



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

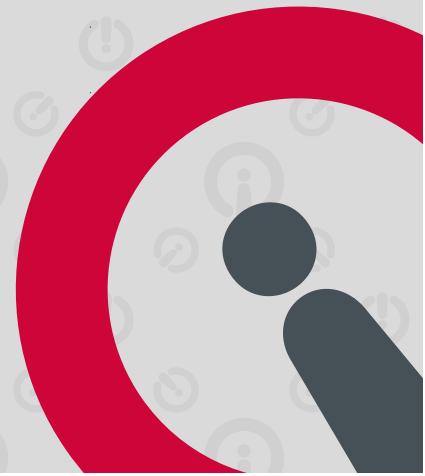
**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**Ti-Nb MİKRO ALAŞIMLI
YÜKSEK MUKAVEMETLİ PETROL
BORU ÇELİKLERİNDE (API) DÜŞÜK
SICAKLIKLARDA ÇENTİK DARBE
VE DWTT
(AĞIRLIK DÜŞÜRMELİ YIRTMA TESTİ)
DAYANIMININ İNCELENMESİ**

Cemre KEÇECİ

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

ŞUBAT 2023





İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ



**Ti - Nb MİKRO ALAŞIMLI YÜKSEK MUKAVEMETLİ PETROL BORU
ÇELİKLERİNDE (API) DÜŞÜK SICAKLIKLARDA ÇENTİK DARBE VE DWTT
(AĞIRLIK DÜŞÜRMELİ YIRTMA TESTİ) DAYANIMININ İNCELENMESİ**

Cemre KEÇECİ

**YÜKSEK LİSANS
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2023

Cemre KEÇECİ tarafından hazırlanan “Ti - Nb MİKRO ALAŞIMLI YÜKSEK MUKAVEMETLİ PETROL BORU ÇELİKLERİNDE (API) DÜŞÜK SICAKLIKLARDA ÇENTİK DARBE VE DWTT DAYANIMININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

Metalürji ve Malzeme Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Cem KAHRUMAN

Üretim Metalurjisi Anabilim Dalı, Bursa Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Mehmet Eyyüphan YAKINCI

Metalürji ve Malzeme Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi:

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Cemre KEÇECİ

...../...../.....

Ti-Nb MİKRO ALAŞIMLI YÜKSEK MUKAVEMETLİ PETROL BORU ÇELİKLERİNDE
(API) DÜŞÜK SICAKLIKLARDA ÇENTİK DARBE VE DWTT DAYANIMININ
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Cemre KEÇECİ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2023

ÖZET

Dünyada sıvı ve gaz fosil yakıt kullanımının devam etmesi ve ihtiyacın gerekli olan bölgelere taşınması için çelik borular kullanılmaktadır. Bu ihtiyacı gidermek adına Amerikan Petrol Enstitüsü tarafından standartları belirlenmiş petrol boru çelikleri hem Türkiye’de hem de dünyanın çeşitli bölgelerinde farklı üretim teknolojileri ile üretilmektedir. Petrol ve doğal gaz gibi bu yakıtların nakli ve kullanımı sırasında kullanılan çelik boruların dış etkenlerden özellikle iklim şartlarından etkilenmemesi için çelik üretiminde dikkat edilmesi gereken çok önemli parametreler bulunmaktadır. Çelik boruların kullanıldığı iklim şartları ağır olması ve sıcaklıkların sıfır altındaki düşük derecelerde olması nedeniyle dayanımlarının yüksek olması gerekmektedir. Petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların taşınması sırasında aşırı soğuk havaların yarattığı çelik kırılma direnci nedeniyle borularda hasarlanma oluşmaması amaçlanmaktadır. Boruların kullanıldığı iklim şartlarının çok düşük sıcaklıklara sahip olması durumunda çelik borulardan yüksek dirence sahip olması ve petrol ile doğal gaz gibi yakıtların nakliyatına engel yaratacak durumların oluşmaması amaçlanmaktadır. Bu nedenle de Amerikan Petrol Enstitüsü tarafından çelikten istenen asgari mekanik özellikler standartlar ile belirlenmiştir. Çelik üreticiler bu çelik boruların üretimi sırasında Amerikan Petrol Enstitüsü tarafından belirlenen standartlara uyması zorunludur. İklim şartlarının zorlaştığı kuzey ülkelerinde ise kullanılacak boru özellikleri daha zorlayıcı limitlere yani daha düşük sıcaklıklarda yüksek kırılma direncine sahip olması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, bahsedilen soğuk iklim şartlarına dirençli petrol ve doğal gaz boru taşımacılığında kullanılan çeliklerin üretimi sırasında standartlarda belirtilen limitler içinde kalmak adına dikkat edilmesi gerekenler ve daha soğuk iklim şartlarında da yüksek darbe direnci gösterebilecek çeliklerin üretimi incelenmiştir. İstatistiksel veri analiz yöntemleri ile birlikte laboratuvar ortamında çelik mikro yapısı karakterizasyonu çalışmaları ile sanayi üretim sonuçları irdelenmiş ve sonucunda ülkemizin de üretiminde büyük pay sahibi olduğu petrol boru çelikleri için düşük sıcaklıktaki direncini yükseltebilecek parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler ile birlikte gerçekleştirilen üretim sonrası çeliğin mekanik özellikleri çekme testi, çentik darbe testi, mikro yapı incelemesi ve DWTT yapılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çentik darbe ve dwtt, mekanik özellikler, titanyum, niyobyum, mikro yapı, tokluk

Sayfa Adedi: 121

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

INVESTIGATION OF NOTCH IMPACT AND DWTT STRENGTH AT LOW
TEMPERATURES IN Ti - Nb MICRO ALLOYED HIGH STRENGTH PETROLEUM PIPE
STEELS (API)
(Master's Thesis)

Cemre KEÇECİ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

FEBRUARY 2023

ABSTRACT

Steel pipes are used to continue the use of liquid and gas fossil fuels in the world and to transport the need to the required regions. In order to meet this need, petroleum pipe steels, whose standards have been determined by the American Petroleum Institute, are produced with different production technologies both in Turkey and in various regions of the world. There are very important parameters to be considered in steel production so that the steel pipes used during the transportation and use of these fuels such as oil and natural gas are not affected by external factors, especially climatic conditions. In case the climatic conditions in which the pipes are used have very low temperatures, it is aimed to have higher resistance than steel pipes and not to create situations that will prevent the transportation of fuels such as oil and natural gas. For this reason, the minimum mechanical properties required by the institute have been determined by the standards. It is mandatory for steel manufacturers to comply with these standards during the production and end-use approval stages of the relevant steel pipes. In the northern countries where the climatic conditions are difficult, the pipe specifications to be used must have more stringent specifications.

In this thesis, the considerations during the production of steels used in oil and natural gas pipe transportation that are resistant to cold climate conditions and the production of steels that can show high impact resistance in colder conditions are examined. In addition to statistical data analysis methods, the results of industrial production were examined with the steel microstructure characterization studies in the laboratory environment, and as a result, the parameters that can increase the resistance at low temperature for petroleum pipe steels, which our country has a large share in the production, were determined.

Key Words: Notch impact and dwtt strength at low temperatures, mechanical properties, titanium, niobium, microstructure, toughness,

Page Number: 121

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

TEŞEKKÜR

Ülkemizin ihtiyacı olan üretim ile birlikte ihracat potansiyellerinin artırılmasına yönelik çelik özelliklerinin incelendiği bu çalışmada hem literatür araştırmaları hem de istatistiksel veri analizi yapılması yüksek lisans tezi hazırlığım sürecinde bilgi birikiminin gelişmesinde çok büyük rol oynamıştır. Teknik anlamda endüstriyel üretim bakış açısı haricinde akademik anlamda da sürecin incelenmesi fikri ile bana ilham veren ve tez hazırlığım süresince desteklerini esirgemeyen saygı değer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın çeşitli aşamalarında deneyimlerini paylaştan jüri üyelerim Prof. Dr. Mehmet Eyyuphan YAKINCI'ya ve Prof. Dr. Cem KAHRUMAN'a yüksek lisans tezime katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Üretimlerin gerçekleştirilmesi ve müşteri beklentilerinin en üst düzeyde karşılanması hedefi ile başlayan projemizde üretim, kalite ve onay süreçlerinde her daim desteği bulunan sayın Serdar GÜNBAY' a, istatistiksel olarak veri incelenme aşamalarındaki yardımlarından dolayı sayın Burcu SOYSAL ve sayın Abdurrahman Mesut ÇAKIR' a, laboratuvar incelemelerinde mekanik testlerin ve karakterizasyon çalışmalarının yapılmasında sayın Ali KOCA, Sadık POLAT, Erdem TAN, Eriş DURMUŞOĞLU' na teşekkür ederim.

En tabi ki iş hayatı devam ederken kariyer hedeflerim arasında bulunan yüksek lisans eğitimi ile akademik anlamdaki kariyerimin gelişmesi aşamasındaki manevi desteklerinden dolayı eşim Sevda KEÇECİ ve çocuklarım Cem KEÇECİ, Nil KEÇECİ 'ye sevgilerimi sunuyorum.

Ayrıca tez çalışması sırasında tüm deneysel çalışmalar ve uygulama konusunda sözlü olarak izin veren, halen çalışmakta olduğum İskenderun Demir Çelik A.Ş' ye teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
RESİMLER LİSTESİ.....	XI
ÇİZELGELER LİSTESİ	XV
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVII
1. GİRİŞ.....	1
2. AMAÇ	2
3. KAPSAM	3
4. PETROL BORU ÇELİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI	3
4.1. Petrol Boru Çeliklerinde İstenen Mekanik Özellikler.....	4
4.2. Demir Çelik Üretim Proses Akışı.....	5
4.3. Yüksek Fırın Üretim Akışı Ve Çelik Üretimi	6
4.3.1. Sürekli Döküm Prosesi, Slab, Kütük Ve Blum Üretimi	9
4.3.2. Türkiye’de Ve Dünyada Çelik Üretimi.....	12
4.4. Boru çeliği üretimi	13
4.5. Müşteri Beklentileri ve Yeni Nesil Çelikler.....	14
4.5.1. Boru Çeliklerinde Çelik Üretimi, Sürekli Döküm Ve Haddeleme Prosesi....	15
4.5.2. Kimyasal Analiz Ve Mikro Alaşımlama Etkileri.....	16
4.5.3. İnküzyon Morfolojisi, Çelik Temizliği, Slab Yüzey Ve İç Yapı Özellikleri	20
4.5.4. Konvansiyonel Ve Termomekanik Haddeleme	25
4.6. Petrol Boru Çeliklerinde İstenilen Mekanik Özellikler	29

4.6.1. Çekme Testi	31
4.6.2. Çentik Darbe Testi	33
4.6.3. Dwtt (Ağırlık Düşürmeli Yırtma Testi)	36
4.7. Mikro Yapı Ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkileri	39
4.7.1. Mikro Yapı İncelemeleri.....	39
4.7.2. Optik Mikroskop.....	39
4.7.3. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	40
4.7.4. Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS).....	41
4.7.5. Mikro Yapının Çelik Üzerindeki Etkileri	42
4.7.6. Ferrit.....	42
4.7.7. Östenit	43
4.7.8. Perlit.....	44
4.7.9. Beynit.....	44
4.7.10. Martenzit	45
4.7.11. Tane Boyutu Ve Dağılımı	45
4.7.12. Bantlaşma Ve Segregasyon.....	46
4.7.13. Çökelti Sertleşmesi Ve Tipleri.....	47
4.7.14. Titanyum Nitrit Çökeltileri	48
4.7.15. Niyobyumca Zengin Çökeltiler.....	48
4.7.16. Vanadyum Karbür Çökeltileri.....	49
5. İSTATİSTİKSEL VERİ ANALİZİ YÖNTEMLERİ.....	50
5.1. Basit Doğrusal Regresyon Denklemi.....	51
5.2. Minitab Terimleri Ve Anlamları	52
5.2.1. R Square (R Kare, R-Sq).....	52
5.2.2. P Değeri (P-Value).....	52

5.2.3. Pp, Ppk	53
5.2.4. Cp, Cpk.....	53
5.3. Malzeme Ve Deneysel Prosedür	53
5.4. Yeterlilik Analizleri (Capability Analysis).....	56
5.4.1. Çekme Test Sonuçları Yeterlilik Analizi	56
5.4.2. Çentik Darbe Test Sonuçları Yeterlilik Analizi	58
5.4.3. Akma Mukavemetinin Modellenmesi.....	63
5.4.4. Çekme Mukavemetinin Modellenmesi	68
5.4.5. % Uzama Değerinin Modellenmesi	71
5.4.6. Çentik Darbe Enerjisinin Modellenmesi	74
5.5. Optimizasyon (Response Optimizer).....	77
5.6. İstatistiki Sonuçların Yorumlanması.....	82
5.7. İstatistiksel Veri İncelemesi Sonrası Çelik Tasarımı	84
5.8. Deneme Döküm.....	85
5.8.1. Deneme Dökümün Gerçekleştirilmesi	85
5.8.2. Döküm Sonuçları	86
5.8.3. Çekme Testleri	92
5.8.4. Doğrulama Deneyleri	97
5.8.5. Dwtt (Yüksekten Ağırlık Düşürme Testi).....	98
5.8.6. Mikro Yapı Sonuçları	100
5.9. Deneyler Sonrası Yeterlilik Analizi	104
5.9.1. Akma Mukavemeti Yeterlilik Analizi.....	104
5.9.2. Çekme Mukavemeti Yeterlilik Analizi	105
5.9.3. % Uzama Yeterlilik Analizi	106
5.9.4. Çentik Darbe Enerjisi Yeterlilik Analizi.....	106

6. GENEL TARTIŞMA	110
7. ÖNERİLER	112
KAYNAKLAR.....	115

RESİMLER LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1 Demir çelik üretim akışı.....	6
Resim 4.2 Yüksek fırın şematik gösterimi.....	7
Resim 4.3 Konverter şematik gösterimi.....	8
Resim 4.4 Sürekli döküm prosesi şematik gösterimi.....	10
Resim 4.5 Tandışten kalıba çelik akışı	11
Resim 4.6 Çelik üretim akışı.....	11
Resim 4.7 Dünya çelik üretim miktarları.....	12
Resim 4.8 Kalıntıların sıcak haddeleme sonrası davranışları	21
Resim 4.9 MnS inklüzyonu sem backscatter görüntüsü	22
Resim 4.10 MnS inklüzyonu sem harita analiz görüntüleri.....	22
Resim 4.11 MnS kalıntısı optik mikroskop görüntüsü	23
Resim 4.12 MnS kalıntısı sem backscatter görüntüsü	23
Resim 4.13 Mamul üzerinde çatlak	24
Resim 4.14 Çatlak mikro yapısı- optik mikroskop görüntüsü	24
Resim 4.15 Soğuma sırasında elde edilecek mikro yapı özellikleri	27
Resim 4.16 Gerilme gerinim grafiği	32
Resim 4.17 Z600E -zwick-roell /almanya; 2011 çekme test cihazı.....	33
Resim 4.18 Çentik darbe test cihazı, zwick rkp 450.....	34
Resim 4.19 Darbe test numune ebatları	34
Resim 4.20 Pragya dwtt Cihazı, 55000J	38
Resim 4.21 DWTT cihazı numune kırılma alanı	38
Resim 4.22 Dwtt numunesi hazırlık şablonu	39
Resim 4.23 Dwtt değerlendirme formülü ve hesaplaması	39
Resim 4.24 Optik mikroskop görüntüsü (nikon epiphot 200)	41
Resim 4.25 Taramalı elektron mikroskobu (jeol 6150).....	42
Resim 4.26 Apı x70 mikro yapı örneği.....	43
Resim 4.27 Demir karbon denge diyagramı	44
Resim 4.28 Perlit evresi	45
Resim 4.29 Hall petch denklemi.....	46
Resim 5.1 Minitab lisans özellikleri	51

Resim	Sayfa
Resim 5.2 Minitab® 19.1.1 (64-bit) ana ekran görüntüsü	52
Resim 5.3 Regresyon örnek gösterimi	52
Resim 5.4 Alt ve üst limit aşma durumu.....	58
Resim 5.5 Akma mukavemeti best subset ekranı	64
Resim 5.6 Response optimizer ayarlama ekranı	79
Resim 5.7 Modele ait hedef giriş ekranı	80
Resim 5.8 Deneme döküme ait gerçekleşen kimyasal kompozisyon	88
Resim 5.9 Deneme olarak gerçekleşen döküme ait seviye 4 kaydı	89
Resim 5.10 1 Numaralı slaba ait seviye 4 test veri giriş ekranı	98
Resim 5.11 Dwtt 1. deneme sonucu.....	100
Resim 5.12 Dwtt 2. deneme sonucu.....	101
Resim 5.13 Dwtt 3. deneme sonucu.....	101
Resim 5.14 21962915300000 Numaralı bobin mikro yapı görüntüleri.....	102
Resim 5.15 21962915400000 Numaralı bobin mikro yapı görüntüleri.....	103
Resim 5.16 21962915500000 Numaralı bobin mikro yapı görüntüleri.....	104
Resim 5.17 21962915600000 Numaralı bobin mikro yapı görüntüleri.....	105

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1 Yıllara göre artan kalite ihtiyacı	14
Şekil 4.2 Kalitelerin yıllara bağlı mukavemet gelişimleri	19
Şekil 4.3 MnS kalıntısı SEM grafik görüntüsü (noktasal analiz)	23
Şekil 4.4 MnS kalıntısı SEM noktasal analiz grafiği	24
Şekil 4.5 Çatlakta tespit edilen kalıntılar sem eds analizi grafiği-.....	25
Şekil 4.6 Farklı mukavemet ihtiyaçları için sertleştirme mekanizmaları	26
Şekil 4.7 Sünek gevrek geçiş sıcaklığı teorik gösterimi	35
Şekil 4.8 X65 kalitede sünek gevrek geçiş sıcaklığı.....	36
Şekil 4.9 Gerinme-gerilme eğrisi altında tokluk.....	37
Şekil 4.10 Mikro alaşım elementlerinin tane büyüklüğüne etkisi.....	47
Şekil 4.11 Mikro alaşım elemanlarının çökelti sıcaklıkları	49
Şekil 5.1 Üretilen apı kalite tonajları pareto analizi	55
Şekil 5.2 Akma mukavemeti ve tane boyutu arası ilişki.....	56
Şekil 5.3 Darbe dayanımı ile fırın deşarj sıcaklığı ve nb çözünürlüğü arası ilişki	56
Şekil 5.4 Akma mukavemeti mevcut durum analizi.....	57
Şekil 5.5 Çekme mukavemeti mevcut durum analizi	58
Şekil 5.6 Uzama değeri mevcut durum analizi	59
Şekil 5.7 Darbe dayanımı mevcut durum analizi.....	60
Şekil 5.8 Darbe dayanımı mevcut durum analizi (-30°C).....	61
Şekil 5.9 Darbe dayanımı mevcut durum analizi (-20°C).....	62
Şekil 5.10 Akma modeline etki eden parametre sıralaması	69
Şekil 5.11 Çekme mukavemet modeline etki eden parametre sıralaması.....	72
Şekil 5.12 % Uzama modeline etki eden parametre sıralaması	75
Şekil 5.13 Çentik darbe modeli etkili parametreler sıralaması	78
Şekil 5.14 Tane boyutu ve analiz ilişkisini gösteren response optimizer raporu.....	81
Şekil 5.15 Analiz ve hadde parametreleri arası ilişkisi response optimizer raporu	82
Şekil 5.16 Analiz, çökelti ilişkisini gösteren response optimizer raporu.....	82
Şekil 5.17 Deneme döküme ait ttt diyagramı.....	92
Şekil 5.18 Deneme döküme ait cct diyagramı	93
Şekil 5.19 1 Numaralı slaba ait çekme test raporu.....	94

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20 2 Numaralı slaba ait çekme test raporu.....	95
Şekil 5.21 3 Numaralı slaba ait çekme test raporu.....	95
Şekil 5.22 4 Numaralı slaba ait çekme test raporu.....	96
Şekil 5.23 5 Numaralı slaba ait çekme test raporu.....	96
Şekil 5.24 6 Numaralı slaba ait çekme test raporu.....	97
Şekil 5.25 7 Numaralı slaba ait çekme test raporu.....	97
Şekil 5.26 Deney sonrası akma mukavemeti yeterlilik analizi	106
Şekil 5.27 Deney sonrası çekme mukavemeti yeterlilik analizi	106
Şekil 5.28 Deney sonrası % uzama yeterlilik analizi.....	107
Şekil 5.29 Denemeler sonrası -20°C darbe sonuçları	108
Şekil 5.30 Denemeler sonrası -30 ve 40°C darbe sonuçları.....	108
Şekil 5.31 Denemeler sonrası -50°C darbe sonuçları	109
Şekil 5.32 Denemeler sonrası -60°C darbe sonuçları	110

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1 Ülkerler bazında çelik üretim tonajları.....	12
Çizelge 4.2 Alaşım elementleri etkileri.....	17
Çizelge 4.3 Petrol boru çelikleri kimyasal analiz standardı.....	29
Çizelge 4.4 Petrol boru çeliği kaliteleri mekanik özellik limitleri	30
Çizelge 5.1 P value değer açıklamaları	53
Çizelge 5.2 Gerçekleşen darbe sonucu.....	60
Çizelge 5.3 Büyük veri seti örnek görüntüsü.....	62
Çizelge 5.4 Veri setinde bulunan parametreler.....	63
Çizelge 5.5 Model varyasyonları.....	65
Çizelge 5.6 Akma ilk modeli parametre katsayıları ve p-value değerleri.....	66
Çizelge 5.7 Akma ilk modeli standart sapması ve r-sq değeri.....	67
Çizelge 5.8 Akma model formülü (ilk)	67
Çizelge 5.9 Akma son modeli parametre katsayıları ve p-value değerleri	68
Çizelge 5.10 Akma son modeli standart sapması ve r-sq değeri	68
Çizelge 5.11 Çekme mukavemeti best subset raporu.....	70
Çizelge 5.12 Çekme mukavemeti model formülü	71
Çizelge 5.13 Çekme mukavemeti modeli parametre katsayıları ve p-value değerleri... ..	71
Çizelge 5.14 Çekme mukavemet model standart sapma ve r-sq	72
Çizelge 5.15 % Uzama best subset raporu	73
Çizelge 5.16 % Uzama model formülü	74
Çizelge 5.17 % Uzama model parametre katsayıları	74
Çizelge 5.18 % Uzama model standart sapma ve r-sq değeri.....	75
Çizelge 5.19 Çentik darbe model best subset raporu	76
Çizelge 5.20 Çentik darbe model formülü	77
Çizelge 5.21 Çentik darbe model parametre katsayıları ve p-value değerleri.....	77
Çizelge 5.22 Çentik darbe modeli standart sapma ve r-sq değeri	78
Çizelge 5.23 Optimizer sonucu tasarlanan üretim pratiği	83
Çizelge 5.24 Sonuç tasarımı raporu	84
Çizelge 5.25 Deneme üretim yapılacak çelik tasarımı	86
Çizelge 5.26 Döküme ait tüm analizler	87
Çizelge 5.27 Deneme döküm içinde üretilen slabların detayı	89

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.28 Deneme slabların üretim sonrası test sonuçları	90
Çizelge 5.29 Kullanılan numune hazırlama ekipmanları	91
Çizelge 5.30 2. Denemeye Ait Slab Test Sonuçları	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
C	Karbon
Mn	Manganez
Si	Silisyum
S	Kükürt
P	Fosfor
Al	Alüminyum
Nb	Niyobyum
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
N	Azot
Cu	Bakır
Cr	Krom
Ni	Nikel
Ceq	Karbon Eşdeğeri
B	Boron
Mo	Molibden
NbC	Niyobyum Karbür

Kısaltmalar**Açıklamalar**

API	Amerikan Petrol Enstitüsü
BOF	Bazik Oksijen Fırını
DWTT	Ağırlık Düşürmeli Yırtma Testi
EAF	Elektrik Ark Ocağı
EDS	Enerji Dispersiv Spektrum
EN	European Norm
F	F Değeri
HSLA	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelik
Ksi	İnç kare başına kuvvet
MA	Martenzit Adası
ISO	International Standart Organization
PSL	Product Spesification Level
MPa	Mega Paskal
R-sq	R-Kare
Regression	Regresyon
Std	Standart Sapma

1. GİRİŞ

Doğal gaz ve petrol gibi fosil yakıtlar uzun zamandır kullanılsa da henüz yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın olmadığı toplumumuzda yılların en önemli ve stratejik enerji kaynaklarından biri halinde devam edeceği gözükmemektedir. Yenilenebilir kaynaklardaki büyüme, “gelecek yeşil büyümede” temel bir rol oynayacak olsa bile henüz istenen seviyede sürekli, güvenilir bir ekonomik ihtiyaç haline ulaşmamıştır. Bu nedenle petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların kullanım ihtiyacı halen oldukça fazla olup bu ihtiyacın kullanılması için toplumlar arasında transferi de son derece gerekli bir ihtiyaç halinde devam etmektedir.

Bu ihtiyaçların giderilebilmesi için endüstri tarafından üretici ülkelerden kullanıcı ülkelere olan yakıt taşıma yolları ve ihtiyaçları analiz edilmektedir. Bu analizler ayrıca rota optimizasyonu, malzeme seçimi, işletme akış parametrelerinin tanımı, optimum hidrolik çap ve duvar kalınlığı seçimi, ara gaz sıkıştırma istasyonlarının boyutlandırılması, inşa edilebilirlik ve çevresel etki analizlerini içermektedir. (Carbos, Jorge, Souza, Bott., Mendes, 2020:1)

Mükemmel mekanik özelliklere sahip, (kullanım yerindeki ortam şartlarına maksimum dayanımda) sertlik ve aynı şekilde en iyi tokluk birleşimi ile elde edilecek çelikler petrol boru taşımacılığı için belirli projelerde kullanılmak istenmektedir. Petrol ve gaz boru hattı taşımacılığı, yüksek verimlilik, ekonomi ve güvenlik ile karakterize edilir ve uzun mesafeli petrol ve gaz taşımacılığının ana bileşenlerindedir.

Boru hatlarının gelişimi gün geçtikçe büyük çaplı ve yüksek basınçlı olma tarafına kaymaktadır ve bu nedenle boru hatlarının zorlu iklim koşullarına karşı dirençlerinin yüksek olması daha fazla talep edilir hale gelmiştir. (Hwang, Shin, Lee, Kim, Ahn, 2008:1)

API çelikleri yüksek basınçlı şartlar altında uzak mesafelerden gaz, su, petrol veya doğalgaz taşımacılığında kullanılan çeşitli çaplarda düz veya spiral olarak üretilen boruların imalatında kullanılan çeliklerdir.

2. AMAÇ

Çalışmanın amacı çelik üretiminde malzemenin kullanım alanı ve yer özellikleri dikkate alınarak en iyi mekanik özelliklerin optimize edilerek sağlanmasıdır. Çelik seçiminde bilindiği üzere nihai ürüne ait mekanik özellikler büyük önem taşımaktadır. Yine kullanım alanına dikkat edilerek çelikten sadece çekme dayanımı ihtiyacı olabilse de kullanılan yere ve yapılacak işe bağlı olarak çekme dayanımı yanında, darbe dayanımı, katlama sonrası malzemenin davranış özellikleri, yırtılma dayanımı gibi özelliklerde ihtiyaç olabilmektedir.

Tezimizin konusu da soğuk iklim şartları gereği ihtiyaç duyulan düşük sıcaklıktaki darbe enerjisi ile birlikte en iyi çekme dayanımı, uzama dayanımı özelliklerinin aynı anda malzemede sağlanabiliyor olmasının araştırılmasıdır.

Bu şekilde nihai üründe çekme dayanımının çok iyi olmasına karşın darbe direnci düşük olabileceği gibi durumların önüne geçilerek çelikten optimum mekanik özelliklerin sağlanabilmesi amaçlanacaktır.

3. KAPSAM

Bu çalışmada tez konunun hedefe ulaşabilmesi adına petrol boru çeliği üretiminde ana etkenler olan parametreler üzerinde durulacaktır. Ayrıca çeliğin mekanik ve mikro yapı özellikleri ve istenen hedefe ulaşılabilmesi adına gerekli özellikler anlatılacaktır. Şu ana kadar yapılan çalışmalarda belirli bir sıcaklığa kadar müşteri isteklerini asgari düzeyde karşılayabilecek özellikte elde edilebilmiştir. Fakat daha düşük sıcaklıklarda istenen özellikler için maliyetlerin artırılmadan mevcut proses parametreleri ise istatistiksel çalışmada yapılarak çalışma hedeflenmektedir.

Çalışma öncelikli olarak geçmiş üretime ait büyük veri setinin incelenmesi ile başlayacak ve istatistiksel veri analiz çalışmaları Minitab19 programı ile gerçekleştirilecektir. Büyük veri seti üzerinden modelleme çalışmaları yapılarak elde edilmek istenen çelik özelliklerine göre kullanılması gereken üretim parametreleri, kimyasal analiz değerleri çıkartılacaktır.

İnceleme aşamasında var olan veriler üzerinden tesis yeterliliği (capability analysis) ile mevcut durum analizi yapılacak olup sonrasında gerçekleştirilecek yeni üretimlerde tesis yeterliliği çalışması tekrarlanarak elde edilecek iyileşme veya kötüleşme durumları analiz edilerek yorumlanacaktır.

4. PETROL BORU ÇELİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI

Petrol boru çeliklerinin varlığı ve kısa bir tanımına bakacak olursak; EN ISO 3183 veya API kalitesine tabi çelikler, Avrupa Standartlarının veya Amerikan Petrol Enstitüsü'nün belirlediği limitlere göre üretilebilen çeliklerdir. Petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların boru hatları ile toprak altında ve üzerinde, okyanus ve denizlerde yapılan transferlerinde kullanılmaktadır.

Bu çeliklerin özelliği (Mitchell, 2019:4), ilgili kalite özelliklerinde üretilen sınırlara göre yüksek mukavemetli ve karbon içeriği ve mikro alaşım ilavelerinin az olmasının da etkisi ile kaynak yapmaya uygunluğu ile birlikte şekillendirilebilmelerine ve darbe dayanımlarının yüksek olması şeklinde ifade edilebilir.

Ülkemizin de bu kalite çelik ihtiyacını karşılayabilmek adına, Türkiye' de ark ocaklı tesisler ve cevherden üretim yapan ERDEMİR ve İSDEMİR gibi tesislerde de petrol boru taşımacılığı amacıyla kullanılmak üzere çelik üretimi gerçekleştirilmektedir.

Petrol boru çelikleri PSL1 ve PSL2 adı altında 2 kalite seviyesi ile adlandırılır. (Ürün Limit Seviyeleri) Borular, aşındırıcı ve aşındırıcı olmayan farklı ortam türlerinde kullanılır. Şiddetli aşındırıcı ortamda kullanılan borular, bu tür işlem koşullarına dayanabilecek malzeme gerektiriyorsa PSL2 kalite seviyesi tercih edilir. Boru yüksek basınç koşullarında kullanılırsa kaynak dikişi böyle bir yüke dayanabilir olmalıdır.

Diğer yandan normal hizmetler için standart bir kalite seviyesi borusu bu amaca uygun olacaktır. Bu yüzden iki ürün seviyesi vardır. Kullanılan borunun durumuna ve ekonomik olmasına göre seçim yapabiliriz.

Petrol boru çeliklerinde kullanılacak kimyasal ve fiziksel özellikler boruların ortam şartlarına göre değişiklik gösterdiğinden müşteri talepleri farklılık gösterebilmektedir. API 5L X65 boruya ISO 3183 L450 boru da denir, petrol ve gaz iletiminde kullanılan API 5L (ISO 3183) spesifikasyonlarında üst seviye bir borudur. Buna X65 boru veya L450 boru dememizin nedeni, 65000 ksi (inç kare başına kilo) 450 Mpa' da gereken minimum akma dayanımı olmasıdır.

4.1. Petrol Boru Çeliklerinde İstenen Mekanik Özellikler

Üretilen bu çeliklerde istenilen başlıca fiziksel/mechanik özellikler şu şekilde belirtilebilir: Yüksek mukavemet, üstün özelliklere sahip çarpma tokluğu, kaynaklanabilirlik özelliklerinin üst seviyede olması ve şekillendirilebilme özelliklerinin iyi olması ile atmosfere açık ortamlarda korozyon dayanımının yüksek olması. (Gray, Siciliano, 2009:5)

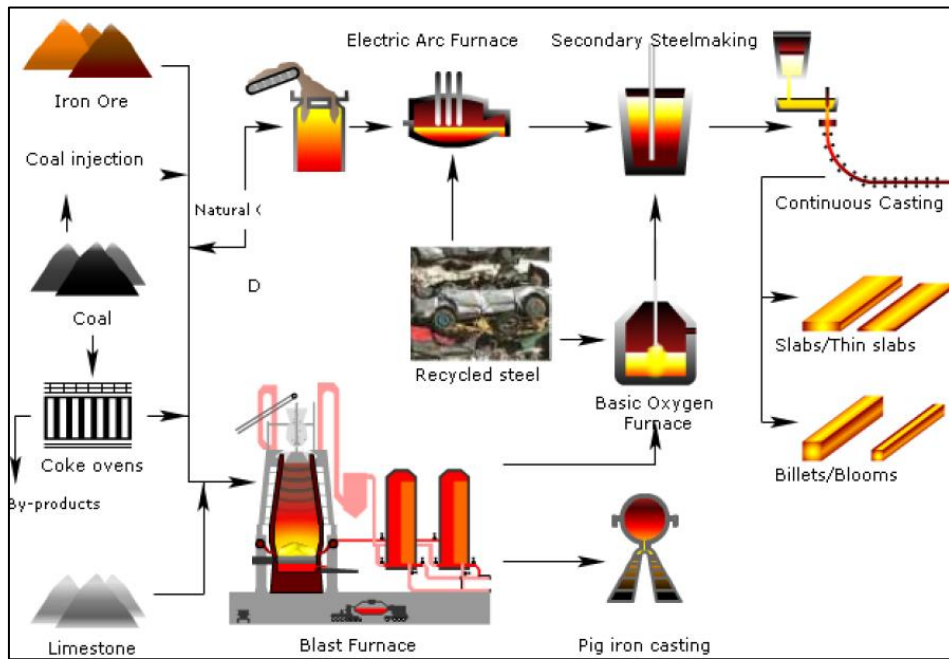
Bu özelliklere ek olarak çeliğin yüzey özellikleri de oldukça önemlidir. Üretilen bobinlere ait slablar yüzey kusurlarını gidermek için şaloma ile yüzey temizleme gerektirebilmektedir. Laminasyon, kenar çatlağı, tufal, oyulma korozyonu, çizik, gaz boşluğu, kalıntı (inklüzyon) ve mikro inklüzyon gibi sonraki hatlarda problem yaratacak kusurlar olmamalıdır. Bu amaçla üretim sırasında gerekli yüzey kontrolleri yapılmalıdır. Müşterinin bu kalitelerde yaptığı testler ise boyutsal ölçümler ile birlikte iç yüzey özellikleri için ultrasonik testler ve mekanik özelliklerin belirlenmesi için tahribatlı testler uygulanabilir. Hidrostatik basınç testleri, ve kimyasal kompozisyon tayini, ferritik tane boyutu ölçümü, segregasyon şeklinde sıralanabilir.

- API 5L veya EN ISO 3183 standardına tabi çelikler petrol ve doğalgaz boru hatları iletimlerinde kullanılmaktadır.
- Bu çeliklerin özelliği; yüksek mukavemetli ve karbon ve mikro alaşımları az olmasından istifade edilerek kaynaklanabilir olmaları ve darbelere karşı dirençli olmaları olarak anlatılabilir.
- Spiral boru üretimleri sıcak haddelenmiş rulodan ve düz dikişli borular ise levhadan ve bobinden üretilmektedir.
- Kullanım yerindeki ortam şartlarına maksimum dayanımda sertlik ve en iyi tokluk birleşimi ile elde edilecek çelikler petrol boru taşımacılığı için belirli projelerde kullanılmak istenmektedir.

Bu kapsamda üretilen çeliklerin petrol borusu olarak kullanılması ve standart/müşteri şartlarını sağlamasını garanti altına almak adına üreticiler tarafından şu testler uygulanır; Çekme Testi, çentik Darbe Testi ve ağırlık düşürmeli yırtma testi. Kimyasal kompozisyon tespiti ve çekme testi gibi tahribatlı testler PSL1 seviyesinde yapılması zorunludur.

4.2. Demir Çelik Üretim Proses Akışı

Çelik kısaca anlatılmak istenirse demirin karbonla yaptığı alaşım ürünüdür. Çelikle ilgili bilimsel ve pratik çalışmaları çeliğin geleneksel tanımına uygun olarak genellikle demir karbür (Fe_3C) faz diyagramı yönlendirir. Ancak çeliğin bileşiminde yer alan alaşım elementlerinin varlığına göre bu diyagramların şeklide değişebilir. Alaşım elementlerinin varlığı dönüşüm sıcaklıklarını değiştirebilir bu nedenle farklı alaşım elementleri ile farklı özellikte çelikler üretilebilmektedir. Resim 4.1 de hem elektrik ark ocağı hem de yüksek fırın prosesine ait akış görülebilmektedir.



Resim 4.1. Demir çelik üretim akışı

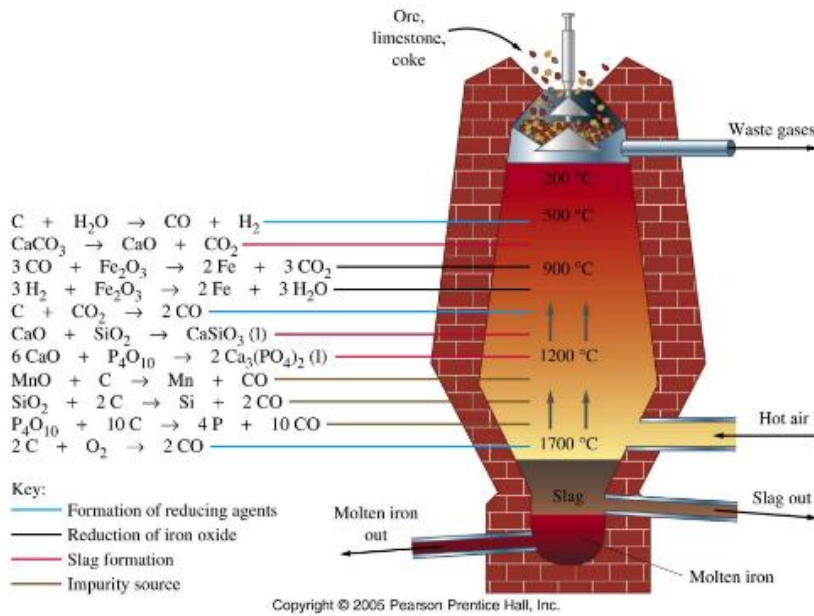
Kaynak: (Glenn, 2013:6)

Çeliğin ana bileşeni demir (Fe) elementidir. Çelik öncelikle iki yöntemden biri kullanılarak üretilir: Yüksek Fırın veya Elektrik Ark Ocağı. Yüksek fırınlar genel olarak entegre çelik üretim tesislerinde bulunurlar. Yukarıdaki şekilden de görüleceği üzere demir cevheri, koklaşmış kömür, kireç taşı, hurda gibi girdiler ile demir cevheri veya hurda ergitilerek demir çelik ürünleri elde edilmektedir.

4.3. Yüksek Fırın Üretim Akışı Ve Çelik Üretimi

Yüksek fırın prosesi ile demir üretimi, demirin oksitli bileşiklerinden çelik üretmenin ön adımındır. İlk yüksek fırınlar 14. yüzyılda ortaya çıkmış olup o yıllarda üretimleri 1 ton ile sınırlı kalabilmişti. Ekipmanlar iyileştirilse ve daha yüksek üretim oranları elde edilebilse de yüksek fırın içindeki süreçler genel olarak benzer şeklini korudu. Yüksek fırında sıvı ham

demir üretmek için koklaştırılmış kömür ile birlikte demir cevheri ve kireç kullanılmaktadır. Bir yüksek fırın içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar ve yüksek fırın içerisindeki sıcaklık değişimleri resim 4.2' de gösterilmiştir. Reaksiyon sonunda sıvı ham demir ve cüruf ayrı noktalardan çıkmaktadır. Resim 4. 2 de gösterildiği gibi yüksek fırına üstten demir cevheri, kireç taşı, kok gibi malzemeler ilave edilir. Alttan verilen sıcak hava ile malzemelerin ertilmesi sağlanır. Resim 4.2' de de görüldüğü üzere atık gazla yüksek fırın üst kısmından alınmaktadır ve yine yüksek fırın içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar gösterilmiştir.

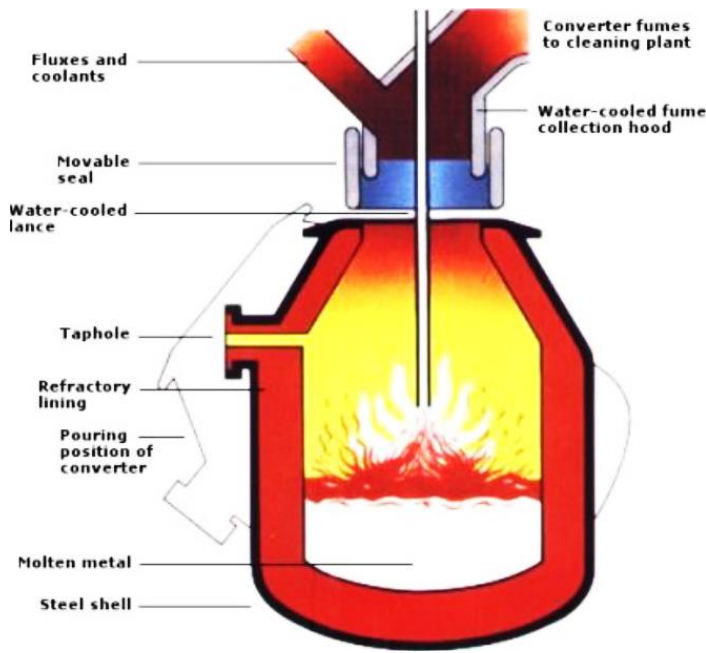


Resim 4.2 Yüksek fırın şematik gösterimi

Kaynak: (Biavesh C. Lad,2012:7)

Çelik üretimi genel olarak demir cevheri veya hurdadan olmak üzere 2 şekilde üretilmektedir. Entegre demir çelik tesislerinde demir cevheri, kömürün koklaştırılması sonrası yüksek fırınlarda ertilmektedir. Yaklaşık %4 karbon içeriğine sahip sıvı demir torpido veya sıvı pik potaları aracılığı ile bazik oksijen fırınlarına taşınmakta ve burada üstten veya alttan oksijen üflenmesi ile sıvı ham demir çeliğe dönüştürülmektedir. Konverterlere sıvı ham demir şarj edilmesi ile beraber cüruf yapıcılar ile birlikte konverter içerisindeki ısının optimize edilmesi için %15-20 arasında hurda ilave edilir. Hurda bu aşamada soğutucu görevi görerek oksijen üflenmesi sonrası aşırı ısınma ve konverterin zarar görmesi problemlerinin önüne geçmektedir. Konverterlerin genel olarak görüntüsü resim 4.3' de gösterilmiştir. Isıya dayanıklı tuğlalar ile örülü bu kova şeklindeki konverterler içerisine daldırılan refrakter kaplı lans ile oksijen üflenmektedir. Resim 4.3'de konvertere

ait bölgeler gösterilmiştir. Konverterlerde elde edilen çelik döküm deliğinden potalara alınır. Konverter içerisinde kalan cüruf ise konverterin yatırılması sonrası üst ağız kısmından cüruf potalarına boşaltılır. Konverterler çeliği yüksek oksijen girdisi ile sıvı demirden çeliğe dönüştürdüğünden dolayı oksijene afinitesi bulunan fosforun giderimi oldukça kolaydır. Buna karşın kükürt giderimi için elverişli bir ortam bulunmamaktadır. Resim 4.3 de bir konverter yapısına ait genel görünüm verilmiştir.



Resim 4.3 Konverter şematik gösterimi

Kaynak: (Short, 2014:8)

Bazı oksijen fırınlarında çeliğe dönüştürülen sıvı ham demir buradan sonra çelik potalarına nakil edilir. Oksijen üflenmesi sonrası çelik içerisinde bulunan yaklaşık 500-1000 ppm seviyesindeki oksijenin giderilmesi için oksijen giderici elemanlar kullanılır. Bu aşamada üretilen çelik kalitesinin de özelliklerine göre deoksidant malzeme seçimi yapılır. Genel olarak pota içerisindeki oksijenin giderilebilmesi için külçe alüminyum, FeSi, FeSiMn gibi alyaj malzemeleri kullanılmaktadır.

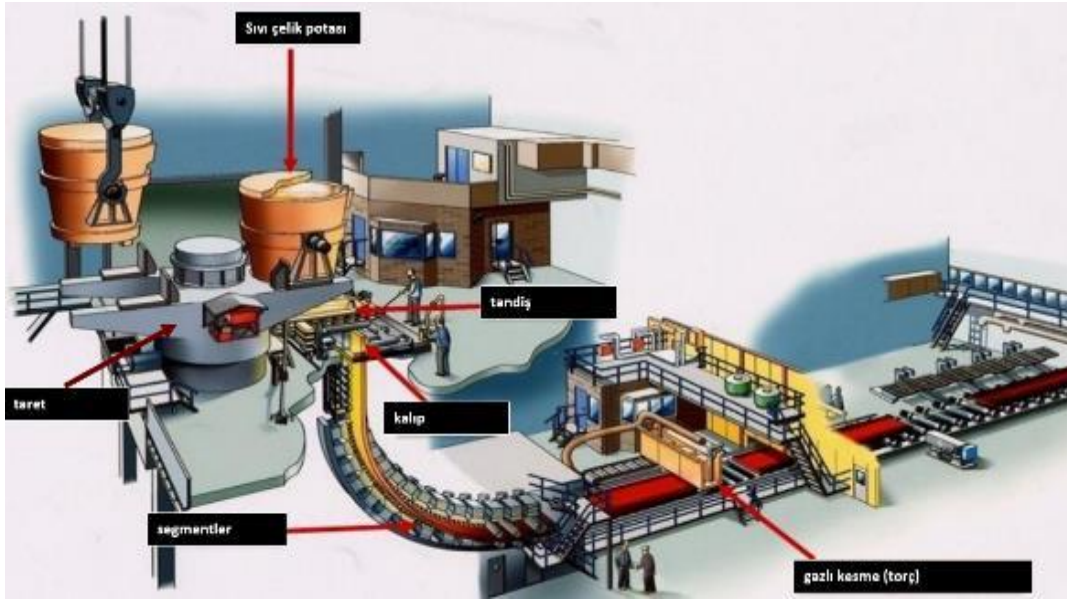
Çelik potasında gerçekleştirilen oksijen giderimi sonrası potalar ilave alaşımlama ihtiyaçlarının giderilmesi, tandište istenen sıcaklık aralığının yakalanması ve oksijen morfolojisinin istenen seviyede elde edilmesi için pota ocağına taşınır. Pota ocakları küçük bir elektrik ark ocağı izlenimi vermekte olup yine 3 adet elektrot bulunan çelik potasını ısıtan ve alyaj malzemelerinin ilave edilebildiği istasyonlardır. Pota ocağına gelen çelik potası burada hem ısıtılır hem de aynı zamanda müşteri isteği ve kalite standartları içerisindeki

talepleri yakalamak için alaşımlandırılır. Ocak üzerinde bulunan silolardan gerekli alyaj malzemeleri hesaplanan miktarlarda seviye 2 yazılımları üzerinden girilerek potaya ilave edilir. Isıtma ile beraber pota içerisine ilave edilen malzemelerin homojen bir şekilde karışması için pota alttan karıştırma sistemleri bulunmaktadır. Burada Ar, N gibi soygazlar pota alt tarafından verilerek potanın karıştırılması sağlanır. Potaların yeterli ısıtılması ve alaşımlandırılması sonrası son kullanım alanına göre çelik temizliği ihtiyaçları için kalsiyum tel enjeksiyonu gerçekleştirilir. Aynı zamanda potalar düşük debide alttan karıştırma ile var olan inklüzyonların yüzerek pota yüzeyindeki cürufa taşınması sağlanır.

4.3.1. Sürekli döküm prosesi, slab, kütük ve blum üretimi

Tüm işlemleri bitirilen pota, vinç vasıtası ile slab veya kütük sürekli döküm tesisine taşınır. Kontinü tesis olarak tabir edilen sürekli döküm makinalarında müşteri isteklerine göre ebatlarda slab, kütük veya blum mamulü üretilebilmektedir. Bu tesisler 24 saat boyunca üretimin devam ettiği ve refrakter malzemelerin 1500 °C sıcaklıklarda izin verdiği süre boyunca üretimin devam ettiği tesislerdir. Genel olarak üretimin devamlılığı tandiş içi refrakter, tandiş ve kalıp arasında kullanılan ara tüp gibi refrakter ekipmanlar üretimin süresini belirler. Bu ekipmanlar tandiş başına üretim maliyetlerini artırdığından dolayı sürekli döküm tesislerinde en fazla sayıda döküm alma hedefi bulunur.

Sıvı çelik potası öncelikle 360 derece dönebilen tarete konulur. Taret dolu ve boşalan döküm potasını vincin alacağı müsati noktaya çekme ve tandiş üzerinde tutmak için geliştirilmiştir. Resim 4.4' de genel olarak bir sürekli döküm (kontinü) tesisi görülmektedir ve sıvı çelik potasının konulduğu taret, kalıp, tandiş, segmentler ve üretilen slabların kesildiği kesme makinaları görülebilmektedir.



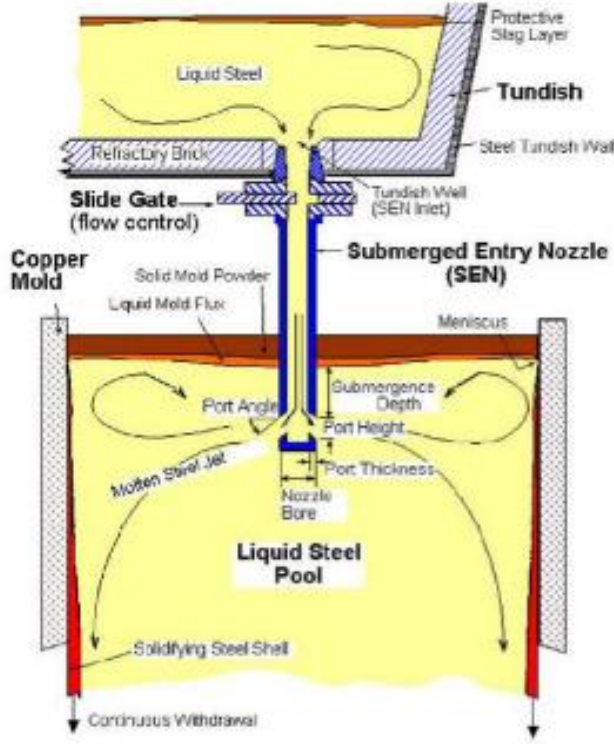
Resim 4.4 Sürekli döküm prosesi şematik gösterimi

Kaynak: (Pei, Petäjaniemi, Regnell, Wijk;2020:10)

Taret döküm pozisyonu olarak altındaki tandişe sıvı çelik akışı için potayı askıda tutar. Tandiş üzerindeki dolu pota tamamen boşalmadan taretin diğer bölümündeki askıya dolu pota getirilmesi gerekmektedir. Tandiş içerisinde kalan miktar kritik seviyeye gelmeden yeni pota açılarak döküme başlanmalıdır. Aksi durumda tandişte üretim kesilerek tekrar yeni bir tandiş ile başlanması gerekir. Buda üretim sürekliliğini sekteye uğratacaktır.

Dolu pota tandiş üzerine getirilmesi sonrası pota altındaki döküm deliği açılarak sıvı çelik öncelikle tandişe ve tandiş dolduktan sonrada döküm makinası kalıplarına akmaktadır. Tandışten kalıba akış şematik olarak resim 4.5' de gösterilmiştir. Tandiş üzerinde sıvı çeliğin hava ile bağlantısını kesmek amaçlı koruyucu örtü tozu, döküm tozu kullanılmaktadır. Sıvı çelik tandiş altında bulunan stoper deliklerinden kalıba akmaktadır. Döküm şekline göre açık veya kapalı döküm olarak tabir edilen durumlarda tandiş ile kalıp arasında refrakter içerikli ara tüp kullanılmaktadır. Ara tüpler sıvı çelik akışı sırasında çeliğin oksijen kapsamını ve çelik içerisinde oksitli kalıntılar oluşmasına engel olmaktadır. Resim 4.5 de tandışten kalıba çelik akışı şematik olarak gösterilmiştir. Görüldüğü üzere çelik sıvı akışı ile beraber oluşan turbülans nedeniyle tandiş içerisinde bulunan çelik veya çelik dışı safsızlıklar akış ile beraber kalıp içine de geçebilmektedir. Bu nedenle çelik üretimi sırasında cüruf tutucu özellikle tandiş örtü tozu ve kalıp döküm tozu gibi ara elementlerin varlığı oldukça önemlidir. Özellikle üretilen çeliğin kullanım alanına bağlı olarak çok düşük seviyede olması gereken çelik kirliliği seviyeleri olabilmektedir. Çelik içerisinde inklüzyon seviyesinin düşük olması

gerekmekte olup özellikle sülfür tip ve alümina tip inklüzyonların boyutlarının düşük olması ve yoğunluklarının az olması istenmektedir. Genel olarak ASTM E45 standardına göre çelik kirliliği seviyesi 2 üzerine çıkmamalıdır.



Resim 4.5. Tandıştan kalıba çelik akışı

Kaynak: (B.G. Thomas, 2006:11)

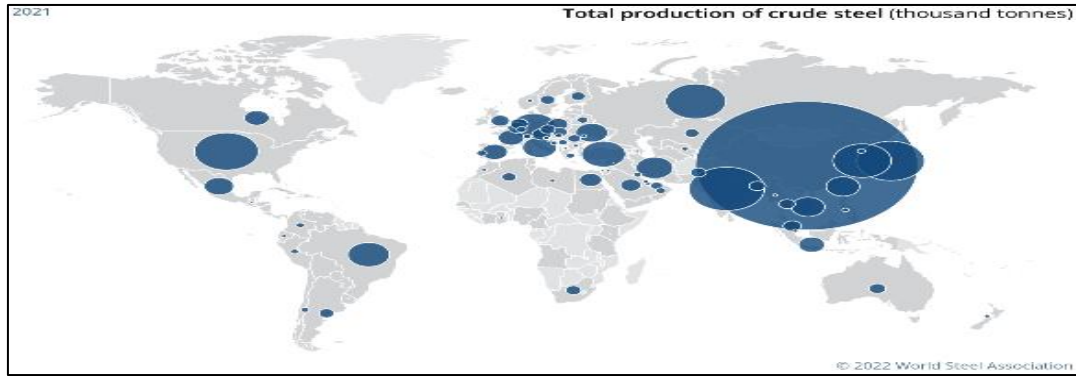
Su soğutması ile birlikte kalıp içerisinde hareket eden çelik katılaşarak ve kabuk oluşturarak yoluna devam eder. Metalürjik uzunluğa bağlı olarak katılaşma sonrası kütük veya slablar torç gazlı kesme cihazları ile istenen uzunluklara kesilerek stoklara taşınır veya sıcak şarj gerekiyor ise haddeleme fırınlarına sevk edilir. Özet olarak resim 4.6’da konverter, pota fırını, slab döküm ve son aşama haddeleme prosesine ait görseller bulunmaktadır.



Resim 4.6. Çelik üretim akışı

4.3.2. Türkiye’de ve dünyada çelik üretimi

Bugün Türkiye’de 26 elektrik ark ocaklı çelik üretim tesisi (EAF), 8 indüksiyon ocağı tesisi ve 3 BOF tesisi bulunmaktadır. (Türkiye Çelik İhracatçıları Birliği, 2021) 2021’de küresel üretim, 2020’a göre %3,8 artarak 1,951 milyar tona çıkmıştır. Türkiye üretiminde ise 2021’de %13 lük artış görülmüş ve 40,36 milyon ton olmuştur. Resim 4.7’ den de görüldüğü üzere en yüksek üretim miktarı açık ara Çin olmak üzere sonrasında Hindistan, Japonya ve Amerika olarak devam etmektedir. Türkiye ise yüksek üretim kapasitesi ile dünyada 7. Sırada yerini almaktadır.



Resim 4.7 Dünya çelik üretim miktarları

Kaynak: (World Steel Assosiation, 2021:12)

Çizelge 4.1 Ülkeler bazında çelik üretim tonajları

Kaynak: (World Steel Assosiation, 2021:12)

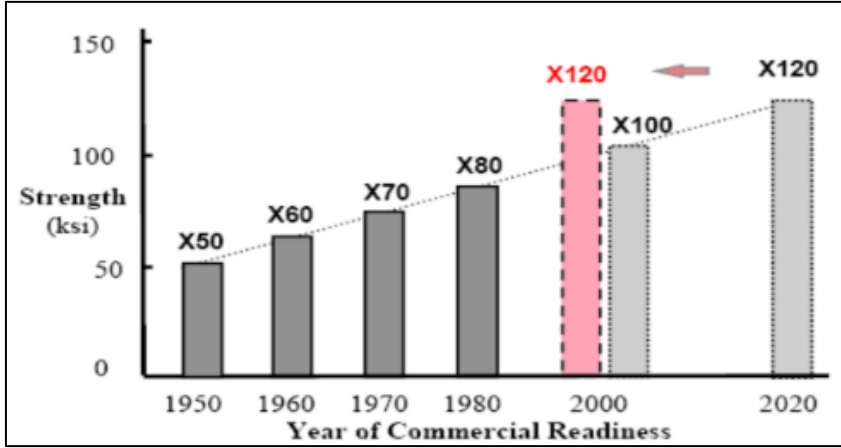
Ülkeler	2017	2018	2019	2020	2021
Dünya Geneli	1.735.087,0	1.826.643,9	1.875.330,1	1.880.410,4	1.951.924,0
Çin	870.740,9	929.038,4	995.418,9	1.064.732,0	1.032.790,0
Hindistan	101.454,7	109.272,0	111.350,7	100.256,5	118.244,0
Japonya	104.661,1	104.318,8	99.284,1	83.186,5	96.334,5
Amerika	81.612,2	86.607,4	87.761,2	72.732,1	85.791,4
Rusya	70.537,0	72.099,0	71.729,2	71.621,0	75.584,8
Güney Kore	71.030,0	72.464,0	71.411,9	67.078,8	70.418,0
Türkiye	37.523,9	37.311,7	33.743,1	35.810,3	40.360,0
Almanya	43.297,2	42.434,7	39.627,3	35.680,0	40.066,3
Brezilya	34.777,6	35.406,5	32.568,9	31.414,9	36.174,3
İran	21.235,6	24.519,7	25.609,2	28.990,1	28.460,0
İtalya	24.007,2	24.495,8	23.190,4	20.379,1	24.426,2
Tayvan	22.437,8	23.240,5	21.954,4	20.958,9	23.233,3
Vietnam	11.473,0	15.471,0	17.469,0	19.900,0	23.019,2
Ukrayna	21.417,3	21.100,5	20.848,2	20.616,4	21.365,6
Meksika	19.924,1	20.204,0	18.387,0	16.802,6	18.453,6

Çizelge 4.1 de görüldüğü üzere dünyada çelik üretim tonajları yıllar bazında verilmiştir. Türkiye bu sıralamada 2021 yılında 7. Sırada yer almıştır. Ülkedeki tüm çelik şirketleri özel şirketlere aittir ve Türk çelik üreticileri, sektörün küresel pazarda uzun vadeli canlılığını artırmak için teknolojik gelişmeleri takip etmeye devam etmektedir.

Türkiye 2001 yılında dünya sıralamasında üretimde 10. sırada yer alır iken 2021 yılında 7. Sıraya kadar yükselmiştir. Hatta 2001-2011 yılları arasında Çin'den sonra dünyanın en hızlı büyüyen üçüncü çelik üreticisi olmuştur. Güçlü iç talep ve dinamik çelik kullanan sektörlerle ek olarak, Türkiye'nin iyi konumlanmış konumu, ihracatı ve üretimi de desteklemektedir.

4.4. Boru çeliği üretimi

Metal ana sanayi alt sektörlerinden biri olan çelik boru üretimi de genel çelik üretimine paralel olarak artış göstermektedir. Tezimiz konusu olan petrol ve doğal gaz boruları yanı sıra su borusu, sondaj boruları, dikişli-dikişsiz borular, spiral borular gibi oldukça geniş bir üretim alanı bulunmaktadır. Doğal gaz yadsınamaz çekici bir enerji kaynağıdır, ancak büyük rezervler genellikle dünyada kullanılmak istenen alandan uzak bölgelerde bulunur. Bu nedenle transfer için bu borular kullanılır. Son yıllarda, genişletilmiş ulaşım etkinliğine yönelik eğilimler, büyük ölçüde boru hatlarının genişliğini genişleterek başarılmıştır. Bugün ticari gelişimdeki en yüksek dereceli boru hattı, tarihsel eğilimlerle tutarlı olarak X-100'dür. Boru hattı çeliğinin özelliklerinin, Amerikan Petrol Enstitüsü (API) standartlarının ölçüsü ile eşdeğer olması gerekir. API çelikleri, bileşime, özelliklere ve kalınlığa bağlı olarak farklı dereceldedir. Bu tanımlamalardaki sayılar, bitmiş borunun minimum akma mukavemetini (ksi) belirtir. API çeliklerindeki özellikler, esas olarak, örneğin Ti, B, P, N, S, Mn, V, Nb vb. kontrollü TMP ve soğutma gibi çeşitli mikro alaşım bileşenlerinin eklenmesiyle elde edilir. Boru hattı çeliklerinin özellikleri, termomekanik, kontrollü işleme yoluyla elde edilen mukavemet, kırılma tokluğu ve kaynak kabiliyeti karışımı olarak karakterize edilebilir. Yıllara bağlı olarak farklı çelik kalitelerinin oluşumu aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. 1950 li yıllarda petrol ve doğal gaz boru taşımacılığında X50 gibi düşük mukavemetli çelikler kullanılsa da sonraki senelerde X60, X70 ve hatta 2000' li yıllarda X120 kalitede çelik ihtiyaçları doğmuştur. Şekil 4.1 de bu durum grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Yıllara göre artan kalite ihtiyacı (boru hattı teknolojisinin ticarileştirilmesi)

Kaynak: (Tovee, 2014:15)

API çeliğinin tavsiye edilen akma ve çekme mukavemeti, petrol ve doğal gaz endüstrileri için ISO 3183:2007 standardında tanımlanmıştır. API kalite çelikler genellikle haddelenmiş, normalize edilmiş haddelenmiş, termomekanik haddelenmiş, normalize edilmiş ve temperlenmiş veya su verilmiş ve temperlenmiş levhalar şeklinde elde edilir. Termomekanik işlem, uygun sıcak haddeleme tasarımı ve ardından soğutma işlemi yolu ile mekanik özellikleri iyileştirmek için ısıtma işlemi sırasında çeliğin plastik deformasyonu olarak tanımlanan yaygın bir terimdir.

4.5. Müşteri Beklentileri ve Yeni Nesil Çelikler

Problemi tanımlamadan önce prosesin tanıtımına kısaca değinecek olursak; Yüksek Fırından gelen sıvı ham demir, konverterde çeliğe dönüştürülmesi sonrası alaşımlama ve sıcaklık ayarlama ve diğer faaliyetler için Pota Fırınında işlem görür ve slab tesisinde yarı mamul haline getirilir. Daha sonra sıcak haddeleme tesisinde müşterinin talep ettiği ebatlarda haddelenerek nihai ürün olarak üretimi gerçekleştirilir. Üretim sonrası müşteri ve standart gereklilikleri olan mekanik testler, bobinlerden kesilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bobin stok sahasında bobin soğuduktan sonra kesilen numune parçaları mekanik fizik test atölyesinde işlenerek çekme testi ve darbe testi için istenen ebatlara indirgenir ve mekanik testler gerçekleştirilir. Test sonuçlarına bağlı olarak da müşteriye uygunluk kararı verilmektedir.

Çalışmamıza konu olan ürünler bu proses hatları ile üretilmiş, kullanım alanı petrol ve doğal gaz borusu olan kaliteleri içermektedir. Bu kalitelerin ait olduğu «petrol boru çelikleri kullanım grubu» katma değeri yüksek, aynı zamanda projeli işler olduğu için de yoğun sipariş şeklinde alınan bir kalite grubudur. Bu çelikler yüksek mukavemetli olması yanı sıra kullanılacağı iklim şartlarına da uyum sağlayacak şekilde yüksek bir darbe direncine yani tokluğa sahip olmalıdır. Bu nedenle soğuk iklim şartlarında gerçekleşecek projelere yönelik çelik ihtiyacı düşük sıcaklıklarda yüksek darbe dayanımı gösteren çeliklerden karşılanmak zorundadır. Petrol boru çelikleri PSL1 ve PSL2 adı altında 2 kalite seviyesi ile adlandırılır.

Petrol boru çelikleri çizelge 4.3' de görüldüğü üzere API 5L standardına göre; 9030 kalitesinden başlayarak 9070 kalitesine kadar üretilmektedir. Bu kalitelere karşılık gelen standart mekanik test limitleri yanında projelere bağlı olarak müşteri istekleri farklılık gösterebilmektedir.

4.5.1. Boru çeliklerinde çelik üretimi, sürekli döküm ve haddeleme prosesi

Proje konusu olan darbe direncini artırmaya (yani malzemenin Tokluğunu, malzeme kırılıncaya kadar harcadığı enerjiyi artırmaya) yönelik çalışma öncesi literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Genel olarak çeliklerdeki bu mekanik özelliğe etki eden ana parametreler karbon, alaşım ilaveleri, azot, segregasyon, empürite değerleri, mikro yapı, çelik kirliliği ve sıcak haddehane üretim parametreleridir.

İstenilen mekanik özellikleri elde etmek adına sıvı çelik üretim tesislerinde temiz bir çelik elde edilmesine yönelik hurda seçimi yapılmalı ve kalite limitleri istekleri bu hedefe yönelik hazırlanmalıdır. Konverterlerde kaliteli hurda kullanımı ile birlikte devirme anında devirme süresi, cüruf kaçışına engel olunması, optimum miktarda kireç ve diğer alaşım elementleri uygulaması gerekmektedir. Aynı zamanda en önemli parametrelerden birisi olan azot ve hidrojen değerinin kontrol altında tutulması ve azot artışına neden olabilecek parametrelerin ortadan kaldırılması gerekmektedir.

Pota ocaklarında uygun sıcaklıklar ile yine azot artışına engel olunmalı ve alaşımlama işlemleri sonrası inklüzyon modifikasyonu sağlanması adına kalsiyum tel enjeksiyonu ile birlikte ideal cüruf yüzdürme pratikleri uygulanmalıdır. Hedeflenen inklüzyon seviyeleri

üzerinde oluşabilecek bir mikro yapı düşük tokluk değeri ile sonuçlanabilecek bir mekanik özellik sağlayacaktır.

Slab üretimi sırasında kalıp içi çelik-cüruf etkileşimi en az seviyede tutulması ve yağlamanın etkili olabilmesi yine inklüzyon kapmada önemli parametredir. Döküm tozu etkisi ile oluşabilecek bir inklüzyon varlığında mekanik özellikler olumsuz etkilenebilecektir. Aynı zamanda slab mamül içerisinde gaz boşluğu, çatlak ve segregasyon varlığının üst seviyelerde olması yine hem mekanik hem de nihai mamül yüzey özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Bu nedenlerden ötürü petrol boru çeliği üretiminde kullanılacak bobin üretimi öncesi haddelenecek slabların kontrol edilmesi gerekir. Slablar tahribatlı olarak kesilerek iç yüzey özellikleri kontrol edilmelidir. Slab yüzey veya iç yüzeyinde görülebilecek bir kusurun mutlaka giderilmesi ve kusur varlığı ile haddeleme yapılmaması gerekmektedir. Bobin mikro yapısında oluşabilecek mikro segregasyon ile birlikte perlit bantlamaları da minimum seviyede tutulmalıdır. Yoğun bir segregasyon varlığı darbe testlerinin düşük gerçekleşmesine sebebiyet verecektir. Kontrol edilen slabların haddelenmesi sırasında optimum tavlama rejimi ile birlikte yüzeyden tufal atımı sağlanmalıdır. İstenilen mikro yapı, mekanik özellikleri elde etmek adına yeterli ezme oranları ile haddeleme gerçekleştirilmeli ve mekanik özelliklere alaşım etkisi üzerinde bir özellik katılmak isteniyor ise mutlaka termomekanik haddeleme yöntemleri ile haddeleme sıcaklık kontrolleri yapılarak tane boyutu kontrol altında tutulmalıdır.

4.5.2. Kimyasal analiz ve mikro alaşımlama etkileri

API sınıfı çelikler, gereksinim özelliklerine göre çeşitli kimyasal bileşimlere sahiptir, bu çelikler, önde gelen mikro alaşım bileşenleri temelinde karakterize edilir. API sınıfı çeliğin özelliklerinde ana alaşım elementlerinin etkileri çizelge 4.2' de verilmiştir. Bu çeliklerin mekanik özelliklerinin iyi olması ile beraber şekil verilebilme ve kaynak edilebilme özelliklerinin de aynı zamanda iyi olması beklenmektedir. Bu amaçla düşük karbonlu, düşük kükürt-fosfor oranlarında ve düşük empüritel (safsızlık) üretim yapılma zorunluluğu vardır. Yüksek mukavemet ve mikro alaşımlandırma (Nb, Ti, V, Mo, Cr gibi) ile termo mekanik haddeleme yöntemleri birlikte üretilebilirler.

Karbon arttıkça darbe enerjisi 200 joule değerinden 50 joule değeri altına kadar düşmektedir. Literatürde 28 joule altındaki enerji değerleri gevrek kırılma olarak değerlendirilebilmektedir. Hat borusu çeliğinin karbon içeriğinin yaklaşık %0.03'e

düşürülmesiyle, mükemmel tokluk, süneklik ve kaynak kolaylığı gibi birçok özellik iyileştirmesinin yanı sıra, slab merkez hattı bölgeleri dahil olmak üzere azaltılmış segregasyon elde edildiği tespit edilmiştir. (Hulka, Heisterkamp, Gray, 1990:17)

Niyobyum tane küçültme özelliği (Almatani, De Ardo, 2020:17) nedeniyle mikro yapı değişimi için kullanılan ana elementlerdendir. Mekanik değerde önemli pozitif etkisi bulunmaktadır. Mikro yapıda üniform bir tane boyutu ve dağılımı sağladığından çeliklerde daha iyi bir kaynaklanabilme ve daha iyi bir yüzey ve işlenebilirlik sağlar. Düşük karbonlu boru çeliklerinde %0,10'a varan niyobyum genel olarak kullanılabilir. Daha yüksek niyobyum içeriği ile östenit işleme, daha yüksek haddeleme sıcaklıklarında gerçekleştirilebilir. Niyobyumun rolü nedeniyle ek mukavemet artışları gözlenir. (Hulka ve diğerleri, 1990:17)

Sülfür (S), MnS haddeleme yönünde boyuna uzamış inklüzyonları oluşturur. Bu nedenle haddelenmiş malzeme içindeki inklüzyon yoğunluğu ne kadar fazla ise mekanik özelliklere yönelik olumsuzluk yaratır. Özellikle enine kesitte alınan darbe test numunelerinde kırılma için çentik oluşumu yaratırlar. Çökelme sertleşmesi ile bu tip çeliklerin mukavemetinin artırılması Nb, Ti, V gibi elementlerin mikro alaşım ile kullanılması ile gerçekleşmektedir. Bu alyajların varlığı ile sağlanan katı çözeltiler ve çökelme sertleşmesi ile çok yüksek mukavemet değerlerine çıkılabilse de tokluk üzerinde olumsuz etkileri olabilmektedir. Termomekanik haddeleme ile mikro alaşımların sertlik ve tokluk üzerindeki olumlu etkisi optimum seviyede sağlanabilmektedir. Alaşım elementlerinin çelik üzerindeki etkileri çizelge 4.2 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Alaşım elementlerinin etkileri

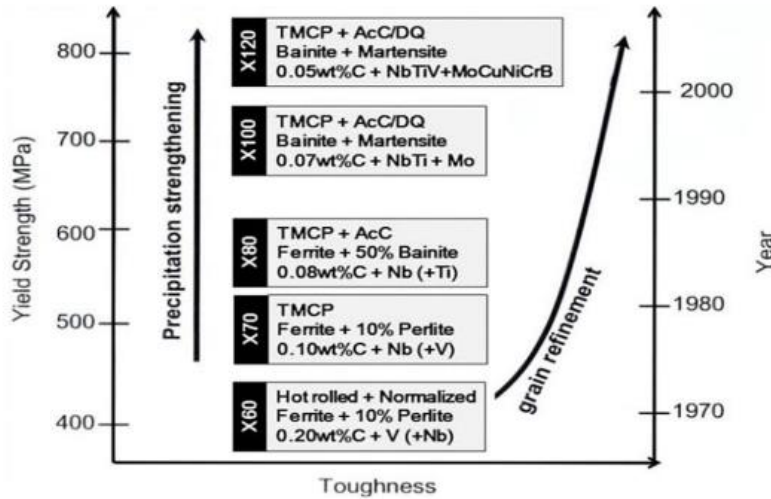
Kaynak: (Mishra, 2014:17)

ELEMENT	ETKİ
C	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Matrix sertleştirici. ✓ Ferrit, beynit ve martensit oluşumu büyük ölçüde %C'ye bağlıdır. ✓ Hidrojen kaynaklı çatlama [HIC] direncini iyileştirir. ✓ Alaşımdaki fazla C tokluğu, kaynak kabiliyetini ve sünekliği azaltır.
Si	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mukavemette iyileştirme (katı çözeltiler), Matrix güçlendirici. ✓ Hem temel çelik hem de HAZ tokluğu üzerinde zararlı etkisi vardır. Östenitte karbon göçü için itici gücü artırarak ferrit sünekliğini iyileştirir, karbür oluşumunu bastırır.

<u>Mn</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mukavemette iyileştirme (katı çözelti), Matrix güçlendirici. ✓ Soğutma sırasında ostenit dönüşümünü geciktirir ✓ Sertleşme kabiliyetini artırır ✓ Sünek gevrek geçiş sıcaklığını azaltır ✓ İnce taneli alt beynit mikroyapı elde edilmesini sağlar
<u>S</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Düşük sıcaklık tokluğunu azaltır ✓ Deformasyondan sonra uzamış MnS oluştur ve böylece HIC için başlangıç noktaları oluşturur.
<u>P</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Boru yapımı ve saha kaynaklanabilirliği üzerinde zararlı etkisi vardır. ✓ Döküm çelik levhada merkezde ayrışır ve tane sınırı kırılmasına neden olur.
<u>Al</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ HAZ bölgesindeki serbest nitrojeni düzeltir ✓ Sertliği ve şekillendirilebilirliği azaltır ✓ Deoksidasyon sırasında ince oksit dağıtıcıdır.
<u>Ti</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ostenit tanelerinin kabalaşmasını (TiN oluşumu) baskılar ✓ Güçlü ferrit güçlendiricidir. ✓ Serbest Ni'yi düzeltir (Ni'nin sertleşebilirlik üzerindeki zararlı etkisini önler)
<u>V</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperleme işlemi sırasında çökelti güçlendirmesine yol açar ✓ Karbon ve nitrojene karşı güçlü afinite ✓ Nb ile HAZ yumuşamasını azaltır ✓ VN baskın ferrit güçlendiricileri çökeltir.
<u>Cu</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Korozyon direncini (Cr ve Ni ile) ve HIC'yi iyileştirir ✓ Koruyucu bir tabaka oluşturarak hidrojen oluşumunu kısıtlar ✓ Östenitten ferrit dönüşüm sıcaklığını düşürür ✓ Yüksek bakır içeriği, sıcak haddeleme sırasında gevrekleşme çatlamaına neden olabilir ✓ Daha yüksek miktarda bakır, aşırı yağış sertleşmesine neden olur
<u>Ni</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alan kaynak kabiliyetini bozmadan düşük karbonlu çeliklerin özelliklerini iyileştirir ✓ Kırılma tokluğunu artırır ✓ Beynitik fraksiyonu artırır
<u>Cr</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mukavemeti ve su verme sertleştirilebilirliğini artırır ✓ Korozyon ve HIC direncini artırır ✓ Ferritte karbon aktivitesini düşürür, yüksek mukavemetli, düşük YS/UTS
<u>N</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ TiN, östenit tane büyümesini kısıtlar ve düşük sıcaklık tokluğunu iyileştirir
<u>B</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Nb ve Mo ile su verme sertleşebilirliğini iyileştirir, daha düşük beynit oluşumuna yardımcı olur
<u>Mo</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ostenit yeniden kristalleşmesini ve tane büyümesini bastırır ✓ Sertleşebilirliği ve mukavemeti artırır, böylece istenen alt beynit mikroyapı oluşumuna yardımcı olur
<u>Nb</u>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sıcak haddeleme prosesinde yeniden kristalleşme sıcaklığını azaltır ✓ Yeniden kristalleşmeyi geciktirir ve östenit tane büyümesini engeller (mukavemeti artırır) ✓ NbC VN'den daha etkili güçlendiriciler

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Düşük karbon seviyesinde ostenitte daha yüksek çözünürlük ✓ Rafine ferrit ve iğnemsî ferritin büyük hacimli fraksiyonunu teşvik eder
--	---

Alaşım elementleri ile yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilmekle birlikte darbe direncinin de mikro yapı ile uyumlu olarak optimum seviyede tutulması gerekmektedir. Titanyumun akma dayanımı ve sertliği üzerindeki etkisi, kuvvetle Ti / N oranına bağlıdır. Ti akma dayanımını artırmaktadır. Öte yandan mikro alyaj ilaveleri, oda sıcaklığı darbe enerjisini mikro yapı da bağlı olarak azaltabilmektedir. Bu çalışmada bu etki net bir şekilde görülebilecektir. Şu ana kadar yapılmış istatistiksel çalışmalar bu etkinin doğruluğunu göstermiştir. Şekil 4.2' de görüldüğü üzere 700 Mpa akma dayanımı için Nb, Ti Mo ve B katkısı çözültü sertleşmesi için gerekli olmaktadır. Titanyum alaşımında Nb gibi çökelme sertleşmesi sağlasa da Titanyumun çelik içerisinde oluşturduğu TiN titanyum nitürlerinin varlığı ve boyutu kırılma ve sert olmalarından dolayı darbe enerjisi- tokluk üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Geniş titanyum nitür varlığı ile birlikte matrix tane yapısında büyük ferrit taneleri yer alırsa bu etki daha fazla olmaktadır. Şekil 4.2' de istenen sertlik ve akma dayanımına göre kullanılması gerekebilecek çelik sertleştirme yöntemleri yıllar itibari ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Kalitelerin yıllara bağlı mukavemet gelişimleri

Kaynak: (Graf, 2001:19)










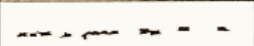
Mikro yapı içerisinde dağılmış ferrit, perlit fazları ve beynit gibi yapıların mekanik ve yüzey özellikleri ile işlenebilirlik üzerine önemli derecede etkisi bulunmaktadır. Sıcak haddeleme parametreleri sayesinde oluşan tanelerde uniform bir dağılım olmalı ve kesit boyunca heterojen şekilde büyümüş (coarse grain) tane yapıları olmamalıdır. Petrol boru

çeliklerine mikro alaşım uygulaması daha yüksek basınca dayanıklı boru hatlarının elde edilmesi amaçlıdır. Bu nedenle, boru hattı çeliği yüksek mukavemetli ve son derece düşük sıcaklıklarda yüksek tokluk özelliği göstermelidir. Bu özellikler genellikle, martenzit yapısı olarak iyi bilinen bir miktar beynit ve Martensit-Östenit bileşenine sahip ultra ince ferrit tane boyutlarına sahip API sınıfı mikro alaşımlı çelikte elde edilir. Kontrollü haddelemeyi uygulayabilmek ve böylece ürünün istenen nihai mekanik özelliklerini elde edebilmek için mikro yapısal evrim bilgisi esastır. Haddeleme sonrası oluşan mikro yapı genel olarak tane büyüklüğü ile beraber poligonal ferrit, asiküler ferrit, perlit, beynit ve martenzit gibi yapılar ile belirlenir. Çökeltilerin hacim fraksiyonu ve boyutu ve atomun tane sınırındaki dislokasyon yoğunluğu, malzemenin nihai mukavemetini iyileştirir. Katı çözültü güçlendirmesi, bileşim aralığına göre çok fazla değişmez ve çökeltilerin boyutu ve hacim oranı da mukavemet üzerinde makul bir etkiye sahiptir. Bu nedenle işlem sırasında kontrol edilmesi gereken en önemli faktör tane boyutudur. Nb, Mo, V gibi alaşım ilavesi, yeniden kristalleşmeyi geciktirmek için uygun ortamı oluşturarak iğnemsiz ferrit oluşumuna yardımcı olabilir ve ayrıca poligonal ferrit ve ferrit dönüşümlerinin oluşumunu bastırır. Mo ilaveleri, karbonla zenginleştirilmiş östenite yol açan ve MA oluşumunu destekleyen karbon difüzyonunu azaltır ve ayrıca bu ilaveler, sonunda tane incelmeye katkıda bulunan karbürlerin (NbC) çökmesini geciktirir. Daha yüksek çalışma derinliğinde, düşük sıcaklık tokluğu gereklidir ve bu tamamen martenzitin östenit bileşenine oranına bağlıdır, çünkü oranlarındaki artış çekme mukavemetini artırır. Beynit fraksiyonu artarsa, martenzitin östenit bileşenine oranı, düşük sıcaklık tokluğunun daha düşük değerine yol açar. Bu, düşük sıcaklık tokluğunu artırmaya ve sünek-kırılgan geçişte azalmaya yardımcı olan yüksek açılı tane sınırlarını artırarak daha da iyileştirilebilir. (Rosado, Waele, Vanderschueren, Hertelé, 2013:21)

4.5.3. İnküzyon morfolojisi, çelik temizliği, slab yüzey ve iç yapı özellikleri

Petrol boru çeliklerinin ana özelliklerinden birisi temiz bir çelik üretim prosesi ile elde edilmiş olmasıdır. Temiz çelik, yabancı ve istenmeyen maddelerden arındırılmış bir çelik üretimi olarak adlandırılabilir. Burada ilk olarak oksijen, kükürt ve bunların bileşiklerinden arındırılmış çelik olması temiz bir çelik elde edilmesi için önemlidir. Oksijen ve kükürtün yanı sıra fosfor, hidrojen, azot, kurşun, kalay ve yerlerine göre bakır ve çinko da sayılabilir. Tamamen inküzyondan arındırılmış bir çelik elde etmek mümkün değildir. Bu nedenle temiz çelikten kasıt inküzyonların minimum seviyede ve haddeleme ve müşteri

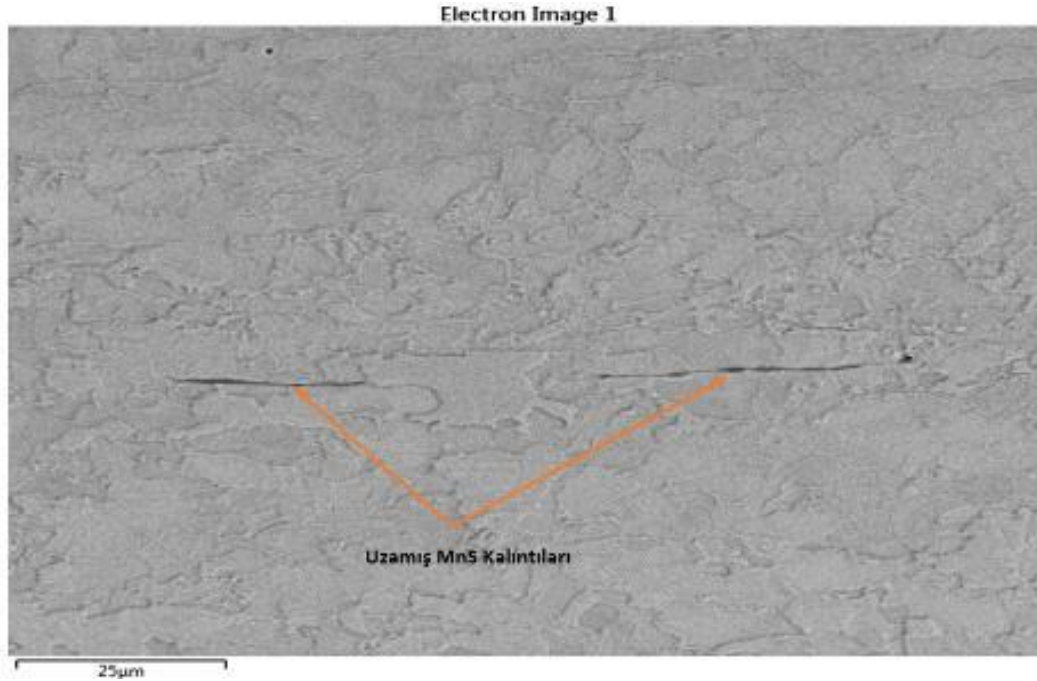
kullanımında problem yaratmayacak morfolojiye çevirmektir. İnküzyonların türü, boyutu, şekli ve dağılımı çeliğin iç yapısını ve genel olarak çeliğin kalitesini doğrudan etkiler. İnküzyonların giderilemediği durumlarda nihai ürün içindeki davranışı önemlidir. Resim 4.8 de farklı tipte inküzyonların sonraki ekstrüzyon prosesi sonrası aldığı şekil ve özellikleri gösterilmektedir.

KALINTILARIN SICAK HADDELEME DAVRANIMLARI				
	YOĞRUKLUK ÖZELİĞİ	SICAK HADDELEME ÖNCESİ	SICAK HADDELEME SONRASI	KALINTI ÖRNEKLERİ
1	YOĞRUK VE YUMUŞAK KALINTI			— CAMSI SİLİKATLAR — MnS KALINTILAR
2	AZ YOĞRUK YUMUŞAK ANAŞAĞI İÇEREN SERT PARÇACIKLAR			— KARMASIK SÜLFÜR-OKSİT KALINTILAR — KİSMİ KRİSTALLEŞMİŞ SİLİKATLAR
3	ESNEMEZ VE SERT KALINTI			— YÜKSEK SiO ₂ İÇERİKLİ CAMSI SİLİKATLAR — NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ OKSİT SÜLFÜRLERİ
4	ESNEMEZ VE SERT KALINTI YIĞINI			— YÜKSEK Al ₂ O ₃ İÇERİKLİ KALSİYUM ALUMİNATLAR — KRİSTAL SİLİKATLAR
5	ESNEMEZ VE SERT KALINTI KÜMESİ			— Al ₂ O ₃ KÜMELERİ

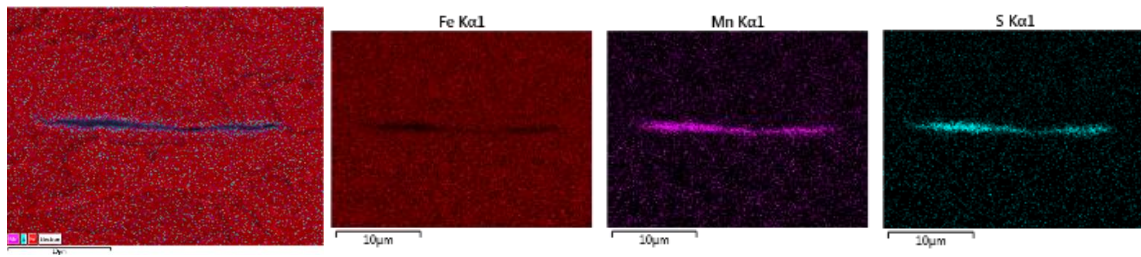
Resim 4.8 Kalıntıların sıcak haddeleme sonrası davranışları

Kaynak: (Tekin, 2012:21)

Metal dışı inküzyonlar oluşumları göz önüne alınarak 3 gruba ayrılabilirler. İlk olarak sıvı çelik ve çeliğin katılaşması sırasında oluşanlar, daha sonrası sıvı çeliğin etkileşimde olduğu pota, tandış, refrakter ürünlerinin aşınması ile oluşanlar ve son olarak sıvı çeliğin slab veya kütük haline getirilmesi sırasında çeliğin oksitlenmesi ile oluşabilecek inküzyonlardır. İlk grupta yer alan sıvı çelik üretimi sırasında oluşan inküzyonlar oksijen giderme, kükürt giderme, alaşımlama gibi tepkimeler sırasında oluştuğu için iç kökenli inküzyonlar olarak adlandırılırlar. Diğerleri ise dış kökenli kalıntılar olarak adlandırılırlar. Resim 4.9' da bir orta karbonlu pertektik çelikte perlit bantlaşmaları ile birlikte uzamış MnS kalıntıları görülebilmektedir. Bu kalıntılar müşteri kaynak ve form verme işlemlerinde ısı girdi ve deformasyonla birlikte çatlak, kırılma şeklinde olumsuzlukla sonuçlanabilmektedir. Yine resim 4.9' da MnS inküzyonlarının elektron mikroskopundaki EDS analizi ile noktasal ve harita olarak element dağılımı görülebilmektedir. Bu görüntü Jeol6150 marka elektron mikroskobu tarafından petrol boru çeliği X65 kalitesinde tespit edilmiş MnS kalıntısını göstermektedir. Resim 4.9 da SEM görüntüsünde matris içerisinde koyu renkli MnS kalıntıları görülebilmektedir.

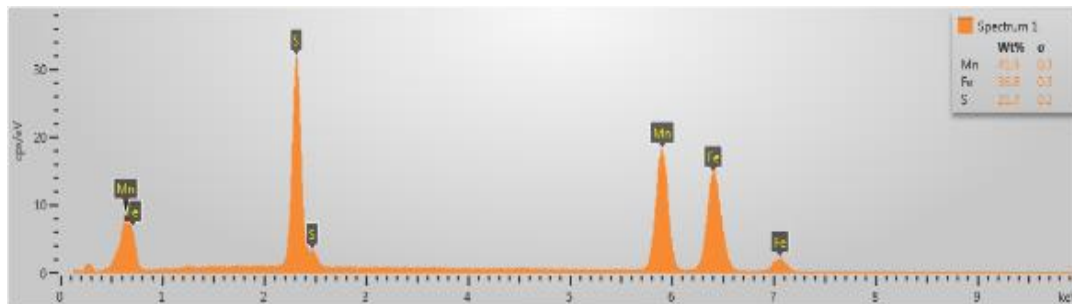


Resim 4.9 MnS inklüzyonu SEM backscatter görüntüsü



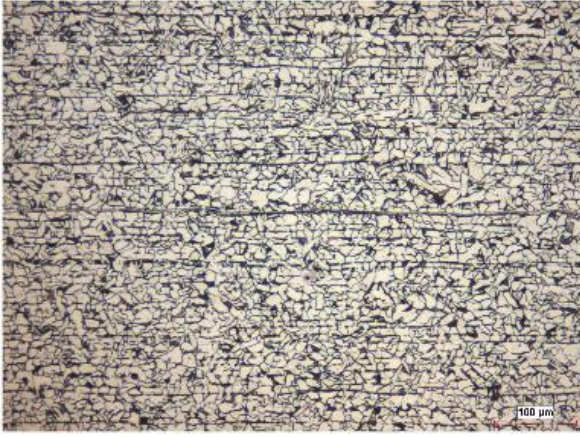
Resim 4.10 MnS inklüzyonu SEM harita analiz görüntüleri

Resim 4.10 da ise tespit edilen MnS kalıntısına ait EDS analizi ile harita görünümü yer almaktadır. Resim 4.10 da kırmızı renkle matris demir içerikli olup ortada mor ve turkuaz renklerinde Mn ve S elementlerinin beraber görüldüğü ve ayrı olarak da SEM EDS analizi ile görülen resimlerindeki elementler yer almaktadır.

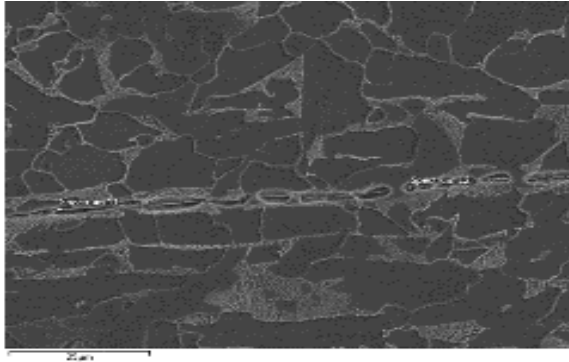


Şekil 4.3 MnS kalıntısı SEM grafik görüntüsü (noktasal analiz)

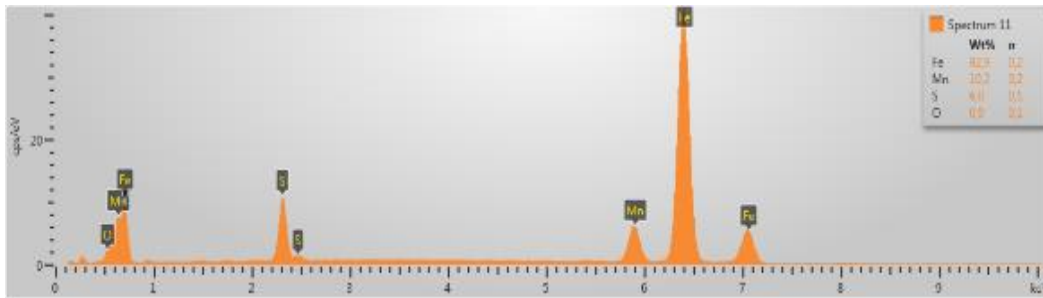
Aynı kusur üzerinde yapılan yine EDS analizi ile var olan elementlerin yüzdelik gösterimleri noktasal analiz ile tayin edilerek şekil 4.3'deki grafik elde edilmiştir. Diğer bir oluşumda ise MnS inklüzyonları optik mikroskop ve SEM (elektron mikroskobundaki) oluşumu gösterilmektedir. Optik mikroskop görüntülerinde MnS inklüzyonları açık gri şeklinde kendini matristen ayırmaktadır.



Resim 4.11 MnS kalıntısı optik mikroskop görüntüsü



Resim 4.12 MnS kalıntısı sem backscatter görüntüsü



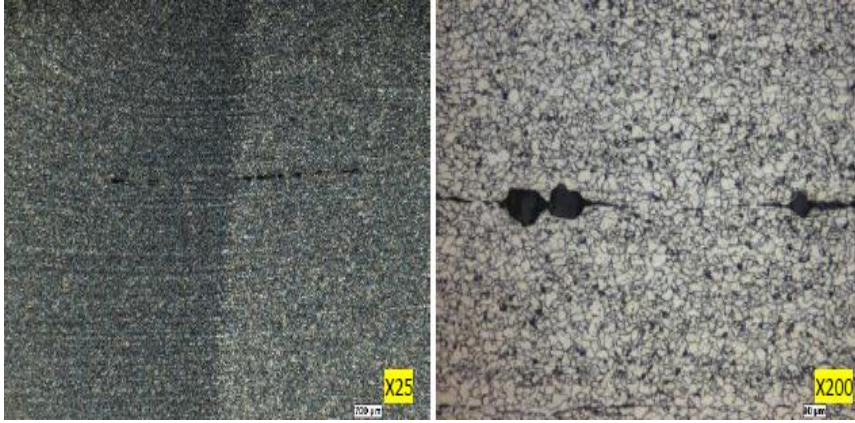
Şekil 4.4 MnS kalıntısı SEM noktasal analiz grafiği

Yukarıdaki görüntülerde (resim 4.11, 4.12 ve şekil 4.4) mikro yapı incelemesi X100

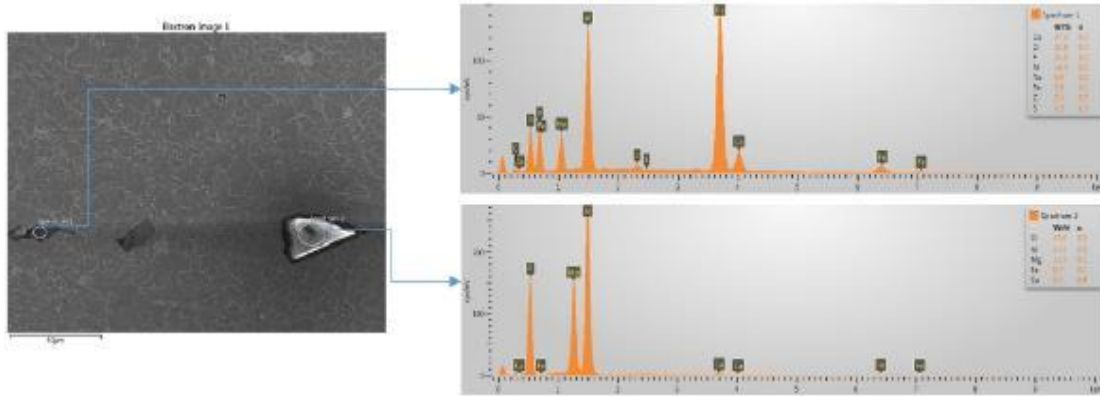
büyütmede görüntülenmiştir. Aynı zamanda elektron mikroskobunda uzamış inklüzyonun MnS olarak tespit edildiği görülmektedir. Diğer bir düşük karbonlu petrol çeliği mamul yüzeyinde kaynak sırasında ise çatlak (resim 4.13) ile karşılaşılmıştır. Çatlaklar incelendiğinde resim 4.13’ de görülüşü şekilde 200-300 mikron boyutlarında döküm tozu kalıntıları tespit edilmiştir.



Resim 4.13 Mamul üzerinde çatlak



Resim 4.14 Çatlak mikro yapısı- optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.5 Çatlakta tespit edilen kalıntılar SEM-EDS analizi grafiği

Şekil 4.5 de görülen malzeme üzerindeki çatlak kusuruna yönelik hasar analizi amacıyla

öncelikli olarak Nikon Epiphot marka 1000 büyütmeli optik mikroskop ile bakılmıştır. Optik mikroskopta çatlak etrafında 200-300 mikron boyutlarında olduğu görülen kalıntıların var olduğu tespit edilmiştir. Sonrasında ise şekil 4.5 de görüldüğü gibi tespit edilen kalıntılara noktasal analiz yapılmış olup SEM EDS raporunda döküm tozu içerikli bir kalıntı varlığı olduğu anlaşılmıştır. Çelik üretiminde nihai kullanımda problem yaratmayacak özelliklerin sağlanması için öncelikli maddelerden biriside çelik bir temiz üretmektir. Yukarıda bahsedilen kusurların tamamı sonraki üretim hatlarında karşılaşılan olumsuzluklara ait incelemeler ile elde edilen kök nedenlerdir. Bu nedenle petrol boru çeliği üretimlerde karşılaşılan bu kusurların engellenmesi için inklüzyon modifikasyonu ve düşük seviyede bir inklüzyon varlığı hedeflenmelidir.

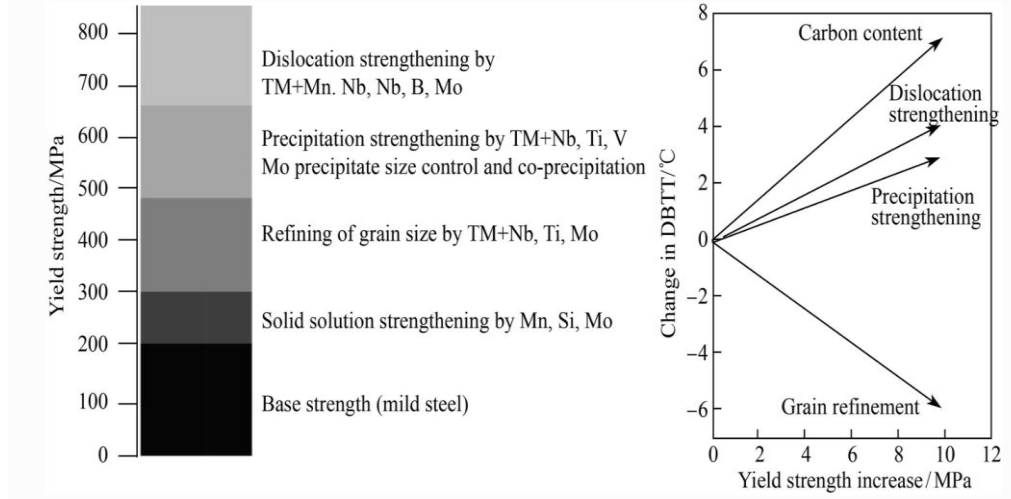
4.5.4. Konvansiyonel ve termomekanik haddeleme

Termomekanik haddeleme, tane incelmesini en üst düzeye çıkarmak ve böylece hem daha yüksek mukavemet hem de tokluk elde etmek için kullanılır. Boru hattı endüstrisinin güvenlik gereksinimlerini karşılamak için yüksek mukavemetli geniş çaplı hat boruları için levha veya şerit üretmenin standart yoludur. (Hulka ve diğerleri 1990:26)

Sıcak haddeleme yöntemlerinden birisi olan ve sıcaklık kontrolü yapılarak gerçekleştirilen termomekanik haddeleme prosesi hızlandırılmış soğutma ile gerçekleştirilen bir mikro yapı kontrollü haddelemedir. Bu yöntem ile sıcaklık kontrolü altında malzeme basma ve çekme kuvvetleri altında ezilerek mikro yapının homojen şekilde uniform dağılımı sağlanır. Bu da malzemenin tokluk ve sertlik özelliklerinde ciddi bir iyileşme sağlar. (Xu, Mistta, Guo, Jia ve Zheng, 2013:26)

Çalışmada bahsettiğimiz üzere petrol boru çeliklerine istenen özelliklerin verilebilmesi için çökelme sertleşmesi, katı eriyik sertleşmesi yaratabilmek adına mikro alaşımlama, tane yapısının iyileştirilmesi için termomekanik haddeleme gibi yöntemler kullanılmaktadır. Termomekanik haddeleme yöntemi kalite tasarımında yüksek miktarda mikro alaşım elementi kullanım ihtiyaçlarını ortadan kaldırarak istenen mikro yapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesinde başrol oynamaktadır. Şekil 4.6 da ise 400 MPa akma mukavemetine sahip bir çelik katı eriyik sertleştirilmesi ile elde edilebilir iken 800 MPa seviyelerine çıkıldıkça mikro alaşımlar ile sertleştirme, termomekanik haddeleme ve ikincil faz oluşumları ihtiyacı olduğu grafik üzerinde gösterilmektedir. (Boru hattı çeliklerinin

geliştirilmesi, tmcp: termomekanik kontrollü haddeleme; acc: hızlandırılmış soğutma; dq: doğrudan hızlı soğutma)



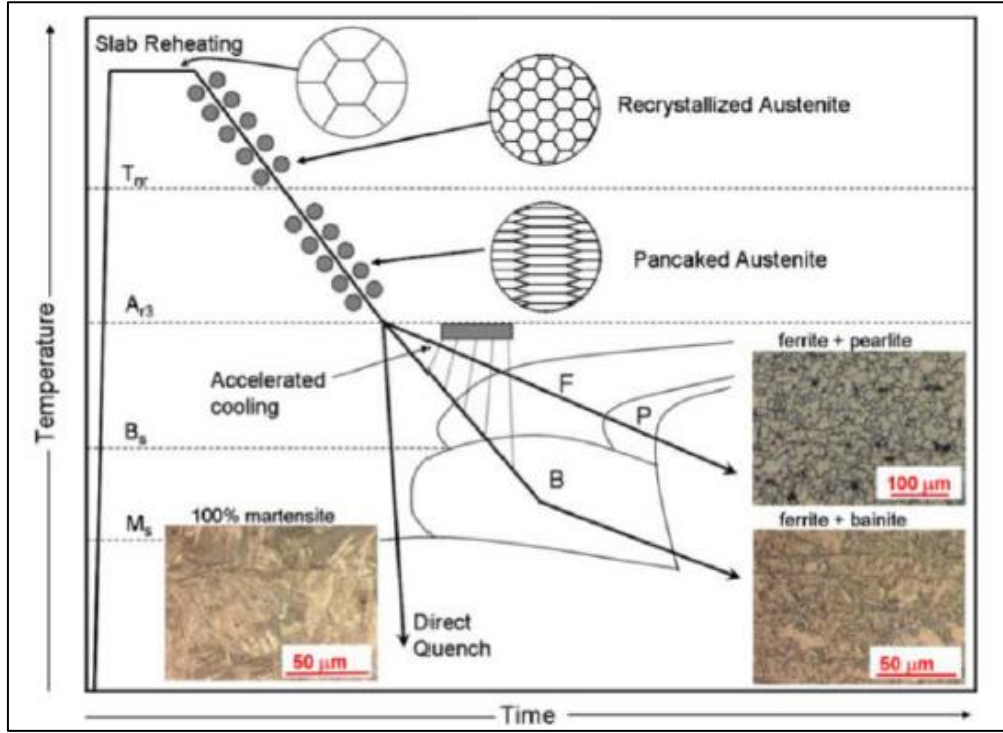
Şekil 4.6 Farklı mukavemet ihtiyaçları için sertleştirme mekanizmaları

Kaynak: (Uranga, Ipabe, 2020:26)

Yeni nesil çeliklerden beklenen yüksek mukavemet, yüksek tokluk gibi mükemmel mekanik özelliklerin elde edilmesi amacıyla çökelti sertleşmesi, mikro yapı optimizasyonu gibi çelik üretim yöntemleri seçilmektedir. Aynı zamanda hem mikro alaşım kullanılması hem de haddeleme prosesinden gelecek mukavemet artışı ile daha düşük karbon oranlarında çelik üretimi mümkün olabilmektedir. Bu sayede daha düşük segregasyon, daha iyi kaynaklanabilirlik gibi müşteri beklentileri olumlu karşılanabilir. Termomekanik haddeleme işleminde amaç yeniden kristalleşme evresinin kontrol edilerek mümkün olan en ufak tane boyutunun elde edilebilmesi ve bu sayede tane boyutu küçülmesi ve uniform bir dağılım ile yüksek mukavemet ve tokluk elde etmek amaçlanır.

Termomekanik haddelemede son paso haddeleme işlemleri ise T_{nr} sıcaklığının altında gerçekleştirilir. Bu sıcaklık aralığı genellikle T_{nr} altı ve Ar_3 sıcaklığı üstüdür. T_{nr} altında yapılan deformasyonlarda, yeniden kristalleşme olmadığından, östenit taneleri ezilerek deforme olurlar. Böylece tanelerin en-boy oranları artar ve daha ince uzun bir morfolojiye dönüşürler (pankek yapısı). Tabi burda bahsedilen bu sıcaklık aralığına ulaşmak için şerit hadde girişinde beklemek gerekmektedir. İstenen sıcaklığa ulaşana kadar bekletmeli haddeleme termomekanik haddeleme sürecinin ilk maddelerindedir. Resim 4.15' de termomekanik haddeleme sırasında östenit tane gelişimi olarak gösterilmiştir. Poligonal ferrit (çok az perlit), beynit veya bunların kombinasyonu ile elde edilen bir yapı

oluşmaktadır. (Sağ tarafta bulunan 2 mikro yapı görüntüsü)



Resim 4.15 Soğuma sırasında elde edilecek mikro yapı özellikleri

Kaynak: (Vervynckt, Verbeken, Lopez, Jonas 2012:27)

Östenitleme ve haddeleme süresince tane boyutu kontrolü için termomekanik haddelemede Nb ve Ti alaşımları büyük önem taşımaktadır. Yine termomekanik haddeleme süreci için en gerekli sıcaklık olan T_{nr} kimyasal bileşime göre hesaplanmıştır. T_{nr} sıcaklığı, redüksiyon oranından ve büyük ölçüde mikro alaşımların eklenmesinden etkilenebilir. Mikro alaşım elementlerinde T_{nr} üzerinde en yüksek artırıcı etkiye sahip olan Nb yer almaktadır.

T_{nr} sıcaklığı altında haddeleme sırasında yeniden kristalleşme gerçekleşmeden deformasyon meydana gelmektedir. T_{nr} altında yapılan deformasyonlarda ostenit taneleri yeniden kristalleşme olasılığı olmadığından redüksiyondan sonra deforme olur ve tanelerin eni küçülürken boyları uzar ve daha ince uzun bir morfolojiye dönüşür. Bu morfolojideki tanelere pancake yapısı dendiğini belirtmiştik. Soğutma devam ederken, A_{r3} sıcaklığı altında ostenit taneleri içinde pankek şeklinde ferrit taneleri oluşur. Bu tür morfolojiden gelen ferrit tane çekirdekleri, koaksiyel tanelerden çok daha fazla tane sınırı içerdiğinden klasik yeniden kristalleşmeye göre çok daha küçüktür. Ayrıca küçük boyutlu pankek östenit tanelerinde ikizlenme bantlarında yeni ferrit taneleri oluşmuştur. Özetle yeniden kristalleşme

sırasında oluşan tanelerin çok ufak boyutta çekirdeklenmesini sağlamak ve oluşan ufak tanelerin büyümesini engellemek termomekanik haddelemenin ana amaçlarındadır.

Sabit bir kalite ve çelik kimyasalı için Tnr sıcaklığı altında redüksiyon oranının artırılması ile ağır bir pancake taneleri oluşumu ile östenit tane boyutu azalmaktadır. Tnr'nin altındaki toplam ezme oranı 3'ün üzerinde tutulmalıdır. (İlk/son kalınlık oranı). Tnr'nin altında gerekli ezmeyi sağlamak için hadde kısıtlamaları da dikkate alınarak termomekanik haddeleme yöntemi için kaba ve şerit hadde işlemlerini içeren haddeleme programı hesaplanmalıdır. Sıcaklık ayarlaması için kaba hadde ve finiş hadde arasında transfer bar kalınlığı da göz önüne alınarak bekletme işlemi yapılmaktadır. Hadde yüklerinde aşırı yükü önlemek için ön stantlarda ezme oranı düşük tutularak transfer bar kalınlığı yüksek bırakılır. Üretim sırasında, ezme miktarları, ana motorların aşırı yüklenmesine neden olmayacak şekilde, haddeleme hızı veya haddeleme kuvvetleri değiştirilerek kısmen ayarlanabilir. Ana motorların aşırı yüklenmesini önlemek için ilk pasolarda haddeleme kuvvetlerindeki azalmanın transfer çubuğu kalınlığındaki artışla telafi edildiğini belirtmekte fayda var.

Bekletmeli haddelemede kaba hadde ve şerit hadde arasında sıcaklık kontrollü bekletme olmasından dolayı silisyum gibi oksitlenme hızı fazla olan elementler bobin yüzeyinde tufal ve kızıl oksit olarak kusur oluşumuna neden olabilmektedir. Bu nedenle çelik tasarımının da bu kusur oluşumu göz önüne alınarak optimum silisyum seviyesi belirlenmesi gerekir. Aynı zamanda bekletme sonrası tufal sökücü kapasitesi de maksimum seviyede kullanılması gerekir. Termomekanik haddeleme işleminde amaca ulaşmak için değerlendirilmesi gereken çok fazla sayıda parametre var: Bunlar;

- Deformasyon (ezme) miktarı, Deformasyonun gerçekleştirildiği sıcaklık
- Yeniden kristalleşme Sıcaklığı, Tnr
- Mikro-alaşım elementlerinin Tnr sıcaklığı üzerindeki etkisi, Alaşım elementlerinin faz dönüşümleri üzerindeki etkisi
- Haddeleme sırasında ürünün soğutulduğu ve bekletildiği sıcaklık ve süre

Sonuç olarak ise tokluğu, şekillendirilebilirliği ve kaynaklanabilirliği iyileştirilmiş çok düşük oranda perlit içeren poligonal ferrit, beynit ve bunların karışımından bir mikro yapı elde edilebilmektedir.

4.6. Petrol Boru Çeliklerinde İstenilen Mekanik Özellikler

Petrol boru çelikleri PSL1 ve PSL2 adı altında 2 kalite seviyesi ile adlandırılır. (Product Specification Levels) Borular, aşındırıcı ve aşındırıcı olmayan farklı ortam türlerinde kullanılır. Şiddetli aşındırıcı ortamda kullanılan borular, bu tür işlem koşullarına dayanabilecek malzeme gerektiriyorsa PSL2 kalite seviyesi tercih edilir. Boru yüksek basınç koşullarında kullanılırsa kaynak dikişi böyle bir yüke dayanabilir olmalıdır. Diğer yandan normal hizmetler için standart bir kalite seviyesi borusu bu amaca uygun olacaktır. Bu yüzden iki ürün seviyesi vardır. Kullanılan borunun durumuna ve ekonomik olmasına göre seçim yapabiliriz. Çizelge 4.3 de X30 kalitesinden başlayarak X70 kalitesine kadar standart kimyasal analiz limitleri tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Petrol boru çelikleri kimyasal analiz standardı

Kaynak: (standart: apı 51 46th edition-2018 / en iso 3183:2019:29)

Standart Karşılığı			Erdemir Kalite No	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti
Standart	Spesifikasyon Seviyesi	Kalite		max.	max	max.	max.	max.	max.	max.	max.
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L210 / A	9030	0.22	-	0.90	0.030	0.030	-	-	-
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L245 / B	9035	0.26	-	1.20	0.030	0.030	(3)(8)	(3)(8)	(3)
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L245N / BN	9036 ⁽¹²⁾	0.24	0.40	1.20	0.025	0.015	(8)	(8)	0.040
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L290 / X42	9042	0.26	-	1.30	0.030	0.030	(3)	(3)	(3)
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L290N / X42N	9043 ⁽¹²⁾	0.24	0.40	1.20	0.025	0.015	0.06	0.05	0.040
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L290M / X42M	9044 ⁽¹²⁾	0.22	0.45	1.30	0.025	0.015	0.05	0.05	0.040
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L320 / X46	9046	0.26	-	1.40	0.030	0.030	(3)	(3)	(3)
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L320N / X46N	9047 ⁽¹²⁾	0.24	0.40	1.40	0.025	0.015	0.07	0.05	0.040
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L320M / X46M	9048 ⁽¹²⁾	0.22	0.45	1.30	0.025	0.015	0.05	0.05	0.040
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L360 / X52	9052	0.26	-	1.40	0.030	0.030	(3)	(3)	(3)
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L360M / X52M	9053 ⁽¹²⁾	0.22	0.45	1.40	0.025	0.015	(3)	(3)	(3)
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L390 / X56	9056	0.26	-	1.40	0.030	0.030	(3)	(3)	(3)
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L390M / X56M	9057 ⁽¹²⁾	0.22	0.45	1.40	0.025	0.015	(3)	(3)	(3)
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L415 / X60	9060	0.26 ⁽⁷⁾	-	1.40 ⁽⁷⁾	0.030	0.030	(4)	(4)	(4)
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L415M / X60M	9061 ⁽¹²⁾	0.12 ⁽⁷⁾	0.45 ⁽⁷⁾	1.60 ⁽⁷⁾	0.025	0.015	(4)	(4)	(4)
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L450 / X65	9065	0.26 ⁽⁷⁾	-	1.45 ⁽⁷⁾	0.030	0.030	(4)	(4)	(4)
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L450M / X65M	9066 ⁽¹²⁾	0.12 ⁽⁷⁾	0.45 ⁽⁷⁾	1.60 ⁽⁷⁾	0.025	0.015	(4)	(4)	(4)
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L485 / X70	9070	0.26 ⁽⁷⁾	-	1.65 ⁽⁷⁾	0.030	0.030	(4)	(4)	(4)

API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L485M / X70M	9071 ⁽¹²⁾	0.12 ⁽⁷⁾	0.45 ⁽⁷⁾	1.70 ⁽⁷⁾	0.025	0.015	(4)	(4)	(4)
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L555M / X80M	9080 ⁽¹²⁾⁽¹³⁾	0.12 ⁽⁷⁾	0.45 ⁽⁷⁾	1.85 ⁽⁷⁾	0.025	0.015	(4)	(4)	(4)

Petrol boru çeliklerinde kullanılacak kimyasal ve fiziksel özellikler boruların ortam şartlarına göre değişiklik gösterdiğinden müşteri talepleri farklılık gösterebilmektedir. Bunun dışında standart olarak üretilmesi gereken ve sağlaması gereken mekanik özellikler ayrıca aşağıdaki çizelge 4.4' de gösterilmiştir. Çizelge 4.4 de yine X30 kaliteden başlayarak X65, X70 gibi kalitelerde akma mukavemeti, çekme mukavemeti, uzama ve çentik darbe enerjisi gibi isterler gösterilmektedir.

Çizelge 4.4 Petrol boru çeliği kaliteleri mekanik özellik limitleri

Kaynak: (standart: apı 5l 46th edition-2018 / en iso 3183:2019:30)

<i>Standart Karşılığı</i>			Erdemir Kalite No	Re N/mm ² (kg/mm ²)		Rm N/mm ² (kg/mm ²)		Rt0,5/Rm	A50 (%)	Darbe	
Standart	Spesifikasyon Seviyesi	Kalite		min.	max.	min.	max.			max.	min.
			API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L210 / A	9030	210 (21.5)	-	335 (34.2)	-	-
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L245 / B	9035	245 (25.0)	-	415 (42.3)	-	-	30	-	-
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L245N / BN	9036	245 (25.0)	450 (45.9)	415 (42.3)	655 (66.7)	0,93	30	0	40
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L290 / X42	9042	290 (29.6)	-	415 (42.3)	-	-	30	-	-
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L290N / X42N	9043	290 (29.6)	495 (50.6)	415 (42.3)	655 (66.7)	0,93	30	0	40
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L290M / X42M	9044	290 (29.6)	495 (50.6)	415 (42.3)	655 (66.7)	0,93	30	0	40
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L320 / X46	9046	320 (32.6)	-	435 (44.4)	-	-	28	-	-
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L320N / X46N	9047	320 (32.6)	525 (53.6)	435 (44.4)	655 (66.7)	0,93	28	0	40
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L320M / X46M	9048	320 (32.6)	525 (53.6)	435 (44.4)	655 (66.7)	0,93	28	0	40
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L360 / X52	9052	360 (36.7)	-	460 (46.9)	-	-	27	-	-
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L360M / X52M	9053	360 (36.7)	530 (54.1)	460 (46.9)	760 (77.5)	0,93	27	0	40
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L390 / X56	9056	390 (39.8)	-	490 (50.0)	-	-	25	-	-
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L390M / X56M	9057	390 (39.8)	545 (55.6)	490 (50.0)	760 (77.5)	0,93	25	0	40
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L415 / X60	9060	415 (42.3)	-	520 (53.1)	-	-	24	-	-

API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L415M / X60M	9061	415	565	520	760	0,93	24	0	40
				(42.3)	(57.6)	(53.1)	(77.5)				
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L450 / X65	9065	450	-	535	-	-	24	-	-
				(45.9)	-	(54.6)	-				
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L450M / X65M	9066	450	600	535	760	0,93	24	0	54
				(45.9)	(61.2)	(54.6)	(77.5)				
API 5L / EN ISO 3183	PSL1	L485 / X70	9070	485	-	570	-	-	22	-	-
				(49.5)	-	(58.2)	-				
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L485M / X70M	9071	485	635	570	760	0,93	22	0	68
				(49.5)	(64.8)	(58.2)	(77.5)				
API 5L / EN ISO 3183	PSL2	L555M / X80M	9080	555	705	625	825	0,93	22	0	68
				(56.7)	(72.0)	(63.8)	(84.2)				

API 5L X65 boruya ISO 3183 L450 boru da denir, petrol ve gaz iletiminde kullanılan API 5L (ISO 3183) spesifikasyonlarında yüksek seviye dereceli bir borudur. Buna X65 boru veya L450 boru dememizin nedeni, 65000 ksi (inç kare başına kilo) 450 Mpa'da gereken minimum akma dayanımı olmasıdır. Bu kapsamda üretilen çeliklerin petrol borusu olarak kullanılması ve standart/müşteri şartlarını sağlamasını garanti altına almak adına üreticiler tarafından aşağıdaki testler uygulanır.

- Çekme Testi
- Çentik Darbe Testi
- DWTT

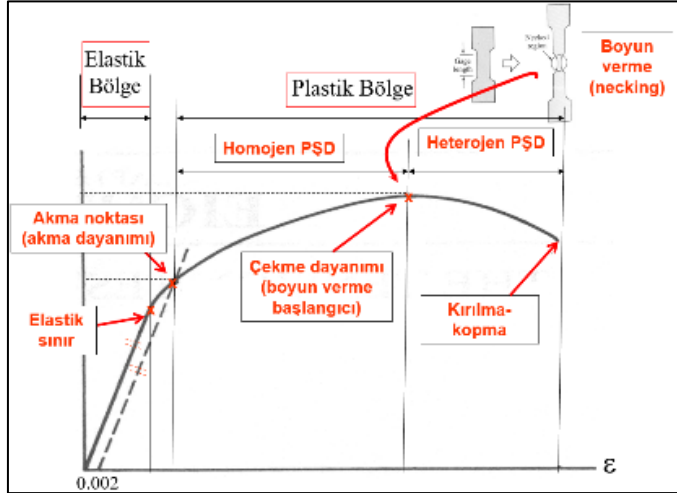
4.6.1. Çekme testi

Çekme Testi, bir gerilim testi şeklindedir ve bir numuneye tamamen kopana kadar kontrollü gerilimin uygulandığı bir mühendislik ve malzeme bilimi testidir. Bu test malzemelerin özelliklerini tayin etmede kullanılan ana tahribatlı testlerden biri olup sıklıkla kullanılmaktadır. Testi yapılan malzemenin ne kadar bir yük altında şekil değiştireceğini ve ne kadar yükten sonra kopacağını gösterir.

Çekme testi sırasında elde edilen akma mukavemeti malzemenin gerilme sırasında hangi değerde şekil değiştirmeye başladığını gösterir. Çekme mukavemeti de malzemenin kopma sırasındaki dayandığı en yüksek stres değerini tespit etmek amaçlı kullanılmaktadır. Çekme testi ile birlikte inceleme yapılmak istenen malzemeye ait bazı mekanik özellikler tespit edilebilir. Bunlar;

- Akma gerilmesi
- Çekme gerilmesi
- Kopma uzaması

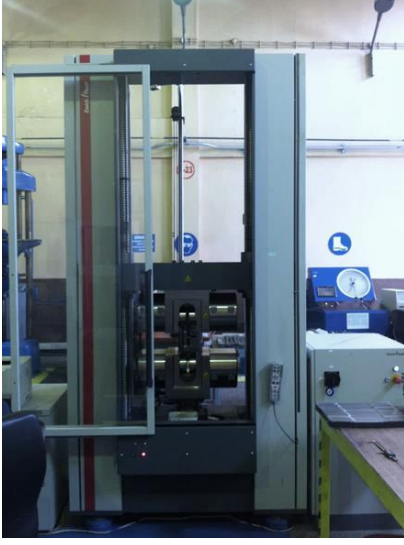
- Kesit daralması
- Tokluk; Bir metalin plastik olarak deforme olma ve kırılmadan önceki süreçteki enerjii emme kabiliyetine tokluk denir.
- Elastisite modülü; malzemenin dayanımının bir ölçüsüdür. Elastikiyet modülünün yüksek olması malzemenin de dayanıklı olduğunu işaretidir. Bu durumda şekil değişimine dirençli olduğunu göstermektedir.



Resim 4.16 Gerilme gerinim grafiği

Kaynak: (Tekin, 2012:32)

Resim 4.16 da bir çekme testi sırasında elde edilen malzemenin elastik ve plastik şekil değişimi sırasındaki davranışı örneklendirilmiştir. Malzeme akma noktasına kadar elastiklik özelliği gösterir iken bu noktada boyun vermeye başlayarak kopma noktasına kadar plastik şekil değişimine uğramaktadır. Petrol boru çeliklerinde müşteri isteğine bağlı olarak her üretilen bobinde veya dökümde 1 adet olacak şekilde çekme testi yapılarak akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değeri hesaplanmaktadır. Numune ebatları müşteri ile anlaşılmiş standarda uygun şekilde çıkartılmaktadır. Resim 4.17 de görülen 60 ton kapasiteli bilgisayar kontrollü Zwick marka çekme test cihazında tez çalışmasındaki çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri TS EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.17 Z600E -zwick-roell /almanya; 2011 çekme test cihazı

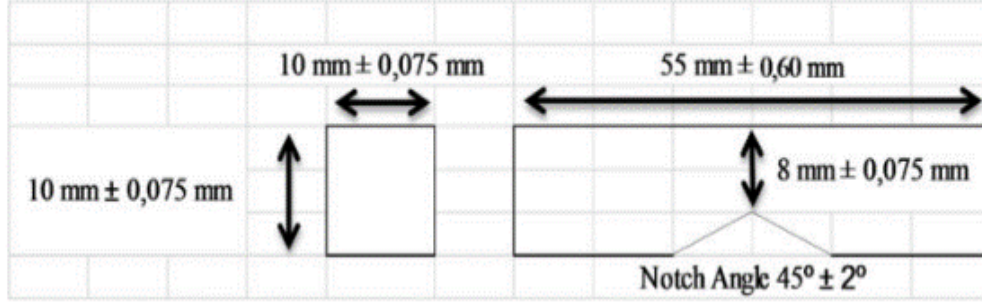
4.6.2. Çentik darbe testi

Tokluk ölçümü için kullanılan bir test yöntemidir. Parça kırıldığında malzemenin gevrek ya da sünek olduğu hakkında bilgi verir. Test sarkaçlı vurma cihazında yapılır. Belirli bir uzunlukta olan ve ucunda bir kütle bulunan sarkaç kolunun hareketi ile kırılan bir malzeme ölçümün genel prensibidir. Çekiç belirli bir yükseklikten bırakılarak test parçasının kırılması sağlanır. Çentik açılmış malzemenin kırılması sırasında kırılması için gerekli olan enerjinin hesaplanması prensibine dayanır. Çentik darbe testi müşterilerin talep ettiği numune sıcaklıklarında yapılmaktadır. Bu değer genellikle 0, -20 °C’lerde olmaktadır. Son zamanlarda müşteri istekleri -30°C, -40°C ve hatta -45 °C’lerde de gelebilmektedir. Resim 4.18 de kullanılan 450 joule kapasiteli Zwick marka çentik darbe test cihazı yer almaktadır.



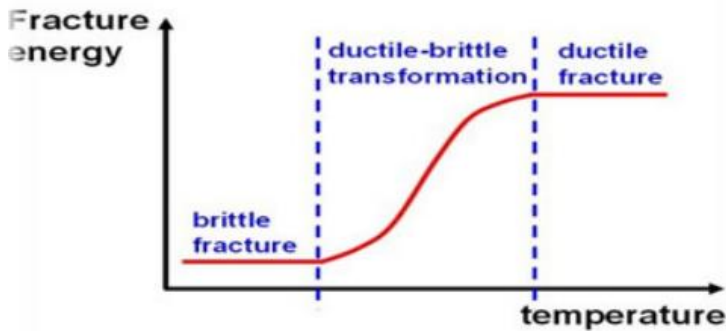
Resim 4.18 Çentik darbe test cihazı, zwick rkp 450

Çentik darbe testleri TS EN ISO 148-1 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Resim 4.19’ da standartta belirtilen darbe test numune ebatları yer almaktadır. Numuneler testere kesim sonrası taşlama tezgahında işlenerek hazırlanmaktadır. Taşlama esnasında bor yağı kullanılmakta ve numune ebatlarından dolayı malzemeye ısı girdisi olmamasına dikkat edilmektedir.



Resim 4.19 Darbe test numune ebatları

Bir metal malzemenin kırılmaya karşı direnci farklı sıcaklıklarda farklı özellik gösterebilir. Sıcaklığa bağlı olarak bir malzeme daha fazla enerji gerektirecek şekilde kırılabilir. Malzemelerin kırılma için gerekli enerji değeri sıcaklıkla doğru orantılı olup sıcaklık düştükçe düşer. Tokluk ölçümünün farklı sıcaklıklarda yapılması ile bu malzemenin sünek gevrek geçiş sıcaklığı belirlenebilir. Geçiş sıcaklığı ilgili malzemenin sünek kırılmadan gevrek kırılmaya doğru değiştiği sıcaklıktır. Genel olarak malzemelerde kırılma sonrası sünek alan miktarının 550 ve gevrek alan miktarının %50 gibi eş olduğu durumlarda belirlenmiş olur. Şekil 4.7 de sıcaklığa bağlı olarak bir malzemenin sünek – gevrek geçiş sıcaklığı örneklenmiştir. Belirli bir sıcaklıktan sonra malzeme %50 oranında gevrek özellik göstermeye başlamaktadır.

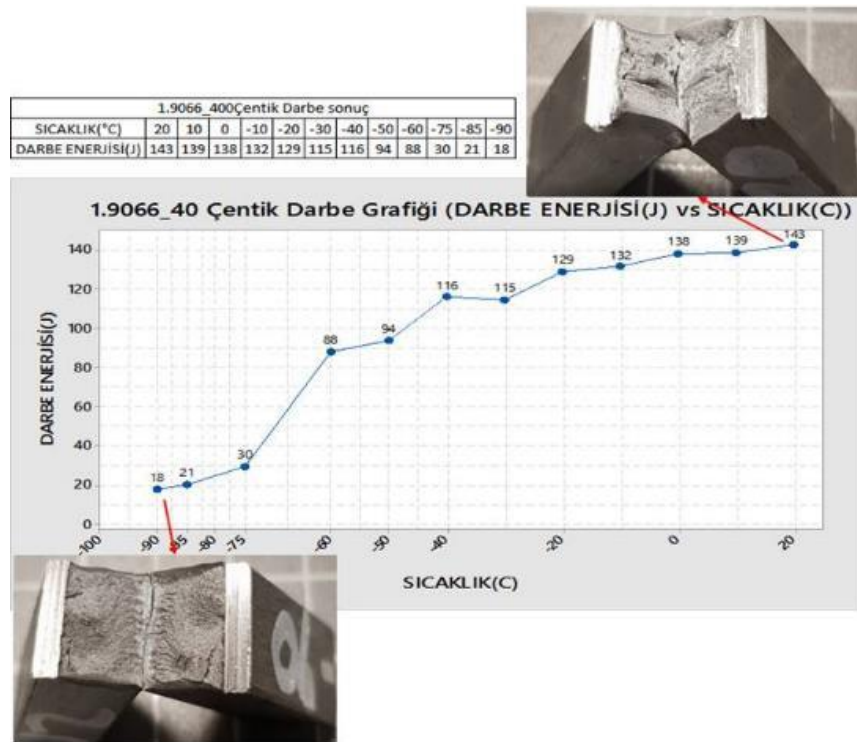


Şekil 4.7 Sünek gevrek geçiş sıcaklığı teorik gösterimi

Kaynak: (Sutar, 2014:35)

Mevcut üretim ortalamalarında -40 °C sıcaklıkta yapılan darbe testi ile 116 joule kırılma enerjisi elde edilir iken -50 °C de şartname limiti altında 64 joule değeri ölçülmüştür. Bu değerler ortalama enerjiler olup daha düşük değerlerin var olması nedeniyle müşteri istekleri %100 olarak karşılanamamaktadır.

Yapılan çalışmalar sonrası üretilen bobinler üzerinde yapılan incelemelerde sünek-gevrek geçiş sıcaklığı ve malzeme davranışı literatüre benzer şekilde simüle edilmiştir. Şekil 4.8’ de bulunduğu gibi -60 °C den sonra malzeme gevrek davranış sergilemeye başlamıştır. Bu inceleme X65 kalite petrol çeliği numunesi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8 de görüldüğü gibi -90 °C de numune yırtılmadan ziyade direk olarak kırılmış bir yüzey görüntüsü vermektedir.

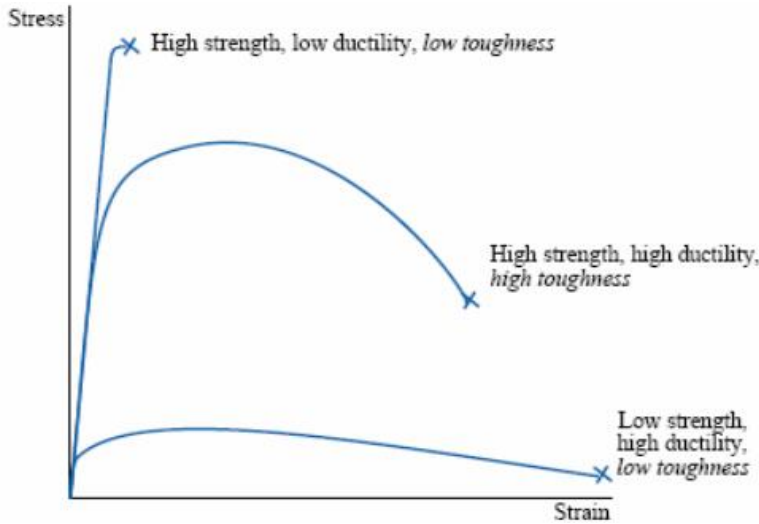


Şekil 4.8 X65 kalitede sünek-gevrek geçiş sıcaklığı

Grafikte de görüldüğü üzere tez konumuz olan X65 kalitesinde -60 , -75 °C sıcaklıkları arasında malzeme sünek özellikten gevrek özellik göstermeye başlamaktadır.

Tokluk hem mukavemet hem de sünekliğin birleşimidir, yüksek mukavemetli ve yüksek sünekliğe sahip bir malzeme, şekil 4.9’da görüldüğü gibi, düşük mukavemetli ve yüksek

süneklığe sahip bir malzemededen daha yüksek tokluğa sahip olacaktır. Tane boyutunun küçültülmesi termo mekanik işlem, ısıl işlem gibi mukavemeti ve tokluğu aynı anda artıracak mekanizmaların olduğu durumlar dışında mukavemet arttıkça tokluk düşer. Bu çalışmanın da amacı mukavemeti ve tokluğu optimum seviyede yakalayarak her iki özelliğinde petrol boru çeliğinde istenen en yüksek hedefte ve düşük maliyetle gerçekleşmesidir.



Şekil 4.9 Gerilme- gerinim eğrisi altında tokluk

Kaynak: (Aran, 2007:37)

Şekil 4.9 da gerilim ve gerinim eğrisi dikkate alınarak genel olarak malzemelerin gösterdiği mekanik davranışlar gösterilmiştir. Yüksek sertlik gösteren bir malzeme aynı zamanda düşük süneklik ve düşük tokluk göstermekte iken daha az sert (yumuşak) bir malzemedede süneklik ve tokluk daha yüksek olmaktadır. Buna karşın çok yumuşak malzemelerde süneklik yüksek iken tokluk da düşük kalmaktadır.

4.6.3. DWTT (Ağırlık düşürmeli yırtma testi)

Ağırlık düşürmeli yırtılma testi, malzemenin kırılma eğilimini görmek, önlemek ve boru hatlarında çatlak oluşma ihtimalini tespit etmeyi amaçlayan bir malzeme karakterizasyon testidir. Çentik açılmış bir numune üzerine yüksekte dikey yönde ağırlık düşürülerek kırılmış yüzeyde sünek alan hesabına dayanır. DWTT çentik darbe testinde olduğu gibi düşük sıcaklıklarda müşterinin istediği şekilde yapılmaktadır. Bu sıcaklıklar müşteriler tarafından boruların kullanılacağı ortam şartlarına göre belirlenmektedir. Resim 4.20 da ise 55000 joule kapasiteli DWTT cihazı görüntüsü yer almaktadır. Cihaz üzerinde bulunan

yükler belirli bir yükseklikten bırakılarak aşağıda bulunan numunelerin kırılması sağlanmaktadır. Kırılan yüzeyler üzerinde gerçekleştirilen inceleme ile sünek alan hesabı yapılarak mamule uygunluk verilmektedir.



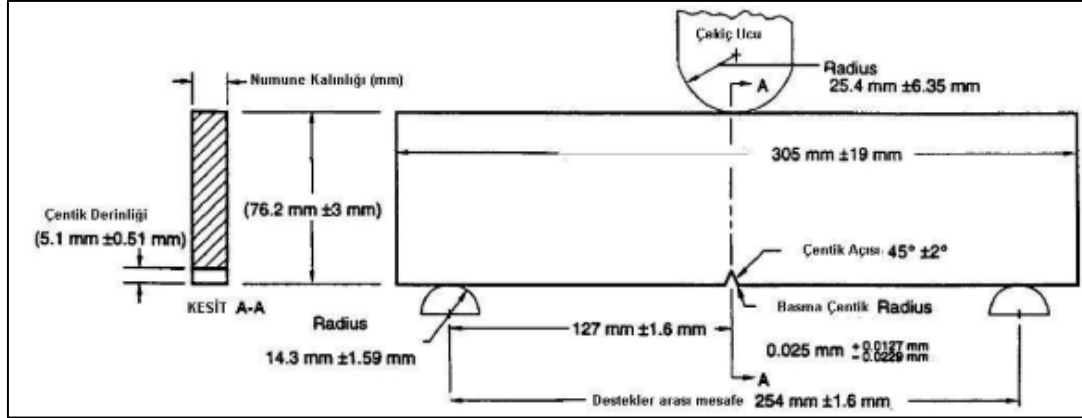
Resim 4.20 Pragma DWTT Cihazı, 55000J

Resim 4.20' den de görüldüğü üzere belirli bir ağırlığın yine öngörülen yükseklikten bırakılması ile aşağıda bulunan numunelerin kırılması-yırılması amacıyla test yapılmaktadır. Resim 4.21' de bırakılan yük ağırlığı görülebilmektedir. Sarı plakalar istenen ağırlık yakalanana kadar eklenip çıkartılabilmektedir. Her bir sarı plaka 100 kg ağırlığında olup yüklerin toplam çıkabildiği yükseklik ise 3,77 metredir.



Resim 4.21 DWTT cihazı numune kırılma alanı

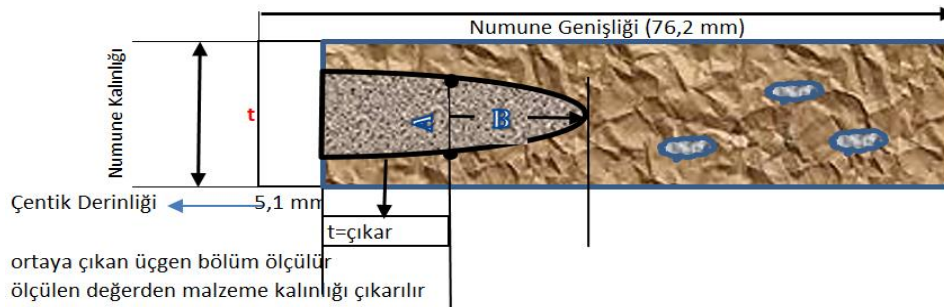
DWTT numunesi ilgili uluslararası standartlarda tanımlandığı (API RP 5L3) şekilde hazırlanmaktadır. Plakaların ¼ lük kısmından kesilen parçalar frezede dikdörtgen şeklinde işlenerek boyu 305 mm ve genişliği 76,2 mm olacak şekilde hazırlanır. Şematik gösterim resim 4.22 'de gösterilmiştir.



Resim 4.22 DWTT numunesi hazırlık şablonu

Kaynak: (API RP 5L3, 1996:39)

DWT testleri petrol boru çeliği için kullanılan API RP 5L3 uluslararası standartlara bağlı olarak yapılmıştır. Gerçekleştirilen testler sonrası ortaya çıkan yırtılma yüzeyi API RP 5L3 standardına göre resim 4.23'deki gibi hesap edilmektedir. Kırılma sonrası oluşan üçgen alan ne kadar kısa ve dar ise malzeme oldukça sünek olmakta iken oluşan üçgen uzun ve geniş olması durumunda kırılan malzemenin gevrek özellikte olduğu anlaşılmaktadır. API RP 5L3 standardında da bu detaylı şekilde anlatılmıştır.



ortaya çıkan üçgen bölüm ölçülür
ölçülen değerden malzeme kalınlığı çıkarılır

Equation (B.2) below is for SI Units:

$$\%SA = \frac{(71 - 2T)_t - \frac{3}{4}AB}{(71 - 2T)_t} \times 100$$

where

A is the width of the cleavage fracture at the "one T" line beneath the notch in millimeters; and

B is the length of the cleavage fracture in between the "two T" lines in millimeters.

Resim 4.23 DWTT değerlendirme formülü ve hesaplaması

Kaynak: (API RP 5L3, 1996:39)

4.7. Mikro Yapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkileri

Çelik üretiminde mikro yapının elde edilecek çeliğin mekanik özelliklerine olan etkisi oldukça önemlidir. Zaten çelik üretiminde amaç uygun mikro yapıyı elde ederek malzemenin sertlik ve mukavemetini oluşturmak amaçlanmıştır. Çeliklerin kullanım alanına yönelik malzemenin istenen mikro yapı değişkenlik göstermektedir. Örnek olarak bir çift alaşımlı jant çeliğinde martensiz yapısı istenirken farklı bir yapı çeliğinde martenzit fazı istenmez perlit ve ferrit fazları yeterli olabilmektedir. Bu çalışmada da istenen mekanik özellikleri elde etmek adına mikro yapı boyutu, faz oranları, fazların birbiri ile olan sınırlarının uzulunluğ açısı gibi çok detay faktörler önemlidir.

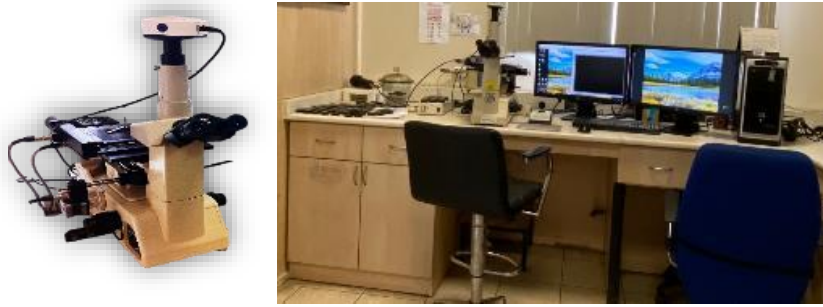
4.7.1. Mikro yapı incelemeleri

Metalografik inceleme ile bir malzemede mikro yapısal özellikler izlenebilir ve yapı vasıtası ile ilgili malzemeye ait özellikler hakkında yorum yapılarak kullanımı sağlanabilir. Kesme işlemi incelenecek numunenin kalıplanmak üzere ana parçadan ayrılması için uygulanan fiziksel işlemdir. Kalıplama kesme aşaması tamamlanmış numunenin, zımparalama-parlatma uygulanacak yüzeyi dışa bakacak şekilde soğuk veya sıcak metotla disk şeklinde kalıp içine alınması işlemidir. Zımparalama inceleme yüzeyindeki pürüzlerin çeşitli derecelerdeki zımpara kağıtları aracılığıyla sulu şartlarda kademeli şekilde düzlenerek parlatma aşamasına hazır hale getirilme işlemidir. Parlatma işlemi adından da anlaşılacağı üzere çok ince aşındırıcılar ile birlikte malzeme yüzeyinin tıraşlanması ve pürüzlük seviyesinin azaltılması ilkesi ile mikroskop altında ışığı iyi yansıtabilecek bir özellik kazandırılması amacı ile uygulanan bir işlemdir. Dağlama parlatılmış ve inceleme yapılacak yüzeye aşındırıcı çözeltiler uygulayarak metal malzemenin mikro yapısını mikroskop altında görülebilir hale getirmek için kullanılır.

4.7.2. Optik mikroskop

Optik Mikroskop objektif, oküler ve aydınlatma sistemi kullanan, malzemenin mikro yapı tespiti amacıyla kullanılan bir mikroskoptur. Optik mikroskoplar ile numune yüzeyinden ışın

geçirilerek inceleme yapılır. Bir ışık mikroskobu, bir ışık kaynağı ve lensler kullanılarak bir nesnenin büyütülmüş bir görüntüsünü oluşturmak için tasarlanmıştır. Işık, bir numunenin yüzeyindeki küçük bir alana odaklanır, kırılır, 2 büyüteçle birleştirilir ve daha sonra gözle veya ekranda izlenir. Optik mikroskopların teorik çözünürlüğü, ışığın ve ışığın dalga boyu ile sınırlıdır, fakat bu sınırı aşmak ve çok düşük nanometreye kadar bir çözünürlük elde etmek için farklı yöntem ve cihazlar geliştirilmiştir.



Resim 4.24 Optik mikroskop görüntüsü (nikon epiphot 200)

Resim 4.24' de bu çalışmadaki görüntülerin elde edildiği optik mikroskop cihazı görüntüsü yer almaktadır. Cihaz 25, 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerde görüntü alabilmekle birlikte üzerinde inklüzyon tarama programı olan CLEMEX CIR bulunmaktadır. Bu tez çalışmasındaki tüm mikro yapı görüntüleri, inklüzyon taramaları bu cihaz ile alınmıştır. Bu mikroskop;

- Malzemelerin faz türlerini
- Tufal Kalınlığı
- Kalıntı analizi
- Tane büyüklükleri
- Segregasyon
- Kenar kusur
- Dekarbürizasyon
- Yüzey kusurları
- Sert faz vb. durumların tespitinde kullanılır.

4.7.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) oldukça ufak bir noktaya odaklanmak için kullanılan yüksek elektron bombardımanı yapılarak yüzey taranması esasına dayanmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek oranda büyütülmüş görüntüler, kırınım desenleri veya

bir numunenin temel haritasını oluşturmak için elektronları kullanır. SEM' de elektron bombardımanı gerçekleştirilir ve elektronlar lensler tarafından odaklandırılır, bir yüzeye çarpar ve kırılan parçacıklar algılanır. Optik mikroskoptan farklı olarak ışık yerine elektronlar kullanılır, mercekler manyetik merceklerdir, numune hakkında algılanabilir veriler ölçülür, bilgiler daha kapsamlıdır ve dedektörler farklıdır.



Resim 4.25 Taramalı elektron mikroskobu (jeol 6150)

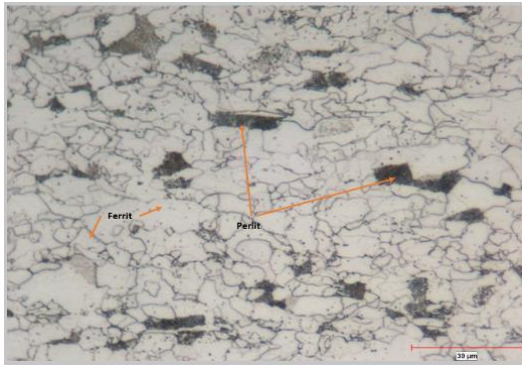
Malzemenin iç yapısında çizgisel, noktasal analiz yaparak belirlenen alanda element haritası çıkartılabilmektedir. AZtec ve Inca Future yazılımları ile inklüzyon tarama ve haritalandırma işlemleri de yapılabilmektedir. Resim 4.25' de bu çalışmada kullanılan SEM cihazı görüntüsü yer almaktadır. Cihazda aynı zamanda elementel analiz yapabilen EDS sistemi bulunmaktadır. Cihaz 300.000 büyötmeye kadar çıkabilmektedir. 30 kV enerjide 3 nm çözünürlüğe, 1kV enerjide 15 nm çözünürlüğe sahiptir.

4.7.4. Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi EDS

Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), numunenin bileşimini saptamak için numune yüzeyinden yayılan X-ışınlarını kullanan bir temel analiz yöntemidir. Numunelerin atomik yörüngelerinin elektronları çıkar, bir yörüngeye ulaşır ve daha düşük enerji yörüngesine geri düştüğünde karakteristik X-ışınları yayar. Bunlar bir X-ışını dedektörü tarafından tespit edilir. Ortaya çıkan spektrum, yayılan X-ışınları her bir element için karakteristik olduğundan elemente özgüdür. Bu nedenle, her elemanın spektrumunda, numunenin bileşiminin tahmin edilmesini sağlayan farklı bir çizgi modeli vardır.

4.7.5. Mikro yapının çelik üzerindeki etkileri

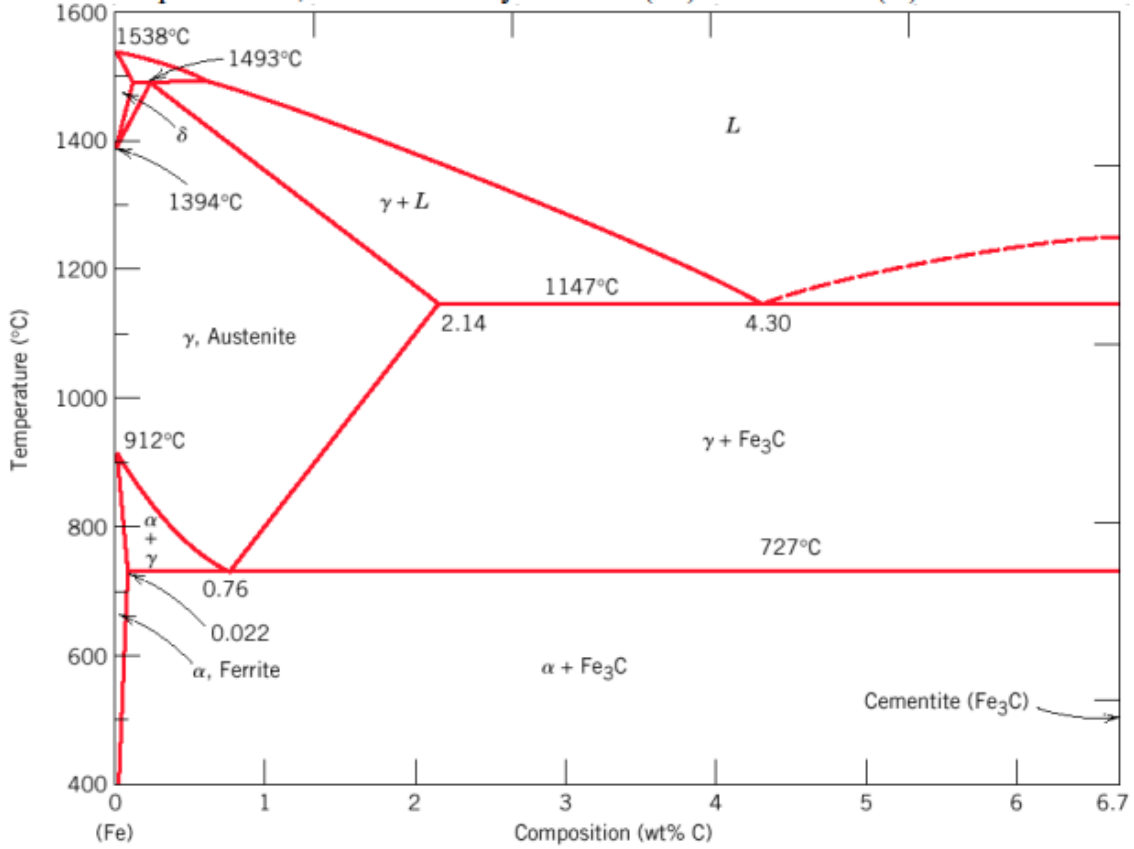
Petrol boru çelikleri (API) kaliteleri istenen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için düşük karbonlu ve mikro alaşım elementleri içerecek şekilde üretilmektedir. Bu durumda ise ortaya ferrit oranı yüksek, en düşük seviyede perlit içeriği olan ve beynit ile çok az miktarda martenzit yapıları ortaya çıkmaktadır. Resim 4.26' da bu çalışmalarda elde edilmiş perlit oranı istenildiğinden daha yüksek olarak ferrit içerikli bir yapı gösterilmiştir. Beyaz adacıklar ferrit fazını gösterir iken siyah yapılar perlit yapılarıdır. Aynı zamanda siyah noktacıklar olarak karbür ve tane içlerinde çekirdeklenmeler görülebilmektedir. 18 mm kalınlığına X65 kalitesinde haddelenmiş bu çelik yapısında mikro inceleme sonucundan da görüldüğü gibi orta ve yalın karbonlu çeliklere nazaran daha düşük boyutta bir ferrit tane boyutu elde edilmiştir.



Resim 4.26 API X70 mikro yapı örneği

4.7.6. Ferrit

Saf demirin oda sıcaklığında oluşan yapısıdır. İçerisinde az miktarda karbon çözümlenebilir. Yumuşak bir yapıya sahiptir. Saf demir metali aşağıdaki zaman ve sıcaklık grafiğinden de görüldüğü gibi katılaştığında hacim merkezli kübik yapıda olup delta demir olarak adlandırılır. Sıcaklık yaklaşık 1400 °C' ye eriştiğinde dönüşüme uğrayarak yüzey merkezli kübik yapıda gamma demire dönüşür. 910 °C de ise başka bir dönüşümle hacim merkezli kübik yapıda alfa demir adını alır. Hacim merkezli kübik yapıdaki alfa demir karbon atomlarını içerisinde barındıramaz ve oda sıcaklığında kısıtlı olarak %0,002 C içerebilir. Bu katı çözeltiliye ferrit (karbonsuz demir, özgür demir) adı verilmektedir.



Resim 4.27 Demir karbon denge diyagramı

Kaynak: (Ebu, 2018:44)

Ferrit fazının genel özellikleri şu şekildedir;

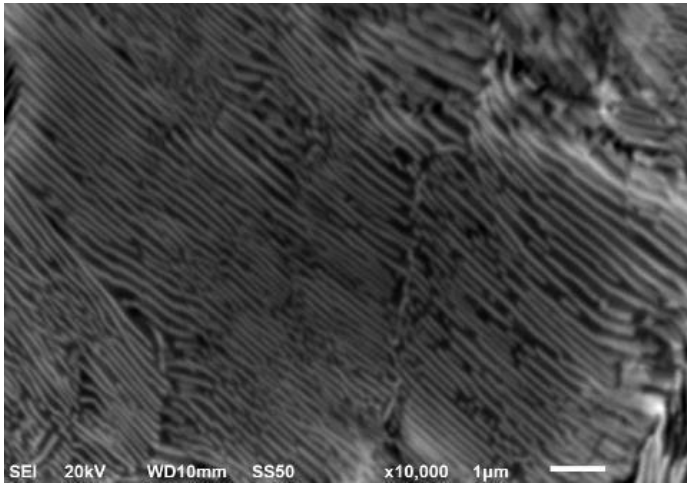
- Hacim merkezli kübik yapıdadır.
- Sertliği düşük bir fazdır.
- Sertliği düşük olmasından dolayı kolay şekil değiştirilebilir,
- Manyetik özellik gösterir.

4.7.7. Östenit

Östenit yüksek sıcaklıklarda elde edilen bir evredir. Gama demir olarak tabir edilir ve yüzey merkezli kübik yapısından ötürü atomlar arası boşlukları doldurabilecek büyüklükteki karbon atomlarını kolayca çözümlenebilir. %2 oranına kadar C, karbon çözümlenebilen gama demirin oluşturduğu çözelti östenit (γ) olarak ifade edilir. Östenit fazı γ -demiri olarak da adlandırılır. Tokluğu ve sertliği yüksektir. Resim 4.27 de 723 °C ile 1400 °C arasında kalan bölgede gösterilmektedir.

4.7.8. Perlit

Ferrit ve Sementit (Fe_3C) karışımından oluşan evre PERLİT olarak adlandırılır. Tabakalı bir yapıya sahip olan perlit; ferrit ve sementit tabakalarının birleşmesi ile oluşur. Demir sementit denge diyagramında östenit bölgesi ile alfa demir ve östenit ikili bölgesini birbirinden ayıran A3 çizgisi ve yine östenit bölgesini alfa demir-sementit ikili bölgesinden ayıran ve A_{cm} (östenit-sementit sınır sıcaklığı) simgesi ile gösterilen katı-katı çizgisi denge durumundaki östenitin sıcaklığa bağımlı olarak kimyasal bileşimini göstermektedir. Bu iki çizginin kesişme noktası %0,77 karbon bileşimine ve $727^{\circ}C$ sıcaklığa karşılık gelmektedir. Bu sıcaklığa ötektoid sıcaklığı da denir. Östenit bu bileşime ve ötektoid sıcaklığına eriştiğinde ötektoid dönüşüm başlamış olur ve perlit olarak bilinen alfa demir ve sementit karışımı oluşur. Resim 4.28' de %0,82C çelikte bir perlit evresinin görünümü elektron mikroskobu ile gösterilmiştir.



Resim 4.28 Perlit evresi

(Veri incelemesi sırasında tespit edilen X65 kalite mikro görüntüsüdür.)

4.7.9. Beynit

Beynit, martensit oluşumuna göre daha yavaş oluşmakta iken ferrit ve perlit oluşumuna göre ise yüksek soğuma hızlarında meydana gelmektedir. Beynit formu 2 farklı tipte olup alt ve üst beynit olarak ifade edilir. Demir alaşımlarında oluşan beynit evresi ferrit ve sementit içeren bir evre karışımıdır. Beynit dönüşümü perlit dönüşüm bölgesi ile martensit dönüşüm bölgesinin arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir. Beynit, martensit oluşumuna göre daha yavaş, ferrit ve perlit oluşumuna göre daha hızlı soğuma hızlarında oluşur.

4.7.10. Martenzit

Martensit, östenitten oldukça yüksek soğuma hızları ile birlikte oluşmaktadır. Oldukça sert bir bileşendir. Martensit oluşumu bir çelik için belirli bir sıcaklık aralığında kesin olarak oluşabilmektedir. Bu sıcaklık aralığı martenzit başlangıç sıcaklığında (Ms) başlar ve martenzit bitiş sıcaklığında (Mf) tamamlanır. Petrol boru çeliklerinde martenzit gibi oldukça sert bir evre istenmez çünkü sertlikle birlikte tokluk düşeceği ve aynı zamanda sünek gevrek geçiş sıcaklığı yükseleceği için kullanım alanı itibari ile olumsuzluk teşkil edecektir.

4.7.11. Tane boyutu ve dağılımı

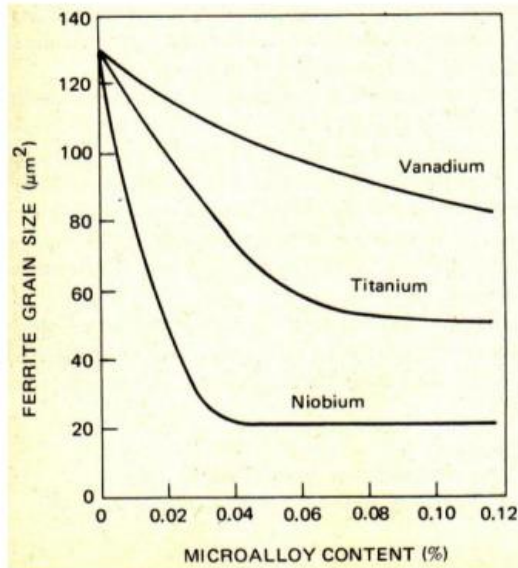
Bir dönüşüm ürünü olan tane büyüklüğü mikro alaşımlı çeliklerde termal ve mekanik özellikleri etkileyen önemli bir parametredir. Çeliklerde çekme ve darbe dayanımı tane büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Tane boyutları, önceden belirlenmiş standartlara (ASTM E112) göre parlatılmış numune yüzeylerinde metalografik kesitlerde inceleme ile tespit edilmektedir. İstenen tane boyutu malzemenin uygulama alanına bağlıdır. Çeliği tasarlarken, tane boyutunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi bilinmelidir. Resim 4.29' da Hall-Petch denkleminde göre tanelerin boyutu bir malzemenin mukavemetini etkiler. Düşük oranda mikro alaşımlı çelikler istenen yüksek mukavemet özellikleri de dikkate alındığında mikro yapı olarak hem düşük hem de uniform şekilde dağılmış tanelerden oluşmalıdır. Tane boyutunun küçük olması ve homojen şekilde dağılmasının katkısı olarak mekanik özelliklerde iyileştirilebilmektedir. Haddeme sürecinde yeniden kristalleşme sıcaklığı hem tane boyutu hem de kimyasal analiz ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilmektedir. Yeniden kristalleşme sıcaklığının düşmesi ise haddeme sürecinde merdaneler arası ezmenin kolaylaştırılmasını yani daha yüksek sıcaklık ile haddeme yapılabilmesini sağlar. Tane büyümesi hem malzeme mekanik özelliklerini düşürür hemde tane sınırlarının artması ile gevrek kırılmaya neden olur. (Gray ve diğerleri, 2009:47; Tekin, 2012:46).

$$\sigma_{yp} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

Resim 4.29 Hall petch denklemi

Kaynak: (Marrison, 1973:46)

Bu denklemde tane boyutu d ile gösterilir. Bu nedenle tane boyutu küçüldükçe mukavemet artar. Bunun nedeni, tane boyutuna uygun olduğu için kafesler arasındaki daha büyük etkileşim olanaklarının azalmasıdır. Aynı denklem akma gerilmesi yerine nihai çekme mukavemeti cinsinden yazılabilir. Çoğu malzeme, oda sıcaklığında Hall- Petch etkisi gösterir ve bu nedenle, tane boyutu küçüldüğünde yukarıda belirtildiği gibi daha yüksek mukavemete sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda bunun tersi doğrudur, çünkü tane sınırlarının açık ve düzensiz doğası, boş pozisyonların daha hızlı hareket edeceği anlamına gelir. Tane sınırları yüksek enerjili bölgelerdir. İkinci fazların çekirdeklenmesi için mükemmel yerlerdir.



Şekil 4.10 Mikro alaşım elementlerinin tane büyüklüğüne etkisi

Kaynak: (Maalekian, 2007:48)

Ferrit tane boyutuna etki eden ana parametreler mikro alaşımlar olup, niyobyum, vanadyum ve tityum gibi elementlerin etkileri şekil 4.10' da verilmiştir. Niyobyum elementi ferritik tane boyutunun küçük olması için kullanılan en önemli elementtir. Sonrasında tityum ve vanadyumda tane küçültücü özelliği nedeniyle kullanılabilir.

4.7.12. Bantlaşma ve segregasyon

Çelikler kimyasal olarak homojen değildir; imal edilmiş şekillerinin tüm enine kesit alanı boyunca tek tip kimyasala sahip değildir. Çelik döküldüğünde, katılan ilk malzeme, kalıp duvarlarına bitişik dış alandır (bu yüzey bölgesi, soğutma bölgesi olarak adlandırılır).

Bu; sıvı metal ile aynı bileşime sahip ince bir eş eksenli kristal tabakası ile sonuçlanır. Bu kristaller, termal gradyana paralel olarak dendritik bir şekilde sütunlu taneler olarak içe doğru büyümeye devam eder. Son olarak, sıvı sıcaklığı düştüğünde ve komşu taneler döküm şeklinin merkezi bölgesinde birbirine çarptığında katılma sona erer. Katılma süreci, sıvı metal soğudukça kimyasal elementlerin makroskobik ve mikroskobik olarak bölünmesine neden olur. Makroskopik olarak, segregasyon, sürekli olarak dökülen ürünlerin merkez çizgisinde ve külçelerin merkez çizgisinde, üstünde ve altında meydana gelir. Mikroskobik olarak, katılmış bölüm boyunca dendritler arasında ayrışma meydana gelir. Müteakip mekanik sıcak işlem (örneğin, haddeleme), değişen elementel kimyanın uzunlamasına bantlarını oluşturur. Mikro segregasyon, dendritik gövdenin merkezi (yani dendritik çekirdek) ile dendrit kolları arasındaki bölge arasındaki bileşim farkıdır. Bantlanma, katılma sırasında alaşım elementlerinin ayrılmasından kaynaklanır. Müteakip sıcak-işleme işlemleri, çalışma yönünde hizalanmış ayrılma ile sonuçlanır, bu da mikro yapıda tasvir edilen bantlı görünüm ile sonuçlanır. Çelikteki alaşım elementlerinin difüzyon oranları, dökümün homojenleşmesini kontrol eder. Örneğin, krom ve molibden kolayca homojenleşirken nikel çok yavaş homojenleşir. Değişken alaşım kimyasının değişen bantları, malzemenin yuvarlanma yönüne paralel olarak yönlendirilen farklı mikro yapılarla sonuçlanır. Mikro segregasyonu ortadan kaldırmak veya azaltmak için ek mekanik ve/veya termal işlemler üretim maliyetini artırır ve çoğu zaman ekonomik olarak uygun görülmez. Örneğin, yüksek derecede homojenizasyon, ayrılmış çeliğin yüksek bir sıcaklıkta (genellikle 1200°C) çok uzun bir süre (bazı durumlarda 100 saate kadar veya daha fazla) ısıtılmasından kaynaklanabilir.

4.7.13. Çökelti sertleşmesi ve tipleri

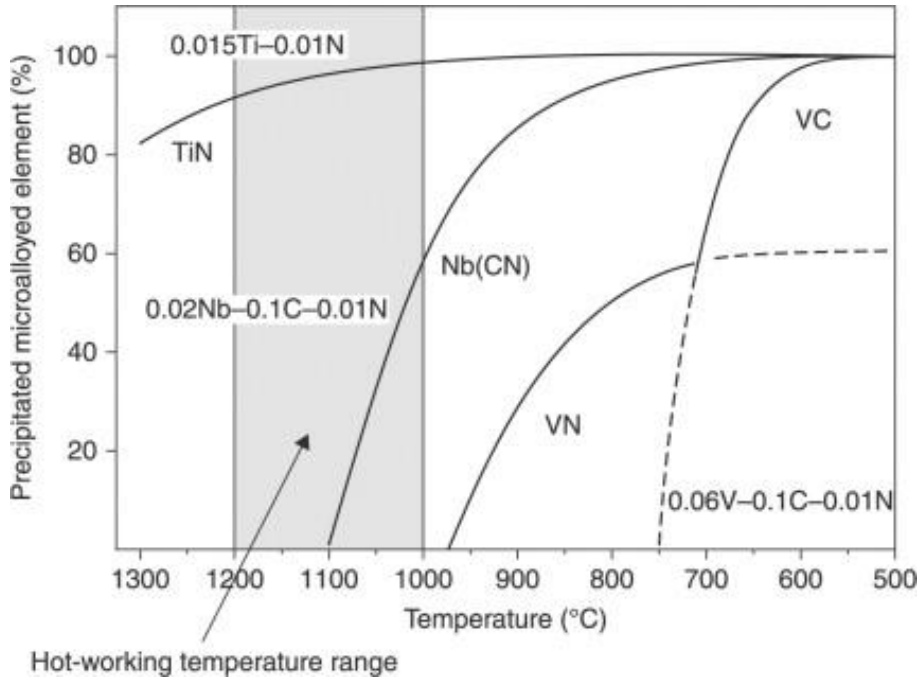
Çelik üretimi sırasında petrol boru çeliklerinde kullanılan Ti, Nb ve V gibi ferro alaşım elementleri sürekli döküm ve sıcak haddeleme süreçlerinde farklı sıcaklıklarda bileşik oluşturarak çökeltirler. Tane içlerinde ve/veya tane sınırlarında çökeltirerek bazı durumlarda çeliğin mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlarken bazı istenmeyen durumlarda ise mekanik özellikleri düşürerek slab veya bobin üzerinde çatlak gibi olumsuz etkiler yaratabilirler. Bu nedenle kullanılan ferro alaşım miktarı ve uygulanan sıcaklıkların özel olarak seçilmesi gerekmektedir.

4.7.14. Titanyum nitrit çökeltileri

Titanyum özellikle nitrojen ile bağ kurarak TiN çökeltisi olarak sürekli döküm aşamasındaki yüksek sıcaklıklarda tane sınırlarında çökelebilmektedir. Bu nedenle çeliğin nitrojen seviyesine bağlı olarak titanyum içeriği stokiyometrik oran kabul edilerek (3,42) ilave edilmelidir. Çoğu literatür çalışmasında TiN çökeltilerinin yüksek olması durumunda; Ti/N oranının yüksek olduğu durumlarda çökeltilerin daha iri olduğu malzemenin tokluğunu düşürdüğü görülmektedir. Daha yüksek Ti/N oranı TiN çökelti oluşum ve irileşme hızını da artırmaktadır. (Garcia, 2016:49) Titanyum kullanımı genel olarak direk malzemenin mekanik özelliklerine olumlu etki etmez iken östeniti tane irileşmesi için engelleyici faktör oluşturarak daha ince ve uniform yapıda ferrit taneleri oluşumuna katkı etmektedir. Homojen ve ince bir tane yapısı oluşumu ise direk olarak malzemenin sertlik ve tokluğuna olumlu ettiği bilinmektedir.

4.7.15. Niyobyumca zengin çökeltiler

Şekil 4.11' de görüldüğü üzere niyobyum karbür çökeltileri 1000 °C ile 1200 °C arasında oluşurlar ve en yüksek miktarına 850 °C de gelirler. Niyobyum kristalleşme sıcaklığı olan T_{nr} ' yi ötelediğinden dolayı sıcak haddeleme aşamasında olumlu etki sağlayarak pankek östenit tanesi oluşmasına neden olur. (Lazor, Graville 1980:49) Bu çökeltilerin oluşum sıcaklık aralıklarından dolayı Nb'yi statik yeniden kristalleşmeyi engellemek için ideal bir element olarak kullanabilmekteyiz.



Şekil 4.11 Mikro alaşım elemanlarının çökelti sıcaklıkları

Kaynak: (Baker, 2016:50)

4.7.16. Vanadyum karbür çökeltileri

Vanadyum nitrür çökeltileri şekil 4.11’de görüldüğü üzere titanyum ve niyobyum çökeltileri sonrası çözültide kalan serbest azot ve karbon varlığı ile 970 °C altında oluşmaya başlamakta ve 700 °C den sonra en yüksek seviyesine çıkmaktadır. Vanadyum nitrür ve vanadyum karbürün en önemli avantajlarından biri tane içinde çökmesi nedeniyle ferritin zenginleşmesine ve dolayısıyla mekanik özelliklere katkı sağlamasıdır.

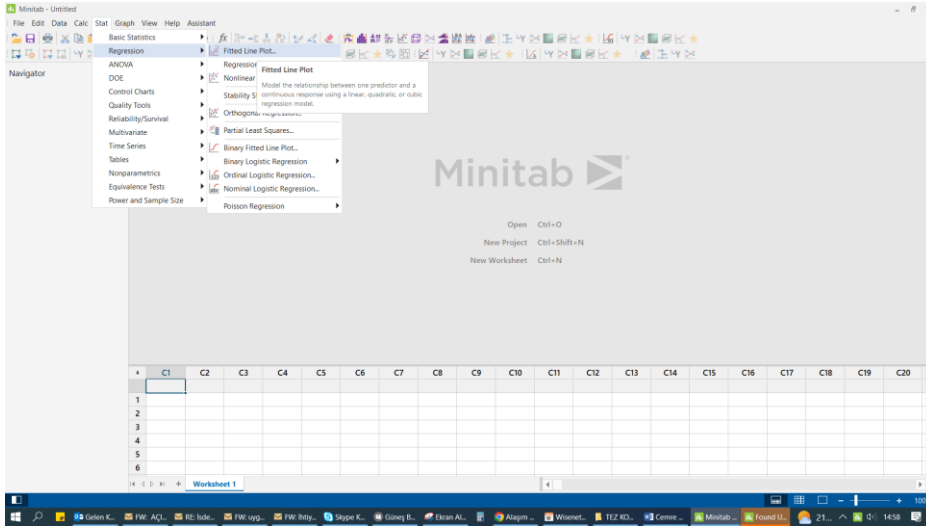
5. İSTATİSTİKSEL VERİ ANALİZİ YÖNTEMLERİ

Çelik üretiminde ve hatta birçok endüstri alanında büyük data'ların (verinin) istatistiksel olarak yorumlanması ve prosesi yönlendirmesi için model oluşturulma yöntemleri son yıllarda oldukça fazla şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Veri analizi yöntemi ile ilave iş gücü, gereksiz malzeme kullanımı ve gereksiz kapasite kullanımı engellenebilmekte ve verilerin modellenmesi ile gerekli proses parametreleri deney yapmadan elde edilebilmektedir.

Demir çelik alanında ise hem çelik üretim hem haddeleme süreçlerinde oldukça fazla değişken parametre bulunmaktadır. Elde edilmek istenen bir mukavemet değeri çıktısı için kullanılması gereken kimyasal analiz, döküm sıcaklığı, döküm hızı, haddeleme hızı, haddeleme soğutma parametreleri modellenmektedir. İstatistiksel veri analiz yöntemlerinde sık olarak minitab yazılımında kalıplaşmış modeller ve doğrulamalar kullanılmakta ve çalışmamızda da sık olarak başvurduğumuz doğrusal regresyon, best subset, DOE, ANOVA gibi enstrümanlar bulunmaktadır. Çalışmalarımız Minitab 19 (64 bit) uygulamasında gerçekleştirilmiştir. Programa ait lisans numarası ve ana ekran görüntüleri resim 5.1 ve resim 5.2 de gösterilmiştir. Minitab yazılımı bazı araştırmacılar tarafından altı sigma çalışmalarında iş süreçlerine istatistiksel yorum ve araştırma yapmaları için geliştirilmiştir.



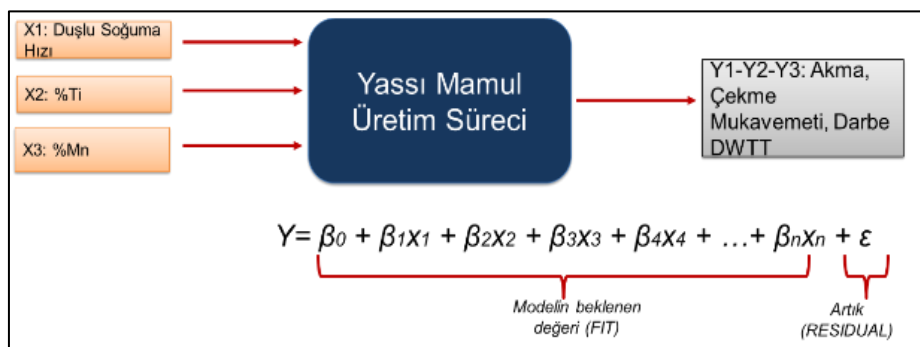
Resim 5.1 Minitab lisans özellikleri



Resim 5.28 Minitab® 19.1.1 (64-bit) ana ekran görüntüsü

5.1. Basit Doğrusal Regresyon Denklemi

Basit doğrusal regresyon, veri noktalarından geçen düz bir çizgiye uymaya yönelik istatistiksel bir tekniktir. İki değişken arasındaki nicel ilişkiyi modeller. Basittir çünkü yalnızca bir öngörücü değişken söz konusudur. Bir değişkenin başka bir değişkenin değişimine göre nasıl değiştiğini açıklar. Her iki değişkenin de sürekli olması gerekir; ayrık verileri modellemek için başka regresyon türleri de vardır. Çalışmamızda elde edilmek istenen mekanik değerler proses parametreleri ile eşleştirilerek çoklu doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Aşağıdaki akışta da görüldüğü üzere girdilerimiz olarak sıcak haddeleme parametreleri ile birlikte çeliğin kimyasal analizi kullanılmış ve çıktı değerlerimiz ise akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve çentik darbe enerjisi olarak belirlenmiştir.



Resim 5.3 Regresyon örnek gösterimi

Girdiler ve çıktıkların yer aldığı ve bu veriler ile oluşturulan regresyon mantığı resim 5.3' de gösterilmiştir. Burada çıktı olan değerler üzerinden kullanılması gereken parametreler ile ilgili model oluşturulabilmektedir.

5.2. MİNİTAB TERİMLERİ VE ANLAMLARI

5.2.1. R Square (R Kare, R-Sq)

R-kare (r-sq), çizilen bir regresyon çizgisi etrafında bulunan veri noktalarının dağılımını değerlendirir. R-kare, doğrusal bir modelin açıkladığı bağımlı değişken varyasyonunun yüzdesidir. R-kare değeri her zaman %0 ile %100 arasında olmaktadır. (Şener, 2020:54) %0 olması durumunda regresyon çizgisi ile elde edilmiş verilerin uyumsuz olduğunu ve bu değişkenlerin ilgili model ya da regresyon ile bağlantılı olmadığını göstermektedir. %100 olması durumu ise ilgili verilerin model ve regresyon ile bire bir uyumlu olduğunu ve modeli açıklayan veriler olduğunu göstermektedir. Bu nedenle r-kare değeri ne kadar büyük olur ise yani %100 e ne kadar yakın ise regresyon modeli ilgili verilerle çok uyumludur. (Şener, 2020:53)

5.2.2. P Değeri (P-Value)

İstatistiki çalışmalarda ve minitab yazılımında p-value yani p değeri gerçekleştirilen çalışmanın yani verilerin süreç ile bağlantılı olup olmadığını yapılacak modelleme için bir anlam ifade edip etmediğini belirlemek amaçlı kullanılmaktadır. (Probability; Olasılık)

Çizelge 5.1 P value değer açıklamaları

1	$p < 0.001$	Çok yüksek düzeyde istatistiki olarak anlam içeriyor
2	$0.001 \leq p < 0.01$	Yüksek düzeyde anlamlı
3	$0.01 \leq p < 0.05$	Veriler istatistiki olarak anlam içeriyor
4	$0.05 \leq p < 0.10$	Sınır ve üzerinde anlamlılık içeriyor
5	$p > 0.10$	Anlam bulunmuyor, fark tesadüfi olabilir

Gerçekleştirilen istatistiksel çalışmaların tamamında bir p değeri hesaplanmaktadır. Belirtilen p değeri hipotez testlerinde yani varsayımda hatalı bir karar verme olasılığının ne kadar olduğunu göstermektedir. P değeri genel olarak çizelge 5.1' de görüldüğü gibi 0,05 ve

altında olması istenir fakat bu değerin düşük olması durumlarında istatistiksel olarak anlamlı olma durumu da artış göstermektedir.

5.2.3. Pp, Ppk

Cp, Cpk, Pp ve Ppk değerleri süreçlerimizin mevcut alt ve üst limitlere göre nerede olduğumuzu ve ne derecede riskli bölgede kalıp kalmadığımızı görmek amaçlı kullanılan istatistiksel parametrelerdir. Pp ve Ppk prosesin performansını izlemek amaçlı kullanılır. Prosesin şu an ve geçmişte nasıl olduğunu gösterir.

5.2.4. Cp, Cpk

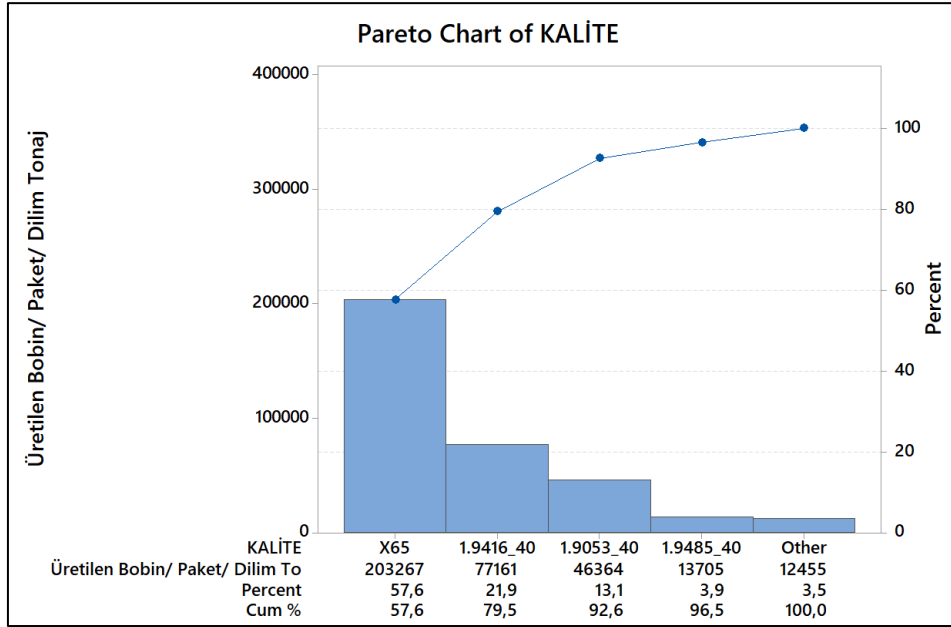
Cp ve Cpk değerleri prosesin yeterliliğini ölçmek için kullanılmaktadır. Prosesin gelecekte nasıl olacağını gösterir. Cp değeri ile proses kararlılığı izlenir iken sonraki sonuçların tahmin edilebilmesini sağladığı için istatistiksel olarak kullanılan ana parametrelerdendir. Cpk değeri ise prosesin toleranslar dışına çıkma eğilimini ölçmek amaçlı kullanılır. Otomotiv endüstrisinde Cpk değeri 1,33 üzeri kabul edilirken, diğer endüstri faaliyetlerinde 1 üzerinde olması kabul edilmektedir. Bu değer ne kadar yüksek olur ise prosesimiz o kadar kararlı olacaktır. 1 değeri altında kalan Cpk değerleri olması durumunda prosesin iyileştirilmesi gerekmektedir.

5.3. Malzeme ve Deneysel Prosedür

Tez çalışmamız bahsettiğimiz üzere kullanım alanı itibari ile yüksek mukavemet ve yüksek darbe dayanımı ihtiyacı olan çelik kalitelerinin karşılanabilmesi için gerekli optimum üretim parametrelerini belirlemek olarak ele alınmıştır. Petrol boru çeliği üretimleri Türkiye’ de uzun zamandır hem entegre tesis hem de hurdadan geri kazanım ile çalışan ark ocaklı tesisler tarafından üretilmektedir.

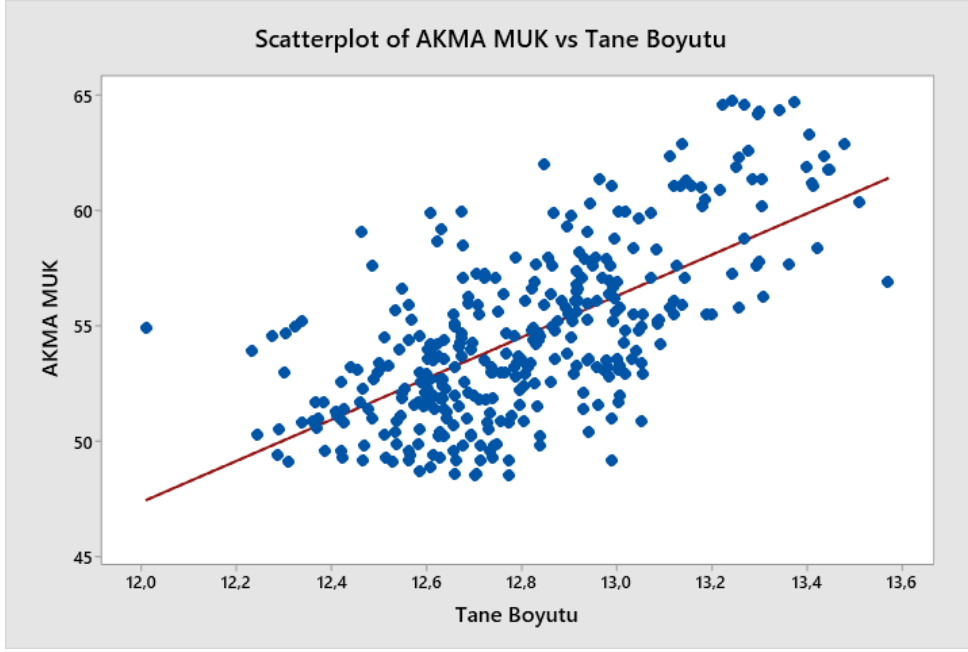
Yeni nesil çeliklerden beklenen bu özelliklerin sağlanabilmesi ve malzeme kalınlığı arttıkça benzer değerlerin elde edilmesi gerekliliği nedeniyle çalışma yapılmıştır. Sık olarak kullanılan X65 petrol boru çeliğinde çalışma yapılmış olup en fazla üretim yapılan bu kalite seçimi için pareto analizi gerçekleştirilmiştir. Mevcut durumu inceleme öncesinde çalışma

yapılacak kaliteyi belirlemek amacıyla pareto analizi minitab yazılımında incelenmiştir. Şekil 5.1 de görüldüğü gibi API 5L X65 kalitesi toplam üretim miktarının %57,6 lık kısmını oluşturmaktadır.



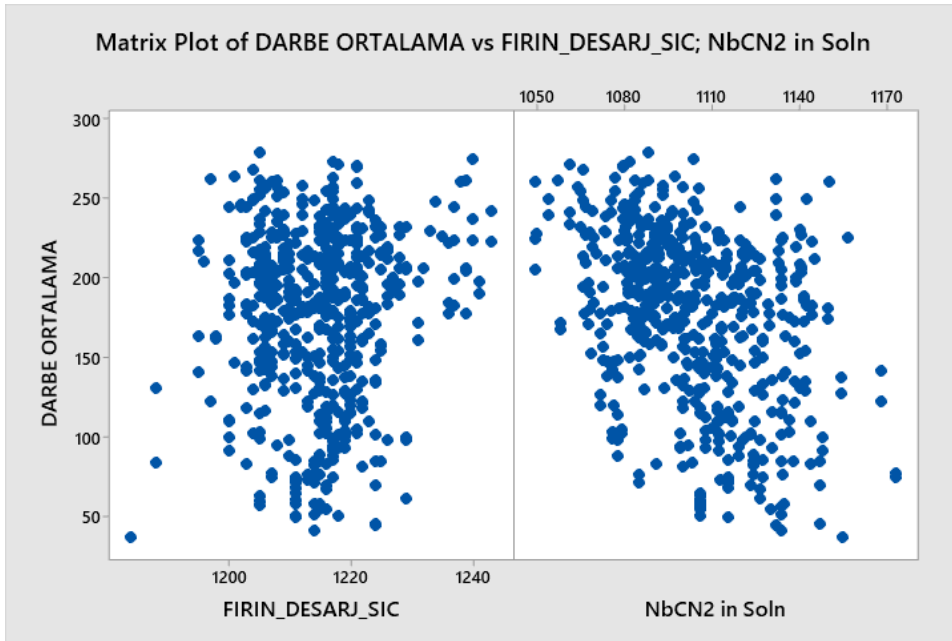
Şekil 5.1 Üretilen apı kalite tonajları pareto analizi

Tüm petrol borusu çeliği üretiminde X65 kalite üretimi en yüksek paya sahip olup toplam petrol borusu çeliği üretiminin %58'e yakını bu kalite üzerinden gerçekleşmektedir. İstatistiksel veri analizi de X65 kalitedeki üretilen tüm bobinlerin verileri kullanılarak yapılmıştır. Bu kalitede akma, çekme, uzama ve darbe enerjisi gibi malzemeden istenen nihai özelliklere etki eden parametreler birçok alanda incelenmiştir. Mukavemetlerin nihai malzemedeki tane boyu ile ilişkisi yine büyük veri havuzunda yer alan değerlerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile incelenmiş ve tane boyutu ile mukavemet arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Aşağıdaki grafikte (şekil 5.2) de görüldüğü gibi tane boyutu numarası 12'den 13,6 ya doğru çıktıkça akma mukavemeti de doğrusal bir şekilde artış göstermektedir. Tane boyutu ölçüm sonuçlarının tamamı NİKON marka optik mikroskoba ait CLEMEX CIR programına ait görüntü işleme teknolojisi ile ASTM E112 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2 Akma mukavemeti ve tane boyutu arası ilişki

Slabların sıcak haddehane tavlama fırınındaki ortalama fırın deşarj sıcaklığı ve malzeme içerisindeki NbCN₂ çözülebilirliği yine istatistiksel olarak yorumlanmış ve sıcaklık değişimleri ile aşağıdaki grafikten de görüldüğü gibi gözle görülür bariz bir etki görülememiştir.



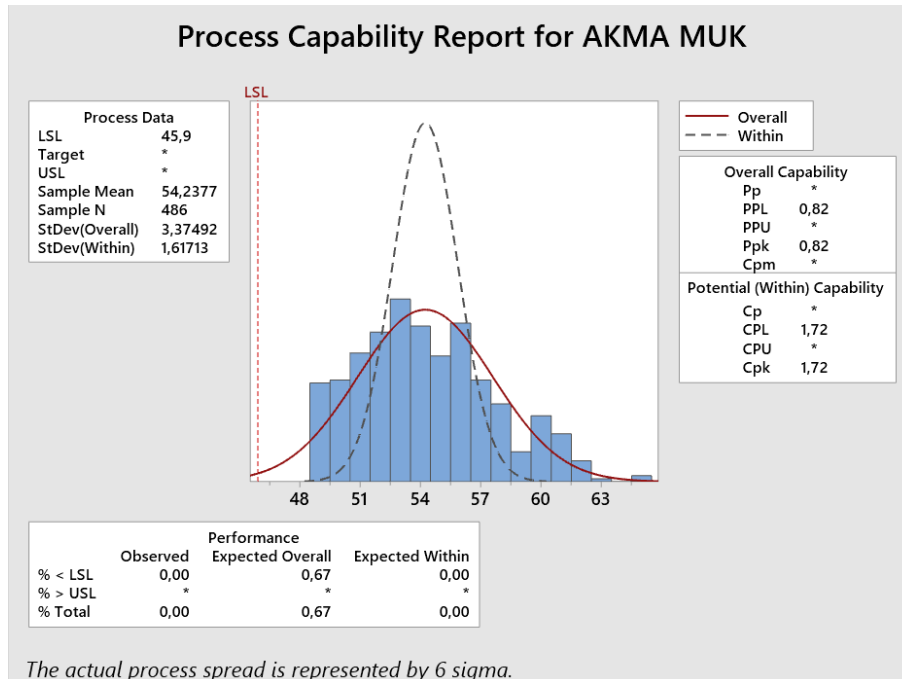
Şekil 5.3 Darbe dayanımı ile fırın deşarj sıcaklığı ve nb çözünebilirliği arası ilişki

5.4. Yeterlilik Analizleri (Capability Analysis)

Çalışmaya konu olan X65 petrol boru çeliğinde bugüne kadar üretilmiş bobinlerin akma ve çekme mukavemetleri minitab yazılımında capability analysis yöntemi ile tesis yeterliliği incelemesi yapılmıştır. Bu çalışma ile standartta istenene mekanik özelliklerin hangi aralığında çalıştığımızı ve sapma potansiyelinin olup olmadığı net bir şekilde görülebilmektedir. Bu çalışmanın bir faydası da mukavemetlerin standart limitlerine yakınlığı göz önüne alınarak ilave alaşım ihtiyaçlarının karşılanması ya da tam tersi olarak fazla kullanılan alaşım elementlerinin tasarrufunun sağlanmasıdır.

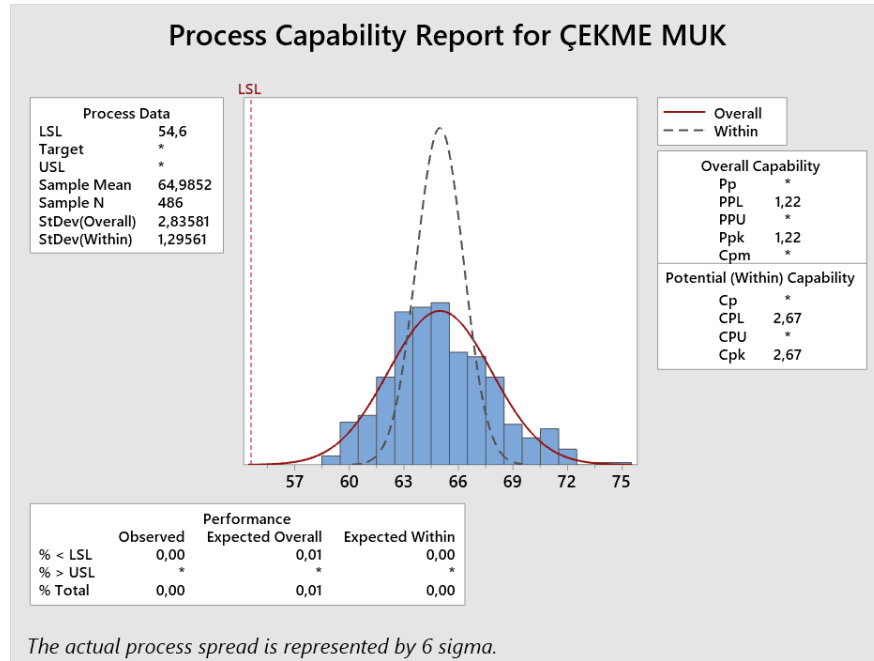
5.4.1. Çekme test sonuçları yeterlilik analizi

Akma mukavemetine yapılan incelemede 486 adet test sonucu incelenmiş olup resim 5.4’ de standart alt limitimiz 45,9 kg/mm² olup inceleme sonucunda çalışma ortalamamızın 54,2 kg/mm² olduğu görülmüştür. Resim 5.4’ de standartta bir üst limit olmayıp müşteri taleplerine göre değişmektedir. Alt limit altında kalan değer olmayıp mevcut Cpk değeri ile de limit altında kalınma olasılığı sıfır olarak gerçekleşmiştir. Resim 5.4’ de görüldüğü üzere alt limit olan değerden yaklaşık 10 kg/mm² fazla çalışıldığı görülmektedir.



Şekil 5.4 Akma mukavemeti mevcut durum analizi

Şekil 5.4' de ayrıca Cpk değeri 1,72 olarak tespit edilmiş ve prosesin oldukça kararlı olduğu görülebilmektedir. Buradan mevcut mukavemetlerin alt limitten 10 kg/mm² üzerinde olduğundan dolayı oldukça garantili olduğu ve limitten uzakta kaldığı yorumu da yapılabilmektedir.



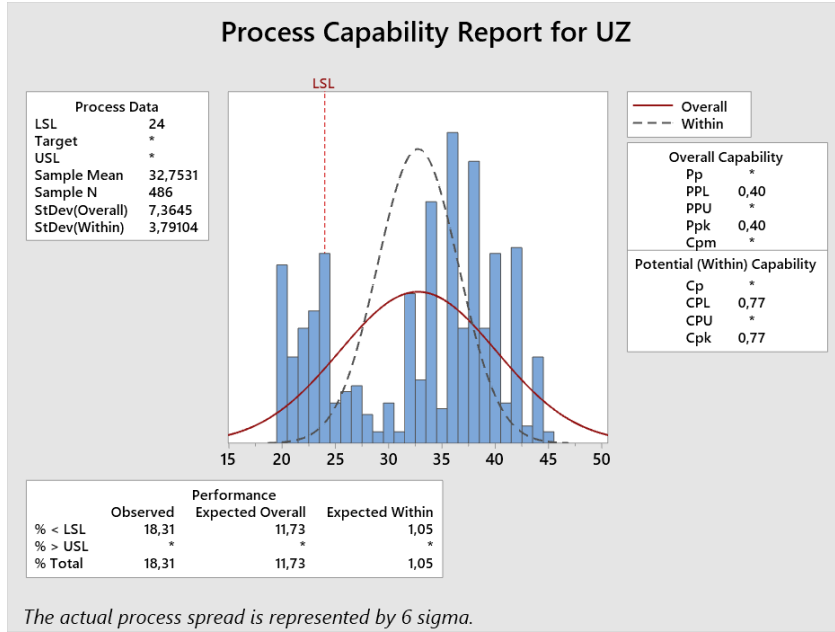
Şekil 5.5 Çekme mukavemeti mevcut durum analizi

Benzer şekilde çalışma çekme mukavemeti üzerinden yapılmıştır. Şekil 5.5' de görüldüğü üzere Cpk değeri 2,67 ile akma mukavemetine oranla daha yüksek çıkmış olup buda hem alt limit hem de üst limitten sapma potansiyelin olmadığını göstermektedir. Alt çekme mukavemet limiti standartta 54,6 kg/mm² olup 486 veri içerisindeki ortalama 64,98 kg/mm² dir. Bu mekanik özellikte de standart alt limitten yaklaşık 10 kg/mm² yukarıda çalışıldığı görülebilmektedir.

	Performance		
	Observed	Expected Overall	Expected Within
% < LSL	18,31	11,73	1,05
% > USL	*	*	*
% Total	18,31	11,73	1,05

Resim 5.4 Alt ve üst limit aşma durumu

Yine resim 5.4' de görüldüğü gibi Cpk değeri 2,67 oldukça yüksek çıkmış olup akma mukavemetinde olduğu gibi değerlerin garanti limitlerde olduğu görülebilmektedir.

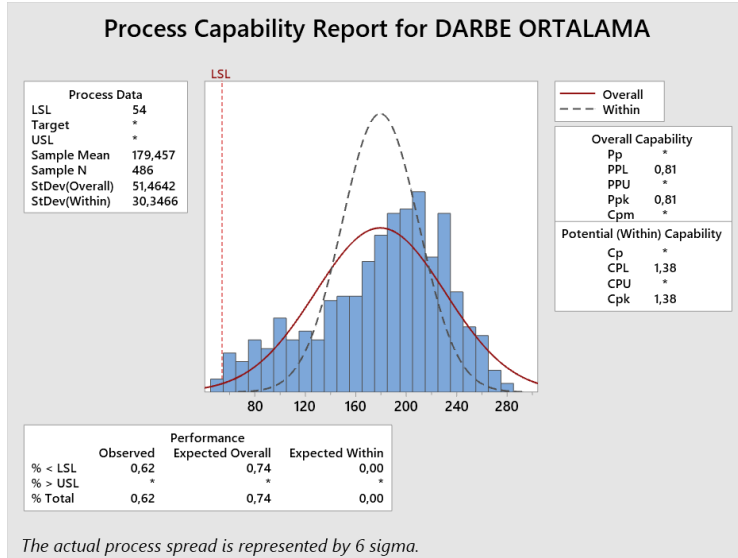


Şekil 5.6 Uzama değeri mevcut durum analizi

Önemli bir mekanik özellikte % uzama değeri olup benzer şekilde yeterlilik analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6' da görüldüğü gibi alt % uzama limiti olan 24 değeri altında kalan verilerin olduğu ve ortalamanın %32 olduğu görülmektedir. Akma ve çekme mukavemetinin alt limite yaklaştırılması ile % uzamanın yukarı çekilmesi durumu gerçekleşeceği düşünülmektedir. Bu da malzemenin tokluğunun iyileştirilmesi çalışmasının artı yönde çalışmaya faydası olacağı fikrini tekrar doğurmuştur. Aynı zamanda alt limit (LSL) olan 24 altında kalan değerlerinde iyileştirilmesi yani % uzama gerçekleşmesinin artırılması faydalı olacaktır. Alt limit altında kalan değerler olması nedeniyle Cpk değeri 1'in altında gerçekleşmiştir.

5.4.2. Çentik darbe test sonuçları yeterlilik analizi

Öncelikle araştırılmak istenen çentik darbe testleri için mevcut durum analizi yapılmıştır. Mevcut durum analizi çalışması yine elde var olan istatistiksel verilerdeki değerlerin minitab yazılımında "capability analysis" modülü ile incelenmesi şeklinde gerçekleşmiştir. Standart alt limiti 0 °C de gerçekleştirilen testlerde 54 Joule olup şekil 5.7' de görüleceği üzere ortalama gerçekleşme 179 joule dur. Buna rağmen değerlerde alt limite yakın olan gerçekleşmeler de olduğu ve standart sapmasının yüksek olduğu görülebilmektedir.



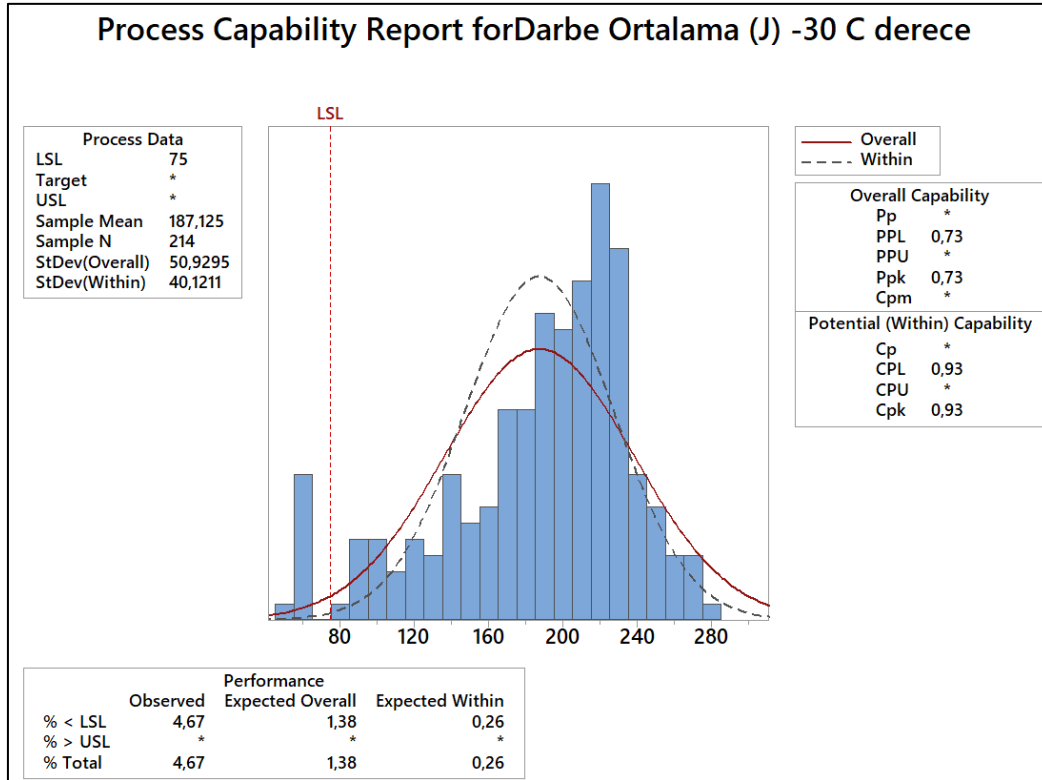
Şekil 5.7 Darbe dayanımı mevcut durum analizi

Standart limite göre kontrol dışında genel müşteri istekleri olan farklı sıcaklıklarda yapılan testlerde de benzer yeterlilik analizi yapılmıştır. Genel alt limit olarak kabul edilen 75 joule değeri üzerinden inceleme gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.2 Gerçekleşen darbe sonucu

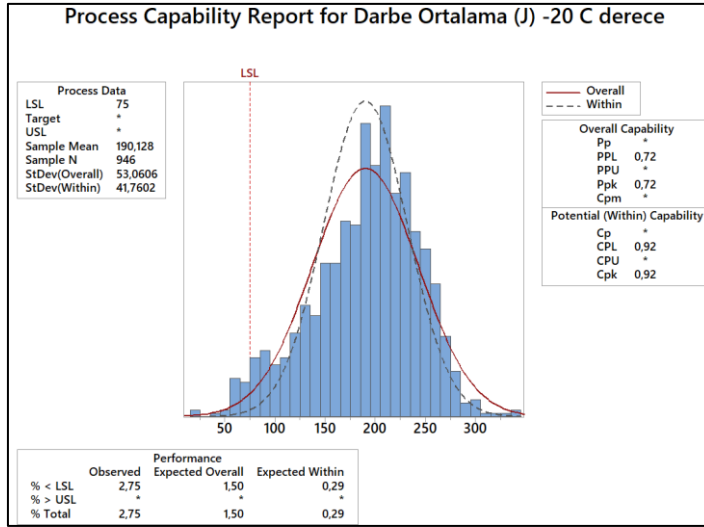
Test Sıcaklığı	Test Adeti	Gerçekleşen Test Sonucu
0 °C	486	179,457
-20 °C	946	190,128
-30 °C	214	187,125
-40 °C	244	178,915

Mevcut darbe test sonuçları incelemesinde son 3 yıla ait gerçekleşen, şekil 5.8' de -30 °C de %1,38 ve şekil 5.9' da -20 °C de %1,50 olduğu görülmüştür. Ayrıca çentik darbe enerjisinin maksimize edilmesi gerekmektedir birlikte alt limitte yakın olan değerlerinde iyileştirilmesi faydalı olacaktır. Şekil 5.8' de -30°C de gerçekleştirilen çentik darbe testlerinde alt limit 75 joule olarak belirlenmiş olup toplamda 214 adet veri incelenmiştir. 214 adet veri 2017 yılından itibaren gerçekleştirilmiş ve arşivlenmiş verileri oluşturmaktadır. Grafikteki rapordan da görüldüğü gibi alt limit olarak belirlenen 75 joule altında tüm verilerden %4,92 si kaldığı görülmektedir. Çalışmamızdaki amaçlarımızda hem bu veriye etki eden parametrelerin incelenerek bulunması hem de iyileştirmek adına deneme üretimlerin gerçekleştirilerek sonuçların incelenmesidir. Benzer çalışma -30°C ve -20°C de gerçekleştirilen çentik darbe testlerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8 Darbe dayanımı mevcut durum analizi (-30°C)

Şekil 5.8' deki grafikteki rapordan görüleceği üzere incelenen numune sayısı 214 adet olarak görülmekte ve yine alt limit olarak belirlenen 75 joule altında tüm verilerin %4,67 si kalmaktadır. Son olarak ise -20 °C de bulunan veriler incelenmiş ve alt limit altında kalan oran %2,75 olarak görülmüştür. Görüldüğü üzere çentik darbe test sıcaklığı yükseldikçe alt limit altında kalma oranı düşmekte ve elde edilen darbe enerjisi yükselmektedir. Bu durum ilgili çelik boruların kullanılacağı ilkim şartlarında hava sıcaklığının yüksek olması ile çeliğin kırılmaya daha dirençli olacağını da yorumlamaktadır. İklim şartlarına bağlı olarak kullanılan bölgenin -30 °C veya -40°C gibi sıcaklıklarda bulunması durumunda çentik darbe enerjisinin -20 °C deki gibi bir sonuç göstermesi kullanıcılar tarafından beklenir. En kötü olasılık ile ortalama bir değer olan 75 joule altında kalmaması istenmektedir.



Şekil 5.9 Darbe dayanımı mevcut durum analizi (-20°C)

Büyük veri havuzunda bulunan petrol boru çeliği üretiminde kullanılmış test ve proses parametreleri ele alınmıştır. Bu veriler içerisinde farklı kimyasal kompozisyona sahip çelikler ile birlikte farklı amaçlar ile deneme olarak üretilmiş ve özel seçilmiş proses parametreleri de yer almaktadır.

Çizelge 5.3 Büyük veri seti örnek görüntüsü

DOKUM CELİK KAL	RM1 EZME	RM2 EZME	RM3 EZME	RM4 EZME	RM5 EZME	RM6 EZME	RM7 EZME	RM TOPLAM EZME	RM FORCE 1	RM FORCE 2	RM FORCE 3	RM FORCE 4
3.9065_51	42,361	31,397	30,15	27,265	21,099	17,704	0	183,707	18,647	18,496	20,696	21,871
3.9065_51	43,91	32,854	30,408	28,103	21,561	17,586	0	187,781	19,907	19,75	21,663	22,763
3.9065_51	44,776	32,721	31,359	27,458	21,18	17,237	0	187,798	19,853	19,069	21,388	22,205
3.9065_51	44,202	32,898	31,044	27,756	21,348	17,335	0	187,807	19,292	18,824	20,843	22,018
3.9065_51	41,899	32,35	30,348	27,799	21,524	17,978	0	185,772	19,878	19,593	21,493	22,236
3.9065_51	41,209	32,858	31,291	26,397	21,979	18,105	15,0	185,754	19,923	20,986	22,907	22,24
3.9065_51	40,082	32,013	30,147	27,809	21,664	18,02	13,3	183,722	17,309	19,9	21,232	22,037
3.9065_51	41,864	33,289	32,426	27,442	21,053	16,994	0	185,799	19,359	20,047	21,933	22,884
3.9065_51	41,872	33,228	31,045	28,126	21,195	17,387	0	185,803	19,051	19,17	21,107	22,45
3.9065_51	42,861	33,46	32,99	26,814	20,897	16,733	0	185,768	20,238	20,512	22,864	23,142
3.9065_51	43,553	32,833	31,864	27,308	21,164	16,646	0	185,772	20,105	19,72	21,762	22,884
3.9065_51	45,662	32,599	30,915	27,44	20,336	16,639	14,2	185,783	21,174	21,158	22,508	23,757
3.9065_51	43,51	32,627	32,344	27,363	21,382	16,073	13,9	185,825	19,819	19,137	21,703	22,619
3.9065_51	44,595	32,306	32,259	27,517	22,154	16,378	0	187,839	22,301	20,98	24,031	24,461
3.9065_51	45,242	32,392	32,373	27,35	22,05	16,029	0	187,835	21,139	20,154	22,503	23,389
3.9065_51	44,94	33,678	32,023	27,83	20,917	16,399	0	187,837	20,321	20,109	21,888	23,524

Çizelge 5.3' de büyük veri setine ait bir kesit örneklendirilmiş olup bu veriler içerisinde aşağıda da bahsedileceği üzere kimyasal tararım da bulunan elementler ile birlikte, sıcak haddeme sürecinde kullanılan proses parametreleri bulunmaktadır. Mevcut durum analizi

sonrası proses parametrelerinin bu sıcaklıklardaki darbe enerjisi üzerindeki etkisini görmek amaçlı best subset yöntemi ve sonrasında doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Belirlenen kalitede üretilmiş 1600 adet bobin her biri yaklaşık 25 tondan toplam 40.000 ton üretim sonucuna ait veriler incelenmiştir. Her bobinde 56 adet farklı parametre değeri seviye 3 yazılımlarından çıkartılarak inceleme yapılmıştır. 1600 adet bobin içerisinde veri setinde ele alınan aşağıdaki parametrelerin ulaşılabildiği ve tane boyutu ölçümü yapılarak bire bir mekanik testlerin gerçekleştirildiği 486 adet bobin verisi kullanılarak istatistiksel analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. İncelenen parametreler arasında kimyasal kompozisyon ile birlikte sıcak haddeleme parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 5.4 Veri setinde bulunan parametreler

RM ÇIKIŞ KAL	FM GİRİŞ SIC	RLT	DUSLU MASA SOĞUMA HIZ	FM ÇIKIŞ SIC	SARILMA SIC	BOBİN KALINLIK	BOBİN GENİSLİK
MFSFM1	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	%Cu
%Cr	%Mo	%Ni	%V	%Ti	%NB	%Ce	%N
MFSFM2	MFSFM3	MFSFM4	MFSFM5	MFSFM6			

Çizelge 5.4’ de bulunan parametrelerin seçiminde bobin üzerinde nihai mekanik özelliklere etki edebilecek özellik göz önüne alınmıştır. Bu nedenle malzeme üzerinde deformasyon miktarı, soğuma hızı, kimyasal değerler, haddeleme sürecinde farklı noktalardaki sıcaklıklar ile birlikte nihai paso (ezme) miktarları kullanılmıştır. Çizelge 5.4’ de kullanılan parametreler yer almakta olup sırasıyla incelenen parametreler şu şekildedir;

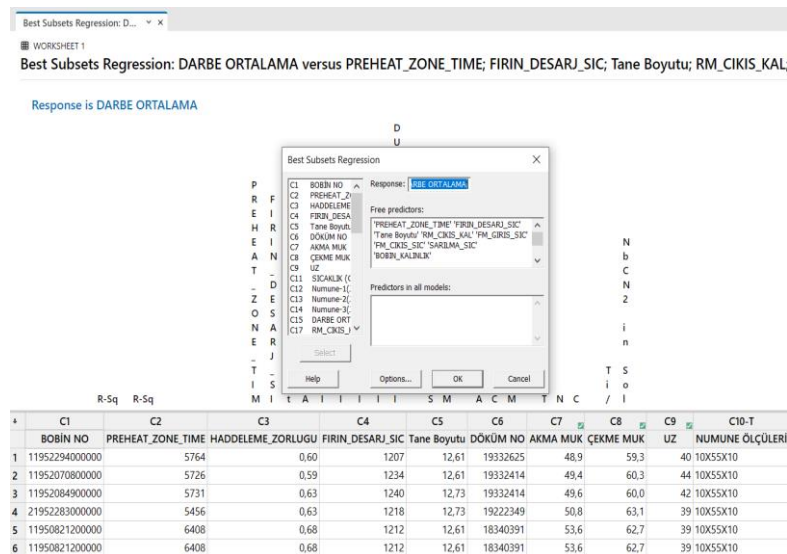
- **RM;** kaba haddeleme sürecindeki 6 pasodaki ezme değerleri
- **RLT SICAKLIĞI;** Yeniden kristalleşme sıcaklığı
- **RM FORCE;** kaba haddede merdane tarafından uygulanan güç
- **RM ÇIKIŞ KALINLIĞI;** kaba haddeleme sonrası nihai kalınlık
- **FM GİRİŞ SICAKLIĞI;** şerit hadde giriş sıcaklığı
- **F EZME;** şerit hadde ezme miktarı
- **F FORCE;** şerit hadde ezme için uygulanan güç
- **FM ÇIKIŞ SICAKLIĞI;** şerit haddeleme sonrası çıkış sıcaklığı
- **SARILMA SICAKLIĞI;** bobinin sarılarak deforme edildiği sıcaklık
- **BOBİN KALINLIK;** üretilen bobin nihai kalınlığıdır.

- **BOBİN GENİŞLİK;** üretilen bobinin nihai genişliğidir.
- **DUŞLU MASA SOĞUTMA SUYU;** şerit haddeleme sonrası bobinin hareket ettirildiği stantlarda verilen su ile birlikte malzemenin soğutulduğu kısımdır.
- **Tnr SICAKLIĞI;** Tnr sıcaklığı, redüksiyon oranından ve büyük ölçüde mikro alaşımların eklenmesinden etkilenebilir. Mikro alaşım elementlerinde Tnr üzerinde en yüksek artırıcı etkiye sahip olan Nb yer almaktadır. Tnr sıcaklığı altında haddeleme sırasında yeniden kristalleşme gerçekleşmeden deformasyon meydana gelmektedir. Tnr altında yapılan deformasyonlarda östenit taneleri yeniden kristalleşme olasılığı olmadığından redüksiyondan sonra deforme olur ve tanelerin eni küçülürken boyları uzar ve daha ince uzun bir morfolojiye dönüşür.

Eldeki tüm verilerden best subset analizi yapılarak akma mukavemetine bireysel veya toplu olarak etki eden parametreler çıkartılmıştır. Çizelge 5.5’ de görüldüğü üzere akma mukavemeti modellenerek etkili parametreler görülebilmektedir. R-sq değerinin en yüksek olduğu değerdeki parametreler toplu olarak en etkili modelin oluşabileceğini göstermektedir.

5.4.3. Akma mukavemetinin modellenmesi

Öncelikle akma mukavemetinin modellenmesi için Minitab 19 yazılımında best subset modülü kullanılmış ve oluşturulacak modellemeye etki eden ana parametreler tespit edilmek istenmiştir. Buradaki amaç modellemeye en fazla katkıda bulunacak parametrelerin seçilmesi ve diğer etkisiz parametrelerin çıkartılarak modellemede kalabalık yaratmamasıdır.



Resim 5.5 Akma mukavemeti best subset ekranı

Çizelge 5.5 Model varyasyonları

Vars	R-Sq		Ön Slab İstirna Bölge	Fırın Deşarj Sıcaklığı	Tane Boyutu	RM Çıkış Kalınlığı	FM Giriş Sıcaklığı	FM Çıkış Sıcaklığı	Sarıma Sıcaklığı	Bobin Kalınlığı	Dışlu Masa Soğutma Hızı	C	Si	Mn	S	Al	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Ce	N	Ti/N	NbCN2 Çözünürlüğü	RLT Sıcaklığı	
	1	2																									
1	57																				*						
1	41																					*					
2	66																				*					*	
2	65																				*					*	
3	69				*																*						
3	69																				*				*		
4	73									*										*	*						
4	73				*														*	*	*	*					
5	75									*									*	*	*	*		*			
5	75									*									*	*	*	*		*			
6	76									*									*	*	*	*		*			
6	76									*									*	*	*	*		*			
7	78									*									*	*	*	*		*			
7	78									*									*	*	*	*		*			
8	79					*				*	*								*	*	*	*		*			
8	79			*	*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
9	80				*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
9	80			*	*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
10	81				*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
10	80				*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
11	81	*			*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
11	81				*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
12	81	*			*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
12	81				*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
13	81	*			*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
13	81	*			*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
14	81	*			*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
14	81	*			*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
15	81	*			*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
15	81	*			*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
16	82	*		*	*	*		*		*	*								*	*	*	*		*	*	*	
16	82	*		*	*	*		*		*	*								*	*	*	*		*	*	*	
17	82	*		*	*	*	*			*	*								*	*	*	*		*	*	*	
17	82	*		*	*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
18	82	*		*	*	*				*	*								*	*	*	*		*	*	*	
18	82	*		*	*	*		*		*	*								*	*	*	*		*	*	*	
19	82	*		*	*	*	*	*		*	*		*	*					*	*	*	*		*	*	*	
19	82	*		*	*	*	*	*	*	*	*		*	*					*	*	*	*		*	*	*	

NbCN2 in Soln	0,071
C	0,038
SI	0,001
MN	0,196
AL	0,007
CR	0,002
MO	0,098
TI	0,000
NB	0,000
MFSFM1	0,068
MFSFM2	0,471
MFSFM3	0,108
MFSFM4	0,010
MFSFM5	0,000
CE	0,002
N	0,000
Ti/N	0,000
RLT	0,268
FM_CIKIS_SIC	0,002

Çizelge 5.7 Akma ilk modeli standart sapması ve r-sq değeri

Std	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,45123	82,46%	81,51%	80,20%

P-Value değeri 0,05 üzerindeki parametrelerin çıkartılması sonrası nihai olarak şu şekilde formüle ulaşılmıştır. Görüldüğü üzere akma mukavemeti %82 R-sq değeri ile modellenebilmiştir. İstatistiki veri analizinde minitab uygulamalarında bilindiği üzere r square değerinin %100 e yakın bir değer olması ve en az %70 üzerinde olması gerekmektedir. %70 üzerindeki her artış elde edilen formülün daha anlamlı olduğunu belirtmektedir.

Çizelge 5.8 Akma model formülü (ilk)

Akma Muk	=	$133,9 + 0,000203 \text{ Preheat_Zone_Time} - 17,36 \text{ Tane Boyutu} \\ + 0,1852 \text{ Rm_Cıkıs_Kal} - 0,01938 \text{ Sarılma_Sıc} - 1,796 \text{ Bobın_Kalınlık} \\ + 0,1794 \text{ Duslu_Masa_Soguma_Hız} - 238,1 \text{ C} - 29,83 \text{ S}_1 + 31,05 \text{ Al} - 20,25 \text{ Cr} \\ + 181,2 \text{ T}_1 + 735,8 \text{ Nb} + 0,01813 \text{ Mfsfm1} + 0,03233 \text{ Mfsfm4} \\ + 0,06709 \text{ Mfsfm5} + 113,1 \text{ Ce} - 1022 \text{ N} - 0,769 \text{ Ti/N} + 0,1113 \text{ Fm Cıkıs Sıc}$
----------	---	--

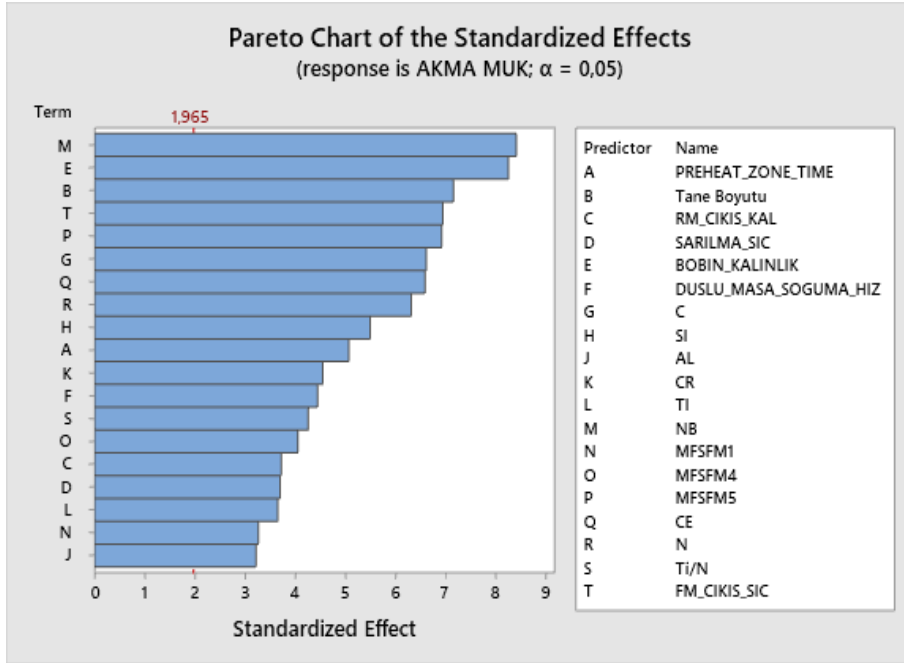
Çizelge 5.9 Akma son modeli parametre katsayıları ve p-value değerleri

Term	P-Value
Constant	0,000
PREHEAT_ZONE_TIME	0,000
Tane Boyutu	0,000
RM_CIKIS_KAL	0,000
SARILMA_SIC	0,000
BOBIN_KALINLIK	0,000
DUSLU_MASA_SOGUMA_HIZ	0,000
C	0,000
SI	0,000
AL	0,001
CR	0,000
TI	0,000
NB	0,000
MFSFM1	0,001
MFSFM4	0,000
MFSFM5	0,000
CE	0,000
N	0,000
Ti/N	0,000
FM_CIKIS_SIC	0,000

Çizelge 5.10 Akma son modeli standart sapması ve r-sq değeri

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,46056	82,00%	81,27%	80,30%

Çizelge 5.8, 5.9 ve 5.10’ da görüldüğü gibi veriler p-value değerinin 0,05 altında olmasından dolayı daha anlamlı hale gelebilmiştir. Çizelge 5.8’ de modele ait formül görülebilmektedir. Formül içerisinde yer alan parametreler ise çizelge 5.9 ‘da görülebilmektedir. Görüldüğü üzere tüm verilerde p-value değeri 0,05 altındadır. Verilerin anlamlı olması için p value değeri 0,05 altında olmalıdır. Aksi takdirde istatistiki olarak bu veriler anlamlı bir sonuç oluşturmamaktadır. Çizelge 5.10’ da ise modele ait standart sapma değeri ile birlikte R-sq değeri yer almaktadır. Mevcut parametreler ile anlık R-sq değeri %82 olarak gerçekleşmiştir. İstatistiki veri analizinde minitab uygulamalarında bilindiği üzere r square değerinin %100 e yakın bir değer olması ve en az %70 üzerinde olması gerekmektedir. %70 üzerindeki her artış elde edilen formülün daha anlamlı olduğunu belirtmektedir.



Şekil 5.10 Akma modeline etki eden parametre sıralaması

Şekil 5.10' de modele etki eden parametrelerin etki dereceleri gösterilmektedir ve % uzama modellemesine etki eden en önemli 3 parametre % Nb, bobin kalınlığı ve nihai tane boyutudur.

5.4.4. Çekme mukavemetinin modellenmesi

Benzer çalışma çekme mukavemeti içinde yapılmış olup öncelikle best subset ile tüm parametrelerin oluşturduğu R-sq değeri hesaplanmış ve sonrasında yine metalürjik olarak yorumlar ile içlerinde sayısal olarak en yüksek R-sq değeri olan model oluşturulmuştur.

Çizelge 5.11 'de best subset modülü ile yapılan çalışmada toplamda 30 farklı parametre kullanılmış ve tüm parametrelerin model içinde yer alması durumunda çizelge 5.10' da görüldüğü gibi %80,3 Rsq değerine ulaşılmıştır. Daha az parametre ile yüksek bir Rsq değeri kullanımı için 10 varyasyonlu formül çizelge 5.14 de görüldüğü üzere %78,7 Rsq değeri vermiştir.

19	79,9	X	X		X	X		X	X	X					X	X	X	X	X		X	X	X		
20	80	X	X		X	X		X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
20	80	X	X		X	X		X		X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
21	80,1	X		X	X	X		X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
21	80,1	X	X	X	X			X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
22	80,2	X	X	X	X	X		X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
22	80,2	X	X	X	X	X		X	X	X		X			X	X	X	X	X		X	X	X	X	
23	80,2	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
23	80,2	X	X	X	X	X		X	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
24	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
24	80,2	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
25	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
25	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
26	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
26	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
27	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
27	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
28	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
28	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
29	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
29	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
30	80,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Çizelge 5.11 de best subset modeli ve seçilebilecek varyasyonlar görülebilmektedir.

Çizelge 5.12 Çekme mukavemeti model formülü

ÇEKME MUK	=	18,01 + 446,5 TI + 81,5 NB + 0,02478 MFSFM1 + 0,04321 MFSFM5
		+ 18,63 CE- 1332 N - 1,071 Ti/N + 91,7 MO + 35,72 V + 0,02010 NbCN2 in Soln

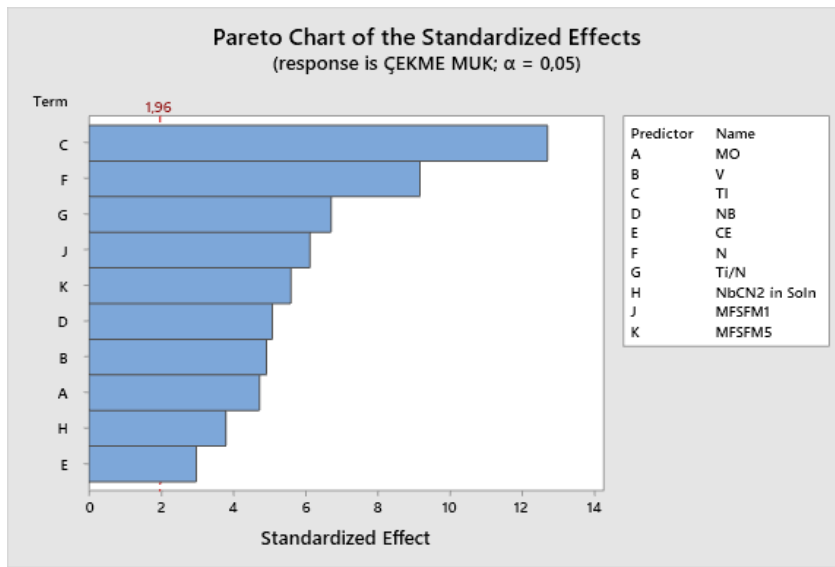
Çizelge 5.13 Çekme mukavemeti modeli parametre katsayıları ve p-value değerleri

Term	P-Value
Constant	0,000
TI	0,000
NB	0,000
MFSFM1	0,000
MFSFM5	0,000
CE	0,003
N	0,000
Ti/N	0,000
MO	0,000
V	0,000
NbCN2 in Soln	0,000

Çizelge 5.14 Çekme mukavemet model standart sapma ve r-sq

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,32269	78,69%	78,24%	77,68%

Çizelge 5.12, 5.13 ve 5.14' de çekme mukavemeti modeline ait formülasyon, formüle etki eden parametreler ve formülün R-sq değeri görülmektedir. Çizelge 5.14' de görüldüğü üzere standart sapma 1,32 olarak gerçekleşmiş olup R-sq değeri %78,69 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.11 Çekme mukavemet modeline etki eden parametre sıralaması

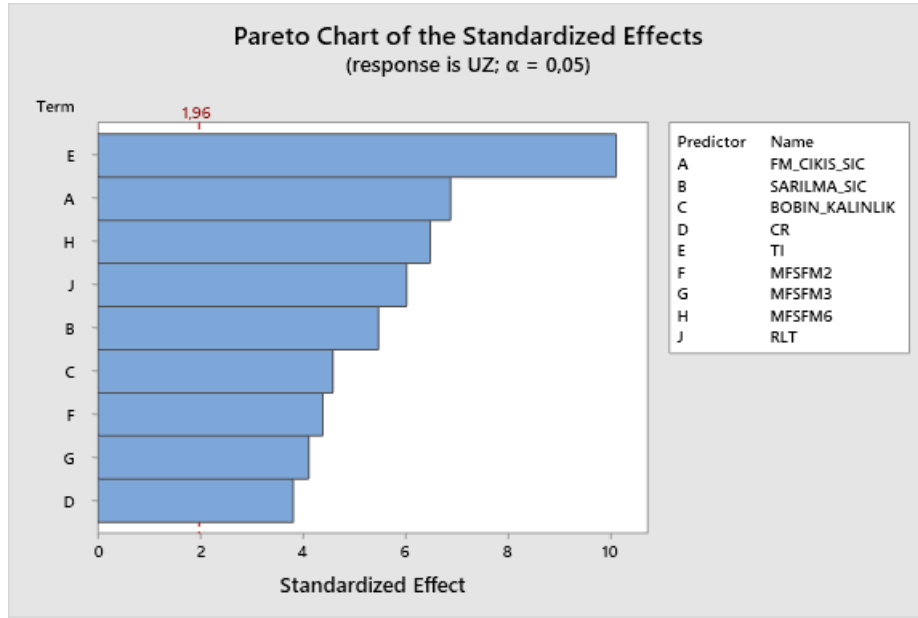
Şekil 5.11' de parametrelerin etki dereceleri görüldüğü gibi % uzama modellenmesine etki eden en önemli 3 parametre % Ti, % N ve Ti/N miktarıdır.

5.4.5. % Uzama değerinin modellenmesi

Mekanik özelliklerde önemli bir yere sahip olan uzama kabiliyetinin de istatistiksel olarak modellenmesi için best subset yöntemi kullanılmıştır. Çizelge 5.15' de görüldüğü gibi 30 farklı parametre ve varyasyon ile %79,1 R-sq değeri ile % uzama değeri modellenmiştir. Çizelge 5.15' de yine 10 varyasyonlu %76,5 R-sq değeri olan model seçilerek formül oluşturulmaya çalışılmıştır.

Çizelge 5.18 % Uzama model standart sapma ve r-sq değeri

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,64648	75,94%	75,48%	74,73%



Şekil 5.12 % Uzama modeline etki eden parametre sıralaması

Şekil 5.12’da parametrelerin etki derecelerinde görüldüğü gibi % uzama modellemesine etki eden en önemli 3 parametre % Ti, FM Çıkış Sıcaklığı ve MFSM6 yani son pasodaki ezme miktarıdır.

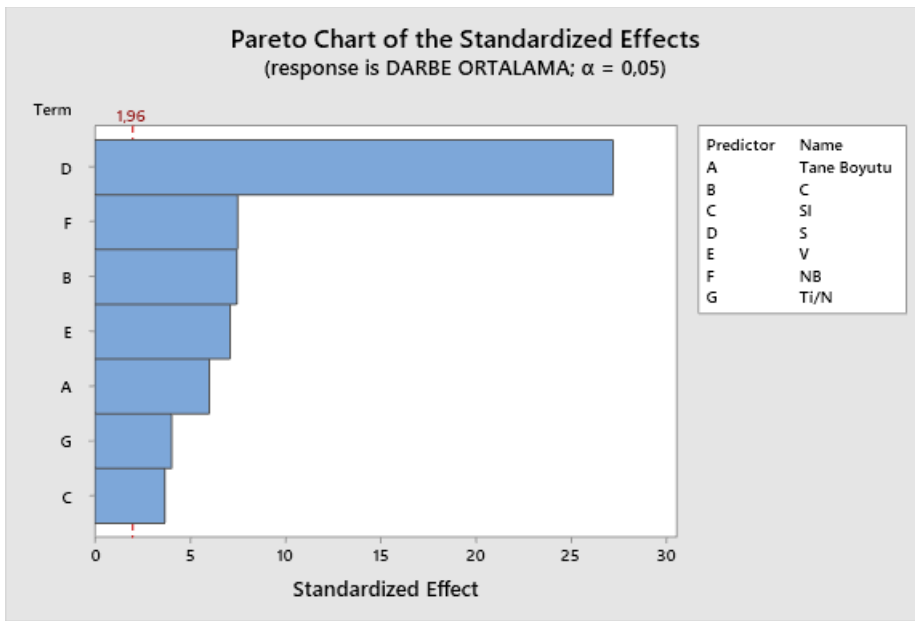
5.4.6. Çentik darbe enerjisinin modellenmesi

Ardından benzer şekilde çentik darbe enerjisinin de etki eden parametreler bulunabilmesi için best subset analizi yapılmıştır. Modelleme çalışması için 7 varyasyonlu ve R-sq değeri 73,7 olan satır seçilmiştir. Modelin seçiminde Rsq değerinin yüksek olması ile birlikte metalürjik olarak sonuca etki eden parametrelerin varlığına göre seçim yapılmıştır. Darbe enerjisi için çıkartılan test çalışmaları bobinlerinden genişliklerinin $\frac{1}{4}$ üne denk gelecek yerinden çıkartılarak kesilmiştir. Tüm bobinler için kesim noktaları benzerdir.

Çizelge 5.19 Çentik darbe model best subset raporu

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
26,5852	73,70%	73,31%	72,79%

Çizelge 5.20, 5.21 ve 5.22 da çentik darbe modeline ait ilgili modellenmiş formül ile birlikte formülde yer alan parametreler ve modele ait R-sq değeri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere tüm parametrelerde p-value değeri 0,05 altında olup verilerin bir anlam içerdiği söylenebilmektedir. Yani veriler bu denklem ve modelleme için alakalı olduğu istatistiki olarak yorumlanabilmektedir.



Şekil 5.13 Çentik darbe modeli etkili parametreler sıralaması

Şekil 5.13' da parametrelerin etki derecelendirmesinde görüldüğü gibi % uzama modellemesine etki eden en önemli 3 parametre % S, % Nb ve % C değeridir.

5.5. Optimizasyon (Response Optimizer)

Akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve çentik darbe enerjisinin ayrı ayrı modellenmesi sonrası bu üç farklı modelden bir tasarım yapılmak istenmiştir. Buradaki amaç malzemeden hem maksimum mukavemet değerini elde ederken buna uygun olarak ta maksimum darbe enerjisini elde etmektir. Bu nedenle mukavemetin çok yüksek değerler çıkması durumunda darbe-kırılma enerjisi düşebilecektir. Bu nedenle malzemeden optimum özelliklerin sağlanması gerekmektedir. Burada da minitabın optimize özelliği kullanılarak akma-çekme

mukavemetinin en iyi olduğu ve çentik darbe de de istenen özelliklere ulaşılabilecek veriler öngörülme çalışılmıştır.

Response Optimization: DARBE ORTALAMA; ÇEKME MUK; AKMA MUK

Results created in Minitab 18 or earlier are not updated if you make changes to the worksheet.

Response	Fit	SE Fit
DARBE ORTALAMA	311,2	12,2
ÇEKME MUK	62,001	0,669
AKMA MUK	52,997	0,569

Response Optimizer

Optimize up to 25 responses:

Response	Goal	Target
DARBE ORTALAMA	Do not optimize	
ÇEKME MUK	Do not optimize	
AKMA MUK	Do not optimize	

Response Optimizer: View Model

Model type: Regression

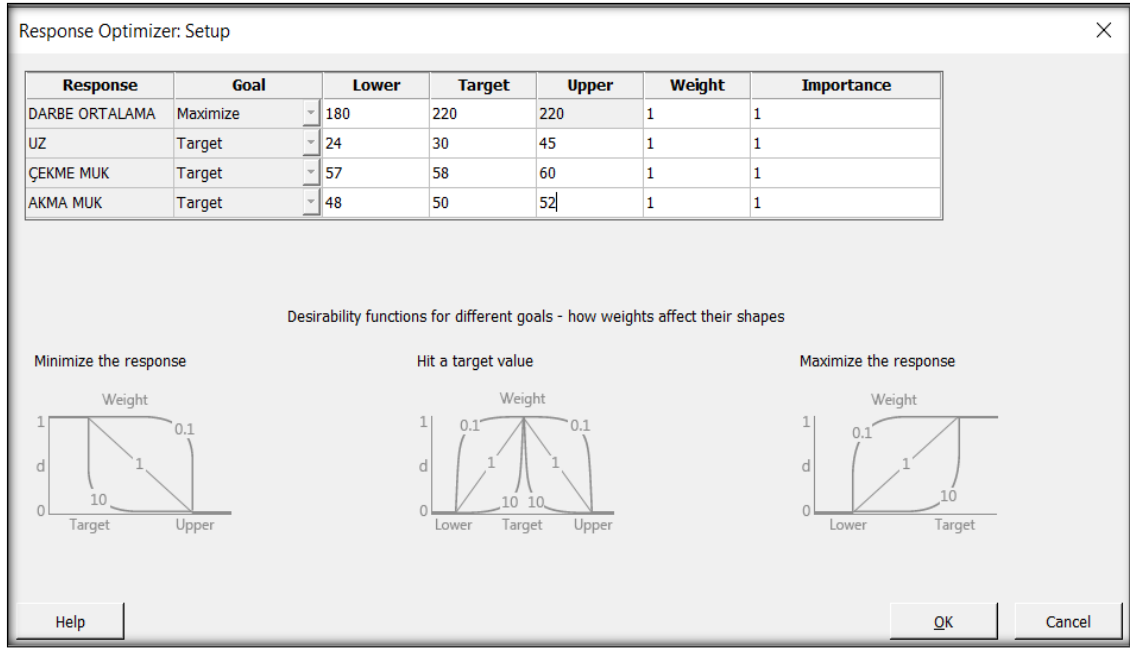
Response: AKMA MUK

Terms: DUSLU_MASA_SOGUMA_HIZ MN MO TI N NB BOBIN_KALINLIK

Model status: The model uses the current data.

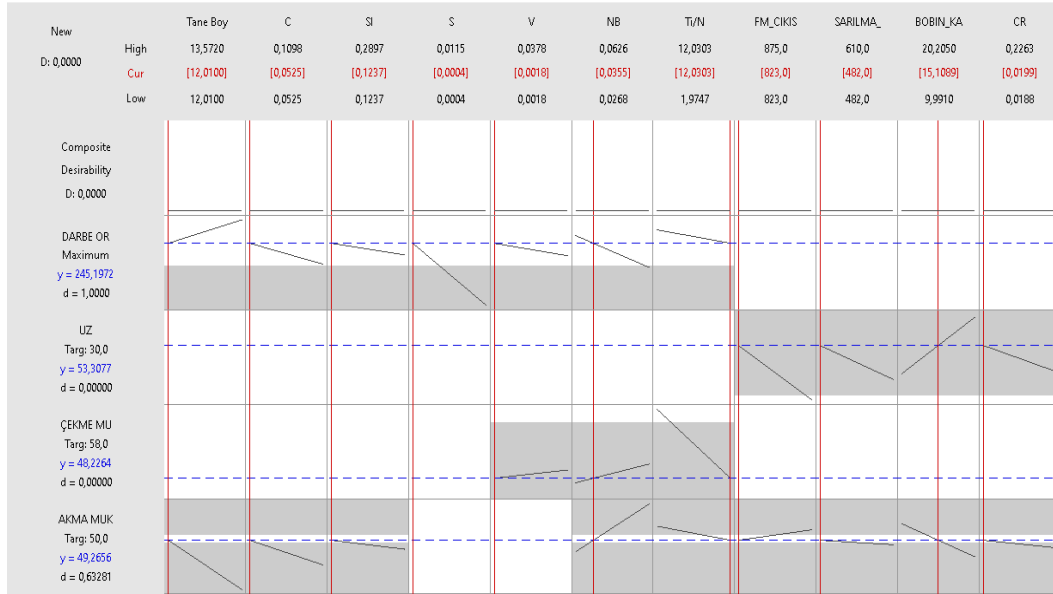
Resim 5.6 Response optimizasyon ayarları ekranı

Resim 5.6’ da Minitab 19 programında kullanılan Response Optimizer modülüne ait ana ekran görüntüsü yer almaktadır. Görüldüğü üzere daha önce yapılan akma, çekme ve çentik darbe modeli kullanılarak bir ortak optimizasyon çalışması yapılabilmektedir. Sonuç olarak ise akma, çekme ve darbe için oluşturulan modellerdeki parametrelerin tamamının olduğu bir grafiksel istatistiksel çalışma elde edilmiştir. “Response Optimizer” yöntemi kullanılan çalışmada aşağıdaki sonuçta da görülebildiği üzere akma, çekme ve darbeye girilen hedef değerler ile kullanılması gereken parametreler otomatik olarak belirlenebilmektedir. Aynı zamanda parametrelerde yapılan değişiklikler ile elde edilecek sonuçtaki akma, çekme ve darbe enerjisi de öngörülebilmektedir. Belirlenen bir kalitede istenen mekanik özellikleri öngörerek bu değerler için kullanılması gereken parametreler belirlenebilmektedir. Bu çalışmada da X65 kalite petrol boru çeliğinde istenene mekanik özellikler için optimum akma, çekme ve çentik darbe enerjisi seçilerek çalışma tamamlanmıştır. Bu kapsamda hedeflenen mekanik özellikler standartlarda göz önüne alınarak şu şekilde seçilmiştir. Bu çalışmada amacımız hedeflenen akma, çekme ve uzama değerinde en yüksek darbe enerjisini yakalamak olduğundan darbe enerjisi maksimize edilerek seçilmiştir.



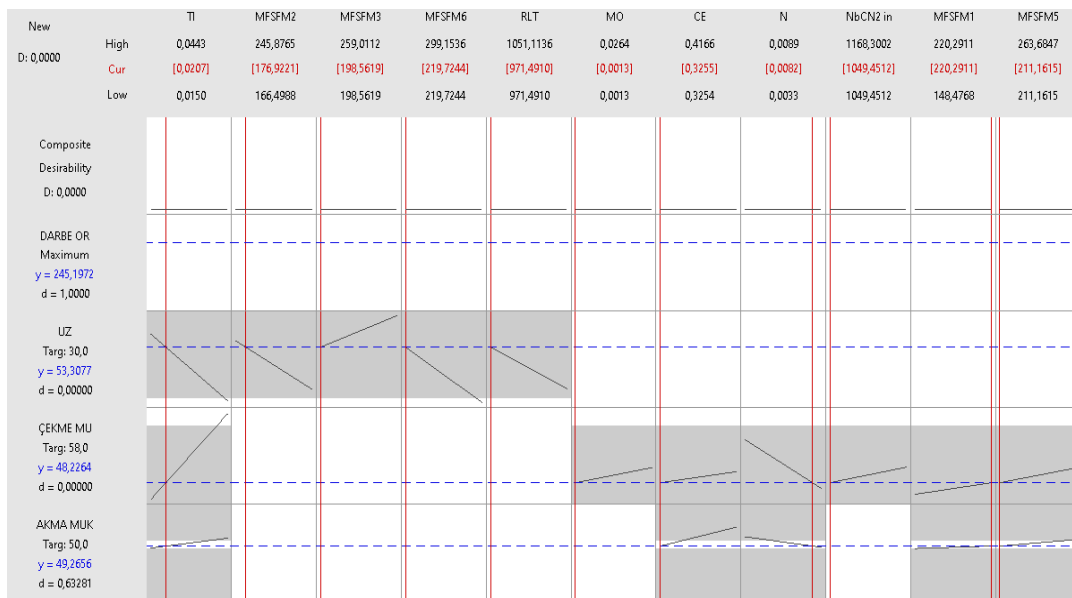
Resim 5.7 Modele ait hedef giriş ekranı

Bu kapsamda ise resim 5.7' de her modele ait hedeflenen değerler ilgili alt, üst, hedef hücrelerine yazılmıştır. Gerçekleştirilen modeller sonunda elimizde farklı 4 adet mekanik özelliklere ait model elde edilmiştir. Akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama değeri ve çentik darbe enerjisi modellenmiş olup bu 4 modelin birbiri içerisindeki uyumu kullanılarak bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Minitab 19 yazılımında bu optimizasyonu yaparken elde edilmek istenen model sonucuna göre hedef değerler verilmekte ve bu değerleri elde etmek adına ihtiyaç duyulacak parametreler grafik üzerinden gösterilmektedir. Akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama ve çentik darbe enerjisine standart limitler de göz önüne alınarak hedef değerler yukarıdaki resim 5.7' de girilmiştir. Sonrasında ise optimizasyon çalıştırıldığında hangi parametre ile sonucun hangi yönde değiştirildiğine ait Minitab 19 yazılımda grafiksel sonuç ortaya çıkmıştır. Aşağıdaki grafiklerden görüldüğü üzere her parametrenin oluşturulan bu 4 model üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Her kutucuk içerisindeki eğim çizgisi o parametrenin ilgili model üzerindeki etkisini göstermektedir. Eğitimin yönü ve ivmesi model üzerindeki etki derecesi ve modele olumlu ve olumsuz etkisi olarak değerlendirilmektedir. Örnek olarak parametreler içerisinde bulunan ilk sıradaki tane boyutu arttıkça darbe enerjisi artmakta buna rağmen çekme mukavemeti ve % uzamaya etkisi bulunmamaktadır. Optimizasyonda seçilen limit değerler dışında kalan bölgeler aşağıdaki grafiklerde gri alan olarak gösterilmiştir. Bu nedenle bu alandaki eğim çizgileri feaseble (uygun) değerde kullanılmaması gerekmektedir.



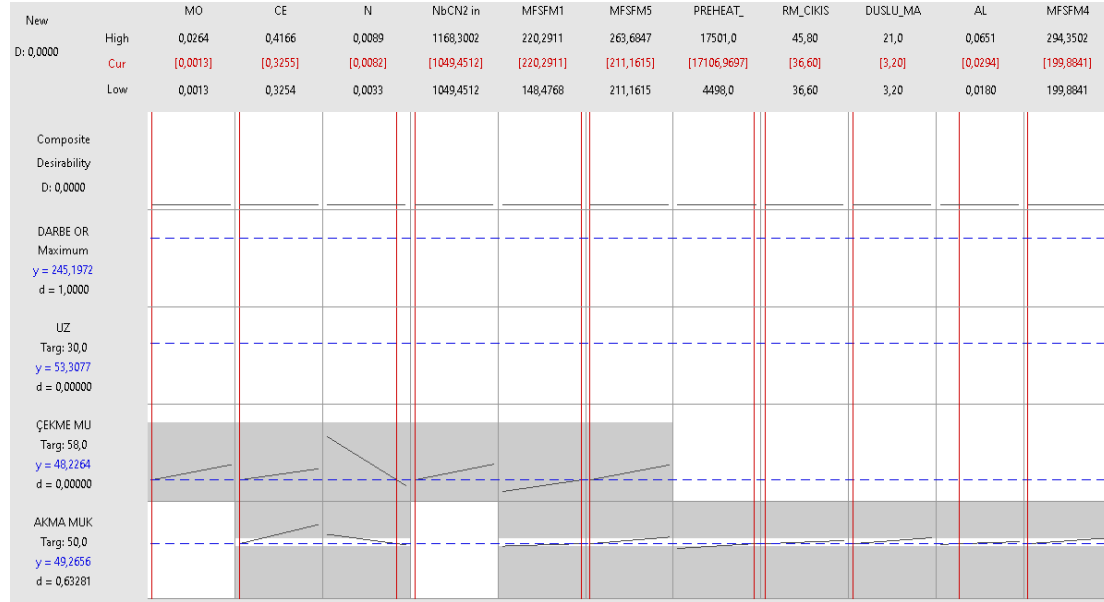
Şekil 5.14 Tane boyutu ve kimyasal analiz ilişkisi response optimizer raporu

Şekil 5.14'de görüldüğü üzere çentik darbe enerjisi ve tane boyutu arasında doğrusal bir orantı bulunmaktadır. Tane boyutunun artması yani tanelerin küçülmesi ile çentik darbe enerjisine olumlu etkisi bulunmaktadır. Buna karşın C, Si, S, V, Nb ve Ti/N değerlerinin artması ile çentik darbe enerjisi düşmektedir. Özellikle grafiğin eğiminden de görüleceği üzere S (kükürt) değeri arttıkça darbe enerjisi yüksek şekilde düşürmektedir.



Şekil 5.15 Analiz ve hadde parametreleri arası ilişkisi response optimizer raporu

Şekil 5.15 'de hedeflenen değerler içinde ilgili parametrelerin etkili olmadığı koyu gri alandan dolayı anlaşılmaktadır. Buna karşın grafiklerdeki eğik çizgilerin eğimi ve yönü ile ilgili modele olan etkisi görülebilmektedir. Titanyum değeri artışı çentik darbe enerjisine etki etmese de % uzamayı düşürmekte ve akma-çekme mukavemetini artırmaktadır.



Şekil 5.16 Analiz, çökelti ilişkisini gösteren response optimizer raporu

Şekil 5.16' de yine ilgili parametreler modellerdeki hedef içinde kalan değerlere etki etmese de genel anlamda akma mukavemetine çok az etki etmekte olup azot (N) değerinin çekme mukavemetine olumsuz etkisi görülebilmektedir.

Çizelge 5.23 Optimizer sonucu tasarlanan üretim pratiği

Variable	Setting
Tane Boyutu	12,01
C	0,0525
SI	0,1237
S	0,0004
V	0,001803
NB	0,0354618
Ti/N	12,0303
FM_CIKIS_SIC	823
SARILMA_SIC	482
BOBIN_KALINLIK	15,1089
CR	0,0198842
TI	0,0207456
MFSFM2	176,922

MFSFM3	198,562
MFSFM6	219,724
RLT	971,491
MO	0,001307
CE	0,325547
N	0,008243
NbCN2 in Soln	1049,45
MFSFM1	220,291
MFSFM5	211,161
PREHEAT_ZONE_TIME	17107
RM_CIKIS_KAL	36,6
DUSLU_MASA_SOĞUMA_HIZ	3,2
AL	0,029446
MFSFM4	199,884

Çizelge 5.23’ de response optimizer sonrası hedeflenen çelik tasarımı elde edilmiştir. Response optimizer ile istenen akma, çekme, % uzama ve çentik darbe enerjisine ulaşmak için kullanılması gereken çelik tasarımı gösterilmiştir.

5.6. İstatistiki Sonuçların Yorumlanması

İstatistiksel veri analizi sonuçlarının metalürjik bilgilerle de doğrulanması adına elde edilen grafiksel verilerin yorumlanması büyük önem arz etmektedir. Her ne kadar istatistiksel veri var olan büyük data içerisinde anlamlı bir sonuç oluştursa da metalürjik bilgi ile eşleşmeme durumu olabilir. Sırayla elde edilen parametreleri yorumlamak gerekir ise;

Çizelge 5.24 Sonuç tasarımı raporu

Tane Boyutu	%C	%SI	%S	%V	%NB	Ti/N	Şerit Hadde Çıkış Sıcaklığı		
12,0	0,052	0,12	0,0004	0,001	0,027	12,0	823		
Sarılma Sıcaklığı	Bobin Kalınlığı		CR	TI	MFSFM2		MFS FM3	MFS FM6	RLT
610	9,9		0,22	0,044	176,9		198,5	219,7	971,4
MO	CE	N	NbCN2 in Soln	MFS FM1	MFS FM5		Ön Tavlama Süresi		
0,001	0,32	0,0082	1049	220	211,1		17107,0		
Rm Çıkış Kalınlığı		Duşlu Masa Soğutma Hızı			%Al	MFSFM 4	DARBE	UZ	Çekme Muk.

36,6	3,2	0,018	199,884	264,873	30,0176	58
Akma Mukavemeti	Composite Desirability					
50	0,99					

Minitab19 istatistiksel veri inceleme programında yapılan analiz sonrası elde edilen sonuçta hedeflenen mekanik özelliklere yönelik çizelge 5.24' de parametreler belirlenmiştir. Sonuç olarak çizelge 5.24' de belirtilen ve Minitab' da Response Optimizer sonucunda tane boyutunun 12,01G olarak hedeflendiği, % karbon değerinin 0,0525, % Si 0,1237, % S minimum ve bunun gibi parametrelerin hedeflendiği durumda akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama ve çentik darbe enerjisinde istenen değerlerin elde edilebileceği görülmektedir.

KÜKÜRT (%S); Kükürt değişimi ile çentik darbe enerjisi çok doğru bir orantı ile değişmektedir. Şekil 5.14' de görüldüğü gibi parametreler içerisinde eğimi en yüksek çizgi grafikte görülmektedir. Buda literatür ile eşleşmekte olup malzeme içerisindeki kükürt oranı arttıkça çentik darbe enerjisi azalmaktadır.

KARBON (%C); Şekil 5.14' de çizgi yönü ve eğimden görüldüğü üzere karbon değeri arttıkça çentik darbe enerjisi düşmektedir. Buda mikro yapı içerisinde bulunan perlit oranının artması nedeniyle daha sert bir yapının elde edilmesi ve tokluğun düşmesi şeklinde yorumlanabilmektedir. Bu nedenle yapılacak üretimlerde karbon değerinin %0,05 gibi en düşük değerlerde hedeflenmesi gerekmektedir. Bu aşamada malzeme kullanılan ferro alaşımların fazla olmasından dolayı ve mangan değeri içindeki karbon bulunması nedeniyle çeliğe karbon eklenmese de ferro alaşımlar içerisinde bir miktar geçeceği düşünülmektedir. Bu nedenle %0,05 gibi bir limite ulaşmak hem zor hem de düşük karbon içeren ferro alaşımlar kullanılması nedeniyle maliyetli olabilmektedir.

SİLİSYUM (%Si); Silisyum alaşımı malzeme içerisinde bulunan bir deoksidan malzemedir. Grafikten de görüldüğü gibi %C a benzer şekilde artması durumunda mukavemet artırıcı özelliğinden dolayı malzeme tokluğu düşürmektedir. Bu nedenle yapılacak üretimlerde %Si değerinin alt limite yakın tutulması gerekmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken durum ise sıvı çelik üretiminde ferro silis ile düşürülen deoksidasyon eksikliğinin alüminyum veya diğer deoksidant malzemeler ile dengelenmesi gerekliliğidir.

VANADYUM (%V); Vanadyum alaşımı bilindiği üzere yüksek sıcaklıklarda oluşan çökelti sertleşmesi özelliği ile malzemede mukavemet artırıcı özelliğe sahiptir. VC oluşumları malzeme sertliği artırıcı özellikte olması nedeniyle tokluğun düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle de grafikte yönü aşağı doğru olması nedeniyle tokluğa olumsuz yönde etki ettiği düşünölmektedir. Bu nedenle yapılacak ilave üretimlerde vanadyum alaşımı kullanılmaması gerektiği yorumlanmıştır.

NİYOBYUM (%Nb); Niyobyum elementi bilindiği üzere mikro yapıda tane küçölmesi etkisi ile malzeme sertliğinin artmasına katkı sağlayan ana alaşım elementlerinden bir tanesidir. Sonuç raporunda da belirli bir noktaya kadar tokluğu artırdığı fakat sonrasında sertliğe olan etkisi nedeniyle tokluğu olumsuz yönde etkilediği görölmektedir. Bu nedenle kullanılması gereken %Nb aralığının 0,0268-0,0355 değerleri içerisinde olması gerekmektedir.

TİTANYUM/AZOT (%Ti/N); Titanyum elementi yüksek bir deoksidant malzeme olması ve ayrıca azota karşı afinitesi yüksek olması nedeniyle güçlü bir azot bağlayıcıdır. Ti/N değerinin artması ile de çelik iğerisinde bulunan azot varlığının olumsuz etkisini giderebilmektedir. Bu nedenle literatürde de stokiometrik eşitlikte düşünölerek Ti/N değerinin en az 3,4 olması gerektiği belirtilmektedir. Sonuç grafiğinde de Ti/N oranı düşükten yükseğe gittikçe sertlik ve tokluğu olumsuz olarak etki ettiği görölmektedir. Stokiyometrik orana yakın sečilten titanyum ilavesi [% Ti = 3.42 x % N] Nispeten yüksek sıcaklıklarda nitrojen ile birleştiği için ek fayda sağlar. (Hulka ve diğerleri, 1990:90)

TANE BOYUTU; Tane boyutu malzeme içerisinde küçöldükçe mekanik özellikler iyileşmektedir. Bunu literatür çalışmaları da desteklemektedir. Mevcut veri havuzumuzda da tane boyutu 12 ile 13,5 G (G; ASTM standardında ölçüm sonucuna karşılık gelen tane boyutu numarasıdır) arasında değişmektedir. Elde edilen optimizasyonda 12'den 13,5'a gittikçe çentik darbe enerjisinin arttığını fakat akma, çekme, uzama gibi değerlerden değişim yaratmadığını göstermektedir.

5.7. İstatistiksel Veri İncelemesi Sonrası Çelik Tasarımı

Bu sonuçlar ışığında aşağıdaki çizelge 5.25’ de yer alan çelik tasarımı düşünülerek hedeflenen çelik üretimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen mamul üzerinde gerekli mekanik testler (çekme testi, darbe testi, dwtt) yapılmıştır. Hedeflenen çelik tasarımı;

Çizelge 5.25 Deneme üretim yapılacak çelik tasarımı

Parametre	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Açıklama
Tane Boyutu	12,01	12,01	13,57	En düşük limit hedeflenecektir
%C	0,0525	0,0525	0,080	En düşük limit hedeflenecektir
%SI	0,1237	0,1237	0,15	En düşük limit hedeflenecektir
%S	0,0004	0,0004	0,005	En düşük limit hedeflenecektir
%V	0,001803	0,001803	0,005	En düşük limit hedeflenecektir
%NB	0,0354618	0,0268	0,0355	Aralık hedef
Ti/N	12,0303	1,97	3,4	En düşük limit hedeflenecektir

Çizelge 5.25’ den de görüldüğü üzere genel olarak Nb, Ti, Si, S ve karbon içeriğinin önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Diğer proses parametreleri malzeme içerisinde akma, çekme, uzama ve darbe gibi değerlere olumlu ya da olumsuz etki etse de hedeflenen mekanik özellikler aralığında birbirini etkileyecek boyutta fark yaratmadığı görülebilmektedir. Buna rağmen özellikle çok yüksek kalınlık ve mukavemet ihtiyaçlarında MFS gibi sıcak haddeleme sıcaklıkları gibi değerlerin mikro yapıda farklı etkileri olduğu bilinmektedir. Burada unutulmaması gereken elde edilen sonucun mevcut tesise ait sonuçların yorumlanması ile oluştuğudur. Farklı tesislerde elde edilen mekanik özelliklerin Minitab yazılımı ile benzer şekilde yorumlanması ile farklı bir *“response optimizer”* sonucu doğurabilecektir.

5.8. Deneme Döküm

Tasarlanan kimyasal analiz ve parametrelere uygun olarak üretim bazik oksijen fırınında başlamış, pota ocağı ve sonrasında slab döküm makinasında sonlanmıştır. Üretim aşamasında nihai çelik özelliklerinin sağlanabilmesi adına çelik temizliği için parametreler ön planda tutulmuştur. Bu kapsamda 34,5 ton olacak şekilde temiz hurda kullanılmıştır.

5.8.1. Deneme dökümün gerçekleştirilmesi

Çizelge 5.26’ da döküme ait kükürt giderme tesisi öncesi ve sonrası (CDSO-CDSS), konverter (KV), pota ocağı (LF) ve slab makinası (SM) noktalarında alınan kimyasal analiz sonuçları bulunmaktadır. Kimyasal analizler optik spektrometre cihazında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.26 Döküme ait tüm analizler

Analiz Yeri	C	Mn	Si	S	P	Al	Cu	Ni	Cr	N	Ti	V	Nb
CDSO-1	4,45	0,35	0,26	0,1205	0,082	0,003	0,00	0,02	0,01	0,0000	0,018	0,014	0,000
CDSS-1	4,34	0,35	0,24	0,0044	0,086	0,003	0,01	0,03	0,02	0,0000	0,017	0,014	0,000
KV2-1	0,75	0,27	0,00	0,0281	0,033	0,197	0,05	0,05	0,04	0,0018	0,000	0,006	0,001
KV2-2	0,04	0,10	0,00	0,0183	0,008	0,220	0,05	0,05	0,02	0,0020	0,000	0,000	0,002
LF12-1	0,06	1,31	0,09	0,0125	0,012	0,058	0,05	0,05	0,03	0,0042	0,001	0,004	0,032
LF12-2	0,07	1,52	0,13	0,0044	0,013	0,052	0,05	0,05	0,03	0,0051	0,015	0,005	0,034
LF12-3	0,07	1,52	0,13	0,0022	0,012	0,040	0,05	0,05	0,03	0,0046	0,014	0,005	0,037
SM1-1	0,08	1,55	0,15	0,0024	0,013	0,037	0,05	0,05	0,03	0,0063	0,016	0,004	0,039
SM1-2	0,08	1,55	0,14	0,0024	0,013	0,037	0,05	0,05	0,03	0,0056	0,014	0,004	0,038

Pota ocağında temiz çelik üretimine yönelik kükürt giderimi etkin yapılmış ve sonrasında inklüzyon modifikasyonu amacıyla kalsiyum tel uygulaması yapılarak etkin şekilde yumuşak yüzdürme (soft bubbling) gerçekleştirilmiştir. Sürekli döküm aşamasında segregasyonu en aza indirmek amaçlı olarak süper ısı (superheat) sıcaklığı likidüs sıcaklığının +35°C üzerinde hedeflenmiştir. Belirlenen hedef kimyasal analize göre likidüs (katılma) sıcaklığı 1521 °C olup tandište ölçülen ortalama sıcaklıklar 1558 °C olarak gerçekleşmiştir. Döküm hızı 0,9 ile 1,0 m/dak olacak şekilde segregasyonu minimize etmek amaçlı sınırlandırılmıştır.

5.8.2. Döküm sonuçları

Belirlenen hedef kimyasal analizler ile deneme döküm üretilmiş olup deneme sonucuna ait Optic Emisyon Spektrometresi (OES) cihazında yapılan kimyasal analiz sonuçları aşağıdaki şekilde seviye 4 sistemi raporunda gözükmemektedir. Deneme döküm 200 tonluk konverter ve potalarda üretilmiş olup üretilen sıvı çelik tonajı 220 ton olarak gerçekleşmiştir. Döküme seviye 3 sistemi üzerinden “Deneme Mukavemet” kodu verilmiş ve sistemden otomatik olarak sonuçları takip edilmiştir.

6	19229243120200	2	10.100	1.590	1.9066_40	Deneme Mukavemet
7	19229243120300	2	10.100	1.590	1.9066_40	Deneme Mukavemet
8	19229243120400	2	9.800	1.500	1.3252_40	Deneme Mukavemet

Sonraki aşamada hedeflenen parametreler ile üretilen slabların haddelenmesi ile elde edilmek istenen mukavemet limitlerine ulaşıp ulaşılamadığı görülmek istenmiştir. Bu aşamada 2 farklı tarihte haddelenme denemeleri gerçekleştirilmiştir. İlk deneme sonrasında elde edilen veriler sonrasında doğrulama yani tekrarlanabilirliği görmek amaçlı 2. Denemeye tabi tutulmuştur. İlk deneme sırasında 4 adet slab haddelenmiş olup bu slabların haddelenmesi ile 17,3 mm kalınlığında bobin üretilmiştir. Üretilen bobinlerden standartlar çerçevesinde çekme testi, çentik darbe testi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.28’ de 19229243 nolu döküme ait 1. Denemede gerçekleştirilen testlere ait çentik darbe test sonuçları ile birlikte çekme test sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 5.28 Deneme slabların üretim sonrası test sonuçları

Bobin No	KALINLIK (mm)	AKMA MUK. (kg/mm ²)	ÇEKME MUK. (kg/mm ²)	UZ. (%)	NUMUNE ÖLÇÜLERİ (mm)	SICAKLIK	Darbe Enerjisi
21962915300000	17,3	47,0	59,0	42	10X55X10	0	246
21962915300000					10X55X10	-20	224
21962915300000					10X55X10	-40	176
21962915300000					10X55X10	-50	140
21962915300000					10X55X10	-60	148
21962915400000	17,3	48,0	58,5	45	10X55X10	0	246
21962915400000					10X55X10	-20	228
21962915400000					10X55X10	-40	214
21962915400000					10X55X10	-50	191
21962915400000					10X55X10	-60	189
21962915500000	17,2	47,4	59,9	40	10X55X10	0	234
21962915500000					10X55X10	-20	219
21962915500000					10X55X10	-40	184
21962915500000					10X55X10	-50	129
21962915500000					10X55X10	-60	86
21962915600000	17,2	48,6	61,0	39	10X55X10	0	236
21962915600000					10X55X10	-20	211
21962915600000					10X55X10	-40	133
21962915600000					10X55X10	-50	106
21962915600000					10X55X10	-60	59

Çizelge 5.28’den de görüldüğü üzere ilk etapta 4 adet slab 17,3 mm kalınlığa haddelenmiştir. Haddelenen 4 adet bobin stok sahasına alınmış ve numune alınması için soğuması beklenmiştir. 4 gün sonunda ise bobinlerin baş kısmından yaklaşık 1000 mm uzunluğunda parçalar kesilerek test atölyesine gönderilmiştir. 1000 mm uzunluğundaki plakalardan ürün

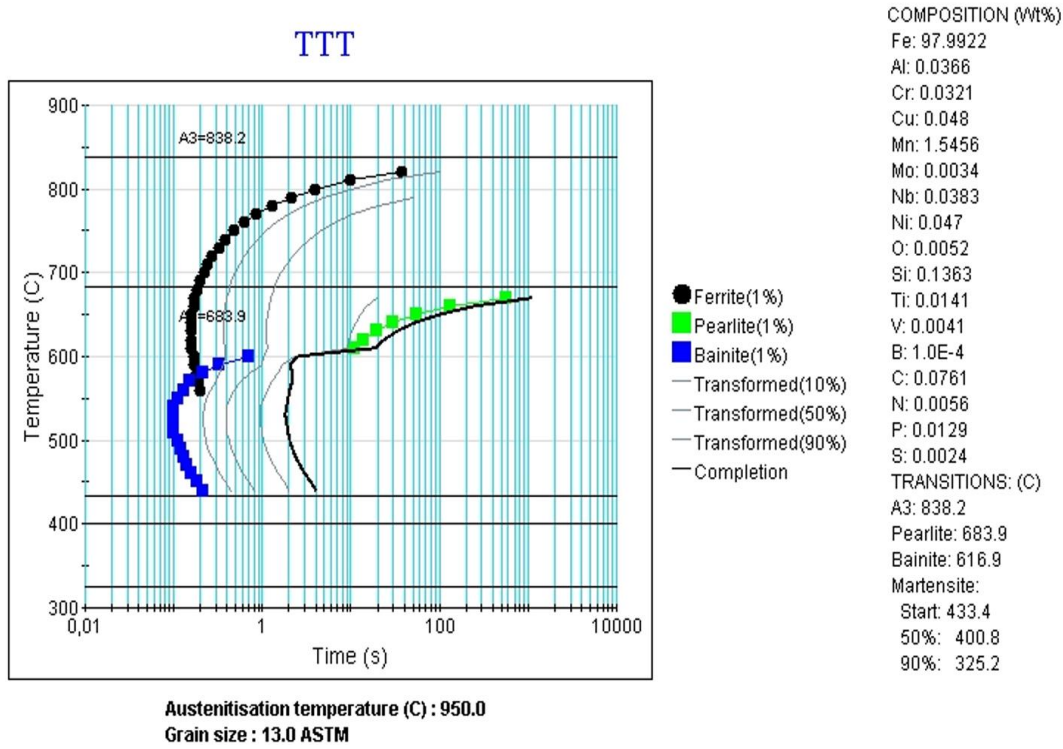
standardına bağılı olarak talep edilen ölçülerde çekme test çubuğu, darbe test numunesi ve DWTT test numunesi için parçalar çıkartılmıştır. Parçaların çıkartılması esnasında numune hazırlama atölyesinde giyotin makas, testere, cnc tezgâh, taşlama tezgâhı ve çapak alma zımparası kullanılmıştır.

Çizelge 5.29 Kullanılan numune hazırlama ekipmanları

Numune Hazırlama Cihazı	Özellikleri ve Amacı
	<p>ERMaksan CNC HVR3100-30 HİDROLİK GİYOTİN MAKAS Yassı mamul numunelerini belli ebatlarda kaba kesim yapar. Kesilen numuneler freze tezgahlarında standartları belirttiği ebat ve şekillerde işlenir. Giyotin tezgâhında yassı numunelerin kesilerek işleme alınması esasına dayalı olarak hidrolik basınç ile çalışan tezgâhtır. 0,5mm-30 mm kalınlık arasındaki yassı numuneler kesilir.</p>
	<p>MVC- 1000 CNC DİK İŞLEM TEZGAHI CNC dik işlem tezgâhı genellikle yassı mamul numunelerinin çekme testine numune hazırlama işleminde kullanılmaktadır.</p>
	<p>1972 MODEL SATİH TAŞLAMA TEZGAHI Çentik darbe numunelerinin yüzey taşlama işleminde kullanılmaktadır.</p>

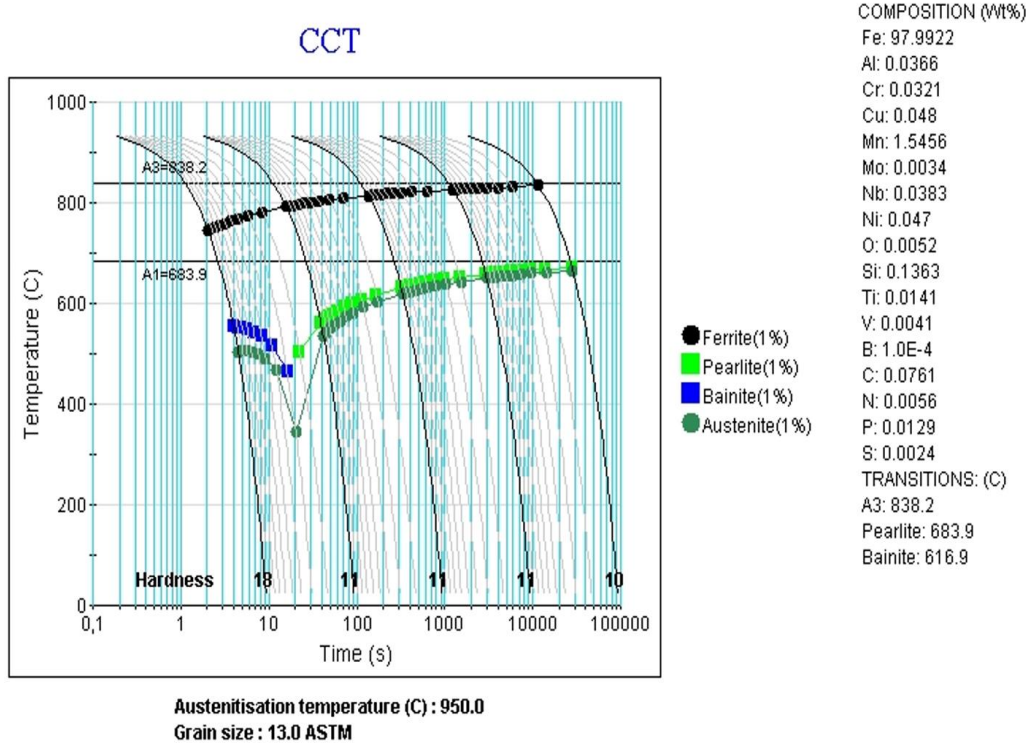
	<p>ŞERİT TESTERE TEZGAHI Numunelerin kaba kesim sonrası istenen ebata yakın hale getirilmesi amacıyla kesici tezgâh olarak kullanılmaktadır.</p>
	<p>KAĞIT BANTLI ZIMPARALAMA MAKİNASI Numunelerin kesimleri sonrası kenarlarında oluşan çapakların giderilmesi amacıyla kullanılmaktadır.</p>

Gerçekleşmiş döküm analiz ve üretim parametreleri üzerinden FactSage programı üzerinden CCT ve TTT diyagramları çıkartılmıştır. Nihai elde edilen mikro yapı kıyaslaması için kullanılmıştır. Şekil 5.17' de TTT diyagramı ve Şekil 5.18' de CCT diyagramı görülebilmektedir.



Şekil 5.17 Deneme döküme ait ttt diyagramı

CCT ve TTT diyagramları, oluşturulmak istenen mikro yapının gelişimini anlamak için uygun bir yöntemdir. API X65 çeliği için CCT ve TTT diyagramları JMAT PRO ile çıkarılmıştır. Şekil 5.17' de farklı soğutma oranlarındaki zamana ve sıcaklığa bağlı değişimdeki mikro yapı oluşumları gösterilmiştir. Siyah nokta ile başlayan alan ferrit oluşum bölgesini, mavi kare ile başlayan alan beynit oluşum bölgesini ve yeşil kare ile başlayan alan perlit oluşum bölgesini göstermektedir. Ferrit, perlit, beynit ve martensit için dönüşüm başlangıç sıcaklıkları, kimyasal bileşim kullanılarak JMatPro yazılımı ile belirlenmiş olup bu çalışmada, martensit başlangıç sıcaklığının 433 °C olduğu ve martensit bitiş sıcaklığının 325 °C altında olduğu şekil 5.18'den görülebilmektedir. Yine şekil 5.18' de görüldüğü üzere yavaş ve orta soğutma koşulunda dönüşüm ferrit bölgesinde başlayacağı ve beynitik bölgeye gelmeden tamamlanacağı görülebilmektedir.

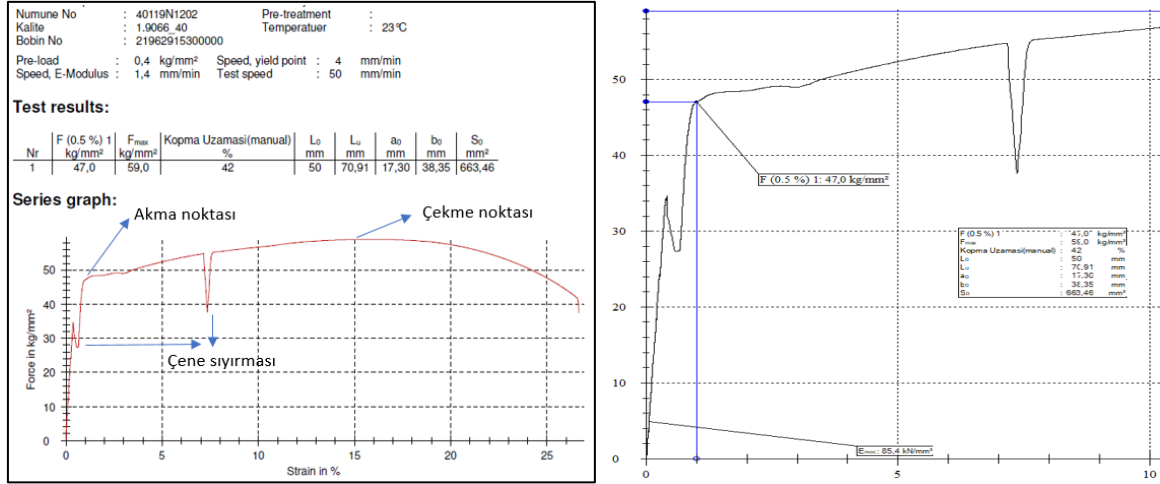


Şekil 5.18 Deneme döküme ait cct diyagramı

Şekil 5.18 'de, üretimi gerçekleştiren döküm analiz ve sıcaklıkları ile hazırlanan CCT diyagramında görüldüğü üzere büyük soğutma hızlarında ve 616,9 °C de beynit oluşumunun oluşmaya başladığı görülebilmektedir. Mevcut sarılma sıcaklığı ve nihai tane boyutu dikkate alındığında mikro yapının büyük oranda ferrit içereceği öngörülmektedir.

5.8.3. Çekme testleri

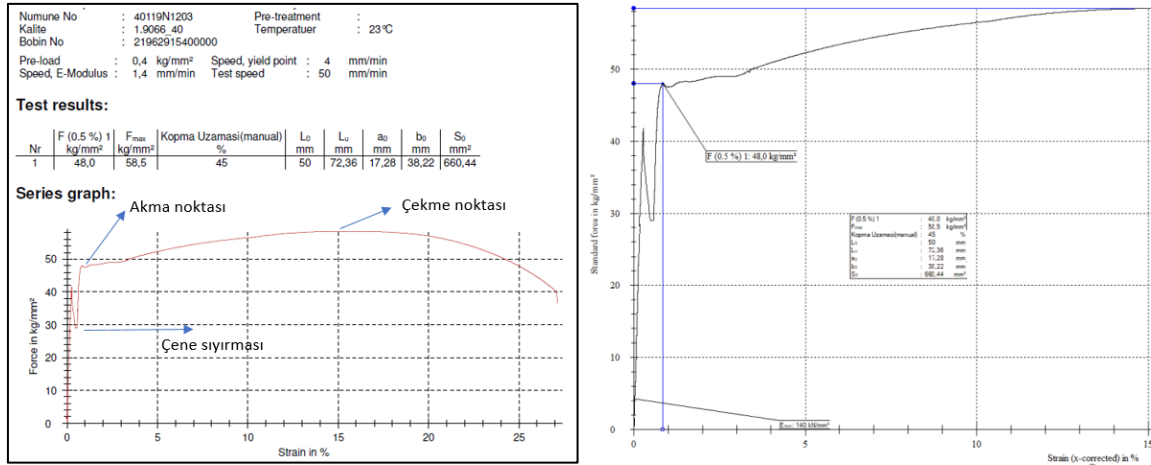
Çekme testleri 1000 mm lik plakaların $\frac{1}{4}$ üne denk gelecek bölgesinden enine olacak şekilde çıkartılmıştır. Kemik şeklinde numuneler CNC tezgâhı ile hazırlanarak test için laboratuvara teslim edilmiştir. Çekme testleri Zwick marka 600 kN kapasiteli Alman menşeli çekme test cihazında yapılmış olup testXpert II yazılımından alınan çekme test raporları aşağıda verilmektedir. Seviye 4 sisteminden de test sonuçları raporu görülebilmektedir. Aşağıdaki rapordaki genel olarak gerilim – gerinim eğrileri bulunmaktadır. Denesi gerçekleştirilen bobinlerde akma, çekme mukavemeti ve % uzama değeri tespiti için rapordaki veriler okunmuştur.



Şekil 5.19 1 Numaralı slaba ait çekme test raporu

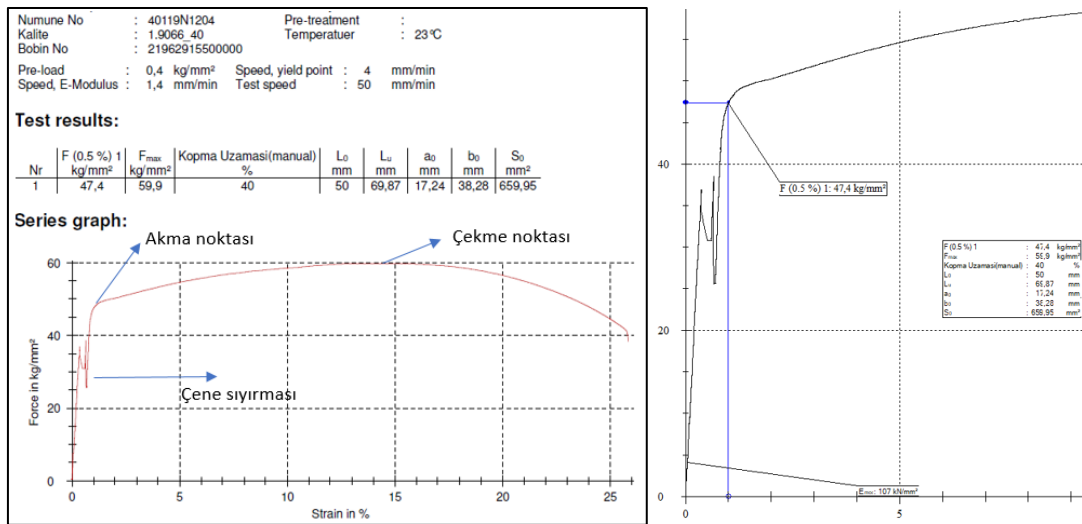
Şekil 5.19'da görüldüğü üzere ilk test 47 kg/mm^2 akma mukavemeti göstermiştir. Çekme mukavemeti ise 59 kg/mm^2 olarak ölçülmüştür. Çekme test çubuklarında L_0 yani marka boyu 50 mm alınmış olup kopma uzaması %42 olarak sonuçlanmıştır. Şekil 5.19' daki grafik eğrisindeki gerçekleşme kırmızı çizgi ile görülebilmektedir. API 5L X65 standardında çekme testlerinde akma noktası için $R_{t0,5}$ (şekil 5.19) noktasındaki değer esas alınmaktadır. Bu grafikte de malzemenin 47 kg/mm^2 de boyun verdiği gözükmektedir. Kırmızı çizgide 2 farklı noktada aşağı doğru gerçekleşen salınımların çekme testi sırasında çenelerin kuvvetinden boşluk bulan numunenin kayması ile gerçekleştiği düşünülmektedir. Çeneden kurtulma olarak tabir edilen bu noktalarda ani mukavemet düşüşü gibi gözükse de anlık gerçekleşen olay sonrası deney kaldığı mukavemet değerinden devam etmektedir.

Çekme testleri daha önce belirtildiği gibi ISO 6892-1 standardına göre metod A ile gerçekleştirilmiştir. Çekme test hızları buna bağlı olarak 6- 60 Mpa/s aralığında seçilerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.20 2 Numaralı slaba ait çekme test raporu

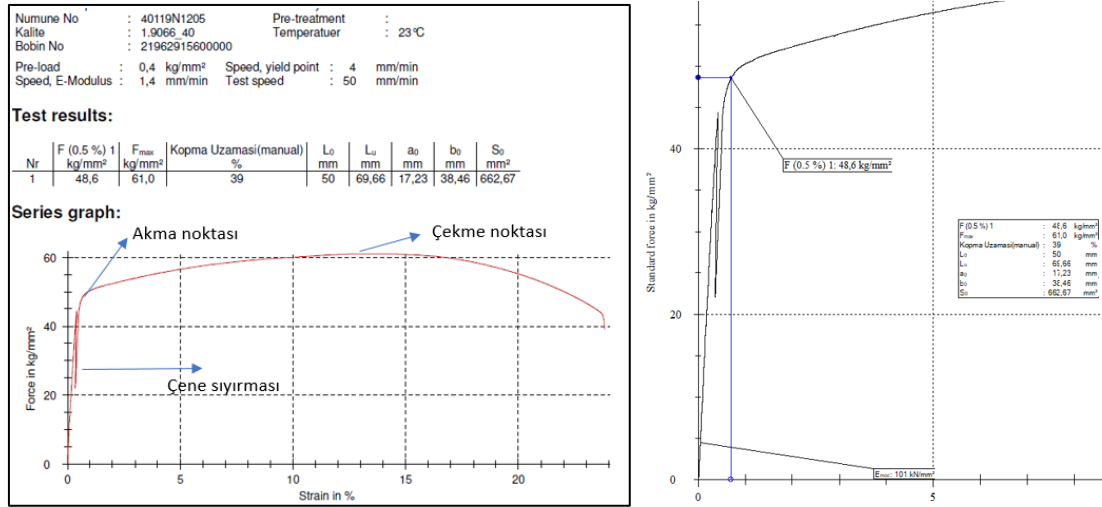
Şekil 5.20 'de görüldüğü üzere ikinci test 48 kg/mm^2 akma mukavemeti göstermiştir. Çekme mukavemeti ise $58,5 \text{ kg/mm}^2$ olarak ölçülmüştür. Çekme test çubuklarında L_0 yani marka boyu 50 mm alınmış olup kopma uzaması %45 olarak sonuçlanmıştır. Yine bu grafikte de görüldüğü üzere akma noktası başlamadan önce 1 adet çene sıyırması gerçekleşmiş ve anlık yük düşüşü gerçekleşmiştir. Gerçekleşen bu yük düşüşleri nedeniyle malzemenin nihai akma ve çekme mukavemetine etkisi bulunmamaktadır.



Şekil 5.21 3 Numaralı slaba ait çekme test raporu

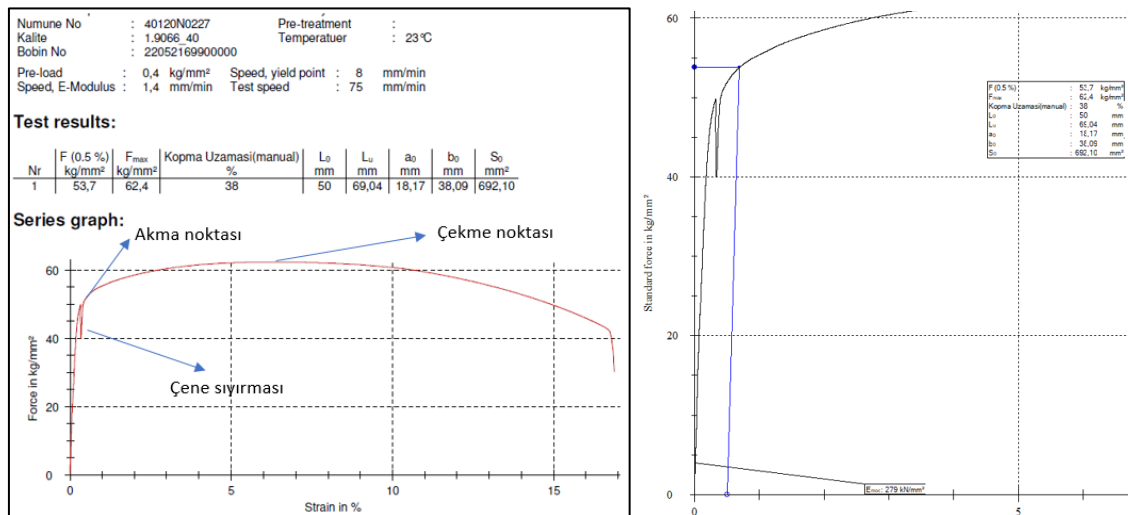
Şekil 5.21 'de görüldüğü üzere üçüncü test $47,4 \text{ kg/mm}^2$ akma mukavemeti göstermiştir. Çekme mukavemeti ise $59,9 \text{ kg/mm}^2$ olarak ölçülmüştür. Çekme test çubuklarında L_0 yani marka boyu 50 mm alınmış olup kopma uzaması %40 olarak sonuçlanmıştır. Testlerde %

uzama değerleri manuel olarak kumpas ile ölçülmüştür. Testler kontrollü şekilde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.22 4 Numaralı slaba ait çekme test raporu

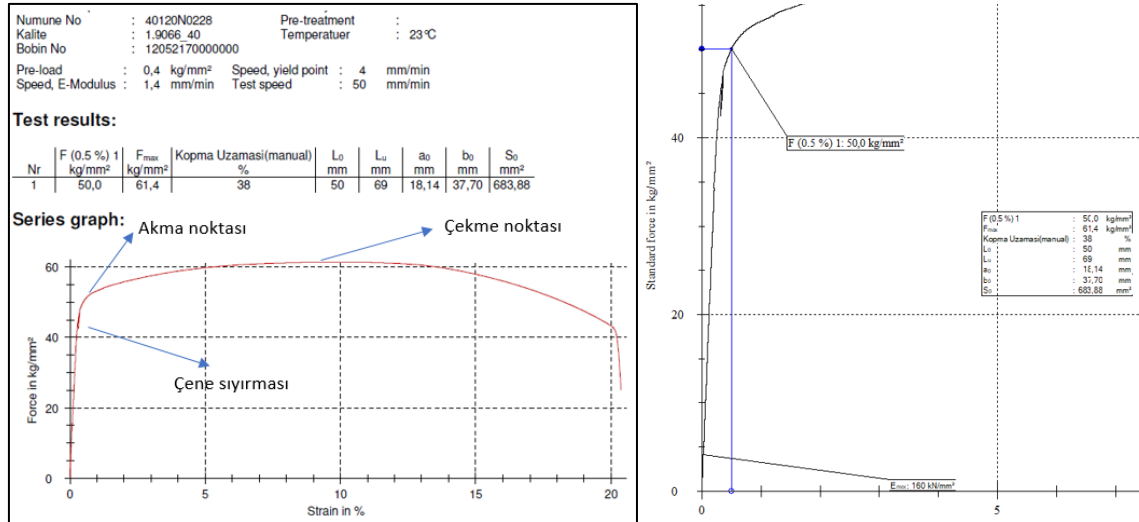
Şekil 5.22 'de görüldüğü üzere dördüncü test 48,6 kg/mm² akma mukavemeti göstermiştir. Çekme mukavemeti ise 61 kg/mm² olarak ölçülmüştür. Çekme test çubuklarında L₀ yani marka boyu 50 mm alınmış olup kopma uzaması %39 olarak sonuçlanmıştır. Çekme mukavemet değeri 60 g/mm² üzerinde olan testlerde % uzama değerleri 38-39 seviyelerinde nispeten düşük gerçekleşmiştir.



Şekil 5.23 5 Numaralı slaba ait çekme test raporu

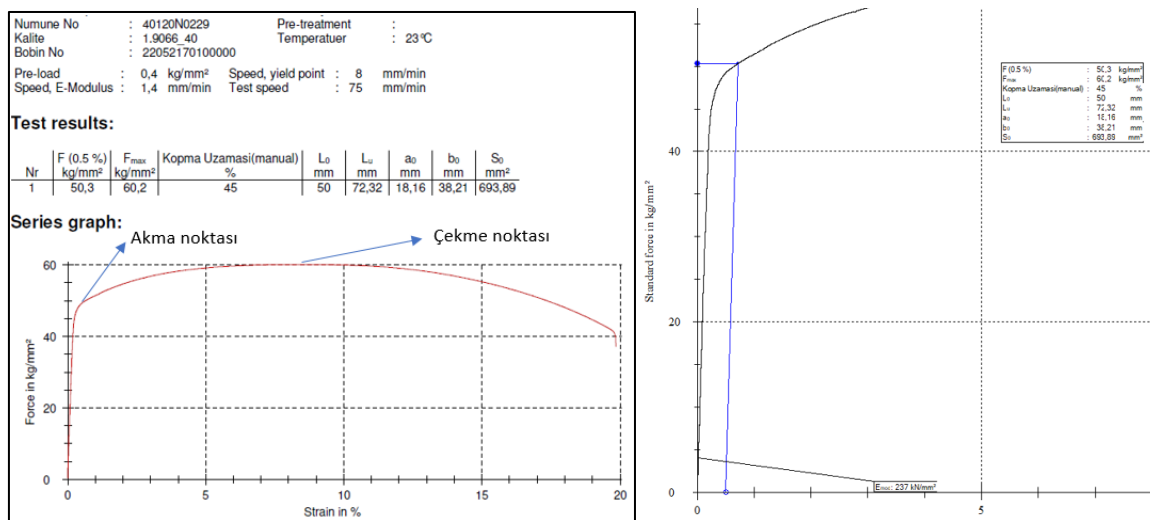
Şekil 5.23 'de görüldüğü üzere beşinci test 53,7 kg/mm² akma mukavemeti göstermiştir. Çekme mukavemeti ise 62,4 kg/mm² olarak ölçülmüştür. Çekme test çubuklarında L₀ yani

marka boyu 50 mm alınmış olup kopma uzaması %38 olarak sonuçlanmıştır. Çekme mukavemeti değeri en yüksek bobin olup haliyle % uzama değeri 38 ile en düşüktür. Buna karşın tüm testlerde % uzama değerleri limitler içerisinde olup malzemenin sünekliliğine de işaret etmekle birlikte oldukça iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 5.24 6 Numaralı slaba ait çekme test raporu

Şekil 5.24 'de görüldüğü üzere altıncı test 50 kg/mm² akma mukavemeti göstermiştir. Çekme mukavemeti ise 61,4 kg/mm² olarak ölçülmüştür. Çekme test çubuklarında L₀ yani marka boyu 50 mm alınmış olup kopma uzaması %38 olarak sonuçlanmıştır.



Şekil 5.25 7 Numaralı slaba ait çekme test raporu

Şekil 5.25 'de görüldüğü üzere yedinci test 50,3 kg/mm² akma mukavemeti göstermiştir. Çekme mukavemeti ise 60,2 kg/mm² olarak ölçülmüştür. Çekme test çubuklarında L₀ yani

marka boyu 50 mm alınmış olup kopma uzaması %45 olarak sonuçlanmıştır. Bu testte yukarıdakilerde olduğu gibi çenelerde malzeme kaçırması ve haliyle grafikte bir yük düşüşü gözlemlenmemiştir.

KT MPC	KT Çelikhane	UP İmalat Lot	Kalite Kontrol	Raporlar	İSDEMİR ÜRETİM YONETİM SİSTEMİ - IUYS		
KK200240	TEST NUMUNE TEST SONUÇLARI GÖRÜNTÜLEME						
	Hedef	Min	Max	Ölçülen	Hold		
Akma Mukavemeti (kg/mm ²)		45,87	61,16	47		Numune No	40119N1202B
Çekme Mukavemeti (kg/mm ²)		54,54	77,47	59		Döküm No	19229243
Kopma Uzaması (%)		24	60	42		Slab No	19229243110100
Maximum Yükteki Uzama-Ag (%)						Çelik Kalitesi	1.9066_40
n Değeri						MPC No	0003015259
BH						Özel Talimat	
BH 2						Özel Talimat Açıklama	
BH YS						Test Rapor Adı	4-Test Raporu
Kesit Daralması (%)						Ebat(Kal/En/Boy) (mm)	17,33
DWT Test Sıcaklığı (°C)						Çentik Darbe Numune Ebatı (mm)	10 x 10 x 55
DWT Testi(%)		-		/		Çekme Numune Kalınlığı (mm)	17,30
Çentik Darbe Test Sıcaklığı (°C)	0			0		Çekme Numune Genişliği (mm)	38,35
Çentik Darbe Testi 1-2-3-Ortalama (J)		- 54		261 / 237 / 240 - 246		Mandrel Çapı (mm)	
Çentik Darbe Süneklik Oranı (%)		-		// -		Katlama Açısı (°)	
Yüksek Sıcaklık Akma Sıcaklığı(°C)						Basma Testi Durumu	
Yüksek Sıcaklık Akma Mukavemeti (kg/mm ²)						Katlama/Basma Sonucu	-
Akma / Çekme			0,93	0,8		Çekme Makinası Adı	ZWICK 600
Sertlik (J)						Marka Boyu (mm)	50

Resim 5.10 1 Numaralı slaba ait seviye 4 test veri giriş ekranı

5.8.4. Doğrulama deneyleri

Elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliğini görmek amaçlı 2. deneme planı yapılarak 3 adet daha slab 18,2 mm kalınlığa haddelenmiştir. Bu bobinlerde de yine çekme testi, çentik darbe testi ve ilave olarak DWTT yapılmıştır.

Çizelge 5.30 2. Denemeye Ait Slab Test Sonuçları

Bobin No	AKMA MUK. (kg/mm ²)	ÇEKME MUK. (kg/mm ²)	UZ. (%)	SICAK Darbe Enerjisi (J)	TEST SICAKLIĞI (°C)	Numune -1 (°C)	Numune -2 (°C)
22052169900000	53,7	62,4	38	0	199		
22052169900000				-30	273	-20	100
22052169900000				-40	268		
22052169900000				-50	279		
22052169900000				-60	227		
12052170000000	50,0	61,4	38	0	283		
12052170000000				-30	262	-20	100

12052170000000				-40	253			
12052170000000				-50	246			
12052170000000				-60	230			
22052170100000	49,5	60,2	45	0	202			
22052170100000				-30	246	-20	93	98
22052170100000				-40	212			
22052170100000				-50	203			
22052170100000				-60	146			
22052170100000				-60	152			

Çizelge 5.30' da görüldüğü üzere 19229243 nolu döküme ait (2.deneme) 3 bobinden kesilen çekme çubukları, darbe numuneler ve DWTT numuneleri test edilmiştir. Darbe testleri ilk seferde olduğu gibi 0, -30, -40, -50 ve -60 °C gibi oldukça düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Burada tez konusunda da olduğu gibi hedefe ulaşabilmesi için mukavemet değerinin yüksek olması yanı sıra düşük sıcaklıklarda kırılma enerjisinin yüksek olabilmesi görülmek istenmiştir. Görüldüğü de üzere 200 joule üzerinde darbe enerjisi yakalanmıştır. En yüksek darbe değerleri haliyle düşük sıcaklıklarda olmasına karşın -50 ve -60 °C de dahi 152 joule üzeri enerji yakalanabilmiştir.

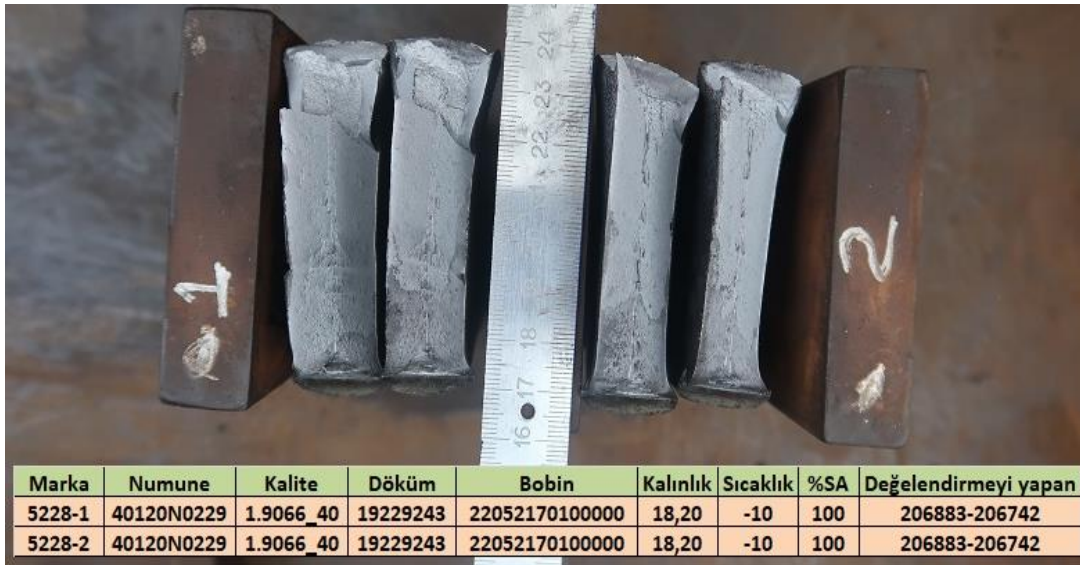
Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi tüm test sonuçları hedeflenen değerde gelmiş olup çentik darbe testi ve DWTT sonucu maksimum seviyede elde edilebilmiştir. Doğrulama çalışması amacıyla alınan 2. dökümde ise daha yüksek kalınlık hedeflenmesine rağmen akma, çekme, uzama ve darbe enerjisi hedefler dahilinde gerçekleşmiştir. -50°C gibi oldukça düşük sıcaklıklarda da stabil darbe enerjisi yakalandığı görülmüştür.

5.8.5. DWTT (Yüksekten Ağırlık Düşürme Testi)

Deneme olarak üretilen bobinlerin ¼ lük kısmından kesilen parçalardan şerit testere ve freze yardımıyla API RP 5L3 standardında bahsedildiği ebatlarda DWTT numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere yine standarttaki ebatlarda çentik açılarak teste hazır hale getirilmiştir. Testler 55000 joule kapasiteli Hindistan üretimi Pragya marka test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test sonrası kırılan yüzeyler yine API RP 5L3 standardında bahsedildiği üzere sünek alan hesabı incelemesine tabi tutulmuştur. Standartta belirtilen durumlarda ve aşağıdaki sonuçlarda da görüldüğü üzere üçgen bölüm az olduğu durumlarda malzemenin sünek davranış gösterdiği bilinmektedir. Test sonrası numunelerde de kırılma yüzeylerinde üçgen bölgeye rastlanmamış olup malzeme %100 sünek davranış gösterir olarak kabul edilmiştir.

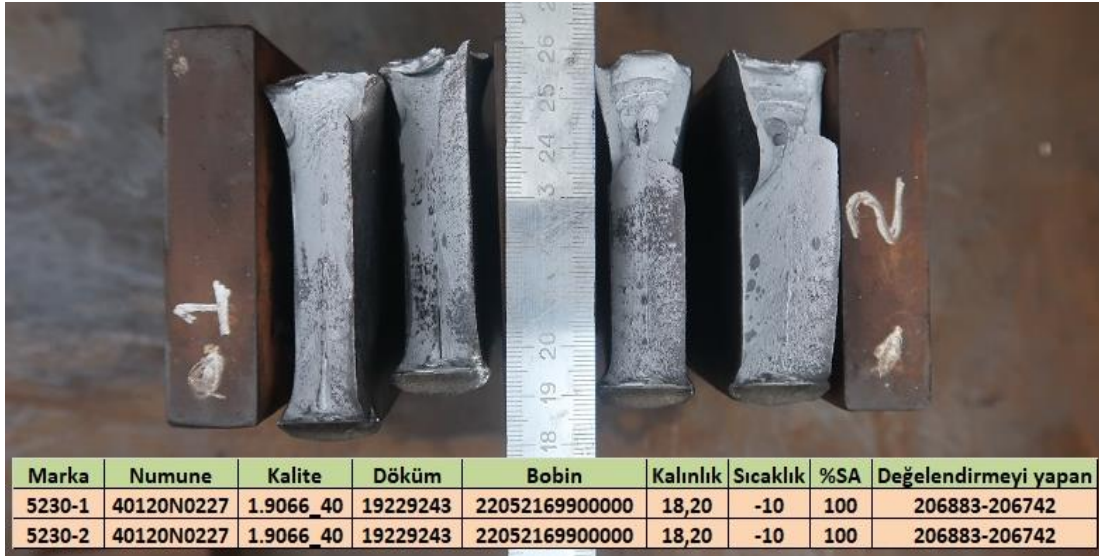
DWTT sonuçlarında da aşağıda görüldüğü gibi kırılma yüzeyleri %100 sünek alan oluşturmuş ve gevrek bir kırılmaya rastlanmamıştır. Test sonuçlarındaki yırtılmış yüzeylerde DWTT standardı göz önüne alınarak sünek alan hesabı yapılmıştır. Sonuçlar %100 olarak sünek bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.

Testler Labo marka numune soğutucusunda alkol içerisinde 20 dakika -10°C de bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Resim 5.11, resim 5.12 ve resim 5.13 de görüleceği üzere kırılma yüzeyleri test sonrası fotoğraflanmıştır. 18,2 mm kalınlıkta olan numunelerdeki sünek alan hesabı %100 olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar fotoğraflanarak rapor olarak kayıt altına alınmış ve seviye 4 yazılımında onaylanmıştır.

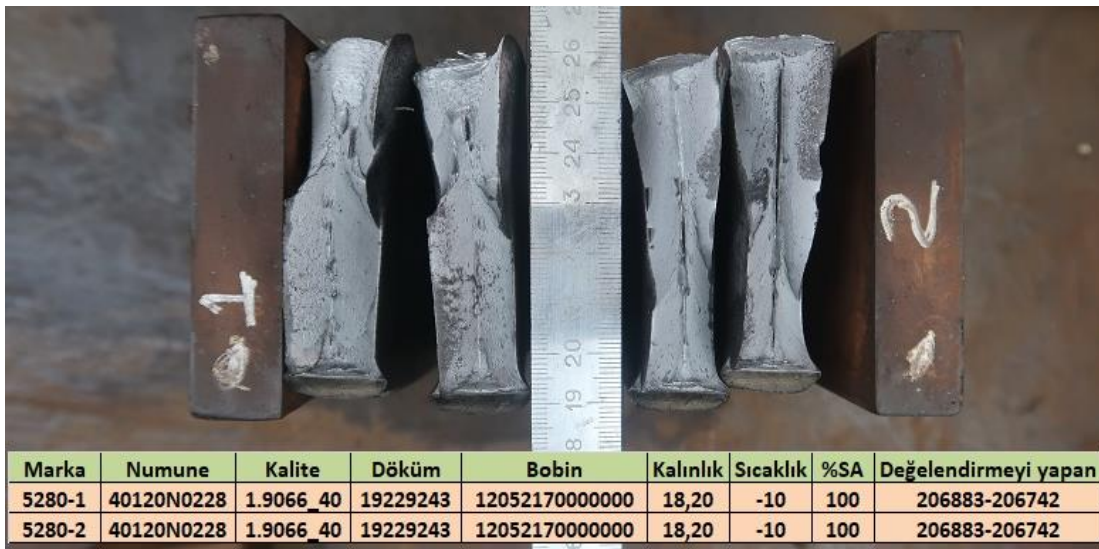


Resim 5.11 DWTT 1. deneme sonucu

Resim 5.11' de 18,2 mm kalınlığına haddelenmiş bobine ait DWTT sonrası kırılma yüzeyi görülmektedir. Kırılma yüzeyinde herhangi bir gevrek alan tespit edilmemiş olup %100 sünek alana sahiptir. Testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş fakat numuneler -10°C de 20 dakika bekletilerek kırılmıştır.



Resim 5.12 DWTT 2. deneme sonucu



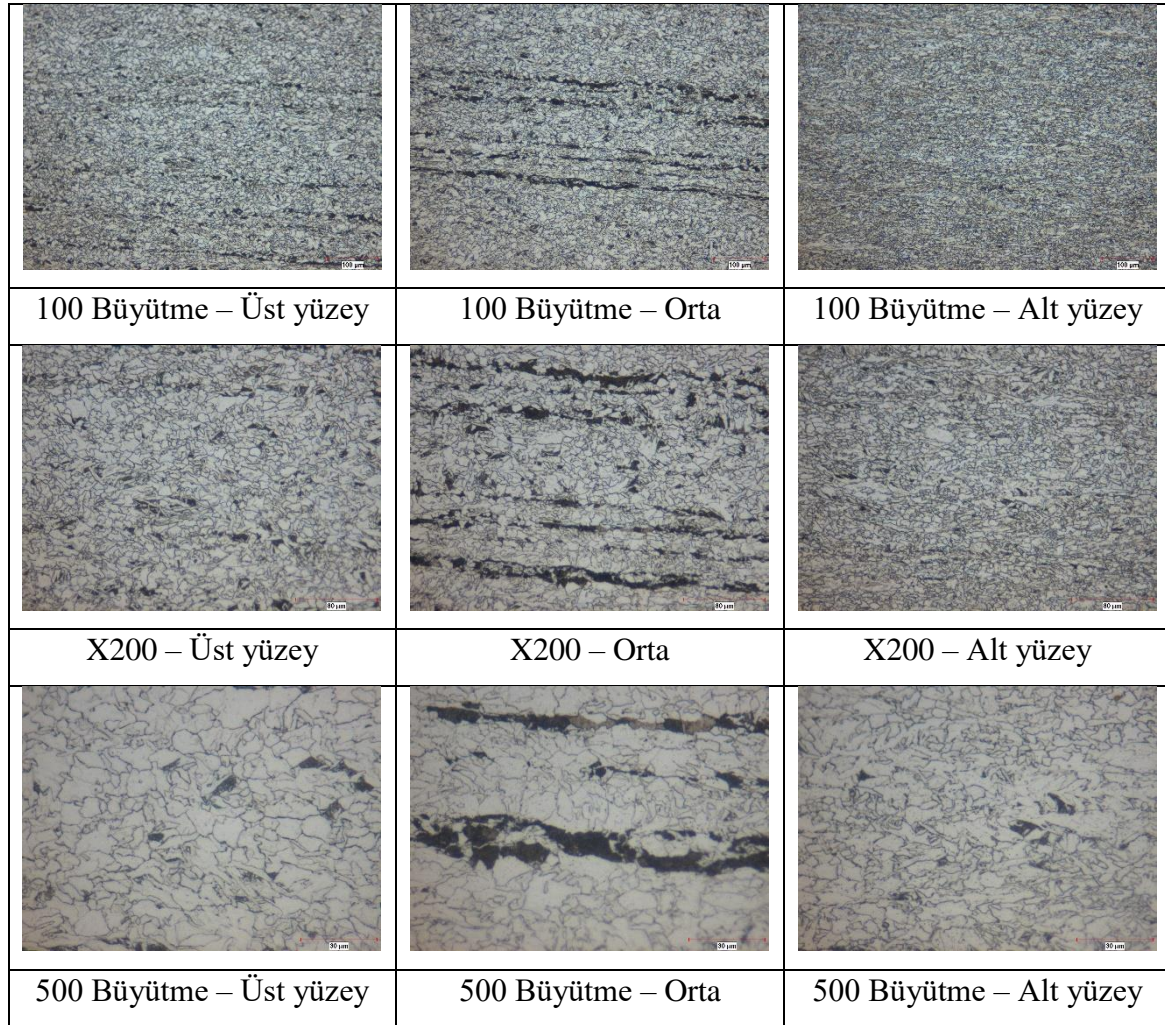
Resim 5.13 DWTT 3. deneme sonucu

Resim 5.12 ve 5.13 de görüldüğü gibi bobinlerden kesilen numuneler 18,2 mm de DWTT gerçekleştirilmiş olup yine %100 sünek alana sahiptir. Numuneler standartlara bağlı olarak işlenmiş ve -10°C de 20 dakika bekletilerek kırılmıştır.

5.8.6. Mikro yapı sonuçları

Üretilen bobinlerde mikro yapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bobinlerden kesilen parçalar standartta belirtilen ölçülere indirgenerek öncelikle bakalite alma, zımparalama ve sonrasında parlatma şeklinde numune hazırlama süreçlerinden geçirilmiştir. Bu süreçlerden

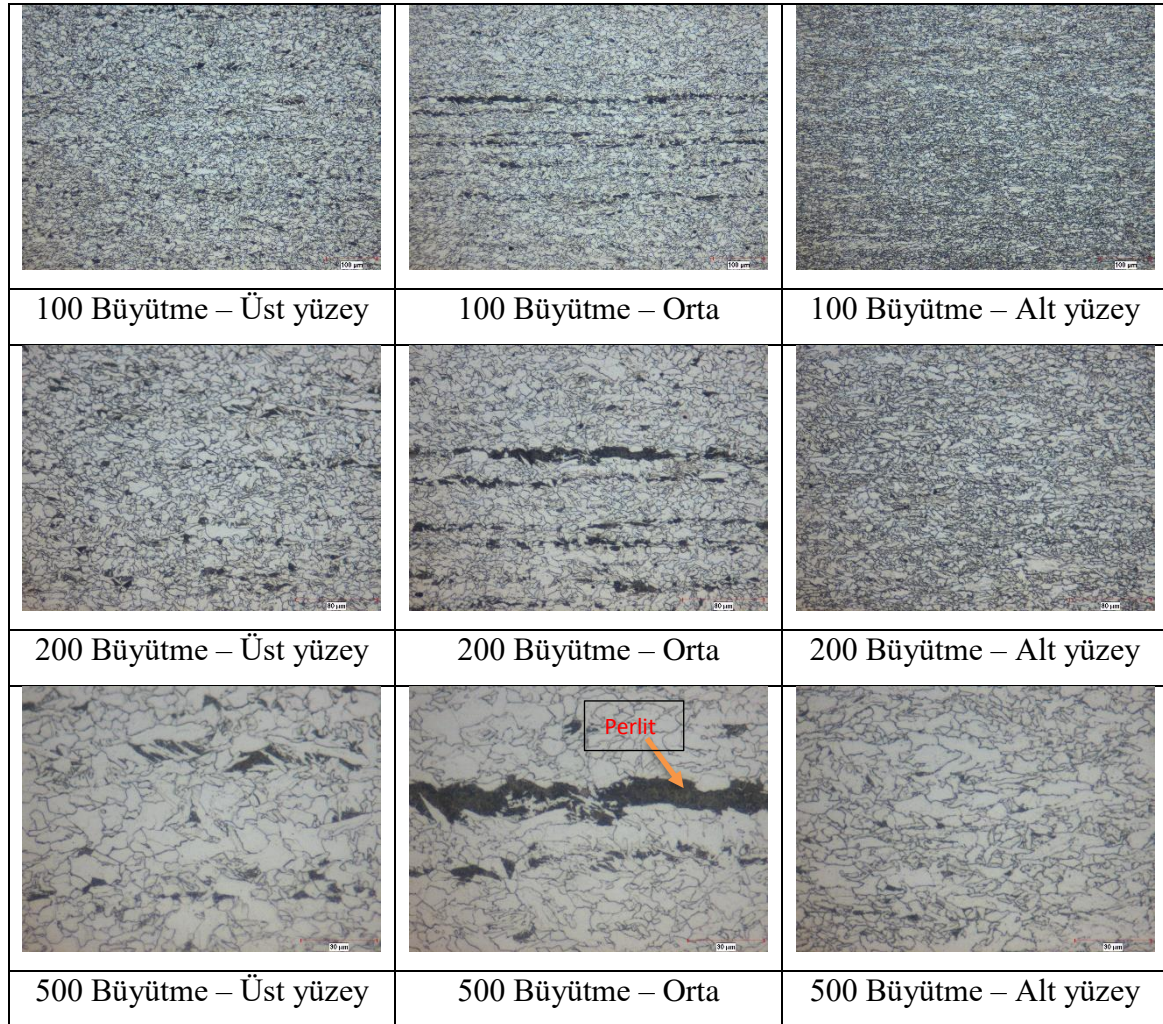
sonra nital ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Nital, karakterizasyon çalışmalarında çeliklerin için kullanılan yaygın bir nitrik asit ve alkol karışım çözeltisidir. Özellikle karbon çeliklerinin mikro yapısını incelemek için kullanılmaktadır Nital dağlayıcısı 1 ile 10 ml arasında HNO_3 , 90 ile 99 ml arasında methanol veya etanol kullanılarak hazırlanmaktadır. İncelemelerde 1000 büyümeli Nikon marka optik mikroskop kullanılmıştır. 1. denemeye ait 4 bobinin mikro inceleme görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Resim 5.14 21962915300000 Numaralı bobin mikro yapı görüntüleri

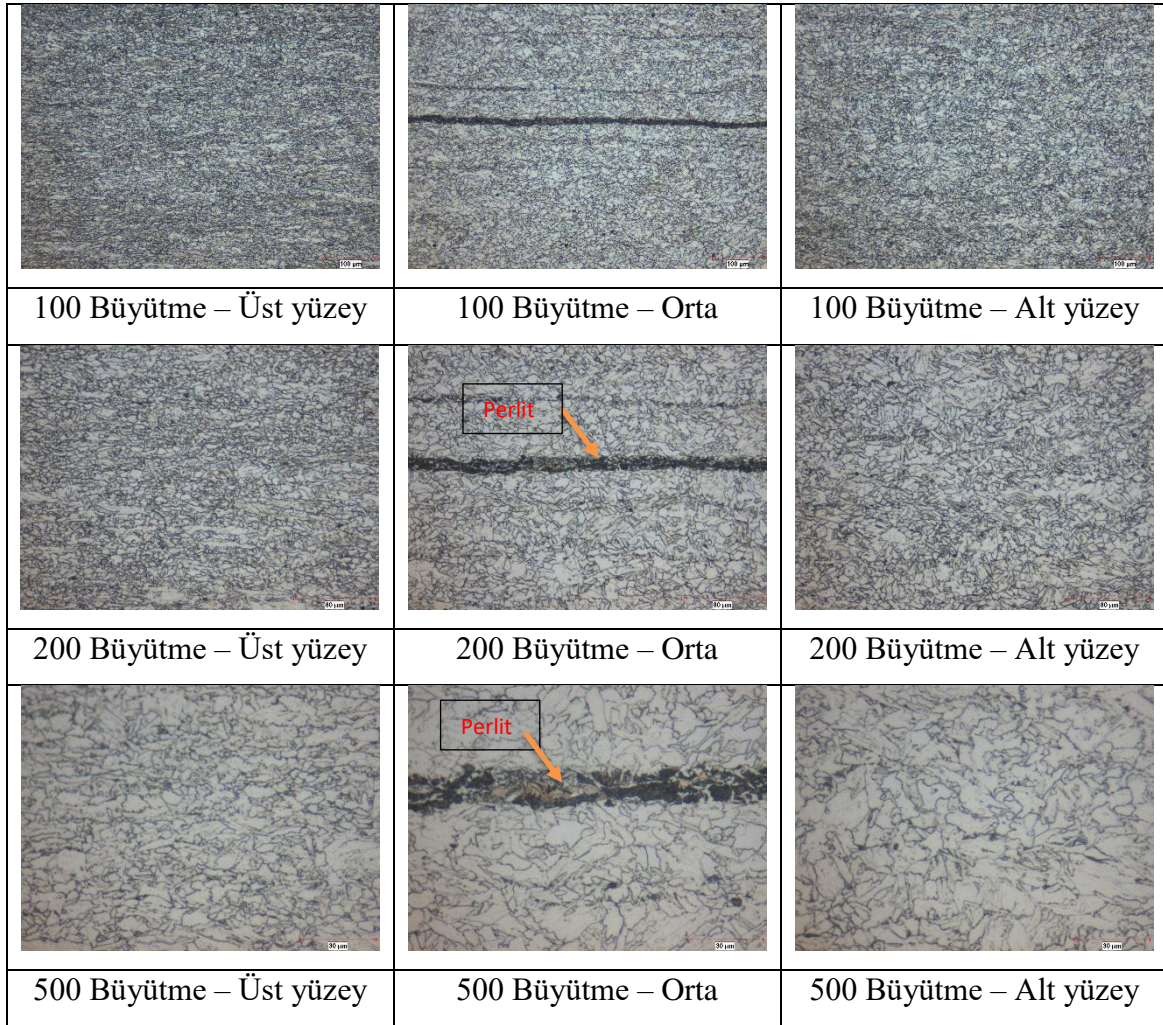
Resim 5.14’ de 21962915300000 numaralı bobine ait mikro yapı incelemelerinde görüldüğü gibi ferritik yapıda bir elik elde edilmiştir. Mikroskopta 100, 200 ve 500 kat büyütmelerde elik i yapı fotoğrafları alınmıştır. Yer yer perlit taneleri bulunmakta olup merkez bölgede az miktarda perlit bantlaşmaları dikkat çekmektedir. 500 büyütmedeki fotoğrafta perlit bandı ereve içerisinde gösterilmiştir. Genel olarak tane boyutlarının uniform bir şekilde dağıldığı söylenebilir. Bobinlerin merkez hattında oluşan perlit bandı, çok istenmeyen bir mikro

yapıdır. Bu bant yapısı esas olarak çeliklerde çatlak oluşumlarına ve gelişmelere neden olabilir. Bu nedenle EMS (elektro magnetik karıştırıcı), soft reduction (yumuşak ezme) gibi uygulamalar kullanılarak şiddetinin azaltılması ihtiyacı gerekebilmektedir.



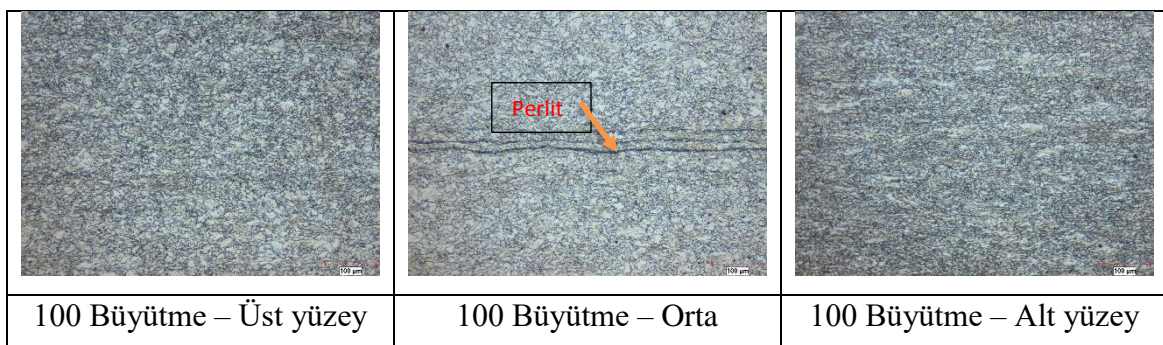
Resim 5.15 21962915400000 Numaralı bobin mikro yapı görüntüleri

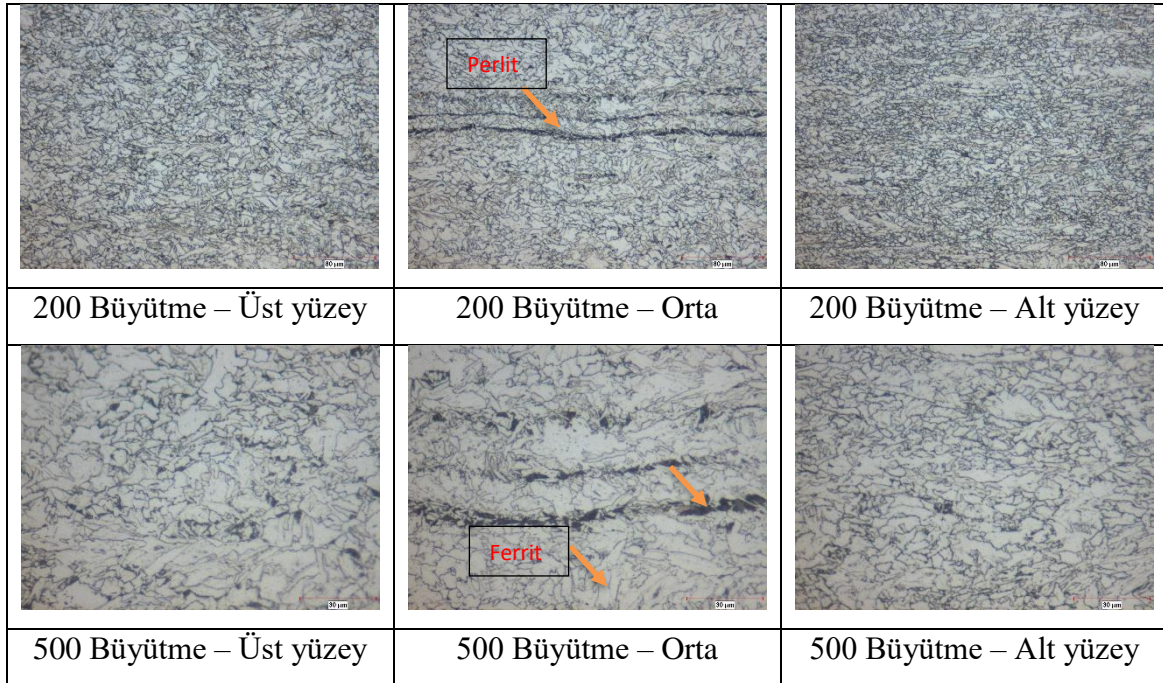
Resim 5.15’ de 21962915400000 numaralı bobine ait mikro yapı incelemelerinde görüldüğü gibi ferritik yapıda bir çelik elde edilmiştir. Yer yer perlit taneleri bulunmakta olup merkez bölgede az miktarda perlit bantlaşmaları dikkat çekmektedir. Genel olarak tane boyutlarının uniform bir şekilde dağıldığı söylenebilir. İyi bir mikro yapı ve mekanik özellik için malzemenin genelinde benzer tane boyutuna sahip tanelerin olması gerekmektedir. İnceleme yapılan numunelerde de genel olarak tüm alanlarda taneler benzer boyutlardadır.



Resim 5.16 21962915500000 Numaralı bobin mikro yapı görüntüleri

Resim 5.16’ da 21962915500000 numaralı bobine ait mikro yapı incelemelerinde görüldüğü gibi ferritik yapıda bir çelik elde edilmiştir. Yer yer perlit taneleri bulunmakta olup merkez bölgede az miktarda perlit bantlaşmaları dikkat çekmektedir. Genel olarak tane boyutlarının uniform bir şekilde dağıldığı söylenebilir. İnceleme yapılan numunelerde genel olarak tüm alanlarda taneler benzer boyutlardadır.





Resim 5.17 21962915600000 Numaralı bobin mikro yapı görüntüleri

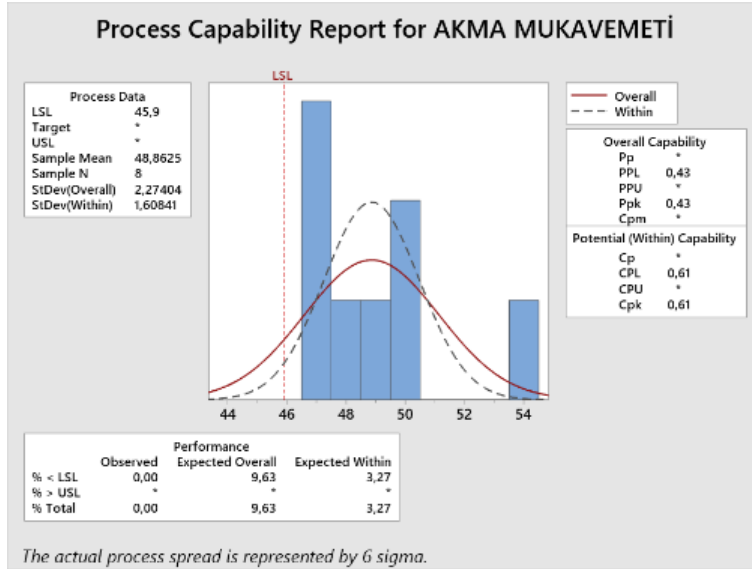
Resim 5.17’ de 21962915600000 numaralı bobine ait mikro yapı incelemelerinde görüldüğü gibi ferritik yapıda bir çelik elde edilmiştir. Yer yer perlit taneleri bulunmakta olup merkez bölgede az miktarda perlit bantlaşmaları dikkat çekmektedir. Genel olarak tane boyutlarının uniform bir şekilde dağıldığı söylenebilir. İnceleme yapılan numunelerde genel olarak tüm alanlarda taneler benzer boyutlardadır.

5.9. Deneyler Sonrası Yeterlilik Analizi

İlk deneme ve sonrasında gerçekleştirilen doğrulama deneyi ile elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri kullanılarak durum analizi gerçekleştirilmiştir.

5.9.1. Akma mukavemeti yeterlilik analizi

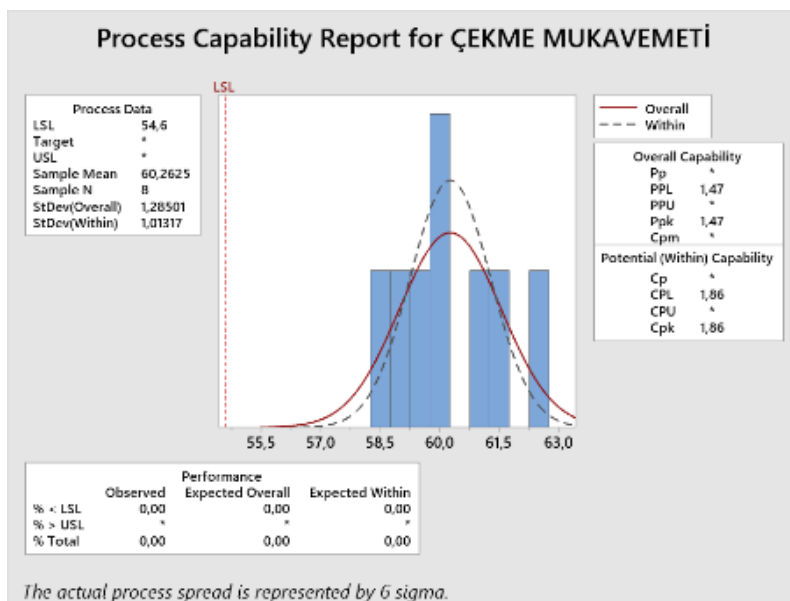
Minitab 19 yazılımında yine “capability analysis” modülü kullanılarak standardın belirlediği limitler içerisindeki dağılım gözlenmiştir. Şekil 5.26’ da görüldüğü gibi gerçekleştirilen 8 adet çekme testi sonuçlarına göre ortalama $48,8625 \text{ kg/mm}^2$ değerine düşmüş ve standart sapma $1,60 \text{ kg/mm}^2$ olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.26 Deney sonrası akma mukavemeti yeterlilik analizi

5.9.2. Çekme mukavemeti yeterlilik analizi

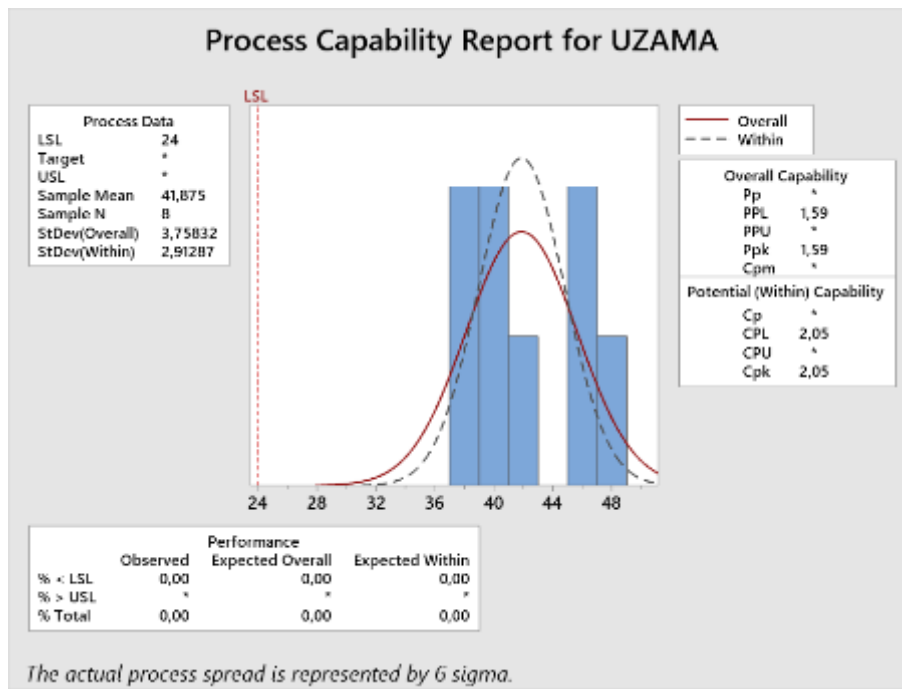
Çekme mukavemeti alt limit olan 54,6 kg/mm² baz alındığında yeni durumda ortalama 60,2625 kg/mm² olarak standart sapma ise 1,01 kg/mm² olarak gerçekleşmiştir. Üst limit ve alt limit altında kalma potansiyeli olmadığı görülmesine rağmen çekme mukavemeti alt limit değerinden halen yaklaşık 5 kg/mm² üzerinde gerçekleşmelerin olduğu görülmüştür. Bu değer daha da düşürülmesi akma mukavemetinin alt limit altında kalma potansiyelini artıracığından mevcut proses parametreleri ve çelik dizaynı ile uygun olmayacaktır.



Şekil 5.27 Deney sonrası çekme mukavemeti yeterlilik analizi

5.9.3. % Uzama yeterlilik analizi

Son olarak % uzama değerinde de yeterlilik analizi gerçekleştirilmiştir. % Uzama alt limiti %24 iken gerçekleşen ortalama %41,875 ve standart sapma %2,91 olarak gerçekleşmiştir. Deneysel % uzama değerleri alt limite yakın ve altında olan değerler var iken çalışma sonucunda alt limitten uzaklaşmıştır. Mukavemet değerlerinin düşürülerek optimum aralığa çekilmesi ile malzemenin sünekliği de optimize edilerek çalışma hedefi ile uyumlu hale gelmiştir.

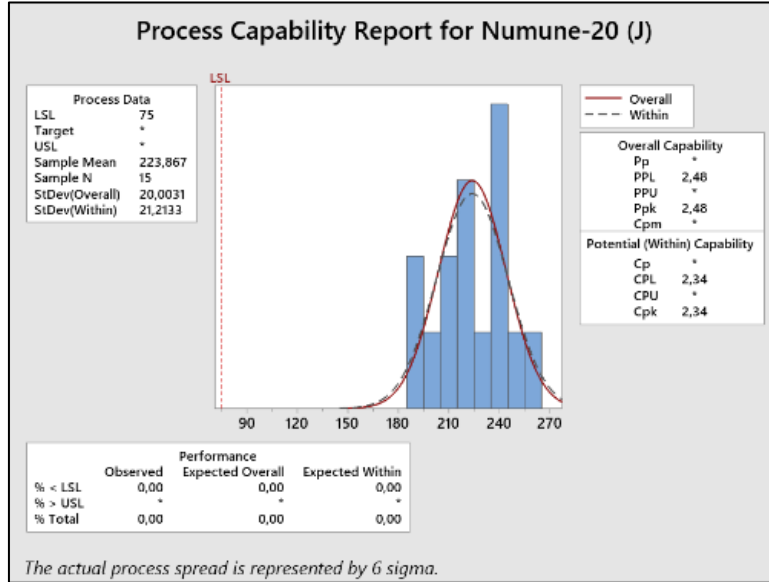


Şekil 5.28 Deneysel sonrası % uzama yeterlilik analizi

5.9.4. Çentik darbe enerjisi yeterlilik analizi

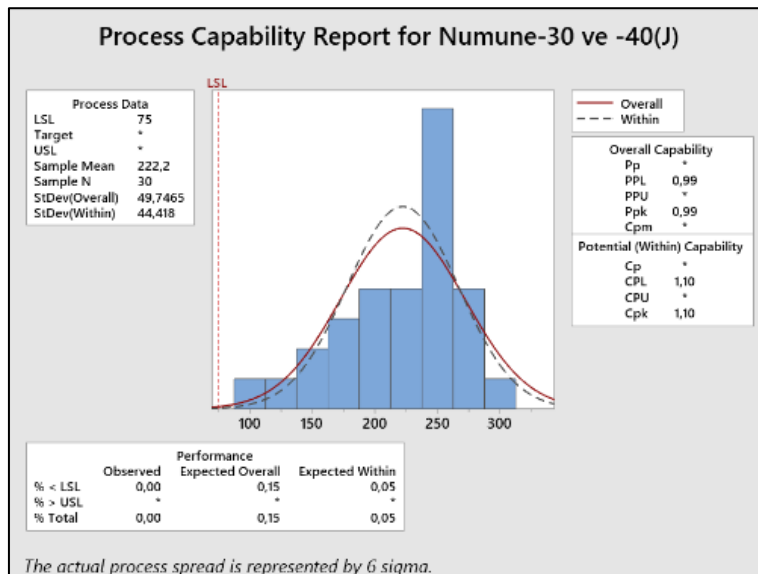
Yeni durumda tesis yeterliliği (capability analysis) çalışması Minitab19 programında yapılmış olup önceki değerlere göre çentik darbe enerjisinde iyileşme olduğu görülebilmektedir. Şekil 5.28 'de görüldüğü üzere gerçekleştirilen 12 adet testte -50 °C de darbe testi ortalaması 229 joule gelmiş olup üretimler bu şekilde devam edecek olursa %0,01 oranda alt limit olan 75 joule altında kalma olasılığı olduğu istatistiksel olarak raporlanmıştır. Önceki üretimlerde mevcut durum analizinde oluşan bu değer ise -40 °C de %3 civarında idi. Sırasıyla şekil 5.25, 5.26, 5.27, 5.28 de ise farklı sıcaklıklardaki yeterlilik incelenmiş olup tamamında sonuçların hedeflendiği şekilde gerçekleştiği görülmüştür. (Çizelge 4.4 Petrol Boru Çeliği

Kaliteli Mekanik Özellik Limitleri (Standart: API 5L 46th Edition-2018 / EN ISO 3183:2019))



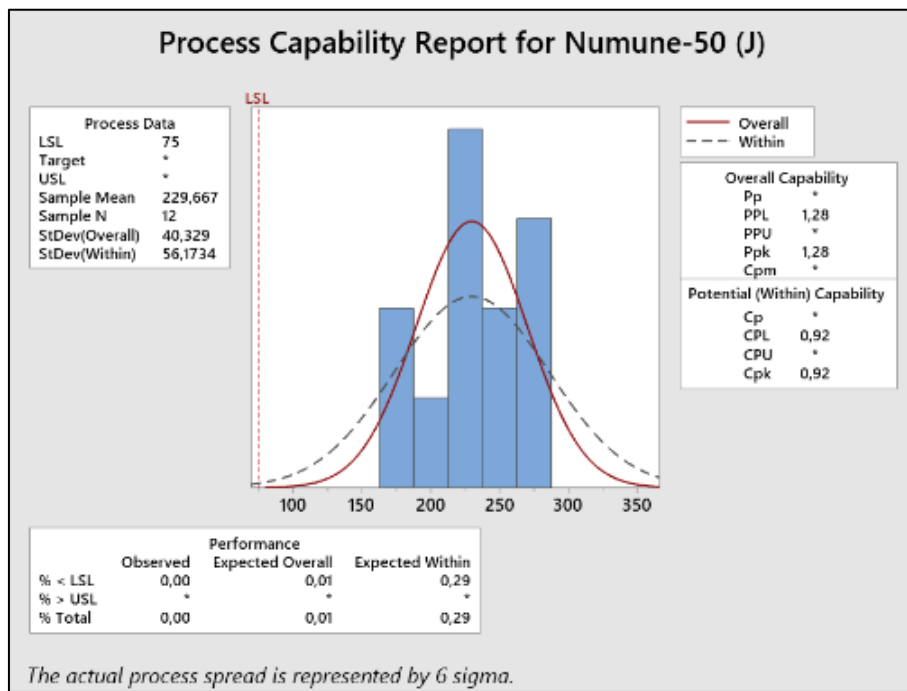
Şekil 5.29 Denemeler sonrası -20°C darbe sonuçları

Şekil 5.29 'da -20°C de gerçekleştirilen çentik darbe testlerine ait yeterlilik analizi bulunmaktadır. Şekil 5.29' da görüldüğü üzere 15 adet test sonucunda ortalama 223 joule gerçekleşmiş ve Cpk değeri 2,34 ile oldukça iyi sonuç alınmıştır. Test sonuçları arasındaki standart sapma 21 joule dur. Grafik altındaki performans çizelgesinde de gerçekleşen ve benzer durumda ileride yapılacak testlerde alt limit altında kalma ihtimali olmadığı gözükmektedir.



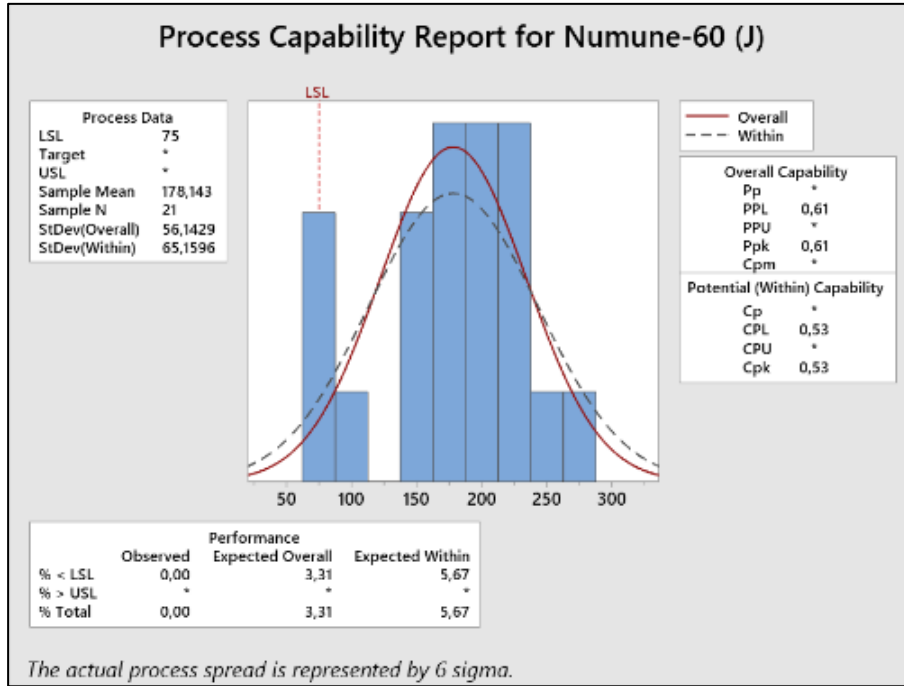
Şekil 5.30 Denemeler sonrası -30 ve 40°C darbe sonuçları

Şekil 5.30' daki grafikte -30°C ve -40°C de gerçekleştirilen çentik darbe test sonuçları yorumlanmıştır. Yeterlilik analizinde toplam 30 teste gerçekleşen ortalama 222 joule olup Cpk değeri 1,10 ile oldukça iyi gerçekleşmiştir. Daha düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen test nedeniyle Cpk değerinin bir miktar düşmesi olağan olmakla birlikte sonuçlar sünelik açısından oldukça iyi durumdadır. Grafik altındaki performans çizelgesinde ise üretimin bu şekilde gerçekleşmesi durumunda gelecekte %0,12 değerinde alt limit olan 75 joule altında kalınma ihtimali vardır ki bu değer de oldukça düşüktür. Test sonuçları arasındaki standart sapma 44 joule' dur.



Şekil 5.31 Denemeler sonrası -50°C darbe sonuçları

Şekil 5.31 de -50°C de gerçekleştirilen çentik darbe test sonuçları yorumlanmıştır. Yeterlilik analizinde 12 adet test sonunda ortalama 229 joule olup testler arası standart sapma 56 joule dur. Test sıcaklıkları azaldıkça testler arasındaki standart sapmanın da arttığı gözükmemektedir. Bu da malzeme içerisindeki sünelikten gevrekliğe geçiş arasındaki homojenlik kaybından olduğu düşüncesine yöneltebilir. Grafik altındaki performans çizelgesinde ise bu şekilde üretime devam edilir ise %0,01 lik oldukça düşük bir oranda 75 joule olan alt limit altında kalınabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.32 Denemeler sonrası -60°C darbe sonuçları

Son olarak şekil 5.32’ de görüldüğü üzere en düşük sıcaklık olan -60°C de ki bu değer malzemenin limitlerini zorlamak için gerçekleştirilmiş olup 21 adet testte ortalama 178 joule çentik darbe enerjisi yakalanmıştır. Testler arası değerlerdeki standart sapma 65 joule olup Cpk değeri 0,53 dür. Tüm sıcaklıklardaki en düşük Cpk değeridir. Sıcaklığın düşmesi ve -60°C gibi oldukça düşük bir sıcaklıkta bu değerın olması normal olarak karşılanabilir. Grafik altında bulunan performans çizelgesinde ise bundan sonra bu parametreler ile gerçekleştirilecek üretimlerde %3,31 oranında alt limit olan 75 joule altında kalınma potansiyeli bulunduğu belirtilmiştir.

6. GENEL TARTIŞMA

Tez çalışmasında petrol boru çeliği imalatında kullanılan API 5L X65 boru çeliği üzerinde metalürjik ve istatistiksel çalışmalar yapılmıştır. Metalürjik veriler ile var olan verilerin istatistiksel olarak yorumlanması gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda son yıllarda sık olarak başvurulan bir istatistik modülü olan MİNİTAB programı kullanılmıştır. Hedeflenen optimum sertlik ve tokluğu yakalamak adına literatür çalışmalarından yola çıkılarak başlıca etki eden parametreler seçilmiştir. Bu kapsamda çıktıya hizmet edecek girdi parametreleri özenle seçilerek farklı modellemelerin birleştirilmesi ile yeni bir model oluşturulmuştur.

Benzer şekilde örnekleri az bulunan ya da tespit edilemeyen akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama ve darbe enerjisinin modellenmesi ile bir optimizer üretilmiştir. Optimizer uygulaması ile hedeflenen ya da öngörülen parametre değerleri girilerek elde edilecek sertlik ve tokluk değeri görülebilir olmuştur. Tez çalışmasında da görüldüğü üzere her model için ilgili parametreler etki derecesi de göz önüne alınarak tespit edilebilmiştir. Bu doğrultuda akma mukavemetinin niyobyum, bobin kalınlığı ve nihai ferrit tane boyutu ile oldukça ilişkili olduğu görülmüştür. Bunun haricinde sıcak haddeleme parametrelerinden şerit hadde çıkış sıcaklığı, bobin üzerinde yaratılan ezme kuvveti (MFS) değerleri de oldukça önemlidir. Elde edilen model ile farklı akma mukavemeti hedefi için istenene parametrelerin ne olması gerektiği öngörülebilir olmuştur.

Çekme mukavemeti ilgili veri seti ile modellenmiş olup çekme mukavemetine etkili parametrelerin sırasıyla titanyum, azot, sıcak haddeleme parametrelerinden bobin ezme miktarları ve niyobyum değeri olduğu görülmüştür. Tez konumuzun başlığında da görüldüğü gibi hem titanyum hem de niyobyum düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerde mukavemet etki eden ana kimyasal elementlerdendir. Bu da bu elementlerin tane küçültücü ve büyüme engelleyici özelliklerinin var olmasından kaynaklıdır.

Uzama değeri modellenmiş olup modelde etkili olan ana parametrelerin titanyum, şerit hadde çıkış sıcaklığı, bobin ezme kuvvetleri ve sarılma sıcaklığı olduğu görülmüştür. Elde edilen istatistiksel sonuçlar metalürjik olarak da doğruluğu yorumlanmıştır. Çekme testlerinin deney sonrası yeterlilik analizi çalışmalarında akma ve çekme mukavemetinin bir miktar düşürülerek alt limite yakınlaştırıldığı ve bu sayede de % uzama değerinin artırıldığı

görülmüştür. Bu da hedef olan çeliğin süneklik kabiliyetinin iyileştirildiğine ait ana göstergelerinden birisi olmuştur.

Son olarak çentik darbe enerjisi modellenmiş olup bu formülasyona etki eden ana parametrelerin kükürt, niyobyum, karbon olduğu görülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken konu ise kükürt değerinin diğer parametrelere göre oldukça etkili olduğudur. Tez çalışması ana konularında da bahsedildiği üzere kükürt ve kükürtlü bileşiklerin mikro yapı içerisinde oluşturduğu safsızlıklar ile sonuçlara olumsuz etkisi bahsedilmiştir. Burada önemli bir yorum mukavemet ve sertliğin mukavemet artırıcı elementler ve sıcak haddeleme parametreleri ile geliştirilebilmesi ile birlikte tokluğu olumsuz yönde etkileyecek safsızlıkların olmaması gerekliliğidir.

7. ÖNERİLER

- Üretilen petrol boru çeliği bobinlerinden imal edilmiş borularda istenene hidrostatik testler, tahribatsız muayene yöntemlerine göre incelemeler yapılarak farklı kimyasal kompozisyonda ve parametrelerde üretilen borular incelenebilir.
- Benzer çalışma API 5L X70, X80 gibi daha yüksek mukavemetli çelikler üzerinde de gerçekleştirilerek optimum darbe dayanımı ve sertlik ilişkisi incelenebilir.
- Çelik nihai özelliklerine etki eden parametreler standartlarda belirtilen ebat ve şekillerdeki numunelere etkisi üzerinden incelenmiştir. Bunun haricinde son ürün kullanan tesisler malzemelerin farklı yönlenmelerdeki mekanik özellikleri ile de ilgilenebilmektedir. Bu amaca yönelik bu çeliklerdeki anizotropik davranış özellikleri araştırılabilir.
- Mikro yapı incelemelerinde TEM desteği ile dislokasyon hareketleri ve nihai özelliklere etkisi incelenebilir. Ayrıca ferro alaşımlar ile elde edilen çökelti sertleşmesine yönelik oluşan çökelti ve etkileri yorumlanmak amaçlı incelenebilir.
- Slab üretimi sırasında kullanılan soft reduction ve EMS gibi teknik özelliklerin slab makrolarındaki yapı değişikliği ve segregasyona etkileri ile nihai mamule olan katkıları incelenebilir.

DİZİN

A

Acm · 72
 API · 2, xxvi, 28, 30, 39, 40, 41, 42, 45, 57, 69, 82, 147,
 148, 149
 API RP 5L3 · 65, 130
 Ar3 · 53, 54

B

best subset · 78, 90, 92, 97, 100, 103
 BOF · xxvii, 37
 Boru · 3, xv, 28, 30, 39, 44, 51, 55

C

capability analysis · 29, 84, 87, 139

Ç

Çelik · xviii
 çelik-cüruf etkileşimi · 42
 Çentik darbe testi · 59

D

darbe direnci · xiv, 29
 deoksidant · 34, 112, 113
 DWTT · 2, xxvi, 32, 57, 63, 129, 130, 131, 148, 149

E

EAF · xxvii, 37
 EDS · xxvii, 47, 48, 49, 51, 69
 Elektrik Ark Ocağı · xxvii, 32

F

Fe3C · 32, 72

H

hidrostatik · 31, 145

İ

inklüzyon · 31, 42, 43, 51

K

Karbon · xxvi, 43, 44
 katı eriyik sertleşmesi · 52
 katlama · 29
 kaynaklanabilirlik · 31, 52
 ksi · 30, 39, 57
 kükürt · 34, 43, 46, 47, 112, 144

L

L₀ · 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129
 laminasyon · 31

M

M-A · 46
 Minitab19 · 29, 111
 MnS · 43, 44, 47, 48, 49, 50

N

NbC · xxvi, 44, 46
 Nital · 132

Niyobyum · xv, xxvi, 43, 112

O

OES · 115

Optimizer · 144

Ö

östenit · 43, 44, 46, 53, 54, 71, 72

P

perlit bantlaşmaları · 47, 133, 134, 135, 136

R

Response Optimizer · 107

R-sq · xxvii, 92, 95, 96, 97, 99, 100, 103, 105

S

safsızlıklar · 36, 144

segregasyon · 31, 41, 42, 43, 52, 75

SEM · 47, 48, 49, 51, 68, 69

SEM EDS · 48

sıcak haddeleme parametreleri · 79, 91, 145

slab · 35, 37, 40, 42, 43, 47, 116, 117, 129

Sülfür · 43

sünek · 46, 59, 61, 63, 65, 131

T

tahribatsız muayene · 145

tane küçültücü · 144

termomekanik · 39, 40, 42, 52, 53, 54

Titanyum · xv, xxvi, 45, 113

Tnr · 52, 53, 54

X

X65 · 30, 47, 56, 57, 61, 82, 83, 84, 107

Y

Yüksek Fırın · 32

KAYNAKLAR

- Carbos T. R., Jorge J. C. F., Souza L. F. G. D., Bott I. D. S., Mendes M. C., Investigation into the Impact Toughness of Api 5L X80 Steel Weldments and its Relationship with Safe Welding Procedures. *Materials Research*, 1-3, 23(6), 2020.
- Hwang B., Shin S. Y., Lee S., Kim N. J., S. S. Ahn, Effect of Microstructure on Drop Weight Tear Properties and Inverse Fracture Occurring in Hammer Impacted Region of High Toughness X70 Pipeline Steels, 945-946, 2008.
- Mitchell E. B., Toughness and Separation Improvement of Thick Plate X70 Pipeline Steels, Masters of Applied Science in Engineering, Doctoral Dissertation, Colorado School of Mines, 2019.
- Gray, M. J., Siciliano, F., High Strength Microalloyed Linepipe: Half A Century of Evolution. Microalloyed Steel Institute, 2009
- K. Hulka, J.M. Gray, F. Heisterkamp, “Metallurgical Concept and Full Scale Testing, 2012 High Toughness, H2S Resistant 0.03 % C- 0.10 % Nb Steel”, Niobium Technical Report NbTR 16/90, CBMM, Sao Paulo, Brazil, 1990
- Almatani R. A., DeArdo A. J. Rational Alloy Design of Niobium-Bearing Hsla Steels *Metals*, 10(3), 413, 1-3, 2020.
- Rosado D.B., Waele W. D., Vanderschueren D, Hertelé S., Latest Developments in Mechanical Properties and Metallurgical Features of High Strength Line Pipe Steels, Ghent University, Laboratory Soete, Belgium Ghent University, Department of Materials Science and Engineering, 1-3,2013.
- Xu, J., Mistta, R. D. K., Guo, B., Jia, Z. and Zheng, L., Understanding Variability in Mechanical Properties of Hot Rolled Microalloyed Pipeline Steels: Process–Structure–Property Relationship. *Materials Science and Engineering*, 2013
- Rudskoi A. I., Kodzhaspirov G. E., Kliber J., Apostolopoulos C., Kitaeva D. A. Physical Fundamentals of Thermomechanical Processing in Ultrafine-Grained Metallic Materials Manufacturing, *Materials Physics and Mechanics*, 43(1), 50-54, 2020.
- Trench T.J, Kiefner J.F, Oil Pipeline Characteristics and Risk Factors: Illustrations from The Decade of Construction, 2-6, 2001.
- Tütük R., Arıkan M. M., Kayalı E. S., Effect of Reduction Ratio Below Austenite Recrystallization Stop Temperature on Mechanical Properties of an Api X70M Psl2 Line Pipe Steel. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(5), 972-974, 2019.
- Uranga P., Ibabe J. M. R., Thermomechanical Processing of Steels, 2-3, 2020.

- Olalla V. C., Influence of the Thermo Mechanical Control Processing Finishing Condition on Microstructure and Properties of High Strength Low Alloy Pipeline Steels, 4-6, 2015.
- Poletskov P., Gushchina M., Polyakova M., Alekseev D., Nikitenko O., Chukin D., Vasil'ev Y., Development of Alloyed Pipe Steel Composition For Oil and Gas Production in the Arctic Region, 8(2), 67, 2019.
- Ike T. M., Adedipe O., Abolarin M. S., Lawal S. A., Mechanical Characterization of Welded API X70 Steel Exposed to Air and Seawater: A review, 1-2, 2018.
- Kholodnyi A., Shabalov I., Matrosov Y., Velikodnev V., Perspective Ways To Improve The Strength Properties and Resistance to Hydrogen Induced Cracking of Low Alloy Pipe Steels, (Vol. 121, p. 04016), 1-2, 2019.
- Rudskoi A. I., Kodzhaspirov G., Kliber J., Apostolopoulos C., Thermomechanical Processing of Steels and Alloys Physical Foundations, Resource Saving Technique and Modelling, Materials Physics and Mechanics, 38(1), 16-18, 2018.
- Wang H., Bao Y., Liu Y., Wang M., Wang J., Su C., Effect of Microstructure and Grain Size on Dwt Properties of 22 mm Thick X80M Hot Rolled Steel Strip. Metallurgical Research and Technology, 116(2), 220, 1-3, 2019.
- Weglowski M. S., Dymek S., Kopyściański M., Niagaj J., Rykała J., De Waele W., Hertelé S., A Comprehensive Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Arc Girth Welded Joints of Spiral Welded High Strength Api X70 Steel Pipe. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 20(1), 1-18., 2020.
- Wu S. A., Microstructural and Damage Investigation into the Low Temperature Impact Behavior of an Hsla Steel, Masters of Applied Science in Engineering, University of Guelph, (Doctoral Dissertation), 2019.
- Zvirko O., Tsyruynyk O., Nykyforchyn H., Non-Destructive Evaluation of Operated Pipeline Steel State Taking Into Account Degradation Stage, Procedia Structural Integrity, 26, 220-221, 2020
- Carbos TR, Jorge J, Souza L, Bott I, Mendes M, Investigation into the Impact Toughness of Api 5L X80 Steel Weldments and its Relationship with Safe Welding Procedures". Materials Research, 23(6), 1-3, 2020.
- Tütük R, Arıkan MM, Kayalı ES. Effect of Reduction Ratio below Austenite Recrystallization Stop Temperature on Mechanical Properties of an Api X70M PSL2 Line Pipe Steel". Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23(5), 972-974, 2019.
- Trench TJ, Kiefner JF. "Oil Pipeline Characteristics and Risk Factors: Illustrations from the Decade of Construction". American Petroleum Institute, 2-6, 2001.

- Zvirko O, Tsyurulnyk O, Nykyforchyn H. “Non-Destructive Evaluation of Operated Pipeline Steel State Taking Into Account Degradation Stage”. *Procedia Structural Integrity*, 26, 219-224, 2020.
- Poletskov P, Gushchina M, Polyakova M, Alekseev D, Nikitenko O, Chukin D. Vasil’ev Y. “Development of Alloyed Pipe Steel Composition For Oil and Gas Production in the Arctic Region”. *Resources*, 8(2), 67, 2019.
- Rudskoi AI, Kodzhaspirov GE, Kliber J, Apostolopoulos C, Kitaeva DA. “Physical Fundamentals of Thermomechanical Processing in Ultrafine-Grained Metallic Materials Manufacturing”. *Materials Physics and Mechanics*, 43(1), 50-54, 2020.
- Ike TM, Adedipe O, Abolarin MS, Lawal SA. “Mechanical Characterization of Welded API X70 Steel Exposed to Air and Seawater: A review”. In *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vancouver, Canada, 9-13 July 2018.
- Danin Akwesi Ebu, Tetteh Quaye Prince, Appiah Fordjour Barnie, *Appraisal Of Locally Manufactured Steel Balls For Use As Ore Grinding Media*, 2018
- Rudskoi AI, Kodzhaspirov G, Kliber J. “Apostolopoulos C. Thermomechanical Processing of Steels and Alloys Physical Foundations, Resource Saving Technique and Modelling”. *Materials Physics and Mechanics*, 38(1), 16-18, 2018.
- Uranga P, Ibabe JMR. “Interaction Between Microalloying Additions and Phase Transformation During Intercritical Deformation in Low Carbon Steels”. *Metals*, 9(10), 1049, 2019.
- Olalla VC. “Influence of the Thermo Mechanical Control Processing Finishing Condition on Microstructure and Properties of High Strength Low Alloy Pipeline Steels”, Doctoral dissertation, Ghent University, Ghent, Belçika, 2015.
- Wu SA. “Microstructural and Damage Investigation into the Low Temperature Impact Behavior of an HSLA Steel”, Doctoral dissertation, University of Guelph, Ontario, Canada, 2019.
- Kholodnyi A, Shabalov I, Matrosov Y, Velikodnev V. “Perspective Ways to Improve the Strength Properties and Resistance to Hydrogen Induced Cracking of Low-Alloy Pipe Steels”, In *E3S Web of Conferences*, Petersburg, Russia, 22-24 May 2019.
- Hu, X., Sundqvist Ökvist, L., Ölund, M., *Materials Properties and Liquid Flow in the Hearth of the Experimental Blast Furnace*. *Metals*, 9(5), 572, 2019
- Tekin, *Çelikler ve Dökme Demirler İçin Kuramsal ve Uygulamalı Metalografi*, 2012
- Victor Blancas-Garcia, *A New View of The Grain-Coarsening Behavior of Austenite in Ti-Microalloyed Low-Carbon Steels*, 2016
- Şener, *Veri Bilimi Regresyon Analizlerinde (Supervised) Önemli Kavramlar Rehberi*, 2020

- Graf, Development and Production Of High Strength Pipeline Steels, 2001
- Mehran Maalekian, Christian Doppler, Laboratory for Early Stages of Precipitation The Effects of Alloying Elements on Steels, 2007
- S Vervynckt, K Verbeken, B Lopez, J.J Jonas, Modern Hsla Steels and Role of Non-Recrystallisation Temperature, 2013
- Pei M, Petäjaniemi M, Regnell A, Wijk O, Toward a Fossil Free Future with Hybrid Development of Iron and Steelmaking Technology in Sweden and Finland, 2020
- W.B. Morrison and W.C. Leslie, Metall. Trans., Vol 4, 1973, p 379
- Tovee, John-Paul, Microstructural Influence on the Effects of Forward and Reverse Mechanical Deformation in Hsla X65 and X80 Linepipe Steels, University of Birmingham. Ph.D., 2014
- T. N. Baker, Steel World, Microalloyed steels, Pages 264-307, 2016
- Sahadev Shivaji Sutar, Gorakshanath Shivaji Kale, Sujit Haridas Merad, Analysis of Ductile-to-Brittle Transition Temperature of Mild Steel, 2014
- R.B. Lazor, B.A. Graville, Effect of Microalloying on Weld Cracking in Low Carbon Steels, in Pipeline and Energy Plant Piping, 1980
- Api Recommended Practice 513, Third Edition, Recommended Practice For Conducting Drop-Weight Teartests on Line Pipe, 1996
- Sg/39, Ministry Of Steel, Govt. Of India, Recommended Guidelines For Iron and Steel Sector, Steel Melting Shop, 2009
- Pello Uranga, Cheng-Jia Shang, Takehide Senuma, Jer-Ren Yang, Ai-Min Guo, Hardy Mohrbacher, Molybdenum Alloying in High-Performance Flat-Rolled Steel Grades, 2020
- Uranga, P., Shang, C. J., Senuma, T., Yang, J. R., Guo, A. M., Mohrbacher, H., Molybdenum Alloying in High-Performance Flat-Rolled Steel Grades, Advances in Manufacturing, 8(1), 15-34, 2020
- Dipesh Kumar Mishra, Thermo-mechanical Processing of API-X60 Grade Pipe Line Steel, 2014
- Vance Kendrick, Brian Frye, Jake McClure, Mark Holtman, Douglas G. Stalheim, Development of Api Grade Pipeline Steel With Improved Toughness on a Compact Strip Production (Csp) Line, 2014
- XiaodanWu, Shoulu Zhang, Yutian Wang, Chengjia Shang, The Influence of Composition and Processing Parameters on the Drop Weight Tear Test (Dwtt) Property of High Grade Linepipe Steel, 2012

B. G. Thomas, Q. Yuan, B. Zhao, S.P. Vanka, Transient Fluid-Flow Phenomena in the Continuous Steel-Slab Casting Mold and Defect Formation, 2006

Glenn O., Allgood, Wayne W. Manges, Joe Lake, Mariann Sawyers, Beverly Kay, Bill Nickerson, Sam Matson, Ron Lachman, Wireless for Steel Energy Efficiency, 2013
Biavesh C. Lad, Overview of Iron Steelmaking, 2012

Jamie Shorta, Chris Barnes, Dr Mark Evans, Dr Roger Grosvenor, Paul Prickett, The Development of a Process Charge Expert System for a Basic Oxygen Steelmaking Plant, 2014



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

