

155728

**ÖNGERİLMELİ ÇELİK I- PUTREL KİRİŞ
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

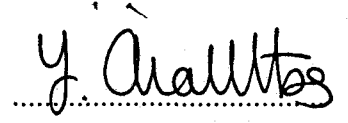
Alpay ÖZER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
(METAL EĞİTİMİ)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

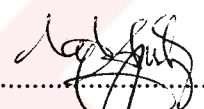
**Ocak 2004
ANKARA**

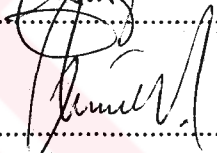
Alpay ÖZER tarafından hazırlanan ÖNGERİLMELİ ÇELİK I- PUTREL KİRİŞ ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Tez Yöneticisi

Bu çalışma jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. H. YILMAZ ARWTAŞ 

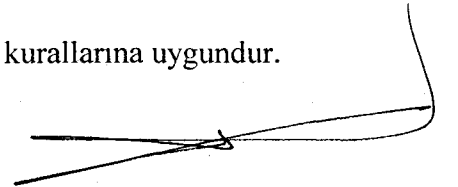
Üye : Yrd. Doç. Dr. BEHÇET GÜLENG 

Üye : Yrd. Doç. Dr. YUSUF ÖZÇATALBAŞ 

Üye :

Üye :

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNGERİLMELİ YAPI ELEMANI.....	4
2.1. Öngerilmeli Beton Üretimi.....	8
2.2. Öngerilmeli Betonun Avantajları.....	11
3. YAPI MALZEMESİ OLARAK ÇELİK VE KAYNAKLI BİRLEŞTİRİLMESİ.....	13
3.1. Çelik Yapılarda Kullanılan Genel Yapı Çelikleri.....	14
3.1.1. Hadde mamulü malzemeler.....	15
3.1.2. Döküm mamulü malzemeler.....	17
3.2. Metal Malzemelere Ait Bazı Mekanik Özellikler.....	17
3.2.1. Akma dayanımı (σ_a).....	18
3.2.2. Çekme dayanımı (σ_c).....	19
3.2.3. Elastikiyet modülü (E).....	20
3.2.4. Rezilyans modülü.....	22
3.3 Kaynak Konstrüksiyonlu I-Putrel Üretim Tekniği.....	25
3.3.1. Kaynakta kalıntı gerilmelerin oluşumunun nedenleri.....	26

4. KİRİŞLERDE MUKAVEMET HESAPLARI.....	33
4.1. Kiriş Çeşitleri.....	33
4.2. Kirişlere Etkiyen Kuvvetler.....	34
4.3. Kirişlerde Meydana Gelen Gerilmeler.....	35
4.4. Kesme Kuvvetleri ve Eğilme Momenti Diyagramları.....	38
4.5. Kirişlerde Eğilme Dayanımı.....	41
4.5.1. Atalet momenti hesabı.....	46
4.6. Kirişlerde Eğilme Miktarlarının Hesaplanması.....	49
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	51
5.1 Malzeme.....	51
5.2. Deney Metodu.....	52
5.2.1 Öngerilmeli kaynaklı I- putrel kiriş üretim metodu.....	52
5.2.2. Öngerme işlemlerinin uygulanması.....	57
5.2.3. Gerilim giderme ısıtıl işlemi.....	68
5.2.4. Kalıntı gerilmelerin türü ve kalıntı gerilme sebepli çarpılma (yerdeğişim) miktarının (KGSÇM) ölçülmesi.....	68
5.2.5. İki noktadan eğilme deneyi.....	70
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	72
6.1. Kalıntı Gerilmelerin Belirlenmesi ve Ön Sehim Ölçüm Sonuçları.....	72
6.2. Eğilme Deneyi Sonuçları.....	82
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	99

**ÖNGERİLMELİ ÇELİK I- PUTREL KİRİŞ
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Alpay ÖZER

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2004**

ÖZET

Bu çalışmada, öngerilmeli çelik I- putrel bir kirişin üretilebilirliği ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Öngerilmeli I- kiriş üretimi için Fe 46 levha malzeme ve Fe 37 yarı mamul T profil kullanılmıştır. Levha malzeme boyuna doğrultuda, gerilmesiz ve farklı eksenel çekme gerilmelerine (94, 188 ve 282 N/mm²) maruzken, T profiline gaz altı kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Bu sayede, 55 mm yüksekliğinde, 50 mm genişliğinde, 5 mm et kalınlığında ve 500 mm uzunluğunda öngerilmeli çelik I- kiriş üretilmiştir. Minimum öngerilmeli kirişte en fazla kalıntı gerilme ve ön sehim oluşurken, artan öngerilme miktarıyla azalan kalıntı gerilme ve ön sehim etkisi belirlenmiştir. Eğilme deneyi sonucunda, öngerilme değerindeki azalışın eğilme dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Buna rağmen, öngerilmeli çelik I- kiriş üretimi ile yaklaşık % 30 oranında eğilme dayanımının arttırılabileceği belirlenmiştir.

Bilim Kodu :710
Anahtar Kelimeler : Çelik Kiriş, Öngerilme, Sehim, Eğilme Dayanımı
Sayfa Adedi :99
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

**INVESTIGATION OF PRODUCTABILITY OF
PRESTRESSED STEEL I- BEAM**

(M.Sc Thesis)

Alpay ÖZER

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2004

ABSTRACT

In this study, productability of a prestressed steel I- beam and its mechanical properties were investigated. In the production of prestressed I- beams, St 46 plate material and St 37 T- beam were used. While the plate materials were under various tensile stresses (94, 188 and 282 N/mm²) or without stress in the horizontal direction, it was joined to the T- beam by metal inert gas welding. By this method, prestressed steel I- beams which have 55 mm in depth, 50 mm in width, 5 mm wall tickness and 500 mm in length were fabricated. The higgest residual stress and pre-deflection were obtained in minimum prestressed beam whereas with increasing in prestress value, residual stress and pre-deflection were decreased. Bending test results indicated that decreasing the prestress value led to increasing the bending loads. However, it was observed that producing prestressed steel I beam by this method resulted in an increase in bending strenght about 30%.

Science Code	: 710
Key Word	: Steel Beam, Prestressed, Deflection, Bending Strenght
Page Number	: 99
Adviser	: Assistant Prof. Dr. Yusuf OZCATALBAS

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli yardımları ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ' a, kaynak işlemleri sırasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ' e, mekanik konusundaki değerli bilgilerinden faydalandığım Öğr. Gör. Mehmet AKAD' a, Kalıp ABD Başkanı Doç. Dr. Ahmet ÖZDEMİR' e, deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Volkan KILIÇLI' ya, Arş. Gör. Melika CERAH'a, Lokman ŞENEL' e, Erkal MUTLU, Ali BAŞ ve Ayhan DEMİR arkadaşlarıma, Yüksek lisans eğitimim süresince maddi ve manevi her konuda yanımda olan çok değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Sırasıyla 24, 30, 36 m. açıklıklı ve 2400 N/m^2 dış yüklü kafes kirişlerde sağlanan ağırlıkça ekonomi.....	13
Çizelge 3.2. Öngerilmeli çelik yapının standart çelik yapıya göre sağladığı ekonomi.....	14
Çizelge 3.3. Yapı Çelikleri İçin Emniyet Gerilmeleri.....	15
Çizelge 3.4. Standart profillere ait ölçü boyları.....	16
Çizelge 3.5. Çok kristalli metallerin Elastik Modülü, Kesme Modülü ve Possion oranı.....	22
Çizelge 4.1. Basit geometrik şekillerin atalet ve dayanım momentleri.....	47
Çizelge 4.2. Kiriş çeşitlerine göre mesnet kuvvetleri, maksimum eğilme momentleri ve en büyük eğilme miktarları.....	50
Çizelge 5.1. 50x5 mm boyutlarındaki levha malzemenin mekanik özellikleri.....	51
Çizelge 5.2. 50x5 mm. boyutlarındaki levha malzemenin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).....	51
Çizelge 5.3. Kaynak işlemi öncesi ve sonrası gerilme değerleri.....	67
Çizelge 6.1. Kalıntı gerilme ölçüm sonuçları.....	75
Çizelge 6.2. Öngerilmemiş kirişte hesaplanan teorik sehim miktarı ile çeşitli eğilme yüklemelerine karşılık üretilen kirişlerde oluşan sehim miktarı.....	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kirişin yüksüz ve yüklü durumu.....	4
Şekil 2.2. Öngerilmeli kirişin yüksüz ve P yükü uygulanmış durumu.....	4
Şekil 2.3. Öngerilmeli beton yükleme durumu.....	5
Şekil 2.4. Betonun Gerilim-gerinim eğrisi.....	6
Şekil 2.5. Öngerilmeli beton.....	7
Şekil 2.6. Öngerilmede kuvvetin çift taraflı etkisi.....	7
Şekil 2.7. Önceden öngerme metodu.....	8
Şekil 2.8. Öngerilmeli beton kiriş üretim yöntemi.....	9
Şekil 2.9. Orta eksenden ve kesitin alttan 1/3'üne öngerilme uygulanma durumu.....	10
Şekil 2.10. Alttan 1/3'üne öngerilme uygulanmış olan kirişin yüklenmiş hali.....	10
Şekil 2.11. Sonradan Öngerme metodu.....	11
Şekil 3.1. Hadde mamül malzemeler.....	16
Şekil 3.2. Metal malzemeler için tipik bir gerilim-gerinim eğrisi.....	18
Şekil 3.3. Belirgin akma göstermeyen malzemenin akma dayanımının belirlenmesi.....	19
Şekil 3.4. Kuvvet atomlar arası aralık eğrisi eğiminin, elastikiyet modülü ile ilişkilendirilmesi.....	20
Şekil 3.5. Bazı malzemeler için elastikiyet modülü verileri.....	21
Şekil 3.6. Gerilim- % uzama eğrisi.....	23
Şekil 3.7. Sıcaklığın gerilim-% uzama eğrisi çekme özellikleri üzerine etkisi.....	24
Şekil 3.8. Sıcaklıkla malzeme özelliklerindeki değişim.....	24

Şekil 3.9. I-Putrel üretiminde başlık ve gövde levhalarının birleştirilmesi tekniği.....	25
Şekil 3.10. Isıl genleşmesi önlenmiş çubukta oluşan zorlamalar.....	27
Şekil 3.11. Kaynak sırasındaki sıcaklık ve gerilim değişiminin şematik olarak gösterimi.....	28
Şekil 3.12. Farklı kaynaklı birleştirme şekillerindeki tipik kalıntı gerilmeler.....	30
Şekil 3.13. Kaynak ağızsız ve kaynak ağızlı (6mm) köşe kaynağı yapılmış parçaların “T” şeklinde birleştirilmesi.....	31
Şekil 3.14. Kaynak ağızsız ve kaynak ağızlı (6 mm) köşe kaynağı sonrasında yapıda oluşan enine kalıntı gerilmelerin dağılımı.....	31
Şekil 3.15. Kaynak ağızsız ve kaynak ağızlı (6 mm) köşe kaynağı sonrasında kaynak boyunca oluşan kalıntı gerilmelerin dağılımı.....	32
Şekil 4.1. Kiriş çeşitleri.....	34
Şekil 4.2. Kirişin bir noktasına etki eden kuvvetler.....	35
Şekil 4.3. Konsol kirişte meydana gelen eksenel (N) ve kesme (V) gerilmeleri ile eğilme momenti (M).....	37
Şekil 4.4. Kuvvetin, kesme gerilmesinin ve momentin yönleri.....	38
Şekil 4.5. Orta noktadan P yükü ile yüklenmiş basit mesnetli bir kirişin kesme kuvveti ve moment diyagramı.....	39
Şekil 4.6. 6 kN ve 4 kN büyüklüğündeki kuvvetlere maruz kalan basit mesnetli kirişte kesme kuvvetleri ve eğilme momenti diyagramı.....	41
Şekil 4.7. Eğilmede temel olan deformasyon kabulü.....	42
Şekil 4.8. Eğilmede meydana gelen birim şekil değişimi.....	43
Şekil 4.9. T profil kesit yüzeyi.....	48
Şekil 4.10. Kirişte eğilme durumu.....	49
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan malzemeler ve boyutları.....	51
Şekil 5.2. Öngerilmeli I- putrel kiriş üretimi.....	53
Şekil 5.3. İç köşe kaynak dikişi geometrileri.....	54

Şekil 5.4. Öngerme aparatı.....	57
Şekil 5.5. Çekme çenesi	58
Şekil 5.6. Deney düzeneğinin fotoğrafı.....	59
Şekil 5.7. Data logger kalibrasyon eğrisi.....	60
Şekil 5.8. Çekme çubuğundaki DMS' lerin konumu.....	61
Şekil 5.9. Wheatstone köprüsünde renk ve sayı kodlaması.....	61
Şekil 5.10. Öngerme levhasının kalibrasyonu.....	62
Şekil 5.11. Öngerme sisteminin DMS' li öngerme levhasıyla kalibrasyonu.....	63
Şekil 5.12. Öngerme sistemi ve levhasının kalibre eğrisi.....	63
Şekil 5.13. Deney düzeneğinin şematik görünüşü.....	64
Şekil 5.14. Vektörel kuvvetler.....	64
Şekil 5.15. Öngerilmeli I- putrel kiriş üretim sistemi ve ekipmanlarının şematik gösterimi.....	66
Şekil 5.16. Kalıntı gerilme türü ve miktarını belirlenmesi ile ilgili deney düzeneği.....	69
Şekil 5.17. Kirişlere uygulanan eğilme deneyinin şematik görüntüsü.....	70
Şekil 5.18. Eğilme deneyi düzeneği ve eğme işleminin gösterilişi.....	71
Şekil 6.1. Nötr eksen ile GUE arasındaki mesafe (moment kolu).....	72
Şekil 6.2. I- putrelde basma gerilmelerinin neden olduğu ön sehimin MD 6 bilgisayar programında analizi.....	73
Şekil 6.3. Öngerilmeli I kirişler ve meydana gelen ön sehim.....	74
Şekil 6.4. Kirişlerde kalıntı gerilme miktarına bağlı oluşan çarpılma miktarının değişimi.....	76
Şekil 6.5. Kiriş enkesiti boyunca $L_t = 30$ mm kesme mesafesinde KGSÇM.....	76
Şekil 6.6. Kiriş kesiti N.E' sinin kaynak dikişi N.E.' sine göre durumu.....	77
Şekil 6.7. Öngerilmeli kirişte oluşan gerilme türleri.....	79

Şekil 6.8. Kaynak dikişi ve nötr eksenin durumuna göre oluşan çarpılma.....	79
Şekil 6.9. Kiriş boyunca oluşan önsehim (boyuna distorsyon) miktarı.....	80
Şekil 6.10. Kirişin orta noktasındaki önsehim miktarı.....	80
Şekil 6.11. Kiriş türleri ve yükleme durumları.....	81
Şekil 6.12.Kiriş tipi-açısal distorsyon arasındaki ilişki.....	81
Şekil 6.13. Üretilen kiriş en kesiti.....	82
Şekil 6.14. Kirişin kesme ve moment diyagramları.....	83
Şekil 6.15. Öngerilmeli kirişlere uygulanan iki noktadan eğilme testi ile teorik eğilme miktarının karşılaştırılması (10000 N-60000 N aralığı).....	84
Şekil 6.16. Öngerilmeli kirişlere uygulanan iki noktadan eğme testi ile teorik eğilme miktarının karşılaştırılması (10000 N-25000 N aralığı).....	85
Şekil 6.17. Öngerilmeli kirişlere uygulanan iki noktadan eğme testi ile teorik eğilme miktarının karşılaştırılması (25000 N-40000 N aralığı).....	85
Şekil 6.18. Öngerilmeli kirişlere uygulanan iki noktadan eğme testi ile teorik eğilme miktarının karşılaştırılması (40000 N-55000 N aralığı).....	86
Şekil 6.19. Basma kuvvetlerinin eğme kuvvetine karşı göstermiş olduğu tepki.....	87
Şekil 6.20. Eğilme testi sonrası kiriş numunelerdeki deformasyonların görünümü.....	88
Şekil 6.21. 50000 N kuvvetle eğilmeye çalışılan öngerilmemiş kiriş.....	89
Şekil 6.22. 50000 N kuvvetle eğilmeye çalışılan öngerilmeli kiriş.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a	Kaynak dikiş kalınlığı
A_k	Toplam kaynak dikiş alanı
$A.N$	Akma noktası
b	Malzeme genişliği
c	Nötr eksen ile malzeme dış yüzeyi arası mesafe
E	Elastikiyet modülü
F	Kuvvet
F_b	Basma kuvveti
$F_ç$	Çekme kuvveti
F_{max}	Maksimum uygulanabilecek kuvvet
F_t	Tepki kuvveti
h	Yükseklik
I	Atalet momenti
k	Çarpılma miktarı
L	Malzeme boyu
L_m	Nötr eksen ile GUE arası mesafe
L_t	Kesme mesafesi
M	Eğilme momenti
Me	Moment kolu
N	Eksenel gerilme
NE	Nötr eksen
P	Yük
$P_{ön}$	Öngerme sistemine uygulanan öngerilme yükü
R_A	A noktasındaki tepki kuvveti
R_B	B noktasındaki tepki kuvveti

q	Her metre kiriş boyuna gelen yayılmış yük
t	Malzeme kalınlığı
V_k	Kaynak hızı
V_t	Tel sürme hızı
W	Dayanım momenti
σ_a	Akma gerilmesi
σ_ϵ	Çekme gerilmesi
σ_{max}	Maksimum gerilme
$\sigma_{\delta n}$	Öngerilme
σ_x	x-x kaynak eksenini boyunca oluşan gerilme
τ	Kesme modülü
τ_k	Kaynak kesme gerilmesi
δ	Sehim (eğilme miktarı)
$\delta_{\delta s}$	Ön sehim
δ_t	Teorik sehim
ν	Possion oranı

Kısaltmalar

Açıklamalar

DMS	Uzayabilir ölçü şeritleri (strain guge)
GUE	Gerilmelerin uygulandığı eksen
KG	Kalıntı gerilme
KGSC	Kalıntı gerilme sebepli çarpılma
KGSCM	Kalıntı gerilme sebepli çarpılma miktarı
MD6	Mechanical desctop version 6 çizim programı
TS	Türk Standartları

1. GİRİŞ

Çelik, hafif bir malzeme oluşu , yüksek yapım hızı, yük taşıma kapasitesi ve depreme dayanıklılığı gibi avantajları ile günümüzde inşaat sektörü için vazgeçilmez bir yapı malzemesi durumuna gelmiştir (1-3).

Yapı malzemesi olarak çeliğin inşaat sektöründe kullanımıyla birlikte çok katlı binalar inşa edilmiş, geniş açıklıklar kolaylıkla geçilebilmiştir. Özellikle deprem yükleri altında göstermiş olduğu dayanım çeliği çok katlı konut yapıların inşasında kullanılan bir malzeme haline getirmiştir (1).

Çelik taşıyabileceği yüklere oranla en hafif yapı malzemesidir. Dayanımının yüksek olması nedeniyle öz ağırlığın taşıdığı yüke oranının küçük olması, çelik çerçevede kullanılan kiriş ve kolonların boyutlarında küçülmeye neden olmaktadır. Bunun avantajı ise yapı öz yük ağırlığının azalmasıdır. Dolayısıyla aynı kat yüksekliğine sahip çelik çerçevenin öz yük ağırlığı, betonarme yapının yarısı kadardır. Çeliğin bu özelliğinin diğer bir avantajı ise kiriş ve kolon boyutlarında önemli ölçüde azalma sağlamasıdır. Taşıyıcı sistemde kolon sayısının azalması veya boyutlarının küçülmesi kullanım alanlarında önemli ölçüde kazançlar sağlar. Çok katlı binalarda üst katlara doğru çıkıldıkça, kolon ve kirişlerin taşıyacağı yük miktarının azalması, kiriş ve kolon boyutlarında azalmaya neden olur. Bunun sonucunda çok katlı binaların öz yük ağırlığı çelik yapılarda, betonarme yapıların 1/10'na kadar düşebilir (3-6).

Çelik malzeme kullanılarak inşa edilen yapıların betonarme veya ahşap yapılara karşı üstün olduğu diğer bir hususta depreme karşı yüksek dayanıma sahip olmalarıdır. Bunun başlıca nedenleri şu şekilde sıralanabilir;

- Çelik sünek bir malzemedir. Bu özelliği depremde betonarme yapılara oranla 18 kat daha fazla enerji absorbe edebilmesini sağlar,
- Yüksek mukavemetli bir malzeme olup, öz ağırlığın taşıdığı yüke oranı çok küçüktür. Ahşap ve alüminyum hariç, diğer yapı malzemelerinden hafif

olması, çelik bir yapıda deprem yüklerinin yarı yarıya azalmasına neden olur, yapı yüksekliği arttıkça bu özellik daha da belirginleşir (3, 5, 6).

Yapı malzemesi olarak inşaat sektöründe çeliğin artan kullanım alanına sahip olmasının diğer bir nedeni de ekonomik olmasıdır. Çünkü, inşaatlarda yıllarla ifade edilen alışılmış yapım süreleri çelik kullanımı ile aylara indirilir. Hava koşullarından bağımsız olarak montaj imkanı sunar. Düşük katlı yapılarda betonarme ve çelik yapılar birbirine yakın maliyete sahipken, çok katlı yapılarda çelik yapılar en güvenilir ve en ekonomiktir (6). Özellikle geniş açıklıkların geçilmesinde kullanılan kafes kirişlerde çelik halatlarla yapılan öngerme tekniği uygulanacak olursa, sistem ağırlığında % 20-22 arası bir kazanç elde edilecektir. Bu kazanç toplam maliyete ise, açıklık mesafesine bağlı olarak, % 8 – 30 arasında yansıyacaktır (7).

Çelik yapılarda elde edilen bu avantajların yanında, dezavantajlarda söz konusudur. Bunlardan ilki yüksek sıcaklıklarda çeliğin dayanımının hızla düşmesidir. Diğer bir dezavantaj ise projelendirmenin çelik yapılarda daha detaylı ve zor olması, profil çeşitliliğinin sağlanamaması ve malzeme yetersizliğidir (3).

Çelik yapıların dezavantajlarının yanı sıra sahip oldukları önemli avantajlara, öngerilmeli çelik kirişlerin yapılarda kullanılmasıyla, bir yenisi eklenilebilir. Öngerme veya öngerilme, çeşitli işletme yükleri altındaki davranışı ve mukavemetini geliştirmek üzere, bir yapı elemanına bilinçli olarak kalıcı gerilmeler verilmesidir.

Öngerilme bir inşaat tekniğidir. Ancak bu sözcük ülkemizde, neredeyse inşaat mühendisleri arasında bile, yalnız betonarme yapılar ile birlikte akla gelmektedir. Öngerilmelerin daha çok betonarme yapılara uygulanmasının nedeni olarak, beton malzemenin çekme dayanımının çok küçük olması (basınç dayanımının 1/10 kadar (8)) gösterilebilir. Aslında öngerme bir teknik olup beton dışındaki birçok malzemeye uygulanması mümkündür. Günümüzde öngerme işlemi çelik yapı elemanları için de kullanılabilmektedir. Ayrıca öngerilme uygulaması, özellikle çeliğin çok ucuz olmadığı piyasa koşullarında, ilginç bir ekonomi sağlayabilmekte ve köprü vb. çelik taşıyıcı sistemlerde daha ucuz takviye olanağı da sağlamaktadır (7).

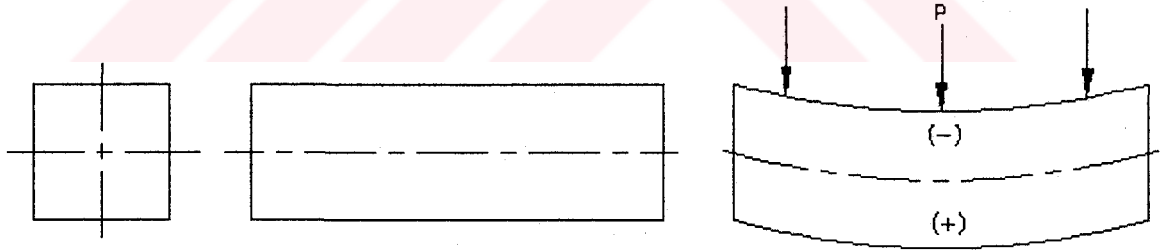
Çeliğin diğer yapı malzemelerine göre çok daha üstün olan mekanik özelliklerinden ve yapım sırasında sağladığı standartlaşma ve kolaylıklardan konut ve köprü inşaatlarında, endüstri yapılarında, gökdelenlerde vb. inşaatlarda faydalanılmaktadır (9). Dolayısıyla bu tür yapıların inşasında önerilmeli I-putrellerin kiriş olarak kullanılması, yapı malzemesinin kesitinde ve dolayısıyla sistemin öz yüklerinde sağlayacağı azalma, önemli ekonomik kazançlar sağlayacaktır.

Bu çalışmada, betonarme yapılarda önerilmenin sağlamış olduğu avantajların çelik konstrüksiyon yapılara da taşınabileceği düşüncesiyle, önerilmeli kaynaklı birleştirmeli bir I putrel kirişin üretilebilirliği ve mekanik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

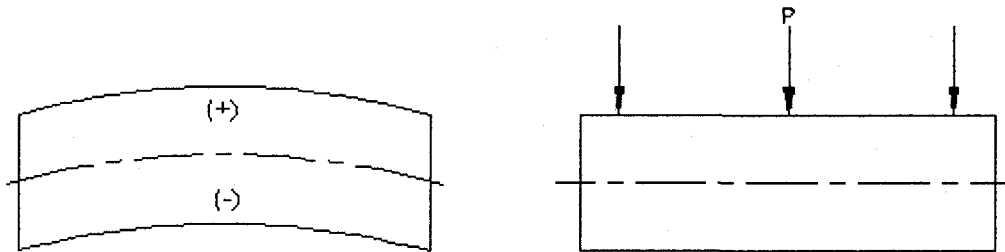


2. ÖNGERİLMELİ YAPI ELEMANI

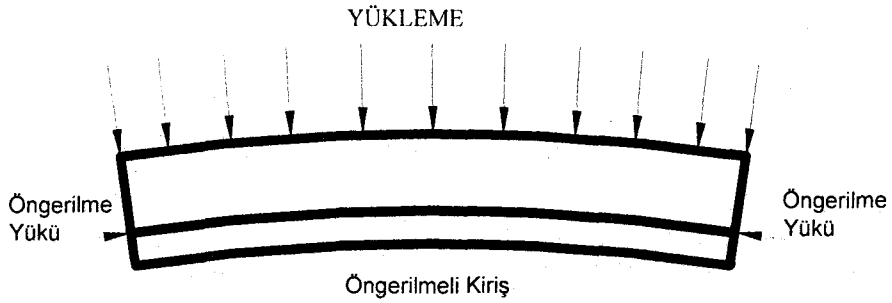
Kare kesitli standart bir beton kiriş düşünülüğünde, kirişin her tarafında gerilmelerin nötr durumda olduğu bilinen bir gerçektir. Bu durumda kirişe bir yükleme yapılacak olursa yükün etkidiği tarafta, basınç etkisinden dolayı, basma gerilimi diğer tarafta ise çekme gerilimi oluşacaktır (Şekil 2.1). Oysa bu kirişe öngerilme verilmiş olsaydı, yani, başlangıçta kirişin kuvvet uygulanan yüzeyinde çekme ve ters tarafta ise basma gerilmeleri öngerilme işlemiyle sağlanabilseydi yük uygulandığında kirişte Şekil 2.1’ de oluşan basma ve çekme gerilmeleri oluşmayacak veya bu gerilmeler daha düşük değerde oluşacaktı, Şekil 2.2. Dolayısıyla öngerilmeli yapı elemanı nötr durumdaki yapı elemanına göre daha fazla bir yükü taşıyabilecek kapasiteye sahip olacak veya standart yük altında öngerilmeli kirişin kesiti nötr kirişin kesitinden daha küçük olacaktır. Bu durum da yapının toplam ağırlığını olumlu (azalma) yönde etkileyecek ve ekonomiklik sağlayacaktır. Zaten kirişe öngerilme vermedeki amaçlardan en önemlisi de malzemeden daha iyi bir şekilde yararlanarak malzeme sarfiyatını azaltmak, taşıyıcı sistem ve elemanlarının taşıma gücünü arttırmaktır.



Şekil 2.1. Kirişin yüksüz ve yüklü durumu



Şekil 2.2. Öngerilmeli kirişin yüksüz ve P yükü uygulanmış durumu



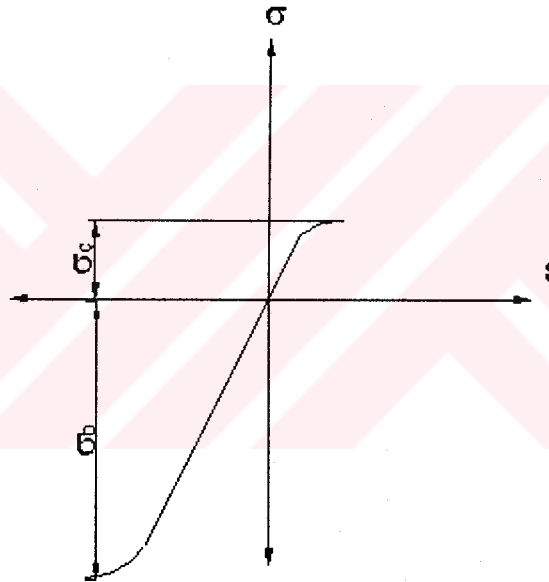
Şekil 2.3. Öngerilmeli beton yükleme durumu (1)

Öngerilmeli beton uygulamaları ile ilgili ilk düşünceler, 1886 yılının başlarında Amerika’ da gündeme getirilmişse de, bu konuyu ciddi anlamda 1930’ lu yıllarda Fransız mühendis Eugene FREYSSINET çalışmıştır. Avrupa’ da bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar ikinci dünya savaşına kadar dar bir çerçevede gerçekleşmiş olup, savaştan sonra ise bu konuyla ilgili dikkate değer yeni düşünceler ortaya atılmıştır (10).

Öngerilmeli betonun önderlerinden E. Freyssinef ön gerilmeyi şu şekilde tanımlamaktadır: “Ön gerilme, bir taşıyıcı sisteme veya elemanına, dış yüklerin yüklenmesinden önce veya bu yükleme ile aynı zamanda, yapay olarak sürekli iç zorlamaların uygulanmasıdır. Bu yapay ve sürekli iç zorlamalar öyle olmalıdır ki, dış yüklerden ileri gelen iç zorlamalarla birlikte değerlendirildiğinde oluşan toplam gerilmeler, her noktada ve göz önüne alınan bütün yükleme durumları için, malzemenin dayanabileceği gerilme sınırları içinde kalsınlar.” Bu tanımdan anlaşılacağı gibi, bir taşıyıcı sistem veya elemanına uygulanan öngerilmenin malzemeyle doğrudan bir bağımlılığı yoktur. Malzeme, yalnız dayanım sınırlarını belirler (7).

Türk Standartları Enstitüsü’ ne göre öngerilmeli betonun tanımı ise “ön gerilmeli beton, dış yüklerin etkisi altındaki bir beton yapı elemanında oluşan iç gerilmelerin yüksek mukavemetli çelik teller, çubuklar veya demetlerin beton eleman içinde, eleman hizmet yüklerinin etkisine girmeden önce, gerilip kenetlenmesi sağlanarak istenen dağılıma getirildiği yapı tekniğidir” (11).

Yapı malzemeleri arasında önemli bir konuma sahip olan betonun çekme altındaki mukavemeti basınç mukavemetinin $1/10 - 1/12$ ' si kadardır (Şekil 2.4) (12) (çelik malzemede ise çekme ve basma mukavemetleri yaklaşık aynıdır). Betonun bu kusuru, taşıyıcı bir elemanın kesitinde meydana gelen çekme gerilmelerini alacak şekilde, taşıyıcı sistemin çekme bölgelerini çelik çubuklarla donatmak suretiyle giderilmiş veya en aza indirilmiş ve “betonarme” denen kompleks bir sistem oluşturulmuştur. Beton ile çelik çubukların berber çalıştığı bu sistemde, çekme gerilmelerinin tümü çelik donatı tarafından, basınç gerilmelerinin hepsi veya önemli bir kısmı ise beton tarafından alınmaktadır (13).

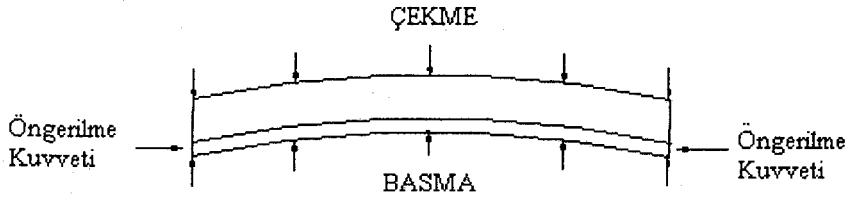


Şekil 2.4. Betonun gerilim-gerinim eğrisi (12)

Öngerilmeli beton, yüksek mukavemetli beton ile yüksek mukavemetli çeliği “aktif” bir tarzda bir araya getirir. Elastik sınırlar içinde oldukça yüksek oranda gerilen çeliğin etkisiyle, yapı elemanında enerji depolanır. Bu enerji yapı elemanının alt kısmında sıkışma meydana getirir, hafif bir ters sehim oluşturur, Şekil 2.5 (14). Sonuçta öngerilme ile betonun zayıf çekme dayanımından doğan olumsuzluk giderilir.



Şekil 2.5. Öngerilmeli beton (14)



Şekil 2.6. Öngerilmede kuvvetin çift taraflı etkisi (14)

Öngerilmede çok önemli olan bir hususta, çeliğin elastik bölge sınırları içerisinde gerilmesidir. Böylece gerilimin uygulanması boyunca çelik malzeme elastik olarak deformasyona uğrayacak (şekil değiştirecek), gerilimin kaldırılmasıyla da absorbe etmiş olduğu enerjiyi geri vererek eski şekline dönmeye çalışacaktır. Çelik malzeme eski şekline dönmeye çalışırken, sertleşmiş beton buna izin vermeyecek ve böylece yapıda öngerilme oluşacaktır.

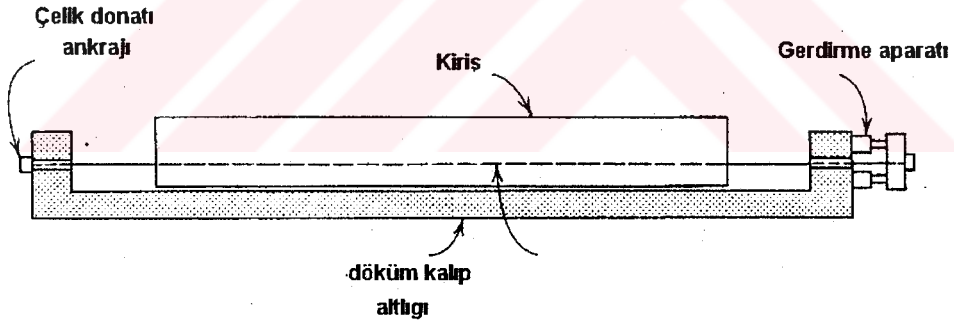
Şekil 2.6' da görüldüğü gibi, kirişte oluşturulan öngerilme sonucunda yukarı doğru basma kuvvetleri oluşacak, bu oluşan kuvvetler kirişin kendi ağırlığını taşımak zorunluluğunu ortadan kaldıracak ve kirişin uzunluğu boyunca oluşan bu kuvvet, kirişe uygulanan yüklere de karşı koyacaktır.

2.1. Öngerilmeli Beton Üretimi

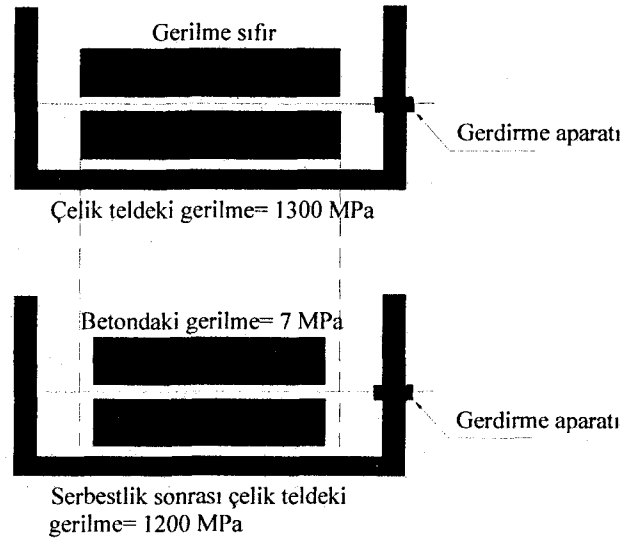
Öngerilmeli beton üretimi iki şekilde yapılır:

a) Önceden öngerme metodu

Bu yöntemde, betonarme yapıdaki çelik donatı Şekil 2.7' de gösterildiği gibi tek taraftan ankrajlanır ve diğer taraftan germe aparatı (jack) vasıtasıyla akma noktası aşılmayacak şekilde gerdirilir. Beton karışım gerili durumdaki çelik donatının bulunduğu kalıba dökülür. Beton sertleştikten sonra gerili haldeki çelik donatı serbest bırakılır (10). Öngerme çeliği ile beton arasındaki aderans sayesinde çeliğe önceden verilmiş öngerilme betona aktarılmış olur. Bu yöntem, sadece prefabrike elemanlarda kullanılır (15). Bu metodun olumlu tarafı, öngerme çubukları ile beton arasında iyi ve düzgün bir aderansın sağlanabilmesidir (10).

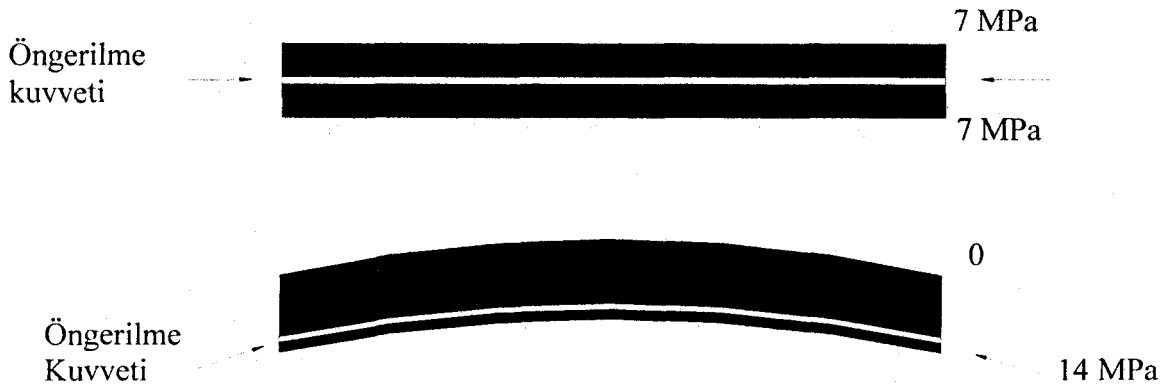


Şekil 2.7. Önceden öngerme metodu (10)

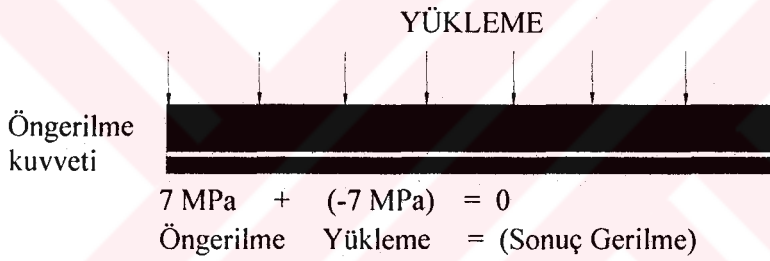


Şekil 2.8. Öngerilmeli beton kiriş üretim yöntemi (14)

Şekil 2.8’ de görüldüğü gibi gerilim uygulanmayan yüksek mukavemetli bir çelik demetine, elastik limiti sınırları içinde, yaklaşık olarak 1300 MPa’ lık bir gerilme uygulanacak olursa çelik malzemenin, elastik deformasyon sonucu, boyunda uzama gerçekleşecektir. Eğer uygulanan bu gerilim kaldırılacak olursa çelik başlangıçtaki uzunluğuna geri dönebilecektir. Ancak gerilmiş çelik demetinin etrafına beton dökülür ve gerekli mukavemete erişince kuvvet ortadan kaldırılırsa, beton ile çelik demeti arasında doğan aderans (yapışma) nedeniyle, beton, çelik demeti tutar. Böylece öngerilme kuvveti aderans aracılığıyla betona aktarılır. Sonuçta beton, gerilmiş demetin kısalma eğilimine direnç gösteren bu kuvveti bünyesine aldığından, bir miktar boyca kısalır. Beton şimdi “ÖNGERİLMELİDİR”. Beton kısalırken çelikte onunla birlikte kısalır. Dolayısıyla çelikte gerilme bir miktar azalarak yaklaşık 1200 MPa mertebesine düşer. Zamanla beton içerisinde, sünme ve büzülme gibi diğer hacim değişiklikleri, çelikte ise bir miktar gevşeme meydana geleceğinden, nihai çelik gerilmesi, yaklaşık 1000 MPa mertebesine inecektir (14).



Şekil 2.9. Orta eksenenden ve kesitin alttan 1/3'üne öngerilme uygulanma durumu (14)



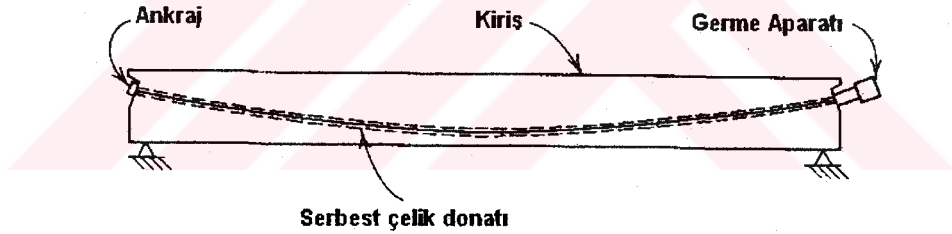
Şekil 2.10. Alttan 1/3'üne öngerilme uygulanmış olan kirişin yüklenmiş hali (14)

Şekil 2.9' da iki kiriş görülmektedir. Altta görülen kirişte öngerilme kuvveti kesitin alttan itibaren 1/3'üne verilmiştir. Üstteki kirişin her iki tarafında 7 MPa'lık bir gerilme elde edilirken, alttaki kirişin üst kısmında sıfır, alt kısmında ise üstteki kirişin 2 katı (14 MPa) olarak oldukça fazla bir basma gerilmesi elde edilmektedir. Elde edilen bu basma gerilmesi, işletme yüklerinden kaynaklanan çekme gerilmelerini dengeler. Şekil 2.10' da ise Şekil 2.9' da görülen alttaki kirişin üst kısmına yük uygulandıktan sonraki durumu gösterilmektedir. Uygulanan yük ve kirişin ağırlığı üst kısımda basma gerilmelerini alt kısımda ise çekme gerilmelerini meydana getirir. Kirişe uygulanan dış yük ile kirişin ağırlığından kaynaklanan toplam yükleme 14 MPa olsun. Bu durumda öngerme kuvvetinin oluşturduğu gerilme değerlerini karşılaştırdığımızda, kirişin tabanındaki gerilmenin sıfır olduğu açıktır. Böylece kirişin maruz olduğu yüklerden dolayı oluşan gerilmeleri karşılayacak bir öngerilmenin oluşturulduğu söylenebilir (14).

b) Sonradan Öngerme Metodu

Sonradan öngerme metodunda, çelik donatı telleri (kablolar) çelik donatı ile betonun ilk etapta aderansını (yapışmasını) önlemek amacıyla kılıf olarak adlandırılan fleksibl bir boru içerisinde serbest halde kalıba yerleştirilir ve daha sonra beton karışımı kalıba dökülür. Beton sertleştikten sonra çelik donatı demeti gerdirilir ve uç kısımlar ankrajlanır (10). Germe işlemi bittikten sonra enjeksiyon boruları vasıtasıyla kılıfla çelik donatı arasına ;

- Aderansı sağlayan ve çelik donatıyı korozyona karşı koruyan özel çimento harcı,
- Yalnız donatıyı korozyona karşı koruyan fakat aderansı temin etmeyen, bir yağ veya benzeri bir madde enjekte edilir (13).



Şekil 2.11. Sonradan Öngerme metodu (10)

2.2. Öngerilmeli Betonun Avantajları

1. Yüksek kaliteli çelik ve betonun beraber kullanılması ve bu sayede ağırlığın azaltılarak büyük açıklıkların ekonomik olarak geçilebilmesi,
2. İç kuvvetlerin istenildiği durumda olmasını temin edebilmek ve bu sayede sehimleri istenilen mertebede tutabilmek ve çatlama durumuna hakim olabilmek,

3. Sonradan germe metodu ile;

- a) Sonradan germe işlemini kademeli yaparak kesitlerde dolayısıyla yapıda önemli ekonomi sağlamak,
- b) Prefabrik elemanları birleştirmek,
- c) Derin vadilerdeki köprü inşaatlarında büyük ekonomi sağlayan yeni yapım metotlarına imkan vermek (13).

Sonuç olarak betonarme yapı elemanlarına öngerilme verilmesiyle bir çok avantaj elde edilmekte olup, bu avantajların her birisi de ekonomikliği beraberinde getirmektedir. Dikkat edilmesi gereken önemli bir husus da çelik konstrüksiyon yapılarıdır. Çünkü günümüzde birçok yapı çelik konstrüksiyon olarak inşa edilmektedir. Dolayısıyla öngerme tekniğinin çelik konstrüksiyon sektörüne de girmesi gerekmektedir. Eğer öngerilmeli çelik kiriş üretimi gerçekleştirilebilirse, öngerilmeli yapıların betonarme yapılar için sağladığı avantajlar çelik konstrüksiyon yapılarda da elde edilebilir. Bu düşünceden yola çıkılarak çelik konstrüksiyon yapı sistemlerinde kiriş olarak kullanılan I-putrellere öngerilmenin verilip verilmeyeceğini, verilebilse bunun yönetimi ve sağlayacağı avantajlar bundan sonraki bölümlerde tartışılacaktır.

3. YAPI MALZEMESİ OLARAK ÇELİK VE KAYNAKLI BİRLEŞTİRİLMESİ

Öngerilme uygulanarak üretilen betonarme yapı elemanlarında elde edilen avantajlar ve bu avantajların özellikle ekonomiklik yönünden sağladığı faydalara Bölüm 2' de değinilmiştir. Benzer tekniğin kullanılması ile ön gerilmeli çelik I- kirişlerin üretilmesi de özellikle çelik konstrüksiyon binalar, köprüler, vinçler vb. yapılarda büyük ekonomik kazançlar sağlayacaktır. Öngerilmeli çelik yapıların üretimi ile kesitte sağlanacak azalma, standart çelik yapılara göre toplam ağırlıkta bir azalma meydana getirecek sonuçta maliyet düşecektir. Çizelge 3.1' de öngerilmeli ve standart kirişlerden elde edilen bir kafes yapıdaki kazançlar görülebilmektedir. Ayrıca Çizelge 3.2' de ise öngerilmeli çelik yapılarda elde edilen kazançlar görülmektedir.

Çizelge 3.1. Sırasıyla 24, 30, 36 m. açıklıklı ve 2400 N/m^2 dış yüklü kafes kirişlerde sağlanan ağırlıkça ekonomi (7)

Açıklık(m)	Kafes Şekli	Çelik Ağırlığı (kg)	Kablo Ağırlığı (kg)	Toplam Ağırlık (kg)	Ağırlıkça Kazanç (%)
24		4110	-	4110	0
24		2860	410	3270	21
30		5870	-	5870	0
30		3940	640	4580	22
36		8660	-	8660	0
36		6068	864	6932	20

Çizelge 3.2. Öngerilmeli çelik yapının standart çelik yapıya göre % ekonomikliği (7)

Yapı Türü	Çelikte Ağırlıkça Ekonomi (%)	Maliyet Ekonomisi (%)
Dolu gövdeli kirişler	10-20	8-12
Kafes kirişler($l < 30$ m.)	5-10	2-5
Kafes kirişler($l = 30-40$ m.)	10-20	5-10
Kafes kirişler($l = 40-60$ m.)	10-45	7-20
Çerçeve ve kemerler($l = 30,60$ m)	20-55	10-30

Demir ve çelik insanlık tarihinde çok eski devirlerden beri bilinmekle beraber, geniş ölçüde üretilmediğinden, iki yüzyıl öncesine kadar sadece silah ve eşya yapımında kullanılabilmektedir. 18. yy.' da İngiltere'de yüksek fırınların kullanılmasıyla geniş ölçüde ham demir ve dökme demir üretime geçilmiş, böylece demirin yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi olanağı belirmiş ve demir malzeme kullanılarak inşa edilen ilk mühendislik yapıları köprüler olmuştur.

Çelik üretiminde kullanılan teknolojideki gelişmeler sonucunda kaliteli çelik malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Ayrıca metalurji bilimindeki ilerlemeler aracılığıyla çok yüksek kalitedeki çeliklerin üretimi de gerçekleştirilmiş ve kopma mukavemeti 1600 N/mm^2 ' ye varan çelik kablolar üretilenmiştir. Böylece de 1000 m.' yi aşan asma köprüler inşa edilmiştir (16).

3.1. Çelik Yapılarda Kullanılan Genel Yapı Çelikleri

Çelik yapılarda başlıca malzeme olarak st-37, st-42, st-46, st-52 çeliğinden imal edilen hadde profilleri kullanılmaktadır. Genelde mühendislik alanında normal kalitede olan st-37 çeliği kullanılır. Bazı durumlarda ticari çelik olan yapı çeliği de kullanılır. Çelik köprülerde ise st-37 ve st-52 çelikleri kullanılır. Çizelge 3.3' de TS 648' e göre yapı çelikleri için emniyet gerilmeleri verilmiştir.

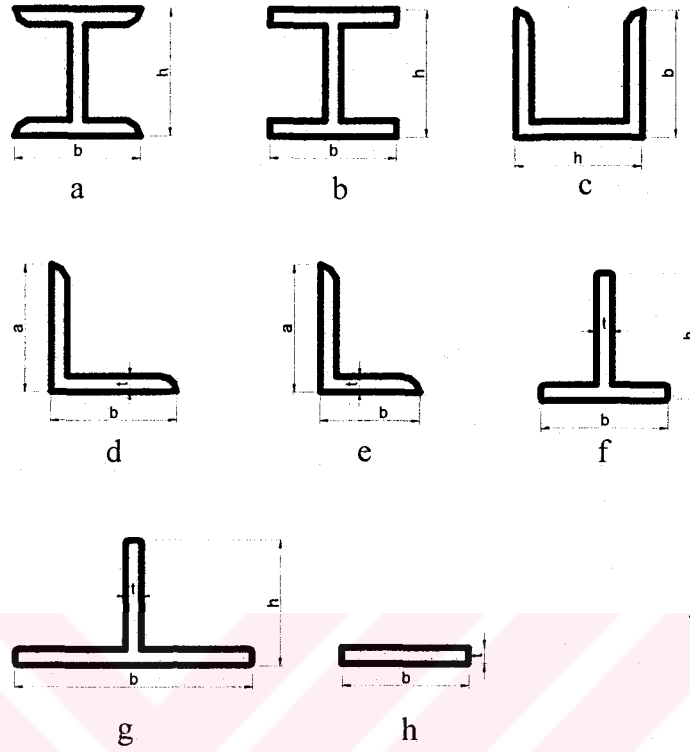
Çizelge 3.3. Yapı Çelikleri İçin Emniyet Gerilmeleri (17) (T.S 648)

YapıÇeliği	Akma Dayanımı		Basma Eğilme Çekme Emniyet Gerilmesi(EY)		Kayma Emniyet Gerilmesi(EY)	
	Kgf/cm ²	N/mm ²	Kgf/cm ²	N/mm ²	Kgf/cm ²	N/mm ²
Fe 33	1900	186	1140	112	658	65
Fe 34	2100	200	1360	124	720	71
Fe 37	2400	235	1440	141	831	82
Fe 42	2800	255	1500	153	900	88
Fe 46	2900	284	1740	171	1005	99
Fe 50	3000	294	1830	177	1030	102
Fe 52	3600	333	2160	212	1247	122
Fe 60	3400	333	2040	200	1178	116
Fe 70	3700	363	2220	218	1282	126

Yapı çelikleri Alman Normu olan DIN 'e göre st olarak adlandırılır. TSE' ye göre ise, yapı çelikleri Fe olarak adlandırılır. St-37 veya Fe-37 gösteriminin anlamı, malzemenin minimum çekme gerilmesinin 37 kgf/mm² (370 N/mm²) olduğudur (17).

3.1.1. Hadde mamulü malzemeler

Çelik yapılarda kullanılan hadde mamulü malzemeler Şekil 3.1' de gösterilmiş olup, bu malzemelere ait teknik özellikler Çizelge 3.4' te verilmiştir.



Şekil 3.1. Hadde mamülü malzemeler (14), a)Normal I profil b) IPB/IP/IPBL profil c) U profil d)Eşit kenar köşebent e) Çeşit kenar köşebent f) Yüksek gövdeli T profil g) Geniş ayaklı T profil h) Lamalar

Çizelge 3.4. Standart profillere ait ölçü boyları (17)

	a(mm)	b(mm)	H(mm)	T(mm)	l(m)	Açıklamalar
I-Profil	-	42-215	80-600	-	4-15	Kiriş ve kolon olarak kullanılır.
IPB/IP/IPBL	-	100-300	100-1000	-	4-15	Kiriş ve kolon olarak kullanılır.
U profil	-	15-110	30-400	-	4-15	Basınç çubuğu, kolon veya kiriş olarak kullanılır.
Eşit kenarlı köşebent	20-200	20-200	-	3-28	3-15	Kafes sistemlerinde örgü çubuğu, başlık çubuğu ve kolon olarak kullanılır
Çeşit kenarlı köşebent	20-200	20-90	-	5-11	3-15	Kafes sistemlerinde örgü çubuğu, başlık çubuğu ve kolon olarak kullanılır.
Yüksek gövdeli T profil	-	20-140	20-140	3-15	3-15	Hafif çelik konstrüksiyonlarda alt ve üst başlık çubuğu olarak kullanılır.
Geniş ayaklı T profil	-	60-200	30-100	3-15	3-12	Hafif çelik konstrüksiyonlarda alt ve üst başlık çubuğu olarak kullanılır.
Lamalar	-	12-150	-	5-60	3-15	T'= 0-5 mm ise silme olarak adlandırılır.
Platina	-	160-1250	-	>10	2-6	
Levha	-	160-1250	-	≤10	2-6	
Sac	-	160-1250	-	≤3-5	2-6	
Teneke	-	160-1250	-	≤0,25	2-6	

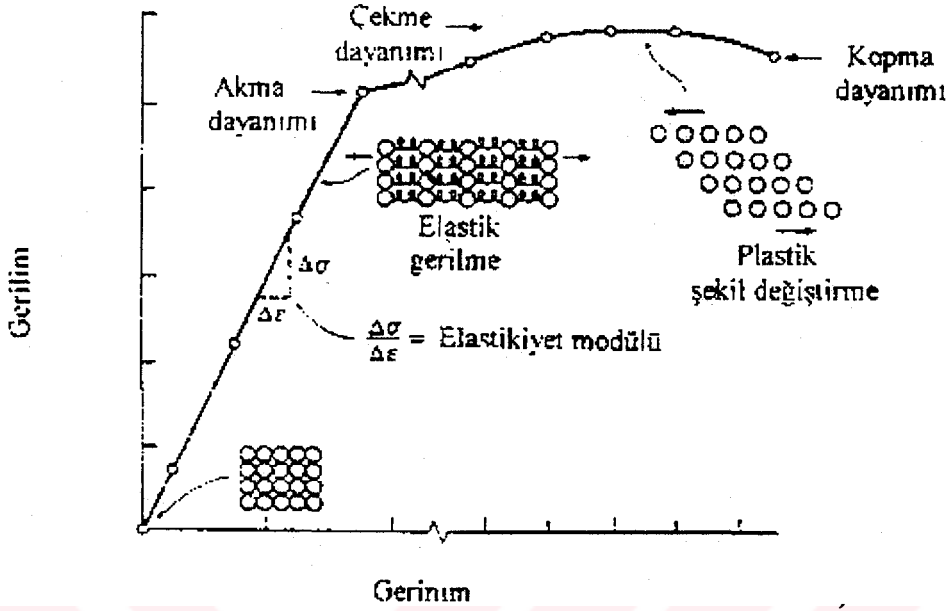
3.1.2. Döküm mamulü malzemeler

- Çelik dökümler: genellikle mesnet levhası olarak
- Islah çeliği: Mesnet rulosu ve mafsallarda
- Gri döküm: özel mesnet levhası olarak kullanılır (17).

Bilindiği üzere çelik malzemelerin birçok özellikleri çeşitli ısı ve mekanik işlemlerle istenilen yönde değiştirilebilmektedir. Çelik malzemenin sahip olduğu bu özellikler diğer mühendislik malzemelerinin çoğunda az rastlanır bir özelliktir. Ayrıca çelik malzemelerin çekme deneyleri sonucunda elde edilen σ - ϵ grafikleri incelendiğinde akma, çekme, kopma noktaları ile elastik deformasyon, plastik deformasyon bölgeleri ve elastikiyet modülü gibi çelik malzemenin birçok mekanik özellikleri hakkında gerekli verilere ulaşabiliriz. Öngerilmeli I-putrel üretiminde de bu mekanik özellikler belirleyici olduğundan, çelik malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde durmak faydalı olacaktır.

3.2. Metal Malzemelere Ait Bazı Mekanik Özellikler

Çekme deneyinin yapılmasının amacı, malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik davranışlara göre sınıflandırılmasıdır. Çekme deneyi ise, ilgili standartlara göre hazırlanan deney örneğinin, tek eksen ve sabit bir hızda koparıncaya kadar çekilmesi işlemidir (18). Şekil 3.2' de metal malzemeler için tipik bir gerilim(σ)-gerinim(ϵ) eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.2. Metal malzemeler için tipik bir gerilim-gerinim eğrisi (19)

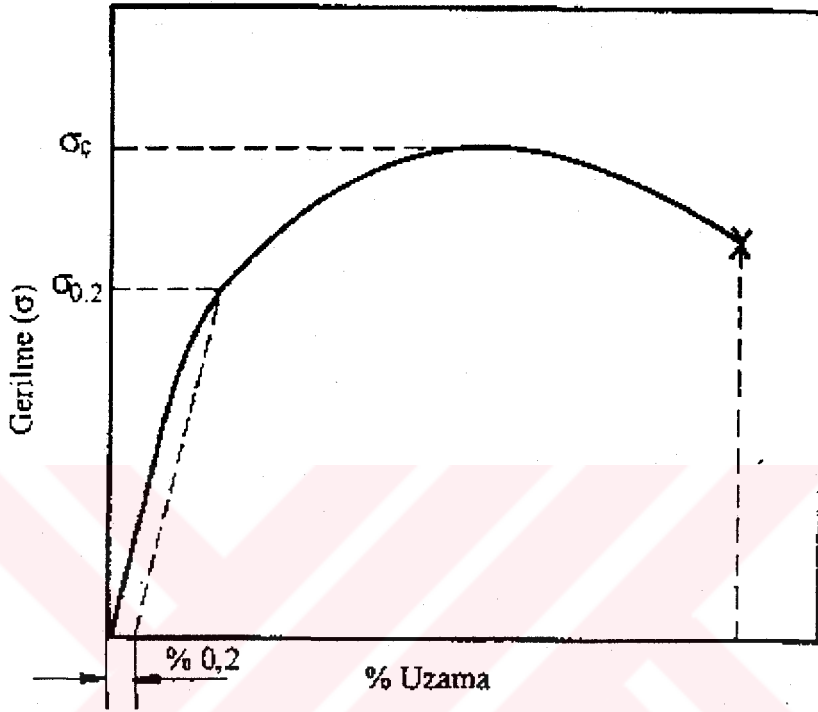
Şekil 3.2' nin incelenmesi sonucunda malzemeye uygulanan işlemlerden önce, akma dayanımının bilinmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

3.2.1. Akma dayanımı (σ_a)

Akma dayanımı, kaymanın fark edilir ve etkili olduğu durumdaki gerilmedir. Kullanım esnasında, uygulanan kuvvete dayanabilecek parçalar tasarlanıyorsa, parçaların plastik olarak şekil değiştirmediklerinden emin olunmalıdır (19, 20). Uygulanan gerilim akma dayanımının altında ise malzemede elastik deformasyon gerçekleşecek, kalıcı şekil değişikliği meydana gelmeyecektir. Bu nedenle oluşturulmak istenen deformasyona bağlı olarak malzemelere, akma dayanımlarının üstünde veya altında gerilme uygulanmalıdır.

Bazı malzemelerde elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gerilimi kolaylıkla tespit edilemez. Bu durumda deneme akma gerilimi belirlenir. %0,2'lik % uzamanın parçada plastik deformasyona neden olmadığı kabul edilir. %0,2'lik deneme % uzaması ile gerilim-% uzama eğrisinin başlangıç kısmına paralel bir çizgi

izilir ve gerilim-% uzama eęrisini kestięi nokta %0,2'lik deneme akma gerilimi olarak belirlenir (18-20).



Şekil 3.3. Belirgin akma göstermeyen malzemenin akma dayanımının belirlenmesi (18)

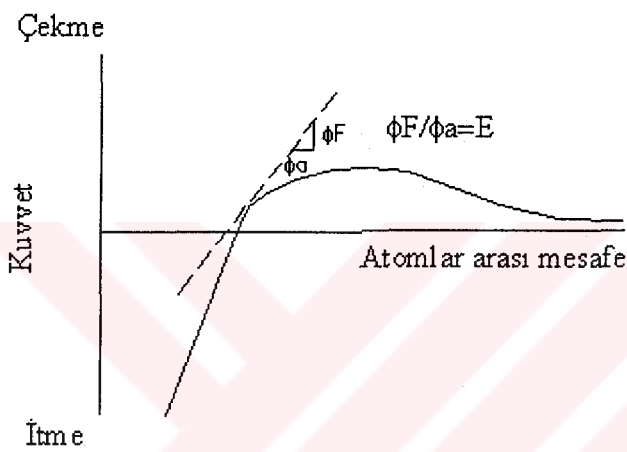
3.2.2. Çekme dayanımı (σ_c)

Bir malzemenin kopmadan veya kırılmadan dayanabileceği en yüksek gerilme çekme gerilmesi olarak adlandırılır. Bu gerilme çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeridir (Şekil 3.2) (18). En yüksek kuvvetle elde edilir. Çekme dayanımına ulaşıldığında malzemede bölgesel kesit daralması başlar ve boyun verme gerçekleşir. Çekme dayanımları malzeme davranışlarının belirlenmesinde kullanışlı olmasına karşın, malzeme seçimi veya imalatı için nispeten önemsizdir. Akma dayanımı ise oldukça önemlidir. Çünkü metalin kalıcı şekil değiştirip değiştirmeyeceğini belirleyen bir faktördür (19).

3.2.3. Elastikiyet modülü (E)

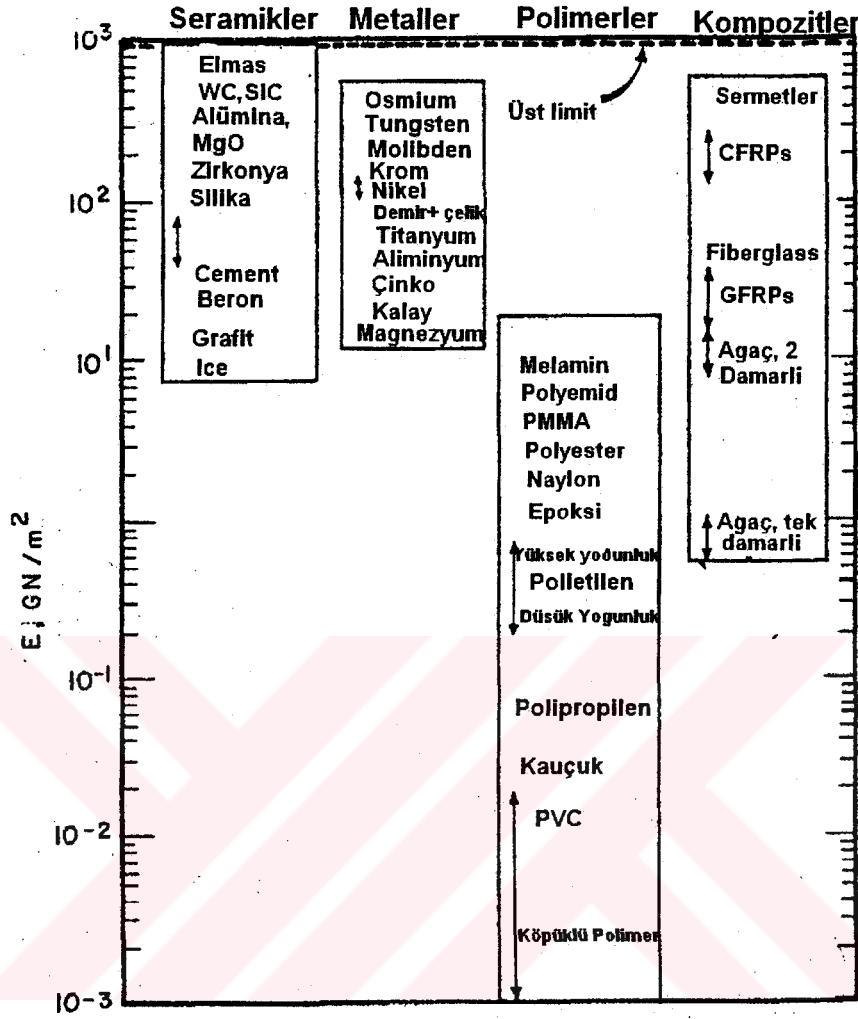
Elastikiyet veya Young modülü elastik bölgedeki gerilim-gerinim eğimidir. Bu ilişki Hooke kanunu olarak ifade edilir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \text{Elastikiyet modülü}$$



Şekil 3.4. Kuvvet-atomlar arası aralık eğrisi eğiminin, elastikiyet modülü ile ilişkilendirilmesi (19)

Kuvvet-atomlar arası aralık diyagramında, denge aralığında dik eğim, atomları ayırmak ve metali elastik olarak gerdirmeyi sağlamak için büyük kuvvet gerektiğini gösterir. Bu nedenle metal yüksek elastikiyet modülüne sahiptir denir (16).



Şekil 3.5. Bazı malzemeler için elastikiyet modülü verileri (21)

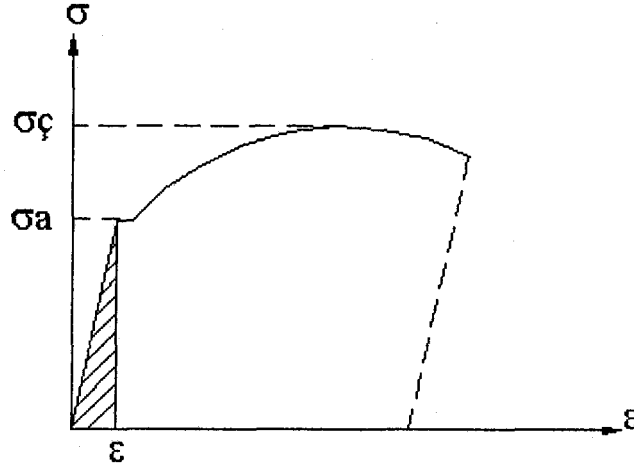
Şekil 3.5’ te farklı sınıflardan malzemelerin elastikiyet modülleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. En yüksek elastikiyet modülüne, kovalent bağlı, elmasın sahip olduğu görülmektedir. Atomlar arası bağ enerjisi malzemenin ergime noktasını ve young modülünü etkilemektedir. Metaller yüksek bağ enerjisine sahip olduklarından dolayı yüksek ergime derecesine ve yüksek elastikiyet modülüne sahiptirler (21). Elastikiyet modülü aynı zamanda malzemenin rijitlik ölçüsüdür. Yüksek elastikiyet modüllü rijit malzeme, elastik yükleme altında boyut ve şeklini korur (19).

Çizelge 3.5. Çok kristalli metallerin Elastik Modülü, Kesme Modülü ve Possion oranı (21)

Metal (20 °C)	E (GPa)	τ (Gpa)	ν
Alüminyum	70,3	26,1	0,345
Kadmiyum	49,9	19,2	0,300
Krom	279,1	115,4	0,210
Bakır	129,8	48,3	0,343
Altın	78,0	27,0	0,440
Demir	211,4	81,6	0,293
Magnezyum	44,7	17,3	0,291
Nikel	199,5	76,0	0,312
Niyobyum	104,9	37,5	0,397
Gümüş	82,7	30,3	0,367
Tantal	185,7	69,2	0,342
Titanyum	115,7	43,8	0,321
Tungusten	411,0	160,6	0,280
Vanadyum	127,6	46,7	0,345

3.2.4. Rezilyans modülü

Malzemenin yalnız elastik şekil değiştirmesi için harcanan enerji veya elastik şekil değiştirme sırasında malzemenin depolandığı enerji olarak tanımlanır. Rezilyans modülü elastik deformasyon bölgesinin alanına eşittir ve numune kırılınca bu enerji geri verilir (18, 20).



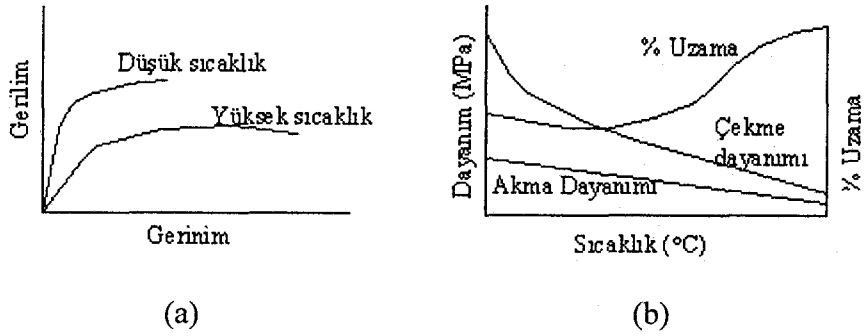
Şekil 3.6. Gerilim- % uzama eğrisi

$$\text{Taralı alan} = \text{Rezilyans Modülü} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2}$$

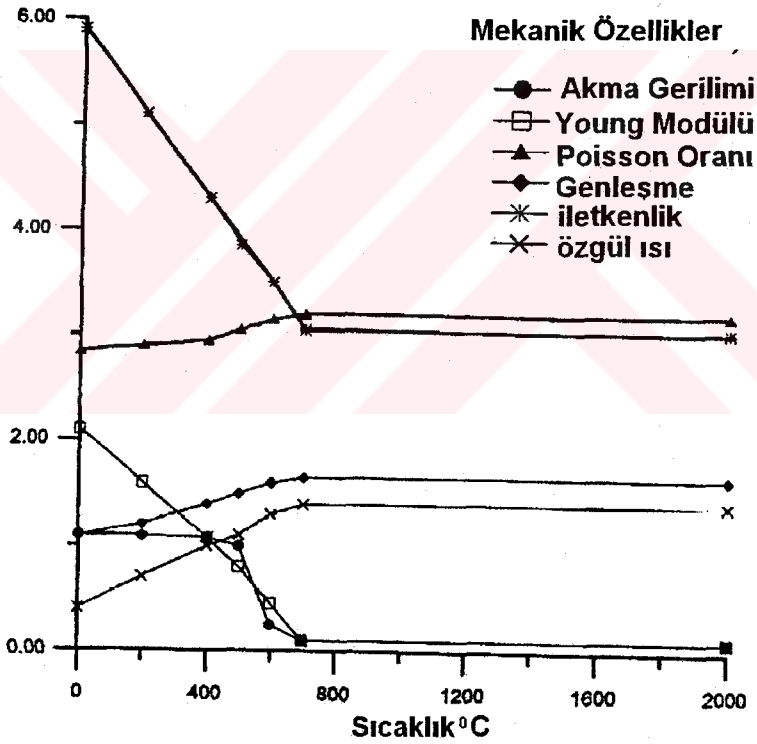
$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon} \quad \varepsilon = \frac{\sigma_a}{E}$$

$$\text{Rezilyans Modülü} = \frac{\sigma_a}{2} \times \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma_a^2}{2E}$$

Malzemelerin çekme deneyi ile elde edilen, bir kısım mekanik özellikleri, malzeme seçiminde ve malzemeye uygulanacak gerilimlerin belirlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılır. Fakat malzemelere ait bu çekme özellikleri ısı tarafından önemli ölçüde etkilenir. Akma dayanımı çekme dayanımı ve elastikiyet modülü yüksek sıcaklıklarda azalma gösterir (19,20). Bu nedenle malzemeye uygulanacak gerilmelerin belirlenmesinde çalışma şartları dikkatli bir biçimde incelenmelidir.



Şekil 3.7. Sıcaklığın (a) gerilim-% uzama eğrisi (b) çekme özellikleri üzerine etkisi (19, 22)

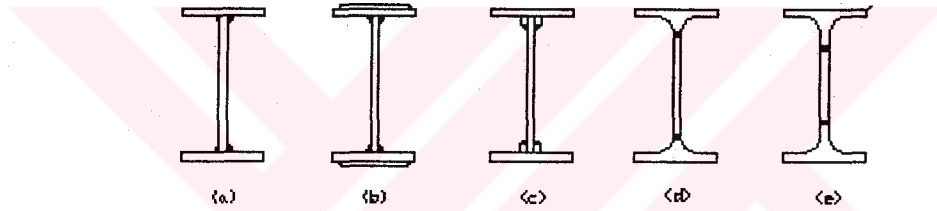


Şekil 3.8. Sıcaklıkla malzeme özelliklerindeki değişim (23, 24)

3.3 Kaynak Konstrüksiyonlu I-Putrel Üretim Tekniği

Çelik konstrüksiyon yapıların vazgeçilmez yapı elemanlarında biriside I-putrellerdir. I-putreller dar başlıklı, geniş başlıklı (IP-profilleri), IPB profilleri ve IPE profilleri olmak üzere farklı boyutsal ölçülere sahip olabilirler.

I-putrellerin kaynaklı birleştirme ile üretimi iki şekilde gerçekleştirilebilir. Birincisinde başlık levhaları köşe kaynağı ile bir gövde levhasına birleştirilir, (Şekil 3.9.a-b). İkinci yöntemde ise özel başlık profilleri gövde levhasına köşe veya küt alın kaynağı ile birleştirilebilir (Şekil 3.9.c-d-e) (25).



Şekil 3.9. I-Putrel üretiminde başlık ve gövde levhalarının birleştirilmesi tekniği (25)

I-Putrellerde başlık levhalarının kalınlığı DIN 4100 normuna göre 30 mm ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca L kiriş açıklığı ve h'da kiriş yüksekliği olduğuna göre genişliklerinde

$$b = \left(\frac{1}{25} \sim \frac{1}{60} \right) L \text{ veya } b = (0,20 \sim 0,45) h \text{ olması gerektiği belirtilmiştir (25).}$$

I-putrelleri oluşturan başlık ve gövde levhaları günümüzde gaz altı kaynak yöntemleri ile birleştirilmektedir. Çünkü gaz altı kaynak yöntemleri sürekli elektrod teli besleme ünitelerine sahip olup, elektrod değiştirme zamanını ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca elektrodun süreklilik göstermesi sayesinde kaynak dikişleri durmadan çekilebilmektedir. Yine kaynak dikişi üzerinde curuf oluşmaması, elektrik ark kaynağına göre sıçramaların az olması bu yöntemin tercih edilme nedenlerinden bazılarıdır (26).

Sonuçta I-putrel üretiminin kaynak yöntemiyle gerçekleştirilmekte olduğu yukarıdaki açıklamalardan anlaşılmaktadır. Kaynak işlemi sonucunda ise malzeme bünyesinde kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Yapıda oluşan bu kalıntı gerilmelerden ön gerilmeli I-putrel üretiminde yararlanılacağından kalıntı gerilmelerin nedenlerinin ve etkilerinin bilinmesi faydalı olacaktır.

3.3.1. Kaynakta kalıntı gerilmelerin oluşumunun nedenleri

Kaynak sırasında oluşan yüksek ısı metalin genleşmesine neden olmaktadır. Soğuma sonucunda ise malzeme tekrar eski haline dönmeye çalışacak ve kendini çekecektir (büzülecektir). Metal malzemenin bünyesinde ısınmayla meydana gelen genleşme ve soğumayla oluşan büzülme kombinasyonu her kaynak işleminde mevcuttur. Bu kombinasyon kaynak işlemi sonunda yapıda gerilmelere sebep olur (27). Kalıntı gerilmeler, bir yapıda tüm yükler kaldırıldığı zaman ortaya çıkan gerilmelerdir (28). Ayrıca malzemedeki sıcaklık artışı ile malzemenin genleşmesinin engellenmesi durumunda da ortaya çıkar (29).

Kalıntı gerilmeler yapıda önceden var olan gerilmelere bağlı olmayıp, asıl dış yüklemeler sonucunda oluşmaktadır. Sıcaklığın değiştirilmesiyle yapıda homojen olmayan kalıntı gerilmeler oluşur. Yapıda oluşan bu gerilmelerin nedeni termal gerilimlerdir. Termal gerilimler genellikle birim alana ani yük veya ısı gönderilmesiyle oluşur.

Metal yapılarda kalıntı gerilmeler birçok işleme tekniklerinden sonra oluşabilir; döküm, sıcak haddeleme, kıvrırma, alevle kesme ve kaynak işlemleri bu tekniklere örnek olarak verilebilir (30).

3.3.1.1. Kaynak sırasında oluşan ısı gerilmeler ve bu gerilmeler sonucu oluşan kalıntı gerilmeler

Kaynak işlemi sırasında ısı kaynağından, sıcaklık dağılımının üniform olmamasından ve kaynak ilerleme yönünün değişmesinden dolayı kaynak metalinin çevresi ısınmıştır. Oluşan ısıl çevrim sırasında birleşme yerinde ve kaynak metalinde kompleks geçici ısıl gerilmeler üretilmiştir (30).

a) Serbest uzama



Çubuk boyu L
Sıcaklık T_0



Sıcaklık T
Çubuk boyu $L = L_0(1 + T_\alpha)$

b) Boyuna genleşme önlenmiş



Sıcaklık $T = T_0 + T_\alpha$
Boy $L = L_0$

$$L_\alpha = L_0 \times T_\alpha$$

$$\text{Isıl Genleşme : } L_\alpha / L_0 = L_0 \times T_\alpha / L_0 = T_\alpha$$

$$\varepsilon = T_\alpha = \sigma / E$$

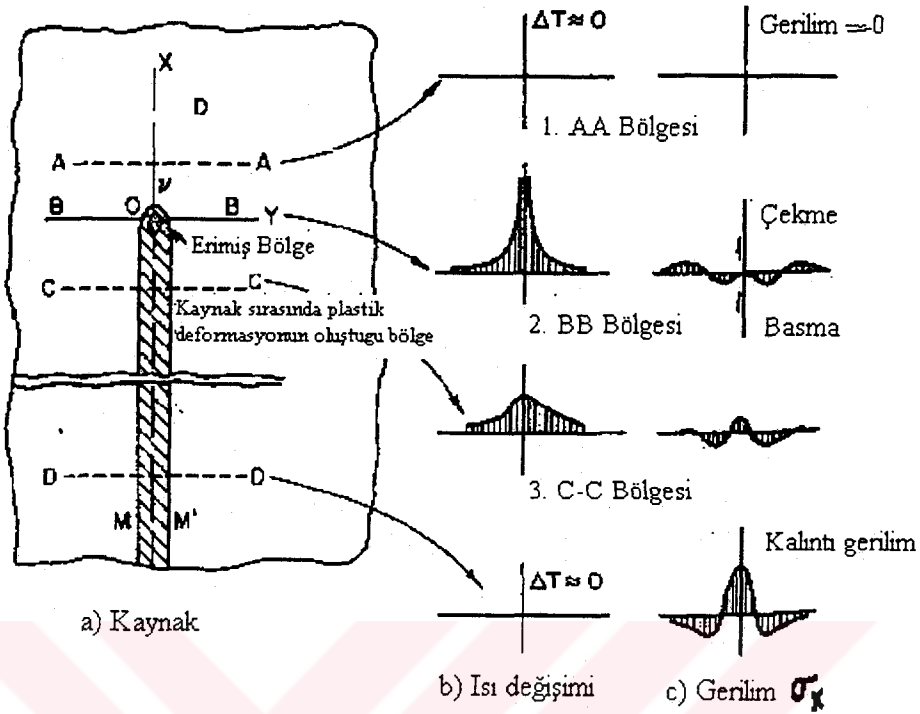
$$\sigma = E \times T_\alpha, E = 2,45 \text{ N/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (çelik için)}$$

Çubuk $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ' a kadar ısıtılırsa

$$\sigma = 100 \times 0,245 = 245 \text{ N/mm}^2$$

Bu değer Fe-37' nin akma dayanımından yüksektir.

Şekil 3.10. Isıl genleşmesi önlenmiş çubukta oluşan zorlamalar (31)



Şekil 3.11. Kaynak sırasındaki sıcaklık ve gerilim değişiminin şematik olarak gösterimi (28)

Şekil 3.11' de ince bir levha üzerine x-ekseni boyunca yapılan kaynak dikişi görülmekte olup, ayrıca kaynak sırasında oluşan gerilme ve sıcaklık değişimi de şematik olarak gösterilmektedir. V hızıyla hareket eden kaynak arkı, O ile gösterilen orijindedir. Şekil 3.11.- a' daki M-M' ile verilen taralı alan, kaynaktaki ısı çevrimi sırasında oluşan plastik deformasyonun olduğu bölgedir. O orijini yakınındaki elips metalin erimiş halde bulunduğu kaynak bölgesini gösterir. Taralı alanın dışındaki alan, kaynak sırasındaki ısı çevrimi esnasında elastik kalır.

Şekil 3.11.-b farklı kesit bölgeleri boyunca sıcaklık dağılımını gösterir. A-A bölümü boyunca, yani kaynak arkının ilerisinde, kaynak nedeniyle oluşan sıcaklık değişimi (ΔT) sıfır kabul edilir. Kaynak arkını kesen B-B boyunca, sıcaklık dağılım eğrisi oldukça diktir. Kaynak arkının biraz gerisinde bulunan C-C bölgesi boyunca sıcaklık dağılımının değişimi, B-B bölgesine göre, daha az diktir. Kaynak arkının oldukça gerisinde bulunan D-D bölümü boyunca sıcaklık dağılımı yine sıfır kabul edilir.

A-A bölümü boyunca kaynak nedeniyle oluşan termal gerilmeler yaklaşık sıfırdır. B-B bölümü boyunca oluşan gerilmelerin dağılımı şekil 3.11.-c' de gösterilmiştir. Kaynak arkının altındaki bölgelerde gerilmeler, ergimiş metalin yükleri karşılayamamasından dolayı, yaklaşık sıfırdır. Arktan biraz uzakta bulunan bölgelerdeki gerilmeler, düşük sıcaklıktaki metalin bu alanların genişlemesini sınırlandırmasından dolayı, basma şeklindedir. Bu alanların sıcaklıklarının çok yüksek olmasının yanında, bu alanlardaki gerilmeler ana metalin, karşılık gelen sıcaklık değerleri için elde edilen, akma dayanım değerleri kadar yüksektir. Basma gerilmelerinin büyüklüğü kaynaktan uzaklaşma mesafesinin artmasıyla veya sıcaklığın düşmesiyle bir maksimum değere yaklaşır. Bununla beraber, kaynak arkından uzak alanlardaki gerilmeler kaynağa yakın alanlardaki çekme gerilmeleri ile dengededir. Şekil 3.11.-c' de bu durum, B-B bölgesi boyunca gösterilmiştir.

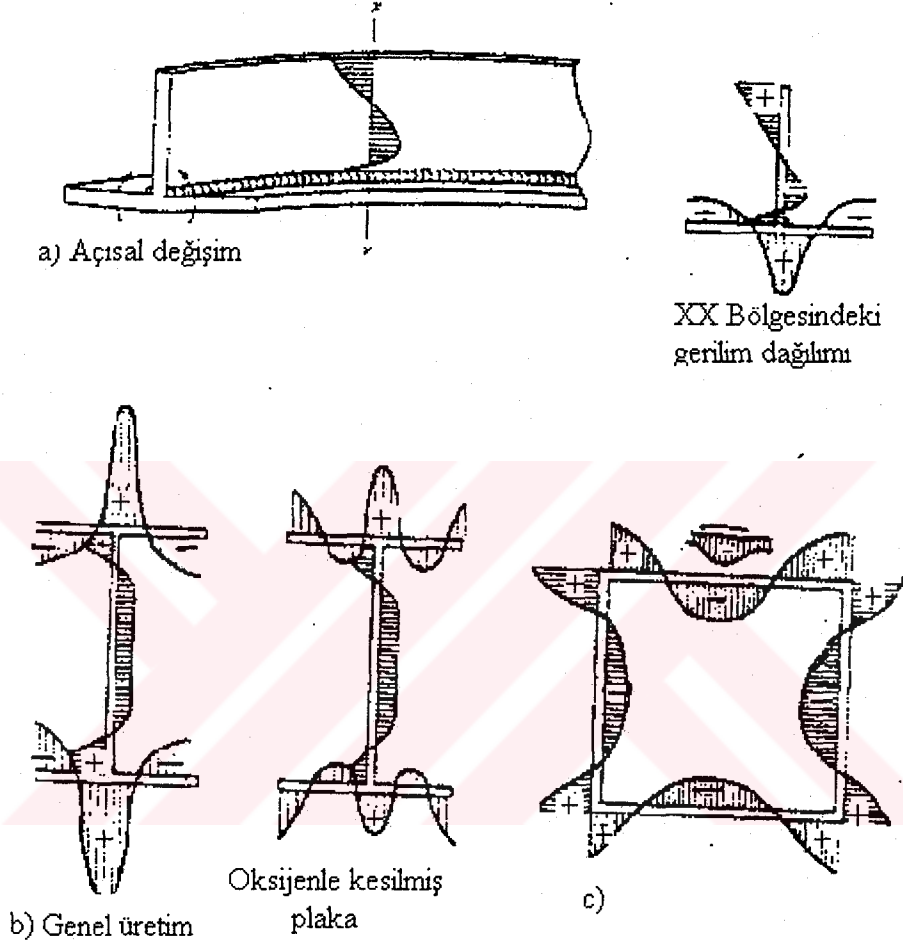
Şekil 3.11.-c' de gösterildiği gibi C-C bölümü boyunca kaynak metali ve kaynağa yakın ana metal bölgeleri soğur. Sonuçta kaynağa yakın bölgelerde çekme gerilimine neden olarak büzülmeye çalışır. Kaynağa olan uzaklık arttıkça, gerilmeler önce basmaya sonra çekmeye dönüşür.

D-D eksenini boyunca, yüksek çekme gerilmeleri kaynağa yakın bölgelerde oluşur. Basma gerilmeleri ise kaynaktan uzak bölgelerde oluşur (28).

3.3.1.2. T, H ve kare şeklindeki parçalarda kaynak işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmeler

Şekil 3.12 çeşitli kaynak şekillerinde oluşan distorsyon ve kalıntı gerilmelerinin tipik dağılımlarını göstermektedir. Şekil 3.12.-a incelendiğinde x-x doğrultusunda, kaynak bölgesine yakın alanlarda, yüksek kalıntı çekme gerilmelerinin olduğu görülmektedir. Oluşan bu gerilmeler kaynak eksenine paralel bir doğrultudadır. Alt parçada oluşan gerilmeler kaynak bölgesinden uzaklaştıkça basma (-), kaynak bölgesine yakın olan yerlerde ise çekme (+) türündedir. Kılıçlama şeklinde ki parçanın üst kısmında oluşan çekme gerilimi ise, T tipindeki profilin boyuna doğru

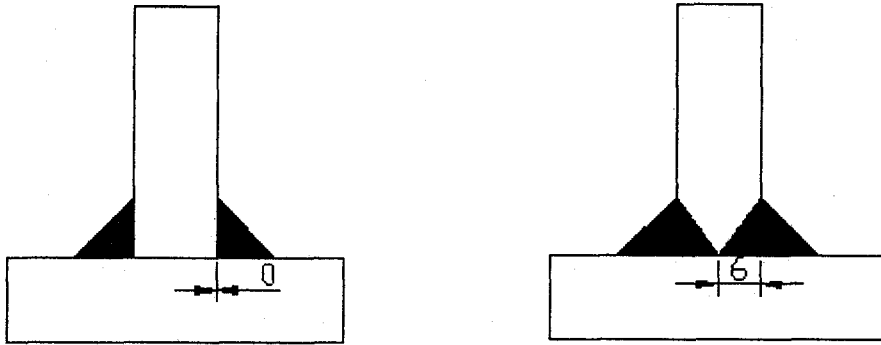
eğilme distorsiyonuna maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Bu tip birleştirmelerde aynı zamanda açısal distorsyonda söz konusudur.



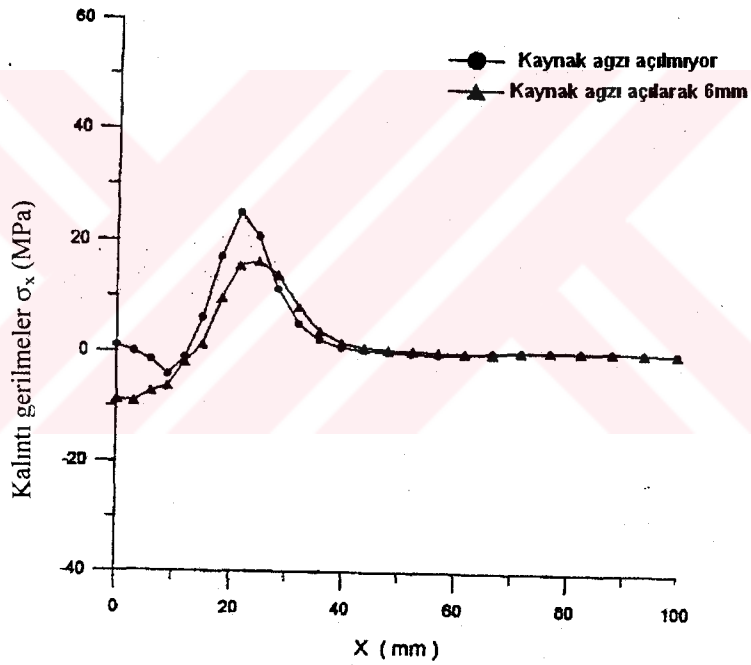
Şekil 3.12. Farklı kaynaklı birleştirme şekillerindeki tipik kalıntı gerilmeler (30)

Şekil 3.12.b-c de ise I putrel ve kutu profil şeklindeki birleştirmelerde oluşan kalıntı gerilmelerinin dağılımı görülmektedir. Oluşan kalıntı gerilmeler kaynak çizgisine paralellik gösterir. Gerilmeler, yukarıda da belirtildiği gibi, kaynaktan uzak bölgelerde basma ve kaynağa yakın bölgelerde ise çekme türündendir (30).

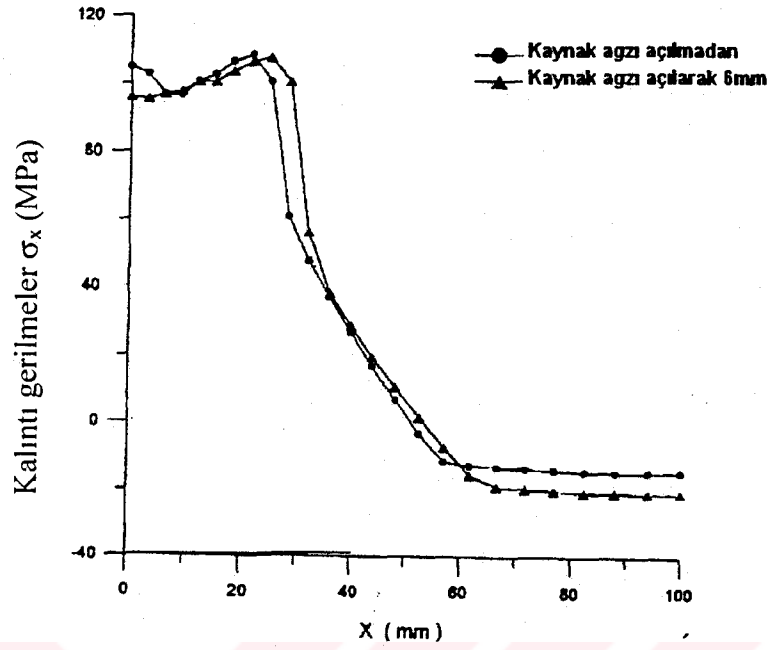
Ayrıca, birleştirilecek malzemeye kaynak ağzı açılması ile (Şekil 3.13), kaynak metali boyunca (Şekil 3.15) ve malzemenin eni doğrultusunda (Şekil 3.14) kalıntı gerilmelerde farklılıkların meydana geldiği görülmektedir (32).



Şekil 3.13. Kaynak ağzızsız ve kaynak ağzlı (6mm) köşe kaynağı yapılmış parçaların “T” şeklinde birleştirilmesi (32)



Şekil 3.14. Kaynak ağzızsız ve kaynak ağzlı (6 mm) köşe kaynağı sonrasında yapıda oluşan enine kalıntı gerilmelerin dağılımı (32)



Şekil 3.15. Kaynak ağzızsız ve kaynak ağzılı (6 mm) köşe kaynağı sonrasında kaynak boyunca oluşan kalıntı gerilmelerin dağılımı (32)

Kaynaklı birleştirmelerde meydana gelen kalıntı gerilmeler bir takım tedbirlerle en aza indirilebilir. Bu tedbirler;

1. Kaynak sırasında oluşacak ısı yapısı geneline üniform dağıtılmalıdır.
2. Kaynak hızı artırılarak ısı girdisi azaltılmalıdır.
3. Kaynak metali miktarının artması ısı girdisini arttıracığından “V” kaynak ağzı yerine “X” kaynak ağzı tercih edilmelidir.
4. Aşırı kaynak pasosundan kaçınılmalıdır.
5. Öntav ve sontav ısıl işlemleri ile kalıntı gerilmeleri azaltılabilir (33).

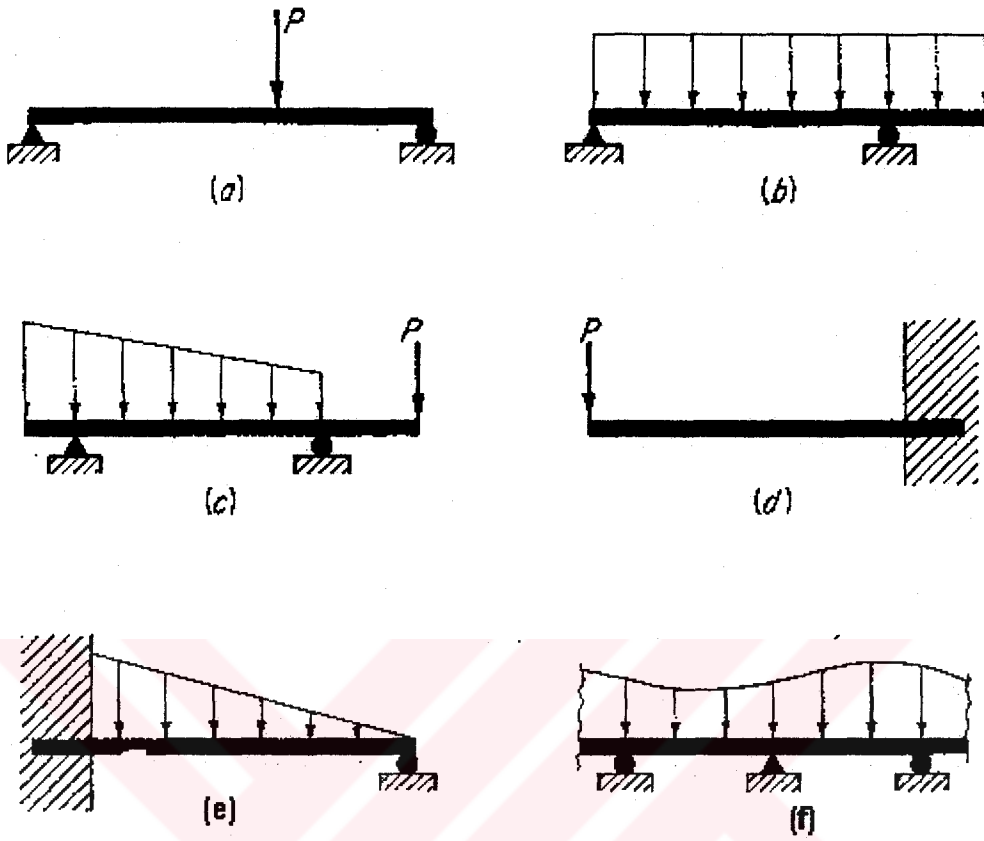
4. KİRİŞLERDE MUKAVEMET HESAPLARI

4.1. Kiriş Çeşitleri

Üzerine gelen yükler karşısında eksenel gerilmeye zorlanan yapı elemanları “KİRİŞ” olarak adlandırılır (34). Bir çok yapı ve makine elemanlarında sayısız kiriş tipiyle karşılaşılabilir. Bir binanın döşemesini taşıyan esas eleman, tıpkı bir araba aksı gibi bir kiriştir. Sonuçta kirişler bir yapının temel elemanıdır (35). Kirişler tam eğilmeye çalıştıkları gibi kesme kuvveti, eksenel kuvvet ve burulma momenti kombinasyonuna da maruz kalabilirler (36).

Yapı elemanlarının değişmez unsurlarından olan kirişlerin eğilmesine neden olan unsur; bir kirişin boy (uzunluk) eksenine dik yüklere maruz kalmasıdır (37). Genel kullanım açısından kirişlerin bir çok çeşidi vardır. En basit kiriş çeşidi en dış uçlarından desteklenen ve basit kiriş olarak adlandırılan kirişlerdir (Şekil 4.1.a) (34, 37, 38). Basit kirişlerde her iki mesnet sabit olabilirken, mesnetlerden birisi silindir şeklinde hareketli de olabilir. Bu tip kirişlerin en önemli özellikleri, her iki uç kısmının da eğilme sırasında açısal hareketlilik serbestliğine sahip olmasıdır. Bu açısal hareketlilik uygulanan yük yönünün tersi yönde gerçekleşebilirken, yanlara doğru bir dönme hareketi söz konusu değildir (34).

Bir kirişin üzerinde durduğu mesnetlerden birisi veya her ikisi birden kirişin uçlarından belirli mesafelerde içeride ise bu tip kirişler çıkmalı kiriş olarak adlandırılır (Şekil 4.1.b-c). Kullanılan kirişin bir ucu yapı bünyesinde sabitlenmiş ve diğer ucu serbest bırakılmış ise bu tip kirişlerde konsol kiriş olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4.1.d) (34, 36-38). Bu tip kirişlerin sabitlenmiş olan veya serbest olan her iki ucu içinde açısal dönme serbestliği söz konusu değildir (34). Şekil 4.1.e’ de görülen kiriş ise bir ucu basit mesnetli konsol kiriş ve Şekil 4.1.f’ de görülen kirişte devamlı (çok mesnetli) kiriş olarak adlandırılır (36, 37).



Şekil 4.1. Kiriş çeşitleri. a) basit kiriş b) çıkmalı kiriş c) çıkmalı kiriş d) konsol kiriş e) mesnetli konsol kiriş f) sürekli kiriş (32)

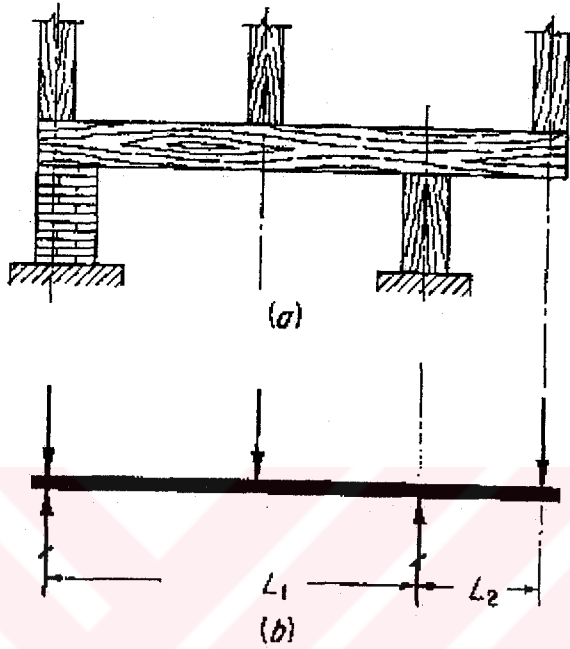
4.2. Kirişlere Etkiyen Kuvvetler

Kirişleri etkileyen kuvvetler iki kısımda incelenebilir.

1. Kirişin bir noktasına etkiyen kuvvetler.

Yük sisteme tek bir noktadan etki ediyorsa, bu durum hesaplamalarda büyük kolaylık sağlar. Bu tür yüklemelere sandalyenin bacaklarından sadece bir tanesi aracılığıyla yükün tabana etki etmesini veya mesnet kolonları üzerinde bulunan kirişin kolonlara olan etkisini örnek olarak verebiliriz. Bu tür yüklemeye bir başka örnek olarak ta Şekil 4.2' deki sistemi verebiliriz. Burada tek noktadan etki eden yüklerin her birinin etkisinin sınırlı alanlarda geçerli olduğu görülmektedir. Şekil 4.2.a' daki gerçek yük

sistemi hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından Şekil 4.2.b' deki gibi basitleştirilebilir (34, 37).



Şekil 4.2. Kirişin bir noktasına etki eden kuvvetler. a) Gerçek yük sistemi, b) Basitleştirilmiş yük sistemi (37)

2. Yayılmış yük.

İsimlendirilmesinden de anlaşılacağı üzere yüklerin dağılımı geniş bir alanı kapsamaktadır. Yayılmış yük Şekil 4.1.b' de gösterildiği gibi düzgün yayılmış yük veya Şekil 4.1.c' deki gibi değişen yayılmış yük olarak sınıflandırılabilir (34, 37, 38). Ayrıca Şekil 4.1.e' deki gibi üçgen şeklinde veya Şekil 4.1.f' deki gibi değişken şeklinde de olabilir (37).

4.3. Kirişlerde Meydana Gelen Gerilmeler

Denge durumunda bulunan katı bir cisim için aşağıdaki denklemlerin gerçekleşmesi gerekir.

$$\sum F_x=0, \sum M_x=0 \quad [4.1]$$

$$\sum F_y=0, \sum M_y=0 \quad [4.2]$$

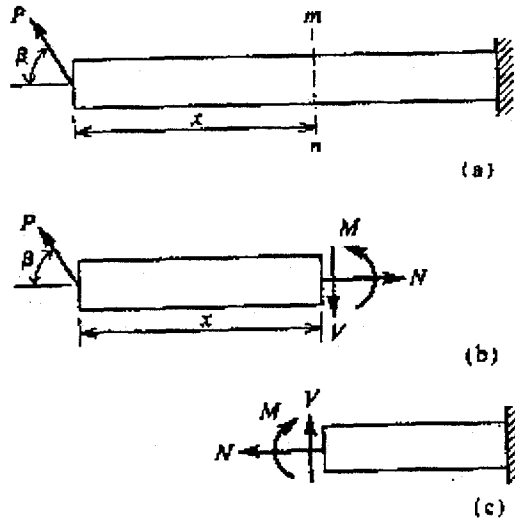
$$\sum F_z=0, \sum M_z=0 \quad [4.3]$$

Birinci kolon, cisme her hangi bir doğrultuda (x,y,z) etkiyen kuvvetlerin vektörel toplamalarının sıfır olması gerektiğini gösterir. İkinci kolon ise, cisme etkiyen kuvvetlerin x, y, z eksenlerine paralel doğrultudaki eksenler boyunca alınan momentlerin vektörel toplamının sıfır olması gerektiğini belirtmektedir (35).

Kirişler yüklenmeleri sonucunda oluşabilecek maksimum gerilmelere karşı koyabilecek şekilde dizayn edilirler ki, oluşabilecek maksimum kesme gerilmesine (V) ve maksimum momente (M) karşı koyabilsinler (37).

Bir kirişe etki eden bir P yükü neticesinde oluşan gerilmeleri bir konsol kiriş örneği üzerinde kolaylıkla açıklayabiliriz. Şekil 4. 3.a' da görülen serbest ucuna P yükü etki eden konsol kiriş, "mn" hattı boyunca iki bölgeye ayrılarak sol taraftaki parça kirişten bağımsız hale getirilirse eğer, uygulanan P yükünün etkisiyle "N, V, M" gerilmelerinin oluştuğunu görebiliriz (Şekil 4.3.b)

Burada "N" P yükünün yatay bileşenine karşılık gelir ve eksenel (normal) gerilme olarak adlandırılır (Eğer P yükü kiriş eksenine 90°'lik bir açı ile etki ediyorsa, bu durumda eksenel yük N=0 olur). "mn" kesme yüzeyine paralel ve kiriş eksenine dik olarak etki eden kuvvet ise kesme gerilmsi olup "V" ile gösterilir. Yine P yükünün etkisiyle oluşan eğilme momenti de "M" olarak ifade edilir. "mn" hattı boyunca kesilen konsol kirişte serbest kalan kısım ile diğer mesnetli kısımda oluşan eksenel ve kesme gerilmeleri ve eğilme momentinin büyüklükleri eşit fakat yönleri terstir (34).



Şekil 4.3. Konsol kirişte meydana gelen eksenel (N) ve kesme (V) gerilmeleri ile eğilme momenti (M) (34)

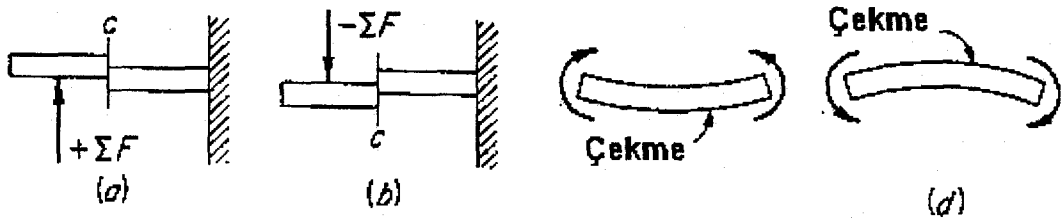
Şekil 4.3' de gösterilen kirişe uygulanan P yükü sonucunda oluşan eksenel gerilme ve kesme gerilmesi ile eğilme momenti basit statik denge formülleri ile kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Eksenel gerilme "N" P yükünün x doğrultusundaki bileşeninin, kesme gerilmesi "V" ise y doğrultusundaki bileşeninin büyüklüğü kadar olup, "mn" noktasına göre alınacak momentte "M" eğilme momentini verecektir. Şekil 4.3' de gösterilen konsol kirişte oluşan kuvvetlerin hesaplanması için gerekli formüller aşağıda verilmiştir (34).

$$N = P \cdot \cos\beta \quad [4.4]$$

$$V = P \cdot \sin\beta \quad [4.5]$$

$$M = P \cdot x \cdot \sin\beta \quad [4.6]$$

Bir kirişe etkiyen kuvvet ve/veya kuvvetlerin etkisiyle oluşan gerilmeler yönlerine göre hesaplamalarda negatif veya pozitif işaretli olarak alınabilirler. Bunun için aşağıdan yukarıya doğru yön veya saatin tersi yön pozitif olarak adlandırılırken, yukarıdan aşağıya veya saat yönü negatif yön olarak adlandırılır (Şekil 4. 4) (37).

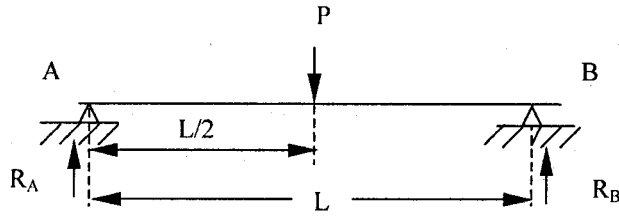


Şekil 4.4. Kuvvetin, kesme gerilmesinin ve momentin yönleri. a) + kesme b)- kesme c) + moment d)-moment (37)

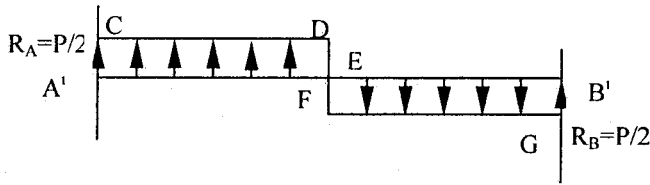
4.4. Kesme Kuvvetleri ve Eğilme Momenti Diyagramları

Yarı grafiksel bir metod ile bir kirişe etki eden kesme gerilmeleri ve eğilme momenti kolaylıkla belirlenebilir ve hesaplanabilir (37).

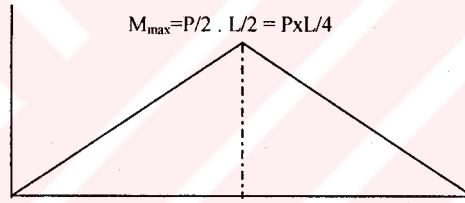
Kirişlerde oluşan kesme gerilmeleri ve eğilme momenti x eksenini doğrultusunda çeşitli aralıklarla tanımlanır. Eğilme gerilmelerine neden olan kuvvetler ile mesnetlerde oluşan tepki kuvvetleri denge halindedir (34). Denge durumunda olan sistemde kiriş boyuna uygun, mesnet kuvvetlerinin yönüne ve büyüklüğüne bağlı olarak çizilen diyagrama kesme kuvvetleri diyagramı adı verilir. Kirişe uygulanan dış kuvvetlerin kirişin çeşitli kesitlerinde meydana getirdikleri eğilme momentlerini gösteren diyagramlara da moment diyagramı adı verilir (20, 34, 38).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.5. Orta noktadan P yükü ile yüklenmiş basit mesnetli bir kirişin, (a) kesme kuvveti diyagramı, (b) moment diyagramı (38, 39)

Şekil 4. 5.a' da görülen P yükü ile yüklenmiş basit mesnetli kirişte, P yükünün etkisiyle mesnetlerde, uygulanan yüke zıt yönde tepki kuvvetleri oluşur. Bu tepki kuvvetleri R_A ve R_B aşağıdaki şekilde formülize edilir.

$$R_A = P / 2 \quad [4.7]$$

$$R_B = P / 2 \quad [4.8]$$

Mesnetlerde oluşan tepki kuvvetleri bulunduktan sonra kesme diyagramı kolaylıkla çizilebilir (Şekil.4.5.b). Bunun için ilk olarak A'B' eksenini çizilir. A noktasından

mesnet kuvveti olan R_A kendi yönünde ve büyüklüğünde alınır. R_A 'nın ok ucundan sağa doğru hareket edilir ve karşılaşılan kuvvetler büyüklükleri ve yönleri değiştirilmeden diyagrama çizilir. Şekil 4.5.a'ya dikkat edilecek olursa, orta noktada etkiyen P kuvvetine kadar başka hiçbir kuvvetin olmadığı görülür. Dolayısıyla diyagram P kuvvetine kadar $A'B'$ doğrusuna paralel çizilir ve CD doğrusu elde edilir. CD doğrusu boyunca her bölgede oluşan kesme kuvveti birbirine eşit ve $V = P/2$ kadardır. D noktasında ise P kuvveti olduğu için kuvvet kendi yönü ve büyüklüğünde diyagrama çizilerek F noktası elde edilir. B mesnetine kadar ise yine başka hiçbir kuvvet olmadığı için $A'B'$ doğrusuna paralel FG doğrusu çizilir. FG doğrusu boyunca kesme kuvveti aynı büyüklükte fakat CD doğrusu boyunca oluşan kesme kuvvetine göre ters yönlüdür, $V = -P/2$. Son olarak R_B kuvvetinin de yönü ve şiddeti diyagrama eklenir ve böylece kesme kuvveti diyagramı çizilmiş olur (20, 34, 38, 39).

Diyagramın çizimine dikkat edilecek olursa, P kuvveti diyagramın $A'B'$ ekseninin E noktasından keserek, kirişe etki eden kesme kuvvetlerinin yön değiştirmelerine sebep olur. İşte bu işaret değiştirme noktası kirişin en tehlikeli kesitini yani en büyük eğilme momentinin meydana geldiği noktayı verir (20, 37, 38).

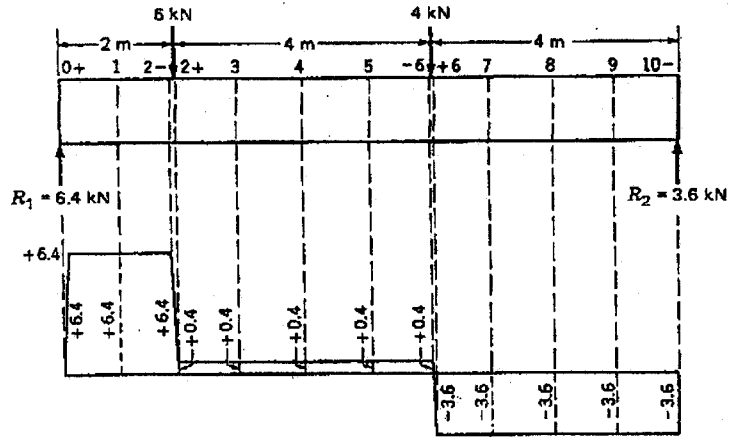
Eğilme momenti diyagramı ise kesme kuvvetleri diyagramına göre yatay eksenin tek tarafında çizilir (Şekil 4.5.c). Kesme kuvveti diyagramında en tehlikeli kesitin yerini veren noktanın bir tarafında kalan alanların cebirsel toplamı o noktadaki eğilme momentini verir. Şekil 4.5.c' de görüldüğü gibi en büyük moment P kuvvetinin etkidiği noktada olup, büyüklüğü

$$M_{\max} = P.L/4 \text{ kg.cm}$$

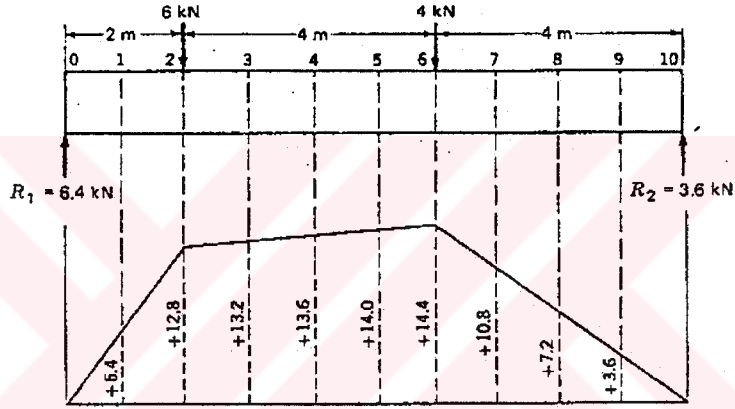
[4.9]

kadardır (38, 39).

Şekil 4. 6' da ise 6 kN ve 4 kN' luk kuvvetlerin etkisinde kalan basit mesnetli bir kirişe ait kesme kuvvetleri ve eğilme momenti diyagramları görülmektedir. Bu diyagramlarda da en tehlikeli kesitin kuvvetin yön değiştirdiği 4 kN' luk yükün etkidiği kesit olduğu anlaşılmaktadır.



(a)

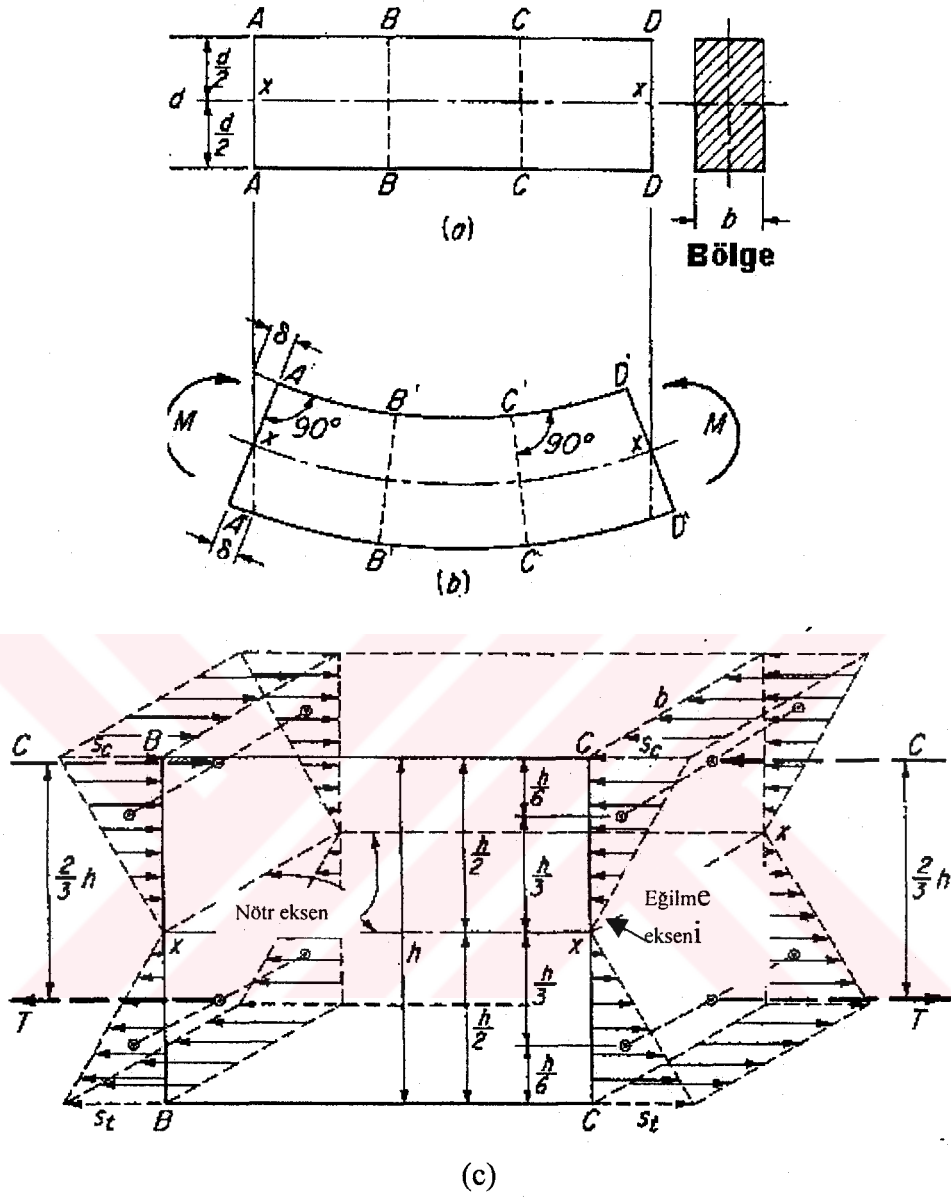


(b)

Şekil 4.6. 6 kN ne 4 kN büyüklüğündeki kuvvetlere maruz kalan basit mesnetli kirişte a) keme kuvvetleri diyagramı b) eğilme momenti diyagramı (20)

4.5. Kirişlerde Eğilme Dayanımı

Şekil 4.7' de görülen yatay durumdaki dikdörtgen prizmanın uçlarından pozitif bir eğilme momenti etkidiğinde, yatay düzlemler eğrisel bir hal alırken eksene dik düzlemlerde hafifçe döner. Ancak AA-BB-CC-DD gibi hatlar yatay düzlemlere dik olarak kalırlar. Bu olay kirişlerin eğilme teorisinin temel hipotezini oluşturur. Bernoulli-Navier hipotezine göre; kiriş eksenine dik olarak alınan düzlemsel kesitler deformasyondan sonrada eksene dik olarak kalırlar (35, 37, 40).



Şekil 4.7. Eğilmede temel olan deformasyon kabulü (37)

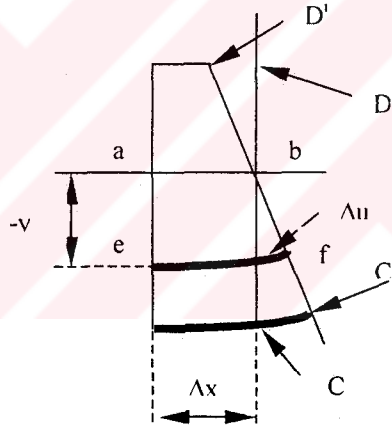
Gerilme analizi için gerekli temel kinematik kabulleri, kirişlerde meydana gelen eğilme gerilmelerini hesaplayabilmek için, farklı bir tarzda ifade etmek gerekmektedir. Deformasyondan önceki durumu BB-CC (Şekil 4.7.a) ile belirtilen bir elemanın deformasyondan sonraki durumu B'B' - C'C' olarak gösterilsin (Şekil 4.7.b-c). Şekil 4.7.' den görüleceği gibi xx yüzeyinde gerilme sıfırdır. Dolayısıyla bu yüzeyin boyutlarında herhangi bir değişim söz konusu değildir. Bu gerilmenin sıfır olduğu liflerin bulunduğu yüzeye kiriş nötr yüzeyi, bu yüzeye dik aksenal bir düzlem

ile bu yüzeyin ara kesitine de nötr eksen adı verilir (35, 37, 38). Nötr eksen den yukarı yüzeye doğru ilerledikçe artan basma gerilmesi oluşurken (üst BC yüzeyinde maksimum), nötr eksen den aşağı yüzeye doğru ilerledikçe de artan çekme gerilmesinin oluşumu söz konusudur (alt BC yüzeyinde maksimum) (37).

Nötr yüzeye paralel ve nötr yüzeyden y mesafesinde bulunan tipik bir e-f lifinde eğilme esnasında meydana gelen uzama Δu ile ifade edilsin (Şekil 4.8). Birim şekil değiştirme esaslarına göre, Δu ' luk bu uzama miktarı Δx başlangıç uzunluğuna bölünürse eğer lineer Σx şekil değiştirme miktarı elde edilir (35).

$$\Sigma x = \lim \Delta u / \Delta x = du / dx.$$

[4.10]



Şekil 4.8. Eğilmede meydana gelen birim şekil değişimi (35)

Başlangıçta eşit uzunlukta olan liflerin aksenal uzamaları nötr eksen de olan uzaklıkla lineer olarak değişmektedir. Dolayısıyla eğilmeye maruz bir kirişteki bir lifin şekil değiştirmesi, bu lifin nötr yüzeyden olan uzaklığı ile lineer olarak değişmektedir. Liflerin birim şekil değiştirmesi, b bir sabit olmak üzere,

$$\Sigma x = by$$

[4.11]

olarak ifade edilir (35).

Lineer elastik malzemelerde σ_x sıfırdan farklı gerilme bileşeni ise, Hooke kanununa göre,

$$\sigma_x = E \cdot \epsilon_x \quad [4.12]$$

şeklinde yazılabilir. Buradan da, lineer elastik bir kirişte eğilmeden meydana gelen σ_x gerilmesinin nötr eksenden olan uzaklık ile orantılı olması gerektiği sonucu ortaya çıkar. Bu durum analitik olarak

$$\sigma_x = By \quad [4.13]$$

şeklinde ifade edilir. Burada b bir sabit olup ($B=b.E$), değişken olan y pozitif ve negatif değerler alabilir (y nötr eksenden olan mesafedir).

B sabiti uygulanan momentin ve kiriş dik kesit alanının özelliklerine bağlıdır. Kirişler için geçerli olan denge şartları eğilme formülünün bulunmasında temel rol oynar. Bu denge formüllerinden birincisi, x eksenini doğrultusundaki kuvvetlerin toplamının sıfıra eşit olmasıdır.

$$\sum F_x = 0, \int \sigma_x \cdot d_A = 0 \quad [4.14]$$

σ_x yerine By yazılacak olursa,

$$\int By \cdot d_A = B \int y \cdot d_A = 0 \quad [4.15]$$

olur. Gerilmeye maruz bir kirişte B sıfır olamayacağına göre,

$$\int y \cdot d_A = 0 \text{ ise } \int y \cdot d_A = y' \cdot A \quad [4.16]$$

olur.

Burada y' kiriş alan ağırlık merkezinin nötr eksenden olan mesafesidir. $y'.A = 0$ şartında A sıfırdan farklı olduğu $y' = 0$ olmalıdır.

İkinci şart ise, toplam momentin sıfır olmasıdır.

$$\sum M = 0, M + \int (\sigma_x \cdot d_A) \cdot y = 0 \quad [4.17]$$

Buradaki y , d_A alan elemanına etkiyen $\sigma_x \cdot d_A$ kuvvetinin nötr eksene göre moment koludur. Bu formülde σ_x yerine $B y$ ($\sigma_x = B y$) yazılacak olursa eğer, formül

$$M = \int B y^2 \cdot d_A \quad [4.18]$$

şekline dönüşür. y' nin ağırlık merkezinden itibaren ölçülmesi halinde, mekanikte bu integrale kesit alanın eksen etrafındaki atalet moment denir ve bilinen bir kesit için bu büyüklük sabit olup "I" ile gösterilir. Bu değişiklik ile yukarıdaki formül

$$M = B I \quad [4.19]$$

veya

$$B = M/I \quad [4.20]$$

şeklini alır. B yerine de σ_x/y yazılacak olursa, bir kiriş için eğilme formülü

$$\sigma_x = M y/I \quad [4.21]$$

elde edilir (35).

Verilen bir kesit için M ve I sabit olduğu için σ_x en büyük değerini y' nin maksimum olduğu yerde alır ki, y' nin maksimum değer aldığı yer nötr eksenden en uzak mesafedir ve bu mesafede "c" ile gösterilir. Sonuçta eğilme momenti formülü

$$\sigma_{\max} = Mc/I \quad [4.22]$$

şeklini alır (20, 35-38, 40).

Bu formülde;

$\sigma_{\max}$: maksimum gerilme (kgf/cm²)

M : eğilme momenti (kg.cm),

c : nötr eksenle en dış yüzey arasındaki mesafe (cm),

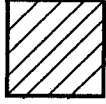
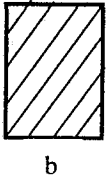
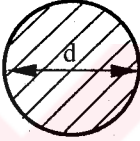
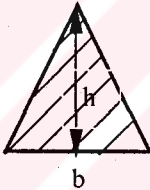
I : kiriş kesit alanının atalet momenti (cm⁴),

4.5.1. Atalet momenti hesabı

Eğilme formülünü uygulayabilmek için incelenen kesitin nötr eksen etrafındaki atalet momentinin bilinmesi gerekir (35). Çoğu basit geometrik şekillerin atalet momentleri çizelge haline getirilmiştir. Çizelge 4.1' de de bazı geometrik şekillerin atalet momentleri ve dayanım momentleri verilmiştir. Dayanım momenti, atalet momentinin tarafsız eksenden en uzak noktanın tarafsız eksene olan mesafesine bölünmesi ile bulunur ve “W” ile gösterilir.

$$W = I/e \text{ cm}^3 \quad [4.23]$$

Çizelge 4.1. Basit geometrik şekillerin atalet ve dayanım momentleri (38, 41)

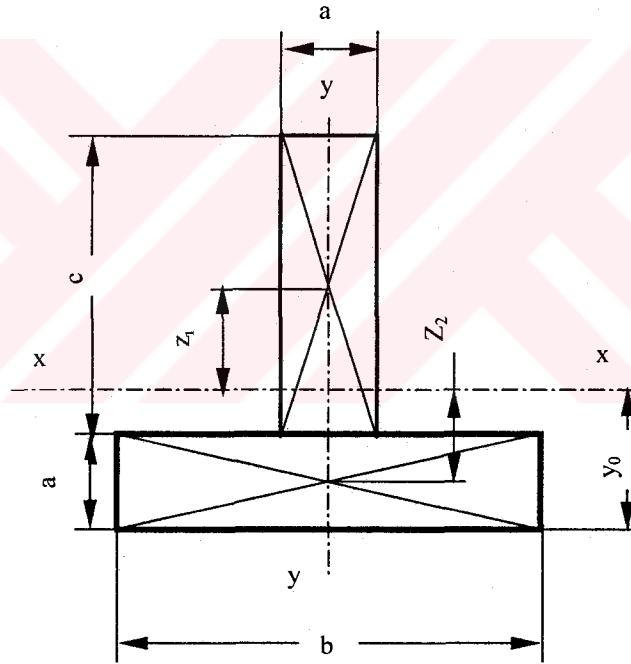
Kesit yüzey	Geometri	Atalet momenti $I \text{ (cm}^4\text{)}$	Dayanım momenti $W \text{ (cm}^3\text{)}$
Kare		$a^4/12$	$A^3/6$
Dikdörtgen		$b.h^3/12$	$b.h^2/6$
Daire		$\pi.d^4/64$	$\pi.d^3/32$
Üçgen		$b.h^3/36$	$W_1 = b.h^2/12$ $W_2 = b.h^2/24$

Yukarıdaki çizelge yardımıyla ölçüleri bilinen ve adı geçen yüzeylerin atalet momentleri kolaylıkla hesaplanabilir. Eğer atalet momenti istenen yüzey, birkaç yüzeyin birleşmesinden meydana gelmiş ise, birleşik yüzeylerin nötr eksene göre atalet momentlerinin toplamı genel şeklin atalet momentini verir. Ancak ağırlık merkezinden geçen eksene göre atalet momenti belirli bir dikdörtgenin bu eksene paralel diğer bir eksene göre atalet momenti istenebilir. Bu durumda gerekli hesaplama Steiner Teoremine göre yapılır (38).

Steiner Teoremi :

Her hangi bir yüzeyin, aynı düzlem içinde bulunan, her hangi bir eksene göre atalet momenti, bu yüzeyin eksene paralel ve kendi ağırlık merkezinden geçen eksene göre atalet momenti ile, yüzeyin alanıyla eksenler arası mesafenin karesi çarpımları, toplamına eşittir.

Örnek olarak Şekil 4.9' daki kesitin atalet momentini Steiner teoremine göre hesaplanabilir. Burada atalet momenti birleşik yüzeyin ağırlık merkezinden geçen x ve y eksenlerine göre bulunacaktır.



Şekil 4.9. T profil kesit yüzeyi (38)

İlk olarak sistemin ağırlık merkezi

$$y_0 = [a \cdot b \cdot (a / 2) + a \cdot c \cdot (c / 2 + a)] / [a(b + c)]$$

[4.24]

formülü ile bulunur. Buradan x eksenine göre atalet momenti

$$I_x = b.a^3 / 12 + a.b.z_2^2 + a.c^3 / 12 + a.c.z_1^2 \quad [4.25]$$

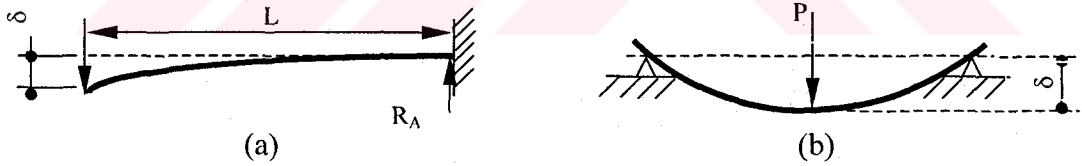
ve y eksenine göre atalet momenti de

$$I_y = c.a^3 / 12 + a.b^3 / 12 \text{ cm}^4 \quad [4.26]$$

olarak bulunur. y eksenini birleşik yüzeyin simetri eksenini olduğu için kesitin ağırlık merkezinin geçer. Bunun için y eksenine göre atalet momenti, şekli meydana getiren dikdörtgenlerin atalet momentleri toplamına eşit olur (38).

4.6. Kirişlerde Eğilme Miktarlarının Hesaplanması

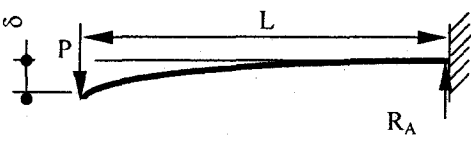
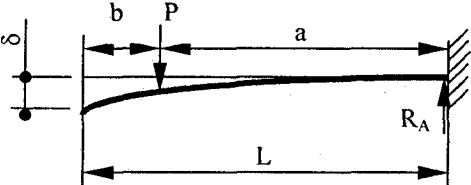
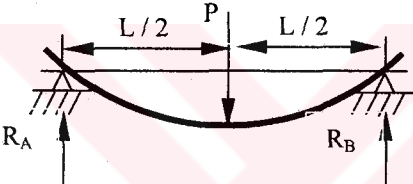
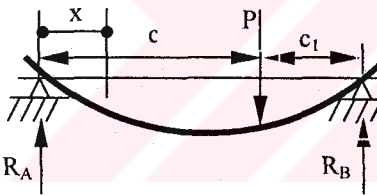
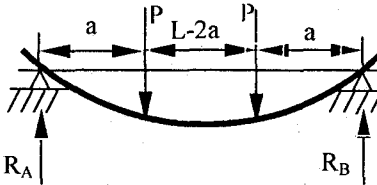
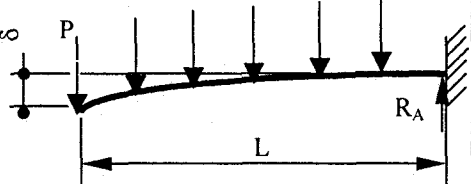
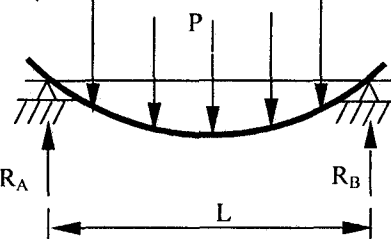
Bir P yükü ile yüklenen bir kirişte, uygulanan yükün etkisiyle, kiriş orijinal konumuna göre uygulanan yükün doğrultusunda bir miktar eğilir. Yatay konumdaki bir kirişte meydana gelen eğilme normal olarak düşey konumda gerçekleşir (Şekil 4.10) (37).



Şekil 4.10. Kirişte eğilme durumu a) konsol kiriş b) basit kiriş (37)

Çizelge 4.2' de ise kiriş tiplerine göre kirişlerde meydana gelebilecek mesnet kuvvetleri, maksimum eğilme momentleri ve en büyük eğilme miktarı formülleri verilmiştir.

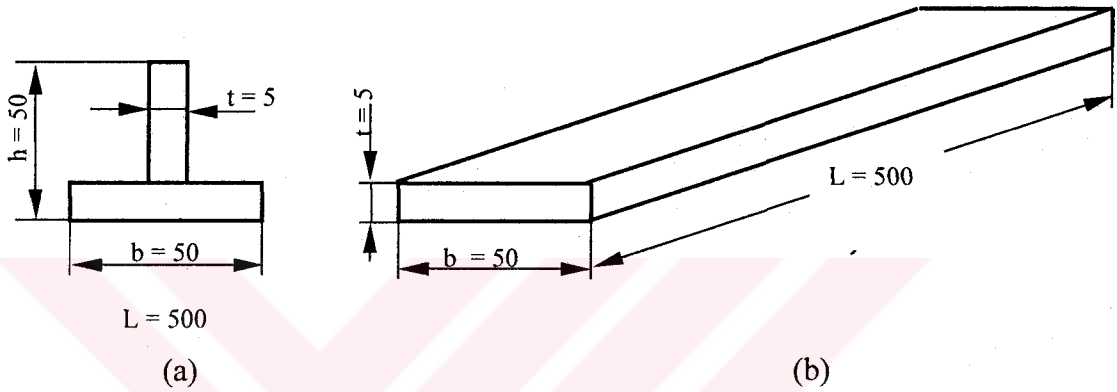
Çizelge 4.2. Kiriş çeşitlerine göre mesnet kuvvetleri, maksimum eğilme momentleri ve en büyük eğilme miktarları(20, 34, 37, 38, 41)

Kiriş çeşidi	Tepki kuvvetleri (kg)	Max. eğilme momenti (kg.cm)	Max. Eğilme miktarı (cm)
	$R_A = P$	$M_{\max} = -P.L$	$\delta = P.L^3/3.E.I$
	$R_A = P.b/L$	$M_{\max} = P.a$	$\delta = P.a^2/6E.I(3L-a)$
	$R_A = P/2$ $R_B = P/2$	$M_{\max} = P.L/4$	$\delta = P.L^3/48.E.I$
	$R_A = P.c_1/L$ $R_B = P.c/L$	$M_{\max} = P.c.c_1/L$	$\delta = P.c_1/3.E.I.L$ $x = [(c(L+c_1)^{3/2})/3]$
	$R_A = P$ $R_B = P$	$M_{\max} = P.a$	$\delta = (P.a/24.E.I)(3L^2-4a^2)$
	$R_A = q.L$	$M_{\max} = -q.L^2/2$	$\delta = q.L^3/8.E.I$
	$R_A = q.L/2$ $R_B = q.L/2$	$M_{\max} = q.L^2/8$	$\delta = 59.L^3/384.E.I$

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Malzeme

Bu çalışmada, üretilecek I- putrel kirişin kesit profilini oluşturacak uygunluğa sahip 50x50x5 mm boyutlarında yarı mamül T profil malzeme ile 50x5 mm boyutunda levha malzeme kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan malzemeler ve boyutları a) T-profil b) 50x5 levha malzeme

Kullanılan deney malzemelerinden T profil, standart Fe-37 yapı çeliğidir. Öngerilmenin verileceği levha malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 5.1 de ve kimyasal bileşimi ise Çizelge 5.2 de verilmiştir.

Çizelge 5.1. 50x5 mm boyutlarındaki levha malzemenin mekanik özellikleri

Akma Mukavemeti σ_a (N/mm ²)	Çekme mukavemeti σ_c (N/mm ²)	% uzama
311,7	460	33,5

Çizelge 5.2. 50x5 mm. boyutlarındaki levha malzemenin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

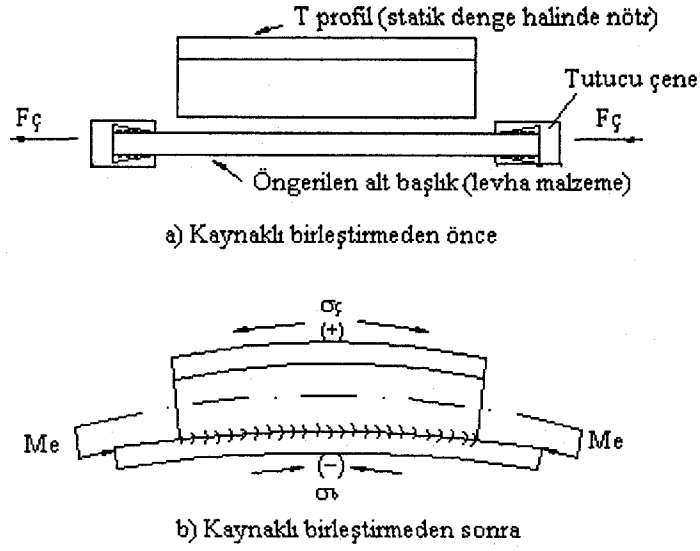
C	Si	Mn	P	S
0,088	0,257	0,520	0,116	0,183

Öngerilmenin uygulanacağı malzemeler, kimyasal bileşimin ve dolayısıyla mekanik özelliklerin sabit kalması amacıyla, bir adet 2000x1000 mm boyutundaki sıcak hadde sac malzemeden hadde doğrultusuna paralel kesilerek elde edilmiştir. T profil malzemeler ise 6000 mm boyutlarındaki yarı mamül malzemelerden kesilerek elde edilmiştir.

5.2. Deney Metodu

5.2.1. Öngerilmeli kaynaklı I- putrel kiriş üretim metodu

Öngerilmeli I- putrel kiriş üretiminde çekme çubuğu olarak kullanılan 5x50 mm en kesit ölçülerine sahip levha malzemeye çekme yönünde 94, 188, 282 N/mm² lik çekme gerilmeleri uygulanmıştır, (Şekil 5.2.a). Çekme gerilmesi etkisinde olan levhaya T profili gazaltı kaynak işlemiyle birleştirilmiş ve daha sonra çekme yükü kaldırılmıştır (Şekil 5.2.b). Bu sayede, çekme gerilmesi olarak uygulanan öngerilme çekme kuvvetinin kalıcı basma gerilmeleri oluşturması sağlanmıştır. Kaynaklı birleştirme sonucu oluşan kendini çekme kuvvetlerine ek olarak, oluşturulan, I- putrel kirişin alt başlığında yüksek değerlerde bir kalıcı basma gerilmesi, üst başlık tarafında ise kalıcı çekme gerilmesi meydana getirilmiştir.



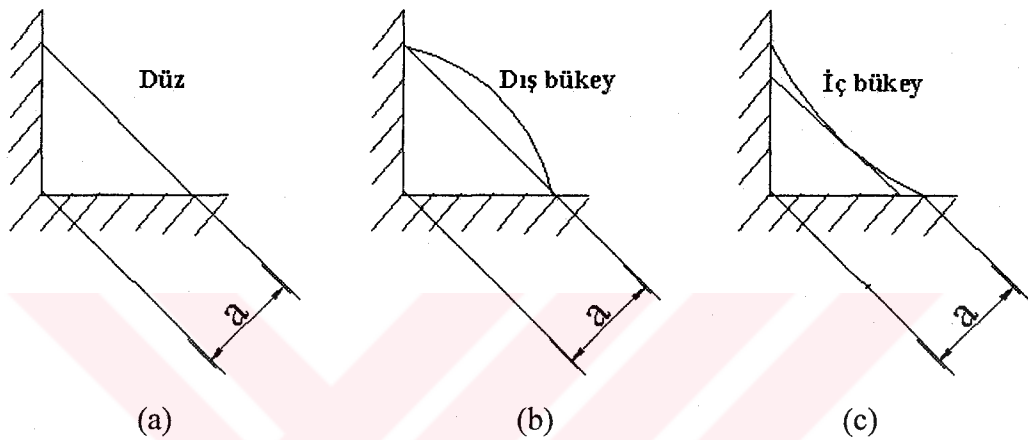
Şekil 5.2. Öngerilmeli I- putrel kiriş üretimi (7)

Öngerilmeli çelik I- putrel kiriş üretimi için hazırlanan ve Şekil 5.1' de görülen deney malzemeleri aşağıda sıralanan avantajlarından dolayı gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir:

- Kaynak işlemi her pozisyonda rahatlıkla gerçekleştirilmektedir.
- Kaynak telinin kaynak bölgesine sürekli olarak sürülmesi, aralıksız çok uzun kaynak dikişlerinin yapılabilmesine imkan vermektedir.
- Derin dikiş nüfuziyeti verir. Kaynak metali miktarının az olması esas metal ile benzer mukavemetli iç köşe kaynak bağlantıları elde edilmesine olanak sağlar.
- Kullanılan tel elektrod çapının diğer yöntemlere göre daha ince olması yığılan kaynak metal miktarının az olmasını, bu da kaynak edilen ana malzemeye ısı girdisinin daha düşük olmasını sağlar.
- Kaynak işlemi sırasında sıçramaların az oluşumu ve kaynak dikişi yüzeyinde curufun oluşmaması, kaynak sonrası temizleme işlemlerini azaltır (43).

Kaynak parametrelerinin seçimi:

Statik yüklemelere maruz çelik yapılarda kaynak işlemi sonucunda elde edilen kaynak dikiş kalınlığı olan “a” parametresinin minimum 3 mm, maksimum $a \leq t_{\min}$ ($a \leq 3,5$ mm) olması istenmektedir (Şekil 5.3) (17).



Şekil 5.3. İç köşe kaynak dikişi geometrileri (17)

Ancak kaynak dikişi geometrisine bağlı olarak ve kaynak işleminden dolayı meydana gelecek ısı girdisi malzemede distorsyonların artmasına sebep olmaktadır. Bu olumsuzluk, dikiş kalınlığı “a”nın minimuma ($a = 3$ mm) indirilmesi ve düz köşe dikişi formunun seçimiyle azaltılabilir (17).

Bu nedenle, deney numunelerinde meydana gelecek ısı girdisini ve dolayısıyla distorsyonları en aza indirmek için “a” kaynak kalınlığı parametresi 3 mm olarak seçilmiş ve kaynak dikişinin maruz kalacağı kesme gerilmesi hesaplanmıştır. Burada;

Malzemeye uygulanacak maksimum yük;

$$\sigma_a = F_{\max} / A$$

[5.1]

$$31,17 = F_{\max} / 250$$

$F_{\max} = 77925 \text{ N}$ olarak bulunur.

Kaynak dikiş kalınlığı $a = 3 \text{ mm}$, kaynak dikiş boyu $L = 500 \text{ mm}$, dikiş hesap boyu $L^1 = 500 - (2.3) = 494 \text{ mm}$ ve kesit alana etkiyecek maksimum yük $F_{\max} = 77925 \text{ N}$ olduğuna göre, kesme gerilmesi

$$\tau_K = F / A_K \quad [5.2]$$

şeklinde formülize edilir.

Toplam kaynak dikiş alanı A_K ise;

$$A_K = 2. (a.L) \quad [5.3]$$

$A_K = 2. (0,3 \cdot 49,4) = 29,64 \text{ cm}^2 = 2964 \text{ mm}^2$ dir. Buradan,

$\tau_K = 77925 / 2964 = 26,29 \text{ N/mm}^2$ olarak bulunur. Köşe kaynaklarında emniyet gerilme değeri en düşük Fe37 malzeme için 110 N/mm^2 olduğundan (17) $\tau_K = 26,29 \text{ N/mm}^2 \leq 110 \text{ N/mm}^2$ dir. Bu durumda belirlenen kaynak dikiş boyutlarının emniyetli çalışma açısından oldukça uygun olduğu görülmektedir.

Bu hesaplamalar sonucunda $a = 3 \text{ mm}$ kaynak dikiş kalınlığını sağlayan ön kaynak işlemleri gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki kaynak parametreleri belirlenmiştir.

Köşe kaynak işlemi parametreleri

Kaynak hızı (V_K) : 700 mm/dak

Tel sürme hızı (V_t) : 5mm/sn

Ark gerilimi : 3V

Koruyucu gaz ve debisi : HB-205 Karışım gaz (%5 CO₂, %2 O₂, Kalan Ar), 12 Lt/dak.

Kaynak teli : TS 5618 (DIN 8559) SG2 Ø1 mm

Birleştirme işleminde gazaltı kaynak makinası, kaynak işleminin sabit bir hızda gerçekleşmesini sağlamak için KT-160 otomatik kesme makinası arabası kullanılmış ve kaynak işlemi çift taraflı olarak gerçekleştirilmiştir.

Koruyucu gaz:

Bir kaynak dikişinin kalitesi, yeterli nüfuziyet, yüksek ısılatma oranı ve düzgün kaynak profili ile belirlenir. Bu değişkenler büyük ölçüde akım, voltaj, kaynak ilerleme hızı ve elektrod açısından etkilense de koruyucu gazlarında bunlar üzerinde önemli etkisi vardır (44).

Kaynak işleminde oluşan dikişin profili yığılan metal miktarı ile yakından ilgilidir. Kaynak profilinin dış bükey olması (Şekil 5.3.b) durumunda yığılan kaynak metali miktarı artacak ve sonuçta ısı girdisi de artacaktır. Isı girdisinin artmasında distorsyonları arttıracığı için istenmeyen bir durumdur.

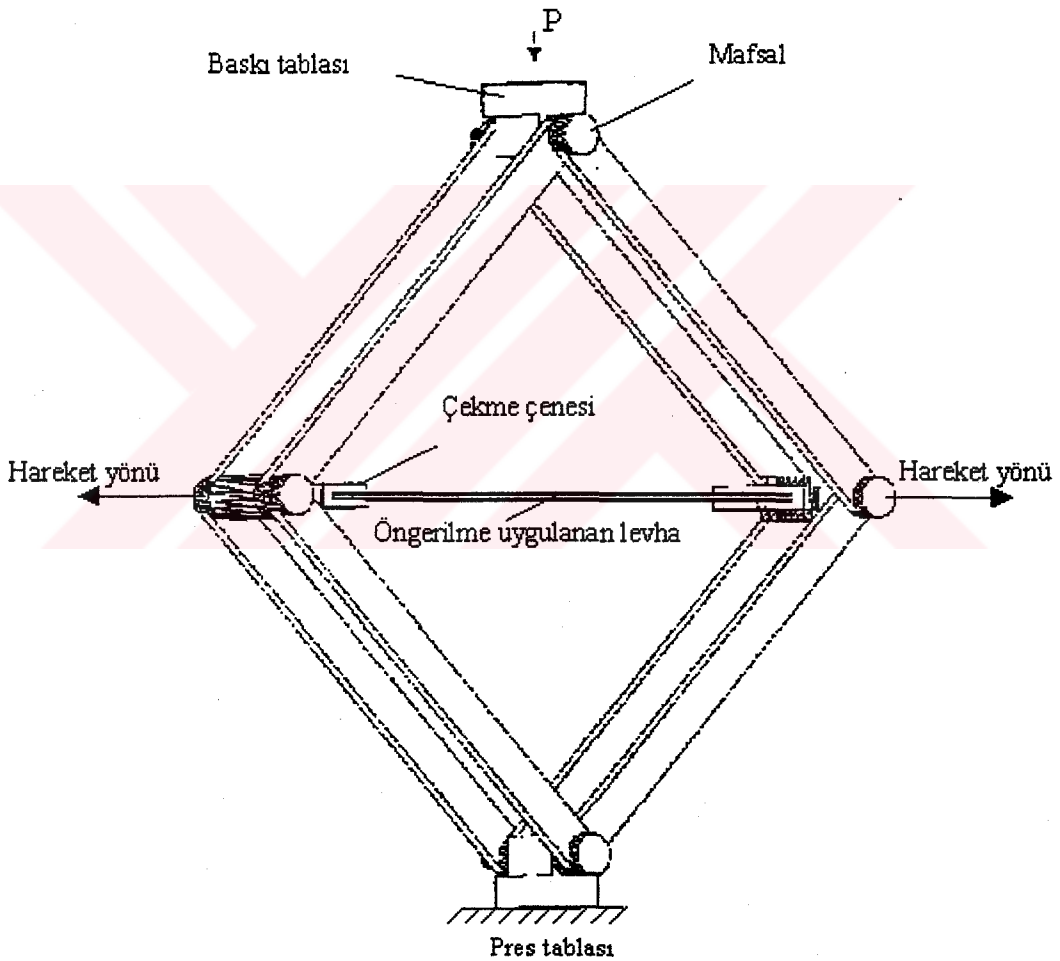
Kaynak dikiş profilinde dış bükeyliği en aza indirmek için karışım gazlar kullanılmaktadır. Karışım gazlar ile mükemmel nüfuziyet, son derece az sıçrama ve düzgün kaynak dikiş profili elde edilmektedir (44). Koruyucu gaz, kaynak dikişinin profili dışında, ark karakteristiğini, metal transfer biçimini, kaynak hızını, kaynak dikişinin mekanik özelliklerini de belirler (43).

Literatürdeki bu bilgelere dayanarak deneysel çalışmalarda HB-205 karışım gazı kullanılmıştır. Böylece kaynak dikişlerinde düşük dış bükeylik, son derece az sıçrama ve oldukça iyi nüfuziyet elde edilmiştir.

5.2.2. Öngerme işlemlerinin uygulanması

5.2.2.1. Öngerme sisteminin hazırlanması

Levha malzemeye uygulanacak öngerme işlemini gerçekleştirebilmek için hidrolik pres vasıtasıyla sağlanan düşey kuvveti yatay kuvvete dönüştüren dört noktadan mafsallı çekme çenelerine sahip öngerme aparatı imal edilmiştir (Şekil 5.4).

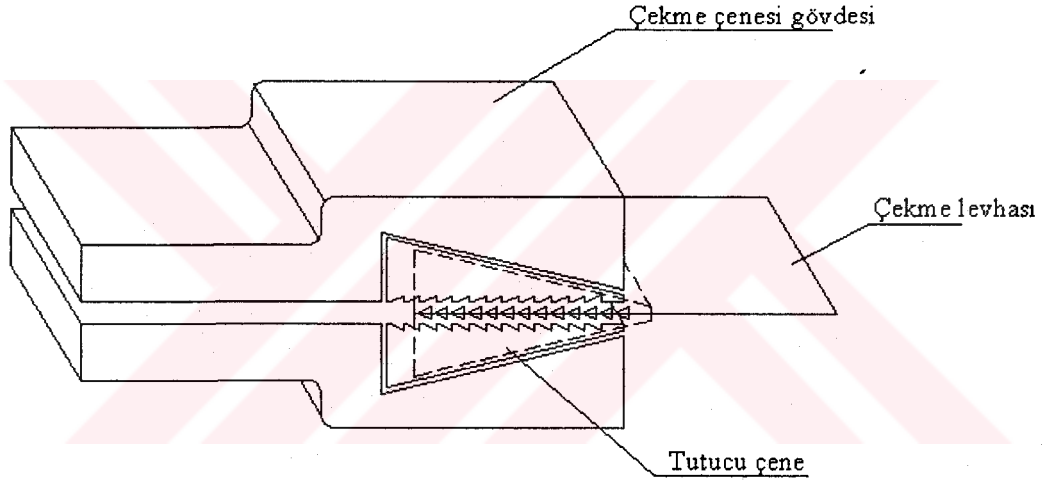


Şekil 5.4. Öngerme aparatı

Şekil 5.4' te görüldüğü gibi öngerme aparatı iki adet baskı tablası, dört adet mafsal ve iki adet çekme çenesinde oluşmaktadır. Pres tablası ile pistonu arasına yerleştirilen germe aparatına bir kuvvet iletildiğinde, mafsalların sağladığı hareketlilik vasıtasıyla, düşey kuvvet germe aparatı aracılığıyla yatay kuvvete

dönüştürülebilmektedir. Bu yatay kuvvet, çekme çeneleri arasında bulunan levha malzemenin çekme gerilmesine maruz kalmasına ve böylece malzemede bir öngerilmenin ($\sigma_{\text{ön}}$) oluşturulmasına imkan sağlamaktadır.

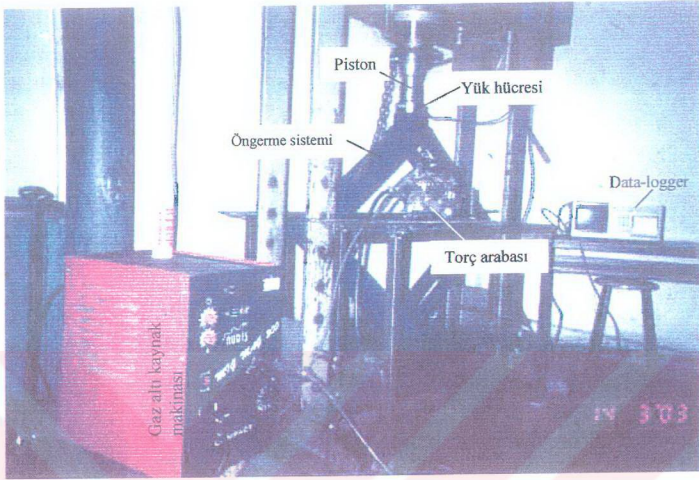
Levha malzeme Şekil 5.5’ te görülen çekme çeneleri aracılığıyla tutulmaktadır. Sisteme uygulanan kuvvet sonucunda tutucu çeneler kapanmaya çalışmakta ve çekme levhası tutucu çeneler arasında sıkışmaktadır. Böylece sisteme uygulanan düşey kuvvet, yatay kuvvete dönüştürülerek levha çekme gerilmesine maruz bırakılmakta, ayrıca, yatay pozisyonda kaynak yapılabilme imkanı sağlamaktadır.



Şekil 5.5. Çekme çenesi

5.2.2.2. Deney düzeneğinin kalibrasyonu

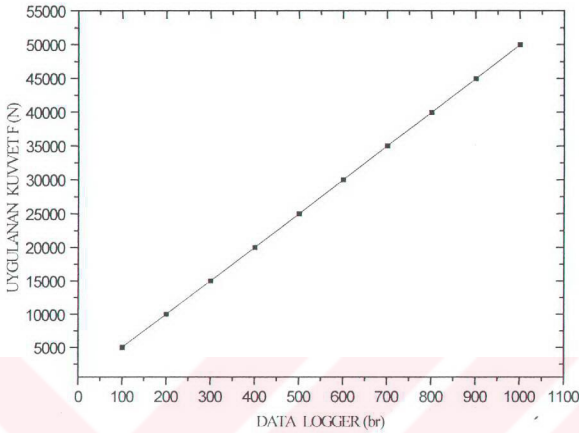
Şekil 5.6’ da görülen deney düzeneğine öngerilme kuvveti uygulanmadan önce, sisteme uygulanan yükün öngerme makas sistemi aracılığıyla levha malzemeye ne kadarlık bir gerilme olarak etkidiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunu için sistemin kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işeminin ilk safhasında, hidrolik pres aracılığıyla sisteme uygulanan kuvvetin hassas ölçümünü yapabilmek amacıyla, kullanılan Data Logger – yük hücresi ikilisinin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6. Deney düzeneğinin fotoğrafı

5.2.2.2.1. Yük hücresi – data logger ikilisinin kalibrasyonu

Çekme cihazı çeneleri arasına bağlanan yük hücresine uygulanan herbir 5000 N' luk basma kuvvetine karşılık data loggerdan okunan birim değerler belirlenerek yük hücresi – data logger ikilisi kalibre edilmiş ve Şekil 5.7' de verilen kalibrasyon doğrusu elde edilmiştir.

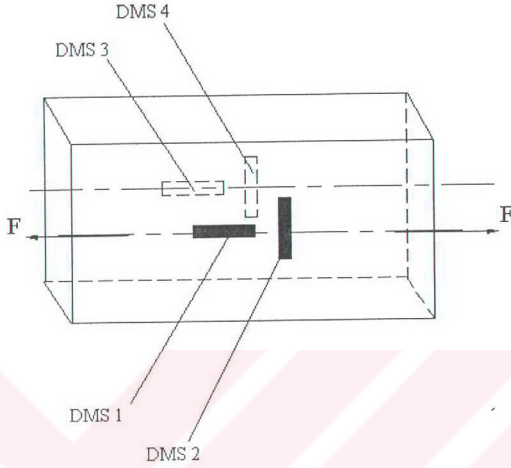


Şekil 5.7. Data logger kalibrasyon eğrisi

Yük hücresi - Data logger ikilisinin kalibrasyon işleminin ardından öngerilme uygulanacak sisteme etkileyen düşey yükün (hidrolik pres vasıtasıyla) ne kadarlık bir kayıpla veya kazançla yatay yüke dönüştüğünün deneysel olarak belirlenmesi işlemi yapılmıştır. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için 50x5 mm boyutlarındaki levha deney malzemesinden bir adet çekme çubuğu hazırlanmıştır.

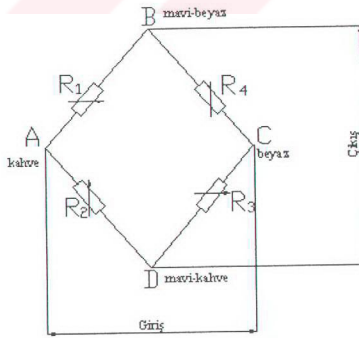
5.2.2.2.2. Germe sisteminin kalibrasyonu

50x5 mm boyutundaki öngerme levha malzemelerinden birine, mekanik gerilmelerin elektriksel büyüklüğe dönüştürülmesinde kullanılan DMS' ler (uzayabilir ölçü şeritleri (strain guage)) yapıştırılarak (Şekil 5.8), öngerme sistemini kalibrasyon amacı ile bir çekme levhası oluşturulmuştur.



Şekil 5.8. Çekme çubuğundaki DMS' lerin konumu

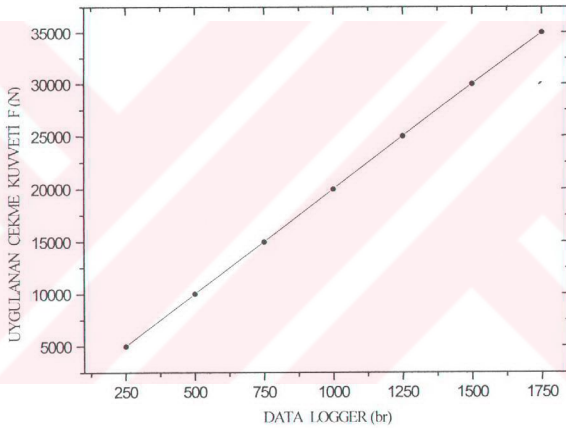
DMS' ler çekme çubuğuna şekil 5.9' da görüldüğü gibi tam (wheatstone) köprü oluşturacak şekilde bağlanmıştır.



Şekil 5.9. Wheatstone köprüsünde renk ve sayı kodlaması (42)

Öngerme levhası üzerindeki DMS' lerin tam köprü bağlantısı yapıldıktan sonra, öngerme levhası çekme cihazı çenelerine bağlanmış ve 1,2 mm/sn sabit hızla çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu sayede öngerme levhasına uygulanan ve bilinen bir yükün data logger' ın algıladığı 1 birim ile ilişkisi belirlenmiştir.

Çekme cihazı vasıtasıyla öngerme levhasına uygulanan her 5000 N' luk çekme kuvveti data loggerda 250 br olarak algılandığı belirlenmiş ve 35000 N' a kadar uygulanan yükte Şekil 5.10' da verilen kalibrasyon doğrusu elde edilmiştir.

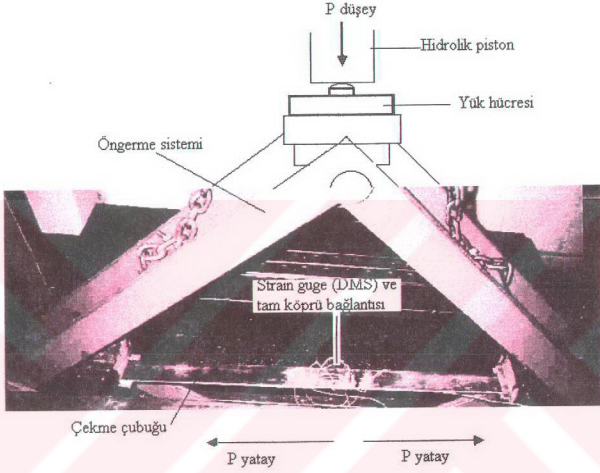


Şekil 5.10. Öngerme levhasının kalibrasyonu

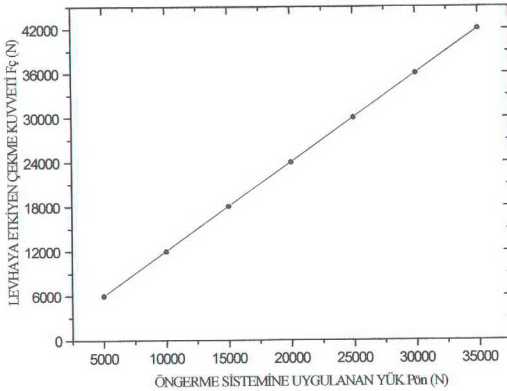
Öngerme levhası çekme cihazında kalibre edildikten sonra deney düzeneğinde (germe sistemi) çekme çeneleri arasına yerleştirilmiş ve germe sistemine hidrolik pres aracılığıyla düşey kuvvet uygulanmıştır (Şekil 5.11).

Hidrolik presin germe sistemine uyguladığı düşey kuvvet yük hücresi vasıtasıyla, düşey kuvvetin öngerme sistemi vasıtasıyla öngerme levhasına uyguladığı yatay kuvvet ise önceden kalibre edilmiş öngerme levhası vasıtasıyla data logger' dan okunmuştur. Bu sayede, hidrolik presin öngerme sistemine uyguladığı düşey

kuvvetle öngerme yatay kuvveti arasında bir bağıntı elde edilmiştir. Sonuç olarak 50 N' luk düşey kuvvetin yatayda oluşturduğu kuvvet 60 N olarak belirlenmiştir (Şekil 5.12).

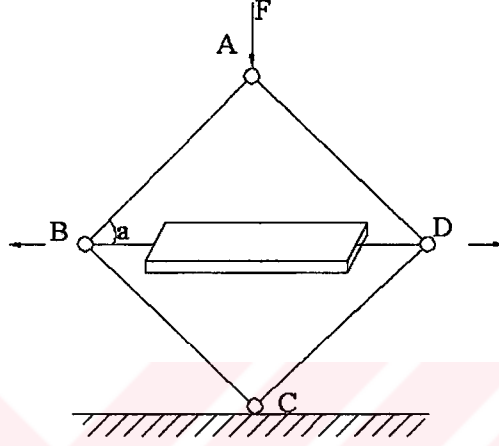


Şekil 5.11. Öngerme sisteminin DMS' li öngerme levhasıyla kalibrasyonu

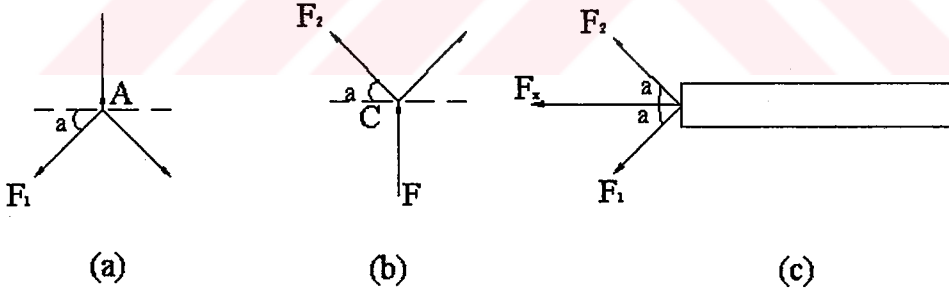


Şekil 5.12. Öngerme sistemi ve levhasının kalibrasyon eğrisi

Uygulanan düşey kuvvet ile çekme çeneleri arasında oluşan yatay kuvvet arasındaki ilişki vektörel denge denklemleri ile de belirlenmiştir. Bunun için, deney düzeneği şekil 5.13’ de görüldüğü gibi şematize edilmiş ve Şekil 5.14.’ de görüldüğü gibi vektörel kuvvetler konumlandırılmıştır.



Şekil 5.13. Deney düzeneğinin şematik görünüşü



Şekil 5.14. Vektörel kuvvetler

Burada $\sum F_y = 0$ olacağından;

$$F_1 = F/2 \cdot \sin a \quad [5.4]$$

$$F_2 = F/2 \cdot \sin a \quad [5.5]$$

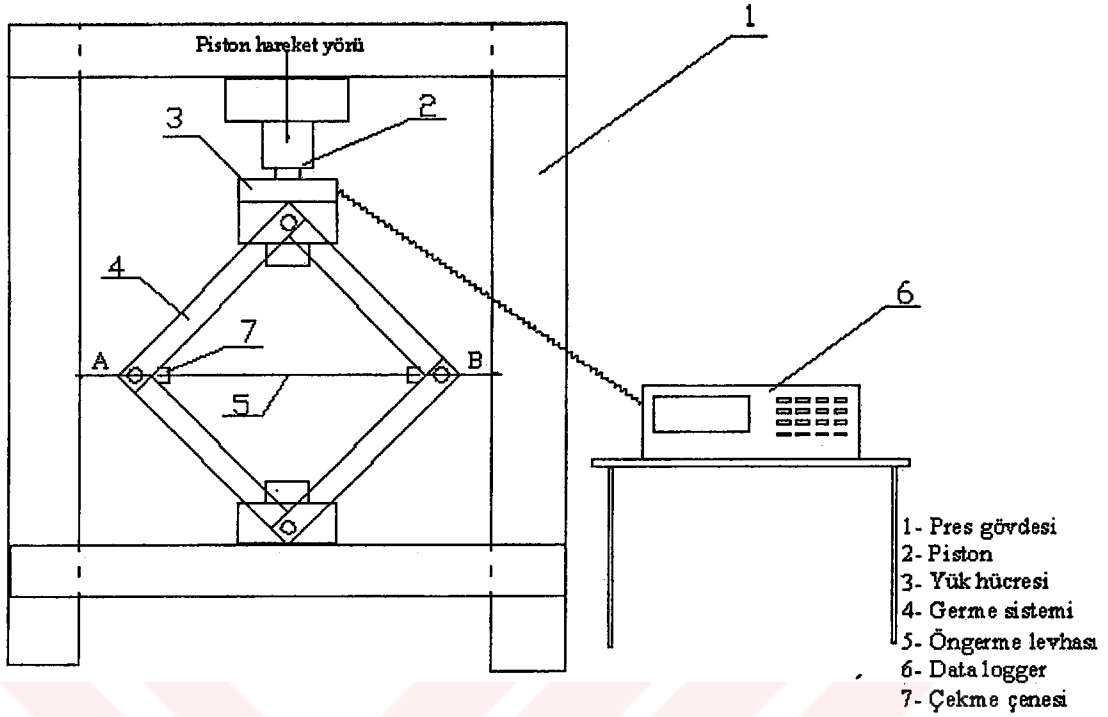
$F_1 = F_2$ olduğu için;

$$F_x = 2.F_1.\cos a \quad [5.6]$$

olur.

5.2.2.3. Öngerilmeli I- putrel kiriş üretimi

Öngerilmeli çelik I- putrel kiriş üretiminin gerçekleştirilebilmesi için, Şekil 5.15' de şematik olarak çizilen öngerme işleminin gerçekleştirildiği deney düzeneği G.Ü.T.E.F Metal Eğitimi Bölümü Mekanik Metalurji Labaratuarında oluşturulmuştur. Öngerilme kuvvetinin levha malzemeye uygulanabilmesi için sistemin çalışması şu şekilde gerçekleşir. İlk olarak hidrolik pres pistonu (no: 2) ok yönünde hareket ettirilir. Böylece germe makas sistemine (no: 4) bir yük uygulanmış olur. Uygulanan bu yükün etkisiyle germe aparatı basılmaya çalışır. Basılma etkisine karşı germe aparatında hareketli A ve B masfallarının bulunduğu noktalardan, dışa doğru açılmak şeklinde tepki oluşacağından, ok yönünde bir hareket meydana gelir. Bu hareketin etkisiyle tutucu çeneler arasına sıkışan levha malzeme çekilmeye çalışılır. Sonuçta çekme çeneleri arasına yerleştirilmiş olan levha malzemedede bir çekme gerilmesi meydana gelir.



Şekil 5.15. Öngerilmeli I- putrel kiriş üretim sistemi ve ekipmanlarının şematik gösterimi

Şekil 5.1 de görülen deney numunelerinden çekme çubuğu ve 5.15’de görüldüğü gibi öngerme aparatının çeneleri arasına yerleştirilmiştir. Düşey kuvveti yatay kuvvete dönüştüren öngerme aparatına hidrolik pres aracılığıyla bir kuvvet uygulanmıştır. Yukarıda açıklandığı üzere levha malzeme, uygulanan bu kuvvetin etkisiyle, çekme çeneleri arasında bir gerilmeye maruz kalmıştır ve önceden hazırlanan yarı mamul T profil malzemede öngerilme yükü altındaki çekme çubuğuna gazaltı kaynak işlemi ile birleştirilmiştir.

Uygulanacak öngerilme kuvvetleri ise çekme çubuğunun akma dayanımına göre belirlenmiş ve öngerilme miktarı malzemenin elastik sınırları içinde tutulmuştur. Çünkü, kaynak işlemi ile yapılacak olan birleştirme sırasında, malzemenin sıcaklığı artacak buna bağlı olarak da malzemenin akma dayanımında düşüş meydana gelecektir. Sıcaklıktan dolayı malzemenin akma dayanımında meydana gelecek düşüşe rağmen, uygulanan öngerilme malzemede akma oluşturmamalı ki sistemde ön gerilme ve sonucunda maksimum ön sehim elde edilebilsin. Bu durum göz önünde tutularak çekme levhasına 94, 188, 282 N/mm² lik öngerilmeler uygulanmıştır.

Ayrıca, dayanım değerlerini karşılaştırabilmek için öngerilmesiz I- putrel kiriş üretimi de gerçekleştirilmiştir. Her bir öngerme miktarında 4' er adet, öngerilmesiz kiriş türünden ise 8 adet üretilmiştir. Öngerilme uygulanmaksızın üretilen kirişlerden 4 tanesine ise gerilim giderme ısı işlemleri uygulanmıştır. Her bir öngerilme değerindeki numunelerin birinde kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Her kiriş türünden kalan diğer 3' er numuneye ise iki noktadan eğme testi uygulanmıştır.

Sisteme öngerilme yüklerinin uygulanması sırasında gerçekleştirilen kaynak işleminden sonra, deney malzemelerinin sıcaklıklarındaki artış sebebiyle, meydana gelen plastik deformasyon ve ısı genleşmeye bağlı olarak data logger'dan okunan yük değerlerinde düşüş ve daha sonra numunelerin oda sıcaklığına soğumasıyla birlikte bu gerilme değerlerinde tekrar artış gözlenmiştir.

Çizelge 5.3. Kaynak işlemi öncesi ve sonrası gerilme değerleri

İşlem	Öngerilme değerleri (N/mm ²)		
Kaynak işlemine başlangıç anında	94	188	282
1. taraf kaynak dikişi bitiş anında	55	118	152
2. taraf kaynak dikişi bitiş anında	50	105	135
Oda sıcaklığına soğuma anında	93	185	204

Çizelge 5.3'te görüldüğü üzere başlangıç öngerilme değeri 94 ve 188 N/mm² olan kirişlerin oda sıcaklığına soğuma anında başlangıç gerilme değerlerine yaklaşıırken, 282 N/mm² öngerilme değerine sahip kirişte ise başlangıç gerilme değerinin çok altında bir öngerilme değeri elde edilmiştir. Bunun sebebi ise, 282 N/mm² öngerilme değerinde gerçekleştirilen kaynak işlemi sırasında malzemenin akma dayanımı değerinin bu öngerilme değeri altında kalması ve çekme levhası malzemesinde akmanın (plastik deformasyonun) meydana gelmesi olarak düşünülmektedir.

Birinci taraf kaynak işleminin bitiş anında öngerilme değerlerinin başlangıç değerlerine göre çok küçük olmasının sebebi ise kaynak işleminden dolayı çekme levhasının sıcaklığının artmasıdır. Çelik malzemelerde sıcaklık arttıkça genleşme

meydana gelmektedir. Boyuna genleşme miktarı 500 °C' ye kadar her 100 °C' de yaklaşık 0,1 mm dir (2). Çekme levhasında meydana gelen bu genleşme sonucunda Şekil 5.15' de görülen pres pistonu ile germe aparatı arasında bulunan yük hücresinin üzerindeki basma kuvveti azalmakta ve böylece kaynak işlemi sonucunda öngerilme değerleri başlangıca göre oldukça düşük çıkmaktadır. Kaynaktan dolayı oluşan sıcaklığın oda sıcaklığına düşmesi neticesinde ise çekme levhası kendini çekmekte ve pres pistonu ile germe aparatı arasındaki yük hücresinin üzerine gelen basma kuvveti artmaktadır. Sonuçta ise malzemede plastik deformasyon (akma) oluşmadığı sürece başlangıç değerlerine yaklaşılmaktadır.

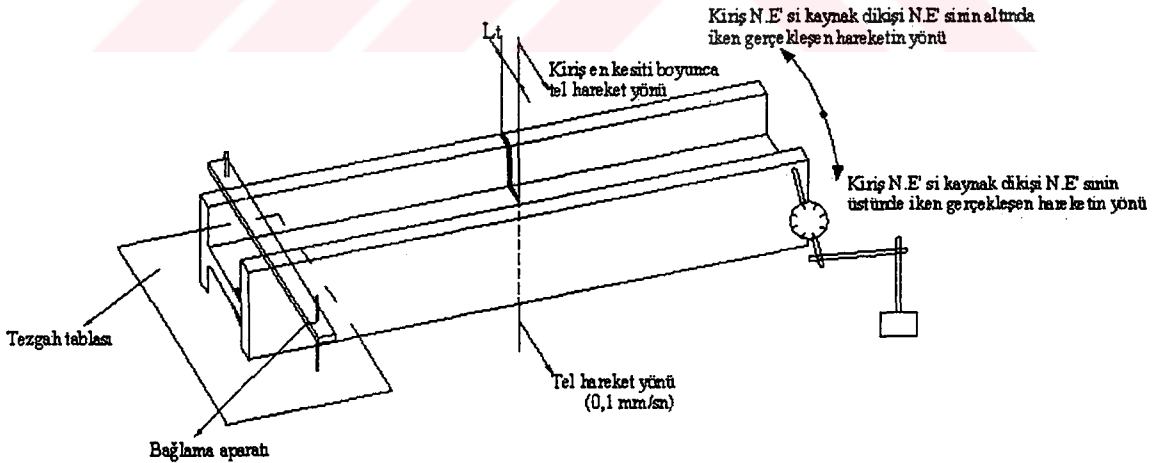
5.2.3. Gerilim giderme ısıtma işlemi

Öngerilmenin, malzemelerin dayanımında sağlayacağı avantajları belirleyebilmek için, öngerilme uygulamaksızın da kaynaklı birleştirme yöntemiyle I- putrel kiriş üretilmiştir. Ancak, kaynaklı birleştirmeler sonucunda kaynak dikişindeki boyuna çekme gerilmelerinin olduğu bilinmektedir. Bu sebeble, oluşan kalıcı çekme gerilmelerinin etkisini de yok etmek amacıyla öngerilmesiz olarak üretilen 8 adet I- putrel kirişten dört tanesine gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanmıştır. Gerilim giderme ısıtma işlemi A₁ sıcaklığı olan 723 °C sıcaklığın 80-173 °C altında (19) bir sıcaklık olan 630 °C sıcaklığa ısıtılması, bir saat beklenmesi ve fırında soğutulması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Gerilim giderme ısıtma işlemi G.Ü.T.E.F Metal Bölümünde bulunan SFL marka 1400 °C ısıtma kapasiteli muffle tipi ısıtma fırınında yapılmıştır.

5.2.4. Kalıntı gerilmelerin türü ve kalıntı gerilme sebepli çarpılma (yerdeğişim) miktarının (KGSCM) ölçülmesi

Öngerilme uygulayarak kaynaklı birleştirme yöntemi ile I- putrel kiriş üretmedeki amaç, kaynak işlemi ile sistemde oluşacak kalıntı gerilmelere ilave yeni gerilmeler oluşturmak ve böylece daha yüksek eğme gerilmelerine karşı koyabilen I- putrel kirişler üretmektir.

Bu amaçla üretilen I-putrel kirişlere kalıntı gerilmelerin oluşturduğu distorsyon miktarını ölçme deneyi uygulanmıştır. Bu deney G.Ü.T.E.F Makine Bölümü Kalıp A.B.D' da bulunan Fine Sodick marka tel elektroerezyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.16' da görüldüğü gibi, KGSCM ölçme deneyi uygulanacak malzeme tek tarafından tezgah tablasına sabit olacak şekilde bağlanmıştır. Öngerilmeli I- putrel kirişin serbest ucuna 0,001 mm hassasiyetli bir komparatör saati yerleştirilmiştir. I-putrel kiriş boyuna orta noktasından, (ağırlık merkezi düşey ekseninden en kesiti boyunca) kaynaksız taraftan olmak üzere, 0,1mm/sn gibi çok düşük bir hızda kesilmeye başlanmış ve kesme derinliği 0,01 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Kaynaklı tarafa doğru yapılan bu kesme işlemi ile birlikte, çekme levhasında kaynak işlemi sonrası oluşan yüksek basma gerilmesinin etkisiyle, I- putrel kirişin serbest ucunun saat ibresi yönünde ve bu yöne ters yönde yatay düzlemde yön değiştirme miktarı 0,001 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Böylece, I-putrel kirişte oluşturulan öngerilmelerin miktarına bağlı olarak meydana gelen yatay düzlemdeki yer değiştirme miktarı belirlenmiş ve bu sayede öngerilme ile oluşturulan kalıntı gerilmelerin miktarı ve cinsi hakkında bilgi edinilmiştir.

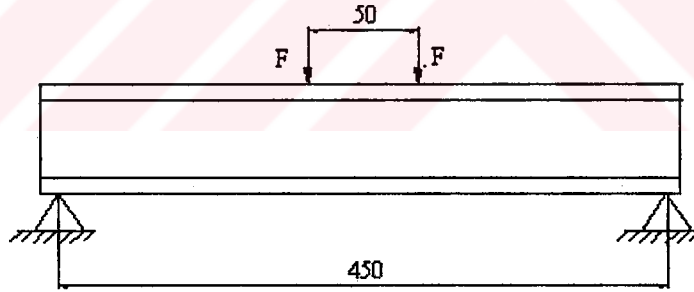


Şekil 5.16. Kalıntı gerilme türü ve miktarını belirlenmesi ile ilgili deney düzeneği

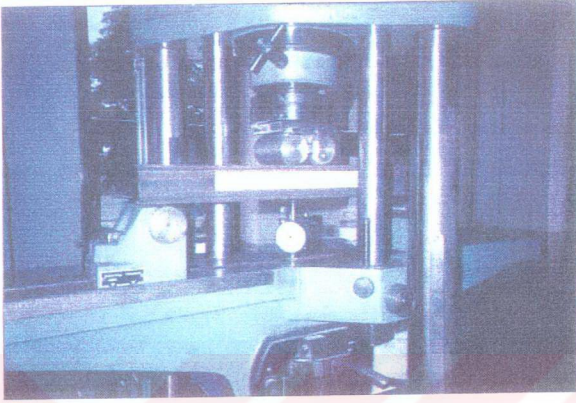
5.2.5. İki noktadan eğilme deneyi

Öngerilmeli çelik I-putrel kiriş üretimi betonarme yapılarda kullanılan öngerilmeli beton kirişlerden yola çıkılarak düşünülmüş ve tasarlanmıştır. Aparicio, A.C. ve arkadaşları (45), Dolan, C.W. ve arkadaşları (46) ile Tountanji, H. ve arkadaşları (47) üretmiş oldukları öngerilmeli betonarme kirişlere iki noktadan eğilme testi uygulamışlardır.

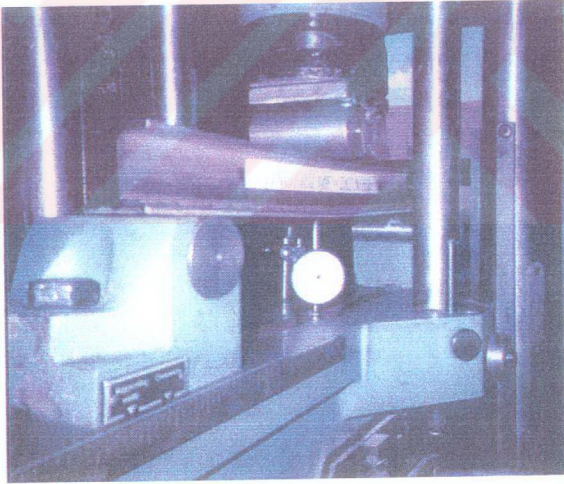
Bu nedenle, öngerilmeli çelik I-putrel kirişlere de benzer eğilme deneyi uygulanmıştır. Şekil 5.17’de uygulanan eğilme deneyi şematik görüntüsü, Şekil 5.18’de ise fotoğrafı görülmektedir. Eğilme deneyi, G.Ü.T.E.F Malzeme laboratuvarında bulunan MFL (Mohr + Federhaff + Lasenhausen) marka 20 ton kapasiteli hidrolik çekme-basma cihazında 1,2 mm/sn yükleme hızında gerçekleştirilmiş ve kirişlerde meydana gelen sehim 0,01’lik kompratör saatiyle ağırlık merkezi düşey eksenine doğrultusuna ölçülmüştür.



Şekil 5.17. Kirişlere uygulanan eğilme deneyinin şematik görüntüsü



a)



b)

Şekil 5.18. Eğme deneyi düzeneği ve eğme işleminin gösterilişi

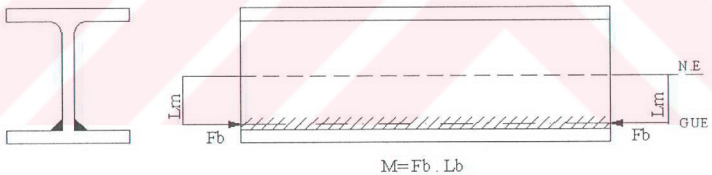
a) Eğme deneyi başlangıcı

b) Eğmenin gerçekleştiği an

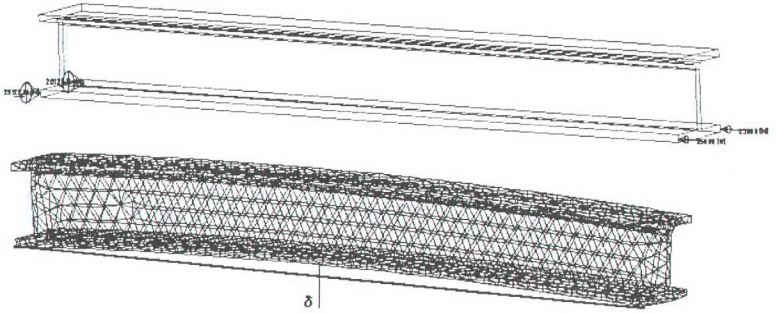
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Kalıntı Gerilmelerin Belirlenmesi ve Ön Şahim Ölçüm Sonuçları

Kirişte oluşan kalıcı basma gerilmesi çelik I- putrel kirişte, boyuna distorsiyonun neden olduğu, bir şahim oluşturmaktadır. Basma gerilmesinin etkisiyle oluşan bu şahimin nedeni ise, gerilmelerin uygulandığı eksenin (GUE) (bu eksen kaynak dikişi ağırlık merkezi yatay eksenidir) nötr ekseninden farklı olmasıdır (Şekil 6.1). Nötr eksen ile GUE arasındaki mesafe (L_m) kiriş ağırlık merkezine göre bir moment kolu, dolayısıyla uygulanan gerilmede bir moment oluşturmaktadır (34, 35). Oluşan momentin etkisiyle de kirişlerde, öngerilme yüküne bağlı olarak, bir şahim meydana gelir. Öngerilmemiş bir I- putrel kirişe GUE ekseninden etki eden 100 N/mm^2 büyüklüğündeki basma gerilmelerinin kirişte yaklaşık $\delta = 2,33 \text{ mm}$ 'lik bir şahime neden olduğu Mechanical Decstop version 6 (MD 6) bilgisayar destekli tasarım programında yapılan gerilme analizleri sonucunda da belirlenmiştir (Şekil 6.2).

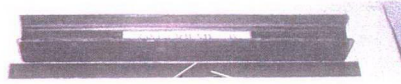


Şekil 6.1. Nötr eksen ile GUE arasındaki mesafe (moment kolu)



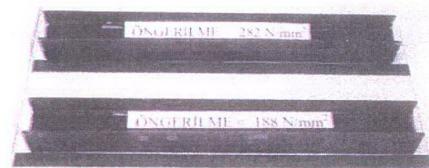
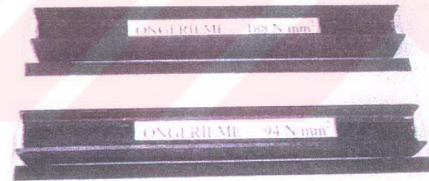
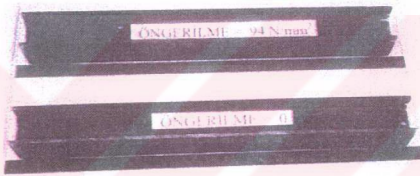
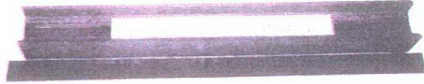
Şekil 6.2. I- putrel kirişte basma gerilmelerinin neden olduğu ön sehmin MD 6 bilgisayar programında analizi

Şekil 6.3’ de görülen kirişlerde öngerme ve kaynak çekmesi sebebiyle oluşan ön sehim (δ_{os}) miktarı da sisteme uygulanan öngerilmeler ile doğrudan ilişkilidir. Kirişe uygulanan öngerilme miktarları çekme levhasında akma ve dolayısıyla plastik deformasyon oluşturmayacak şekilde seçilmiştir. Ancak kaynak işlemi sırasında yüksek ısı çekme levhasının akma dayanımında düşmelere sebep olmuştur. Bunun neticesinde 188 N/mm^2 öngerilme uygulanan levha malzemede çok düşük miktarda, 282 N/mm^2 öngerilme uygulanan levha malzemede ise önemli ölçüde akmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Zira, akmanın meydana geldiği numunelerde daha düşük bir ön sehim meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 6.3 ‘deki ön sehim miktarını gösteren referans düzlemi ile öngerilmeli I- putrel alt yüzeyindeki beyaz çizgi olarak görülen aralığın büyük ve küçük boyutta olmasından anlaşılmaktadır.



Önşim aralığı

Referans düzlemi



Şekil 6.3. Öngerilmeli I kirişler ve meydana gelen ön sehim

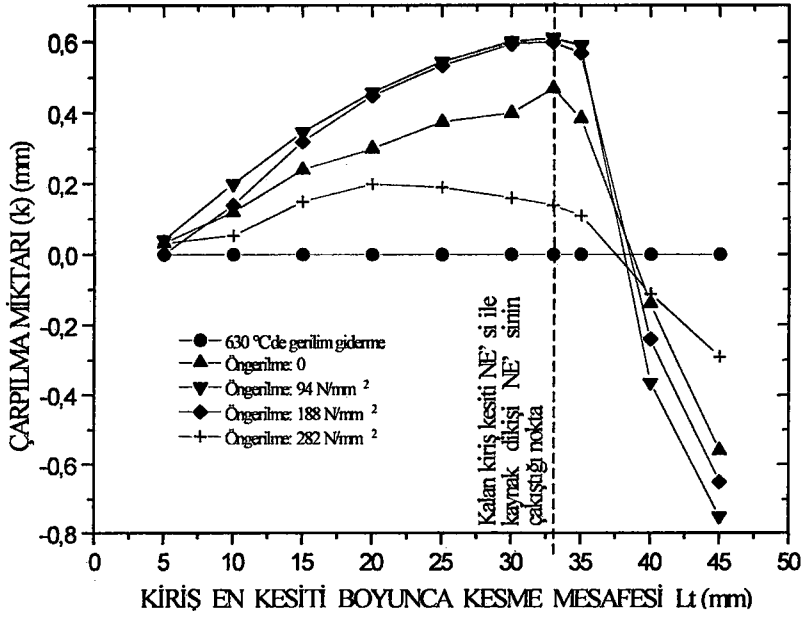
Germe aparatına uygulanan öngerilme miktarına bağlı olarak I kirişlerde oluşan KGSCM Şekil 5.16' da şematik olarak görülen deney düzeneği kullanılarak belirlenmiş ve Çizelge 6.1 ve Şekil 6.4' de verilen değerler elde edilmiştir. Şekil 6.5' de ise I kiriş kesitinin üst noktasından itibaren 30 mm derinlikteki kalıntı gerilme miktarları gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Kalıntı gerilme ölçüm sonuçları

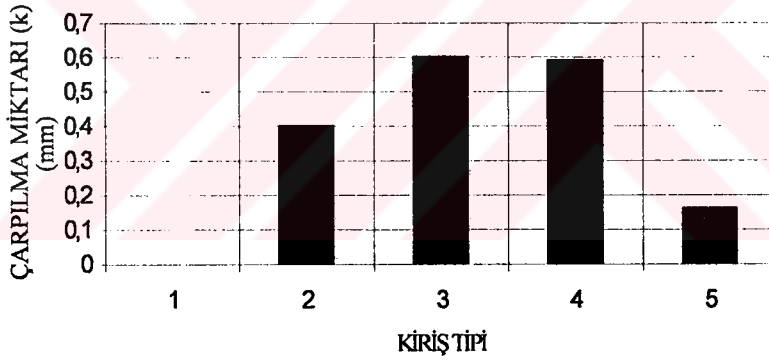
Kesme mesafesi Lt (mm)	Numune türü ve KGSCM (mm)					Lt' ye bağlı oluşan NE' nin üst noktasına mesafesi (mm)
	Isıl işlem uygulanan öngerilmemiş kiriş	Öngerilmemiş kiriş	94 N/mm ² öngerilmeli kiriş	188 N/mm ² öngerilmeli kiriş	282 N/mm ² öngerilmeli kiriş	
5	0	0,032	0,040	0,0	0,03	40,7
10	0	0,120	0,200	0,140	0,053	42,5
15	0	0,240	0,347	0,320	0,15	44,3
20	0	0,300	0,460	0,450	0,20*	46
25	0	0,375	0,545	0,530	0,19	47,5
30	0	0,400	0,600	0,590	0,16	48,7
33	0	0,470*	0,610*	0,600*	0,14	49,7
35	0	0,385	0,590	0,570	0,11	50,2
40	0	-0,14	-0,365	-0,240	-0,112	51,25
45	0	-0,56	-0,82	-0,65	-0,290	52,05

* Kiriş hareket yönü değişimi (N.E' nin GUE eksenine altında kaldığı Lt mesafesi)

Not: Gerilmelerin uygulandığı eksenin (GUE) kiriş üst noktasına mesafesi 49 mm' dir.



Şekil 6.4. Kirişlerde kalıntı gerilme miktarına bağlı oluşan çarpılma miktarının değişimi

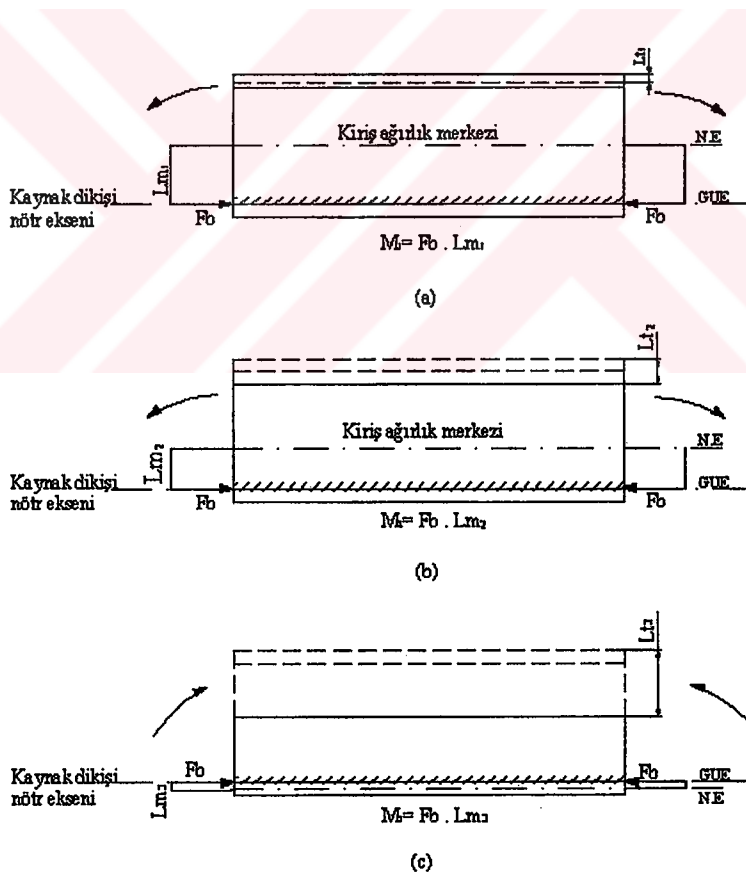


Şekil 6.5. Kiriş enkesiti boyunca $L_t = 30$ mm kesme mesafesinde KGSCM (1-630 °C' gerilim giderme ısıtıl işlemi uygulanmış kiriş, 2-Öngerilme: 0, 3-Öngerilme: 94 N/mm², 4-Öngerilme: 188 N/mm², 5-Öngerilme: 282 N/mm² uygulanmış kirişler)

Çizelge 6.1, Şekil 6.4 ve 6.5' de görüldüğü üzere KGSCM, uygulanan öngerilme yüküne bağlı olarak değişmektedir. En fazla KGSCM 94 N/mm² öngerilme uygulanan kirişte elde edilirken, 630 °C'de gerilim giderme tavlama uygulanan kirişte ise KGSCM sıfır değerindedir. Öngerilmenin uygulanmadığı kirişte ise kaynak işleminden dolayı kalıntı gerilme söz konusu iken, 282 N/mm² öngerilme kuvveti ile üretilen kirişte de KGSCM çok düşük değerdedir. Bunun nedeni kaynak

işlemi sırasında artan ısıdan dolayı çekme levhasında plastik deformasyonun meydana gelmesidir.

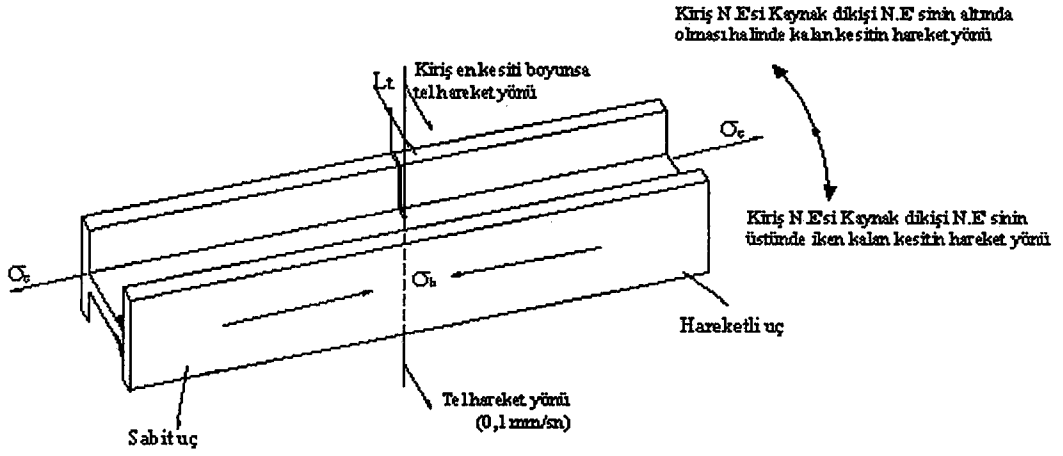
Tel erezyon ile kesmede değişen L_t ile birlikte, kiriş kesitine bağlı olarak yer değişimi gösteren nötr eksenin kaynak dikişi nötr eksenine göre olan konumu bir moment kolu (L_m) oluşturmaktadır (Şekil 6.6.a). Kiriş N.E' si kaynak dikişi N.E' sine yaklaştıkça moment kolu ve dolayısıyla oluşan moment değeri de azalmaktadır (Şekil 6.6.b). Kiriş N.E' si ile kaynak dikişi N.E' si çakıştığında ise $L_m = 0$ ve dolayısıyla moment değeri de sıfır olur. Kiriş N.E' si kaynak dikişi N.E' sinin altında olduğunda ise L_m ve dolayısıyla moment tekrar oluşur. Fakat oluşan moment ters yöndedir (Şekil 6.6.c).



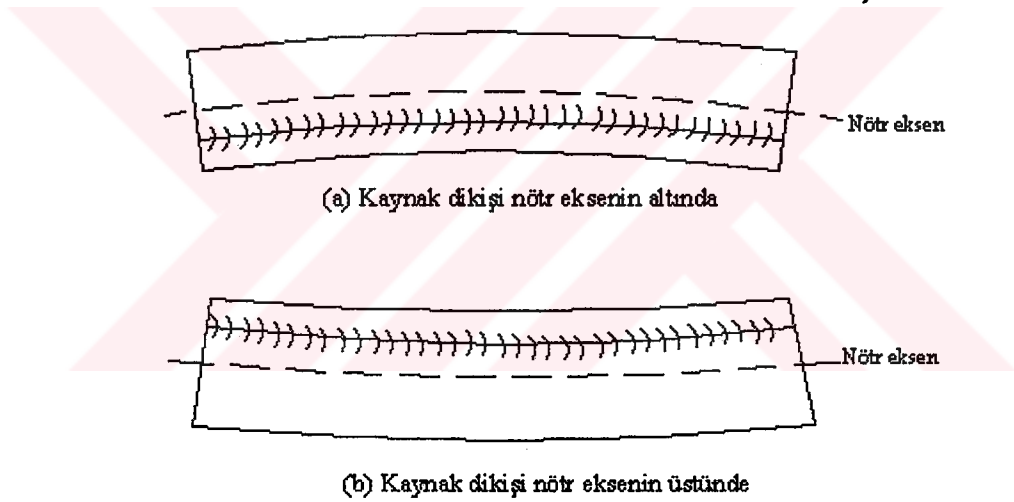
Şekil 6.6. Kiriş kesiti N.E' sinin kaynak dikişi N.E' sine göre durumu (a-b) Kiriş N.E' si Kaynak dikişi N.E' sinin üzerinde ($L_{t1} < L_{t2}$ olduğundan $L_{m1} > L_{m2}$ dir. Dolayısıyla $M_1 > M_2$ olur) (c) Kiriş N.E' si Kaynak dikişi N.E' sinin altındadır. Oluşan moment ve dolayısıyla çarpılma ters yöndedir

94 ve 188 N/mm² öngerilmeye sahip kirişler ile öngerilmenin sıfır olduğu kirişte KGSC yaklaşık 33 mm kesme derinliğine ulaşıldıktan sonra tekrar sıfıra doğru yaklaşmakta ve hatta ters yönde devam etmektedir. 282 N/mm² öngerilmeye sahip malzemede ise, KGSC' deki geri dönüş yaklaşık 20 mm' de meydana gelmektedir (Çizelge 6.1, Şekil 6.4). Kirişlerde meydana gelen bu KGSCM değerlerinin belirli bir değere kadar saat yönünde, daha sonra ters yönde gerçekleşmesinin nedeni ise öngerilme kuvvetlerinin kirişte meydana getirdiği kalıntı gerilmeler ve kaynak dikişinin nötr eksene göre bulunduğu konumdur.

Üretilen öngerilmeli bir kiriş orta noktasından en kesiti boyunca kesilecek olursa (Şekil 6.7), kirişin üst başlık levhasındaki çekme ve alt (kaynak yapılan kısım) başlık levhasındaki basma gerilmelerinden dolayı, kirişin serbest ucu saat yönünde hareket eder. Ancak, kaynak işleminden sonra meydana gelen boyuna çekme ve nötr eksenin kaynak dikişine göre konumu da oldukça önemlidir. Şöyle ki, kaynak dikişi eğer nötr eksenin altında kalıyorsa malzemede üst kısım dış bükey olacak şekilde bir çarpılma meydana gelir. Eğer nötr eksen kaynak dikişinin altında kalıyorsa, bu durumda üst kısım iç bükey olacak şekilde bir çarpılma söz konusudur (Şekil 6.8) (48). Öngerilmeli kirişlerde başlangıçta nötr eksen kaynak dikişinin üstündedir. Ancak, kiriş en kesiti boyunca kesme derinliği (Lt) arttıkça, kiriş en kesit boyutu azalacağından, nötr eksen kaynak dikişine doğru kayar. Sonuçta, nötr eksen kaynak dikişinin altına iner ve öngerilmesiz, 94, 188 N/mm² öngerilmeli kirişlerde Lt= 33 mm, 282 N/mm² öngerilmeli kirişte ise Lt= 20 mm kesme derinliğinden sonra, kirişlerde meydana gelen KGSC ters yönde devam eder. 282 N/mm² öngerilmeye maruz kalan kirişte KGSC' nin 20 mm' den sonra yön değiştirmesinin nedeni olarak, birleştirme sırasında plastik deformasyonun meydana gelmesi ve düşük kalıntı gerilmelerin varlığı söylenebilir.

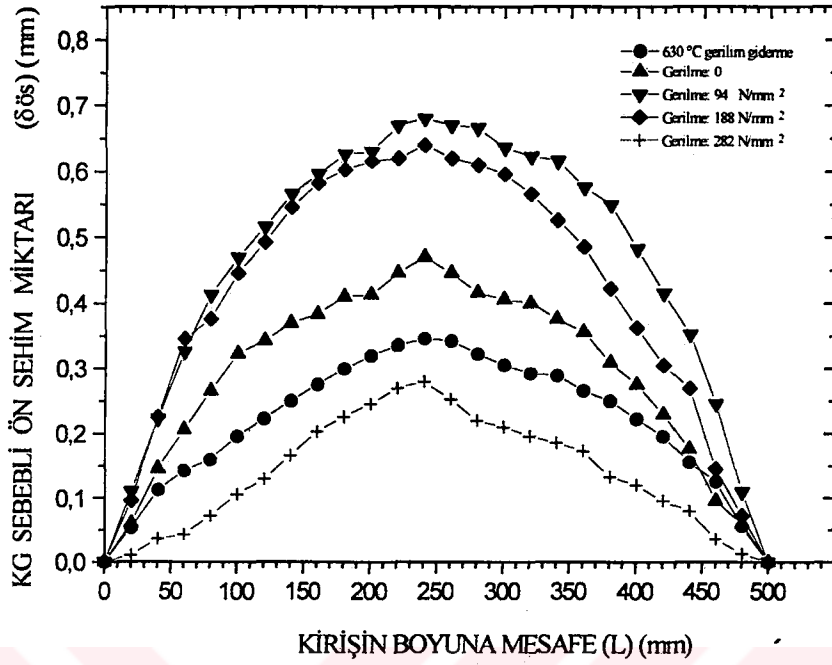


Şekil 6.7. Öngerilmeli kirişte oluşan gerilme türleri

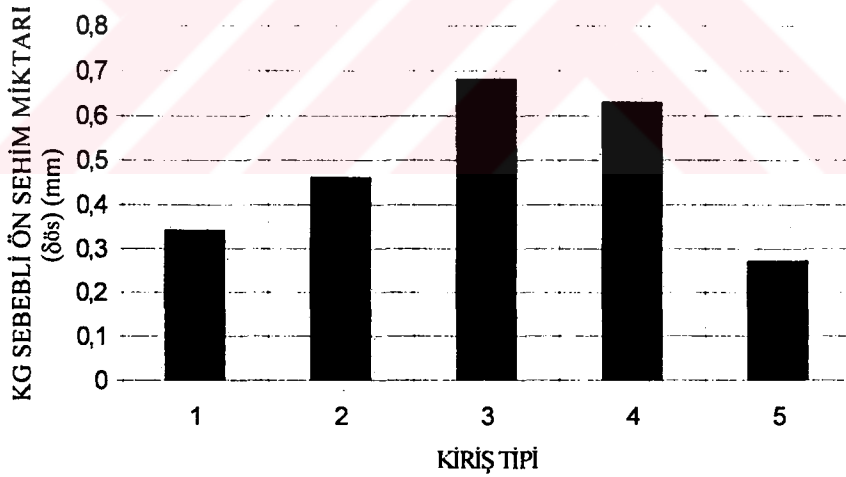


Şekil 6.8. Kaynak dikişi ve nötr ekserinin durumuna göre oluşan çarpılma

Ayrıca, oluşan kalıntı gerilmeler kirişte boyuna distoryona ve dolayısıyla ön sehimin oluşmasına da neden olduğu için, kalıntı gerilmenin az olduğu kiriş sistemlerinde ön sehim de az olmuştur (Şekil 6.9, 6.10).



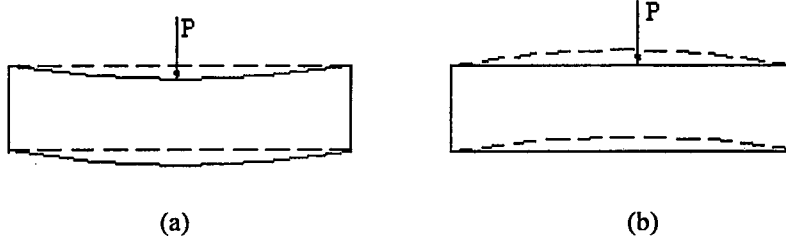
Şekil 6.9. Kiriş boyunca oluşan önsehim (boyuna distorsiyon) miktarı



Şekil 6.10. Kirişin orta noktasındaki önsehim miktarı (1-630 °C' gerilim giderme ısıtıl işlemi uygulanmış kırış, 2-Öngerilme: 0, 3-Öngerilme 94 N/mm², 4-Öngerilme:188 N/mm², 5-Öngerilme: 282 N/mm² uygulanmış kırışlar)

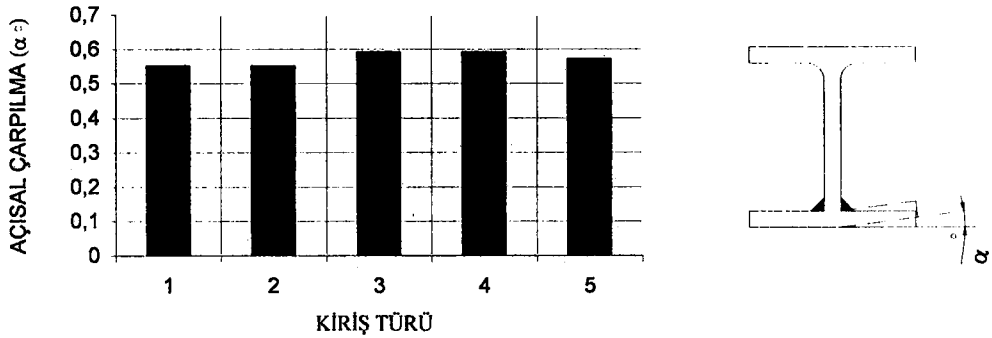
Kırışlar çalışma şartlarında eğilmeye zorlanan yapı elemanlarıdır. Eğilme gerilmesinin etkisiyle kırışın alt başlık bölgesinde çekme, üst başlık bölgesinde ise basma gerilmeleri oluşur.Yani kırışte bir ters sehim meydana gelir. Bu durumda kırışın eğme dayanımını olumsuz yönde etkiler. Ancak kırış bir ön sehimde sahip ise,

yüklemeye anında kirişin alt ve üst başlıklarında bir ters sehime oluşmayacaktır (Şekil 6.11). Bu durum, ön sehime sahip kirişin daha fazla eğilme gerilmesini taşımasına olanak sağlamaktadır (14, 15)



Şekil 6.11. Kiriş türleri ve yükleme durumları. a) Standart kiriş b) Ön sehime sahip kiriş

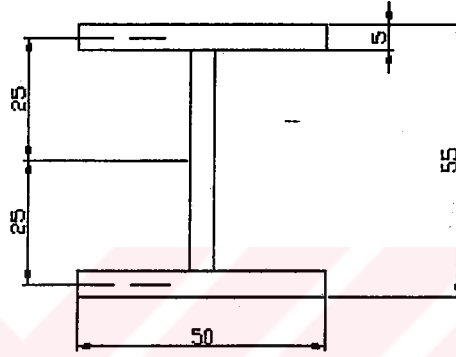
Kaynak işlemi sırasında meydana gelen elektrik arkından dolayı artan sıcaklık nedeniyle çekme çubuğu olarak kullanılan alt başlıklarda açılma distorsiyon da meydana gelmiştir. Ancak Şekil 6.12’ de görüldüğü gibi oluşan açılma distorsiyon miktarı tüm kirişlerde birbirine çok yakın değerlerde meydana gelmiştir. Açılma distorsiyon değerlerinin birbirine çok yakın olması uygulanan öngerilmenin açılma distorsiyon üzerinde etkisi olmadığını göstermektedir.



Şekil 6.12. Kiriş tipi - açılma distorsiyon arasındaki ilişki. (1-630 °C’ gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanmış kiriş, 2-Öngerilme: 0, 3-Öngerilme 94 N/mm², 4-Öngerilme:188 N/mm², 5-Öngerilme: 282 N/mm² uygulanmış kirişler)

6.2. Eğilme Deneyi Sonuçları

Deneysel verilerle hesaplanan teorik verilerin kıyaslanabilmesi için Şekil 6.13’ de en kesiti ve ölçüleri görülen ve üretilen öngerilmeli kirişlerle aynı ölçülerdeki standart öngerilmemiş bir kirişin teorik olarak dayanabileceği maksimum kuvvet hesaplanmıştır.



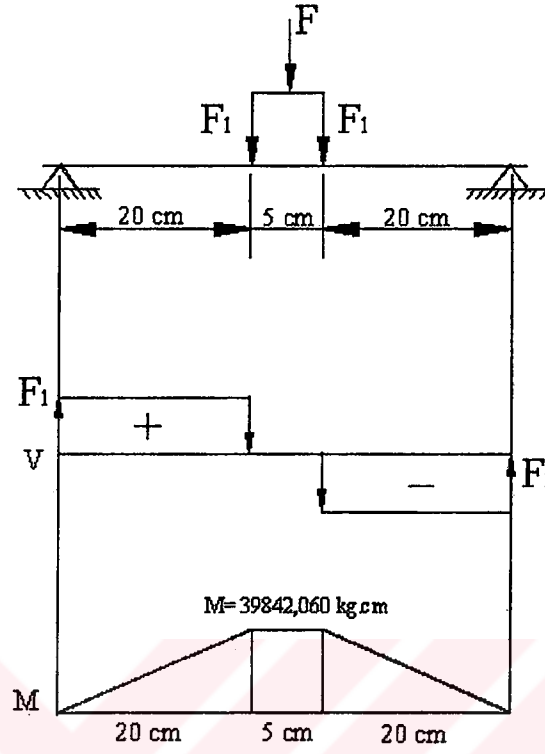
Şekil 6.13. Üretilen kiriş en kesiti

Steiner teoremine göre kesit alanın atalet momenti ilk olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$I = ((5 \times 0,5^3) / 12 + (5 \times 0,5) \times (2,5)^2) \times 2 + ((0,5 \times 4,5^3) / 12 = 35,151 \text{ cm}^4$$

$\sigma_{akma} = M.c / I$ eğilme formülünde akma dayanımı, atalet momenti ve c parametresi yerine konularak, kesitin maksimum momenti $M = 39842,060 \text{ kg.cm}$ olarak bulunmuştur.

Bulunan maksimum moment değerine göre Şekil 6.14’ de görüldüğü gibi sistemin kesme ve moment diyagramları çizilmiş ve kirişin taşıyabileceği maksimum yük hesaplanmıştır.



Şekil 6.14. Kirişin kesme ve moment diyagramları

$F_1 = 39842,060 / 20 = 1992,103 \text{ kgf}$ ($19522,609 \text{ N}$) olarak bulunur. $F = 2F_1$ olduğuna göre bu kirişin taşıyabileceği maksimum yük $3984,206 \text{ kgf}$ ($39045,218 \text{ N}$) olarak bulunur. Dolayısıyla Şekil 6.13' de görülen kesite sahip 50 cm uzunluğundaki bir kirişe 40000 N yüklendiğinde, teorik olarak kirişte akma ve sonucunda plastik deformasyon gözlenecektir.

Yine Şekil 6.13' de kesiti görülen 50 cm uzunluğundaki kiriş farklı yüklere maruz bırakıldığında, kirişte meydana gelecek teorik sehim miktarı Çizelge 6.2' de verilmiş olan $\delta_t = (P.a / 24.E.I).(3L^2 - 4a^2)$ formülü ile hesaplanmıştır.

Burada;

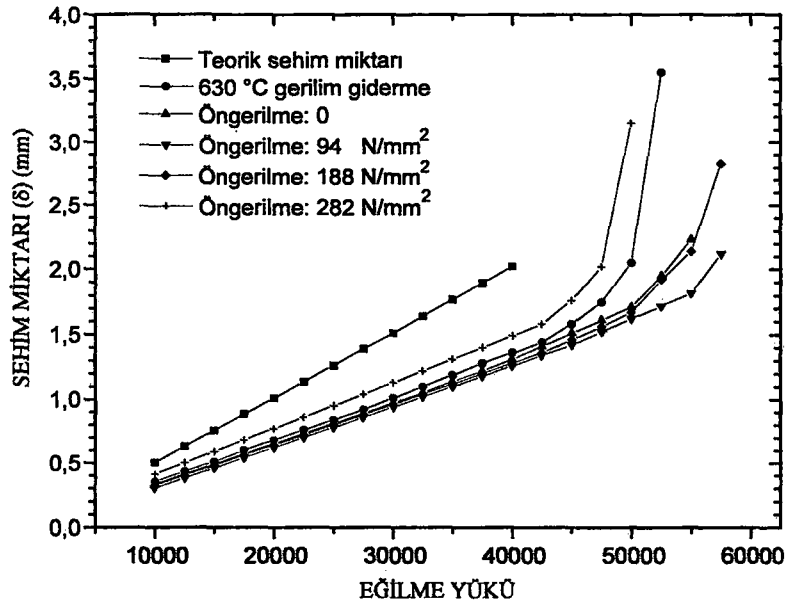
Elastikiyet modülü 2100000 kg/cm^2 , atalet momenti $39842,060 \text{ kg.cm}$, kiriş boyu 50 cm ve yük ile mesnet arası mesafe $a = 20 \text{ cm}$ olarak alınmıştır.

Çizelge 6.2. Öngerilmemiş kirişte hesaplanan teorik sehim miktarı ile çeşitli eğilme yüklemelerine karşılık üretilen kirişlerde oluşan sehim miktarı

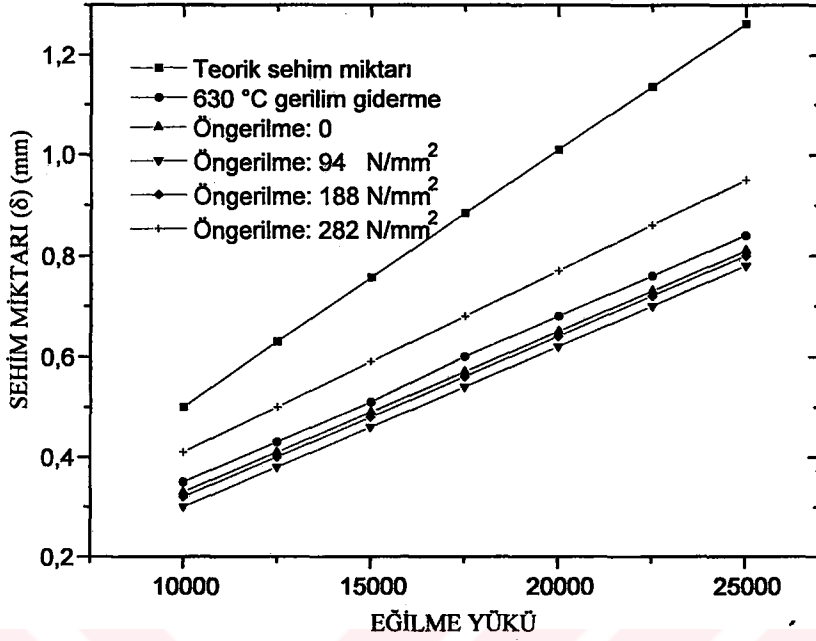
Uygulanan yük (N)	Öngerilmemiş kirişte hesaplanan teorik sehim miktarı δ_t (mm)	Isıl işlem uygulanmış öngerilmemiş kirişte sehim miktarı δ (mm)	Öngerilmemiş kirişte sehim miktarı δ (mm)	94 N/mm ² öngerilmeli kirişte sehim miktarı δ (mm)	188 N/mm ² öngerilmeli kirişte sehim miktarı δ (mm)	282 N/mm ² öngerilmeli kirişte sehim miktarı δ (mm)
2500	0,126	0,11	0,09	0,06	0,08	0,14
5000	0,252	0,19	0,17	0,14	0,16	0,23
10000	0,505	0,35	0,33	0,30	0,32	0,41
15000	0,757	0,51	0,49	0,46	0,48	0,59
20000	1,01	0,68	0,65	0,62	0,64	0,77
25000	1,262	0,84	0,81	0,78	0,80	0,95
30000	1,51	1,01	0,97	0,94	0,96	1,13
35000	1,768	1,19	1,14	1,10	1,12	1,31
40000*	2,02	1,36	1,31	1,26	1,28	1,49
45000	2,73	1,58	1,51	1,42	1,46	1,76
50000		2,05	1,71	1,62	1,67	3,15
55000		3,55	2,23	1,82	2,14	4,03

* Teorik akmanın gerçekleştiği eğilme yükü

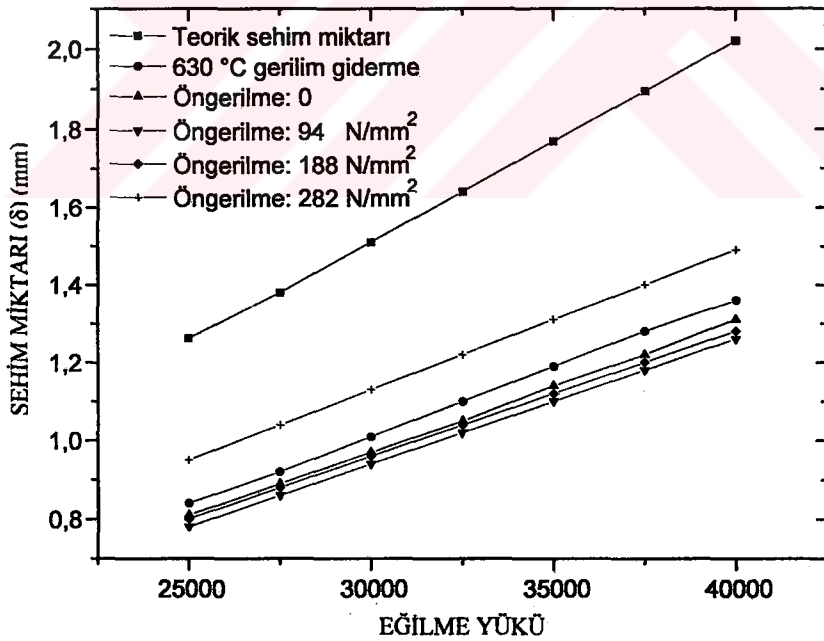
Şekil 6.15-16-17-18' de ise üretilen kirişlere uygulanan eğilme deneyi sonuçlarının teorik sehim miktarlarıyla karşılaştırılması görülmektedir.



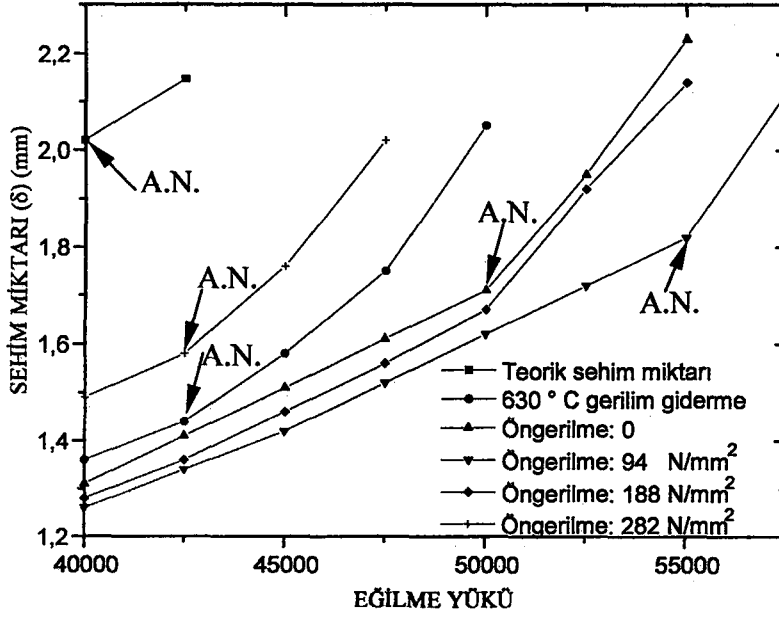
Şekil 6.15. Öngerilmeli kirişlere uygulanan iki noktadan eğme testi ile teorik eğilme miktarının karşılaştırılması (10000 N-60000 N aralığı)



Şekil 6.16. Öngerilmeli kirişlere uygulanan iki noktadan eğme testi ile teorik eğilme miktarının karşılaştırılması (10000 N-25000 N aralığı)



Şekil 6.17. Öngerilmeli kirişlere uygulanan iki noktadan eğme testi ile teorik eğilme miktarının karşılaştırılması (25000 N-40000 N aralığı)

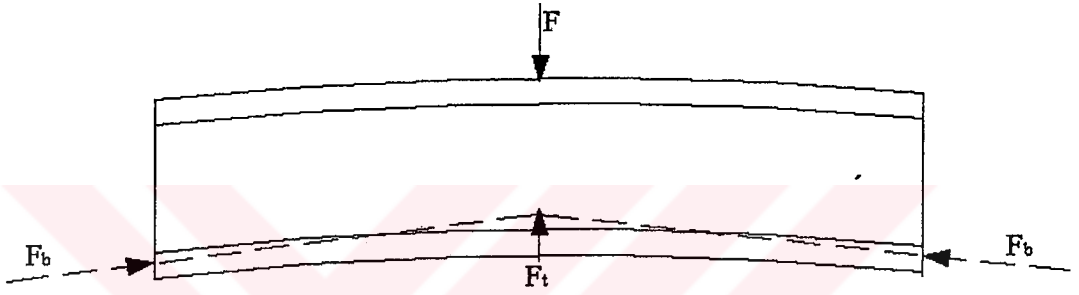


Şekil 6.18. Öngerilmeli kirişlere uygulanan iki noktadan eğme testi ile teorik eğilme miktarının karşılaştırılması (40000 N-55000 N aralığı)

Kaynaklı birleştirme yöntemiyle üretilen tüm kirişlerde, uygulanan eğilme kuvvetiyle oluşan sehim teorik olarak hesaplanan sehim miktarından daha azdır. Öngerilmeli kirişlerde öngerilme miktarının artmasıyla birlikte kirişte oluşan sehimin azalacağı beklentisi yanlıştır. Çünkü, 94 N/mm² öngerilmede üretilmiş olan kirişte oluşan sehim, 188 ve 282 N/mm² öngerilmede üretilmiş olan kirişlerden daha düşüktür. Hatta 282 N/mm² öngerilme uygulanarak üretilen kirişte eğilme testi sonucunda oluşan sehim miktarı teorik sehim miktarına en yakın olanıdır (Şekil 6.15, 6.16, 6.17, 6.18). Bunun nedeni ise, kaynak işlemi sırasında meydana gelen sıcaklık artışının malzemenin akma dayanımını düşürmesi ve bunun sonucu olarak uygulanan öngerilme kuvveti altında çekme levhasında plastik deformasyonun meydana gelmesidir. Eğilme yüküne bağlı olarak kirişlerin eğilme dayanımında dolaylı olarak belirleyebilir ve en az sehim oluşan kirişin eğilme dayanımı en iyidir diyebiliriz.

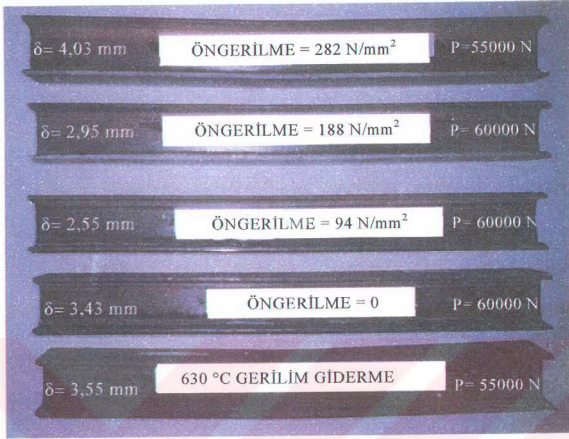
Eğilme deneyine tabi tutulan kirişlerde oluşan sehim miktarı uygulanan eğilme yüküne bağlı olarak belirli bir yüke kadar lineer gerçekleşmektedir. Ancak belirli bir eğilme yükünden sonra sehimdeki bu lineerlik bozulmaktadır. Kirişlerde sehimdeki lineerliğin bozulduğu yük, o kirişin eğilme dayanımını vermekte olup, bu noktadan

sonra kirişte plastik deformasyonun başladığının göstergesidir. Şekil 6.18’ de, aynı kesite sahip teorik akma noktası $A.N. = 40000 \text{ N}$ olan kirişlerin öngerilme değerlerine bağlı olarak A.N.’ ları gösterilmiştir. 94 N/mm^2 öngerilme değerine sahip olan kirişin A.N’ nın 55000 N olduğu görülmektedir. Yani kirişe verilen ön gerilme ile kirişin A.N. 15000 N kadar iyileştirilmiştir. Bunun nedeni ise öngerilme kuvvetinin kirişi eğmeye çalışan kuvvete karşı tepki kuvveti (F_t) oluşturması ve sonuçta eğilme kuvvetinin şiddetini azaltmasıdır (Şekil 6.19).



Şekil 6.19. Basma kuvvetlerinin eğme kuvvetine karşı göstermiş olduğu tepki

Sehim miktarı uygulanan eğme yükü arasındaki ilişkiyi veren şekiller incelenecek olursa (Şekil 6.15, 6.16, 6.17, 6.18), öngerilme uygulanmadan kaynaklı birleştirmeye üretilen kirişlerde de yüksek bir eğilme dayanımı elde edildiği görülecektir. Bunun nedeni de kaynak işleminden dolayı kirişte yüksek oranda çekme türünde kalıcı gerilmelerin oluşmasıdır (30). Kaynaktan dolayı oluşan bu kalıcı gerilmeler, kirişte bir öngerilme varmış gibi davranmaktadır. Şekil 6.20’ de ise eğilme deneyi sonrası kirişlerde meydana gelen plastik deformasyon görülmektedir. Üretim sırasında plastik deformasyonun meydana geldiği 282 N/mm^2 öngerilme değeri altında üretilen kirişte 55000 N ’ luk eğilme yükü altında $4,03 \text{ mm}$ büyüklüğünde sehim oluşurken, 94 N/mm^2 öngerilme değerine sahip kirişte ise 60000 N ’ luk eğilme yükünde $2,55 \text{ mm}$ ’ lik bir sehim oluştuğu tespit edilmiştir.

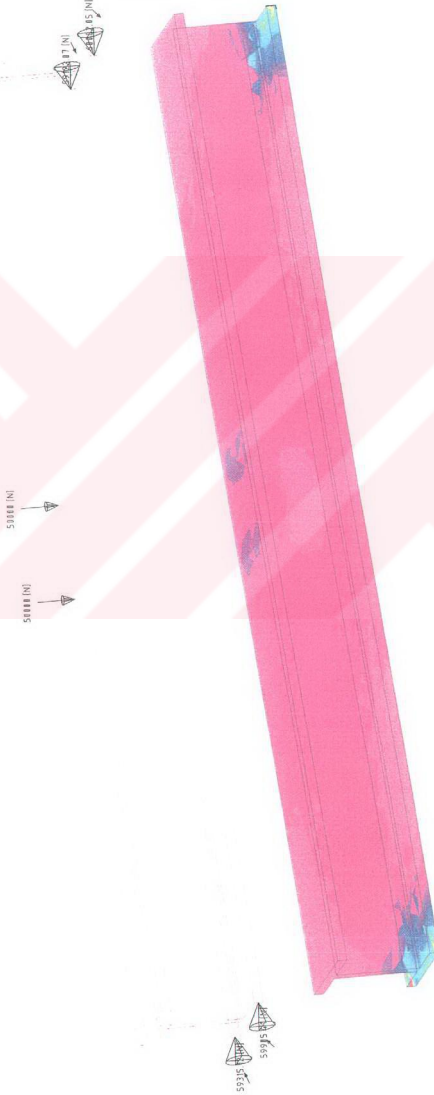


Şekil 6.20. Eğilme testi sonrası kiriş numunelerdeki deformasyonların görünümü

MD6 paket programında yapılan gerilme analizleri sonucunda Şekil 6.21' de öngerilmemiş kirişin, Şekil 6.22' de ise 23500 N öngerilme değerine sahip kirişin 50000 N' luk iki noktasal kuvvet ile eğilmeye çalışıldıkları durumda oluşan gerilmeler ve sehim miktarları görülmektedir. Öngerilmeli kirişte, kirişe etki eden toplam kuvvet sayısı ve bu kuvvetlerin gerilme değerleri toplamı ön gerilmemiş kirişe göre daha fazladır. Dolayısıyla öngerilmeli kirişteki Von Misses ve max ana gerilme dağılım miktarı öngerilmemiş kiriştekiye göre daha fazladır (Şekil 6.21.a, 6.22.a). Fakat öngerilmelinin, kirişin eğilme dayanımında bir artış sağladığı da bir gerçektir. Çünkü öngerilmeli kirişte oluşan sehim oldukça azdır. Öngerilmeli kirişte oluşan sehim 1,3 mm seviyesinde iken (Şekil 6.22.b) öngerilmemiş kirişte oluşan sehim ise 5,54 mm' dir (Şekil 6.21.b).

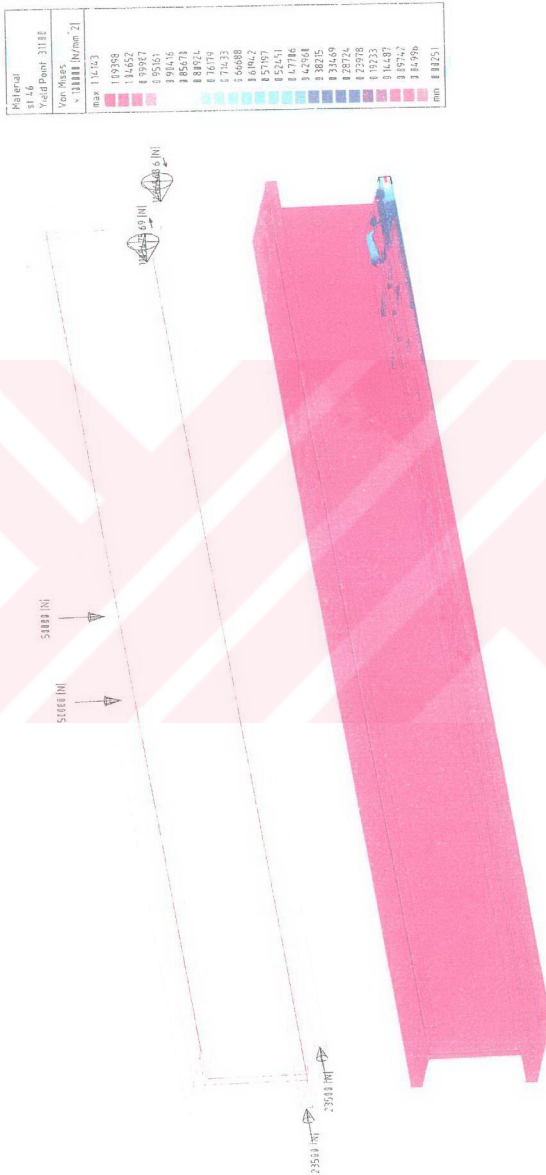
Bu durum, aynı kesite sahip kirişlerde öngerilmeli kirişlerin daha fazla yük taşıyabilmesini sağlamaktadır. Başka bir ifade ile daha küçük kesitli bir öngerilmeli kiriş ile daha büyük kesitli bir kirişin taşıyabileceği yük taşınabilecektir. Bu durum da, büyük konstrüksiyon inşaatlarında sistemin öz yüklerinin azalmasına ve beraberinde önemli ölçüde ekonomikliğe neden olacaktır.

Material:	
st 46	
Yield Point: 311.11	
Von Mises	
Max: 6782.52371	
6511.16413	
5935.12668	
5452.65908	
5278.19193	
4885.25557	
4527.78838	
4241.32862	
3975.38527	
3932.91759	
3111.44891	
2763.84488	
2545.51456	
1988.57921	
1033.17617	
46.544385	
51.71851	
85.77314	
min: 3.31543	



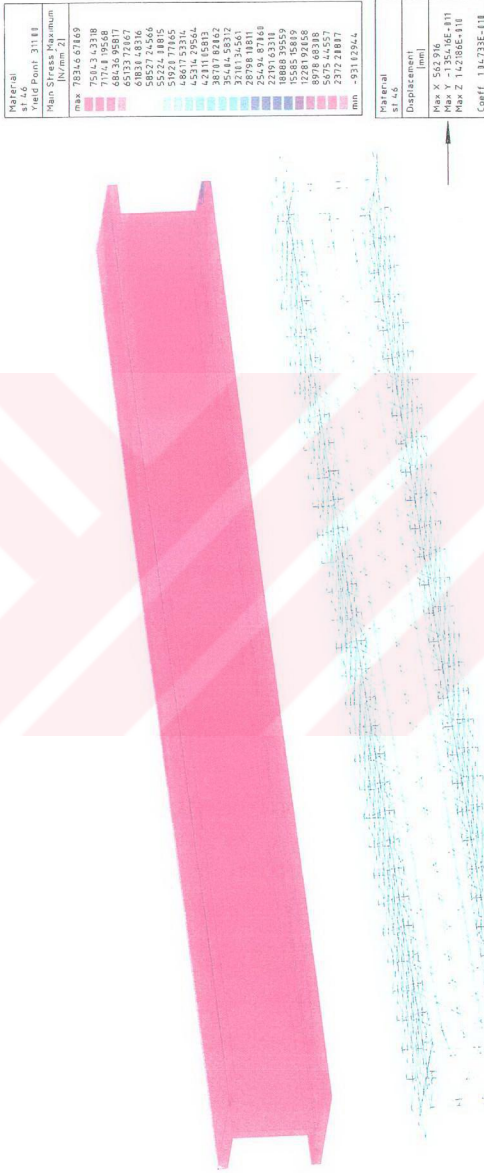
(a) Uygulanan kuvvetlerin gösterimi ve Von Mises akma gerilmesi değerleri

Şekil 6.21. 50000 N' luk iki noktasal kuvvetle eğilmeye çalışılan *öngerilmemiş* kiriş



(a) Uygulanan kuvvetlerin gösterimi ve Von Misses akma gerilmesi değerleri

Şekil 6.22. 50000 N' luk iki noktasal kuvvetle eğilmeye eğilimli kiriş



(b) Maksimum ana gerilme ve oluşan sehım değerleri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Öngerilmeli çelik I- putrel kirişin üretilebilirliği ve mekanik özelliklerinin araştırılması amaçlı yapılan çalışma ile ilgili aşağıda belirtilen sonuç ve öneriler söylenebilir:

1. Sisteme verilen çekme kuvveti şeklindeki öngerilme yükü, kaynak işlemi ile birleştirme sırasında malzemede bir akma meydana getirmiyorsa, kaynaklı birleştirmeden sonra sisteme basma yükü şeklinde etkir ve I- putrel kirişte bir ön sehimin oluşmasına neden olmaktadır.
2. I- putrel kirişlerde oluşan sehim miktarı uygulanan öngerilme değerine bağlı olarak değişir. Öngerilmenin uygulandığı çekme levhasında akma (plastik deformasyon) olmadığı sürece öngerilme yükü arttırıldığında oluşan sehim miktarı da artmaktadır.
3. Kalıntı gerilme sebepli çarpılma miktarı da uygulanan öngerilme miktarına bağlı olarak değişmektedir. Çekme levhasında akma olmadığı sürece artan öngerilmeye karşılık kalıntı gerilme sebepli çarpılma miktarı da artar. Çekme levhasında akma meydana geldiğinde ise kalıntı gerilme sebepli çarpılma miktarı azalmaktadır.
4. Kalıntı gerilme sebepli çarpılmanın yönü I- putrel kiriş kesiti N.E’ sinin kaynak dikişi N.E.’sine olan konumuna göre değişmektedir.
5. Öngerilme kuvvetinin açısıl çarpılmaya bir etkisi olduğu gözlenmemiş olup, üretilen bütün I- putrel kirişlerde açısıl çarpılma değerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.
6. 94 N/mm^2 öngerilmeli I- putrel kirişte, optimum sonuçlar elde edilmiş ve öngerilmesiz kirişe göre eğilme dayanımı % 30 oranında arttırılmıştır.

7. Öngerilmeli I-putrel kiriş, basma kuvveti şeklindeki öngerilme yükü ve ön sehimin etkisiyle, üzerine etkiyen eğilme kuvvetlerine daha fazla direnç göstermiş ve eğilme yükü altında öngerilmeli I- putrel kirişte oluşan sehim miktarı azalmıştır.
8. Basma kuvvetleri altında öngerilmeli I- putrel kirişte oluşan sehimin daha az olması dolayısıyla, öngerilmeli I- putrel kirişin eğilme dayanımının öngerilmesiz I- putrel kirişlere göre daha yüksek olduğu söylenebilir.
9. Kaynaklı birleştirilmeli öngerilmeli I- putrel kiriş üretilebilir. Ancak, elastik sınırlar içinde seçilen öngerilmenin ve kaynak sırasında oluşan ısı etkileşiminin dikkate alınması ve putrel tasarımının buna göre yapılması önerilir. Ayrıca, üretilen öngerilmeli I- putrel kirişin dinamik yüklemeler altındaki dayanımının ve daha detaylı mekanik deneylerinin yapılması ileride yapılabilecek çalışmalar olacaktır.

KAYNAKLAR

- 1- Susam, M.Ü., “Hafif çelik konutların konstrüksiyon özelliklerinin irdelenmesi ve bir uygulama örneği”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-27 (2003).
- 2- Özkan, E., “Çelik yapı bileşenlerinde alınması gereken yangın güvenlik önlemleri ve bir uygulama örneği”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 38-43, 77-79 (2002).
- 3- Badem, M., “Yapıda taşıyıcı sistem elemanı olarak çelik kullanımı, Avrupa ve Türkiye’deki uygulama olanak ve kısıtlamalarının saptanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 28-48, 55-76 (2003).
- 4- Arda, T.S., “Neden çelik malzeme”, www.tucsa.org.tr (12.11.2003).
- 5- Akbay, F., “Neden çelik yapı”
<http://fatihakbay.tripod.com/celikyap/CELIK.Y.html> (12.11.2003).
- 6- Türk Yapısal Çelik Derneği, www.tucsa.org.tr (12.11.2003).
- 7- Arda, T.S., Yardımcı, N., “Çelik Yapıda Öngerme”, *Birsan Yayınevi Ltd. Şti*, İstanbul, 7-9, 18, 75-78 (2000).
- 8- Ersoy, U., “Betonarme, Temel İlkeleri ve Taşıma Gücü Hesabı”, Cilt I. *Evrım Yayınevi Ltd. Şti*, İstanbul, 18-37 (1985).
- 9- Şimşek, M., “Yüksek kalite teknolojik güven”, *Çelik Yapılar Dergisi*, Nisan-2001 sayısı: 8-10 (2001).
- 10- Nilson, A.H., “Desing Of Prestressed Concrete, 2nd ed.”, *John Wiley& Sons*, New York, 1-18, 41 (1987).
- 11- TS. 5679/Nisan 1998. “Çelik Çubuklar - Öngerilmeli Beton İçin Alaşımli-Sıcak Haddelenmiş veya Sıcak Haddelenmiş İşlem Görmüş”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-14 (1998).
- 12- Bakioğlu, M. “Cisimlerin mukavemeti”, *Beta Basım A.Ş.*, İstanbul, 92-93 (2001).
- 13- Özden, K., Trupia, L.A., Eren, İ., Öztürk, T., “Öngerilmeli beton”, *İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Anabilim Dalı*, Sayı 1544, İstanbul (1994).
- 14- Boduroğlu, H., “Öngerilmeli beton nedir?”, *I. Öngerilmeli Beton ve Uygulamaları Semineri Rabak A.Ş. Yayını*, İstanbul, 9-16 (1986).

- 15- Özgüneri, M., “Öngerme çelikleri, elemanları ve uygulamaları”, *1. Öngerilmeli Beton ve Uygulamaları Semineri Yayın ve Tebliğler Kitabı, Rabak A.Ş. Yayını*, İstanbul, 84-91 (1986).
- 16- Deren, H., “Çelik Yapılar”, *Teknik Kitaplar Yayınevi Matbaa Teknisyenleri Basımevi*, İstanbul, 1-6 (1984).
- 17- Özçatalbaş, Y., “MET-214 Konstrüksiyon ve Elemanları Ders Notları”, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğt. Fak. Metal Eğitimi Bölümü*, Ankara, 1-4, 14-16 (1999).
- 18- Savaşkan, T., “Malzeme Bilgisi Ve Muayenesi”, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, *Beta Basım A.Ş* Trabzon, 250-255 (1999).
- 19- Askeland, R.D., “The Science and Engineering of Materials 3rd ed.”, cilt no:1, Çeviri: Mehmet Erdoğan, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 106-111 (1998).
- 20- Garnar, A.O., “Elements of Mechanics of Materials 4th ed.”, *Prentice Hall Inc.*, New Jersey, 77-91, 193-201, 270-277, 304-305 (1982).
- 21- Meyer, M. A., Chawla, K. K., “Mechanical Behavior of Materials”, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey, 89-93 (1999).
- 22- Michaleris, P., Debiccari, A. “Prediction of welding distorsion”, *AWS Annual Convention*, Chicago, 172-180 (1997).
- 23- Tso, L.T., Chin, P.F., Peng, H.C., Wei, C.Y., “Analysis of residual stresses and distortions in t-joint fillet welds”, *International Journal of Pressure Vessels and Pipin*, 78: 223-236 (2001).
- 24- Tso, L.T., Chih, C.L., “Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75: 857-864 (1998).
- 25- Uluğ, T.N., Odabaşı, Y., “Ahşap ve Çelik İnşaat Hesapları”, *Uluğ Kitapevi Yayınları*, Yayın No= 2: İstanbul, 130-300 (1972).
- 26- Anık, S., “Kaynak Tekniği El Kitabı”, *Gedik Holding Yayını*, İstanbul, 74-82 (1991).
- 27- Ronald, H.J., “Welding of carbon steels” *Welding, Brazing and Soldering*, ASTM Handbook, 6: 645-664 (1993).
- 28- Weismon, C., “Fundamental of welding.”, Volume-1, *Welding Handbook* 7th ed., *American Welding Society*, Miami, 221-230 (1976).

- 29- Ünver, F., "Konstrüksiyon parçalarında iç gerilmenin zararları", *Mühendis Ve Makine Dergisi*, 8 (208): 169-180 (1974).
- 30- Masubuchi, K., "Welding, Brazing And Soldering" Volume-6, Metals Handbook 9th ed. *American Society and Metal*, Ohio, 1093-1097 (1983)
- 31- Macun, A. "Kaynaklı konstrüksiyon tasarımına giriş I", *Mühendis ve Makine Dergisi*, 21 (242): 93-107 (1977).
- 32- Tso, L.T., Chin, P.F., Peng, H.C., Wei, C.Y., "Analysis of residual stresses and distortions in t-joint fillet welds", *International Journal of Pressure Vessels and Pipin*, 78: 223-236 (2001).
- 33- Külekçi, M.K., Ertürk, İ., "Kaynaklı yapılarda çekme ve çarpılmalar", *Kaynak Teknolojisi 1. Ulusal Kongresi Kitabı. TMMOB Makine Müh. Odası*, 200 (1): 179-189 (1997).
- 34- Timoshenko, S.P., Gere, M.J., "Mechanics of Materials", *D. Van Nostrand Company*, New York, 95-106, 167-175 (1972).
- 35- Popov, E.P., "Introduction to Mechanics of Solids", *Conversion from FPS to MKS units by P. Kapila and S.N. Agnihotri, Prentice-hall Of India Private Limited*, New Delhi, 9-30, 206-214 (1976).
- 36- Yazıcıoğlu, O. "Konstrüksiyonda Mukavemet", *Beta Basın Yatın Dağıtım, A.Ş.*, İstanbul, 77-85 (1998).
- 37- Jensen, A., Chenoweth, H.N., "Applied Strength of Materials 4th ed.", *McGraw-Hill Book Company*, New York, 142-269 (1983).
- 38- Bayvas, M.Ş., "Cisimlerin Dayanımı 5. Baskı", *Milli Eğitim Basımevi*, İstanbul, 65-68 (1976).
- 39- Megson, T.H.G., "Strength of Materials for Civil Engineers", *Van Nostrad Reinhold Co. Ltd.*, UK, 52, 53, 103-113, 237-247 (1983).
- 40- Demiray, H., "Mukavemet", *Çağlayan Kitapevi*, İstanbul, 114-121 (1997).
- 41- Ertunç, S., "Teknik Tablolar", *TPAO Makine Ve İkmal Grup Başkanlığı*, Sayı:17, İzmir, 52-55 (1995).
- 42- Erdiller, B., Saral, A., "DMS (Uzayabilir Ölçü Şeridi) İle Ölçme Esasları", *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, No: 189, Ankara, 1-6, 18 (1982).
- 43- Tülbetçi, K., "MİG-MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi", *Arctech Yayınları*, Yayın No:2, İstanbul, 19, 50-52 (1998).

- 44- İdaş, O., "Gaz-Metal Ark Kaynağı ve Koruyucu Gazlar", *Birleşik Oksijen Sanayi A.Ş. Yayını*, İstanbul, 20,21,44 (1998).
- 45- Aparicio, A.C., Ramos, G., Casas, J.R., "Testing of externally prestressed concrete beams", *Engineering Structures*, 24: 73-84, (2002).
- 46- Dolan, C.W., Swanson, D., "Development of flexural capacity of a FRP prestressed beam with vertically distributed tendons", *Composites Part: B Engineering*, 33: 1-6 (2002).
- 47- Tountaji, H., Saafi, M., "Performance of concrete beams prestressed with aramid fiber-reinforced polymer tendons", *Composite Structures*, 44:63-70 (1999).
- 48- Kurt, A., "MET-519 Kaynağın Isıl İşlemi Ders Notları", *Gazi Üniversitesi Teknik Eğt. Fak. Metal Eğitimi Bölümü*, Ankara, 51-54 (2001).



ÖZGEÇMİŞ

10.12.1975 tarihinde Gaziantep' te doğdu. İlköğretimini ve ortaöğretimini Niğde ilinde tamamladı. 1993 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir Meslek Yüksek Okulu Makine Teknikerliği Programında önlisans eğitimine başladı. 1995 yılında bu programdan Makine Teknikeri ünvanını alarak başarı ile mezun oldu. 1995- 1997 yılları arasında İzmir Atatürk Organize Sanayi Bölgesinde faaliyette bulunan özel bir sektörde Makine Teknikeri olarak görev yaptı. 1997 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal İşleri Öğretmenlik Programına başladı. 2001 yılında aynı bölümden 3,51 ortalama ile Gazi Üniversitesi Yüksek Onur Listesine geçerek mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi yüksek lisans programına başladı.