

# Tozaltı Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Petrol ve Doğalgaz Borularının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Hakan ADA<sup>1</sup>, Sinan AKSÖZ<sup>1</sup>, Tayfun FINDIK<sup>2</sup>, Cemil ÇETİNKAYA<sup>2</sup>, Mehmet GÜLSÜN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ankara

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Met. Mater. Eng. Ankara, Turkey

(Geliş / Received :14.10.2015 ; Kabul / Accepted :08.02.2016)

## ÖZ

Bu çalışmada; farklı çelik üreticileri tarafından biri doğalgaz (X52), diğeri ise petrol boru hatları için üretilmiş (X65) aynı karbon eşdeğerliğine sahip X52 ve X65 kalitede rulo sac malzemeler boru haline getirilerek tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Elde edilen birleştirmelerden alınan kaynaklı numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, numunelere kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe testleri uygulanmıştır. Kaynaklı birleştirmelere yapılan mekanik testler ile makro ve mikroyapı incelemeleri sonucunda, ince taneli yapıya sahip olan petrol boru hattı için üretilen X65 malzemenin çekme dayanımı ve kaynak metali sertliğinin, nispeten daha iri taneli olan ve doğalgaz boru hattı için üretilen X52 malzemeden daha yüksek olduğu ve tokluk değerlerinin ise daha düşük olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** API, tozaltı kaynağı, tane boyutu, mikroyapı.

## Investigation of Microstructure and Mechanic Properties of Petroleum and Natural Gas Pipeline Weldment by Submerged Welding Processes

### ABSTRACT

In this study, roll sheet materials that were produced for natural gas and oil pipelines by different steel producers, have the same carbon equivalent, X52 and X65 quality were turned into pipe. These materials were combined with submerged arc welding method. Microstructure and mechanical properties of weld samples which taken from combined pipes were investigated. In experimental studies, chemical analysis, hardness tensile, notch-impact tests were performed. The macro-microstructure and mechanical test investigations for the samples taken from welded joints showed that tensile strength and weld metal hardness of X65 material produced for oil pipeline and have fine-grained structure were higher than that of X52 material produced for gas pipeline and have coarser-grain structure. On the other hand, the toughness values of X65 material were lower than that of X52 material.

**Keywords:** API, submerged arc welding, grain size, microstructure.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

IEO'nun (The International Energy Outlook), 2008 yılında yapmış olduğu bir araştırmada, 2008 itibariyle global enerji ihtiyacının %34,6'sını karşılayan petrolün 2030 yılında toplam enerji tüketimindeki oranının % 33 olması beklenmektedir. Son yıllarda büyük oranda artış gösteren doğalgaz talebindeki artış sürerken, petrol talebinde dikkat çekici bir artış beklenmemektedir. [1]. Ulaşım dışındaki diğer tüm alanlarda petrolün en güçlü rakibi haline gelecek olan doğalgazın kullanımının ise 2020'de ikiye katlanarak 5 trilyon m<sup>3</sup>'e ulaşacağı ön görülmektedir [2]. Böylesine hem ekonomik, hem de stratejik önemi bulunan petrol ve doğalgazın buldukları kaynaklardan çıkarılarak ayırma istasyonlarına, ayırma işleminden çıkan ürünlerine

kullanım yerlerine taşınmaları gereklidir. Yüksek basınçlarla gerçekleştirilen bu taşıma işlemi ise büyük çaplı çelik borular ile yapılmaktadır.

Tozaltı ark kaynağında kaynak metali; ana malzeme, ilave edilen kaynak teli ve tozunun, yüksek sıcaklıklarda ergimesi sonucu oluşur [3, 4, 5]. Tozaltı kaynağında ark, tel sürme ünitesiyle kaynak bölgesine otomatik olarak gelen tel elektrot ile birleştirilecek parçalar arasında oluşur ve kaynak bölgesi bir toz kütlesi tarafından korunur [6,7]. Tozaltı kaynak yöntemi, kalın kesitli malzemelerin kaynağında üstün performans, yüksek metal yığıma kapasitesi, düzgün kaynak dikiş formları, yüksek nüfuziyet derinliği, işçilik, enerji, zamandan tasarruf ve yüksek kaynak hızı gibi avantajları nedeniyle günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir kaynak yöntemidir [5,8].

Günümüzde üretilen hat borularının çoğu API (American Petroleum Institute) standardına göre üretilmektedir

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: hakanada@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 275-282

Amerikan Petrol Enstitüsü tarafından yayınlanmakta olan API 5L standardında öngörülen boru ve çelik malzemeler tüm dünyada petrol ve gaz boru hatlarında kullanılmaktadır. API 5L standardı ürün spesifikasyon seviyesi & hizmet koşulları için malzemelerin teslim koşulunu (kara, deniz aşırı, asidik ortam, vb. gibi) ve çelik kalitelerini; normalleştirilmiş, su verilmiş, termomekanik olarak haddelenmiş, vb. gibi tanımlamaktadır. Bu standart, dikişsiz ve dikişli boruları kapsamaktadır. Dikişli borular genellikle ark kaynak yöntemleri ile boyuna ve spiral dikişli olarak üretilirler [9]. Doğalgaz ve petrol boruları gerek on-line gerekse off-line kontrollerin yanı sıra, DWTT (Drop Weight Tear Test) işlemleri de dâhil olmak üzere birçok tahribatlı ve tahribatsız testlerden geçirilmektedirler. Proje gereksinimleri ve kullanım alanlarına bağlı olarak; alaşımsız, mikroalaşımli veya özel imalat çelikleri kullanılmaktadır. Üretim için seçilecek malzemeye temel oluşturmak amacıyla projeye özgü bir şartname hazırlanır. Amaç, sağlam ve sünek olmanın yanı sıra, şekillendirme, kaynak ve bükme için uygun homojen ince taneli mikroyapıyı elde etmektir.

API borularının üretildiği malzemeler ince taneli yapı çelikleridir. Bu malzemeler genellikle X sınıfında değerlendirilmekte ve tane yapısına göre sınıflandırılmaktadır. X42, X46, X52, X65 ve X70 gibi malzemeler doğalgaz ve petrol boru hatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. API standardında X sınıfında değerlendirilen malzemelerin ana özelliği, ince taneli ferrit ve perlit yapılarının termomekanik işlemler sonucunda elde edilmesidir. Bu sınıflandırma işleminde X'in yanında bulunan malzeme numarası yapı içerisindeki alaşım elementleri oranına göre değişmekte, X'in yanındaki numara arttıkça mikroyapıların daha ince yapılardan oluştuğu görülmektedir. İnce taneli yapı çeliklerinde ana

birleştirilmiştir. X65 ve X52 malzemeler farklı mikroyapılara sahiptirler. Farklı tane boyutlarındaki her iki malzeme tozaltı ark kaynağıyla birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmelerden alınan kaynaklı numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, numunelere kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikroyapı fotoğrafları çekilerek, kaynak işleminin mekanik özelliklere olan etkileri araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Deneylerde, sürekli döküm yolu ile imal edilmiş, termomekanik haddelemeye tabi tutulmuş, hidrojen kırılabilirliğine karşı yüksek dirençli, API 5L standardında üretilen ve aynı karbon eşdeğerliğine sahip (% 0,26) X52 (A numunesi) ve X65 (B numunesi) çeliği kullanılmıştır.

Önemli bir parametre olan karbon eşdeğerliği her iki malzemede hemen hemen aynı (% 0,26) seçilerek mekanik özelliklerin tane boyutuna bağlı olarak gösterdiği değişimin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Sac malzemeler, Borusan Mannesmann'ın İzmit'teki fabrikasında Çizelge 1'deki kaynak parametrelerine uygun olarak, tüm elektriksel ekipmanları Lincoln Electric tarafından tasarlanan otomatik tozaltı kaynak makinasında spiral şeklinde kaynatılarak boru haline getirilmiştir. Kaynak makinesi; 273,1 mm (10") - 3048 mm (120") boru çap aralığında 4,0 ile 25,0 mm kesit kalınlığındaki boruları kaynatabilen, DC redresörler maksimum 1500 A akım, AC redresörler ise maksimum 1200 A akımda çalışabilmektedir. Kaynak hızı 0,25 ile 3,20 m/dk. arasında değişmekte olup, iç kaynakta üç kafa, dış kaynakta ise iki kafayı ayna anda kullanım

Çizelge 1. Deney Parametreleri (Test Parameters)

Malzeme	Kullanılan Kaynak Teli	Kaynak Bölgesi	Tel çapı (mm)	Hız (cm/dk)	Akım Tipi	Amper (A)	Ark Gerilimi (V)
API 5L X 52 kalite evsafında, (16") 406,4x6,4 mm boyutlu doğalgaz borusu – A numunesi	S2Mo	İç Kaynak	3,2	170	DC +	675	29
		Dış Kaynak	3,2	170	DC +	700	29
API 5L X 65 kalite evsafında, (42") 1067x11,91 mm boyutlu petrol borusu – B numunesi	S3Mo	İç Kaynak	4,0	200	DC +	850	27
			3,2	200	AC1	700	27
			3,2	200	AC2	475	29
		Dış Kaynak	3,2	200	DC +	850	29
			3,2	200	AC	575	29

mikroalaşım elementi, titanyum ve vanadyum ile kombinasyonu (Nb/V, Nb/Ti, and Nb/V/Ti) olan niyobyumdur. Bu yapılar çeliklerin akma gerilimini ve tokluğunu olumlu yönde etkilemektedir [10-12].

Bu çalışmada; biri doğalgaz boru hattı (X52 - A numunesi), diğeri ise petrol boru hattı için üretilmiş (X65 - B numunesi) X52 ve X65 kalitede rulo sac malzemeler boru haline getirilerek tozaltı ark kaynak yöntemi ile

olanağı vardır. Tel sürme işlemi, DC redresörlerde Lincoln NA-5, AC redresörlerde ise Lincoln NA-4 kontrol sistemi ile gerçekleştirilmektedir.

Kaynaklı birleştirmelerde P223 FX kaynak tozu, ilave tel olarak S2Mo ve S3Mo tel kullanılmıştır. Çizelge 2'de deney malzemelerinin, Çizelge 3'de kaynak tellerinin, Çizelge 4'de ise kaynak tozunun kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 2. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Analizleri (Chemical Analysis of Materials Used in Experimental Studies)

Malzeme / %	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	N	Al	Nb	Ti	Ceş
X52 Malzeme - A numunesi	98,6	0,09	0,22	0,93	0,010	0,004	0,01	0,02	0,03	0,006	0,035	0,028	0,001	0,26
X65 Malzeme - B numunesi	98,5	0,039	0,19	1,1	0,014	0,001	0,02	0,01	0,01	0,005	0,032	0,054	0,0022	0,26

Çizelge 3. Deneylerde Kullanılan Kaynak Tellerinin Kimyasal Analizi (Chemical Analysis of the Welding Wire Used in the Experimental Studies)

Kaynak Teli	Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V
S2Mo (A numunesi)	98,0	0,10	1,03	0,12	0,006	0,007	0,07	0,05	0,48	0,08	0,003	0,003	0,01
S3Mo (B numunesi)	97,5	0,09	1,65	0,16	0,008	0,006	0,02	0,02	0,51	0,03	0,002	0,002	0,01

Çizelge 4. Deneylerde Kullanılan P223 FX Türü Kaynak Tozunun Kimyasal Analizi (Chemical Analysis of the P 223 FX Fluxes Used in Experimental Studies)

P223FX	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	FeO	NaO	Metal Alaşımı
%	23	4	21	21	20	4	2	1	1	2	3 Maks.

Yapılan kaynak işlemlerinden sonra numunelere çekme, sertlik ve çentik - darbe (Charpy) testleri uygulanmış ve numunelerin makro ve mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Çizelge 1'deki kaynak parametrelerine bağlı kalına-rak yapılan deneylerden sonra her bir malzeme için deney numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler, standart meta-lografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış, daha sonra % 3 Nital çözeltisiyle dağlanmış. Dağlanan numunelerin mikroyapı fotoğrafları LEICA marka optik mikroskop yardımıyla çekilmiştir.

Mikroyapı fotoğrafları çekilen numuneler, daha sonra sertlik ölçme işlemlerinde kullanılmıştır. Sertlik deneyleri Struers marka, Duramin A300 model, 0,100 – 31.250 kg kapasiteli, tam pinomatik, değişken yüke sahip, Vickers, Brinell, Rockwell cinsinden makro ve mikro ölçümler yapabilen bir cihaz yardımıyla yapılmıştır. Sertlik ölçme işleminde Vickers sertlik ölçme metodu kullanılmış ve yük olarak da boru imalatçıların kullandığı 10 kilogramlık bir ağırlık seçilmiştir. Her bir deney numunesinin üzerinden 15 ayrı bölgeden, 5 farklı noktadan sertlik değerleri alınmış, bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır.

Çekme numuneleri ise ASTM E8 standardına uygun olarak her bir kaynaklı malzeme için 5 adet çekme testi, 600 KN yük kapasitesine sahip Instron marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kaynaklı birleştirmelerin maksimum çekme mukavemeti ve %

uzama değerlerine bakılmış ve numunelerin ortalama değeri hesaplanmıştır.

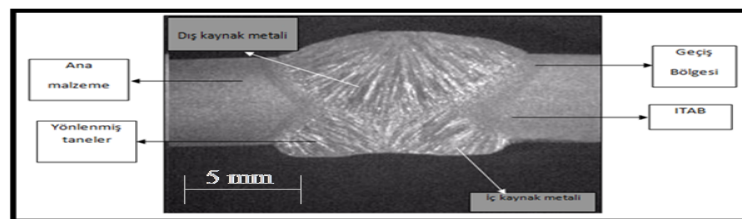
Çentik - darbe deneyleri maksimum 300 Joule enerji ölçebilen ve çarpma hızı 5,42 m/sn olan bir cihaz yardımı ile yapılmış olup, çentik - darbe deney numuneleri EN 10045'e göre sivri çentikli ISO-V şeklinde hazırlanmıştır. Numune soğutması sıvı banyo içinde  $\pm 0,5$  °C hassasiyet ile yapılmış olup, sıvı banyo içinde tutulma süresi 7 dakikadır. Deneyler, -20 °C'de yapılmış olup numuneler cihaza çentik eksenine mesnet açıklığının tam ortasında ve çentikli yüzün çekicinin vuracağı yüzün ters tarafında olacak şekilde yapılmıştır. Deneylerde ana malzemeden ve kaynak bölgesinden alınan 5'er adet numunenin çentik - darbe sonuçları alınmış olup, ortalamaları hesaplanarak çentik - darbe deney sonucu hesaplanmıştır.

### 3. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

#### (EXPERIMENTAL RESULTS and DISCUSSION)

#### 3.1. Makroyapı Analizleri (Macrostructure Analyses)

Kaynak işleminden sonra elde edilen makroyapı görüntüleri Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmektedir. Genel olarak incelenen makroyapı fotoğraflarına bakıldığında kaynaklı birleştirmelerde tam nüfuziyet sağlanmış olup, makro düzeyde herhangi bir kaynak hatasına (yanma oluğu, gözenek, kalıntı, çatlak, v.b.) rastlanmamıştır. Ayrıca kaynak metali içerisindeki tanelerin, ana metal sınırlarından kaynak metali merkezine doğru yönelmesi



Şekil 1. X52 Doğalgaz Boru Numunesine (A) Ait Kaynak Metali Makroyapı Fotoğrafı (Macrostructure Image of Weld Metal of X52 Natural Gas Pipe Samples (A))

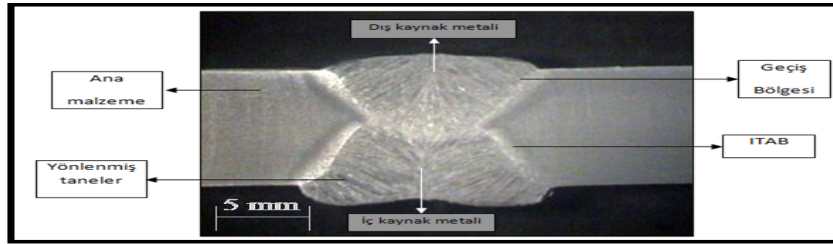
görüldükçe, ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgeleri de net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 1 ve Şekil 2’de verilen X52 ve X65 birleştirmelerine ait makroyapı fotoğrafları incelendiğinde, yapısal olarak benzerlik görülmektedir. Ancak Şekil 1’de görülen X52 malzemenin makro görüntülerinde sütunsal tanelerin daha belirgin ve kaba olduğu, ITAB’ların daha geniş olduğu görülebilmektedir. X52 ana malzemesinin, X65 ana malzemesine göre daha kaba taneli olduğu bilinmekte olup [10 - 12], yapılan çalışmadaki mikroyapı

geliştirilmesi ve muhtemel çatlak oluşumlarının engellenmesini sağlamaktadır [14–19].

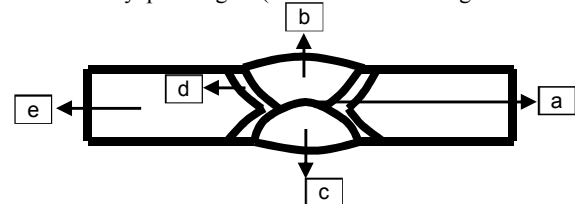
### 3.2. Mikroyapı Analizleri (Microstructure Analyses)

Şekil 3’de ana malzeme, ITAB, iç kaynak metali, dış kaynak metali ve kaynak metali şematik olarak verilmektedir. Şematik olarak verilen bölgelerden alınan mikroyapı görüntüleri ise Şekil 4 (X52- A numunesi) ve Şekil 5’de (X65 – B numunesi) görülmektedir.



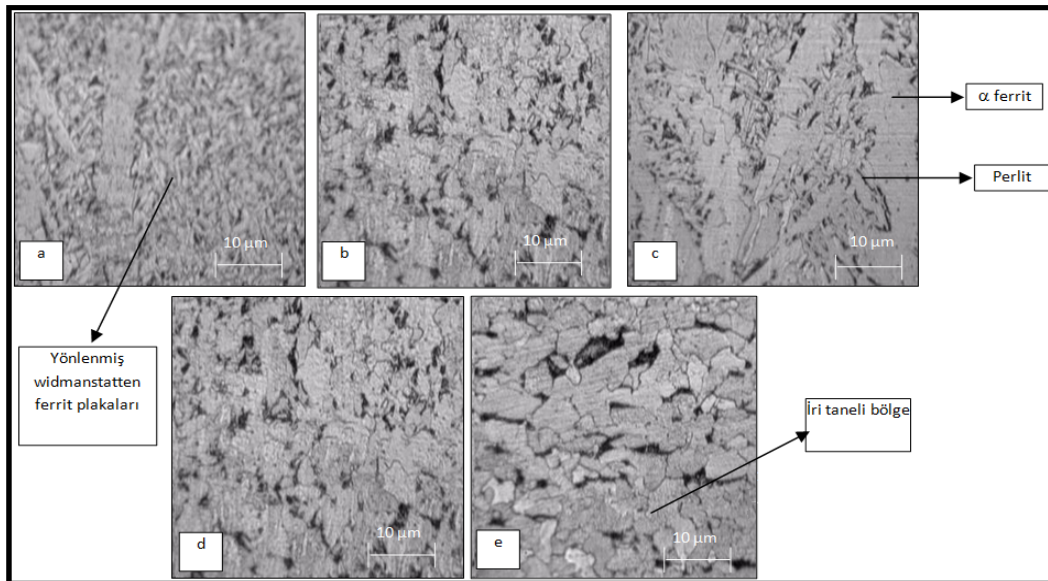
Şekil 2. X65 Doğalgaz Petrol Boru Numunesine (B) Ait Kaynak Metali Makroyapı Fotoğrafı (Macrostructure Image of Weld Metal of X65 Natural Gas Pipe Samples (B))

analizleri (Şekil 4 ve Şekil 5) ise bu durumu destekler niteliktedir. Bu durum yapıda bulunan V, Nb ve Ti gibi alaşım elementlerinin tane inceltici etkisinden kaynaklanmaktadır. Bazı düşük alaşımlı çeliklere titanyum, vanadyum ve niyobyum gibi alaşım elementleri ilavesinin asiküler ferrit oluşumunu artırdığı bilinmektedir. Asiküler ferrit oluşumunun artmasıyla birlikte tane yapısı incelenerek, mekanik özellikleri artırmaktadır [13]. Kaynak işleminde dolgu malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken önemli husus kaynak metalinin akma ve çekme dayanımları ile tokluğunun artması ve yüksek performanslar elde edilmesidir. Kaynak metaline ilave edilen Mn, Cr, Ni, Mo, Ti, Nb ve V gibi alaşım elementleri mekanik özelliklerin

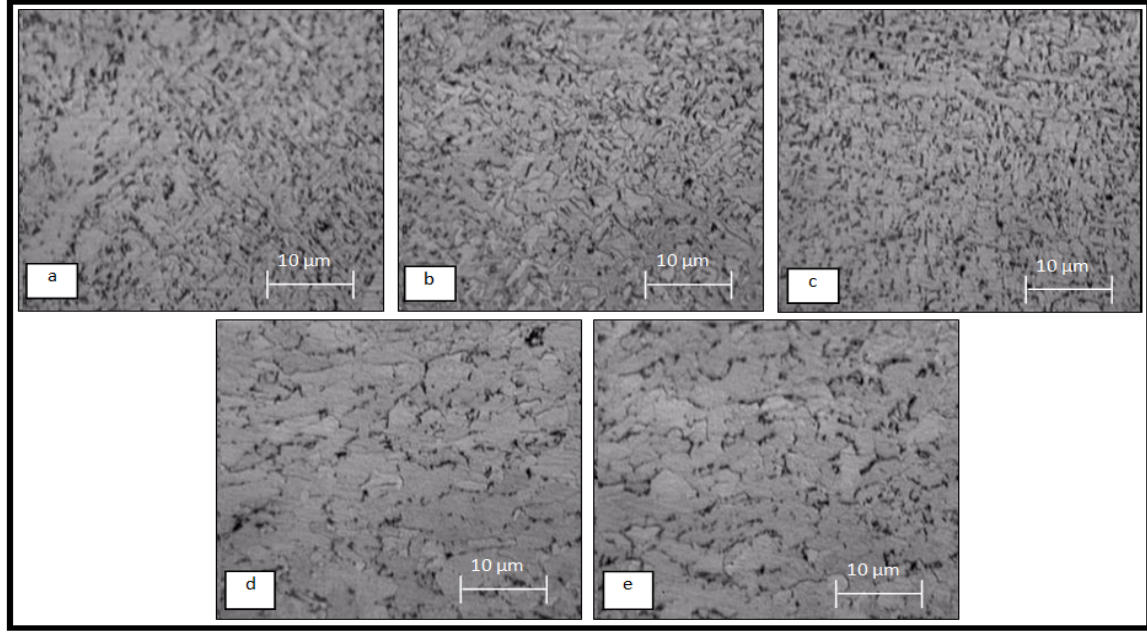


Şekil 3. Mikroyapı Fotoğrafları Çekilen Bölgelerin Şematik Gösterimi. a) İç ve Dış Kaynak Birleşim Noktası b) Dış Kaynak c) İç Kaynak d) Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) e) Ana Malzeme

(Schematic Illustration of the Weld Zones. a) Fusion Line of Internal and External Weld Zones b) External Weld c) Internal Weld d) Heat Affected Zone e) Main Material)



Şekil 4. X52 (A) numunesi Mikroyapı Fotoğrafları (x1000), a) İç ve Dış Kaynak Birleşim Noktası b) Dış Kaynak c) İç kaynak d) Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) e) Ana Malzeme (Microstructure Images of X52 Samples a) Fusion Line of Internal and External Weld Zones b) External Weld c) Internal Weld d) Heat Affected Zone e) Main Material)



Şekil 5. X65 (B) Numunesi Mikroyapı Fotoğrafları (x1000), a) İç ve Dış Kaynak Birleşim Noktası b) Dış Kaynak c) İç Kaynak d)Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) e)Ana Malzeme (Microstructure Images of X65 Samples a) Fusion Line of Internal and External Weld Zones b) External Weld c) Internal Weld d) Heat Affected Zone e) Main Material)

Şekil 4 ve Şekil 5’de verilen mikroyapı görüntülerine bakıldığında, her iki malzemede ITAB’da ana malzemeye göre daha iri tanelerin oluştuğu görülmektedir. Kaynak metalinde ise tane yapısı olarak, klasik kaynak metalindeki dendritik yapının hâkim olduğu belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Tanelerin ısı akışı yönüne ters yönde olacak şekilde oluştuğu görülürken, yüksek türbülansın etkisiyle tane yapısının diğer bölgelere oranla daha homojen bir şekilde ve daha ince olarak dağıldığı görülmektedir. Kaynak metal mikroyapısı daha ince tanelerden oluşmaktadır. Diğer bölgeler ise kısmen dendritik tanelerden oluşmuştur. X65 malzemenin birleştirilen petrol borusunun (B numunesi) kaynak metal mikroyapı fotoğraflarında uzun sütunsal ferrit plakaları görülürken, X52 malzemesine ait doğalgaz borusu (A numunesi) kaynak metalinde daha küçük ve sık ferrit plakaları görülmektedir. Petrol borusunun (X65), doğalgaz borusuna (X52) göre daha kalın kesitte olmasının, bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Mikroyapı fotoğraflarında X52 malzemesinde daha iri ana malzeme tane yapısının oluştuğu görülürken, X65 malzemesinde daha küçük tanelerin oluştuğu görülmüştür. Bilindiği gibi ince taneli yapıların dayanımı kaba tanelere göre daha yüksektir. Çekme deneyi sonuçlarında da iri taneli yapıya sahip olan X52 malzemesinin çekme dayanımının, X65 malzemenin çekme dayanımından daha düşük bir değerde olduğu tespit edilmiştir. Diğer mekanik testlerde bu durumu doğrulamaktadır. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri birbirine yakın olmakla birlikte karbon eşdeğerleri de aynıdır ( $C_{eq}=\%0,26$ ). Üretim esnasında Ti, Nb gibi alaşım elementleri kullanarak tane inceltmesi sağlanarak malzemelerin dayanım değerleri artırılmıştır. Ti ve Nb

gibi alaşım elementleri tane sınırlarının çevresinde kümelenerek tanelerin irileşmemesi için bir bariyer görevi görmekte ve tanelerin ince ve küçük yapıda kalmasına neden olmaktadır. Deniz ve Krautkramer de yaptığı çalışmalarda [20, 21], V, Al, Mo, Ti ve Nb gibi elementlerin tane büyümesini azaltıcı etki yapan en önemli alaşım elementleri olduğunu ifade etmektedir.

### 3.3. Çekme Testi Sonuçları (Results of Tensile Test)

Deneyel çalışmada çekme numuneleri standarda (ASTM E8) uygun hazırlanan numunelere ait çekme test sonuçları Çizelge 5’de verilmektedir. Çekme deney sonuçları incelendiğinde, kopmanın bütün malzemelerde ana malzemenin olduğu, kaynaklı bölgeden herhangi bir kopmanın olmadığı tespit edilmiştir. Bu da kaynaklı numunenin çekme dayanımının, ana malzemenin çekme dayanımından yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi; çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyonu engellemesi olarak düşünülmektedir. Kahraman ve arkadaşları yaptıkları çalışmada aynı bileşim ve farklı çekme boylarında yapılan çekme testleri sonucu, çekme hızı sabit ise çekme boyu kısa olan malzemenin hızlı pekleşmeden dolayı daha yüksek dayanım gösterdiğini belirtmektedir. Kaynak bölgesinin daha sert olması nedeniyle deformasyon bu bölgelerin dışında meydana gelmektedir. Deformasyonun dar bir bölgede meydana gelmesi ise dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Kopma ana malzemenin olmasına rağmen, kaynaklı numunenin % uzama değerlerinin düşük çıkma sebebinin ise kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında deformasyona uğramamasıdır. Kaynaklı bölgenin deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç çekme mukavemetinin artmasına ve % uzama değerinin azalmasına neden olmaktadır [4]. Çekme test sonuçlarında X65 malzemesinden ölçülen çekme

değerleri kaynak metalinde ortalama  $615 \text{ N/mm}^2$ , ana malzemede ise  $564 \text{ N/mm}^2$ , X52 malzemesinde ise ana malzemede  $515 \text{ N/mm}^2$ , kaynak metalinde ise  $557 \text{ N/mm}^2$  olarak ölçülmüştür. Malzemelerin tane boyutlarının, mekanik özelliklerin tayininde önemli ölçüde etkili olduğu, çekme testlerinde de görülmektedir. Tane boyutu, mukavemeti belirleyen bir mekanizma olup, tane boyutu ile mukavemet arasında ters orantı vardır. Tane boyutu arttığında birleştirilen malzemenin mukavemet değerleri azalmakta, azaldığında ise mukavemet değerleri artmaktadır. Yapılan benzer çalışmalarda da; tanelerin ortalama büyüklüğü azaldıkça, tane boyutundan gelen akma dayanımının artacağı ifade edilmektedir [22, 23]. Deneylerde kullanılan farklı ilave tellerin özellikleri de kaynak metalinin mekanik özelliklerini etkilemektedir. İlave tellerin kimyasal kompozisyonları incelendiğinde, malzemelerin nispeten birbirine yakın içerikte olduğu görülmektedir. Ancak kaynak malzemeleri içerisinde, X65 malzemedeki Mn miktarı, X52 malzemesine göre % 50 oranında daha fazla içeriğe sahiptir (Çizelge 3). Mn oranının artması ile malzemenin mukavemet ve sertlik özellikleri artarken, tokluk değerinde azaldığı bilinmektedir. Yapılan bu çalışmada da kaynak metalinin mukavemet ve sertlik özellikleri artarken tokluk değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu özelliklerin sergilenmesinde, X65 malzeme kaynağında kullanılan S3Mo telin sahip olduğu mangan oranının etkili olduğu düşünülmektedir. C, Cu ve Mn gibi alaşım elementlerinin malzemenin mukavemet değerlerinin ve sertliği arttırdığı, kırılma ve tokluk değerlerinin ise azaldığı yapılan daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir [24, 25].

Çizelge 5. Çekme Testi Sonuçları (Results of Tensile Test)

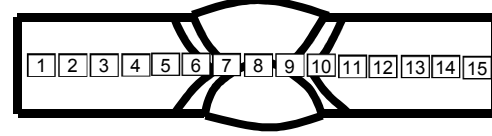
Numune	Ölçüm Bölgesi	Max. Çekme Dayanımı ( $\text{N/mm}^2$ )	% Uzama
A – X52 Doğalgaz Boru Numunesi	Ana malzeme	515 ( $\pm 7$ )	34 ( $\pm 3$ )
	Kaynaklı malzeme	557 ( $\pm 12$ )	20 ( $\pm 2$ )
B – X65 Petrol Boru Numunesi	Ana malzeme	564 ( $\pm 6$ )	36 ( $\pm 4$ )
	Kaynaklı malzeme	615 ( $\pm 8$ )	14 ( $\pm 2$ )

Çekme testi sonuçları, mikroyapı sonuçları ile birlikte irdelendiğinde; daha ince tane yapısı görülen X65 malzemede (Şekil 5) çekme dayanımı, alaşım elementleri ve tane yapısının etkisiyle birlikte daha yüksek sonuçlar göstermektedir. Düşük çekme dayanımı gösteren X52 malzemesinin (Şekil 4) mikroyapı fotoğraflarında ise; bu malzemenin daha kaba taneli yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Mahmutoğlu ve Çimenoğlu yaptığı çalışmada, API çeliğinin tane boyutunun küçüldükçe akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinin artmakta, kopma uzamasında ise belirgin bir değişim görüldüğünü belirtmektedir [23]. Karacif ve arkadaşları da; küçük tane boyutuna sahip malzemelerin, yüksek dayanım, yüksek tokluk ve yüksek yorulma ömrü gibi avantajlara sahip olduğunu belirtmektedir [26]. Ayrıca, tane boyutu küçüldükçe akma ve çekme mukavemeti, çentik darbe ve kırılma tokluğu ile sertlik değerlerinin arttığı ifade edilmektedir. Akma ve çekme mukavemetindeki artış,

tane boyutunun küçülmesi sonucunda tane sınırlarının yoğunluğunun artarak dislokasyon hareketlerini engellemesinden kaynaklanmaktadır [27].

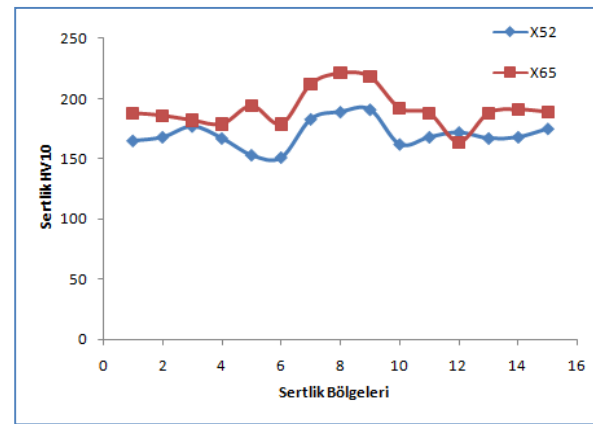
### 3.4. Sertlik Testi Sonuçları (Results of Hardness Test)

Şekil 6'da sertlik değerleri alınan bölgelerin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 6. Sertlik ölçüm bölgeleri (The Regions of Hardness measurement)

X52 ve X65 malzemenin sertlik grafiği ise Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. X52 ve X65 malzemelerine ait sertlik grafiği (Hardness graph of X52 and X65 materials)

Sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak bölgesinde olduğu, en düşük sertliğin ise kaynak metalinin hemen yanında ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) olduğu görülmektedir. Eroğlu ve Aksoy'un, yaptıkları çalışmada en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde olduğunu ifade etmesi, çalışmadaki sertlik sonuçlarını destekler niteliktedir [28]. X52 malzemede kaynak metalinin sertliğinin yaklaşık 190 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise malzemenin orijinal sertlik değeri olan yaklaşık 170 HV olduğu görülmektedir. X 65 malzeme için kaynak metali sertliğinin yaklaşık 220 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise ilk sertlik değeri olan yaklaşık 180 HV değerinde olduğu görülmektedir (Şekil 7).

### 3.5. Çentik - Darbe Deneysel Sonuçları (Results of

Charpy – Impact Test)

-20 °C’de gerçekleşen çentik - darbe deneyleri sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6’da verilmiştir. Çentik - darbe deney sonuçlarına göre X 52 malzemede ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 182 Joule, kaynak metalinin ise 148 Joule olduğu tespit edilmiştir. X 65 malzemede ise ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 299 Joule, kaynak metalinin ise 65 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 6. Çentik darbe test sonuçları (Results of Charpy Impact Test)

Numune	Ölçüm Bölgesi	Enerji (Joule) Test sıcaklığı:-20°C
A – X52 Doğalgaz Boru Numunesi	Ana malzeme	182 (±7)
	Kaynaklı bölge	148 (±8)
B – X65 Petrol Boru Numunesi	Ana malzeme	299 (±11)
	Kaynaklı bölge	65 (±5)

Çentik – darbe deneylerinde, kaynaklı bölgelerdeki çentik – darbe değerlerinin daha düşük olduğu, ana malzeme değerlerinin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik deney sonuçlarında da en sert bölgenin kaynak metali olduğu belirtilmiştir. Elde edilen çentik - darbe deney sonuçları sertlik sonuçları ile kıyaslandığında sertliğin yüksek olduğu bölgelerin kırılma enerjisinin daha yüksek olduğu, buna karşın ana malzemelerin kaynak bölgelere oranla daha tok olduğu ve kırılma enerjisini daha çok absorbe ettiği görülmektedir. Kaynak metali içerisinde tane sınırı widmanstatten ferrit ve martenzit oluşumunun tokluk düşüşüne neden olduğu bilinmektedir. Eroğlu ve Aksoy da yaptıkları çalışmada, yine tane sınırı widmanstatten ferrit ve martenzit yapının kaynak metalinde tokluk düşüşüne neden olduğu ifade edilmektedir [28]. İnce tane yapısının hâkim olduğu X65 malzemenin kaynak metalinde daha yüksek sertlik değerleri görülürken, en düşük çentik darbe değerleri, sertliğe ters oranlı olarak X65 malzemede görülmektedir. Sertlik deneylerinden elde edilen verilerden de görüleceği üzere kaynak bölgesi malzemenin en sert bölgesidir. Kaynak metalleri için ölçülen sertlik grafiklerinde verilen değerler ile tokluk değerleri kıyaslanacak olursa; sertlik arttığında tokluğun azaldığı görülmektedir.

Tane boyutunun tokluk üzerine etkilerini incelemek üzere yapılan çalışmalarda, kaba taneli yapılar ile ince taneli yapılar mukayese edilmiş ve kaba taneli yapılarıdaki tokluk değerlerinin, daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [29]. Ayrıca çeliklerin mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda, artan tane boyutunun etkisiyle akma ve çekme dayanımları artarken, tokluk dayanımlarının düştüğü belirtilmektedir [30, 31].

### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Çalışmada kullanılan malzemelerden X52’de daha iri tane yapısı oluşurken, X65’in daha ince tanelerden meydana geldiği görülmüştür.
- İnceltmiş tane yapısına sahip olan malzemelerin çekme dayanımı ve tokluk gibi mekanik özelliklerini arttırdığı ve X65 malzemesinin sahip olduğu mekanik özelliklerin, X52 malzemesine oranla daha iyi sonuçlar sergilediği görülmüştür.
- Üretim esnasında Ti, Nb, V gibi alaşım elementleri kullanarak tane inceltmesi yapılmış ve malzemelerin dayanımının artırıldığı, Ti, Nb ve V gibi alaşım elementleri tanelerin ince kalmasını sağlayarak mukavemetlendirme mekanizmasına neden olduğu gözlenmiştir.
- Mikroyapı ile elde edilen çekme dayanımları sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu ve daha ince tane yapıları X65 malzemenin, kaba taneli X52 malzemesinden daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.
- Mikroyapıda bulunan widmanstatten ferrit, asiküler ferrit ve martenzit fazların kaynak metalinde sertliği arttırdığı, tokluğu ise olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TPAO, “Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu”, *Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı*, Ankara, 1-2, (2008)
- [2] Petrogas, “Dünya daha çok enerji istiyor”, *Petrogas, Botaş Vakfı Yayın Organı Sayı 10*, Ankara, 30-31, (1999).
- [3] Durgutlu A., Kahraman N., Gülenç B., “Tozaltı ark kaynağında kaynak tozunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *ESEF*, 10(11):1-8, (2002).
- [4] Kahraman N., Gülenç B., Durgutlu A., “Tozaltı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18(3): 473-480 (2005).
- [5] Kaya Y., Kahraman N., Durgutlu A., Gülenç B., “Tozaltı ark kaynağı ile birleştirilen farklı kalınlıktaki Grade A gemi saclarının mekanik özelliklerinin araştırılması”, *J. New World Sci. Acad. Eng. Sci.*, 1A0088, 5(2): 348-357, (2010).
- [6] Kahraman N., Gülenç B., “Modern Kaynak Teknolojisi Kitabı”, *Epa-Mat Basın Yayın Ltd. Şti*, Ankara, 30-36, (2009).
- [7] Ogborn J.S., “Submerged Arc Welding”, *ASM Handbook*, 6: 202-204, (1993).
- [8] Çetinkaya C., “Orta karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği ve mekanik özelliklerin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 1(3-4): 61 - 67, (1998).
- [9] Yıldız M., “Doğalgaz boru hatlarının kaynağı ve tahribatsız muayenesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4 - 12, (2000).

- [10] Bajic N. and Šijaki-Žeravi V., “The analysis of change of structural and mechanical properties of welded joints of microalloyed Nb/V steel grade by changing the composition of filler material,” *Internat. Conf. on Welding*, Belgrade (2003).
- [11] Bajic N., Šijaki-Žeravi V., Rakin M. and Kovacevic K., “Structure optimization of weld metal and HAZ in microalloyed high strength steel welded joints”, *YUCOMAT 2005*, Herceg Novi, (SBN: 86-80321-08-7), pp. 193–200, (2005).
- [12] Radovic A., Bajic N. and Grabulov V., “Specific quality of the weld metal of welded joints of fine-grained microalloyed steels”, *Zavarivanje* 96, 61–72, Belgrade, (1996).
- [13] Beidokthi B., Koukabi A.H., Dolati A., “Effect of Titanium Addition On The Microstructure And Inclusion Formation In Submerged Arc Welded HSLA Pipeline Steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1-9, (2009).
- [14] Osama A.K., “Weld metallurgical aspects and crack susceptibility in high-strength steels: weldability of materials and testing methods”, *Vranje*, 49–57, (1985).
- [15] Bhadeshija H.K.D., “Bainite in Steels”, *The Institute of Materials*, London, UK, 45–58. (1992).
- [16] Li Y., Crowther D.N., Green M.J.W., and Mitchell P.S., “The effect of vanadium and niobium on the properties and microstructure of the intercritically reheated coarsegrained heat-affected zone in low-carbon microalloyed steels”, *ISIJ International*, 41: 46 – 61, (2001).
- [17] Evans G.M., “The effect of alloying elements on the microstructure and properties of ferrite all-weld-metal deposits”, *Welding-90*, Zurich, Switzerland, (1990).
- [18] Evans G.M., “The effect of nickel on the properties of C-Mn as-welded metal deposits”, (I.I.W2-1A-791-89), (1989).
- [19] Hallen G., “Some aspects on the formation of microstructure in multipass welds in ferritic ductile iron”, 3rd *Int. Symp. on the Physical Metallurgy of Cast Irons*, Stockholm, Sweden, 457–65, (1984).
- [20] Krautkramer M.B., “Nondestructive Material Testing with Ultrasonics - Introduction to the Basic Principles”, *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, ISSN: 1435-4934, 5:9, (2000).
- [21] Deniz A., “Çeliklerde Tane Boyutunun Ultrasonik Yöntemle İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 40, Ağustos, (2012).
- [22] Kara R., “Tane Boyutunun HMK Kafesli Metallerin Temel Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Yüksek lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2005).
- [23] Mahmutoğlu Z., Çimenoğlu M., “% 0.03 Nb ve % 0.05 V’lu Bir Boru Hattı Çeliğinde Mikroyapı-Mekanik Özellik İlişkisi”, *İTÜ Dergisi – Mühendislik*, 2(6): 1-5, (2003).
- [24] Ada H., Fındık T., Çetinkaya C., “Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen Boruların Birleştirilmesinde Kaynak Teli Kompozisyonunun Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, *2nd International Conference on Welding Technologies and Exhibition*, Ankara, 654-664, (2012).
- [25] Ünlü B.S., Kurgan N. ve Yılmaz S.S., “Toz Metal Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Mühendis ve Makina*, 50: 1-9, (2008).
- [26] Karacif K. ve İnem B., “Düşük Karbonlu Bir Çeliğin Kaynağında Termomekanik İşlemin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 16: 1-8, Ankara, (2001).
- [27] Taş Z., “Nb ve V Alaşımli Çeliklerinde Mikroyapı - Mekanik Özellikler İlişkisi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 22: 1-9, Kayseri, (2006).
- [28] Eroğlu M. ve Aksoy M., “15Mo3 Çeliğinin Kaynağında Enerji Girişinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi*, 38, (2002).
- [29] Kostrubanic J., Koss D.A., Locci I.E. and Nathal M., “On Improving the Fracture Toughness of a Ni-Al Based Alloy by Mechanical Alloying”, *MRS Fall Meeting*, (1990).
- [30] Xiao F.R., Liao B., Shan Y.Y., Qiao G.Y., Zhong Y., Zhang C., Yang K., “Challenge of Mechanical Properties of An Acicular Ferrite Pipeline Steel” *Materials Science and Engineering A*, 431: 41–52, (2006).
- [31] Zhao M.C., Yang K., Shan Y. “The Effects Of Thermo-Mechanical Control Process On Microstructures And Mechanical Properties Of A Commercial Pipeline Steel”, *Materials Science and Engineering A*, 335: 14–20, (2002).