

**TEPCORE ISIL İŞLEMİ UYGULANMIŞ  
NERVÜRLÜ BETONARME ÇELİĞİNİN MANYETİK  
REZONANS YORULMA DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**2015  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Okan ÇELİK**

**TEPCORE ISIL İŞLEMİ UYGULANMIŞ NERVÜRLÜ BETONARME  
ÇELİĞİNİN MANYETİK REZONANS YORULMA DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**Okan ÇELİK**

**Karabük Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2015**

Okan ÇELİK tarafından hazırlanan “TEPCORE ISIL İŞLEMİ UYGULANMIŞ BETONARME ÇELİKLERİNİN MANYETİK REZONANS YORULMA DAVRANIŞININ BELİRLEME ÇALIŞMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/06/2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Cahit KARAOĞLANLI (BÜ)

Üye : Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI (KBÜ)



...../...../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Okan ÇELİK

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **TEMPCORE ISIL İŞLEMİ UYGULANMIŞ BETONARME ÇELİKLERİNİN MANYETİK REZONANS YORULMA DAVRANIŞININ BELİRLEME ÇALIŞMASI**

**Okan ÇELİK**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Metalürji ve Malzeme Mühendisliği**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI**

**Haziran 2015, 40 sayfa**

İnşaat sektörü, kendi kullanım amaçları için betonarme çeliklerindeki yüksek emniyet ve düşük maliyet gibi konularla çok yakından ilgilenmektedir. Bu yüzden yüksek mekanik özelliklere sahip betonarme çelikleri, son yıllarda teknolojideki gelişmelere paralel olarak büyük boyutlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, betonarme yapılarında kullanılan, Tempcore sistemine tabi tutulmuş TS 708 Standardı S420 kalitesindeki nervürlü yapı çeliklerinin ne kadar yüke dayanacağını ve ne kadar sürede yorulacağını belirlemek amacıyla depremler sonucunda binaların yıkılmaması adına alınabilecek önlemler için yol gösterici bir çalışma yapılmıştır.

Günümüzde yüksek mukavemetli betonarme çeliklerinin üretiminde kullanılan en yaygın yöntem “TEPCORE YÖNTEMİ”dir. Tempcore prosesi temel anlamda, sıcak çekilmiş beton çelik çubuklarına, mukavemeti arttırmak üzere uygulanan bir ısıl işlemdir. Bu ısıl işlem sıcak haddelenmiş ve halen sıcak (1000 °C) olan çubuğa finiş pasosunu terk eder terk etmez, hızlandırılmış şekilde su verilere uygulanır.

Özellikle çok yüksek katlı binalarda yapı çelikleri statik yüklerle birlikte dinamik yüklere de maruz kalmaktadır. Bu değişken yükler karşısında çeliğin nasıl davranış sergileyeceğini sadece çekme test deneyi ile belirlenmesinin yeterli olmayacağı belirlenerek manyetik rezonans test cihazı ile ölçümleri yapılması düşünülmüştür.

Manyetik rezonans test cihazında çevrim sayısına göre uygulanan yük değişimleri sonuçları incelediğinde akma mukavemetinin üzerine çıktığımız statik yüklerde malzeme hasara uğramıştır. Akma yükünün üzerine çıkıldığı durumlarda frekans değişimleri negatif (-) değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Akma dayanımına yakın veya bir miktar altında olan yüklerde ise numune  $10^7$  çevrim sayısına dayanmıştır. Plastik deformasyona uğradığında ise kesit büzülerek daralmış ve kırılmadan önce sünek davranış sergilemiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Tempcore prosesi, mekanik özellikler.

**Bilim Kodu** : 915.3.022

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **A STUDY ON DETERMINATION OF MAGNETIC RESONANCE FATIGUE BEHAVIOR OF RIBBED BAR OF TEMPCORE HEAT TREATED CONSTRUCTION STEEL**

**Okan ÇELİK**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Metallurgy Education**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI**

**June 2015, 40 page**

The purpose of this thesis is to investigate the mechanical properties of construction steel ribbed bars that used commonly in civil sector. The sector mostly interests in materials which has low cost and high mechanical properties. This why the quenched and self-tempered bars are produced instead of micro alloyed steel.

In this study, used in low carbon steel, Tempcore to subject the system TS 708 standard what the low carbon steel structure in S420 quality up will be based on the load and how long the earthquakes have been done for a study for the measures to be taken on behalf of the demolition of the building on the results to determine whether fatigue.

Today, the most common method used in the production of high-strength steel reinforced concrete "TEMPCORE METHOD" is. Tempcore process in basic sense, the hot rolled low carbon steel rebar is a heat treatment applied to increase the strength. This hot-rolled and heat treatment is still hot (1000 ° C) leave the finishing passes are applied to data accelerated the water.

Specifically high-building steel structure is exposed to dynamic load with a static load. The tensile test is not sufficient to determine behaviour of ribbed bar construction steel against variable loads. This is why; it is intended to be performed by magnetic resonance measurement tester.

As a result, while the load changes applied by the number of cycles of magnetic resonance tester is more than the static load on the yield strength. The material has damage. In cases where the load exceed the value of yield strength. Frequency changes negative (-) values were observed to reach. The load in the near or slightly below the yield strength of  $10^7$ , samples was based on the number of cycles. The subjected to plastic deformation shrinks the narrowed section and showed ductile behaviour before the break.

**Key Word** : Tempcore process, mechanical properties.

**Science Code** : 915.3.022



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI'ya, teőekkürü bir borç bilirim.

Kardemir AŐ yöneticileri, Haddehaneler Baőmüdürü Sayın İbrahim TOZLU ve Kontinü Haddehane Müdürü Sayın Ragıp PARLAK'a ve tüm mesai arkadaşlarıma, teşekkür ederim.

Her türlü deneylerin yapılışında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim üyesi Arő. Gör. Said ÖZÇELİK'e teşekkür ederim.

Çalıőmam sırasında bana verdikleri destek, gösterdikleri duyarlılık ve anlayış için sevgili eőime ve biricik oğluma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
NERVÜRLÜ BETONARME ÇELİKLERİNİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	3
2.1. KİMYASAL KOMPOZİSYONUN AYARLANMASI .....	4
2.1.1. Karbon ve Mangan Değerlerinin Ayarlanması.....	4
2.1.2. Mikroalaşımlama .....	4
2.2. SOĞUK İŞLEM SERTLEŞMESİ.....	4
2.3. TEMPCORE PROSESİ.....	5
2.3.1. Tempcore İşleminin Temel Metalurjik Prensipleri.....	8
2.3.2. Tempcore Prosesini Etkileyen Faktörler .....	9
2.3.3. Tempcore Betonarme Çelik Çubuklarının Mekanik Özellikleri .....	10
2.3.3.1. Kaynaklanabilirlik Özelliği.....	10
2.3.3.2. İleri-Geri Eğme Özelliği .....	11
2.3.3.3. Eğme Özelliği .....	11
2.3.3.4. Düşük Sıcaklıklarda Tokluk Özelliği.....	11
2.3.4. Nervürlü Betonarme Çeliklerinin Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	11
2.3.5. Tempcore Prosesinin Genel Değerlendirilmesi .....	12

2.4. BETONARME ÇELİKLERİNE NERVÜR ÖZELLİĞİNİN ETKİSİ.....	13
<b>BÖLÜM 3.</b> .....	14
<b>YORULMA.</b> .....	14
3.1. YORULMANIN TANIMI .....	15
3.2. YORULMA OLAYINDA ÇEVİRİMLİ YÜKLEME.....	16
3.3. YORULMA ÇATLAĞI .....	16
3.4. YORULMA KIRIK YÜZEYİ.....	17
3.5. YORULMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	17
3.5.1. Malzemenin Çekme Mukavemeti.....	17
3.5.2. Çentik Etkisi .....	18
3.5.3. Korozyon Etkisi .....	18
3.5.4. Yükleme Şeklinin Etkisi.....	19
3.5.5. Frenkans Etkisi .....	19
3.5.6. Boyut Etkisi .....	19
3.5.7. Sıcaklık Etkisi.....	20
3.5.8. Gerilme Genliğinin Etkisi.....	20
3.5.9. Yüzey İşlemlerinin Etkisi .....	20
3.6. MANYETİK REZONANS CİHAZIYLA TEPMCORE SİSTEMİYLE ÜRETİLMİŞ NERVÜRLÜ BETONARME ÇELİKLERİNİN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ .....	21
3.7. YORULMA HASARININ ÖNLENMESİ.....	21
<b>BÖLÜM 4.</b> .....	22
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	22
4.1. NUMUNE HAZIRLAMA .....	22
4.2. MİKRO YAPI İNCELENMESİ.....	23
4.3. SERTLİK.....	23
4.4. ÇEKME DENEYLERİ.....	24
4.5. DÖNEL EĞMELİ YORULMA DENEYİ .....	25
4.6. MANYETİK REZONANS .....	26

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 5. ....	27
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	27
5.1. MİKROYAPI ÇALIŞMASI.....	28
5.2. MİKROSERTLİK ÇALIŞMASI.....	28
5.3. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI .....	29
5.4. MANYETİK REZONANS İLE YORULMA DENEY SONUÇLARI .....	29
BÖLÜM 6. ....	37
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	37
KAYNAKLAR .....	38
ÖZGEÇMİŞ .....	40

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Betonarme çeliklerinin üretim yöntemleri .....	2
Şekil 2.2. Tempcore prosesinin şematik gösterimi .....	4
Şekil 3.1. Dinamik yüklemde zamana göre yükün değişimi .....	16
Şekil 4.1. Mikro test otomatik parlatma ve zımparalama cihazı.....	23
Şekil 4.2. Lecia marka DMILM model optik ışık mikroskobu.....	23
Şekil 4.3. Sertlik değernini alınacağı bölgeler .....	24
Şekil 4.4. Schimadzu marka HMW model mikro sertlik cihazı .....	24
Şekil 4.5. Alsa marka 1200 kN çekme cihazı .....	25
Şekil 4.6. ZWICK./ROELL amsler 500 HFP manyetik yorulma rezonans cihazı ..	25
Şekil 5.1. Tempcore işlemine tabi tutulmuş S 420 kalite nervürlü çeliğin dış yüzey (10X) mikroyapısı .....	27
Şekil 5.2. Tempcore işlemine tabi tutulmuş S 420 kalite nervürlü çeliğin merkez bölgesinin (20X) mikroyapısı .....	28
Şekil 5.3. Tempcore işlemi uygulanmış çelik çubuklarına ait sertlik sonuçları.....	29
Şekil 5.4. 24,12 /10,03 kN $F_{maxstatik} / F_{maxdinamik}$ yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.....	31
Şekil 5.5. 27,63 /11,42 kN $F_{maxstatik} / F_{maxdinamik}$ yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.....	31
Şekil 5.6. 35,57/14,87kN $F_{maxstatik} / F_{maxdinamik}$ yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.....	32
Şekil 5.7. 45,90/19,99 kN $F_{maxstatik} / F_{maxdinamik}$ yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.....	32
Şekil 5.8. 54,00/22,35 kN $F_{maxstatik} / F_{maxdinamik}$ yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.....	32
Şekil 5.9. Uygulanan 68,99/29,35 kN olarak uygulanan sırasıyla $F_{maxstatik} / F_{maxdinamik}$ yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.....	33
Şekil 5.10. İncelenen nervürlü yapı çeliğinin yorulma hasarının makro görünümü ..	33
Şekil 5.11. S420 nervürlü yapı çeliğinin kenar bölgesinin düşük yüklerde (24,12 kN) test edilen nervürlü yapı çeliğinin kenar mikro yapı görüntüleri.....	34

## Sayfa

Şekil 5.12. S420 nervürlü yapı çeliğinin kenar bölgesinin yüksek yüklerde (68,99) test edilen nervürlü yapı çeliğinin kenar mikro yapı görüntüleri .....	34
Şekil 5.13. S420 nervürlü yapı çeliğinin dış yüzeyine ait düşük yüklerde (24,12 kN) test edilen nervürlü yapı çeliğinin merkez mikro yapı görüntüleri .....	35
Şekil 5.14 S420 nervürlü yapı çeliğinin dış yüzeyine ait düşük yüklerde yüksek yüklerde (68,99kN) test edilen nervürlü yapı çeliğinin merkez mikro yapı görüntüleri .....	35
Şekil 5.15. Kırık numunenin yüzeyine ait SEM görüntüsü .....	36

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Alaşım elementlerinin çeliğe kazandırdığı özellikler .....	9
Çizelge 2.2. Nervürlü betonarme çelik üretim yöntemlerinin karşılaştırılması .....	11
Çizelge 5.1. S420 Tempcore'lu yapı çeliğinin kimyasal bileşimi .....	27
Çizelge 5.2. S420 sıcak haddelenmiş yapı çeliğinin kimyasal bileşimi.....	29
Çizelge 5.3. Manyetik Rezonans test verileri .....	35

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

17.08.1999 depreminde ülkemizde yapılan birçok betonarme yapıların depreme dayanıklı olmadığını çok acı bir şekilde öğrendik. Bu yapılar yapılırken ülkemizin tehlikeli bir coğrafyada yer aldığı unutuldu. Depremden sonra yapılan istatistiklere göre ülkemizin %92' si deprem tehlikesi altında bulunmaktadır. 17 Ağustos depremi, tüm Marmara Bölgesi'nde, Ankara'dan İzmir'e kadar geniş bir alanda hissedildi. Resmi raporlara göre, 17.480 ölüm, 23.781 yaralı ve 505 kişi sakat kaldı. 285.211 konut ve 42.902 işyeri hasar gördü. Bu acı olaylardan sonra betonarme yapılarında kullanılan yapı çeliklerinin mikro yapıları, akma - çekme değerleri ve yorulma dayanımları gibi birçok mekanik özelliklerinin öncelikli olarak dikkat edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Betonarme yapılarında kullanılan, Tempcore sistemine tabi tutulmuş S420 kalitesindeki nervürlü yapı çeliklerinin ne kadar yüke dayanacağını ve ne kadar sürede yorulacağını belirlemek amacıyla depremler sonucunda binaların yıkılmaması adına alınabilecek önlemler için yol gösterici bir çalışma yapılmıştır. Nervürlü betonarme çubuklarında istenen önemli özelliklerinden birisi de yüksek yorulma dayanımıdır. Malzemelerin statik koşullarda dayanabildiği gerilmelere tekrarı yükler altında dayanamadıkları bilinmektedir. Deprem gibi aşırı tekrarlı yüklemeler malzemede plastik deformasyon meydana getirmektedir.

Son yıllarda teknolojiye paralel olarak inşaat sektörünün kullandığı beton çelik çubukların yüksek akma dayanımına sahip olmalarının yanı sıra süneklilik, kaynak edilebilirlik özelliği de istenmektedir. Fakat geleneksel yöntemlerle üretilen nervürlü beton çelik çubuklarının, yüksek dayanıma sahip olmalarına rağmen, süneklilik ve kaynak edilebilirlikleri son derecede sınırlıdır. Bunun sebebi; çelik çubukta yüksek akma dayanımı elde etmek için kullanılan yüksek karbon ve



mangan içeriğinin süneklilik ve kaynak edilebilirlik özelliğini ters yönde etkilemesidir. Beton çelik çubuklarındaki bu olumsuzlukları gidermek için geliştirilen yöntemlerden biri Tempcore prosesidir. Tempcore prosesi temel anlamda, sıcak çekilmiş beton çelik çubuklarına, mukavemeti arttırmak üzere uygulanan bir ısıl işlemdir [1].

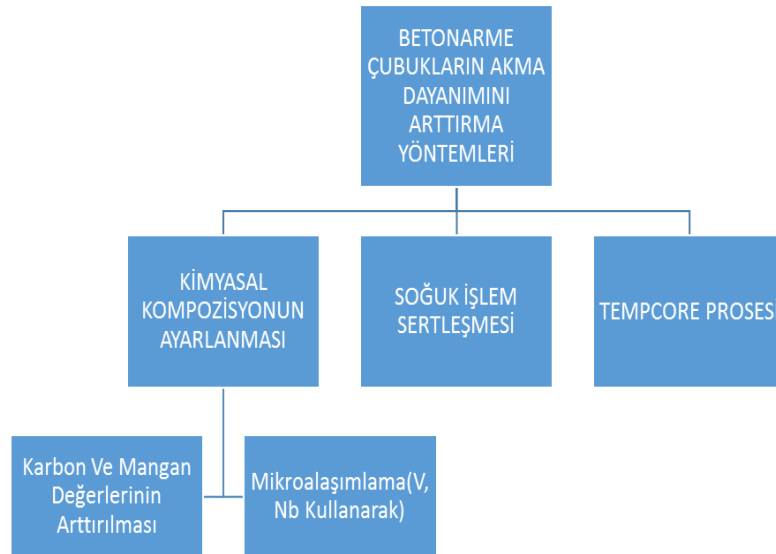
## BÖLÜM 2

### NERVÜRLÜ BETONARME ÇELİKLERİNİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yüksek mekanik özelliklere sahip nervürlü betonarme çelikleri son yıllarda teknolojideki gelişmelere paralel olarak daha büyük boyutlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu yüzden tüketiciler düşük maliyet ve yüksek dayanım gibi konulara önem vermektedir. Nervürlü betonarme çeliklerinden istenen yüksek akma dayanımının aynı zamanda daha az malzeme ile daha fazla yük taşımak anlamına geldiği düşünüldüğünde nervürlü çubukların inşaat sektöründeki önemi açıkça görülmektedir. Birbiri ile iç içe iki olgu halinde olan süneklik ve ileri- geri eğme özelliği inşaat işlerinde büyük öneme sahiptir. Çeliğe soğuk işleme istenilen şeklin verilebilmesi, konstrüksiyon sırasında çeliğe verilen şekil ve ölçünün bozulması üzerinde titizlikle durulan noktalardır.

Günümüzde kullanılan betonarme çeliklerinden beklenen özellikler şu şekildedir [2].

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



Şekil 2.1. Betonarme çeliklerinin üretim yöntemleri.

## **2.1. KİMYASAL KOMPOZİSYONUN AYARLANMASI**

### **2.1.1. Karbon ve Mangan Değerlerinin Ayarlanması**

Sıcak haddelenmiş çeliğe istenilen mukavemet kazandırılabilir. Ancak özellikle çelik içeriğinde yüksek karbon içeriği, kaynaklanabilirliği düşürdüğünden, süneklilik ve uzamayı azalttığından, bu yöntem ile üretilen çelikler tercih edilmemektedir [3].

### **2.1.2. Mikroalaşımlama**

Düşük karbonlu çeliğin mukavemeti mikro alaşımlama elementleri kullanarak da artırılabilir. Mikro alaşımlama elementleri olarak genellikle pahalı olan V, Nb gibi elementler kullanılmaktadır. Bu elementlerin oluşturduğu nitrür ve karbür çökeltileri, gerek çökelti sertleşmesi ve gerekse tane küçültme etkileri ile çeliğe ek bir mukavemet sağlarlar. Mikro alaşımlama ile üretilen betonarme çelikleri amaç için çok uygun olmalarına karşın, Tempcore prosesi ile üretilen çelikler ile karşılaştırıldığında daha maliyetli olmasından dolayı bu üretim yöntemine olan talebin azalmasında ana etken olarak görülmektedir [3].

## **2.2. SOĞUK İŞLEM SERTLEŞMESİ**

Standartlarca belirtilen düşük karbon oranlarında, mukavemetin artırılabilmesi için kullanılmış olan ilk yöntemlerden birisi (TOR çelikleri), sıcak haddelenmiş çeliğin, soğuk olarak burularak işlem sertleşmesi sonucunda yüksek mukavemet elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Düşük karbonlu, kaynaklanabilir beton çeliği üretilebilmesine karşın yüksek maliyet sebebiyle bu yöntemde günümüzde hemen hemen terkedilmiştir [3].

## **2.3. TEMPCORE PROSESİ**

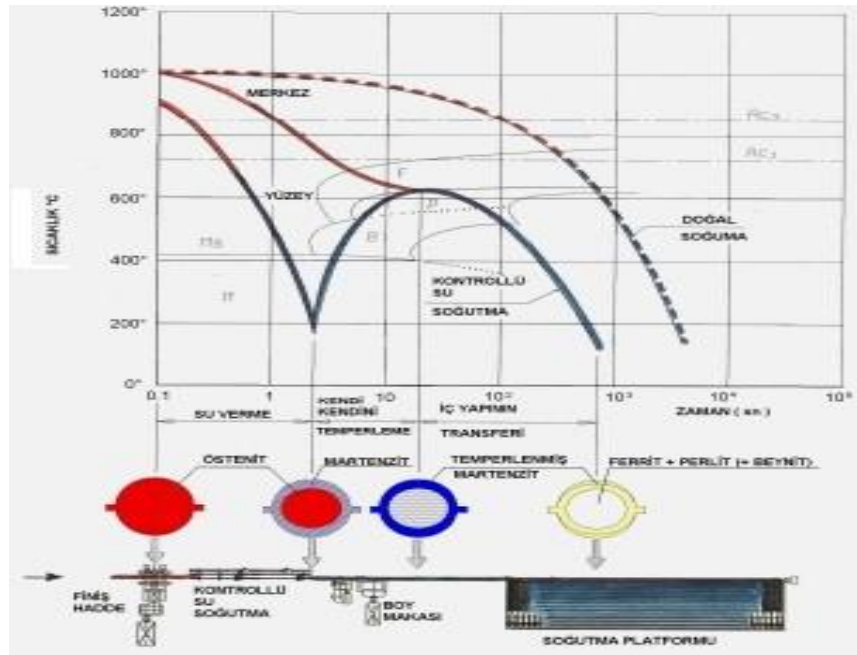
Son yıllarda yüksek miktarlarda üretilmekte olan kaynaklanabilir betonarme çelikleri için su verme ve çelik çubuğun kendi kendini temperlemesi çok popüler bir çözüm haline gelmiştir [4].

Yüksek mukavemetli betonarme çeliklerinin üretiminde kullanılan en yaygın yöntem Tempcore yöntemidir. Tempcore ismi martensit tabakanın, soğutmadan sonra çekirdekten yayılan ısı ile temperlenmesi nedeniyle “core tempering” den üretilmiştir. Bu prosesin en büyük özelliği C ve Mn oranları düşük tutularak, alaşım elementi ilavesi gerek duyulmadan sıcak çekilmiş olan beton çelik çubuklarının, sünekliliğinin, dayanımının ve kaynak edilebilirliğinin artırılmasıdır [5]. Kısaca Tempcore prosesi, sıcak haddelenmiş ve halen sıcak olan çubuk, finiş pasosunu terk eder terk etmez, hızlandırılmış şekilde su verilmesi olayı olarak isimlendirilir [3].

Temperleme sonrasında sert, kararsız ve kırılğan olan martensit fazı, mukavemeti daha düşük fakat yeterince sünek olan temperlenmiş martensite dönüşmektedir. Yüzeyi çepeçevre saran ve belli bir kalınlıktaki temperlenmiş martensit bölge, çeliğe mukavemet, ferritik- perlitik çekirdek ise süneklilik sağlar [3].

Şekil 2.2’ de gösterilen Tempcore prosesi, sıcak hadde merdanesinden çıkan çubuğun ısıl işleminde oluşur ve üç aşamayı kapsar:

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



Şekil 2.2. Tempcore prosenin şematik gösterimi.

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

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 ısı yayılımı olur. Sonuçta ilk aşamada şekillenen martensit kendi kendine temperlemeye maruz kalmaktadır. Böylelikle yüksek akma mukavemeti 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 [6].

Üçüncü aşama çubuk soğutma yatağındaiken 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 karışımından oluşup çeşitli faktörlere bağlıdır [7].

- Çelik kompozisyonu,
- Çubuk çapı,
- Son haddeden çıkan malzemenin çıkış sıcaklığı,
- 1. Kademedeki soğutma verimliliği ve süreci.

Tempcore işlemine tabi tutulmuş çubuklarda mikro yapı ve özellikler çubuğun merkezine doğru sürekli değişir. Bununla birlikte, Tempcore çubuklarını iki ayrı parçadan meydana geldiğini düşünmek uygun bir yaklaşımdır. Kolaylık olması yönünden, mertenziti veya temperlenmiş martensiti bir yüzey kabuğu ile ferrit ve

perlitten oluşan çekirdek olarak adlandırılır. Tempcore çubuğunun baştan sona makroskopik özellikleri, bilhassa gerilme özellikleri şu üç faktöre bağlıdır.

- Martensitin hacimsel yüzdesi
- Martensitin gerilme özellikleri,
- Çekirdeğin (ferrit-perlit) gerilme özellikleri,

Martensitin hacimsel yüzdesi; martensit dönüşümün başlangıç sıcaklığına, çeliğin kompozisyonuna ve soğutma ünitesini terk eden çubuğun enine kesitindeki sıcaklık alanına bağlıdır.

Martensit kabuğun gerilme özellikleri; kimyasal kompozisyona, soğutma kademesindeki termal alana ve temperleme sıcaklığına bağlıdır. Bu temperleme sıcaklığı, Tempcore soğutma ünitesini terk eden çubuğun enine kesitindeki termal alanın bir fonksiyonudur.

Çekirdeğin mekanik özellikleri ise iki grup parametreye bağlıdır.

- Kimyasal kompozisyon, CCT diyagramları ve mikro yapı özellikler arasındaki bağıntılar;
- Soğutma süresince soğutma şartları ve izleyen soğutma kademeleri.

Yukarıdaki açıklamalardan çıkan sonuç; verilen bir kimyasal kompozisyon için çubuğun mekanik özelliklerini etkileyen ana faktör, soğutma kademesine oluşan termal alandır [3]. Böylece merkez yumuşak dışı sert olarak üretilen betonarme çeliklerinde, yüksek dayanım, tokluk, süneklik, kaynak edilebilirlik ve kolay bükülebilirlik gibi özellikler ürüne üretim sırasında kazandırılmaktadır [4]. Sonuç olarak Tempcore prosesi; yüksek mukavemetli, sünek ve kaynaklanabilir betonarme çeliğinin üretimine imkân sağlayan en ekonomik ve en yaygın yöntemdir [3].

### 2.3.1. Tempcore İşleminin Temel Metalurjik Prensipleri

Sertlik çeliğin, plastik deformasyona gösterdiği dirençtir. Çeliğin sertliği arttıkça mukavemeti de artar. Tempcore prosesinin temeli, çelik yüzeyinin su verme yöntemiyle sertleştirilmesi prensibine dayanır. Hızlandırılmış su verme ünitesine girmeden önce, finiş pasosunu terkeden yaklaşık 1000 °C deki çeliğin mikro yapısı %100 östenitten oluşmaktadır. Su verme sırasında, çubuğun martensit başlangıç sıcaklığı altında düşen yüzey kısmı östenit fazından martensit fazına dönüşür. Yavaş soğuyan merkez ise östenit fazından ferritik- perlitik bir mikro yapıya dönüşür. Martensit çeliğin en sert fazıdır.

Çeliği sertleşmesi istendiğinde;

- Martensitin sertlik değerinin mümkün olduğunca yüksek olması istenir. Mikro yapının %100 martensitten oluştuğu varsayılırsa, su verme sonrasında oluşan mikro yapının sertliği sadece çeliğin %C içeriğine bağlıdır.
- Mikro yapıda martensit yüzdesinin yüksek olması gereklidir.
- Östenit- martensit dönüşümünün oranı; çeliğin kompozisyonuna, östenitin tane büyüklüğüne, soğuma hızına ve dolayısıyla parçanın büyüklüğüne bağlıdır [3].

Çizelge 2.1. Alaşım elementlerinin çeliğe kazandırdığı özellikler.

	Si	Mn*	Mn*	Cr	Ni*	Ni*	Al	W	V	Co	M o	S	P
Sertlik	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	-	↑	↑	↑	↑	-	↑
Mukavemet	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	-	↑
Akma Noktası	↑↑	↑	↓	↑↑	↑	↓	-	↑	↑	↑	↑	-	↑
Uzama	↓	~	↑↑↑	↓	~	↑↑↑	-	↓	~	↓	↓	↓	↓
Kesit Büzülmesi	~	~	~	↓	~	↑↑	↓	↓	~	↓	↓	↓	↓
Darbe Direnci	↓	~	-	↓	~	↑↑↑	↓	~	↑	↓	↑	↓	↓↓↓
Elastisite	↑↑↑	↑	-	↑	-	-	-	-	↑	-	-	-	-
Sıcaklığa Dayanım	↑	~	-	↑	↑	↑↑↑	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	-
Soğutma Hızı	↓	↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	-	↓↓	↓↓	↑↑	↓↓	-	-
Karbür Oluşumu	↓	~	-	↑↑	-	-	-	↑↑	↑↑	-	↑↑	-	-
Aşınma Direnci	↓↓↓	↓↓	-	↑	↓↓	-	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	-
Dövülebilirlik	↓	↑	↓↓↓	↓	↓	↓↓↓	↓↓	↓↓	↑	↓	↓	↓↓	↓↓↓
İşlenebilirlik	↓	↓	↓↓↓	-	↓	↓↓↓	-	↓↓	-	~	↓	↑↑	↓↓↓
Okistlenme Eğilimi	↓	~	↓↓	↓↓	↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓	↓	↑↑	-	↓↓
Korozyon Direnci	-	-	-	↑↑	-	↑↑	-	-	↑	-	-	↓	↑↑

\* Perlitik      ↓ Azaltır      ↑ Arttırır    ~ Değişirmez    - Etkilemez

\*\* Östenitik

### 2.3.2. Tempcore Prosesini Etkileyen Faktörler

- 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 kalınlığı da artar. Akma dayanımındaki artış karşısında diğer klasik yöntemlerle üretilen çeliklerin tersine süneklikte çok fazla düşüş olmaz [7].

- Soğutma ekipmanının tipi: Tempcore soğutma sistemi direkt suyla soğutma hattı ve soğutma suyu boru sisteminden meydana gelmektedir. Soğutma hattı, soğutma ekipmanlarından, su toplama ve geri dönüş sisteminden ve kontrol sisteminden meydana gelmektedir [9]. Soğutma ekipmanının seçiminde ısıl verimlilik dizayn ve yapının basitliği ile işletme maliyeti arasında çok iyi bir uyum sağlaması gerekir [7].
- Çelik Bileşimi: Çeliğin bileşiminin seçiminde pratikte iki önemli unsur vardır.
  - Haddehane şartlarından ve müşteriden kaynaklanan bazı sınırlamalar;
    - İstenilen minimum akma dayanımı
    - Kabul edilebilir maksimum akma/ çekme dayanım oranı
    - İstenilen süneklik
    - Kaynak edilebilirliğe bağlı olan maksimum karbon içeriği
    - Haddehanenin dizayn ve hızına bağlı olarak, maksimum soğutma süresi
    - Suyun ulaşılabilir basınç ve debisi
  - 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 mangan bileşiminin artmasıyla akma dayanımında artış sağlanabilir [7].

- 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.

### **2.3.3. Tempcore Betonarme Çelik Çubuklarının Mekanik Özellikleri**

#### **2.3.3.1. Kaynaklanabilirlik Özelliği**

Karbon içeriğinin az olması ve karbon eşdeğerinin düşük olması sebebiyle Tempcore tüm alışıl gelmiş yöntemlerle kaynak edilebilme özelliğine sahiptir. Tempcore prosesine göre işlem gören çubukların bütün alın kaynak testleri tatmin edici sonuçlar vermiştir [2].

#### **2.3.3.2. İleri-Geri Eğme Özelliği**

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 eğmedeli deformasyon yüzünden oluşan süneklik kaybı, eğer çubuklar yeterli kadar sünek değilse geri eğme operasyonu esnasında kırılmaya sebep olabilir.

#### **2.3.3.3. Eğme Özelliği**

Tempcore'un güçlü dış kabuğu ve mükemmel sünek çekirdeği eğilebilir bir betonarme çubuk üretimine olanak verir. Bu özellik, Tempcore çubuklarının küçük mandrel 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 [2].

#### **2.3.3.4. Düşük Sıcaklıklarda Tokluk Özelliği**

Tempcore betonarme çubukları düşük sıcaklıkta mükemmel tokluk gösterirler. Tempcore betonarme 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 kullanıma son derece elverişlidir [2].

#### 2.3.4. Nervürlü Betonarme Çeliklerinin Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Tempcore prosesinin diğer üretim yöntemleriyle karşılaştırılması tablo 2 'de verilmektedir. Betonarme çubuklarının kullanıcıları tarafından talep edilen akma ve çekme dayanımı, süneklilik 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 süneklilik ve kaynaklanabilirlik açısından zararlıdır. Mikroalaşım ilavesi veya ayrıca soğuk deformasyon uygulaması üretim maliyetini oldukça arttıracaktır. Tempcore prosesi hem teknik hem de ekonomik açıdan bu olumsuzlukları dengelemektedir [10]. Daha önce belirtildiği gibi nervürlü betonarme çeliklerinin mekanik özelliklerini geliştirmenin üç yolu bulunmaktadır. Ancak Tempcore prosesi dışındaki yöntemler, maliyetleri oldukça yükseltmektedir.

Çizelge 2.2. Nervürlü betonarme çelik üretim yöntemlerinin karşılaştırılması [11].

Üretim prosesi	Yüksek dayanım elde etmenin yolları	Üretim masrafları	Proses özellikleri	
			Süneklilik	Kaynaklanabilirlik
Mikro alaşımlama	Alaşım elementleri ilavesi(C, Si, Cr, V, Nb)	Pahalı alaşım elementleri maliyeti yüksektir	İyi süneklilik, yüksek dayanım	C eşdeğerinin artışıyla kötüleşir
Soğuk şekillendirme	Burma, soğuk çekme	Pahalı, sistem teçhizat maliyeti yüksektir	Azalma olur	Kaynak sırasındaki oluşan ısıdan dolayı azalma gözlenir
Tempcore	Haddeleme esnasında kontrollü soğurma ile ısı işlem	Çok ekonomik, çalışma maliyeti düşük	Düşük sıcaklıklarda dahi mükemmel	Düşük C eşdeğerinde bile mükemmel

### 2.3.5. Tempcore Prosesinin Genel Değerlendirilmesi

- 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 [5,12,13].
- Tempcore beton çelik çubukların kesitlerinin kabuk ve merkez bölgesi farklı yapılara sahiptirler. Çeliklerin merkez bölgesindeki ferrit- perlit, kabuk bölgesi ise martensit yapıdadır. Sertlik değerleri de bu yapılara uygun değerlerdir.
- Tempcore beton çelikleri, benzer bileşimi 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 yapıları alanın yüzdesindeki artışlar çubuğun akma ve çekme dayanımını artırır, % uzama değerini azaltır.
- Çelik yüzeyindeki tuhaf miktarının az oluşu inşaat çeliğinin beton ile daha iyi tutunmasını sağlamaktadır. Klasik haddelenmiş çeliklerde tufal miktarı  $105 \text{ g/} m^2$  iken Tempcore çeliklerinde  $25 \text{ g/} m^2$  dir [11].
- 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 [6].

### 2.4. BETONARME ÇELİKLERİNE NERVÜR ÖZELLİĞİNİN ETKİSİ

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 profillendirilir. Bu noktada betonarma 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 % uzaman 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].

## BÖLÜM 3

### YORULMA

Uygulamada yani servis şartlarında malzemeler çoğunlukla statik olarak zorlanmaz. Makine ve ekipmanları genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli ya da düzensiz olarak sürekli değişen kuvvetlere maruz kalırlar. Bu yüklemelere çevrimli yükleme adı verilir [14].

Çevrimli yüklemelere maruz kalan malzemelerde oluşan gerilmeler akma mukavemetlerinin altında olsa bile belli bir çevrim sayısını aştıktan sonra yüzeyde bir çatlak oluştururlar. Çatlağın ilerlemesi neticesinde de malzeme hasar görür. Yorulma adı verilen bu olay ilk olarak 1829 yılında W.A.S. Alber tarafından, demir zincirler üzerine tekrar eden yükler uygulanarak, incelenmiştir. Servis şartlarında gözlenen ilk yorulma kırılmaları araba ve tren akslarında meydana gelmiştir. 19. Yüzyılda demiryolu sistemlerinin gelişmesiyle de akslarda meydana gelen bu kırılmaların incelenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Akma noktasının altında fakat tekrarlı yüklemelerle çalışan bu parçaların kırılma şartları laboratuvar ortamında yeniden canlandırılmış ve sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır [15].

1852 ve 1870 yılları arasında Alman demir yolları mühendisi August Wöhler ilk sistematik yorulma incelemesini yapmıştır. Ağırlıklı olarak demiryolu aksları üzerinde çalışan Wöhler, küçük miktarda eğilme, burulma ve radyal olarak tekrarlanan yükler uygulayarak bu malzemelerin davranışlarını kaydetti. Elde ettiği veriler neticesinde ismi ile de anılan S-N (gerilme-çevrim sayısı) eğrilerini oluşturdu. Bu eğriler sayesinde ilgili malzemenin ne kadar yük altında kaç çevrim yapabileceği öğrenilmiştir [15].

Geçen zaman içerisinde yorulma konusu önem kazanmaya devam etmiş, gerek servis gerekse laboratuvar şartlarında yapılan incelemelerle sebep sonuç ilişkileri kurulmaya çalışılmıştır. Geliştirilen dislokasyon teorileri ile yeni yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Bununla beraber teknolojik ilerlemeler sayesinde inceleme ve veri toplama hassasiyeti artmış ve güvenilir sonuçlar ortaya çıkmıştır. Son olarak kırılma mekaniği fikri, farklı şartlarda çalışan malzemelerin ömürlerini hesaplamada temel olmakla beraber çatlakların oluşumu ve ilerlemesi konusunda da aydınlatıcı olmuştur [15].

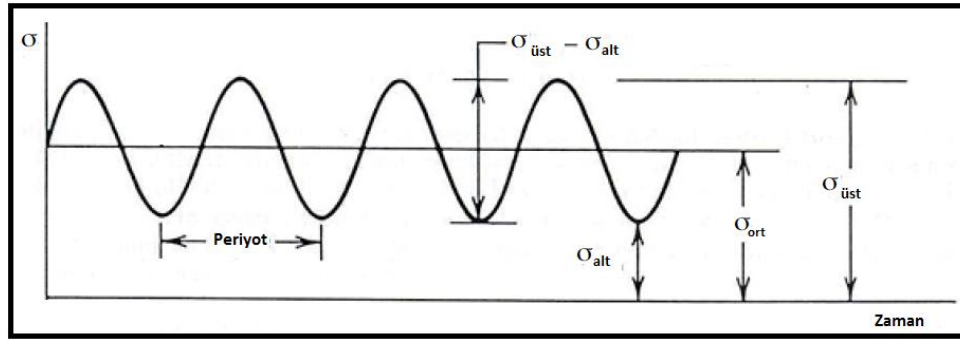
Mühendislikte deformasyon sebeplerinin en yaygın olanı yorulmadır. Çekme, basma, sürünme ve kırılma testlerinde yüklemeler statik ya da sürekli artan kuvvetler şeklindedir. Yorulma yüklemeleri ise; ileri-geri kuvvet değişimi, açık-kapalı basınç değişimine benzer yüklemelerdir. Yorulmaya sadece dışarıdan etki eden kuvvetler sebep olmaz. Isıl genleşme ve büzülme neticesinde oluşan gerilmelerde yorulma hasarına sebep olabilir. Bu olaya da termal yorgunluk adı verilir. Yorulma olayında hasar bir çatlak sonucu oluşur. Bu çatlak da yüzeydeki bir süreksizlikten kaynaklanır. Yüzeyde pürüz, çentik, çizik, kılcal çatlak ya da ani bir kesit değişimi yorulma çatlağının oluşumu için yeterlidir [15].

### **3.1. YORULMANIN TANIMI**

Yorulma hasarı çevrimsel gerilme, çekme gerilmesi ve plastik deformasyon gibi eş zamanlı hareketlerden kaynaklanmaktadır. Çevrimsel gerilmeden kaynaklanan plastik deformasyon etkisiyle enine çatlaklar çekirdeklenmeye başlar. Yorulma sırasında yavaş bir şekilde mikro çatlaklar haline gelir. Çekme gerilmesi çatlak büyümesine ve yayılmasına destek olur. Çıplak gözle görülebilecek makro çatlaklar oluşuna kadar bu dönüşüm devam eder. Bir mikro çatlak kritik boyuta ulaştığında kararsız hale gelir. Sonuçta numunenin kırılması felaketle sonuçlanabilir. Basma gerilmeleri yorulmaya sebep olmamakla birlikte, basma yükleri lokal çekme gerilmeleri oluşturabilir [16].

### 3.2. YORULMA OLAYINDA ÇEVİRİMLİ YÜKLEME

- Malzemelere etkiyen yükleri zamanın fonksiyonu olarak üç grupta inceleyebiliriz. Bunlar; sürekli artan yükler, statik yükler ve dinamik yüklerdir.
- Sürekli artan yükler; malzeme muayenelerinde rastlanabilecek yükleme şeklidir. Çekme veya basma deneyi sırasında numuneye sıfırdan itibaren artan bir yük uygulanır ve kopma gerçekleştiğinde yük kaldırılır.
- Statik yükler; zamana göre değeri değişmeyen yüklerdir. Uygulanan yük malzemenin akma mukavemetinin altında ise hasar görmeyecektir. Üstünde ise plastik deformasyona ya da kopmaya sebep olacaktır.
- Dinamik yükler; değeri zamana göre değişen yüklerdir. Yorulmaya sebep olan dinamik yükler çoğunlukla periyodiktir. Mesela; bir taşıt mili taşıtın ağırlığından dolayı eğilmeye zorlanır [14].



Şekil 3.1. Dinamik yüklemeye göre yükün zamana göre değişimi [15].

### 3.3. YORULMA ÇATLAĞI

Yorulma genellikle içyapıda oluşan kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılmalarından kaynaklanır. Bundan dolayı yorulma olayı içyapıya çok bağlıdır. İçyapıda 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 çıkıntılarının 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 [17].

### **3.4. YORULMA KIRIK YÜZEYİ**

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 [17].

### **3.5. YORULMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER**

Yorulma olayının mekanizması hayli karışık olduğundan ve hala tam olarak çözülemeyen konuları olduğundan aynı gerilme genliklerinde bile farklı çevrim sayılarında kırılmalar olabilir. Buradan da görüleceği gibi, malzeme özelliklerinden çalıştığı ortama kadar, yorulma olayına etki eden birçok faktör söz konusudur [14].

#### **3.5.1. Malzemenin Çekme Mukavemeti**

Genellikle malzemelerin çekme mukavemetleri arttıkça yorulma dayanımları da artar. Mesela demir alaşımları ve titanyum alaşımlarında arayer atomu halindeki alaşım elementleri çekme mukavemetini artırarak yorulma dayanımı da artırır. Sadece yorulma dayanımını artıran bir aşım elementi mevcut değildir [20].

Malzemelerin çekme mukavemetlerini artıran tüm işlemler aynı zamanda yorulma dayanımına da artırır. Özellikle uygun su verme ve menevişleme neticesinde sertliği

ve çekme mukavemeti artan çeliklerin yorulma dayanımları da artar. Alaşım elementleri ile su alma derinlikleri artan çeliklerde de ısıl işlem neticesinde yorulma dayanımında artış görülmektedir. Sünek malzemelerin son mekanik işlemleri, inklüzyon, segregasyon gibi çekme mukavemetini düşüren olumsuzlukların giderilmesi de yorulma dayanımını artırır. Kısacası malzemenin mekanik mukavemet değerlerini artıran işlemlerin hemen hepsi yorulma dayanımı da artırır [20].

### **3.5.2. Çentik Etkisi**

Yorulma kırılmaları her zaman gerilmelerin yoğun olduğu noktalardan başlar. Parça kesitinde çentik, delik, kama kanalı, ani kesit değişimleri gibi durumlar gerilme yığılmalarına sebep olduğu için yorulma dayanımını düşürür. Ayrıca malzemeler üretilirken yüzeylerinde oluşan pürüzlerde çentik etkisi oluşturabilir. Bunu önlemek için malzemeler ana çekme gerilmesi yönünde taşlanırlar. Çizikler gerilme eksenine paralel olduğunda gerilme dayanımı en yüksek değere ulaşır [14].

### **3.5.3. Korozyon Etkisi**

Malzemenin yorulma zorlamasına maruz kalırken korozyona uğramasına “korozyonlu yorulma” adı verilir. Korozyon malzeme yüzeyinde oyuklar ya da çukurlar oluşmasına sebep olur. Oluşan çukurlar da çentik etkisi oluşturarak yorulma dayanımını düşürür. Korozyon ortamda yapılan yorulma deneylerinde frekans da önem kazanır. Düşük frekanslarda yapılan deneylerde süre artacağı için korozyon ortam çatlak içerisinde de etki gösterir. Böylece yorulma dayanımını düşürür [20].

Vakum altında yapılan deneylerde malzemeler, normal deneylere göre daha büyük yorulma dayanımı sergiler. Korozyon etkisi oluşturacak gazların çok küçük miktarları bile sonucu oldukça fazla etkiler. Sulu çözeltilerde yapılan deneylerde ise Wöhler eğrilerinin daha aşağıya indiği görülmüştür [14].

#### **3.5.4. Yükleme Şeklinin Etkisi**

Yorulma olayında aksenal, eğilme ve burulma olmak üzere üç temel yükleme vardır. Tam değişken aksenal yorulma ile saptanan yorulma dayanımı eğilme ile saptanan değerlerin % 85'i kadardır. Tam değişken burulmada ise bu değer % 58'dir. Bu nedenle test edilecek parça servis şartlarında ne tür yüklemelere maruz kalacaksa ona göre yükleme biçimi seçilmelidir. Parçaların tek tip yüklemelere maruz kalmadığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle ilgili parçaların servis şartlarında nasıl yüklemelere maruz kaldığı kaydedilip teknolojik yorulma cihazlarında testler yapılabilir [14].

#### **3.5.5. Frekans Etkisi**

Metallerde 104 tekrar/dakikaya kadar ısınma meydana gelmediğinden frekansın bir etkisi yoktur. Plastik malzemelerde ise 10 Hz civarındaki çevrimlerde bile ısınma meydana geldiğinden frekans oldukça düşük tutulmalıdır [14].

#### **3.5.6. Boyut Etkisi**

Eğilme ve burulma şeklindeki yüklemeler parça kesitinde uniform olmayan gerilemelere neden olduğundan, parça boyutunun artması yorulma dayanımını olumsuz etkiler.

#### **3.5.7. Sıcaklık Etkisi**

Oda sıcaklığının altındaki deneylerde sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artar. Ancak oda sıcaklığının altındaki değerlerde malzemelerin çentik hassasiyeti artmaktadır. -200 °C ve -400 °C aralığında yorulma dayanımında fark edilir bir artış meydana gelir [14]. 2000 °C'ye kadar sıcaklığın bir etkisi yoktur. Düşük karbonlu çeliklerde 200-3000 °C aralığında yorulma dayanımında artış görülür. Bu etkinin nedeni düşük karbonlu çeliklerin bu sıcaklıklarda deformasyon yaşlanmasına uğrayarak çekme mukavemetinin artmasıdır. Bunun haricindeki durumlarda yorulma dayanımı düşer [20].

Deney sıcaklığı belirli bir değerin üstüne çıktığında yorulmadan ziyade sürünme devreye girer. Kopma, yorulmadan çok sürünmeden kaynaklanır. İki olay arasındaki fark kırılma türleridir. Yorulmada kırılma tane içinde, sürünmede ise taneler arasındadır [20]. Makine elemanlarının kullanım esnasında sıcaklık değişmelerine maruz kalmaları ısıl gerilmelere yol açarak malzemede yorulmaya neden olabilir. Bir defalık ısıl değişimler bile malzemede çatlama yol açabilir. Buna “termal şok” adı verilir. Çatlak birkaç ısıl değişim neticesinde oluşursa buna “termal yorulma” adı verilir. Isıl genleşme katsayısı büyük olan malzemeler termal yorulmaya karşı son derece hassastır [20].

### **3.5.8. Gerilme Genliğinin Etkisi**

Gerilme genliği yorulma olayında birinci derece değişkendir. Gerilme genliğindeki en ufak bir değişim yorulma ömrü üzerinde büyük değişimlere sebep olur [20].

### **3.5.9. Yüzey İşlemlerinin Etkisi**

Yüzeyde sertleştirme işlemi uygulandığında yorulma dayanımında artış görülmektedir. Fakat bu işlem tüm yüzeye uygulanmalıdır. Aksi halde kesişim noktasından çatlak oluşabilir. Nitrasyonla yüzey sertleştirilmesi sonucunda eğme yorulması % 20-35 aralığında iyileşme görülür [14]. Yüzeyin bilyalanarak dövülmesi neticesinde oluşan artık basma gerilmeleri yorulma dayanımını % 27-33 aralığında artırır. Haddelme ile yüzeye basınç uygulanması da yorulma dayanımına % 10-25 aralığında katkı sağlar [14]. Yüzeye yapılan krom kaplama işlemi ise aşınma ve korozyona karşı koruma sağlarken yorulmaya karşı aynı etkiyi oluşturamaz. Metal püskürtme işlemi yüzeyde küçük boşluklar ve tabakalar meydana getirdiğinden yorulma dayanımını düşürür. Mesela metal püskürtme yolu ile kaplanmış Al-Cu-Mg alaşımlarının yorulma dayanımları % 14 oranında düşmektedir [14].

### **3.6. MANYETİK REZONANS CİHAZIYLA TEMPCORE SİSTEMİYLE ÜRETİLMİŞ NERVÜRLÜ BETONARME ÇELİKLERİNİN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Test cihazı, bünyesindeki mıknatıslar sayesinde her bir numunenin hangi yükte, ne kadar manyetik rezonans dalgasına maruz kaldığını kaydederek yorulma testini gerçekleştirmektedir. Yorulma deneyleri sonunda test edilen yapı çeliklerinin sonuç çapları ölçülmüş ve numunenin kesit görüntüsü optik ışık mikroskobunda incelenmiştir. Kırılmış olan numune yorulma mekanizmasını belirlemek için stereo mikroskop altında analiz edilmiştir.

### **3.7. YORULMA HASARININ ÖNLENMESİ**

Uygulamada kullanılan birçok 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 [19].

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, ısıl işlem, 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 pürüzlüğü ve kalıntı gerilmeler gibi yüzey koşullarından da etkilenmektedir.

## **BÖLÜM 4**

### **DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu çalışmanın amacı; Tempcore'lu S420 kalitesindeki nervürlü yapı çeliklerinin servis şartlarındaki mekanik özelliklerinin deprem yönetmeliğinde belirtilen değerlere uygun olup olmadığını ve yorulma davranışlarını mukayese etmektir. Deneysel çalışmalar için deprem yönetmeliğinde TS 708 2010 standardı uyarınca mikro yapı karakterizasyonu, sertlik taraması ve çekme testleri yapılmıştır. Manyetik rezonans cihazıyla yorulma testleri gerçekleştirilmiştir.

#### **4.1. NUMUNE HAZIRLAMA**

Bu çalışmada 12 mm çapında Tempcore ısıl işlemi uygulanmış S420 kalitesinde nervürlü yapı çelikleri Kardemir AŞ firmasından temin edilmiştir.

Sağlanan mikro yapı S420 kalite nervürlü çeliğin incelenmesi ve sertlik ölçümü için sulu numune kesme cihazıyla 30 mm uzunluğunda 8 adet numune kesilmiş ve ardından bakalite alınmıştır.

Çekme deneyinde kullanılmak üzere 400 mm uzunluğunda 3 adet çekme numunesi hazırlanırken yorulma deneyi için 600 mm uzunluğunda kesilen nervürlü çubukların baş kısımları demir + reçine karışımıyla 25 mm çapında kalıplanmaktadır. Burada amaç nervürlü çubukların yorulma test cihazı çeneleri tarafından dengeli bir şekilde kavranmasıdır.

## 4.2. MİKRO YAPI İNCELEMESİ

Mikro yapı çalışmaları; standart metalografi prosedürleri uygulandıktan sonra optik mikroskopta yapılmıştır. İncelenecek numuneler diskatonda kesme, bakalite alma, zımparalama (240 grit- 1200 grit kadar) ardından sırasıyla 9 µm, 3 µm ve 1 µm keçeler kullanılarak Şekil 4.1' deki Mikro Test Otomatik Parlatma Ve Zımparalama Cihazı ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler % 2 Nital ile dağlandıktan sonra Şekil 4.2'deki Lecia marka DMILM model optik ışık mikroskobunda incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir.



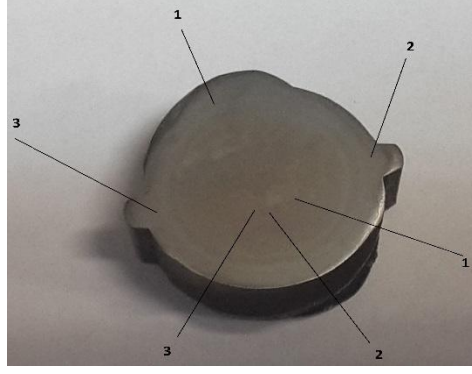
Şekil 4.1. Mikro test otomatik parlatma ve zımparalama cihazı.



Şekil 4.2. Lecia marka DMILM model optik ışık mikroskobu.

## 4.3. SERTLİK

Tempcore ısıl işlemleri uygulanmış S420 nervürlü betonarme çeliklerinin kesitlerinden Şekil 4.3' de gösterilen sertlik taramaları yapılmıştır. Standartta uygun olarak 10 saniye süreyle ve 10 N yük altında sertlik taramalarının yapıldığı Schimadzu Marka HMV Model Mikro Sertlik Cihazı Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Sertlik değerlerinin alındığı bölgeler.



Şekil 4.4. Schimadzu marka HMV model mikro sertlik cihazı.

#### 4.4. ÇEKME DENEYLERİ

Çekme testi için kullanılacak numuneler Şekil 4.5' de görülen Zwick/Roell SP1200 çekme testi cihazı ile yapılmaktadır.





Şekil 4.5. Zwick/Roell SP 1200 çekme cihazı.

#### **4.5. MANYETİK REZONANS İLE YORULMA DENEYİ**

Yorulma testleri Şekil 4.6'da verilen ZWICK/ROELL Amsler 500 HFP 5100 manyetik rezonans yorulma test cihazıyla EN 15630/2002 standardına göre yapılmıştır. Yorulma testlerinde numunelere statik olarak  $F_{o_{max}}$  yükü 34,1- 85,74 kN aralığında yüklenmiştir. Statik olarak yüklenen min / max yüklerinin oranı yaklaşık olarak 0,41 olarak belirlenmiştir. Her bir test sonrası manyetik rezonans cihazı, frekans-çevrim sayısı (yük değişimi) grafikleri vermektedir. Test sırasında kırılan numunenin kırık yüzeyi stereo mikroskopta incelenmiştir.



Şekil 4.6. ZWICK/ROELL Amsler 500 HFP 5100 manyetik rezonans yorulma cihazı.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

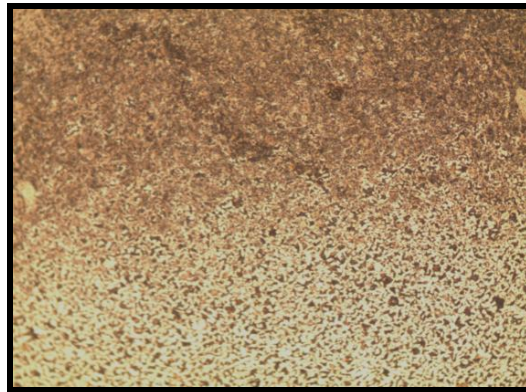
TSE- 780 standardına göre S420 kalite Tempcore prosesine tabi tutulmuş nervürlü betonarme çeliklerinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 S420 Tempcore'lu yapı çeliğinin kimyasal bileşimi.

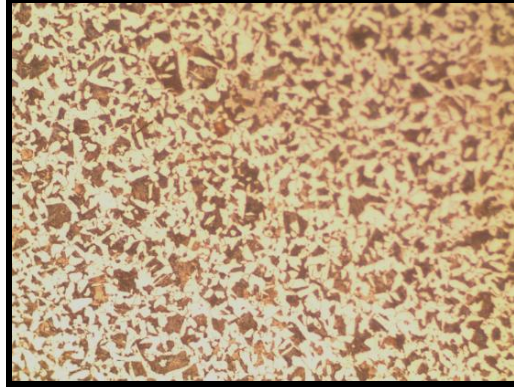
S420	C	Mn	Si	S	P	N (ppm)	Cu	Ceq
	0,33	0.62	0,17	0,036	0,016	60	0,055	0,428

#### 5.1. MIKROYAPI ÇALIŞMASI

Deneylerde kullanılan 12 mm Tempcore işlemine tabi tutulmuş S420 kalitesinde nervürlü çelik çubuklarının mikro yapısı Şekil 5.1 ve 5.2 'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Tempcore işlemine tabi tutulmuş S 420 kalite nervürlü çeliğin dış yüzey (10X) mikroyapısı.

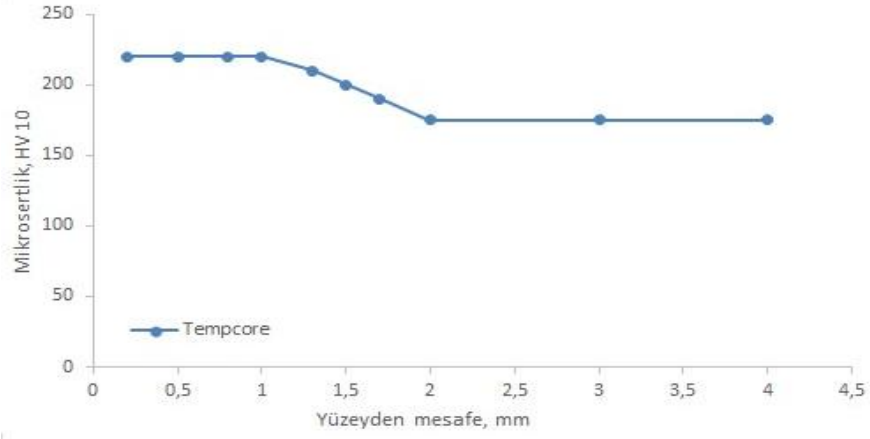


Şekil 5.2. Tempcore işlemine tabi tutulmuş S 420 kalite nervürlü çeliğin merkez bölgesinin (20X) mikroyapısı.

Tempcore prosesine göre üretilen nervürlü çelik çubuğun dış yüzeyinde temperlenmiş martensit mikro yapısı (Şekil 5.1a) mevcuttur. Burada temperlenmiş martensit yapısı homojen ve ince taneli bir yapı olup, malzemenin yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olmasını sağlayan en sert bölgesidir [21]. Şekil 5.1b' de gösterildiği gibi Tempcore prosesine göre üretilmiş numunenin merkez bölgesinde ise tamamen ferrit- perlitten oluşan yapıya genelde ferrit mikro yapısının hâkim olduğu görülmektedir. Tüm ısını dış yüzeye vererek yapıda bulunan östenitin tamamen ferrit ve perlit yapısına dönüştüğü, tane sınırlarının çok açık ve homojen bir tane oluşumunun gözlemlendiği bu yapının malzemenin mükemmel süneklik özelliği gösteren en yumuşak ve en geniş alana sahip olan bölgesidir [21].

## 5.2. MİKROSERTLİK ÇALIŞMASI

Standart parlatma işlemleriyle hazırlanan 12 mm çapındaki nervürlü yapı çeliğine 10N yük altında ve vickers ucu ile alınan mikro sertlik sonuçları Şekil 5,2'da verilmiştir. Tempcore prosesi ile üretilen nervürlü çelik çubukta en dış yüzeyden merkeze kadar yapılan sertlik taramasında mikro sertlik 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 bölgeler karşılık gelmektedir. Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik çubukta ise mikro sertlik ölçüm sonuçları ferrit-perlit yapısının homojen dağılımına uygun olarak dış yüzeyden merkeze kadar hemen aynı değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. Tempcore prosesi uygulanmış numune yüzeyinden merkeze doğru ölçülen sertlik taraması.

### 5.3. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI

Çekme deneyi TS- 708 standardı esas alınarak yapılmış olup 40 cm uzunluğunda hazırlanmış 3 adet nervürlü çelik numune çekme testi, Zwick/Roell SP 1200 çekme cihazında yapılmıştır. Bağlanan numuneler dakikada 30 mm deney hızı, 2 N/mm<sup>2</sup> ön yük uygulanarak oda sıcaklığında çekilmiştir. Çekme deneyi sonucu elde edilen veriler Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

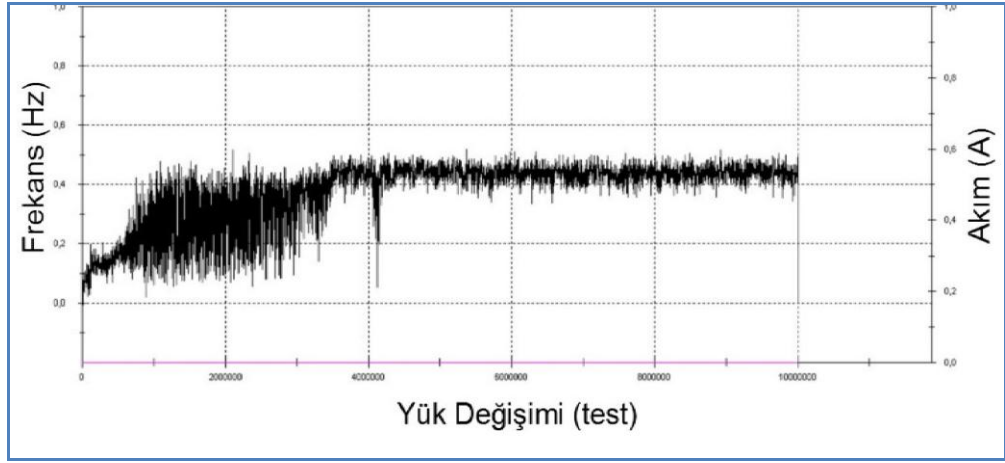
Çizelge 5.2. Çekme deneyi sonuçları.

Numune Çapı mm	Kesit Alanı mm <sup>2</sup>	L0 mm	S0 (mm <sup>2</sup> )	Rp 0,2 N/mm <sup>2</sup>	ReH N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A5(m) %
12	113,04	120	113	495	501,6	631,6	19,6

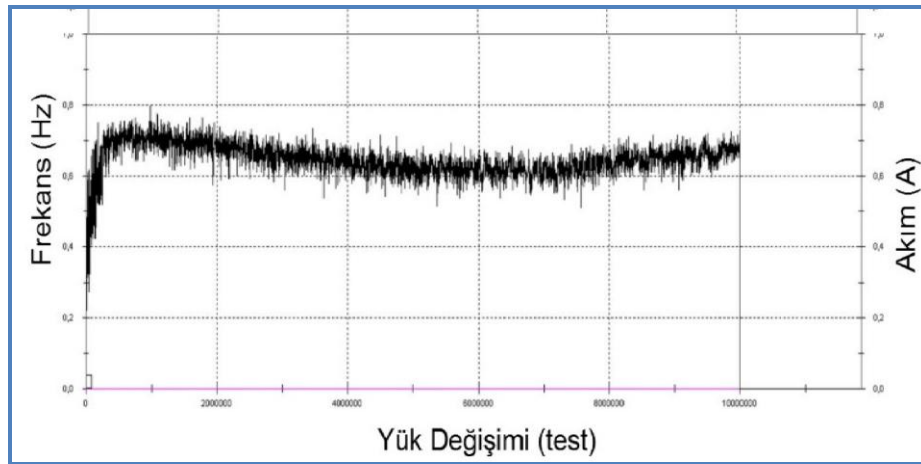
### 5.4. MANYETİK REZONANS İLE YORULMA DENEY SONUÇLARI

Şekil 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9’da uygulanan 24,12- 68,95 kN aralığında F<sub>max</sub> statik yükleri altında çevrim sayısına karşılık belirlenen frekans değerleri verilmiştir. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi max statik/dinamik yük miktarı arttıkça genel olarak frekans değişimi negatif değerlere kaymaktadır. Cihaz anlık 5 kN yük artışına karşılık kendine korumaya almaktadır ve testi durdurmaktadır. Bu durum numune içerisinde

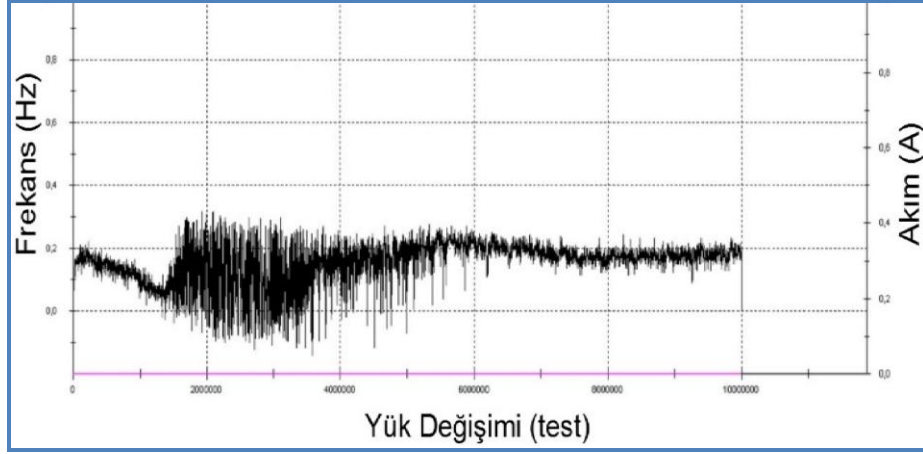
bir çatlağın veya bir inklüzyonun sebep olduğu gerilme yoğunlaşması sonucu ortaya çıkabilir. Bu çalışmada numunede kırılma veya  $10^7$  çevrime ulaşılmeden test bittiği için bu durumu gösteren numuneler iptal edilmiştir. Frekansın eksi değerlere düştüğü yükleme koşullarında numune hasara uğramaktadır. Çünkü negatif frekansa yol açan yükler incelenen malzemelerin akma mukavemetine oldukça yakın ve/veya üzerindedir. Şekil 5.7’de verilen 54 kN maksimum statik yük akma mukavemetinin bir miktar altında olmasından dolayı bu yük altında denen numune  $10^7$  çevrim sayısına kadar dayanırken, Şekil 5.8’de akma mukavemetinin üzerinde test edilip kopan nervürlü çeliğe ait frekans - çevrim sayısı grafiği görülmektedir.



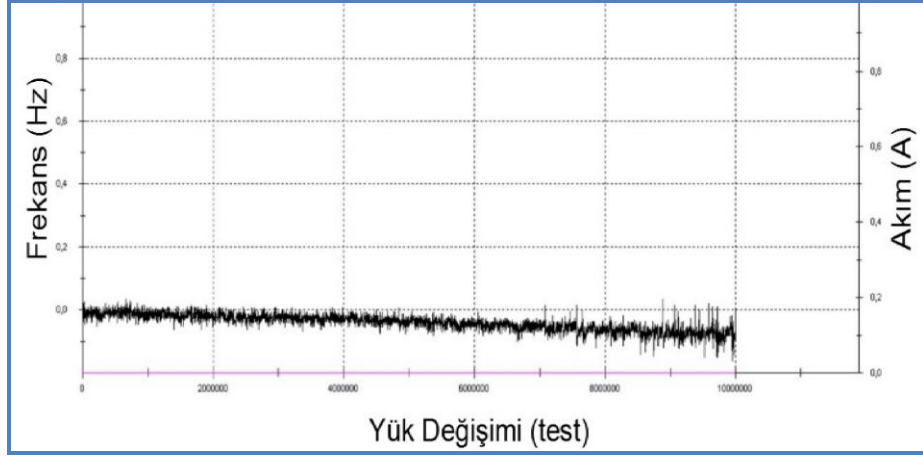
Şekil 5.4. Uygulanan 24,12 kN/10,03 kN  $F_{\max\text{statik}} / F_{\max\text{dinamik}}$  yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.



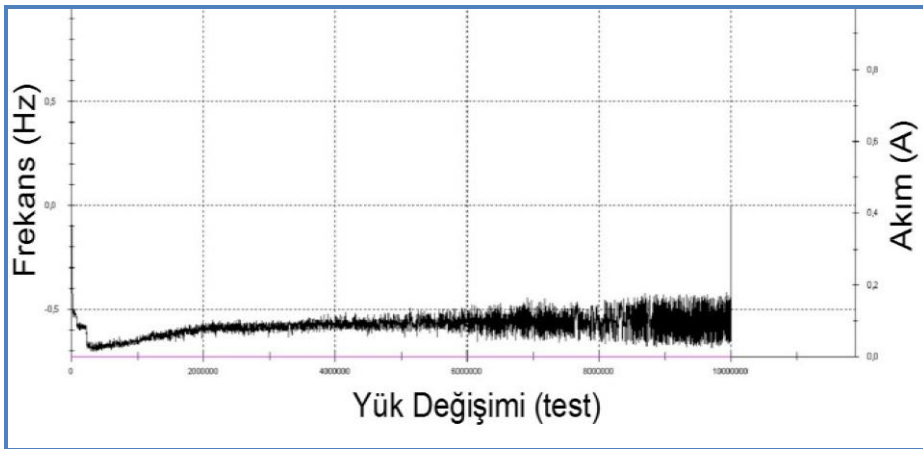
Şekil 5.5. 27,63 kN/11,42 kN  $F_{\max\text{statik}} / F_{\max\text{dinamik}}$  yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.



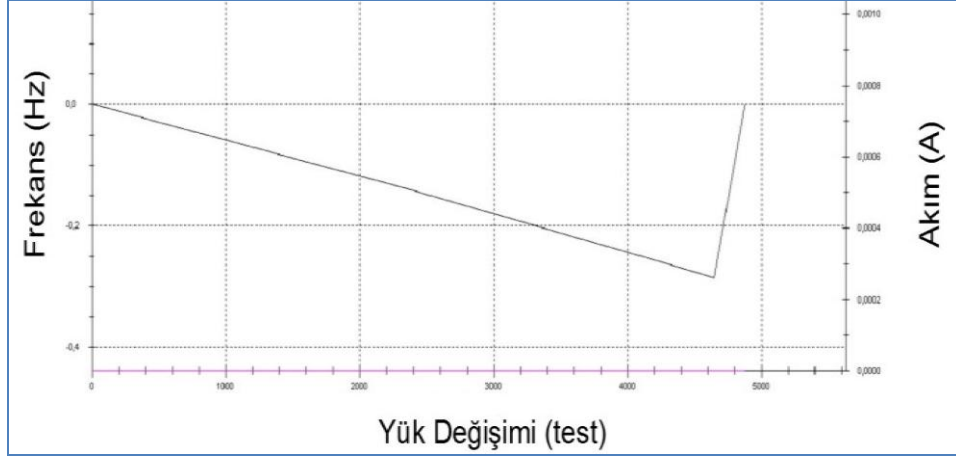
Şekil 5.6. 35,57/14,87kN  $F_{\max\text{statik}} / F_{\max\text{dinamik}}$  yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.



Şekil 5.7. 45,90/19,99 kN  $F_{\max\text{statik}} / F_{\max\text{dinamik}}$  yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.



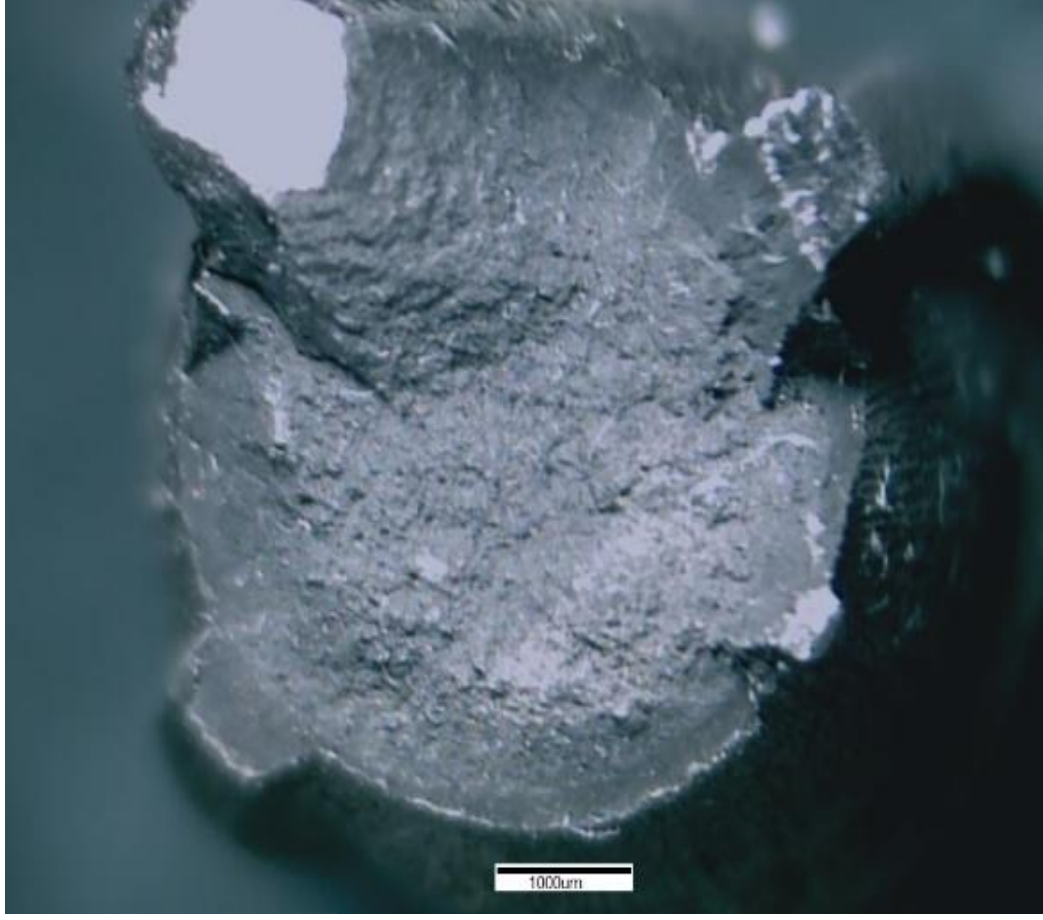
Şekil 5.8. 54,00/22,35 kN  $F_{\max\text{statik}} / F_{\max\text{dinamik}}$  yüklere karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.



Şekil 5.9. Uygulanan 68,99/29,35 kN olarak uygulanan sırasıyla  $F_{\max\text{statik}} / F_{\max\text{dinamik}}$  yüklerle karşılık manyetik rezonans frekansının değişimi.

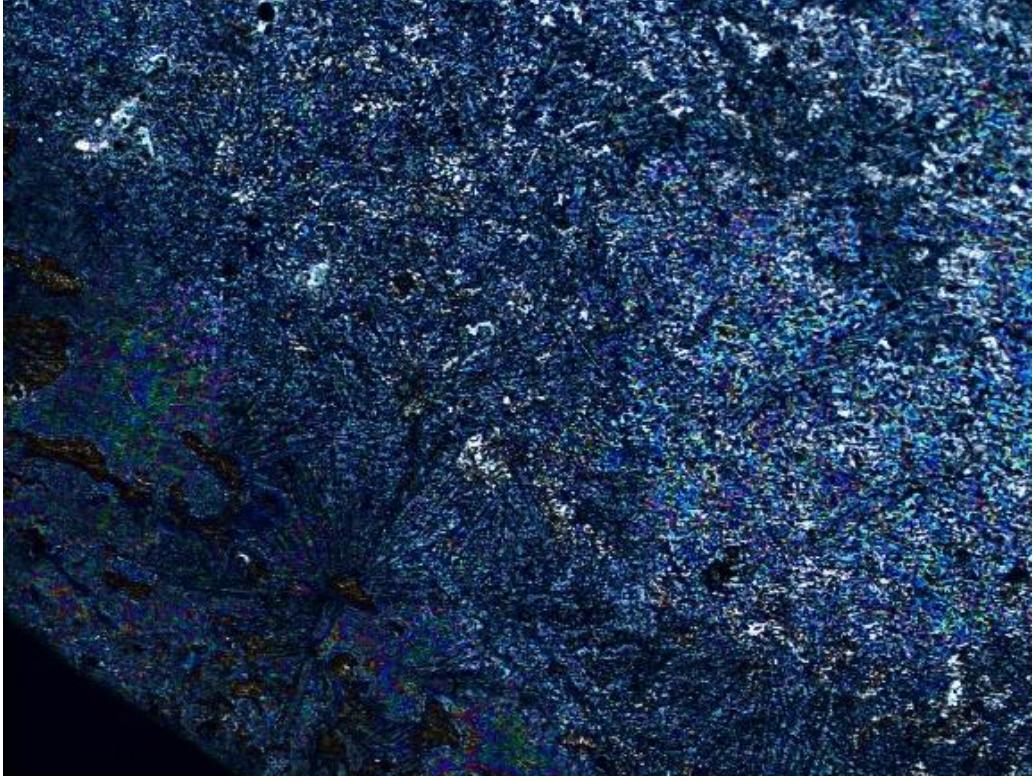
ZWICK/ROELL Amsler 500 HFP 5100 manyetik rezonans yorulma test cihazı statik max. yüke karşılık dinamik yük tayin etmektedir. İncelenen numuneye uygulanan dinamik yükler 10,03- 29,35 kN aralığında değişmektedir. Belirlenen max. statik 54000 N yük incelenen nervürlü çeliğin kesit alanına oranlandığında akma mukavemetine yaklaşmaktadır. Buna rağmen max. dinamik yükler akma mukavemetinin hemen hemen yarısı kadar değerlere ulaşmaktadır. Akma mukavemetinin üzerinde gerilmeye yol açan max. Yükün kullanılması halinde numunede yorulma hasarı meydana gelmiştir. Yorulma hasarına sebep olan gerilme akma mukavemetinin çok üzerinde olduğundan yorulma hasarı kesitte büzülmeyle birlikte gerçekleşmiştir (Şekil 5.5) 54000 N'dan düşük yükler altında gerçekleşen yorulma testi sonrası hasara uğramayan numunelerin kesit çapları yaklaşık %3 daralırken, bu yükün üzerindeki yüklerde çaptaki daralma yaklaşık %10'dur. Şekil 5.4.'de görüldüğü gibi kırık yüzey üzerinde büzülmenin yanı sıra uzamada meydana gelmiştir.



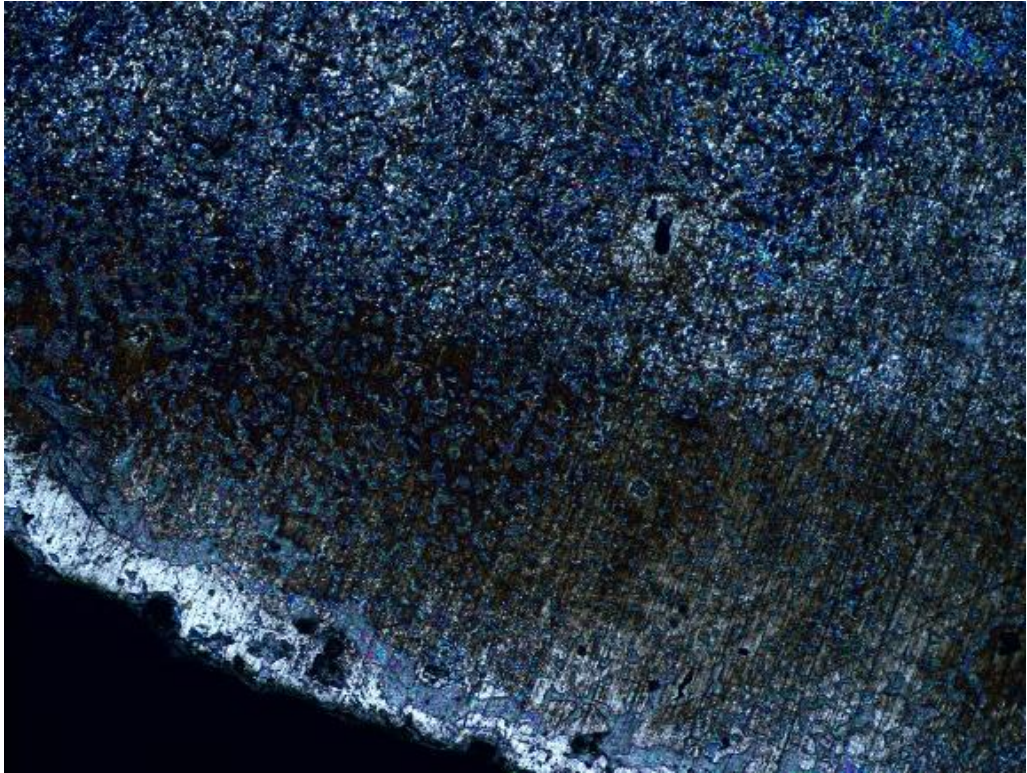


Şekil 5.10. İncelenen nervürlü yapı çeliğinin yorulma hasarının makro görünümü.

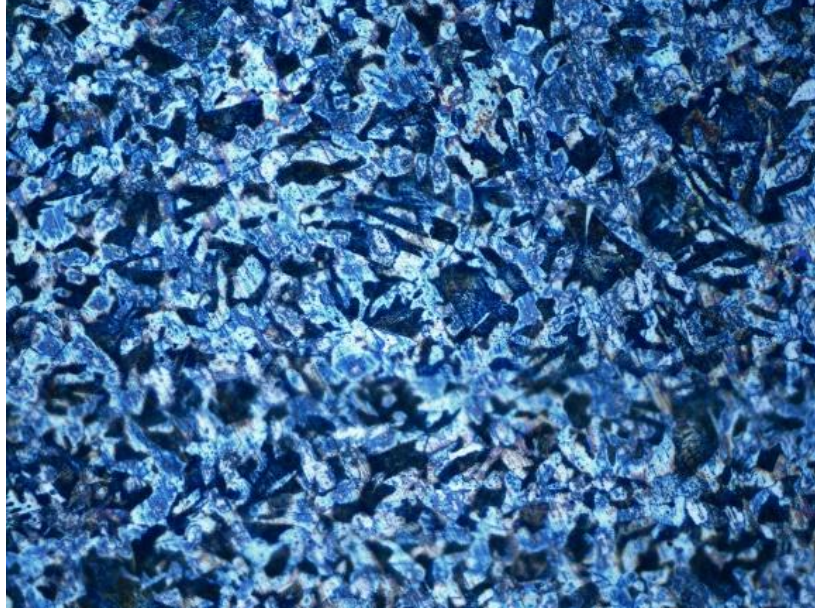
Manyetik rezonans yorulma testi sonrası sırasıyla düşük yüklerde ve yüksek yüklerde test edilen numunelerinin uzunlamasına orta noktasından metalografik numune kesilmiş, hazırlanan merkez ve kenara ait mikroyapı resimleri Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'de verilmiştir. Şekil 5.5'de manyetik rezonans test cihazıyla uygulanan tekrarlı yüklemelerle meydana gelen kesitteki daralma sonucunda Tempcore bölgesinde tane kabalaşması gözlenmiştir. Şekil 5.6.' de verilen mikroyapıda, kesitteki incelmeyle perlit tanelerinde plastik deformasyonun meydana geldiği görülmektedir.



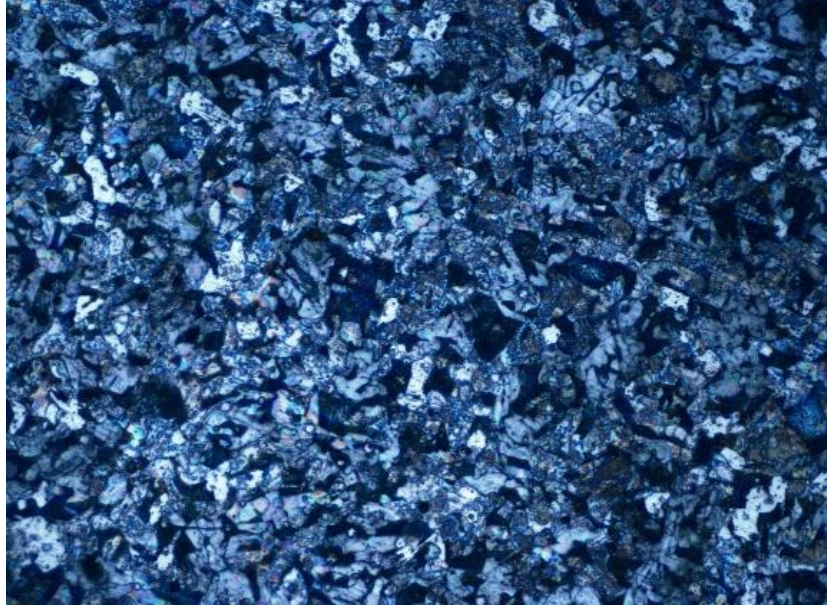
Şekil 5.11. S420 nervürlü yapı çeliğinin kenar bölgesinin düşük yüklerde (24,12 kN) test edilen nervürlü yapı çeliğinin kenar mikro yapı görüntüleri.



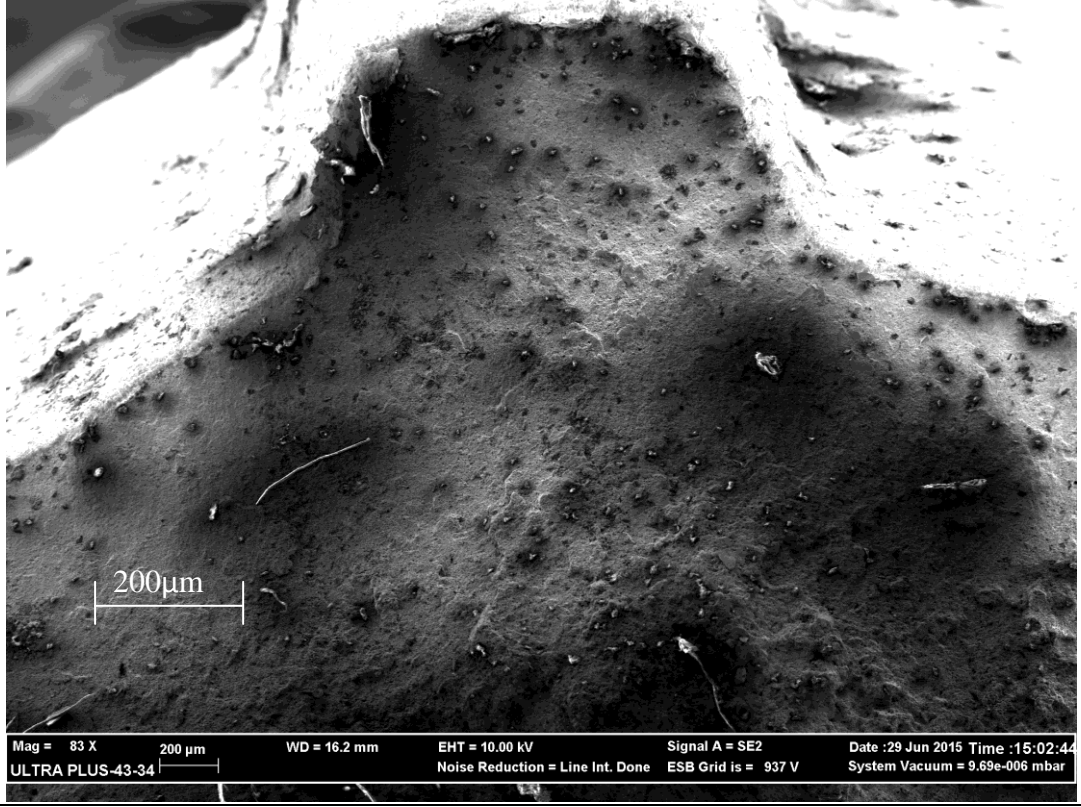
Şekil 5.12. S420 nervürlü yapı çeliğinin kenar bölgesinin yüksek yüklerde (68,99) test edilen nervürlü yapı çeliğinin kenar mikro yapı görüntüleri.



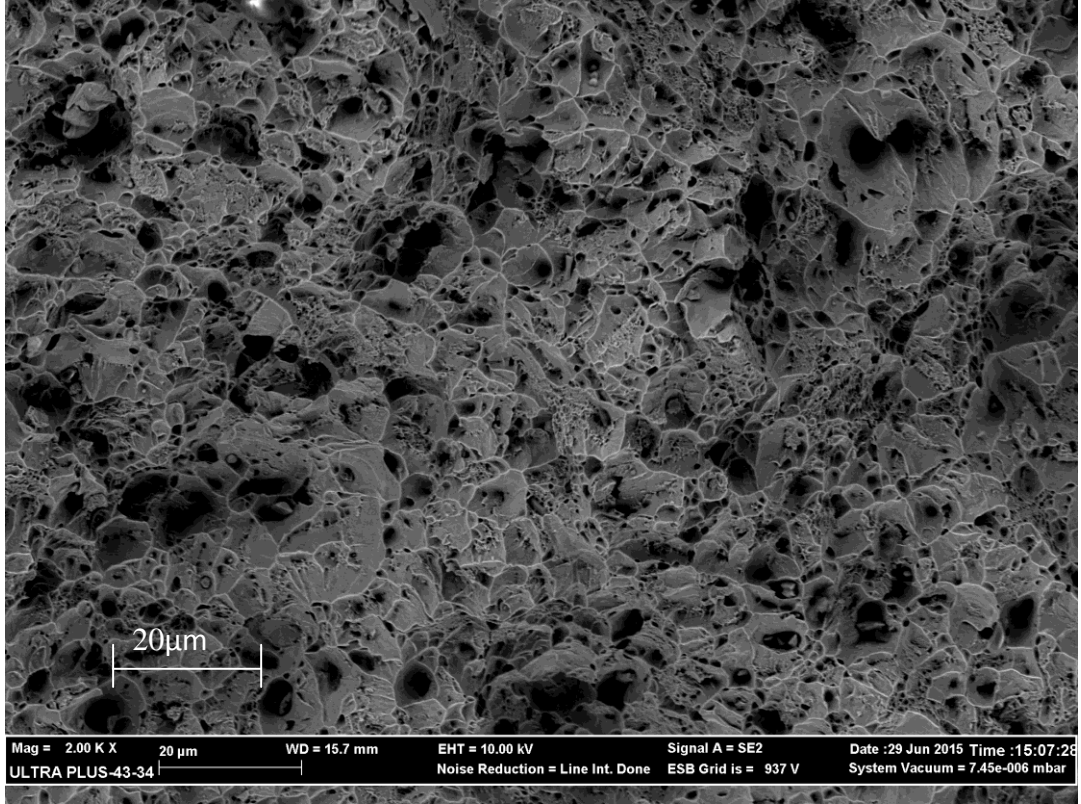
Şekil 5.13. S420 nervürlü yapı çeliğinin dış yüzeyine ait düşük yüklerde (24,12 kN) test edilen nervürlü yapı çeliğinin merkez mikro yapı görüntüleri.



Şekil 5.14. S420 nervürlü yapı çeliğinin dış yüzeyine ait düşük yüklerde yüksek yüklerde (68,99kN) test edilen nervürlü yapı çeliğinin merkez mikro yapı görüntüleri.



Şekil 5.15. Kırık numunenin yüzeyine ait SEM görüntüsü.



Şekil 5.16. Kırık numunenin 2000X büyütme ile orta merkezine ait SEM görüntüsü.

## BÖLÜM 6

### GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Tempcore ısıtıl işlemi uygulanmış S420 nervürlü betonarme çeliğinin mikroyapı ve manyetik rezonans yorulma davranışı incelenmiştir.

Bu çalışma sonucunda;

1. Manyetik rezonans test cihazında çevrim sayısına göre uygulanan yük değişimleri incelendiğinde akma mukavemetinin üzerine çıktığımız statik yüklerde malzeme hasara uğramıştır.
2. Manyetik rezonans test cihazıyla yapılan deneylerde akma yükünün üzerine çıkıldığı durumlarda frekans değişimleri negatif (-) değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Akma mukavemetine yakın veya bir miktar altında olan yüklerde ise numune  $10^7$  çevrim sayısına dayanmıştır.
3. Plastik deformasyona uğrayan numunenin %10 büzülerek fraksiyona uğraması netice olarak plastik deformasyondan önce sünek davranış sergilediğini göstermektedir.
4. Tempcore ısıtıl işlemine tabi tutulan malzemelerin yüzey ve merkez yapıları incelenerek kıyaslandığında temperlenmiş martensit nihayetinde ferrit ve perlit tanelerinin dağılımı ve konfigürasyonuna bakarak EAF'ında hurdadan ergitilerek üretimi yapılan Tempcore ısıtıl işlemine tabi yapı çeliği ile sıvı ham demirden üretimi yapılan Tempcore ısıtıl işlemi uygulanmış betonarme yapı çeliği arasında yorulma dayanımı bakımında farklılıklar olması beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Kığılı, E., “Üretim parametrelerinin beton çeliklerinin özelliklerine etkisi”, *İ.T.Ü. Araştırma Fonu Projesi*, 1,2 (2003).
2. Uysal, A., “Beton çelik çubuklarının çevrimsel deformasyon davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 256-258 (2002).
3. İ.D.Ç., “İsdemir Tempcore Eğitim Notları”, *İ.D.Ç.*, İskenderun, 55-57 (1997).
4. Şeşen, K., “Özel çelikler ders notları”, *İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, 120-122 (1999).
5. Simon, P., Economopoulos, M. and Nilles, P., “Tempcore, an economical process for the production”, *Metalurgical Plant And Technology*, 3 (84): 80-93 (1984).
6. Devrim, E., “İzmir Demir Çelik Sanayi A.Ş. Eğitim Notları”, *İzmir Demir Çelik Sanayi A.Ş.*, İzmir, 89-92 (2000).
7. Respen, Y., Lessel, G. and Steffes, G., “Application of the tempcore process to the fabrication of high yield strength concrete reinforcing bars”, *Economopoulos C.R.M.*, Belçika, 356-358 (1975).
8. Özçelik, S., “Mantarı sertleştirilmiş raylarda yorulma davranışı incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 67-69 (2013).
9. T.C., “Process Technology and Operating Instructions”, *The Tempcore Process*, 55,56,59,61 (1990).
10. Ammerling, W. J., “Bar and roll mills-influence of design parameters on economics and properties of rolled products”, *Metallurgical Plant And Technology*, 7 (1): 46-57 (1984).
11. Bakkaloğlu, A., “Tempcore prosesinin nervürlü beton çeliğinin mikro yapısı ve mekanik özelliklere etkisi”, *İstl İşlem Sempozyumu*, İstanbul, 114-117 (2001).
12. Simon, P., “Optimization of tempcore installations for rebars”, *Metalurgical Plant And Technology*, 2: 61-69 (1990).
13. Emir, N. ve Korkmaz, S., “Yüksek mukavemetli çelik çubuklarının üretimde tempcore prosesi”, *T.D.Ç.İ. İsdemir Eğitim Yayınları*, İskenderun, 105-107 (1988).

14. Taşkın, V., “Takım çeliklerinde çekme basma yorulma özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 88,89 (1996).
15. Özçelik, S., “Mantarı sertleştirilmiş raylarda yorulma davranışı incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul. 23-25 (2013).
16. Bernstein, M. L. and Zaimovsky, V. A., “Mechanical Properties of Metals”, *MIR Publishers*, Moskova, 89-91 (1983).
17. Dodd, L. L. and Restrepo-Posada, J. I., “Model for predicting cyclic of reinforcing steel”, *Journal of Structural Engineering*, 121 (3): 433-445 (1995).
18. Temiz, V. “Makina Elemanlarının Sürekli Mukavemete Göre Hesabı”, *Makine Elemanları*, 78-79 (1986).
19. Boardman, B. “Fatigue Resistance of Steels in Metal Handbook”, *ASM International*, 673-668 (1990).
20. Kayalı, E. S., Ensari, C. ve Dikeç, F., “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri”, *İTÜ Kimya Metalürji Fakültesi Ofset Atölyesi*, İstanbul (1990).
21. Coşar, İ., “Az alaşımlı karbon çeliği beton alaşımlarının sürtünme davranışları ve mikroyapısal karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2000).

## **ÖZGEÇMİŞ**

1976 yılında Karabük'te doğdu. İlköğrenimini aynı şehirde, ortaöğrenimini Antalya Lisesi'nde tamamladı. Askerlik görevini 2002 kısa dönem olarak yerine getirdi. Lisans öğrenimini İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde tamamladı. 2003 yılında KARDEMİR AŞ'de Kontinü Haddehane İşletme Mühendisi olarak göreve başladı. Halen aynı kısımda İşletme Başmühendisi olarak görev yapmakta olup evli ve bir çocuk babasıdır.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Yenişehir Mahallesi Göktürkler Caddesi 9/4 KARABÜK

Tel : 0 505 803 44 63

E-posta : okancelik@hotmail.com