kullanılan alanlardan biri
A ₈	: zayıf ekseninde spandrel parçalarını bulmak için kullanılan alanlardan biri
A _b	: profilin başlık alanı
A _g	: profilin gövde alanı
A _s	: profilin spandrel alanı
b	: başlık genişliği
f	: güçlü ekseninde plastik tarafsız eksen spandreldeyken, gövde ile spandrelin birleştiği noktanın plastik tarafsız eksene olan mesafesi
G	: kesitin geometrik merkezi
g	: güçlü ekseninde plastik tarafsız eksen spandreldeyken, plastik tarafsız eksenin başlığa olan mesafesi
h	: kesit yüksekliği
h _i	: gövde yüksekliği
k	: zayıf ekseninde plastik tarafsız eksen spandreldeyken, plastik tarafsız eksenin gövdenin alt yüzünden geçen eksene olan mesafesi
M _p	: plastik moment kapasitesi
M _{p,n}	: aksenal yük etkisiyle azaltılmış plastik moment kapasitesi
n	: aksenal basınç kuvveti oranı
P	: aksenal yük
P _c	: gerilme diyagramında basınç bölgesinin bileşke kuvveti
P _{c1}	: güçlü ekseninde PTE gövdedeyken üst başlığa etkiyen statikçe eşdeğer kuvvet
P _{c2}	: güçlü ekseninde PTE gövdedeyken üst spandrellere etkiyen statikçe eşdeğer kuvvet
P _{c3}	: güçlü ekseninde PTE gövdedeyken gövdenin PTE'nin üzerinde kalan parçasına etkiyen statikçe eşdeğer kuvvet
P _t	: gerilme diyagramında çekme bölgesinin bileşke kuvveti
P _{t1}	: güçlü ekseninde PTE gövdedeyken alt başlığa etkiyen statikçe eşdeğer kuvvet
P _{t2}	: güçlü ekseninde PTE gövdedeyken alt spandrellere etkiyen statikçe eşdeğer kuvvet
P _{t3}	: güçlü ekseninde PTE gövdedeyken gövdenin PTE'nin altında kalan parçasına etkiyen statikçe eşdeğer kuvvet
P _y	: akma yükü
p	: zayıf ekseninde plastik tarafsız eksen spandreldeyken, plastik tarafsız eksenin başlığın doğrusal kısmının başladığı bölgeye olan mesafesi
r	: başlık ile gövde arasında kalan eğriliğin yarıçapı
t _f	: başlık kalınlığı
t _w	: gövde kalınlığı
W _p	: plastik mukavemet momenti
W _{p,n}	: aksenal yük etkisiyle azaltılmış plastik mukavemet momenti
x _p	: zayıf ekseninde kesitin geometrik merkezinin PTE'ye uzaklığı

- x_s : zayıf ekseninde spandrelin geometrik merkezinin, spandrelin başlıkla birleştiği noktaya olan uzaklığı
 y_c : güçlü ekseninde PTE gövdedeyken eşdeğer basınç kuvvetinin ETE'ye uzaklığı
 y_{c1} : P_{c1} kuvvetinin ETE'ye uzaklığı
 y_{c2} : P_{c2} kuvvetinin ETE'ye uzaklığı
 y_{c3} : P_{c3} kuvvetinin ETE'ye uzaklığı
 y_p : güçlü ekseninde kesitin geometrik merkezinin PTE'ye uzaklığı
 y_s : güçlü ekseninde spandrelin geometrik merkezinin, gövdenin başlangıcına olan uzaklığı
 y_t : güçlü ekseninde PTE gövdedeyken eşdeğer çekme kuvvetinin ETE'ye uzaklığı
 y_{t1} : P_{t1} kuvvetinin ETE'ye uzaklığı
 y_{t2} : P_{t2} kuvvetinin ETE'ye uzaklığı
 y_{t3} : P_{t3} kuvvetinin ETE'ye uzaklığı
 β : güçlü ekseninde spandrel alanlarını bulabilmek için kullanılan açı
 σ_y : çeliğin akma dayanımı
 Φ : zayıf ekseninde spandrel alanlarını bulabilmek için kullanılan açı
 \bar{y}_1 : A_1 parçasının ağırlık merkezinin spandrel ile gövdenin birleştiği yere uzaklığı
 \bar{y}_2 : A_2 parçasının ağırlık merkezinin spandrel ile gövdenin birleştiği yere uzaklığı
 \bar{y}_3 : A_3 parçasının ağırlık merkezinin spandrel ile gövdenin birleştiği yere uzaklığı
 \bar{y}_4 : A_4 parçasının ağırlık merkezinin spandrel ile gövdenin birleştiği yere uzaklığı
 \bar{x}_5 : A_5 parçasının ağırlık merkezinin spandrel ile başlığın birleştiği yere uzaklığı
 \bar{x}_6 : A_6 parçasının ağırlık merkezinin spandrel ile başlığın birleştiği yere uzaklığı
 \bar{x}_7 : A_7 parçasının ağırlık merkezinin spandrel ile başlığın birleştiği yere uzaklığı
 \bar{x}_8 : A_8 parçasının ağırlık merkezinin spandrel ile başlığın birleştiği yere uzaklığı

Kısaltmalar

- ETE : Elastik Tarafsız Eksen
PTE : Plastik Tarafsız Eksen

FARKLI BASINÇ KUVVETLERİNİN ETKİSİNDEKİ KISA HEA-KESİTLİ ÇELİK KİRİŞ-KOLONLARIN GÜÇLÜ VE ZAYIF EKSENDE PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNİN HESAPLANMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında; burkulma sınır durumları göz ardı edilerek, HEA profillerin farklı basınç yükleri altındaki plastik moment kapasiteleri hesaplanmış ve tabloleştirilmiştir. Örnek olarak HEA300 profili ele alınmış ve kesite; elemanın akma yükünün belli yüzdelere karşılık gelen basınç kuvvetleri etkiltilerek, basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisinde kesitin plastik moment dayanımı hesaplanmıştır. Profillerin plastik moment kapasitelerini hesaplayabilmek için öncelikle plastik tarafsız eksenin yerini belirlemek gerekmektedir. Herhangi bir kesite artan basınç yükleri uygulandığında, plastik tarafsız eksenin yeri değişir. Başlangıçta plastik tarafsız eksenin tam olarak nereden geçtiği bilinmediği için, gövdede, eğriliklerde ve başlıkta olacağı varsayıldığı her bir durum için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. İlk olarak plastik tarafsız eksenin kesitin geometrik merkezine olan uzaklığını belirlemek, sonrasında da plastik moment kapasitesini bulmak için genel denklemler çıkarılmıştır. Plastik tarafsız eksenin doğru konumu, üç durum için hesaplanandan gerçekçi olan alınarak belirlenmiştir. Bu değerleri kullanarak da plastik moment kapasitelerine ulaşılmıştır.

Ardından incelenen profiller için mühendislerin plastik tasarım yaparken faydalanacakları, farklı basınç yükleri altındaki plastik moment dayanım tabloları oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: HEA Profiller, Plastik Moment Kapasitesi, Plastik Tarafsız Eksen.

CALCULATION OF STRONG AND WEAK AXES PLASTIC MOMENT CAPACITIES OF SHORT STEEL BEAM-COLUMNS WITH HEA-SECTIONS FOR VARIOUS COMPRESSIVE LOAD

ABSTRACT

In this thesis, the plastic moment capacities of HEA profiles under different compressive loads are calculated by ignoring the buckling limit states and then tabulated. The HEA300 profile is taken as a sample and plastic moment strength values for the compressive forces corresponding to certain percent values of the yield load of the element under the common effect of compressive load and bending moment. It is primarily required to determine the location of the plastic neutral axis in order to calculate the plastic moment capacities. When increasing compressive loads are applied to any cross section, the location of the plastic neutral axis shifts. Since it is not exactly known where the plastic neutral axis passes through at the beginning, the calculations are performed separately for the each case of assumptions of being on the web, on the curved parts and on the flange. First the equations to determine the distance between the plastic neutral axis and then the general equations for plastic moment capacity are derived. The correct position of plastic neutral axis is determined by selecting the realistic one of the three cases that are calculated. Plastic moment capacities are obtained by using these values.

Then plastic moment strength tables under different compressive loads are generated for the examined profiles, which the engineers can make use of, while making plastic design.

Keywords: HEA Profiles, Plastic Moment Capacity, Plastic Neutral Axis.

GİRİŞ

Tüm dünyada ve özellikle son zamanlarda ülkemizde çelik yapıların kullanımını giderek artmaktadır. Bu durum, çeliğin diğer yapı malzemelerine oranla birçok olumlu özelliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Çelik; gerek nakliye ve montaj kolaylığı sağlayarak inşaat süresini kısaltması ve sökölüp takılabilme özelliği sayesinde değişikliğe kolayca uyum sağlaması, gerekse geniş açıklıklar geçmeyi mümkün kılması sayesinde özellikle fabrika yapılarında, endüstriyel binalarda, depo ve hangarlarda, sanayi bölgelerinde ana taşıyıcı elemanlarda kullanılan temel yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca çelik, yüksek mukavemete sahip bir malzeme olduğu için küçük kesitlerle büyük yükler taşıyabilmeye elverişli bir karakteristiğe sahiptir. Çeliğin bu özelliği sayesinde yapı ağırlığı da olabildiğince minimize edilerek yapıya gelecek deprem yükleri azaltılmış ve daha güvenli bir tasarım elde edilmiş olur. Bu, aynı zamanda temel maliyetinde de tasarruf edilmesine olanak sağlar.

Tüm bunlara ek olarak, çelik malzemenin en büyük avantajı, sünek olması sebebiyle akma yeteneğine sahip olmasıdır. Süneklik, akma sonrasındaki deformasyon kapasitesi olarak tanımlanabilir. Çeliğin bu özelliği sayesinde yapı sistemindeki bazı elemanlar tasarım yükünü aşsalar bile akarak ayakta kalmaya devam edebilirler [1]. Çeliğin gerilme şekil değiştirme grafiği göz önüne alındığında elastik davrandığı yani Hooke Kanunu'nun geçerli olduğu bu bölümde; kesite artan yükler uygulandığında, deformasyonlar lineer, orantılı ve göreceli olarak yavaş hızda artar. Ayrıca yük ortadan kalktığında bu deformasyonlar da ortadan kalkar [2]. Fakat çeliğin akması demek artık yük taşıyamadığı anlamına gelmemektedir. Çekmeye çalışan bir çelik elemanda akma gerilmesine ulaşıldıktan sonra çelik hala yük taşımaya devam eder fakat bu kez deformasyonlar uygulanan yükle orantılı değildir ve küçük yüklerde büyük deformasyonlar görülür. Bu bölge plastik deformasyon bölgesi olarak adlandırılabilir. Eğilme durumunda ise, çelikte akma ilk olarak en dış liflerde gerçekleşir ve yük arttırılmaya devam ettiği müddetçe sırasıyla en içteki life kadar akma devam eder. Bu aşama çeliğin elastoplastik yani yarı elastik yarı plastik davrandığı kısımdır ve yüklemeye ortadan kalktığında deformasyonların bir kısmı ortadan kalkarken elemanda bazı kalıcı deformasyonların oluştuğu da görülür.

Kesitteki tüm liflerin akmasıyla tam plastik kesit elde edilir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)'nde [3] kullanılan kapasite tasarımı yöntemi, plastik şekil değiştirmelere ulaşılabilmenin bir sonucudur. Dolayısıyla, plastik davranışın göz önüne alınmasıyla taşıyıcı sistem davranışının daha iyi anlaşılması ve yapının daha gerçekçi sınırlar içerisinde değerlendirilmesi mümkün olmaktadır [4]. Bu durum, elastik şekil değiştirmelerin yanı sıra plastik şekil değiştirmelerle ilgili yapılan çalışmaların önemini de bir kez daha gözler önüne sermektedir.

Ülkemizde boyutlandırmada çeliğin aktıktan sonra bile yük taşıyabilmeye devam etmesi sayesinde plastik tasarım yapabilmek mümkündür. Ayrıca elastik tasarımda yöntem gereği ulaşılamayan teorik göçme yükü değerine plastik tasarımda ulaşabilmektedir. Bu durum, malzemenin karakteristiğinden de olabildiğince fazla yararlanmayı mümkün kılmaktadır. Böylelikle; oluşacak deformasyonların sınırlandırılması kaydıyla plastik tasarım, mühendislerin tasarım yaparken gözettikleri güven, kullanılabilirlik, ekonomiklik ve estetik açısından elastik tasarıma göre daha avantajlıdır [5].

Bu bağlamda daha önce yapılan tez çalışmaları incelendiğinde, plastik tasarım yöntemleriyle ilgili yapılan bazı çalışmaların varlığı gözlemlenmiştir. "Performans Tabanlı Plastik Tasarım Yönteminin Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım Yöntemiyle Kıyaslanması" adlı yüksek lisans tez çalışmasında [6]; elastik tasarıma göre hesaplamaları yapılan elemanların kullanılmayan ekstra moment taşıma kapasitelerinden, plastik tasarım yapılarak faydalanılabileceğinden bahsedilmiştir.

Yine başka bir çalışmada [7] ise, tam plastik I kesitli kirişler üzerinde kesme kuvvetinin etkisi araştırılmış, ampirik denklemlerle bu ilişki açıklanmış ve bazı tablolar oluşturulmuştur.

2010 yılında yayımlanan bir doktora tezinde [8], eğilme etkisi altında zayıf ekseninde çalışan U profillerin plastik tasarım koşullarıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada, Avrupa Çelik Yapılar Tasarımı (TS-EN 1993) yönetmeliğinde izin verilen plastik tasarım sınır koşulları irdelenmiş ve farklı en kesit ve boylardaki profillerde dönme kapasitesi hesaplamaları yapılarak kesit sınırlandırmalarının doğruluğu tartışılmıştır.

Çelik yapıların plastik tasarım hesaplamalarıyla ilgili başka bir yüksek lisans tez çalışmasında [9], plastik akma ve pekleşmelerin taşıma gücüne etkisinden

bahsedilmiştir. Tezde plastik moment-eğrilik hesaplamaları yapılarak, plastik akma değerlerinin hesaplanan moment-eğrilik diyagramındaki dağılımları incelenmiştir.

Plastik analiz ve tasarım söz konusu olduğunda karşımıza çıkan bir başka tez çalışmasında da [10], plastik moment dağılım yöntemi kullanılmış ve bu yöntemin oldukça ekonomik olduğu, zamandan tasarruf sağlayan ve kullanılabilirlik açısından oldukça uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Literatürde, çelik yapı elemanlarına uygulanan aksenal yük, eğilme momenti veya bileşik yüklemelerle ilgili çalışmalar da mevcuttur. Örneğin; soğuk şekil verilmiş çelik yapı elemanları ile ilgili yapılan bir çalışmada [11], kenarları rijit bir C profilin aksenal yük dayanımı Avrupa ve Amerikan şartnameleri kullanılarak hesaplanmış ve karşılaştırma yapılmıştır.

“Eksenal Yük ve Moment Etkisi Altındaki Çelik Gömme Kompozit Kolonların Dayanım Ve Süneklikleri” başlıklı araştırma makalesinde [12], sonlu elemanlar metodu kullanan bir paket program aracılığıyla hem çelik hem de kompozit kolonların aksenal yük ve moment etkisi altındaki gerilme yoğunlukları hesaplanmıştır. Kompozit kolonların içerisindeki çeliğin, çelik kolonlara göre; akma dayanımı ve uygulanan yükler altında yaptıkları yer değiştirme karşılaştırıldığında daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yine başka bir çalışmada [13], aksenal yük ve kesme kuvvetinin ortak etkisindeki yapısal bir elemanda plastik göçme incelenmiştir. Etkiyen aksenal yük ve kesme kuvvetlerinin eleman tarafından taşınıp taşınmadığı kontrol edilmiş ve nihai eleman seçimi tüm yük zorlamalarını karşılayacak şekilde yapılmıştır.

Dikdörtgen kesitli elemanlarda aksenal yük ve kesme kuvvetinin plastik moment kapasitesi üzerine etkisiyle ilgili bir çalışmada ise [14], statik yükleme durumlarında kesme kuvvetinin aksenal yüke göre oldukça küçük olduğundan göçme durumunda aksenal kuvvetin daha etkili olduğu, fakat dinamik yükleme durumlarında plastik moment üzerinde hem kesme kuvvetinin hem de aksenal yükün etkili olabileceği üzerinde durulmuştur. Dikdörtgen kesitli bir konsol kiriş hem kesme hem de aksenal yük ile yüklenerek bu etki araştırılmıştır.

Hem kesme kuvveti hem de aksenal yük etkisindeki bir kirişin plastik moment kapasitesi ile alakalı bir başka çalışmada [15], I kesitli konsol bir kiriş üzerinde

yüklemeye yapılmış, tarafsız eksenin gövde ve başlıkta olduğu durumlar için üst ve alt sınırlar belirlenerek moment kapasitesindeki farklılıklar ortaya konmuştur.

Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı basınç yüklerinde çelik profillerin plastik moment kapasiteleriyle ilgili çalışmaların eksikliği fark edilmiştir. Bu sebeple konu seçiminde, plastik tasarım yapılırken mühendisler hız kazandıracak plastik moment kapasite tablolarının oluşturulmasına yönelik çalışmaların eksikliği faktörü etkili olmuştur.

Çalışmada, I profillere kıyasla daha kalın başlığa sahip olmaları sayesinde daha rijit olan HEA profiller seçilerek sayısal örnekler HEA profiller üzerinden gösterildi.

Tezin ilk bölümünde HEA profiller başlık, spandrel ve gövde olmak üzere üç bölüme ayrılıp alanları hesaplandı ve tablo haline getirildi.

İkinci bölümde güçlü yönde, üçüncü bölümde ise zayıf yönde çalışan HEA profiller üzerine hesaplamalar yapıldı. Her bir durum için, ilk olarak, kesitin akma yükünün %10'una eşdeğer bir aksenal yük uygulandığında plastik moment kapasitesi hesaplandı. Daha sonra bu yük değeri, %10'ar artırılarak %90'a kadar etkilip aksenal yük değişimine bağlı olarak plastik moment kapasitesindeki değişime ulaşıldı.

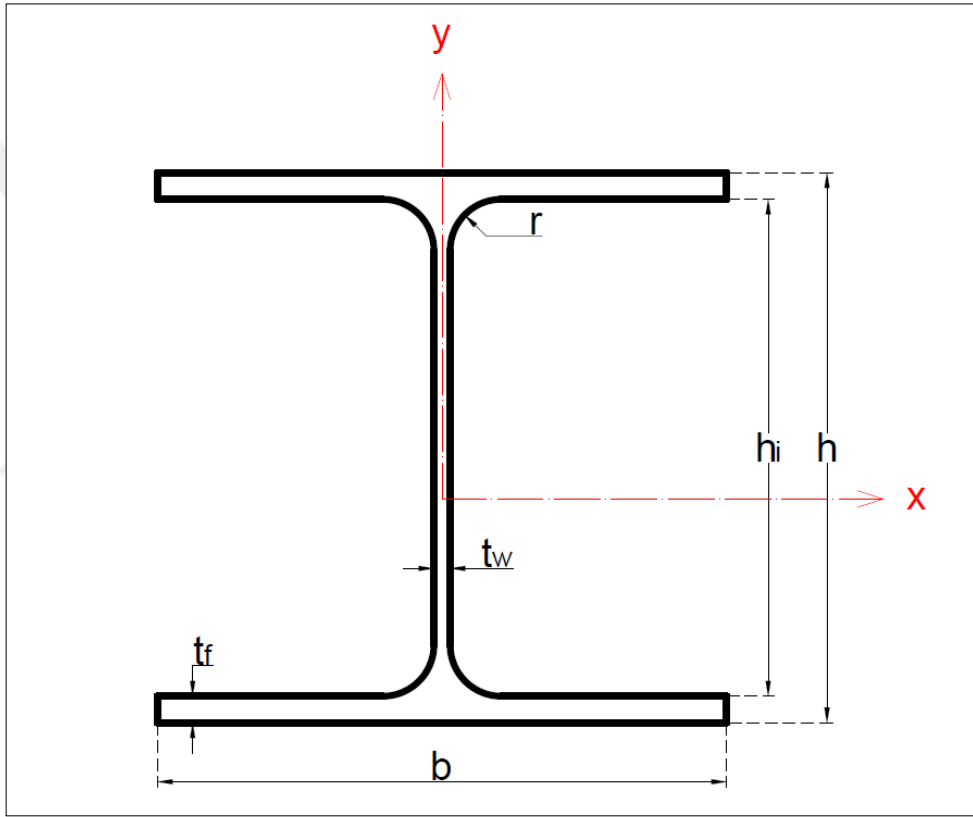
Dördüncü bölümde incelenen her bir profil için hem zayıf yönde hem de güçlü yönde, plastik moment kapasitesinin aksenal yüke bağlı değişimlerini içeren grafiklere yer verildi.

Sonuç kısmında, HEA profillerin güçlü ve zayıf eksenindeki aksenal yüke bağlı plastik moment değişimleri mukayese edildi.

Tüm bu işlemler yapılırken hem lisans öğrencilerine hem de saha mühendislerine faydalı olması açısından işlem basamakları ayrı ayrı detaylı bir şekilde gösterildi.

1. HEA KESİTLİ ÇELİK PROFİLLERİN ALAN HESAPLAMALARI

Plastik moment hesaplamaları yaparken bazı alan hesaplamalarının yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında HEA300 çelik profili ele alınarak hesaplamaların tamamı bu profil üzerinden gösterilmiş olup tüm HEA profilleri için aynı adımlar tekrarlandı. Şekil 1.1'de HEA profillerin kesit özellikleri yer almaktadır.

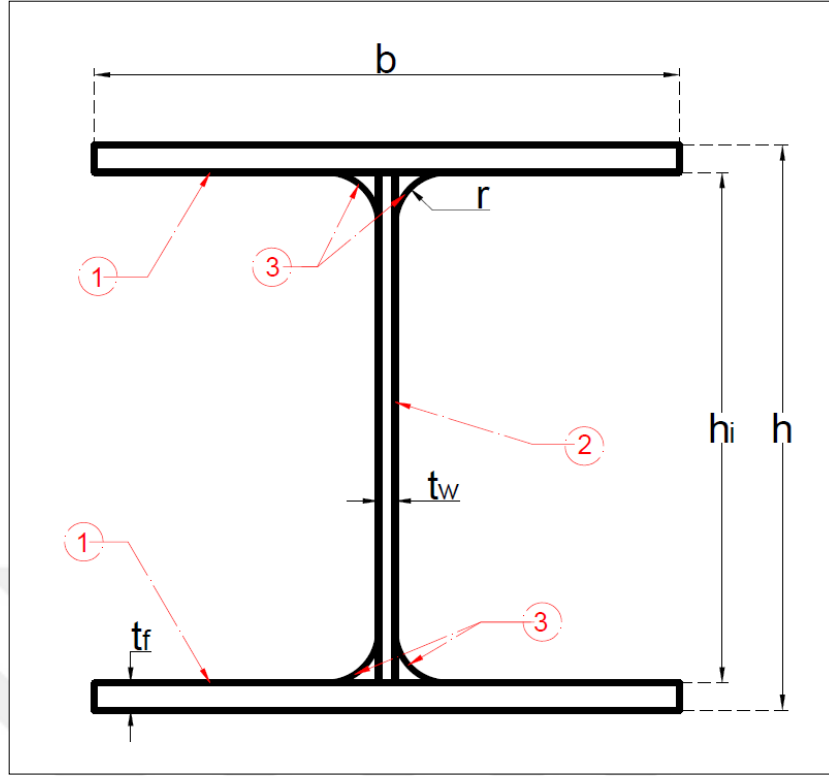


Şekil 1.1. HEA profillerin kesit özellikleri

Şekil 1.1'de yer alan simgelerden, b başlık genişliğini, h kesit yüksekliğini, h_i gövde yüksekliğini, t_f başlık kalınlığını, t_w gövde kalınlığını ve r başlık ile gövde arasında kalan eğriliğin yarıçapını ifade eder ve HEA300 için sayısal değerler şu şekildedir; $b = 300$ mm; $h = 290$ mm; $h_i = 262$ mm; $t_f = 14$ mm; $t_w = 8,5$ mm; $r = 27$ mm'dir [16].

1.1. HEA300 Çelik Profilinin Alan Hesabı

Profilin toplam alanı; başlık, gövde ve spandrel alanı olmak üzere Şekil 1.2'de gösterilen üç ana bölgeye ayrılarak hesaplanabilir.



Şekil 1.2. Kesitin bölgelere ayrılması

1.1.1. Başlık alanı hesabı

Başlık alanı (A_b) Şekil 1.2'de gösterilen 1 nolu alan ile ifade edilmektedir. Başlık alanı Denklem (1.1) kullanılarak hesaplanabilir;

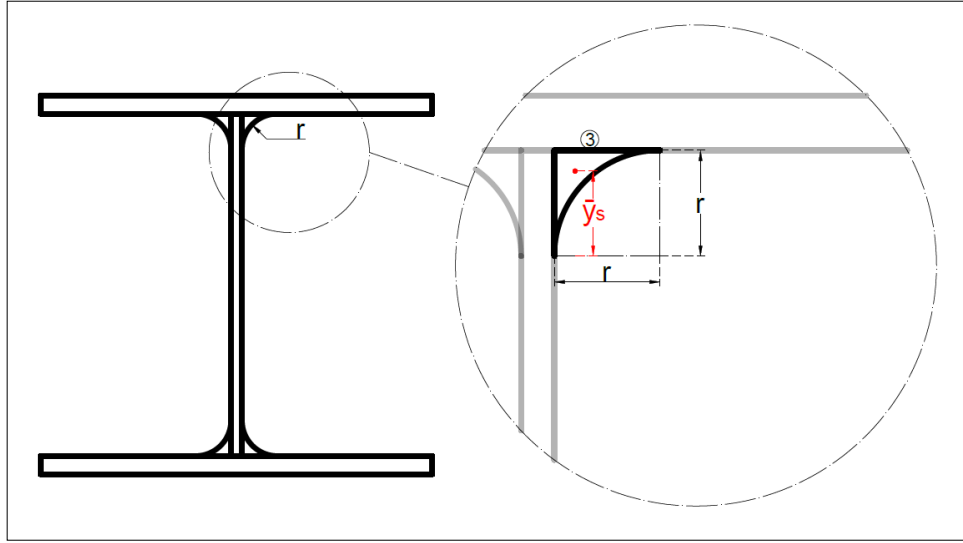
$$A_b = b \times t_f \quad (1.1)$$

Buradan, HEA300 profilinin kesit özelliklerine ait sayısal değerler Denklem (1.1)'de yerine yazılarak başlık alanı;

$$A_b = 300 \times 14 = 4200 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

1.1.2. Spandrel alanı hesabı

Spandrel alanı Şekil 1.2'de gösterilen 3 nolu alan ile ifade edilmektedir. Şekil 1.3'te spandrelin detaylı çizimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi spandrel, bir kenarı r olan bir karenin alanından yarıçapı r olan bir çeyrek daire alanının çıkarılmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 1.3. Spandrelin detaylı gösterimi

Bu durumda spandrel alanı (A_s) Denklem (1.2) kullanılarak hesaplanabilir;

$$A_s = A_{\text{Kare}} - A_{\text{Çeyrek Daire}} = r^2 - \left(\frac{\pi r^2}{4} \right) \quad (1.2)$$

HEA300 profilin spandrel alanı Denklem (1.2) kullanılarak;

$$A_s = 27^2 - \left(\frac{\pi \times 27^2}{4} \right) = 156,44 \text{ mm}^2 \text{ olarak hesaplanır.}$$

1.1.3. Gövde alanı hesabı

Gövde alanı (A_g) Şekil 1.2'de gösterilen 2 nolu alan ile ifade edilmektedir. Gövde alanı Denklem (1.3) kullanılarak hesaplanabilir;

$$A_g = h_i \times t_w \quad (1.3)$$

Denklem (1.3)'ten HEA300 profilinin gövde alanı;

$$A_g = 262 \times 8,5 = 2227 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

1.1.4. Toplam kesit alanı hesabı

Kesit iki adet başlık, bir adet gövde ve dört adet spandrelinden meydana gelmektedir. Dolayısıyla toplam alan; $A = 2A_b + A_g + 4A_s$ şeklinde ifade edilebilir.

HEA300 profilinin toplam alanı;

$$A = 2 \times 4200 + 2227 + 4 \times 156,44 = 11,25 \times 10^3 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

1.2. HEA Profillerin Alan Tabloları

Tüm HEA profillerin kesit özellikleri ve alanları Tablo 1.1'de yer almaktadır.

Tablo 1.1. HEA profillerin kesit alanı tabloları

PROFİL TİPİ	KESİT ÖZELLİKLERİ						ALAN (mm ²)			
	b (mm)	h (mm)	h _i (mm)	t _r (mm)	t _w (mm)	r (mm)	Başlık Alanı (mm ²)	Gövde Alanı (mm ²)	Spandrel Alanı (mm ²)	Toplam Alan (x10 ³ mm ²)
HEA100	100	96	80	8	5	12	800	400	30,90	2,123
HEA120	120	114	98	8	5	12	960	490	30,90	2,534
HEA140	140	133	116	8,5	5,5	12	1190	638	30,90	3,142
HEA160	160	152	134	9	6	15	1440	804	48,29	3,877
HEA180	180	171	152	9,5	6	15	1710	912	48,29	4,525
HEA200	200	190	170	10	6,5	18	2000	1105	69,53	5,383
HEA220	220	210	188	11	7	18	2420	1316	69,53	6,434
HEA240	240	230	206	12	7,5	21	2880	1545	94,64	7,684
HEA260	260	250	225	12,5	7,5	24	3250	1688	123,6	8,682
HEA280	280	270	244	13	8	24	3640	1952	123,6	9,726
HEA300	300	290	262	14	8,5	27	4200	2227	156,4	11,25
HEA320	300	310	279	15,5	9	27	4650	2511	156,4	12,44
HEA340	300	330	297	16,5	9,5	27	4950	2822	156,4	13,35
HEA360	300	350	315	17,5	10	27	5250	3150	156,4	14,28
HEA400	300	390	352	19	11	27	5700	3872	156,4	15,90
HEA450	300	440	398	21	11,5	27	6300	4577	156,4	17,80
HEA500	300	490	444	23	12	27	6900	5328	156,4	19,75
HEA550	300	540	492	24	12,5	27	7200	6150	156,4	21,18
HEA600	300	590	540	25	13	27	7500	7020	156,4	22,65
HEA650	300	640	588	26	13,5	27	7800	7938	156,4	24,16
HEA700	300	690	636	27	14,5	27	8100	9222	156,4	26,05
HEA800	300	790	734	28	15	30	8400	11010	193,1	28,58
HEA900	300	890	830	30	16	30	9000	13280	193,1	32,05
HEA1000	300	990	928	31	16,5	30	9300	15312	193,1	34,68

Tezin iki ve üçüncü bölümlerindeki hesaplamalar, akma yükünün belli yüzdeleri ile toplam alan çarpılıp akma gerilmesi bulunarak yapıldı.

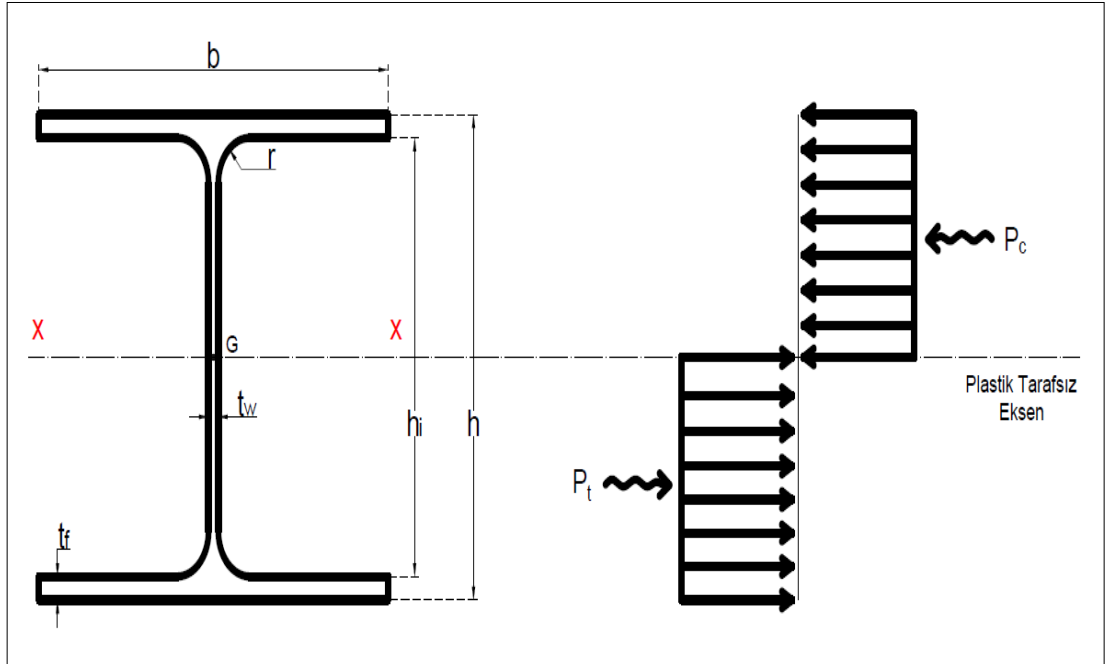
2. FARKLI BASINÇ KUVVETLERİNİN ETKİSİ ALTINDAKİ HEA PROFİLLERİN GÜÇLÜ YÖNDEKİ PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNİN HESABI

Bu bölümde güçlü yönde çalışan HEA profillerin farklı basınç kuvvetleri altında taşıyabilecekleri plastik moment büyüklükleri bulundu. Profillere etkiyen eksenel kuvvet, profillerin akma yüküne (P_y) göre belirlendi. Profillere, P_y 'nin %10'una eşit bir basınç yükü etkidiği durumdan, %90'ına eşit bir basınç yükü etkidiği duruma kadar profillerin taşıyabildiği plastik moment kapasiteleri hesaplandı.

Daha detaylı açıklanacak olursa; profilin akma yükünün %10'u bulunup bu şiddete sahip bir eksenel basınç yükü etkilendiğinde, kesitin ne kadar plastik moment taşıdığı hesaplandı ve aynı işlem basınç kuvveti %10'ar artırılarak her bir yük için tekrarlandı. Buradan da eksenel yük-plastik moment tabloları oluşturuldu.

2.1. Güçlü Ekseninde Basit Eğilmede Plastik Moment Kapasitesi

Kesite hiç eksenel yük etkemediğinde, yani basit eğilme halinde, kesitte oluşan plastik gerilme dağılımları Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1. Güçlü ekseninde basit eğilmede enkesitteki plastik gerilme dağılımı

Şekildeki P_c ifadesi basınç bölgesindeki, P_t ise çekme bölgesindeki bileşke kuvveti ifade etmektedir. G kesitin geometrik merkezidir. Bu durumda, plastik tarafsız eksen kesitin geometrik merkezinden geçmektedir; yani, kesitte birbirine eşit basınç ve çekme bölgeleri oluşmaktadır. Bu nedenle, hem çekme hem de basınç bölgesi; gövdenin yarısı, bir başlık ve iki spandrel alanından oluşmaktadır.

Plastik moment kapasitesinin bulunması için de öncelikle spandrelin geometrik merkezinin gövdenin başlangıcına olan uzaklığının (\bar{y}_s) hesaplanması gerekmektedir.

Bir önceki bölümde yer alan Şekil 1.3'te de detaylı bir şekilde gösterildiği üzere \bar{y}_s mesafesinin bulunması için bir kenarı r olan bir kareden, yarıçapı r olan bir çeyrek daire çıkarılarak sonuca ulaşılmalıdır. Bunun için Denklem (2.1)'den faydalanıldı;

$$\bar{y}_s = \left(\frac{(A_{\text{Kare}} \times \bar{y}_{\text{Kare}}) - (A_{\text{Çeyrek Daire}} \times \bar{y}_{\text{Çeyrek Daire}})}{A_s} \right) \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'deki ifadeler daha açık yazılarak;

$$\bar{y}_s = \left[\frac{\left(r^2 \times \frac{r}{2} \right) - \left(\frac{\pi r^2}{4} \times \frac{4r}{3\pi} \right)}{r^2 - \left(\frac{\pi r^2}{4} \right)} \right] \quad (2.2)$$

Denklem (2.2) ifadesi elde edildi ve $r=27$ mm için $y_s = 20,97$ mm olarak bulundu.

Şekil 2.1'deki gerilme diyagramından faydalanılarak kesitin plastik mukavemet momenti kapasitesi, P_t ve P_c 'nin plastik tarafsız eksene göre momenti alınarak bulunabilir. Kesitin basit eğilme halinde plastik mukavemet momenti kapasitesi, Denklem (2.3)'te gösterildiği gibidir,

$$W_{px} = \left[2A_b \times \left(\frac{h_i + t_f}{2} \right) \right] + \left[4A_s \times \left(\bar{y}_s + \frac{h_i}{2} - r \right) \right] + \left(2 \times \frac{A_g}{2} \times \frac{h_i}{4} \right) \quad (2.3)$$

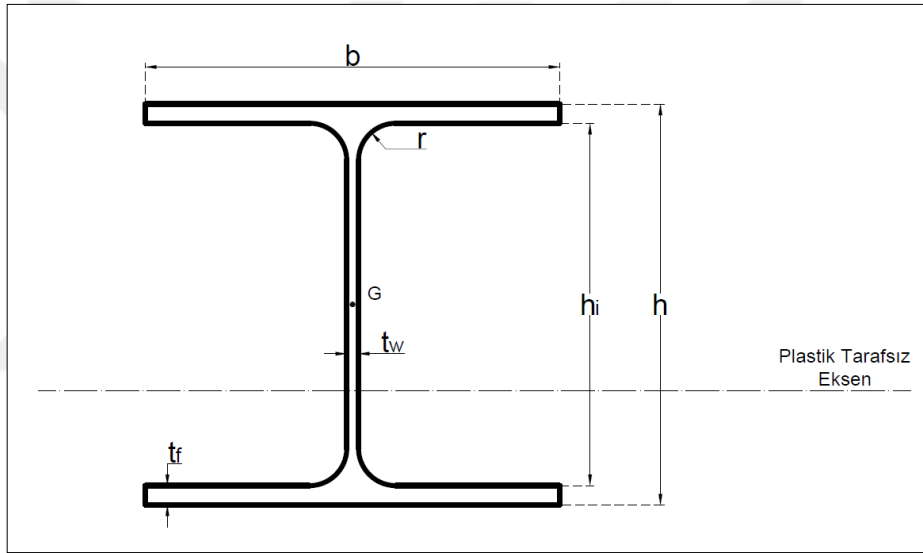
Kesite ait sayısal değerler Denklem (2.3)'te yerine yazılarak;

$$W_{px} = \left[2 \times 4200 \times \left(\frac{262 + 14}{2} \right) \right] + \left[4 \times 156,44 \times \left(20,97 + \frac{262}{2} - 27 \right) \right] + \left(2 \times \frac{2227}{2} \times \frac{262}{4} \right)$$

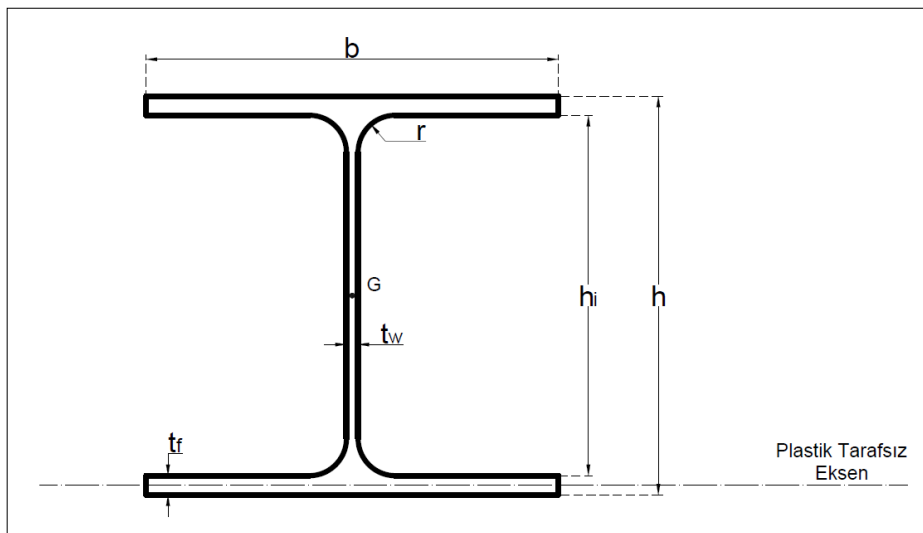
ifadesi elde edilerek $W_{px} = 1383 \times 10^3$ mm³ olarak bulunur.

2.2. Aksenal Yük ve Eğilme Momentinin Ortak Etkisinde Plastik Moment Kapasitesi

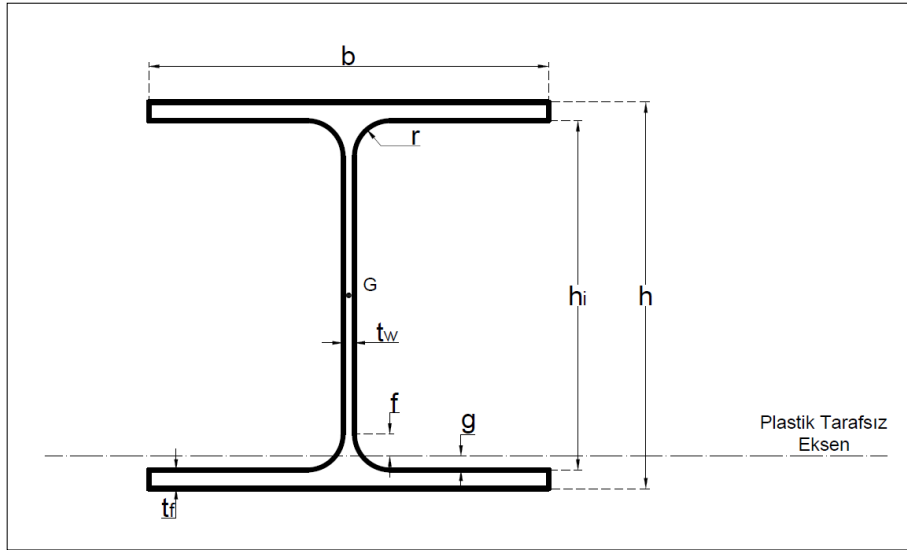
Plastik tarafsız eksen (PTE) sadece basit eğilme durumunda, yani, kesite hiç aksenal yük etkilediğinde, kesitin geometrik merkezinden geçmektedir. Kesite akma yükünün %10'u, %20'si, %30'u, %40'ı, %50'si, %60'ı, %70'i, %80'i veya %90'ına eşdeğer bir basınç yükü etkilediği durumda PTE'nin yeri değişecektir. Kesite etkiyen her bir basınç yükünde kesitin plastik moment kapasitesini hesaplayabilmek için, öncelikle PTE'nin yerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda PTE'nin yeriyle ilgili üç ihtimal mevcuttur. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi gövdede, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi başlıkta ve son olarak Şekil 2.4'te görüldüğü gibi spandrelde olabilir.



Şekil 2.2. Plastik tarafsız eksenin gövdede olduğu durum



Şekil 2.3. Plastik tarafsız eksenin başlıkta olduğu durum



Şekil 2.4. Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durum

Şekil 2.4'te g simgesi plastik tarafsız eksenin başlığın iç yüzüne olan mesafesini, f simgesi ise gövde ile spandrelin birleştiği noktanın plastik tarafsız eksene olan mesafesini belirtmektedir.

Kesit boyutları her profile aynı oranda büyümediğinden y_p farklı yerlere düşebilir. Bu yüzden her bir basınç yükü ve her bir profil için işlemler tekrar yapılmalıdır. Yani plastik moment kapasitesi hesaplanırken, bu üç ihtimal de göz önüne alınarak kesitin geometrik merkezinin plastik tarafsız eksene uzaklığı olan y_p mesafesi her seferinde hesaplandıktan sonra, bulunan y_p 'ler sınır durumlarla kıyaslanarak plastik tarafsız eksenin gerçek yeri belirlenmeli ve plastik moment kapasiteleri hesaplanmalıdır.

Daha önce de belirtildiği gibi, tezin temel amacı HEA-kesitli çelik profillerin farklı seviyelerdeki aksenal basınç kuvvetleri altındaki plastik moment kapasitelerini hesaplamaktır. Tezde, profillere etkiyen aksenal basınç kuvveti (P), profillerin aksenal basınç kuvveti altındaki plastik kapasitelerine (P_y) bölünerek boyutsuz bir oran elde edilmiş; böylece profillere uygulanan farklı seviyelerdeki basınç kuvvetinin, "aksenal basınç kuvveti oranı (n)" olarak isimlendirilen bu oranla ifade edilmesine karar verilmiştir;

$$n = \frac{P}{P_y} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'te profilin akma yükü (P_y), çelik malzemenin karakteristik akma gerilmesi σ_y ile profilin enkesit alanı A çarpılarak hesaplanabilir;

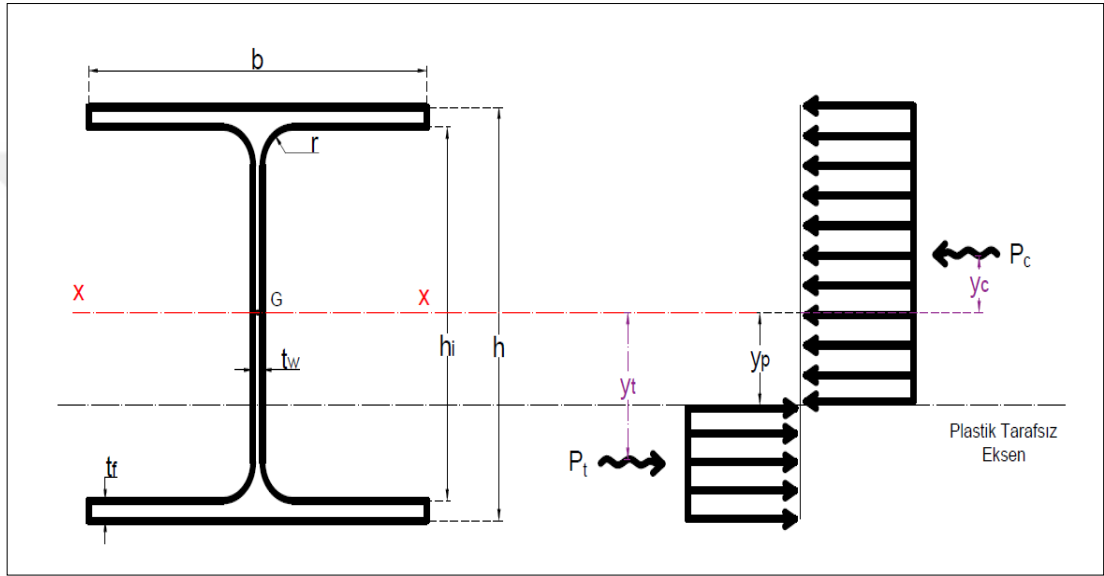
$$P_y = \sigma_y A \quad (2.5)$$

Tezde ayrıca, farklı aksenal yük oranları için hesaplanacak plastik moment kapasiteleri için “ $M_{p;n}$ ” simgesinin kullanılmasına karar verilmiştir. Örnek olarak, akma yükünün %30’una eşit bir aksenal yük etkisindeki HEA profili için hesaplanan moment kapasitesi $M_{p;0,30}$ simgesiyle ifade edilecektir. Aksenal yük oranının iki sınır değerinin (0 ve 1), incelenen her bir profil için, iki özel yükleme durumuna karşılık geldiği fark edilebilir. Basit eğilme haline karşılık gelen $n=0$ durumunda, incelenen profilin plastik moment kapasitesi en büyük değerine, yani tam plastik moment kapasitesine ($M_{p;0}=M_p$) eşittir. Aksenal yükün akma yüküne eşit olduğu $n=1$ durumunda ise, profilin plastik moment kapasitesi teorik olarak sıfıra eşittir. Diğer bir ifadeyle, aksenal yük oranı 0’dan 1’e doğru arttıkça, plastik moment kapasitesi M_p ’den 0’a doğru azalmaktadır. Ancak kapasitedeki azalmanın, ya da diğer bir ifadeyle P-M etkileşiminin, doğrusal olmadığı bilinmektedir. Mevcut yönetmelikler, çelik kiriş-kolonlar için basitleştirilmiş P-M ilişkileri tanımlamaktadır. Örnek olarak, ülkemizdeki güncel çelik tasarım yönetmeliğinde [17] tanımlanan etkileşim eğrisi, farklı eğime sahip iki doğrudan oluşmaktadır. Bu çalışmada, incelenen profillerin “gerçek” etkileşim eğrileri elde edilecektir. Ancak, elde edilecek etkileşim eğrilerinin profillerin yerel ya da genel burkulmalarının engellendiği durumlar için geçerli olduğu unutulmamalıdır; zira, profillerin plastik kapasitelerine ulaşabilmeleri için olası bütün burkulma modlarının engellenmiş olması gerekir.

İncelenen profillerin etkileşim eğrilerini elde edilebilmek için, önce tam plastik moment kapasiteleri ($M_{p;0}$); ardından, dokuz farklı n değeri için (0,1’den 0,9’a kadar 0,1 aralıklarla) plastik moment kapasiteleri ($M_{p;n}$) hesaplanmıştır. Belirli bir n değerine karşılık gelen $M_{p;n}$ kapasitesini hesaplamak için, ilk olarak incelenen yükleme durumunda kesitte oluşan plastik gerilme dağılımı çizilmelidir. Plastik gerilme dağılımı, plastik tarafsız eksenin (PTE) konumuna; yani PTE ile profilin geometrik merkezinin arasındaki y_p mesafesine, bağlıdır. Tezde, profillere etkiyen momentin üst başlıkta basınç gerilmelerine neden olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda, $0 < n < 1$ olduğunda, PTE kesitin alt yarısında konumlanacaktır. n arttıkça PTE’nin gövdeden alt başlığa doğru kayacağı; yani, y_p değerinin artacağı, fark edilebilir. Tezde hesap kolaylığı sağlması açısından, PTE’nin (i) profilin düz gövdesinde ($y_p < h/2$), (ii) profilin gövdesinin alt başlığıyla birleştiği ve eğriliklerin de olduğu bölgede ($h/2 < y_p < h/2+r$) ve (iii) profilin alt başlığında ($(h/2+r < y_p < h/2)$) bulunduğu üç özel konum için kapasite hesapları ayrı ayrı yapılmıştır. Bununla birlikte, $M_{p;n}$ hesaplarında izlenen temel

adımlar aslında PTE'nin bu üç konumu için oldukça benzerdir ve tipik bir gerilme dağılımı kullanılarak kolayca açıklanabilir.

Şekil 2.5'te PTE'nin profilin gövdesinde olduğu bir aksenal yük seviyesini temsil eden plastik gerilme dağılımı görülmektedir. Aksenal basınç kuvveti oranı 0'dan farklı olduğu için, kesitin yarısından fazlası basınç gerilmelerinin, geri kalanı ise çekme gerilmelerinin etkisindedir. Gerilme dağılımları çizilirken pekleşmenin etkisinin ihmal edildiği ve bütün liflerin akma gerilmesine ulaştığının kabul edildiği unutulmamalıdır.



Şekil 2.5. Plastik tarafsız eksen gövdede iken gerilme diyagramı

Kesitte oluşan normal gerilmenin şiddeti sabit olduğundan, kesitte oluşan basınç gerilmelerinin etkiledikleri alan üzerindeki toplamlarını (yani, integralini) ifade eden statikçe eşdeğer basınç kuvveti P_c ile kesitte oluşan çekme gerilmelerinin etkiledikleri alan üzerindeki toplamlarını ifade eden statikçe eşdeğer çekme kuvveti P_t , ilgili alanların akma gerilmesi ile çarpımından hesaplanabilir. İlgili alanlar PTE'nin konumuna bağlı olduğundan, P_c ve P_t de y_p 'ye bağlıdır. Profile etkiyen aksenal basınç kuvveti P , P_c ile P_t 'nin farkına eşittir;

$$P = P_c - P_t \quad (2.6)$$

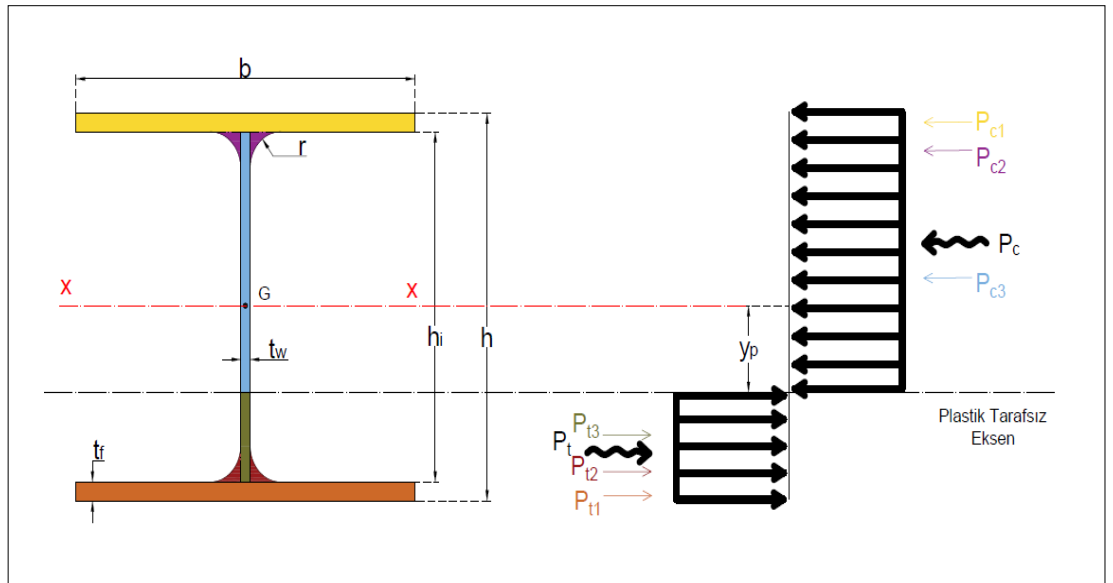
Denklem (2.6)'daki eşitlikten, PTE'nin konumu; yani y_p , kolaylıkla belirlenebilir. Profilin plastik moment kapasitesi ise P_c ve P_t kuvvetlerinin profilin geometrik merkezinden geçen ve PTE'ye paralel olan eksene, diğer bir deyişle kesitin elastik tarafsız eksenine (ETE'ye), göre momentleri alınarak hesaplanabilir.

$$M_{p,n} = P_c y_c + P_t y_t \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'de, y_c ve y_t , Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, sırasıyla, P_c ve P_t 'nin moment kollarıdır. Ancak, özellikle PTE'nin spandrelde bulunduğu konumda, y_c ve y_t 'nin hesapları oldukça karışık işlemler gerektirmektedir. Bu nedenle, kapasite hesaplarında, P_c ve P_t 'nin yerine; toplamları bu kuvvetlere eşit olan, profilin farklı alanlarına etkiyen plastik gerilme dağılımlarını temsil eden, moment kolları daha kolay belirlenebilen eşdeğer kuvvetler hesaplanmıştır. Örnek olarak, Şekil 2.5'teki gerilme dağılımına karşılık gelen plastik moment kapasitesi hesaplanırken, (i) üst başlığa, (ii) üst başlıkla gövde arasındaki spandrellere, (iii) gövdenin PTE'nin üzerinde kalan parçasına, (iv) gövdenin PTE'nin altında kalan parçasına, (v) alt spandrellere ve (vi) alt başlığa etkiyen statikçe eşdeğer kuvvetler (Şekil 2.6'da, sırasıyla P_{c1} , P_{c2} , P_{c3} , P_{t3} , P_{t2} ve P_{t1} simgeleriyle gösterilmektedir) ve kuvvet kolları (y_{c1} , y_{c2} , y_{c3} , y_{t1} , y_{t2} ve y_{t3}) ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu durumda, plastik kapasite her bir eşdeğer kuvvetin momenti, işaretine dikkat ederek, toplanarak hesaplanabilir;

$$M_{p,n} = P_{c1} y_{c1} + P_{c2} y_{c2} + P_{c3} y_{c3} + P_{t1} y_{t1} + P_{t2} y_{t2} + P_{t3} y_{t3} \quad (2.8)$$

Bu şekilde elde edilecek plastik moment kapasitesi, profilin karakteristik akma gerilmesine bağlı olacaktır. Karşılaştırmalarda kolaylık sağlanması açısından, elde edilen plastik moment kapasitesi, karakteristik akma gerilmesine oranlanırsa, bir çeşit mukavemet momenti elde edilmiş olur;



Şekil 2.6. Plastik tarafsız eksen gövde iken, kesitin farklı parçalarına etkiyen statikçe eşdeğer kuvvetler

$$W_{p;n} = \frac{M_{p;n}}{\sigma_y} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'da, $W_{p;n}$, farklı aksenal yük oranları (n) için profillerin “azaltılmış” plastik moment kapasitelerinin ($M_{p;n}$) hesabında kullanılan “azaltılmış” mukavemet momentleridir. $W_{p;0}$ değerinin, basit eğilme halindeki mukavemet momentine, yani W_p 'ye, karşılık geldiği kolayca fark edilebilir.

2.2.1. Plastik tarafsız eksenin gövdede olduğu durum

PTE'nin gövdede olduğu durumda gerilme diyagramı Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Buradan Denklem (2.6)'daki eşitliği sağlamak amacıyla,

$$P_c = \left[(b \times t_f) + 2A_s + \left(\frac{h_i}{2} \times t_w \right) + (y_p \times t_w) \right] \times \sigma_y \quad (2.10)$$

$$P_t = \left[(b \times t_f) + 2A_s + \left(\left(\frac{h_i}{2} - y_p \right) \times t_w \right) \right] \times \sigma_y \quad (2.11)$$

olmak üzere bileşke kuvvetler yukarıdaki gibi yazılabilir. Bu eşitlikler Denklem (2.6)'da yerine yazılarak;

$$P = \left[(b \times t_f) + (2A_s) + \left(\frac{h_i}{2} \times t_w \right) + (y_p \times t_w) - (b \times t_f) - (2A_s) - \left(\frac{h_i}{2} \times t_w \right) + (y_p \times t_w) \right] \times \sigma_y \quad (2.12)$$

ifadesine ulaşılır. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında P yükü,

$$P = 2y_p \times t_w \times \sigma_y \quad (2.13)$$

olarak elde edilir. σ_y yerine Denklem (2.5)'ten P_y / A kullanılarak, PTE'nin gövdede olduğu durumlarda, PTE'nin kesitin geometrik merkezine olan uzaklığı (y_p) Denklem (2.14)'teki gibi bulunur.

$$y_p = \frac{A}{2t_w} \times \frac{P}{P_y} \quad (2.14)$$

Denklem (2.4)'te belirtildiği üzere aksenal basınç kuvveti oranı Denklem (2.14)'te yerine konarak,

$$y_p = \frac{A \times n}{2t_w} \quad (2.15)$$

denklemleri elde edilir.

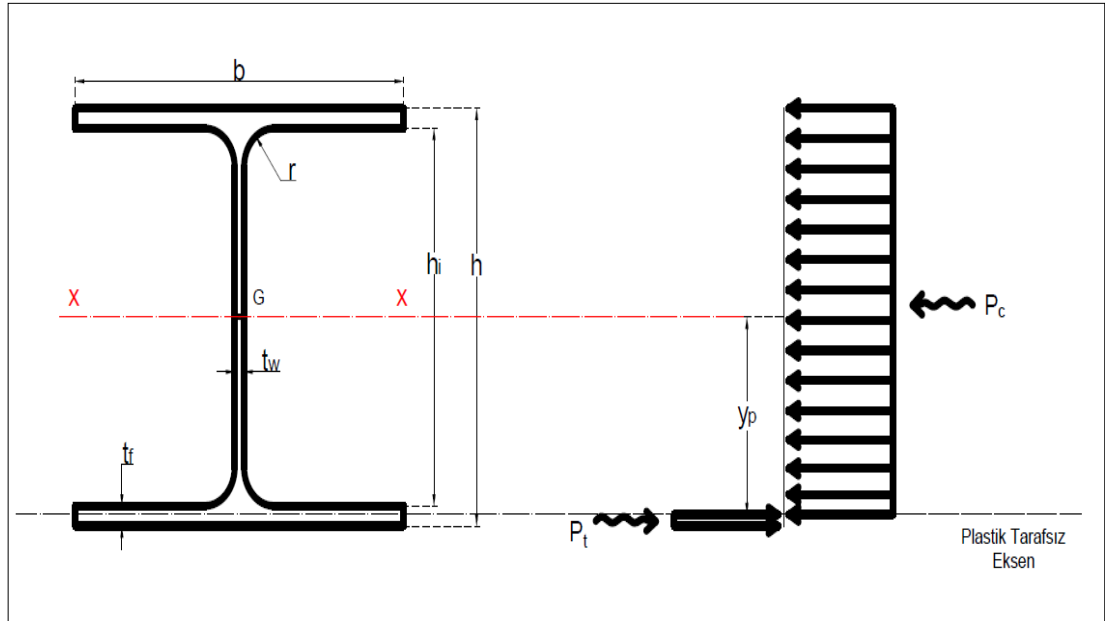
PTE'nin yerinin belirlenmesiyle, profilin plastik moment kapasitesi, eşdeğer basınç ve çekme kuvvetlerinin profilin geometrik merkezinden geçen yatay eksene göre momenti alınarak aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$W_{px;n} = \left[2A_b \times \left(\frac{h_i + t_f}{2} \right) \right] + \left[4A_s \times \left(\bar{y}_s + \frac{h_i}{2} - r \right) \right] + \left(\frac{h_i}{2} \times t_w \times \frac{h_i}{4} \right) + \left[\left(\frac{h_i}{2} - y_p \right) \times t_w \times \left(\frac{h_i}{2} - y_p + y_p \right) \right] - \left(y_p \times t_w \times \frac{y_p}{2} \right) \quad (2.16)$$

2.2.2. Plastik tarafsız eksenin başlıkta olduğu durum

PTE'nin başlıkta olduğu durumda da Bölüm 2.2.1'de tanımlandığı gibi, ilk olarak PTE'nin konumu belirlenmeli, ardından plastik moment kapasitesi hesaplanmalıdır.

PTE'nin başlıkta olduğu durumda gerilme diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Plastik tarafsız eksen başlıkta iken gerilme diyagramı

PTE'nin profilin başlığında olduğu durumda, eşdeğer basınç ve çekme kuvvetleri, Şekil 2.7'den aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$P_c = \left[(b \times t_f) + 4A_s + (h_i \times t_w) + b \times \left(y_p - \frac{h_i}{2} \right) \right] \times \sigma_y \quad (2.17)$$

$$P_t = \left[b \times \left(t_f + \frac{h_i}{2} - y_p \right) \right] \times \sigma_y \quad (2.18)$$

Denklem (2.17) ve (2.18)'de yer alan ifadeler Denklem (2.6)'da yerine yazılarak;

$$P = \left[\begin{array}{l} (b \times t_f) + 4A_s + (h_i \times t_w) + (b \times y_p) - \left(b \times \frac{h_i}{2} \right) - (b \times t_f) + (b \times y_p) \\ - \left(b \times \frac{h_i}{2} \right) \end{array} \right] \times \sigma_y \quad (2.19)$$

elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapıp, Denklem (2.5) kullanılarak;

$$P = \left[4A_s + (h_i \times t_w) + (2b \times y_p) - (b \times h_i) \right] \times \frac{P_y}{A} \quad (2.20)$$

ifadesi elde edilir. Buradan, PTE'nin geometrik merkezden uzaklığı olan y_p ,

$$y_p = \frac{(A \times n) - (4A_s) - (h_i \times t_w) + (b \times h_i)}{2b} \quad (2.21)$$

olarak elde edilir. Denklem (2.21)'de, $n = \frac{P}{P_y}$ olduğu unutulmamalıdır.

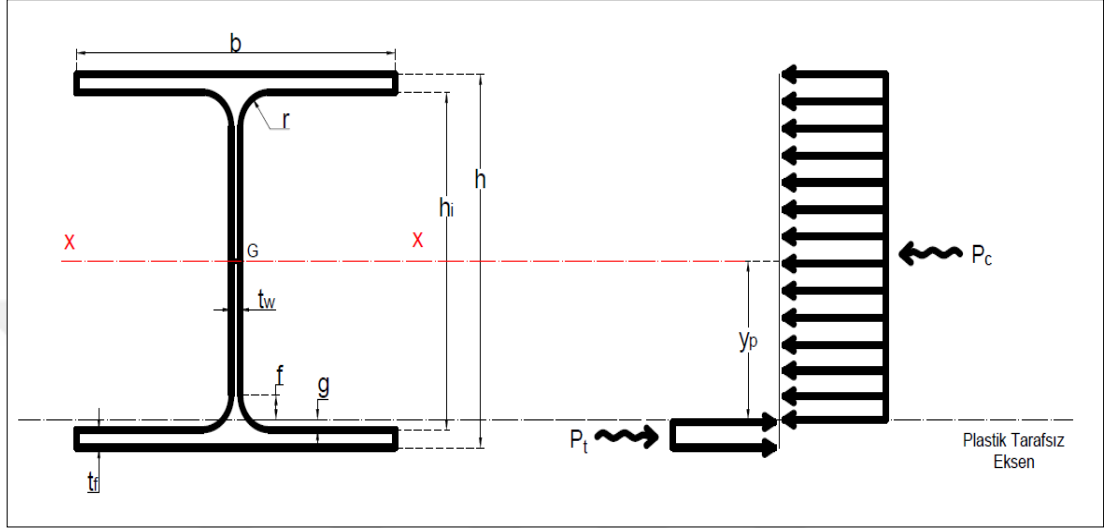
PTE'nin yerinin belirlenmesiyle profilin plastik moment kapasitesi, Şekil 2.7'deki gerilme diyagramından yola çıkılarak aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$W_{px;n} = \left[A_b \times \left(\frac{h_i + t_f}{2} \right) \right] - \left[b \times \left(y_p - \frac{h_i}{2} \right) \times \left(\frac{y_p - \frac{h_i}{2}}{2} + \frac{h_i}{2} \right) \right] \quad (2.22)$$

$$+ \left[b \times \left(t_f - y_p + \frac{h_i}{2} \right) \times \left(\frac{t_f - y_p + \frac{h_i}{2}}{2} + y_p \right) \right]$$

2.2.3. Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durum

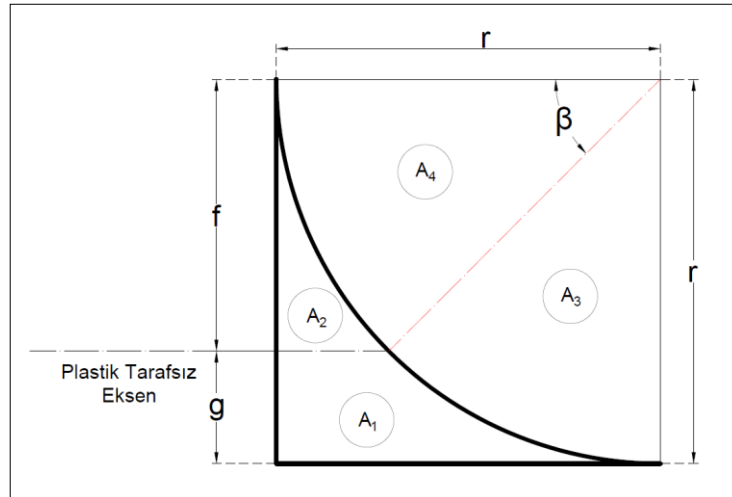
PTE'nin spandrelde olduğu durumda da Bölüm 2.2.1 ve 2.2.2'de tanımlandığı gibi, ilk olarak PTE'nin konumu belirlenmeli, ardından plastik moment kapasitesi hesaplanmalıdır. PTE spandreldeyken gerilme diyagramı Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Plastik tarafsız eksen spandrelde iken gerilme diyagramı

2.2.3.1. Spandrelin parçalara ayrılması

Plastik tarafsız eksen spandrelinden geçtiğinde, açığı bağlı genel bir denklem elde edip bundan sonraki tüm hesaplamalarda kullanabilmek için spandrel daha küçük alanlara bölünerek bu alanların her birinin gövdeyle spandrelin birleştiği noktaya olan uzaklıkları (\bar{y}) hesaplandı. Spandrelin parçalara bölünmüş hali Şekil 2.9'da yer almaktadır.



Şekil 2.9. Spandrelin alanlara bölünmesi

Şekil 2.9'da yer alan f ve g mesafelerinin toplamı şekilden de görüleceği üzere çeyrek dairenin yarıçapına eşittir.

$$r = g + f \quad (2.23)$$

Denklem (2.23)'teki eşitlikten g değeri;

$$g = r - f \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. f ve g mesafelerinin β açısına bağlı denklemleri ise sırasıyla Denklem (2.25) ve (2.26)'da yer almaktadır;

$$f = r \times \sin\beta \quad (2.25)$$

$$g = r - r \times \sin\beta \quad (2.26)$$

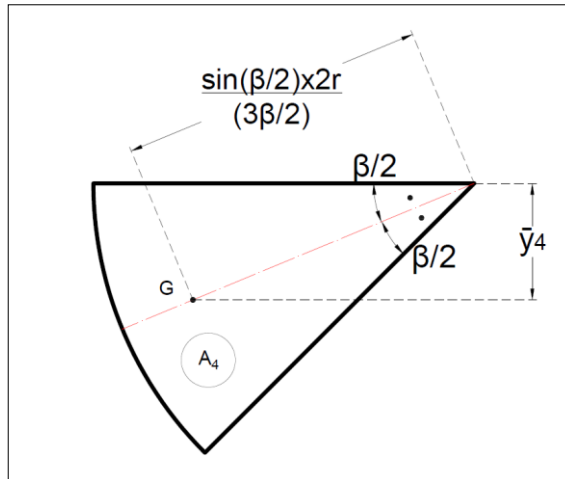
2.2.3.2. Parçaların alan ve merkeze olan uzaklıklarının hesabı

Şekil 2.9'da gösterilen A_1, A_2, A_3, A_4 nolu parçaların alanları ve bu parçaların ağırlık merkezlerinin, spandrel oluşturulan çeyrek dairenin gövde ile birleştiği yere olan uzaklıkları (\bar{y}) hesaplanmalıdır.

A_1 ve A_2 parçalarının hesaplanabilmesi için de öncelikle A_4 ve A_3 parçalarının alanları ve \bar{y} mesafelerinin hesaplanması gerekmektedir.

- A_4 parçasının alanı ve \bar{y}_4 mesafesi

A_4 parçasının detaylı çizimi Şekil 2.10'da yer almaktadır.



Şekil 2.10. A_4 parçasının detaylı çizimi

Şekil 2.10'da G, A₄ parçasının geometrik merkezini ifade etmektedir. \bar{y}_4 ile gösterilen mesafe A₄ parçasının ağırlık merkezinin spandrelin gövde ile birleştiği yere olan uzaklığını belirtmektedir.

A₄ parçasının alanı Denklem (2.27) ile gösterilmiştir,

$$A_4 = \frac{\beta}{2} \times r^2 \quad (2.27)$$

Şekil 2.10'dan açıya bağlı olarak \bar{y}_4 mesafesi;

$$\bar{y}_4 = \left(\frac{2r \times \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{3\beta}{2}} \right) \times \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (2.28)$$

olarak bulunur ve ifade düzenlenerek;

$$\bar{y}_4 = \frac{2r \times \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{3\beta}{2}} = 2r \times \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \times \left(\frac{2}{3\beta}\right) \quad (2.29)$$

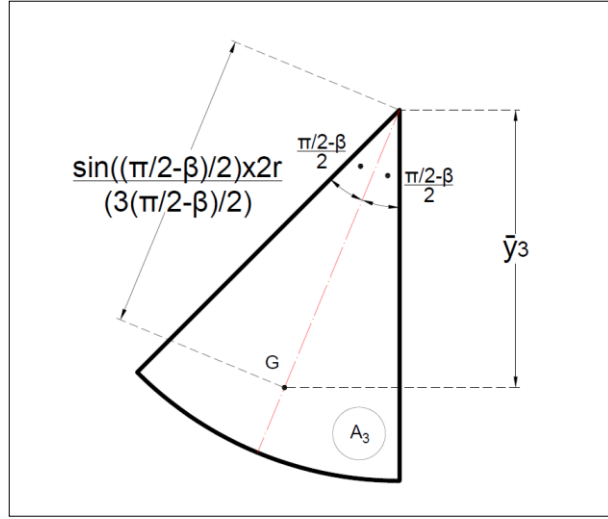
Denklem (2.29) elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapılarak,

$$\bar{y}_4 = \frac{4r \times \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{3\beta} \quad (2.30)$$

sonucuna ulaşılır. Denklem (2.27) ile (2.30) ve ikisinin arasında kalan diğer tüm işlem adımlarında β 'nin radyan cinsinden olması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır.

- A₃ parçasının alanı ve \bar{y}_3 mesafesi

A₃ parçasının detaylı çizimi Şekil 2.11'de yer almaktadır. Yine Şekil 2.10'da olduğu gibi, Şekil 2.11'de de G, A₃ parçasının ağırlık merkezini ifade etmektedir. \bar{y}_3 ile gösterilen mesafe A₃ parçasının ağırlık merkezinin spandrelin gövde ile birleştiği yere olan uzaklığını belirtmektedir.



Şekil 2.11. A₃ parçasının detaylı çizimi

A₃ parçasının alanı çeyrek dairenin alanından A₄ parçasının alanı çıkarılarak bulunur. Yani; $A_3 = A_{\text{Çeyrek Daire}} - A_4$ şeklinde gösterilebilir. Çeyrek dairenin alanı ve A₄ parçasının alanı yerine konarak;

$A_3 = \frac{\pi r^2}{4} - \frac{\beta}{2} \times r^2$ ifadesine ulaşılır. Sadeleştirmeler yapıldığında denklem (2.31) elde edilir,

$$A_3 = r^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) \quad (2.31)$$

Şekil 2.11'den açıya bağlı olarak \bar{y}_3 mesafesi;

$$\bar{y}_3 = \frac{2r \times \sin\left(\frac{(\pi/2) - \beta}{2}\right)}{3\left(\frac{(\pi/2) - \beta}{2}\right)} \times \cos\left(\frac{(\pi/2) - \beta}{2}\right) \quad (2.32)$$

olarak bulunur. İfade, "sin 2α = 2 sin α × cos α" eşitliğinden faydalanarak düzenlenecek olursa;

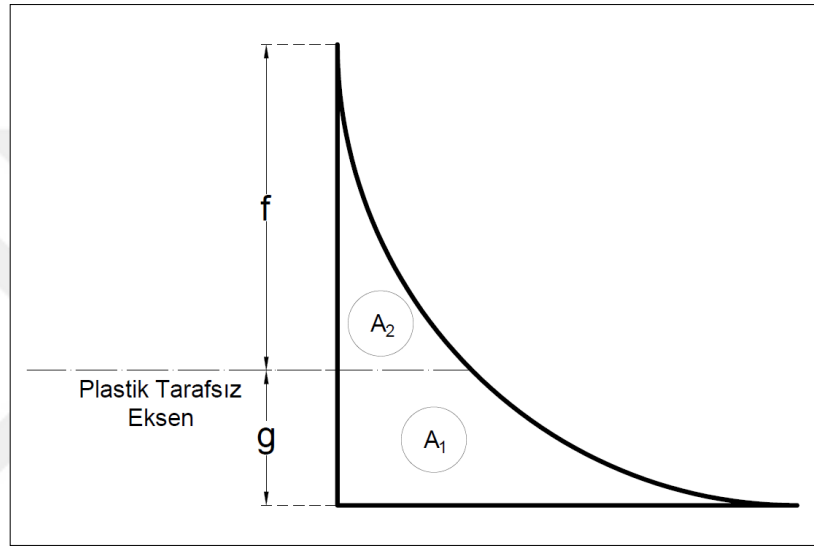
$$\bar{y}_3 = \frac{r \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)}{3\left(\frac{(\pi/2) - \beta}{2}\right)} = \frac{2r}{3 \times \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)} \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \quad (2.33)$$

şeklinde yazılabilir. Gerekli sadeleştirmeler yapılarak Denklem (2.34) elde edilir.

$$\bar{y}_3 = \frac{2r}{3\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)} \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \quad (2.34)$$

- A_1 ve A_2 parçalarının alanı ve \bar{y} mesafeleri

A_1 ve A_2 parçaları spandrel oluşturulan parçalardır, A_1 'i bulabilmek için de A_2 alanının bulunması gerekmektedir. A_1 alanı spandrelin alanından A_2 alanı çıkarılarak bulunur. A_1 ve A_2 parçalarının detaylı çizimi Şekil 2.12'de yer almaktadır.



Şekil 2.12. A_1 ve A_2 parçalarının detaylı çizimi

A_2 parçasının alanı Şekil 2.13'te detaylı bir şekilde görülen, bir kenarı çeyrek dairenin yarıçapı olan yamuk alanından, A_4 parçasının alanı çıkarılarak bulunmalıdır. Yani; $A_2 = A_{\text{yamuk}} - A_4$ şeklinde yazılabilir. Yamuk alanı da işlem kolaylığı açısından dikdörtgen ve üçgene ayrılarak çözümlendiğinde ve A_4 parçasının alanı yerine konulduğunda;

$$A_2 = \frac{(r + r - r \cos \beta)}{2} \times f - \left(\frac{\beta}{2} \times r^2 \right) \quad (2.35)$$

ifadesi elde edildi. İfadeyi daha düzenli hale getirerek;

$$A_2 = \frac{(2r - r \cos \beta) \times r \sin \beta}{2} - \frac{\beta}{2} \times r^2 \quad (2.36)$$

elde edildi ve sonrasında,

$$A_2 = \frac{2r^2 \times \sin\beta}{2} - \frac{r^2 \times \sin\beta \times \cos\beta}{2} - \frac{\beta}{2} \times r^2 \quad (2.37)$$

ifadesi yarıçap parantezine alınarak;

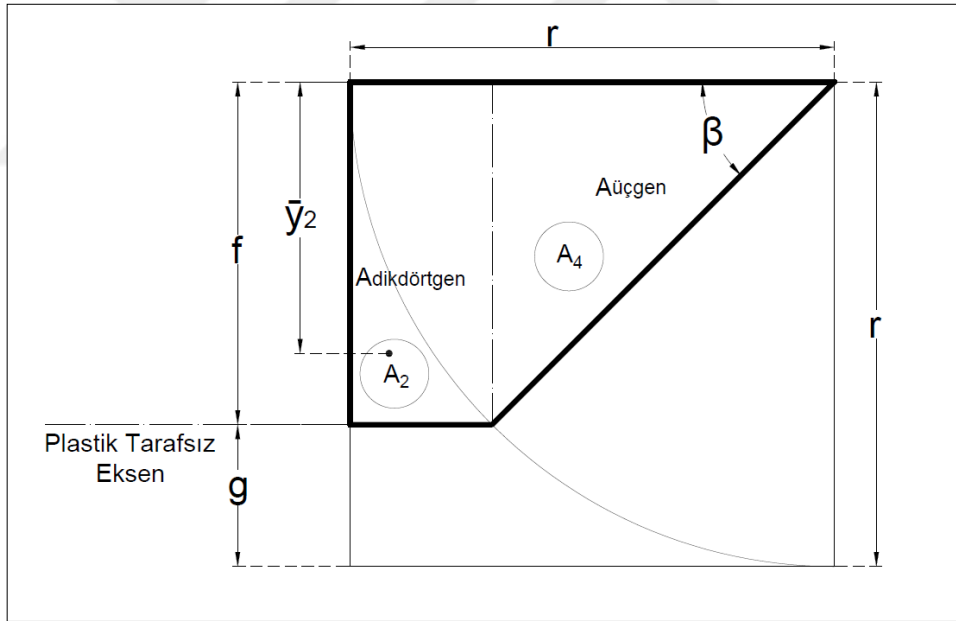
$$A_2 = \frac{r^2}{2} (2\sin\beta - \sin\beta \times \cos\beta - \beta) \quad (2.38)$$

sonucuna ulaşıldı. Buradan, “ $\sin 2\alpha = 2\sin\alpha \times \cos\alpha$ ” dönüşüm formülleri kullanılarak;

$$A_2 = \frac{r^2}{2} \left(2\sin\beta - \frac{\sin 2\beta}{2} - \beta \right) \quad (2.39)$$

elde edildi.

\bar{y}_2 mesafesini açığa bağlı olarak bulabilmek için de Şekil 2.13'te detayları verilen yamuk ve A_4 parçasından faydalanıldı.



Şekil 2.13. A_2 parçasının detaylı çizimi

Daha kolay hesap yapmak amacıyla yamuk, dikdörtgen ve üçgene parçalanarak \bar{y}_2 mesafesi;

$$\bar{y}_2 = \frac{A_{\text{Üçgen}} \times \bar{y}_{\text{Üçgen}} + A_{\text{Dikdörtgen}} \times \bar{y}_{\text{Dikdörtgen}} - A_4 \times \bar{y}_4}{A_2} \quad (2.40)$$

şeklinde yazılabilir.

Parçaların alanları ve ağırlık merkezlerinin mesafeleri yerine konularak Denklem (2.41) elde edilir;

$$\bar{y}_2 = \frac{\left(r \cos \beta \times \frac{f^2}{6} \right) + \left((r - r \cos \beta) \times \frac{f^2}{2} \right) - \left(\frac{\beta}{2} r^2 \times \frac{4r \times \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)}{3\beta} \right)}{A_2} \quad (2.41)$$

A_2 parçası bulunduktan sonra spandrel alanından A_2 çıkarılarak son parça olan A_1 'e ulaşılır. Yani; $A_s = A_1 + A_2$ 'dir.

Buradan A_1 parçasının alanı aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$A_1 = \left[r^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] - \left[\frac{r^2}{2} \left(2 \sin \beta - \frac{\sin 2\beta}{2} - \beta \right) \right] \quad (2.42)$$

Şekil 2.9'da yer alan tüm parçaların açığa bağlı alan ve ağırlık merkezlerinin mesafeleri baz alınarak \bar{y}_1 mesafesi Denklem (2.43) ile hesaplanabilir;

$$\bar{y}_1 = \frac{A_{\text{Kare}} \times \bar{y}_{\text{Kare}} - A_4 \times \bar{y}_4 - A_3 \times \bar{y}_3 - A_2 \times \bar{y}_2}{A_1} \quad (2.43)$$

2.2.3.3. β açısının hesaplanması

Önce y_p 'den bağımsız olarak sadece açığa bağlı değerler ile, Şekil 2.8'deki diyagramdan faydalanılarak Denklem (2.6)'daki eşitlik sağlanmalıdır. Bunun için;

$$P_c = \left[(b \times t_f) + (2A_1) + (2A_2) + ((h_i - g) \times t_w) + (2A_2) \right] \times \sigma_y \quad (2.44)$$

$$P_t = \left[(b \times t_f) + (2A_1) + (g \times t_w) \right] \times \sigma_y \quad (2.45)$$

eşdeğer basınç ve çekme kuvvetleri şekildeki gibi yazılıp Denklem (2.6)'da yerine konarak;

$P = \left[(b \times t_f) + (2A_1) + (4A_2) + (h_i \times t_w) - (g \times t_w) - (b \times t_f) - (2A_1) - (g \times t_w) \right] \times \sigma_y$ ifadesi elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapılarak da;

$P = \left[(4A_2) + (h_i \times t_w) - (2g \times t_w) \right] \times \sigma_y$ sonucuna ulaşılır.

Bu noktadan sonra işleme devam edebilmek için ifadedeki bilinenlerin yerine konması gerekmektedir ve β açısının hesaplanması için A_2 alanının bilinmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Buradan anlaşıldığı üzere β açısı ile A_2 alanı birbirlerine bağlı denklemlerdir. Bu sebeple denklemin elle çözümü mümkün olmadığından Excel 'hedef ara' komutu ile en doğru açı değeri birden fazla iterasyon yapılarak bilgisayara hesaplatılmıştır. Bu sebeple Bölüm 2.2.3.2'de hesaplama adımları gösterilen ve Denklem (2.39) ile ifade edilen A_2 alanı denklemde yerine konarak;

$$P = \left[\left(4 \left(\frac{r^2}{2} \left(2\sin\beta - \frac{\sin 2\beta}{2} - \beta \right) \right) \right) + (h_i \times t_w) - (2(r - r\sin\beta) \times t_w) \right] \times \sigma_y$$
 ifadesi elde edilip, gerekli sadeleştirmeler yapılarak;

$$P = \left[\begin{array}{l} (4r^2 \times \sin\beta) - (r^2 \times \sin 2\beta) - (2r^2 \times \beta) + (h_i \times t_w) - (2r \times t_w) \\ + (2r \times \sin\beta \times t_w) \end{array} \right] \times \sigma_y \quad (2.46)$$

sonucuna ulaşılır ve σ_y yerine P_y / A yazılarak aksenal basınç yükü etkisindeki β açısı;

$$A \times n = (4r^2 \sin\beta) - (r^2 \sin 2\beta) - (2r^2 \beta) + (h_i \times t_w) - (2r \times t_w) + (2r \times \sin\beta \times t_w) \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (2.47)'de n değeri için Denklem (2.4) kullanılmıştır.

2.2.3.4. Plastik tarafsız eksenin kesitin geometrik merkezine olan uzaklığının ve moment kapasitesinin bulunması

β açısına bağlı olarak formülize edilen A_1 , A_2 , A_3 , A_4 parçalarına ait alanlar ve bu parçaların ağırlık merkezlerinin çeyrek dairenin gövde ile birleştiği yere olan uzaklıklarını simgeleyen \bar{y}_1 , \bar{y}_2 , \bar{y}_3 , \bar{y}_4 mesafelerinin hesaplanmasından sonra, Şekil 2.8'deki gerilme diyagramından faydalanılarak y_p için eşdeğer basınç ve çekme kuvvetleri aşağıdaki gibi yazılır;

$$P_c = \left[(b \times t_f) + 2A_1 + 2A_2 + \left(\frac{h_i}{2} \times t_w \right) + (y_p \times t_w) + 2A_2 \right] \times \sigma_y \quad (2.48)$$

$$P_t = \left[(b \times t_f) + 2A_1 + (g \times t_w) \right] \times \sigma_y \quad (2.49)$$

Denklem (2.48) ve (2.49)'da yer alan ifadeler Denklem (2.6)'da yerine yazılarak;

$$P = \left[\begin{array}{l} (b \times t_f) + (2A_1) + (4A_2) + \left(\frac{h_i}{2} \times t_w\right) + (y_p \times t_w) - (b \times t_f) - (2A_1) \\ -(g \times t_w) \end{array} \right] \times \sigma_y \quad (2.50)$$

P yükü bulunur ve $\sigma_y = P_y / A$ eşitliği kullanılarak y_p mesafesine ulaşılır,

$$y_p = \left[\frac{(A \times n) - (4A_2) - \left(\frac{h_i}{2} \times t_w\right) + (g \times t_w)}{t_w} \right] \quad (2.51)$$

Şekil 2.8'deki gerilme dağılımından plastik moment kapasitesi için;

$$\begin{aligned} W_{px;n} = & \left[2A_b \times \left(\frac{h_i + t_f}{2}\right) \right] + \left[4A_1 \times \left(\bar{y}_1 + \frac{h_i}{2} - r\right) \right] + \left[2A_2 \times \left(\bar{y}_2 + \frac{h_i}{2} - r\right) \right] \\ & + \left(\frac{h_i}{2} \times t_w \times \frac{h_i}{4}\right) - \left[\left(\frac{h_i}{2} - g\right) \times t_w \times \left(\frac{h_i - g}{2}\right) \right] - \left[2A_2 \times \left(\bar{y}_2 + \frac{h_i}{2} - r\right) \right] \\ & + \left[g \times t_w \times \left(\frac{g}{2} + \frac{h_i}{2} - g\right) \right] \end{aligned} \quad (2.52)$$

olarak yazılabilir. Buradan sadeleştirmeler sonucu PTE'nin profilin eğriliklerinde olduğu durumdaki plastik moment kapasitesi için aşağıdaki ilişki elde edilir;

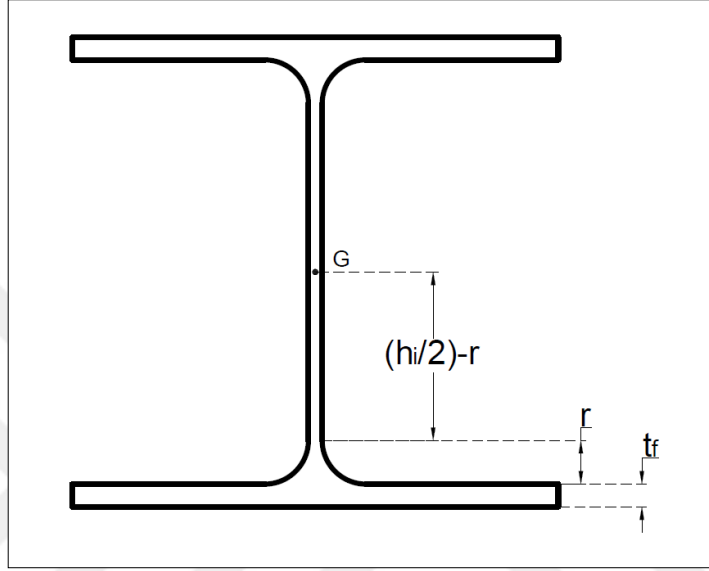
$$\begin{aligned} W_{px;n} = & \left[2A_b \times \left(\frac{h_i + t_f}{2}\right) \right] + \left[4A_1 \times \left(\bar{y}_1 + \frac{h_i}{2} - r\right) \right] + \left(\frac{h_i}{2} \times t_w \times \frac{h_i}{4}\right) \\ & - \left[\left(\frac{h_i}{2} - g\right) \times t_w \times \left(\frac{h_i - g}{2}\right) \right] + \left[g \times t_w \times \left(\frac{g}{2} + \frac{h_i}{2} - g\right) \right] \end{aligned} \quad (2.53)$$

2.3. Aksel Yükleme Kesite Etkitilmesi

Profilde basınç kuvvetinin olmadığı durumda $y_p=0$ olduğu daha önce belirtilmişti. Profile etkiyen P basınç kuvveti arttıkça, PTE'nin alt başlığa doğru hareket edeceği fark edilebilir. Elbette ki bu durum, pozitif eğilme momenti için geçerlidir. Yani, eğilme momenti nedeniyle basınç gerilmelerinin üst başlıkta olduğu durum için geçerlidir. Aksel yük akma yükünün küçük yüzdelere eşit olduğunda, PTE'nin gövdede olacağı, yük arttıkça spandrelere doğru kayacağı, kesitin akma yüküne yaklaştıkça alt

başlıkta konumlanacağı görülebilir. PTE'nin bu üç bölgeden hangisinde olduğu hesaplanan y_p değerinden anlaşılabilir.

Yani, $y_p < \frac{h_i}{2} - r$ ise gövdede, $\frac{h_i}{2} - r < y_p < \frac{h_i}{2}$ ise spandrelde, $\frac{h_i}{2} < y_p < \frac{h_i}{2} + t_f$ ise alt başlıktadır. Şekil 2.14'te y_p 'ler için belirtilen bu aralıklar gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Güçlü ekseninde sınır durumlar

HEA300 profilinin sınır değerleri ise; gövde için $y_p < 104$, spandrel için $104 < y_p < 131$ ve başlık için $131 < y_p < 145$ 'tir.

Tüm aksenal yüklemeler için sırasıyla PTE'nin gövdede, başlıkta ve spandrelde olduğu varsayımları kontrol edilmelidir. PTE'nin gerçek yeri bulunduğu anda ise diğer varsayımların kontrol edilmesine gerek yoktur. Fakat HEA300 dışındaki profillerde Excel'de daha rahat işlem yapılması amacıyla tüm y_p değerleri hesaplanmış ve sınır değerlerle kıyaslama bilgisayara yaptırılmıştır. Böylece, elle hesapları gösterilen HEA300 için gereksiz işlem yapmaktan kaçınılmış, tablolarda ise tüm profiller için doğru aralıkta olan y_p ve $W_{px;n}$ değerlerine yer verilmiştir.

2.3.1. HEA300 profiline akma yükünün %10'una eşit aksenal yükün etkimesi durumu

HEA300 profiline, akma yükünün %10'una eşit bir aksenal yük etkidiği durumda ilk olarak PTE'nin gövdede olduğu kabulünün doğru olup olmadığı Denklem (2.15)'ten y_p değeri bulunarak kontrol edilmelidir;

$$y_p = \frac{11,25 \times 10^3 \times 0,1}{2 \times 8,5} = 66,19 \text{ mm olarak bulunur.}$$

y_p değerinin 104 mm'den küçük olması durumunda PTE'nin gövdede olacağı daha önce belirtilmişti. Dolayısıyla, PTE'nin gövdede olduğu, başlık ve spandrel kabullerinin yapılmasına gerek olmadığı açıkça görülebilir. Bu durumda plastik moment kapasitesi ise Denklem (2.16) kullanılarak kolayca bulunabilir;

$$\begin{aligned} W_{px;0,10} &= \left[2 \times 4200 \times \left(\frac{262+14}{2} \right) \right] + \left[4 \times 156,44 \times \left(20,97 + \frac{262}{2} - 27 \right) \right] \\ &+ \left(\frac{262}{2} \times 8,5 \times \frac{262}{4} \right) + \left[\left(\frac{262}{2} - 66,19 \right) \times 8,5 \times \left(\frac{\frac{262}{2} - 66,19}{2} + 66,19 \right) \right] \\ &- \left(66,19 \times 8,5 \times \frac{66,19}{2} \right) = 1346 \times 10^3 \text{ mm}^3 \text{ olarak bulunur.} \end{aligned}$$

2.3.2. HEA300 profiline akma yükünün %20'sine eşit aksel yükün etkimesi durumu

Bölüm 2.3'te belirtildiği üzere ilk olarak gövde kabulünün doğru olup olmadığı kontrol edilmelidir. Bunun için Denklem (2.15)'ten y_p değeri hesaplanmalıdır;

$$y_p = \frac{11,25 \times 10^3 \times 0,20}{2 \times 8,5} = 132,39 \text{ mm olarak bulunur.}$$

y_p değerinin 104 mm'den daha büyük olması PTE'nin gövdede olmadığını açıkça göstermektedir. Bu yüzden başlıkta olduğu varsayımının da kontrol edilmesi gerekmektedir. PTE'nin başlıkta olduğu durumdaki gerilme dağılımından ulaşılan ve Denklem (2.21) kullanılarak bulunabilen y_p değeri;

$$y_p = \frac{(11,25 \times 10^3 \times 0,20) - (4 \times 156,45) - (262 \times 8,5) + (300 \times 262)}{2 \times 300} = 129,99 \text{ mm'dir.}$$

PTE başlıkta diyebilmek için y_p değerinin $131 < y_p < 145$ aralığında olması gerektiği belirtilmişti. Bulunan y_p değerinin bu aralığı da sağlamadığı dolayısıyla spandrel kontrollerinin yapılması gerektiği görülmektedir. Bunun için ilk olarak PTE spandrel bölüğünde oluşacağı varsayılan parçaların alanları ve \bar{y} mesafeleri hesaplanmalıdır.

- A_4 parçasının alanı ve \bar{y}_4 mesafesi

A_4 parçasının alanı Denklem (2.27) kullanılarak hesaplanabilir. HEA300 profilinin kesit özelliklerine ait sayısal değerler ve daha önce belirtildiği üzere bilgisayara iterasyon yaptırılarak bulunan β açısı yerine konarak;

$$A_4 = \frac{0,75}{2} \times 27^2 = 274,46 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

A_4 parçasının \bar{y}_4 mesafesi ise Denklem (2.30) kullanılarak hesaplanabilir;

$$\bar{y}_4 = \frac{4 \times 27 \times \sin^2\left(\frac{0,75}{2}\right)}{3 \times 0,75} = 6,46 \text{ mm olarak bulunur.}$$

- A_3 parçasının alanı ve \bar{y}_3 mesafesi

A_3 parçasının alanı için Denklem (2.31), \bar{y}_3 mesafesi için Denklem (2.34) kullanılarak;

$$A_3 = 27^2 \times \left(\frac{\pi}{4} - \frac{0,75}{2}\right) = 298,09 \text{ mm}^2 \text{ ve } \bar{y}_3 = \frac{2 \times 27}{3 \left(\frac{\pi}{2} - 0,75\right)} \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - 0,75\right) = 16,06 \text{ mm}$$

olarak bulunur.

- A_2 parçasının alanı ve \bar{y}_2 mesafesi

A_2 parçasının alanı için Denklem (2.39) kullanılarak;

$$A_2 = \frac{27^2}{2} \left(2 \times \sin(0,75) - \frac{\sin(2 \times 0,75)}{2} - (0,75) \right) = 42,17 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

\bar{y}_2 mesafesi için ise Denklem (2.41) kullanılarak;

$$\bar{y}_2 = \frac{27 \times \cos(0,75) \times \frac{(18,46)^2}{6}}{42,17} + \frac{(27 - 27 \times \cos(0,75)) \times \frac{(18,46)^2}{2}}{42,17} - \frac{\frac{(0,75)}{2} \times 27^2 \times \frac{4 \times 27 \times \sin^2\left(\frac{0,75}{2}\right)}{3 \times (0,75)}}{42,17} = 13,98 \text{ mm olarak bulunur.}$$

- A_1 parçasının alanı ve \bar{y}_1 mesafesi

A_1 parçasının alanı için Denklem (2.42) kullanılarak;

$$A_1 = \left(27^2 \times \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right) - \left(\frac{27^2}{2} \left(2\sin(0,75) - \frac{\sin(2 \times 0,75)}{2} - (0,75) \right) \right) = 114,27 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

\bar{y}_1 mesafesi için ise Denklem (2.43) kullanılır ve,

$$\bar{y}_1 = \frac{27^2 \times \frac{27}{2} - (274,46 \times 6,46) - (298,09 \times 16,06) - (42,17 \times 13,98)}{114,27} = 23,55 \text{ mm}$$

olarak hesaplanır.

Tüm alan ve \bar{y} mesafelerinin hesaplamaları yapıldıktan sonra, Bölüm 2.2.3.3'te çıkarılan Denklem (2.47) kullanılarak akma yükünün %20'si için β ;

$$11,25 \times 10^3 \times 0,20 = (4 \times 27^2 \times \sin\beta) - (27^2 \times \sin 2\beta) - (2 \times 27^2 \times \beta) + (262 \times 8,5) - (2 \times 27 \times 8,5) + (2 \times 27 \times \sin\beta \times 8,5) \text{ ifadesi toparlanarak,}$$

$3375 \times \sin\beta - 729 \times \sin 2\beta - 1458 \times \beta - 482,56 = 0$ şeklinde yazılabilir. Buradan;

$\beta = 0,75$ rad olarak bulunur.

Spandrel kabulünün doğruluğunu kontrol edebilmek için Denklem (2.51) kullanılarak hesaplanan y_p değeri;

$$y_p = \left(\frac{11,25 \times 10^3 \times 0,20 - (4 \times 42,17) - \left(\frac{262}{2} \times 8,5 \right) + (8,54 \times 8,5)}{8,5} \right) = 122,46 \text{ mm'dir.}$$

Bulunan y_p değerinin $104 < y_p < 131$ aralığında olması PTE'nin spandrelde olduğu varsayımının doğru olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla Denklem (2.52) kullanılarak akma yükünün %20'si için plastik moment kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\begin{aligned}
W_{px;0,20} &= \left[2 \times 4200 \times \left(\frac{262 + 14}{2} \right) \right] + \left[4 \times 114,27 \times \left(23,55 + \frac{262}{2} - 27 \right) \right] \\
&+ \left(\frac{262}{2} \times 8,5 \times \frac{262}{4} \right) - \left[\left(\frac{262}{2} - 8,54 \right) \times 8,5 \times \left(\frac{262}{2} - 8,54 \right) \right] \\
&+ \left[8,54 \times 8,5 \times \left(\frac{8,54}{2} + \frac{262}{2} - 8,54 \right) \right]
\end{aligned}$$

Buradan ifade toparlanarak $W_{px;0,20} = 1236 \times 10^3 \text{ mm}^3$ olarak bulunur.

2.3.3. HEA300 profiline akma yükünün %30'una eşit aksel yükün etkimesi durumu

Bölüm 2.3'te belirtildiği üzere ilk olarak gövde kabulünün doğru olup olmadığı kontrol edilmelidir. Bunun için Denklem (2.15) kullanılarak y_p değeri;

$$y_p = \frac{11,25 \times 10^3 \times 0,30}{2 \times 8,5} = 198,58 \text{ mm olarak bulunur.}$$

y_p değerinin 104 mm'den daha büyük olması PTE'nin gövdede olmadığını açıkça göstermektedir. Bu yüzden sırasıyla başlıkta ve spandrelde olduğu varsayımlarının da kontrol edilmesi gerekmektedir. PTE'nin başlıkta olduğu durumda, Denklem (2.21) kullanılarak bulunabilen y_p değeri;

$$y_p = \frac{(11,25 \times 10^3 \times 0,30) - (4 \times 156,45) - (262 \times 8,5) + (300 \times 262)}{2 \times 300} = 131,87 \text{ mm'dir.}$$

Bulunan y_p değerinin $131 < y_p < 145$ aralığında olması PTE'nin başlıkta olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla spandrelde olduğu varsayımının kontrol edilmesine gerek yoktur. Denklem (2.22) kullanılarak %30'luk bir akma yükü için plastik moment kapasitesi;

$$\begin{aligned}
W_{px;0,30} &= \left[4200 \times \left(\frac{262 + 14}{2} \right) \right] - \left[300 \times \left(131,87 - \frac{262}{2} \right) \times \left(\frac{131,87 - \frac{262}{2}}{2} + \frac{262}{2} \right) \right] \\
&+ \left[300 \times \left(14 - 131,87 + \frac{262}{2} \right) \times \left(\frac{14 - 131,87 + \frac{262}{2}}{2} + 131,87 \right) \right] = 1090 \times 10^3 \text{ mm}^3 \text{ 'tür.}
\end{aligned}$$

2.4. Güçlü Yönde Çalışan HEA Profilere Ait Plastik Moment Kapasite Tabloları

HEA300 profiline akma yükünün %30'una eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin başlıkta olacağı Bölüm 2.3.2'de hesaplanmıştır. Plastik tarafsız eksen %30'dan itibaren başlığa düşmeye devam edeceğinden PTE'nin yerini bulmaya yönelik yapılan varsayımların yapılmasına gerek yoktur. Bu yüzden hem HEA300 hem de diğer HEA profiller için bilgisayar ortamında yapılan hesaplamalara ait tablolar Tablo 2.2'den Tablo 2.10'a kadar olmak üzere aşağıda verilmiştir. Tablo 2.1'de ise karşılaştırmaların daha kolay yapılabilmesi için profillerin güçlü yöndeki sınır y_p değerlerine yer verilmiştir.

Tablo 2.1. Profillerin güçlü yöndeki sınır y_p değerleri

PROFİL TİPİ	SINIR " y_p " DEĞERLERİ		
	GÖVDE	SPANDREL	BAŞLIK
	" $h_i/2-r$ " (mm)	" $h_i/2$ " (mm)	" $h_i/2+t_f$ " (mm)
HEA100	28	40	48
HEA120	37	49	57
HEA140	46	58	66,5
HEA160	52	67	76
HEA180	61	76	85,5
HEA200	67	85	95
HEA220	76	94	105
HEA240	82	103	115
HEA260	88,5	112,5	125
HEA280	98	122	135
HEA300	104	131	145
HEA320	112,5	139,5	155
HEA340	121,5	148,5	165
HEA360	130,5	157,5	175
HEA400	149	176	195
HEA450	172	199	220
HEA500	195	222	245
HEA550	219	246	270
HEA600	243	270	295
HEA650	267	294	320

Tablo 2.1.(Devam) Profillerin güçlü yöndeki sınır y_p değerleri

PROFİL TİPİ	SINIR " y_p " DEĞERLERİ		
	GÖVDE	SPANDREL	BAŞLIK
	" $h_i/2-r$ " (mm)	" $h_i/2$ " (mm)	" $h_i/2+t_f$ " (mm)
HEA700	291	318	345
HEA800	337	367	395
HEA900	385	415	445
HEA1000	434	464	495

Tablo 2.2. Kesite %10 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI " $n=0,10$ ($P=0,10P_y$)" İKEN		
	y_p (mm)	$W_{px;0,10}$ ($\times 10^3$ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	21,24	80,76	GÖVDEDE
HEA120	25,34	116,3	GÖVDEDE
HEA140	28,56	169,0	GÖVDEDE
HEA160	32,31	238,9	GÖVDEDE
HEA180	37,71	316,3	GÖVDEDE
HEA200	41,41	418,3	GÖVDEDE
HEA220	45,96	553,7	GÖVDEDE
HEA240	51,22	724,9	GÖVDEDE
HEA260	57,88	894,6	GÖVDEDE
HEA280	60,79	1083	GÖVDEDE
HEA300	66,19	1346	GÖVDEDE
HEA320	69,09	1585	GÖVDEDE
HEA340	70,25	1804	GÖVDEDE
HEA360	71,38	2038	GÖVDEDE
HEA400	72,26	2504	GÖVDEDE
HEA450	77,40	3147	GÖVDEDE
HEA500	82,31	3868	GÖVDEDE
HEA550	84,70	4532	GÖVDEDE
HEA600	87,10	5252	GÖVDEDE
HEA650	89,50	6028	GÖVDEDE
HEA700	89,82	6915	GÖVDEDE
HEA800	95,28	8563	GÖVDEDE
HEA900	100,2	10651	GÖVDEDE
HEA1000	105,1	12642	GÖVDEDE

Akma yükünün belli yüzdelere karşılık gelen aksel basınç yükleri profillere etkilendiğinde, PTE'nin yeri bilinmediğinden üç durum için de moment ve tarafsız eksene olan uzaklık bilgisayar ortamında ayrı ayrı hesaplanmıştır. Sonrasında, Bölüm 2.3'te gösterilen sınır değerler ile kıyaslama yapılarak PTE'nin gerçek yeri bulunmuş ve tablolarda bu değerler belirtilmiştir. Kesitlere %10 akma yüküne eşit bir aksel yük etkilendiğinde profillerin tamamı için PTE'nin gövdede olduğu Tablo 2.2'de görülmektedir.

Tablo 2.3. Kesite %20 akma yüküne eşit bir aksel yük etkiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,20 (P=0,20P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,20} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	37,36	74,24	SPANDRELDE
HEA120	46,07	106,9	SPANDRELDE
HEA140	54,15	155,7	SPANDRELDE
HEA160	61,37	220,2	SPANDRELDE
HEA180	71,18	291,0	SPANDRELDE
HEA200	78,35	385,2	SPANDRELDE
HEA220	87,55	509,6	SPANDRELDE
HEA240	96,07	666,5	SPANDRELDE
HEA260	105,6	820,7	SPANDRELDE
HEA280	114,0	994,9	SPANDRELDE
HEA300	122,5	1236	SPANDRELDE
HEA320	130,1	1457	SPANDRELDE
HEA340	136,2	1663	SPANDRELDE
HEA360	141,2	1885	SPANDRELDE
HEA400	144,5	2332	GÖVDEDE
HEA450	154,8	2940	GÖVDEDE
HEA500	164,6	3624	GÖVDEDE
HEA550	169,4	4263	GÖVDEDE
HEA600	174,2	4956	GÖVDEDE
HEA650	179,0	5704	GÖVDEDE
HEA700	179,6	6564	GÖVDEDE
HEA800	190,6	8155	GÖVDEDE
HEA900	200,3	10169	GÖVDEDE
HEA1000	210,2	12095	GÖVDEDE

Profillere %20 akma yüküne eşdeğer bir aksel basınç yüklemesi yapıldığında HEA400 profiline kadar PTE spandrel sınırları içindeyken HEA400den itibaren hala

gövdede olduğu Tablo 2.3'ten açıkça görülmektedir. Büyük kesitli profillerde gövde kalınlığının daha fazla olması PTE'nin belirtilen yükte yer değiştirmemesini sağlamıştır.

Tablo 2.4. Kesite %30 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,30 (P=0,30P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,30} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	40,57	65,83	BAŞLIKTA
HEA120	49,61	94,54	BAŞLIKTA
HEA140	58,65	137,6	BAŞLIKTA
HEA160	67,52	194,8	BAŞLIKTA
HEA180	76,70	256,9	BAŞLIKTA
HEA200	85,58	340,2	BAŞLIKTA
HEA220	94,76	449,9	BAŞLIKTA
HEA240	103,8	588,4	BAŞLIKTA
HEA260	113,3	724,2	BAŞLIKTA
HEA280	122,8	877,8	BAŞLIKTA
HEA300	131,9	1090	BAŞLIKTA
HEA320	140,5	1286	BAŞLIKTA
HEA340	149,4	1469	BAŞLIKTA
HEA360	158,3	1666	BAŞLIKTA
HEA400	176,5	2067	BAŞLIKTA
HEA450	199,2	2612	BAŞLIKTA
HEA500	221,8	3228	SPANDRELDE
HEA550	241,4	3818	SPANDRELDE
HEA600	258,0	4463	SPANDRELDE
HEA650	268,5	5163	SPANDRELDE
HEA700	269,5	5979	GÖVDEDE
HEA800	285,8	7474	GÖVDEDE
HEA900	300,5	9366	GÖVDEDE
HEA1000	315,3	11184	GÖVDEDE

Tablo 2.4'te profillere etkiyen %30 akma yüküne eşit basınç yükleri sebebiyle, HEA500 profiline kadar PTE'nin başlığa kaydığı, HEA500'den sonraki 4 profilde spandrelde ve çok daha büyük kesitli HEA700-800-900 ve 1000 profillerinde gövde kalınlıklarının etkisiyle hala gövdede çıktığı görülmektedir. Gerek elle hesaplamalarda gerekse tablolarda görüldüğü üzere yük arttıkça PTE'nin yeri gövdeden spandrelde, spandrelde de başlığa kaymaktadır. Tablo 2.5'te profillerin üç tanesi dışında tüm

profillerde PTE başlığa kaymış durumdayken, Tablo 2.6'dan itibaren profillerin tamamında PTE'nin başlıkta olduğu görülmektedir.

Tablo 2.5. Kesite %40 akma yüküne eşit bir aksel yük etkiğinde plastik tarafsız akselin yeri ve güçlü akseldeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,40 (P=0,40P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,40} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	41,63	57,10	BAŞLIKTA
HEA120	50,67	81,84	BAŞLIKTA
HEA140	59,77	119,0	BAŞLIKTA
HEA160	68,73	168,3	BAŞLIKTA
HEA180	77,96	221,9	BAŞLIKTA
HEA200	86,93	293,8	BAŞLIKTA
HEA220	96,23	388,4	BAŞLIKTA
HEA240	105,4	508,0	BAŞLIKTA
HEA260	115,0	625,1	BAŞLIKTA
HEA280	124,6	757,4	BAŞLIKTA
HEA300	133,7	941,0	BAŞLIKTA
HEA320	142,6	1110	BAŞLIKTA
HEA340	151,7	1268	BAŞLIKTA
HEA360	160,7	1438	BAŞLIKTA
HEA400	179,1	1784	BAŞLIKTA
HEA450	202,2	2255	BAŞLIKTA
HEA500	225,2	2787	BAŞLIKTA
HEA550	248,8	3296	BAŞLIKTA
HEA600	272,4	3854	BAŞLIKTA
HEA650	295,8	4464	BAŞLIKTA
HEA700	319,0	5188	BAŞLIKTA
HEA800	363,9	6529	SPANDRELDE
HEA900	398,8	8243	SPANDRELDE
HEA1000	420,4	9908	GÖVDEDE

Tablo 2.6. Kesite %50 akma yüküne eşit bir aksel yük etkiğinde plastik tarafsız akselin yeri ve güçlü akseldeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,50 (P=0,50P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,50} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	42,69	48,15	BAŞLIKTA
HEA120	51,72	68,86	BAŞLIKTA
HEA140	60,89	100,1	BAŞLIKTA

Tablo 2.6.(Devam) Kesite %50 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,50 (P=0,50P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,50} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA160	69,94	141,5	BAŞLIKTA
HEA180	79,22	186,3	BAŞLIKTA
HEA200	88,27	246,6	BAŞLIKTA
HEA220	97,69	326,0	BAŞLIKTA
HEA240	107,0	426,4	BAŞLIKTA
HEA260	116,7	524,5	BAŞLIKTA
HEA280	126,3	635,4	BAŞLIKTA
HEA300	135,6	789,4	BAŞLIKTA
HEA320	144,6	931,6	BAŞLIKTA
HEA340	153,9	1064	BAŞLIKTA
HEA360	163,1	1207	BAŞLIKTA
HEA400	181,8	1497	BAŞLIKTA
HEA450	205,2	1892	BAŞLIKTA
HEA500	228,5	2339	BAŞLIKTA
HEA550	252,4	2765	BAŞLIKTA
HEA600	276,1	3233	BAŞLIKTA
HEA650	299,9	3745	BAŞLIKTA
HEA700	323,3	4352	BAŞLIKTA
HEA800	371,2	5475	BAŞLIKTA
HEA900	418,3	6918	BAŞLIKTA
HEA1000	466,1	8334	BAŞLIKTA

Tablo 2.7. Kesite %60 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,60 (P=0,60P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,60} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	43,75	38,97	BAŞLIKTA
HEA120	52,78	55,63	BAŞLIKTA
HEA140	62,01	80,75	BAŞLIKTA
HEA160	71,15	114,1	BAŞLIKTA
HEA180	80,47	150,2	BAŞLIKTA
HEA200	89,62	198,8	BAŞLIKTA
HEA220	99,15	262,7	BAŞLIKTA
HEA240	108,6	343,6	BAŞLIKTA
HEA260	118,3	422,5	BAŞLIKTA

Tablo 2.7.(Devam) Kesite %60 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,60 (P=0,60P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,60} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA280	128,1	511,7	BAŞLIKTA
HEA300	137,5	635,8	BAŞLIKTA
HEA320	146,7	750,5	BAŞLIKTA
HEA340	156,1	857,2	BAŞLIKTA
HEA360	165,5	972,1	BAŞLIKTA
HEA400	184,4	1206	BAŞLIKTA
HEA450	208,1	1524	BAŞLIKTA
HEA500	231,8	1884	BAŞLIKTA
HEA550	255,9	2227	BAŞLIKTA
HEA600	279,9	2604	BAŞLIKTA
HEA650	303,9	3015	BAŞLIKTA
HEA700	327,6	3504	BAŞLIKTA
HEA800	375,9	4407	BAŞLIKTA
HEA900	423,6	5568	BAŞLIKTA
HEA1000	471,9	6707	BAŞLIKTA

Tablo 2.8. Kesite %70 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,70 (P=0,70P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,70} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	44,81	29,57	BAŞLIKTA
HEA120	53,83	42,12	BAŞLIKTA
HEA140	63,13	61,09	BAŞLIKTA
HEA160	72,37	86,28	BAŞLIKTA
HEA180	81,73	113,5	BAŞLIKTA
HEA200	90,96	150,2	BAŞLIKTA
HEA220	100,6	198,4	BAŞLIKTA
HEA240	110,2	259,5	BAŞLIKTA
HEA260	120,0	319,0	BAŞLIKTA
HEA280	129,8	386,3	BAŞLIKTA
HEA300	139,4	480,0	BAŞLIKTA
HEA320	148,8	566,7	BAŞLIKTA
HEA340	158,3	647,3	BAŞLIKTA
HEA360	167,9	734,2	BAŞLIKTA
HEA400	187,1	911,1	BAŞLIKTA

Tablo 2.8.(Devam) Kesite %70 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,70 (P=0,70P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,70} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA450	211,1	1151	BAŞLIKTA
HEA500	235,1	1423	BAŞLIKTA
HEA550	259,4	1682	BAŞLIKTA
HEA600	283,7	1966	BAŞLIKTA
HEA650	307,9	2276	BAŞLIKTA
HEA700	332,0	2645	BAŞLIKTA
HEA800	380,7	3326	BAŞLIKTA
HEA900	429,0	4202	BAŞLIKTA
HEA1000	477,7	5060	BAŞLIKTA

Tablo 2.9. Kesite %80 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve güçlü eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,80 (P=0,80P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,80} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	45,88	19,94	BAŞLIKTA
HEA120	54,89	28,35	BAŞLIKTA
HEA140	64,26	41,08	BAŞLIKTA
HEA160	73,58	57,99	BAŞLIKTA
HEA180	82,99	76,24	BAŞLIKTA
HEA200	92,31	100,8	BAŞLIKTA
HEA220	102,1	133,2	BAŞLIKTA
HEA240	111,8	174,3	BAŞLIKTA
HEA260	121,7	214,1	BAŞLIKTA
HEA280	131,5	259,2	BAŞLIKTA
HEA300	141,2	322,1	BAŞLIKTA
HEA320	150,9	380,4	BAŞLIKTA
HEA340	160,6	434,5	BAŞLIKTA
HEA360	170,2	492,9	BAŞLIKTA
HEA400	189,7	611,6	BAŞLIKTA
HEA450	214,1	772,8	BAŞLIKTA
HEA500	238,4	954,9	BAŞLIKTA
HEA550	262,9	1129	BAŞLIKTA
HEA600	287,5	1319	BAŞLIKTA
HEA650	311,9	1527	BAŞLIKTA
HEA700	336,3	1775	BAŞLIKTA

Tablo 2.9.(Devam) Kesite %80 akma yüküne eşit bir aksel yük etkidiğinde plastik tarafsız akselin yeri ve güçlü akseldeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,80 (P=0,80P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,80} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA800	385,5	2231	BAŞLIKTA
HEA900	434,3	2818	BAŞLIKTA
HEA1000	483,4	3394	BAŞLIKTA

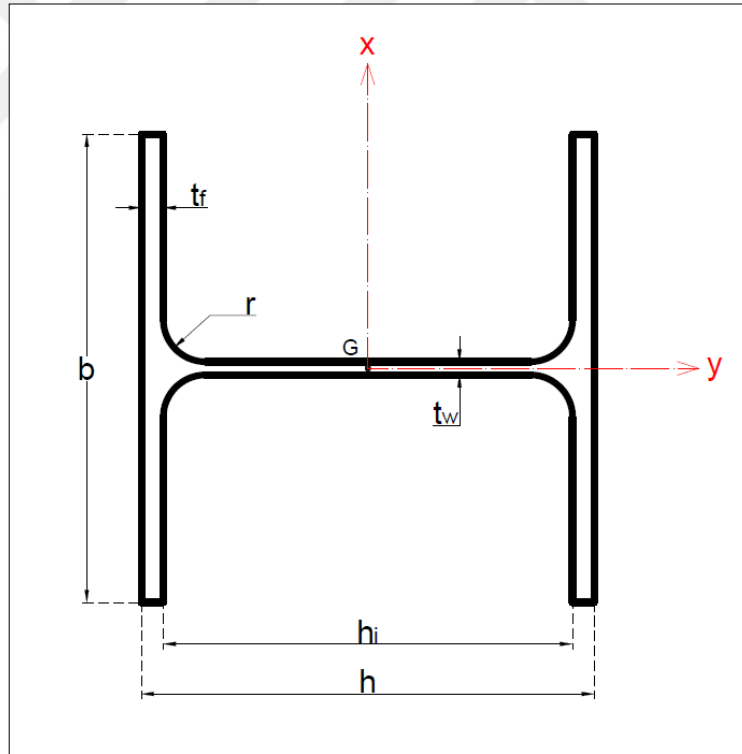
Tablo 2.10. Kesite %90 akma yüküne eşit bir aksel yük etkidiğinde plastik tarafsız akselin yeri ve güçlü akseldeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,90 (P=0,90P _y)" İKEN		
	y _p (mm)	W _{px;0,90} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	46,94	10,08	BAŞLIKTA
HEA120	55,94	14,31	BAŞLIKTA
HEA140	65,38	20,72	BAŞLIKTA
HEA160	74,79	29,23	BAŞLIKTA
HEA180	84,24	38,41	BAŞLIKTA
HEA200	93,65	50,78	BAŞLIKTA
HEA220	103,5	67,09	BAŞLIKTA
HEA240	113,4	87,75	BAŞLIKTA
HEA260	123,3	107,8	BAŞLIKTA
HEA280	133,3	130,5	BAŞLIKTA
HEA300	143,1	162,1	BAŞLIKTA
HEA320	152,9	191,5	BAŞLIKTA
HEA340	162,8	218,7	BAŞLIKTA
HEA360	172,6	248,1	BAŞLIKTA
HEA400	192,4	307,9	BAŞLIKTA
HEA450	217,0	389,0	BAŞLIKTA
HEA500	241,7	480,7	BAŞLIKTA
HEA550	266,5	568,0	BAŞLIKTA
HEA600	291,2	663,8	BAŞLIKTA
HEA650	316,0	768,4	BAŞLIKTA
HEA700	340,7	893,0	BAŞLIKTA
HEA800	390,2	1122	BAŞLIKTA
HEA900	439,7	1418	BAŞLIKTA
HEA1000	489,2	1707	BAŞLIKTA

3. FARKLI BASINÇ KUVVETLERİNİN ETKİSİ ALTINDAKİ HEA PROFİLLERİN ZAYIF YÖNDEKİ PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNİN HESABI

Bir önceki bölümde güçlü yönde çalışan HEA profillerin aksenal yüke maruz kaldıkları durumdaki plastik moment kapasiteleri hesaplanmıştır. Bu bölümde de zayıf yönde çalışan HEA profillerin farklı aksenal basınç yükü taşıdıkları durumda, plastik moment kapasiteleri ile alakalı hesaplamalar yapıldı. Kesite etkiyen basınç yükleri yine profillerin akma yükünün %10'undan başlayıp %10 artırılarak %90'a kadar uygulandı ve bu basınç yüklerinde kesitin ne kadar plastik moment taşıdığı bulundu.

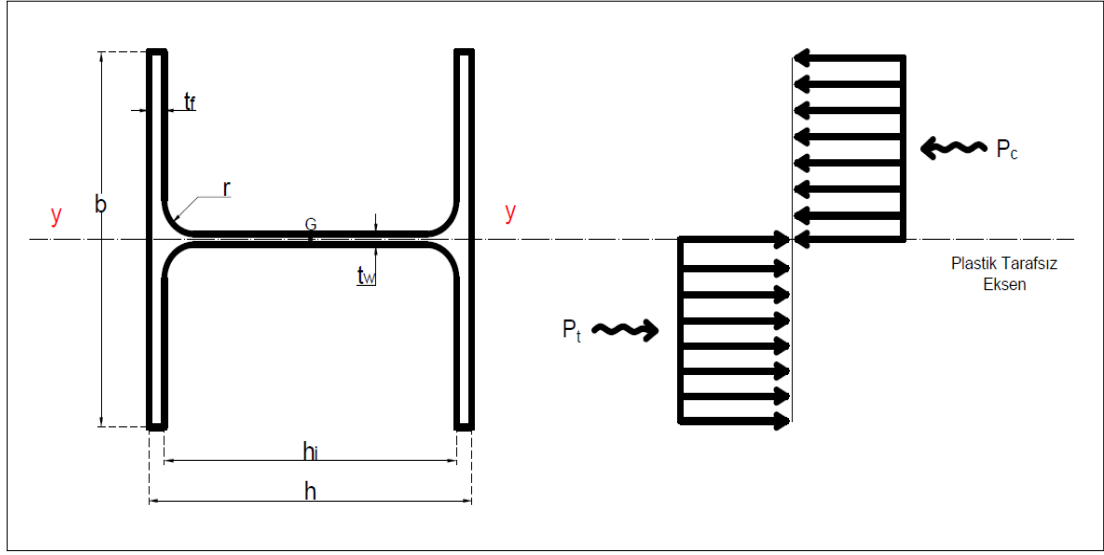
Şekil 1.1'de gösterilen kesit güçlü yönde çalışmaktaydı. Şekil 3.1'de ise zayıf yönde çalışan, diğer bir ifadeyle y eksenini etrafında eğilen, bir HEA profili gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Zayıf yönde çalışan HEA profili

3.1. Zayıf Eksende Basit Eğilmede Plastik Moment Kapasitesi

Profile hiç basınç yükü etkilemediğinde, yani kesitin tamamının plastik moment taşıdığı durumda, kesitin çekme ve basınç bölgelerindeki plastik gerilme dağılımı Şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2. Zayıf eksende basit eğilmede enkesitteki plastik gerilme dağılımı

Burada da yine güçlü yönde olduğu gibi; P_c ifadesi basınç bölgesinin, P_t ifadesi ise çekme bölgesinin bileşke kuvvetini ifade etmektedir. G kesitin ağırlık merkezi olup, plastik tarafsız eksen yine kesitin geometrik merkezinden geçmektedir yani kesitte birbirine eşit basınç ve çekme bölgeleri oluşmaktadır. Bu durumda her iki bölge iki adet yarım başlık, iki adet spandrel ve gövdenin yarısından oluşmaktadır.

Güçlü yönde çalışan HEA300 profilinde spandrel için kullanılan ağırlık merkezinin plastik tarafsız eksene olan uzaklığı; profil simetrik olduğu için değişmeyeceğinden tekrar \bar{x}_s mesafesi için çizim yapılmamış ve formül doğrudan burada da kullanılmıştır.

Zayıf eksende plastik mukavemet momenti kapasitesi W_{py} , P_c ve P_t kuvvetleri y-eksenine göre momentleri alınarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$W_{py} = 2 \left[\left(2 \times \frac{b}{2} \times t_f \times \frac{b}{4} \right) + \left(2A_s \left(r - \bar{x}_s + \frac{t_w}{2} \right) \right) + \left(h_i \times \frac{t_w}{2} \times \frac{t_w}{4} \right) \right] \quad (3.1)$$

HEA300 profili için, kesit özellikleri ($b=300$ mm, $t_f=14$ mm, $r=27$ mm ve $t_w=8,5$ mm) yerine yazıldığında;

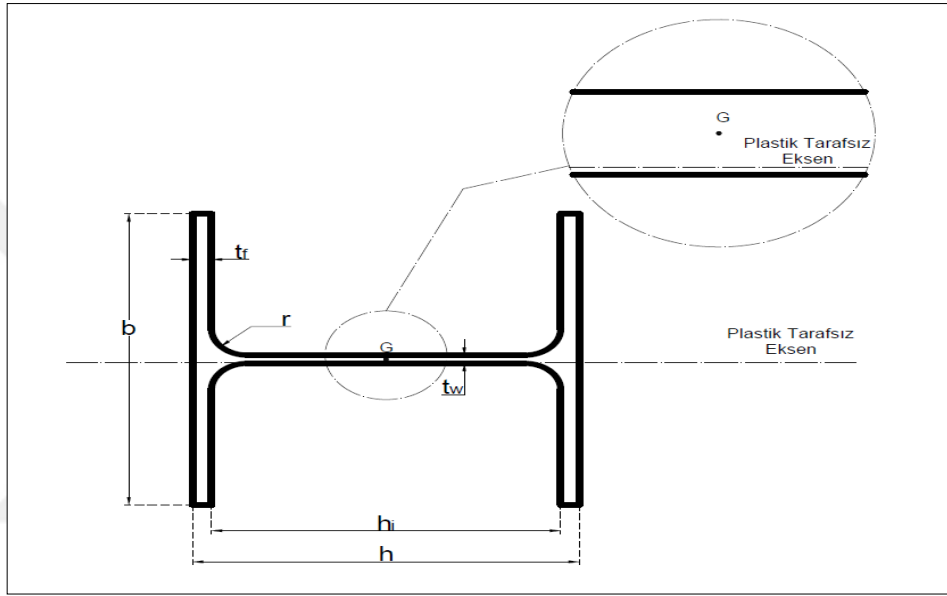
$$W_{py} = 2 \left[\left(2 \times \frac{300}{2} \times 14 \times \frac{300}{4} \right) + \left(2 \times 156,44 \times \left(27 - 20,97 + \frac{8,5}{2} \right) \right) + \left(262 \times \frac{8,5}{2} \times \frac{8,5}{4} \right) \right]$$

Zayıf eksende plastik mukavemet momenti kapasitesi;

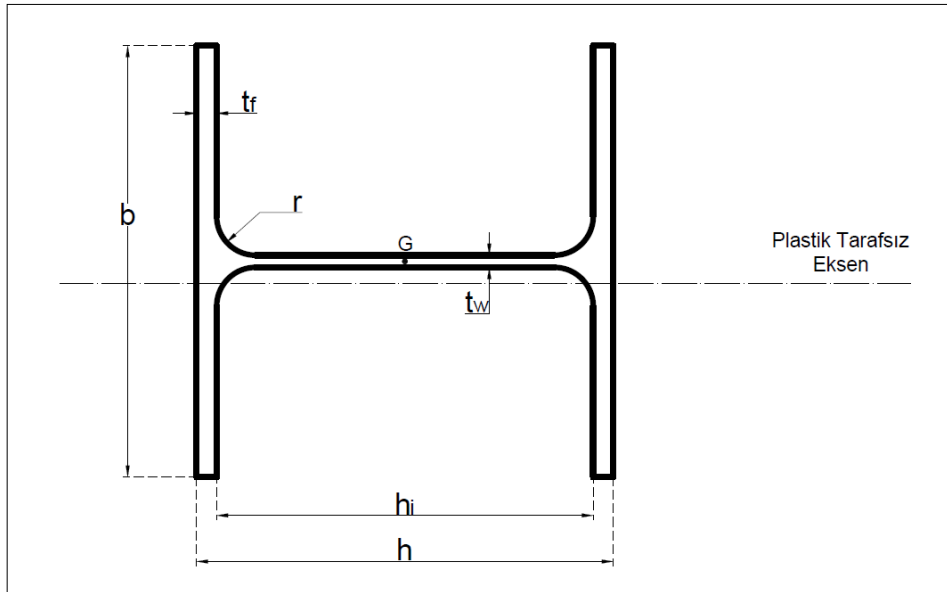
$$M_p = 641,2 \times 10^3 \text{ mm}^3 \text{ olarak elde edilir.}$$

3.2. Aksenal Yük ve Eğilme Momentinin Ortak Etkisinde Plastik Moment Kapasitesi

Plastik tarafsız eksen (PTE) sadece basit eğilmede, yani kesite hiç basınç yükü etkilemediğinde, kesitin geometrik merkezinden geçmektedir. Yine Bölüm 2'de ifade edildiği üzere taşıdığı her bir basınç yükü için PTE'nin yeri değişecektir ve PTE'nin yeriyle alakalı üç ihtimal sırasıyla, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 olmak üzere aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.3. Plastik tarafsız eksenin gövdede olduğu durum



Şekil 3.4. Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durum

İkinci bölümde de hesaplandığı gibi, PTE'nin yerinin belirlemek için Denklem (2.6)'daki denge denklemi kullanılmalıdır;

Basınç kuvveti P_c ;

$$P_c = \left[\left(2 \left(\frac{b}{2} + x_p \right) \times t_f \right) + 2A_s + \left(\left(\frac{t_w}{2} + x_p \right) \times h_i \right) \right] \times \sigma_y \quad (3.2)$$

Çekme kuvveti P_t ;

$$P_t = \left[\left(2 \left(\frac{b}{2} - x_p \right) \times t_f \right) + 2A_s + \left(\left(\frac{t_w}{2} - x_p \right) \times h_i \right) \right] \times \sigma_y \quad (3.3)$$

ile ifade edilebilir. Denklem (3.2) ve (3.3)'te yer alan ifadeler Denklem (2.6)'da yerine yazılarak;

$$P = \left[\begin{array}{l} (b \times t_f) + (2x_p \times t_f) + 2A_s + \left(\frac{t_w \times h_i}{2} \right) + (x_p \times h_i) - (b \times t_f) + (2x_p \times t_f) \\ -2A_s - \left(\frac{t_w \times h_i}{2} \right) + (x_p \times h_i) \end{array} \right] \times \sigma_y \quad (3.4)$$

ifadesine ulaşılır. Buradan P yükü,

$$P = \left[(4x_p \times t_f) + (2x_p \times h_i) \right] \times \sigma_y \quad (3.5)$$

olarak bulunur. σ_y yerine Denklem (2.5)'ten P_y / A kullanılarak,

$$P = \left[(4x_p \times t_f) + (2x_p \times h_i) \right] \times \frac{P_y}{A} \quad (3.6)$$

ifadesinden, PTE'nin gövdede olduğu durumlarda PTE'nin elastik tarafsız eksen (ETE)'den uzaklığı x_p ;

$$x_p = \frac{A \times n}{4t_f + 2h_i} \quad (3.7)$$

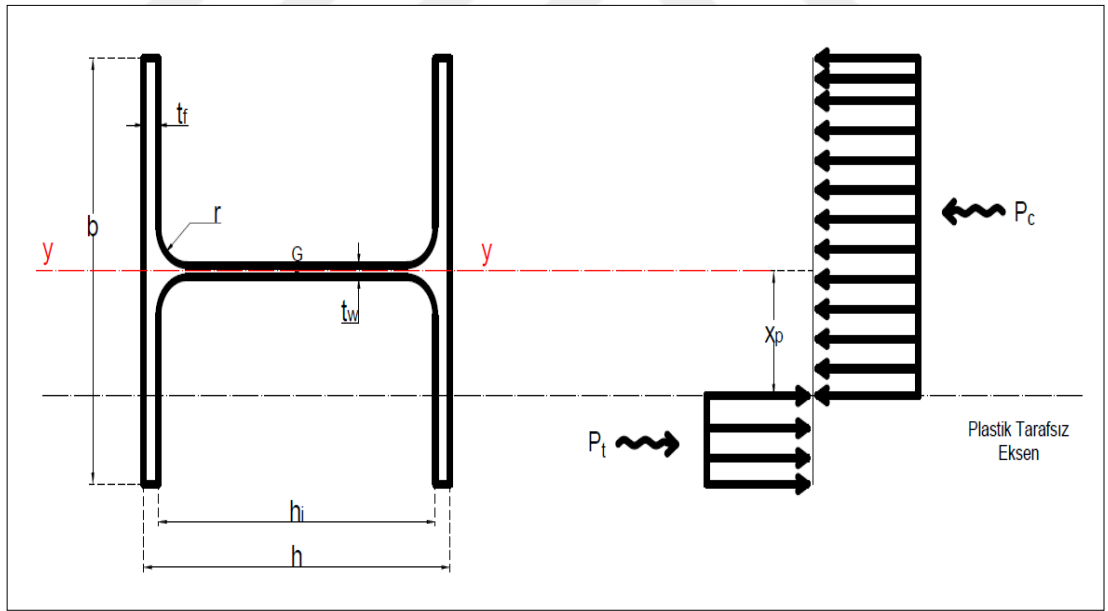
olarak bulunur. Denklem (3.7)'de n'in aksenal basınç kuvveti oranı olduğu ve Bölüm 2'de Denklem (2.4) ile ifade edildiği unutulmamalıdır.

Şekil 3.6'daki gerilme diyagramı kullanılarak, plastik moment kapasitesi eşdeğer kuvvetlerin y-eksenine göre momentleri alınıp toplanarak bulunabilir;

$$\begin{aligned}
 W_{py,n} = & 2\left(\frac{b}{2} \times t_f \times \frac{b}{4}\right) + 2\left[A_s \times \left(r - \bar{x}_s + \frac{t_w}{2}\right)\right] + \left(h_i \times \frac{t_w}{2} \times \frac{t_w}{4}\right) - \left(x_p \times h_i \times \frac{x_p}{2}\right) \\
 & - 2\left(x_p \times t_f \times \frac{x_p}{2}\right) + 2\left[\left(\frac{b}{2} - x_p\right) \times t_f \times \left(\frac{\left(\frac{b}{2} - x_p\right)}{2} + x_p\right)\right] + 2\left[A_s \times \left(r - \bar{x}_s + \frac{t_w}{2}\right)\right] \\
 & + \left[\left(\frac{t_w}{2} - x_p\right) \times h_i \times \left(\frac{\left(\frac{t_w}{2} - x_p\right)}{2} + x_p\right)\right] \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

3.2.2. Plastik tarafsız eksenin başlıkta olduğu durum

Plastik tarafsız eksenin başlıkta olduğu durumda gerilme diyagramı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Plastik tarafsız eksen başlıkta iken gerilme diyagramı

Şekil 3.7'deki gerilme diyagramından yola çıkılarak eşdeğer basınç ve çekme kuvvetleri;

$$P_c = \left[\left(2\left(\frac{b}{2} + x_p\right) \times t_f \right) + (h_i \times t_w) + 4A_s \right] \times \sigma_y \quad (3.9)$$

$$P_t = \left[2 \left(\frac{b}{2} - x_p \right) \times t_f \right] \times \sigma_y \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilir ve Denklem (2.6)'daki eşitlikten;

$$P = \left[(b \times t_f) + (2x_p \times t_f) + (h_i \times t_w) + 4A_s - (b \times t_f) + (2x_p \times t_f) \right] \times \sigma_y \quad (3.11)$$

sonucuna ulaşılır.

Gerekli sadeleştirmeler yapıp akma gerilmesi yerine Denklem (2.5)'ten P_y / A kullanılarak P yükü;

$$P = \left[(4x_p \times t_f) + (h_i \times t_w) + 4A_s \right] \times \frac{P_y}{A} \quad (3.12)$$

olarak bulunabilir. Buradan PTE'nin geometrik merkezden uzaklığı olan x_p ;

$$x_p = \frac{(A \times n) - (4A_s) - (h_i \times t_w)}{4t_f} \quad (3.13)$$

olarak elde edilir.

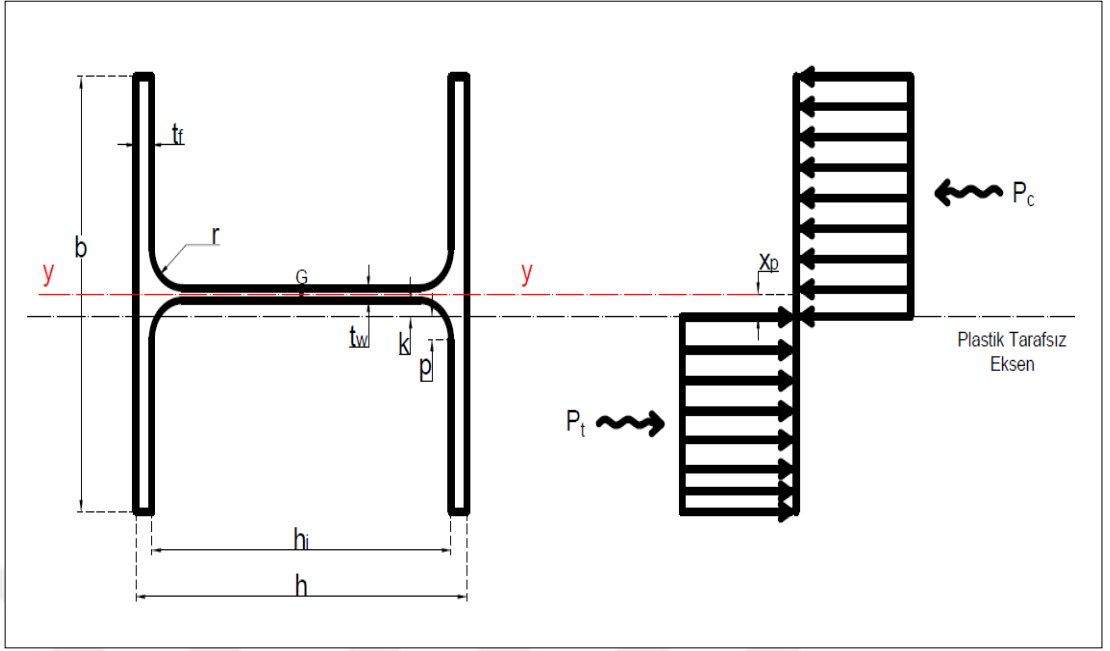
PTE'nin yerinin belirlenmesiyle profilin plastik moment kapasitesi Şekil 3.7'deki gerilme dağılımından faydalanılarak;

$$W_{py;n} = \left(\frac{b^2 \times t_f}{4} \right) - (x_p^2 \times t_f) + 2 \left[\left(\frac{b}{2} - x_p \right) \times t_f \times \left(\frac{\left(\frac{b}{2} - x_p \right)}{2} + x_p \right) \right] \quad (3.14)$$

olarak bulunur.

3.2.3. Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durum

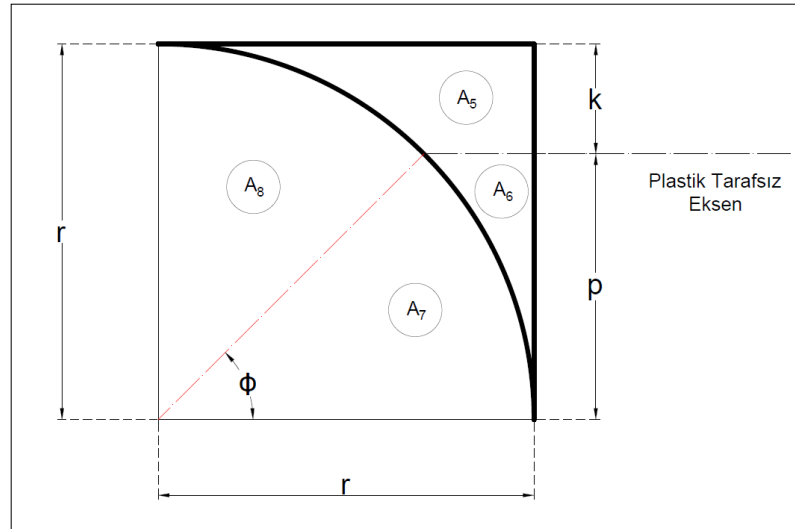
Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğu durumda gerilme diyagramı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Şekilde k simgesi PTE'nin gövdenin alt yüzünden geçen eksenine olan mesafesini, p simgesi ise PTE'nin başlığın doğrusal kısmının başladığı bölgeye olan mesafesini belirtmektedir.



Şekil 3.8. Plastik tarafsız eksen spandrelde iken gerilme diyagramı

3.2.3.1. Spandrelin parçalara ayrılması

Plastik tarafsız eksen spandrelinden geçtiğinde, açığa bağlı genel bir denklem elde edip bundan sonraki tüm hesaplamalarda kullanabilmek için spandrel küçük alanlara bölündü ve bu alanların her birinin merkeze olan uzaklıkları (\bar{x}) hesaplandı. Spandrelin parçalara bölünmüş hali Şekil 3.9'da yer almaktadır.



Şekil 3.9. Spandrelin alanlara bölünmesi

Şekil 3.9'da yer alan k ve p mesafelerinin toplamı şekilden de görüleceği üzere çeyrek dairenin yarıçapına eşittir.

A_7 parçasının alanı Denklem (3.19) ile gösterilmiştir,

$$A_7 = \frac{\phi}{2} \times r^2 \quad (3.19)$$

Şekil 3.10'dan açıya bağlı olarak \bar{x}_7 mesafesi;

$$\bar{x}_7 = \left(\frac{2r \times \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{\frac{3\phi}{2}} \right) \times \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3.20)$$

olarak bulunur ve ifade düzenlenerek;

$$\bar{x}_7 = \frac{2r \times \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}{\frac{3\phi}{2}} = 2r \times \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \times \left(\frac{2}{3\phi}\right) \quad (3.21)$$

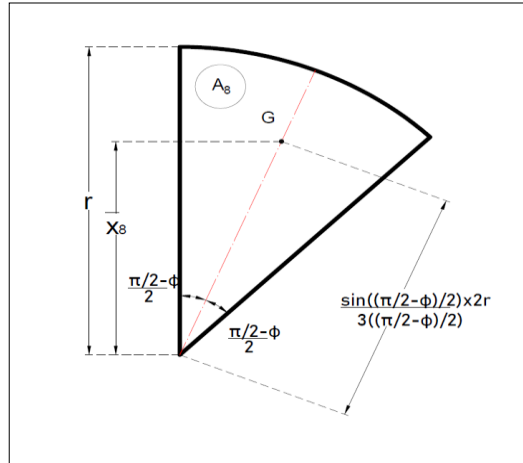
elde edilir ve gerekli sadeleştirmeler sonucunda;

$$\bar{x}_7 = \frac{4r \times \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}{3\phi} \quad (3.22)$$

ulaşılır. Burada açının radyan cinsinden olduğu unutulmamalıdır.

- A_8 parçasının alan ve \bar{x}_8 mesafesi

A_8 parçasının detaylı çizimi Şekil 3.11'de yer almaktadır.



Şekil 3.11. A_8 parçasının detaylı çizimi

Şekil 3.11'de G, A₈ parçasının ağırlık merkezini ifade etmektedir. \bar{x}_8 ile gösterilen mesafe A₈ parçasının ağırlık merkezinin spandrelin başlık ile birleştiği yere olan uzaklığını belirtmektedir.

A₈ parçasının alanı çeyrek dairenin alanından A₇ parçasının alanı çıkarılarak bulunur. Yani, $A_8 = A_{\text{Çeyrek Daire}} - A_7$ şeklinde gösterilebilir. Çeyrek dairenin alanı ve A₇ parçasının alanı yerine konarak;

$A_8 = \frac{\pi r^2}{4} - \frac{\phi}{2} \times r^2$ ifadesi elde edilir. Sadeleştirmeler yapılarak A₈ parçasının alanı aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$A_8 = r^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.23)$$

Şekil 3.11'den açıya bağlı olarak \bar{x}_8 mesafesi;

$$\bar{x}_8 = \frac{2r \times \sin\left(\frac{(\pi/2) - \phi}{2}\right)}{3\left(\frac{(\pi/2) - \phi}{2}\right)} \times \cos\left(\frac{(\pi/2) - \phi}{2}\right) \quad (3.24)$$

olarak bulunur. İfade " $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \times \cos \alpha$ " eşitliği kullanılarak düzenlenebilir;

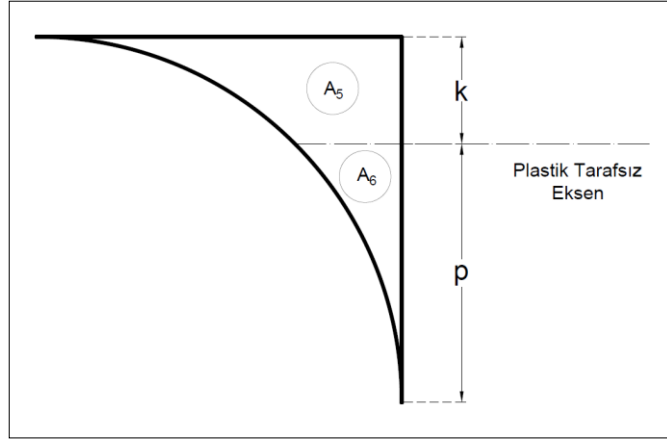
$$\bar{x}_8 = \frac{r \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)}{3\left(\frac{(\pi/2) - \phi}{2}\right)} = \frac{2r}{3 \times \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \quad (3.25)$$

Gerekli sadeleştirmeler yapılarak \bar{x}_8 mesafesi aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$\bar{x}_8 = \frac{2r}{3\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \quad (3.26)$$

- A₅ ve A₆ parçalarının alanı ve \bar{x} mesafeleri

A₅ ve A₆ parçaları spandrel oluşturulan parçalardır, A₅'i bulabilmek için de A₆ alanının bulunması gerekmektedir. A₅ alanı, spandrelin alanından A₆ alanı çıkarılarak bulunur. A₅ ve A₆ parçalarının detaylı çizimi Şekil 3.12'de yer almaktadır.



Şekil 3.12. A₅ ve A₆ parçalarının detaylı çizimi

A₆ parçasının alanı Şekil 3.13'te görülen bir kenarı çeyrek dairenin yarıçapı olan yamuk alanından, A₇ parçasının alanı çıkarılarak bulunmalıdır. Yani; $A_6 = A_{\text{Yamuk}} - A_7$ eşitliği kullanılarak;

$$A_6 = \frac{(r + r - r\cos\phi)}{2} \times p - \left(\frac{\phi}{2} \times r^2 \right) \quad (3.27)$$

ifadesi elde edildi. İfadeyi daha düzenli hale getirerek;

$$A_6 = \frac{(2r - r\cos\phi) \times r\sin\phi}{2} - \frac{\phi}{2} \times r^2 \quad (3.28)$$

elde edildi ve sonrasında,

$$A_6 = \frac{2r^2\sin\phi}{2} - \frac{r^2\sin\phi \times \cos\phi}{2} - \frac{\phi}{2} \times r^2 \quad (3.29)$$

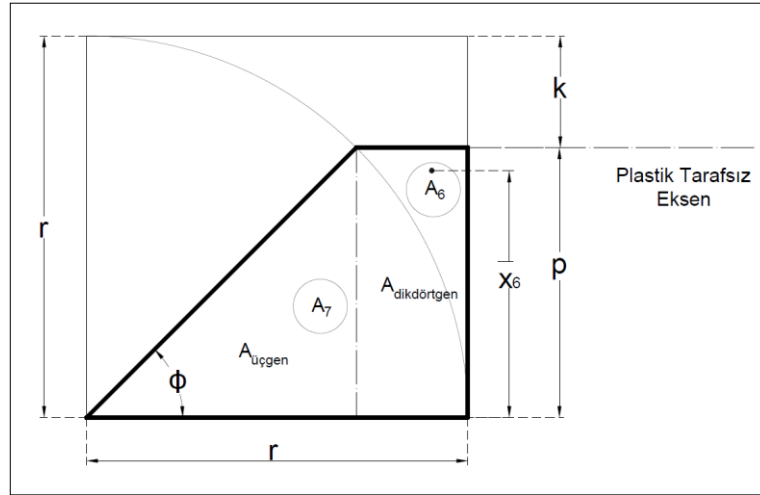
ifadesi yarıçap parantezine alınarak;

$$A_6 = \frac{r^2}{2} (2\sin\phi - \sin\phi \times \cos\phi - \phi) \quad (3.30)$$

sonucuna ulaşılır ve " $\sin 2\alpha = 2\sin\alpha \times \cos\alpha$ " dönüşüm formülleri kullanılarak A₆ alanı aşağıdaki gibi bulunur;

$$A_6 = \frac{r^2}{2} \left(2\sin\phi - \frac{\sin 2\phi}{2} - \phi \right) \quad (3.31)$$

\bar{x}_6 mesafesini açığa bağlı olarak bulabilmek için Şekil 3.13'ten faydalanıldı.



Şekil 3.13. A₆ parçasının detaylı çizimi

Daha kolay hesap yapmak amacıyla yamuk, dikdörtgen ve üçgene parçalanarak \bar{x}_6 mesafesi;

$$\bar{x}_6 = \frac{A_{\text{Üçgen}} \times \bar{x}_{\text{Üçgen}} + A_{\text{Dikdörtgen}} \times \bar{x}_{\text{Dikdörtgen}} - A_7 \times \bar{x}_7}{A_6} \quad (3.32)$$

şeklinde yazılabilir. Parçaların alanları ve ağırlık merkezlerinin mesafeleri yerine koyularak Denklem (3.33) elde edilir;

$$\bar{x}_6 = \frac{\left(r \cos \phi \times \frac{p^2}{6} \right) + \left((r - r \cos \phi) \times \frac{p^2}{2} \right) - \left(\frac{\phi}{2} r^2 \times \frac{4r \times \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right)}{3\phi} \right)}{A_6} \quad (3.33)$$

A₆ parçası bulunduğundan sonra spandrel alanından A₆ çıkarılarak son parça olan A₅'e ulaşılır. Yani; A₅ = A₈ + A₆ 'dir. Buradan A₅ parçasının alanı aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$A_5 = \left[r^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] - \left[\frac{r^2}{2} \left(2 \sin \phi - \frac{\sin 2\phi}{2} - \phi \right) \right] \quad (3.34)$$

Şekil 3.9'daki parçaların açığa bağlı alan ve ağırlık merkezlerinin mesafeleri baz alınarak \bar{x}_5 mesafesi denklem (3.35) ile hesaplanabilir;

$$\bar{x}_5 = \frac{A_{\text{Kare}} \times \bar{x}_{\text{Kare}} - A_8 \times \bar{x}_8 - A_7 \times \bar{x}_7 - A_6 \times \bar{x}_6}{A_5} \quad (3.35)$$

3.2.3.3. ϕ açısının hesaplanması

İlk olarak x_p 'den bağımsız olarak sadece açığa bağlı değerler ile, Şekil 3.8'deki diyagramdan faydalanılarak;

$$P_c = \left[\left(2 \left(\frac{b}{2} + \frac{t_w}{2} + k \right) \times t_f \right) + (h_i \times t_w) + 2A_s + 2A_5 \right] \times \sigma_y \quad (3.36)$$

$$P_t = \left[\left(2 \left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - k \right) \times t_f \right) + 2A_6 \right] \times \sigma_y \quad (3.37)$$

eşdeğer basınç ve çekme kuvvetleri yukarıdaki gibi yazılır ve Denklem (2.6)'da yerine koyularak;

$$P = \left[\begin{array}{l} (b \times t_f) + (t_w \times t_f) + (2k \times t_f) + (h_i \times t_w) + 2A_s + 2A_5 - (b \times t_f) \\ + (t_w \times t_f) + (2k \times t_f) - 2A_6 \end{array} \right] \times \sigma_y \quad (3.38)$$

ifadesi elde edilip gerekli sadeleştirmeler yapıldığında;

$$P = \left[(2t_w \times t_f) + (4k \times t_f) + (h_i \times t_w) + 2A_s + 2A_5 - 2A_6 \right] \times \sigma_y \quad (3.39)$$

sonucuna ulaşılır ve Denklem (2.5)'ten σ_y yerine P_y / A yazıldığında aksenal basınç yükü etkisindeki ϕ açısı;

$$A \times n = (2t_w \times t_f) + (4k \times t_f) + (h_i \times t_w) + 2A_s + 2A_5 - 2A_6 \quad (3.40)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (3.40)'ta n değeri için Denklem (2.4) kullanıldığı göz önünde bulundurulmalıdır. Birinci bölümde de açıklandığı üzere A_5 ve A_6 alanları ile ϕ açısı arasında elle çözülemeyen bir denklem ilişkisi bulunmaktadır ve iterasyon yapılarak hesaplanması gerekmektedir. Bu işlemler Excel kullanılarak yapılmıştır.

3.2.3.4. Plastik tarafsız eksenin kesitin geometrik merkezine olan uzaklığının ve plastik moment kapasitesinin bulunması

Şekil 3.8'deki gerilme diyagramından faydalanılarak x_p mesafesinin hesabı için eşdeğer basınç ve çekme kuvvetleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$P_c = \left[\left(2 \left(\frac{b}{2} + x_p \right) \times t_f \right) + 2A_s + (h_i \times t_w) + 2A_5 \right] \times \sigma_y \quad (3.41)$$

$$P_t = \left[\left(2 \left(\frac{b}{2} - x_p \right) \times t_f \right) + 2A_6 \right] \times \sigma_y \quad (3.42)$$

Denklem (3.41) ve (3.42)'de yer alan ifadeler Denklem (2.6)'da yerine yazılarak;

$$P = \left[(b \times t_f) + (2x_p \times t_f) + 2A_s + (h_i \times t_w) + 2A_5 - (b \times t_f) + (2x_p \times t_f) - 2A_6 \right] \times \sigma_y \quad (3.43)$$

sonucuna ulaşılır. $\sigma_y = P_y / A$ eşitliği kullanılarak x_p mesafesi aşağıdaki gibi bulunur;

$$x_p = \left[\frac{(A \times n) - 2A_s - 2A_5 + 2A_6 - (h_i \times t_w)}{4t_f} \right] \quad (3.44)$$

Şekil 3.8'deki gerilme dağılımından plastik moment kapasitesi için;

$$\begin{aligned} W_{py,n} = & 2 \left(\frac{b}{2} \times t_f \times \frac{b}{4} \right) + 2A_s \times \left(r - \bar{x}_s + \frac{t_w}{2} \right) + \left(h_i \times \frac{t_w}{2} \times \frac{t_w}{4} \right) - \left(h_i \times \frac{t_w}{2} \times \frac{t_w}{4} \right) \\ & - 2 \left(x_p \times t_f \times \frac{x_p}{2} \right) - 2A_5 \times \left(r - \bar{x}_5 + \frac{t_w}{2} \right) + 2A_6 \times \left(r - \bar{x}_6 + \frac{t_w}{2} \right) \\ & + 2 \left[\left(\frac{b}{2} - x_p \right) \times t_f \times \left(\frac{\left(\frac{b}{2} - x_p \right)}{2} + x_p \right) \right] \end{aligned} \quad (3.45)$$

eşitliği kurulur ve sadeleştirmeler yapılarak plastik moment kapasitesi için aşağıdaki ilişki elde edilir;

$$\begin{aligned} W_{py,n} = & 2 \left(\frac{b}{2} \times t_f \times \frac{b}{4} \right) + 2A_s \times \left(r - \bar{x}_s + \frac{t_w}{2} \right) - 2 \left(x_p \times t_f \times \frac{x_p}{2} \right) \\ & - 2A_5 \times \left(r - \bar{x}_5 + \frac{t_w}{2} \right) + 2A_6 \times \left(r - \bar{x}_6 + \frac{t_w}{2} \right) \\ & + 2 \left[\left(\frac{b}{2} - x_p \right) \times t_f \times \left(\frac{\left(\frac{b}{2} - x_p \right)}{2} + x_p \right) \right] \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$x_p = \frac{11,25 \times 10^3 \times 0,1}{4 \times 14 + 2 \times 262} = 1,94 \text{ mm olarak bulunur.}$$

x_p değeri 4,25 mm'den küçük olduğu için PTE gövdededir. Dolayısıyla PTE'nin başlıkta ve spandrelde olduğu durumların incelenmesine gerek yoktur. Bu durumda plastik moment kapasitesi Denklem (3.8) kullanılarak bulunabilir;

$$\begin{aligned} W_{py,0,10} = & 2 \left(\frac{300}{2} \times 14 \times \frac{300}{4} \right) + 2 \left(156,44 \times \left(27 - 20,97 + \frac{8,5}{2} \right) \right) + \left(262 \times \frac{8,5}{2} \times \frac{8,5}{4} \right) \\ & - \left(1,94 \times 262 \times \frac{1,94}{2} \right) - 2 \left(1,94 \times 14 \times \frac{1,94}{2} \right) \\ & + 2 \left(\left(\frac{300}{2} - 1,94 \right) \times 14 \times \left(\frac{\left(\frac{300}{2} - 1,94 \right)}{2} + 1,94 \right) \right) + 2 \left(156,44 \times \left(27 - 20,9 + \frac{8,5}{2} \right) \right) \\ & + \left(\left(\frac{8,5}{2} - 1,94 \right) \times 262 \times \left(\frac{\left(\frac{8,5}{2} - 1,94 \right)}{2} + 1,94 \right) \right) = 640,1 \times 10^3 \text{ mm}^3 \text{ olarak bulunur.} \end{aligned}$$

3.3.2. HEA300 profiline akma yükünün %30'una eşit aksel yükün etkimesi durumu

Bölüm 3.3'te belirtildiği üzere ilk olarak gövde kabulünün doğru olup olmadığı Denklem (3.7) kullanılarak kontrol edilmelidir;

$$x_p = \frac{11,25 \times 10^3 \times 0,30}{4 \times 14 + 2 \times 262} = 5,820 \text{ mm olarak bulunur.}$$

x_p değerinin 4,25 mm'den büyük olması PTE'nin gövdede olmadığını göstermektedir. Bu yüzden başlıkta olduğu varsayımının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunun için Denklem (3.13)'ten x_p değeri;

$$x_p = \frac{(11,25 \times 10^3 \times 0,30) - (4 \times 156,44) - (262 \times 8,5)}{4 \times 14} = 9,340 \text{ mm olarak bulunur.}$$

x_p değeri $31,25 < x_p < 150$ aralığında olmadığından spandrel kontrollerinin yapılması gerekmektedir. Bunun için ilk olarak spandrel oluşturulan parçalara yönelik hesaplamalar yapılmalıdır.

- A_7 parçasının alanı ve \bar{x}_7 mesafesi

A_7 parçasının alanı Denklem (3.19) ile hesaplanabilir. HEA300 profiline ait sayısal değerler ve Denklem (3.40) sonucunda bulunan ϕ açısı yerine konarak;

$$A_7 = \frac{0,77}{2} \times 27^2 = 279,75 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

A_7 parçasının \bar{x}_7 mesafesi ise Denklem (3.22) kullanılarak hesaplanabilir;

$$\bar{x}_7 = \frac{4 \times 27 \times \sin^2\left(\frac{0,77}{2}\right)}{3 \times 0,77} = 6,57 \text{ mm olarak bulunur.}$$

- A_8 parçasının alanı ve \bar{x}_8 mesafesi

A_8 parçasının alanı için Denklem (3.23), \bar{x}_8 mesafesi için Denklem (3.26) kullanılarak;

$$A_8 = 27^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{0,77}{2} \right) = 292,81 \text{ mm}^2 \text{ ve } \bar{x}_8 = \frac{2 \times 27}{3 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 0,77 \right)} \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - 0,77 \right) = 16,13 \text{ mm}$$

olarak bulunur.

- A_6 parçasının alanı ve \bar{x}_6 mesafesi

A_6 parçasının alanı Denklem (3.31) kullanılarak;

$$A_6 = \frac{27^2}{2} \left(2\sin(0,77) - \frac{\sin(2 \times 0,77)}{2} - 0,77 \right) = 44,28 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

A_6 parçasının \bar{x}_6 mesafesi ise Denklem (3.33) aracılığıyla;

$$\bar{x}_6 = \frac{\left(27 \times \cos(0,77) \times \frac{18,75^2}{6} \right)}{44,2824} + \frac{\left((27 - 27 \times \cos(0,77)) \times \frac{18,75^2}{2} \right)}{44,2824}$$

$$- \frac{\left(\frac{0,77}{2} \times 27^2 \times \frac{4 \times 27 \times \sin^2\left(\frac{0,77}{2}\right)}{3 \times 0,77} \right)}{44,28} = 14,20 \text{ mm olarak hesaplanır.}$$

- A_5 parçasının alanı ve \bar{x}_5 mesafesi

A_5 parçasının alanı Denklem (3.34) kullanılarak bulunabilir;

$$A_5 = \left[27^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] - \left[\frac{27^2}{2} \left(2 \sin(0,77) - \frac{\sin(2 \times 0,77)}{2} - 0,77 \right) \right] = 112,16 \text{ mm}^2 \text{ 'dir.}$$

\bar{x}_5 mesafesi Denklem (3.35) kullanılarak;

$$\bar{x}_5 = \frac{27^2 \times \frac{27}{2} - (292,81 \times 16,13) - (279,75 \times 6,57) - (44,28 \times 14,20)}{112,16} = 23,64 \text{ mm olarak}$$

hesaplanır.

Tüm alan ve \bar{x} mesafelerinin hesaplamaları yapıldıktan sonra, Denklem (3.40) ile ifade edilen ϕ açısı için;

$$11,25 \times 10^3 \times 0,30 = (2 \times 8,5 \times 14) + (4 \times 8,25 \times 14) + (262 \times 8,5) + (2 \times 156,44) + (2 \times A_5) - (2 \times A_6) \text{ ifadesi sadeleştirilerek;}$$

$\phi=0,77$ rad olarak bulunur.

Spandrel kabulünün doğruluğunu kontrol edebilmek için Denklem (3.44) kullanılarak hesaplanan x_p değeri;

$$x_p = \left[\frac{(11,25 \times 10^3 \times 0,30) - (2 \times 156,44) - (2 \times 112,16) + (2 \times 44,28) - (262 \times 8,5)}{4 \times 14} \right] \text{ 'den}$$

12,50 mm olarak bulunur.

Bulunan x_p değerinin $4,25 < x_p < 31,25$ aralığında olması PTE'nin spandrelde olduğu varsayımının doğru olduğunu göstermektedir.

Plastik tarafsız eksenin spandrelde olduğunun bulunmasıyla $x_p=12,50$ mm değeri için; Denklem (3.46) ve HEA300 profilinin kesit özellikleri ($b=300$ mm, $t_f=14$ mm, $t_w=8,5$ mm, $r=27$ mm, $h_i=262$ mm) kullanılarak akma yükünün %30'u için plastik moment kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\begin{aligned}
W_{py,0,30} &= 2 \left(\frac{300}{2} \times 14 \times \frac{300}{4} \right) + \left[2 \times 156,44 \times \left(27 - 20,96 + \frac{8,5}{2} \right) \right] - 2 \left(12,50 \times 14 \times \frac{12,50}{2} \right) \\
&- \left[2 \times 112,16 \times \left(27 - 23,64 + \frac{8,5}{2} \right) \right] + \left[2 \times 44,28 \times \left(27 - 14,20 + \frac{8,5}{2} \right) \right] \\
&+ 2 \left[\left(\frac{300}{2} - 12,50 \right) \times 14 \times \left(\frac{\left(\frac{300}{2} - 12,50 \right)}{2} + 12,50 \right) \right] = 634,6 \times 10^3 \text{ mm}^3 \text{ olarak bulunur.}
\end{aligned}$$

3.3.3. HEA300 profiline akma yükünün %50'sine eşit aksel yükün etkimesi durumu

PTE'nin gövdede olduğu kabulünün doğruluğunun kontrol edilebilmesi için Denklem (3.7) kullanılarak x_p değeri;

$$x_p = \frac{11,25 \times 10^3 \times 0,50}{4 \times 14 + 2 \times 262} = 9,70 \text{ mm olarak hesaplanır.}$$

x_p değerinin 4,25 mm'den büyük olması PTE'nin gövdede olmadığını göstermektedir. Bu yüzden başlıkta olduğu varsayımının kontrol edilmesi için Denklem (3.13)'ten x_p değeri;

$$x_p = \frac{(11,25 \times 10^3 \times 0,50) - (4 \times 156,44) - (262 \times 8,5)}{4 \times 14} = 49,53 \text{ mm olarak hesaplanır.}$$

PTE'nin başlıkta olabilmesi için x_p değerinin $31,25 < x_p < 150$ aralığında olması gerektiği belirtilmişti. Bulunan x_p değerinin bu aralığı sağlaması PTE'nin başlıkta olduğunu göstermektedir. Öyleyse Denklem (3.14) kullanılarak plastik moment kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır;

$$\begin{aligned}
W_{py,0,50} &= 2 \left[\left(\frac{300}{2} - 49,53 \right) \times 14 \times \left(\frac{\left(\frac{300}{2} - 49,53 \right)}{2} + 49,53 \right) \right] + \left(\frac{300^2 \times 14}{4} \right) \\
&- (49,53^2 \times 14) = 561,3 \times 10^3 \text{ 'tür.}
\end{aligned}$$

3.4. Zayıf Yönde Çalışan HEA Profillere Ait Plastik Moment Kapasite Tabloları

HEA300 profiline %50 akma yüküne eşdeğer bir basınç yükü etkidiğinde PTE'nin başlıkta olacağı Bölüm 3.3.3'te hesaplanmıştı. Benzer şekilde PTE %50'lik akma

yükünden itibaren başlığa düşmeye devam edeceğinden hesaplamalar gösterilmemiş direkt plastik moment kapasite tablolarına yer verilmiştir. Tablo 3.1’de zayıf eksende çalışan profiller için sınır değerlerin yer aldığı y_p ’ler, Tablo 3.2’den 3.10’a kadar ise plastik moment değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Profillerin zayıf yöndeki sınır y_p değerleri

PROFİL TİPİ	SINIR “ y_p ” DEĞERLERİ		
	GÖVDE	SPANDREL	BAŞLIK
	“ $tw/2$ ” (mm)	“ $tw/2+r$ ” (mm)	“ $b/2$ ” (mm)
HEA100	2,5	14,5	50
HEA120	2,5	14,5	60
HEA140	2,75	14,75	70
HEA160	3	18	80
HEA180	3	18	90
HEA200	3,25	21,25	100
HEA220	3,5	21,5	110
HEA240	3,75	24,75	120
HEA260	3,75	27,75	130
HEA280	4	28	140
HEA300	4,25	31,25	150
HEA320	4,5	31,5	150
HEA340	4,75	31,75	150
HEA360	5	32	150
HEA400	5,5	32,5	150
HEA450	5,75	32,75	150
HEA500	6	33	150
HEA550	6,25	33,25	150
HEA600	6,5	33,5	150
HEA650	6,75	33,75	150
HEA700	7,25	34,25	150
HEA800	7,5	37,5	150
HEA900	8	38	150
HEA1000	8,25	38,25	150

Tablo 3.2. Kesite %10 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,10 (P=0,10P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py;0,10} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	1,106	41,02	GÖVDEDE
HEA120	1,111	58,71	GÖVDEDE
HEA140	1,181	84,66	GÖVDEDE
HEA160	1,275	117,4	GÖVDEDE
HEA180	1,323	156,2	GÖVDEDE
HEA200	1,417	203,4	GÖVDEDE
HEA220	1,532	270,1	GÖVDEDE
HEA240	1,670	351,1	GÖVDEDE
HEA260	1,736	429,4	GÖVDEDE
HEA280	1,801	517,3	GÖVDEDE
HEA300	1,940	640,1	GÖVDEDE
HEA320	2,006	708,5	GÖVDEDE
HEA340	2,022	754,6	GÖVDEDE
HEA360	2,039	800,8	GÖVDEDE
HEA400	2,038	871,2	GÖVDEDE
HEA450	2,023	963,7	GÖVDEDE
HEA500	2,016	1057	GÖVDEDE
HEA550	1,961	1105	GÖVDEDE
HEA600	1,919	1153	GÖVDEDE
HEA650	1,888	1203	GÖVDEDE
HEA700	1,888	1254	GÖVDEDE
HEA800	1,809	1310	GÖVDEDE
HEA900	1,801	1412	GÖVDEDE
HEA1000	1,752	1467	GÖVDEDE

Profillere %10'luk akma yüküne eşit bir aksenal basınç yükü etkidiğinde Tablo 3.2'den görüldüğü üzere tüm profillerde PTE gövdededir. Benzer şekilde Tablo 3.3'te yer alan %20'lik akma yüküne eşit aksenal yükleme durumu için de plastik tarafsız eksenin yeri değişmemektedir.

Buna rağmen Tablo 3.4'te HEA500'den büyük kesitli profillerde plastik tarafsız eksen, gövde kalınlığının daha fazla olması sebebiyle gövdede kalmaya devam ederken daha küçük kesitli profillerde spandrelde yer almaktadır.

Tablo 3.3. Kesite %20 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,20 (P=0,20P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py;0,20} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	2,212	40,67	GÖVDEDE
HEA120	2,222	58,29	GÖVDEDE
HEA140	2,362	84,11	GÖVDEDE
HEA160	2,551	116,6	GÖVDEDE
HEA180	2,646	155,3	GÖVDEDE
HEA200	2,833	202,3	GÖVDEDE
HEA220	3,064	268,6	GÖVDEDE
HEA240	3,341	349,1	GÖVDEDE
HEA260	3,473	427,2	GÖVDEDE
HEA280	3,602	514,6	GÖVDEDE
HEA300	3,880	636,8	GÖVDEDE
HEA320	4,012	704,8	GÖVDEDE
HEA340	4,045	750,5	GÖVDEDE
HEA360	4,079	796,5	GÖVDEDE
HEA400	4,076	866,4	GÖVDEDE
HEA450	4,046	958,3	GÖVDEDE
HEA500	4,031	1051	GÖVDEDE
HEA550	3,921	1099	GÖVDEDE
HEA600	3,838	1147	GÖVDEDE
HEA650	3,776	1196	GÖVDEDE
HEA700	3,775	1247	GÖVDEDE
HEA800	3,618	1302	GÖVDEDE
HEA900	3,601	1403	GÖVDEDE
HEA1000	3,503	1458	GÖVDEDE

Tablo 3.4. Kesite %30 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,30 (P=0,30P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py;0,30} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	5,141	40,47	SPANDRELDE
HEA120	5,823	57,89	SPANDRELDE
HEA140	6,369	83,43	SPANDRELDE
HEA160	6,629	116,1	SPANDRELDE
HEA180	7,933	154,2	SPANDRELDE
HEA200	8,109	201,5	SPANDRELDE

Tablo 3.4.(Devam) Kesite %30 akma yüküne eşit bir aksel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,30 (P=0,30P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py,0,30} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA220	9,297	266,9	SPANDRELDE
HEA240	10,18	347,4	SPANDRELDE
HEA260	11,19	425,6	SPANDRELDE
HEA280	11,62	512,3	SPANDRELDE
HEA300	12,50	634,6	SPANDRELDE
HEA320	12,54	701,7	SPANDRELDE
HEA340	11,75	747,5	SPANDRELDE
HEA360	10,94	793,4	SPANDRELDE
HEA400	8,705	863,6	SPANDRELDE
HEA450	7,434	955,1	SPANDRELDE
HEA500	6,242	1047	SPANDRELDE
HEA550	5,882	1088	GÖVDEDE
HEA600	5,757	1136	GÖVDEDE
HEA650	5,663	1184	GÖVDEDE
HEA700	5,663	1235	GÖVDEDE
HEA800	5,427	1289	GÖVDEDE
HEA900	5,402	1389	GÖVDEDE
HEA1000	5,255	1442	GÖVDEDE

Tablo 3.5. Kesite %40 akma yüküne eşit bir aksel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,40 (P=0,40P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py,0,40} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	10,31	38,87	SPANDRELDE
HEA120	12,51	55,62	SPANDRELDE
HEA140	14,56	80,22	SPANDRELDE
HEA160	15,40	112,0	SPANDRELDE
HEA180	18,55	147,4	BAŞLIKTA
HEA200	19,26	194,3	SPANDRELDE
HEA220	22,26	255,3	BAŞLIKTA
HEA240	23,96	334,6	SPANDRELDE
HEA260	25,82	410,0	SPANDRELDE
HEA280	27,77	493,7	SPANDRELDE
HEA300	29,44	611,7	SPANDRELDE
HEA320	29,65	676,2	SPANDRELDE

Tablo 3.5.(Devam) Kesite %40 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,40 (P=0,40P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py,0,40} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA340	28,67	721,3	SPANDRELDE
HEA360	27,67	766,7	SPANDRELDE
HEA400	24,65	838,2	SPANDRELDE
HEA450	23,11	929,1	SPANDRELDE
HEA500	21,58	1020	SPANDRELDE
HEA550	18,52	1071	SPANDRELDE
HEA600	15,64	1122	SPANDRELDE
HEA650	12,97	1172	SPANDRELDE
HEA700	9,462	1223	SPANDRELDE
HEA800	7,236	1271	GÖVDEDE
HEA900	7,203	1368	GÖVDEDE
HEA1000	7,007	1421	GÖVDEDE

Kesite %40'lık bir aksenal yük uygulandığında HEA180 ve HEA220 profil kesitleri kendilerinden önceki ve sonraki profiller gibi davranış göstermemişler ve PTE diğer profiller için hala spandrelde olduğu halde bu kesitlerde başlığa inmiştir. Bunun sebebi; HEA160 ve HEA180'in spandrel yarıçapı ve gövde kalınlıkları sırasıyla 15 ve 6mm olmak üzere aynı iken, başlık kalınlıkları sırasıyla 9 ve 9,5 mm'dir. Başlık kalınlıklarındaki 0,5 mm'lik fark HEA160 kesitinde PTE'nin spandrelde yer almasına sebep olmuşken HEA180'de ise PTE başlığa kaymıştır.

HEA180 ve HEA200 profillerinde PTE'nin yerinin farklı çıkmasının nedeni ise spandrel yarıçaplarının arasında 3mm'lik fark olmasıdır. Bu fark sayesinde HEA200 kesitinde PTE spandrelde. Aynı şekilde HEA220 profilinde PTE'nin başlıkta yer alma sebebi spandrel yarıçapları aynı olduğu halde HEA200 ile HEA220 kesitleri arasındaki 1mm'lik başlık kalınlığı farkıdır.

Tablo 3.6. Kesite %50 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,50 (P=0,50P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py,0,50} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	16,82	35,47	BAŞLIKTA
HEA120	20,41	50,93	BAŞLIKTA
HEA140	23,80	73,67	BAŞLIKTA

Tablo 3.6.(Devam) Kesite %50 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,50 (P=0,50P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py,0,50} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA160	26,15	102,9	BAŞLIKTA
HEA180	30,46	136,3	BAŞLIKTA
HEA200	32,71	178,6	BAŞLIKTA
HEA220	36,88	236,3	BAŞLIKTA
HEA240	39,96	307,3	BAŞLIKTA
HEA260	43,18	375,9	BAŞLIKTA
HEA280	46,48	453,4	BAŞLIKTA
HEA300	49,53	561,3	BAŞLIKTA
HEA320	49,70	620,9	BAŞLIKTA
HEA340	48,88	663,6	BAŞLIKTA
HEA360	48,03	706,8	BAŞLIKTA
HEA400	45,41	776,6	BAŞLIKTA
HEA450	44,03	863,6	BAŞLIKTA
HEA500	42,64	951,4	BAŞLIKTA
HEA550	39,71	1004	BAŞLIKTA
HEA600	36,77	1057	BAŞLIKTA
HEA650	33,83	1110	BAŞLIKTA
HEA700	29,43	1174	SPANDRELDE
HEA800	23,02	1240	SPANDRELDE
HEA900	18,04	1343	SPANDRELDE
HEA1000	13,32	1400	SPANDRELDE

Tablo 3.6'dan da görüldüğü üzere HEA profillerin yarısından fazlasında %50 akma yüküne eşit bir eksenel yüklemeye başlıkların kalın olması münasebetiyle plastik tarafsız eksen başlıktadır. Sadece başlık ile gövde arasındaki iç büküm yarıçapı diğer profillere kıyasla daha fazla olan HEA700, HEA800, HEA900 ve HEA1000 profillerinde hala spandrelde.

Ayrıca Tablo 3.7'de görüldüğü üzere HEA1000 profili %60'lık eksenel yüke maruz kaldığında bile plastik tarafsız eksen, r yarıçapı kalın olduğu için hala spandrelde yer almaktadır.

Tablo 3.7. Kesite %60 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,60 (P=0,60P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py,0,60} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	23,45	31,20	BAŞLIKTA
HEA120	28,33	44,76	BAŞLIKTA
HEA140	33,04	64,74	BAŞLIKTA
HEA160	36,92	90,66	BAŞLIKTA
HEA180	42,37	119,8	BAŞLIKTA
HEA200	46,17	157,4	BAŞLIKTA
HEA220	51,51	207,8	BAŞLIKTA
HEA240	55,97	270,4	BAŞLIKTA
HEA260	60,54	330,9	BAŞLIKTA
HEA280	65,18	399,1	BAŞLIKTA
HEA300	69,62	494,3	BAŞLIKTA
HEA320	69,76	546,6	BAŞLIKTA
HEA340	69,11	584,9	BAŞLIKTA
HEA360	68,42	623,6	BAŞLIKTA
HEA400	66,33	687,8	BAŞLIKTA
HEA450	65,22	766,3	BAŞLIKTA
HEA500	64,11	845,9	BAŞLIKTA
HEA550	61,77	896,9	BAŞLIKTA
HEA600	59,42	948,5	BAŞLIKTA
HEA650	57,06	1001	BAŞLIKTA
HEA700	53,53	1060	BAŞLIKTA
HEA800	47,92	1131	BAŞLIKTA
HEA900	43,16	1238	BAŞLIKTA
HEA1000	38,11	1313	SPANDRELDE

Tablo 3.8. Kesite %70 akma yüküne eşit bir eksenel yük etkiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,70 (P=0,70P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py,0,70} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	30,09	25,51	BAŞLIKTA
HEA120	36,25	36,58	BAŞLIKTA
HEA140	42,28	52,91	BAŞLIKTA
HEA160	47,69	74,26	BAŞLIKTA
HEA180	54,28	97,93	BAŞLIKTA
HEA200	59,63	128,9	BAŞLIKTA

Tablo 3.8.(Devam) Kesite %70 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,70 (P=0,70P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py;0,70} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA220	66,13	170,0	BAŞLIKTA
HEA240	71,98	221,3	BAŞLIKTA
HEA260	77,91	270,8	BAŞLIKTA
HEA280	83,89	326,6	BAŞLIKTA
HEA300	89,72	404,6	BAŞLIKTA
HEA320	89,82	447,4	BAŞLIKTA
HEA340	89,33	479,2	BAŞLIKTA
HEA360	88,82	511,4	BAŞLIKTA
HEA400	87,25	565,8	BAŞLIKTA
HEA450	86,42	631,3	BAŞLIKTA
HEA500	85,59	698,1	BAŞLIKTA
HEA550	83,83	742,7	BAŞLIKTA
HEA600	82,06	788,3	BAŞLIKTA
HEA650	80,30	834,7	BAŞLIKTA
HEA700	77,65	889,4	BAŞLIKTA
HEA800	73,44	958,0	BAŞLIKTA
HEA900	69,87	1057	BAŞLIKTA
HEA1000	66,09	1124	BAŞLIKTA

Tablo 3.9. Kesite %80 akma yüküne eşit bir aksenal yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,80 (P=0,80P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py;0,80} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	36,73	18,42	BAŞLIKTA
HEA120	44,16	26,39	BAŞLIKTA
HEA140	51,52	38,18	BAŞLIKTA
HEA160	58,46	53,68	BAŞLIKTA
HEA180	66,18	70,68	BAŞLIKTA
HEA200	73,08	93,17	BAŞLIKTA
HEA220	80,75	122,7	BAŞLIKTA
HEA240	87,99	159,8	BAŞLIKTA
HEA260	95,27	195,6	BAŞLIKTA
HEA280	102,6	236,0	BAŞLIKTA
HEA300	109,8	292,4	BAŞLIKTA
HEA320	109,9	323,2	BAŞLIKTA

Tablo 3.9.(Devam) Kesite %80 akma yüküne eşit bir aksel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,80 (P=0,80P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py;0,80} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA340	109,6	346,4	BAŞLIKTA
HEA360	109,2	370,0	BAŞLIKTA
HEA400	108,2	410,4	BAŞLIKTA
HEA450	107,6	458,6	BAŞLIKTA
HEA500	107,1	507,8	BAŞLIKTA
HEA550	105,9	541,9	BAŞLIKTA
HEA600	104,7	576,8	BAŞLIKTA
HEA650	103,5	612,6	BAŞLIKTA
HEA700	101,8	655,8	BAŞLIKTA
HEA800	98,96	711,6	BAŞLIKTA
HEA900	96,58	790,3	BAŞLIKTA
HEA1000	94,06	846,5	BAŞLIKTA

Tablo 3.10. Kesite %90 alana eşit bir aksel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,90 (P=0,90P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py;0,90} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA100	43,36	9,913	BAŞLIKTA
HEA120	52,08	14,20	BAŞLIKTA
HEA140	60,76	20,54	BAŞLIKTA
HEA160	69,23	28,93	BAŞLIKTA
HEA180	78,09	38,03	BAŞLIKTA
HEA200	86,54	50,21	BAŞLIKTA
HEA220	95,38	66,07	BAŞLIKTA
HEA240	104,0	86,05	BAŞLIKTA
HEA260	112,6	105,3	BAŞLIKTA
HEA280	121,3	127,1	BAŞLIKTA
HEA300	129,9	157,5	BAŞLIKTA
HEA320	129,9	174,1	BAŞLIKTA
HEA340	129,8	186,7	BAŞLIKTA
HEA360	129,6	199,6	BAŞLIKTA
HEA400	129,1	221,8	BAŞLIKTA
HEA450	128,8	248,2	BAŞLIKTA
HEA500	128,5	275,1	BAŞLIKTA
HEA550	127,9	294,3	BAŞLIKTA

Tablo 3.10.(Devam) Kesite %90 alana eşit bir eksenel yük etkidiğinde plastik tarafsız eksenin yeri ve zayıf eksendeki plastik moment kapasitesi

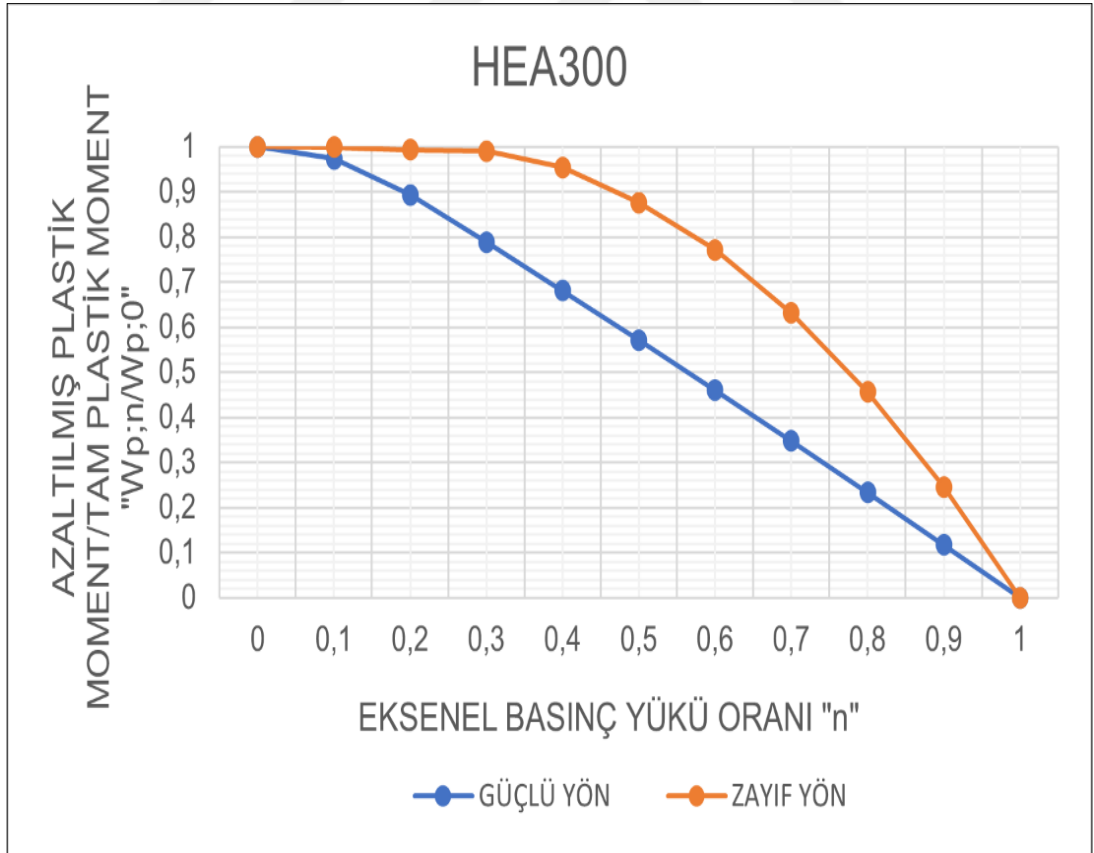
PROFİL TİPİ	EKSENEL YÜK ORANI "n=0,90 (P=0,90P _y)" İKEN		
	x _p (mm)	W _{py,0,90} (x10 ³ mm ³)	PLASTİK TARAFSIZ EKSENİN YERİ
HEA600	127,4	314,0	BAŞLIKTA
HEA650	126,8	334,4	BAŞLIKTA
HEA700	125,9	359,3	BAŞLIKTA
HEA800	124,5	392,3	BAŞLIKTA
HEA900	123,3	438,0	BAŞLIKTA
HEA1000	122,0	471,8	BAŞLIKTA

4. GÜÇLÜ VE ZAYIF YÖNDE ÇALIŞAN HEA PROFİLLERİN EKSENEL BASINÇ YÜKÜ ETKİSİYLE PLASTİK MOMENT KAPASİTELERİNDEKİ DEĞİŞİM

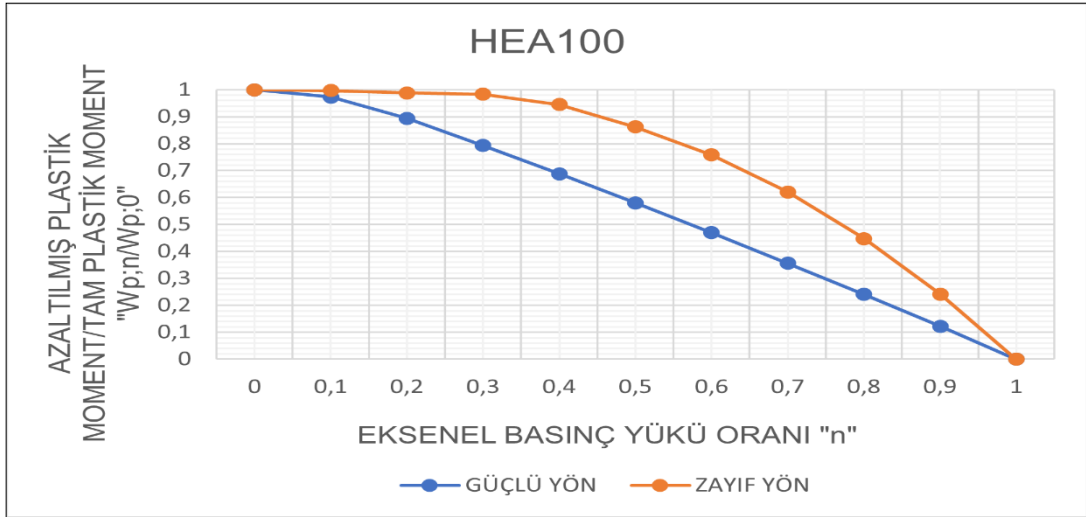
Bu bölümde, daha önceki bölümlerde hesaplamaları gösterilen ve tablolaştırılan eksenel yüke bağlı plastik moment değerleri grafiklerle değerlendirilecektir.

Tüm hesaplamaların detaylıca gösterildiği HEA300 profili öncelikli olmak üzere, HEA100'den HEA1000 profiline kadar tezde incelenen bütün profillere ait grafikler sırasıyla Şekil 4.1'den Şekil 4.24'e kadar olmak üzere sunulmuştur.

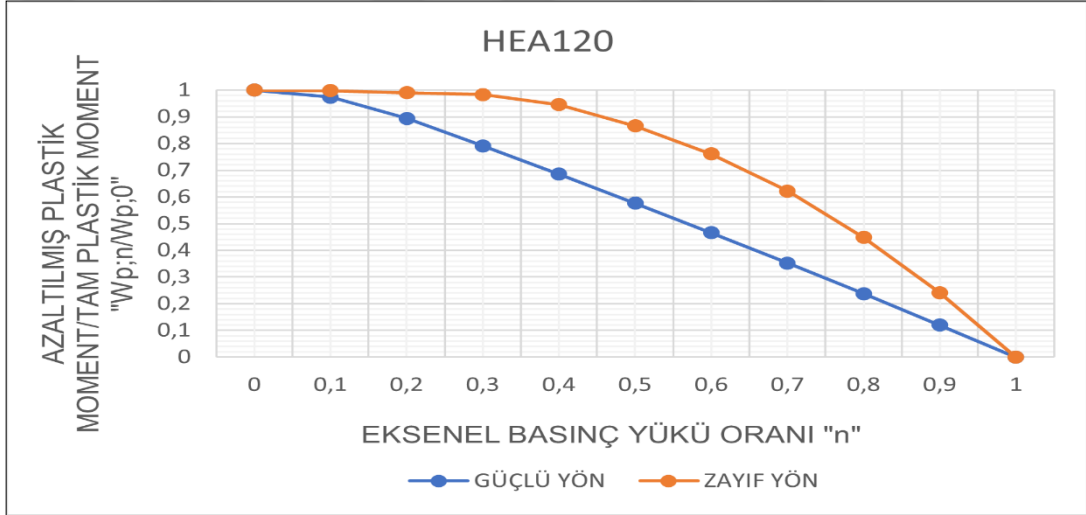
Grafiklerde, yatay eksenle elemana etkiyen eksenel basınç yükü oranları, düşey eksenle ise bu basınç yükleri etkisiyle hesaplanan azaltılmış plastik moment kapasitelerinin tam plastik moment kapasitesine oranlanması ile normalize edilen değerler çizdirilmiştir.



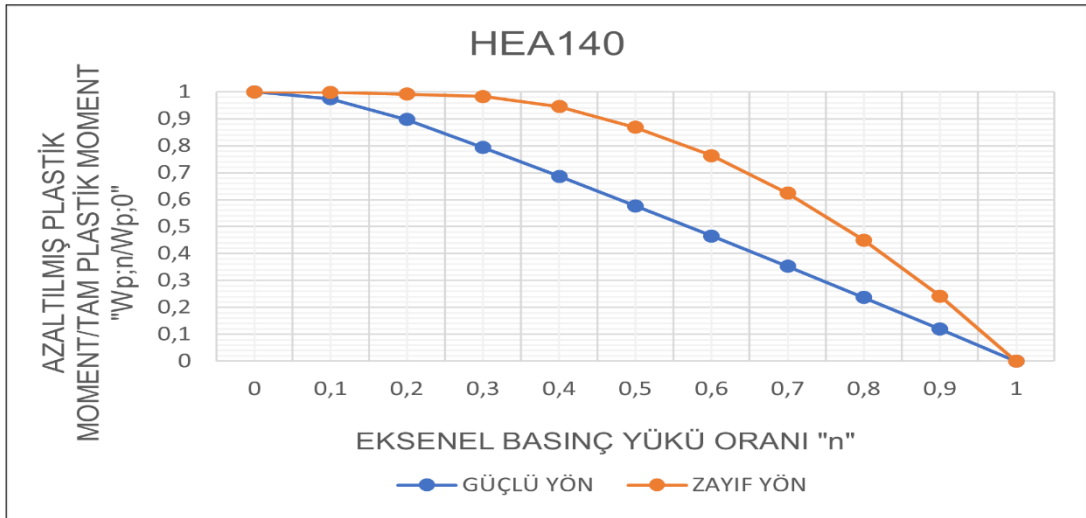
Şekil 4.1. HEA300 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



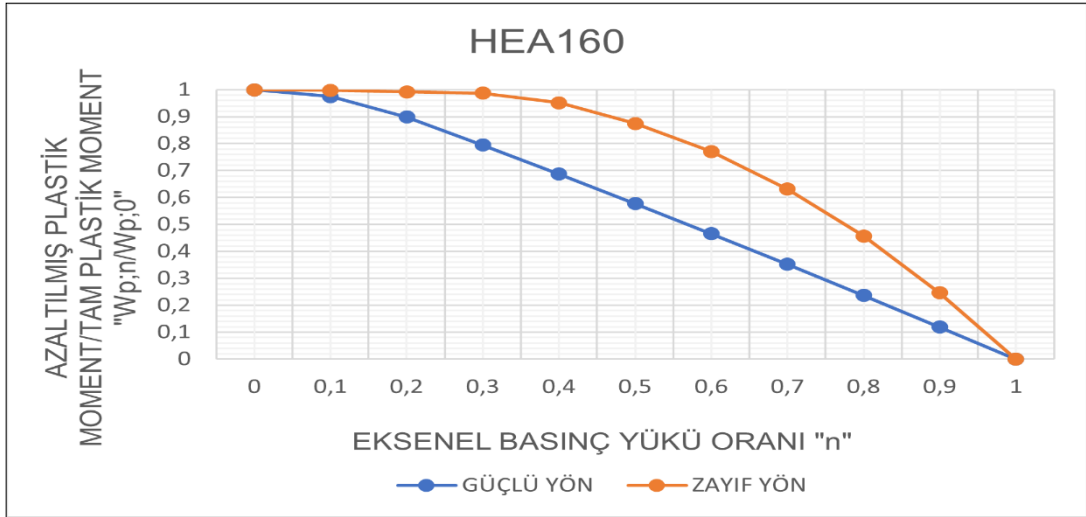
Şekil 4.2. HEA100 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



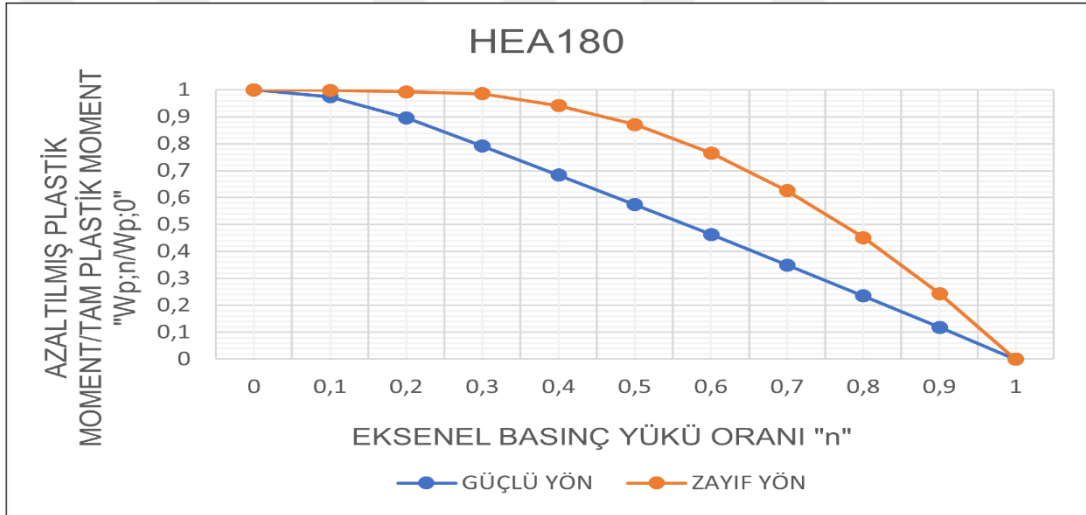
Şekil 4.3. HEA120 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



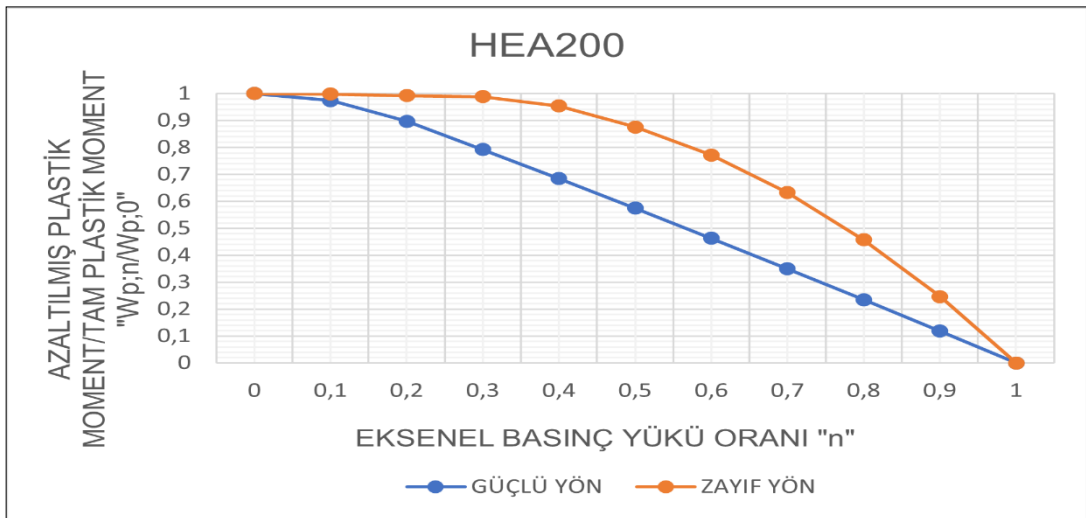
Şekil 4.4. HEA140 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



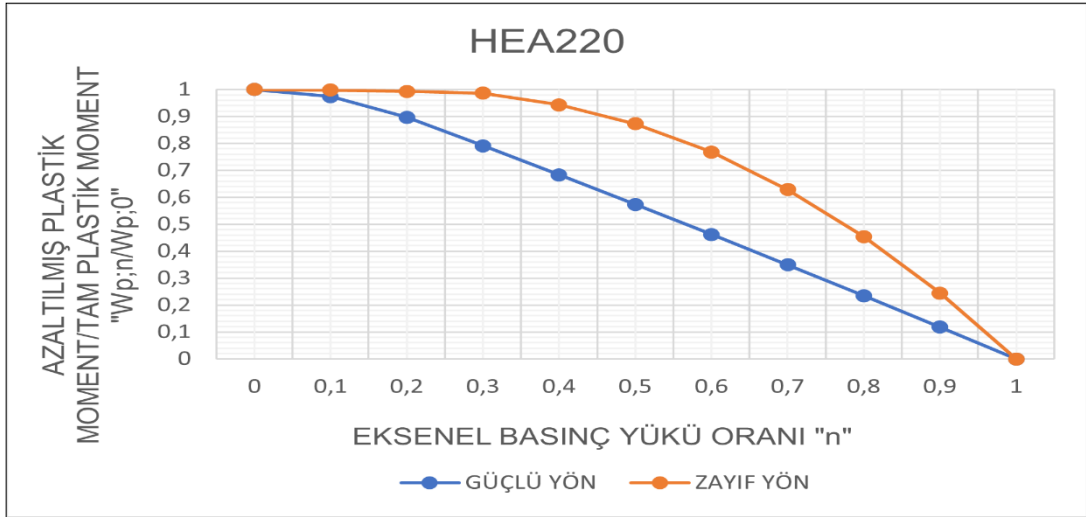
Şekil 4.5. HEA160 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



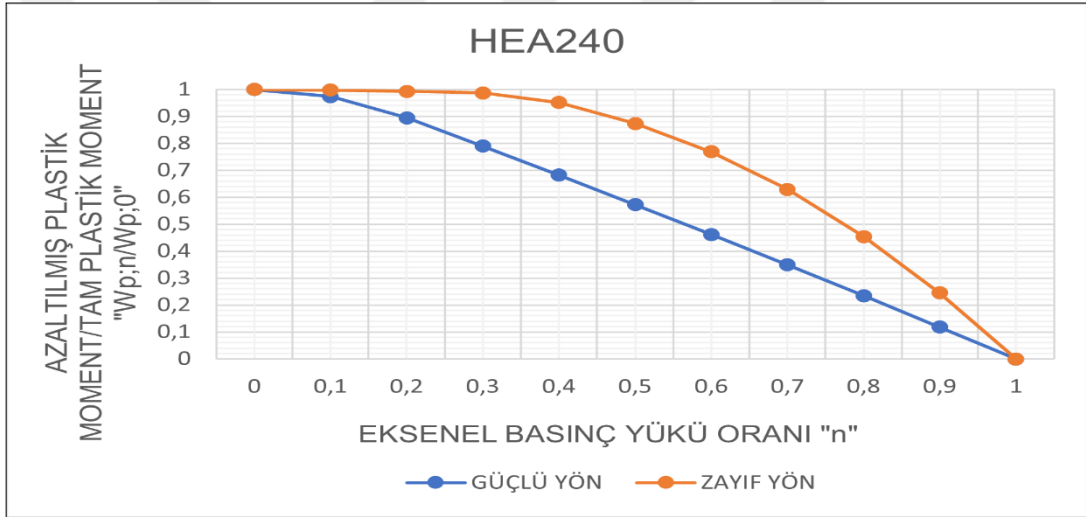
Şekil 4.6. HEA180 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



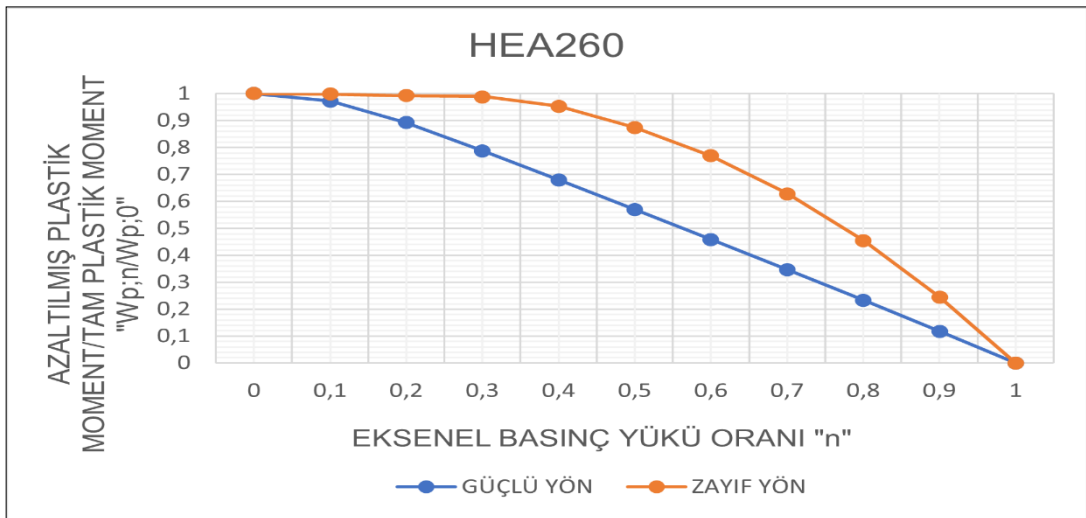
Şekil 4.7. HEA200 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



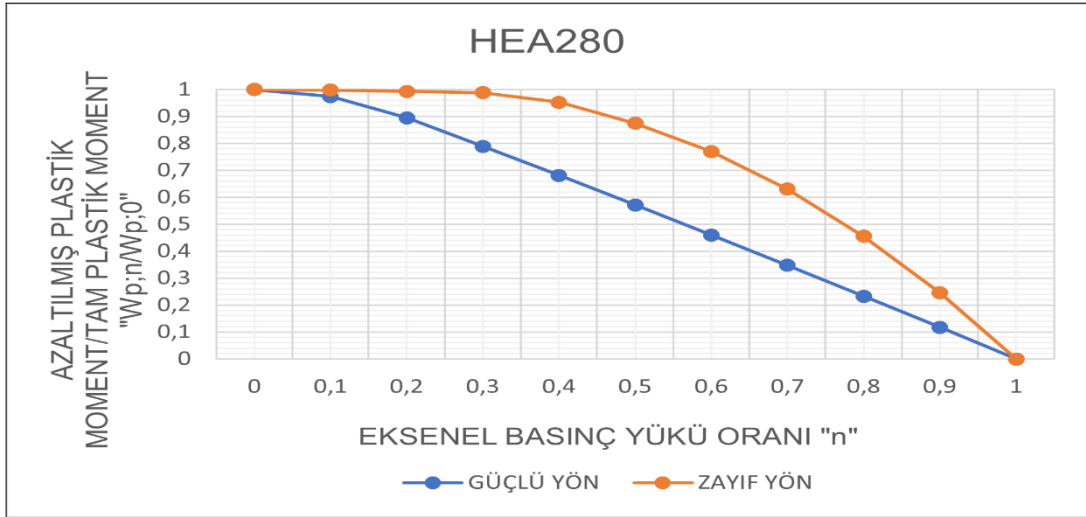
Şekil 4.8. HEA220 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



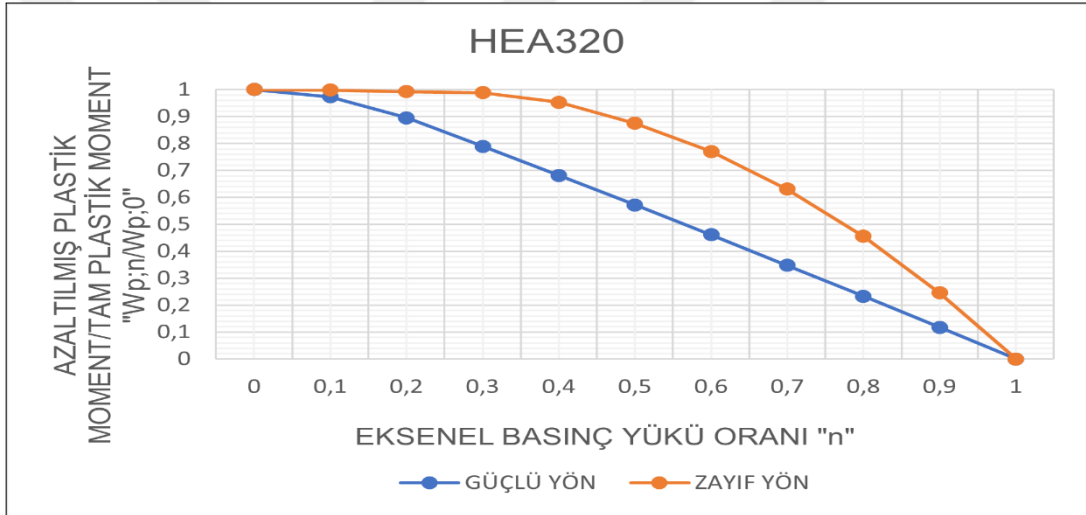
Şekil 4.9. HEA240 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



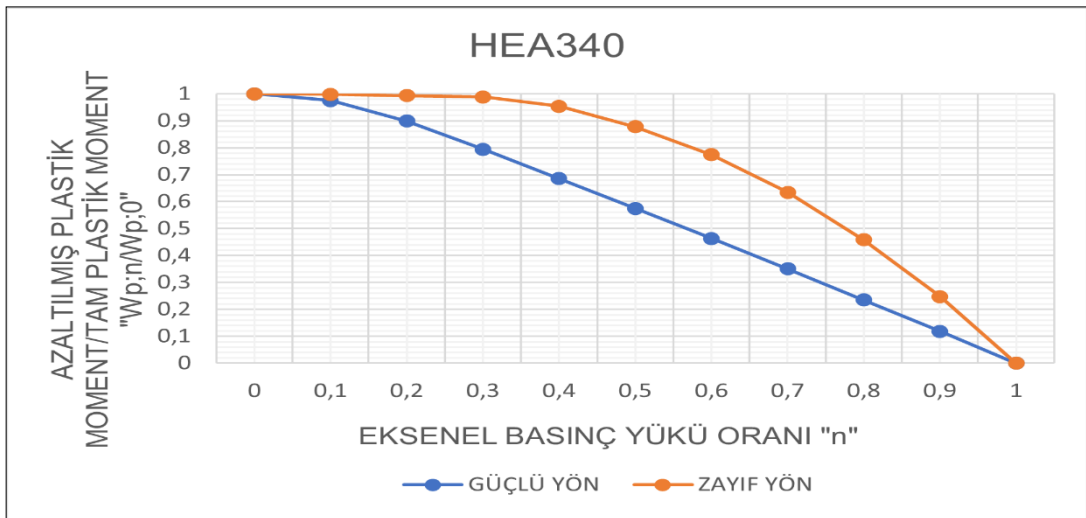
Şekil 4.10. HEA260 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



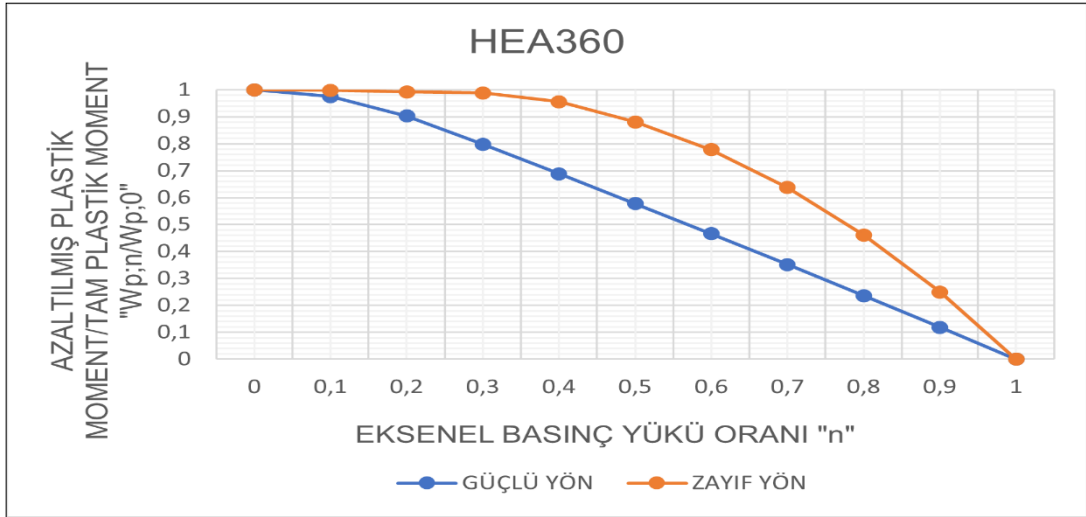
Şekil 4.11. HEA280 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



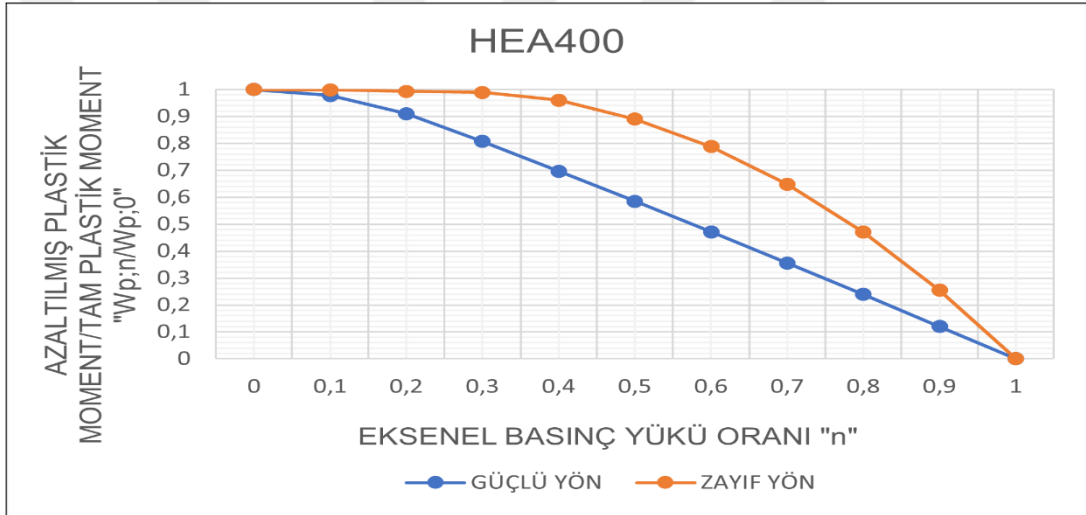
Şekil 4.12. HEA320 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



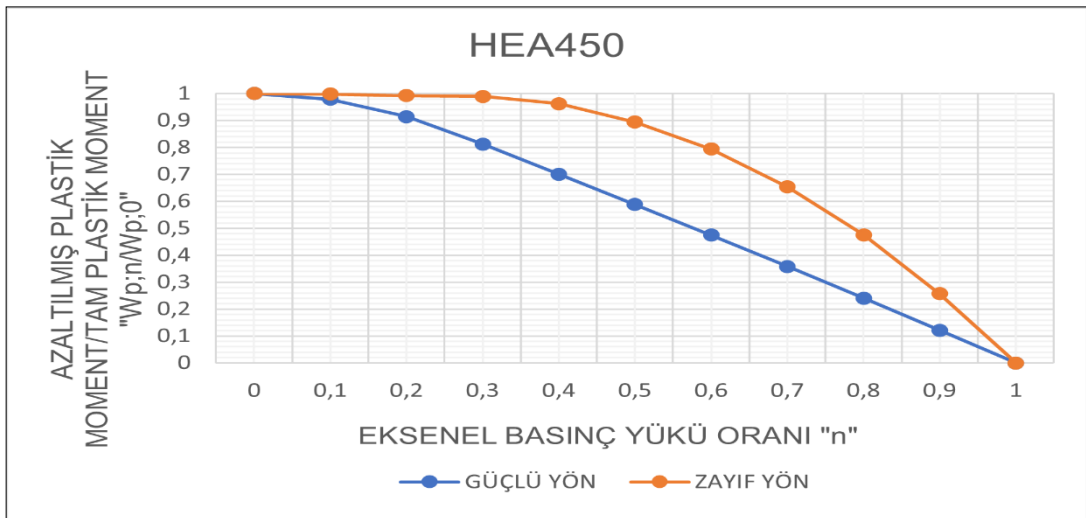
Şekil 4.13. HEA340 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



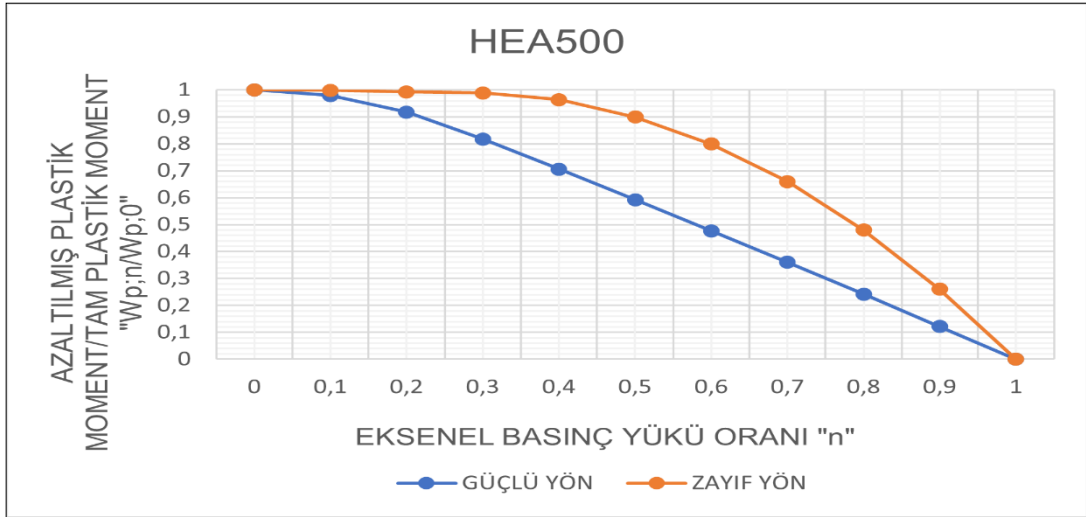
Şekil 4.14. HEA360 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



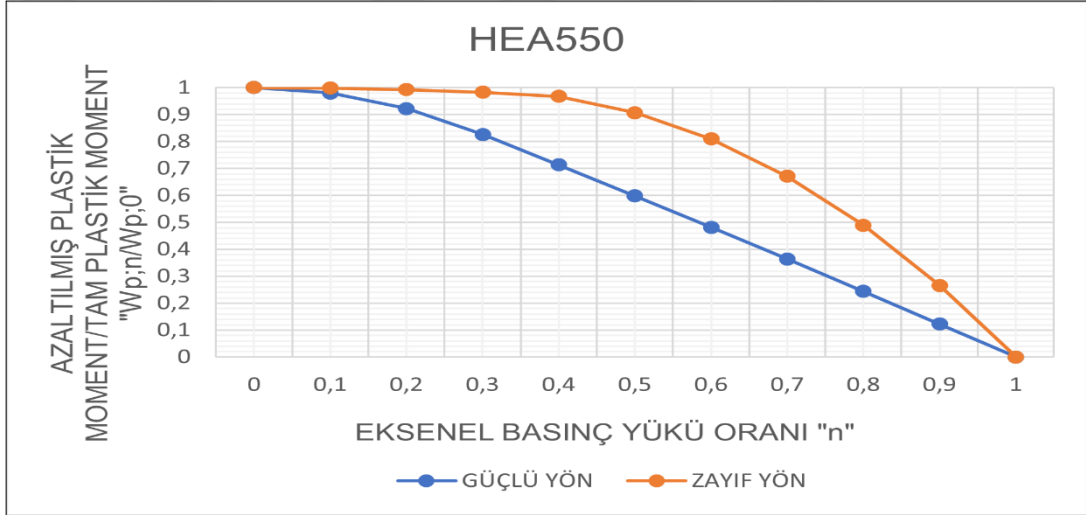
Şekil 4.15. HEA400 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



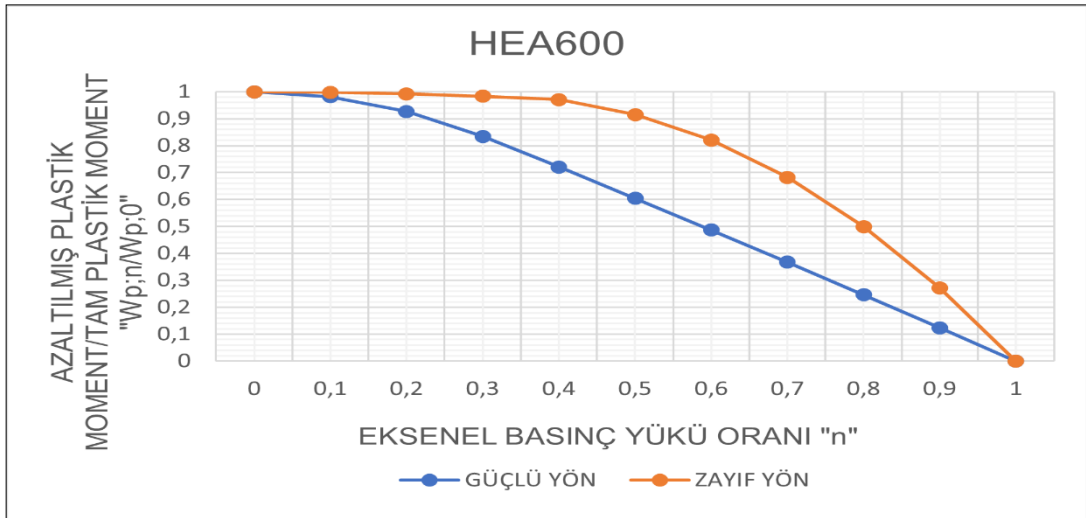
Şekil 4.16. HEA450 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



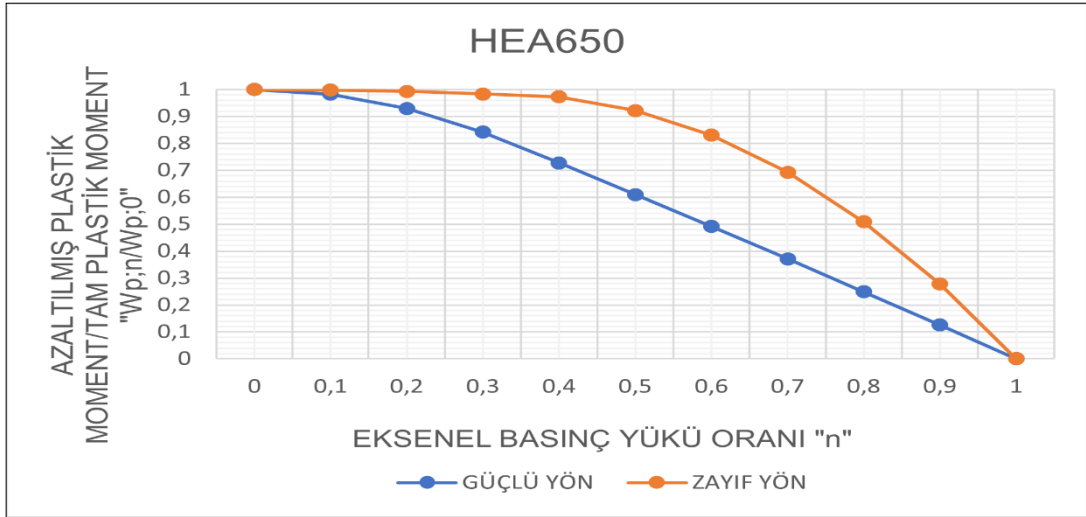
Şekil 4.17. HEA500 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



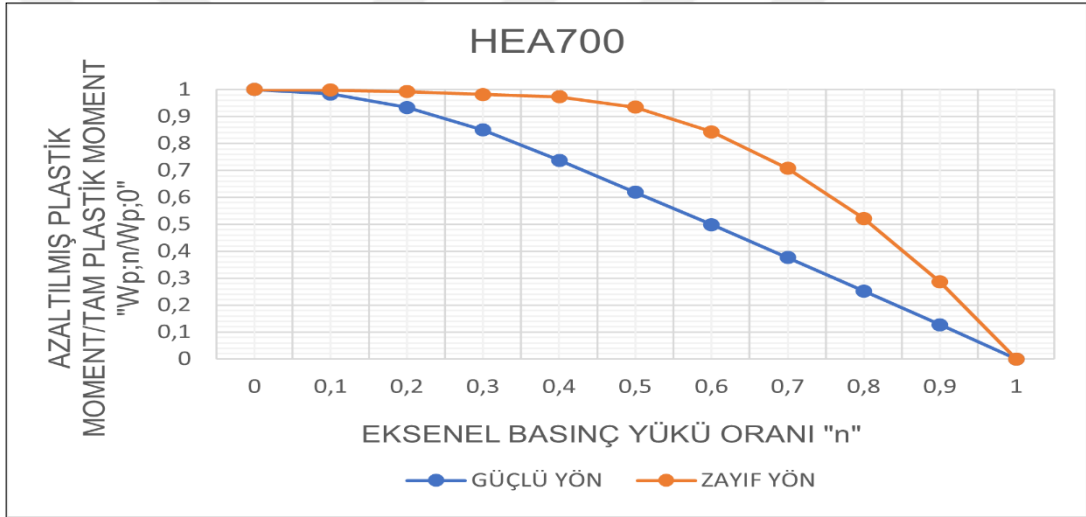
Şekil 4.18. HEA550 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



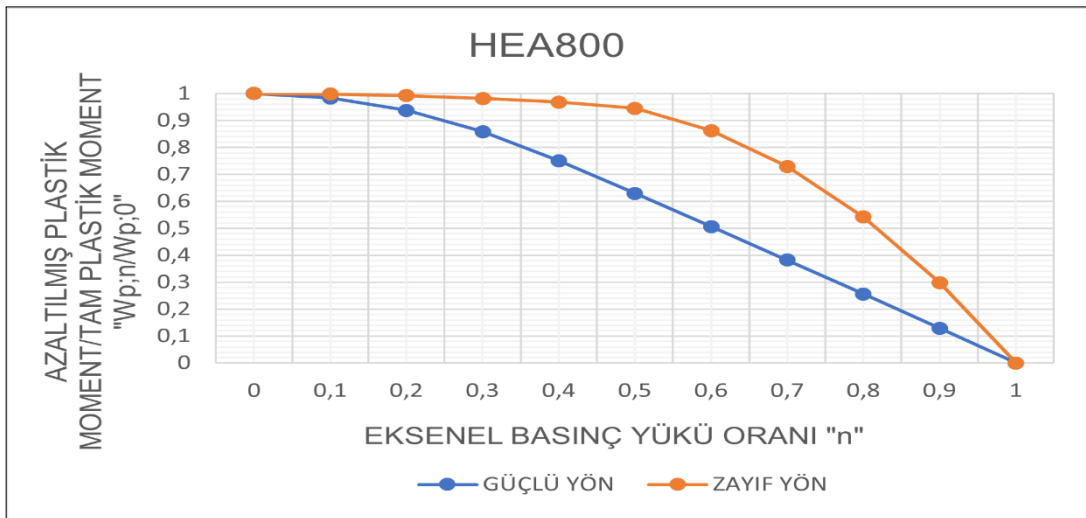
Şekil 4.19. HEA600 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



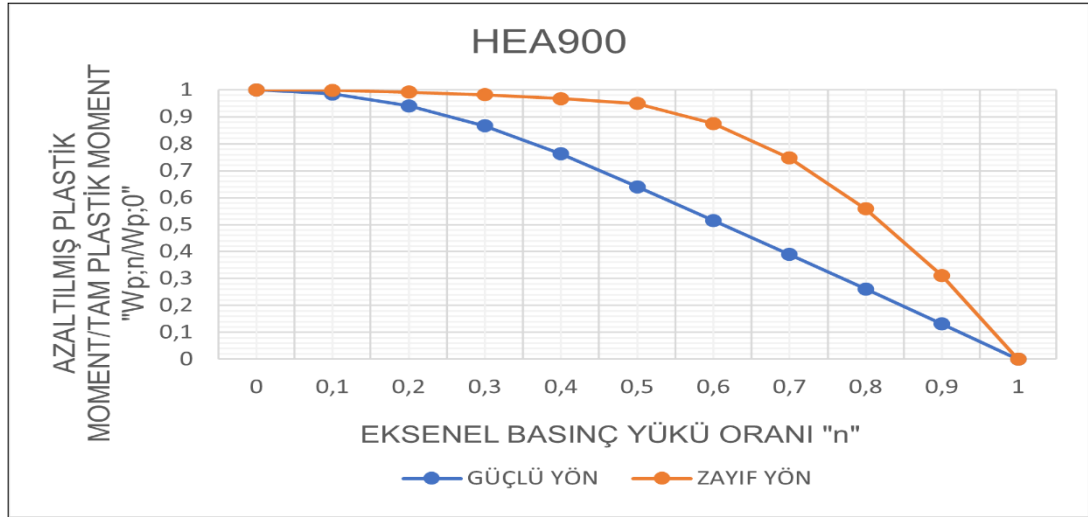
Şekil 4.20. HEA650 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



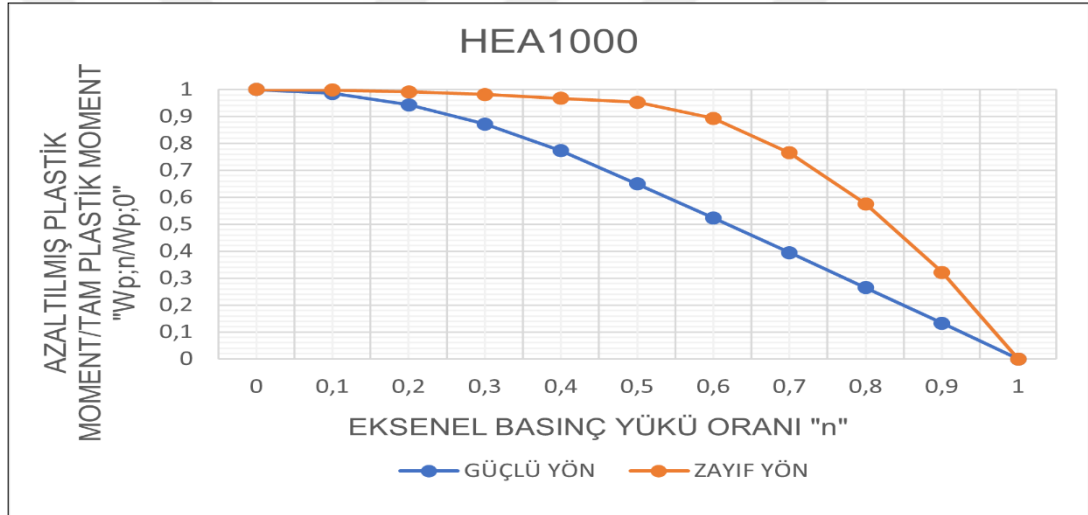
Şekil 4.21. HEA700 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



Şekil 4.22. HEA800 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



Şekil 4.23. HEA900 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi



Şekil 4.24. HEA1000 profili için plastik moment kapasitesinin basınç yüküyle değişimi

Grafiklerden de görüldüğü üzere profil tiplerinin tamamında hem güçlü hem de zayıf yönde kesite etkiyen aksenal yükleme arttıkça plastik moment kapasiteleri azalmaktadır. Bu azalma güçlü ekseninde belirgin bir şekilde gözlemlenebilirken zayıf ekseninde daha yavaş bir değişim söz konusudur. Ayrıca güçlü yönde neredeyse doğrusal bir değişim söz konusuyken zayıf ekseninde küçük kesitli profillerde aksenal yük oranı 0,30'lara tekabül edene kadar hemen hemen hiç değişim olmamakta daha kalın kesitli profillerde ise bu değer neredeyse %50'leri bulmaktadır. Sonrasında grafikte hızlı bir düşüş gözlemlenmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmanın ilk bölümünde HEA profillerin toplam kesit alanları hesaplandı ve uluslararası çelik üreticisi olan bir firmanın kataloğundaki değerlerle karşılaştırıldığında herhangi bir farklılık gözlemlenmedi. Hesaplanan alanlar çalışmanın ikinci ve üçüncü bölümlerinde profillerin plastik moment kapasiteleri hesaplanırken kullanıldı.

Çalışmanın ikinci bölümünde HEA profillerin güçlü eksendeki, eksenel yük değişimine bağlı plastik mukavemet momenti kapasiteleri hesaplanarak tablolar oluşturuldu. Kesite dışarıdan etkiyen her bir eksenel basınç yükü durumu için PTE'nin yerini bulmak amacıyla yapılan hesaplamalarda, hassasiyeti artırmak adına spandrel alanı her ne kadar ihmal edilebilecek kadar küçük olsa da hem ikinci hem de üçüncü bölümlerde yapılan hesaplamalara dahil edilerek daha gerçekçi sonuçlara ulaşıldı. Bu bölümde kesitlerin başlık kalınlıklarının, PTE'nin yerinin değişimindeki en belirleyici faktör olduğu gözlemlendi. Örnek olarak ele alınan ve tüm işlem adımlarının gösterildiği HEA300 profilinde de görüldüğü gibi %10'luk akma yüküne eşdeğer eksenel basınç yükü profile etkidiğinde PTE gövde sınırları, %20'lik akma yüküne eşdeğer eksenel basınç yükü profile etkidiğinde ise spandrel sınırları içinde kalmıştır. %30'luk akma yüküne eşdeğer eksenel basınç yükünden itibaren kalan tüm yükleme durumlarında ise hep başlığa düşmüştür. Bu da bizlere göstermektedir ki güçlü yönde PTE'nin yeri için en belirleyici etmen başlık kalınlığıdır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde HEA profillerin zayıf eksendeki, eksenel yük değişimine bağlı plastik mukavemet momenti kapasiteleri hesaplanarak tablolar oluşturuldu. Bu bölümde yine örnek olarak HEA300 profili kullanılarak işlem adımları tamamlandı. Bu kez %10'luk ve %20'lik akma yüküne eşdeğer eksenel basınç yükü profile etkidiğinde PTE'nin gövde sınırları içinde kaldığı, %30'luk ve %40'lık akma yüküne eşdeğer eksenel basınç yükü etkidiğinde ise spandrel sınırlarında olduğu gözlemlenmiştir. Ancak %50'lik akma yüküne eşdeğer bir eksenel basınç yükünden itibaren PTE'nin yeri başlıkta seyretmiştir.

PTE'nin profil güçlü yönde kullanıldığında %30'luk, zayıf yönde kullanıldığında ise %50'lik akma yükünden itibaren başlığa düşmesi zayıf yönde başlık kalınlığının güçlü ekseninde olduğu kadar önemli olmadığını ve gövde kalınlığı ile spandrel yarıçapının da bu sonuçta etkili olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın son bölümünde ise; ikinci ve üçüncü bölümde hesaplamaları yapılan güçlü ve zayıf yöndeki normalize edilmiş plastik moment değerleri, her bir profil için tek bir grafikte ayrı ayrı gösterilerek karşılaştırıldı. Grafik sonuçlarına göre güçlü eksenindeki aksenal yüke bağlı moment değişiminde eğilimin hemen hemen doğrusal olarak azaldığı, zayıf ekseninde ise belli aksenal yüklemeye kadar çok az değişim olurken bu yükten sonra elemanın hızlı bir azalma davranışı sergilediği gözlemlenmiştir.

Çalışmada oluşturulan tabloların çelik yapılarla ilgili tasarım yapan mühendis ve mimarlara özellikle elemanların tam plastik haldeykenki davranışlarını göstermesi, ayrıca da belirli aksenal yüke karşılık gelen moment kapasitelerini içermesi açısından yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Yıldırım S. G., Hafif Çelik Taşıyıcılı Endüstrileşmiş Konutlarda Tasarım Verileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003, 142541.
- [2] Beer F. P., Johnston E. R., Dewolf Jr. J. T., Mazurek D. F., *Cisimlerin Mukavemeti 6. Basımdan Çeviri*, İstanbul, 78-79, 2014.
- [3] TBDY/2018, Türk Bina Deprem Yönetmeliği, *AFAD ve Acil Durum Başkanlığı*, Ankara, 2018.
- [4] Celep Z., Deprem Yönetmeliği'nde Plastisite Teorisinin Uygulamaları, *XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi*, Manisa, Türkiye, 26-30 Ağustos 2013.
- [5] Şengel S., Kıraç N., Çelik Yapılarda Elastik ve Plastik Yöntem Çözümleri ve Birleşimler, *Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 2003, **16**(1), 30-42.
- [6] Arat M. F., Performans Tabanlı Plastik Tasarım Yönteminin Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım Yöntemiyle Kıyaslanması, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2020, 637036.
- [7] Neal B. G., Effect of Shear Force on The Fully Plastic Moment of An I-Beam, *Journal of Mechanical Engineering Science*, DOI: 10.1243/jmes_jour_1961_003_033_02.
- [8] Yaman Z., Zayıf Eksende Eğilen Çelik U Kesitli Profillerin Plastik Tasarım Koşullarının İrdelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2010, 274731.
- [9] Soltani Pakdel V., Çeliğin Plastik Akma ve Pekleşmesinin Taşıma Gücüne Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 237101.
- [10] Whang B., Plastic Moment Distribution, Master Thesis, Polytechnic Institute of Brooklyn, ProQuest Dissertations Publishing, 1961.
- [11] Mojaddidy K., Göğüş M. T., Eksenel Yüklü Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Dayanımlarının Farklı Şartnamelere Göre İncelenmesi, *XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi*, Manisa, Türkiye, 26-30 Ağustos 2013.
- [12] Uslu F., Taşkın K., Saraçoğlu M. H., Eksenel Yük ve Moment Etkisi Altındaki Çelik Gömme Kompozit Kolonların Dayanımları ve Sünelikleri, *İğdir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, DOI: 10.21597/jist.789886.

- [13] Abu Saba E. G., Influence of Axial Forces on Plastic Moment, *Design of Steel Structures*, DOI: 10.1007/978-1-4615-2079-5_12.
- [14] Neal B. G., The Effect of Shear and Normal Forces on The Fully Plastic Moment of a Beam of Rectangular Cross Section, *Journal of Applied Mechanics*, DOI: 10.1115/1.3641666.
- [15] Neal B. G., Effect of Shear and Normal Forces on The Fully Plastic Moment of An I-Beam, *Journal of Mechanical Engineering Science*, DOI: 10.1243/jmes_jour_1961_003_035_02.
- [16] Arcelor Mittal Europe, Section and Merchant Bars, Version 2016-1
- [17] ÇYTHYEY, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2016.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Bilen Demirci N.**, Okay F., Pınarbaşı Çuhadaroğlu S., Eksenel Y¼k Taşıyan HEA Çelik Profillerin Plastik Moment Kapasitelerinin Hesabı, *5. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresi*, İstanbul, 21-22 Aralık 2019.



ÖZGEÇMİŞ

Nezahat BİLEN DEMİRCİ lise öğrenimini Kastamonu Abdurrahmanpaşa Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2015 yılında mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. HEA profillerde aksel yük plastik moment ilişkisi ile ilgili çalışmaları bulunmaktadır.

