

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETON ÇELİK ÇUBUKLARININ ÇEVİRİMSSEL DEFORMASYON  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Metalurji Müh. Abdulkadir UYSAL**

**Anabilim Dalı : METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : SERAMİK**

**MAYIS 2002**

**BETON ÇELİK ÇUBUKLARININ ÇEVİRİMSSEL  
DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Metalurji Müh. Abdulkadir UYSAL**  
**(506981118)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002**  
**Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**  
**Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. E. Sabri KAYALI**  
**Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)**

**MAYIS 2002**

## ÖNSÖZ

Öncelikle beni bugünlere getiren ve büyük desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili anneme, babama ve biricik kardeşime sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum ve yüksek lisans tezimi onlara armağan ediyorum.

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca öncelikle göstermiş olduğu hoşgörüsüyle ve gerek ders aşamasında gerekse tez çalışmalarımnda değerleri fikirleriyle beni olumlu şekilde yönlendiren saygıdeğer hocam Prof. Dr Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Değerli fikirleriyle çalışmalarımıza olumlu katkıda bulunan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımı yönlendiren ve değerleri bilgilerini bizimle paylaşan her aşamada yanımda olan değerli arkadaşım Araştırma Görevlisi Murat BAYDOĞAN'a ve ayrıca çalışmalarımnda bana destek olan İ.T.Ü. Mekanik Laboratuvarında birlikte çalıştığımız başta Metalurji Yük. Müh. Mehmet Ali AKOY olmak üzere bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tezin yazımı aşamasında benimle birlikte çalışan ve her türlü fedakarlığı gösteren sevgili arkadaşım Metalurji Mühendisi Kerem TÖRÜN'e ve mesleki bilgileriyle bana yardımcı olan Metalurji Mühendisi Cafer KIRAN'a ve Vitsan Gözetim çalışanlarına, malzemelerin temininde ve değerleri fikirleriyle bana yardımcı olan Çolakoğlu Metalurji Kalite Kontrol mühendisleri ve çalışanlarına, çalışmamda emeği geçen Diler Demir Çelik Kalite Kontrol mühendisleri ve Demirsan Hadde Sanayi Kalite Kontrol çalışanlarına ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

15 Mayıs, 2002

Metalurji Müh. Abdulkadir UYSAL

| <b>İÇİNDEKİLER</b>                                              | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>ÖNSÖZ</b>                                                    | ii                     |
| <b>İÇİNDEKİLER</b>                                              | iii                    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                            | vi                     |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                            | vii                    |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                           | x                      |
| <b>ÖZET</b>                                                     | xii                    |
| <b>SUMMARY</b>                                                  | xiii                   |
| <b>1.GİRİŞ</b>                                                  | 1                      |
| <b>2.YÜKSEK KALİTELİ NERVÜRLÜ ÇELİK ÇUBUKLAR</b>                | 2                      |
| 2.1 Nervürlü Betonarme Çeliklerinin Üretimi                     | 2                      |
| 2.2 Betonarme Çelik Çubuklarında Nervür Özelliğinin Etkisi      | 2                      |
| 2.3 Nervürlü Beton Çeliklerinin Üretim Yöntemleri               | 3                      |
| 2.3.1 Soğuk İşlemler                                            | 4                      |
| 2.3.2 Mikroalaşımlama Yöntemi                                   | 5                      |
| 2.4 Kontrollü Soğutma Yöntemi ( Tempcore Prosesi )              | 5                      |
| 2.4.1 Tempcore Prosesini Etkileyen Faktörler                    | 7                      |
| 2.4.1.1. Soğutma Aşamanın Süresi                                | 7                      |
| 2.4.1.2 Soğutma Ekipmanının Tipi                                | 8                      |
| 2.4.1.3 Çelik Bileşimi                                          | 9                      |
| 2.4.1.4 Hadde Serilerinde Finiş Sıcaklığı                       | 10                     |
| 2.4.2 Tempcore Betonarme Çelik Çubuklarının Mekanik Özellikleri | 10                     |
| 2.4.2.1 Eğme Özellikleri                                        | 10                     |
| 2.4.2.2 İleri - Geri Eğme Özellikleri                           | 11                     |
| 2.4.2.3 Kaynaklanabilirlik Özelliği                             | 11                     |
| 2.4.2.4 Düşük Sıcaklıklarda Tokluk Özelliği                     | 12                     |
| 2.4.2.5 Yüksek Sıcaklıklarda Mukavemet Özellikleri              | 12                     |
| 2.5 Nervürlü Betonarme Çeliklerinin                             |                        |
| Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması                          | 12                     |
| 2.6 Tempcore Prosesinin Genel Değerlendirilmesi                 | 13                     |

|                                                                                       |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>3.YORULMA</b>                                                                      | <b>15</b>     |
| 3.1 Yorulmada Kullanılan Semboller ve Tanımlamalar                                    | 16            |
| 3.2 Çevrimsel Gerilme - Deformasyon                                                   | 17            |
| 3.3 Bauschinger Etkisi                                                                | 20            |
| 3.4 Yorulma Çatlağı                                                                   | 21            |
| 3.5 Dislokasyon ve İstif Hata Enerjisi                                                | 22            |
| 3.6 Yorulma Kırık Yüzeyi                                                              | 23            |
| 3.7 Yorulma Hasarının Önlenmesi                                                       | 24            |
| <br><b>4. YORULMA TÜRLERİ</b>                                                         | <br><b>25</b> |
| 4.1 Çatlaksız Malzemelerde Yorulma                                                    | 25            |
| 4.2 Kısa Ömürlü Yorulma                                                               | 26            |
| 4.2.1 Kısa Ömürlü Yorulma Davranışının Belirlenmesi                                   | 31            |
| 4.3 Tempcore Nervürlü Çelik Çubukların Yorulma Dayanımı                               | 31            |
| 4.3.1 Tempcore Çeliklerinin Yorulma Davranışını Etkileyen Parametreler                | 32            |
| 4.3.1.1 Çubuk Geometrisinin Etkisi                                                    | 32            |
| 4.3.1.2 Kalıntı Gerilmeler ve Mikroyapının Etkisi                                     | 33            |
| 4.3.1.3 Ortalama Gerilmeler ve Deformasyon Etkileri                                   | 33            |
| 4.3.2 Tempcore Çeliklerinin Yorulma Özelliklerinin Diğer Çeliklerle Karşılaştırılması | 34            |
| <br><b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>                                                     | <br><b>37</b> |
| 5.1 Deney Malzemeleri                                                                 | 37            |
| 5.2 Mikroyapı Çalışmaları                                                             | 38            |
| 5.3 Sertlik Deneyleri                                                                 | 38            |
| 5.4 Çekme Deneyleri                                                                   | 39            |
| 5.5 Kısa Ömürlü Yorulma Deneyleri                                                     | 39            |

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ</b>                                                  | <b>40</b> |
| 6.1 Mikroyapı Sonuçları                                                                   | 40        |
| 6.2 Mikrosertlik Deney Sonuçları                                                          | 42        |
| 6.3 Çekme Deneyi Sonuçları                                                                | 44        |
| 6.4 Kısa Ömürlü Yorulma Deney Sonuçları                                                   | 44        |
| 6.4.1 Kaynaksız Nervürlü Çubukların Yorulma Davranışları                                  | 45        |
| 6.4.2 Kaynaklı Nervürlü Çubukların Yorulma Davranışları                                   | 47        |
| 6.4.3 Yorulma Deneyleri Sırasında Sıcaklık Değişimi                                       | 48        |
| 6.4.4 Yorulma Sırasında Gerilme Değişimi                                                  | 49        |
| 6.4.5 Kısa Ömürlü Yorulma Analizi                                                         | 51        |
| 6.4.6 Çevrimsel ve Monotonik Gerilme–Birim Şekil Değişim<br>Eğrilerinin Karşılaştırılması | 56        |
| 6.4.7 Sertlik Ölçümleriyle Çevrimsel Yumuşamanın İncelenmesi                              | 57        |
| 6.4.8. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi                                                   | 59        |
| <b>7.GENEL SONUÇLAR</b>                                                                   | <b>62</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                                          | <b>64</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                                           | <b>67</b> |

## **TABLO LİSTESİ**

## **Sayfa No**

|           |                                                                                                                                                 |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1 | Nervürlü betonarme çelik üretim yöntemlerinin karşılaştırılması ...                                                                             | 13 |
| Tablo 5.1 | Deney numunelerinin kimyasal özellikleri. ....                                                                                                  | 38 |
| Tablo 6.1 | Çekme deneyi sonuçları. ....                                                                                                                    | 44 |
| Tablo 6.2 | Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların kaynaklı ve kaynaklı olmayan durumdaki yorulma geçiş ömürleri ( $N_f$ ) değerleri. .... | 54 |
| Tablo 6.3 | Coffin – Manson eşitliğinden hesaplanan kaynaklı ve kaynaklı olmayan nervürlü çelik çubuklara ait olan yorulma sabit ve katsayıları .....       | 55 |

## ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa No

|            |                                                                                                                                                     |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | Çubukların akma mukavemetlerini artırma metotları .....                                                                                             | 4  |
| Şekil 2.2  | Sürekli Soğuma Dönüşüm grafiğinde<br>kontrollü su soğutma sisteminin gösterimi .....                                                                | 6  |
| Şekil 2.3  | (a) Su akış hızı ve (b) su verme hızıyla<br>akma mukavemetinin değişimi .....                                                                       | 7  |
| Şekil 2.4  | Akma mukavemeti ile % uzamanın değişimi.....                                                                                                        | 8  |
| Şekil 2.5  | Üç farklı soğutma ekipmanı ile akma mukavemetindeki artış.....                                                                                      | 8  |
| Şekil 2.6  | Değişik çelik kompozisyonları için soğutma süresine bağlı olarak<br>akma mukavemetindeki artış.....                                                 | 9  |
| Şekil 2.7  | Finiş sıcaklığına bağlı olarak soğutma süresinin değişimi.....                                                                                      | 10 |
| Şekil 3.1  | Wöhler (S-N) diyagramları .....                                                                                                                     | 17 |
| Şekil 3.2  | Çevrimsel yükleme koşulları için histerisiz döngüsü.....                                                                                            | 18 |
| Şekil 3.3  | a)Gerilme kontrollü ve b)Deformasyon kontrollü<br>çevrime bağlı malzeme tepkisi.....                                                                | 19 |
| Şekil 3.4  | Bakırın deformasyon kontrollü yorulma davranışı .....                                                                                               | 20 |
| Şekil 3.5  | (a) Monotonik gerilme – birim şekil değişim eğrisi ve<br>(b) Bauschinger etkisini gösteren çevrimsel<br>gerilme-birim şekil değişim eğrisi. ....    | 21 |
| Şekil 3.6  | (a) Yüksek istif hata enerjili bakırın ve<br>(b) düşük istif hata enerjisine sahip Cu – % 7.5 Al alaşımının<br>çevrimsel deformasyon davranışı..... | 23 |
| Şekil 4.1  | Birim şekil değişimi - ömür eğrisi .....                                                                                                            | 27 |
| Şekil 4.2  | Farklı alaşımlar için Monotonik ve çevrimsel<br>gerilme–birim şekil değişim eğrilerinin karşılaştırılması .....                                     | 29 |
| Şekil 4.3  | Diğer betonarme çelikleriyle tempcore çelik çubuklarının<br>kısa ömürlü yorulma eğrileri.....                                                       | 34 |
| Şekil 5.1  | TS 708 standardına göre kaynaklı çekme test numunesi .....                                                                                          | 37 |
| Şekil 6.1  | Tempcore nervürlü çelik çubuğun farklı bölgelerindeki<br>mikroyapı fotoğrafları .....                                                               | 40 |
| Şekil 6.2  | Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuğun farklı bölgelerindeki<br>mikroyapı fotoğrafları. ....                                                      | 41 |
| Şekil 6.3. | Tempcore prosesiyle üretilmiş nervürlü çelik çubukların<br>kaynaklı bağlantılarına ait farklı bölgelerin mikroyapı fotoğrafları                     | 41 |

|            |                                                                                                                                          |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.4  | Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların kaynaklı bağlantılarına ait farklı bölgelerin mikroyapı fotoğrafları                         | 42 |
| Şekil 6.5  | Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çubuğa ait mikrosertlik sonuçları.....                                                            | 43 |
| Şekil 6.6  | Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların kaynak bölgesine ait mikrosertlik ölçüm sonuçları.....                           | 43 |
| Şekil 6.7  | Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuklarla bunların kaynaklı bağlantılarının birim şekil değişim genliği çevrim sayısı..... | 45 |
| Şekil 6.8  | Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların birim şekil değişim genliği – çevrim sayısı eğrileri. ....                       | 46 |
| Şekil 6.9  | Kaynaklı sıcak haddelenmiş ve kaynaklı tempcore numunelerine ait birim şekil değişim genliği – çevrim sayısı eğrileri. ....              | 47 |
| Şekil 6.10 | Kaynaksız (a) Tempcore ve (b) Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların çevrim sayısı sıcaklık değişimi. ....                          | 49 |
| Şekil 6.11 | $\Delta\epsilon_t/2\sigma = \%0.36$ birim şekil değişimi için tempcore numunesine ait çevrimsel gerilme – çevrim sayısı. ....            | 50 |
| Şekil 6.12 | $\Delta\epsilon_t/2\sigma = \% 0.72$ birim şekil değişimi için tempcore numunesine ait çevrimsel gerilme – çevrim sayısı değişimi. ....  | 50 |
| Şekil 6.13 | Tempcore numunelerine ait birim şekil değişim bileşenlerinin kırılmaya kadar çevrim sayısı (2Nf) değişimi.....                           | 52 |
| Şekil 6.14 | Sıcak haddelenmiş numunelere ait birim şekil değişim bileşenlerinin – kırılmaya kadar çevrim sayısı (2Nf) ile değişimi ...               | 53 |
| Şekil 6.15 | Kaynaklı Tempcore numunelere ait birim şekil değişim bileşenleri kırılmaya kadar tersinir çevrim sayısı (2Nf) değişimi .....             | 53 |

|            |                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.16 | Kaynaklı Sıcak numunelere ait birim şekil değişim bileşenleri kırılmaya kadar tersinir çevrim sayısı (2Nf) değişimi .....                                                                                                        | 54 |
| Şekil 6.17 | (a) Tempcore (b) Sıcak haddelenmiş (c) Kaynaklı Tempcore ve (d) Kaynaklı sıcak haddelenmiş numunelere ait çevrimsel gerilme – birim şekil değişimi eğrisi ve monotonik gerilme – birim şekil değişim eğrisiyle karşılaştırılması | 57 |
| Şekil 6.18 | (a) Tempcore (b) Sıcak haddelenmiş (c) Kaynaklı Tempcore ve (d) Kaynaklı Sıcak haddelenmiş çelik çubuklara ait yorulma öncesi ve sonrası sertlik değerleri .....                                                                 | 58 |
| Şekil 6.19 | Kısa ömürlü yorulma deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin görünümü .....                                                                                                                                                           | 59 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                        |                                             |
|------------------------|---------------------------------------------|
| CE                     | : Karbon eşdeğeri                           |
| $\Delta\sigma$         | : Gerilme aralığı                           |
| $\sigma_{\max.}$       | : Maksimum gerilme                          |
| $\sigma_{\min.}$       | : Minimum gerilme                           |
| $\sigma_{\text{ort.}}$ | : Ortalama gerilme                          |
| $\sigma_{\text{gn.}}$  | : Gerilme genliği                           |
| R                      | : Gerilme oranı                             |
| Nf                     | : Kırılmaya kadar çevrim sayısı             |
| YDS                    | : Yorulma dayanım sınırı                    |
| $\sigma_{\text{UTS}}$  | : Çekme dayanımı                            |
| $\sigma_Y$             | : Akma dayanımı                             |
| $\sigma_{0.2}$         | : % 0.2 akma dayanımı                       |
| n                      | : Deformasyon sertleşmesi üssü              |
| a                      | : Basquin bağıntısında malzeme sabiti       |
| $C_1$                  | : Basquin bağıntısında malzeme sabiti       |
| $\Delta\epsilon_t$     | : Toplam birim şekil değişim aralığı        |
| $\Delta\epsilon_{pl}$  | : Plastik birim şekil değişim aralığı       |
| b                      | : Coffin-Manson bağıntısında malzeme sabiti |
| $C_2$                  | : Coffin-Manson bağıntısında malzeme sabiti |
| $\Delta\epsilon_p$     | : Elastik birim şekil değişim aralığı       |
| $\Delta\epsilon_t/2$   | : Toplam birim şekil değişim genliği        |
| $\Delta\epsilon_e/2$   | : Elastik birim şekil değişim genliği       |
| $\Delta\epsilon_p/2$   | : Plastik birim şekil değişim genliği       |
| $\sigma_f'$            | : Yorulma mukavemet katsayısı               |
| b                      | : Yorulma mukavemet üssü                    |
| $\epsilon_f'$          | : Yorulma süneklik katsayısı                |
| c                      | : Yorulma süneklik üssü                     |
| E                      | : Elastisite modülü                         |
| $\sigma_a$             | : Kararlı hal gerilme genliği               |

- $K'$  : Çevrimsel dayanım katsayısı  
 $n'$  : Çevrimsel deformasyon sertleşmesi üssü.  
 $\Delta\sigma_0/2$  : Çevrimsel % 0.2 akma dayanımı  
 $2N_f$  : Yarı çevrim sayısı  
 $N_t$  : Yorulma geçiş ömrü

## ÖZET

### BETON ÇELİK ÇUBUKLARIN ÇEVİRİMSSEL DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Son yıllardaki teknolojik gelişmelere paralel olarak nervürü betonarme çelikleri inşaat sektöründe giderek daha da artan boyutlarda kullanılmaktadır. Az alaşımlı karbon çelikleri sınıfına giren betonarme çelikleri, beton içerisinde bir iskelet görevi yaparak yapıya dayanım kazandırmaktadır. Bu nedenle beton içerisinde kullanılacak nervürlü çelik çubukların; yüksek akma ve çekme dayanımı ile birlikte, yüksek süneklik, ileri-geri katlanabilme ve iyi kaynaklanabilirlik gibi üstün mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Klasik sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen nervürlü beton çelikleri bu gereksinimleri tam olarak karşılayamamaktadır. Nervürlü çelik çubuğun dış yüzeyinin sert temperlenmiş martensit, merkezinin ise tok ferrit-perlit yapısında üretilmesini sağlayan Tempcore prosesinin gelişmesiyle, inşaat sektörünün gereksinimleri tam anlamıyla karşılanmaktadır.

Nervürlü beton çubuklardan istenen diğer bir önemli özellik ise yüksek yorulma dayanımıdır. Malzemelerin statik koşullarda dayanabildiği gerilmelere tekrarlı yükler altında dayanamadıkları bilinmektedir. Deprem gibi aşırı tekrarlı yüklemeler malzemede plastik deformasyon meydana getirmektedir. Bu nedenle beton çeliklerinin dinamik yükleme koşullarındaki davranışının belirlenmesi için kısa ömürlü yorulma deneyleri uygun görünmektedir. Çünkü kısa ömürlü yorulma deneylerinde de malzemelere tekrarlı bir şekilde yüksek plastik deformasyon uygulanır ve malzemenin bu dinamik yükleme koşuluna hasara uğramadan dayanacağı deformasyon çevrimi sayısı (yorulma ömrü) kaydedilir. Farklı deformasyon seviyeleri için çevrim sayılarının belirlenmesiyle, kısa ömürlü yorulma davranışını ifade eden genel bir bağıntı elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, Tempcore prosesi ve sıcak haddeleme gibi iki farklı prosesle üretilen nervürlü betonarme çelikleri ile bu çeliklerin kaynaklı bağlantılarının kısa ömürlü yorulma davranışları incelenmiştir.

## **SUMMARY**

### **INVESTIGATION OF CYCLIC DEFORMATION BEHAVIOUR OF CONCRETE STEEL BARS**

Depending on the technological improvements in recent years, reinforced concrete steels are used in increasing amounts in building industry. Concrete steels in the group of low-alloyed carbon steels are set to build up strength into the concrete. However, outstanding mechanical properties such as high yield and tensile strength, ductility and bend-rebend as well as good weldability are expected from the concrete steels. Conventional hot rolled concrete steels do not completely meet the desired properties. The tempcore process, on the other hand, in which the reinforced concrete steel having tempered martensite in the surface and tough ferrite-pearlite structure in the core can be produced, are completely meet the requirements of building industry.

High fatigue strength is another important property expected from reinforced steel bars. It is known fact that materials cannot resist periodic stresses at the same level as they can resist under static conditions. Severe periodic loading like that during earthquake causes plastic deformation of materials. Therefore, low cycle fatigue test is seem to be suitable to define the response of the reinforced concrete steels under such a dynamic loading. Because high plastic deformation is applied periodically to the specimen during low cycle fatigue test and, the number of deformation cycles (fatigue life), which the material endures without failure under such a dynamic loading condition, is recorded. By determining the number of cycles for different deformation level, a general correlation, which expresses the low cycle fatigue behaviour, can be obtained.

In this study, low cycle fatigue behaviours of reinforced steel bars produced by the Tempcore process and hot rolling process as well as the welded joints of these steels were investigated.

## 1. GİRİŞ

Son yıllardaki teknolojik gelişmelere paralel olarak betonarme çeliklerinin yapılarda kullanılması için yüksek akma dayanımının yanı sıra süneklik, kaynaklanabilirlik ve iyi eğme özellikleri istenmektedir. Ancak geleneksel üretim yöntemleri ile istenen özellikleri gerçekleştirmek son derece sınırlı ve pahalıdır. Bu uygulamalara alternatif olarak geliştirilen üretim yöntemi “tempcore” prosesidir.

Tempcore prosesinde sıcak haddelenen yüzeyde nervürleri işlendikten sonra çıkan çelik çubuk , özel bir soğutma sisteminden geçer. Hızlı soğutma çelik çubuğun yüzey tabakasını martensite dönüştürür. Soğutma bölgesinden ayrılan çelik çubuğun soğumamış çekirdeğinin ısısı, yüzey tabakasını temper sıcaklığına ulaştırır ve yüzey tabakasındaki martensit temperlenir. Böylece yüzeyde temperlenmiş martensit tabakası, iç kısımları ise ferrit - perlit veya beynit, ferrit ve perlitten oluşan yapıyla nervürlü çelik çubuk, gerekli dayanımın yanında tokluk, süneklik, kaynak edilebilirlik ve kolay bükülebilirlik özelliklerine sahip olur. Yapısal betonların artan kullanımıyla bu yapıların içerisinde bulunan tempcore nervürlü çelik çubuklar köprüler, kıyı platformları ve su altı yapıları gibi yapıların inşasında kullanılmaktadır. Beton içerisindeki bu yapısal elemanlar sıklıkla eğme, burkulma, çekme veya basma yüklemeleri içeren çok karmaşık yükleme çevrimlerine maruz kalmaktadırlar. Bu yapılar ve onların elemanları şiddetli yer hareketleri, sert rüzgarlar ve okyanus dalgaları gibi sürekli zamana bağlı salınımlı yüklere maruz kalmaktadır ve bu şiddetli tekrarlı yükler altında yapılar kısa ömürlü yorulma etkisiyle kırılabilir. Bu nedenle yapıların veya bileşenlerinin kısa ömürlü yorulma dayanımının daha iyi anlaşılması şiddetli tekrarlı yüklemeler altındaki yapıların dizaynı için önemlidir.

Bu çalışmada betonarme çeliklerinin üretiminde son yıllarda büyük boyutlarda kullanılan Tempcore prosesiyle ve geleneksel üretim yöntemi olan sıcak haddeleme prosesiyle çeşitli standartlarda üretilen 8 mm çapındaki nervürlü çelik çubuklar ve bunların kaynaklı bağlantılarının kısa ömürlü yorulma davranışları incelenmiştir.

## **2.YÜKSEK KALİTELİ NERVÜRLÜ ÇELİK ÇUBUKLAR**

### **2.1 Nervürlü Betonarme Çeliklerinin Üretimi**

Nervürlü betonarme çelik çubuklarının üretimi, çoğunlukla elektrik ark ocağında hurda ergitilmesi ve elde edilen sıvı çeliğin sürekli döküm tekniğiyle çelik kütük haline getirilip haddehanelerde merdaneler yardımıyla şekil verilmesi şeklinde özetlenebilir.

Elektrik ark ocağı, ergitme ve izabe olmak üzere iki aşamada çalışır. İlk aşamada hurdalar elektrotlarla oluşturulan arkın verdiği ısıyla eritilir. İkinci aşamada ise sıvı çeliğin karbon ile oksijenin oranı ayarlanır ve fosfor tasfiye edilmeye çalışılır. İkincil metalurji yöntemleriyle istenilen bileşimi elde edilen sıvı ham çelik sürekli dökümle tek aşamada veya ingot dökümden haddeleme yoluyla blum veya kütük haline getirilir. Sürekli döküm sisteminde sıvı metal potadan bir döküm haznesine doldurulur, buradan bir kalıp içine akıtılarak istenilen kesitte katı bir kabuk oluşturulur. Daha sonra su püskürtülerek katılaşmanın tamamlanması sağlanır. Haddeleme, beton çeliklerinin üretiminin son aşamasıdır. Çelik kütükler kendi ekseni etrafında dönen merdaneler arasından geçirilerek plastik şekil verme işlemi uygulanır. Bu işlem çelik kütüklerin tav fırınlarında ( $1200\pm 50^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklıklarına kadar ısıtılması ile başlar. Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde yapılan bu işlem ile döküm yapısındaki büyük ve sütunsal yapı bozularak küçük ve eşeksensiz tanelerin oluşumu sağlanır ve kütük kesiti daraltılır. İstenilen çapta beton çeliği elde edilene kadar haddeleme işlemine devam edilir. Haddeleme işlemi yüzeyde nervürlerin işlenmesi ile son bulur [1].

### **2.2 Betonarme Çelik Çubuklarında Nervür Özelliğinin Etkisi**

Beton çelik çubuklar binaların yapımı esnasında beton içerisinde iskelet görevi yaparak yapıya dayanım kazandırır. Çubuğun beton içinde yük uygulandığında kaymaması ve bu iki farklı malzemenin bir tür kompozit malzeme halinde çalışması için birbirine tam kaynaşması gerekir. Bu amaçla çelik çubukların yüzeyleri

nervürlerle profilendirilir. Bu noktada betonarme yapı içerisinde beton ile çelik çubuğun kaynaşabilme özelliğini ifade eden yapışma faktörü oldukça önemlidir. Çelik çubuğa uygulanan gerilme arttıkça yapışma faktörü artar. Yakın zamana kadar ülkemizde ve dünyada sıcak haddelenmiş, yuvarlak düz yüzeyli inşaat çelikleri kullanılmaktaydı. Günümüzde ise nervürlü çelik çubukların kullanılması yaygınlaşmıştır. Bunun sebebi nervürlü çelik çubukların mekanik özelliklerinin düz yuvarlak çelik çubuklara göre daha iyi olmasıdır. Nervürlü çeliklerin akma ve çekme dayanımı düz yuvarlak çeliklere göre daha yüksektir ancak % uzama değeri daha düşüktür. Nervür yüksekliği, şekli ve boyu da çeliğin dayanımını etkiler. Özellikle deprem bölgesindeki ülkelerde nervürlü çeliğin kullanılmasında emniyet ve dayanıklılık açısından fayda vardır. Nervürlü çeliğin maliyeti düz yuvarlak çeliklere göre daha fazla olmasına rağmen uzun vadede düşünüldüğünde ekonomik açıdan daha iyi olduğu görülmüştür. Her ülkenin standardında kendine özgü kullandığı nervür şekilleri vardır [2].

### **2.3 Nervürlü Beton Çeliklerinin Üretim Yöntemleri**

Yüksek mekanik özelliklere sahip nervürlü betonarme çelikleri, son yıllarda teknolojiye paralel olarak daha büyük boyutlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu yüzden tüketiciler düşük maliyet ve yüksek dayanım gibi konulara önem vermektedirler.

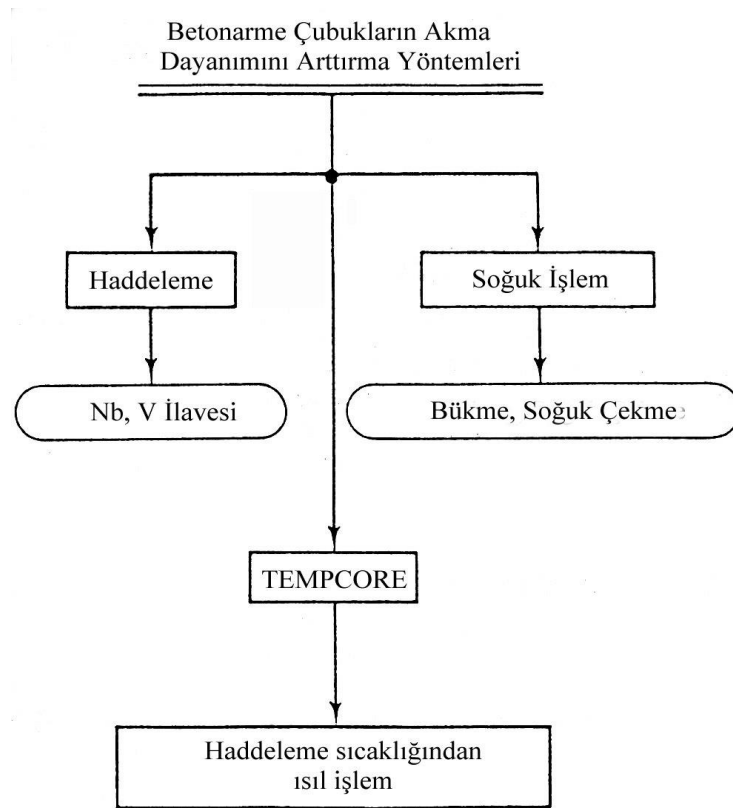
Nervürlü betonarme çeliklerinden istenen yüksek akma dayanımının aynı zamanda daha az malzeme ile daha fazla yük taşımak anlamına geldiği düşünüldüğünde nervürlü çelik çubukların inşaat sektöründeki önemi açıkça görülmektedir. Özellikle, prefabrik çelik konstrüksiyonun önceden yapımı ve daha sonra başka bir yerde, içine beton dökülerek betonarme halinde kullanımı çok sık rastlanılan bir uygulama olmuştur. İnşaat işlerinde süreyi kısaltan, emniyeti arttıran, işçiliği ve maliyeti düşüren bu uygulama tümüyle çeliğin kaynaklanabilirliğine bağlıdır.

Bir bakıma, birbiri ile iç içe iki olgu halinde olan süneklik ve ileri – geri eğme özelliği inşaat işlerinde büyük öneme sahiptir. Çeliğe soğuk işlemle istenilen şeklin verilebilmesi, konstrüksiyon sırasında çeliğe verilen şekil ve ölçünün bozulmaması üzerinde titizlikle durulan noktalardır [3].

Günümüzde kullanılan betonarme çeliklerinden beklenen özellikler şu şekildedir [3]:

- Yüksek akma dayanımı
- Süneklik
- İleri geri eğme özellikleri
- Kaynak edilebilirlik

Bu gereksinimleri karşılayacak yüksek akma dayanımlı betonarme çelik çubuklar, nispeten yeni geliştirilen tempcore prosesiyle birlikte üç farklı prosesle üretilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Çubukların akma dayanımlarını artırma metotları [4].

### 2.3.1 Soğuk İşlemler

Çelik çubuklar sıcak haddeleme sonrası soğuk deformasyon ile deformasyon sertleşmesine tabi tutulurlar. Çubukların akma dayanımı, soğuk deformasyon oranının artırılması ile yükseltilir. Bu metotla düşük karbon ve manganezli çeliklerden yüksek dayanımlı kaynak yapılabilir çubukların üretimi gerçekleştirilir. Bu işlemde soğuk deformasyon ek bir işlem olduğu için maliyet artmaktadır [5].

### 2.3.2 Mikroalaşımlama Yöntemi

Haddeleme koşullarında üretilen ve havada yavaş soğumadan sonra kullanılan çelik çubukların akma dayanımı kimyasal bileşimin modifiye edilmesiyle artırılabilir. Fakat karbon ve manganez miktarlarının artması kaynaklanabilirlikte önemli bir düşüşe sebep olur. Bu problem Nb ve V gibi alaşım elementlerinin çok düşük miktarlarda ilavesi olarak tanımlanan mikroalaşımlama ile çözülebilmektedir [5].

Ancak mikroalaşımlama işleminde kullanılan elementlerin fiyatlarının yüksek oluşu ve daha sonraları oluşabilecek istenmeyen fazların engellenmesi için ayrı bir proses gerekmesi nedeniyle bu yöntem istenilen özelliklerin kazandırılması için ekonomik bir çözüm değildir [6].

### 2.4 Kontrollü Soğutma Yöntemi ( Tempcore Prosesi )

Son yıllarda yüksek miktarlarda üretilmekte olan kaynaklanabilir betonarme çelikleri için su verme ve çelik çubuğun kendi kendini temperlemesi çok popüler bir çözüm haline gelmiştir. Tempcore prosesi 30.10.1972 tarih ve 790.867 numaralı Belçika patentıyla tescil edilmiş bir yüksek dayanımlı çelik üretim metodudur [7].

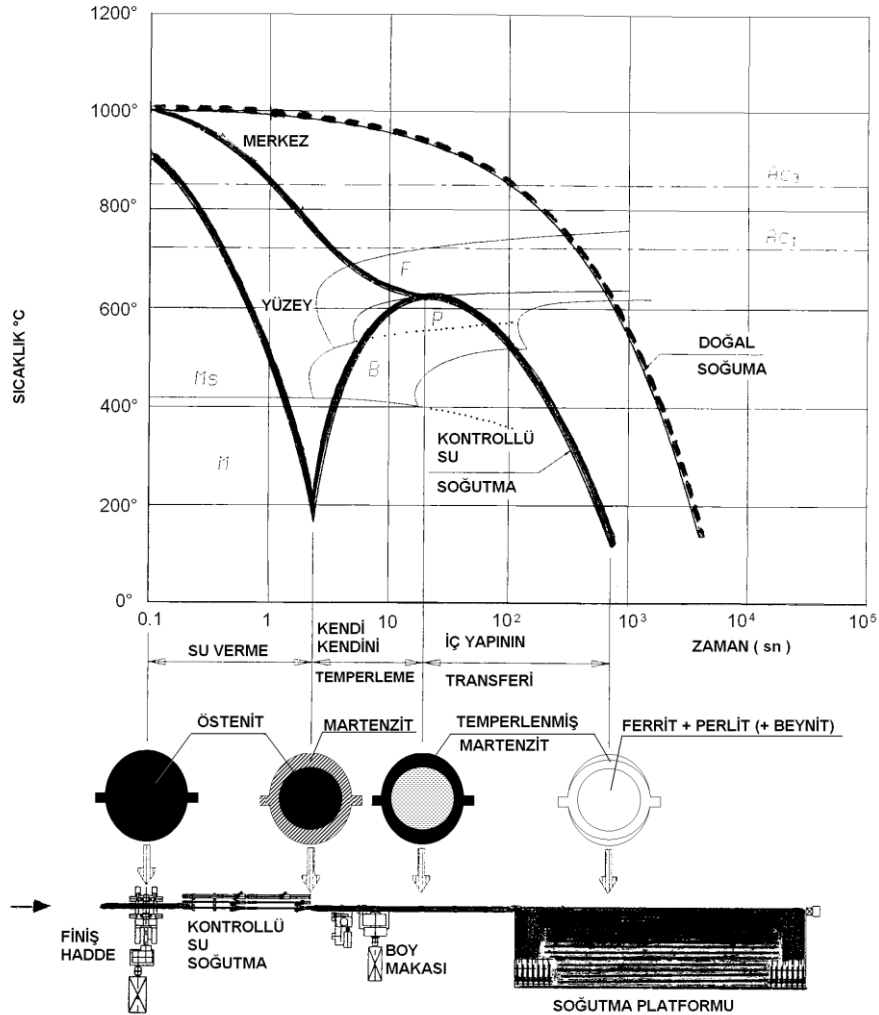
Tempcore ismi martensit tabakanın, soğutmadan sonra çekirdekten yayılan ısı ile temperlenmesi nedeniyle “core tempering”den türetilmiştir. Bu prosesin en büyük özelliği C ve Mn oranları düşük tutularak, alaşım elementi ilavesi gerek duyulmadan malzemenin sünekliğinin, dayanımının ve kaynak edilebilirliğinin artırılmasıdır. Bu özellikler hadde çıkışında özel soğutma ve bunu takiben malzemenin kendi kendini temperlenmesi sonucunda sağlanmaktadır [5].

Şekil 2.2’de gösterilen tempcore prosesi, sıcak hadde merdanesinden çıkan çubuğun ısıtılmasından oluşur ve üç aşamayı kapsar:

1. Yüzey tabakasına su verilmesi,
2. Martensitin kendini temperlemesi ve
3. Çekirdeğin dönüşümü.

Birinci aşamada son hadde tezgahından çıkan çubuğa hızlı soğutma uygulanır. Bu ilk aşamada soğutma sisteminin soğutma hızının martensit oluşturmak için gerekli olan kritik soğutma hızından daha yüksek olması gerekir. Bu operasyonun sonucunda çelik çubuk, östenit çekirdek ve onu kuşatan östenit ve martensit karışımından oluşan bir katmana sahiptir.

İkinci aşama esnasında, çubuk havada soğumaya bırakılmıştır. Çevrenin ısı transfer katsayısı çok küçük ve çubuğun kesit alanındaki sıcaklık gradyanı çok büyük olduğu için çekirdekten su verilmiş yüzeye kondüksiyonla ısı yayınımlı olur. Sonuçta ilk aşamada şekillenen martensit kendi kendine temperlenmeye maruz kalmaktadır. Böylelikle yüksek akma mukavemet korunurken yeterli süneklik de sağlanır. İkinci aşama, çubuğun yüzeyindeki sıcaklık belirli bir maksimum değeri geçtiğinde biter. Bu sıcaklık değeri temperleme sıcaklığı olarak adlandırılır. İkinci aşamanın uzunluğu büyük oranda çubuk çapıyla ve ilk aşama sırasında uygulanan soğutma şartlarıyla değişir. Diğer yandan temperlenmiş martensit kabuğun hemen altındaki tabakanın beynite dönüşebilmesi, çeliğin kompozisyonuna ve soğutma şartlarına bağlıdır [8].



Şekil 2.2 Sürekli Soğuma Dönüşüm grafiğinde kontrollü su soğutma sisteminin gösterimi [8].

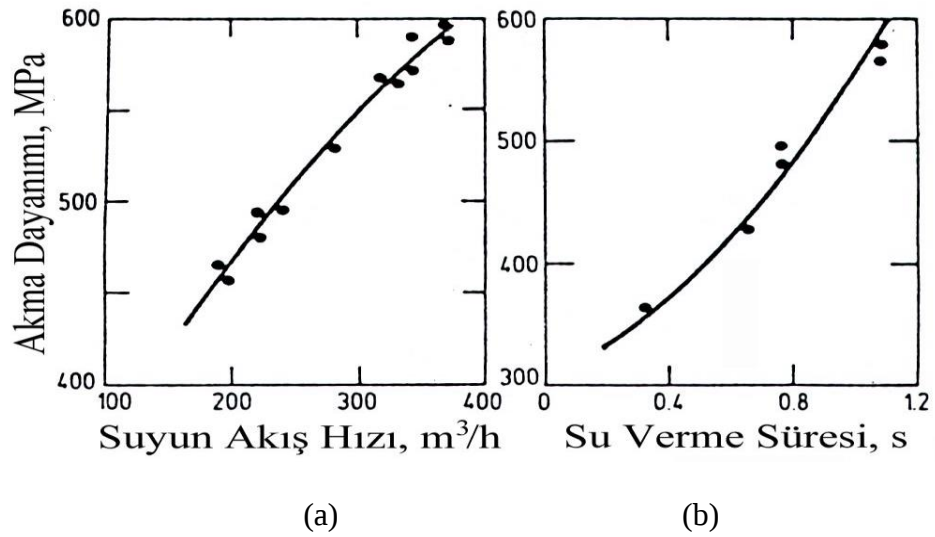
Üçüncü aşama çubuk soğutma yatağındayken meydana gelir. Bu aşama, kalan östenitin hemen bir izotermal dönüşümünden ibarettir. Bu dönüşümün üretimi çelik kompozisyonu, çubuk çapı, son hadde serisinin sıcaklığı, ilk aşamadaki soğutma süresi ve verimliliği gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak ya ferrit - perlit karışımıdır ya da ferrit, perlit ve beynit karışımıdır [4].

Böylece merkezi yumuşak, dışı sert olarak üretilen beton çeliklerinde, yüksek dayanım, tokluk, süneklik, kaynak edilebilirlik, ve kolay bükülebilirlik gibi özellikler ürüne üretim sırasında kazandırılmaktadır [7].

## 2.4.1 Tempcore Prosesini Etkileyen Faktörler

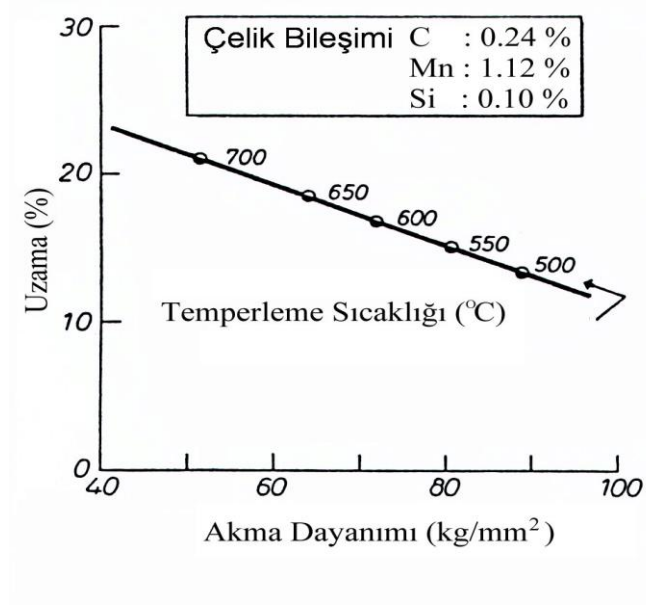
### 2.4.1.1. Soğutma Aşamanın Süresi

Tempcore prosesinde soğutma aşamasının süresinin uzaması, çeliğin akma dayanımını artırır. Su verme aşamasının süresi uzadıkça akma dayanımının artışına paralel olarak yüzeydeki martensit tabakanın kalınlığında artar. Akma dayanımındaki artış karşısında diğer klasik yöntemlerle üretilen çeliklerin tersine süneklikte çok fazla bir düşüş olmaz [4]. Şekil 2.3 a ve b' de, soğutma aşamasının uzunluğu ve su akış hızına bağlı olarak akma dayanımındaki artış gösterilmiştir [5].



Şekil 2.3 (a) Su akış hızı ve (b) su verme hızıyla akma dayanımının değişimi [5].

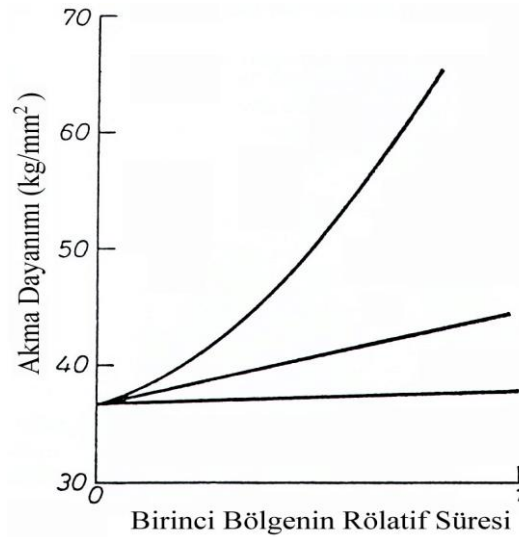
Burada ayrıca vurgulanması gereken husus; akma dayanımındaki artış karşısında geleneksel yöntemlerdeki üretimlerin tersine çeliğin sünekliğinde çok fazla bir düşme olmamasıdır. Şekil 2.4, % 0.25 C içeren bir çelik için akma dayanımı ile % uzamadaki değişimi göstermektedir [4].



Şekil 2.4 Akma dayanımı ile % uzamanın değişimi [4].

#### 2.4.1.2 Soğutma Ekipmanının Tipi

Şekil 2.5’de verilen üç farklı soğutma ekipmanı ile akma dayanımındaki artış, soğutma ekipmanının tipinin ısı verimlilik açısından son derece önemli olduğunu göstermektedir. Soğutma ekipmanının seçiminde ısı verimlilik, dizayn ve yapının basitliği ile işletme maliyeti (akış hızı, basınç ve soğutma suyunun temizliği) arasında çok iyi bir uyum sağlanması gerekir [4].



Şekil 2.5 Üç farklı soğutma ekipmanı ile akma dayanımındaki artış [4].

### 2.4.1.3 Çelik Bileşimi

Çeliğin bileşiminin seçiminde pratikte iki önemli unsur vardır.

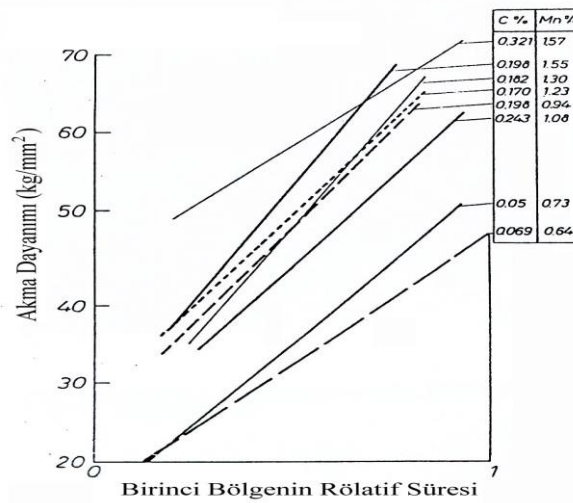
a) Haddehane şartlarından ve müşteriden kaynaklanan bazı sınırlamalar:

- İstenilen minimum akma dayanımı
- Kabul edilebilir maksimum akma dayanımı / çekme dayanımı oranı
- İstenilen süneklik
- Kaynak edilebilirliğe bağlı olarak maksimum karbon içeriği
- Haddehanenin dizayn ve hızına bağlı olarak, maksimum soğutma süresi
- Suyun ulaşılabilir basınç ve debisi

b) Çeliğin maliyeti;

- Alaşım elementlerinin maliyetine
- Çeliğin cinsine
- Soğutma suyuna ve aparatının bakım ve maliyetine bağlıdır

Tüm bu sınırlamalar dikkate alınarak belirlenen bir bölge içerisinde karbon ve manganez bileşiminin artırılmasıyla akma dayanımında artış sağlanabilir. Şekil 2.6'da, 20 mm çapındaki sekiz farklı çelik kompozisyonu için soğutma süresinin akma dayanımına bağımlılığı görülmektedir [4].

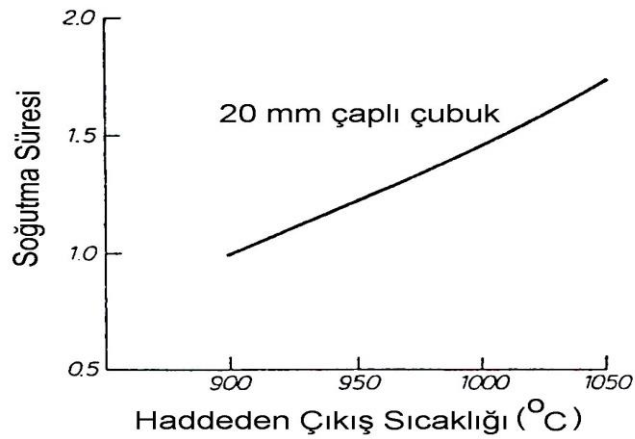


Şekil 2.6 Değişik çelik kompozisyonları için soğutma süresine bağlı olarak akma dayanımındaki artış [4].

#### 2.4.1.4 Hadde Serilerinde Finiş Sıcaklığı

Finiş sıcaklığının en önemli etkisi; finiş sıcaklığı arttıkça, soğutma esnasında çelik çubuk yüzeyinde uzaklaştırılması gereken ısı miktarının da bu artışa bağlı olarak artmasıdır.

Şekil 2.7'ye göre finiş sıcaklığı 900°C'den 1050°C'ye yükseldiğinde soğutma süresinin uzunluğu yaklaşık % 70 artmaktadır. Bu su tüketiminin ve soğutma ekipmanının aynı oranda artması demektir.



Şekil 2.7 Finiş sıcaklığına bağlı olarak soğutma süresinin değişimi [4].

Hesaplamalar, finiş tezgahından önce çubukları soğutmanın yararlı olduğunu göstermiştir. Son finiş tezgahının çıkışındaki sıcaklığın 115°C düşürülmesi akma dayanımında 3 kg/mm<sup>2</sup>'lik bir artışa neden olur. Pratikte finiş sıcaklığı motorların gücüne bağlı olarak düşürülebilir. Termomekanik işlemle ısıl işlemin birleştirilmesi gerekli olan ısıl işlem aparatlarının uzunluğunu ve su tüketimini azaltır. Finiş sıcaklığının 115°C düşmesi toplam soğutma suyu miktarını % 16 ve soğutma tesisatı uzunluğunu % 44 azaltmasına olanak verir.

#### 2.4.2 Tempcore Betonarme Çelik Çubuklarının Mekanik Özellikleri

##### 2.4.2.1 Eğme Özellikleri

Tempcore'un güçlü dış kabuğu ve mükemmel sünek çekirdeği eğilebilir bir betonarme çubuk üretimine olanak verir. Bu özellik, tempcore çubuklarının küçük mandrel çapları etrafında kopma olmaksızın eğilebilir olmasına izin verir.

Basit eğme deneyinde Tempcore çubuklar, yüksek karbonlu sıcak haddelenmiş çubuklara göre çok üstündür. Bu sonuçlar tempcore çubukların mükemmel sünekliğe sahip olduğunu belirtir.

Kaynak sırasında ark sıçraması ya da herhangi bir nedenle çubukta meydana gelen çentikler, betonarme çubuklarının tokluk ve süneklik gibi özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu tür hataların çubuğun mekanik özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla bilinçli olarak ark sıçraması ve çentiklere maruz bırakılan çubuklara düşük sıcaklıklarda eğme deneyleri uygulanmaktadır. İnşaatta kullanılan çubuklarda dikkatsizlik sonucu olabilen bu tür hasarlar yükleme ve sıcaklık koşulları ile birleştiğinde hassas çubuklarda gevrek kırılmayla sonuçlanabilir. Oysa tempcore prosesi ile üretilmiş nervürlü çelik çubuklar bu tür deneylerden başarıyla geçmektedir. Bu da nervürlü tempcore çelik çubuklarının yüksek tokluk ve sünekliğinin bir kanıtı olmaktadır.

Tempcore çubuklarda  $-50^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşük sıcaklıklarda yapılan testlerde hiç kırılma olmazken test edilen diğer çubuk tipleri kırılma gösterir. Tempcore çubukların daha düşük karbon bileşimleri, ark sıçraması yüzünden olan gevrek bölgelerin olabilirliğini azaltır.

#### **2.4.2.2 İleri - Geri Eğme Özellikleri**

Basit eğme testindeki gibi, Tempcore çubukları eğme – yaşlandırma – geri eğme testlerinde çok iyi performans gösterir. Bu test inşaat yapımındaki durumu yansıtmaktadır. Çubuklarda, ilk eğme ve ters eğme arasındaki esnada deformasyon yaşanması olabilir. Deformasyon yaşanması yüzünden ve ilk eğmedeki deformasyon yüzünden oluşan süneklik kaybı, eğer çubuklar yeteri kadar sünek değilse geri eğme operasyonu esnasında kırılmaya sebep olabilir.

#### **2.4.2.3 Kaynaklanabilirlik Özelliği**

Karbon içeriğinin az olması ve karbon eşdeğerinin düşük olması sebebiyle Tempcore tüm alışlagelmiş yöntemlerle kaynak edilebilme özelliğine sahiptir. Tempcore prosesine göre işlem gören çubukların bütün alın kaynak testleri tatmin edici sonuçlar vermiştir. Standartlarda 7–10d çapında mandrelde eğme deneyi yapılması istenmesine rağmen. Tempcore prosesine göre üretilmiş kaynaklı çubuklar çatlama olmaksızın 4d çapındaki mandrelde  $180^{\circ}$ 'lik eğmeye dayanmıştır. Burada d, nervürlü çubuğun çapını simgelemektedir.

Özellikle kaynaklı birleşmelerin eğme deneyi zor bir deney olarak sayılmasına rağmen standartta eğme açısı 45° iken, eğme açısı 90°'lik açıya kadar yükseltilerek 10d çapındaki mandrellerde başarıyla eğme yapılmıştır

#### **2.4.2.4 Düşük Sıcaklıklarda Tokluk Özelliği**

Tempcore betonarme çubukları düşük sıcaklıkta mükemmel tokluk gösterirler. Tempcore betonarme çelik çubuklarının gevrek kırılmaya karşı direnci için değer biçilememektedir. Tempcore çeliklerinin özellikle düşük sıcaklıklarda gösterdikleri tokluk nedeniyle özellikle deprem bölgesindeki yapılarda ve darbe yüküne maruz kalan yerlerde kullanımı son derece elverişlidir.

#### **2.4.2.5 Yüksek Sıcaklıklarda Mukavemet Özellikleri**

Yüksek sıcaklıklarda yapılan deney sonuçları tempcore prosesine göre üretilen çelik çubukların akma dayanımının oda sıcaklığıyla (20°C) karşılaştırıldığında 300°C ve 500°C'de sırasıyla yaklaşık %20 ve %40 azalmakta olduğunu göstermiştir. Tempcore'un bu performansı soğuk bükülmüş ve düşük karbonlu mikroalaşımli betonarme çubuklarının performansına benzerdir.

#### **2.5 Nervürlü Betonarme Çeliklerinin Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması**

Tempcore prosesinin diğer üretim yöntemleriyle karşılaştırılması Tablo 2.1'de verilmektedir. Betonarme çubuklarının kullanıcıları tarafından talep edilen akma ve çekme dayanımı, süneklik ve kaynaklanabilirlik gibi özellikler, Nb ve V gibi alaşım elementleri ilavesiyle veya çekme ve burma gibi soğuk deformasyon yöntemleriyle başarılamamaktadır. Çekme ve akma dayanımları, yüksek Mn ve C bileşimleriyle artırılabilir fakat bu süneklik ve kaynaklanabilirlik açısından zararlıdır. Mikroalaşım ilavesi veya ayrıca soğuk deformasyon uygulaması üretim maliyetini oldukça artıracaktır. Tempcore prosesi hem teknik hem de ekonomik açıdan bu olumsuzlukları dengelemektedir [9].

Daha önce belirtildiği gibi nervürlü betonarme çeliklerinin mekanik özelliklerini geliştirmenin üç yolu bulunmaktadır. Ancak, kontrollü su soğutma yöntemi dışındaki yöntemlerde, maliyetler oldukça yükselmektedir. Maliyet konusunda Türkiye'de kesin bir araştırma yapılmamıştır. Bu noktada kesin olarak bilinen, kontrollü su soğutma tekniği ile üretim yapmanın, mikroalaşımlama yöntemi ile aynı sonuca ulaşmaya göre ton başına net olarak ~ 4 USD daha ucuz olduğudur. Pratik bir

hesapla, yılda 600.000 ton/yıl kapasiteli bir haddehanede, toplam rakam 2.400.000 USD olmaktadır ki, bu da ciddi bir rakamdır [8].

Tablo 2.1 Nervürlü betonarme çelik üretim yöntemlerinin karşılaştırılması [6].

| Üretim Prosesi      | Yüksek Dayanım Elde Etmenin Yolları                 | Üretim Masrafları                           | Proses Özellikleri                |                                                          |
|---------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                     |                                                     |                                             | Süneklik                          | Kaynaklanabilirlik                                       |
| Mikro Alaşımlama    | Alaşım Elementleri İlavesi (C,Si,Mn,Cr,V,Nb)        | Pahalı Alaşım Elementleri Maliyeti Yüksek   | İyi süneklik, yüksek dayanım      | C eşdeğerinin artışıyla kötüleşir                        |
| Soğuk Şekillendirme | Burma, Soğuk Çekme                                  | Pahalı, sistem teçhizatı maliyeti yüksektir | Azalma olur                       | Kaynak sırasındaki oluşan ısıdan dolayı azalma gözlenir. |
| Tempcore            | Haddeleme esnasında kontrollü soğutma ile ısı işlem | Çok ekonomik, çalışma maliyeti düşük        | Düşük sıcaklıklarda dahi mükemmel | Düşük C eşdeğerinde bile mükemmel                        |

## 2.6 Tempcore Prosesinin Genel Değerlendirilmesi

Tempcore prosesinin uygulanmasının sağladığı faydalar aşağıda özetlenmiştir.

- Bu proses C – Mn çeliklerinin geniş bir aralığına uygulanabilir.
- Bu proses uygulandığında akma dayanımında, soğutma yoğunluğuna bağlı olarak, 150 ile 230 MPa'lık bir artış görülür. Artan akma dayanımına karşın kopma uzaması azalır. Ancak bütün durumlarda kopma uzaması bütün standartlarda istenen değerlerden daha yüksektir [5,10,11].
- Tempcore beton çelik çubukların kesitlerinin kabuk ve göbek kısımları farklı yapılara sahiptirler. Çeliklerin göbek bölgesindeki ferrit - perlit, kabuk bölgesi ise martensit yapıdadır. Sertlik değerleri de bu yapılara uygun değerlerdedir.
- Tempcore beton çelikleri, benzer bileşime sahip beton çeliklerine göre dayanımları yüksektir. Düşük kimyasal bileşim ve düşük C eşdeğerleri (CE) nedeniyle tempcore çelik çubukların kaynağı hiçbir önlem alınmaksızın yapılır.
- Su verilmiş bir tabaka olmasına rağmen verilen bir akma dayanımı için işlem gören çubukların eğme davranışı işlem görmemiş çubuklara göre daha iyidir.

- Tempcore prosesine göre üretilen betonarme çelik çubuklarının martensitik yapılı alanın yüzdesindeki artışlar çubuğun akma ve çekme dayanımını artırır, % uzama değerini azaltır.
- Çelik yüzeyindeki tufal miktarının az oluşu inşaat çeliğinin beton ile daha iyi tutunmasını sağlamaktadır. Klasik haddelenmiş çeliklerde tufal miktarı 105 gr/m<sup>2</sup> iken tempcore çeliklerinde 25 gr/m<sup>2</sup>'dir [6].
- Ülkemizde bu sistemi imal ederek, montajını ve devreye alma işlerini yapabilecek firmalar mevcuttur. Halen birçok büyük inşaat çeliği üreticisi firma da bu sistemi kullanmaktadır. Kullanıcıların kaliteli ve daha ucuz inşaat demiri kullanımı için, bu noktalarda bilinçlenmesinin bu sistemin yaygınlaşmasında büyük rolü olmuştur [8].

### 3.YORULMA

Yorulma, değişken gerilmeler altında malzemede çatlama ya da kırılmayla sonuçlanan bir hasar türüdür. Yorulma dayanımı olarak tanımlanan mekanik özellik ise malzemenin bu değişken yüklere dayanabilme yeteneğinin bir ölçüsüdür ve malzemenin statik dayanımından oldukça düşüktür. Yorulma kırılması birçok durumda test parçasında dikkate değer bir deformasyon oluşmadan meydana gelir ve bu nedenle kırılma öncesi fark edilip önlenmesi oldukça zordur.

Makine parçalarının ve yapıların kırılmasında yorulmanın önemli bir payı olduğu daha 19 yy'ın ilk yarısında belirlenmiş ve günümüze değin yorulma konusunu ele alan çok sayıda bilimsel ve endüstriyel çalışma yapılmıştır. "Fatigue" terimi ilk kez çelik yapıların dayanımlarının çekme ve basma gerilmelerinin çevrimsel etkisiyle azaldığını farkedenden Fransız J.V. Poncelet tarafından kullanılmıştır.

Yorulma problemi 19.yy'ın ortalarında tren yolu ulaşımındaki ilerleme nedeniyle lokomotif ve araba akslarının kırılması gibi hasarlarla daha kritik hale gelmiştir. Aynı zamanda Alman F. Wöhler yorulma dayanım limitini ölçmek için bir metot geliştirmiştir. Wöhler metodu 1858'de önerilmiştir. Ancak bu metot malzemelerin çevrimsel dayanımının hesaplanmasında hala kullanılmaktadır [11].

Yorulma, malzemenin çekme mukavemetinden çok daha düşük tekrarlı gerilmelere maruz kalan malzemelerde meydana gelen, ilerlemeye açık, bölgesel, kalıcı ve yapısal bir hasar türüdür. Yorulma çatlaklarla sonuçlanır ve yeterli bir dalgalanma sayısından sonra kırılmaya neden olur.

Yorulma prosesi üç aşamadan oluşur:

1. Gerilme yoğunlaşmalarının olduğu bölgelerde çatlağın başlaması,
2. Çatlağın ilerleyerek kritik bir büyüklüğe gelmesi ve bunun sonucunda parçanın çatlaksız kısmının uygulanan yükü taşıyamayacak hale gelmesi ve
3. Çatlaksız kısmın ani kırılması ile sonuçlanır.

Yorulma hasarı çevrimsel gerilme, çekme gerilmesi ve plastik deformasyon gibi eş zamanlı hareketlerden kaynaklanmaktadır. Çevrimsel gerilmeden kaynaklanan plastik deformasyonun etkisiyle enine çatlaklar çekirdeklenmeye başlar. Yorulma sırasında yavaş bir şekilde mikroçatlaklar haline gelir. Çekme gerilmesi çatlak büyümesine ve yayılmasına destek olur. Çıplak gözle görülebilecek makroçatlaklar oluşuna kadar bu dönüşüm devam eder. Bir mikroçatlak kritik boyuta ulaştığında, kararsız hale gelir. Sonuçta numunenin kırılması felaketle sonuçlanabilir. Basma gerilmeleri yorulmaya sebep olmamakla birlikte, basma yükleri lokal çekme gerilmeleri oluşturabilir [12].

### 3.1 Yorulmada Kullanılan Semboller ve Tanımlamalar

Yorulma da gerilmenin minimum ve maksimum sınır değerlerine bağlı olarak aşağıda belirtilen özel terimler kullanılmaktadır:

$$\text{Gerilme Aralığı} \quad \Delta \sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (3.1)$$

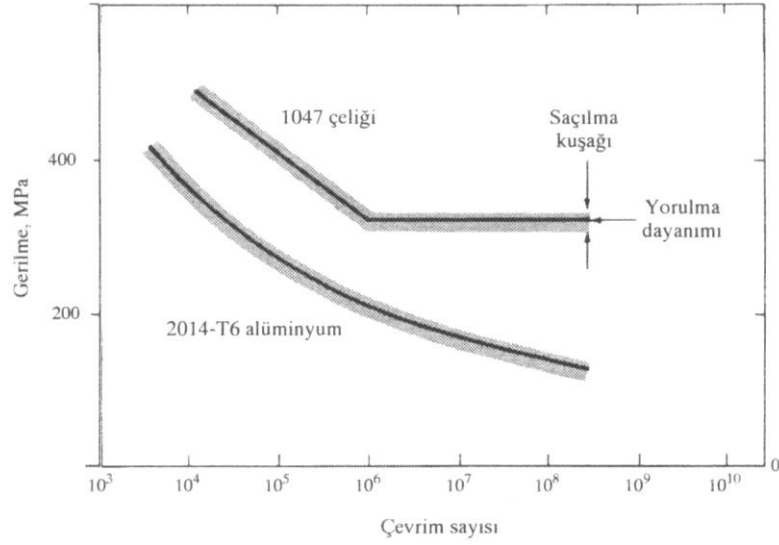
$$\text{Ortalama Gerilme} \quad \sigma_{og} = \left( \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{Gerilme Genliği} \quad \sigma_{gn} = \left( \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right) \quad (3.3)$$

$$\text{Gerilme Oranı} \quad R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3.4)$$

Yorulma olayında minimum ve maksimum gerilmelerin oranına “Gerilme Oranı (R)” denir. Bu oran -1 ile +1 arasında değişir. R= -1 ise; değişken yükleme (minimum ve maksimum gerilme değerleri aynı yönleri farklı), R= 0 ise; dalgalı yükleme (minimum gerilme sıfır), R= +1 ise statik yüklemedir (alt ve üst gerilmeler eşit) [13].

Yorulmada kullanılan, düşey ekseninde gerilme genliği ve yatay ekseninde ise malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (Nf) bulunan Wöhler diyagramları ile bir malzemenin kaç çevrim (Nf) sonra hasara uğrayacağı belirlenebilir (Şekil 3.1). Wöhler diyagramında eğrinin yatay hale geldiği gerilmeye “Yorulma Sınırı (YS)” veya “Yorulma Dayanım Sınırı (YDS)” denir. Bu gerilmenin altındaki gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir [14].



Şekil 3.1 Wöhler (S-N) diyagramları [13].

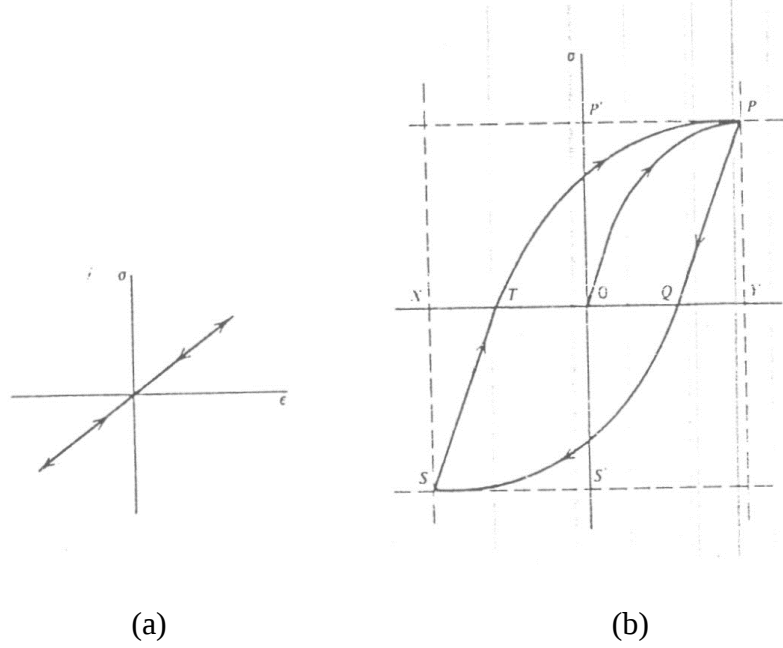
Pratikte demir esaslı malzemelerde belirli bir çevrim sayısından sonra eğride yataylaşma görülür. Demir dışı malzemelere ait Wöhler diyagramları incelendiğinde ise, eğrilerde herhangi bir yataylaşmanın olmadığı görülür. Bu açıklamalardan çıkan sonuç demir esaslı malzemeler yorulma dayanım sınırı altındaki gerilmelerde sonsuz bir ömre sahipken, demir dışı malzemelerin yorulma ömrü sınırlıdır.

### 3.2 Çevrimsel Gerilme - Deformasyon

Yorulma ömrü, yorulma deney cihazlarında gerilme veya şekil değişim miktarı sabit tutularak tespit edilmektedir. Sabit birim şekil değişim genliğinde yapılan deneylerde, çevrim sayısına bağlı olarak her çevrimdeki gerilme miktarı kontrol edilirken, sabit gerilme genliklerinde yapılan deneylerde ise çevrim sayısına bağlı olarak her çevrimdeki birim şekil değişim miktarı belirlenir [14].

Bir çevrimsel yükleme deneyi esnasında çevrimsel gerilme-deformasyon eğrisinin incelenmesiyle malzemenin çevrimsel davranışı açıkça tanımlanabilir. Örneğin uygulanan yüklerin yalnızca elastik deformasyona neden olduğu koşullarda Şekil 3.2a'daki gibi bir histerisiz eğrisi elde edilir. Burada malzemenin gerilme - deformasyon davranışı tamamen tersinirdir yani oluşan deformasyonlar tamamen elastiktir. 2.tip davranış elastik ve plastik deformasyonu kapsar, çekme ve basma yönünde tekrarlı şekilde uygulanan gerilmeler malzemede hem elastik hem de plastik

deformasyon oluşturur (Şekil 3.2b). Histerisiz döngüsünün alanı malzemede plastik deformasyon oluşturmak için yapılan işin bir ölçüsüdür.

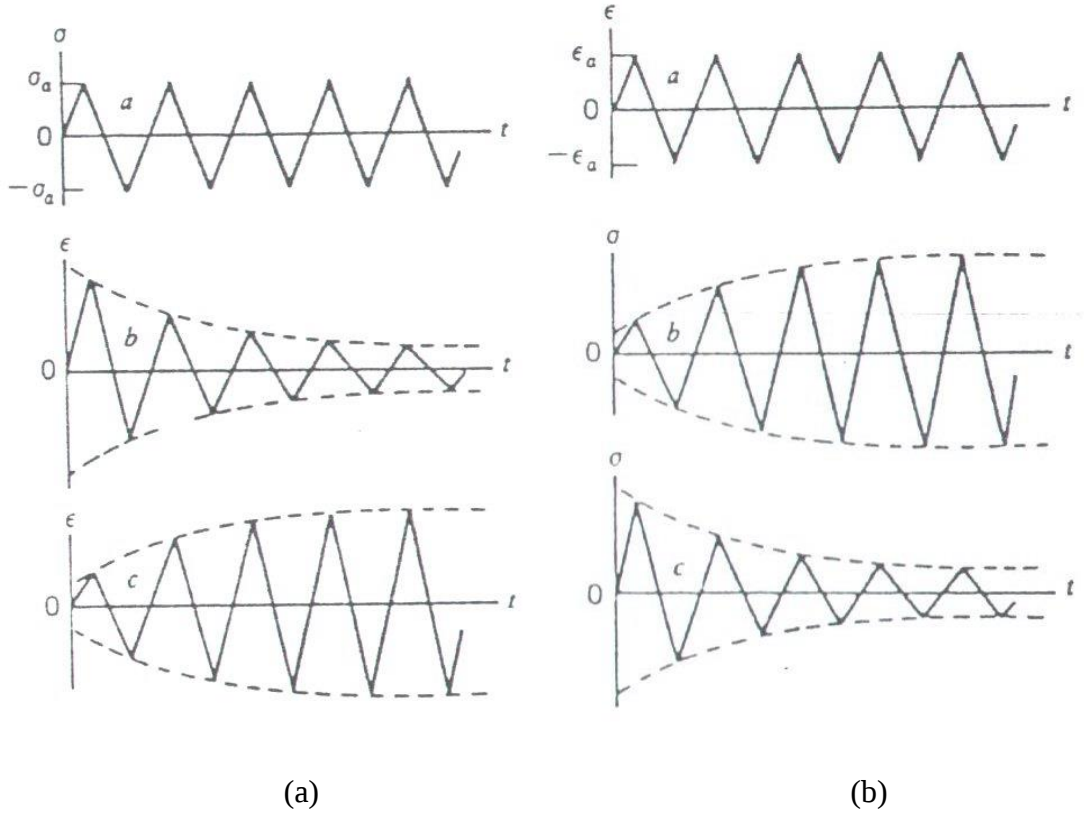


Şekil 3.2 Çevrimsel yükleme koşulları için histerisiz döngüsü [15].

a) ideal elastik malzeme b) elastik ve plastik deformasyona uğrayan malzeme.

Plastik deformasyonun sıfıra düştüğü durumda Şekil 3.2 b'deki histerisize döngüsü 3.2a'da gösterilen şekle dönüşür. Sonuçta elastik deformasyon toplam deformasyona yaklaşıp [15]. Plastik deformasyon büyük ölçüde kalıcı şekil değişimlerine neden olduğundan mühendislik malzemelerinin kullanımını kısıtlar. Plastik deformasyon yükleme boşaltıldıktan sonra kalıntı gerilmelerin kalmasına sebep olur. Kalıntı gerilmeler ise çekme veya basma karakterli olup olmamasına bağlı olarak malzemenin yorulma direncine etkiler. Çekme karakterli kalıntı gerilmeleri yorulma direncini azaltırken, basma karakterli kalıntı gerilmeleri yorulma direncini artırıcı bir etkiye sahiptir [16].

Gerilme ve deformasyon kontrolü koşullarda çevrim sayısına bağlı olarak değişen malzeme davranışları Şekil 3.3 a ve b' de histerisiz döngüsünün şeklindeki değişim olarak görülmektedir. Hem gerilme hem de deformasyon kontrolü altında malzeme davranışı çevrimsel kararlılığa ulaşılan kadar devam eder. Çevrimsel koşullarda malzeme, uygulanan gerilme veya deformasyonlara daha az (çevrimsel yumuşama) veya daha fazla (çevrimsel sertleşme) dirençli hale gelir. Bu nedenle malzemede çevrimsel deformasyon sertleşmesi veya çevrimsel deformasyon yumuşaması olduğu söylenir.



Şekil 3.3 a) Gerilme kontrollü ve b) Deformasyon kontrollü çevrime bağlı malzeme tepkisi [15].

Histerisiz döngüsünün genişliği çevrimsel sertleşme meydana geldiğinde daralır ve çevrimsel yumuşama sırasında ise genişler. Histerisiz döngüsü genellikle 100 çevrimden daha kısa sürelerde kararlı hale gelir ve uygulanan deformasyon aralığında malzeme denge şartlarını yakalar. Sonuç olarak çevrimsel kararlı haldeki gerilme deformasyon eğrileri bir malzemenin çevrimsel davranışının karakterize edilmesinde önemlidir.

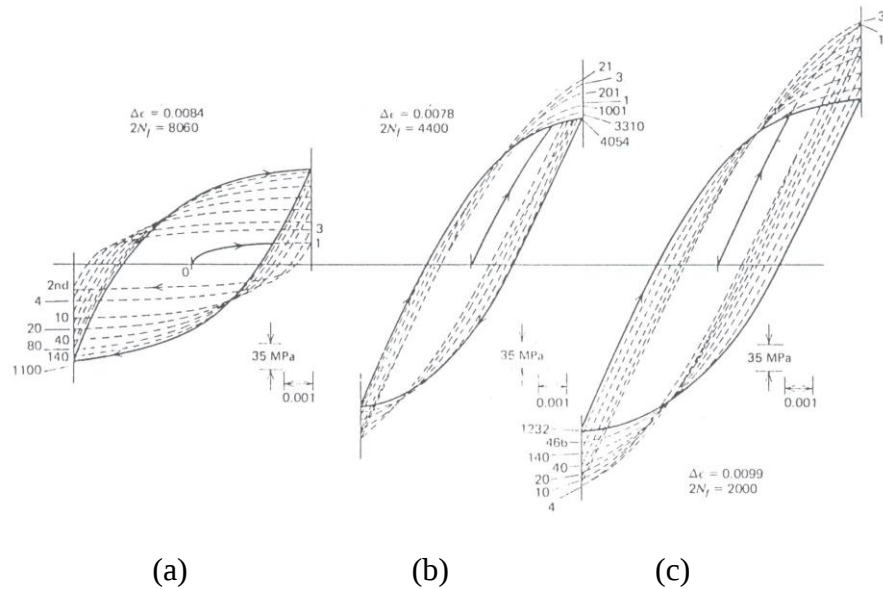
Manson çevrimsel sertleşme veya yumuşama eğiliminin malzemenin monotonik çekme dayanımının %0.2 akma dayanımına oranına ( $\sigma_{UTS}/\sigma_Y$ ) bağlı olduğunu gözlemlemiştir. Buna göre  $\sigma_{UTS}/\sigma_Y > 1.4$  ise malzeme sertleşecek,  $\sigma_{UTS}/\sigma_Y < 1.2$  ise malzemede yumuşama meydana gelecek,  $\sigma_{UTS}/\sigma_Y$  oranının 1.2 ile 1.4 arasındaki değerleri için tahminde bulunmak zordur. Bununla birlikte eğer deformasyon sertleşmesi üssü  $n > 0.2$  ise çevrimsel sertleşme veya  $n < 0.1$  ise çevrimsel yumuşama olacaktır. Bu nedenle başlangıçta sert ve dayanıklı malzemeler genellikle çevrimsel deformasyon yumuşamasına uğrarken, başlangıçta yumuşak olan malzemeler sertleşecektir. Manson, çevrimsel sertleşme veya yumuşama meydana gelip gelmeyeceğini belirlemek için monotonik özellikleri kullanmıştır. Bununla

birlikte çevrimsel büyüklüğün neden olduğu dönüşüm sadece monotonik ve çevrimsel gerilme-deformasyon eğrilerinin karşılaştırılmasıyla belirlenebilir [15].

Malzemelerin çevrimsel sertleşme veya yumuşamaya uğraması malzemenin dislokasyon altyapısının doğası ve kararlılığı ile ilgilidir. Başlangıçta yumuşak olan malzemede dislokasyon yoğunluğu düşüktür. Plastik deformasyon çevriminin sonucunda dislokasyon yoğunluğu hızlıca artar bu da deformasyon sertleşmesine önemli bir katkıda bulunur. Bu noktada dislokasyonlar, kullanılan malzeme ve uygulanan çevrimsel deformasyonun büyüklüğüne bağlı olarak kararlı bir düzende geçerler. Malzeme başlangıçta sert olduğunda, sonraki deformasyon çevrimi sırasında dislokasyonlar deformasyona karşı daha az direnç gösteren yeni bir düzende geçerler, bu da malzemenin deformasyon yumuşaması gösterdiği anlamına gelir. Bu etkiyi karakterize etmek için bir yükleme çevrimine maruz kalan malzemenin akma davranışının incelenmesi gerekir.

### 3.3 Bauschinger Etkisi

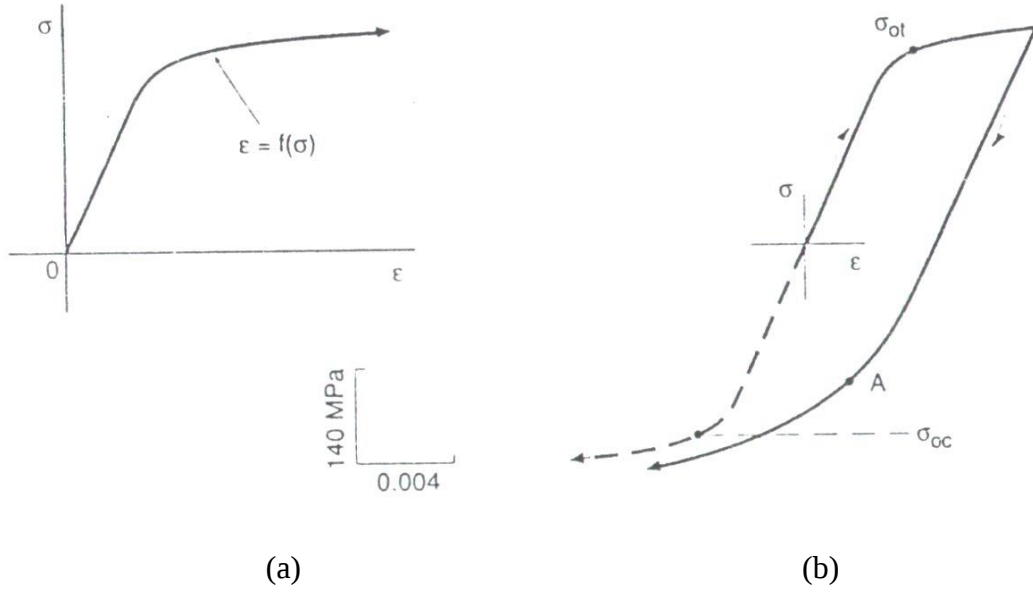
Ardışık olarak çekme ve basma gerilmelerine maruz kalan bir malzemede basmadaki akma gerilmesinin değerinin, çekmedeki akma gerilmesinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum akma noktasının üzerinde bir çekme gerilmesinden sonra basma gerilmesine maruz kalan bir malzemenin daha kolay şekil değiştireceği anlamına gelir ve Bauschinger etkisi olarak bilinir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Bakırın deformasyon kontrollü yorulma davranışı [15].

(a) Tam tavlanmış      (b) Kısmen tavlanmış      (c) Soğuk işlem görmüş.

Çekme yönünde uygulanan gerilme etkisiyle akma noktası geçildikten sonra gerilme yönü değiştirilirse, gerilme birim şekil değişim eğrisi, tek eksenli gerilme halindeki farklı olur (Şekil 3.5). Gerilme yönü basmaya değiştirildiğinde akma genellikle tek eksenli basma gerilmesi altındaki akma noktasından daha düşük bir gerilmede meydana gelir. 1880’li yıllarda Alman bir mühendisin çalışmalarından sonra, bu erken akma davranışı Bauschinger Etkisi olarak adlandırılmıştır [16].



Şekil 3.5 (a) Monotonik gerilme – birim şekil değişim eğrisi ve (b) Bauschinger etkisini gösteren çevrimsel gerilme-birim şekil değişim eğrisi [16].

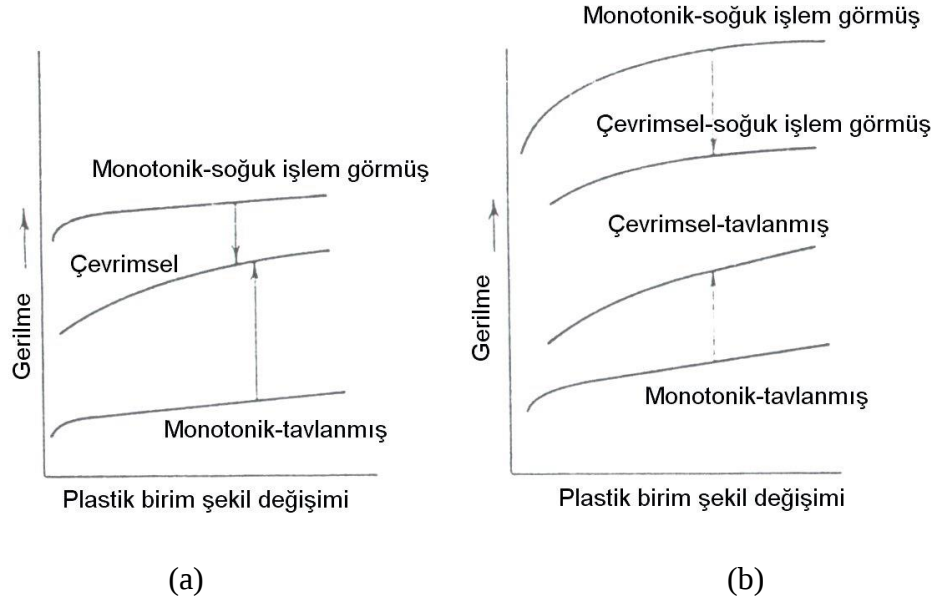
Polakowski farklı karbon çeliklerinden elde edilen deney sonuçlarına dayanarak Bauschinger etkisinin şekliyle çeliğin karbon içeriği arasında bir ilişki kurarak düşük karbonlu çeliklerin yüksek karbonlu çeliklerden daha belirgin bir Bauschinger etkisine sahip olduğunu bulmuştur. Bauschinger etkisinin şeklinin monotonik gerilme deformasyon eğrisinden bağımsız olmadığını, Bauschinger etkisinin farklı çeliklerde aynı şekle sahip olamayacağını ama benzer bir eğilimi göstereceğini belirlenmiştir. Bu farklılığın ana sebebi çelikteki karbon içeriğinin etkisidir. Karbon bileşimi Bauschinger etkisinin şeklini etkileyen önemli bir değişkendir. Karbon bileşimi artarsa Bauschinger eğrisi daha belirsiz olur. Bu etki Wilson ve Bate tarafından elde edilen deney sonuçlarıyla kanıtlanmıştır [17].

### 3.4 Yorulma Çatlağı

Yorulma genellikle iç yapıda oluşan kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılmalarından kaynaklanır. Bundan dolayı yorulma olayı iç yapıya çok bağlıdır. İç yapıda bulunan çatlak, çentik, boşluk ve ani kesit değişimleri civarındaki gerilmeler ortalama gerilmelerden daha büyüktür. Bu gerilmeler etkisinde yerel plastik şekil değiştirme meydana gelir. Diğer taraftan başlangıçta hiçbir kusur içermeyen yüzeyi parlatılmış homojen kesitli bir metalde elastik sınır altında da dislokasyonlar yerel olarak hareket ederek kayma bantları oluştururlar. Bu bantlar da yüzeyde girinti ve çıkıntıların oluşmasına, dolayısıyla gerilme yığılmalarına neden olur. Bütün bu hallerde tekrarlı gerilmeler etkisinde oluşan plastik şekil değiştirme sonucu malzeme sertleşir, gevrekliği artar ve sonunda mikro çatlaklar doğar. Bu mikro çatlaklar zamanla yayılarak ani yorulma kırılması meydana getirir. Yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar ve malzemenin iç kısımlarına doğru ilerler [18].

### 3.5 Dislokasyon ve İstif Hata Enerjisi

Dislokasyon hareketliliği malzemenin istif hata enerjisine (SFE) bağlı olan dislokasyon altyapı kararlılığını güçlü bir şekilde etkiler. İstif hata enerjisi yüksek olduğu zaman çapraz kaymayı artırdığından dislokasyon hareketliliği büyüktür. Tam tersine çapraz kayma düşük istif hata enerjisine sahip olan malzemelerde kısıtlanmaktadır. Sonuç olarak bazı malzemeler diğerlerinden daha fazla çevrimsel sertleşme ya da çevrimsel yumuşama davranışı gösterir. Örneğin, bakır gibi yüksek istif hata enerjili ve başlangıçta sert olan malzemeler çevrimsel yumuşama davranışı gösterirken, başlangıçta yumuşak olan bakır numuneler çevrimsel sertleşme gösterirler. Dolayısıyla çevrimsel kararlılık, malzemenin başlangıç durumuna değil, dislokasyon yapısı ve istif hata enerjisiyle ilgilidir (Şekil 3.6a). Bu durumda kararlı haldeki malzemelerin mekanik özellikleri önceki deformasyon geçmişinden bağımsız olmaktadır. Bu yaklaşım, düşük istif hata enerjisine sahip bir malzeme için doğru değildir. Düşük istif hata enerjisine sahip bir malzeme yüksek istif hata enerjisine sahip bir malzemedan daha yavaş sertleşir veya yumuşar. Şekil 3.6b'deki malzeme çevrimsel olarak yumuşayacak veya sertleşecektir ancak sonuçta kararlı bir hal hiçbir zaman tam olarak elde edilemez ve iki farklı başlama şartları için eşdeğer değildir. Böyle malzemeler için nihai çevrimsel kararlı hal önceki deformasyon geçmişine bağlıdır.



Şekil 3.6 (a) Yüksek istif hata enerjili bakırın ve (b) düşük istif hata enerjisine sahip Cu – % 7.5 Al alaşımının çevrimsel deformasyon davranışı [15].

Çevrimsel yükleme durumunda da dislokasyon altyapılarının oluşma mekanizması tek yönlü gerilmeler altında gelişen mekanizmayla benzerdir. Gerçekten de, Feltner ve Laird [15], tek yönlü deformasyon koşullarında gerçekleşen bazı dislokasyon yapılarının çevrimsel deformasyon koşullarında da aynı şekilde etkin olduğunu gözlemlemiştir. Örneğin; yüksek deformasyon çevrimlerindeki bir hücre yapısı yüksek istif hata enerjili alaşımlarda gelişmektedir. Eğer çevrimsel deformasyon hücrenin önceki yapısının kabalaşmasına neden oluyorsa sonradan yumuşama meydana gelecektir. Eğer hücre yapısı daha da incelirse çevrimsel deformasyon sertleşmesi meydana gelir. Düşük istif hata enerjili alaşımlarda dislokasyon düzlemleri sıralanır ve istif hataları oluşur. Bu bulgular monotonic yükleme için de benzerdir. Düşük deformasyonlarda monotonic ve çevrimsel yükleme nedeniyle üretilen dislokasyon yapıları benzer özellik göstermektedir [15].

### 3.6 Yorulma Kırık Yüzeyi

Yorulma kırılması yüzeyinin ilginç bir görünüşü vardır. Yüzeyde çatlağın başladığı nokta, onu çevreleyen midye kabuğu görünümlü aynı merkezli eğriler ve bunların yanında taneli bir bölge görülür. Çatlak zamanla yavaş ilerlerken karşılıklı yüzeylerin sürekli birbirine sürtünmesi sonucu yorulma kırılması yüzeyi parlak görünür. Çatlak

ilerleyip geri kalan kesit normal yükü taşıyamaz hale gelince ani kırılma meydana gelir ve kırılma yüzeyi taneli görünüştedir [18].

### **3.7 Yorulma Hasarının Önlenmesi**

Uygulamada kullanılan bir çok makine parçası ve yapı elemanı tekrarlı yüklere ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Yorulmaya etki eden faktörlerin fazla olması ve uygulamada statik yüklemeye nadir rastlanması ile günümüzde meydana gelen hasarların % 25 gibi büyük bir kısmı yorulmadan kaynaklanmaktadır [13].

Çalışmalar çeliklerin yorulma dayanımlarının genellikle sertlik ve çekme dayanımlarıyla orantılı olduğunu göstermekle birlikte, malzemenin yük taşıma kapasitesinin, tokluğu ve kritik çatlak boyutuyla belirlendiği yüksek çekme dayanımına sahip malzemeler için bu genelleme doğru değildir. Üretim prosesi, ısıtma işlemi, yüzey işlemleri ve servis şartları çevrimsel gerilmeye maruz kalan çeliğin nihai davranışına önemli derecede etki eder.

Malzemeler, yükleme koşulları, gerilme konsantrasyonları ve diğer pek çok faktördeki çok küçük değişikliklere duyarlı oldukları için bir metal parçasının yorulma ömrünü tahmin etmek çok zordur. Bir yapısal metal elemanın yorulmaya karşı direnci soğuk şekillendirme, kaynak gibi üretim yöntemleriyle, yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeler gibi yüzey koşullarından da etkilenmektedir.

Küçük numuneler üzerinde yapılan yorulma deneyleri parçanın yorulma ömrünü tahmin etmek için yeterli değildir. Bu deneyler, çevrimsel gerilmeye maruz kalan malzemenin temel özellikleri ve malzemenin istenen göreceli direnci için kullanışlıdır. Bir ömür tahmini yapmadan önce dizayn analizlerindeki parçanın temel özellikleri ile yükleme geçmişi birlikte değerlendirilmelidir.

Malzeme ve yük özelliklerine ilaveten dizayn analizinde, uygulanan yüklemenin tipi (tek eksenli, eğme veya bükme), yükleme modeli (sabit veya değişken büyüklüklerde periyodik yükleme veya rastgele yükleme), en yüksek gerilme değeri, parçanın tüm uzunluğu, üretim metodu, yüzey pürüzlülüğü, oksitlenmiş yüzey varlığı, kullanım sıcaklığı ve ortamı ile servisin neden olduğu kusurların meydana gelmesi berabercede dikkate alınmalıdır [12].

#### 4. YORULMA T RLER 

Yorulma, malzemede çatlak bulunup bulunmamasına ve uygulanan gerilme seviyesine bağlı olarak aŗaėıdaki gibi sınıflandırılabilir [14].

- i  atlaklı Malzemelerde Yorulma
- ii çatlaksız Malzemelerde Yorulma
  - Uzun  m rl  Yorulma
  - Kısa  m rl  Yorulma

##### 4.1  atlaksız Malzemelerde Yorulma

 atlaksız bir malzemede kırılma, çatlağın oluŗumu ve ilerlemesi ile meydana gelen yorulma hasarı, uzun ömürlü ve kısa ömürlü yorulma olmak üzere iki grupta incelenmektedir [14].

Uzun ömürlü yorulmada  $|\sigma_{\max}|$  ve  $|\sigma_{\min}|$  değerleri malzemenin akma dayanımından d ŗ kt r ve kırılmaya kadar olan çevrim sayısı  $10^4$ 'den büyüktür. Kısa ömürlü yorulmada ise  $|\sigma_{\max}|$  ve  $|\sigma_{\min}|$  değerleri malzemenin akma dayanımı değerinden büyük olduğundan yorulma sırasında plastik deformasyon meydana gelir ve kırılmaya kadar olan çevrim sayısı  $10^4$ 'den küçüktür. Uzun ömürlü yorulma, tekerlekler gibi dönen ve titreŗen sistemlerde, akslarda ve motor elemanlarında görülür. Kısa ömürlü yorulma ise nükleer reaktör parçalarında, türbin parçalarında ve aŗırı yükleme etkisinde kalan parçalarda görülür [14].

 atlaksız malzemelerde g r len uzun ömürlü yorulmada deney sonuçlarının ampirik olarak [14];

$$\Delta \sigma . N_f^a = C_1 \quad (4.1)$$

bağıntısına uyduğu Basquin tarafından tespit edilmiŗtir. Basquin bağıntısı olarak adlandırılan bu bağıntıda  $\Delta \sigma$ ; gerilme aralığı,  $N_f$ ; kırılmaya kadarki çevrim sayısı,  $a$ ; ve  $C_1$  malzeme sabitleridir.  $a$  sabiti çoğu malzemeler için  $1/8$  ile  $1/15$  arasındadır.

Kısa ömürlü yorulmada ise  $|\sigma_{\min}|$  ve  $\sigma_{\max}$  değerleri akmanın üzerinde olduğundan Basquin bağıntısı geçerli değildir. Bu durumda malzemede plastik şekil değişimi meydana geldiğinden malzemelerin yorulma özellikleri plastik birim şekil değişimi aralığına ( $\Delta \varepsilon_{pl}$ ) bağlıdır. Kısa ömürlü yorulmada Coffin-Manson kanunu olarak bilinen [14];

$$\Delta \varepsilon . N_f^b = C_2 \quad (4.2)$$

bağıntısının geçerli olduğu görülür. Burada  $\Delta \varepsilon$ ; toplam birim şekil değişim genliği,  $N_f$ ; kırılmaya kadarki çevrim sayısı,  $b$  (çoğu malzemeler için 0.5 ile 0.6 arasında) ve  $C_2$  birer malzeme sabitidir.

Yorulma deneylerinde genellikle gerilme genliğinin kontrol edilmesi esastır. Ancak uygulanan gerilme akma dayanımını aşarsa malzemede önemli ölçüde plastik birim şekil değişimi meydana gelir ve çatlak oluşur oluşmaz uygulanan sabit gerilme genliği etkisiyle çok kısa sürede kırılma meydana gelir. Bu durumda yorulma çatlağının ilerlemesi gözlenemez. Yapılan araştırmalar akma dayanımından daha yüksek gerilmelere maruz kalan ve bu nedenle malzemede plastik birim şekil değişiminin meydana geldiği kısa ömürlü yorulma deneylerinde, gerilme genliği yerine birim şekil değişimi genliğinin ( $\Delta \varepsilon/2$ ) kontrol edilmesinin, malzemenin yorulma davranışını belirlemede çok daha yararlı olduğunu göstermiştir. Buna göre, kısa ömürlü yorulma deneyleri, toplam birim şekil değişim genliği, yüksek çevrimli yorulma deneyleri ise gerilme genliği kontrol edilerek yapılmaktadır [18].

#### 4.2 Kısa Ömürlü Yorulma

Kısa ömürlü yorulma deneylerinde, malzemede elastik ve plastik birim şekil değişimi meydana gelmektedir. Elastik ve plastik birim şekil değişimlerinin toplam deformasyona olan katkıları, çevrim sayısına bağlı olarak değişmekte ve matematiksel olarak ifade edilebilmektedir.

Elastik birim şekil değişim bileşeni, gerçek gerilme ve çevrim sayısına bağlı olarak,

$$\frac{\Delta \varepsilon_e E}{2} = \frac{\sigma_a}{2E} = \sigma_f' (2 N_f)^b \quad (4.3)$$

eşitliğiyle tanımlanmaktadır [20].

Burada,  $\sigma_a$  = Kararlı hal gerilme genliği,  $\sigma_f$  = yorulma mukavemet katsayısı,  $b$  = yorulma mukavemet üssüdür. Eşitlik (4.3), 1910 yılında Basquin tarafından önerilen formüle benzerdir. Artan yorulma ömrü ile yorulma dayanım üssü  $b$ 'nin azalması ve yorulma mukavemet katsayısı  $\sigma_f$ 'in artması beklenmektedir.

Toplam deformasyonun plastik bileşeni ise en iyi şekilde Coffin – Manson bağıntısıyla tanımlanmaktadır.

$$\Delta \varepsilon_p / 2 = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (4.4)$$

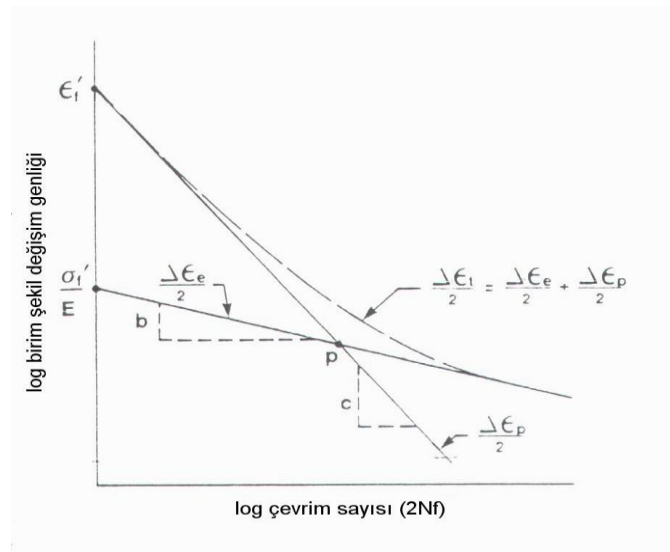
Burada,  $\varepsilon_f'$  = yorulma süreklilik katsayısı,  $N_f$  = kırılmaya kadarki çevrim sayısı ve  $c$  = yorulma süreklilik üssüdür. Yorulma süreklilik üssü  $c$ 'nin azalmasıyla ve yorulma süreklilik katsayısı  $\varepsilon_f'$ 'nin artmasıyla yorulma ömrünün artması beklenmektedir.

Bir malzemenin kısa ömürlü yorulma davranışı, elastik ve plastik birim şekil değişim bileşenlerin toplamı olarak Eşitlik 4.5 ve 4.6'da ifade edilmektedir:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{2} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6'da verilen elastik, plastik ve toplam birim şekil değişimleri ile çevrim , sayısı arasındaki ilişki Şekil 4.1'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 4.1 Birim şekil değişimi – çevrim sayısı eğrisi [24].

Yukarıdaki eşitliklerle kısa ömürlü yorulma verilerinin değerlendirilmesinde, kırılmaya kadarki tersinir deformasyon sayısının ( $2N_f$ ) kullanılması, deneysel dataların uyumu bakımından kırılmaya kadarki çevrim sayısının ( $N_f$ ) kullanılmasından daha iyidir [19].

Şekil 4.1'den görüldüğü gibi, düşük çevrim sayılarında plastik birim şekil değişim bileşeninin, yüksek çevrim sayılarında ise elastik birim şekil değişiminin toplam birim şekil değişimi içindeki payı daha fazladır. Elastik ve plastik bileşen eğrilerinin kesiştiği ve yorulma geçiş ömrü ( $2N_t$ ) olarak tanımlanan çevrim sayısında ise her iki elastik ve plastik birim şekil değişim genlikleri eşittir. Daha yüksek  $2N_t$  değerlerinde kırılan bir kısa ömürlü yorulma deney numunesinin ömrü boyunca maruz kaldığı deformasyon büyük ölçüde plastik karakterlidir. Daha düşük  $2N_t$  değerine sahip olan malzeme yorulma ömrü boyunca büyük ölçüde elastik birim şekil değişimine maruz kalacaktır.

Malzemelerin kısa ömürlü yorulma davranışlarının kıyaslanmasında yorulma geçiş ömrü ( $2N_t$ ) yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu durumda yorulma geçiş ömrü, daha yüksek  $2N_t$  değerine sahip malzemenin yorulma ömrünün belirlenmesinde malzemenin sünekliği, daha düşük  $2N_t$  değerine sahip malzemenin yorulma ömrünün belirlenmesinde ise malzemenin dayanımı daha belirleyici olmaktadır [19].

Kısa ömürlü yorulma verilerinin değerlendirilmesinde Eşitlik 4.7 ve 4.8'de verilen bağıntılar;  $K'$ , çevrimsel dayanım katsayısı ve  $n'$  çevrimsel deformasyon sertleşmesi üssü olarak tanımlanan yorulma sabitlerini belirler.

$$K' = \sigma_f' / (\epsilon_f')^{n'} \quad (4.7)$$

$$n' = b/C \quad (4.8)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir.

Araştırmacılar yorulma süneklik katsayısı  $c$ 'nin genellikle  $-0.5$  ile  $-0.7$  arasında, yorulma mukavemet üssü  $b$ 'yi ise tipik olarak  $-0.05$  ile  $-0.12$  arasında ve çevrimsel deformasyon sertleşme üssünü  $n'$  ise yaklaşık  $0.15$  olarak belirlemişlerdir [23].

Çevrimsel gerilme birim şekil değişimi eğrileri monotonik gerilme-birim şekil değişimi eğrileriyle karşılaştırıldığında, çevrimsel gerilme koşullarında sertleşme veya yumuşama davranışı belirlenebilmektedir.

Çevrimsel gerilme-birim şekil değişiminin Morrow bağıntısı olarak bilinen

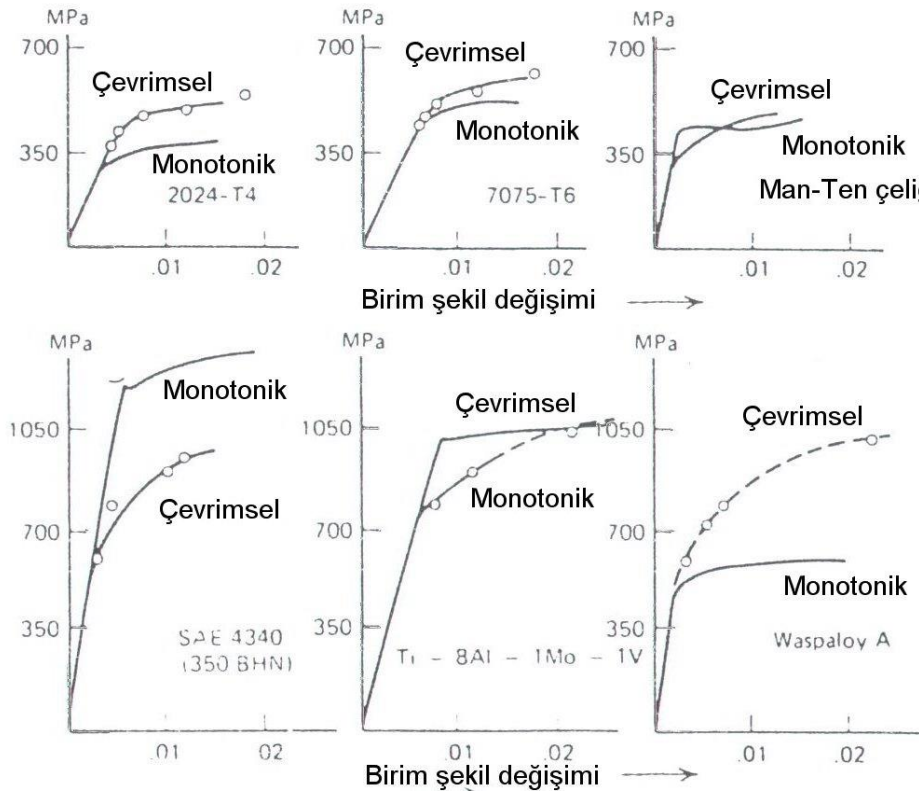
$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa} = \left( \frac{100}{E} \right) \sigma_a + \varepsilon_f \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_f} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.9)$$

eşitliği ile tanımlanabileceği ileri sürülmüştür [20].

% 0.2 çevrimsel akma gerilmesi, plastik deformasyon genliği ve kararlı hal gerilmesi arasındaki ilişki Ramberg – Osgood bağıntısıyla hesaplanmaktadır [21]:

$$\Delta \sigma / 2 = \Delta \sigma_0 / 2 + K \left( \Delta \varepsilon_{pl} / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

Şekil 4.2’de farklı alaşımlar için çevrimsel ve monotonik gerilme – birim şekil değişim eğrileri görülmektedir. Bu tür eğriler çevrimsel ya da monotonik koşullarda, aynı birim şekil değişim seviyesinde malzemenin maruz kaldığı gerilmeyi gösterir ve dolayısıyla malzemenin çevrimsel sertleşme veya yumuşama davranışını ifade etmektedir. Malzemenin kısa ömürlü yorulma davranışını tanımlamak için çevrimsel gerilme–birim şekil değişim eğrilerinin mutlaka elde edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.2 Farklı alaşımlar için Monotonik ve çevrimsel gerilme–birim şekil değişim eğrilerinin karşılaştırılması [15].

Kısa ömürlü yorulma koşullarında malzemelerin yumuşaması veya sertleşmesi en iyi şekilde yorulma çevrim sayısına bağlı olarak çekme gerilme piklerinin görüntülenmesi ile belirlenir. Deneyin başlangıç aşamalarında gerilme piklerinde her zaman bir azalma gözlenebilmektedir. Deneyin ilerleyen aşamalarında da gerilme düşmeye devam eder ve toplam ömrün ( $N_f$ ) yaklaşık yarısında sabit bir hale ulaşır. Bu gerilme değeri “karalı hal gerilmesi” olarak bilinir. Bu davranış özellikle düşük toplam deformasyon büyüklüklerinde telaffuz edilmektedir [21].

Malzemelerin çevrimsel deformasyon davranışı genellikle yapıda dislokasyonların oluşum ve çoğalma süreçleriyle ilgilidir. Perlitik yapılı çeliklerde çevrimsel sertleşme ya da çevrimsel yumuşama davranışını ortaya çıkaran mekanizmalar birbirlerinden bağımsız olarak çalışır. Bunların hangisinin daha baskın olacağı dislokasyon hareketlerini engelleyen lameller arası mesafe ile uygulanan birim şekil değişim genliğine bağlıdır. Ötektoid bileşime sahip perlitik bir çelikte ince perlit yapısı çevrimsel yumuşama, kaba perlit yapısı ise çevrimsel sertleşme davranışına neden olur. Ortalama bir lameller arası mesafeye sahip olan perlitte ise sırasıyla düşük birim şekil değişim genliklerinde çevrimsel yumuşama yüksek birim şekil değişim genliklerinde ise çevrimsel sertleşme görülür. Lameller arası mesafenin büyük olduğu kaba ferritte dislokasyonlar nispeten düşük gerilme seviyelerinde üretilir. Dislokasyonların sayısı uygulanan birim şekil değişimini karşılayacak kadar fazla olduğunda üretilen yeni dislokasyonlar, dislokasyonlar arasındaki etkileşimleri artırır ve sonuçta deformasyon sertleşmesine bağlı olarak çevrimsel sertleşme meydana gelir. İnce perlitte ise dislokasyon üretmek için yüksek gerilmeler gerekir. Lameller arası mesafenin küçük olması aktif kayma sistemlerini sayısını azaltır. Bunun sonucunda dislokasyonların birbirleriyle etkileşmesi ve deformasyon sertleşmesi ihtimali azalır. Öte yandan % 0.45 karbon oranına kadar yorulma kaynaklı plastik deformasyon sadece ferrit taneleri ile sınırlıdır. Oysa yüksek karbon oranlarında perlitin içindeki ferritte de artan miktarda plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu nedenle lameller arası mesafenin özellikle yüksek karbon oranlarında çevrimsel gerilme davranışı üzerinde önemli etkisi vardır [22].

#### 4.2.1 Kısa Ömürlü Yorulma Davranışlarının Belirlenmesi

Malzemelerin çevrimsel deformasyon davranışları, eksenel, tam tersinir ve çevrimsel deformasyon kontrolü altında düzgün, yuvarlak ve parlatılmış numunelerin test edilmesiyle belirlenmektedir [23]. En yaygın deney tamamıyla tersinir ( $R = -1$ ) çevrimli sabit birim şekil değiştirme limitleri arasında yapılandır. Birim şekil değiştirme büyüklüğü  $\epsilon_a = \Delta\epsilon/2$  olarak seçilmiştir ve eksenel test numunesi çekme uzaması  $\epsilon_{\max} = +\epsilon_a$ 'ya ulaşana kadar yük uygulanmaktadır. Sonra uzama  $\epsilon_{\min} = -\epsilon_a$  oluncaya kadar yüklemenin yönü ters çevrilmektedir ve test devam ettirilmektedir. Yüklemenin yönü her seferinde  $+\epsilon_a$  veya  $-\epsilon_a$ 'ya ulaşmaktadır. Birim şekil değiştirme oranı bu limitler arasında sabit tutulabilmektedir veya bazen zamanla birim şekil değiştirmenin karışık frekanslı varyasyonları kullanılmaktadır. Deney frekansı malzemenin davranışını etkiler. Her çevrimsel birim şekil değiştirme deneyi yorulma kırılması oluncaya kadar devam ettirilmektedir [16].

Deneyin başlangıç çevrimleri esnasında, malzemeler çevrimselliğin neden olduğu sertleşme veya yumuşamayla deformasyon direncinde bir değişiklik geçirirler. Deney ilerlediğinde bu tepki genellikle toplam test ömrünün %20 ile %40'ı civarında kararlı hale gelir. Toplam deformasyon, gerilme ve çevrimsel modül değerleri bu kararlı histerisize döngülerinden elde edilir. Bu değerler daha sonra yorulma parametrelerini belirlemek için numunenin toplam ömrüyle kullanılmaktadır. Bununla birlikte bütün malzemeler kararlı çevrimsel tepki göstermezler. Bu yüzden kararlı tepki olarak toplam ömrün % 50 si tipik olarak seçilmektedir [24].

#### 4.3 Tempcore Nervürlü Çelik Çubukların Yorulma Dayanımı

Tempcore nervürlü çelik çubuklar, köprüler, açık deniz platformları ve su altı yapıları gibi yapıların inşasında kullanılmaktadır. Beton içerisindeki bu yapısal elemanlar sıklıkla eğme, burma, çekme veya basma yüklemeleri içeren çok karmaşık yükleme çevrimlerine maruz kalmaktadırlar. Hatta tek yükleme koşulları altında karmaşık gerilme hali çentiklerde veya süreksizliklerde ortaya çıkabilir. Ayrıca uygulanan yükler orantılı ya da orantısız olabilmektedir. Bu yapılar ve elemanlar şiddetli yer hareketleri, sert rüzgarlar ve okyanus dalgaları gibi sürekli zamana bağlı tekrarlı yüklere maruz kalmaktadır ve bu şiddetli tekrarlı yükler altında yapılar kısa ömürlü yorulma etkisiyle kırılabilir. Bu nedenle yapıların veya bileşenlerinin kısa

ömürlü yorulma mukavemetinin daha iyi anlaşılması şiddetli tekrarlı yüklemeler altındaki yapıların dizaynı için önemlidir [24,25].

Avrupa’da tempcore çeliklerinin yorulma davranışı konusunda yapılan sınırlı sayıda çalışma sonucunda bu çeliklerin yorulma dayanımının, eşdeğer akma mukavemetine sahip diğer betonarme çeliklerinin yorulma dayanımı kadar iyi olduğu ancak yorulma dayanımının, çeliğin çekme çekme dayanımına bağlı olmadığı görülmüştür. Ayrıca, tempcore prosesiyle üretilmiş 12 mm çaplı çelik çubuklarla yorulma özelliklerinin soğuk şekillendirilmiş çubukların yorulma özelliklerinden daha üstün olduğu kaydedilmiştir. Yapılan çalışmalarda genellikle Tempcore çeliklerinin yorulma dayanımının, çubuk geometrisi, çelik kalitesi, uygulanan minimum gerilme ve çubuk çapıyla etkilendiği hesaba katılmıştır. Sonuç olarak betonarme çeliklerinin yorulma özelliklerini tahmin etmek için birkaç model geliştirilmiştir. Fakat bunlar Tempcore çeliğine karşı test edilmemiştir. Araştırmacılar bir betonarme çubuğunun yorulma dayanımının esas olarak çubuk geometrisine ve her gerilme çevriminde uygulanan minimum gerilmeye bağlı olduğu kanısında genellikle aynı görüştedirler [26].

#### **4.3.1 Tempcore Çeliklerinin Yorulma Davranışını Etkileyen Parametreler**

##### **4.3.1.1 Çubuk Geometrisinin Etkisi**

Deneysel sonuçlar yorulma çatlak başlangıcının, gerilme konsantrasyonlarının yüksek olduğu çapraz nervür kökü ya da tanımlama yazılarında meydana geldiğini göstermektedir. Çapraz nervürde gerilme konsantrasyonu nervür taban yarıçapının nervür yüksekliğine oranının azalmasıyla artmaktadır. Bu şekilde, daha geniş bir nervür ve daha yüksek bir kenar açısı daha büyük bir gerilme konsantrasyonlarına sebep olmaktadır. Dolayısıyla çubuk eksenine paralel olan tanımlama markaları çapraz nervür kökünün yaptığından daha küçük bir gerilme konsantrasyonuna sebep olmaktadır. Bununla birlikte, nervürlerin içinde markaların süreksiz olarak birleşmesi nervür köklerinden kaynaklanan gerilme konsantrasyonuna eşit gerilme konsantrasyonu üretebilir. Daha yüksek bir çevrimsel gerilme aralığı ve daha keskin bir nervür geometrisi çatlağın pek çok noktadan başlama olasılığını artırır ve daha kısa bir yorulma ömrüne yol açar [26].

#### **4.3.1.2 Kalıntı Gerilmeler ve Mikroyapının Etkisi**

Kısa ömürlü yorulma deneyi yapılmış numunelerdeki çekme deneyleri, bütün çatlakların düşük ve orta sertlikteki tabakaya ulaşmadığını göstermiştir. Böylece çubukların yorulma özellikleri, esasen çubuğun merkezdeki yapısından ziyade sertleştirilmiş dış yüzey yapısıyla belirlenebilmektedir. Tempcore prosesiyle üretilmiş çelik çubukların statik mekanik özellikleri çekirdek malzemesiyle kabuk arasındaki etkileşimin sonucu iken, yorulma özellikleri sadece en dıştaki mikroyapının bir fonksiyonudur [26]. Yorulma direncinin çekme mukavemetini artıran her ısıtma işlemle artacağı çok iyi bilinmektedir. Eşdeğer mukavemetli malzemeler için en iyi özellikler temperlenmiş martensitle elde edilmektedir. Çalışmalar, ferrit ve temperlenmiş martensitten ibaret bir mikroyapıda, yorulma çatlaklarının martensitten başlamayacağını göstermiştir. Bu tür çeliklerin yorulma dayanımı, çekme dayanımlarıyla artmaz. Çünkü çatlaklar ferrit tanelerinden başlar. Bu sonuç betonarme çeliklerinin diğer tiplerinde çelik kalitesinin yorulma dayanımını neden etkilemediğini açıklayabilir. Tempcore çeliğinin diğer betonarme çelik tiplerine göre bazı avantajları vardır. Çünkü tempcore prosesiyle üretilmiş çeliklerin yüzeyinde güçlü bir temperlenmiş martensit tabakası bulunmaktadır. Bu sertleşmiş malzemenin çekme mukavemeti 750–890 MPa civarındadır. Bu değer, yüksek mukavemetli betonarme çeliklerinin diğer tiplerinin aynı kalitesiyle en azından eşit veya daha yüksektir [26]. Kalıntı gerilmeler tempcore çeliğinde oldukça önemlidir. Yüzeydeki basma kalıntı gerilmelerinin yorulma çatlaklarının başlamasını ve yayılmasını engellediği belirtilmiştir. Çubukların yorulma özellikleri esasen kabuk malzemeyle belirlendiğinden, sertleşmiş kabuktaki eksenel basma kalıntı gerilmesi toplam yorulma özelliklerinde önemli bir faktör olmaktadır [26].

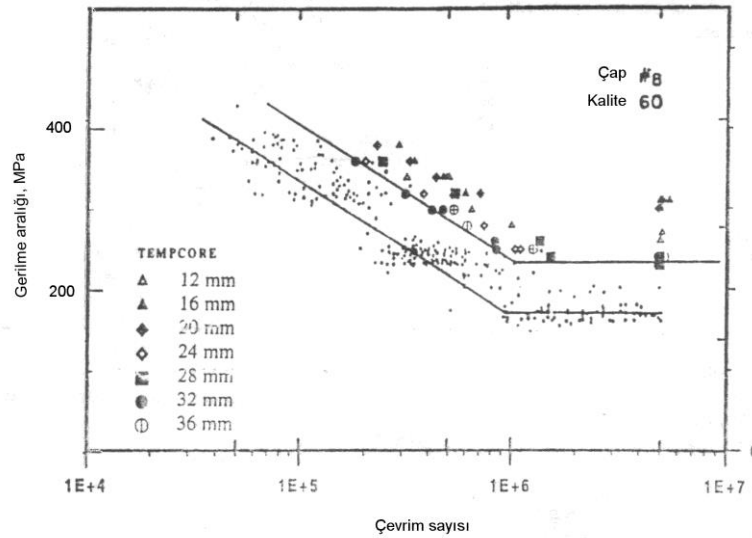
#### **4.3.1.3 Ortalama Gerilmeler ve Deformasyon Etkileri**

Ortalama gerilme etkileri, ağırlıklı olarak elastik deformasyon bileşeninin olduğu daha uzun yorulma ömürlerinde ortaya çıkar. Bu durumlarda düşük deformasyon genliklerinde ( $<0.005$ ) yorulma ömrü ortalama gerilmenin basma veya çekme olmasına bağlı olarak artabilir veya azalabilir. Plastik deformasyonun önemli olduğu daha yüksek deformasyon büyüklüklerinde gerilme gevşemesi meydana gelir. Mekanik ya da ısıtma işlemlerin neden olduğu ortalama gerilmeler sıfıra doğru veya yorulma ömründe fark edilebilir bir değeri olmayan çok küçük bir değere azalma

eğilimindedir. Böylece kısa ömürlü yorulma çalışmaları için kullanılan deformasyon büyüklüklerinin değişimi için ortalama gerilmenin etkisi önemsizdir [27].

#### 4.3.2 Tempcore Çeliklerinin Yorulma Özelliklerinin Diğer Çeliklerle Karşılaştırılması

Tempcore prosesiyle üretilmiş çelik çubukların yorulma dayanımı diğer çelik tiplerinden genel olarak daha üstündür [26]. Şekil 4.3'de Kuzey Amerika'nın yüksek mukavemetli betonarme çeliği GR 60 kalite için elde edilen tipik S – N eğrisi, tempcore nervürlü çubuklarının uzun ömürlü yorulma deney sonuçlarının üzerine bindirilmektedir [26]. S – N eğrilerinin eğimi betonarme çeliklerinin diğer çeşitlerinininki ile paraleldir. Ancak tempcore çeliği daha yüksek yorulma limitleri ve çok daha uzun yorulma ömrü gösterir.



Şekil 4.3 Diğer betonarme çelikleriyle tempcore çelik çubuklarının uzun ömürlü yorulma eğrileri [26].

Başka bir çalışmada Avustralya yapımı soğuk işlenmiş çelik çubuklarla yapılmış çeşitli yorulma deneyleriyle yapılan karşılaştırmalar, tempcore'un, özellikle yüksek yük ve birim şekil değişim genliğindeki kısa ömürlü yorulma özelliklerinin soğuk işlenmiş çubukların yorulma özelliklerinden daha iyi olduğunu göstermiştir. [28].

Diğer bir çalışmada ise çevrimsel yükleme altında betonarme elemanlarındaki betonarme çubuklarının kararsızlığını dikkate alan analitik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Beton kolonlarındaki betonarme çubuklarına yapılan çevrimsel tersinir yüklemede akmanın ötesindeki deformasyonları ölçmek için yeni bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu araştırmanın sonuçları, çubukların bir çekme deformasyonu

aralığındaki basma gerilmesi altında olduğunda, çevrimsel tersinir yüklemeye maruz kalan betonarme elemanlarındaki çelik çubuklarda burkulma meydana gelebileceğini gösterir. Buna göre histerisize çevrimlerine maruz kalan çelik bir çubukta burkulmanın başlaması çekmedeki bir tersinirden sonra meydana gelebilir ve tersinir çevrimden önce çekme deformasyonunun ulaştığı maksimum değere şiddetli bir şekilde bağlıdır. Bu durumda, çelik bir çubuğun burkulmasının başlaması histerisize çevriminin çekme bölgesinde meydana gelebilir [29].

Tempcore prosesiyle üretilmiş betonarme çeliklerinin kısa ömürlü yorulma davranışları hakkında aşağıdaki genel değerlendirmeler yapılabilir [26]:

1. Tempcore çeliklerinin yorulma özellikleri yüksek mukavemetli betonarme çeliklerinin diğer tiplerinin yorulma özelliklerinden üstündür.
2. Yorulma özellikleri esas olarak sertleştirilmiş dış kenar tabakasının bir fonksiyonudur. Temperlenmiş martensit oluşur ve basma kalıntı gerilmeleri içerir, her ikisi de üretim prosesi esnasında gelişir.
3. Çekirdek malzemesi, tempcore çeliğin yorulma performansında önemli değildir.
4. Tempcore çeliği oldukça toktur ve yorulma kırılmasından önce önemli ölçüde plastik deformasyona maruz kalır.
5. Malzeme geometrilerinin yorulma davranışları üzerindeki etkileri Tempcore prosesi ile üretilmiş nervürlü çubuklar içinde geçerlidir.

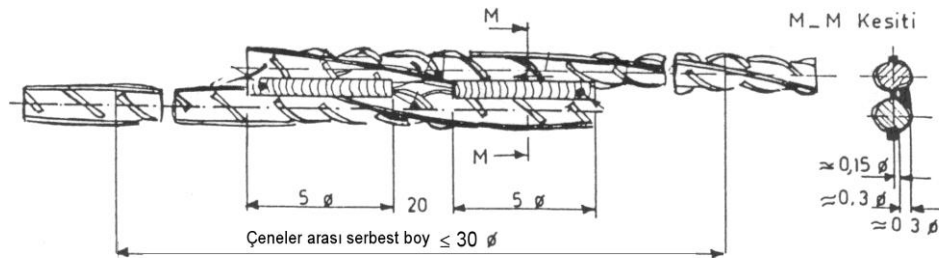
## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, sıcak haddeleme ve tempcore prosesleri ile üretilen nervürlü çelik çubuklar ile bunların kaynaklı bağlantılarının kısa ömürlü yorulma davranışları incelenmiştir. Sıcak haddeleme prosesi, haddeleme sonrası havada soğutmayla üretilen klasik çelik çubuk üretim prosesini, tempcore prosesi ise sıcak haddeleme sırasında su verilerek çelik yüzeyinde sert bir temperlenmiş martensit tabaka oluşumunun sağlandığı üretim prosesini ifade etmektedir.

### 5.1 Deney Malzemeleri

Deneysel çalışmalarda, kimyasal bileşimleri Tablo 5.1’de görülen 8 mm çapındaki nervürlü çelik çubuklar kullanılmıştır. Sıcak haddeleme ve tempcore prosesiyle üretilen çubuklar ile bunların kaynaklı bağlantıları olmak üzere toplam 4 farklı gruba ayrılan deney numuneleri, Tablo 5.1’de farklı üretim koşullarını ifade edecek sembollerle gösterilmiştir ve bundan sonra da bu kısaltmalarla ifade edilecektir.

Tempcore ve sıcak haddeleme prosesiyle üretilen nervürlü çelik çubukların kaynaklı deney numuneleri, üretim aşamasından sonra TS 708 standardında belirtilmiş olan ve Şekil 5.1’de verilen “kaynaklı çekme test numunesi” dikkate alınarak elektrik ark kaynağı yöntemiyle hazırlanmıştır [30]. Kaynak işlemi için, akım şiddeti 90 Amper, gerilim ise 584 Volt olarak çalışılmıştır. Kullanılan kaynak elektrodu 3.25 mm çapında bazik elektrottur. Çelik çubuklar tek taraflı bindirme kaynağı şeklinde birleştirilmiş olup, kaynak uzunluğu 80 mm’dir.



Şekil 5.1. TS 708 standardına göre kaynaklı çekme test numunesi [30].

Tablo 5.1. Deney numunelerinin kimyasal özellikleri.

| Numune            | Sembol | Kalite              | Kimyasal bileşim, % maks. |      |      |       |       |                       |
|-------------------|--------|---------------------|---------------------------|------|------|-------|-------|-----------------------|
|                   |        |                     | C                         | Mn   | Si   | P     | S     | Karbon Eşdeğeri (CE)* |
| Sıcak Hadde       | S      | SI 739<br>S 400     | 0.38                      | 0.89 | 0.20 | 0.016 | 0.038 | 0.52                  |
| Tempcore          | T      | UNI 6407<br>FeB 500 | 0.16                      | 1.13 | 0.13 | 0.038 | 0.054 | 0.41                  |
| Kaynaklı Sıcak    | KS     | ASTM A<br>615 Gr 60 | 0.34                      | 0.98 | 0.23 | 0.034 | 0.045 | 0.51                  |
| Kaynaklı Tempcore | KT     | UNI 6407<br>FeB 500 | 0.19                      | 0.93 | 0.13 | 0.021 | 0.039 | 0.38                  |

$$*CE = C + (Mn / 6) + [ (Cr + Mo + V) ] / 5 + [ (Ni + Cu) ] / 15$$

## 5.2 Mikroyapı Çalışmaları

Deneylerde kullanılan her bir grubu temsil eden numunelerden enine kesitler alındıktan sonra standart metalografik işlemlerle hazırlanan numuneler alümina ile parlatılıp sonra %2'lik nital ile dağlanarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

## 5.3 Sertlik Deneyleri

Deneylerde mikrosertlik ve Rockwell B sertlik yöntemleri olmak üzere iki tip sertlik ölçümü yapılmıştır. Malzemelerin mikroyapısal karakterizasyonunun bir ölçüsü olarak metalografi örnekleri üzerinde mikrosertlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca yorulma deneyi öncesi ve sonrasında yorulma deney numunesinin ölçü bölgesinden Rockwell B sertlik ölçümleri alınarak deney sırasında numunede herhangi bir sertleşme ya da yumuşama olup olmadığı tespit edilmiştir.

Mikrosertlik ölçümleri, “TUKON” mikrosertlik cihazında 200 g yük altında ve tepe açısı 136° olan elmas piramit uç (Vickers ucu) kullanılarak yapılmıştır. Rockwell B sertlik ölçümleri ise “Misawa Seiki Seisakusho” sertlik ölçme cihazında, 100 kg yük altında ve 1/16" çapında çelik bilya kullanılarak yapılmıştır.

#### **5.4 Çekme Deneyleri**

Nervürlü çelik çubukların çevrimsel gerilme deformasyon davranışlarını belirlemek için öncelikle monotonik gerilme-deformasyon davranışını tespit etmek gerektiğinden, her bir nervürlü çelik çubuk grubunu temsil eden kaynaklı nervürlü çubuklar için 90 mm kaynaklı nervürlü çubuklar için 120 mm ölçü uzunluğundaki numunelere DARTEC marka servohidrolik kontrollü deney cihazında 5 mm/dak. çene hızında çekme deneyleri yapılmıştır.

#### **5.5 Kısa Ömürlü Yorulma Deneyleri**

Kısa ömürlü yorulma deneylerinde 8 mm çapındaki kaynaklı ve kaynaklı olarak sıcak haddeleme ve tempcore prosesleriyle üretilmiş nervürlü çelik çubuklar kullanılmıştır. Numuneler aynı dökümden ve eşit sayıda üretim esnasında alınmışlardır. Kısa ömürlü yorulma deneylerinde kaynaklı durumdaki nervürlü çubuklar için çeneler arası mesafe 90 mm uzunluğunda ve bunların kaynaklı bağlantıları için 120 mm uzunluğunda olacak şekilde sırasıyla 200 mm ve 250 mm uzunluğunda kesilmiştir.

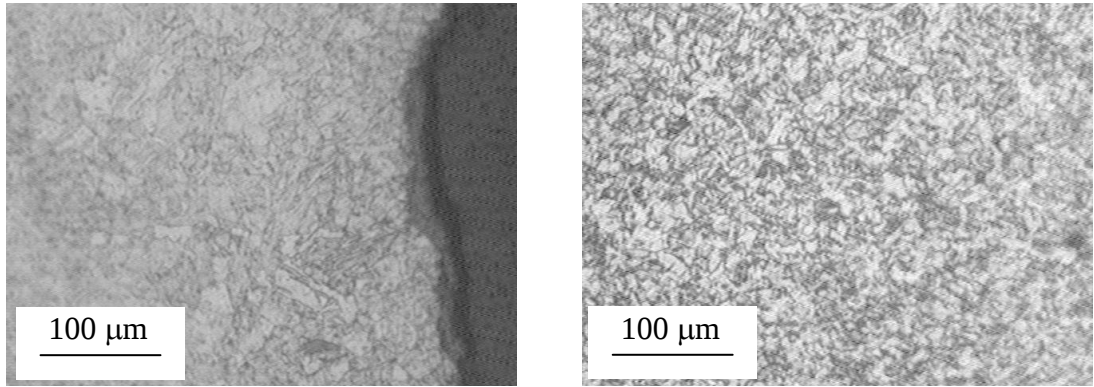
Yorulma deneyinden önce çenelerin kavraması için numuneler üzerinde herhangi bir fiziksel işlem yapılmamış olup, numuneler olağan durumlarında kısa ömürlü yorulma deneylerine tabi tutulmuştur.

Tempcore prosesi ve sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen 8 mm çapındaki kaynaklı ve kaynaklı nervürlü çelik çubukların kısa ömürlü yorulma deneyleri, servohidrolik kontrollü DARTEC RK400 model deney cihazında, oda sıcaklığında, 1 Hz. frekansta yapılmıştır. Toplam birim şekil değişimi kontrollü olarak yapılan deneylerde yükleme şekli sinüsoidaldir. Eksenel yükleme koşullarında yapılan deneylerde yükleme oranı  $R = -1$  olup, hasar kriteri olarak numunenin kırılması esas alınmıştır.

## 6. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

### 6.1 Mikroyapı Sonuçları

Deneylede kullanılan 8 mm çapındaki nervürlü çelik çubukların mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.1 - Şekil 6.4 de görülmektedir. Şekil 6.1a’da Tempcore prosesine göre üretilen nervürlü çelik çubuğun dış yüzeyinde temperlenmiş martensit mikroyapısı mevcuttur. Burada temperlenmiş martensit yapısı homojen ve ince taneli bir yapı olup, malzemenin yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olmasını sağlayan en sert bölgesidir [1]. Şekil 6.1b’de Tempcore numunesinin merkez bölgesinde tamamen ferrit - perlitten oluşan yapıya genelde ferrit mikroyapısının hakim olduğu görülmektedir. Termomekanik işlem sırasında tüm ısını dış yüzeye vererek yapıda bulunan östenitin tamamen ferrit ve perlit yapısına dönüştüğü, tane sınırlarının çok açık ve homojen bir tane oluşumunun gözleendiği bu yapı malzemenin mükemmel süneklik özelliği gösteren en yumuşak ve en geniş alana sahip olan bölgesidir [1].

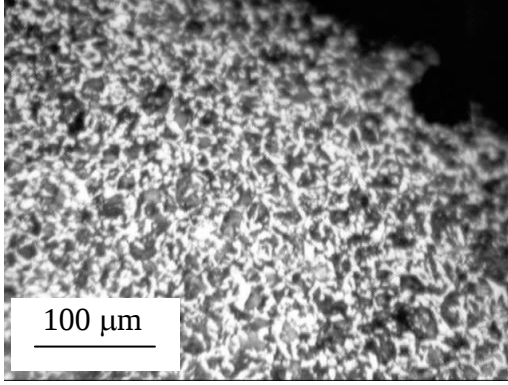


(a)

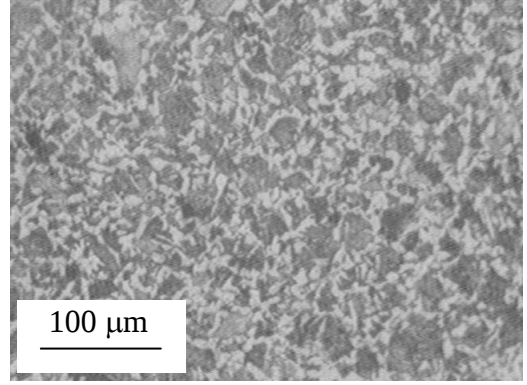
(b)

Şekil 6.1. Tempcore nervürlü çelik çubuğun farklı bölgelerindeki mikroyapı fotoğrafları a) Yüzey b) Merkez mikroyapısı.

Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuğa ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.2’de verilmekte olup, mikroyapının homojen perlit ve ferritten oluştuğu görülmektedir. Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuğun yüzeyi ve merkezi arasında mikroyapı açısından önemli bir farklılık bulunmamaktadır (Şekil 6.2 a ve b).



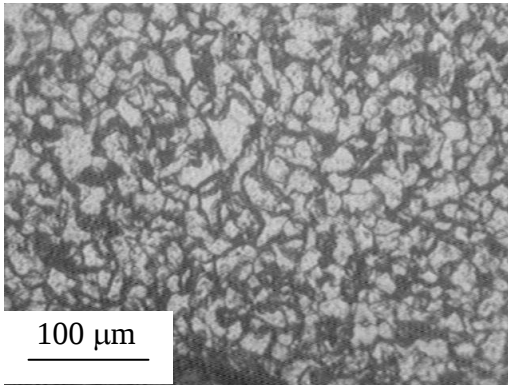
(a)



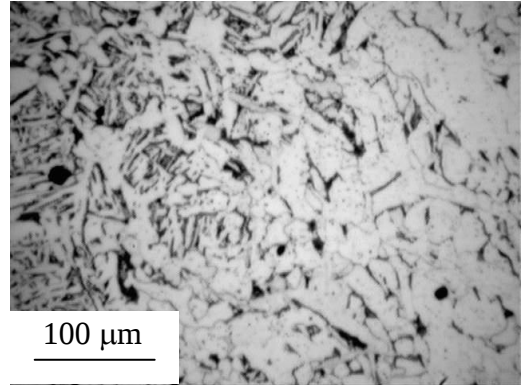
(b)

Şekil 6.2 Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuğun farklı bölgelerindeki mikroyapı fotoğrafları a) Yüzey b) Merkez mikroyapısı.

Şekil 6.3’de, tempcore prosesine göre üretilmiş nervürlü çelik çubukların kaynaklı bağlantısına ait mikroyapı fotoğrafları verilmektedir. Burada kaynağın neden olduğu aşırı ısı etkisi, ısıya karşı oldukça duyarlı olan martensit yapısını yok ederek malzemenin mikroyapısı üzerinde oldukça önemli değişiklikler meydana getirmiştir (Şekil 6.3a). Martensit yapısının yer almadığı yeni mikroyapı ısı tesiri altındaki bölgede ince taneli perlit ve ferrit ile kaynak metalinde ferritik yapıdan oluşmaktadır (Şekil 6.3b).



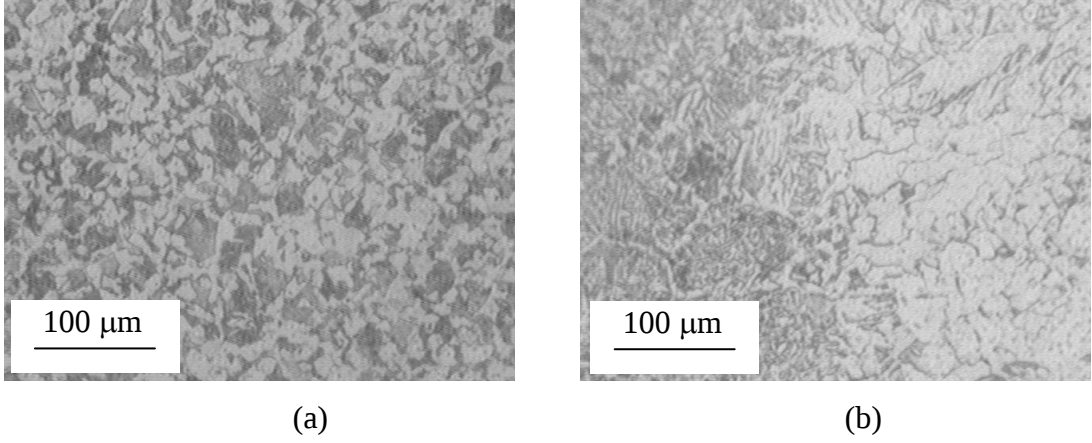
(a)



(b)

Şekil 6.3. Tempcore prosesiyle üretilmiş nervürlü çelik çubukların kaynaklı bağlantılarına ait farklı bölgelerin mikroyapı fotoğrafları a) Yüzey b) Ana metal – kaynak arayüzeyi.

Şekil 6.4’de ise sıcak haddelenmiş nervürlü çubuğun kaynaklı bağlantısının mikroyapısı görülmektedir. Buradaki yapıda kaynaktan dolayı herhangi bir değişim söz konusu değildir ve yapı kaynaksız durumdaki mikroyapıyla aynı özelliklere sahiptir.

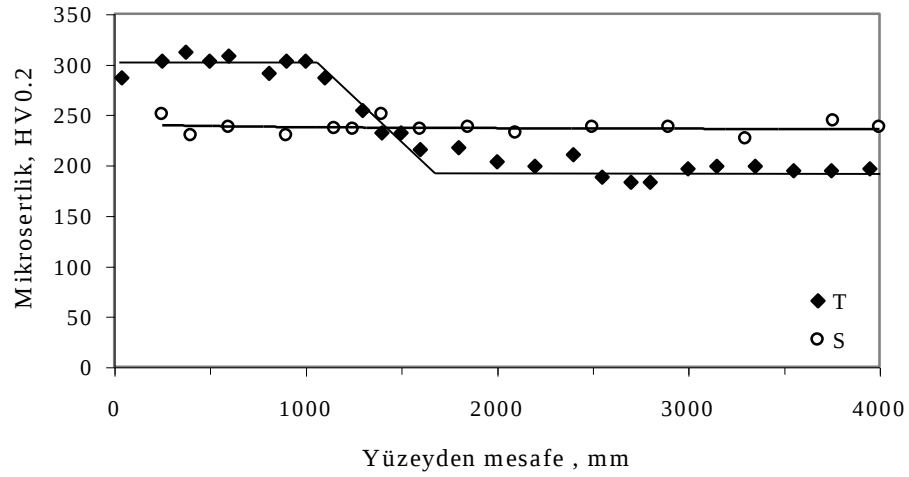


Şekil 6.4. Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların kaynaklı bağlantılarına ait farklı bölgelerin mikroyapı fotoğrafları a) Yüzey b) Ana metal-kaynak ara yüzeyi.

## 6.2. Mikrosertlik Deney Sonuçları

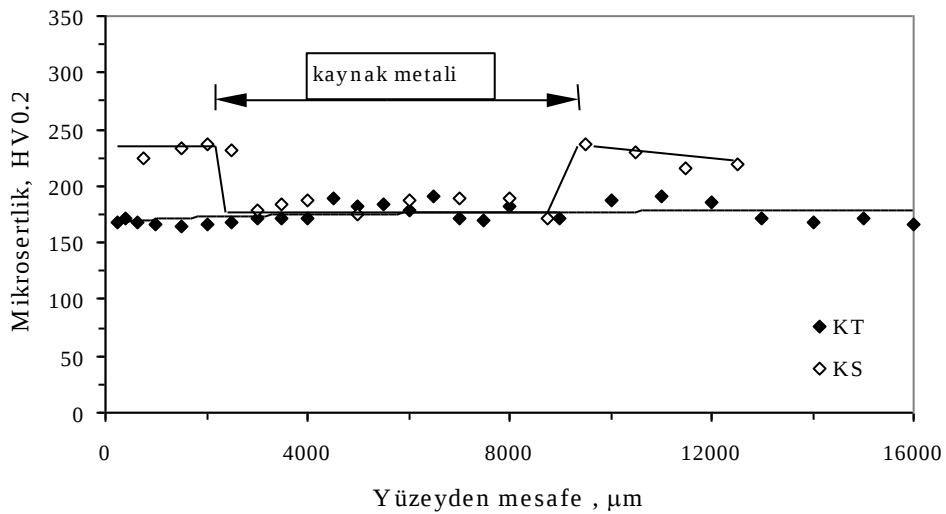
Standart parlatma işlemleriyle hazırlanan 8 mm çapındaki nervürlü çelik çubuklardan 200 g yük altında ve Vickers ucu ile alınan mikrosertlik sonuçları Şekil 6.5 ile Şekil 6.6’da verilmiştir.

Tempcore ve sıcak haddeleme prosesiyle üretilen nervürlü çelik çubukların mikrosertlik profili Şekil 6.5’de görülmektedir. Tempcore prosesi ile üretilen nervürlü çelik çubukta en dış yüzeyden merkeze kadar yapılan sertlik taramasında, mikrosertlik değerlerinin yüzeyden merkeze doğru azaldığı belirlenmiştir. Yüksek sertlik değerleri, çeliğin yüzey ve yüzeye yakın kısımlarındaki temperlenmiş martensit bölgesine, nispeten düşük sertlik değerleri ise çeliğin merkeze yakın kısımlarındaki ferrit-perlit yapısının bulunduğu bölgelere karşılık gelmektedir. Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukta ise mikrosertlik ölçüm sonuçları ferrit-perlit yapısının homojen dağılımına uygun olarak dış yüzeyden merkeze kadar hemen hemen aynı değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5 Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çubuğa ait mikrosertlik sonuçları.

Tempcore ve sıcak haddeleme prosesiyle üretilen nervürlü çelik çubukların kaynaklı bağlantısından alınan enine kesit üzerinde uçtan uca yapılan mikrosertlik taraması Şekil 6.6'da görülmektedir. Özellikle tempcore prosesi ile üretilen nervürlü çelik çubukta kaynak etkisi ile mikroyapıda meydana gelen değişiklikler sonucunda mikrosertlik grafiğinde kaynaksız duruma göre önemli farklılıklar Şekil 6.3'te görüldüğü gibi oluşmuştur. Kaynaklı tempcore nervürlü çelik çubuğundan alınan mikrosertlik ölçümleri sonunda martensitin yapıdan tamamen yok olmasından dolayı mikrosertlik değerlerinin önceki duruma nazaran oldukça düşük değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6 Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların kaynak bölgesine ait mikrosertlik ölçüm sonuçları.

Ayrıca kaynaklı durumda iken yüzeye yakın bölgelerde sıcak haddelenmiş malzemeden daha yüksek olan mikrosertlik ölçümleri de kaynaklı durumda iken tam tersi bir durum ortaya çıkmıştır. Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların kaynaklı bağlantısında enine kesit üzerinde numuneye bir uçtan öteki uca kadar yapılan mikrosertlik test sonuçlarında yapıdaki homojen perlit ve ferrit dağılımından dolayı mikrosertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Kaynak bölgesinde kaynaklı çubuğa nazaran daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.

### 6.3 Çekme Deneyi Sonuçları

Nervürlü çelik çubukların monotonik gerilme - deformasyon davranışını belirlemek amacıyla yapılan çekme deneylerinin sonuçları da Tablo 6.1’de verilmiştir. Tempcore prosesi ile üretilen nervürlü çelik çubuklar sıcak haddeleme prosesi ile üretilenlere nazaran daha yüksek akma dayanımına sahiptir. Gerek kaynaklı gerekse kaynaklı durumda sıcak haddeleme prosesi ile üretilen nervürlü çelik çubuklar daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Kaynaklı nervürlü çelik çubuklarla yapılan çekme deneylerinde numuneler kaynak bölgesi dışından kopmuştur.

Tablo 6.1. Çekme deneyi sonuçları.

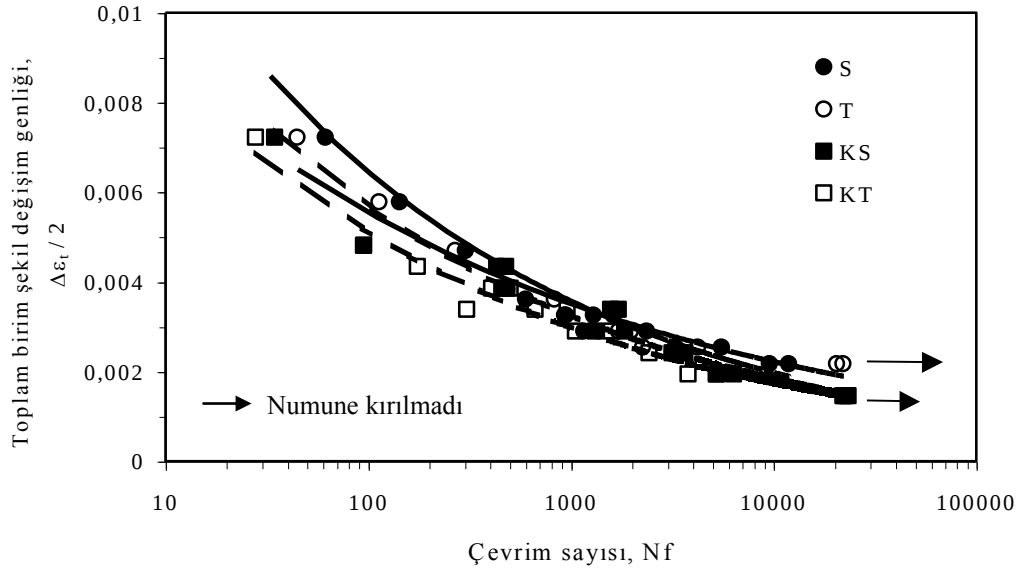
| Numune Türü         | Anma Çapı (mm) | Çap (mm) | L <sub>0</sub> (mm) | Akma Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> ) | Çekme Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> ) | Kopma Uzunluğu, % |
|---------------------|----------------|----------|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| Sıcak Had.          | 8              | 7.89     | 40                  | 488                                  | 731                                   | 19.9              |
| Tempcore            | 8              | 7.92     | 40                  | 574                                  | 639                                   | 16.6              |
| Kaynaklı Sıcak Had. | 8              | 7.85     | --                  | --                                   | 659                                   | —                 |
| Kaynaklı Tempcore   | 8              | 7.80     | --                  | --                                   | 631                                   | —                 |

### 6.4 Kısa Ömürlü Yorulma Deney Sonuçları

Tempcore ve sıcak haddelenmiş numunelere ( $\Delta\epsilon_t/2 = \%0.21 - \%1.08$ ) arasında, bunların kaynaklı numunelerine ise ( $\Delta\epsilon_t/2 = \%0.14 - \%0.72$ ) arasında farklı birim şekil değişimi genliklerinde ( $\Delta\epsilon_t/2$ ), her bir farklı birim şekil değişimi genliğinde 2 adet numune kullanılarak uygulanmış olan çevrimsel yüklemeler, numuneler

tamamen kırılana kadar sürdürülmüş ancak  $2 \times 10^4$  çevrime ( $N_f = 20000$ ) kadar kırılmayan numuneler için bu çevrim sayısında deney durdurulmuştur.

İncelenen tempcore ve sıcak haddeleme yöntemleriyle üretilen kaynaklı ve kaynaklı olmayan nervürlü çelik çubukların kısa ömürlü yorulma deneyi sonuçları “Birim şekil değişim genliği ( $\Delta \epsilon_t / 2$ ), - Kırılmaya kadar çevrim sayısı ( $N_f$ )” eğrileri olarak Şekil 6.7’de toplu olarak verilmiştir. Numunelere uygulanan birim şekil değişim genliği, nervürlü çelik çubukların uğradığı elastik ve plastik birim şekil değişimlerini kapsamaktadır. Artan toplam birim değişim genliği ( $\Delta \epsilon_t / 2$ ) ile çevrim sayısı ( $N_f$ ) azalmaktadır.



Şekil 6.7 Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuklarla bunların kaynaklı bağlantılarının birim şekil değişim genliği – çevrim sayısı.

#### 6.4.1 Kaynaklı Nervürlü Çubukların Yorulma Davranışları

Tempcore ve sıcak haddeleme prosesiyle üretilen kaynaklı ve kaynaklı olmayan nervürlü çelik çubukların kısa ömürlü yorulma davranışları Şekil 6.8’de kıyaslanmaktadır.

Şekil 6.8’de gösterilmekte olan sıcak haddelenmiş ve tempcore numunelerine ait kısa ömürlü yorulma eğrileri arasında;

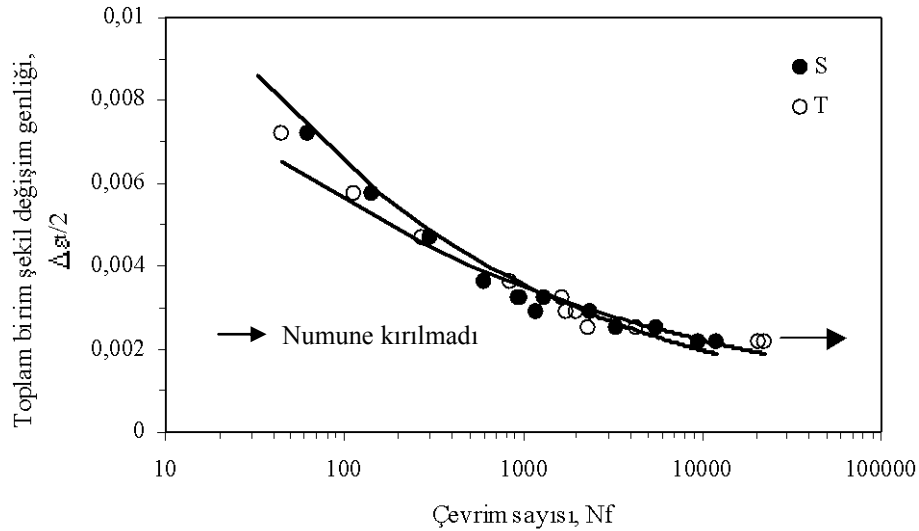
$$\text{Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuk için: } \frac{\Delta \epsilon}{2} = 0.02 N_f^{-0.26} \quad (6.1)$$

$$\text{Tempcore nervürlü çelik çubuk için: } \frac{\Delta \epsilon}{2} = 0.014 N_f^{-0.2} \quad (6.2)$$

Şeklinde ampirik bir ilişki mevcuttur. Denklem 6.1 ve 6.2 birbirine eşitlendiğinde, kritik çevrim sayısı  $N_{fc} = 1351$  olarak bulunur ki bu değer, kritik birim şekil değişim genliği olarak ( $\Delta\epsilon_t/2$ ) olarak % 0.33 değerine karşı olarak gelir.

Buna göre, % 0.33 ten daha büyük birim şekil değişimi genliğinde ( $\Delta\epsilon_t/2 > \Delta\epsilon_{tc}/2$ ), sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuğun daha uzun, % 0.33'den daha küçük birim şekil değişimi genliğinde ise tempcore nervürlü çelik çubuğun daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğu söylenebilir.

Elde edilen yorulma verilerinden ve Şekil 6.8'den görüldüğü gibi ( $\Delta\epsilon_t/2 = \%0.22$ ) gibi en küçük birim şekil değişim genliğinde, sıcak numune 11952 çevrimde kırılmasına rağmen Tempcore numunesi aynı birim şekil değişim genliğinde 22128 çevrim sayısına kadar kırılmadan ulaşmıştır ve numune kırılmadan deney sonuçlandırılmıştır. En yüksek birim şekil genliği olarak uygulanan ( $\Delta\epsilon_t/2 = \%0.72$ ) gibi yüksek birim şekil değişim genliğinde ise tempcore numunesi 42 çevrimde kırılırken sıcak haddelenmiş numunenin 60 çevrimde kırılmıştır.



Şekil 6.8 Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların birim şekil değişim genliği – çevrim sayısı eğrileri.

#### 6.4.2 Kaynaklı Nervürlü Çubukların Yorulma Davranışları

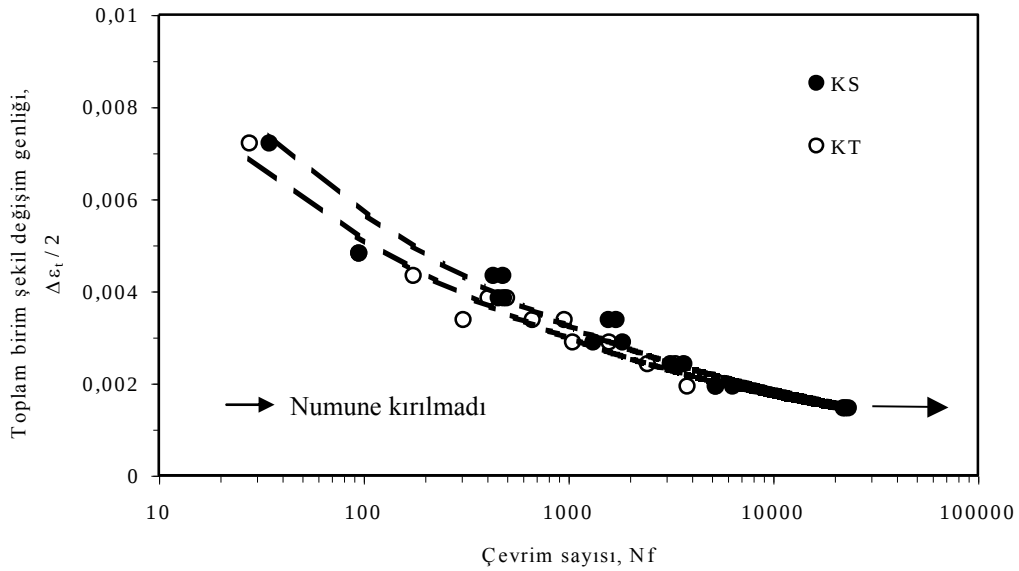
Şekil 6.9’da gösterilmekte olan kaynaklı tempcore ve kaynaklı sıcak numunelerine ait kısa ömürlü yorulma eğrileri arasında da ampirik bir ilişki mevcuttur. Denklemler birbirine eşitlenerek, bu iki eğrinin kesişme noktaları bulunup;

$$\text{Kaynaklı Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuk için, } \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.017 N_f^{-0.25} \quad (6.3)$$

$$\text{Kaynaklı Tempcore nervürlü çelik çubuk için, } \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.015 N_f^{-0.23} \quad (6.4)$$

şeklindeki ampirik bağıntılar denklem 6.3 ve denklem 6.4’te birbirine eşitlendiğinde kritik çevrim sayısı ( $N_{fc}$ )  $2.3 \times 10^6$  olarak bulunur ki bu değer kritik toplam birim şekil değişim genliği olarak ( $\Delta \varepsilon_t / 2 = \% 4.84 \times 10^{-2}$ ) değerine karşı olarak gelir.

Buna göre,  $\% 4.84 \times 10^{-2}$ ’den daha büyük toplam birim şekil değişimi genliğinde, sıcak haddelenmiş kaynaklı nervürlü çelik çubuk daha üstün yorulma ömrüne,  $\% 4.84 \times 10^{-2}$ ’den daha küçük birim şekil değişimi genliğinde ise kaynaklı tempcore nervürlü çelik çubuk daha üstün yorulma ömrüne sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 6.9 Kaynaklı sıcak haddelenmiş ve kaynaklı tempcore numunelerine ait birim şekil değişim genliği – çevrim sayısı eğrileri.

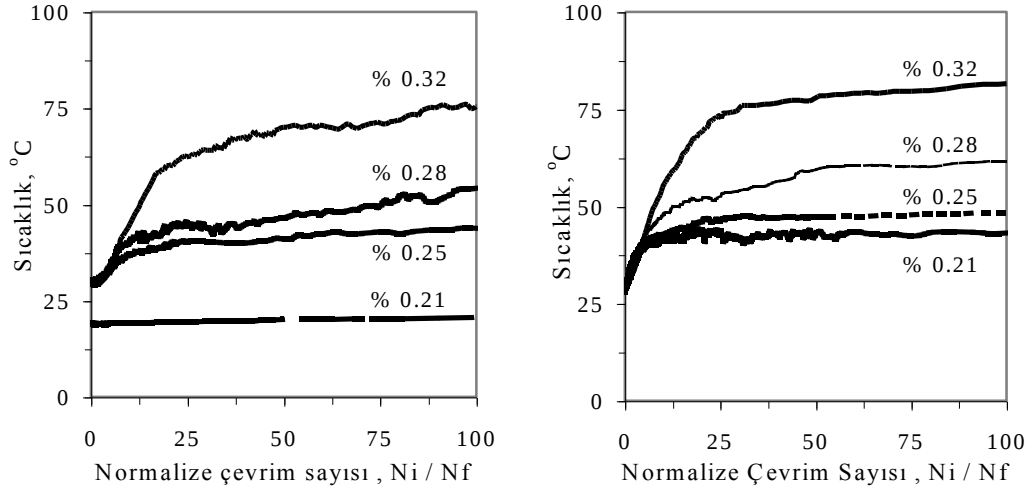
Kaynaklı ve kaynaklı numunelerde yapılan yorulma deneylerinde 8 mm çapındaki nervürlü elik çubukların kısa ömürlü yorulma davranışları üzerinde kaynağın önemli etkileri bulunduğu görölmüştür. Kaynaklı durumda iken düşük birim şekil değışimlerinde kısa ömürlü yorulma özellikleri sıcak haddelenmeyle üretilen nervürlü elik çubuklara göre oldukça üstün görünen Tempcore nervürlü çubukların kaynak sonrasında bu özelliğini yitirdiği ve sıcak haddelenmiş nervürlü çubuklarla düşük birim şekil değışim genliklerinde aynı ancak daha yüksek birim şekil değışim genliklerinde daha düşük yorulma ömrüne sahip olduğu tespit edilmektedir.

Kaynaklı ubukların kısa ömürlü yorulma davranışlarındaki belirgin değışiklikler, kaynaklı numuneler üzerinde yapılan mikroyapı çalışmaları, sertlik ölçümleriyle de desteklenmektedir. Tempcore prosesiyle üretilmiş ve kaynak yapılmış nervürlü elik çubukların optik mikroskop incelemeleri daha önceden yapıda bulunan martensit tabakasının kaynak etkisi ile yok olduğunu ortaya çıkarmıştır (Şekil 6.3a). Buna bağılı olarak yapılan mikrosertlik ve sertlik ölçümlerinde de kaynaklı durumdaki Tempcore numunesinin mikrosertlik değeri de aşırı bir değeri kaybı gözlenmiştir (Şekil 6.5).

#### 6.4.3 Yorulma Deneyleri Sırasında Sıcaklık Değışimi

Şekil 6.10a ve b’de tempcore ve sıcak haddelenme prosesiyle üretilen kaynaklı numunelerin kısa ömürlü yorulma deneyleri sırasında çevrim sayısına bağılı olarak malzemede meydana gelen sıcaklık artışları verilmiştir. Şekil 6.10.a ve b’de yatay eksen de görölen normalize çevrim sayısı ( $N_i / N_f$ ), sıcaklık ölçümü yapılan çevrim sayısının ( $N_i$ ), numunenin kırıldığı çevrim sayısına ( $N_f$ ) oranıdır.

Yüksek birim şekil değışim genliklerine doğru çıkıldıkça numunenin yüzeyinde aşırı ısınmaların meydana geldiği ölçölen sıcaklık değeriyle tespit edilmiştir. Tempcore numunelerine nazaran sıcak haddelenmiş numunelerde sıcaklık daha fazla artmıştır. % 1.08 gibi yüksek birim şekil değışim genliğinde sıcak haddelenmiş numune 81.5 °C’ye tempcore numunesi ise 75.4 °C’ye ısınmıştır. % 0.32 gibi düşük birim şekil değışim genliğinde tempcore numunesi oda sıcaklığı seviyesi olan 20.6 °C iken sıcak haddelenmiş numune 43.2 °C’ye kadar ısınmıştır.



Şekil 6.10 Kaynaksız (a) Tempcore ve (b) Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların çevrim sayısı sıcaklık değişimi.

#### 6.4.4 Yorulma Sırasında Gerilme Değişimi

Mikroyapı ve uygulanan çevrimsel birim şekil değişimi genliğine bağlı olarak değişen çevrimsel yüklemeler çevrimsel sertleşme veya yumuşama ile sonuçlanır. Bütün malzemelerin yorulma çevrim sayısı – gerilme arasında çizilen eğrilerde başlangıçta gerilmede hızlı bir düşme ve bunu takiben kararlı hal gerilmesi olarak adlandırılan yavaşça bir azalma ile karakterize edilebilir [21].

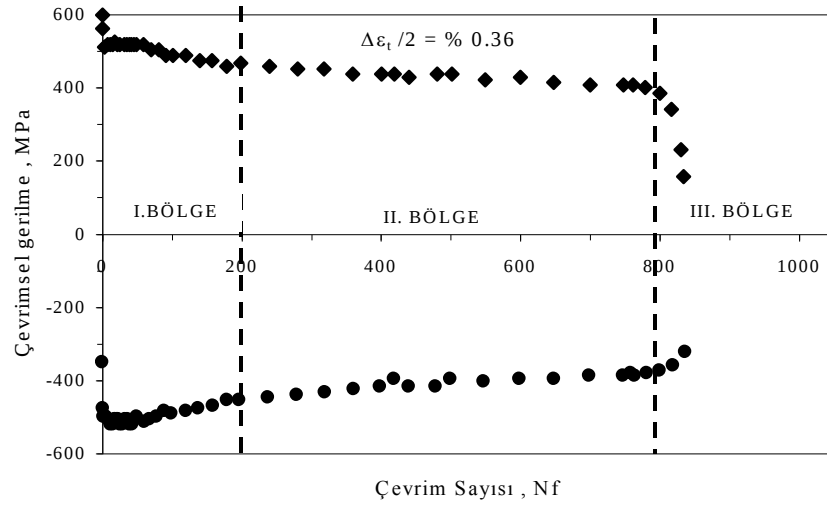
Gerilme – çevrim sayısı grafikleri malzemelerin çevrimsel deformasyon altındaki tepkisini gösteren önemli eğrilerden biridir [29]. Çevrimsel gerilmeler ile çevrim sayısı arasında çizilen diyagramlar üç farklı bölge halinde incelenebilir:

I BÖLGE: Deneyin başlangıçında gerilmedeki hızlı düşme şeklinde kendini gösteren çevrimsel yumuşama bölgesi,

II. BÖLGE: Belirli bir çevrim sayısı aralığında gerilmenin sabit kaldığı bölge ve

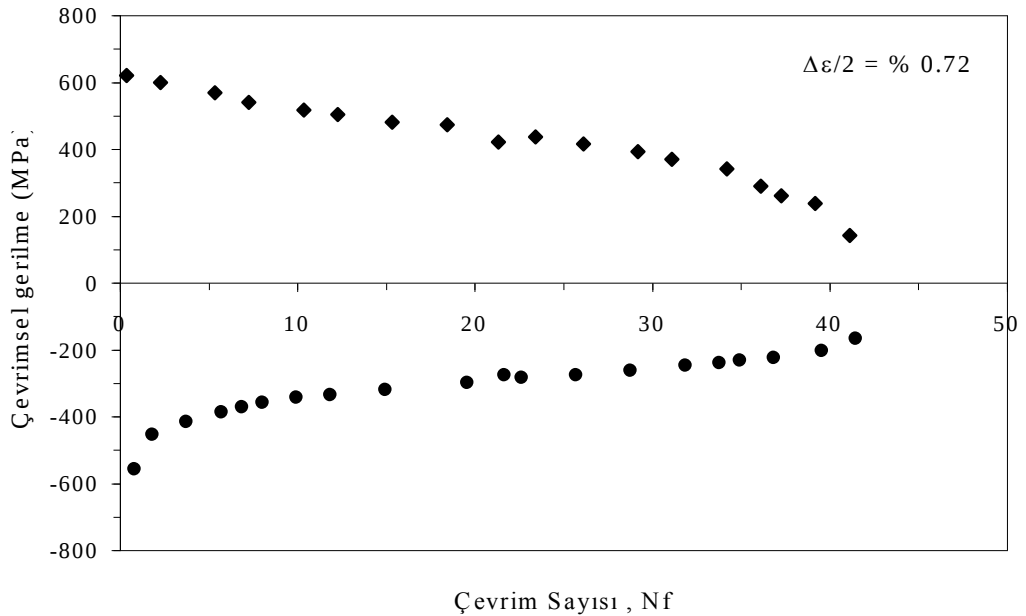
III BÖLGE: Kırılmanın yaklaştığı ve gerilmenin hızla düştüğü bölge: Bu aşamada hasar meydana gelir.

Şekil 6.11’de % 0.36 gibi düşük birim şekil değişim genliği için tempcore numunelerine ait gerilme – çevrim sayısı eğrileri verilmiştir. Gerilme başlangıçta belirgin bir şekilde azalmaktadır. Yaklaşık 200 çevrimden sonra gerilme kararlı hale ulaşmaktadır. Yaklaşık 800 çevrimden sonra ise gerilmede hızlı bir düşme olmaktadır.



Şekil 6.11  $\Delta\epsilon_t/2 = \%0.36$  birim şekil değişimi için tempcore numunesine ait çevrimsel gerilme – çevrim sayısı.

Şekil 6.12’de ise % 0.72 birim şekil değişimi için tempcore numunesinin gerilme değerinde sürekli bir azama olduğu ve azalmanın numune kırılana kadar devam ettiği dolayısıyla kararlı hale ulaşamadığı görülmektedir. Şekil 6.12 malzemede meydana gelen çevrimsel yumuşamayı çok açık bir şekilde göstermektedir.



Şekil 6.12  $\Delta\epsilon/2 = \% 0.72$  birim şekil değişimi için tempcore numunesine ait çevrimsel gerilme – çevrim sayısı değişimi.

#### 6.4.5 Kısa Ömürlü Yorulma Analizi

Kısa ömürlü yorulma deney sonuçlarını değerlendirmek için Eşitlik 4.6'da verilen elastik, plastik ve toplam birim şekil değişimi genlikleri ile çevrim sayısı arasındaki ilişkileri yansıtan bağıntı kullanılmıştır. Ayrıca bu bağıntıyla kısa ömürlü yorulma davranışını tanımlayan yorulma sabit ve katsayıları hesaplanmıştır.

Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuklara ve bunların kaynaklı bağlantılarına ait toplam birim şekil değişimi değerleri her birim şekil değişim genliğinde yapılan iki deneyin sonuçlarının Eşitlik 4.6'da verilen bağıntı ile değerlendirilmesi sonucunda toplam, elastik, plastik birim şekil değişim genlikleri hesaplanmıştır.

Bu eğrilerin elde edilmesinde kullanılan gerilme değeri, malzemenin toplam ömrünün yarısına karşılık gelen çevrim sayısındaki toplam çevrimsel gerilme genliği değeridir ve “yarı ömür yaklaşımı” olarak bilinir [19]. Ancak bu gerilme değerinin seçilerek hesaplamalarda kullanılabilmesi için, numunenin, çevrim sayısı-çevrimsel gerilme eğrisinde, çevrim sayısına bağlı olarak gerilmenin sabit kaldığı çevrimsel kararlılık durumunun (Şekil 6.11) oluşması gerekir.

Gerilmenin çevrim sayısına bağlı olarak sürekli düştüğü ya da arttığı eğriler için yarı ömür yaklaşımı kullanılmaz. Çünkü, çevrimsel kararlılık göstermeyen malzemelerde kararlı hale ulaşamadığından, yarı ömürdeki kararlı hal gerilmelerinin kullanılmasının fiziksel bir dayanağı yoktur [19]. Bu nedenle kaynaksız nervürlü çubukların kısa ömürlü yorulma deneylerinden elde edilen gerilme – çevrim sayısı eğrilerinde çevrimsel kararlılık göstermeyen numuneler için (Şekil 6.12) kararlı hal gerilmeleri bulunmadığından, bu numuneler, elastik, plastik ve toplam birim şekil değişim genliği hesaplamalarında kullanılmamıştır.

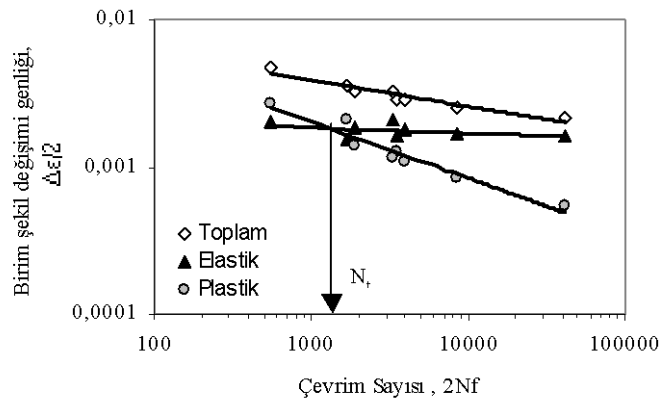
Kısa ömürlü yorulma deneylerinde düşük çevrim sayılarında plastik birim şekil değişim genliğinin, elastik birim şekil değişim genliğine kıyasla malzemenin toplam birim şekil değişimi üzerinde daha etkili olduğu, yüksek çevrim sayılarında ise elastik birim şekil değişim genliğinin toplam birim şekil değişim genliği üzerinde daha etkili olduğu bilinmektedir.

Kaynaklı ve kaynaksız tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuklar için kararlı hal gerilmesi dikkate alınarak hesaplanan elastik, plastik ve toplam birim şekil değişim genlikleri ile kırılmaya kadar ki çevrim sayısı ( $2N_f$ ) arasındaki eğriler

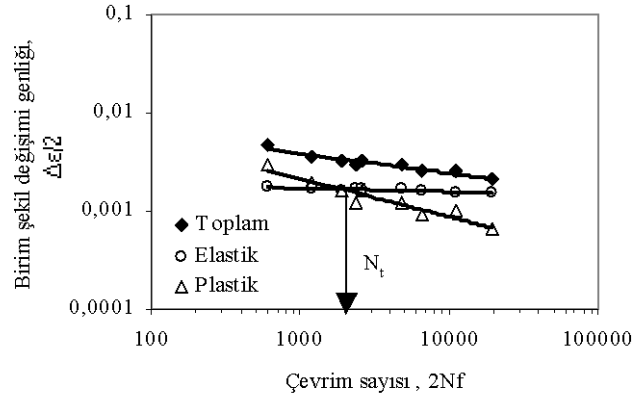
Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’de görülmektedir. Bu eğrilerde yatay eksen de görülen çevrim sayısı ( $2N_f$ ), malzemede bir çevrimde meydana gelen ters yönlü çekme ve basma yüklemelerinin sayısıdır.

Malzemelerin kısa ömürlü yorulma davranışlarını yorumlamada yararlanılan yaklaşımlardan birisi de yorulma geçiş ömrüdür ( $N_t$ ). Yorulma geçiş ömrü, elastik ve plastik birim şekil değişim eğrilerinin birbirini kestiği noktadır. Malzemede aynı birim şekil değişim genliklerinde meydana gelen elastik ve plastik birim şekil değişimi bu noktada birbirine eşittir. ( $\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_e$ ) Bu yaklaşıma göre daha büyük  $N_t$  değerine sahip malzeme yorulma ömrünü plastik deformasyon bölgesinde harcar. Daha küçük  $N_t$  değerine sahip olan malzeme ise yorulma ömrünü elastik deformasyon bölgesinde geçirir[19].

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’de, sıcak haddelene ve tempcore prosesiyle üretilen nervürlü çelik çubuklara ait toplam, elastik ve plastik birim şekil değişimlerinin kırılmaya kadar ki çevrim sayısı ( $2N_f$ ) ile ilişkisi görülmektedir. Bu iki grafiğin karşılaştırılmasında yorulma geçiş ömrü ( $N_t$ ) yaklaşımı kullanılmıştır. Buna göre tempcore nervürlü çelik çubukların  $N_t$  değeri 828 iken sıcak malzemenin  $N_t$  değeri 951’dir. Dolayısıyla sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların  $N_t$  değeri daha büyük olduğundan yorulma ömrünün büyük kısmını plastik deformasyon bölgesinde geçirmiştir. Aynı birim şekil değişim genlikleri için tempcore nervürlü çelik çubukları ise yorulma ömrünün büyük kısmını elastik deformasyon bölgesinde geçirmektedir.

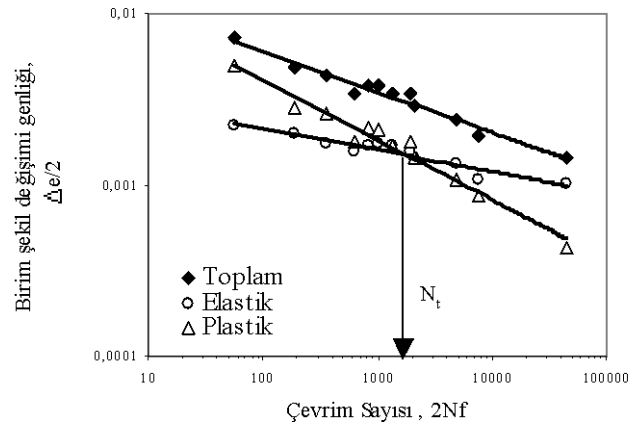


Şekil 6.13 Tempcore numunelerine ait birim şekil değişim bileşenlerinin – kırılmaya kadar çevrim sayısı ( $2N_f$ ) değişimi.

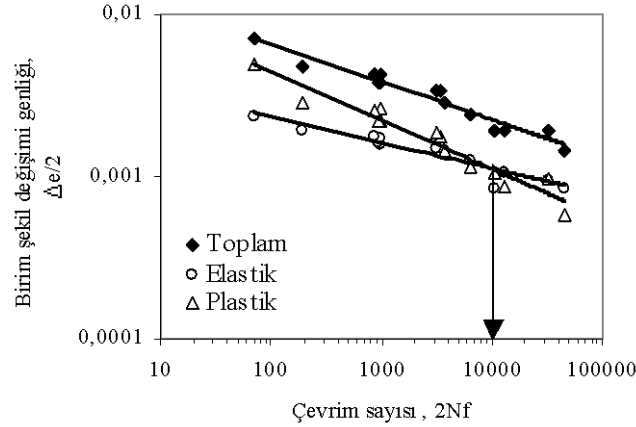


Şekil 6.14 Sıcak haddelenmiş numunelere ait birim şekil değişim bileşenlerinin – kırılmaya kadar çevrim sayısı (2Nf) ile değişimi.

Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’de ise kaynaklı sıcak ve kaynaklı tempcore malzemelere ait toplam, elastik ve plastik birim şekil değişimlerinin kırılmaya kadar ki çevrim sayısı ile ilişkisi görülmektedir. Kaynaklı durumda tempcore malzemesinin  $N_t$  değeri 968 iken sıcak malzemenin  $N_t$  değeri ~5000’dir. Dolayısıyla sıcak malzemenin  $N_t$  değeri daha büyük olduğundan yorulma ömrünün büyük kısmını plastik deformasyon bölgesinde geçirmiştir. Aynı birim şekil değişim genlikleri için tempcore malzeme ise yorulma ömrünün büyük kısmını elastik deformasyon bölgesinde geçirmektedir.



Şekil 6.15 Kaynaklı Tempcore numunelere ait birim şekil değişim bileşenleri – kırılmaya kadar tersinir çevrim sayısı (2Nf) değişimi.



Şekil 6.16 Kaynaklı sıcak numunelere ait birim şekil değişim bileşenleri – kırılmaya kadar tersinir çevrim sayısı ( $2N_f$ ) değişimi.

Nitekim Şekil 6.10a ve b’de verilen çevrim sayısı - sıcaklık değişimi eğrisinde sıcak malzemenin kısa ömürlü yorulma deneylerinde daha fazla ısındığı görülmüştür. Hatta en düşük birim şekil değişim genliğinde Tempcore nervürlü çelik çubuk hiç bir ısınma belirtisi göstermezken sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların  $43.2^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar çıkması malzemede meydana gelen plastik birim şekil değişiminin bir göstergesidir.

M. L. Roessle ve Fatemi [31] farklı malzemelerle yaptıkları kapsamlı bir yorulma çalışmasında malzemelerin sertliği, çekme dayanımı, yorulma dayanım sınırı ve yorulma mukavemet üssü ile ( $N_t$ ) yorulma geçiş ömrü arasında ampirik bağıntılar türetmişlerdir. Bu bağıntılara göre malzemenin sertliği arttıkça yorulma geçiş ömrü  $N_t$  azalmaktadır. Ayrıca sertlik ve yorulma mukavemeti arasında doğrusal bir ilişki belirlemişlerdir. Buna göre yorulma mukavemeti artan sertlikle ve azalan yorulma geçiş ömrü ( $N_t$ ) ile artmaktadır.

Tablo 6.2’de tempcore ve sıcak haddeleme prosesiyle üretilmiş olan nervürlü çubuklara ait kaynaklı ve kaynaklı  $N_t$  değerleri görülmektedir. Kaynak her iki prosesle üretilen nervürlü çubuğunda  $N_t$  değerini artırmıştır.

Tablo 6.2 Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların kaynaklı ve kaynaklı durumdaki yorulma geçiş ömürleri ( $N_t$ ) değerleri.

|       | Tempcore |          | Sıcak haddelenmiş |          |
|-------|----------|----------|-------------------|----------|
|       | Kaynaklı | Kaynaklı | Kaynaklı          | Kaynaklı |
| $N_t$ | 828      | 968      | 951               | 5000     |

Malzemeler ait yorulma üs ve katsayılarının belirlenmesi de toplam birim şekil değişimi ve bileşenleri ile kırılmaya kadarki tersinir çevrim sayısı arasında çizilen eğrilerden elde edilir. Eşitlik 4.6’da belirtilen şekilde hesaplanan çeşitli yorulma sabit ve katsayıları Tablo 6.3’de verilmiştir [23].

Tablo 6.3 Coffin – Manson eşitliğinden hesaplanan kaynaklı ve kaynaklız nervürlü çelik çubuklara ait olan yorulma sabit ve katsayıları.

| Numune | Elastik bileşen |             | Plastik bileşen |               | n'<br>n' = b/c | K' = $\sigma_f' (\epsilon_f')^{n'}$ |
|--------|-----------------|-------------|-----------------|---------------|----------------|-------------------------------------|
|        | b               | $\sigma_f'$ | c               | $\epsilon_f'$ |                |                                     |
| T      | -0,04           | 504         | -0,382          | 0,028         | 0,09           | 704                                 |
| S      | -0,04           | 483         | -0,389          | 0,032         | 0,10           | 688                                 |
| KT     | -0,13           | 798         | -0,349          | 0,020         | 0,36           | 3215                                |
| KS     | -0,16           | 1008        | -0,314          | 0,019         | 0,42           | 4567                                |

Tablo 6.3’de belirtilen değerler Eşitlik 4.6’da yerine konularak kaynaklı ve kaynaklız tempcore nervürlü çelik çubuklarına ait yorulma denklemleri bulunmuştur. Buna göre,

Tempcore prosesiyle üretilen nervürlü çubuklar

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 0.0024 (N_f)^{-0.035} + 0.0281 (N_f)^{-0.38} \quad (6.5)$$

Sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen nervürlü çubuklar,

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 0.0023 (N_f)^{-0.04} + 0.0315 (N_f)^{-0.38} \quad (6.6)$$

Tempcore prosesiyle üretilen kaynaklı nervürlü çubuklar

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 0.0031 (N_f)^{-0.109} + 0.0174 (N_f)^{-0.37} \quad (6.7)$$

Sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen kaynaklı nervürlü çubuklar

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 0.0038 (N_f)^{-0.125} + 0.0204 (N_f)^{-0.35} \quad (6.8)$$

kısa ömürlü yorulma denklemleri elde edilmiştir.

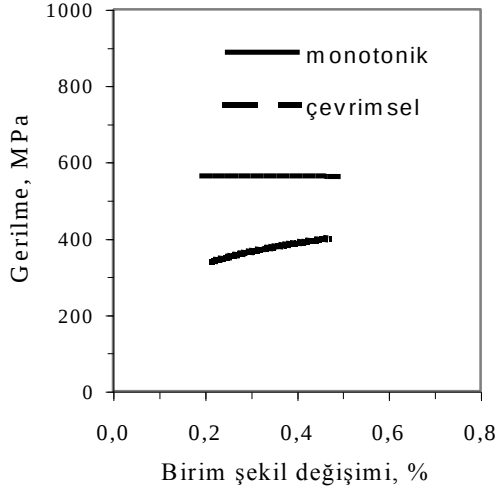
#### 6.4.6 Çevrimsel ve Monotonik Gerilme – Birim Şekil Değişim Eğrilerinin Karşılaştırılması

Çevrimsel gerilme birim şekil değişimi eğrisinin belirlenmesi ve çevrimsel yükleme altında sertleşme veya yumuşama tepkisinin monotonik gerilme birim şekil değişimi eğrisiyle karşılaştırılması yorulma analizini tamamlamak için olmazsa olmaz bir şarttır ve mutlaka yapılmalıdır [23]. Kısa ömürlü yorulma deneylerinden elde edilen ve malzemenin çevrimsel davranışını belirleyen yorulma sabit ve katsayıları malzemenin çevrimsel gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin çıkarılmasında da kullanılmıştır. Elde edilen çevrimsel gerilme – birim şekil değişim eğrisinin monotonik gerilme – birim şekil değişimi ile karşılaştırılarak malzemenin çevrimsel deformasyon altındaki davranışını belirlenmesi için Eşitlik (6.9) ile belirtilen Ramberg – Osgood bağıntısı kullanılmıştır [21].

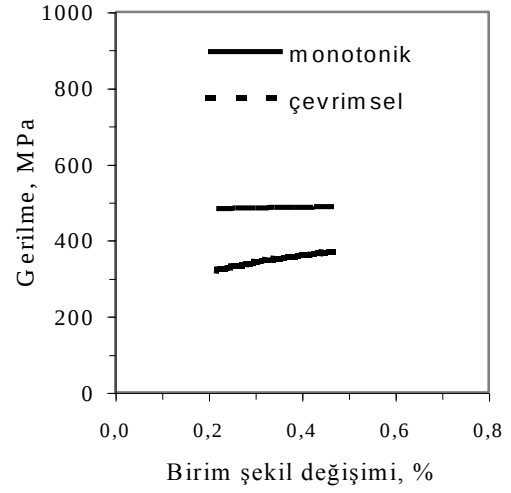
$$\frac{\Delta \sigma}{2} = \frac{\Delta \sigma_0}{2} + K (\varepsilon_{pl})^n \quad (6.9)$$

Burada  $\Delta \sigma$ , kararlı haldeki gerilme genliği,  $\Delta \sigma_0$ , %0.2'ye karşılık gelen çevrimsel akma dayanımıdır.

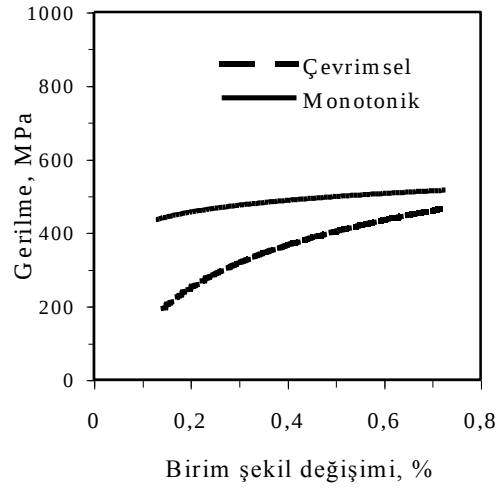
Tempcore ve sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen nervürlü çelik çubukların ve bunların kaynaklı durumlarına ait çevrimsel ve monotonik gerilme – birim şekil değişim eğrilerinin karşılaştırılmaları Şekil 6.17'de görülmektedir. Hem kaynaklı hemde kaynaklı durumda tempcore ve sıcak haddelenmiş numunelere ait çevrimsel eğriler monotonik eğrilerin altında kaldığından her iki malzeme grubuna ait numuneler de çevrimsel yumuşama göstermektedirler. Ancak tempcore prosesi ile üretilen nervürlü çelik çubuklar hem kaynaklı hemde kaynaklı durumda iken sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuklara nazaran daha belirgin bir çevrimsel yumuşama davranışı göstermiştir.



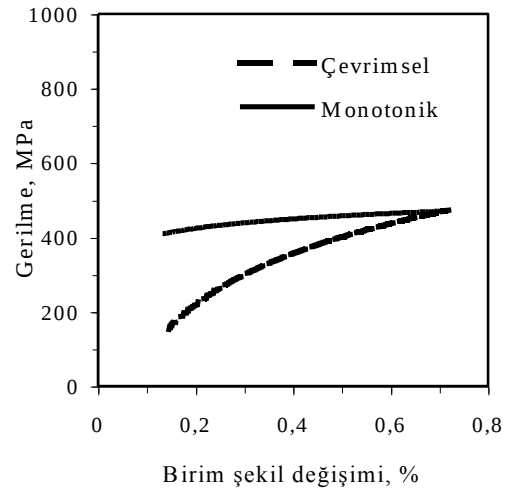
(a)



(b)



(c)



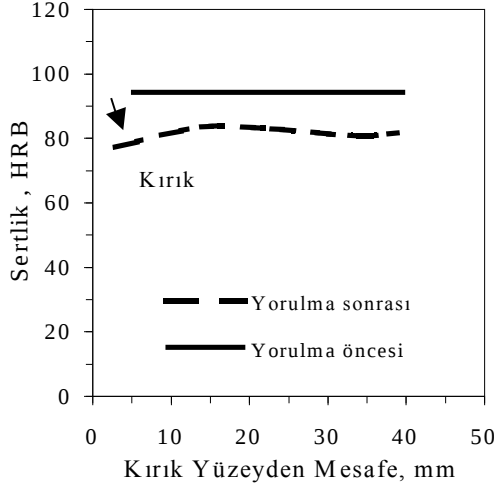
(d)

Şekil 6.17(a) Tempcore (b) Sıcak haddelenmiş (c) Kaynaklı Tempcore ve (d) Kaynaklı sıcak haddelenmiş numunelere ait çevrimsel gerilme – birim şekil değişimi eğrisi ve monotonik gerilme – birim şekil değişim eğrisiyle karşılaştırılması.

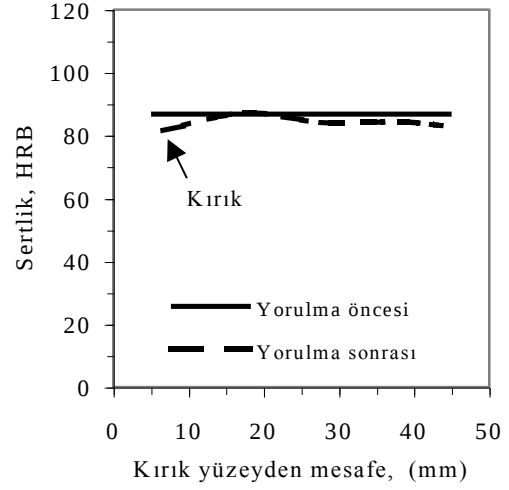
#### 6.4.7 Sertlik Ölçümleriyle Çevrimsel Yumuşamanın İncelenmesi

Malzemelerin çevrimsel yük altındaki davranışını belirlemek amacıyla yapılan ölçümlerden bir tanesi de sertlik ölçümleridir. Şekil 6.18’de kaynaklı ve kaynaklı tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların yorulma öncesi ve sonrasında kırık yüzeyi mesafesinden belirli aralıklarla yapılan sertlik ölçümlerinin Rockwell B skalası cinsinden sonuçları görülmektedir.

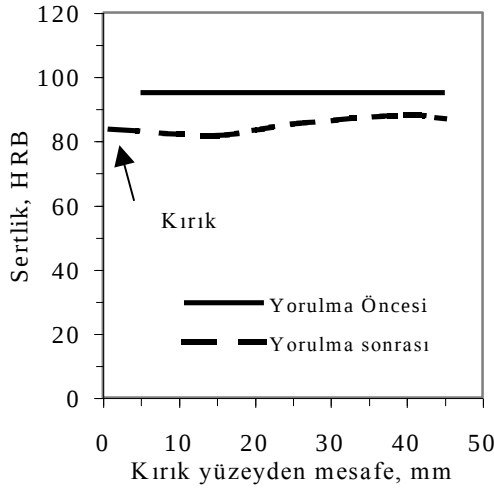
Kısa ömürlü yorulma sırasında malzemede meydana gelen çevrimsel yumuşama davranışına bağlı olarak tempcore numunelerinin yorulma sonrasında sertlik değerlerinde aşırı bir düşme olduğu gözlenmektedir.



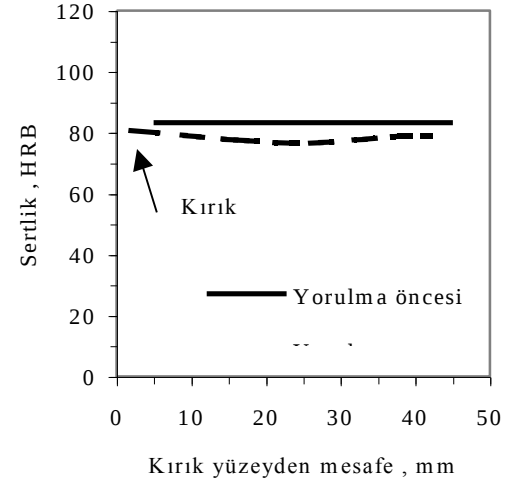
(a)



(b)



(c)



(d)

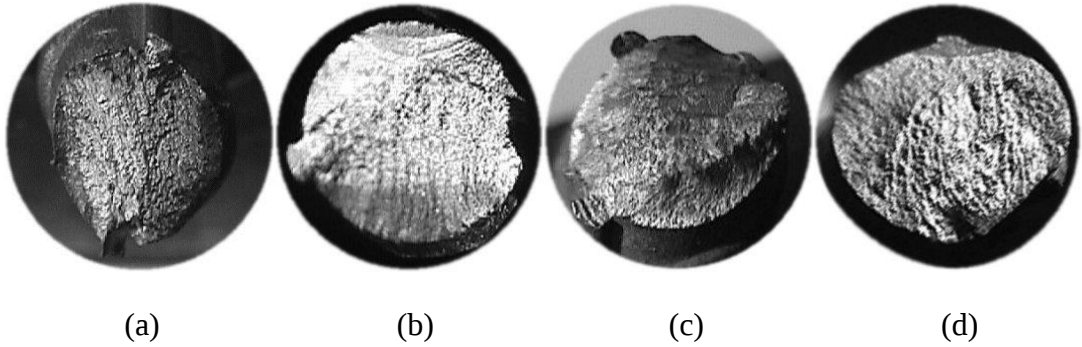
Şekil 6.18 (a) Tempcore (b) Sıcak haddelenmiş (c) Kaynaklı Tempcore ve (d) Kaynaklı Sıcak haddelenmiş çelik çubuklara ait yorulma öncesi ve sonrası sertlik değerleri.

Kaynaklı ve kaynaklı tempcore nervürlü çelik çubukların sertliğindeki düşme kaynaklı ve kaynaklı sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukların sertliğindeki düşmeye göre daha belirgindir.

#### -6.4.8. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi

Kısa ömürlü yorulma deneylerinde Tempcore ve sıcak haddelenmiş numuneler ile bunların kaynaklı bağlantılarının yorulma sonrasındaki kırık yüzeylerinden çekilen temsili fotoğraflar Şekil 6.19 a-d' de görülmektedir. Gerek tempcore gerekse sıcak haddeleme prosesiyle üretilen nervürlü çelik çubukların tamamı nervür diplerinden kırılmıştır.

Kaynaklı nervürlü çelik çubukların kısa ömürlü yorulma deneylerinde her iki gruptaki numuneler de yorulma kırılması kaynak bölgesinde meydana gelmemiştir. Bununla birlikte bütün numunelerde yorulma çatlağının kaynakla malzemenin birleştiği yerden başladığı tespit edilmiştir. Buna göre çekme ve basma gerilmelerinin numune üzerinde eğme etkisinde bulundukları ve bu eğme etkisinin numunede gerilme konsantrasyonlarının yoğunlaştığı ısı tesiri altındaki bölgede yorulma makro çatlağının başlamasına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.19 Kısa ömürlü yorulma deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin görünümü.

- (a) Tempcore prosesine göre üretilmiş nervürlü çelik çubuk ( $\Delta\epsilon_t/2 = \% 0.32$ )
- (b) Sıcak haddeleme ile üretilmiş nervürlü çelik çubuk ( $\Delta\epsilon_t/2 = \% 0.25$ )
- (c) Tempcore prosesine göre üretilmiş kaynaklı nervürlü çelik çubuk ( $\Delta\epsilon_t/2 = \% 0,38$ )
- (d) Sıcak haddeleme ile üretilmiş kaynaklı nervürlü çelik çubuk ( $\Delta\epsilon_t/2 = \% 0.33$ )

## 7.GENEL SONUÇLAR

Tempcore prosesiyle ve sıcak haddeme yöntemiyle üretilmiş 8 mm çapındaki nervürlü çelik çubukların ve bunların TS 708 standartına göre yapılan bindirme kaynaklı bağlantılarının kısa ömürlü yorulma davranışlarının incelendiği bu çalışmada aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir;.

1) Tempcore prosesiyle ve sıcak haddeme ile üretilen nervürlü çelik çubukların “Toplam birim şekil değişim genliği ( $\Delta\epsilon_t/2$ ) – Kırılıncaya kadarki çevrim sayısı ( $N_f$ )” grafikerinden

Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuk için

$$\text{Kaynaksız durumda } \Delta\epsilon_t/2 = 0.0211 N_f^{-0.257}$$

$$\text{Kaynaklı durumda } \Delta\epsilon_t/2 = 0.0177 N_f^{-0.2457}$$

Tempcore nervürlü çelik çubuk için

$$\text{Kaynaksız durumda } \Delta\epsilon_t/2 = 0.0139 N_f^{-0.1991}$$

$$\text{Kaynaklı durumda } \Delta\epsilon_t/2 = 0.015 N_f^{-0.2344}$$

şeklinde ampirik bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntılara göre, kaynaklı durumda % 0,33'den daha büyük birim şekil değişimi genliğinde sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuk , % 0,33'den daha küçük birim şekil değişimi genliğinde ise tempcore nervürlü çelik çubuk daha uzun yorulma ömrüne sahiptir. Kaynak her iki nervürlü çeliğin yorulma ömrünü düşürmüştür. Kaynaklı durumda % 0.05'den daha büyük birim şekil değişimi genliğinde sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubuk, % 0.05'den daha küçük birim şekil değişimi genliğinde ise tempcore nervürlü çelik çubuk daha uzun yorulma ömrüne sahiptir.

2) Sıcak haddeme ve tempcore prosesleriyle üretilmiş olan nervürlü çeliklere ait toplam, elastik ve plastik birim şekil değişimlerinin kırılmaya kadar ki çevrim sayısı eğrilerinin karşılaştırılmasında yorulma geçiş ömrü ( $N_t$ ) yaklaşımı kriter alındığında kaynaklı durumda tempcore malzemesinin  $N_t$  değeri 828 sıcak

malzemenin Nt değeri 951 olarak bulunmuştur. Bu çubukların kaynaklaması Nt değerini tempcore malzemede 968' sıcak malzemede 5000'e artırmıştır. Nt değerinin yüksek olması malzemenin yorulma ömrünün plastik deformasyon bölgesinde geçirdiğinin bir göstergesidir.

3) Tempcore ve sıcak haddelenmiş nervürlü çubuklarla bunların kaynaklı bağlantılarının çevrimsel gerilme – birim şekil değişim eğrilerinin çıkarılması sonucunda iki malzeme grubunda çevrimsel gerilme eğrileri monotonik eğrilerin altında kaldığından çevrimsel yumuşama davranışı gösterdikleri belirlenmiştir. Bu değerlendirme gerilme – çevrim sayısı ve sertlik ölçümleriyle de desteklenmektedir.

4) Kısa ömürlü yorulma deneylerinde uygulanan toplam birim şekil değişimlerinin elastik ve plastik bileşenlerinin kırılmaya kadar ki çevrim sayısı arasında çizilen eğrilerinden yorulma üs ve katsayılarının elde edilmesiyle Coffin – Manson bağıntısında yerine konulmuş ve her bir malzeme grubuna ait yorulma denklemleri çıkarılmıştır.

Buna göre, Coffin – Manson denklemi,

Kaynaksız nervürlü çelik çubuklar için;

$$\text{Tempcore prosesiyle üretilenler} \quad \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.0024 (N_f)^{-0.035} + 0.0281 (N_f)^{-0.38}$$

$$\text{Sıcak haddeme yöntemiyle üretilenler} \quad \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.0023 (N_f)^{-0.04} + 0.0315 (N_f)^{-0.38}$$

Kaynaklı nervürlü çelik çubuklar için ise;

$$\text{Tempcore prosesiyle üretilenler;} \quad \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.0031 (N_f)^{-0.109} + 0.0174 (N_f)^{-0.37}$$

$$\text{Sıcak haddeme yöntemiyle üretilenler} \quad \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0.0038 (N_f)^{-0.125} + 0.0204 (N_f)^{-0.35}$$

olarak elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Coşar, İ.**, 2000, Az Alaşımlı Karbon Çeliği Beton Çubuklarının Sürünme Davranışları ve Mikroyapısal Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Tankut, K.**, 1995, Tempcore Prosesi ile Üretilen Düşük Alaşımlı Nervürlü Beton Çeliklerinin Karakteristiği, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Ersoy, K.**, 2000, Üretim Parametrelerinin Beton Çeliklerinin Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Economopoulos, E., Respen, Y., Lessel G., Steffes, G.**, 1975, Application of the Tempcore Process to the Fabrication of High Yield Strength Concrete Reinforcing Bars, C.R.M, Belçika.
- [5] **Simon, P., Economopoulos, M., Nilles, P.**, 1984, Tempcore, an Economical Process for the Production, Metallurgical Plant and Technology, 3/84, 80 –93.
- [6] **Bakkaloğlu, A.**, 2001, Tempcore Prosesinin Nervürlü Beton Çeliğinin Mikroyapısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Isıl İşem Sempozyumu, İstanbul.
- [7] **Şeşen, K.**, 1999, Özel Çelikler Ders Notları, İ.T.Ü. Kimya – Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [8] **Devrim, E.**, 2000, İzmir Demir Çelik Sanayi A.Ş. Eğitim Yayınları, İzmir.
- [9] **Ammerling, W.J.**, 1984, Bar and rod mills – influence of design parameters on economics and properties of rolled products, Metallurgical Plant and Technology, 7,1, 46-57.
- [10] **Simon, P.**, 1990, Optimization of Tempcore Installations for Rebars, Metallurgical Plant and Technology International, 2,61-69.
- [11] **Emir, N., Korkmaz S.**, 1988, Yüksek Mukavemetli Çelik Çubukların Üretiminde Tempcore Prosesi, T.D.Ç.İ. İsdemir Eğitim Yayınları, İskenderun.
- [12] **Bernstein, M.L., Zaimovsky, V.A.**, 1983, Mechanical Properties of Metals, MIR Publishers, Moskova.
- [13] **ASM International**, 1990, Fatigue Resistance of Steels, in Metals Handbook pp 673 – 688 , Boardman, B.,
- [14] **Kayalı, E.S.**, 1997, Yorulma, Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, İstanbul.

- [15] **Kayalı, E.S., Çimenoglu H.**, 1991, Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İTÜ Kimya-Metalurji fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [16] **Hertzberg, R.W.**, 1996, Cyclic Stress and Strain Fatigue, in Deformation and Fracture Mechanics Engineering Materials, pp 560-598.
- [17] **Dowling, N.E.**, Mechanical Behaviour of Materials, Engineering Method for Deformation, Fracture and Fatigue.
- [18] **Dodd, L.L., and Restrepo – Posada, J.I.**, 1995, Model for Predicting Cyclic of Reinforcing Steel, Journal of Structural Engineering, 121, 3,433 – 445.
- [19] **Li, D.M., Kim, K.W., Lee, C.S.**, Low Cycle Fatigue Data Evaluation for a High Strength Spring Steel, International Journal of Fatigue, 19, 8-9, 607 – 612.
- [20] **Saeki, N., Sugisawa, M., Yamaguchi, T., Wada, A.**, 1988, Mechanical Properties of low yield Point Steels, Journal of Material in Civil Engineering, 10, 3, ASCE.
- [21] **Krabiell, A., Reichel, U.**, 1993, Low Cycle Fatigue Properties of Microalloyed Medium Carbon Precipitation hardening Steels in Comparison to Quenched and Tempered Steels, Steel Research, 64,8/9,425-430.
- [22] **Sarma, V.S., Padmanabhan, K.A.**, Low Cycle Fatigue Behaviour of a Medium Carbon Microalloyed Steel”, Internatioanl Journal of Fatigue, 19,2,135-140, 1997.
- [23] **ASTM A 606 – 92**, Standart Practice for Strain Controlled Fatigue Testing
- [24] **Foss, S.K.**, 1988, Evaluation Procedure for Low Cycle Fatigue Data, Journal of Testing and Evolution, JTEVA, 16., 5, 470-473.
- [25] **Thandavamoorthy, T.S.**, 1999, Static and Fatigue of High Ductility Bars Reinforced Concrete Beams, Journal of Materials in Civil Engineering,11,1.
- [26] **Zheng, H., Abel, A.A.**,1999 Fatigue Properties of Reinforcing Steel Produced by Tempcore Process, Journal of Materials in Civil Engineering, 11, 2 , ASCE.
- [27] **Mander, J.B., Panthaki, F.D., and Kasalanati, A.**, 1994, Low Cycle Fatigue Behaviour of Reinforcing Steel, Journal of Materials in Civil Engineering , 6, 4, 453-468.
- [28] **Behan, J.E., Warner, R.F.**, 1984, Fatigue Properties of Tempcore Reinforcing Bars, Report No: R-63, The University of Adelaide , Department of Civil Engineering, Avustralya.
- [29] **Rodriguez, M.E., Botero, J.C., and Villa, J.**, 1999, Cyclic Stress-Strain Behavior of Reinforcing Steel Including Effect of Buckling, 125, 6.
- [30] **TS 708**, 1996, “Betonarme Çelik Çubukları”, Türk Standardları Enstitüsü.
- [31] **Roessle, M.L., Fatemi, A.**, 2000, Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations, International Journal of Fatigue, 22,495-511.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1978 yılında Kırıkkale’de doğdu. İlköğrenimini 1988 yılında Kırıkkale Gündoğdu İlkokulu’nda, orta öğrenimini 1991 yılında Kırıkkale Namık Kemal Ortaokulu’nda ve lise öğrenimini 1994 yılında Kırıkkale Lisesi’nde tamamladı. 1994 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümüne girdi. 1998 yılında Lisans öğrenimini tamamlayarak, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Seramik Programına girdi.