

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

**ZAYIF EKSENDE EĞİLEN ÇELİK U KESİTLİ
PROFİLLERİN PLASTİK TASARIM KOŞULLARININ
İRDELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Y. Müh. Zeynep YAMAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muzaffer ELMAS
Ortak Danışman : Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ

Temmuz 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAYIF EKSENDE EĞİLEN ÇELİK U KESİTLİ
PROFİLLERİN PLASTİK TASARIM KOŞULLARININ
İRDELENMESİ

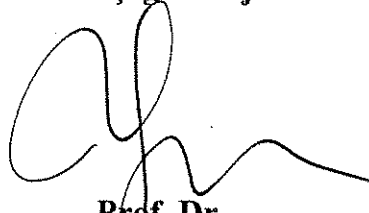
DOKTORA TEZİ


İnş. Y. Müh. Zeynep YAMAN


Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

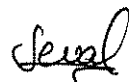
Bu tez 22 / 07 /2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.
Seyhan FIRAT
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Muzaffer ELMAS
Üye


Doç. Dr.
Bülent AKBAŞ
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Naci ÇAĞLAR
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Seval PINARBAŞI
Üye

TEŞEKKÜR

Sakarya Üniversitesinde, gerek araştırma görevlisi olarak görev yaptığım sürece gerekse öğrencisi olarak doktora yaptığım süre boyunca bilimsel ve sosyal deneyimlerinden faydalandığım ve her alanda yardım ve desteğini esirgemeyen doktora danışmanım Sn. Prof. Dr. Muzaffer ELMAS'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Doktora tez çalışmam süresince değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımı her aşamada izleyip değerlendirerek yön veren, Çelik Yapılar konusunda ufkumu genişleten ve bizlere önce öğretmen sonra meslektaş, dost, arkadaş ve kardeş olan doktora tez ortak danışmanım Sn. Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ'a, teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince bana yardımcı olan bütün mesai arkadaşlarıma, hayatta daha iyi bir seviyeye gelmem için maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli DERE, YAMAN ve HERGÜNER ailelerine ve benim minik ailem; eşim Çetin' e, çocuklarım Elif, Oğuz, Yavuz 'a ve ailemizin manevi annesi Ruşen KÜÇÜKSİPAHİ ve ailesine, kucak dolusu sevgi ve minnet duygularımı sunarım.

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projelerini Destekleme Komisyonu tarafından desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Projelerini Destekleme Komisyonu Kurucu ve Komisyon üyelerine de teşekkürlerimi bildiririm.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması	3

BÖLÜM 2.

ÇELİK YAPILARDA HESAP VE TASARIM YÖNTEMLERİ	7
2.1. Emniyet Gerilmeleri Yöntemine Göre Tasarım	8
2.2. Sınır Değer Yöntemlerine Göre Tasarım	9
2.2.1. Yük ve mukavemet faktörüne göre tasarım	9
2.2.2. Plastik teoriye göre hesap ve tasarım	9
2.2.2.1. Dönme kapasitesi	14

BÖLÜM 3.

STANDART VE YÖNETMELİKLERDE TASARIM KURALLARI	20
3.1. EN 1993'e Göre Tasarım Kuralları.....	20
3.1.1. EN 1993' e göre kesitlerin sınıflandırılması.....	21
3.1.2. EN 1993'e göre c/t hesabı.....	23

3.2. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY)'e Göre Tasarım Kuralları	26
3.3. TS 4561'e Göre Tasarım Kuralları	28

BÖLÜM 4.

U KESİTLİ KİRİŞLERİN ZAYIF EKSENDE EĞİLME DENEYLERİ	29
4.1. Malzeme özellikleri	29
4.2. Deney Düzenegi	30

BÖLÜM 5.

SONLU ELEMAN MODELLEMESİ	32
5.1. Malzeme Modeli	32
5.2. Plastisite ve Kırılma Hipotezleri	34
5.3. Geometrik Kusur	37
5.3.1. Kusuru sinüs dalgası formunda tanımlamak	38
5.3.2. Lineer burkulma mod şeklinin geometrik kusur olarak kullanılması	40
5.4. Malzemelerin İzotrop Pekleşmesi	42
5.5. Doğrusal Olmayan Sistemlerin Sayısal Çözüm Yöntemleri	43
5.5.1. Riks adımlama metodu	45
5.6. S4R Sonlu Eleman Modeli	47
5.7. Çözüm Ağı Yoğunluğu	49
5.8. Sınır Koşulları ve Yükleme	51
5.9. Gerçekleme	51

BÖLÜM 6.

PARAMETRİK ÇALIŞMA	55
6.1. Zayıf Eksende Eğilme	55
6.2. Parametrik Modelleme Sonuçları	59
6.3. Sonuçların Tartışılması	70
6.4. EN 1993'ün Değerlendirilmesi	77
6.5. Enkesit Plak Elemanları için Narinlik Limitleri	77

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	86
EKLER.....	91
ÖZGEÇMİŞ	98

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Enkesit alanı
AWS	: Amerikan kaynak birliği (American Welding Society)
b_f	: Profil başlık genişliği
c	: Eurocode 3'e göre tarafsız eksen mesafesi
d	: Profil gövde yüksekliği
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (Türk Deprem Yönetmeliği)
E, E_s	: Çeliğin elastisite modülü
e_1	: Yük güvenlik katsayısı
e_2	: Malzeme güvenlik katsayısı
EN 1993	: Eurocode 3[16]
$f_v, \sigma_a, \sigma_{ak}$: Akma gerilmesi
h_w	: Profil net gövde yüksekliği
L	: Profil boyu
M_p, M_{pl}	: Plastik moment
M_{ul}	: Kesitin taşıyabileceği en büyük moment
M_y	: Akma momenti
P_i	: İşletme yükleri
P_u	: Taşıma gücü
R	: Kesit dönme kapasitesi
T.E.	: Tarafsız eksen
t_f, t	: Profil başlık kalınlığı
TS 3357	: Çelik yapılarda kaynaklı birleşimlerin hesap ve yapım kuralları
TS 4561	: Çelik yapıların plastik teoriye göre hesap kuralları
TS 648	: Çelik yapıların hesap ve yapım kuralları
t_w	: Profil gövde kalınlığı

μ_E	: Enerji sünekliği
μ_x	: Kesit sünekliği
μ_δ	: Yapısal süneklik
μ_ϵ	: Malzeme sünekliği
μ_0	: Eleman sünekliği
σ_1	: x eksenini dođrultusundaki gerilme
σ_2	: y eksenini dođrultusundaki gerilme
σ_3	: z eksenini dođrultusundaki gerilme
τ_{max}	: Maksimum kayma gerilmesi
	: Eğrilik
N_x	: x eksenini dođrultusundaki birim basınç kuvveti
N_y	: y eksenini dođrultusundaki birim basınç kuvveti
N_z	: z eksenini dođrultusundaki birim basınç kuvveti

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Sınır Durum Yöntemlerinde Tasarıma Esas Olan Sınır Durum Türleri [3].	8
Şekil 2.2. Gerilme Davranışı ve Momet-Eğrilik İlişkisi [53].....	11
Şekil 2.3. Eğilme Durumunda Genel Davranış Şekli [52].....	12
Şekil 2.4. Süneklik Türleri ve Hesaplanma Tarzları [9]	13
Şekil 2.5. Eğilme Momenti–Eğrilik Diyagramı [6]	15
Şekil 2.6. İdealleştirilmiş Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği [6].....	16
Şekil 2.7. Dönme Kapasitesinin Belirlenmesi.....	17
Şekil 3.1. EN 1993'te Basınç Parçası için "c" Değeri[16].....	24
Şekil 3.2. EN 1993'e Göre Parametrik Modellerde c/t Hesabı Akış Diyagramı	25
Şekil 4. 1. Zayıf Eksende Eğilme Deney Düzeneği [19]	30
Şekil 5.1. Çeliğin Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi [10]	33
Şekil 5.2. İdeal Elasto-Plastik Malzemede σ - ϵ Diyagramı	33
Şekil 5.3. Tresca ve Von-Mises Akma Yüzeyleri [23]	36
Şekil 5.4. Eğilme ve Flanş Eğriliğinin Ölçüsü	38
Şekil 5.5. Sinüs Dalgası Şeklinde Geometrik Kusur.....	39
Şekil 5.6. Geometrik Kusurların Sinüs Dalgası Formunda Modellendiği Sonlu Eleman Metodu(SEM) Sonuçlarının Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması	39
Şekil 5.7. Burkulma Analiz Sonucunda Elde Edilen Farklı Mod Şekilleri.....	40
Şekil 5.8. Geometrik Kusurlar Lineer Burkulma Mod Şekli ile Tanımlandığı Deney Elemanlarının Yük-Deplasman Grafiği	41
Şekil 5.9. a)İzotropik Sertleşme b) Kinematik Sertleşme	43
Şekil 5.10. Yük-Yerdeğiştirme Eğrisindeki Ani Yön Değişimleri [20].....	46
Şekil 5. 11. Yay boyu (Riks) Metodunun Grafikselsel Gösterimi [29]	46
Şekil 5.12. Sonlu Elemanda Serbestlik Derecesi	47
Şekil 5.13. Az Yoğun Çözüm Ağı	50

Şekil 5.14. Orta Yoğun Çözüm Ağı	50
Şekil 5.15. Çok Yoğun Çözüm Ağı	50
Şekil 5. 16. Değişik Çözüm Ağı Yoğunlukları Kullanılarak Elde Edilen Deney1 Yük- Deplasman Grafiklerinin Deney 1 Verileri ile Karşılaştırılması	50
Şekil 5.17. Zayıf Eksende Eğilmeye Maruz U Profil Sonlu Eleman Modeli	52
Şekil 5.18. Sonlu Elemen Modeli ile Deney Yük Deplasman Grafiklerinin Karşılaştırılması	53
Şekil 6.1. Parametrik Model Geometrisi Hesaplama Şeması.....	56
Şekil 6.2. Grup İçinde c/t_f Değişiminin Etkileri	56
Şekil 6. 3 Örnek R hesabı.....	59
Şekil 6.15. Zayıf Eksende Eğilen U Kesitli Kiriş Enkesitindeki Gerilme Dağılımı ..	81
Şekil 6.16. Plak Burkulma Teorisine göre Basınç Gerilmesi Dağılımı	82

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. DBYBHY'e göre Enkesit Koşulları[17]	27
Tablo 4.1. Zayıf Eksende Eğilme Deneyi Numune Özellikleri	30
Tablo 5. 1 Modellenen Deneyler	51
Tablo 6.1. Parametrik Çalışma Matrisleri	57
Tablo 6.2. Matris 1 ($F_y=235 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=15$ için parametrik gruplar)	57
Tablo 6.3. Matris 2 ($F_y=235 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=25$ için parametrik gruplar) ...	57
Tablo 6.4. Matris 3 ($F_y=235 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=35$ için parametrik gruplar)	57
Tablo 6.5. Matris 4 ($F_y=355 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=15$ için parametrik gruplar)	58
Tablo 6.6. Matris 5 ($F_y=355 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=25$ için parametrik gruplar)	58
Tablo 6. 7. Matris 6 ($F_y=355 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=35$ için parametrik gruplar)	58
Tablo 6. 8. Matris 1; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri.....	64
Tablo 6. 9. Matris 2; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri.....	64
Tablo 6. 10. Matris 3; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri.....	66
Tablo 6. 11. Matris 4; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri.....	67
Tablo 6. 12. Matris 5; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri.....	68
Tablo 6. 13. Matris6; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri.....	69
Tablo 6.14. Farklı Çelik Sınıfları İçin b/t Oranları	81

ÖZET

Anahtar kelimeler: Çelik U Profil, Plastik Tasarım, Doğrusal Olmayan Analiz, Zayıf Eksende Eğilme

Bu tez çalışmasının amacı zayıf eksende eğilme etkisinde çelik U kesitli kirişlerin plastik analizine izin verilen kesit koşullarını irdelemek ve bunları Türkiye'nin de kabul ettiği Avrupa Çelik Yapılar Tasarımı (TS-EN 1993) yönetmeliğinde belirtilen enkesit koşulları ile kıyaslayarak yönetmelikte verilen kuralların geçerliliğini tartışmaktır. Değişik enkesit ve boylara sahip kirişler için dönme kapasitesi hesaplanarak EN 1993'te belirtilen kesit sınıflandırmalarının doğruluğu incelenmiştir.

Bu çalışma deneylerle doğrulanmış doğrusal olmayan sonlu elemanla modelleme stratejilerini içermektedir. Oluşturulan sonlu eleman modelleri literatürden elde edilen deneylerle doğrulanmıştır. Analiz için çok amaçlı ticari sonlu elemanlar paket programı olan ABAQUS kullanılmıştır. Bu aşamada, sonlu elemanlar programının eleman kütüphanesinden uygun eleman seçimi, malzeme davranışları için uygun malzeme modelleri seçimi, üç boyutlu analizde gerekli tüm sınır koşulları ve deney numunelerindeki geometrik süreksizlikler göz önüne alınarak deney ortamı birebir modellenmeye çalışılmıştır. Modellemede hem malzeme hem de geometrik non-linearite göz önünde bulundurulmuştur. Gerçek laboratuvar deneyi ile doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılması, bilgisayar ortamında parametrik çalışmalar yapılmasının yolunu açmıştır.ve kısa sürede çok sayıda farklı nümerik deneyler elde edilmesini sağlamıştır

Parametrik çalışmada kesit geometrik özellikleri değişken olarak kabul edilerek nümerik kiriş elemanları elde edilmiştir. Analizler tamamlandıktan sonra her bir parametrenin sonuçlara etkisi tartışılmıştır. Elde edilen Moment-Eğrilik diyagramlarından kesitlerin dönme kapasiteleri (R) hesaplanmıştır. Plastik analize izin verme şartı olan $R \geq 3$ değerini veren plak narinlikleri, EN 1993'de verilen değerlerle kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre EN 1993'te verilen değerlerin pek çoğu güvensiz çıkmaktadır.

INVESTIGATION OF PLASTIC DESIGN REQUIREMENTS OF U SECTION STEEL BEAMS SUBJECTED TO MINOR AXIS BENDING

SUMMARY

Key words: Steel U Section, Plastic Design, Nonlinear Analysis, Minor Axis Bending

This study focuses on cross section requirements for plastic design of U-section beams subjected to weak axis bending. Findings of this study are compared with those cross section requirements given in European Steel Design Code (TS-EN1993) which is also adopted by Turkey. Thus the validity of the code is discussed with this study. To do this, moment rotation capacity of different beams with various cross section geometries and lengths are calculated then the results are compared with the cross section classification rules mentioned in TS-EN1993.

The study reported on herein involves the use of experimentally verified nonlinear finite element modeling strategies. Experiments from literature are used to verify the finite element models. The commercial multipurpose finite element software package ABAQUS is employed in this research. Finite element models are constructed as consistent as possible by selecting the appropriate element from element library, by defining the adequate material model along with the boundary conditions in 3 dimensional domain and by implementing geometrical imperfections. Both material and geometrical nonlinearity are considered in the modeling. Numerical parametric studies are carried out by using experimentally verified finite element models. Thus many numerical experiments are completed in very short period of time.

Cross sectional geometrical properties are varied along with the beam length to construct various numerical beams in the parametric study. Affects of each parameter on the results are discussed after the analyses are completed. Moment rotation curves are obtained to calculate the moment rotation capacity (R) of each beam. Cross sections with $R \geq 3$ are compared with those mentioned in TS-EN1993 to discuss the reliability of the code. This study shows that TS-EN1993 is not reliable for many beams subjected to this research.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Mühendislikte bir yapı statik, dinamik, mukavemet ve yapısal analiz prensiplerinden yararlanılarak, kullanım amacına hizmet verebilecek şekilde güvenli ve ekonomik olarak tasarlanabilmelidir. 1850'lere kadar yapısal tasarım, yalnızca, deneyim ve önsezilere dayanarak taşıyıcı elemanları boyutlandırmak ve bir araya getirmekle gerçekleştirilmiştir. Tasarım yöntemlerinin daha bilinçli olarak geliştirilmesi, yapıların davranışı ve yapı elemanlarının malzeme özellikleri ile ilgili bilgi birikiminin artmasıyla başlamıştır.

Yapıların tasarımı konusunda yapılan çalışmalar halen devam etmektedir. Bu çalışmaların pek çoğunda eleman, birleşim veya sistemde oluşan değişik göçme durumlarının belirlenmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Çalışmaların başlangıcını elemanın, birleşimin veya sistemin sınır durumları teşkil etmektedir. Sınır durumlar, yapının beklenen işlevlerini yerine getirememeye koşullarıdır ve genellikle, taşıma sınır durumu ve kullanma sınır durumu olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Taşıma sınır durumları; denge, akma, kopma, büyük şekil değiştirmeler, mekanizma, burkulma, yerel burkulma, çarpılma, yorulma, devrilme, maksimum sünek dayanım yani plastik dayanım ve kaymadır. Kullanma sınır durumları ise sehim, titreşim, kalıcı şekil değiştirmeler ve çatlaklar gibi yapının kullanımı ile ilgili durumları içerir [1].

Plastik tasarıma izin verilen durumlarda, kesitin yerel burkulmaya uğramadan yeteri kadar dönme yapabilme kapasitesine ulaşması istenir. Bu durum tasarım yönetmeliklerinde plak narinliği sınırlanarak sağlanır. Böylece plastik mafsallarda oluşması durumunda mafsallarda momentlerin, eleman boyunca yeniden dağılmasına izin verecek kadar dönme kapasitesine sahip olacaktır. Bu çalışmada literatürden elde edilen deneysel çalışmalarla doğrulanmış sonlu eleman modelleri kullanılarak zayıf ekseninde eğilen U kesitli kirişlerde plastik analiz için gerekli olan kesit narinlikleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar EN 1993'te verilen değerler ile kıyaslanmıştır.

Çelik yapılarda kiriş elemanlar tasarlanırken en sık kullanılan profiller I ve U kesitli profillerdir. U kesitli profiller merdiven boylama kirişlerinin, daha hafif yüklere maruz yürüyüş iskelesi, platform, podyum kirişlerinin ve çatı aşıklarının tasarımında kullanılırlar. Ayrıca yapma profiller oluştururken de U profil kullanılır. Bölüm 1.1'de anlatılacağı üzere I profillerin plastik tasarım koşulları gerek deneysel gerekse analitik olarak incelenmiştir. U profillerle ilgili soğukta işlenmiş elemanların kuvvetli ve zayıf eksen de eğilme davranışları incelenmiştir. bu çalışmada zayıf eksen de eğilme etkisinde, haddelenmiş U profillerinin plastik tasarım kriterleri incelenmiştir.

Yapılan tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de yapıların tasarımında kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin içeriklerinden bahsedilmiştir. Özellikle tezin ana çerçevesini oluşturan; burkulma, yorulma veya gevrek kırılma gibi göçme modları önlenmiş sistemlerde uygulanması mümkün olan plastik teoriye göre hesap ile tasarım yöntemi ve kuralları üzerinde durulmuştur.

Bölüm 3'te, ülkemizde şu anda kullanılan şartname ve yönetmeliklerde belirtilen plastik tasarıma izin verilen kesitlerle ilgili tasarım koşulları anlatılmıştır. Bu yönetmeliklerde elemanların gövde ve başlıklarının her biri ayrı birer dikdörtgen plak gibi düşünülerek, her bir plak elemanın burkulmaya karşı direnç gösterebilmesi için gerekli sınır narinlik oranları belirtilmiştir. Bir elemanın basınç parçası olarak çalışan parçalarının tasarım burkulma dayanımının incelenmesi için basınç parçaları (gövde ve başlıklar) ince cidarlı dikdörtgen plaklar olarak düşünülüp narinlik oranı elastik burkulma teorisi ile irdelenerek enkesit plak bileşenleri için sınır narinlik oranı belirlenebilir. Gerek EN 1993'te gerekse DBYBHY'de enkesit koşulları narinliklerinde uyulması gerekli sınır değerler belirtilmiştir. TS 4561'de ise plak narinliklerine ve sünekliğe ait herhangi bir sınır koşul belirtilmemiştir. DBYBHY'de enkesitlerin sadece kuvvetli eksen doğrultusunda kullanılacağı düşünülerek plak narinliklerinin sınır oranları verilmiştir. EN 1993 bu konuda yapı elemanlarının hem zayıf eksen hem de kuvvetli eksen doğrultusunda kullanılabileceğini dikkate alarak enkesit narinlik koşullarını her iki durum için de ayrı ayrı belirtmiştir.

Bölüm 4'te, literatür taraması ile elde edilen zayıf ekseninde eğilen U kirişlere ait deneysel çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 5'te, Bölüm 4'te anlatılan deney düzeneği ve deney elemanlarının ABAQUS sonlu eleman programında modellenmesinin adımları açıklanmıştır. Aslında Bölüm 4-5-6 birbiri ile döngüsel olarak içiçe geçmiş bölümlerdir. Uygun sonlu eleman modelinin oluşturulabilmesi için değişik modelleme yöntem ve teorileri kullanılmış ve mevcut deney düzeneğinin sonlu eleman yöntemi ile en doğru şekilde modellenmesi ile mevcut deney sonuçlarına hassas yakınlıkta değerler elde edilmiştir.

Bölüm 7'de ise geliştirilen sonlu eleman modeli kullanılarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. Oluşturulan parametrik modellerin süneklik düzeyleri ve plak narinlikleri incelenerek EN 1993'te belirtilen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır.

1.1. Literatür Taraması

Kemp [14], I profillerin plastik bölgede yerel ve yanal burkulmasını ve bunların etkileşimini incelemiştir. Basit teorik formülasyonlar ve deneylerin sonucunda, plastik bölgedeki dönme kapasitesine sadece yönetmeliklerdeki parametrelerin değil enkesit başlık uzunluğu/kalınlığı oranının ve eksenel kuvvet oranının da önemli oran da etkilediğini göstermiştir. Sonuçlar I kesitli elemanların eğilme sünekliğini araştırmaya yönelik bir çalışmanın sonuçları gibi görünmekle birlikte aslında yapıların plastik tasarımı ile ilgilidir.

Gioncu [38], başlık ve gövdedeki yerel plastik burkulmanın sınırlandırıldığı kiriş kolonların ve geniş başlıklı çelik kirişlerinin mevcut dönme kapasitelerinin belirlenmesi ile ilgilenmiştir. Akma bölgesinde ve plastik bölgede meydana gelen plastik çökme ile meydana gelen plastik dönmenin belirlenmesi amacı ile özel bir bilgisayar programı geliştirmiştir (DUCTROT 96). Malzeme özellikleri, eleman boyutları, başlık ve gövde arasındaki etkileşim, plastik burkulma, tekrarlı yükleme vb. gibi kesitlerin dönme kapasitesini etkileyen faktörler analize dahil edilmiştir.

Earls [55], eğilme momenti etkisi altındaki kompakt I kesitli kirişlerin sünekliğinin, kirişin dönme kapasitesi ile ifade edilebileceğini ve dönme kapasitesinin belirlenmesinde malzemenin akma gerilmesinin, pekleşme bölgesinin birinci derecede önemli rol oynadığını göstermiştir. Kompakt olarak tasarlanmış farklı başlık narinliklerine sahip I kesitli iki kirişin göçme davranışlarını inceleyerek, her iki modelin göçmesinde yerel ve global bileşenlerin yanı sıra malzeme dayanımı ve yapısal sünekliğin ne kadar baskın rol oynadığını tartışmıştır.

Young [47], çalışmasında soğukta işlenmiş U profillerinde gövde yüksekliği ve kalınlığı ile gövdedeki burkulmanın ilişkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneyle, narinlik değerlerini değiştirerek soğukta işlenmiş çelik yapılar için Amerikan şartnamesi ve Avusturya-Yeni Zellanda şartnamelerinde belirtilen dört yükleme durumu için gerçekleştirmiştir. Şartnamelerle önceden belirlenen tasarım dayanımlarının dudaksız U profiller için genellikle güvenli olmadığı gösterilmiştir.

Fang [36], soğukta işlenmiş U profillerin elastik ve plastik tasarımına yönelik bir çalışma yapmıştır. Çalışma kapsamında, basınç altındaki U profiller, her iki asal eksenenden eğilmeye zorlanan U profiller, aksel yük altında ve her iki asal eksenende eğilmeye zorlanan U profillerin davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada en kesiti oluşturan plak elemanların çeşitli gerilme türleri altında burkulma davranışları incelenmiş ve plakların elastik ve plastik davranış bölgelerindeki plak burkulma katsayıları araştırılmıştır. Kapsamlı bir sonlu eleman çalışması ile desteklenen deney sonuçları, tasarım formülleri türetmek için kullanılmıştır.

Young [50]; soğukta işlenmiş U kesitli profillerde eğilme ve gövdedeki buruşmanın birlikteliğini konu alan deneysel araştırmalar yapmış, Avusturya/Yeni Zellanda standartlarında kullanılan tasarım gövde narinlik değerlerini ve soğukta işlenmiş yapı çelikleri için Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü şartnamesinde belirtilen tasarım değerlerini irdelemiştir. Eğilme ve gövdede buruşmaya maruz bırakılan U enkesitli bir eleman için tasarım kurallarının uygunluğunu farklı gövde boyları için incelemiştir. Çalışmanın sonunda eğilme ve gövdede buruşmaya maruz bırakılan kalın gövdeli U profillerin dayanımlarına ait kesin şartların önceden belirlenebileceği belirtilmiştir.

Bambach [34]; çekme gerilmesi altındaki ince cidarlı elemanların davranışlarını incelemiş ve ince cidarlı elemanlar için tasarım yöntemleri üretmiştir. Çalışmanın ana sonucu olarak gerilme altındaki ince cidarlı elemanların burkulmasına neden olan unsurlar belirlenerek tasarım önerileri sunulmuştur. Bu tasarım önerileri; Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapılar için Avustralya Standardı AS/NZ 4600 (1996) ve Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapılar için Amerika standardı AISI (1996)'da bulunan koşullar ile karşılaştırılmıştır.

Aktas [23]; çalışmasında I kesitli kirişler ve kiriş-kolonlarda uygun bir şekilde göçme mekanizmasının oluşması için gerekli yapısal sistem içerisinde momentlerin yeniden dağılımını sağlayacak yeterli plastik dönme kapasitesine sahip mafsalların oluşması için gerekli enkesit narinlik koşullarını incelemiştir. Bu çalışmada incelenen I kesitli elemanların etkileşim diyagramlarını AISC yönetmeliğinde açıklanan etkileşim diyagramı ile karşılaştırarak, yapı elemanlarının dayanımlarının önceden tahminini geliştirmek için mevcut AISC etkileşim denklemlerinde yapılması gereken değişiklikler önerilmiştir.

Brescia [8]; sismik bölgelerdeki çelik moment dayanma çerçevelerinin sınır durum tasarımı ile ilgili en son gelişmeleri dikkate alarak, Eurocode 3, OPCM 3274, ve Eurocode 8 gibi deprem yönetmelikleri tarafından benimsenen çelik elemanların ve çelik yapıların sınıflandırma kriterlerine odaklanmıştır. Çalışmada sınıflandırmayı etkileyen ana faktörlerin elemanın dönme kapasitesi ve aşırı dayanım (overstrength) (akma gerilmesinin üzerindeki ilave gerilme dayanımı) olduğu anlayışından yola çıkarak kuramsal, yarı deneysel ve deneysel yaklaşımlar üzerine araştırma yapılarak, bu parametrelerin etkileri belirlenmiştir. Elemanları süneklik ve aşırı dayanım (overstrength) sınıflarına ayıran sınıflandırma kriterlerinin gerekliliği ve önemi vurgulanmıştır. Dönme kapasitesinin yapının davranışına etkileri nedeni ile çelik yapı elemanlarının süneklik sınıflarına ayrılmasının gerekliliği ve kapasite tasarım kriterlerinin yerel ve global seviyede uygulanması için elemanların aşırı dayanım (overstrength) sınıflarına ayrılmasının gerekliliği üzerinde durulmuştur. Mevcut yönetmeliklerin bu iki sınıflandırma kriterlerinden herhangi birini dikkate aldığı vurgulanmıştır.

Ren [43]; eğilme ve gövdede buruşmaya maruz bırakılan U profillerde göçme yükünü deneysel olarak incelemiş ve eğilme ve gövdede buruşmaya ek olarak sadece eğilmeyi konu alan soğukta işlenmiş çelik U profillerin dayanımlarını ve davranışlarını önceden belirlemede sonlu eleman modeli oluşturmuştur. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde ettiği analitik sonuçları deneysel yük ve moment değerleri ile doğrulayarak genişletilmiş parametrik bir çalışma yapmıştır. Parametrik çalışmada önceden belirlenen U profillerin dayanımları, Soğukta İşlenmiş Çelik Yapılar için Kuzey Amerikan Şartnamesi'nden hesaplanan tasarım dayanımları ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan literatür taramasında, I ve U enkesitlerinin giriş elemanlar olarak kullanılan en yaygın enkesitler olduğu görülmüştür. Literatürden elde edilen çalışmalarda I profillerin gerek zayıf gerekse kuvvetli ekseninde eğilme altında plastik tasarım kriterlerinin incelendiği görülmüştür. U kesitli hadde profillerin eğilme etkisinde plastik tasarım kriterlerinin her iki ekseninde de incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada sadece zayıf ekseninde eğilme altında çalışma yapılmıştır. Avrupa birliği üye ülkelerinin uzun süre çalışmaları sonucu elde ettikleri ve ülkemizin de kabul ettiği TS EN 1993 "Çelik Yapıların Projelendirilmesi" şartnamesinde önerilen kriterler bu çalışmada kritik edilmiştir..

BÖLÜM 2. ÇELİK YAPILARDA HESAP VE TASARIM YÖNTEMLERİ

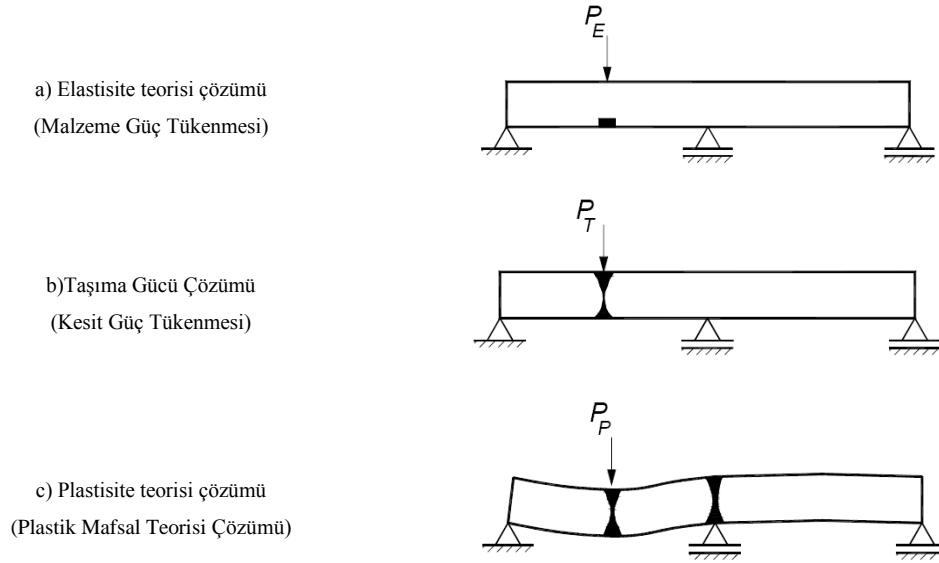
Günümüzde yapıların tasarımında kullanılan iki temel yaklaşım çelik yapıların tasarımında da kullanılmaktadır. Bunlar;

– Emniyet Gerilmesi Yöntemi

– Sınır Durum Yöntemleri

Önceleri emniyet gerilmesi esasına dayanan yöntemler kullanılmış olmakla beraber son yıllarda sınır değer yöntemlerinin kullanılması yaygınlaşmıştır. Tasarım için değişik sınır durum esaslı yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin, taşıma gücü tasarımı, yük katsayısı esaslı tasarım, yük ve dayanım artımı tasarımı, plastik tasarım gibi tasarım yöntemleri vardır [2].

Şekil 2.1' de taşıyıcı sistem tasarım yöntemlerinden sınır durum yöntemlerinin üst sınır çözüm noktaları gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, elastisite teorisine göre çözümde elemanın herhangi bir enkesitinde akmanın başladığı ilk andaki sınır durum dikkate alınırken, taşıma gücüne göre çözümde, elemanın en çok zorlanan enkesitinin tüm liflerinde akma gerilmesine ulaşıldığı an için çözüme gidilir. Plastik teoriye göre çözümde ise elemanın pek çok enkesitinin tüm liflerinde akma gerilmesine ulaşıldığı göçme sınır durumu dikkate alınır.



Şekil 2.1. Sınır Durum Yöntemlerinde Tasarıma Esas Olan Sınır Durum Türleri [3]

2.1. Emniyet Gerilmeleri Yöntemine Göre Tasarım

Malzemenin doğrusal-elastik sınır gerilmesi olan akma gerilmesi değerinin bir emniyet katsayısına bölünmesi ile emniyet gerilmesi değeri elde edilir. Yapıya etkileyen dış yüklerden oluşan gerilmeler, emniyet gerilmesi değerinden daha küçük olacak şekilde sistem boyutlandırılır.

Doğrusal–elastik teoriye göre bir sistemin veya elemanın hesaplanabilmesi için birtakım kabuller yapılmaktadır. Bu kabullere göre;

- Malzeme doğrusal-elastiktir.
- Yer değiştirmelerin, denge ve geometrik süreklilik denklemlerine etkileri ihmal edilebilecek kadar azdır.
- Sistemin boyutları yükleme ile değişmemektedir.

Elastik bölgede eğilme altındaki bir elemanın kesitlerinde kalıcı deformasyonlar oluşmaz. Başka bir ifadeyle çelik eleman henüz akmayı gerçekleştirecek yüke ulaşamaz [4].

2.2. Sınır Değer Yöntemlerine Göre Tasarım

Gerçekte yapı orantılılık sınırı karşı gelen yüklerden daha büyük yükleri taşıyabilir. Yükler artarak göçme yükü adı verilen bir sınır değere ulaştığında sistem kullanılamaz hale gelir. Başka bir tanımla, göçme yükü sistemi kullanılamaz duruma getiren yüküdür.

2.2.1. Yük ve mukavemet faktörüne göre tasarım

Sınır durumları dikkate alan bu yöntemde genel yaklaşım;

$$\sum P_i e_1 \leq P_n e_2 \quad (2.1)$$

koşulu ile özetlenebilir[5]. Bu ifadede " P_i : işletme yükleri", " e_1 : yük emniyet katsayısı", " P_n : yapının taşıma gücü", " e_2 : malzeme emniyet katsayısı" olmak üzere denklemin sol tarafı dış yükleri, sağ tarafı ise yapı ve yapı elemanlarının mukavemetini ifade eder.

Bu yöntemde kesitlerin taşıma kapasiteleri malzeme güvenlik katsayısı ile çarpılmak suretiyle taşıma gücü değeri hesaplanır. Yapıya etkiyen dış yüklerin yük güvenlik katsayıları ile çarpımından oluşan hesap yükleri, taşıma gücü değerinden küçük olacak şekilde yapı boyutlandırılır. İşletme yükleri e_1 yük güvenlik katsayıları ile çarpılarak arttırılmaktadır. Elemanlar, katsayılarla çarpılıp arttırılmış yükleri taşıyabilecek şekilde seçilirler. Katsayılarla çarpılmış yükler gerçekte var olan işletme yüklerinden büyüktürler. Bu yükler elemanları sınır durumlara ulaştırırlar. Sınır durumlar ise kırılma, akma veya burkulma olabilir.

2.2.2. Plastik teoriye göre hesap ve tasarım

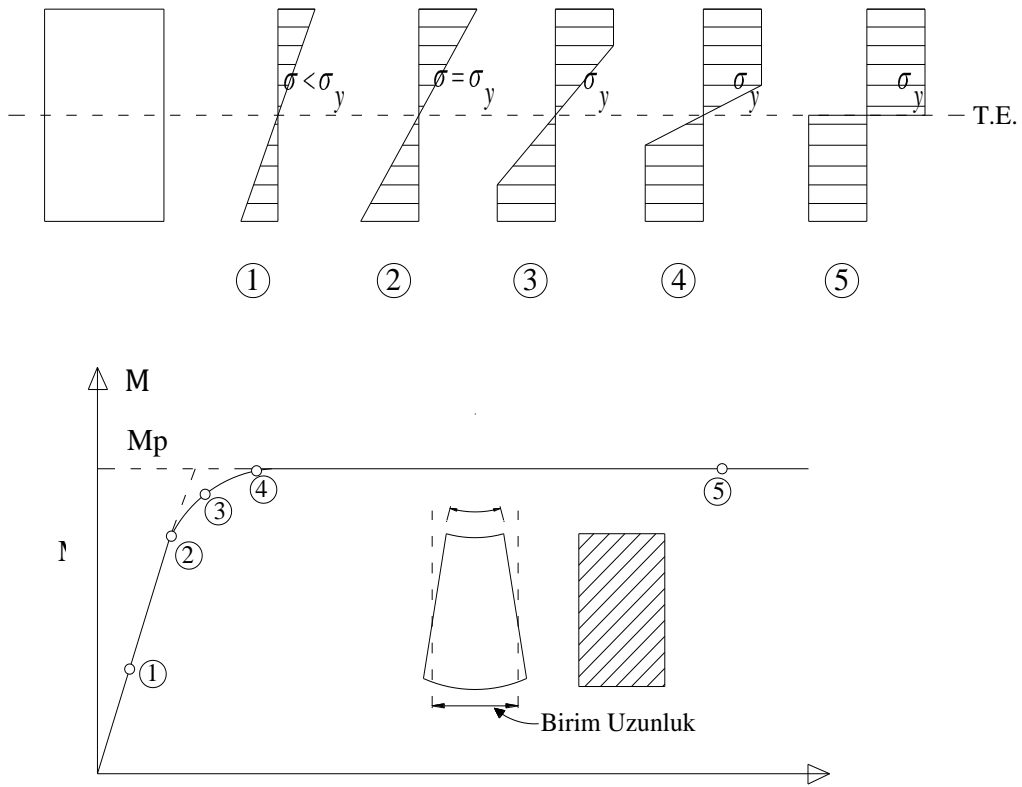
Plastik tasarım sınır durum tasarımının özel bir halidir ve sınır durumu M_p plastik moment dayanımı belirler. Plastik moment değerine elemanın en çok zorlanan enkesitinin tamamında gerilme değeri akma gerilmesine eşit olduğunda ulaşılır.

Plastik tasarım, burkulma, yorulma veya gevrek kırılma gibi sınır durum hallerinin önlenmiş olduğu sistemlerde uygulanması mümkündür [2].

Plastisite üzerinde ilk önemli çalışmalar 1864'te Tresca ve 1912'de Von Mises tarafından yapılarak günümüzde de kullanılan akma ve kırılma hipotezleri geliştirilmiştir. Daha sonra birçok ülkede deneysel çalışmalar yapılmış ve 1940'da Amerika Birleşik Devletleri'nde Van Der Broek plastik hesabın temel ilkelerini yayınlamıştır. 1950'den sonra araştırmalar yoğunluk kazanmış, 1960'dan günümüze plastik hesabın kullanılması yaygınlaşmış ve birçok ülkede çelik yapıların plastik hesabıyla ilgili yönetmeliklerin yürürlüğe girmesiyle, bütün bu ülkelerde plastik hesap yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir [2].

Bir çelik taşıyıcı sistemin taşıyabileceği yüke, çeliğin plastik bölgede çalışabilme yeteneğinin yani sünekliğinin (düktilitesinin) de etkisi vardır. Sistemin bir bölgesinde plastik şekil değiştirmelerin oluşması durumunda fazla zorlanan bölgeden az zorlanan bölgelere iç kuvvetler aktarılır ve bu nedenle de sistemin taşıma gücü hemen tükenmez [2]. Buradan, taşıyıcı sistemin bütünü için yedek bir güvenliğin bulunduğu anlaşılır. Bu konunun bilimsel olarak incelenmesi sonucunda "Taşıma Yüğü Yöntemleri" ortaya çıkmıştır.

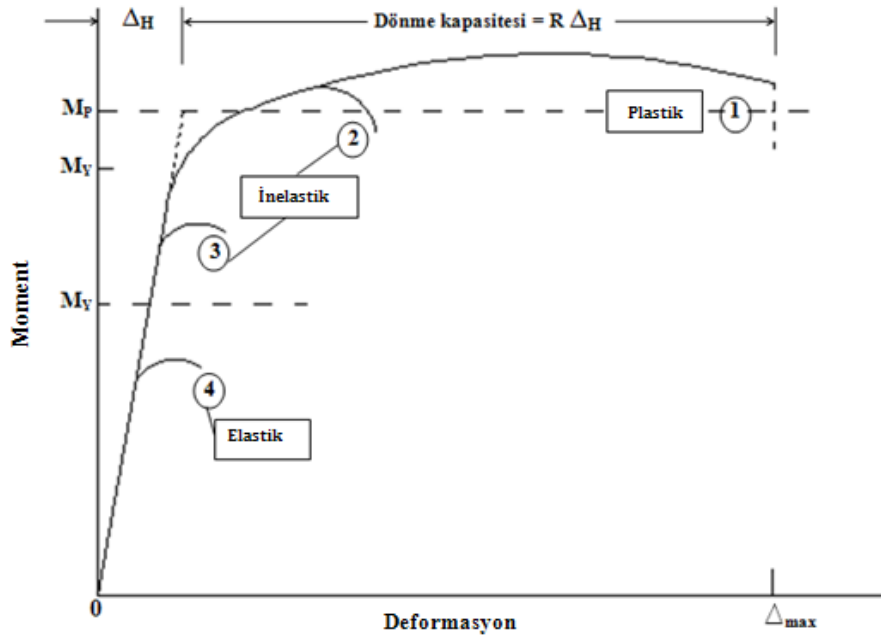
Taşıma yükü esasına göre yapılan analizlerde, sistemi göçme durumuna getirecek olan yük hesaplanır ve bir emniyet katsayısına bölünerek sistemin taşıyabileceği yük elde edilir. Taşıma gücüne ulaşma sırasında elemanın bazı kısımlarında plastikleşmenin oluşmasına neden olacak kadar çok büyük şekil değiştirmeler ortaya çıkar. Ayrıca çeşitli noktalarda enkesitlerin yükseklikleri boyunca tamamen plastikleşmesi nedeniyle plastik mafsallar da ortaya çıkacaktır. Yani, bu noktalarda enkesitin yüksekliği boyunca tüm liflerinde akmaya ulaşılabacaktır. Böylece kesitlerde moment taşıma kapasitesi M_p plastik moment değerine ulaşarak bu kesitlerde plastik mafsallar oluşacaktır [4][6] (Bkz. Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Gerilme Davranışı ve Momet-Eğrilik İlişkisi [53]

Sabit moment altında dönebilen bu kesitlerin varlığında, yüklemenin artarak devam ettirilmesi ile yapıda yeniden moment dağılımı meydana gelecek ve elastik şartlar altındaki momentlerin M_p den daha az olduğu başka enkesit bölgelerinde plastik mafsallar oluşacaktır.

Yapının plastik davranışı momentin yeniden dağılım miktarına bağlıdır. Tahmini göçme yüküne ulaşma sadece plastik mafsal bölgelerinde olmaz. İnelastik dönme bölgesi denilen bölgede de göçme yüküne ulaşılabilir. Bu nedenle plastik mafsallarda yeterli dayanımla birlikte sünekliğin de yeterli miktarda olması istenir (Bkz. Şekil 2.3).



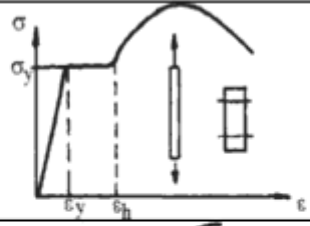
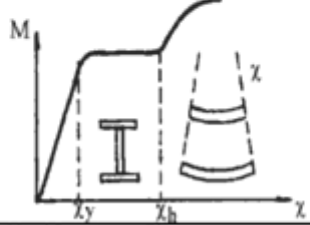
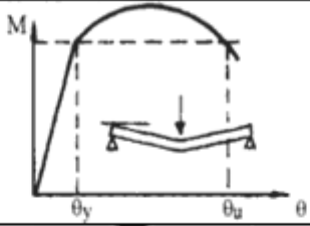
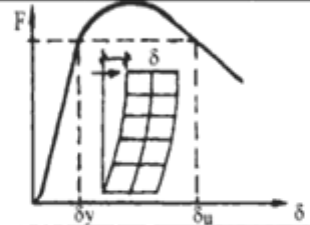
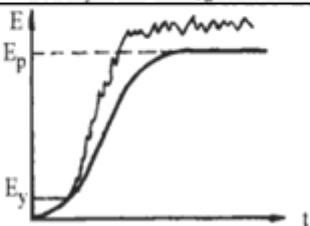
Şekil 2.3. Eğilme Durumunda Genel Davranış Şekli [52]

Pratikte yapının plastik tasarımını, yapının sünekliği belirler. Yapının sünekliği yapının göçme anındaki kapasitesini önceden belirlemeyi sağlar. Her tip yükleme altında yapının tasarımı için sünekliği önemli bir kriterdir. Literatüre göre kısaca süneklik tipleri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir[7]:

- Malzeme sünekliği: Farklı yük tipleri için “malzemenin” gerilme şekil değiştirme eğrisinde plastik deformasyona bakılarak belirlenen sünekliktir.
- Enkesit sünekliği: Burada kastedilen “enkesitin” plastik deformasyonlarıdır. Bu da enkesiti oluşturan parçalar arasındaki etkileşim olarak dikkate alınır.
- Eleman sünekliği: “Elemanların” sınır koşullarına bağlı olarak ve dış yükler altındaki davranış özellikleri dikkate alınarak belirlenen sünekliktir.
- Yapı sünekliği: Tüm sistemin davranışına bakılarak “yapının” sünekliği hakkında karar verilir.

– Enerji süneklığı: Eleman veya yapıda tüketilen enerji miktarına bağlı olarak belirlenen süneklıktır.

Şekil 2.4'te süneklık türleri ve hesap formülleri tablo halinde gösterilmiştir [7,8,9]. Bu çalışmada eleman süneklığı ile ilgilenilmiştir.

SÜNEKLİK TÜRLERİ	GRAFİK	HESAPLAMA
MALZEME SÜNEKLİĞİ		$\mu_{\sigma} = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_y}{\varepsilon_y}$
KESİT SÜNEKLİĞİ		$\mu_x = \frac{\chi_n - \chi_y}{\chi_y}$
ELEMAN SÜNEKLİĞİ		$\mu_{\theta} = \frac{\theta_n - \theta_y}{\theta_y}$
YAPISAL SÜNEKLİK		$\mu_{\delta} = \frac{\delta_n - \delta_y}{\delta_y}$
ENERJİ SÜNEKLİĞİ		$\mu_E = \frac{E_p - E_y}{E_y}$

Şekil 2.4. Süneklık Türleri ve Hesaplanma Tazrları [9]

Sünekliğin ölçüsü dönme kapasitesidir. Yapıların plastik tasarımında temel ilke plastik mafsalların yeterli dönme kapasitesine sahip olmasıdır. Dönme kapasitesi; göçme yüküne erken ulaşmayan, plastik moment taşıma kapasitesine erişmiş bir enkesitteki plastik deformasyon yapabilme kapasitesine bağlı olarak hesaplanır. Yani eleman enkesiti, yük altında yapı göçme mekanizmasına ulaşmaya kadar plastik deformasyonlara olanak veren bir yapıya sahip olmalıdır (Bkz. Şekil 2.6).

Çelik yapılarda elemanların enkesitleri değerlendirilirken, gövde ve başlıklar ayrı birer plak eleman olarak düşünülmektedir. Dolayısıyla eleman enkesitinin plastik deformasyonlara olanak veren bir yapıya sahip olması için; en kesiti teşkil eden plak elemanların hiçbirinde yerel burkulmaların ve elemanda yanal burkulmaların oluşmaması gerekmektedir. Aksi takdirde çelik yapı elemanı dönme kabiliyetini kaybeder.

2.2.2.1. Dönme kapasitesi

Süneklik oranının büyük olduğu ve doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin küçük bir bölgeye yayıldığı sistemlerde; doğrusal olmayan eğilme şekil değiştirmelerinin plastik mafsalları verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde sistemin doğrusal-elastik davrandığı varsayılabilir. Bu hipoteze “plastik mafsalları hipotezi” adı verilir [4,5,6].

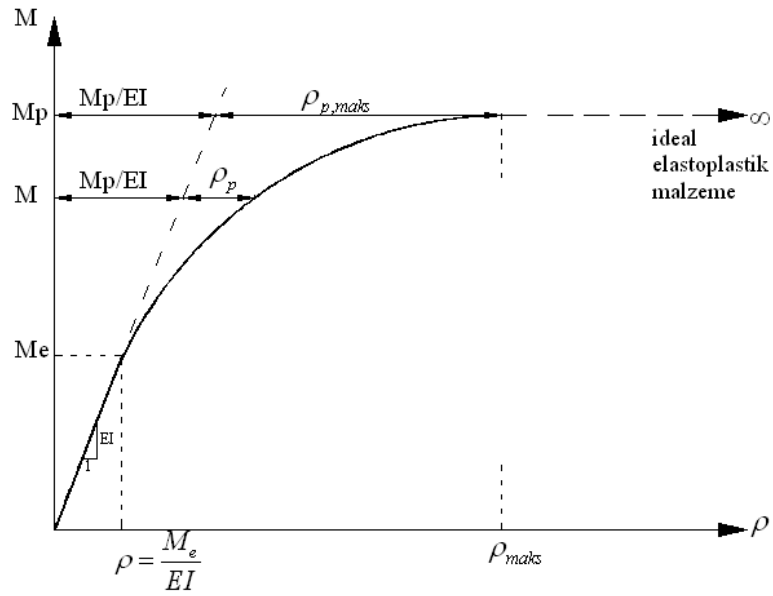
Plastik mafsalları hipotezinin esasları;

1. Bir kesitteki eğilme momenti artarak M_p plastik moment değerine eşit olunca, o kesitte bir plastik mafsalları oluşur. Daha sonra, kesitteki eğilme momenti $M=M_p$ olarak sabit kalır ve kesit serbestçe dönmeye. Plastik mafsaldaki θ_p plastik dönmesi artarak $\theta_{p,max}$ maksimum dönme kapasitesine erişince kesit kullanılamaz duruma gelir.

2. Plastik mafsallar arasında sistem doğrusal-elastik olarak davranır.

3. Kesite eğilme momenti ile birlikte normal kuvvetin de etkimesi halinde, M_p plastik momenti yerine, kesitteki N normal kuvvetine bağlı olarak akma koşulundan bulunan indirgenmiş plastik moment değeri esas alınır.

Şekil 2.5'te bir düzlem çubuk elemanın eğilme momenti-eğrilik ilişkisi görülmektedir.



Şekil 2.5. Eğilme Momenti-Eğrilik Diyagramı [6]

Plastik mafsal hipotezinde, çubuk elemanı üzerinde l_p uzunluğundaki bir bölgeye yayılan doğrusal olmayan plastik şekil değiştirmelerin;

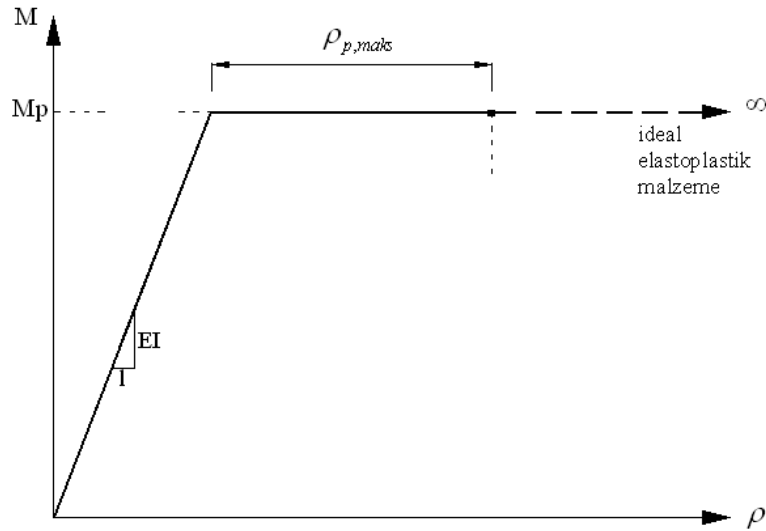
$$- \quad (2.2)$$

şeklinde, plastik mafsal olarak tanımlanan bir noktada toplandığı varsayılmaktadır [10,11]. Burada, θ_p plastik mafsalın dönmesini göstermektedir. Plastik mafsal hipotezinin uygulanması, gerçek eğilme momenti-eğrilik bağıntısının

$$- \quad (2.3)$$

(2.4)

şeklinde iki doğru parçasından oluşacak şekilde idealleştirilmesine karşı gelmektedir (Bkz. Şekil 2.6).



Şekil 2.6. İdealleştirilmiş Eğilme Momenti-Eğrilik Grafiği [6]

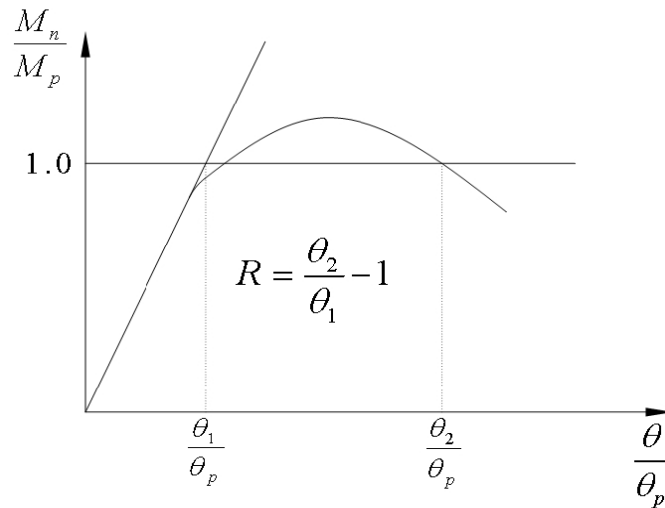
Artan dış yükler altında plastik mafsalsın dönmesi artarak dönme kapasitesi adı verilen bir sınır değere ulaşıncaya, oluşan büyük plastik şekil değiştirmeler nedeniyle kesit kullanılamaz hale gelebilir. Yapı sisteminin bir veya daha çok kesitindeki plastik mafsal dönmelerinin dönme kapasitelerine ulaşması ise, yapının tümünün kullanılamaz hale gelmesine, diğer bir deyişle, “göçmesine” neden olmaktadır.

Dönme kapasitesi, elemanın deformasyon kapasitesini ölçmenin bir yoludur. Dikkate alınan enkesitin başlangıçtaki denge konumundan sapma miktarı ile deformasyon kapasitesi hesaplanır. Dönme kapasitesinin hesabında en doğru değer; elemanın M-θ eğrisinden hareket ederek elde edilir. Bunun için literatürde pek çok oran tanımlanmıştır.

1965'te Lay ve Galambos [12] dönme kapasitesini $R_h = \theta_h / \theta_p$ oranı ile ifade etmiştir. Burada, θ_p momentin M_p 'ye ulaştığı ilk andaki elastik dönme miktarı ve θ_h : Momentin M_p değerinin altına düştüğü noktadaki plastik dönme miktarıdır.

1971 yılında ASCE standartlarında dönme kapasitesi $R = (\theta_2 / \theta_1) - 1$ olarak tanımlanmıştır [13]. Burada, θ_2 $M_n / M_p - \theta / \theta_p$ grafiğinde kesit momenti M_n / M_p oranının 1 in altına düştüğü andaki dönmedir. θ_1 ise teorik dönme kapasitesidir ve elastik kirişin rijitliğine bağlı olarak kesit tamamen plastik kapasiteye ulaştığı andaki dönme miktarıdır.

ASCE (1971)'e göre dönme kapasitesi hesap değerlerinin $M_n / M_p - \theta / \theta_p$ eğrisinden belirlenmesi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Dönme Kapasitesinin Belirlenmesi

1985'te Kemp[14]; dönme kapasitesinin belirlenmesi için alternatif olarak $R_{hm} = \theta_{hm} / \theta_p$ eşitliğini önermiştir. Burada, θ_{hm} moment-dönme eğrisinde maksimum moment değerine karşılık gelen plastik dönmedir.

1995 ve sonrasında Dubina [9], Mazzolonia ve Gioncu[7], dönme kapasitesini — şeklinde hesaplamışlardır. Burada, θ_r göçme anındaki plastik dönme ve θ_p ise ilk plastik mafsallın oluştuğu andaki dönmedir.

Çelik yapı elemanlarının tasarımı için yapısal sünekliğin en uygun seviyesi $R \geq 3$ olarak belirlenmiştir (AISC-1999)[15]. EN 1993'te[16] ise kesit dönme kapasitesine ilişkin kesin bir bilgi verilmemekle birlikte plastik global analize ilişkin kesitte aranan birtakım koşullar belirtilmiştir. Bu koşullar kısaca şöyle açıklanabilir:

– Plastik mafsal bölgelerinde eleman enkesiti, plastik mafsal bölgesinde olması istenen dönme kapasitesinden daha az dönme kapasitesine sahip olmamalıdır.

– Eğer aşağıda belirtilen şartların her ikisi de sağlanıyorsa, üniform bir elemanda etkili dönme kapasitesinin plastik mafsalda olduğu kabul edilebilir. Bunlar;

a) Elemanın plastik mafsal bölgesindeki en kesit 1.Sınıf olmalıdır.

b) Plastik mafsal bölgesinde gövdeye uygulanan ve en kesitin kesme kapasitesinin %10'unu aşan enine yükler altında, plastik mafsal bölgesinden $h/2$ kadar mesafedeki eleman boyunca gövde direnci sağlanmalıdır. Burada "h" plastik mafsal bölgesindeki kesit yüksekliğidir.

Ayrıca elemanın uzunluğunun boyunca eleman enkesiti aşağıdaki kriterleri sağlamalıdır:

a) Plastik mafsal bölgesine eleman boyunca $2d$ 'den daha az mesafede bulunan komşu bölgelerde; enkesit gövdesinin kalınlığı azaltılmamalıdır. Burada "d" gövdenin plastik mafsal bölgesindeki net derinliğini tanımlar.

b) Plastik mafsal bölgesine eleman boyunca $2d$ 'den daha az mesafede bulunan komşu bölgelerde enkesitlerde basınca çalışan başlıklar (flanşlar) 1. Sınıf olmalıdır. "d" plastik mafsal bölgesindeki gövdenin net derinliğini tanımlar.

Benzer şekilde plastik mafsal bölgesine komşu olan bölgelerde; kesit momentinin plastik moment kapasitesinin 0,8 katına düştüğü noktaların dışındaki mesafelerde eleman enkesitlerinde basınca çalışan başlıklar (flanşlar) 1. Sınıf olmalıdır. "d" plastik mafsal bölgesindeki gövdenin net derinliğini tanımlar.

c) Plastik mafsal bölgesinin dışındaki bölgelerde, basınç başlığı 1 ve 2. Sınıf, gövde sınıfı ise 1, 2 veya 3. Sınıf olmalıdır.

Bir çerçevenin plastik tasarımı için istenen kesit dikkate alınır ve plastik mafsalin olduğu elemanın bütünü yukarıda belirtilen maddelere göre güvenli ve yeterli ise plastik moment dağılım kapasitesinin yeterli olduğu kabul edilebilir.

Yerel burkulmalar, eleman burkulmaları ve genel burkulmaların etkilerinin tamamının dikkate alındığı durumlarda plastik mafsal bölgesinin etrafındaki bölgeler için sınıf şartlarını dikkate almaya gerek yoktur.

Plastik analiz için sünekliğin ne kadar önemli ve gerekli olduğundan daha önce bahsedilmişti. Ayrıca, bir elemanın veya yapının süneklik düzeyinin de dönme kapasitesine bakılarak anlaşılacağı açıklanmıştı. EN 1993'te plastik analiz için dönme kapasitesine atıfta bulunulmasına rağmen, sünekliliğe ve dönme kapasitesine ilişkin bir açıklama yapılmamıştır. Fakat literatürde[8] EN 1993'e göre sınıf 1(Sünek) kesitler için $R \geq 3$, sınıf 2 (kompakt) kesitler için $1 \leq R < 3$ ve $M_u > M_p$ koşulları dikkate alınarak dönme kapasitesinin hesaplandığı ifade edilmiştir. Dolayısıyla EN 1993'de, AISC'de olduğu gibi bir kesitte plastik tasarıma izin verilebilmesi için o kesitin dönme kapasitesi değerinin en az 3 olması gerektiği anlaşılmaktadır.

BÖLÜM 3. STANDART VE YÖNETMELİKLERDE TASARIM KURALLARI

Ülkemizde çelik yapıların tasarım ve boyutlandırmasında yararlanılan yönetmeliklerden başlıcaları; DBYBHY-2007 “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, TS648 “Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”, TS4567 “Çelik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesap Kuralları”, TS498 “Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri”, TS7046 “Yapıların Tasarımı İçin Hesaplar-Çatılardaki Kar Yüklerinin Tespiti”, TS3357 “Çelik Yapılarda Kaynaklı Birleşimlerin Hesap ve Yapım Kuralları”, ve TS EN 1993-1-1 “EN 1993 (Eurocode 3)”, BS5050 “British Standard”, DIN “Deutsche Norm”, AISC 2005 “American Institute of Steel Construction”, ASD “Allowable Stress Design” ve LRFD “Load and Resistance Factor Design” şeklinde özetlenebilir.

Bu yönetmeliklerin bir kısmında Emniyet Gerilmeleri Yöntemine Göre Tasarım, bir kısmında Taşıma Gücüne Göre Tasarım veya Yük ve Mukavemet Faktörüne Göre Tasarım ve bir kısmında da Plastik Teoriye Göre Hesap ve Tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada EN 1993'te verilen tasarım kriterleri araştırılacaktır.

3.1. EN 1993'e göre Plastik Tasarım Kuralları

TSE tarafından yürürlükte olduğu ilan edilen TS EN 1993-1-1 (EN 1993) [16] şartnamesinde plastik teoriye dayalı tasarım ilkesi kabul edilmektedir. EN 1993 plastik tasarımda çok büyük önemi olan sünekliği etkileyen yerel burkulma sınır değerlerini daha hassas tanımlayabilmek için kesitleri sınıflandırmaktadır.

3.1.1. EN 1993' e göre kesitlerin sınıflandırılması

EN 1993' te kesitlerin direnç ve dönme kapasiteleri lokal burkulma dirençleri ile sınırlandırılarak kesitleri sınıflandırma kuralları açıklanmıştır. Şartnamede kesitler dört ana sınıfa ayrılır:

1. **Sınıf Kesitler**, dayanımlarında herhangi bir düşüş olmaksızın plastik analizin gerektirdiği dönme kapasitesi ile plastik mafsal oluşturabilirler.
2. **Sınıf Kesitler**, plastik moment kapasitesi büyüyebilir veya büyütülebilir fakat yerel burkulmadan dolayı sınırlı bir dönme kapasitesine sahiptir.
3. **Sınıf Kesitler**, gerilmenin elastik dağıldığı varsayılan çelik elemanlarda en dış basınç liflerinde gerilme akma dayanımına ulaşabilir fakat yerel burkulma nedeni ile kesit plastik moment kapasitesine ulaşamaz.
4. **Sınıf Kesitler**, kesitin pek çok kısmında gerilmeler akma gerilmesine ulaşmadan önce bölgesel burkulmalar oluşur.

EN 1993'e göre kesitlerin sınıflandırılması basınç bölgesindeki elemanların narinliklerine (genişlik/kalınlık oranlarına) bağlıdır. Düşünülen yük kombinasyonları altında ya kesitin tamamı ya da bir kısmı basınç elemanı olarak çalışabilir. Basınç elemanı olarak çalışan değişik basınç parçaları (gövde, başlık) genelde farklı kesit sınıflarında olabilirler. Böyle bir durumda, kesitin sınıfı kesiti oluşturan basınç parçalarının sahip olduğu en üst düzey sınıf olarak belirlenir. Başka bir ifade ile; bir kesitin sınıflandırılması, gövde sınıflandırılması ve başlık sınıflandırılmasının her ikisi yapıldıktan sonra yapılabilir. 1., 2. ve 3. Sınıf basınç parçaları için sınır oranlar EN 1993-Tablo 5.2'de [Ek 1] verilmiştir. 3. Sınıf kesitlerde sınır oranlarındaki başarısızlık durumunda kesitin 4. Sınıf olarak alınması gerektiği belirtilmektedir. Ancak 4. Sınıf olarak belirtilen kesitler hariç, EN 1993-Tablo 5.2'de 3. Sınıf olabilecek kesitler için belirtilen sınır değerlerden daha az genişlik/kalınlık oranlarına sahip kesitler 3. Sınıf olarak adlandırılabilir. Bu durumda birim şekil değiştirme oranı,

$$\frac{\sigma}{E} = \epsilon$$

(3.1)

ile arttırılmalıdır. Burada;

$\sigma_{com,Ed}$: birinci merteye veya ikinci merteye analizden elde edilen en büyük tasarım basınç gerilmesi

f_y : akma gerilmesi

γ_{mo} : kesitlerin sınıflandırılmasına bağlı olmayan kısmi direnç katsayısıdır.

Ayrıca EN 1993-Bölüm 6.3'te bir elemanın tasarım burkulma dayanımının sağlandığı durumlarda, o kesit için uygun kesit sınıfına göre sınır oranların EN 1993-Tablo 5.2'den belirlenebileceği belirtilmektedir. Örneğin, EN 1993-Tablo 5.2'ye göre, 3. Sınıf kesit özelliğini sağlamayan enkesitler, EN 1993-Bölüm 6.3'e göre, tasarım burkulma direncini sağlıyorsa 3. Sınıf kesit olarak adlandırılır ve sınır oranlar EN 1993-Tablo 5.2'den [Ek 1] belirlenir [16].

EN 1993-Bölüm 6.3.2[16]'ye göre yanal olarak tutulmamış bir kirişin tasarım burkulma moment kapasitesi

$$\text{---} \quad (3.2)$$

formülünden hesaplanır. Burada,

f_y : akma gerilmesi

: elemanların kararsız durumlarında elemanın kontrolü ile belirlenen kısmi dayanım katsayısı olarak adlandırılır ve $\gamma_{M1}=1$ olarak alınması tavsiye edilir

χ_{LT} : yanal burkulma için azaltma katsayısıdır ve 1 olarak alınabileceği belirtilmiştir.

W_y : y eksenine etrafındaki kesit modülü olarak adlandırılır ve

$W_y = W_{pl,y}$ 1. ve 2. Sınıf kesitler için

$W_y = W_{el,y}$ 3. Sınıf kesitler için

$W_y = W_{eff,y}$ 4. Sınıf kesitler için

şeklinde dikkate alınır [16].

Gövde de yalnızca kesme kuvveti dayanımı dikkate alınıyorsa, kesitin normal kuvvet dayanımı ve eğilme dayanımlarına katkısının olmadığı düşünülerek, yalnızca başlıkların sınıfına bağlı olarak kesitlerin Sınıf 2, 3 ve 4 olarak tasarlanabileceği de ifade edilmektedir [16].

3.1.2. EN 1993'e göre c/t hesabı

Elastik ortam için kabul edilen Bernoulli-Navier varsayımı elasto-plastik ortamda da geçerliliğini korur. Cismin ideal elastik-mükemmel plastik olduğu kabul edildiği için enkesitin bir lifinde akma sınırına ulaşıldığı anda o enkesitin plastikleşmeye başladığı kabul edilir. Plastikleşen kesitte gerilme dağılımı; kesiti iki eşit alana bölen bir tarafsız eksen (plastik tarafsız eksen, eşit alan eksenini) oluşturur. Eğer enkesit çift simetriye sahip ise plastik tarafsız eksen simetri eksenini ile çakışır.

EN 1993'te kesitlerin sınıflandırılması kesitin basınca çalışan bölgesindeki c/t oranına bağlı olarak yapılmıştır. Burada;

c: basınç bölgesinin uzunluğu

t: basınç bölgesinin kalınlığıdır.

Bu oran başlıklar için,

$c/t < 9\varepsilon/\alpha$ 1. Sınıf kesitler için

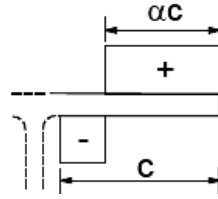
$c/t < 10\varepsilon/\alpha$ 2. Sınıf kesitler için

değerleri ile sınırlanmıştır. ε , çeliğin akma gerilmesine bağlı olarak,

—————

(3.3)

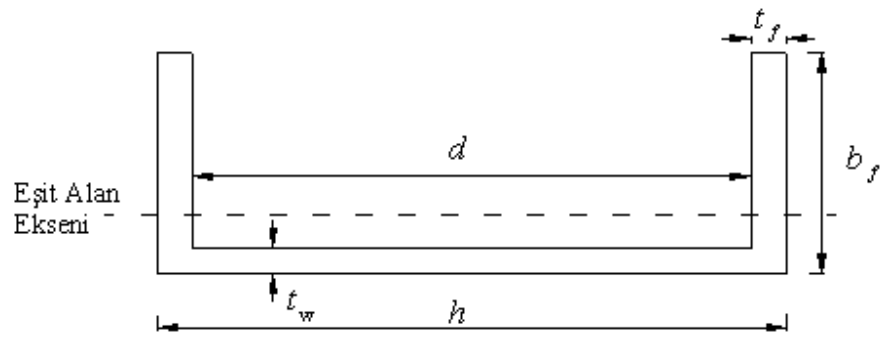
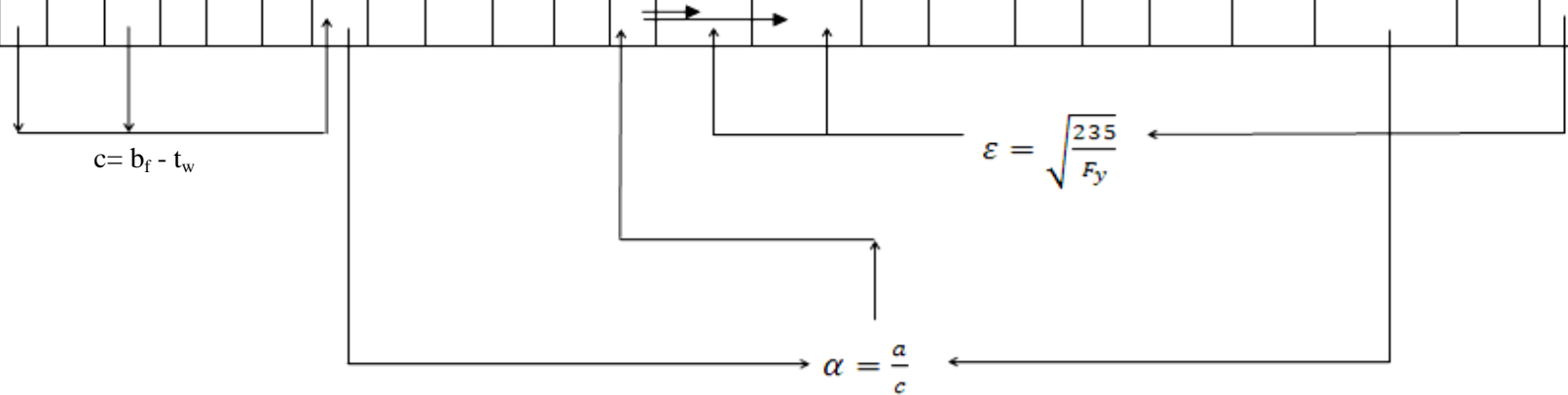
eşitliği ile ifade edilmiştir. α değeri ise plastikleşen kesite eşit alan ekseninin konumunu belirten bir katsayıdır.



Şekil 3.1. EN 1993'te Basınç Parçası için "c" Değeri[16]

Bölüm 6'daki parametrik çalışmalarda oluşturulan eleman boyutlarına göre her bir kesit için farklı c/t oranları hesaplanmıştır. Hesaplamanın nasıl yapıldığı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

PARAMETRİK	EUROCODE 3																			Eşit Alan Eksen Mesafesi				
N-mm	h	t _w	h/t _w	b _f	t _f	d	b _f /d	c	c/t _f	L _b	L _b /b _f	y _z	α	c/t=9ε/α	c/t=10ε/α	alan	yarı alan	a ₁	a ₂	Basınç bölgesi	Basınç bölgesi	a	Basınç bölgesi	F _v
235_FY MODEL_1	75.00	5.00	15.00	65.67	4.67	65.67	1.00	60.67	13.00	262.67	4.00	22.25	0.83	10.83	12.03	941.22	470.61	50.423	59.392	470.61	470.61	50.4226	470.61	235



Şekil 3.2. EN 1993'e Göre Parametrik Modellerde c/t Hesabı Akış Diyagramı

3.2. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY)'e göre Tasarım Kuralları

Türk Deprem Yönetmeliği olarak da adlandırılan "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik"[17]'in 4. Bölümünde "Çelik Binalar için Depreme Dayanıklı Tasarım Kuralları" anlatılmıştır.

DBYBHY, deprem bölgelerinde yapılacak tüm çelik binaların taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlandırılması ve birleşimlerinin düzenlenmesinin, bu konuda yürürlükte olan ilgili standart ve yönetmeliklerle birlikte, öncelikle bu yönetmelikte belirtilen özel kurallara uyularak yapılmasını belirtmektedir. Ayrıca, bu yönetmeliğin kapsamı içindeki çelik binaların yatay yük taşıyıcı sistemlerinin; sadece çelik çerçevelerden, sadece merkezi veya dışmerkez çelik çaprazlı perdelerden veya çelik çerçevelerin, çelik çaprazlı perdeler ya da betonarme perdelerle birleşiminden oluşabileceği anlatılmaktadır. Ek olarak, betonarme döşemelerin çelik kirişler ile kompozit olarak çalıştığı çelik taşıyıcı sistemlerin de bu bölümün kapsamı içinde olduğu vurgulanmaktadır [17].

Yönetmelikte depreme karşı davranışları bakımından, çelik binaların yatay yük taşıyıcı sistemleri, iki sınıfa ayrılmıştır:

- Süneklik Düzeyi Yüksek Sistemler
- Süneklik Düzeyi Normal Sistemler

Süneklik düzeyi yüksek çerçevelerin boyutlandırılmasında uyulacak kurallar yönetmeliğin 4. Bölümünün 3. Başlığında, süneklik düzeyi normal çerçevelerin boyutlandırılmasında uyulacak kurallar yönetmeliğin 4. Bölümünün 4. Başlığında, açıklanmıştır. Her iki başlık altında ilk madde olarak çerçevelerin teşkilinde kullanılacak olan elemanların en kesit koşullarına ilişkin bilgi verilmiş ve en kesitlerin boyutlandırılması ile ilgili koşullar tablo halinde sunulmuştur (Bkz. Tablo 3.1). Gerek süneklik düzeyi yüksek, gerekse süneklik düzeyi normal sistemlerin oluşturulmasında kullanılan elemanların boyutlandırılmasında Tablo 3.1'deki koşullar kullanılmaktadır.

Tablo 3.1. DBYBHY'e göre Enkesit Koşulları[17]

Eleman Tanımı	Narinlik Oranları	Sınır Değerler	
		Süneklik Düzeyi Yüksek Sistem	Süneklik Düzeyi Normal Sistem
Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki I Kesitler U Kesitler	$b/2t$ b/t	_____	_____
Eğilme Etkisindeki I Kesitler U Kesitler	h/t_w	_____	_____
Basınç Etkisindeki T Kesitler L Kesitler	h/t_w	_____	_____
Eğilme Ve Eksenel Basınç Etkisindeki I Kesitler U Kesitler	h/t_w	_____	_____
		_____	_____
<p>Tanımlar</p> <p>b : I, U kesitleri ve dikdörtgen kutu kesitlerde başlık genişliği</p> <p>h : I, U, T kesitleri ve dikdörtgen kutu kesitlerde gövde yüksekliği L kesitlerinde büyük kenar(kol) uzunluğu</p> <p>t : I, U, T kesitleri ve dikdörtgen kutu kesitlerde başlık kalınlığı halka kesitlerde (borularda) kalınlık</p> <p>t_w : I, U, T, L kesitleri ve dikdörtgen kutu kesitlerde gövde kalınlığı</p>			
<p>: Akma gerilmesi</p> <p>: Elastisite modülü</p> <p>: Eksenel basınç kuvveti</p> <p>Enkesit alanı</p>			

3.3. TS 4561'e Göre Tasarım Kuralları

elik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesap Kuralları olarak adlandırılan 4561 numaralı Türk Standardı [18] plastik teoriye göre hesap kurallarını açıklarken, Bölüm 2.4'te kesitlerin taşıma gücü hakkında "açıklanan kuralların çok karşılaşılan I, dikdörtgen ve sandık kesitler için kesit tesirlerinin aşmaması gerekli sınırları belirlediği" ifadesini kullanmaktadır. TS 4561 Bölüm 2.4'te bahsedilen enkesitlerde anlatılan kuralların uygulanabilmesi için, elemanda genel ve yanal burkulma ve buruşma gibi kararsızlık durumlarının oluşmadığının ayrıca kontrol edilmesi gerektiğini vurgulanmaktadır. Bölüm 2.5'te ise yanal ve yerel burkulmalara ilişkin sınır koşullar üzerinde durulmuştur. Fakat yine, açık bir ifade ile, TS 4561 bölüm 2.5'de belirtilen kuralların da I ve sandık kesitler için geçerli kurallar olduğu belirtilmiştir.

BÖLÜM 4. U KESİTLİ KİRİŞLERİN ZAYIF EKSENDE EĞİLME DENEYLERİ

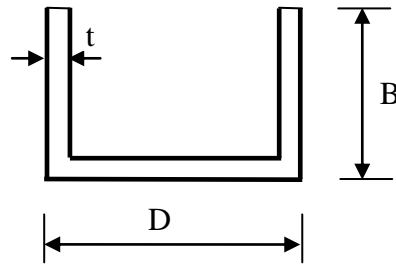
Bu tezde, zayıf eksende eğilmeye maruz U kesitli kirişlerde plastik hesap yapılabilirliğini sorgulamak amacı ile EN 1993'te verilen[Ek 1] plak narinliklerinin geçerliliği sorgulanacaktır. Bu amaçla, literatürde U kesitli kirişlerle ilgili yapılan deneyler araştırılmış ve Beale, Godley ve Enjily [19] tarafından 2001 yılında yapılmış olan ve 26 adet U kesitli soğukta işlem görmüş ve 4 nokta yüklemesine tabi tutulmuş çelik kirişin deney sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu deneysel çalışmada araştırmacılar gövde ve başlık narinliklerinin maksimum moment taşıma kapasitesine etkilerini incelemiştir. Bu deney verileri, bu tezde oluşturulacak olan sonlu eleman modellerinin doğrulanmalarında kullanılacaktır. Bu nedenle tezin bu bölümünde bu deneysel çalışma hakkında daha detaylı bilgi verilecektir.

4.1. Malzeme Özellikleri

Deney elemanları, soğukta işlenmiş iki farklı çelik sınıfına ait 1.6mm kalınlığındaki çelik plaklardan imal edilmiştir. Deney elemanlarının tüm köşelerdeki iç yarıçapları 1.6mm'dir. Deney elemanlarının uçları, kare şeklindeki plakların kiriş gövde uçlarına kaynaklanmasıyla koruma altına alınmıştır. Deney elemanlarına ait tüm özellikler Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Malzemelerin sadece akma gerilmesi ve elastik modelleri raporlanmıştır. Deney raporlarında pekleşme bölgesi için bilgilere rastlanmamıştır.

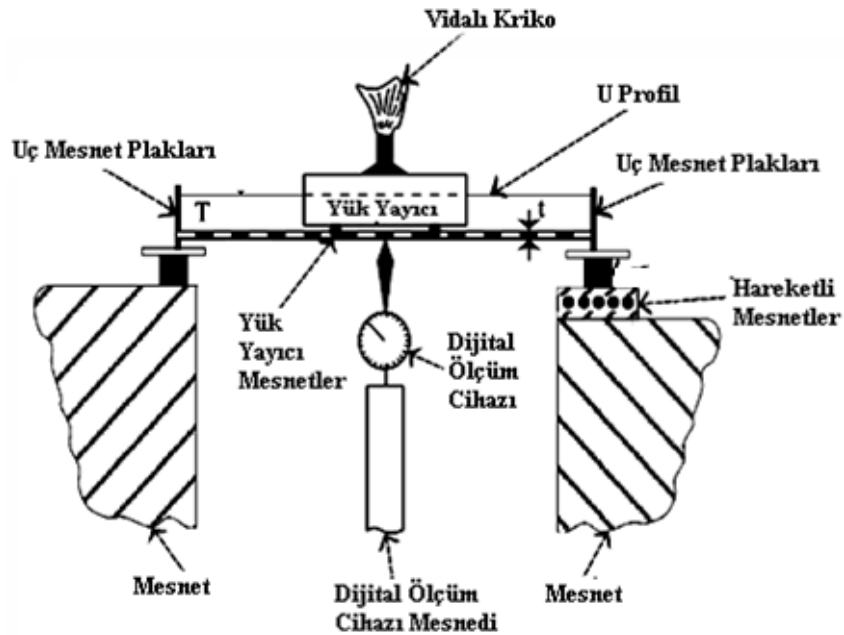
Tablo 4.1. Zayıf Eksende Eğilme Deneyi Numune Özellikleri

	Numune Kodu	Kesit Ebatları (DxBxt) (mm)	σ_y (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Deneysel Göçme Yüğü (kN)	Tam Plastikleşme Yüğü (kN)	Deneysel Göçme Yüğü / Tam Plastikleşme Yüğü	Kiriş Boyu (mm)	b/t
DENEY 1	M14	105X48X1.6	232.5	198700	2.46	4.743	0.519	1000	28
DENEY 2	12	75X32X1.6	232.5	198700	4.24	4.850	0.874	500	18
DENEY 3	14	105X48X1.6	232.5	198700	5.82	11.068	0.526	500	28



4.2. Deney Düzenegi

Deney numuneleri dört noktadan yüklenerek eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 4. 1. Zayıf Eksende Eğilme Deney Düzenegi [19]

Kiriş uçları kare plaklar ile emniyet altına alınarak, basit mesnetli kiriş olarak düzenlenmişlerdir. Deney düzeneği Şekil 4.1'de gösterildiği gibidir. Yük, vidalı bir kriko vasıtası ile uygulanmış ve yük dağıtıcı bir parça tarafından bu yükleme birbirinden belirli bir mesafede olan yuvarlak rijit çubuklar vasıtası ile gövdede iki çizgi üzerine yayılı yük olarak uygulanmıştır. Her bir yükleme bölgesine ve mesnet noktalarına yük naklediciler konulmuştur. Yükleme noktaları arası mesafe; 500 mm uzunluğundaki kirişler için 200 mm, 1000 mm uzunluğundaki kirişler için 300 mm olarak ayarlanmıştır. Her bir kirişin açıklık ortasındaki sehimi dijital ölçüm cihazı ile ölçülmüştür.

Deney sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir. Tabloda deneye tabi tutulan kiriş elemanı boyunca bir kesit için okunan deneysel göçme yükü, o kesit için hesaplanan plastik göçme yükü ile karşılaştırılmıştır. Tabloda ayrıca deney kirişlerinin başlıkları için genişlik/kalınlık (b/t) oranları da verilmiştir.

BÖLÜM 5. SONLU ELEMAN MODELLEMESİ

Başarılı bir sonlu eleman modellemesi için malzemenin mekanik özelliklerinin, kırılma hipotezlerinin, sistem geometrisinin, sınır koşullarının, çözüm ağı yoğunluğunun, kullanılacak sonlu eleman türünün ve çözüm metodlarının en doğru sonucu verecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu bölümde bu aşamalar hakkında bilgi verilecektir.

5.1. Malzeme Modeli

Çelik yapılarda kullanılan yapısal çeliklerin statik yükler ve çekme kuvvetleri altındaki dayanımını tanımlamak için malzemenin akma sınırı, çekme mukavemeti özelliklerinden yararlanır.

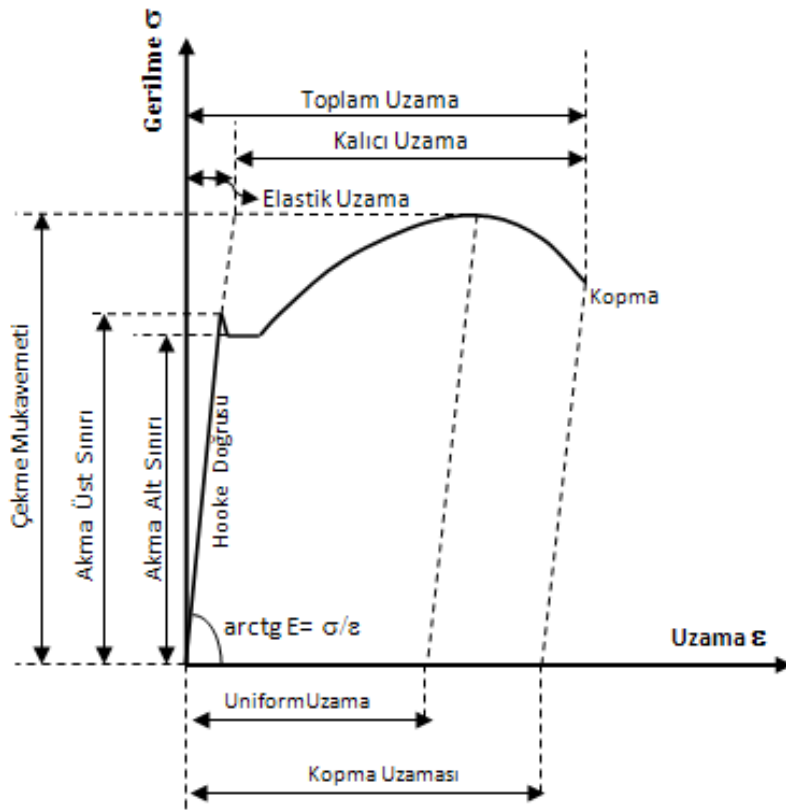
Gerçekte yapısal çelikler için gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi gösteren diyagram Şekil 5.1'de görüldüğü gibidir. Gerçekleştirilmesi yapılacak olan deney setinde, malzemeye ait mekanik özelliklerden sadece akma gerilmesi ve elastik modülün değerleri Bölüm 4'te verilmişti. Bu bilgilerden yola çıkarak malzemenin ideal elasto-plastik şekilde modellenmesine karar verilmiştir (Bkz. Şekil 5.2).

İdeal elasto-plastik malzemenin tanımı uyarınca, σ - ϵ diyagramının,

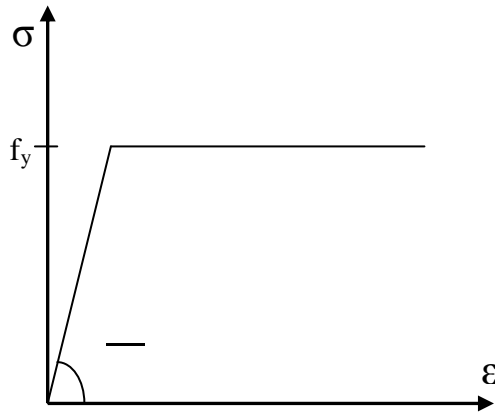
$$0 < \epsilon < \epsilon_e \quad \text{için} \quad \sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\epsilon_e < \epsilon < \infty \quad \text{için} \quad \sigma = f_y$$

şeklinde iki doğru parçasından oluştuğu, çekme ve basınç yüklemeleri altında malzemenin aynı davranışı gösterdiği kabul edilmektedir. Burada ϵ_e elastik birim şekil değiştirmeyi, E elastisite modülünü, f_y ise akma gerilmesini göstermektedir.



Şekil 5.1. Çeliğin Gerilme Şekil Değişirme Eğrisi [10]



Şekil 5.2. İdeal Elasto-Plastik Malzemede σ - ϵ Diyagramı

5.2. Plastisite Ve Kırılma Hipotezleri

Kuvvetler etkisi altındaki cisimlerin ne gibi sebeplerin tesiri ile kırıldığını araştıran bilim adamları, bir çok deneyin sonucunda bazı kriterler ileri sürmüşlerdir. Bu kriterlere “Kırılma Kriterleri” veya “Kırılma Teorileri (Hipotezleri)” denir. Bir cismin hangi yük sınırında plastik hale geçeceği veya hangi yük sınırında kırılacağını bilmek için o cismi deneye tabi tutmak gerekir. Fakat deneyler çoğunlukla basit çekme veya basit basınç gibi tek eksenli gerilme altında yapılmakta bu nedenle, ancak tek eksenli gerilmeye maruz cisimler için sınır değerler tespit edilebilmektedir. Gerçekte cisimler iki veya üç eksenli gerilmeye maruzdur ve cismin bu zorlamalar altında plastik duruma ve kırılma durumuna nasıl ulaşacağı bilinmemektedir. Çünkü iki veya üç eksenli gerilme altında deney yapmak hayli güç olmakla birlikte, üç eksenli gerilme durumunun sonsuz çeşidi olup bunlara ayrı ayrı deney yaparak ortalama davranışı tespit etmek olanaksızdır [10].

Bu nedenle, tek eksenli gerilme halinin sınır değerleri (kırılma, kopma, ezilme, akma) üç eksenli gerilme haliyle kıyaslanarak, her iki halin gerilmeleri arasındaki bağıntılar bulunmaya çalışılmıştır. Fakat iç bünyede geçen karışık olayların kesin fizik kanunları ile ifade edilmesi mümkün olmadığı için kesin mukayese kriterlerinden de bahsetmek doğru değildir. Bunun yerine, mukayese kriterleri istatistiksel olarak incelenmelidir [10]. Bu konularla ilgilenen bilim adamları iç yapıları bakımından birbirinden çok farklı olan malzemeler için tek bir kriter bulunamayacağını belirterek karşılaştırma için, uygunluk derecesi deneylerle kontrol edilmiş bazı varsayımlar öne sürmüşlerdir [10].

Etki eden kuvvetlerin çeşidine göre kırılma teorilerini "Statik etki altında kırılma" ve "Dinamik etki altında kırılma" şeklinde iki bölümde incelemek mümkündür. Statik etkiyle kastedilen, kuvvetlerin yavaş etki ederek şiddetlerini yavaş yavaş artırmaları halinde meydana gelen kırılmadır. Mukavemet hesaplarında, statik etki altında kırılmayı açıklamak için ileri sürülen kırılma teorileri esas olarak üç grupta toplanabilir[56].

1. Gerilme Teorileri

- a. Maksimum gerilme teorisi
- b. Maksimum kayma gerilmesi teorisi
- c. İç sürtünme teorisi
- d. Mohr kriteri

2. Şekil Değişimi Teorileri

- a. Maksimum birim uzama teorisi
- b. Maksimum çarpılma açısı teorisi

3. Enerji Teorileri

- a. Toplam şekil değişimi enerjisi teorisi (Tresca Kriteri)
- b. Çarpılma enerjisi teorisi (Von-Mises Kriteri)

Kriter seçiminde önemli etkenler, tasarımcıya hesaplamalar için gerekli olan malzemenin dayanım değerinin bilinmesi, uygun kırılma kontrol düzeninin seçimi için özel gereksinimlerin bilinmesi olarak sayılabilir.

ABAQUS[20] sonlu elemanlar programı farklı tip plastisite ve kırılma teorileri kullanımına imkan tanımaktadır. Literatürde, genel olarak sünek bir malzeme için Von Mises veya Tresca kriteri kullanılmaktadır.

Tresca Akma Kriterine göre, malzeme elastik halden plastik hale τ_{\max} kritik bir değere ulaştığı zaman geçer. Bu değer gerilme tipinden bağımsızdır. Genel ifadesi :

$$\text{Maksimum } \{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|\} = \sigma_a \quad (5.1)$$

Burada σ_1 , σ_2 ve σ_3 asal gerilmeler olup $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 'tür. Düzlem şekil değiştirme durumu için $\sigma_3 = 0$ alınırsa yukarıdaki denklem;

$$\text{Maks. } \{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2|, |\sigma_1|\} = \sigma_a \text{ olur.} \quad (5.2)$$

Bu tezde Von-Mises kriteri tercih edilmiştir. Bu kritere göre, hidrostatik basınç malzemenin akmasına sebep olamaz. Yalnızca, distorsiyon enerjisi malzemeyi

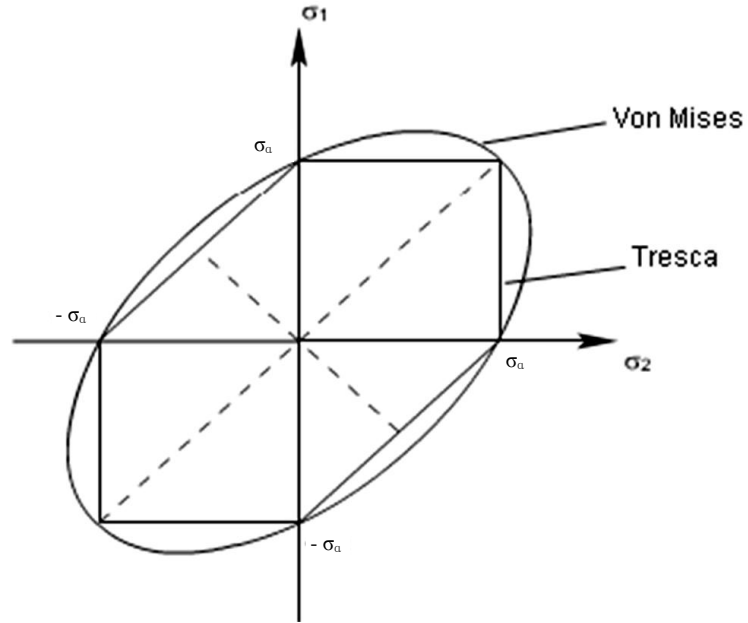
elastik durumdan plastik duruma geçirmede etkili olur. Elastik distorsiyon enerjisi kritik bir değere erişirse akma başlar. Genel formül;

(5.3)

şeklindedir. Düzlem şekil değıştirme durumunda alınırsa;

(5.4)

olur. Bu denklem bir elips denklemdir.



Şekil 5.3. Tresca ve Von-Mises Akma Yüzeyleri [23]

5.3. Geometrik Kusur

İnce cidarlı geometrilerinden dolayı çelik profiller yerel ve global burkulmaya açık yapı elemanlarıdır. Özellikle yerel burkulmaların etkilerinin izlenebilmesi için doğrusal olmayan geometrik analiz yapılmalıdır. Bundan dolayı, sonlu eleman modellerine gerçekteki gibi burkulmasına yardımcı olmak amacıyla başlangıçta ilkel kusurlar eklenmelidir. Aslında bu ilkel kusurların eklenmesi gerçekte hiçbir elemanın kusursuz olmadığı gerçeği ile de örtüşmektedir.

Dubina ve Ungureanu [21], soğukta işlenmiş çelik elemanların davranışı üzerinde kusurların etkilerini analiz etmişlerdir. Bir sonlu elemanlar modeli için geometrik kusurların kodlaması ve karakterize edilmesi konusu ile özel olarak ilgilenmiş ve birinci ve ikinci kararsızlık modlarında, geometrik kusurlardan dolayı, teorik burkulma dayanımındaki azalmayı ileri plastik analizde kullanılan çeşitli yaklaşımları esas alarak hesaplamışlardır.

Schafer ve Peköz'e göre [22], ince cidarlı soğukta işlenmiş çelik elemanların burkulma sonrası davranışı çok karmaşık bir durum sergilemektedir ve bu davranışın önceden belirlenmesi zordur. Günümüzde ileri hesaplama modellerine hassas deneylerinde eklenmesiyle, bu davranışın hesaplama modellerinin oluşturulabileceğini ve girdilerin karakterizasyonuna bağlı olarak hesaplamaların doğruluğuna önemli ölçüde güvenilebileceğini ifade etmişlerdir. Soğukta işlenmiş çelik elemanların kalıcı gerilme modeli ve geometrik kusurların modeli için kullanılmış büyüklük ve dağılımlarda ortak bir karar olmadığını ve detaylı bilgiler elde etmek için var olan verilerin toplanması yeniden analizler ve deneyler yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Gerek anlatılan bu iki çalışmadan gerekse literatürdeki geometrik kusurlar üzerine yapılan diğer çalışmalardan yola çıkarak, sonlu eleman modellemelerinde geometrik kusurların sonlu eleman programlarında tanımlanabilmesi için birkaç yöntem olduğu tesbit edilmiştir [21,22,23,24]. Bu çalışmada bu yöntemlerden iki tanesi kullanılarak kusur tanımlanmaya çalışılmıştır.

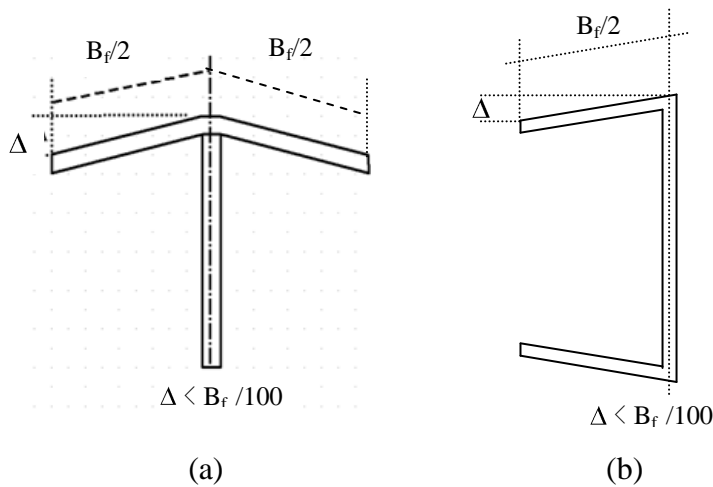
- Var olan kusurun sinüs dalgası formülasyonu ile idealize edilmesi.
- Kusursuz sistemin lineer burkulma analizi yapılarak birinci burkulma modunun ölçeklendirilerek kusurlu sistemmiş gibi kabul edilmesi.

5.3.1. Kusuru sinüs dalgası formunda tanımlamak

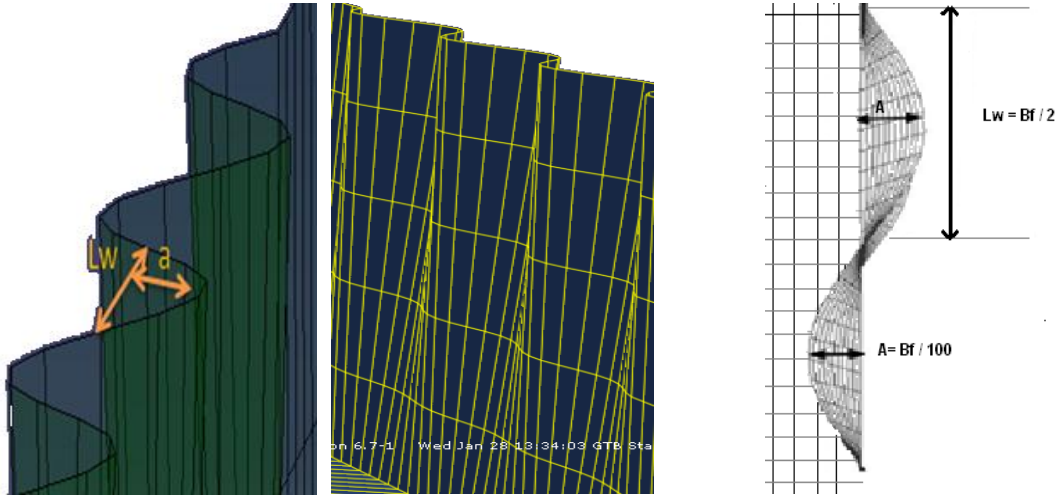
Kusur ya gerçek değeri ile ya da şartnamelerin belirlediği maksimum değerler göz önüne alınarak, sinüs dalgası ile modellenenir. Literatürde benzer çalışmalara rastlanmaktadır [23]. Bunun için yapı elemanını oluşturan parçaların serbest uçlarına;

$$y = a \sin (\pi x / L_w) \quad (5.5)$$

formuna sahip geometri verilmesi gerekmektedir. Excel tablolama programı yardımıyla, ilgili düğümlerin koordinatları yukarıda verilen denklemlerle hesaplanarak sonlu elemanlar programına girilmiştir. Denklem (5.5)'de a dalganın genliğini, L_w ise dalga boyunu ifade etmektedir. Genlik için Amerika Kaynak Birliğinin (AWS D1.1:2000) [25] verdiği maksimum kusur değeri kullanılmıştır. Bu değer dalganın genliği için $B_f/100$ ile sınırlandırılmıştır (Bkz. Şekil 5.4.a). Bu çalışmada U profiller için benzer kusur kullanılmıştır (Bkz. Şekil 5.4.b). Plak teorisine göre plaklar burkulurken serbest kenarlardan kısa olan kenarın uzunluğuna sahip dalga boyu ile burkulurlar. Buradan yola çıkarak dalga boyu $B_f/2$ ile sınırlandırılmıştır (Bkz. Şekil 5.5).

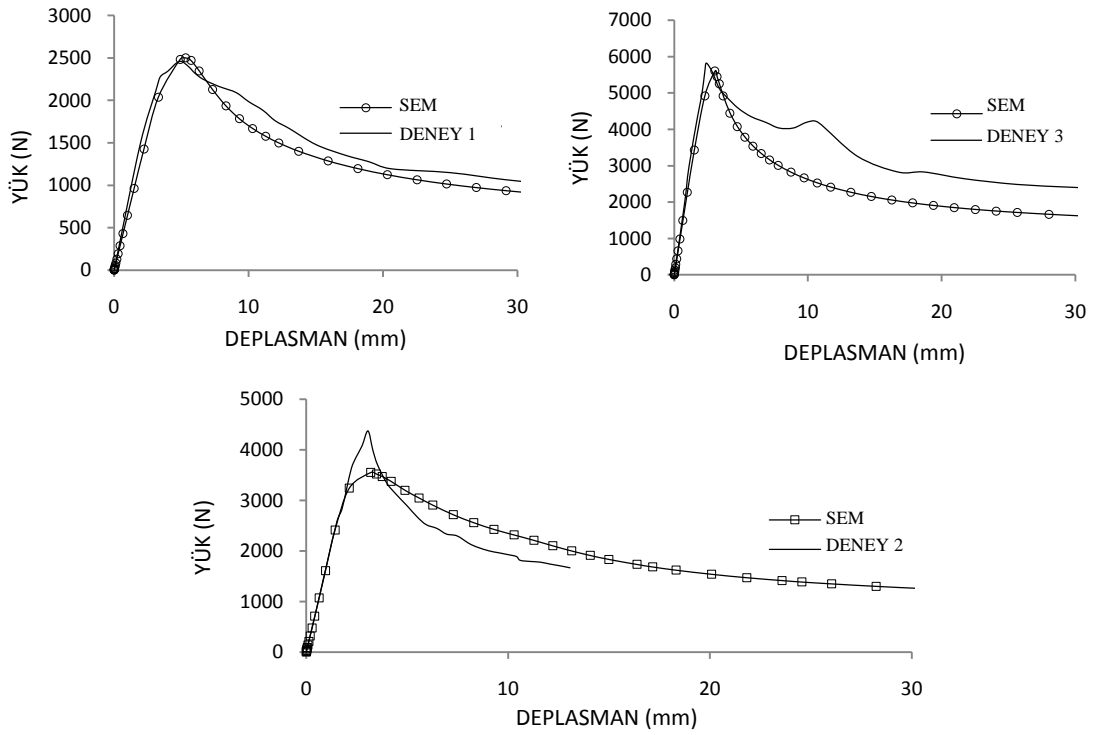


Şekil 5.4. Eğilme ve Flanş Eğriliğinin Ölçüsü



Şekil 5.5. Sinüs Dalgası Şeklinde Geometrik Kusur

Bölüm 4'te anlatılan deney elemanları için geliştirilen ve ilerleyen kısımlarda detayları verilecek olan nümerik modellemelerde geometrik kusurların sinüs dalgası formunda tanımlanması ile elde edilen sonuçların gerçek deney sonuçları ile kıyaslandığı grafikler Şekil 5.6'da sunulmuştur.



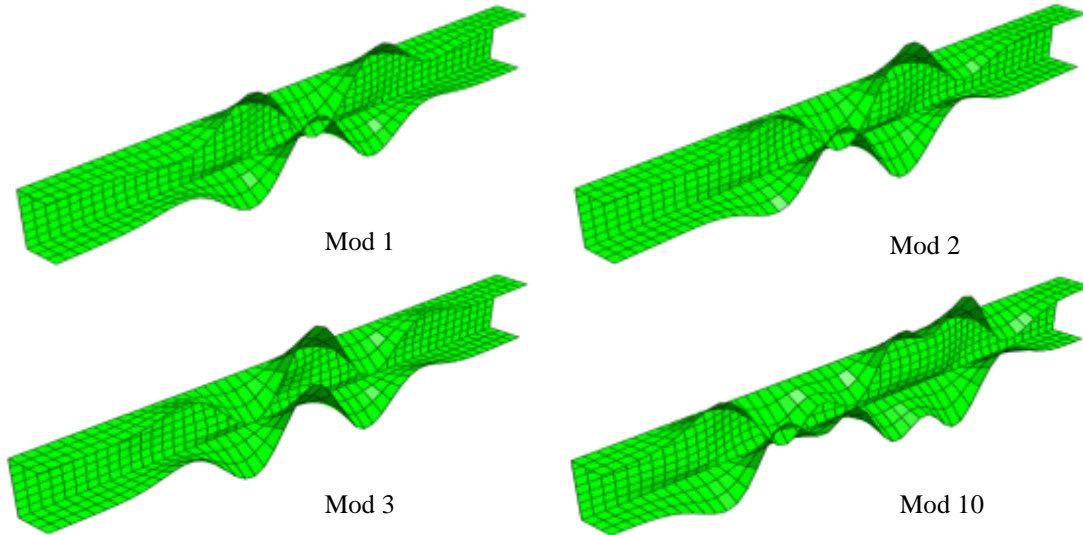
Şekil 5.6. Geometrik Kusurların Sinüs Dalgası Formunda Modellendiği Sonlu Eleman Metodu(SEM) Sonuçlarının Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

Şekillerden, sinüs dalgası kusur modeli kullanılarak yapılan modellerin çözümünden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile deneylere ait yük-deplasman grafiklerinin elastik davranış bölgesinde aynı doğrusallığa sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca elastik olmayan bölgede de benzer eğri davranışlarının yakalandığı söylenebilir.

5.3.2. Doğrusal burkulma mod şeklinin geometrik kusur olarak kullanılması

Bu yöntemde yapı elemanı kusursuz bir şekilde modellenir ve lineer burkulma analizi yaptırılarak istenen sayıda burkulma modları elde edilir. Elde edilen bu burkulma modlarından en küçüğü bir sayı ile ölçeklendirilerek kusursuz sistemin geometrisiymiş gibi sayısal modele aktarılır. Eleman, elde edilen geometride çözdürülerek sonuca gidilir.

Bu çalışmada 10. Mod'a kadar burkulma şekilleri incelenmiştir. Burkulma şekillerinin farklılığını göstermek adına Şekil 5.7'de Mod 1, Mod 2, Mod 3 ve Mod 10'a ait burkulma şekilleri verilmiştir.

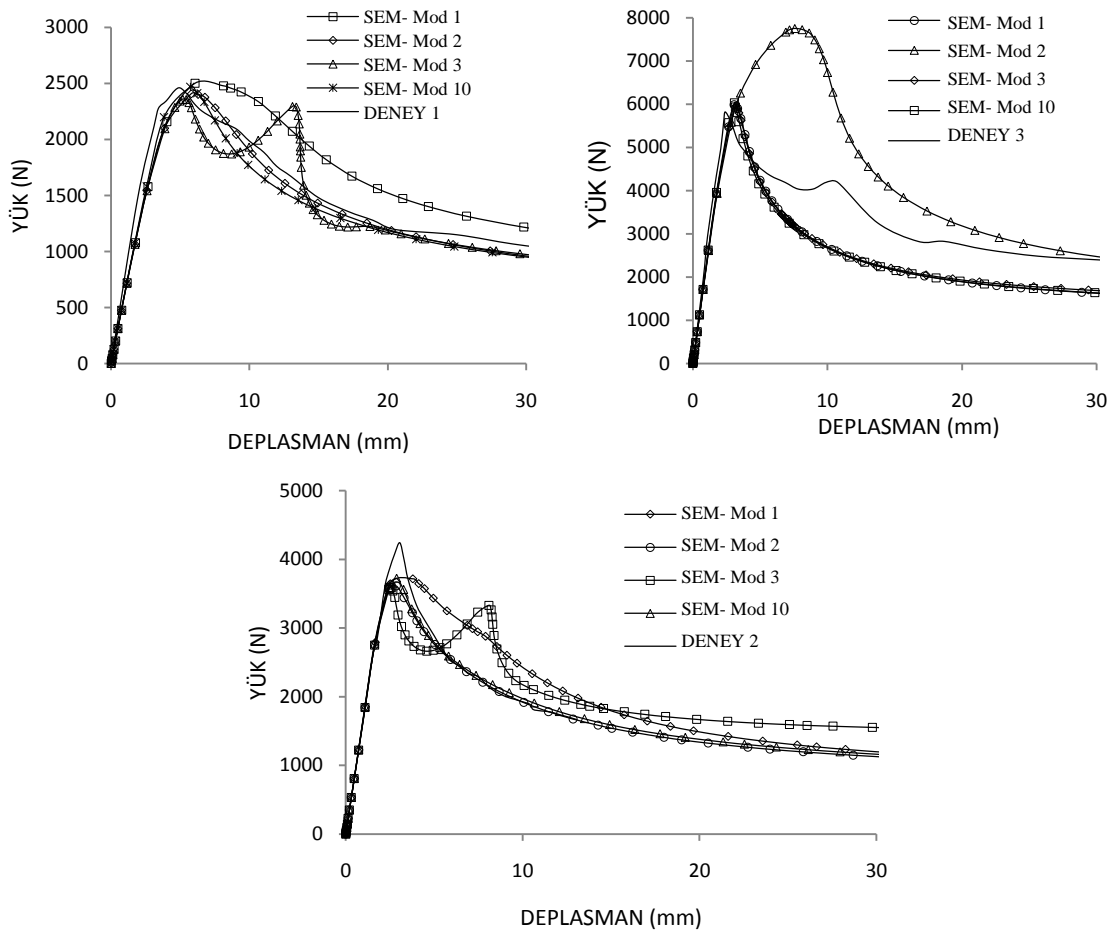


Şekil 5.7. Burkulma Analiz Sonucunda Elde Edilen Farklı Mod Şekilleri

Bölüm 4'te anlatılan deney elemanları sonlu elemanlarla modellenirken elemanların geometrik kusurları, doğrusal burkulma mod şekillerinin $L/1000$ büyütme katsayısı ile çarpılarak elde edildiği modellerin analiz sonuçları ile gerçek deney sonuçlarına

ait yük-deplasman grafikleri Şekil 5.8' de sunulmuştur. Geometrik kusur tanımında lineer burkulma mod şekillerinin kullanılması ile yapılan modellerin çözümünden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile deneylere ait yük-deplasman grafiklerinin elastik davranış bölgesinde aynı lineerliğe sahip olduğu görülmektedir. Fakat gerek maksimum yük değerini yakalamada, gerekse elastik olmayan bölgedeki eğri davranışlarında her bir mod şekli için farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu durum hangi mod şeklinin kusur tanımında kullanılmasının daha uygun olacağı belirsizliğini de ortaya çıkarmıştır.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.8 deki grafiklerde eğri davranışları kıyaslanarak bu çalışmada geometrik kusurların sinüs dalgası formunda, başlıklarda, serbest uçlara verilmesine karar verilmiştir.



Şekil 5.8. Geometrik Kusurlar Lineer Burkulma Mod Şekli ile Tanımlandığı Deney Elemanlarının Yük-Deplasman Grafiği

5.4. Malzemelerin İzotrop Pekleşmesi

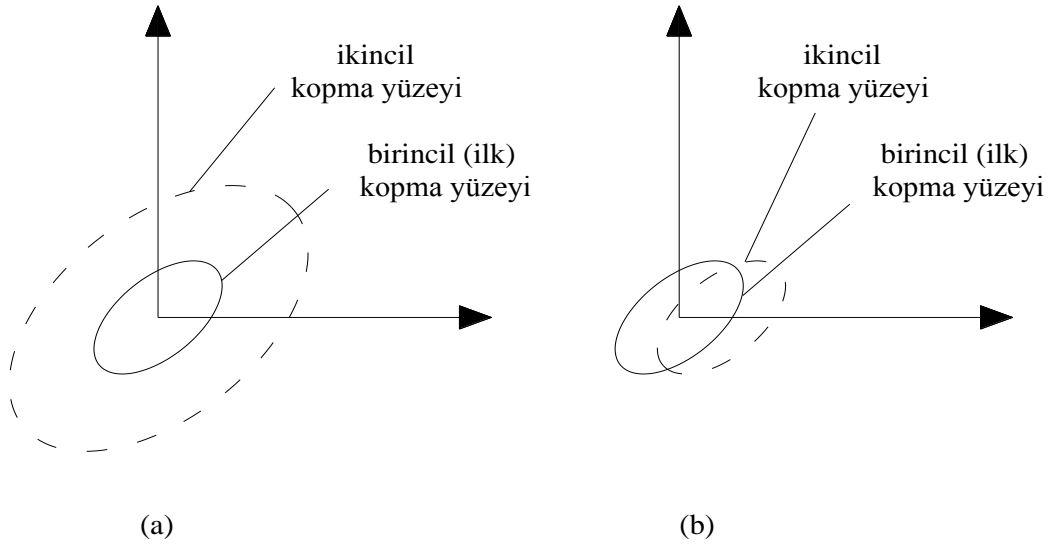
Metallerin, elastik limiti aşan uzamalarda nasıl sertleştikleri net olarak bilinmemekle birlikte malzeme bilimcileri olayın işleyiş mekanizmasını açıklarken iki teori etrafında birleşmektedirler; "kinematik sertleşme" ve "izotropik sertleşme" [26].

Bu iki yaklaşımın da temelinde "akma yüzeyi" kavramı yatmaktadır. Akma yüzeyi fiziksel bir değeri ifade etmekle birlikte, plastik deformasyona uğrayan maddelerin matematiksel ifadesi için kullanılır. Akma yüzeyi üzerinde alınan tüm yönlerdeki gerilmeler "ana gerilim" olarak kabul edilir ve malzeme, yüzey sınırları içinde uygulanan gerilimle elastik bir davranış gösterir. Bu iki teori bu noktadan sonrasını, yüzey sınırlarının plastik deformasyon etkisinde nasıl hareket ettiklerini farklı yollarla açıklamaya çalışmaktadır [26].

İzotropik sertleşme teorisi; akma yüzeyinin, Von Mises'in "Maksimum biçim değiştirme enerjisi" kriteriyle elde edilen gerilme değerleriyle doğru orantılı olarak büyüdüğünü kabul etmektedir. Buna göre bir malzemeye uygulanan "hacimsel değişim enerjisi", o malzemenin çekme testinde akma noktasına ulaşması için gereken değer altında kaldığı sürece malzeme elastik davranış göstermeye devam edecektir. Akma noktasında görülen plastik uzama, malzemenin yapısındaki kristal düzlemlerin birbirleri üzerinden kayarak yer değiştirmelerine ve düzensizleşmelerine sebep olurlar. Bu yer değişimleri birim hacimde ne kadar çoksa malzeme de o kadar sert ve kırılğan bir yapı özelliği kazanır. Deformasyon dolayısıyla malzeme içinde çekme ve basınç gerilmeleri birbirlerine neden olarak görülmeye başlanır [26, 27]. İzotropik sertleşme grafiğindeki simetrik büyüme kaydetmiş akma yüzeyi de bu görüşü destekler (Bkz. Şekil 5.9) [26].

Kinematik sertleşme teorisi ise; malzemenin izotropik olmayan doğası sonucu, uygulanan kuvvetlerin malzeme üzerinde yarattığı değişimleri göz önüne alarak bir model oluşturur. Teori temel fikrini "Bauschinger etkisi"nden alır. Buna göre belli bir yönde elastik limiti aşan değerlerde çekme uygulanan malzemenin içindeki sıkışma kuvvetleri de o oranda küçük olur; tersi de doğrudur. Başka bir deyişle malzemenin dayanımı, plastik olarak deforme edildiği yönde uygulanan kuvvetle

orantılı olarak artarken tersi yönde azalır. Elde edilen uzamaya dik doğrultuda ise bir değişim gözlenmez. Matematiksel olarak bunun anlamı, kinematik sertleşme grafiğinde görüldüğü üzere ve izotropik durumu açıklayan teorisinin aksine; kopma yüzeyinin boyutunu değiştirmeden sadece kaydırır. Bu tezde izotropik pekleşme teorisine göre modelleme yapılmıştır.



Şekil 5.9. a) İzotropik Sertleşme b) Kinematik Sertleşme

5.5. Doğrusal Olmayan Sistemlerin Sayısal Çözüm Yöntemleri

Bir yapı sisteminin hesabında yer değiştirme bileşenlerinin bilinmeyenler olarak seçilmesi halinde, bilinmeyenleri veren denklem takımının matris formundaki genel ifadesi;

[K] : katsayılar matrisi (sistem rijitlik matrisi)

[d] : bilinmeyenler matrisi (yerdeğiştirme matrisi)

[p] : sabitler matrisi (yükleme matrisi)

olmak üzere,

$$[K][d]=[p] \quad (5.6)$$

şeklinde yazılabilir [5].

Doğrusal olmayan yapı mekaniği problemlerinde, problemin türüne ve çözümde uygulanan yöntemle ilgili olarak, $[K]$ katsayılar matrisi ve bazı hallerde $[p]$ sabitler matrisi veya bazı hallerde her iki matris birden problemin çözümünü, diğer bir deyişle, çözüme ait yer değiştirmeleri ve şekil değiştirmeleri içermektedir.

Örneğin, geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemlerin hesabında denge denklemlerinin şekil değiştirmiş hal üzerinde yazılması gerektiğinden, genel olarak denklemin katsayıları, yani $[K]$ matrisi bilinmeyen yer değiştirmelere bağlıdır[5]. Diğer taraftan, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin fiktif dış yüklerle temsil edilmesi halinde, $[p]$ yükleme matrisinin elemanları sistemin yer değiştirmelerine bağlı olarak ifade edilmektedir [5].

Malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlerde de, bünye denklemlerinin doğrusal olmaması nedeniyle, elemanların etkin rijitliklerinin ve bu rijitlikleri içeren $[K]$ matrisinin sistemin şekil değiştirmelerine, diğer bir deyişle problemin bilinmeyenlerine bağlı olarak ifade edilmesi gerekmektedir [5].

Görüldüğü gibi, özellikle bilinmeyen sayısı fazla olan yapı sistemlerinin doğrusal olmayan teoriye göre hesabında, doğrusal olmayan denklemin yazılması ve bu denklemin kapalı çözümünün elde edilmesi uzun hesapları gerektirmekte ve çok kere olanaksız olmaktadır.

Bu durumda, doğrusal olmayan yapı sistemlerinin etkin bir şekilde hesabı için, her adımda problemin doğrusallaştırılması esasına dayanan sayısal yöntemlerin geliştirilmesi ve uygulanması olmaktadır.

5.5.1. Riks Adımlama Metodu

Doğrusal olmayan yapı sistemlerinin hesabı için uygulanan sayısal yöntemler genel olarak iki bölümde incelenebilirler [5]:

- 1- Ardışık yaklaşım yöntemleri.
- 2- Yük artımı yöntemleri.

Sonlu elemanlar programlarında elemanların doğrusal olmayan davranışını inceleyebilmek için yük-deformasyon eğrilerinin tam olarak elde edilmesi gerekmektedir. Doğrusal olmayan denklemlerin çözüm yöntemlerinden yük-deformasyon eğrisinin ardışık yaklaşım yöntemleri ile tam olarak elde edilmesi mümkün değildir. Ayrıca yük kontrollü metodlar da sınır noktası civarlarında çözüm vermediğinden deplasman kontrollü metodlar geliştirilmiştir (Bkz. Şekil 5.10) [5].

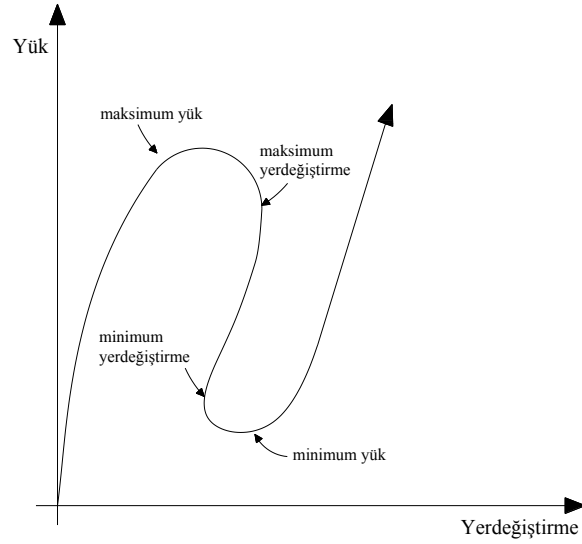
Fakat yük-deformasyon eğrisindeki ani yön değişimleri deplasman kontrollü metodların da hatalı sonuç vermesine neden olmaktadır. Bu nedenle yük kontrollü metodlarla, deplasman kontrollü metodlar birlikte kullanılarak bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir [28]. Yay-boyu (archlength) metodu olarak anılan bu metod yapıların lineer olmayan davranışını elde etmek için kullanılan daha genel bir metod olup, ilk olarak Riks tarafından geliştirilmiş ve daha sonraları birçok araştırmacı bu yöntemi yeniden düzenleyerek kullanmıştır [29, 30, 31].

Yük veya deplasman kontrollü metodlarda, bir çözüm adımında, yük parametresi veya deplasman parametrelerinden biri sabit tutularak yakınsama noktasına ulaşılmaya çalışılmaktadır. Fakat yay-boyu metodunda yük ve deplasman parametreleri her iterasyonda yeniden elde edilerek yakınsama noktasına ulaşılmaktadır (Bkz Şekil 5.11). Dolayısıyla, bu metotta yük seviyesi parametresi λ , denge denklemlerine ilave bir değişken olarak girer [28, 29].

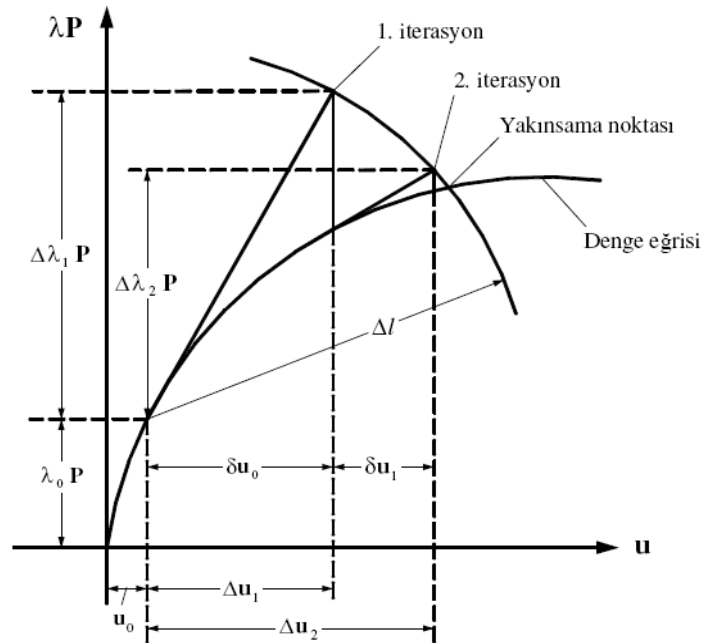
Bu yöntemde doğrusal olmayan yapı sistemlerinin denge denklemleri

$$R(\mathbf{u}, \lambda) = F(\mathbf{u}) - \lambda P = 0 \quad (5.7)$$

şeklinde yazılabilir [32]. Burada R "artık kuvvet", F "iç kuvvet", P "dış yük vektörü" ve u "yer değiştirme vektörü" dür. [28, 29]. Yay-boyu metodunun amacı verilen bu denklem ile l sabit yay boyu arasındaki kesişimi bulmaktır.



Şekil 5.10. Yük-Yerdeğiştirme Eğrisindeki Ani Yön Değişimleri [20]



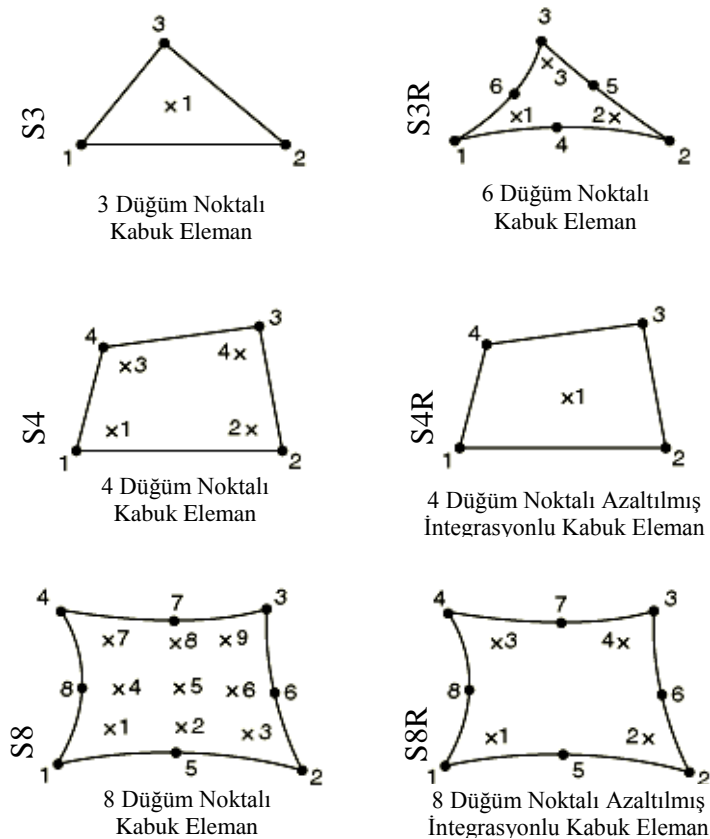
Şekil 5.11. Yay boyu (Riks) Metodunun Grafiks gösterimi [29]

5.6. S4R Sonlu Eleman Modeli

Plakların davranışı kirişlerin davranışına benzer. Gerek kirişler gerekse plaklar enine yükler altında eğilme davranışı yapar. Sonlu eleman modellemesinde plak elemanlar kabuk (shell) elemanlarla ifade edilir. Bu nedenle bu tezde, modellerde sonlu eleman olarak kabuk eleman kullanılmıştır.

ABAQUS sonlu elemanlar programında birçok farklı kabuk eleman vardır (Şekil 5.12). Bu kabuk elemanları üç kategoride değerlendirmek mümkündür [20]:

- Genel amaçlı kabuklar (S3R, S4R vb.)
- Kalın kabuklar (S8R, S8RT vb.)
- İnce kabuklar (STRI35, S4R5, STRI65, S8R5, S9R5, STRI3 vb.)



Şekil 5.12. Sonlu Elemanda Serbestlik Derecesi

İnce kabuklarda kayma deformasyonu ihmal edildiği için, kayma deformasyonunun göz ardı edildiği elemanların analizlerinde bu kabuk elemanlarının kullanılması tavsiye edilir. İnce kabuklu elemanlarda Kirchhoff teorilerine göre analiz yapılır. Kalın kabuklarda kayma deformasyonunu karşılaması nedeniyle bu deformasyonun önemli olduğu modellerde kalın kabuklar kullanılmalıdır. Kalın kabuk elemanlarında Mindlin teorisine göre analiz yapılır [33].

Sonlu elemanlarla analizde sonlu şekil değiştirme kabiliyetine sahip (S3R, S4R) elemanlarının analiz boyunca kalınlıklarının değiştirilmesi mümkün olmasına rağmen, küçük şekil değiştirme kabiliyetine sahip (STRI35, S4R5, STRI65, STRI3, S8R, S8RT, S8R5, S9R5) elemanlarının analiz boyunca kalınlıklarının değiştirilmesine izin verilmez. Bir elemanın eğilme davranışı incelenmek isteniyorsa eğilebilen elemanlardan STRI35, STRI65, S3R ve S4R seçilmesi tavsiye edilir[20].

Bu çalışmada profil enkesitlerinin eğilme davranışı incelendiği için S4R kabuk eleman seçilmiştir. 4 düğüm noktalı be azaltılmış integrasyon yöntemini kullanan bu elemanda 1 noktada integrasyon yapılmaktadır (Bkz Şekil 5.12). ABAQUS eleman kütüphanesindeki S4'de 4 düğüm noktalı bir kabuk elemandır ve aynı şekilde eleman her bir düğüm noktasında üç doğrultuda yer değiştirme ve dönme yeteneğine sahiptir. Fakat S4 eleman da çözüm için her bir düğüm noktası dikkate alınarak rijitlik matrisi oluşturulur. Bu durum çözümü hem zorlaştırmakta hem de çözüm zamanını arttırmaktadır. Ayrıca çözüm için düğüm noktalarının hepsinin dikkate alındığı bu tip kabuk elemanların eğilme altında şekil değiştirmediği daha ziyade kesme deformasyonu oluşturduğu görülmüştür. Bu nedenle eğilme etkisindeki elemanlarda azaltılmış integrasyon yöntemini uygulayan kabuk elemanlar kullanılarak çözüme ulaşılmalıdır. Bu tür elemanlar çözüm ağı yoğun modellerde hesapların daha çabuk ve daha doğru olarak yapılmasını sağlamaktadır. Çünkü sayısal yöntemlerle yapılan integrasyon işleminde biriken hatalar daha da aza indirgenmiş olur.

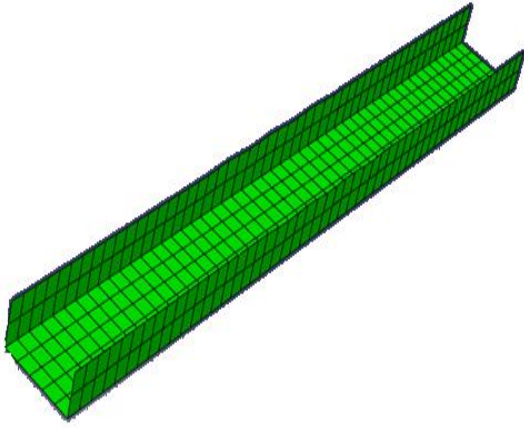
S4R elemanında ne sadece Kirchhoff ne de sadece Mindlin teorisi formülasyonu tek başına kullanılmaktadır. S4R eleman ise; kalın kabuklarda Mindlin teorisine benzer bir formülasyon, ince kabuklarda ise Kirchhoff teorisine benzer bir formülasyon

kullanılarak çözüm yapılan bir sonlu elemandır. S4R elemanın enine kayma gerilmesi formülasyonu plak elemanda kullanılan Banyo-Dvorkin formülasyonuna benzemektedir.

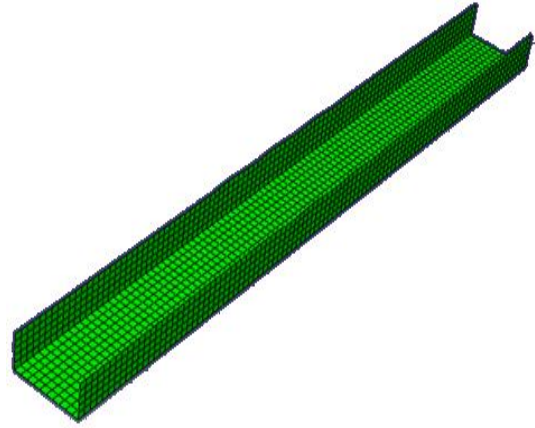
5.7. Çözüm Ağı Yoğunluğu

Sonlu elemanlar metodunda ilk basamak, yapıyı veya çözüm bölgesini alt bölümlere yani sonlu elemanlara ayırmaktır. Kullanılacak eleman sayısı ve yoğunluğu sonuçları değiştirecektir. Çok yoğun bir çözüm ağına sahip modelin çözümünü elde etmek çok zaman alacağından optimum çözüm ağını elde etmek gerekir. "Çok yoğun çözüm ağı daha doğru sonuçlar verir." önermesi her zaman doğru değildir. Bazı modeller çözüm ağı hassasiyetine sahiptir. Önemli olan çözüm ağı oluşturulurken, her bir sonlu elemanın boyutları arasındaki orandır. Bu çalışmada 4 düğüm noktalı kabuk eleman kullanılacağından dolayı kabuk elemanın her iki boyutunun oranı 1'e çok yakın alınmıştır.

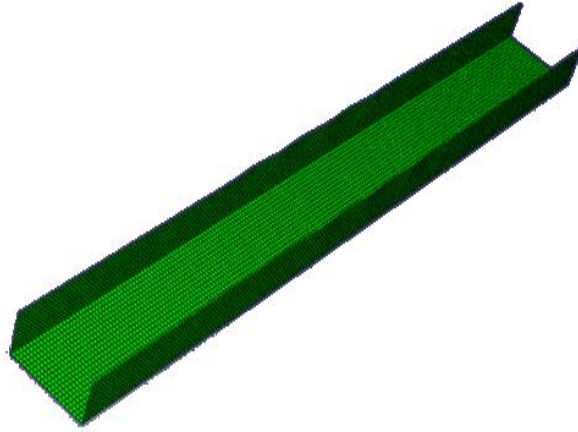
Şekil 5.13-14-15' te M14 deney elemanı için farklı çözüm ağı yoğunluğu ile çözüm yapılmıştır. Az yoğun çözüm ağında 450 adet kabuk elemanı, orta yoğun çözüm ağında 2000 adet kabuk elemanı, çok yoğun çözüm ağında ise 8000 adet kabuk kullanılmıştır. Tüm modellerde sonlu elemanların her birinin kenar uzunluklarındaki oran ≈ 1 dir. Farklı yoğunluktaki çözüm ağı ile yapılan çözümler için elde edilen yük deplasman grafikleri karşılaştırılmış(Bkz. Şekil 5.16).ve bu tezde her bir eleman boyutu yaklaşık 10 mm alınarak orta yoğunluktaki çözüm ağı kabulüyle çalışmalara devam edilmiştir.



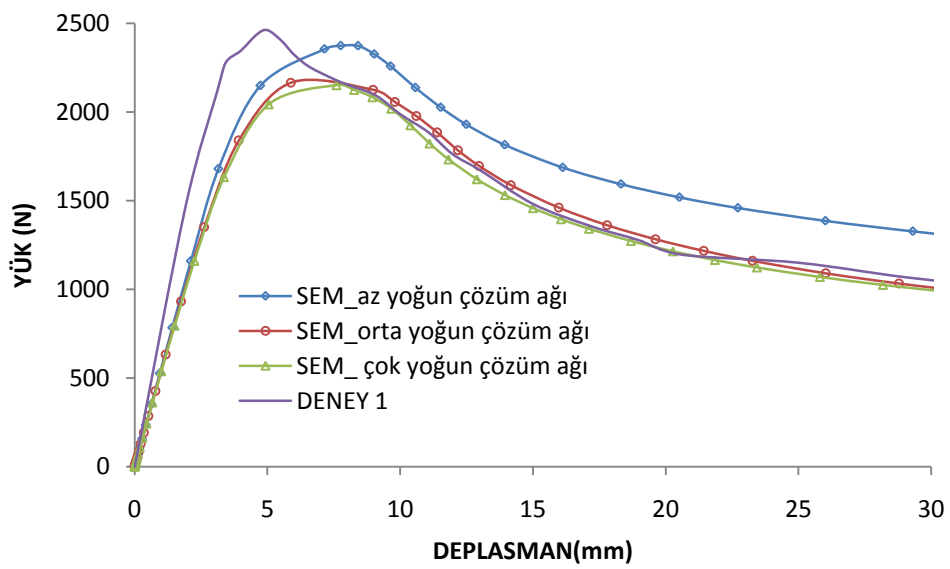
Şekil 5.13. Az Yoğun Çözüm Ağı



Şekil 5.14. Orta Yoğun Çözüm Ağı



Şekil 5.15. Çok Yoğun Çözüm Ağı



Şekil 5. 16. Değişik Çözüm Ağı Yoğunlukları Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Yük-Deplasman Grafiklerinin Deneysel Verileri ile Karşılaştırılması

5.8. Sınır Koşulları Ve Yükleme

Mevcut deney düzeneğindeki yükleme tarzında, yük vericiden gelen yükler yük yayıcı çubuklar aracılığı ile kiriş gövdesine aktarıldığı için en uygun yükleme modelinin gövde boyunca üniform yayılı çizgisel yük olacağı düşünülmüştür. Ayrıca kiriş uçlarına, gövdeye kaynaklı levhalar yerleştirildiği için bu sınır koşulunun en uygun gövdeden mesnetli basit kiriş olarak sonlu eleman modeline tanıtılmasının uygun olacağı görülmüştür.

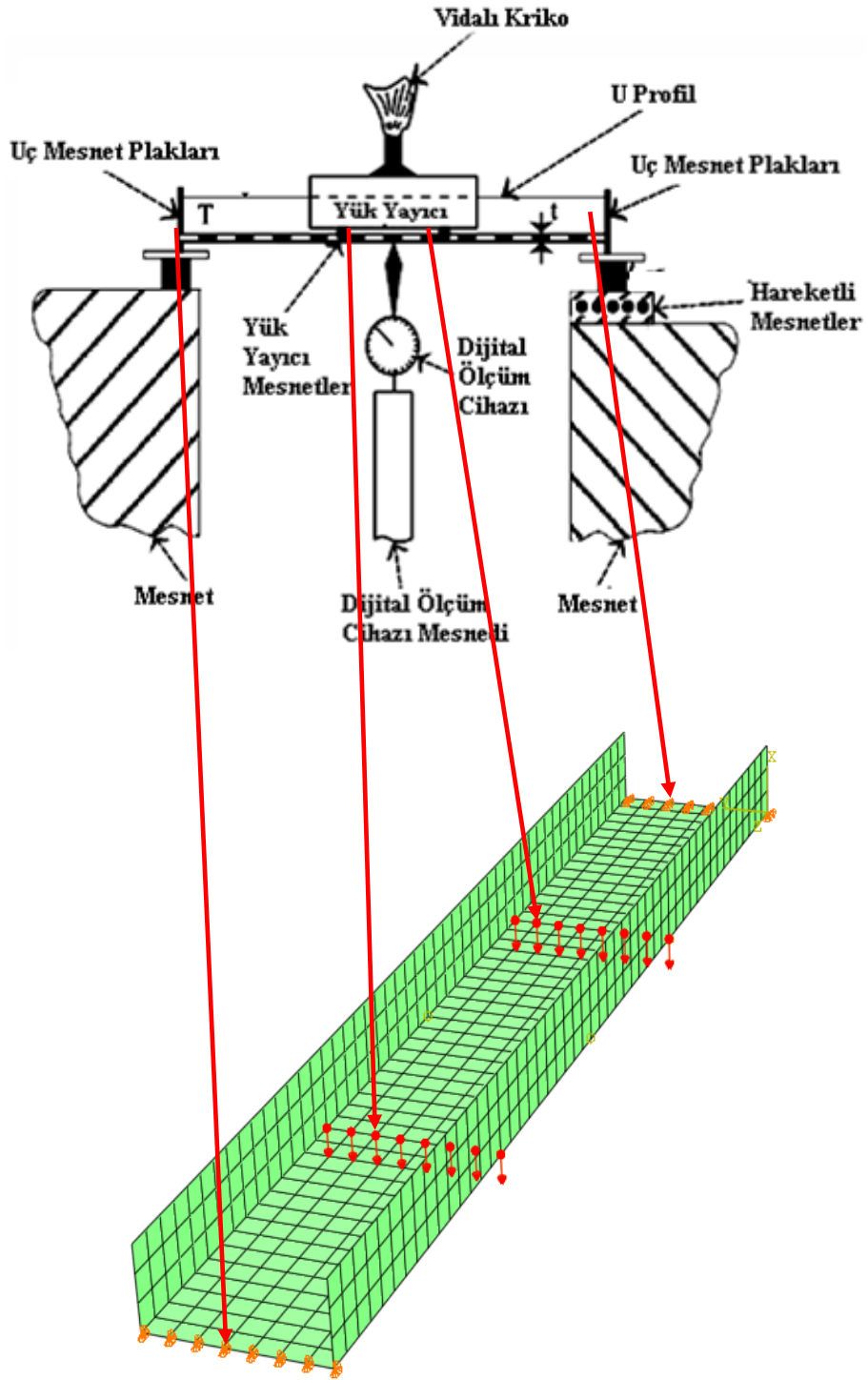
5.9. Gerçekleme

Yukarıda belirtilen modelleme aşamalarından sonra Beale, Godley ve Enjily [19] tarafından yapılan zayıf eksende eğilme deneylerini modellemek için oluşturulan sonlu eleman modeli ne ait yazılım Ek 2'de, model şekli de Şekil 5.17'de verilmiştir. ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilen modellerden elde edilen yük deplasman grafikleri ile gerçek deney sonuçlarının kıyaslanması Şekil 5.18'de gösterilmiştir.

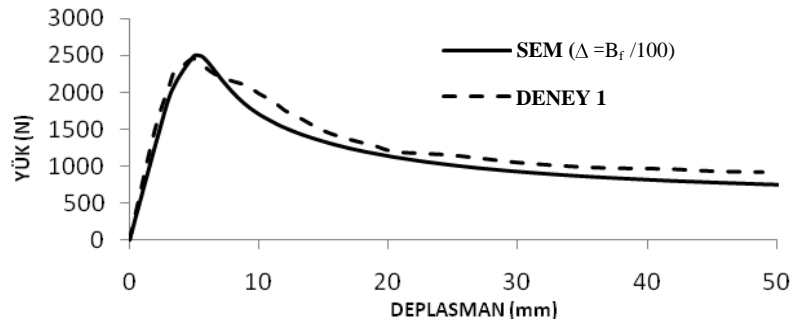
Deney raporunda geometrik kusurlarla ilgili bilgi verilmediğinden geometrik kusur miktarı yönetmeliklerin belirlediği maksimum sınır değer $b_f/100$ alınarak modeller hazırlanmıştır. Ancak Şekil 5.18 (c)' de deney sonucu ile nümerik analiz sonucunda maksimum yükte bir uyumsuzluk olduğu görülmektedir. Bu durum gerçek deney numunesindeki kusurun modellenenden daha az olduğu şeklinde yorumlanabilir. Nitekim daha az bir kusurla yani $b_f/3120$ ile elde edilen sonucun deney sonucuyla aynı olduğu görülmektedir (Bkz Şekil.5.18(d)).

Tablo 5. 1 Modellenen Deneyler

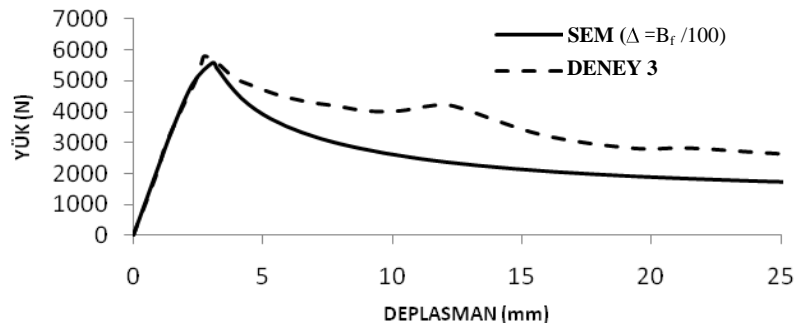
Deney Numune Adı	Geometrik Kusur	$P_{deneysel}$ (kN)	P_{SEM} (kN)	$P_{deneysel} / P_{SEM}$	$\Delta_{deneysel}$ (mm)	Δ_{SEM} (mm)	$\Delta_{deneysel} / \Delta_{SEM}$
Deney 1	$B_f/100$	2.46	2.49	0.99	5.35	5.31	1.01
Deney 2	$B_f/3120$	4.24	4.10	1.03	3.06	3.01	1.02
Deney 3	$B_f/100$	5.82	5.60	1.03	3.75	3.25	1.15



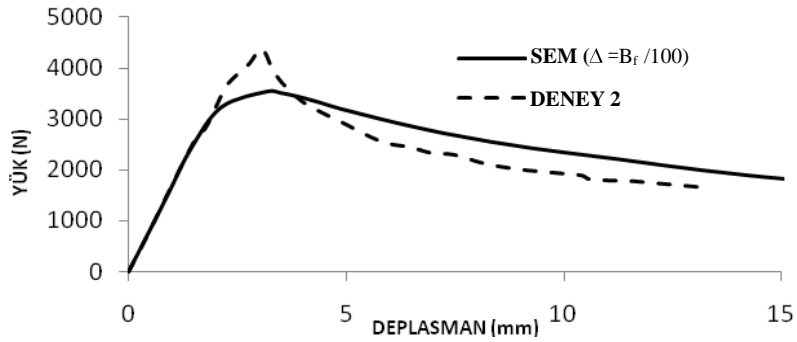
Şekil 5.17. Zayıf Eksende Eğilmeye Maruz U Profil Sonlu Eleman Modeli



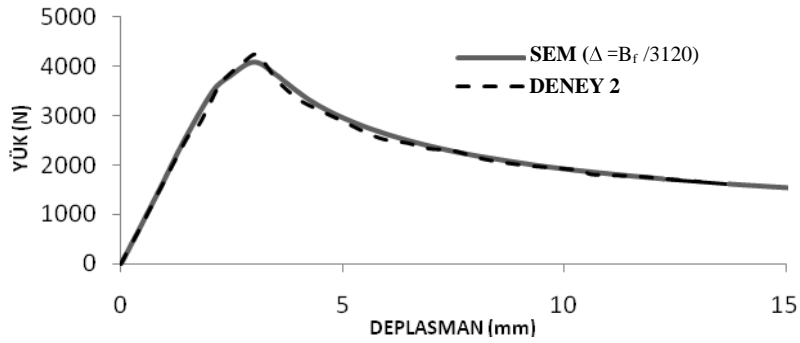
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.18. Sonlu Eleman Modeli ile Deney Yük Deplasman Grafiklerinin Karşılaştırılması

Deney sonuçları ve sonlu eleman sonuçlarının kıyaslandığı Tablo 5.1' e bakıldığında gerek maksimum yük değerlerinin gerekse bunlara karşı gelen deplasmanların değerlerinin çok yakın olduğu görülmektedir.

Sonlu elemanlarla modellenerek çözümleri gerçekleştirilen profil kesitleri için elde edilen çözüm sonuçları mevcut deney sonuçları ile karşılaştırılarak sonlu eleman modelinin doğruluğu ve geçerliliği kanıtlanmıştır.

BÖLÜM 6. PARAMETRİK ÇALIŞMA

Bu bölümde zayıf ekseninde eğilen altındaki U kesitli kirişlerin davranışını etkileyebilecek boyut parametrelerine bağlı olarak modeller oluşturulmuş ve bu modellerin moment-dönme kapasiteleri ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak incelenmiştir.

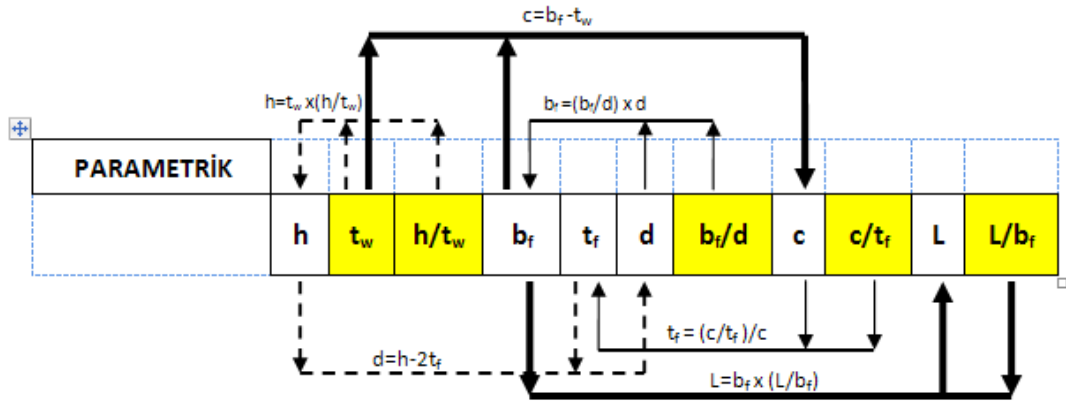
Parametrik modeller oluşturulurken malzeme sınıfı da değiştirilerek malzemenin akma gerilmesinin de sonuçlara etkisi araştırılmak istenmiştir. Bu amaçla iki farklı çelik sınıfı üzerinde geometrik parametreler denenmiştir. Hem kirişin uzunluğunun hem de kesitin geometrik boyutlarının değişiminin analiz sonuçlarını nasıl etkilediğini gözlemlemek amacıyla L/b_f , b_f/d , c/t_f , ve h/t_w oranları değiştirilerek geometrik parametrelerde geniş bir aralıkta moment-dönme kapasiteleri incelenmiştir. Böylece başlık ve gövde narinliklerinin yanısıra kiriş uzunluğunun ve kiriş derinliğinin de sonuçlara etkisi gözlemlenebilmiştir.

6.1. Zayıf Ekseninde Eğilme

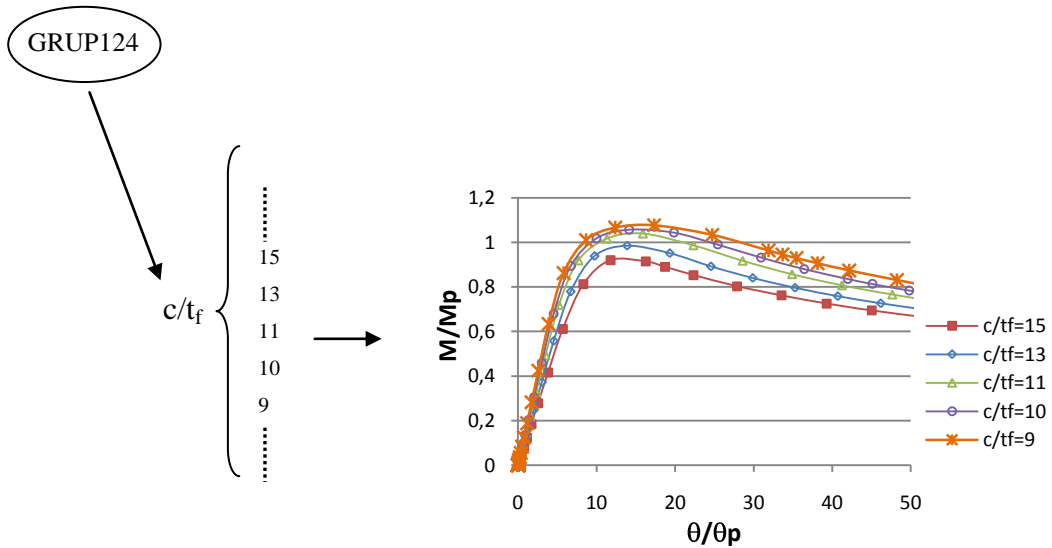
İnşaat sektöründe mevcut ve yaygın olarak kullanılan profil tablolarından yapılan istatistiki çalışmalarla L/b_f , b_f/d , c/t_f , ve h/t_w oran değerleri belirlenmiştir. Belirtilen oranlara bağlı olarak, model geometrilerinin oluşturulma aşamaları Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekilde taralı hücrelerdeki geometrik oran değerleri başlangıçta tanımlanmakta, diğer hücrelerdeki geometrik ebatlar ise bu oranlara bağlı olarak otomatik olarak hesaplanmaktadır.

Gövde narinliği (h/t_w) için 15, 25 ve 35 değerleri incelenmiştir. Tüm modellerde $t_w=5$ mm alınarak ilgili orana bağlı olarak h değeri hesaplanmıştır. Başlık genişliği ile gövde yüksekliği arasındaki oran (b_f/d) 1~0.4 aralığında değiştirilmiştir. Başlıkların narinlik değerleri (c/t_f) ise, kesitte istenilen dönme kapasitesine (R) ulaşıncaya

kadar değiştirilmiştir (Bkz. Şekil 6.2). Eleman uzunluklarındaki değişimin etkileri L/b_f oranı ile incelenmiştir. Bu oran da 4~10 aralığında değiştirilmiştir. Oluşturulan parametrik grupların hangi matris ismi altında toplandığı Tablo 6.1'de açıklanmaktadır. Bu matrisleri teşkil eden grupların adlandırması ise Tablo 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 ve 6.7'de gösterilmiştir. Her bir grup içinde farklı c/t_f oranlarında modeller oluşturulmuştur.



Şekil 6.1. Parametrik Model Geometrisi Hesaplama Şeması



Şekil 6.2. Grup İçinde c/t_f Değişiminin Etkileri

Tablo 6.1. Parametrik Çalışma Matrisleri

	f_y (N/mm ²)	h/t_w
Matris 1	235	15
Matris 2		25
Matris 3		35
Matris 4	355	15
Matris 5		25
Matris 6		35

Tablo 6.2. Matris 1 ($F_y=235$ N/mm², $t_w=5$ mm, $h/t_w=15$ için parametrik gruplar)

$t_w=5$ mm $h/t_w=15$		L/b_f						
		4	5	6	7	8	9	10
b_f/d	1	Grup111	Grup116	Grup121	Grup126	Grup131	Grup136	Grup141
	0.9	Grup112	Grup117	Grup122	Grup127	Grup132	Grup137	Grup142
	0.8	Grup113	Grup118	Grup123	Grup128	Grup133	Grup138	Grup143
	0.6	Grup114	Grup119	Grup124	Grup129	Grup134	Grup139	Grup144
	0.4	Grup115	Grup120	Grup125	Grup130	Grup135	Grup140	Grup145

Tablo 6.3. Matris 2 ($F_y=235$ N/mm², $t_w=5$ mm, $h/t_w=25$ için parametrik gruplar)

$t_w=5$ mm $h/t_w=25$		L/b_f						
		4	5	6	7	8	9	10
b_f/d	1	Grup211	Grup216	Grup221	Grup226	Grup231	Grup236	Grup241
	0.9	Grup212	Grup217	Grup222	Grup227	Grup232	Grup237	Grup242
	0.8	Grup213	Grup218	Grup223	Grup228	Grup233	Grup238	Grup243
	0.6	Grup214	Grup219	Grup224	Grup229	Grup234	Grup239	Grup244
	0.4	Grup215	Grup220	Grup225	Grup230	Grup235	Grup240	Grup245

Tablo 6.4. Matris 3 ($F_y=235$ N/mm², $t_w=5$ mm, $h/t_w=35$ için parametrik gruplar)

$t_w=5$ mm $h/t_w=35$		L/b_f						
		4	5	6	7	8	9	10
b_f/d	1	Grup311	Grup316	Grup321	Grup326	Grup331	Grup336	Grup341
	0.9	Grup312	Grup317	Grup322	Grup327	Grup332	Grup337	Grup342
	0.8	Grup313	Grup318	Grup323	Grup328	Grup333	Grup338	Grup343
	0.6	Grup314	Grup319	Grup324	Grup329	Grup334	Grup339	Grup344
	0.4	Grup315	Grup320	Grup325	Grup330	Grup335	Grup340	Grup345

Tablo 6.5. Matris 4 ($F_y=355 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=15$ için parametrik gruplar)

$t_w=5 \text{ mm}$ $h/t_w=15$		L/b_f						
		4	5	6	7	8	9	10
b_f/d	1	Grup111	Grup116	Grup121	Grup126	Grup131	Grup136	Grup141
	0.9	Grup112	Grup117	Grup122	Grup127	Grup132	Grup137	Grup142
	0.8	Grup113	Grup118	Grup123	Grup128	Grup133	Grup138	Grup143
	0.6	Grup114	Grup119	Grup124	Grup129	Grup134	Grup139	Grup144
	0.4	Grup115	Grup120	Grup125	Grup130	Grup135	Grup140	Grup145

Tablo 6.6. Matris 5 ($F_y=355 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=25$ için parametrik gruplar)

$t_w=5 \text{ mm}$ $h/t_w=25$		L/b_f						
		4	5	6	7	8	9	10
b_f/d	1	Grup211	Grup216	Grup221	Grup226	Grup231	Grup236	Grup241
	0.9	Grup212	Grup217	Grup222	Grup227	Grup232	Grup237	Grup242
	0.8	Grup213	Grup218	Grup223	Grup228	Grup233	Grup238	Grup243
	0.6	Grup214	Grup219	Grup224	Grup229	Grup234	Grup239	Grup244
	0.4	Grup215	Grup220	Grup225	Grup230	Grup235	Grup240	Grup245

Tablo 6.7. Matris 6 ($F_y=355 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=35$ için parametrik gruplar)

$t_w=5 \text{ mm}$ $h/t_w=35$		L/b_f						
		4	5	6	7	8	9	10
b_f/d	1	Grup311	Grup316	Grup321	Grup326	Grup331	Grup336	Grup341
	0.9	Grup312	Grup317	Grup322	Grup327	Grup332	Grup337	Grup342
	0.8	Grup313	Grup318	Grup323	Grup328	Grup333	Grup338	Grup343
	0.6	Grup314	Grup319	Grup324	Grup329	Grup334	Grup339	Grup344
	0.4	Grup315	Grup320	Grup325	Grup330	Grup335	Grup340	Grup345

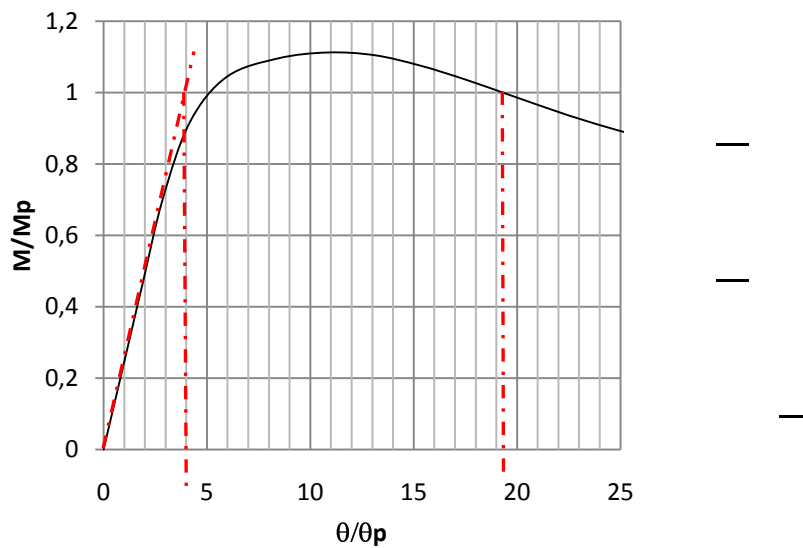
6.2. Parametrik Modelleme Sonuçları

Her bir grup için c/t_f oranına bağlı moment dönme kapasitesi (R) bölüm 2.2.2.1'de anlatıldığı gibi

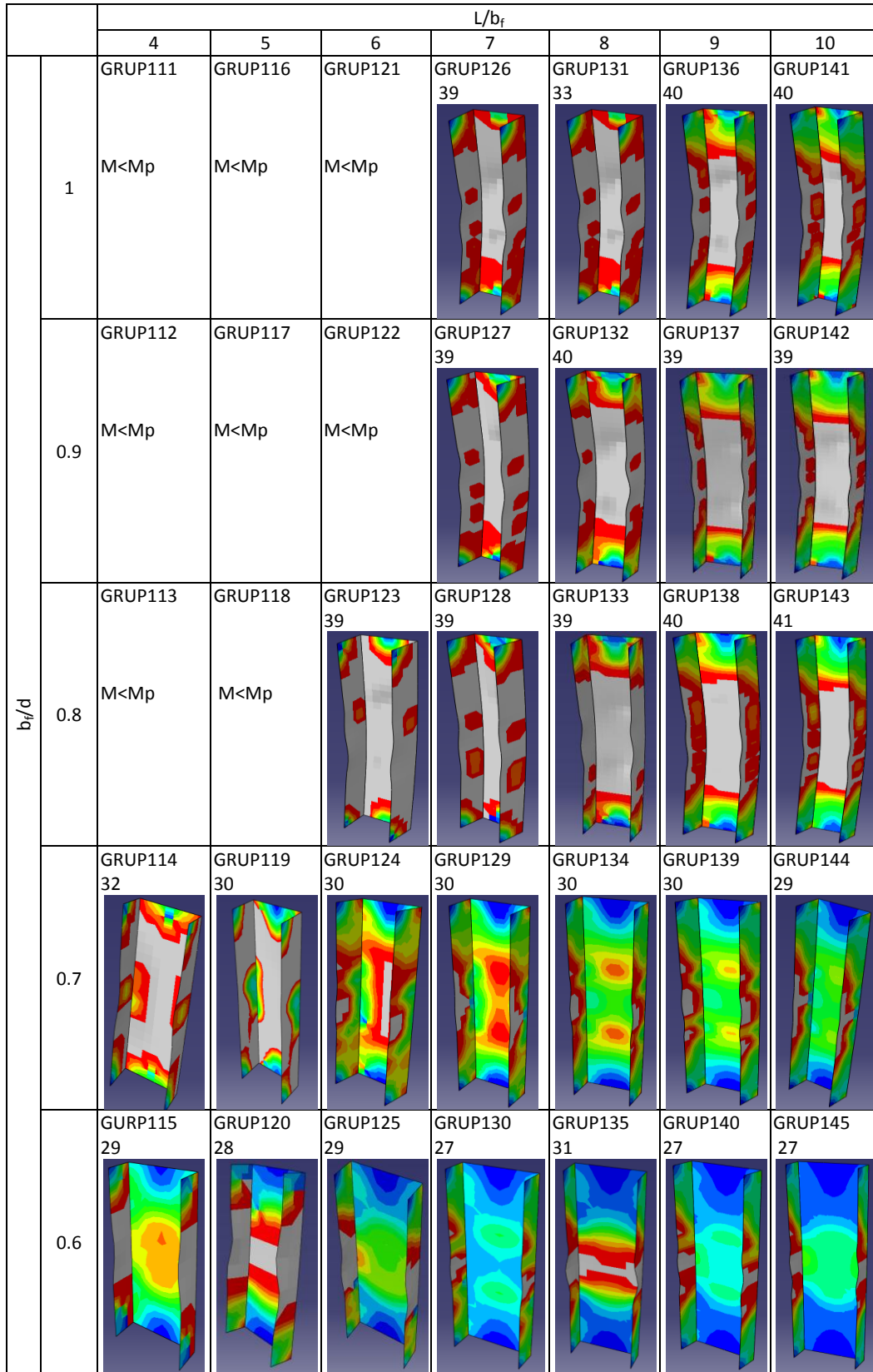
$$— \quad (6.1)$$

formülü ile hesaplanarak $R=3$ 'e en yakın değeri veren c/t_f narinlik oranları tespit edilmiştir. Bölüm 2'de anlatıldığı gibi R'nin hesaplanabilmesi için kesitin plastik moment kapasitesine ulaşmış olması gerekmektedir. Tipik bir kesit için R'nin hesaplanması Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Matris 1, Matris 2 ve Matris 3'e ait nümerik modellerin Von-Mises gerilme dağılımlarına bakıldığında bazı gruplarda plastik moment kapasitesine ulaşılmadığı görülmektedir. Dolayısıyla bu gruplarda M_p 'ye ulaşılmadan yerel burkulmalar gözlemleneceğinden plastik tasarıma izin verilmeyecektir (Bkz. Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6).

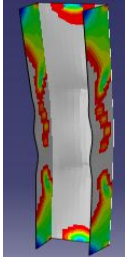
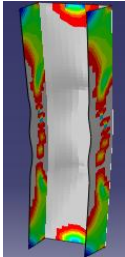
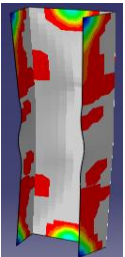
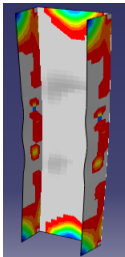

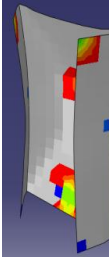
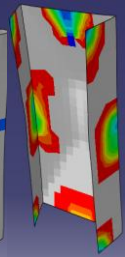
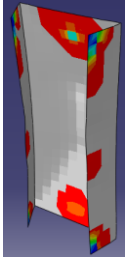
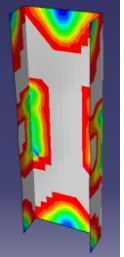
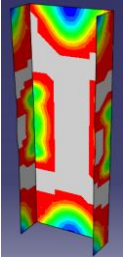
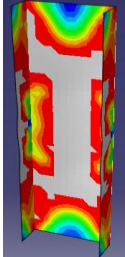
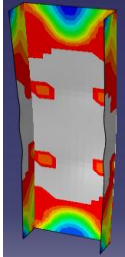
Gövde narinliğinin (h/t_w) 35 olması durumunda Matris 3'de çok az bir gurubun M_p 'ye ulaşabildiği gözlemlenirken (Şekil 6.6), gövde narinliğinin en az olduğu Matris 1'de elemanların büyük bir kısmının M_p 'ye ulaştığı Şekil 6.4'ten anlaşılmaktadır. Bu konu ile ilgili detaylı tartışma Bölüm 6.3'te verilmiştir.



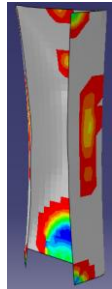
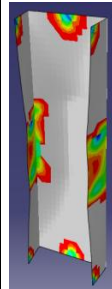
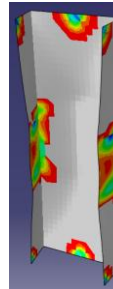
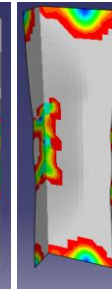
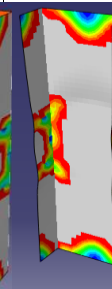
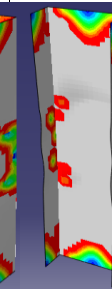
Şekil 6. 3 Örnek R hesabı



Şekil 6.4. Matris 1: $F_y=235 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=15$ Parametrik Guruplarına ait $M=M_p$ Olduğu Andaki Gerilme Dağılımları

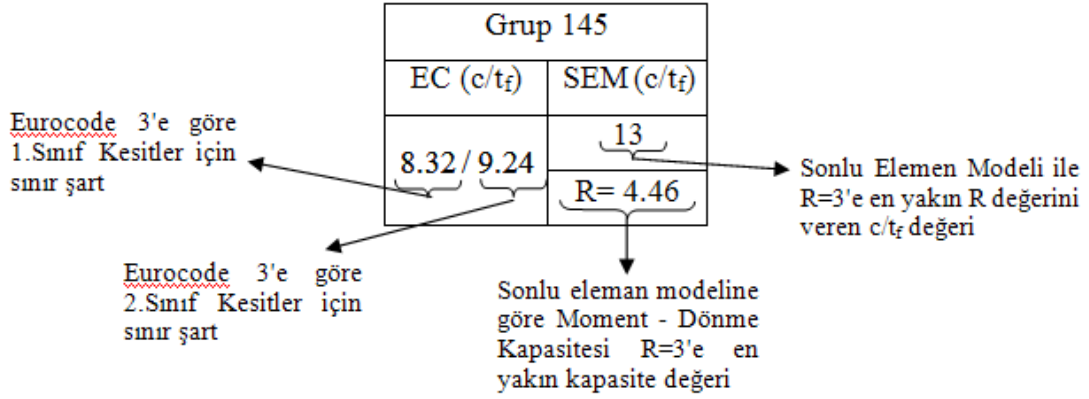
		L/b _f						
		4	5	6	7	8	9	10
b _f /d	1	GRUP211 M<M _p	GRUP216 M<M _p	GRUP221 M<M _p	GRUP226 M<M _p	GRUP231 M<M _p	GRUP236 M<M _p	GRUP241 M<M _p
	0.9	GRUP212 M<M _p	GRUP217 M<M _p	GRUP222 M<M _p	GRUP227 M<M _p	GRUP232 M<M _p	GRUP237 M<M _p	GRUP242 44 
	0.8	GRUP213 M<M _p	GRUP218 M<M _p	GRUP223 M<M _p	GRUP228 M<M _p	GRUP233 M<M _p	GRUP238 M<M _p	GRUP243 40 
	0.7	GRUP214 M<M _p	GRUP219 M<M _p	GRUP224 M<M _p	GRUP229 M<M _p	GRUP234 42 	GRUP239 36 	GRUP244 37 
	0.6	GURP215 50 	GRUP220 44 	GRUP225 42 	GRUP230 38 	GRUP235 35 	GRUP240 36 	GRUP245 37 

Şekil 6.5. Matris 2: $F_y=235 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=25$ Parametrik Guruplarına ait $M=M_p$ Olduğu Andaki Gerilme Dağılımları

		L/b _f						
		4	5	6	7	8	9	10
b _r /d	1	GRUP311 M<M _p	GRUP316 M<M _p	GRUP321 M<M _p	GRUP326 M<M _p	GRUP331 M<M _p	GRUP336 M<M _p	GRUP341 M<M _p
	0.9	GRUP312 M<M _p	GRUP317 M<M _p	GRUP322 M<M _p	GRUP327 M<M _p	GRUP332 M<M _p	GRUP337 M<M _p	GRUP342 M<M _p
	0.8	GRUP313 M<M _p	GRUP318 M<M _p	GRUP323 M<M _p	GRUP328 M<M _p	GRUP333 M<M _p	GRUP338 M<M _p	GRUP343 M<M _p
	0.6	GRUP314 M<M _p	GRUP319 M<M _p	GRUP324 M<M _p	GRUP329 M<M _p	GRUP334 M<M _p	GRUP339 M<M _p	GRUP344 M<M _p
	0.4	GRUP315 M<M _p	GRUP320 50 	GRUP325 50 	GRUP330 36 	GRUP335 34 	GRUP340 32 	GRUP345 33 

Şekil 6.6. Matris 3: $F_y=235 \text{ N/mm}^2$, $t_w=5 \text{ mm}$, $h/t_w=35$ Parametrik Guruplarına ait $M=M_p$ Olduğu Andaki Gerilme Dağılımları

Moment dönme kapasitesi değerinin en az 3 olacak şekilde elde edilmesini sağlayan c/t_f değerleri Tablo 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 ve 6.13'de verilmiştir. Tablolarda taralı hücrelerde ilgili grubun M_p değerine ulaşmadığı anlaşılmaktadır. Yine tablolarda her bir grup için EN 1993'de verilen c/t_f sınır değerleri gösterilmiştir. Her bir hücrede verilen bilgiler Şekil 6.7'de detaylı olarak ifade edilmiştir.



Şekil 6.7. Parametrik Çalışma Sonuç Tablolarındaki Hücelere Ait Açıklama

Parametrik çalışma sonucu elde edilen sonuçlara göre geometrik parametrelerle kesit sınıflandırma parametresi c/t_f arasındaki ilişki incelenmiştir.

Tablo 6. 8. Matris 1; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri

$F_y=235 \text{ N/mm}^2$															
$t_w=5\text{mm}$ $h/t_w=15$	L / b_f														
	4		5		6		7		8		9		10		
b_f/d	1	Grup111		Grup116		Grup121		Grup126		Grup131		Grup136		Grup141	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA	NA	NA	NA	NA	NA	13.09/14.55	5	13.09/14.55	5	13.39/14.88	4	13.39/14.88	4
	R=10.727		R=9.1		R=27		R=34.26								
	0.9	Grup112		Grup117		Grup122		Grup127		Grup132		Grup137		Grup142	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA	NA	NA	NA	12.47/13.85	5	12.47/13.85	5	12.47/13.85	5	12.82/14.25	4	12.82/14.25	4
	R=10		R=10		R=9.46		R=30		R=28.95						
	0.8	Grup113		Grup118		Grup123		Grup128		Grup133		Grup138		Grup143	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA	NA	NA	NA	11.69/12.99	5	11.69/12.99	5	11.69/12.99	5	12.11/13.46	4	12.11/13.46	4
	R=10.333		R=10.6		R=8.64		R=51.75		R=45						
	0.6	Grup114		Grup119		Grup124		Grup129		Grup134		Grup139		Grup144	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		8.78/9.75	11	8.8/9.78	10	8.84/9.82	9	8.84/9.82	9	8.84/9.82	9	8.84/9.82	9	8.84/9.82	9
	R=3.714		R=3.83		R=3.7		R=3		R=3		R=3		R=3.8		
	0.4	Grup115		Grup120		Grup125		Grup130		Grup135		Grup140		Grup145	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		8.28/9.20	19	8.27/9.19	17	8.29/9.22	16	8.3/9.22	15	8.3/9.22	15	8.32/9.24	13	8.32/9.24	13
	R=4.43		R=7.33		R=4.789		R=3.28		R=3.143		R=4.17		R=4.46		

Tablo 6. 9. Matris 2; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri

F _y =235 N/mm ²															
t _w =5 mm h/t _w =25	L / b _f														
	4		5		6		7		8		9		10		
b _f /d	1	Grup211		Grup216		Grup221		Grup226		Grup231		Grup236		Grup241	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.9	Grup212		Grup217		Grup222		Grup227		Grup232		Grup237		Grup242	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		14.66/16.29	4
	0.8	Grup213		Grup218		Grup223		Grup228		Grup233		Grup238		Grup243	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		13.83/15.36	5
	0.6	Grup214		Grup219		Grup224		Grup229		Grup234		Grup239		Grup244	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		11.61/12.89	6	12.08/13.42	5	12.08/13.42	5
	0.4	Grup215		Grup220		Grup225		Grup230		Grup235		Grup240		Grup245	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		8.75/9.72	11	8.75/9.72	11	9.77/9.74	10	8.79/9.77	9	8.86/9.84	7	8.86/9.84	7	8.86/9.84	7
		R=9.25		R=7		R=3		R=3		R=3.4		R=3.3		R=3.4	

Tablo 6. 10. Matris 3; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri

		$F_y=235 \text{ N/mm}^2$													
$t_w=5 \text{ mm}$ $h/t_w=35$		L / b_f													
		4		5		6		7		8		9		10	
b _y d	1	Grup311		Grup316		Grup321		Grup326		Grup331		Grup336		Grup341	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.9	Grup312		Grup317		Grup322		Grup327		Grup333		Grup337		Grup343	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.8	Grup313		Grup318		Grup323		Grup328		Grup333		Grup338		Grup343	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.6	Grup314		Grup319		Grup324		Grup329		Grup334		Grup339		Grup344	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.4	Grup315		Grup320		Grup325		Grup330		Grup335		Grup340		Grup345	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		8.94/9.93	10	9/10	8	8.96/9.96	9	9.47/10.533	7	9.47/10.53	7	10.01/11.12	6
	NA		R=6.76		R=9.83		R=15.33		R=20,33		R=3.86		R=3.73		

Tablo 6. 11. Matris 4; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri

$F_y=355 \text{ N/mm}^2$															
$t_w=5 \text{ mm}$ $h/t_w=15$		L / b_f													
		4		5		6		7		8		9		10	
b_f/d	1	Grup111		Grup116		Grup121		Grup126		Grup131		Grup136		Grup141	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA	NA	NA	NA	NA	NA	10.89/12.10	4	10.89/12.10	4	10.89/12.10	4	10.89/12.10	4
							R=12.52		R=16.5		R=14.5		R=16.5		
	0.9	Grup112		Grup117		Grup122		Grup127		Grup132		Grup137		Grup142	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA	NA	NA	NA	10.43/11.59	4	10.43/11.59	4	10.43/11.59	4	10.43/11.59	4	10.43/11.59	4
					R=8.3		R=14.8		R=30.92		R=16.1		R=16.33		
	0.8	Grup113		Grup118		Grup123		Grup128		Grup133		Grup138		Grup143	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA	NA	NA	NA	9.86/10.95	4	9.86/10.95	4	9.86/10.95	4	9.86/10.95	4	9.86/10.95	4
					R=21		R=39.8		R=14		R=25		R=22		
	0.6	Grup114		Grup119		Grup124		Grup129		Grup134		Grup139		Grup144	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		7.19/7.99	9	7.22/8.02	8	7.22/8.02	8	7.26/8.07	7	7.26/8.07	7	7.26/8.07	7	7.32/8.13	6
	R=6.08		R=3.24		R=3		R=3.22		R=3.11		R=3		R=3.80		
	0.4	Grup115		Grup120		Grup125		Grup130		Grup135		Grup140		Grup145	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		6.75/9.22	15	6.75/9.22	15	6.79/7.54	11	6.79/7.54	11	6.79/7.54	11	6.79/7.54	11	6.79/7.54	11
	R=3		R=3		R=5.22		R=3.58		R=3.73		R=3		R=3.11		

Tablo 6. 12. Matris 5; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri

		$F_y=355 \text{ N/mm}^2$													
$t_w=5\text{mm}$ $h/t_w=25$		L / b_f													
		4		5		6		7		8		9		10	
b/d	1	Grup211		Grup216		Grup221		Grup226		Grup231		Grup236		Grup241	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.9	Grup212		Grup217		Grup222		Grup227		Grup232		Grup237		Grup242	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.8	Grup213		Grup218		Grup223		Grup228		Grup233		Grup238		Grup243	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
														11.52/12.80	4
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		R=5.52	
	0.6	Grup214		Grup219		Grup224		Grup229		Grup234		Grup239		Grup244	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
												10.23/11.37	4	10.23/11.37	4
		NA		NA		NA		NA		NA		R=4.76		R=6.6	
	0.4	Grup215		Grup220		Grup225		Grup230		Grup235		Grup240		Grup245	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		7.12/7.91	11	7.12/7.91	11	8.07/8.96	9	7.25/8.06	7	7.31/8.12	7	7.31/8.12	6	7.31/8.12	6
		R=5.375		R=3		R=3		R=3		R=3		R=4.40		R=3.05	

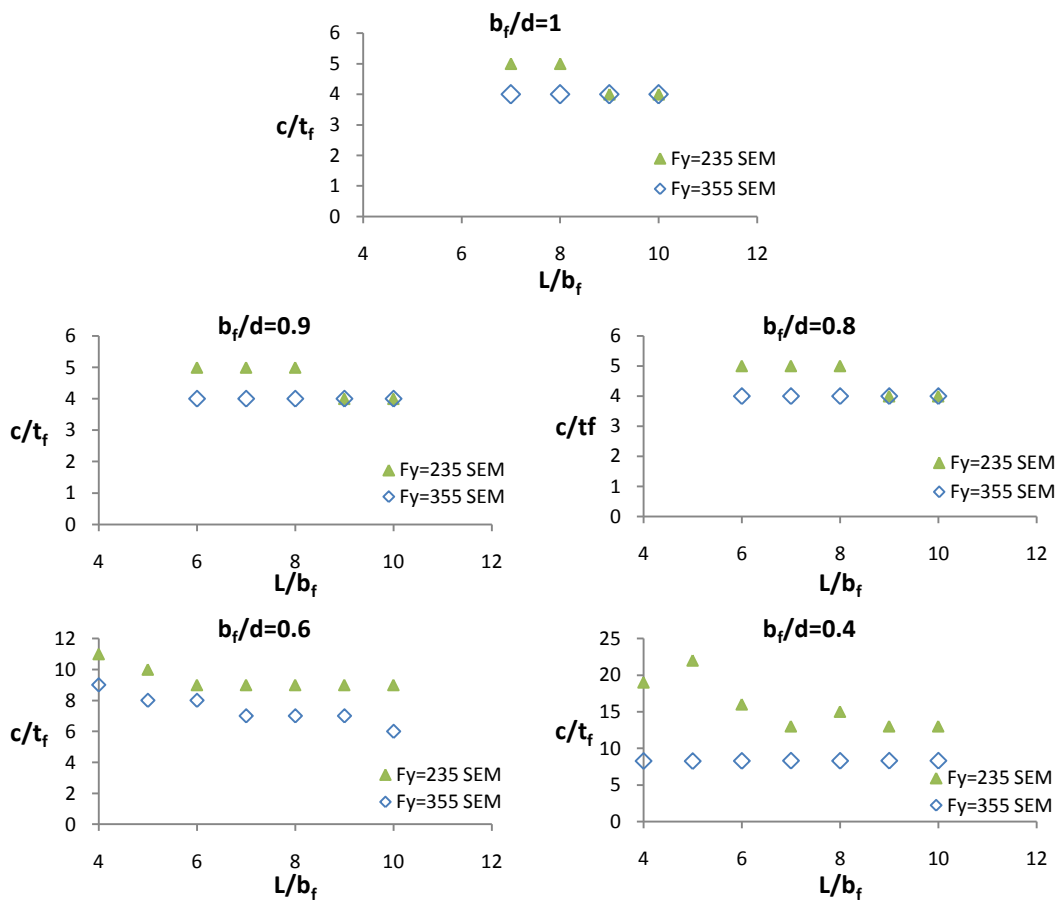
Tablo 6. 13. Matris6; Plastik Mafsal Oluşturan Gruplar ve Dönme Kapasiteleri

		$F_y=355 \text{ N/mm}^2$													
$t_w=5 \text{ mm}$ $h/t_w=35$		L / b_f													
		4		5		6		7		8		9		10	
b_f/d	1	Grup311		Grup316		Grup321		Grup326		Grup331		Grup336		Grup341	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.9	Grup312		Grup317		Grup322		Grup327		Grup333		Grup337		Grup343	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.8	Grup313		Grup318		Grup323		Grup328		Grup333		Grup338		Grup343	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.6	Grup314		Grup319		Grup324		Grup329		Grup334		Grup339		Grup344	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	0.4	Grup315		Grup320		Grup325		Grup330		Grup335		Grup340		Grup345	
		EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)	EC (c/t _f)	SEM (c/t _f)
		NA		7.25/8.06	11	7.29/8.10	9	7.27/8.08	9	7.71/8.56	7	8.15/9.05	5	8.63/9.59	5
			R=4.47		R=7.44		R=9		R=8		R=8.15		R=8.6		

6.3. Sonuçların Tartışılması

Bu bölümde parametrik çalışma sonucu elde edilen sonuçlara göre geometrik parametrelerle kesit sınıflandırma parametresi c/t_f arasındaki ilişki tartışılmıştır.

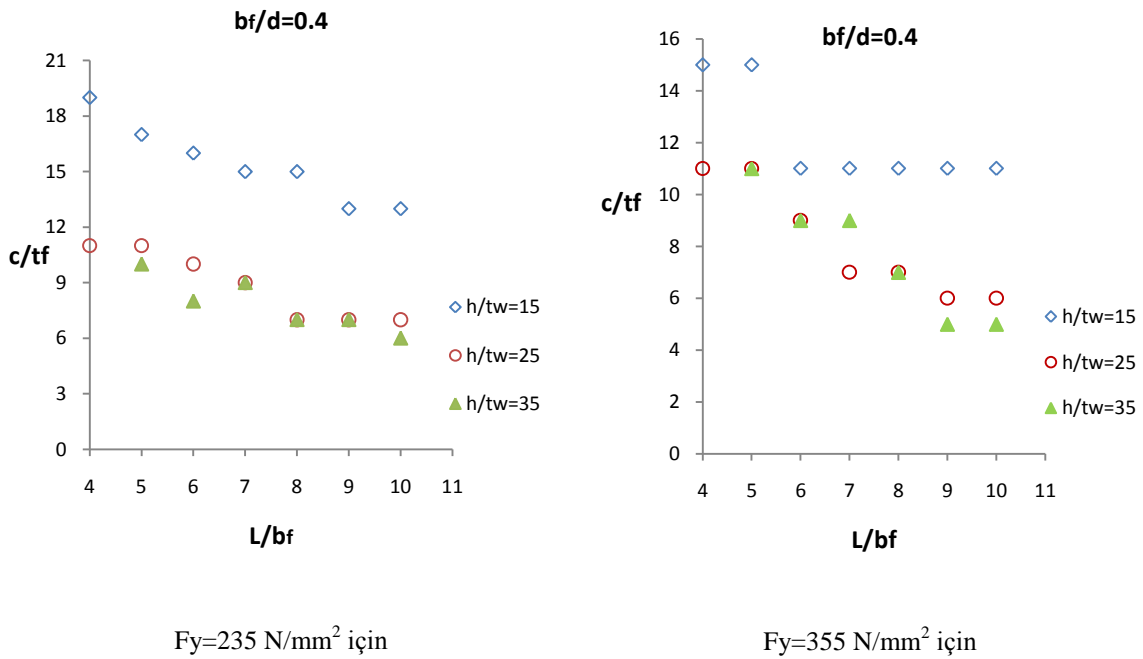
Çelik Akma Değerinin Etkisi: Çelik akma değeri 235 MPa ve 355 MPa alınarak c/t_f oranındaki değişim gözlemlenmek istenmiştir. Diğer bütün parametreler aynı olduğunda, akma dayanımı artınca c/t_f oranında düşüş eğilimi olduğu görülmüştür (Şekil 6.8). Ancak bu düşüş belirgin değildir. Akma değerinin artmasıyla c/t_f değerinin azalması EN 1993'de belirtilen eğilime de uymaktadır. EN 1993'de c/t_f oranı ε 'a bağlı bir fonksiyon olup ε değeri de F_y ile ters orantılıdır [Ek 1]. Dolayısı ile F_y nin artması ile c/t_f oranı azalacaktır. Elde edilen sonuçlar bu ilişkiye uymaktadır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Değişen Çelik Sınıfları için $t_w=5$, $h/t_w=15$ için Değişen b_f/d Oranına Bağlı L/b_f - c/t_f Değişim Grafikleri

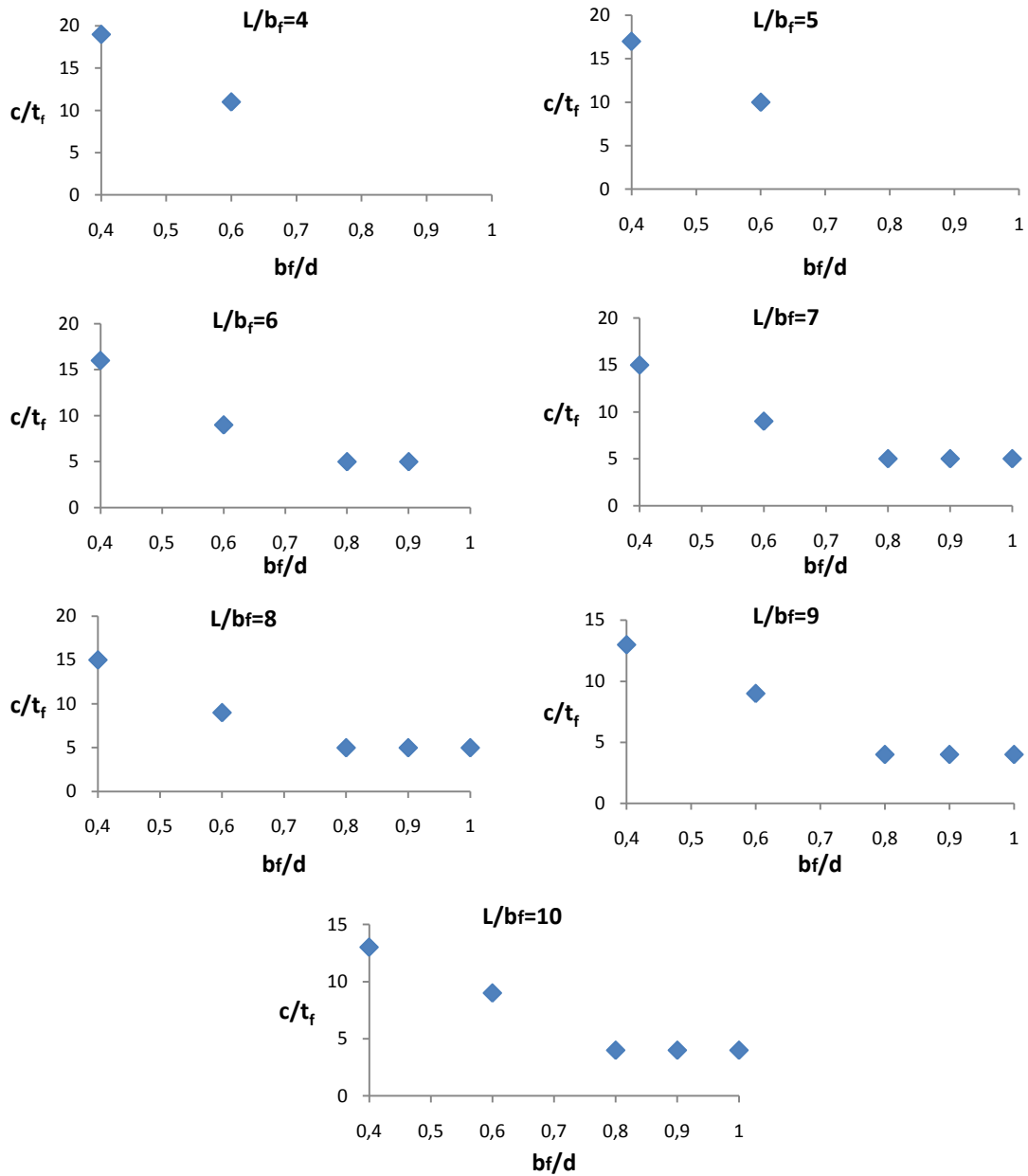
Gövde Narinliğinin Etkisi: Sonuçlara en çok etki eden parametre olan h/t_w değeri sırasıyla 15, 25 ve 35 olarak alınmıştır. h/t_w değeri arttıkça yani daha narin bir gövde ile kesitlerin oluşturulması durumunda M_p değerine ulaşamayan elemanların sayısı artmıştır. Örneğin; $F_y=235$ MPa olan gruplarda, $h/t_w=15$ olan deney matrisinde moment değeri M_p 'ye ulaşamayan grup sayısı 7 iken, $h/t_w=25$ 'de M_p 'ye ulaşamayan grup sayısı 23'e, $h/t_w=35$ 'de ise bu değer 29'a yükselmiştir.

Dolayısıyla zayıf eksende eğilecek olan U kesitli elemanlarda flanşların narinliğinde en önemli parametrelerin flanşlara mesnet görevi yapan gövdenin narinliği olduğu anlaşılmaktadır. M_p değerine ulaşan gruplara bakıldığında ise diğer bütün parametreler sabit alındığında, h/t_w değeri arttıkça, c/t_f değeri düşmektedir. Bir başka deyişle mesnet görevi yapan plağın narinliği arttıkça istenen moment dönme kapasitesini sağlamak için elemanın narinliği azalmaktadır. Örneğin; $b_f/d = 0.4$ olan gruplarda h/t_w değişimi ile elde edilen c/t_f oranları Şekil 6.9'de verilmiştir.

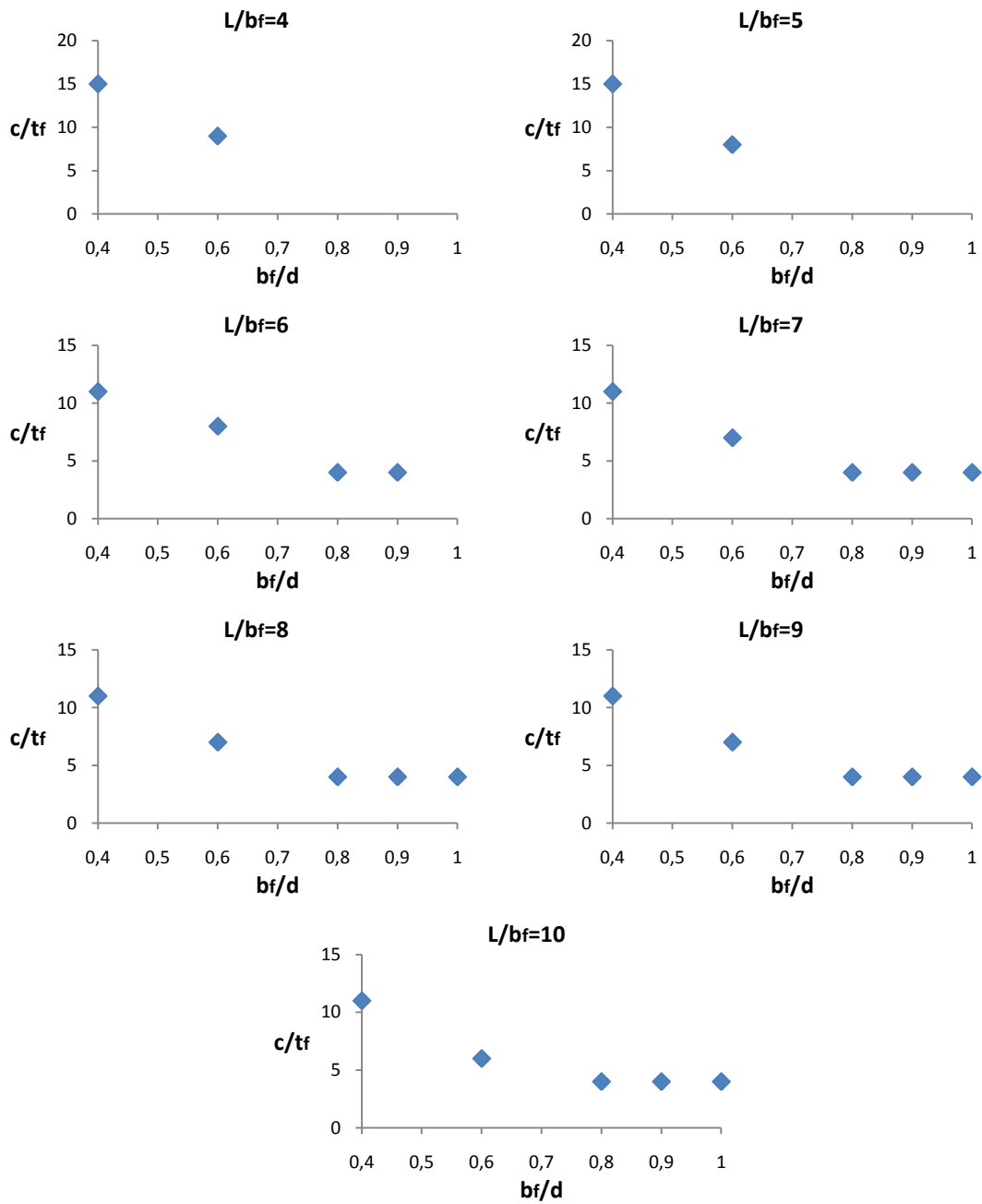


Şekil 6. 9. Gövde Narinliğinin Flanş Narinliğine Etkileri

Kesit boyutlarının etkisi (b_f/d): Bu oranın kesitlerin plastik kapasiteye ulaşım ulaşmamasına etkisi olduğu gibi c/t_f oranının değişmesine de gövde narinliği kadar etkisi olduğu görülmüştür. b_f/d oranının artması bir anlamda daha uzun başlıklar, yani daha narin başlıklar anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, arzu edilen moment-dönme kapasitesine daha düşük b_f/d oranı ile ulaşılacağı aşikardır. Bu durum sonuçlara bakıldığında da gözlenebilmektedir (Şekil 6.10 ve Şekil 6.11).



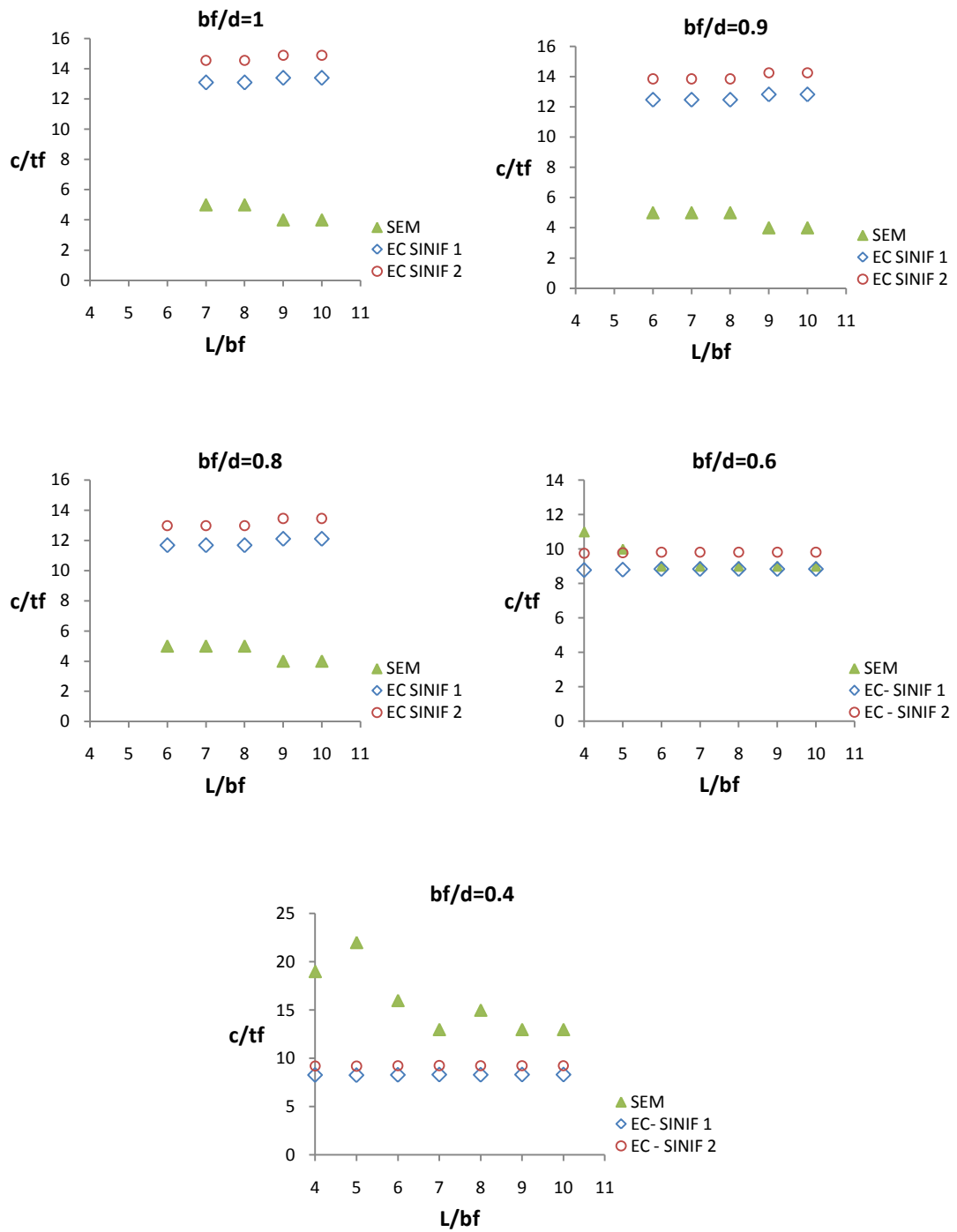
Şekil 6. 10. Matris 1 için Değişen L/b_f Altında b_f/d - c/t_f Grafikleri



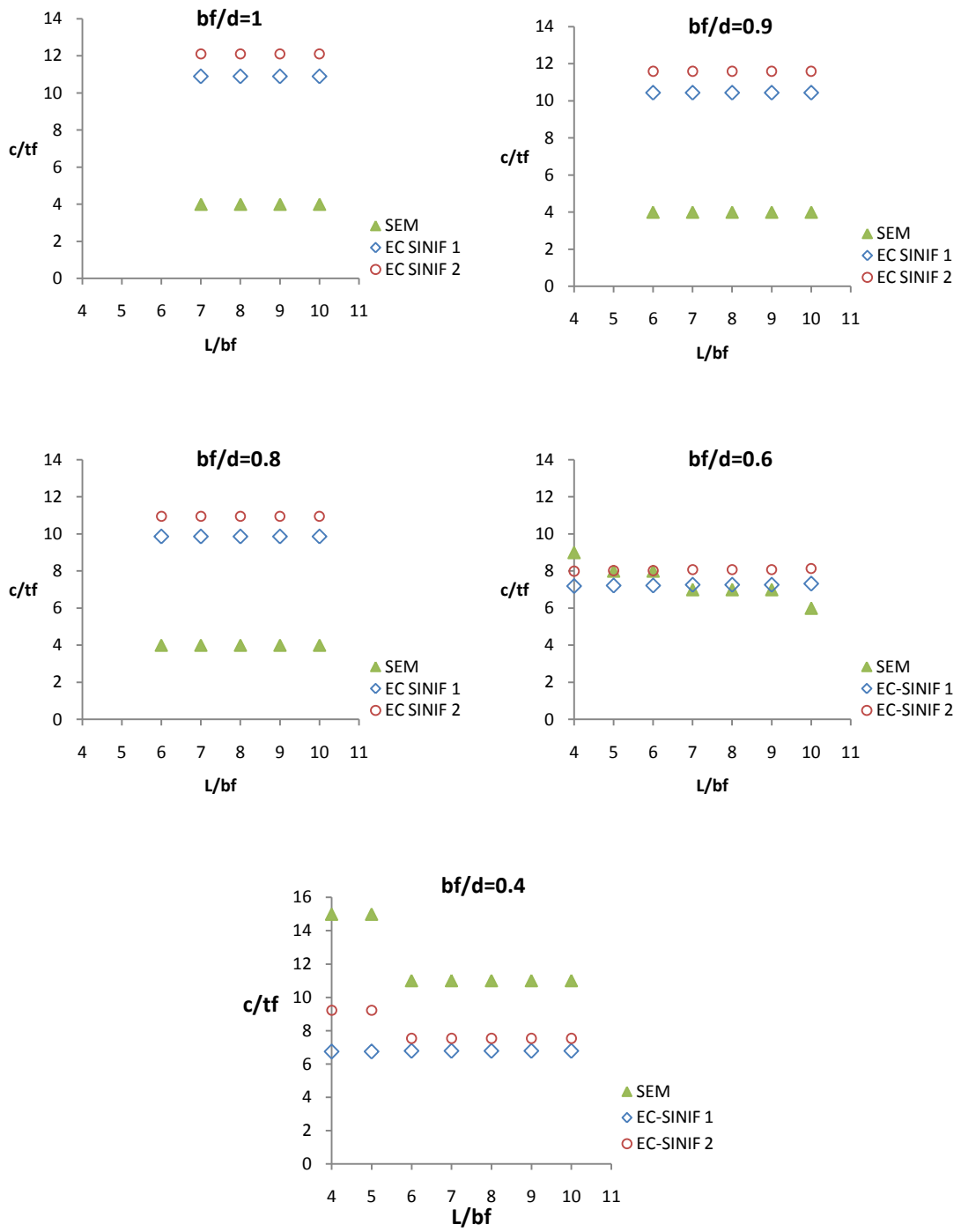
Şekil 6. 11. Matris 4 için Değişen L/b_f Altında b_f/d - c/t_f Grafikleri

Eleman Uzunluğunun Etkisi: Uzunluğun etkisi L/b_f oranı ile izlenmiştir. Bu oran 4-10 arasında değiştirilmiştir. L/b_f oranı arttıkça c/t_f oranında bir azalma izlenmektedir (Bkz. Şekil 6.12, Şekil 6.13). Ancak bu azalma çok etkin olmamakla birlikte bazı durumlarda aynı değerler yakalanmaktadır. L/b_f oranı 7'den büyük olan modellerde $R=3$ değerini yakalayan c/t_f oranları elde edilmiştir. Örneğin; $L/b_f=6$ olan Grup 225'te minimum $R=20.25$ olarak hesaplanırken $L/b_f=7$ olan grup 226'da ise $R=3$ olarak hesaplanabilmiştir. Bu davranış farkı $L/b_f=7$ 'den büyük olan elemanlarda Bernoulli-Euler kiriş teorisine uygun bir davranış ile açıklanabilir.

Bütün bu parametreler gözönünde bulundurulduğunda en etkin parametrenin başlıklara mesnet görevi yapan gövdenin geometrik özellikleri olduğu görülmektedir. h/t_w oranı ve b_f/d oranlarının etkileri daha önce detaylı olarak anlatılmıştır. Her iki parametrede de gövdenin yani başlıklara mesnet teşkil eden plakanın narinlikleri söz konusudur. Mesnet plakanın narinliğinin artması, eğilme rijitliğinin azalması başlıkların daha erken burkulacağı gerçeğini ortaya çıkaracaktır. Ancak L/b_f oranının küçük olduğu kısa elemanlarda kesme kuvvetleri daha etkin olduğundan dolayı aynı b_f/d oranında daha büyük moment-dönme kapasiteleri elde edilmiştir. Bu elemanlarda kesme etkin olduğu için azalmış eğilme rijitliklerinin etkisi pek öne çıkamamaktadır.



Şekil 6. 12. Matris 1 için $L/b_f - c/t_f$ Değişim Grafikleri



Şekil 6.13. Matris 4 için L/b_f - c/t_f Değişim Grafikleri

mümkün olabileceği görülür. Bu değerlerin en küçüğü bize kritik burkulma yükünü verir. L uzunluğu, b genişliği ve t kalınlığına sahip dört tarafından basit mesnetli dikdörtgen bir plak için kritik narinlik;

$$\frac{F_{cr}}{F_y} = \frac{1}{1 + \frac{F_y}{E} \left(\frac{L}{k} \right)^2} \quad (6.2)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Bu denklemde F_y ; akma gerilmesini, F_{cr} ; elastik kritik burkulma gerilmesini tanımlamaktadır. Elastik kritik burkulma gerilmesi ise;

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (6.3)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir [7][16]. Bu eşitlikte "E" elastisite modülü, " ν " poisson oranını, " b/t " plağın genişlik/kalınlık oranını, " k " ise plağın geometrik olarak uzunluk/genişlik oranına ve kenar mesnet şartlarına bağlı burkulma katsayısını tanımlar. Bu denklemlerden yola çıkarak;

$$\frac{F_{cr}}{F_y} = \frac{\pi^2 E}{F_y} \left(\frac{b}{t} \right)^2 \quad (6.4)$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{F_y} \left(\frac{b}{t} \right)^2 F_y \quad (6.5)$$

elde edilebilir. Eşitlikte $E=2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$ değerleri yerine yazılırsa b/t oranı için;

$$\frac{F_{cr}}{F_y} = \frac{\pi^2 E}{F_y} \left(\frac{b}{t} \right)^2 \quad (6.6)$$

elde edilir.

Plak narinliği, Haaijer ve Thürliman [42] tarafından, bir ucu mesnetli diğer ucu serbest olan ve pekleşme bölgesini geçip plastikleşmeye ulaşmış plaklar için

$\alpha = 0.46$, iki ucu mesnetli ve pekleşme bölgesini geçip plastikleşmeye ulaşmış plaklar için ise $\alpha = 0.58$ olarak hesaplanmıştır. U kesitli profilin başlıkları için $\alpha = 0.46$ alınır;

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha}} \quad (6.7)$$

elde edilir.

α değerinin mesnet şartlarına ve uzunluk/genişlik (a/b) oranına bağlı olarak hesaplanmış değerleri Şekil 6.14'de verilmiştir. U kesitli kirişlerin başlıkları, bir kenarı serbest uçlu diğer ucu gövdeye basit mesnetle bağlı veya ankastre olarak tutturulmuş bir plak eleman gibi düşünülebilir. Zayıf ekseninde eğilen U kesitli bir kiriş enkesitindeki gerilme dağılımı Şekil 6.15'te görüldüğü gibidir.

Zayıf ekseninde eğilen U-kesitli bir kirişin başlıkları, bir kenarı serbest uçlu diğer ucu gövdeye basit mesnetle bağlı bir plak eleman gibi düşünülürse $k_{\min} = 0.425$, bir kenarı serbest uçlu diğer ucu gövdeye ankastre bağlı bir plak eleman gibi düşünülürse $k_{\min} = 1.277$ olduğu Şekil 6.14'te görülmektedir.

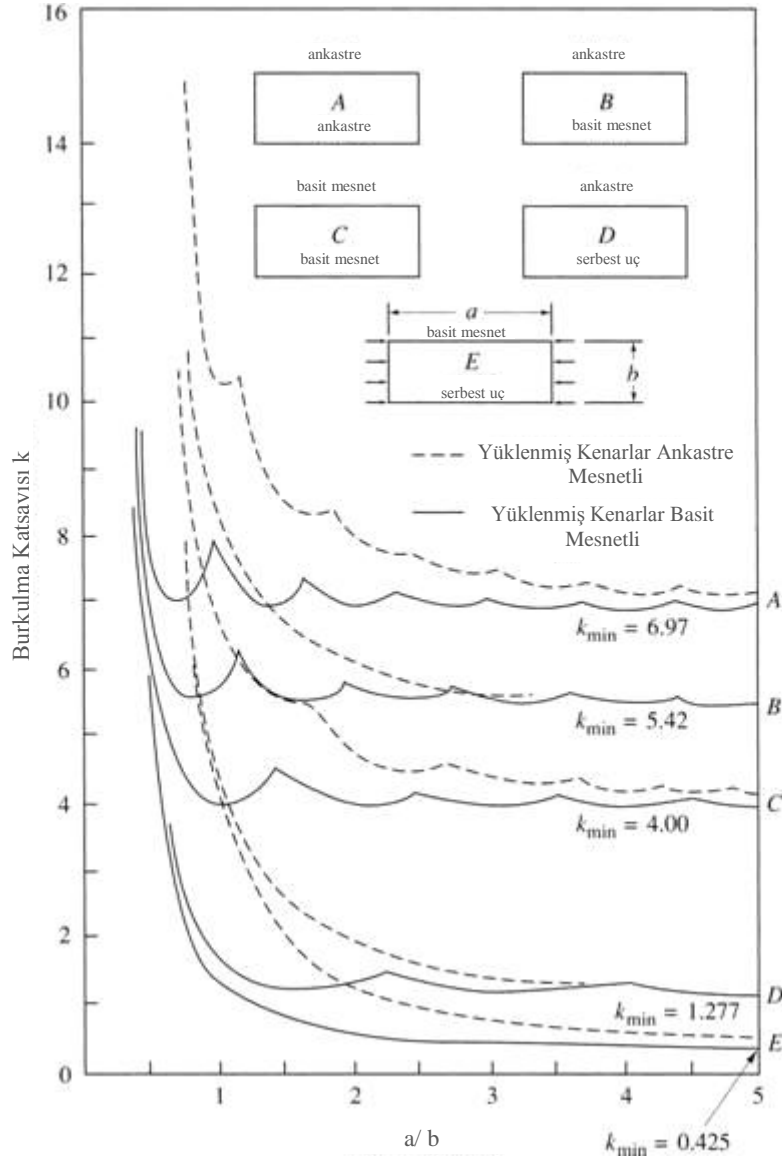
U kesitli profillerde başlık ve gövde plaklarının birleştiği bölge için sınır koşulunun basit mesnet mi yoksa ankastre mesnet mi olduğu tam olarak bilinemediğinden, her iki sınır duruma ait α değeri dikkate alınarak sınır değerler elde edilebilir. Buna göre serbest mesnetli plaklarda;

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha}} \quad (6.8)$$

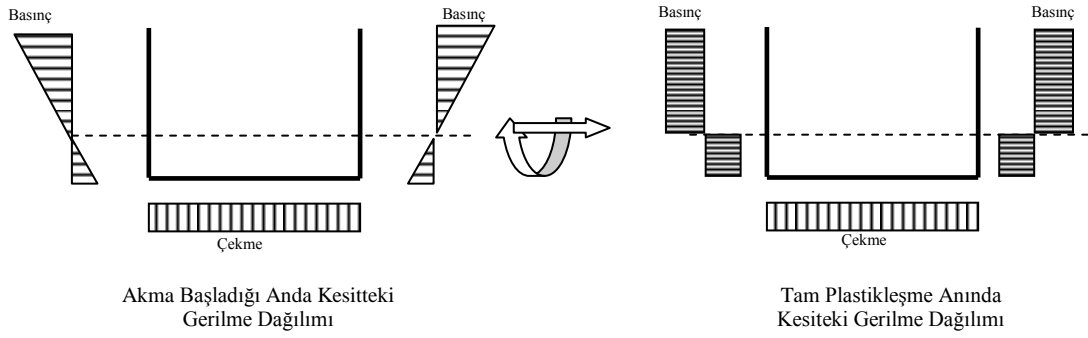
ankastre mesnetli plaklarda ise;

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha}} \quad (6.9)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada yer alan St 235 ve St 355 çelik sınıfları için elde edilen bu formüllerle hesaplanan b/t oranları Tablo 14'teki gibidir.



Şekil 6.14. Dikdörtgen Plakların Basınç Altında Elastik Burkulma Katsayıları [51]

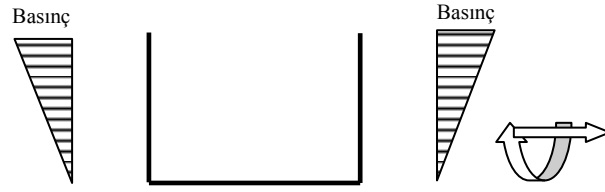


Şekil 6.4. Zayıf Eksende Eğilen U Kesitli Kiriş Enkesitindeki Gerilme Dağılımı

Tablo 6.14. Farklı Çelik Sınıfları İçin b/t Oranları

	Basit Mesnet	Ankastre
	b/t	b/t
St 235	8.53	14.78
St 355	6.94	12.00

Nümerik analiz sonucu elde edilen c/t narinlik oranları (6-8) ve (6-9) denklemleri ile kıyaslandığında, denklemlerle elde edilen değerlerin ait olduğu kesitlerin daha narin olduğu görülmektedir. Bu durum formüllerle elde edilen değerlerin güvensiz olduğu anlamını taşımaktadır. Ancak formüllerle elde edilen değerlerle EN1993'de verilen değerler aynı aralıkta kalmaktadır. Literatürde tavsiye edilen metodlarla elde edilen (6-8) ve (6-9) numaralı denklemlerin sonlu elemanlarla yapılan parametrik çalışma sonuçlarını yakalayamamasının başlıca nedeni, burkulma katsayısı k hesaplanırken plakta yükleme yapılan kenarların basit mesnetli kabul ediliyor olmasıdır. Böylece nümerik analizde ve gerçekte olmayan bir rijitlik dikkate alınarak daha küçük narinlik değerleri hesaplanmaktadır. Ayrıca, literatürde burkulma formülleri elde edilirken plaktaki gerilme dağılımında tarafsız eksen gövdeye gelecek şekilde kabul edilmiştir [42](Bkz. Şekil 6.16).



Şekil 6.56. Plak Burkulma Teorisine göre Basınç Gerilmesi Dağılımı

Oysa Şekil 6-15'te görüldüğü gibi tarafsız eksen başlıkta ilerlemektedir. Bu durum, tarafsız eksenin gerçekte gövde ile çakışmadığı bu nedenle gövdenin basınç başlıklarına doğrudan mesnet görevi görmediği anlamına da gelebilir. Dolayısıyla burkulma daha kolay gerçekleşecektir. Böylece nümerik analizden elde edilen sonuçların daha az narin plak değerlerini işaret etmesi mantıklıdır.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Zayıf ekseninde eğilen U-kesitli profillerin nümerik modellemelerinin gerçek davranışa en uygun sonuçlar verebilmesi için;

- Doğrusal olmayan malzeme modeli ile birlikte kabuk eleman kullanılması uygundur.
- Geometrik kusur, başlıklara sinüsoidal formda tanımlanabilir.
- Deney koşullarını yansıtan en uygun geometrik mesnet koşullarının atanması gerekmektedir.

Elde edilen nümerik modellemelerle tasarım yönetmeliklerinde bahsedilen ve plastik tasarım yapılabilmesi için gerekli olan plak narinlik şartının sağlanıp sağlanmadığının araştırıldığı bu çalışmada uygulamada çok sık karşılaşılan iki çelik sınıfı, farklı kiriş uzunlukları ve kesit geometrileri kullanılarak parametrik çalışma yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre;

- Çelik akma dayanımının artmasıyla plastik tasarım için gerekli olan dönme kapasitesini sağlayacak olan başlık narinlik değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Gövde narinlik değerleri arttıkça plastik tasarım için gerekli olan dönme kapasitesini sağlayacak olan başlık narinlik değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- b_f/d oranının artmasıyla plastik tasarım için gerekli olan dönme kapasitesini sağlayacak olan başlık narinlik değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Kiriş uzunluğu arttıkça plastik tasarım için gerekli olan dönme kapasitesini sağlayacak olan başlık narinlik değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Tüm bu parametreler içerisinde en baskın etkiye sahip olan parametrenin gövde narinliği(h/t_w) ve b_f/d oranı olduğu bulunmuştur.

Elde edilen tüm bu sonuçlar Avrupa Birliği ülkelerinde kullanılan EN1993 çelik yapı şartnamesinde belirtilen plak narinlik şartı ile kıyaslandığında;

- EN1993 şartnamesine göre hesaplanan narinlik değerlerinin bir çok test grubu için şartnamede iddia edildiği gibi plastik tasarıma elverişli kesitler olmadığı anlaşılmıştır. Şartname bu gruplarda güvensiz kalmaktadır.
- Sadece $b_f / d = 0.4$ olan gruplarda gözlemlenen sonuçların şartnamede iddia edilenleri sağladığı gözlemlenmiştir.
- c/t_f plak narinliğinin yanı sıra gövde narinliği(h/t_w) ve b_f / d oranının da dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Literatürde plakların burkulması için verilen diferansiyel denklemlerin çözüm aşamaları çalışma konusu olan U-kesit için uygulandığında;

- Başlık plaklarının gövdeyle olan bağlantısının sabit mesnet veya ankastre mesnet olarak kabul edilmesi durumuna göre iki formül elde edilmiştir.
- Elde edilen formüllerle bulunan plak narinlik değerlerinin nümerik analiz sonucunda bulunan değerlerden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu da formüllerin emniyetsiz tarafta olduğunu ortaya çıkarmaktadır.
- Formüllerde yükleme yapılan kenarlarda mesnet kabul edilmesi gerçek durumla uyuşmamaktadır. Farklılığın bundan kaynaklanması muhtemeldir. Ancak formüllerle elde edilen değerlerle EN1993'te verilen değerler aynı aralıkta kalmaktadır. Bu durum EN1993'de verilen değerlerin, plak burkulma teorisiyle hesaplandığı ihtimalini artırmaktadır.

Tüm bu sonuçlar ışığında;

- EN1993'te, kesitlerin sünek davranışının belirlenmesinde sadece basınç bölgesindeki c/t narinlik oranına bakılması belirtilmiştir. Parametrik çalışmada b_f / d oranının enkesit davranışında çok etkin bir rol oynadığı görülmüştür. Bu durumda EN1993'te plak burkulma teorisi yanı sıra deneylerle desteklenen bir revizyona ihtiyaç vardır.
- DBYBHY incelendiğinde çalışma konusu olan U-profiller için sadece kuvvetli ekseninde eğilme dikkate alındığı ama zayıf ekseninde eğilmenin ihmal edildiği görülmektedir. Yönetmeliğin bu konudaki eksikliğini gidermesi gerekmektedir.
- TS4561 incelendiğinde ise sadece I-profil ve sandık kesitli elemanlar için çalışmalara rastlanmıştır. Farklı enkesitli profiller için herhangi bir açıklama

gözlemlenmemiştir. Yönetmeliğin çelik yapılarda kullanılan tüm enkesitleri dikkate alarak, yeniden plastik tasarım koşullarını belirlemesi gerekmektedir.

- U-Profillerin kuvvetli ekseninde eğilmesi durumunda, plastik tasarım için gerekli olan dönme kapasitesini sağlayacak olan narinlik değerlerinin de ayrıca kontrol edilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ÖZHENDEKÇİ, D., Çelik Yapılar I Ders Notları, YTÜ İnşaat Müh. Böl., <http://www.yildiz.edu.tr>, 07.06.2010.
- [2] YARDIMCI, N., Çelik Yapıların Tasarımı Ve Tasarım Yöntemleri, Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 435 - 2005/1, 46-50.
- [3] CELEP, Z., Betonarme Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış: Plastik Mafsal Kabulü ve Çözümleme, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 167-180, İstanbul, 16-20 Ekim 2007.
- [4] ÖZER, E., Yapı sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi, Ders Notları, İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, 09.02.2005.
- [5] ÖZER, E., Doğrusal Olmayan Sistemlerin Çözüm Yöntemleri, Ders Notları, İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, 12.02.2009.
- [6] ÖZER, E., Doğrusal Olmayan Şekil Değiştirmelerin Belirli Kesitlerde Toplanması Hali, Ders Notları, İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27.03.2008.
- [7] MAZZOLONIA, F. M., GIONCU, V., Ductility of Seismic-Resistant Steel Structures, Taylor & Francis, 2001.
- [8] BRESCIA, M., Rotation Capacity and Over-Strength of Steel Members for Seismic Design, Phd Thesis, University of Napoli Federico II, 2009.
- [9] DUBINA, D., IVANYI, M., Stability and Ductility of Steel Structures, Elsevier Science, 1999.
- [10] İNAN, M., Cisimlerin Mukavemeti, Ofset Matbaacılık Ltd.Şti., 1970.
- [11] TIMOSHENKO, S., (Çeviri: Şuhubi E., Deren H.), Elastik Stabilite Teorisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, 1963.

- [12] LAY M.G., GALAMBOS, T.V., Inelastic Beams Under Uniform Moment, Journal of Structural Division ASCE, 91, 1965.
- [13] ASCE, Plastic Design in Steel, A Guide and Commentary, American Society of Civil Engineers, New York, 1971.
- [14] KEMP, A.R., Interaction of Plastic Local and Lateral Buckling, Journal of Structural Engineering, 111(10):2181-2196, 1985.
- [15] AISC, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, 3rd Ed., American Institute of Steel Construction Inc., Chicago, Illinois, 1999.
- [16] TS EN 1993-1-1, EN 1993: Çelik Yapıların Projelendirilmesi –Bölüm 1-1: Genel Kurallar ve Bina Kuralları, 2005.
- [17] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Afet İşleri, 2007.
- [18] TS 4561, Çelik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesap Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, 1985.
- [19] BEALE, R.G., GODLEY, M.H.R., ENJILY, V., A Theoretical and Experimental Investigation into Cold-Formed Channel Sections in Bending with the Unstiffened Flanges in Compression, Computers and Structures, 79: 2403-2411, 2001.
- [20] ABAQUS/CAE, "Users Manual", Version 6.8.3, Dassault Systems Simulia Corp, USA.
- [21] DUBINA, D., UNGUREANU, V., Effect of Imperfections on Numerical Simulation of Instability Behaviour of Cold-Formed Steel Members, Thin Walled Structures, 40; 239-262, 2002.
- [22] PEKÖZ, T., SCHAFER, B.W., Computational Modeling of Cold-Formed Steel: Characterizing Geometric Imperfections and Residual Stresses, Journal of Constructional Steel Research, 47, 193-210, 1998.
- [23] AKTAS, M., Minor Axis Flexure and Combined Loading Response of I-Shaped Steel Members, Phd Thesis, University of Pittsburgh, 2004.

- [24] AKTAŞ, M., EARLS, C.J., Minor Axis Moment-Thrust Response Behavior in Steel I-Shaped Members, *Journal of Structural Engineering*, 132:7(1079), 2006.
- [25] American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications—Third Edition, Washington, 2004.
- [26] TAŞGETİREN, S., TOPCU, M., Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodu, PAÜ Mühendislik Fakültesi matbası, Ders kitapları Yayın No: 007, 1998, ISBN 975-6992-03-4, DENİZLİ.
- [27] ŞENALP, A.Z., GYTE Makine Mühendisliği Bölümü, Ders Notları.
- [28] SU, X.Z., MEMON, B. A., Arc-length Technique for Nonlinear Finite Element Analysis, *Journal of Zhejiang University Science*, 2004;5(5): 618-628.
- [29] POLAT, C., CALAYIR, Y., Lineer Olmayan Yapı Sistemlerinin Analizi için Yay-Boyu Metodu, *Science and Eng. J. of Fırat Univ.*, 2007; 19 (4): 525-530.
- [30] RIKS, E., The Application of Newton's Method to the Problem of Elastic Stability, *Journal of Applied Mechanics*, 39, 1060-1065, 1972
- [31] RIKS, E., An Incremental Approach to the Solution of Snapping and Buckling Problems, *International Journal of Solids and Structures*, 15(7), 529-551, 1979.
- [32] ÇOBANOĞLU, M., FENERCİOĞLU, T., Çelik Yapıların Tasarımı, 2008 İlkbahar Dönemi Mesleki Eğitim Seminerleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, 08 Nisan 2008.
- [33] VARMA, A.H., WHALEN, T., *Finite Elements in Elasticity*, Lecture Notes, Purdue University, 2009.
- [34] BAMBACH, M.R., *Thin-Walled Sections With Unstiffened Elements Under Stress Gradients*, Phd Thesis, The University of Sydney-Australia, 2003.

- [35] DUBINA, D., UNGUREANU, V., Ductility and Seismic Performance of Thin Walled of Cold-Formed Steel Structures, *Steel Structures*, 4: 209-222, 2004.
- [36] FANG, Y., PEKÖZ, T., Design of Cold Formed Steel Plain Channels, Final Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, 2001.
- [37] GARDNER, L., NETHERCOT, D.A., Designer Guide to EN 1993:Design of Steel Structures, Thomas Telford, 2005.
- [38] GIONCU, V., PETCU, D., Available Rotation Capacity of Wide-Flange Beams and Beam-Columns Part 1. Theoretical Approaches, *Journal of Constructional Steel Research*, 43(1-3): 161-217, 1997.
- [39] HANCOCK, G. J., YOUNG, B., Finite-Element Simulation and Design of Cold-Formed Steel Channels Subjected to Web Crippling, *ASCE*, 132, 1967-1975, 2006.
- [40] KUHLMAN, U., Definition of Flange Slenderness Limits on The Basis Of Rotation Capacity Values, in *Journal of Construction Steel Research*,;14: 21-40, 1989.
- [41] POPOV, E., Çeviren: DEMİRAY, H., Katı Cisimlerin Mekaniğine Giriş-Mukavemet, Çağlayan Basımevi, 1990.
- [42] HAAIJER, G., THURLIMAN, B., On Inelastic Buckling Steel, *Transactions, ASCE*, 125, 308-344, 1960.
- [43] REN, W., FANG, S., YOUNG, B., Analysis and Design of Cold Formed Steel Channels Subjected to Combined Bending and Web Crippling, *Thin-Walled Structures*, 44:314-320, 2006
- [44] REN, W., FANG, S., YOUNG, B., Finite-Element Simulation and Design of Cold-Formed Steel Channels Subjected to Web Crippling, *Journal of Structural Engineering*,, 132(12):1967-1975, 2006.
- [45] UZGİDER, E., PİROĞLU, F., ÇAĞLAYAN, B.Ö., Çelik Yapılar, Çağlayan Kitabevi, 2005.
- [46] YOUNG B., HANCOCK G. J., Web Crippling of Cold Formed Unlipped Channels with Flanges Restrained, *Thin-Walled Structures*, 42, 911-930,

2004.

- [47] YOUNG, B., HANCOCK, G., Design of Cold Formed Channels Subjected to Web Crippling, Journal of Structural Engineering, October,; 127(10):1137-1144, 2001.
- [48] YOUNG, B., HANCOCK, G. J., Cold Formed Steel Subjected to Concentrated Bearing Load, ASCE, 129, 1003-1010, 2003.
- [49] YOUNG, B., HANCOCK, G. J., Design of Cold Formed Channels Subjected to Web Crippling, ASCE, 128, 300-308, 2001.
- [50] YOUNG, B., HANCOCK, G. J., Test of Channels Subjected to Combined Bending and Web Crippling, ASCE, 128, 300-308, 2002
- [51] SALMON, C.G., JOHNSON, J.E., MALHAS, F.A., Steel Structures Design and Behaviour, Fifth Edition, Pearson Education , 2009
- [52] GALAMBOS, V.T., Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Wiley, 1998
- [53] ARDA, T.S., UZGİDER, E., Çelik Yapıların Taşıma Gücü, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 1986
- [54] YAMAN, Z. D., ERYILMAZ D. M., AKTAŞ, M., ELMAS, M., Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizinde Çelik Eğilme Elemanlarının Geometrik Kusurlarının Tanımlanması, Uluslararası Sakarya Deprem Sempozyumu, , Sakarya, 1-3 Ekim 2009.
- [55] EARLS, C. J., Influence of Material Effects on Structural Ductility of Compact I-Shaped Beams, Journal of Structural Engineering, 126,(11):1268–1278, 2000.
- [56] MAK612 Ders Notları, Metallerin Akma Kriteri, URL= www.gyte.edu.tr/anibal/AbIDrive/.../w/.../mak612-ders-notlari-07.pdf, Kasım2009.
- [57] AY, İ., Sac Şekillendirme, URL= <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/iy2/lecture12.pdf>, Nisan 2010.

EKLER

Ek 1:

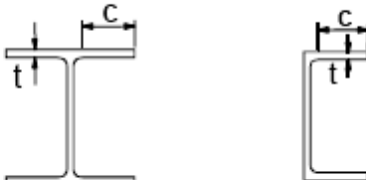
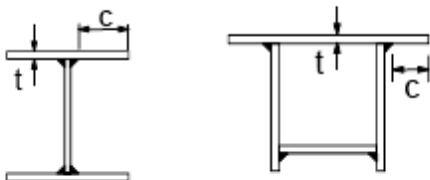
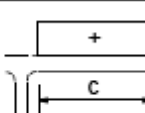

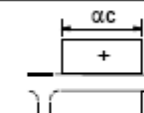

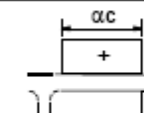
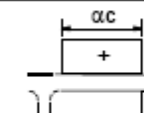
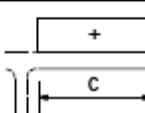
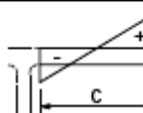
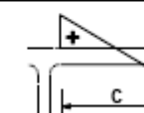
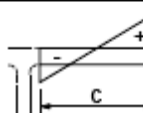
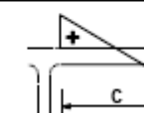
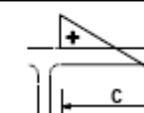
EN 1993-1-1: 2005 (E)

Table 5.2 (sheet 1 of 3): Maximum width-to-thickness ratios for compression parts

Internal compression parts						
				Axis of bending		
Class	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and compression			
1						
	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
3						
	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ when $\psi \leq -1^*)$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$e = \sqrt{235/f_y}$	f_r	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ applies where either the compression stress $\sigma \leq f_y$ or the tensile strain $\epsilon_y > f_y/E$

Table 5.2 (sheet 2 of 3): Maximum width-to-thickness ratios for compression parts

Outstand flanges						
						
		Rolled sections		Welded sections		
Class	Part subject to compression	Part subject to bending and compression				
		Tip in compression		Tip in tension		
Stress distribution in parts (compression positive)						
1	$c/t \leq 9e$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10e$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Stress distribution in parts (compression positive)						
3	$c/t \leq 14e$	$c/t \leq 21e\sqrt{k_\sigma}$ For k_σ see EN 1993-1-5				
$e = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Ek 2:

ZAYIF EKSENDE EĞİLEN ÇELİK U KİRİŞLER İÇİN ABAQUS INPUT DOSYASI

```

*heading
**d=14,Ld=121.74
**b=5,Lb=44.89
**tw=5,L=379.13,tf=3.26
**a=14,La=126.376666666667
**c=14,Lc=126.376666666667
**impsize=0.8978,Lw=44.89
**camber=0,
**dely=9.02690476190476
**P=1
**E=210000
**a=14
**a+c=28
**2a+c=42
*Node
**I nolu parca_alt
1,0,0,0
15,0,0,126.376666666667
29,0,0,252.753333333333
43,0,0,379.13
**I_üst-II_alt
216,-44.89,0,0
230,-44.89,0,126.376666666667
244,-44.89,0,252.753333333333
258,-44.89,0,379.13
**II_üst-III_alt
818,-44.89,121.74,0
832,-44.89,121.74,126.376666666667
846,-44.89,121.74,252.753333333333
860,-44.89,121.74,379.13
**III_üst
1033,0,121.74,0
1047,0,121.74,126.376666666667
1061,0,121.74,252.753333333333
1075,0,121.74,379.13
**I_alt
**II_üst
*NGEN,NSET=a1
1,15,1

```

```
*NSET,NSET=a2,GENERATE
15,29,1
*NGEN,NSET=a3
29,43,1
*NGEN,NSET=b1
216,230,1
*NGEN,NSET=b2
230,244,1
*NGEN,NSET=b3
244,258,1
*NGEN,NSET=c1
818,832,1
*NGEN,NSET=c2
832,846,1
*NGEN,NSET=c3
846,860,1
*NGEN,NSET=d1
1033,1047,1
*NSET,NSET=d2,GENERATE
1047,1061,1
*NGEN,NSET=d3
1061,1075,1
**I NOLU PARÇA,
*NFILL,NSET=z1
a1,b1,5,43
*NFILL,NSET=z2
a2,b2,5,43
*NFILL,NSET=z3
a3,b3,5,43
*NFILL,NSET=z4
b1,c1,14,43
*NFILL,NSET=z5
b2,c2,14,43
*NFILL,NSET=z6
b3,c3,14,43
*NFILL,NSET=z7
c1,d1,5,43
*NFILL,NSET=z8
c2,d2,5,43
*NFILL,NSET=z9
c3,d3,5,43
**
*NSET,NSET=LOAD,GENERATE
230,832,43
244,846,43
```

```
*NSET,NSET=MID,GENERATE
237,839,43
*NSET,NSET=SABIT,GENERATE
258,860,43
*NSET,NSET=HAREKETLI,GENERATE
216,818,43
**ELEMENT DEFINATIONS
**
*ELEMENT,TYPE=S4R
1,1,2,45,44
*ELGEN,ELSET=e11
1,14,1,1,5,43,42
*ELEMENT,TYPE=S4R
15,15,16,59,58
*ELGEN,ELSET=e12
15,14,1,1,5,43,42
*ELEMENT,TYPE=S4R
29,29,30,73,72
*ELGEN,ELSET=e13
29,14,1,1,5,43,42
*ELEMENT,TYPE=S4R
211,216,217,260,259
*ELGEN,ELSET=e14
211,14,1,1,14,43,42
*ELEMENT,TYPE=S4R
225,230,231,274,273
*ELGEN,ELSET=e15
225,14,1,1,14,43,42
*ELEMENT,TYPE=S4R
239,244,245,288,287
*ELGEN,ELSET=e16
239,14,1,1,14,43,42
*ELEMENT,TYPE=S4R
799,818,819,862,861
*ELGEN,ELSET=e17
799,14,1,1,5,43,42
*ELEMENT,TYPE=S4R
813,832,833,876,875
*ELGEN,ELSET=e18
813,14,1,1,5,43,42
*ELEMENT,TYPE=S4R
827,846,847,890,889
*ELGEN,ELSET=e19
827,14,1,1,5,43,42
*ELSET,ELSET=WEB
```

```
e14,e15,e16
*ELSET,ELSET=FLANGE
e11,e12,e13,e17,e18,e19
*shell section,material=steel,elset=web
5
*shell section,material=steel,elset=flange
3.26
*Material,Name=steel
*elastic
210000,0.3
*plastic
235,0
*boundary,TYPE=displacement
SABIT,1,3
HAREKETLI,1,2
*step,nlgeom,inc=100
*static,riks
0.01,1,0.0000000001
*controls,analysis=discontinuous
*load
LOAD,1,-1
*restart,write,frequency=1
*elprint,frequency=0
*node print,frequency=1
cf
*end step
```

ÖZGEÇMİŞ

Zeynep DERE YAMAN, 09.09.1972 tarihinde Malatya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Malatya'da tamamladı. 1993 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1993-1996 yılları arasında çeşitli şirketlerde inşaat mühendisi olarak çalıştı. 1996 yılında Niğde Üniversitesi Aksaray Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1997 tarihinde Elazığ Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimini 2000 yılında tamamladı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Evli ve üç çocuk annesi olan Zeynep DERE YAMAN Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.