KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI KARBON İÇERİKLİ ÇELİK FİLMAŞİNLERDEN ÜRETİLMİŞ TELLERDE KIRILMA MODLARININ İNCELENMESİ

EROL MEHMET MURADOĞLU

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI KARBON İÇERİKLİ ÇELİK FİLMAŞİNLERDEN ÜRETİLMİŞ TELLERDE KIRILMA MODLARININ İNCELENMESİ

EROL MEHMET MURADOĞLU

Prof. Dr. Ş. Hakan Atapek
Danışman, Kocaeli Üni. .....

Prof. Dr. M. Özgür Bora
Jüri Üyesi, Kocaeli Üni. .....

Dr. Öğr. Üyesi Serhat Acar
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üni. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 06.02.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Çokyaşar Holding firma bünyesinde maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Erol Mehmet MURADOĞLU

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisanüstü Tezlerin ElektroniOrtamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Erol Mehmet MURADOĞLU

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmama yön veren, bu yolda desteğini esirgemeyen ve her sorunda çözümleriyle ufkumu aydınlatarak bana yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Ş. Hakan Atapek'e içten ve sonsuz teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tezi, Çokyaşar Halat Makine Tel Galvanizleme A.Ş. bünyesinde yürütülen AR-GE çalışmaları kapsamında üretim prosesini irdelemek ve geliştirmek amaçlı belirlenen iş paketlerinin çıktılarını içermektedir. Bundan dolayı tez sürecinde, gerek hammaddenin (filmaşin) tedarik edilmesinde gerekse deneysel çalışmaların yürütülmesinde büyük katkısı olan Çokyaşar Halat Makine Tel Galvanizleme A.Ş. firmasına desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın firma bünyesinde gerçekleştirilmesine destekçi olan Genel Müdürümüz İbrahim Korkusuz'a, deneysel çalışmalarda katkısı olan Nur Yonar'a ve Yasin Aydın'a ve tez çalışma süreci boyunca katkıda bulunan üniversitedeki laboratuvar ekip arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana güç veren ve desteklerini bir an olsun esirgemeyen aileme sonsuz ve en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim. Son olarak sürekli arkamda olan, destekleyen eşim Merve Muradoğlu'na süreç boyunca sağladığı sürekli yardımları için teşekkür ederim.

Ocak - 2025 Erol Mehmet MURADOĞLU

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
2. ÇELİK ESASLI TELLER ÜZERİNE TEMEL YAKLAŞIMLAR 3
2.1. Çelik Tellerin Kullanım Alanları 3
2.2. Çelik Tellerin Sınıflandırılması 4
2.3. Çelik Tellerin Genel Metalurjik Özellikleri 6
3. ÇELİK TELLERİN ÜRETİMİ, METALURJİSİ VE KIRILMA DAVRANIŞI 8
3.1. Filmaşin Üretimi 8
3.2. Tel Çekme Öncesi Yüzey Hazırlama İşlemleri 12
3.3. Tel Çekme İşlemi 17
3.4. Çelik Teller Üzerine Fiziksel Metalurjik Yaklaşımlar 20
3.5. Çelik Tellerin Kırılma Davranışı 25
4. MALZEME VE YÖNTEM 31
4.1. Tedarik Edilen Filmaşinlerin Yapısal Özellikleri 31
4.2. Soğuk Tel Çekme İşlemleri 31
4.3. Mikroyapısal ve Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları 32
4.4. Fraktografik İnceleme Çalışmaları 33
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 34
5.1. Filmaşinlerin Yapısal Özelliklerinin Değerlendirilmesi 34
5.2. Çapı İndirgenmiş Tellerin Yapısal Özelliklerinin Değerlendirilmesi 39
5.3. Kopma Kesitleri Üzerine Mikroskobik İncelemeler 45
5.4. Kırılma Yüzeyleri Üzerine Fraktografik İncelemeler 48
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 52
KAYNAKLAR 54
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 58
ÖZGEÇMİŞ 59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Sürekli döküm prosesine özgü şematik bir akış görseli 9
Şekil 3.2. (a) Çelik esaslı malzemenin katılaşma yapısında bulunan refrakter esaslı partikül ve (b) deformasyon yükleri altında satırlanmış partiküller 9
Şekil 3.3. Metal/kalıntı arayüzeyinde çatlak çekirdeklenmesinin gösteren mikroskobik görüntüler 9
Şekil 3.4. Sürekli döküm sürecinde üretilen kütüklere ait makro bir görüntü 10
Şekil 3.5. Isıtılan kütüklerin fırından çıkışını gösteren makro bir görüntü 11
Şekil 3.6. Çelik esaslı silindirik parça yüzeyine tutunmuş oksitleri gösteren makro bir görüntü 12
Şekil 3.7. Çekme gerilmeleri altında yüzeye tutunmuş oksit tabakasının hasarlanması 13
Şekil 3.8. (a) Filmaşin yüzeyinde var olan oksit formlarını ve (b) asit ile etkileşim sonrası yüzeyin oksitlerden temizlenmesini gösteren mikroskop görüntüleri 14
Şekil 3.9. Düşük karbonlu bir çeliğin yüzeyinde bulunan fosfat tabakasını gösteren mikroyapılar 14
Şekil 3.10. Filmaşin yüzeylerinin tel fırça yardımıyla oksitlerden temizlenmesini gösteren makro görüntüler 15
Şekil 3.11. Filmaşin yüzeylerinin makaralı mekanik sıyırıcılar kullanılarak oksitlerden temizlenmesini gösteren makro görüntüler 16
Şekil 3.12. Mekanik sıyırıcılar kullanılarak kısmen oksitlerden temizlenmiş filmaşin yüzeylerini gösteren mikroskop görüntüleri 16
Şekil 3.13. Değişken püskürtme basınçları ile dövülmüş yüzeylere ait mikroskop görüntüleri 16
Şekil 3.14. Haddeleme işleminin şematik gösterimi 17
Şekil 3.15. Tel çekme işleminde çoklu redüksiyona işaret eden şematik görüntüler; (a) tel-matris etkileşimi, (b ve c) değişken matrislerden tel geçişi ve kesit indirgenmesi 18
Şekil 3.16. Telin matristen geçişi sırasında plastik akışı gösteren şematik bir görsel 19
Şekil 3.17. Ferrit ve sementit içeren tipik perlit yapısı 20
Şekil 3.18. Değişken oranda deforme edilmiş perlit yapılarını gösteren mikroskop görüntüleri 21
Şekil 3.19. Deforme edilmiş çelik tel matriksi içerisinde lamellar sınırlarda bloklanmış dislokasyonlar 22
Şekil 3.20. Deformasyon ve tavlama süreçlerinde perlitik bir matriks içerisinde gelişebilen mikroyapısal değişimler 23
Şekil 3.21. Deformasyon altında perlitin yönlenmesini ve tavlama ile sementit morfolojisindeki değişimi gösteren örnek mikroyapı ve şematik görüntüler 24

Şekil 3.22. Deformasyonu takiben farklı sürelerde 500°C sıcaklıkta yapılan tavlama işleminin sementit morfolojisi üzerine etkisini gösteren mikroskop görüntüleri; (a) deforme edilmiş yapı, (b) 2 dakika, (c) 20 dakika ve (d) 1 saat tavlanmış yapılar 24
Şekil 3.23. Tavlama süresine bağlı olarak deformed edilmiş çeliğin mukavemetinde meydana gelen değişimler 25
Şekil 3.24. Demir esaslı malzemede sünek ve gevrek kırılmayı gösteren makro görüntüler 26
Şekil 3.25. Torsiyon yüklenmesine maruz kalan çelik tellere ait makro kırılma görüntüleri 27
Şekil 3.26. Kuru ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerin kopma testi sonrası kırılma modunu gösteren görüntüler 27
Şekil 3.27. Sulu ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerin kopma testi sonrası kırılma modunu gösteren görüntüler 28
Şekil 3.28. Kuru ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerin kopma testi sonrası kırılma modunu gösteren SEM görüntüleri 29
Şekil 3.29. Sulu ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerin kopma testi sonrası kırılma modunu gösteren SEM görüntüleri 29
Şekil 3.30. Kuru ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş 0.90 mm çaplı telin nihai kopma bölgesini gösteren SEM görüntüleri 30
Şekil 3.31. Sulu ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş 0.75 mm çaplı telin nihai kopma bölgesini gösteren SEM görüntüleri 30
Şekil 4.1. Tel çekim sürecinde ulaşılan indirgenme çaplarını (mm) ve ilgili çapa karşılık gelen malzemelerin tanıtımını gösteren şematik bir görsel 32
Şekil 5.1. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin parlatılmış en kesitlerine ait IM görüntüleri 34
Şekil 5.2. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin en/boy kesitlerine ait makro görüntüler 35
Şekil 5.3. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin dağlanmış en kesitlerine ait IM görüntüleri 36
Şekil 5.4. Farklı karbon içeren filmaşinlerin matrikslerinde bulunan kalıntıları gösteren IM görüntüleri 37
Şekil 5.5. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin en ve boy kesit sertlik değerleri 38
Şekil 5.6. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin kopma mukavemet değerleri 38
Şekil 5.7. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin %-uzama değerleri 39
Şekil 5.8. F-06 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası indirgenmiş tel kesitlerine ait IM görüntüleri 40
Şekil 5.9. F-22 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası indirgenmiş tel kesitlerine ait IM görüntüleri 40
Şekil 5.10. F-55 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası indirgenmiş tel kesitlerine ait IM görüntüleri 40
Şekil 5.11. F-06 malzemesi ve indirgenmiş tel çaplarına ait en/boy kesit sertlik değerleri 41
Şekil 5.12. F-22 malzemesi ve indirgenmiş tel çaplarına ait en/boy kesit sertlik değerleri 42

Şekil 5.13. F-55 malzemesi ve indirgenmiş tel çaplarına ait en/boy kesit sertlik değerleri 43
Şekil 5.14. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin ve kesitleri indirgenmiş tellerin kopma mukavemet değerleri 44
Şekil 5.15. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin ve kesitleri indirgenmiş tellerin %-uzama değerleri 45
Şekil 5.16. Değişken karbon içeriğine sahip filmaşinlerin kopma testleri sonrası parlatılmış kırılma kesitlerine ait IM görüntüleri 46
Şekil 5.17. F-06 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası üretilen tellerin kopma kesitlerine ait IM görüntüleri 47
Şekil 5.18. F-22 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası üretilen tellerin kopma kesitlerine ait IM görüntüleri 47
Şekil 5.19. F-55 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası üretilen tellerin kopma kesitlerine ait IM görüntüleri 47
Şekil 5.20. F-06 malzemesinin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri 49
Şekil 5.21. F-22 malzemesinin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri 49
Şekil 5.22. F-55 malzemesinin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri 49
Şekil 5.23. F-06 malzemesinden üretilen tellerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri 50
Şekil 5.24. F-22 malzemesinden üretilen tellerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri 51
Şekil 5.25. F-55 malzemesinden üretilen tellerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri 51

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Ticari yüksek mukavemetli çelik tellerin kullanım alanları 3
Tablo 4.1. Filmaşinlere ait kimyasal kompozisyonlar (ağ.-%)..... 31

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

D_0 : Başlangıç tel çapı
D_ε : Deformasyon sonrası ulaşılan çap
S_0 : Perlitin başlangıç lamellararası mesafesi
S_ε :Tel çekme ile elde edilen lamellararası mesafe
ε : Gerçek gerinme
σ_a : Ferrit içerisinde sürtünme gerilmesi
α : Ferrit fazı

Kısaltmalar

HV : Hardness of Vickers (Vickers Sertliği)
IM : Işık Mikroskobu
ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Örgütü)
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

FARKLI KARBON İÇERİKLİ ÇELİK FİLMAŞİNLERDEN ÜRETİLMİŞ TELLERDE KIRILMA MODLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, farklı karbon içeriğine sahip 1006, 1022 ve 1055 kalite çeliklerden indirgenmiş çaplarda tel üretimi sonrasında yapı-özellik-kırılma üzerine incelemeler yapılmıştır. Endüstriyel pratiklikte eşdeğer koşullarda farklı karbon içeriğine sahip çelik filmaşinlerden tel üretimi yapılarak 5,50 mm çaptan 2,00 mm çapa indirgenme başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olup, redüksiyon ara kademelerinde her bir tel malzemenin metalurjik ve mekanik karakterizasyonu yapılmıştır. Metalurjik analizler tellerin nihai mikroyapısında deformasyon boyunca uzamış perlitik yapıların var olduğunu ortaya koymuştur. Mekanik karakterizasyon çalışmaları, çapta sağlanan indirgenme ve çeliğin artan karbon içeriğine bağlı olarak mukavemet değerlerinde bir artışa karşılık ve %-uzama değerlerindeki bir azalmanın olduğunu ortaya koymuştur. Çekme testi sonrası hasarlanan tellerin kırılma kesitleri üzerine yapılan çalışmalar ise matriks içerisinde perlitik faz miktarına ve özellikle redüksiyon ile değişebilen perlit lamellararası mesafeye bağlı olarak kırılma modunun ne denli değişken olabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Karakterizasyon, Kırılma, Mikroyapı, Soğuk Çekilmiş Tel.

INVESTIGATION OF FRACTURE MODES IN WIRES PRODUCED FROM STEEL RODS HAVING DIFFERENT CARBON CONTENT

ABSTRACT

In this study, structure-property-fracture studies were conducted after wire production in reduced diameters from 1006, 1022 and 1055 quality steels with different carbon content. In industrial practice, wire production from steel wire rods with different carbon content under equivalent conditions was successfully achieved by reducing the diameter from 5.50 mm to 2.00 mm, and metallurgical and mechanical characterization of each wire material was performed in the intermediate stages of reduction. Metallurgical analyses revealed that there were elongated pearlitic structures in the final microstructure of the wires during deformation. Mechanical characterization studies revealed that there was an increase in strength values and a decrease in %-elongation values due to the reduction provided in diameter and the increasing carbon content of the steel. Studies on the fracture cross-sections of damaged wires after tensile tests have revealed how variable the fracture mode can be depending on the amount of pearlitic phase in the matrix and the distance between pearlite lamellae, which can change especially with reduction.

Keywords: Characterization, Fracture, Microstructure, Cold Drawn Steel Wire.

1. GİRİŞ

Çelik esaslı malzemeler geçmişten günümüze endüstrinin pek çok alanında tercih edilen alaşımlar olup, kompozisyonunda bulunan başta karbon ve diğer alaşım elementleri çeliklerin birçok özelliğinin geliştirilmesine doğrudan katkı vermektedir. Çeliklere uygulanan konvansiyonel ısıl işlemler ve termo-mekanik işlemler çeliğin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini doğrudan geliştirebilmektedir. Kompozisyonlarının ve uygulanan ısıl işlemlerin bir sonucu olarak kazandıkları metalurjik yapı çeliklerin kullanım alanlarını genişletebilmektedir (Güzey, 2009; Onur, 2010).

Kütlesel çelik malzemeler kadar çelik esaslı teller sahip oldukları yüksek mukavemetleri, yüksek toklukları ve yeteri korozyon/aşınma dirençleri nedeni ile günümüzde hava, deniz ve kara platformlarında iş gören birçok komponentin imalında kullanılan başlıca bir yapı malzemesidir (Onur, 2010). Özellikle maden endüstrisinde kullanılan ve kütlesel malzeme taşınımına olanak veren halatların imalinde kullanılan bir malzemedir. Bu açıdan bakıldığında halat malzemelerinin imalinde paslanmaz çelik teller ve galvanizlenmiş/kaplanmış teller tercih edilen ürünlerdir (Güzey, 2009).

Servis koşullarında tellerin ve halatların çevresel koşullarda uzun ömürde iş görebilmesi açısından metalurjik, mekanik ve kimyasal kararlılığı belirleyici olabilmektedir. Bu tür malzemelerin erken ömürde hasarlanması neticesinde sadece herhangi bir konstrüksiyonun işlevselliğinin yitirilmesi kadar insan hayatının tehlikeye girmesi de söz konusudur. Günümüz endüstriyel platformlarının bir isteri olan iş ve iş sağlığı güvenliği dikkate alındığında tellerin/halatların hasarlanması nedenli çoklu riskler açığa çıkabilmektedir. Halat bileşenlerinden olan tellerin üretiminden/kullanımından kaynaklı hata faktörlerinin devreye girerek erken ömürde kopmanın gerçekleşmesi çoğu kez karşılaşılan bir durumdur. Bundan dolayı endüstriyel tel üretiminde başlangıç hammaddesi olarak uygun filmaşinlerin seçimi, ısıl işlem ve deformasyon süreçlerinin optimizasyonu önemlidir (ASM Handbook, 1990; Güzey, 2009).

Bu tez çalışması kapsamında, karbonca kimyasal kompozisyon farklılığı içeren değişken 5.50 mm çaplı filmaşinlerden (1006, 1022 ve 1055 kalite) endüstriyel koşullarda ısıl işlem ve deformasyona maruz bırakılarak tel malzeme (2.00 mm çaplı) üretimi üzerinde durulacak olup, özellikle çoklu redüksiyon işlemleri ile inceltilen tel çaplarında

metalurjik yapının hem mekanik özelliklere hem de kopmada kırılma davranışına olan etkileri karakterize edilmiştir. Metalurjik karakterizasyon çalışmalarında özellikle perlitik matriksin deformasyon koşullarında yönlenmesi ve lamellararası mesafesindeki değişimler izlenmiştir. Mekanik karakterizasyon çalışmalarında ise seçili numunelerde azalan lamellararası mesafeye de bağlı olarak sertlik, kopma mukavemet ve %-uzama değerlerindeki değişim kayıt altına alınmıştır. Kopma ile hasarlanmış tel malzemelerin hem kırılma yüzeyleri hem de kesitleri üzerine yapılan fraktografik incelemeler ile her bir malzeme için proses-yapı-özellik-kırılma süreci fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda irdelenmiştir.

2. ÇELİK ESASLI TELLER ÜZERİNE TEMEL YAKLAŞIMLAR

2.1. Çelik Tellerin Kullanım Alanları

Yüksek mukavemetli çelik tellerin üretiminde hammadde olarak kullanılan ve belirli bir çapa sahip filmaşinin % 90 oranında deformasyonu esastır. Bu tür bir işlem ile çelik telin sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler ürün formun endüstriyel kullanımını belirlemektedir. Tablo 2.1'de yüksek mukavemetli çelik tel sınıfında yer alan ve çeşitli alanlarda kullanılan ürün formlar listelenmiştir (ASM Handbook, 1990).

Tablo 2.1. Ticari yüksek mukavemetli çelik tellerin kullanım alanları (ASM Handbook, 1990)

Ürün formu	Çekme mukavemeti (N/mm^2)	Kullanım alanı
Piyano teli	1790-2410	Piyano telleri ve yayları
Mandolin teli	2000-2760	Küçük yaylı enstrümanlar
Metalik saat kordon teli	1170-1590	Metalik saat kordonu üretimi
Hortum takviye teli	2140-2480	Yüksek basınç hortumları
Halat telleri	< 2160	Tel kablolar
Süspansiyon kablosu teli	1380-1590	Süspansiyon bağlantıları
Mekanik yay telleri	< 2960	Yaylar

Soğuk deformasyon ile çoklu redüksiyon aşamasında her ne kadar tel malzemenin mukavemetinde kayda değer bir artış olsa da süneklikte bir kaybın olması da söz konusudur. Ancak malzemenin çelik halat bileşeni olarak kullanılması halinde sağlayacağı yüksek emniyet ve dayanım da göz ardı edilmemelidir. Öte yandan tel formunda malzemenin kolay bükülebilir ve yüksek aşınma dirençli olması da yüksek mukavemetli çelik tellerin endüstriyel ve ticari bir ürün olarak kullanılabilirliğini arttırmaktadır (Güzey, 2009).

Günümüzde yüksek mukavemetli tel halatlar madencilik sektörü başta olmak üzere petro-kimya endüstrisinde ve denizcilik, balıkçılık, gemi ve yat endüstrisinde tercihen kullanılır. Bahsi geçen bu endüstriyel alanlarda çoğu kez petrol kuyularında, vinçlerde, ağır yük taşınmaya yarayan sistemlerde, asansörlerde, tramvaylarda, teleferiklerde yüksek dayanımlı çelik halatların kullanım kaçınılmazdır.

Çelik halatların sahip oldukları yüksek yorulma dayanımı ve yüksek yük taşıma kapasiteleri saha uygulamalarında bu tür malzemelerin seçilmesini belirleyen önemli seçim kriterleridir. Çelik tellerin metalurjik altyapısında bulunan perlitin lamellararası mesafesinin indirgenmesi halinde yüksek dayanım ve yüksek yük taşıma kapasitesinin malzemeye kazandırıldığı bilinen bir gerçektir. Özellikle denizel uygulamalarda çelik tellerin ve halatların yüksek korozyon direncinde üretilebilmesi kullanım yaygınlığı da sağlayabilmektedir (ASM Handbook, 1990).

2.2. Çelik Tellerin Sınıflandırılması

İmalat endüstrisinde çelik tellerin sahip oldukları mekanik özelliklerinden dolayı önemli bir malzeme grubunu oluşturması yadsınamaz. Alaşım kompozisyonu kadar plastik şekillendirme yöntemleri çelik esaslı tellerin mekanik özelliklerinde önemli bir belirleyici faktördür. Değişken çaplarda üretilebilen tellerin özellikle tel çekme işleminde mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra yüksek yüzey kalitesinde üretilebilirliği de önemlidir. Bu açıdan bakıldığında endüstriyel tel çekme hatlarının sürekli modernize edilmesi ve çağa uygun şekillendirme teknolojisinin yansıtılması kaçınılmazdır (Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014).

Bilindiği üzere, plastik şekil verme yöntemlerinden biri olan haddeleme ve tel çekme işlemleri ile çeliklerin eş zamanlı fiziksel, kimyasal ve mekanik dayanımları arttırılabilmektedir. Günümüz haddeleme teknolojisi kütlesel olarak 4-5 mm çapına sahip malzeme kesitlerinin üretilebilirliğini mümkün kılmaktadır. Ancak tel çekme işlemleri ile bu çap değerinin daha da altındaki çap kesitlerinde malzeme üretmek de mümkündür.

Tel çekme sürecinde uygulanan soğuk deformasyonun etkisi ile perlitik faz yapısının deformasyon doğrultusunda yönlendirilmesi, özellikle sementit lamellerinin inceltilmesi ve lamellerarası mesafenin her bir redüksiyon kademesinde daha da indirgenmesi ile çelikte hem mekanik özellik gelişimi hem de oksidasyon gerçekleşmeden yüksek yüzey kalitesinde malzeme üretimi söz konusudur (Güzey, 2009; Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014).

Tellerin sınıflandırılmasında çoklu yaklaşımlar yapılabilmektedir. Sınıflandırmada malzemenin menşei önemli bir kriter olabilmekte ve bu tür bir sınıflandırma dahilinde

düşük/yüksek karbonlu çelikler ve paslanmaz çelikler yer alabilmektedir. Sınıflandırmada telin kullanım amacı da belirleyici olabilmektedir. Yay telleri ve halat telleri gibi başlıklarda tellerin alt sınıflandırılması mümkündür. Tellerin sınıflandırılmasında yüzey özellikleri de etkendir. Pürüzsüz çelik teller ve galvaniz içeren/içermeyen çelik teller bu açıdan bakıldığında sınıflandırmada yer alan tellerdir (ASM Handbook, 1990; Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014).

Çelik tellerinin sınıflandırılmasında malzemenin kompozisyonunda bulunan karbon ve alaşım elementlerinin önemli bir rolü vardır. Kompozisyonunda ağırlıkça % 1.8'den daha düşük miktarda karbon içeren çelik tellerin daha sünek bir davranış sergilemesi ve şekil alma kabiliyetinin yüksek olması beklenir. Daha yüksek karbon içeriğinde ise sertlik ve mukavemet daha baskın özellik olarak çelik tellere kazandırılır. Kompozisyonda bulunan mangan ve silisyum gibi alaşım elementleri telin aşınma ve yorulma direncini arttırmakta ve böylece çelik tellerin endüstriyel dayanımda olması sağlanmaktadır (Altun, 2015; Bargujer, 2013)

Genel sınıflandırma içerisinde yay teli ve galvanizli teller öne çıkan malzemelerdir. Yay telleri, basma, çekme ve burma yayı olarak otomotiv, beyaz eşya ve tarım gibi çeşitli endüstrilerde kullanılırken; galvanizli teller, çinko kaplama sayesinde oksidasyona ve korozyona karşı koruma sağlar. Galvanizleme işlemi ile çelik tellerin yüzeyine uygulanan çinko, malzemenin dayanımını ve ömrünü önemli ölçüde arttırır. Esasen yüzeyde oluşan ve yüzeyi çepeçevre saran yüksek yapışma kabiliyetli Fe-Zn fazları ile çevresel şartların sunabildiği korozif ortamın etkinliği azaltılabilmekte ve altlık malzeme olarak çelik telin kullanım ömrü arttırılmaktadır. Bu tür teller, çit, dikenli tel ve yatak yayları gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılır (ASM Handbook, 1990; Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014).

Endüstriyel uygulamalarda dinamik yüklerin olması halinde halat telleri sıklıkla tercih edilir. Halatı oluşturan çelik tellerin ince perlit yapıya sahip olması, malzemeye hem sertlik hem de süneklik kazandırarak çekme mukavemeti ve yorulma dayanımını optimize eder. Halat tellerinin yapısal performansı, malzemenin kompozisyona, mikroyapısına ve üretim yöntemine doğrudan bağlı olup, tasarım parametrelerinin de optimize edilmesi gerekmektedir (Güzey, 2009; URL-1).

2.3. Çelik Tellerin Genel Metalurjik Özellikleri

Metalurjik olarak çelik teller lamellar perlit yapısına sahip yüksek mukavemetli ve yüksek süneklik değerlerine sahip malzemeler olarak bilinir. Esasen demir esaslı malzemeler arasında çeliklerin mukavemet hiyerarşisinde martenzitik çelikler her ne kadar yüksek mukavemetleri ile tercihen kullanım alanı bulsa da soğuk çekilmiş perlit yapısının sahip olduğu üstün mekanik özellikler dikkat çekicidir (ASM Handbook, 1990). Çelik tel üretiminde kullanılan patentleme işlemi ile homojen perlitik bir yapının çeliğe kazandırılması, ardından çoklu redüksiyon işlemleri ile soğuk deforme edilmiş bir matriks yapısının oluşturulması ve indirgenmiş lamellararası mesafeli perlitik bir yapının eldesi sağlanır. Tüm bu süreç ile demir esaslı malzemede istenen yüksek süneklikte yüksek mukavemet elde edilir (Güzey, 2009; Altun, 2015).

Östenitten ötektoid dönüşüm ile oluşan perlitin yapısı birbirine göre farklı açılarda yönlenmiş kolonileri içermektedir. Her bir koloni kendi bünyesinde ferrit ve sementit lamelleri barındırır. Bu açıdan bakıldığında perlitin birbirine göre değişken kristal yapılı ve özellikte iki ayrı faz yapısını sahip olduğu söylenebilir. Perlitin bir unsuru olan ferrit fazı nispeten yumuşak bir faz olup, mekanik yüklenme koşulunda deforme olabilmektedir. Ancak sementit fazı ferrite göre daha sert bir karaktere sahip olup, bu fazın plastik deformasyon kabiliyeti oldukça düşüktür. Plastik deformasyon kabiliyetinin düşük ve sınırlı olması sementit fazının kırılgan bir eğilimde olduğuna da işaret etmektedir. Ancak her iki fazın perlit yapısı içerisinde bulunması çelik tellerin nihai mukavemetini ve sünekliğini doğrudan belirlemektedir (Güzey, 2009; Altun, 2015). Perlitik yapı içerisinde sementit faz hacmi toplam hacminin 1/8'ine karşılık gelse de soğuk deformasyon koşullarında sementitin davranışı nihai özelliklere ulaşmada karar kılıcı olabilmektedir. Çoklu redüksiyon ile tellerin kesit indirgenmesi sürecinde lamellararası mesafenin de indirgenmesine bağlı olarak sementitin çekme mukavemetine olan katkısı kadar ferritin deformasyona uğraması sünek davranışı getirmektedir. Soğuk tel çekimi aynı zamanda ferrit fazı içerisinde dislokasyon hareketlerinin gelişimine ve özellikle dislokasyonların lamellar sınırlar boyunca bloklanmasına olanak vermektedir. Bu durumda sınırlarda artan dislokasyon yoğunluğuna da bağlı olarak mukavemetin artması kaçınılmazdır (Güzey, 2009; Altun, 2015). Çelikler üzerine termo-mekanik işlem süreçlerinin işletilmesi mikroyapının homojenleştirilmesi ve yorulma/aşınma direnci gibi

mekanik özelliklerin daha da iyileştirilmesine olanak vermektedir. Kontrollü ısıtma ve soğutma çevirmleri altında östenitten perlite bir dönüşüm ve sonrasında belirli hızlarda soğuk deformasyonun uygulanması ile çelik tellerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri eşzamanlı iyileştirilmektedir. Bilindiği üzere, perlitik yapısındaki sementitin kırılganlık özelliğine rağmen ince taneli yapıların soğuk tel çekme ile yüksek deformasyona maruz kalması sementit fazının da belirli bir ölçüde sünek davranış sergilemesine olanak tanımaktadır. Bu tür bir davranışta sementit içindeki kayma sistemlerinin aktive olması söz konusudur ve bu tür bir süreç soğuk çekme sırasında mekanik dayanıma büyük katkı sağlar (Güzey, 2009; Altun, 2015).

Sonuç olarak, yüksek mukavemetli perlitik çelik teller hem mikroyapısının özgün yapısı hem de soğuk çekme ve ısıl işlemi gibi özel uygulamalar sonucunda üstün mekanik özellikler sunabilmektedir. Bu nedenle, yüksek dayanım ve sünek davranış gerektiren uygulamalarda bu malzemeler tercih edilmektedir. Bununla birlikte, mikroyapının detaylı incelenmesi ve optimize edilmesi ile bu malzemelerin gelecekteki uygulamalarını arttırmak mümkündür (Bargujer, 2013; ASM Handbook, 1990). Bir sonraki bölümde filmaşinden başlayarak hem tel üretim metodolojisi üzerinde durulacak hem de hammadden başlayarak nihai kesitinde çelik tellerin fiziksel metalurjisi üzerinde durulacaktır. Aynı zamanda tellerin metalurjik yapısının yük altında plastik deformasyon davranışında ve kırılma (kopma) sürecinde ne denli belirleyici olabildiği kırılma analizleri eşliğinde işlenecektir.

3. ÇELİK TELLERİN ÜRETİMİ, METALURJİSİ VE KIRILMA DAVRANIŞI

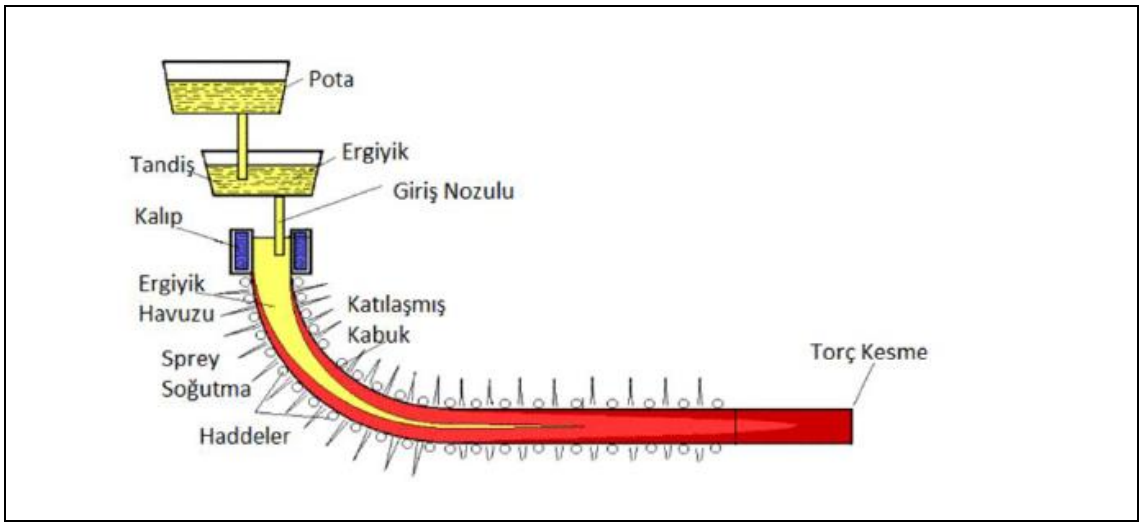
3.1. Filmaşin Üretimi

Çelik tellerin üretimine esasen filmaşin olarak bilinen yarı mamul ile başlanmaktadır. Filmaşin üretiminde birinci aşamada geleneksel ergitmenin gerçekleştirilmesi ve istenen alaşım kompozisyonun oluşturulması gelmektedir. Bu süreçte sürekli döküm prosesine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3.1'de sürekli döküm prosesine özgü genel bir akış şematiği verilmiştir (Verreet, 2002).

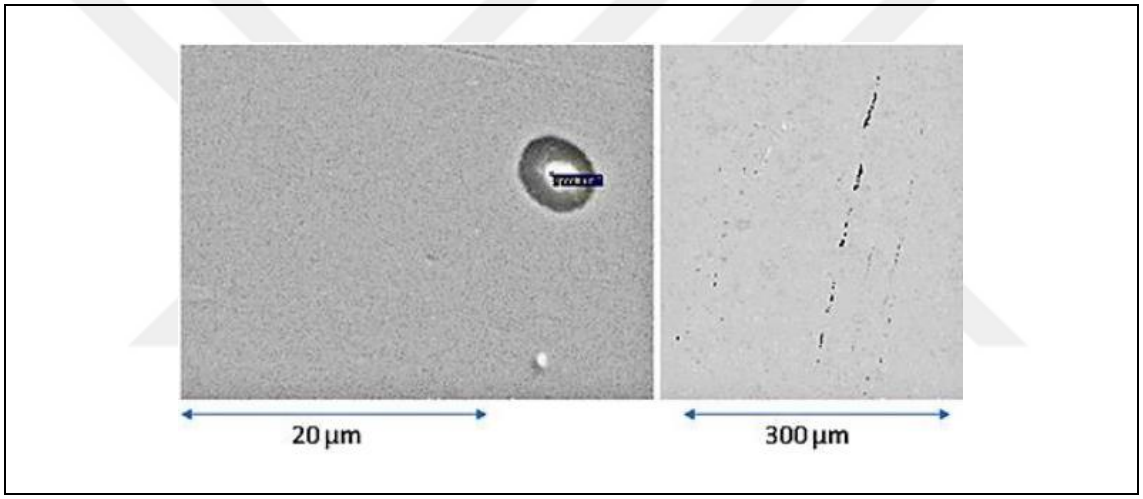
Sürekli döküm sürecinde başlangıçta ergitilmiş çelik tandişe aktarılır. Tandişte var olan ergimiş metal kompozisyonuna herhangi bir müdahalede bulunulmaz ve bu aşamada sadece sürekli döküm işleminin kontrollü bir şekilde akışını sağlamak hedeflenir. Sürekli döküm prosesinde tandiş aşınmasının filmaşinde önemli bir kalite probleminin açığa çıkmasında önemli bir rolü vardır. Tandiş değişim sıklığının azaltılması halinde tandiş duvarlarında bulunan refreakter malzemelerin aşınmasında önemli bir hız artışı gözlenmekte ve refrakter malzemelerden kopan parçacıklar ergiyik çelik içerisine karışarak metalik olmayan kalıntıların (inklüzyonların) var olmasına neden olabilmektedir (URL-2).

Şekil 3.2'de verilen mikroyapı örnekleri tandişten kopan refrakter esaslı partiküllerin katılaşma yapısında var olabildiğini ve deformasyon yükleri altında bu partiküllerin matriks içerisinde satırlanmalar oluşturabildiğine işaret etmektedir (Kapusuz ve diğ., 2019).

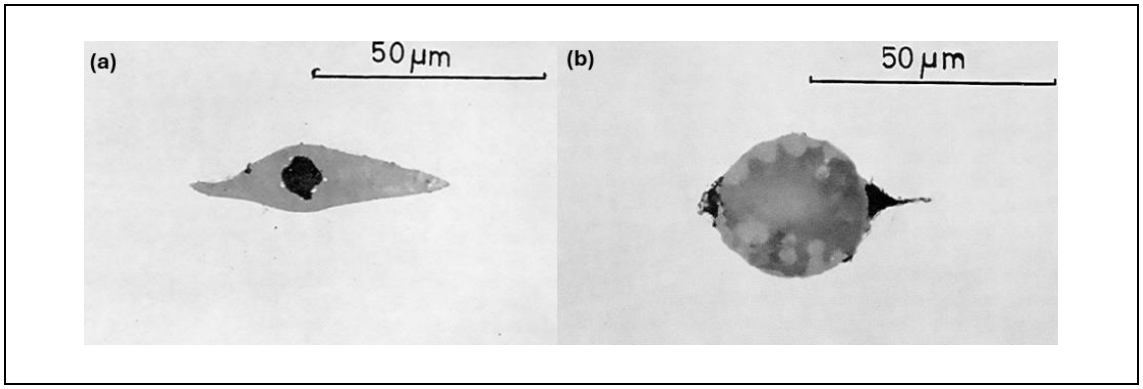
Bu tür metalik olmayan kalıntılar çelik esaslı yarı mamülde ve nihai mamulde mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Matriks içerisinde bulunan kalıntıların çatlak çekirdeklenme ve ilerleme yöreleri olarak davranması bahsi geçen mekanik performansın azalmasına nedendir. Şekil 3.3'te çelik matriks-kalıntı arayüzeyi boyunca çatlak çekirdeklenmesi örneklenmiştir (URL-3). Bu açıdan bakıldığında tandiş değişim sıklığının arttırılması çeliğin kimyasal temizliği açısından büyük önem taşımaktadır (ASM Handbook, 1990; URL-2).



Şekil 3.1. Sürekli döküm prosesine özgü şematik bir akış görseli (Verreet, 2002).



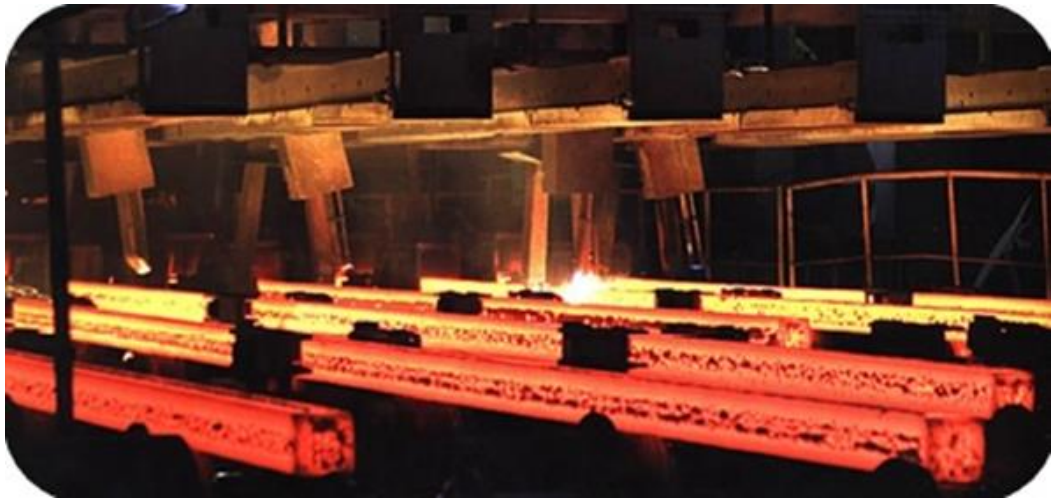
Şekil 3.2. (a) Çelik esaslı malzemenin katılaşma yapısında bulunan refrakter esaslı partikül ve (b) deformasyon yükleri altında satırlanmış partiküller (Kapusuz ve diğ., 2019).



Şekil 3.3. Metal/kalıntı arayüzeyinde çatlak çekirdeklenmesinin gösteren mikroskobik görüntüler (URL-3).

Sürekli döküm işleminin ergiyik çelikte eş zamanlı soğutma ve şekillendirme sağlaması filmaşin üretimine yönelik önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu durumda yeniden haddeleme gibi sürece ihtiyaç duyulmaksızın hem yarı mamul üretimi sağlanmakta hem de iş verimliliği / enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Sürekli döküm sürecinde ergiyik çelik potadan kalıplara dökülmekte ve böylece çelikte katılaşma süreci başlatılmaktadır. Bu süreçte kullanılan kalıplar yüksek ısıl iletim katsayılarına sahip bakır esaslı malzemelerden imal edilmiş olup, soğutmanın etkin sağlanabilmesi için kalıplara osilasyon kazandırılır.

Osilasyon hareketinin gerçekleştirilmesi halinde hem homojen soğuma sağlanmakta hem de ani sıcaklık değişimlerine bağlı olarak açığa çıkan çatlama (çatlak oluşturma) riski indirgenmektedir. Sürekli dökümün konstrüksiyonu gereği kalıplardan aşağıya doğru sıvı çelik hareket etmekte ve bu süreçte katılaşmaktadır. Katılaşan hacmin nihai şekli hadde blokları yardımıyla ortaya çıkmaktadır. Sürekli dökümde nihai olarak kütük olarak adlandırılan bir kütlesel malzeme üretilir. Şekil 3.4'te kütük malzemelere ait makro bir görsel verilmiştir (Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014). Kütükler son boyutlarına ulaştırılmadan önce sürekli katılaşan ana kütlesel malzemeden kesme torçları ile istenilen uzunlukta dilimlenir ve soğutma süreci taşıma bantlarında devam eder (Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014).



Şekil 3.4. Sürekli döküm sürecinde üretilen kütüklere ait makro bir görüntü (Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014).

Filmaşin üretiminde sürekli dökümden gelen kütüklerin haddelenmesi esastır. Kütüklerin endüstriyel pratiklikte kolay haddelenmesi için 1200-1250 °C arasında değişen östenit sıcaklıklarına homojen ısıtılması gerekir. Şekil 3.5'te ısıtılan kütüklerin fırından çıkışı gösteren makro bir görüntü verilmiştir (Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014). Seçilen bu yüksek sıcaklık aralığı çeliğin şekil değişimine olanak vermekle birlikte sonraki haddemeler için gerekli olan homojen bir metalurjik yapının oluşmasını mümkün kılmaktadır. Her bir haddelemede farklı bir kuvvet uygulanarak çoklu haddeleme sonrası istenilen kesitlere (çaplara) ulaşılır. Bilindiği üzere, indirgenen çapa karşılık telin hareket hızı artmakta ve bu durumda hadde merdane hızlarının optimize edilmesi gerekir. İvmelenen bir süreçte tellerin kopması da mümkündür. Bu tür bir problemin indirgenmesinde tellerin oldukça düşük bir eğime maruz bırakılması önem taşımaktadır. Son haddeleme işlemini takiben tellerin basınçlı su kaplarından geçirilmesi ile kontrollü bir soğutma süreci başlatılır. Bu aşama malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi açısından önemli bir aşamadır. Bu aşamada, telin yaklaşık 100 m/s gibi yüksek bir hıza ulaşması kaçınılmaz olup, tel halkalar şeklinde konveyör sistemine aktarılır. Konveyörde fanlardan gelen hava ile soğutma işlemine devam edilir ve nihai çapta (çoğunlukla 5.50 mm) filmaşin üretilmiş olur. Filmaşinlerin homojen bir çapta ve yüksek yüzey kalitesinde üretilmesi sonraki tel çekme işlemlerinin verimliliğinin artması açısından da önemlidir (Verreet, 2002; URL-1; URL-2).



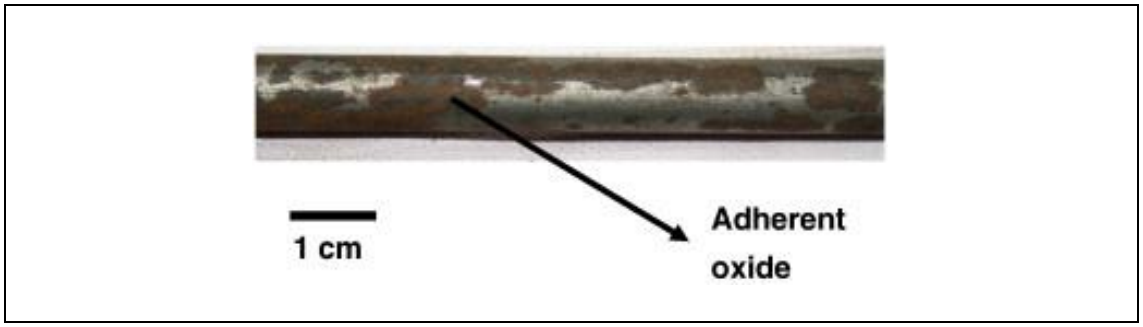
Şekil 3.5. Isıtılan kütüklerin fırından çıkışını gösteren makro bir görüntü (Çokyaşar Halat Proses Kataloğu, 2014).

Çelik esaslı tellerin üretiminde yarı mamul olan filmaşinlerin üretim teknolojisi çelik malzemenin kalite standartlarını doğrudan belirlemektedir. Günümüzde hem sürekli

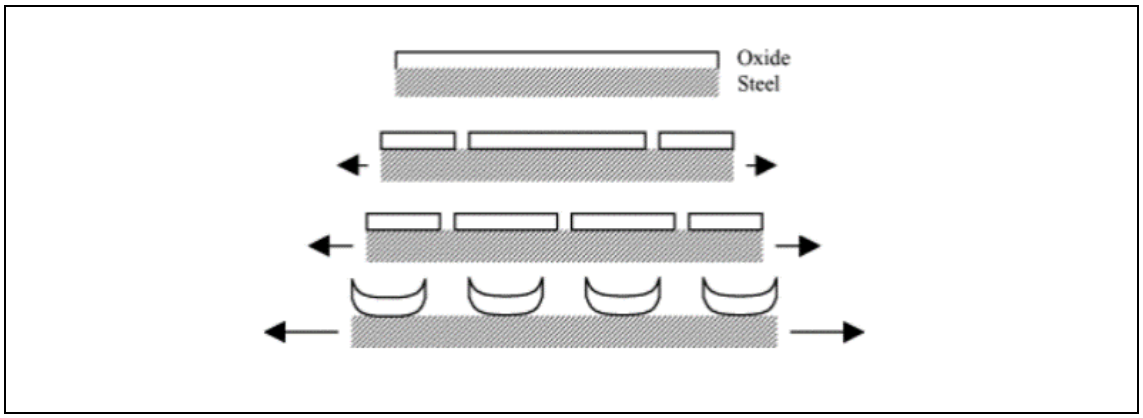
döküm üniteleri hem de haddeleme tezgahları istenen çapta ve yüksek yüzey kalitesinde ve yeterli metalurjik karakteristiğinde filmaşinlerin üretimini mümkün kılmaktadır. Ancak tandiş değişim sıklığı, refrakter malzeme kontrolü ve su verme gibi kritik parametreler filmaşinin mekanik özelliklerini ve nihai performansını doğrudan belirleyebilmektedir. Söz konusu etken faktörlerin kontrolü ve takibi ile üretim yapan hatların kurulması halinde çelik tel üretim verimliliğinin sağlanacağı da açıktır (URL-2).

3.2. Tel Çekme Öncesi Yüzey Hazırlama İşlemleri

Sıcak haddeleme ile belirli bir kesite indirgenmiş filmaşinlerin soğuk çekim öncesi yüzeylerinin temizlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada özellikle yüzey var olan oksit tabakalarının giderimi sağlanır. Şekil 3.6'da yüzeye iyi tutunmuş halde bahsi geçen oksit formu örneklenmiştir (Chattopadhyay ve diğ., 2009). Özellikle sıcak haddeleme sürecinde tufal olarak yüzeyde oluşabilen bu oksit formları tel çekme sırasında hem kalıp matrisinin aşınmasına hem de nihai tel yüzeyinde istenmeyen pürüzlülüğe neden olabilmektedir. Bahsi geçen pürüzlülük bir kalite problemine neden olmaktadır. Öte yandan Şekil 3.7'de gösterildiği üzere, yüzeyde var olan oksit formları herhangi bir mekanik yüklenme altında var olan kusurlarından kaynaklı olarak çatlama eğilimine uğrar. Tufal kalınlığı boyunca ilk çatlaktan oluşumunu takiben elastik gerilme gevşemesi ile çoklu çatlamalar veya delaminasyon süreci açığa çıkabilir. Bu durumda yüzeyden kopan parçacıklar tüm deformasyon sürecinde yüzeyden içeri doğru batabilen ve kütlesel malzeme çatlak oluşumuna neden olabilen bir yüzey altı süreksizliğe bürünebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında filmaşin yüzeylerinin temizlenmesi önem arz etmektedir (Gillström ve diğ., 2006)



Şekil 3.6. Çelik esaslı silindirik parça yüzeyine tutunmuş oksitleri gösteren makro bir görüntü (Chattopadhyay ve diğ., 2009)



Şekil 3.7. Çekme gerilmeleri altında yüzeye tutunmuş oksit tabakasının hasarlanması (Gillström ve diğ., 2006)

Filmaşin esaslı malzemelerin yüzeylerinin temizlenmesinde dekapaj sıklıkla kullanılan bir yöntem olup, bu yöntemde filmaşinlerin belirli oranlarda H_2SO_4, HCl ve su içeren kimyasal banyolara daldırılması ve belirli bir süre içerisinde kimyasal reaksiyonlar eşliğinde yüzeydeki oksit formların giderilmesi sağlanır. Şekil 3.8'de asit ile etkileşim sonrasında yüzeylerin oksit formlarından temizlenebildiğine gösteren mikroskop görüntüleri verilmiştir (Liu ve diğ., 2022).

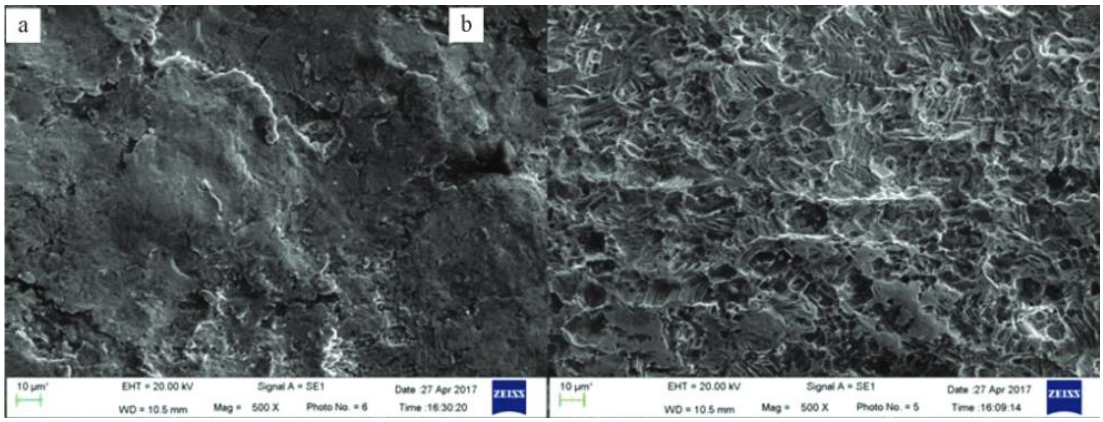
Daldırma ile temizleme sürecinde sülfürik asidin filmaşinlerin tüm yüzeylerine etkin temasının sağlanabilmesi ve oksit formlarının çözünmesinin sağlanabilmesi için banyo sirkülasyonu gerekmektedir. Öte yandan yüzey temizlemeye yönelik banyo bileşimi ve sıcaklığı çelik esaslı malzemenin kimyasal kompozisyonuna göre ayarlanmalıdır.

Kompozisyonlarında düşük karbon içeren çeliklerin yüzeylerinde yoğun ve kalın oksit formları oluşabilmekte ve bundan dolayı yüzey temizleme işlemlerinde çoğunlukla banyo kompozisyonunda yüksek asit içeriği bulunur. Düşük asit konsantrasyonları çoğunlukla yüksek karbon içeren çeliklerin kimyasal yüzey temizleme işlemlerinde kullanılır. Banyo sıcaklığının ayarlanmasında esasen banyo kompozisyonunda bulunan asit konsantrasyonu belirleyici olabilmektedir. Çünkü artan sıcaklık ile birlikte asit-malzeme etkileşim kinetiği artmakta ve asidik çözeltinin malzemede daha çok çözünme (yenim) sağlayabildiği bilinmektedir.

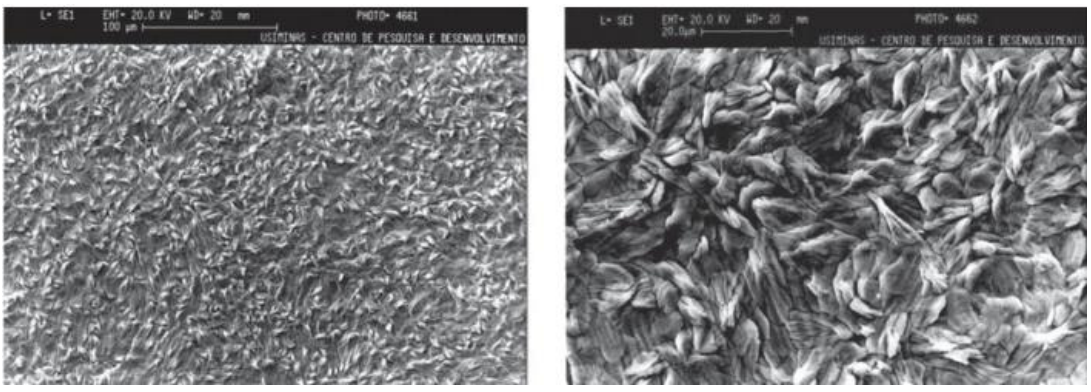
Asit esaslı çözeltiler ile yüzey temizleme işlemini takiben kangal formunda filmaşinlerin basınçlı su jetleri vasıtasıyla yıkanması mümkündür. Yıkama işlemini takiben atmosferik koşullarda filmaşin yüzeyinde yeniden ince bir oksit tabakası oluşabilir ve bu tabaka

kangalların sıcak boraks veya fosfat banyolarına daldırılmasıyla koruyucu bir katman davranışı sergiler. Bilindiği üzere, fosfatlama ile çelik yüzeyinde korozif çalışma koşullarına karşın bir direnç tabakası oluşturulur.

Şekil 3.9'da düşük karbonlu bir çelik yüzeyinin fosfatlama sonrası yüzeyine ait mikroyapılar verilmiş olup, yüzeye iyi tutunmuş sürekli ve homojen bir kaplama yapısının varlığı ortaya konulmuştur. Boraks banyosu ile etkileşim sonrasında filmaşin yüzeyleri dayanıklı ve tutucu bir yüzeye sahip olabilmektedir (De Araújo Ponte ve diğ., 2002).



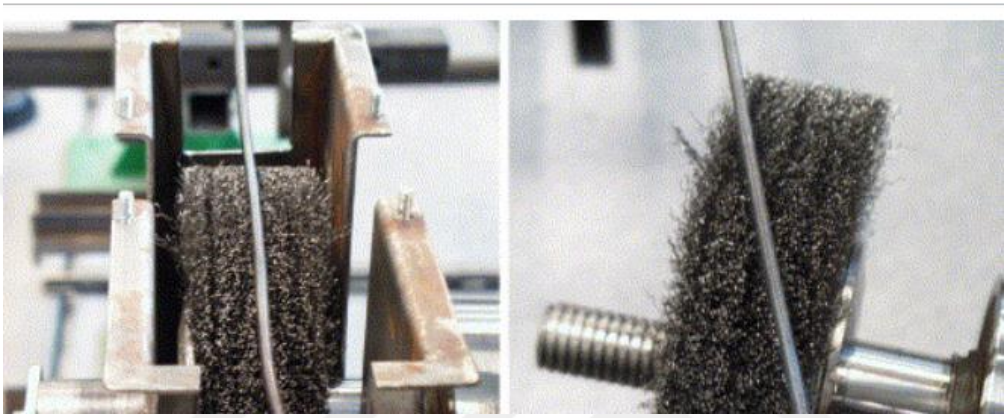
Şekil 3.8. (a) Filmaşin yüzeyinde var olan oksit formlarını ve (b) asit ile etkileşim sonrası yüzeyin oksitlerden temizlenmesini gösteren mikroskop görüntüleri (Liu ve diğ., 2022)



Şekil 3.9. Düşük karbonlu bir çeliğin yüzeyinde bulunan fosfat tabakasını gösteren mikroyapılar (De Araújo Ponte ve diğ., 2002).

Her ne kadar kimyasal çözeltilerin kullanımı ile etkin bir yüzey temizliği yapılabilse de banyo bileşenlerinin çevre kirletici olduğu açıktır. Günümüzde daha çevreci olmalarından

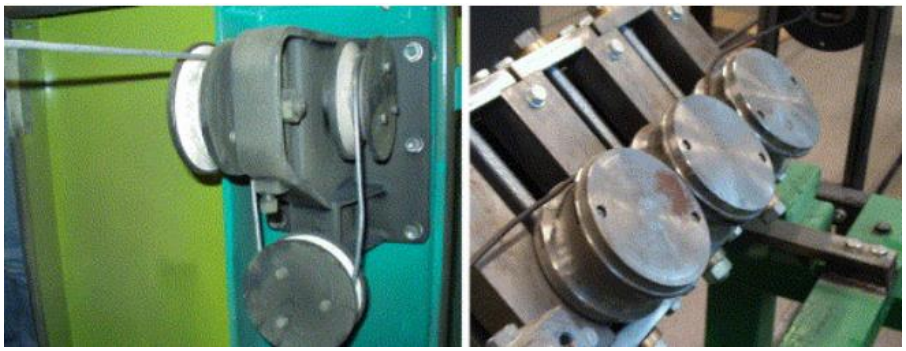
dolayı mekanik yüzey işlemleri tercihen kullanılmaktadır. Bu tür bir yöntemin aynı zamanda yüksek verimlilikte temizleme sağlaması büyük bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Filmaşin yüzeylerinin tel fırçalar ile mekanik olarak temizlenmesi mümkündür (Şekil 3.10). Bu süreçte birbirine göre paralel yerleştirilmiş makaralar arasından filmaşinin sürekli geçişi ve fırçalar yardımıyla yüzeydeki oksitlerin temizlenmesi sağlanır (Gillström ve diğ., 2006).



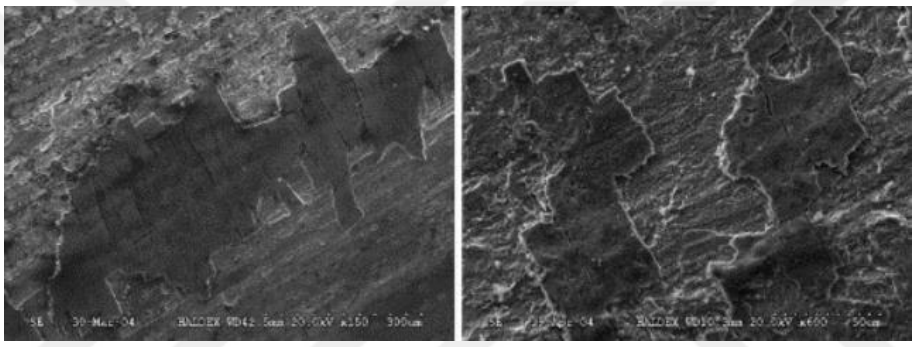
Şekil 3.10. Filmaşin yüzeylerinin tel fırça yardımıyla oksitlerden temizlenmesini gösteren makro görüntüler (Gillström ve diğ., 2006)

Filmaşinlerin yüzeylerinde var olan oksit formlarını temizlemek amacı ile makaralı mekanik sıyırıcılar (kırıcılar) da kullanılmaktadır. Şekil 3.11'da bu tür bir düzeneğe ait makro görüntüler verilmiştir. Bahsi geçen düzeneğin kullanımı ile filmaşin yüzeylerindeki oksitlerin önemli ölçüde giderilebildiği raporlanmış olup, Şekil 3.12'de verilen mikroskop görüntüleri filmaşin yüzeyinden sıyrılarak tufallerin yüzeyden uzaklaştırabildiğine işaret etmektedir (Gillström ve diğ., 2006). Mekanik temizleme işlemlerinden biri de yüzeylerin kumlanmasıdır. Yüzeylere yüksek hızda metal bilyaların püskürtülmesi ile yüzeyde var olan oksitlerin dökülmesi sağlanabilmektedir. Bu tür bir yöntemde kullanılan altlık malzemenin mekanik özellikleri kadar bilya malzemesinin sertliği, püskürtme mesafesi ve açısı, püskürtme hızı ve etkileşim süresi gibi parametreler nihai yüzeyin özelliklerini doğrudan belirleyebilmektedir.

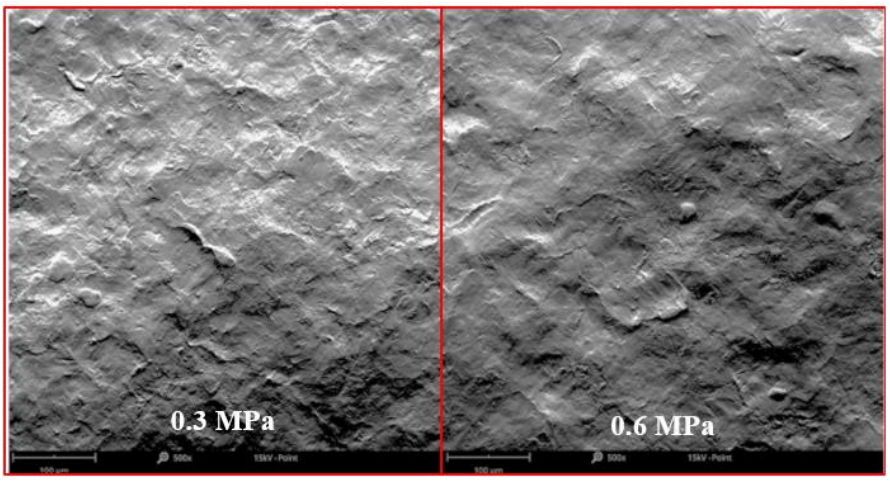
Şekil 3.12'de çelik esaslı bir malzemenin sert bilyalar ile farklı basınçlarda (0.3 ve 0.6 MPa) etkileşimi sonrası yüzeylerine ait topografik değişim örneklenmiştir. Artan etkileşim basıncı ile daha düz yüzeylerin eldesi sağlanmıştır (Walczak ve diğ., 2021).



Şekil 3.11. Filmaşin yüzeylerinin makaralı mekanik sıyırıcılar kullanılarak oksitlerden temizlenmesini gösteren makro görüntüler (Gillström ve diğ., 2006)



Şekil 3.12. Mekanik sıyırıcılar kullanılarak kısmen oksitlerden temizlenmiş filmaşin yüzeylerini gösteren mikroskop görüntüleri (Gillström ve diğ., 2006)



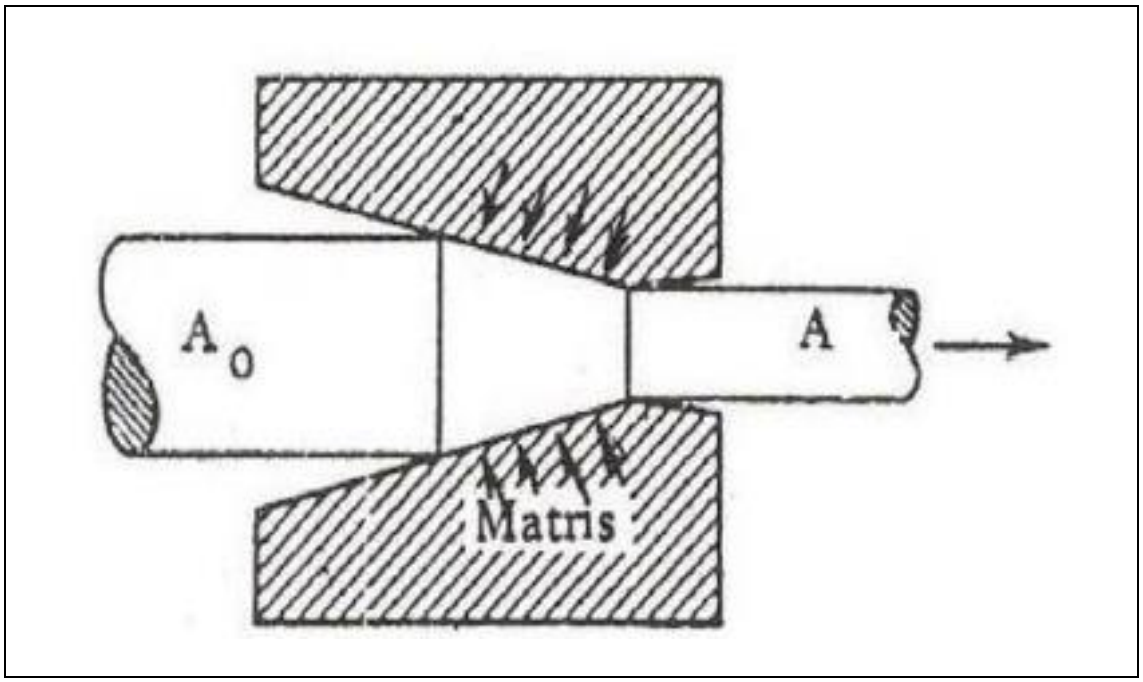
Şekil 3.13. Değişken püskürtme basınçları ile dövülmüş yüzeylere ait mikroskop görüntüleri (Walczak ve diğ., 2021)

3.3. Tel Çekme İşlemi

Tel çekme işlemi sürecinde çelik esaslı tellerin kontrollü kesit indirgenmesi sağlanmakta ve bu tür plastik şekillendirme yönteminin seçilmesi ile malzemenin mekanik özelliklerinde önemli ölçüde bir gelişim sağlanabilmektedir (Ünseren, 2006). Proses istenen kesitte ve boyca uzamada yarı mamul veya nihai mamul üretimini mümkün kılmaktadır.

Tel çekme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilen bir proses olduğundan bu proses aynı zamanda bir soğuk deformasyon prosesi olarak da değerlendirilir. Nispeten daha kalın kesitli malzemelerin deformasyon sürecinin kolaylaştırılması açısından prosesin yükseltilmiş sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi de mümkündür (Ünseren, 2006).

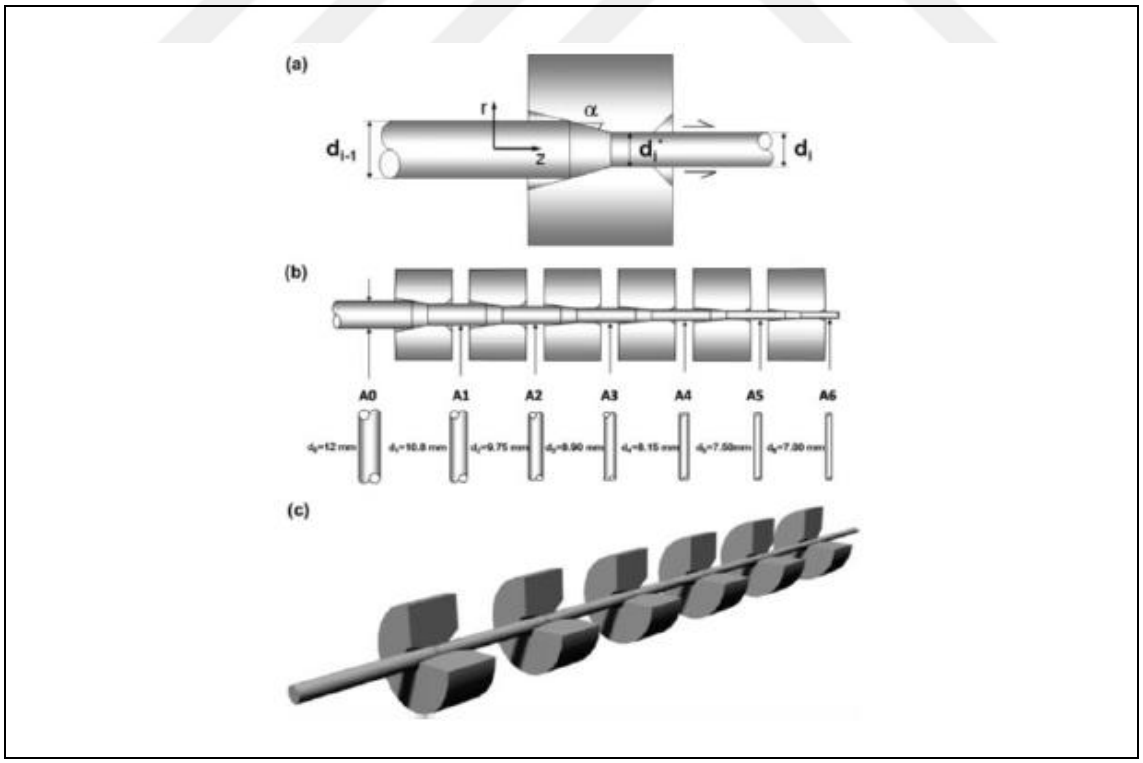
Tel çekme işleminde değişken kesitte filmaşinin/tellerin matris adı verilen kalıplardan geçirilmesi esastır. Şekil 3.13'te telin matristen geçirilme işlemi olarak haddeleme şematik bir görüntü ile gösterilmiş olup, şematik görüntü D_0 başlangıç kesitine sahip bir malzemenin daha düşük kesit çapına (D_ε) haddeleme işlemi ile indirgenebileceğine işaret etmektedir. Bu tür bir süreçte matris ile temas eden yüzeyde basma gerilmeli altında malzemede şekillendirme sağlanabilmektedir (Ünseren, 2006).



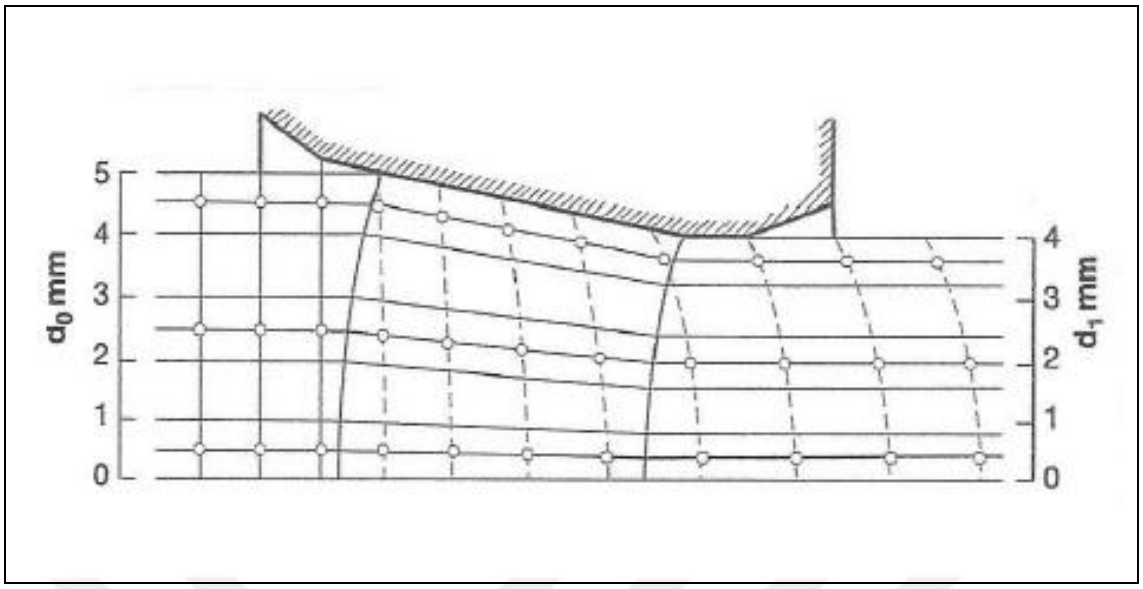
Şekil 3.14. Haddeleme işleminin şematik gösterimi (Ünseren, 2006).

Tel çekme işleminde belirli bir doğrultuda uygulanan çekme kuvveti genellikle kalıp çıkışına uygulanmaktadır ve bu kuvvet hem telin kalıp içerisinde çekilmesini sağlamakta hem de kuvvet nedenli oluşan çekme ve basma gerilmelerinin bir kombinasyonu ile form verme sürecinde sürdürülebilirlik sağlanmaktadır. Esasen tel çekme işlemi çoklu deformasyon kademesi içermektedir. Bu durumda birbirine göre değişken hadde tezgahlarının kullanımı kaçınılmazdır. Şekil 3.14 çoklu merdanelerden telin akışına özgü şematik bir görüntü göstermektedir.

Her bir merdane sisteminden bulunan matrislerin azalan açıklığından dolayı açığa çıkan gerilmeler altında daha ince tel kesitlerine ulaşılmaktadır. Deformasyon belirli bir doğrultuda telin çekilmesi esasına dayandığından Şekil 3.15'ten de görüleceği üzere malzeme içerisinde homojen bir plastik akış sağlanabilmektedir. Öte yandan seri tel çekme işlemleri sonrası malzeme yapısında gerilme birikimi ve buna bağlı olarak pekleşme nedenli sertleşme meydana gelebilir. Bu durumda, malzemeye şekil değişim kabiliyetinin yeniden kazandırılması için özel tavlamalara gereksinim duyulabilir (Ünseren, 2006; URL-4).



Şekil 3.15. Tel çekme işleminde çoklu redüksiyona işaret eden şematik görüntüler; (a) tel-matris etkileşimi, (b ve c) değişken matrislerden tel geçişi ve kesit indirgenmesi (URL-4)

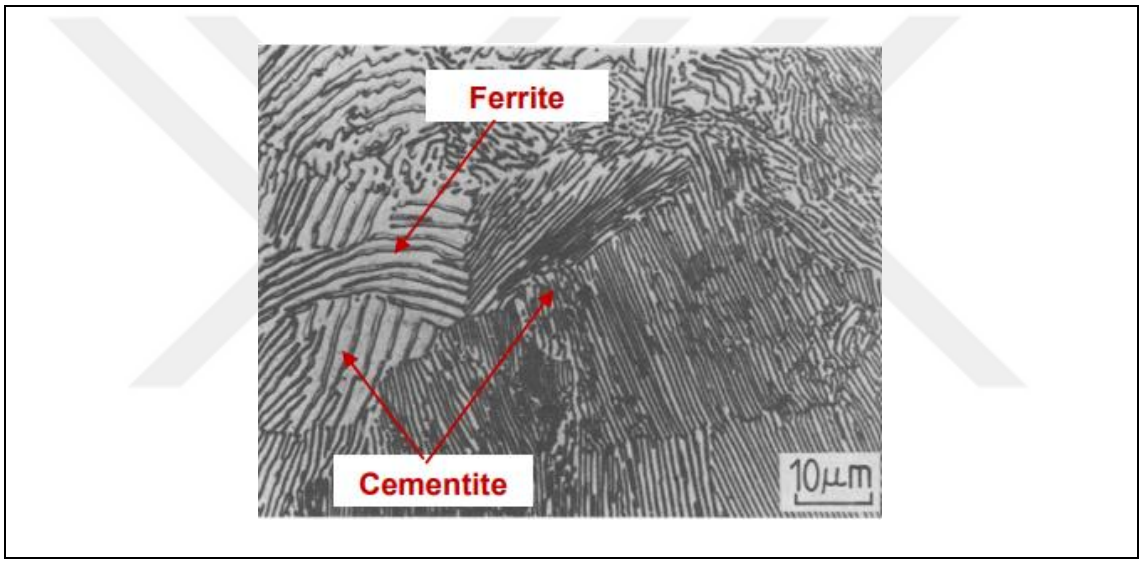


Şekil 3.16. Telin matristen geçişi sırasında plastik akışı gösteren şematik bir görsel (Ünseren, 2006)

Tel çekme işleminde malzemenin çekme kuvvetine karşı bir direnç göstermesi ve bu direnç altında şekillenmesi beklenir. Matris içerisinden malzemenin akışı sırasında malzemede var olan dislokasyon yoğunluğun artması ve bu durumda malzemenin sertleşmesi kaçınılmazdır. Ancak bu durumda malzeme sünekliğinde bir kaybın gerçekleştiği de açıktır. Bundan dolayı redüksiyon işlemlerini takiben tavlama ile hem iç gerilme seviyesi azaltılması hem de mekanik özelliklerde bir dengeleme hedeflenir. Tüm bu süreçlerin telin yüzey kalitesinde herhangi bir bozunum sağlamayacak şekilde de organize edilmesi gerekmektedir. İndirgenmiş kesitte homojen bir metalurjik ve mekanik karakterde ve aynı zamanda yüksek yüzey kalitesinde üretilmiş tellerin endüstriyel koşullarda uzun ömürde çalışması mümkündür (Lee ve diğ., 2009). Tel çekme işleminin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi açısından sisteme dahil olan çekme makinelerinin, kullanılan matrislerin, yağlayıcıların uygun özellikte seçilmesi esastır. Proseslemede kullanılan çekme makineleri bir taraftan telin sürekli hareketini sağlamakta ve diğer taraftan da deformasyonun kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bir diğer önemli bileşen olan matris ise telin geometrik hassasiyetini ve yüzey kalitesini belirlemektedir. Proseslemede kullanılan yağlayıcılar sürtünmenin azaltılmasında ve matris ömrünü arttırarak yüksek yüzey kalitesinde tel üretimine olanak vermektedir (Fang ve diğ., 2014; Ünseren, 2006)

3.4. Çelik Teller Üzerine Fiziksel Metalurjik Yaklaşımlar

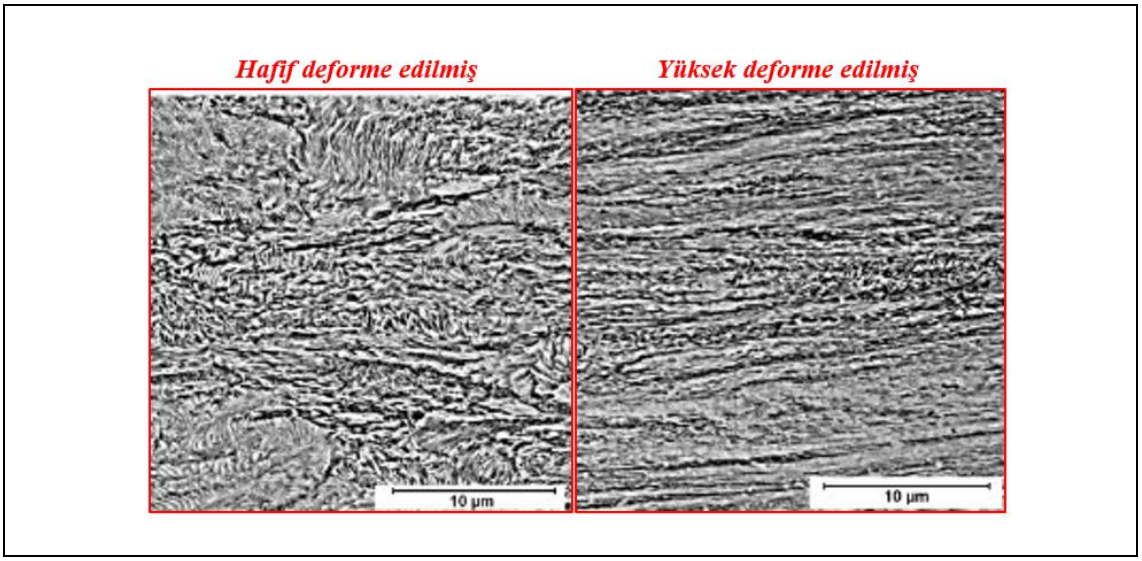
Günümüz endüstriyel uygulamalarında sahip oldukları üstün mekanik özelliklerinden dolayı çelik esaslı teller tercihen kullanılmaktadır. Tellerin mekanik özelliklerini belirleyen ana unsurlardan biri de sahip oldukları metalurjik yapıdır. Yüksek mukavemetli çelik tellerin metalurjik yapısı esasen perlitik bir yapıya dayanmaktadır. Bilindiği üzere, perlitik yapı ferrit (α) ve sementitten oluşan lamelli bir yapıdır ve lamellar yapının deformasyon altında yönlenmesi ile lamellararası mesafenin indirgenmesi ile tele üstün mekanik özellikler kazandırılmaktadır. Şekil 3.16'da lamellar yapıda bulunan perlit yapısı ve bu faza ait bileşenler (ferrit ve sementit) gösterilmiştir (Kapito ve diğ., 2019).



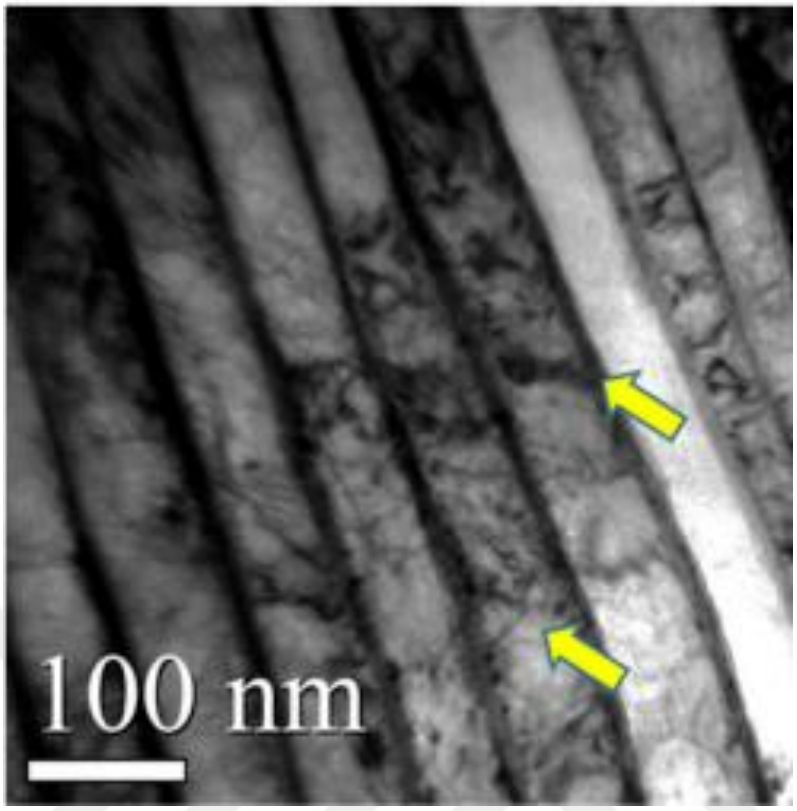
Şekil 3.17. Ferrit ve sementit içeren tipik perlit yapısı (Kapito ve diğ., 2019).

Perlitik çeliklerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda iyileştirilebilir ve bu durumda hem malzemenin kimyasal bileşimi hem de malzemeye uygulanan ısıl işlem süreçleri belirleyici olmaktadır. Çeliğin kompozisyonunda bulunan karbon birçok özelliği eşzamanlı belirleyebilmektedir. Karbon içeriği çelikte perlitik oluşum yüzdesini belirlemekte olup, artan karbon oranı ile birlikte çelik matriksinde perlitik faz miktarı artmaktadır. Perlitin nispeten artması malzemenin mekanik özelliklerinde belirgin bir değişime de neden olur. Öte yandan kompozisyonda bulunan mangan, silisyum ve nikel gibi alaşım elementleri de perlitin dayanımını ve sünek karakterini belirleyebilmektedir (Feyrer, 2007; Jun ve diğ., 2008; Zhang ve diğ., 2013). Perlitik çeliklerde malzemenin östenitleştirilmesi ve kontrollü soğutularak çelikte ötektoid dönüşümün sağlanması esastır. Yüksek mukavemetli çelik

tellerin üretiminde özellikle patentleme olarak bilinen çelikte yapısal dönüşümlerin gerçekleşmesine olanak veren bir işlem sıklıkla kullanılır. Dönüşümü takiben deformasyon altında perlitin lamellararası mesafesinin indirgenmesi istenen mekanik özelliklerin tel matriksine kazandırılmasına olanak vermektedir. Patentleme işlemi çoğunlukla 850-970°C sıcaklık aralığına bir ısıtma ve sonrasında kum/kurşun banyolarına kontrollü soğutma evrelerini içerir. Böylece soğuk deformasyona hazır bir matriks yapısı çeliğe kazandırılmış olur (Meseguer-Valdenebro ve diğ., 2015; Duarte ve diğ., 2018). Uygulanan deformasyon koşullarına bağlı olarak perlit yapısında bir değişimin gerçekleşmesi kaçınılmazdır. Deformasyon oranındaki artış ile perlitin lamellararası mesafesinde önemli bir indirgenme sağlanabilmektedir. Bu süreçte lamellerin yönlenmesi ve tel malzemede deformasyon doğrultusunda mukavemet kazanımı da söz konusudur (Zhang ve diğ., 2013; Zelin, 2002). Şekil 3.17 ise değişken oranda (hafif ve yüksek) deforme edilmiş perlit yapısını örneklemektedir ve deformasyon seviyesine bağlı olarak lamellararası mesafenin indirgenmesi mümkündür (Grygier ve diğ., 2015). Şekil değişim kabiliyeti yüksek olan ferrit ile nispeten daha sert olan sementitin perlitik yapı içerisinde bulunması ve deformasyon koşullarında inceltilmiş lamellar sınırlarda yoğun dislokasyon yoğunluklarına ulaşılması malzemenin mukavemetini belirleyen ana unsurlardır. Şekil 3.18'de verilen transmisyon mikroskop görüntüsü sınırlar boyunca dislokasyon takılmalarını örneklemektedir (Jung ve diğ., 2021).



Şekil 3.18. Değişken oranda deforme edilmiş perlit yapılarını gösteren mikroskop görüntüleri (Grygier ve diğ., 2015).



Şekil 3.19. Deforme edilmiş çelik tel matriksi içerisinde lamellar sınırlarda bloklanmış dislokasyonlar (Jung ve diğ., 2021).

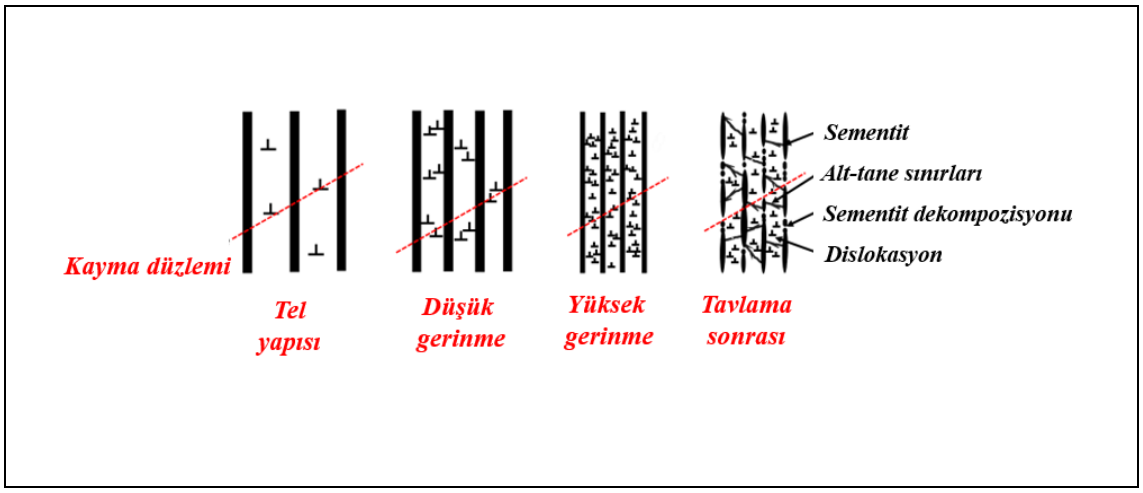
Perlitik yapıda bulunan sert sementit fazı soğuk çekilmiş tellerin mekanik özelliklerini belirleyici bir yapı elemanıdır. Her en kadar sementit düşük bir hacim oranında matriks içerisinde bulunsa da varlığı çekilmiş tellerin dayanım ve sünek seviyesini belirlemektedir.

Soğuk deformasyon sonrası sementitin perlit sünekliğine olan etkisi iki mekanizma ile açıklanabilmektedir; (i) sementit lamellerinin deformasyon sırasında dislokasyon hareketlerine bağlı olarak ince parçacıklara ayrılması ve (ii) deformasyon sırasında sementitin bir partikül gibi davranarak dönme ve kayma hareketleri sergilemesi (Zhang ve diğ., 2013; Zelin, 2002). Öte yandan tellerin deformasyonunu takiben tavlama ile matriks içi bileşenlerin yeniden organize edilmesi ile doğrudan özellik değişimi sağlanabilmektedir. Şekil 3.19 şematik olarak telin deformasyonu ve tavlama süreçlerine özgü yapısal unsurlardaki değişimleri göstermektedir.

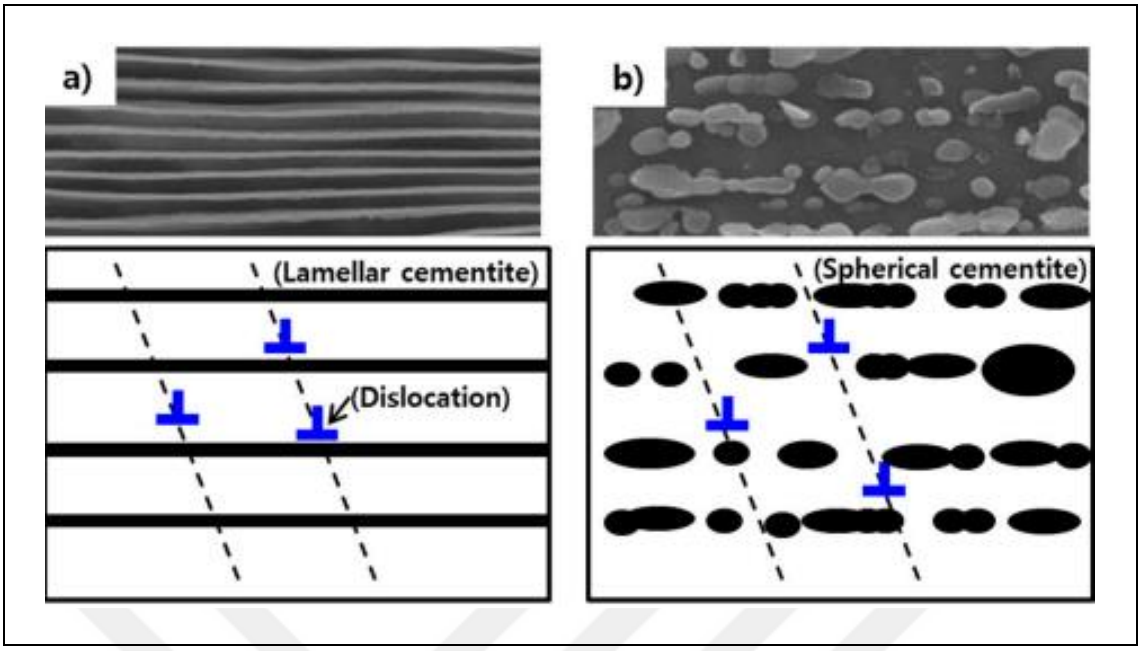
Tel içerisinde kayma düzlemleri boyunca bir taraftan şekil değişimi sağlanmakta ve bir taraftan da dislokasyon oluşumları gözlenebilmektedir. Gerinme durumuna bağlı olarak dislokasyon yoğunluğu değişebilmekte ve çoğunlukla dislokasyon yoğunluğu yüksek seviyede gerinme koşullarında artabilmektedir. Tavlama etkisi altında alt tanelerin oluşumu, dislokasyon yoğunluğunun azalması ve sementitin morfolojik dekompozisyonu gerçekleşebilmektedir.

Şekil 3.20'de verilen mikroyapı örnekleri özellikle ve şematik görseller perlitin deformasyon altında yönlenmesini, yönlenmiş yapı içerisinde dislokasyon yoğunluğun oluşabileceğini ve tavlama ile birlikte özellikle sementit morfolojisindeki değişimi göstermektedir. Tavlama koşullarında lamellar yapılı sementit morfolojisinin tavlama koşullarında yüzey gerilimleri ve termodinamik gereği küreselleşme eğilimine girmesi bilinen bir gerçektir. Bu tür bir morfolojik değişim tav sıcaklığından/süresinden önemli ölçüde etkilenebilmektedir.

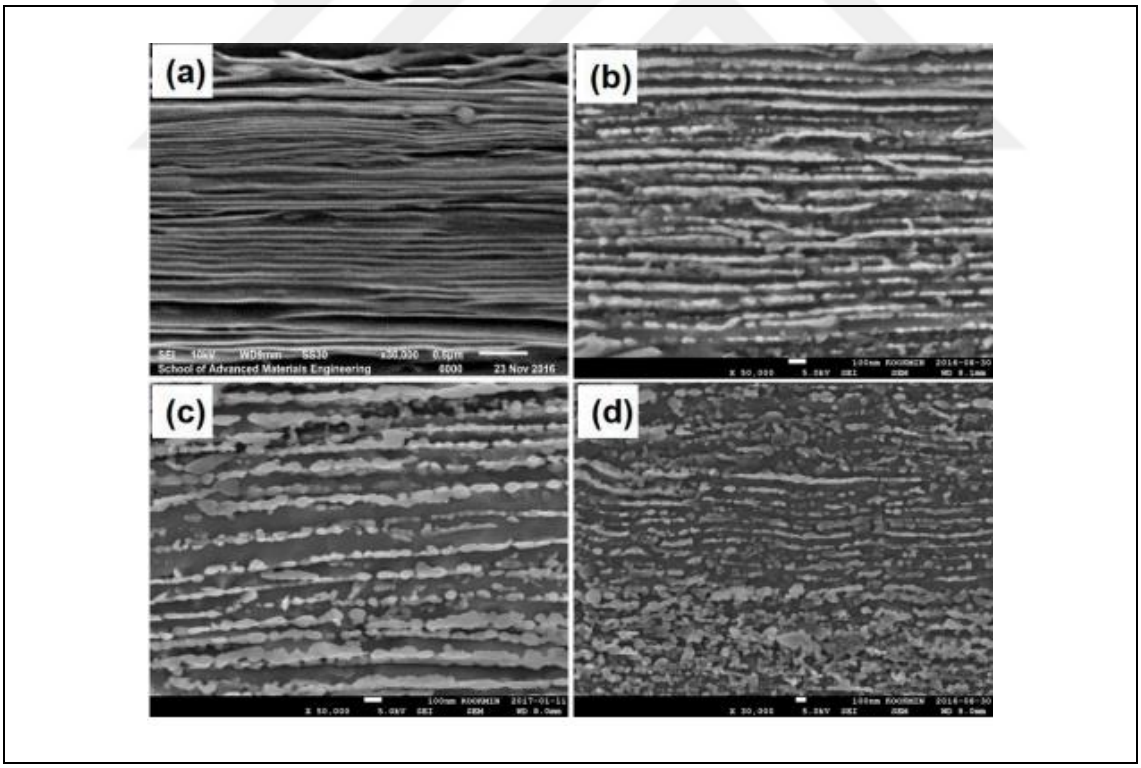
Nitekim Şekil 3.21'de verilen mikroskop görüntüleri deformasyonu takiben farklı sürelerde 500°C sıcaklıkta yapılan tavlama işleminin sementitte morfolojik değişim üzerine ne denli etken olabildiğine işaret etmektedir. Ancak Şekil 3.22'den de görüleceği üzere bu tür bir tavlama etkinliğinin deforme edilmiş çelik matriksinin sahip olduğu en yüksek mukavemet değerlerinde önemli bir azalmaya neden olacağı da not edilmelidir (Jung ve diğ., 2021).



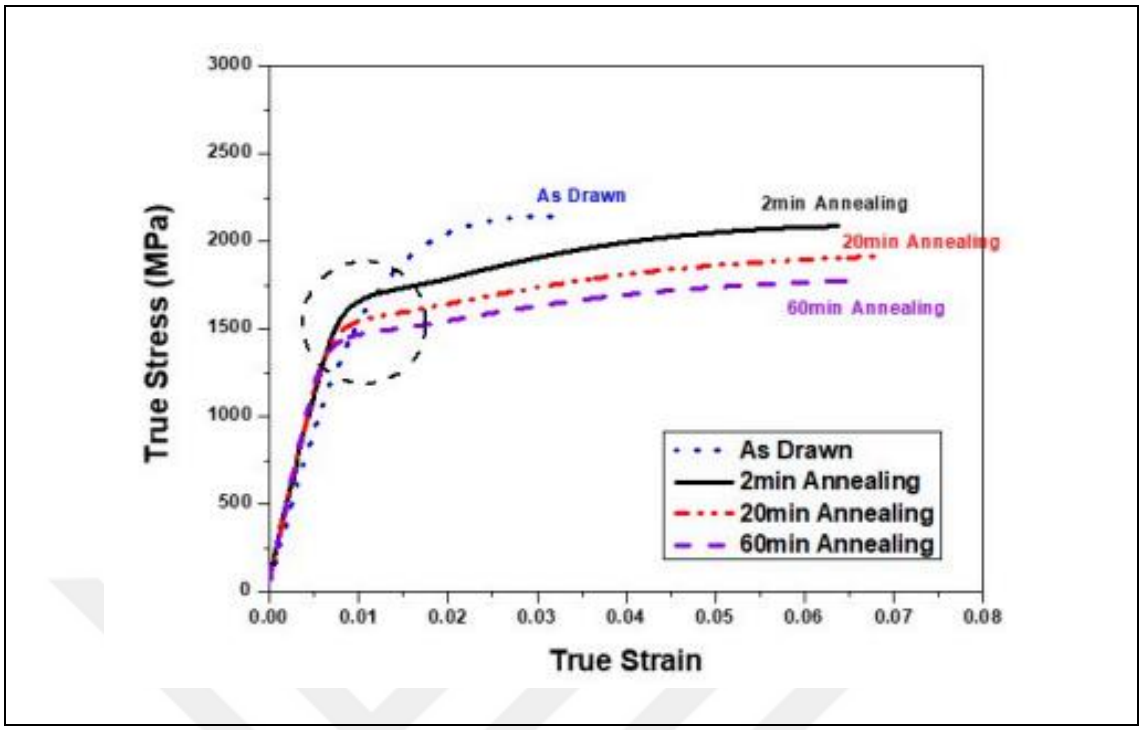
Şekil 3.20. Deformasyon ve tavlama süreçlerinde perlitik bir matriks içerisinde gelişebilen mikroyapısal değişimler (Jung ve diğ., 2021).



Şekil 3.21. Deformasyon altında perlitin yönlenmesini ve tavlama ile sementit morfolojisindeki değişimi gösteren örnek mikroyapı ve şematik görüntüler (Jung ve diğ., 2021).



Şekil 3.22. Deformasyonu takiben farklı sürelerde 500°C sıcaklıkta yapılan tavlama işleminin sementit morfolojisi üzerine etkisini gösteren mikroskop görüntüleri; (a) deforme edilmiş yapı, (b) 2 dakika, (c) 20 dakika ve (d) 1 saat tavlanmış yapılar (Jung ve diğ., 2021).



Şekil 3.23. Tavlama süresine bağlı olarak deformed edilmiş çeliğin mukavemetinde meydana gelen değişimler (Jung ve diğ., 2021).

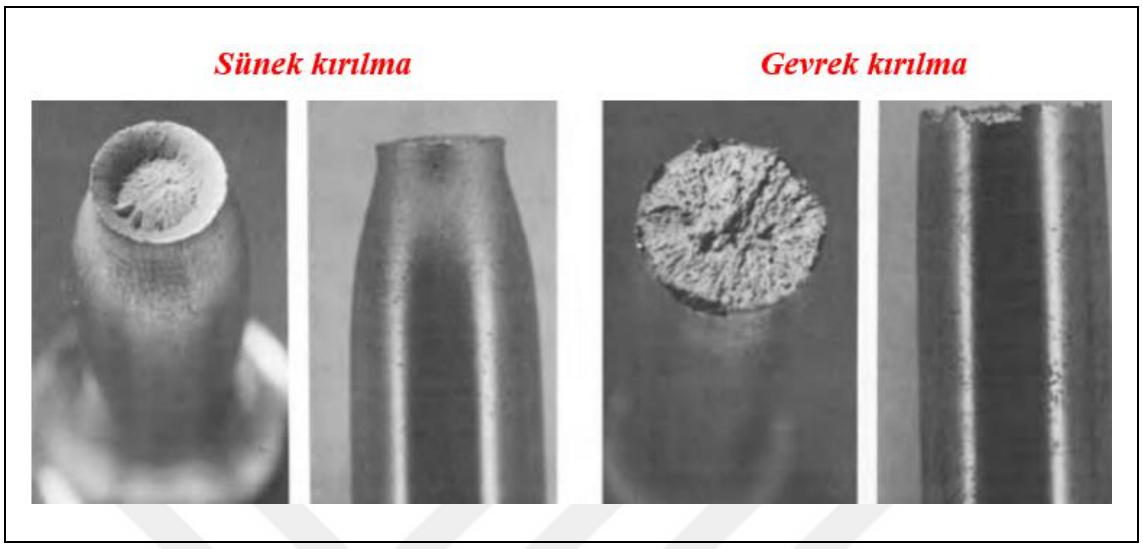
3.5. Çelik Tellerin Kırılma Davranışı

Kırılma olayı, bir malzemenin gerilme etkisi altında iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Kırılma genellikle malzemenin nasıl kırıldığına göre sınıflandırılır ve bu nedenle genel olarak kırılma; (i) sünek kırılma ve (ii) gevrek kırılma olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir.

Sünek kırılmada çatlak ilerlemesinden önce ve çatlak ilerleme sırasında plastik deformasyonun açığa çıkmaktadır. Ancak gevrek kırılmada plastik deformasyon oldukça düşük miktarda gözlenir ve genellikle akma dayanımının altındaki gerilme değerlerinde hasarlanma gerçekleşir. Bundan dolayı gevrek kırılma çok az veya hiç uyarı olmadan aniden meydana gelir.

Şekil 3.23'te silindirik demir esaslı bir malzemede çekme yüklenmesi altında meydana gelen sünek ve gevrek kırılma makro görüntüler eşliğinde örneklenmiştir. Şekil 3.23'te verilen makro görüntülerden de görüleceği üzere, sünek kırılma halinde malzeme plastik deformasyon nedeni ile kesitte önemli bir şekil değişimi sergileyebilmektedir. Ancak

gevrek kırılma halinde malzeme kesitinde herhangi bir değişim izlenmez ve düz bir kırılma yüzeyi açığa çıkar (Showkat, 2021).

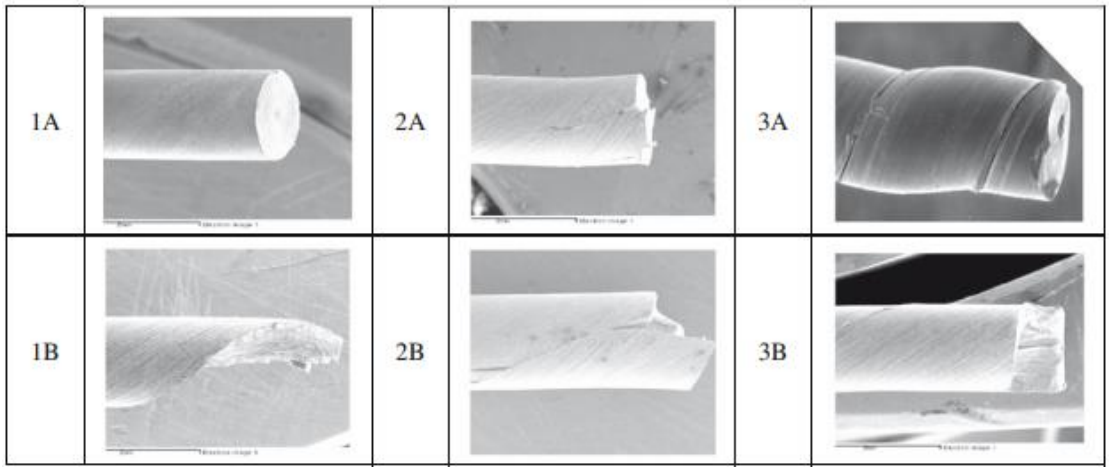


Şekil 3.24. Demir esaslı malzemede sünek ve gevrek kırılmayı gösteren makro görüntüler (Showkat, 2021).

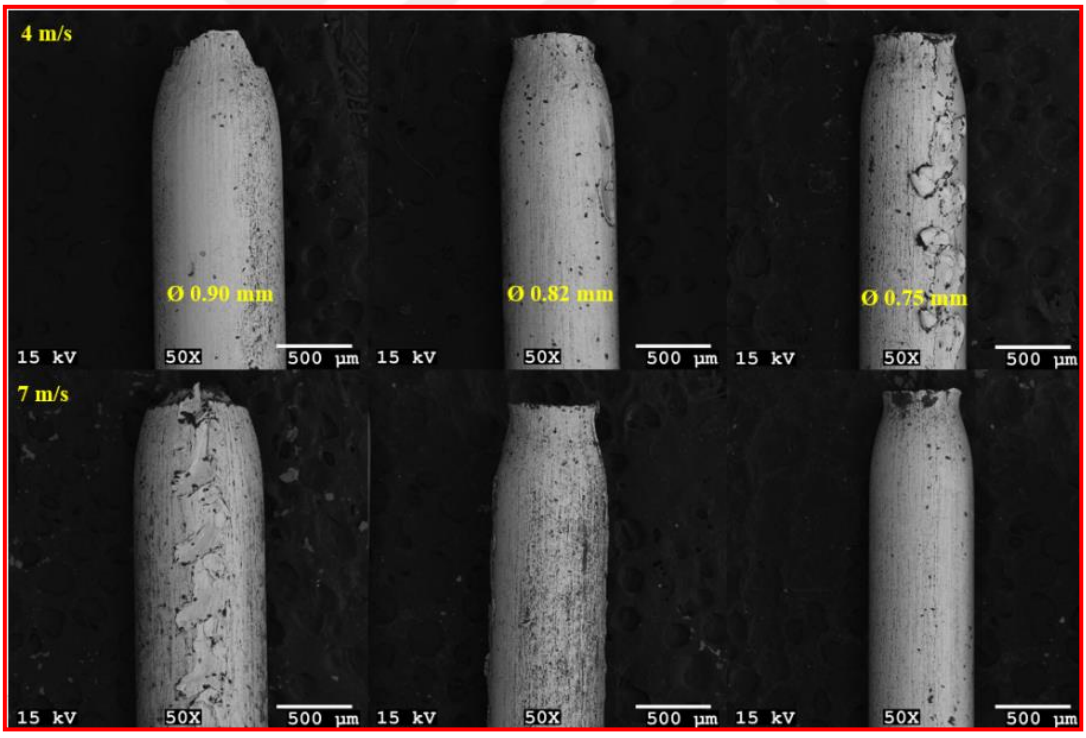
Tel esaslı malzemede yüklenme moduna göre değişken makro kırılmalar izlenebilmektedir. Şekil 3.24'te torsiyon yüklenmesine maruz kalan tellerin makro kırılmaları örneklenmiştir. Esasen torsiyonel yüklenmede düz kırılma yüzeyinden oldukça şekilsiz bir kırılma yüzeyine geçişe işaret eden üç tip kırılma paterni gözlenir. Hasarlanma esasen malzemenin delaminasyonu ile gerçekleşir.

Delaminasyon, plastik burulma deformasyonunun erken aşamalarında tel yüzeyinde uzunlamasına bir bölünme ile karakterize edilir. Daha fazla burulma ile çatlak numune uzunluğu boyunca uzanır ve ona tipik bir helezonik görünüm kazandırır. Bir tork-açı eğrisi ölçüldüğünde, bu bölünme delaminasyon sırasında torkta keskin bir düşüşle karakterize edilir (Lee ve diğ., 2009).

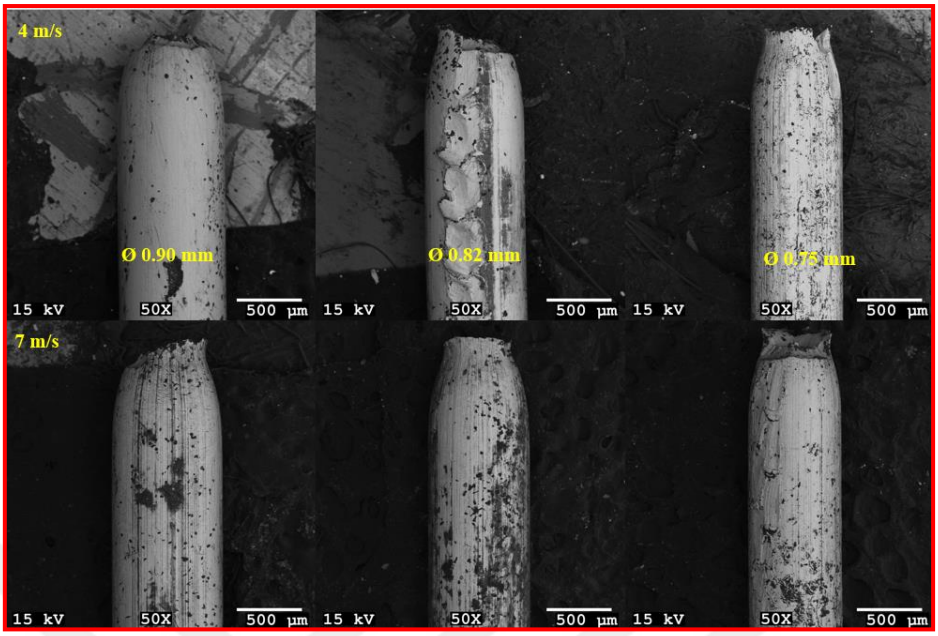
Çelik tellerin kırılması üzerine deformasyon koşullarının ne denli belirleyici olduğu Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da verilen kırılma modları ile izlenebilir. Kuru ve sulu ortamlarda ve değişken hızlarda soğuk deforme edilen patentlenmiş ve galvanizlenmiş tellerde her ne kadar çekme yüklenmesi altında teller çanak-koni tipi bir kırılma ile hasarlanmış olsa da üretim süreçlerinde artan çekim hızı ve sulu ortam koşullarında yüzeyde plastik yığılma ve aşınma nedenli malzeme kaybı daha fazla gerçekleşebilmektedir (Muradoğlu ve diğ., 2024).



Şekil 3.25. Torsiyon yüklenmesine maruz kalan çelik tellere ait makro kırılma görüntüleri (Lee ve diğ., 2009).



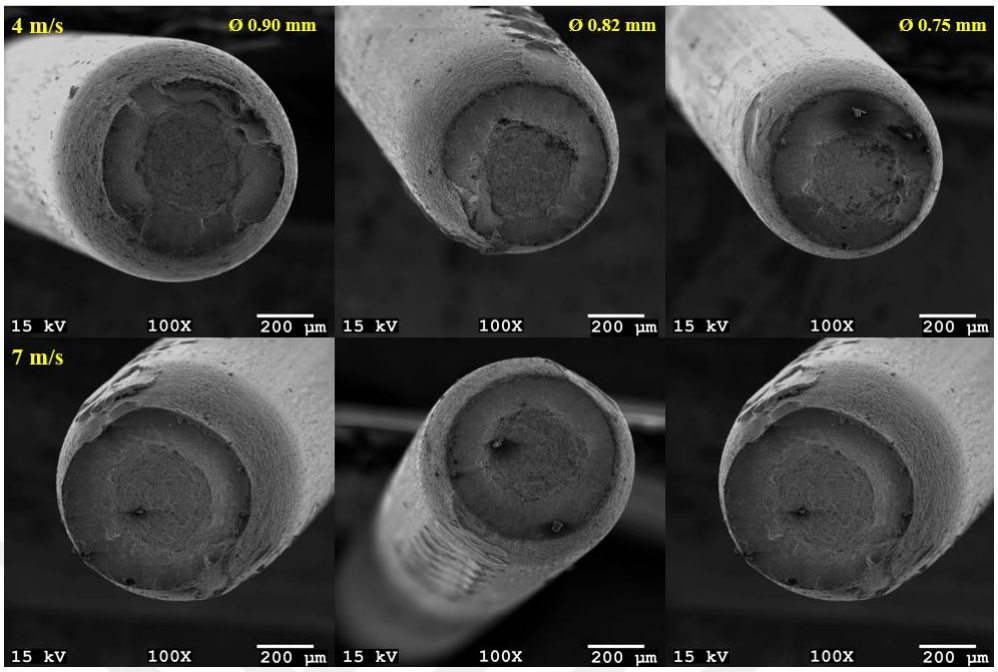
Şekil 3.26. Kuru ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerin kopma testi sonrası kırılma modunu gösteren görüntüler (Muradoğlu ve diğ., 2024).



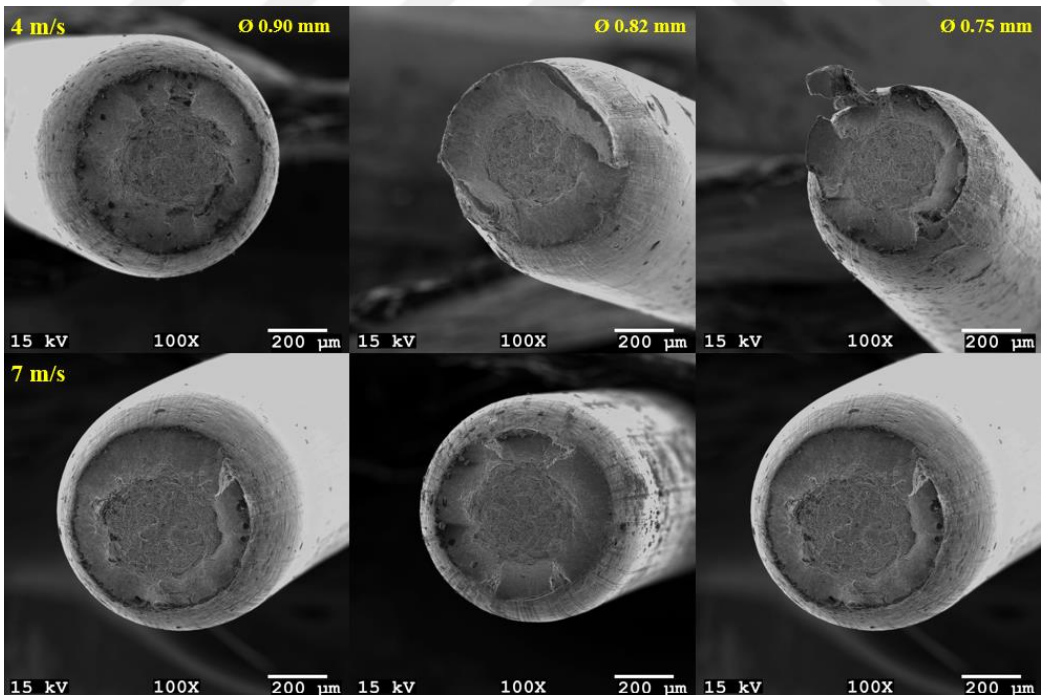
Şekil 3.27. Sulu ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerin kopma testi sonrası kırılma modunu gösteren görüntüler (Muradoğlu ve diğ., 2024).

Mikroskobik seviyede kırılma yüzeylerinin analizi taramalı elektron mikroskopları ile yapılabilmektedir. Bu süreçte özellikle ikincil elektron modunda yapılan görüntülemeler çatlak çekirdeklenme yöreleri, çatlak ilerleme yolu ve genel/lokal kırılma analizi kolaylıkla yapılabilmektedir.

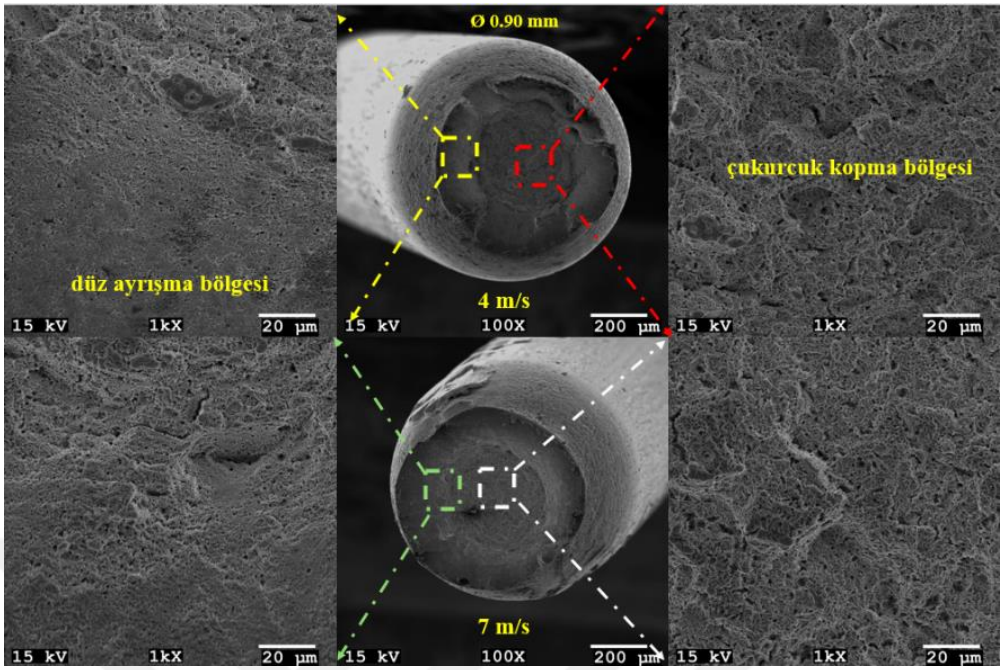
Yüksek mukavemetli çelik tellerin kırılma davranışı üzerine yapılan birçok çalışmada esasen kırılma özgü genel paternler izlenmektedir. Teller için çoğu kez temel kırılma (hasarlanma) çanak-koni tipi bir kırılma ile gerçekleşir ve bu tür bir kırılmada yüklenme altında plastik deformasyon ile birlikte boyun oluşumu, merkezde mikro boşluk oluşumu ve boşlukların birleşmesi sonucu düz bir çatlak ilerleme hattının oluşumu ve nominal yüke 45°'lik açı ile kayma nedenli ayrışmayı da içeren bir süreç söz konusudur. Tel imalatına özgü proses koşulları değişken olsa da çanak-koni tipi kırılma ile hasarlanma çoğu tel malzeme için geçerlidir. Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'te değişken koşullarda üretimi yapılan (kuru/sulu ortamda ve değişken hızlarda tel çekme) tellerin çekme yüklenmesi altında kırılma morfolojisini gösteren taramalı elektron mikroskop görüntüleri (SEM) verilmiştir. Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'dan da görüleceği üzere, merkezde çoğunlukla çukurcuk kopması ve yanal yüzeylerde düz ayrışma bölgeleri var olabilmektedir (Muradoğlu ve diğ., 2024).



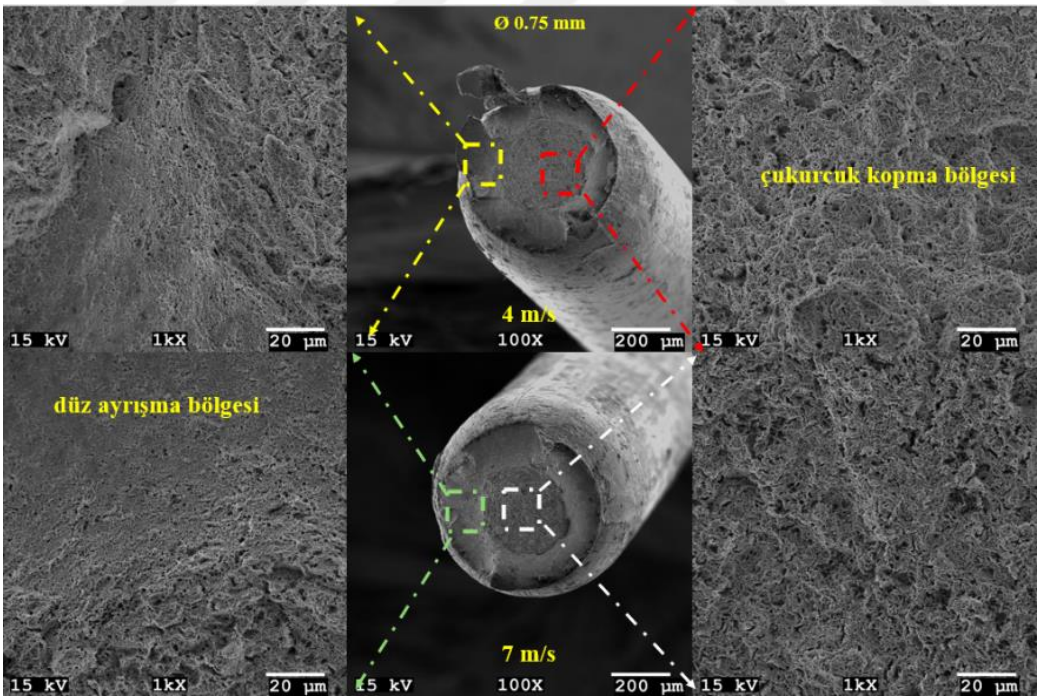
Şekil 3.28. Kuru ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerin kopma testi sonrası kırılma modunu gösteren SEM görüntüleri (Muradoğlu ve diğ., 2024).



Şekil 3.29. Sulu ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerin kopma testi sonrası kırılma modunu gösteren SEM görüntüleri (Muradoğlu ve diğ., 2024).



Şekil 3.30. Kuru ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş 0.90 mm çaplı telin nihai kopma bölgesini gösteren SEM görüntüleri (Muradoğlu ve diğ., 2024).



Şekil 3.31. Sulu ortamda soğuk deformasyon ile üretilmiş 0.75 mm çaplı telin nihai kopma bölgesini gösteren SEM görüntüleri (Muradoğlu ve diğ., 2024).

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Tedarik Edilen Filmaşinlerin Yapısal Özellikleri

Tez çalışması kapsamında Tablo 4.1'de kimyasal kompozisyonu verilen 5.50 mm çaplı filmaşinler (F) hammadde olarak kullanılmıştır. Esasen kullanılan malzemeler ticari 1006, 1022 ve 1055 malzemelerdir. Tez çalışması kapsamında bu malzemeler sırası ile F-06, F-22 ve F-55 olarak kodlanmıştır. Konvansiyonel bir işlem olarak tedarik edilen filmaşinlerin yüzeylerinde var olabilen demir oksitlerin ve kontaminasyonların giderimini için asitleme işlemi uygulanarak yüzeylerin kimyasal temizliği gerçekleştirilmiştir. Bu tür bir işlem sonrasında yüzeydeki asit kalıntılarının giderimi için yıkama ve sonrasında kurutma işlemi de uygulanmıştır. Filmaşinlerden alınan en ve boy kesitlerde metalografik işlemler sonrasında yapılan bazı yapısal karakterizasyon çalışmaları ile malzemelerde dekarbürizasyon, kılcal çatlak, kalıntı ve segregasyon gibi süreksizlikler incelenmiştir. Yüzey kalitesinin belirlenmesinde ISO 16120-1 standardı kullanılmıştır. Dekarbürizasyon, segregasyon ve kalıntı kontrolü sırası ile ISO 3887, ISO 16120-1 ve ISO 4967 standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

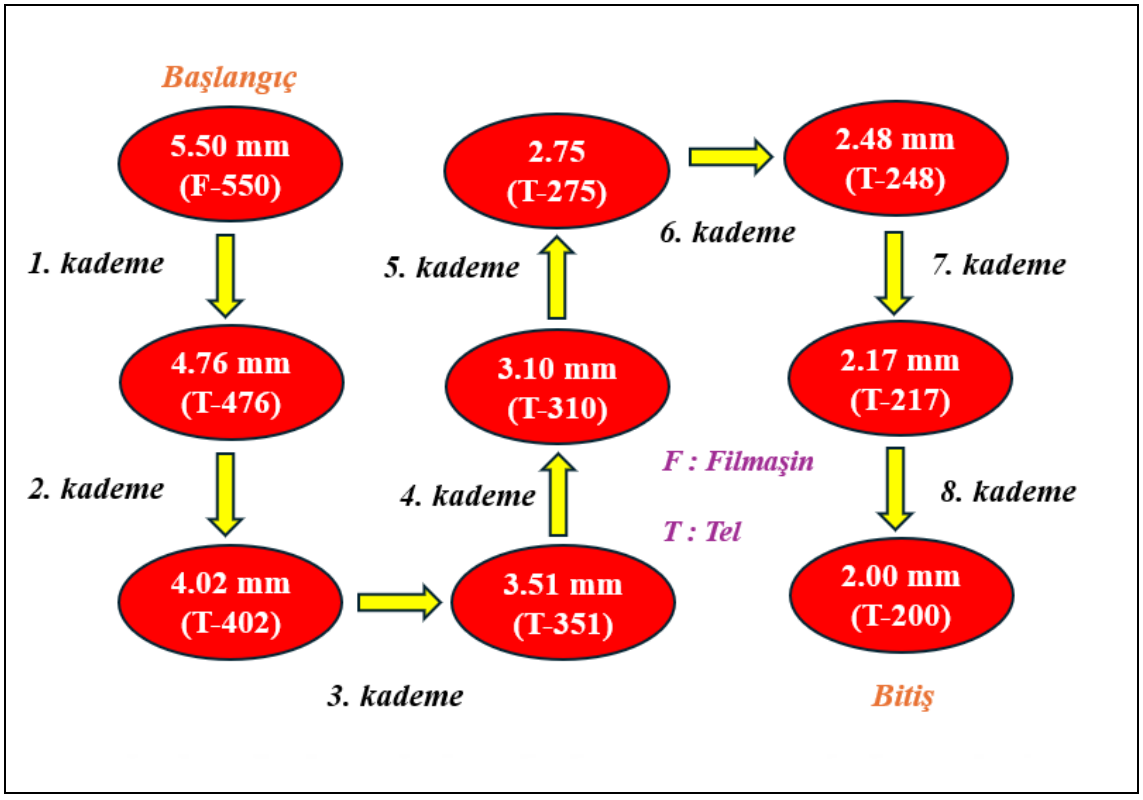
Tablo 4.1. Filmaşinlere ait kimyasal kompozisyonlar (ağ.-%)

Malzeme	C	Mn	Si	P	S	Fe
F-06	0.05	0.38	0.12	0.019	0.008	balans
F-22	0.24	0.55	0.19	0.010	0.012	balans
F-55	0.57	0.61	0.23	0.010	0.012	balans

4.2. Soğuk Tel Çekme İşlemleri

Tedarik edilen farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin nihai çapa kadar tüm soğuk tel (T) çekimleri Özyaşar Tel ve Galvanizleme Sanayi A.Ş. altyapısı kullanılarak ticari pratiklikte gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte 5.50 mm çaptan 2.00 mm çapa indirgeme 8 kademede çoklu redüksiyon işleminin başarılı bir şekilde uygulanması ile sağlanabilmiştir. Şekil 4.1'de hem tüm redüksiyon sürecine özgü indirgenme çap sıralaması hem de her bir kondisyon için malzeme tanımlaması örneklenmiştir. Verilen akış şematiğinde 5.50 mm çaptan indirgenme süreci "başlangıç" olarak ifade edilmiştir.

Nihai çap olan 2.00 mm değerine ulaşma süreci ise “bitiş” olarak ifadelendirilmiştir. Tüm indirgenmiş çap değerlendirmelerinde Filmaşin çapının kesit düşümü sırasında azalan redüksiyon kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Tel çekim sürecinde ulaşılan indirgenme çaplarını (mm) ve ilgili çapa karşılık gelen malzemelerin tanıtımını gösteren şematik bir görsel

4.3. Mikroyapısal ve Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları

Filmaşinlerden ve soğuk deformasyon ile üretilmiş tellerden alınan en/boy kesitler metalografik olarak hazırlanmıştır. Bu aşamada, temsili numunelerin sıcak bakalite alınması ile kalıplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kalıplama işlemini takiben değişken SiC esaslı zımpara kağıtları (320-100 mesh) kullanılarak numune yüzeylerinde kaba ve ince zımparalama işlemleri yapılmıştır. Yüzeylerin nihai parlatılması ise 3 µm’luk elmas solüsyon kullanımı ile sağlanmıştır. Malzemelerin matriksinde bulunan fazların belirlenmesi için %3 nital çözeltisi kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm bu süreçte Özyaşar Tel ve Galvanizleme Sanayi A.Ş. bünyesinde bulunan Ar-Ge Laboratuvar ve Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Yüksek Sıcaklık Malzemeleri Laboratuvar altyapısı kullanılmıştır.

Parlatılmış ve dağlanmış yüzeylerin metalurjik karakterizasyonu Özyaşar Tel ve Galvanizleme Sanayi A.Ş. bünyesinde bulunan Ar-Ge Laboratuvar bünyesinde bulunan NIKON LV150N model ışık mikroskobu (IM) kullanılarak yapılmıştır. Bu süreçte hem filmaşin yapısında hem de tel malzeme yapısında bulunabilen dekarbürizasyon kalınlığı, metalik olmayan kalıntı varlığı, segregasyon bantları, tufal batması ve ferritik/perlitik faz bileşenleri izlenmiştir. Malzemelerin mekanik karakterizasyonu sertlik ölçümleri ve çekme testleri ile yapılmıştır. Sertlik ölçümleri ALS laboratuvarında bulunan Emcotest Durascan70 model mikro Vickers sertlik cihazının kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, belirli kesite indirgenmiş çelik esaslı tellerin en/boy kesitlerine ait sertlik değerleri 1 kgf yük altında belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri çoklu yapılmış olup, en az 5 ölçüm sonrasında aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri belirlenmiştir.

Hem filmaşin malzemelerinde hem de çekilmiş her bir tel malzemesinde kopma testleri de gerçekleştirilerek malzemelere ait akma ve kopma mukavemet değerleri ve aynı zamanda %-uzama değerleri de kayıt altına alınmıştır. Tüm kopma testleri Çokyaşar Holding bünye altyapısında bulunan çekme test düzeneğinde (Zwick Roell) gerçekleştirilmiş olup, testler ISO 6892-1 standardına uygun olarak tamamlanmıştır. Testler oda sıcaklığında ve 0.0067 1/sn çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir malzeme için en az 3 test yapılmış ve testler sonrası tüm mekanik değerler için aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır.

4.4. Fraktografik İnceleme Çalışmaları

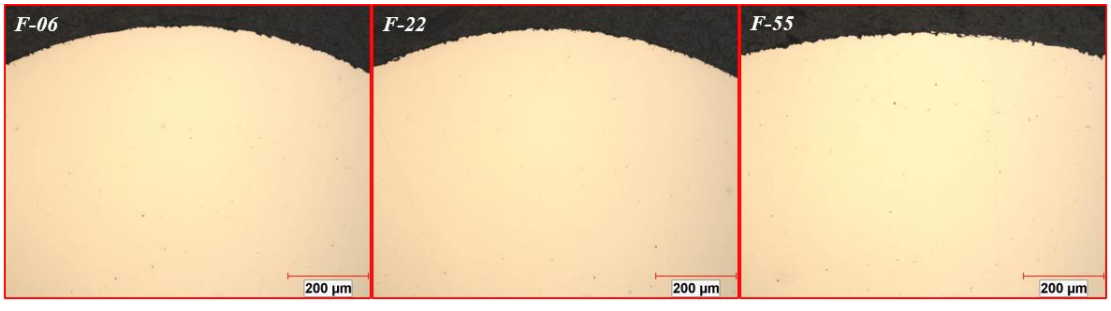
Kopma testleri sonrası her bir hasarlanma bölgesi ana mamulden hassas kesme ile kırılma numuneleri alınmış olup, hasarlanma bölgelerinin yüzeyleri ve kesitleri fraktografik etüdler eşliğinde karakterize edilmiştir. Kırılma yüzeyleri alkol içerisinde uzun süreli ultrasonik olarak temizlenmiştir. Kurutulan yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM, Jeol JSM 6060) ile incelenmiş olup, değişken büyütmelerde mikrofraktograflar elde edilmiştir. Öte yandan kırılma kesitleri bakalite alınarak metalografik olarak hazırlanmıştır. Özellikle kesitlerin parlatılmış konumlarında kırılmaya özgü çatlak çekirdeklenme/ilerleme süreçleri değerlendirilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

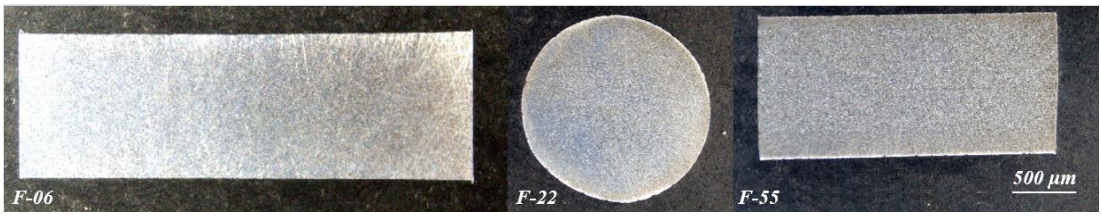
5.1. Filmaşinlerin Yapısal Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Ana hammadde olarak kullanılacak olan filmaşinlerin özellikle en kesitlerinde herhangi bir geometrik farklılığın olmaması ticari pratiklikte tel çekiminin bir gereğidir. Şekil 5.1'den de görüleceği üzere, farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin (F-06, F-22 ve F-55) en kesitleri herhangi bir geometrik yapı farklılığına işaret etmektedir. Filmaşinler kesitleri boyunca süreklilik göstermektedir. Öte yandan özellikle en/boy kesitte segregasyon nedenli herhangi bir bant yapısının olmaması da filmaşinin metalurjik olarak yeterliliğini ortaya koyabilmektedir.

Bilindiği üzere, katılaşmada makro ve mikro seviyede segregasyonun oluşumuna bağlı olarak çelik matriks içerisinde kayda değer bir elementel kompozisyon farklılaşması açığa çıkabilmektedir. Bu durumda özellike faz/tane sınırları boyunca kompozisyonda bulunan herhangi bir elementin birikimi homojen olmayan bir matriks yapısının oluşumuna neden olmaktadır. Sürekli dökümü takiben özellikle sıcak deformasyon koşullarında segregasyon içeren bölgelerin deformasyon doğrultusunda yönlenmesi ve dizinler oluşturması da mümkündür. Bu tür bir matriks yapısının var olması malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini zayıflatabilmektedir. Şekil 5.2'de tez çalışması kapsamında hammadde olarak kullanılan filmaşinlerin farklı kesitlerine ait makro görüntüleri verilmiş olup, makroskobik görüntüler matriks içerisinde herhangi bir bantsı/dizin yapısının olmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5.1. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin parlatılmış en kesitlerine ait IM görüntüleri



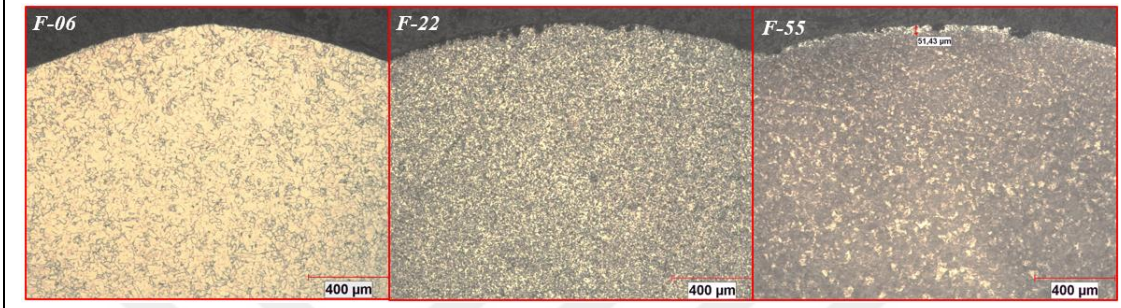
Şekil 5.2. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin en/boy kesitlerine ait makro görüntüler

Filmaşin malzemelerin yüzey ve yüzey altı süreksizlikleri arasında dekarbürizasyonun önemli bir yeri vardır. Metalurjik olarak filmaşinlerin üretim atmosferinde yüzeyinde karbonsuzlaşma meydana gelebilir ve bu durumda orijinal matriks yapısından bulunan perlit yapısı yüzeyden belirli bir derinliğe kadar bulunmamaktadır. Bu durumda yüzeyden içeri doğru bir ferritce zengin bir tabakanın oluşması kaçınılmazdır. Yüzeyin ferritce zengin olmasına karşılık merkez yapısının ferrit-perlit yapısına sahip olması şekillendirmede homojen kesit değişimin gerçekleştirilemeyeceğine işaret etmektedir. Fazların sertlikleri dikkate alındığında, ferrit fazının perlit fazına göre nispeten daha yumuşak olması ve şekillendirme kuvvetleri altında ferrit fazının öncelikli şekil değişim eğilimi bu tür bir problemin açığa çıkmasına olanak vermektedir. Öte yandan yüzeyin öncelikli deformasyonu merkez yapısının eşlenik deformasyon eğiliminde olmaması yüzeyden merkeze doğru farklı kalıntı gerilmelerin de açığa çıkmasına neden olabilmektedir. Bu tür bir durum malzemenin yorulma mukavemetlerinin azalmasına neden olabilmektedir.

Şekil 5.3'te farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin dağlanmış kesitlerine ait IM görüntüleri verilmiştir. ISO 3887 standardı dikkate alındığında dekarbürizasyon derinliği filmaşin çapının %1'ini geçmeyecek bir değerde olması istenir. Yüzeyden içeriye doğru dekarbürizasyon derinlikleri takip edilmiş ve 30- 50 µm'luk bir derinlikler tespit edilmiştir.

Yapılan incelemeler dağlanmış kesitlerde kayda değer bir dekarbürizasyonun olmadığına işaret etmektedir. Şekil 5.3'te verilen IM görüntüleri aynı zamanda filmaşin malzemelerin sahip olduğu fazları da yansıtmaktadır. Bilindiği üzere, çelik kompozisyonların bulunan

karbonun perlit yapıcı bir karakteristiği bulunmaktadır. Tedarik edilen filmaşinlerden en düşük karbon (ağ.% 0.05) içeriğine sahip F-06 malzemesine kıyasla en yüksek karbon (ağ.% 0.57) içeriğine sahip F-55 malzemesinde perlit miktarında belirgin bir artış vardır (Şekil 5.3). bu artış görece matriks içerisinde bulunan koyu kontrastlı faz miktarının artışı ile kolaylıkla izlenebilmektedir.

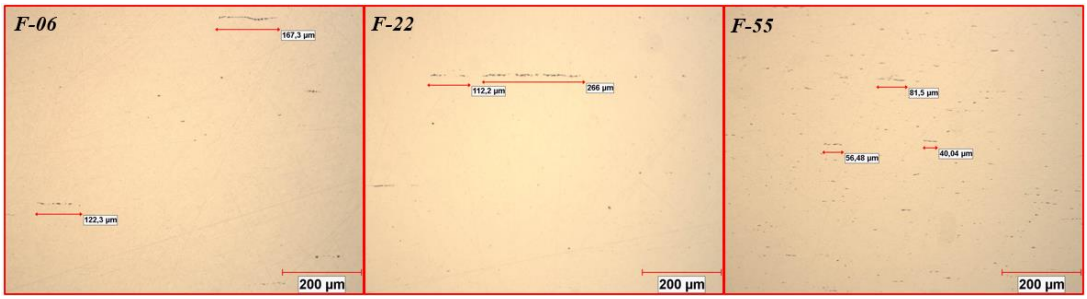


Şekil 5.3. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin dağlanmış en kesitlerine ait IM görüntüleri

Filmaşin malzemelerin hem şekillendirilmesi hem de malzemelerin mekanik özellikleri açısından matriks içerisinde bulunabilen metalik olmayan kalıntıların kontrolü önemlidir. Çalışma kapsamında ISO 4967 standardına uygun olarak metalik olmayan kalıntı kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

Metalik olmayan kalıntıların morfolojileri, türleri ve miktarları malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir. Çelik içerisinde bulunan kalıntılar çoğu kez oksit ve sülfür esaslı olabilmektedir. Oksit esaslı olanlar tekli bir oksit yapısında olabileceği gibi kompleks oksit yapısında da olabilmektedir. MnS gibi bir metalik olmayan kalıntı ise çelik matrikslerinde sıklıkla gözlenen bir kalıntıdır. Metalik olmayan kalıntılar parlatılmış kesitlerde matrikse göre nispeten daha koyu kontrastlarda gözlenebilmektedir. Matriksin IM incelemelerinde kalıntılara göre yüksek refleksiyon katsayısını kontrastın eldesi için yeterli olabilmektedir.

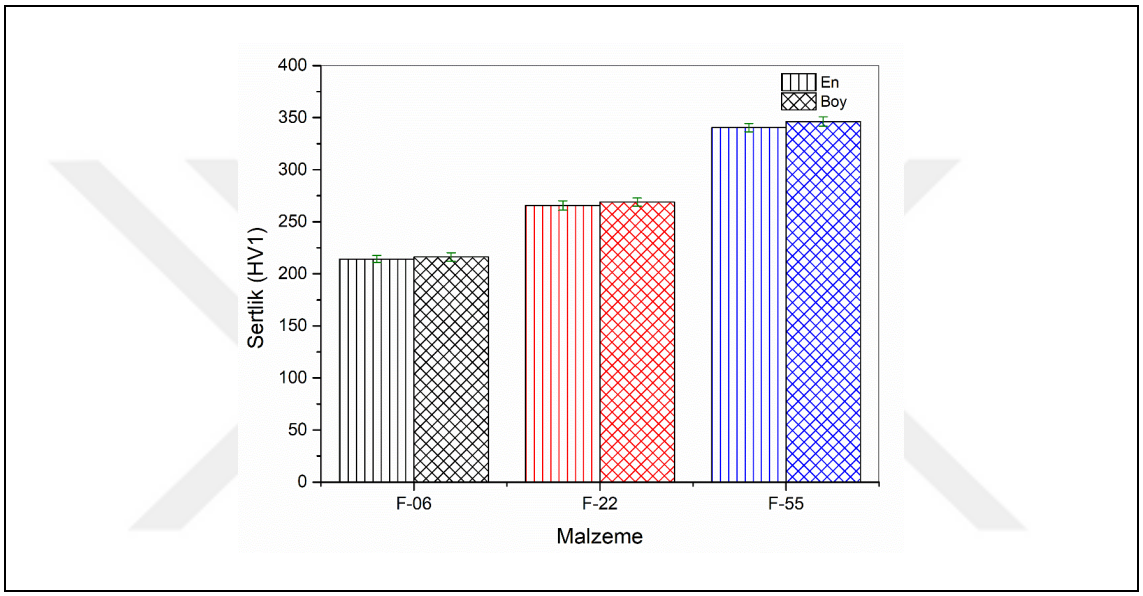
Şekil 5.4'te her bir filmaşin için matrikslerinde gözlenen metalik olmayan kalıntılar (MnS) örneklenmiştir. Her ne kadar matriksler içerisinde sıklıkla bu tür kalıntılar izlenmemiş olsa da var olan kalıntıların satırlanma uzunlukları 300 µm değerin altındadır. Bu açıdan bakıldığında metalik olmayan kalıntı dağılımı standart gereği kabul edilebilir bir seviyededir.



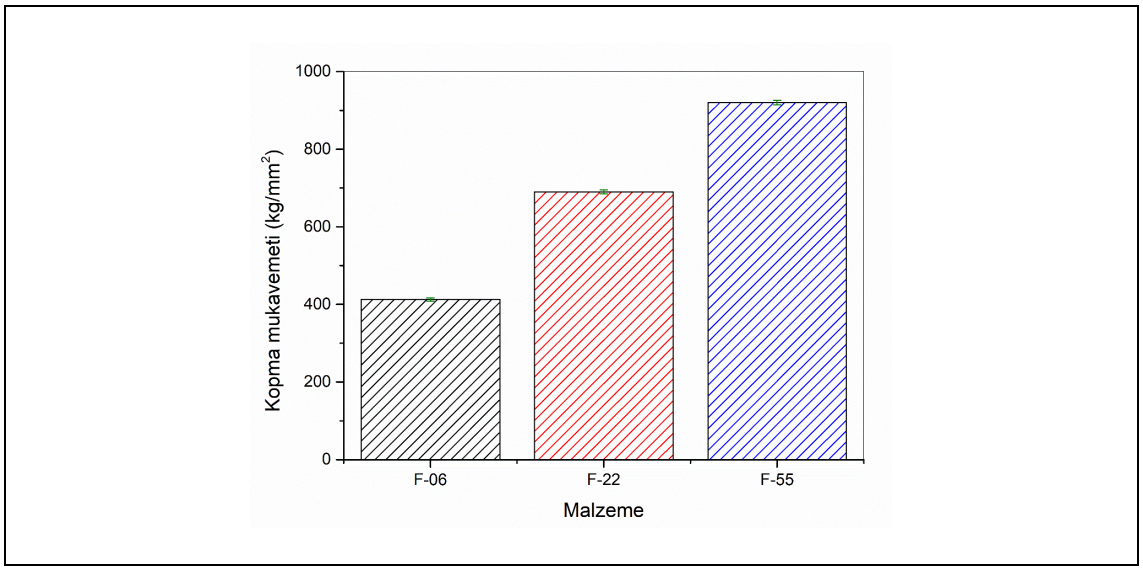
Şekil 5.4. Farklı karbon içeren filmaşinlerin matrikslerinde bulunan kalıntıları gösteren IM görüntüleri

Dağlanmış matriks yapılarından da anlaşılacağı üzere, filmaşinler kimyasal kompozisyonlarının bir sonucu olarak farklı perlit miktarlarına sahiptir. Her ne kadar tez çalışması kapsamında her bir filmaşin malzeme içerisinde %-perlit miktarı ve perlite ait lamellararası mesafe değerleri kantitatif metalografik belirlenmemiş olmasa da artan karbon miktarına bağlı olarak perlit miktarındaki artışın sertlik değerlerine yansıması kaçınılmazdır. Şekil 5.5'te her bir filmaşinin en ve boy kesitinden alınan sertlik değerleri verilmiştir. Bilindiği üzere, en kesitte perlitin matriks içerisinde gelişigüzel dağılımına karşılık boy kesitte deformasyon boyunca uzaması ve yönlenmesi söz konusudur. Bu durumda en kesit sertliğine kıyasla boy kesit sertliğinde bir artış mümkündür. Şekil 5.5'te verilen sertlik değerleri bir taraftan en kesitlere göre boy kesitlerinde düşük miktarda artışa ve bir taraftan da artan karbon miktarına bağlı olarak filmaşin sertliğinde meydana gelen artışa işaret etmektedir. En düşük karbon içeriğine sahip F-06 malzemesinin boy kesit sertlik değeri ~ 216 HV1 iken, en yüksek karbon içeriğine sahip F-55 malzemesi için bu değer ~ 346 HV1 seviyesindedir. Öte yandan karbon içeriği ve perlit faz miktarı filmaşinlerin kopma mukavemet değerlerinde de belirleyici olabilmektedir. Şekil 5.6'da verilen filmaşinlere ait kopma mukavemet değerleri doğrudan artan karbon miktarına bağlı olarak kopma mukavemet değerlerindeki belirgin artışı göstermektedir. F-06, F-22 ve F-55 malzemeleri için elde edilen kopma mukavemet değerleri sırası ile 413, 690 ve 920 kg/mm^2 değerindedir. Her bir filmaşin için elde edilen bu değerler malzeme kompozisyonuna ve üretim kondisyonuna karşılık hedeflenen değer aralığındadır. Filmaşinlerden çoklu redüksiyon ile inceltilmiş kesitlerde teller soğuk deformasyon ile üretileceğinden malzemenin sahip olduğu %-uzama değeri bu aşamada önem arz

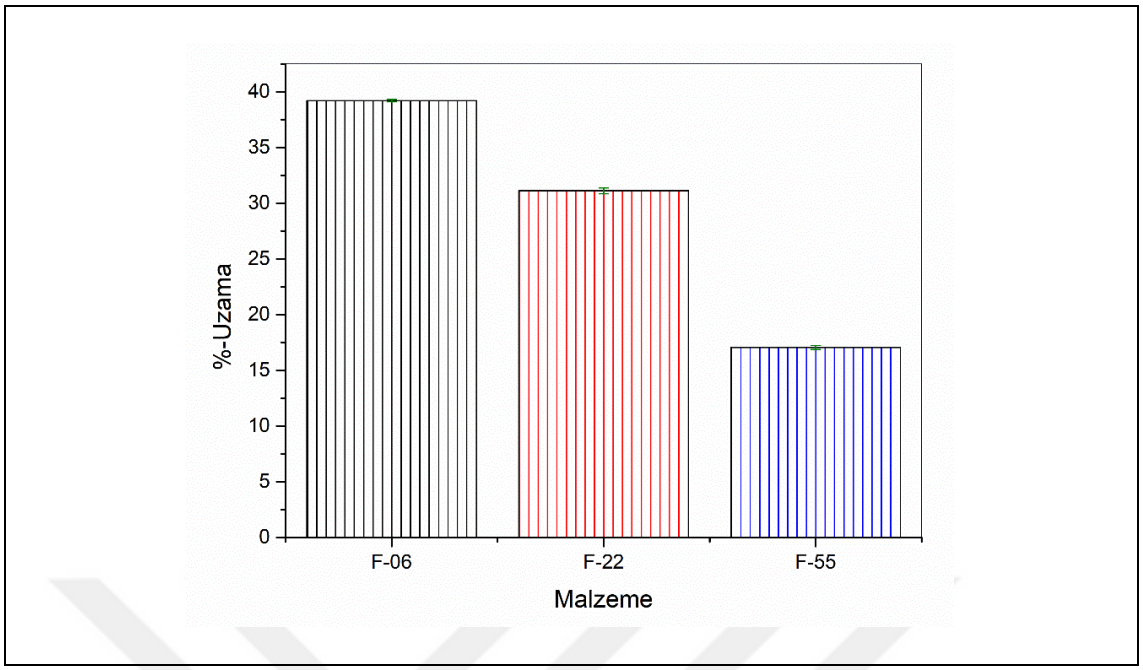
etmektedir. Şekil 5.7'de tedarirk edilen her bir filmaşin malzemeye ait %-uzama değerleri verilmiştir. En düşük karbon içeren F-06 malzemesi en yüksek %-uzama değerine (%39,21) sahiptir. Karbon miktarı arttıkça %-uzama değerinde belirgin bir azalma tespit edilmiş olup, F-22 ve F-55 malzemeleri için %-uzama değerleri sırası ile %31 ve %17 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler ticari pratiklikte soğuk deformasyon ile tel üretimine yönelik başlangıç hammaddesi olarak seçilen filmaşinler için ideal değerler olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.5. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin en ve boy kesit sertlik değerleri



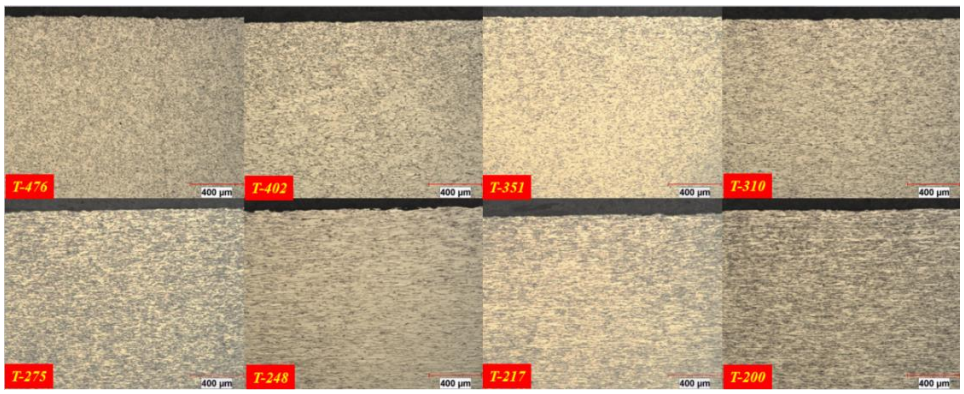
Şekil 5.6. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin kopma mukavemet değerleri



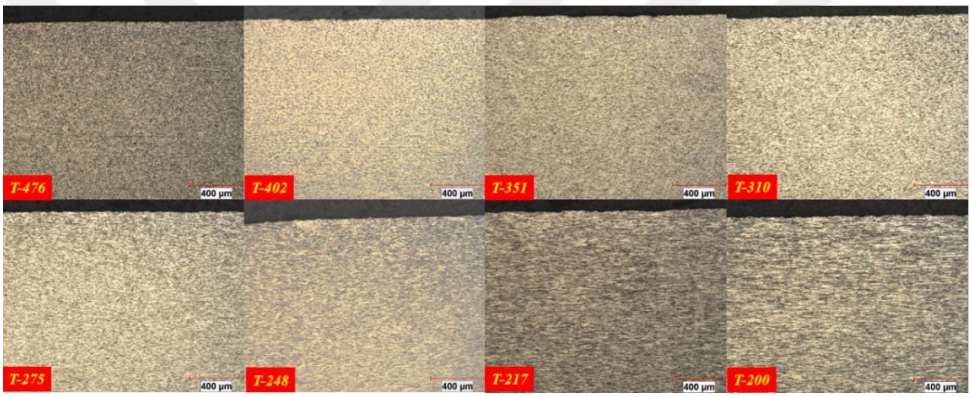
Şekil 5.7. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin %-uzama değerleri

5.2. Çapı İndirgenmiş Tellerin Yapısal Özelliklerinin Değerlendirilmesi

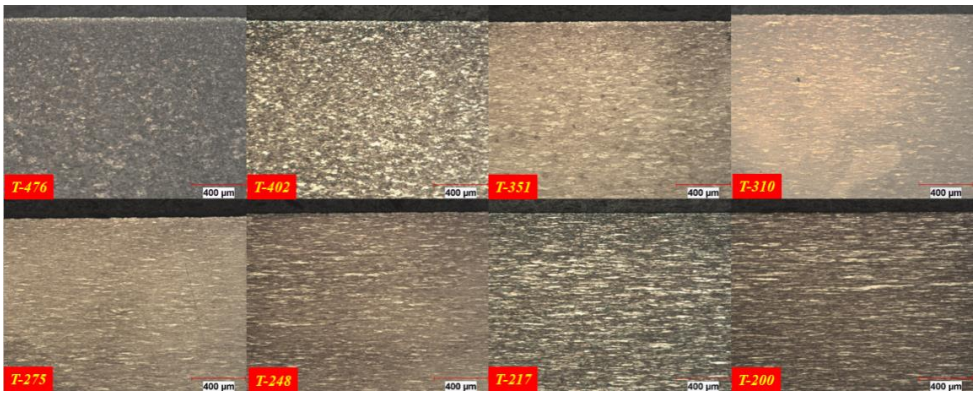
Şekil 5.8'de F-06 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonlar sonrası nihai tel çapına getirilmesi sürecine kadar her bir kademede malzemenin dağlanmış boy kesitlerine ait IM görüntüleri verilmiştir. Bilindiği üzere, her bir kesit indirgenmesinde perlitik fazın deformasyon doğrultusunda yönlenmesi ve lamellararası mesafesinin indirgenmesi söz konusudur. Nitekim daha yüksek karbon içeriğine sahip F-22 ve F-55 filmaşinlerin soğuk deformasyonu sonrasında da benzer bir eğilim vardır (Şekil 5.9 ve Şekil 5.10). Her ne kadar tez çalışması kapsamında daha yüksek çözünürlükte ve netlik derinliğinde mikroskobik incelemeler eşliğinde lamellararası mesafe değişimleri izlenmese de IM görüntüleri incelen tel çaplarında daha yoğun ve ince perlit dizinlerinin olabildiğine işaret etmektedir. Bu durumda her bir redüksiyon sonrası malzemenin mekanik özelliklerinde de kayda değer bir değişim olabilmektedir. Bilindiği üzere, perlit fazı ferrit ve sementit lamellerini içermekte olup, soğuk deformasyon koşullarında lamellararası mesafenin indirgenmesi, ferrit lamel sınırları boyunca lokal dislokasyon yoğunluğunun artması ve tüm bunlara bağlı olarak sertliğin artması kaçınılmazdır. Artan karbon içeriğine bağlı olarak perlit miktarının görece artması ve deformasyon sonrası daha yoğun ve yönlenerek inceltilmiş lamellar yapının daha sert olması beklenir.



Şekil 5.8. F-06 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası indirgenmiş tel kesitlerine ait IM görüntüleri



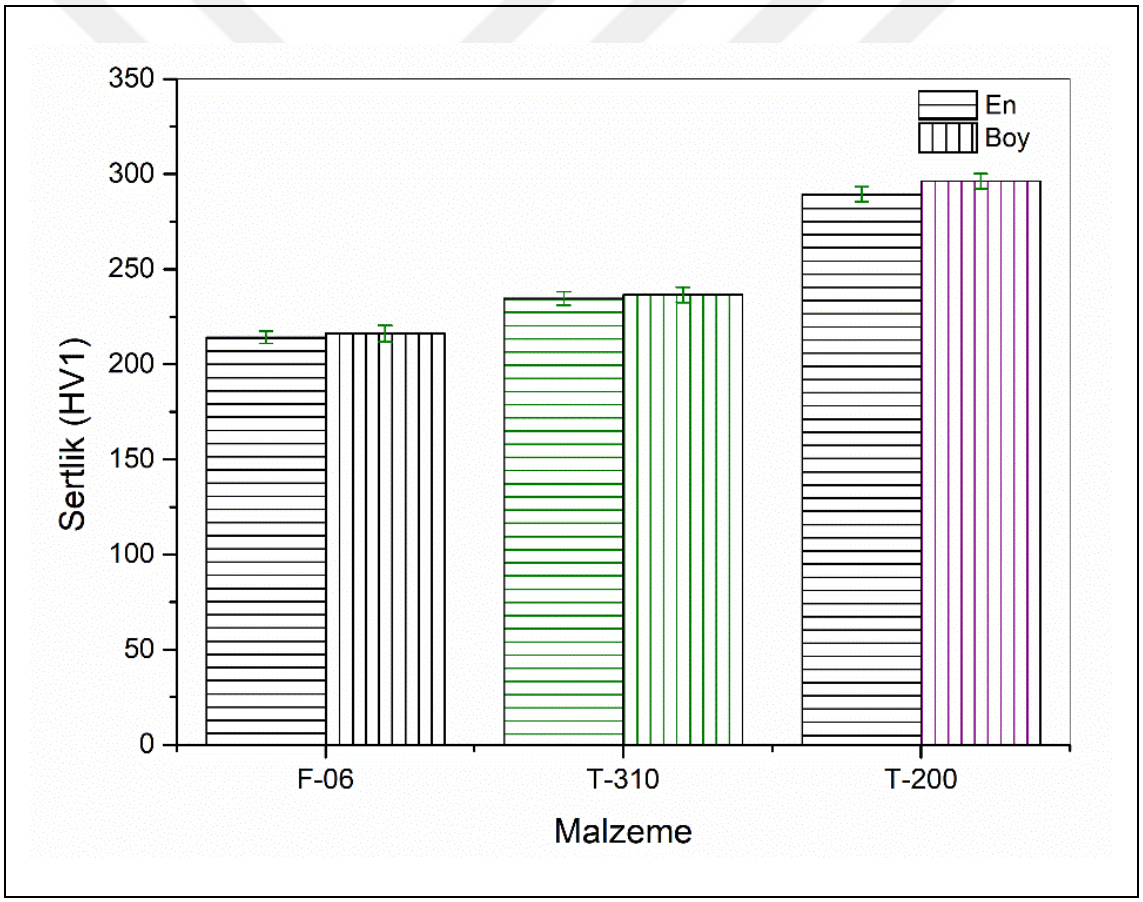
Şekil 5.9. F-22 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası indirgenmiş tel kesitlerine ait IM görüntüleri



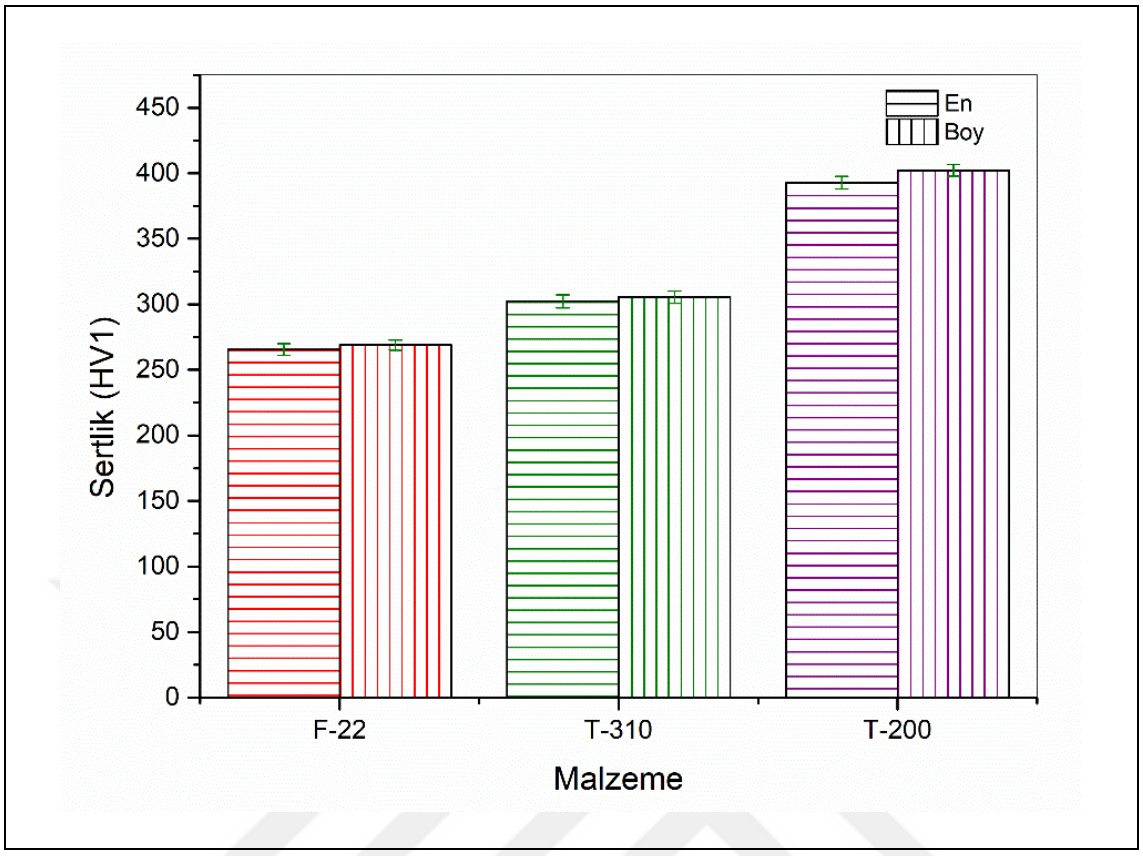
Şekil 5.10. F-55 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası indirgenmiş tel kesitlerine ait IM görüntüleri

Şekil 5.11'de F-06 filmaşin malzemesinin kesitte indirgenmesi sonrası orta seviye ve nihai tel çaplarına karşılık en/boy kesit sertlikleri verilmiştir. Başlangıç filmaşin sertliği en/boy kesitte 214/216 HV1 değerinde olup, tel çapının 3.10 mm getirilmesi halinde malzemenin (T-310) en/boy kesit sertliği 234/236 HV1 değerine ulaşmıştır.

Kesitin daha da inceltilmesi ve hedeflenen tel çapına (2.00 mm) sürekli deformasyonun uygulanması halinde ise malzemenin (T-200) en/boy kesit sertliği en yüksek değere (289/296 HV1) ulaşmıştır. Nispeten daha yüksek karbon içeriğine sahip F-22 filmaşinde F-06 malzemesine göre daha yüksek en/boy kesit değerleri (265/268 HV1) ile soğuk deformasyon sürecine geçilmiş ve nihai tel kesitinde beklenildiği üzere daha da yüksek en/boy kesit sertliklerine (392/402 HV1) ulaşılmıştır (Şekil 5.12).



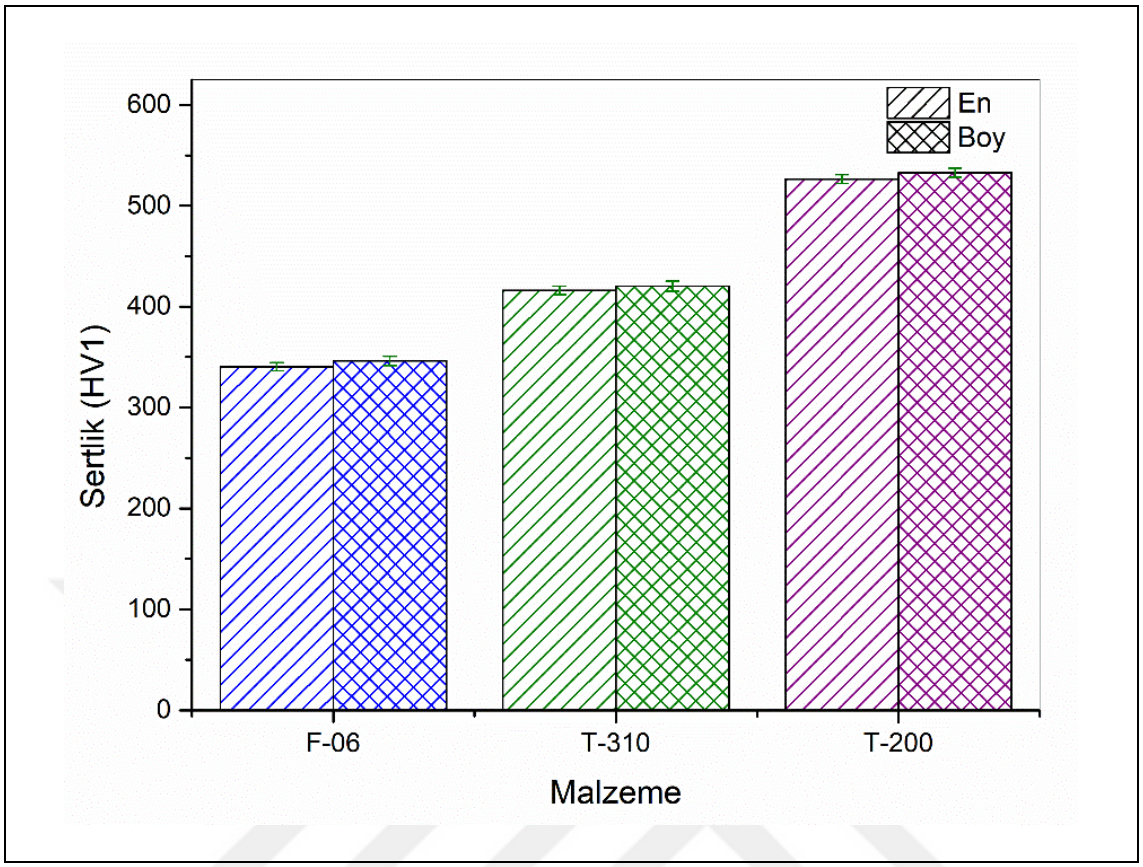
Şekil 5.11. F-06 malzemesi ve indirgenmiş tel çaplarına ait en/boy kesit sertlik değerleri



Şekil 5.12. F-22 malzemesi ve indirgenmiş tel çaplarına ait en/boy kesit sertlik değerleri

F-55 filmaşin malzemenin kesitinde yapılan indirgemeler sonrası malzemenin tel çap kondisyonuna bağlı olarak en/boy kesitlerinde F-06 ve F-22 eşdeğer kondisyonlarına kıyasla daha yüksek en/boy sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

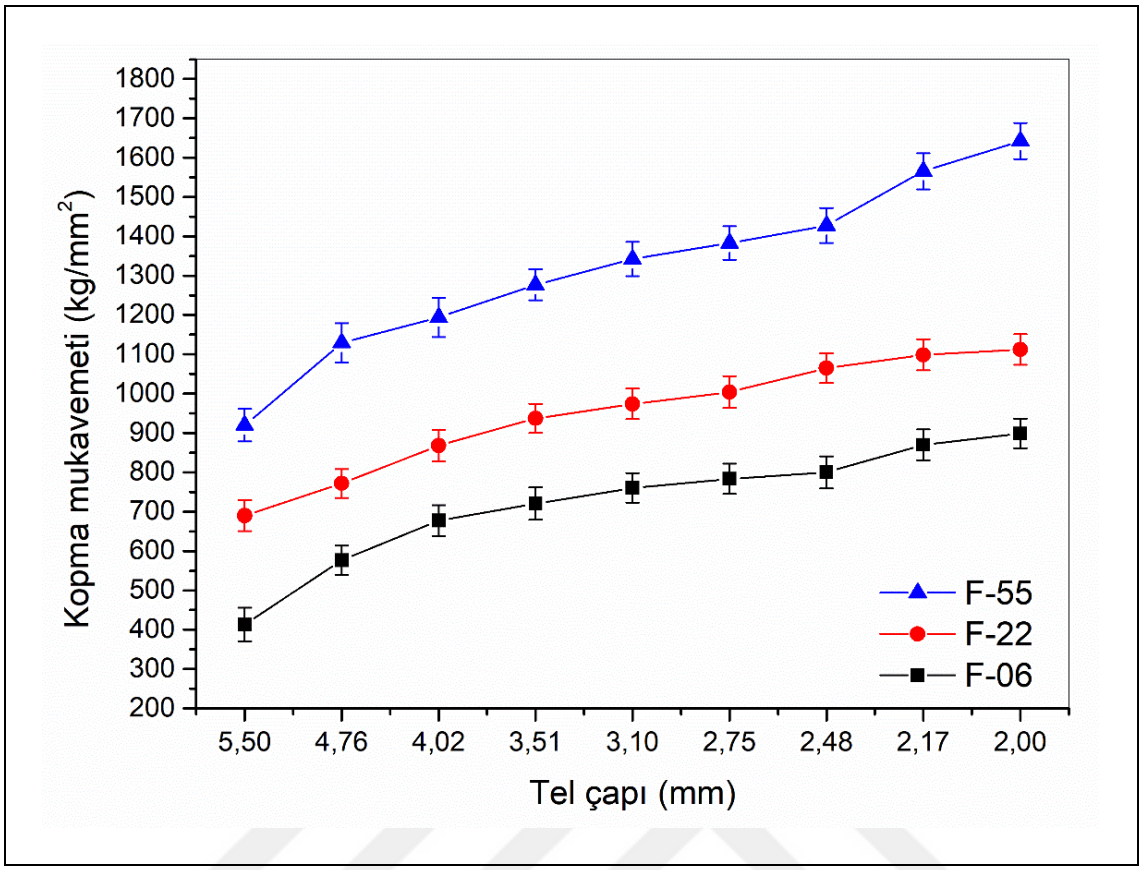
Şekil 5.13'ten de görüleceği üzere, F-55 filmaşin malzemenin en/boy kesit sertlik değeri 340-346 HV1 değerinde olup, en ince kesitte (T-200) en/boy kesit sertlikleri tüm test edilen malzemeler arasında en yüksek değerdedir (526/532 HV1). Tüm en/boy kesit sertlikleri dikkate alındığında; (i) filmaşin malzemenin kompozisyonunda karbon miktarı arttıkça sertlik değerlerinde bir artışı, (ii) soğuk deformasyon etkisi ile inceltilmiş tel çaplarında filmaşin malzemeye göre sertlikte bir artışı ve (iii) tel kesitinde daha da inceltmenin sağlanması halinde kayda değer bir sertlik artışı izlenmiştir.



Şekil 5.13. F-55 malzemesi ve indirgenmiş tel çaplarına ait en/boy kesit sertlik değerleri

Şekil 5.14'te her bir filmaşin malzemenin çoklu redüksiyonu sonrasında sahip oldukları tel çaplarına karşılık kopma mukavemet değerlerindeki değişim verilmiştir. Daha öncesinde farklı karbon içeriğien sahip filmaşinlerin kopma mukavemet değerleri kıyaslanmış olup, karbon miktarının perlit faz miktarına ve dolayısı ile kopma mukavemet değerine ne denli etken olabildiği ifade edilmiştir. Öte yandan özellikle indirgenmiş tel kesitlerinde perlitik matriksin lamellar yapısının inceltilmesinin de mukavemet kazanıma neden olacağı vurgulanmıştır.

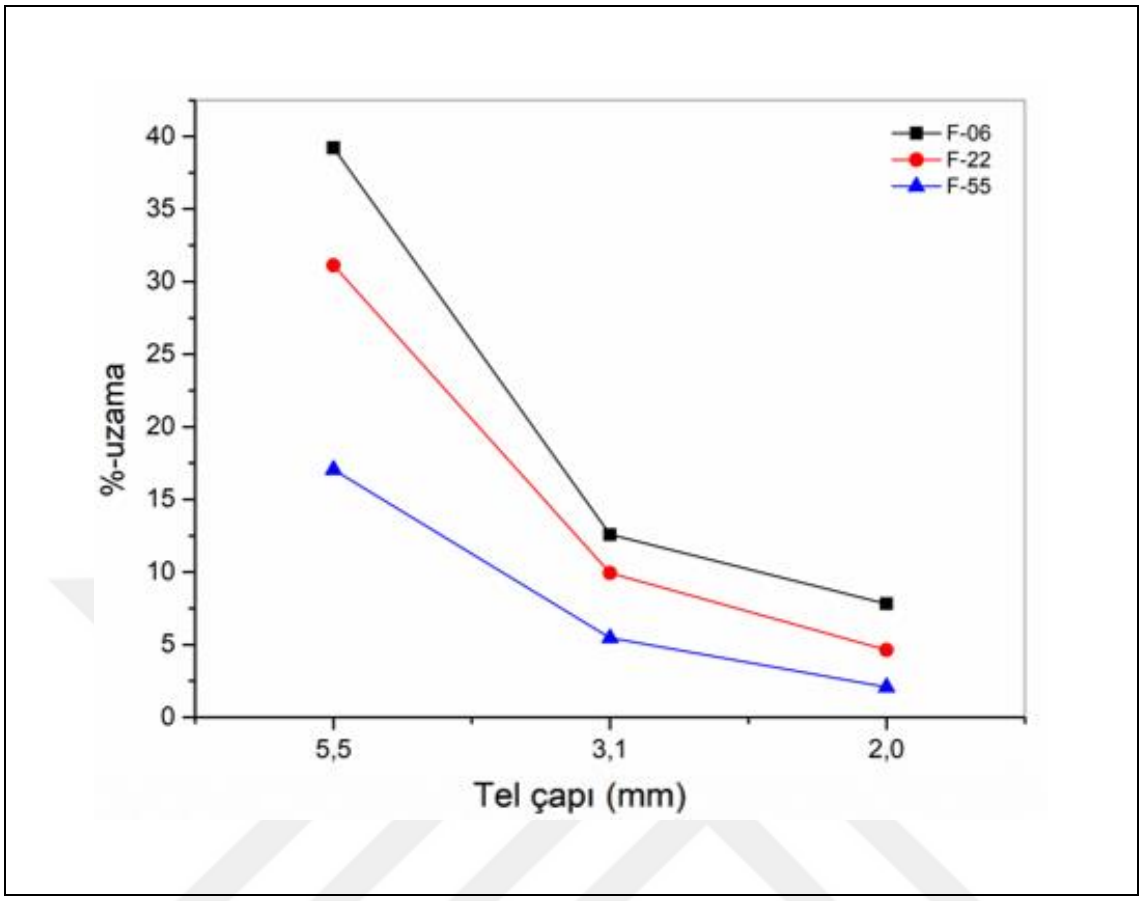
Şekil 5.14 bahsi geçen proses-yapı-özellik ilişkisini özetleyebilmektedir. Elde edilen kopma mukavemet değerleri dikkate alındığında; (i) artan karbon içeriğine bağlı olarak daha yüksek kopma mukavemet değerlerine ulaşıldığı, (ii) kesitte indirgenme yapıldıkça kopma mukavemet değerlerinin arttığına ve (iii) en yüksek karbon içeriğinde ve en düşük tel çapında en yüksek mukavemet değerine (1642 kg/mm^2) ulaşıldığı açıktır.



Şekil 5.14. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin ve kesitleri indirgenmiş tellerin kopma mukavemet değerleri

Şekil 5.15'te ise filmaşin malzeme, orta seviye ve nihai tel çaplarına karşılık gelen %-uzama değerlerini yansıtmaktadır. Elde edilen veriler artan kopma mukavemet değerlerinin aksine hem karbon miktarı arttıkça hem de tel çapı azaldıkça %-uzama değerlerinin azaldığını ortaya koymaktadır. Bilindiği üzere, soğuk deformasyon sürecinde malzemenin hem kesitinde bir indirgenme hem de kesit sertliğinde bir artış sağlanabilmektedir.

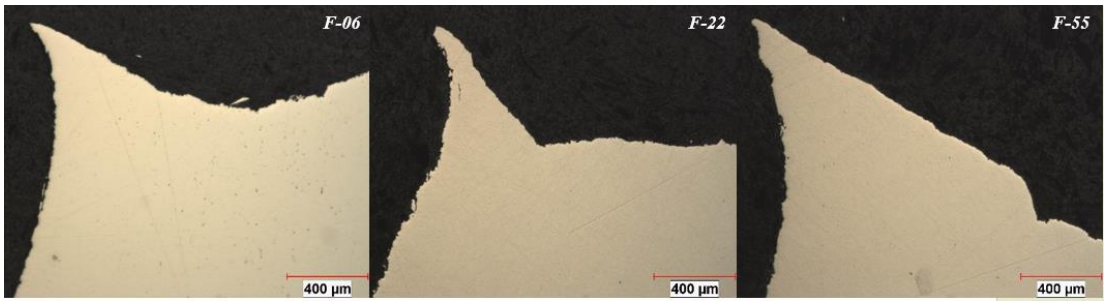
Perlitik matriksin lamellar yapısının sürekli inceltilmesi ile ferrit/sementit sınırları birbirine en yakın konuma gelmekte ve böylece dislokasyonların hareket alanları daha da sınırlandırılmaktadır. Bu durumda malzeme içerisinde özellikle sınırlar boyunca dislokasyon yoğunluğunun artması her ne kadar mukavemet kazanımına katkı sağlasa da matriks içerisinde dislokasyon hareketlerinin sınırlandırılması şekil değişim kabiliyetinde kayda değer bir azalmaya neden olacaktır. Bu tür bir durum inceltilen tel çapına karşılık azalan bir %-uzama değerine karşılık gelmektedir.



Şekil 5.15. Farklı karbon içeriğine sahip filmaşinlerin ve kesitleri indirgenmiş tellerin %-uzama değerleri

5.3. Kopma Kesitleri Üzerine Mikroskobik İncelemeler

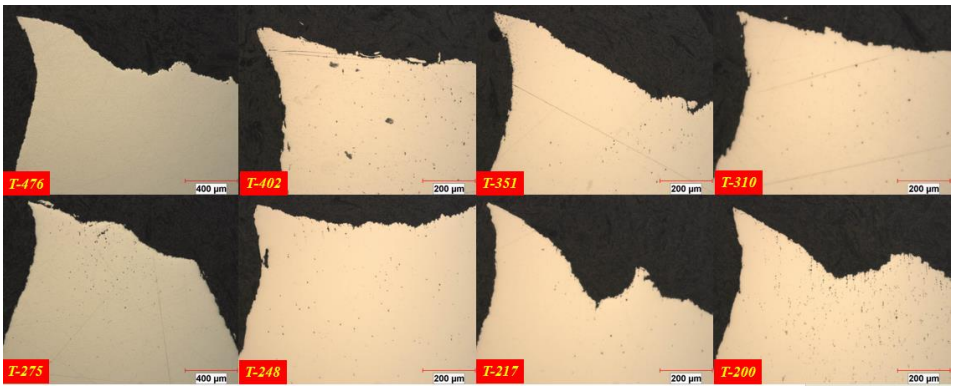
Şekil 5.16'da değişken karbon içeriğine sahip filmaşinlerin kopma testleri sonrası parlatılmış kırılma kesitleri verilmiştir. Farklı %-uzama değerlerine sahip malzemelerin çekme yüklenmesi altında bir taraftan şekil değişim eğiliminin bir taraftan da kırılma davranışının değişkenlik göstermesi kaçınılmazdır. En yüksek %-uzama değerine (% 39) sahip F-06 malzemesinde yüklenme altında malzemede kayda değer bir boyun oluşumu izlenmiş olup, yanal kesitte tam kayma kırılmasına benzer bir yapı gözlenmiştir. Bu malzemenin merkez kesitinde ise bir çukurlaşma var olup, malzeme kırılma kesitinde tipik çanak-koni tipi bir kırılma sergilemiştir. Karbon içeriğinin artmasına bağlı olarak her ne kadar mukavemette bir artış olsa da %-uzama değerindeki azalma malzemenin plastik şekil değişiminin de bir azalma ve özellikle kesit merkezinde tipik çukurlaşma eğilimin de bir azalma getirecektir. Nitekim F-22 ve F-55 malzemeleri için kırılma kesitlerinde çoğunlukla tam kayma benzeri bir kopma türü izlenmiştir (Şekil 5.16).



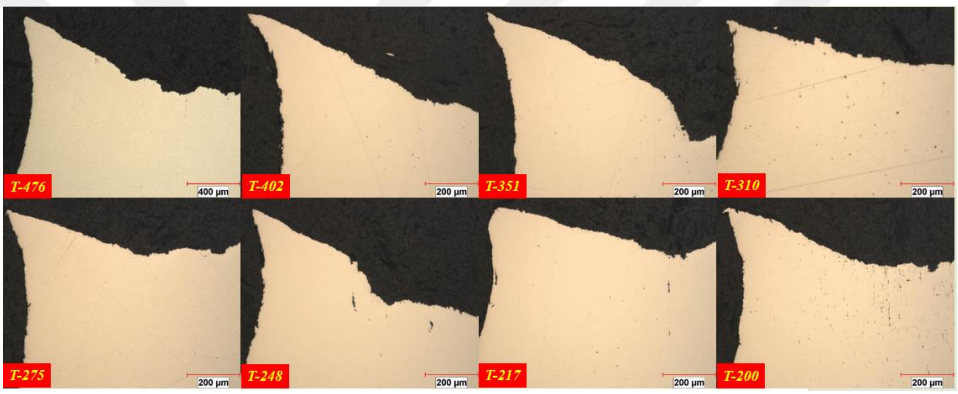
Şekil 5.16. Değişken karbon içeriğine sahip filmaşinlerin kopma testleri sonrası parlatılmış kırılma kesitlerine ait IM görüntüleri

Şekil 5.17 – Şekil 5.19'da her bir filmaşin malzemenin telleri için kırılma kesitlerine ait IM görüntüleri verilmiştir. Daha öncesinde de bahsedildiği üzere, indirgenmiş tel çaplarına karşılık %-uzama değerlerinde belirgin bir azalma söz konusudur. Bu durum inceltilmiş çap kesitlerinde plastik deformasyon kabiliyetinin azalabildiğine işaret etmektedir. Bu durumda nispeten daha düşük mukavemette olan filmaşinlere kıyasla tel malzemelerde daha belirgin kayma kırılmalarının oluşması kaçınılmazdır. Esasen tüm kırılma kesitleri dikkate alındığında malzemelerde sünek kırılma sürecinin belirgin bir şekilde geliştiği açıktır. Bilindiği üzere bu süreçte başlangıçta bir boyun verme, sonrasında mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi, bileşen boşluklar uzantısında çatlak ilerlemesi ve son kaymanın da gerçekleşmesini takiben kırılmanın (kopmanın) açığa çıkması beklenir.

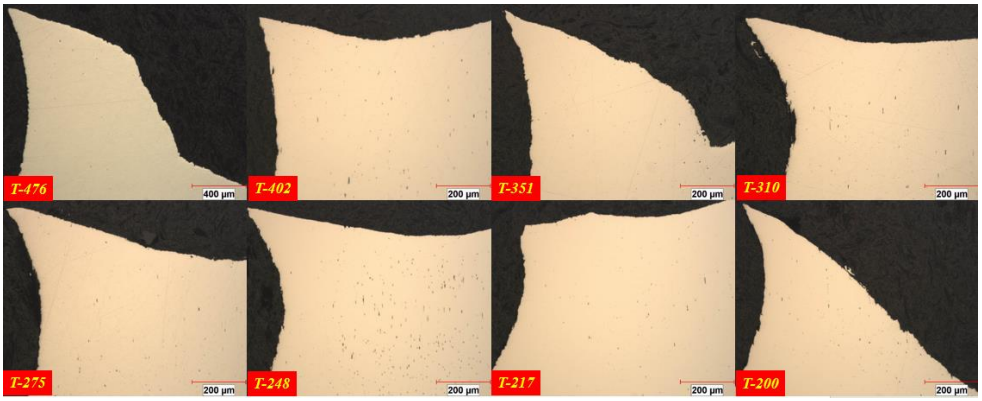
Kırılma kesitleri özellikle karbon içeriğindeki artışa ve indirgenmiş tel çaplarına bağlı olarak bu sürecin ne denli keskin tam kayma kırılmasına evrilebildiğine işaret etmektedir. Metalik malzemelerde plastik deformasyon esasen kaymaya karşı direnci az olan atom düzlemlerinin yer değiştirmesi ile oluşur. Bu süreçte kayma çatlaklarının oluşması da beklenir. Birçok metalik malzemede kayma çatlakları maksimum kayma gerilmesinin açığa çıktığı bölgelerde oluşabilir ve bu bölgeler aynı zamanda çatlak ilerleme bölgeleri olarak da görev üstlenir. Çatlağın çekirdeklenmesi ve ilerlemesi sonrası meydana gelen kopma makroskobik olarak çekme yönüne dik gerçekleşebilmektedir. Ancak mikroskobik olarak değerlendirildiğinde çatlak çekme ekseni ile 45° lik açı yapan düzlemler boyunca ilerleyerek kayma kırılmasını neden olur. Bu durumda özellik kopma kesitinin merkez hattı boyunca mikro boşluk bölgesi olarak da bilinen ve çoğu durumda yüksek seviyede sünek bir karaktere sahip olan bölgenin alansal küçülmesi de beklenir.



Şekil 5.17. F-06 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası üretilen tellerin kopma kesitlerine ait IM görüntüleri



Şekil 5.18. F-22 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası üretilen tellerin kopma kesitlerine ait IM görüntüleri

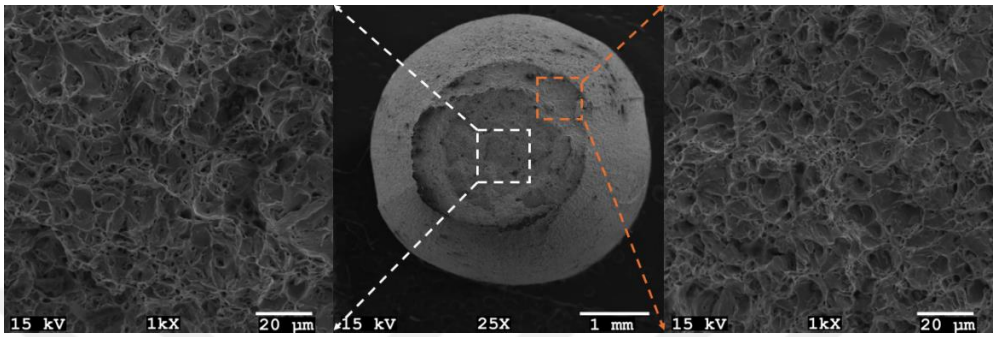


Şekil 5.19. F-55 filmaşin malzemesinin çoklu redüksiyonu sonrası üretilen tellerin kopma kesitlerine ait IM görüntüleri

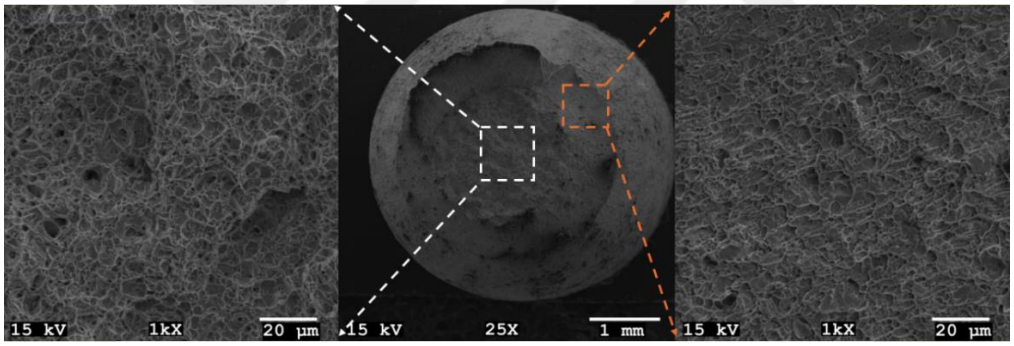
5.4. Kırılma Yüzeyleri Üzerine Fraktografik İncelemeler

Şekil 5.20 – Şekil 5.22'de filmaşin malzemelerinin çekme yüklenmesi altında kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Her ne kadar karbon içeriğinde ve metalurjik yapılarında bir değişim olsa da her bir filmaşin birbirine benzer bir kırılma yapısı içermektedir. Daha öncesinde kırılma kesitlerinde de gözlendiği üzere, genel kırılma yüzeyleri çanak-koni tipi kırılmanın gerçekleştiğine işaret etmektedir. Yüklenmede malzemede meydana gelen plastik deformasyon nedeni ile kayda değer bir kesit daralması ve bir boyun oluşumu verilen SEM görüntülerinde kolaylıkla izlenebilmektedir. Yüklenme altında malzemenin plastik deformasyon kabiliyetinde metalurjik yapı doğrudan etkendir. Genel kırılma görüntüleri hem kesit merkezinde hem de yanal cephelerde farklı kırılma modlarının olabildiğine de işaret etmektedir. Bu ise malzemelerin metalurjik yapı farklılığından kaynaklanmaktadır. En düşük perlit içeriğine sahip olan malzemede (F-06) daha fazla %-uzama eğilimin olması kırılma kesitinin merkezinde daha geniş bir alanda mikro boşluk birleşmesinin olabildiğini göstermektedir. Nitekim en yüksek karbon içeriğine sahip olan malzemede ise bu alan oldukça daralmaktadır. Kırılma kesitlerinde mikro boşluk içeren bölgelerin görece genişlemiş alanlara olan dağılımı malzemeye yüklenme ile iletilen ve şekil değişimine harcanması beklenen enerjinin malzeme tarafında ne kadar absorbladığının da bir ölçütüdür. Absorblanan enerjinin yüksek olması malzemenin sünek bir karakterde hasarlandığını ve kırılmanın yüksek enerji modunda gerçekleştiği sonucunu çıkarır. Kesit merkezinde yoğun bir şekilde mikro boşluk birleşmesi mekanizmasının devreye girerek malzemede bir çatlak oluşturabildiği aşikardır. Kesit merkezinde homojen dağılımlı ve birbirine göre benzer genişlik/derinlikte çukurcukların (dimple) olduğu gözlenmektedir. Mikro boşlukların birleşmesi sonrasında merkez hattında sürekli bir kavitasyonun oluşumu kaçınılmazdır. Belirli bir boyuta ulaşan kavitasyonlar hasarlanmada aktif rol oynayabilmektedir. Öte yandan özellikle yanal cephelerde kaymanın daha da aktif olması birlikte yönlenmiş sığ çukurcuk oluşumları izlenebilmektedir. Filmaşinlerde karbon miktarı arttıkça kesit merkezinde plastik akış bölgesinin giderek azalabildiği de gözlenmektedir. Bu durumda daha öncesinde verilen özellikle kırılma kesit IM görüntüleri de dikkate alındığında, artan karbon içeriğine bağlı olarak perlit faz yapısındaki artış nedenli olarak malzemede sünek davranış kısmen azalmakta ve yüklenme altında kesitte çoğunlukla kayma çatlakları oluşarak nihai kırılma

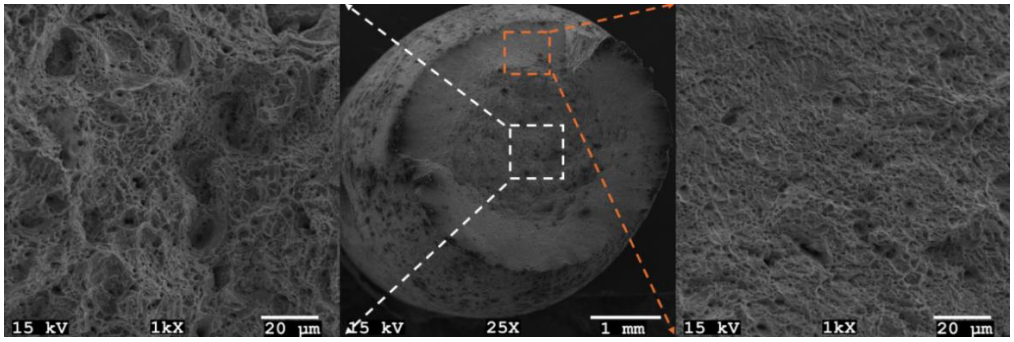
gerçekleşmektedir. Nominal yüke göre 45°'lik bir açıda maksimum gerilme seviyesinde çatlakların hızla ilerlemesi nihai kopmayı getirebilmektedir. Yanal cephelerde bundan dolayı merkez hatta göre daha düz ve pürüzlülüğü indirgenmiş bir kırılma görünümü de açığa çıkabilmektedir.



Şekil 5.20. F-06 malzemesinin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri

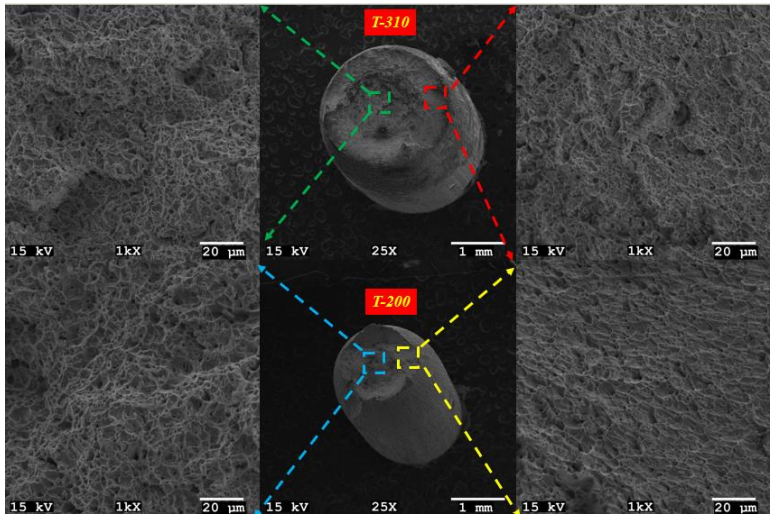


Şekil 5.21. F-22 malzemesinin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri

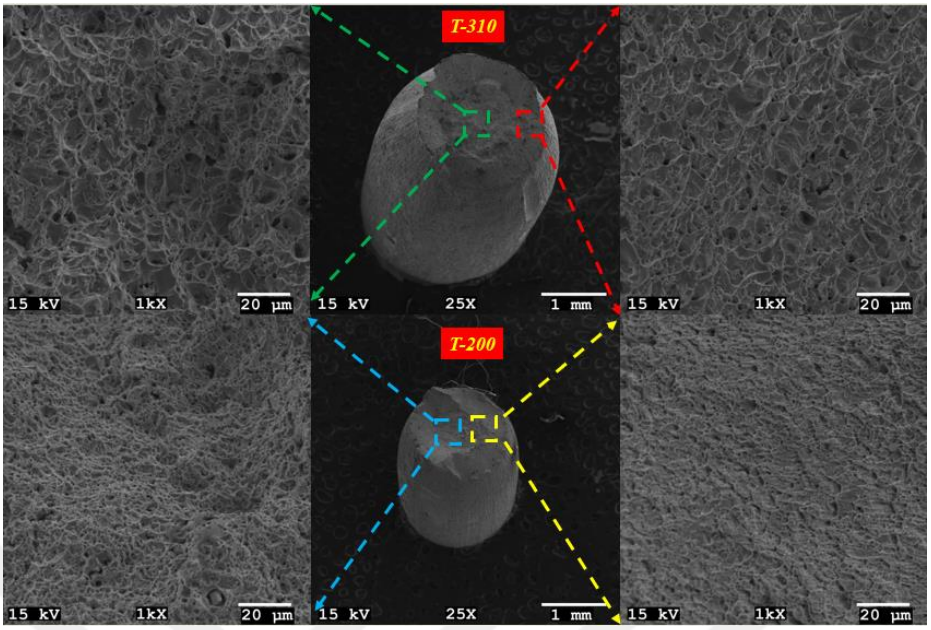


Şekil 5.22. F-55 malzemesinin kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri

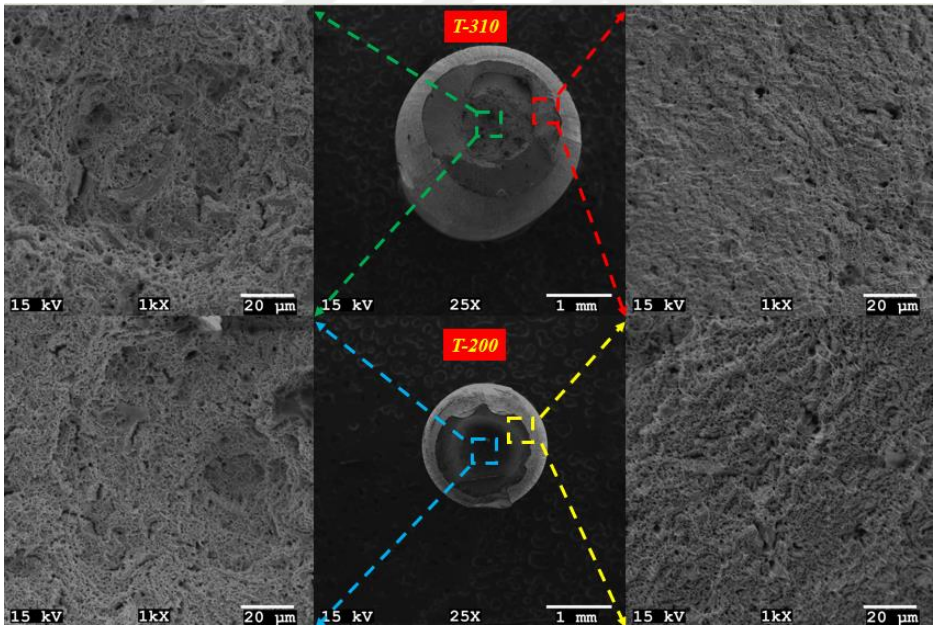
Şekil 5.23 ve Şekil 5.25'te filmaşinlerden üretilen farklı çaptaki tellerin çekme yüklenmesi altında kırılma yüzeylerini gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. Filmaşin malzemelerde yüksek enerjili kırılma moduna karşılık gelen sünek kırılma bölgesinin azalmasına kompozisyonda bulunan karbonun ve metalurjik yapıda bulunan perlitin ne denli etkide bulunduğu vurgulanmıştı. İndirgenmiş tel kesitlerinde perlit lamellerarası mesafenin de indirgenmesi ve böylece dislokasyon yoğunluklu bölgelerin artması malzemede sünek davranışı önemli ölçüde azaltacaktır. Sünek kırılmada geçerli olan ve çoğu çalışmada da gözlenen bazı unsurların arttırılmış karbon içerikli malzemelerde ve indirgenmiş tel kesitlerinde açığa çıkması da kaçınılmazdır. Sünek kırılma karakteristiği; (i) çatlak ucunda aşırı plastik deformasyon, (ii) yavaş çatlak ilerlemesi, (iii) kırılma yüzeyinde belirgin bir deformasyon, (iv) çatlağın ilerleyebilmesi için arttırılmış gerilme ve (v) tek parçalı kırılma gibi unsurları taşımaktadır. Tel çaplarının inceltilmesi ile birlikte kırılma kesitinin merkezinde görece plastik akış bölgesinin daha da azaldığı ve özellikle yanal cephelerde kayma kırılmasının baskın olduğu Şekil 5.23 – Şekil 5.25'te verilen SEM görüntülerinden izlenebilmektedir. Yanal cephelerde çoğunlukla sığ ve yönlenmiş çukurcuk benzeri kırılma yapısı izlenmekle birlikte bu cepheler oldukça düz kırılma cepheleridir. Bu tür bir oluşum bu bölgelerde plastik akışın daha çok kayma ile gerçekleştiğini ve mikro boşluk birleşmesi nedenli çatlak oluşum eğilimin nispeten azaldığını göstermektedir.



Şekil 5.23. F-06 malzemesinden üretilen tellerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri



Şekil 5.24. F-22 malzemesinden üretilen tellerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri



Şekil 5.25. F-55 malzemesinden üretilen tellerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, farklı karbon içeriğine sahip filmaşin malzemeler (1006, 1022 ve 1055 kalite) tedarik edilmiş olup, endüstriyel pratiklikte doğrudan soğuk tel çekimleri yapılarak 5.50 mm kesit çapından 2.00 kesit çapına indirgenmeler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ana hammaddeden başlayarak indirgenmiş çelik tellerin metalurjik ve mekanik karakterizasyon çalışmaları yapılarak tez çalışmasının esas odak noktası olan farklı karbon içerikli çelik filmaşinlerden üretilmiş teller için proses-yapı-özellik-kırılma davranışı irdelemesi yapılabilmiştir.

Filmaşinler ve teller üzerine yapılan metalurjik ve mekanik karakterizasyon çalışmaları; (i) tedarik edilen filmaşinlerin ISO 16120-1, 3887 ve 4967 standartlarına uygun olarak uygun bir yüzey kalitesinde olduğunu ve böylece tolere edilebilir metalik olmayan kalıntı, segregasyon ve dekarbürizasyona sahip olduğunu, (ii) filmaşinlerde artan karbon içeriğine bağlı olarak görece perlit faz miktarının arttığını, (iii) artan perlit faz miktarına bağlı olarak sertlik ve mukavemetin arttığını ancak %-uzama değerinde bir azalmanın olduğunu, (iv) kesitte indirgenme ile azalan lamellararası mesafenin bir sonucu olarak mukavemetlerin daha da arttığını, ancak buna karşılık %-uzama değerlerinin daha azaldığını ortaya koymuştur. Özellikle elde edilen tüm mekanik değerler dikkate alındığında, en yüksek karbon içerikli filmaşinden (1055 kalite) başlayarak indirgenmiş en ince tel kesitinde (2.00 mm) ~ 346 HV1 sertlik değerine, 1642 kg/mm2 kopma mukavemet değerine ve % 2.8 uzama değerine ulaşılabilmiştir.

Filmaşinler ve teller üzerine yapılan fraktografik karakterizasyon çalışmalar (i) filmaşinlerde artan karbon içeriğine bağlı olarak çanak-koni tipi bir kırılmadan ziyade kayma kırılmasına yönelik bir gelişimin olduğunu, (ii) kırılma kesitlerinin merkez hattında bulunan ve mikro boşluk birleşmesi sonucu baskın sünek kırılmaya işaret eden bölgelerin artan karbon ve indirgenen tel çaplarına bağlı olarak azalabildiğini ve (iii) kayma kırılma cephesinde yönlenmiş daha sığ çukurcuk bölgelerinin düz kırılma bölgeleri oluşturabildiğini ortaya koymuştur.

Tez çalışmasının çıktıları halihazırda endüstriyel olarak değişken karbon içerikli çelik esaslı filmaşinlerin soğuk tel çekimine yönelik detaylı metalurjik ve mekanik veri içermektedir. Çalışma kapsamında proses kondisyonlarına bağlı olarak metalurjik ve

mekanik değişimler nedenselleştirilmiş olup, ticari filmaşin malzemeler ve filmaşinlerden üretilen teller için tipik bir proses-yapı-özellik ilişkisini yansıtmaktadır. Aynı zamanda kopma testleri sonrası hem kırılma kesitleri hem de kırılma yüzeyleri üzerine yapılan fraktografik analizler ile malzemelerin kırılma davranışına kompozisyon ve metalujik yapı etkisi de vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

Altun, K., (2015). Soğuk Çekme Metoduyla Üretilen Kaynak Tellerinde Görülen Hataların Belirlenmesi ve Giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 392974.

ASM Handbook Volume 1 (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and HighPerformance Alloys, *ASM International*, 746-758.

Bargujer, S. S., Suri, N. M., Belokar, R. M. (2016). Pearlitic steel wire: High carbon steel based natural nanomaterial by lead patenting process, *Materials Today: Proceedings*, *3*(6).

Bargujer, S. S., Suri, N. M., Belokar, R. M. (2013). Thermo Mechanical Processing of Hypereutectoid Steel Wire Rod in Lead Patenting*, Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng*, *3*(5), 36-39.

Borchers, C., Kirchheim, R. (2016). Cold-drawn pearlitic steel wires, *Progress in Materials Science*, September, *82*, 2016.

Cao, T. S., Vachey, C., Montmitonnet, P., Bouchard, P. O. (2015). Comparison of reduction ability between multi-stage cold drawing and rolling of stainless steel wire – Experimental and numerical investigations of damage, *Journal of Materials Processing Technology*, March, *217*.

Chattopadhyay, A., Kumar, P., Roy, D. (2009). Study on formation of "Easy to remove oxide scale" during mechanical descaling of high carbon wire rods, *Surface and Coatings Technology*, *203* (19), 2912-2915.

Culcasi, J. D., Seré, P. R., Elsner, C. I., Di Sarli A. R. (1999). Control of the growth of zinc-iron phases in the hot-dip galvanizing process, *Surface and Coatings Technology*, December, 122, 1.

Çokyaşar Halat Makine Tel Galvanizleme A. Ş. Soğuk Çekilmiş Tel Proses Kataloğu, Düzce, 2014.

De Araújo Ponte, H., Maul, A. M., De Azevedo Alvarenga, E. (2002). Analysis of Electrochemical Porosity of Phosphatized Coatings on Galvanized Steel Substrate, *Materials Research, 5*(4), 439-446, 2002.

Duarte, A. C. R., Mendes, R. S., Fontana, M., Silva, F. R. F. D., Castro, G. G. P. D., Lins, J. F. C. (2018). Microstructural Evolution of a Pearlitic Steel Subjected to Thermomechanical Processing, *Materials Research*, *21*(2), 1-5.

Fang, F., Zhao, Y., Liu, P., Zhou, L., Hu, X. J., Zhou, X., Xie, Z. H. (2014). Deformation of Cementite in Cold Drawn Pearlitic Steel Wire, *Materials Science and Engineering: A, 608,* 11-15.

Feyrer, K., Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability, *Springer Berlin Heidelberg*, New York.

Gillström, P., Jarl, M. (2006). Mechanical descaling of wire rod using reverse bending and brushing, *Journal of Materials Processing Technology*, *172*(3), 332-340.

Grygier, D., Dudzinski, W., Gerstein, G., Nürnberger, F. (2015). The effectiveness of spheroidization pearlitic steel with regard to the degree of plastic deformation, *Interdisciplinary Journal of Engineering Sciences, 3*(1), 6-9.

Güzey, A., (2009). Demirsel Tellerin Üretim Sürecinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 245428.

Jun, M. A., Ge, S. R., Zhang, D. K. (2008). Distribution of Wire Deformation within Strands of Wire Ropes, *Journal of China University of Mining and Technology, 18*(3), 475-478.

Jung, J. Y., An, K. S., Park, P. Y., Nam W. J. (2021). Correlation between Microstructures and Ductility Parameters of Cold Drawn Hyper-Eutectoid Steel Wires with Different Drawing Strains and Post-Deformation Annealing Conditions, *Metals, 11*(2), 178.

Kapito, A., Mostert, R. J., Stumpf, W. E., Siyasiya, C. W. (2019). Carbide-free bainitic steels for rail wheel applications, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, *655*, 012012, 2019.

Kapusuz, H., Güvenç, M. A., Mıstıkoğlu, S. (2019). A review study on ladle slag detection technologies in continuous casting process. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, *3*(3), 144-149.

Lee, S. K., Ko, D. C., Kim, B. M. (2009). Pass schedule of wire drawing process to prevent delamination for high strength steel cord wire, *Materials & Design, 30*(8), 2919-2927.

Lee, S. K., Ko, D. C., Kim, B. M. (2009). Pass Schedule of Wire Drawing Process to Prevent Delamination for High Strength Steel Cord Wire, *Mater. Des., 30,* 2919-2927.

Liu, J., Han, J., Lu, R. (2022). Study on descaling characteristics of 304 stainless steel using pickling and abrasive water jet, *Materials and Technology, 56*(5), 507-513,

Meseguer-Valdenebro, J. L., Miguel, V., Caravaca, M., Portolés, A., Gimeno, F. (2015). Teaching Mechanical Properties of Different Steels for Engineering Students, *J. Mater. Educ.,* 37, 103-118.

Muradoğlu, E. M., Atapek, Ş. H., (2024). Process-Structure-Property-Fracture Characterization of steel wires with different carbon contents. *International Symposium on Characterizastion*, 178-183

Muradoğlu, E. M., Yonar, N., Arslan, İ., Efe, A., Bitikçioğlu, M., Atapek, Ş. H., (2024). Effect of cold deformation conditions on fracture mode in patented and galvanized steel wires. *International Symposium on Characterizastion*, 171-177

Muradoğlu, E. M., Yonar, N., Arslan, İ., Efe, A., Bitikçioğlu, M., Atapek, Ş. H. (2024). Effect of cold drawing parameters on the properties of galvanized and patented steel wires. *EGE XI. International Conference on Applied Sciences*, 63-71

Onur, Y. A. (2010). Halat Ömrüne Etki Eden Parametrelerin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 315356.

Showkat, S. N. (2021). Damage and Failure of Steel Wire Ropes, Thesis, Politecnico di Torino,

URL-1: http://www.kulkoni.com/american-wire-rope/ (Ziyaret Tarihi: 12 Mart 2025).

URL-2: https://ushamartin.com/images/wire-rope-handbook-brochure.pdf (Ziyaret Tarihi: 2 Nisan 2025).

URL-3: https://www.steeldata.info/inclusions/demo/data/77.html (Ziyaret Tarihi: 8 Mart 2025).

URL-4: https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/286/1018.pdf (Ziyaret Tarihi: 26 Mart 2025).

Ünseren, M. (2006). Tel Çekme Matrisleri Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 185112.

Verreet, R. (2002). Steel Wire Ropes for Cranes- Problems and Solutions, Casar Drahtseilwerk Saar Gmbh Internal Report, Kirkel, Germany.

Walczak, M., Szala, M. (2021). Efect of shot peening on the surface properties, corrosion and wear performance of 17-4PH steel produced by DMLS additive manufacturing, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21, 157.

Zelin, M. (2002). Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing, *Acta Materialia*, October, 50, 17.

Zelin, M. (2002). Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing, *Acta Materialia*, October, 50, 17.

Zhang, X., Godfrey, A., Hansen, N., Huang, X. (2002). Hierarchical Structures in ColdDrawn Pearlitic Steel Wire, *Acta Mater,* 61, 4898-4909.

Zhang, X., Godfrey, A., Huang, X., Hansen, N., Liu, Q. (2011). Microstructure and strengthening mechanisms in cold-drawn pearlitic steel wire, *Acta Materialia*, May, 59, 9.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Muradoğlu, E. M., Atapek, Ş.H., (2024). Process-Structure-Property-Fracture Characterization of steel wires with different carbon contents. *International Symposium on Characterizastion,* 178-183

Muradoğlu, E. M., Yonar, N., Arslan, İ., Efe, A., Bitikçioğlu, M., Atapek, Ş. H., (2024). Effect of cold deformation conditions on fracture mode in patented and galvanized steel wires. *International Symposium on Characterizastion*, 171-177

Muradoğlu, E. M., Yonar, N., Arslan, İ., Efe, A., Bitikçioğlu, M., Atapek, Ş. H., (2024). Effect of cold drawing parameters on the properties of galvanized and patented steel wires. *EGE XI. International Conference on Applied Sciences*, 63-71

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimini Düzce'de tamamlamıştır. 2015 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü 2019 yılında tamamlayıp, mezun olmuştur. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Eğitimine başlamıştır. Ocak 2020- Haziran 2021 tarihleri arasında Özyaşar Tel ve Galvanizleme Sanayi A.Ş'de, Kalite/Üretim Mühendisi olarak çalışmıştır. Daha sonra Nisan 2021- Şubat 2022 tarihleri arasında Çelik Halat ve Tel San. A.Ş'de, Kalite Mühendisi olarak çalışmıştır. Şubat 2022 tarihinden itibaren Çokyaşar Halat Makine Tel Galvanizleme A.Ş'de, Kalite Güvence/Ar-Ge Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.