



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

journal homepage: <https://jiens.org>

SG2 düşük alaşımlı ilave metal kullanılarak tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen silindirik parçanın mekanik özelliklerinin araştırılması

Kürşat Uygur Altun^{a*}, Ercan Çağlar^a, Yusuf Ayan^b, Nizamettin Kahraman^a

^aKarabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük, 78050, Türkiye.

^bKarabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Karabük, 78050, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 20 Eylül 2023

Düzeltilme 30 Kasım 2023

Kabul 28 Aralık 2023

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Tel ark eklemeli imalat

Silindir

Düşük alaşımlı çelik

SG2

ÖZET

Bu çalışmada, son yıllarda kullanım alanları ve önemi giderek artan eklemeli imalat tekniklerinden tel ark eklemeli imalat yöntemi (TAEİ) kullanılmıştır. Çalışmada düşük alaşımlı çelik olan SG2 gazaltı kaynak teliyle silindirik şekilde parça üretimi yapılmıştır. Çalışmanın amacı standart olarak temin edilemeyen silindirik parçanın istenilen ölçülerde TAEİ yöntemiyle üretilmesidir. Üretim işlemlerinde MIG-MAG kaynak yöntemi kullanılmıştır. Üretilen parçadan alınan numunelere mekanik ve metalürjik testler uygulanmıştır. Mekanik özellikleri belirlemede çekme ve sertlik testleri, metalürjik özellikleri belirlemede ise makro/mikro yapı çalışmaları yapılmıştır. Çekme testi 3 farklı numune grubuna (direk alındığı haliyle, sadece frezelenmiş numune, frezelenmiş+standart çekme numunesi) uygulanmıştır. Çekme testinde numune türüne göre değişen sonuçlar elde edilmiştir. Numunelerin mikroyapılarında ağırlıklı olarak poligon ferrit yapısı gözlemlenmiştir. Üretilen numuneden ölçülen ortalama sertlik değerinin yaklaşık 166 HV olduğu belirlenmiştir.

Investigation of the mechanical properties of cylindrical part produced by wire arc additive manufacturing method using SG2 low alloy filler metal

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 Sep 2023

Received in revised form 30 Nov 2023

Accepted 28 Dec 2023

Available online

Keywords:

Wire arc additive manufacturing

Cylinder

Low alloy steel

SG2

ABSTRACT

In this study, wire arc additive manufacturing method (WAAM), which is one of the additive manufacturing techniques whose usage areas and importance have increased in recent years, was used. In the study, low alloy steel SG2 arc welding wire was produced in the form of a cylindrical part and in layers. The aim of this study is to produce the cylindrical part that cannot be supplied as a standard in the desired size by WAAM method. For this purpose, MIG-MAG welding was used in the study. Mechanical and metallurgical tests were applied to the samples taken from the produced part. Tensile and hardness tests were used to determine the mechanical properties, and macro/microstructure studies were performed to determine the metallurgical properties. Tensile test was applied to 3 different sample groups (as taken directly, milled sample only, milled + standard tensile sample). In the tensile test, results varying depending on the sample type were obtained. Polygonal ferrite was observed predominantly in the microstructures of the samples. It was observed that the average hardness value measured from the manufactured sample was approximately 166 HV.

I. GİRİŞ

Üç boyutlu baskı ve hızlı üretim olarak da bilinen Eklemeli imalat (Eİ), katman üzerine katman şeklinde malzemelerin üretimini ele alan bir tekniktir [1]. Eİ metal malzemelerin üretiminde, imalat yöntemleri arasında önemli bir konumdadır ve teknoloji ile beraber sürekli gelişen ve popüler hale gelen bir üretim yöntemidir. Bu teknolojinin en temel prensibi bilgisayar destekli tasarım ile oluşturulan katı modelin bir plaka üzerinde üst üste eklenerek katmanlar halinde üretilmesidir [2]. Eİ; geleneksel üretim yöntemlerinden biri olan talaş kaldırmanın aksine üretiminin yapılacağı parçanın katman üzeri katman şeklinde ve üretimi zor olan karmaşık geometriye parçaların üretilmesini sağlar [3]. Son yıllarda araştırmacılar tel ark eklemeli imalat (TAEİ) yöntemi üzerinde çeşitli kaynak yöntemleri ile farklı malzemeler kullanarak çalışmalar yapmakta ve geliştirmektedirler. Kaynak işlemi esasına dayanan bu yöntemle farklı kaynak çeşitleri ile üretim yapılabilmekte, malzeme birikimi diğer yöntemlerden fazla olduğu için büyük boyutlu metal parçaların üretimi yapılabilmektedir [4]. TAEİ yönteminde birçok kaynak yöntemi (MIG-MAG, TIG, plazma, lazer, elektron ışın) kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında TAEİ alanında en çok kullanılan MIG-MAG kaynağı tercih edilmiştir. MIG-MAG kaynak yönteminde kaynağı başlatmak için gereken ısı, ergiyen ve sürekli beslenen tel elektrot ile birleştirilecek parça arasında oluşan ark ve elektrottan geçen kaynak akımının direnci ile oluşan ısıdan üretilir. Kaynak teli otomatik olarak ark bölgesine gönderilir, ergiyerek kaynak metalini oluşturur. Kaynak esnasında kaynak bölgesi koruyucu bir gaz ile korunmaktadır [5].

Yapılan literatür araştırmalarında MIG-MAG kaynak yöntemi kullanılarak çok sayıda demir ve demirdışı malzemeden oluşan duvar tipi parçalar üretilmiştir [6-15]. Huang ve arkadaşları [6] derleme makalelerinde Eİ yönteminde karşılaşılan zorlukları, malzeme seçimini, işleme yöntemini, katmanların kalitesini iyileştirme çalışmaları ve mikroyapı çalışmalarını, Turgut ve arkadaşları [7] SG2 düşük alaşımlı çelik malzemeyi TAEİ yöntemi ile üretirken katmanlar arası bekleme süresinin malzemenin mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkilerini araştırmışlardır. Reisgen ve arkadaşları [8] eklemeli imalat yöntemi ile SG2 gazaltı kaynak teli kullanarak soğuma hızı ve soğutma ortamları üzerinde araştırma yapıp su ve basınçlı hava ile soğutma yaparak soğuma sonucu numunelerin termal etkilerini, mikroyapılarını ve sertlik değerlerini incelemişlerdir. Hölscher ve arkadaşları [9] EN ISO 14341-A gazaltı kaynak teli kullanarak elektrot ve parça arasındaki ark boyu mesafesini araştırmışlardır. Taşdemir ve Nohut [10] derleme makalelerinde Eİ yönteminin gemi inşa endüstrisinde kullanımını araştırmış, gemi sektöründe oldukça yoğun olarak kullanılan karmaşık yapı ve büyük parçaların (yay, dümen, pervane) döküm yöntemi ve TAEİ yöntemi ile üretimini karşılaştırmışlardır. Prado ve arkadaşları [11] SG2 gazaltı kaynak teli kullanarak karmaşık şekilli parçaların TAEİ yöntemi ile daha düşük ısı girdisi ile daha düşük maliyet ve daha yüksek hızda üretimini araştırmışlardır. Sydow ve arkadaşları [12] SG3 gazaltı kaynak teli kullanarak ürettiği parçanın yeniden kristalleşme durumunu, mikrosertlik değerlerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Dirisu ve arkadaşları [13] düşük alaşımlı çelik malzeme kullanarak duvar biçiminde parçalar üretmiş, ürettikleri parçaların kırılma direncini araştırmış, mekanik testler ve mikroyapı çalışmaları uygulamışlardır. Li ve arkadaşları [14] derleme makalelerinde TAEİ yöntemiyle üretilen duvar tipi çalışmaları analiz etmişlerdir. Jahns ve arkadaşları [15] düşük alaşımlı çelik malzeme kullanarak ve TAEİ ile ürettikleri düz duvar biçimindeki parçanın inşaat sektöründe kullanılabilirliğini araştırmışlar ve numunelere mekanik testler uygulamışlardır.

TAEİ yönteminde MIG-MAG kaynak tekniği kullanılarak silindirik malzeme üretilebilirliği konusunda bazı çalışmalar bulunmaktadır [16-19]. Rodrigues ve arkadaşları [16] ER110S-G düşük alaşımlı gazaltı kaynak teli

kullanarak TAEİ yöntemi ile ürettikleri parçaya üretim sırasında SiC eklemişler, mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını araştırmışlardır. Nagasai ve arkadaşları [17] düşük alaşımlı çelik gazaltı kaynak teli ile ürettikleri silindirik parçanın mekanik ve mikroyapı özelliklerini, mikrosertlik özelliklerini incelemiş ve çekme testleri yapmışlardır. Yıldız ve arkadaşları [18] SG2 gazaltı kaynak teli kullanarak yaptıkları çalışmada tel besleme hızı ve ilerleme hızı gibi parametrelerin parçaya olan etkilerini araştırmışlar ve ürettikleri parçaları mekanik testler ve mikroyapı incelemeleri uygulamışlardır. He ve arkadaşları [19] TAEİ yöntemiyle EH700-1 malzeme kullanarak hem silindirik çevresel hem de silindirik aksel besleme şeklinde üretim yapmışlar ve üretilen parçaların mikroyapı özelliklerini ve aynı bileşiğe sahip döküm parçaya göre farklılıklarını araştırmışlardır.

Verilen bilgiler doğrultusunda görüldüğü gibi TAEİ yöntemiyle silindirik parça üretimi üzerine çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmanın benzerlerinden farklı yönü üretimin farklı şekilde gerçekleşmesi ve üretilen parçaya 3 farklı biçimde (direkt alındığı haliyle, sadece yüzey işlemine tutularak ve hem yüzey işlemine tutularak hem de standart çekme numunesi haline getirilmesiyle) çekme testi uygulanmasıdır. Bir başka ifade ile üretimi gerçekleştirilen numuneler; direkt alındığı haliyle, sadece frezelenmiş ve frezelenmiş+standart çekme numunesi haline getirilmiştir. Böylelikle TAEİ yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey işlemlerine tabi tutularak veya tutulmadan servis şartlarında kullanımlarının mekanik özelliklere etkisi belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda üç farklı değişkenin kullanımından elde edilen verilerin benzerlik ve farklılıkları neden-sonuç ilişkisi ile değerlendirilmiştir. Ayrıca üretilen numunelere sertlik testleri ile mikroyapı çalışmaları yapılarak üretimlerin mekanik özellikler ile ilişkileri araştırılmıştır.

II. DENEYSEL METOT

Gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak TAEİ yöntemiyle silindirik parça üretiminin amaçlandığı bu çalışmada MIG-MAG kaynak işlemlerinde en çok tercih edilen SG2 gazaltı kaynak teli kullanılmıştır. Kullanılan ilave telin (SG2) mekanik özellikleri (akma, çekme ve çentik darbe dayanımı) ve kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmalarda kullanılan ilave metalin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)				Kaynak Metali Mekanik Özellikleri		
C	Mn	Si	Fe	Akma dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
0.07	1.45	0.90	Kalan	460	560	27

TAEİ yöntemi ile silindirik parça üretim işlemleri için çok sayıda ön çalışma yapılmış ve nihai üretim parametresi Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 1’de üretimin yapıldığı makinenin resmi ve kaynak işlemi esnasında katmanların oluşturulduğu görüntüler verilmiştir.

Tablo 2. TAEİ işlem parametreleri

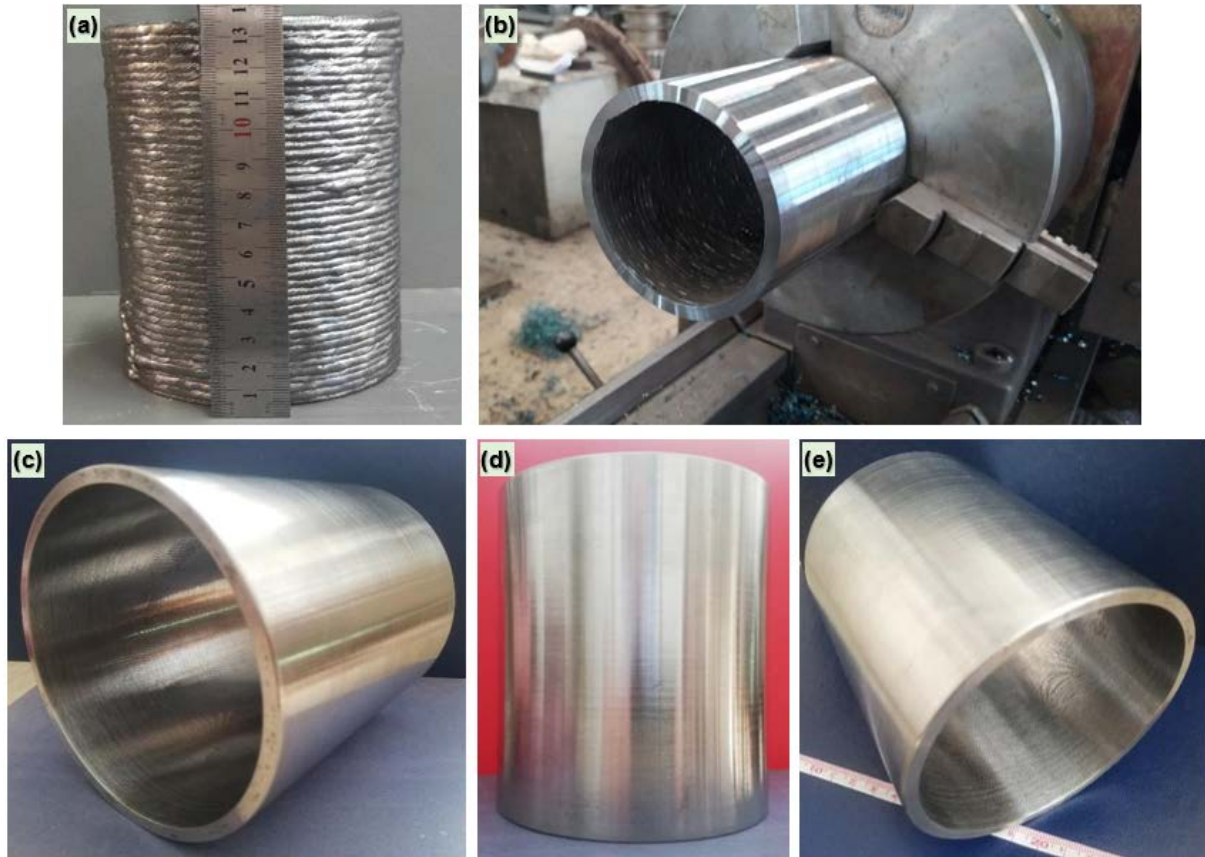
Kaynak Akımı (A)	Volt (V)	Tel ilerleme hızı (m/dk)	Torç İlerleme Hızı (m/dk)	Tel Çapı (mm)	Koruyucu gaz	Gaz debisi (l/dk)
105-120	20-22	3	2	1.2	%86 Ar, %12 CO ₂ , %2 O ₂	16



Şekil 1. TAEİ işlemlerinin gerçekleştirildiği makine ve üretim aşamalarından bazı görüntüler

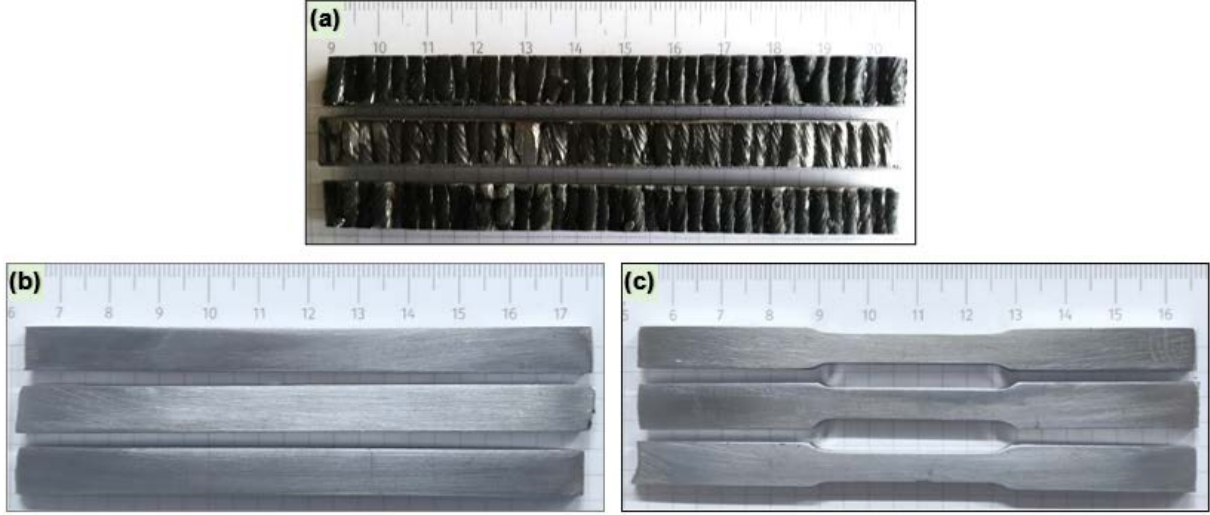
Belirlenen parametreler dahilinde üretim işlemine başlanarak Şekil 1’de gösterildiği gibi katmanlar oluşturulmuştur. Katmanlar oluşturulur iken her bir katman tamamlandığında üretim otomatik olarak durdurulmuş ve kaynak dikiş sıcaklığının (katmanlar arası sıcaklık) 80-90 °C’ye soğuması sağlanacak şekilde beklenilmiştir.

Üretim tamamlandıktan sonra aynı yöntem ve parametreler kullanılarak aynı parçadan bir adet daha üretilmiş ve oksit tabakaları tel fırça ile temizlenmiştir. Parçaların birine Şekil 2’de görüldüğü gibi iç ve dış tornalama yapılırken, diğerinden kesme makinesiyle 10 mm genişliğinde 10 adet parça alınarak, mekanik testler için numuneler hazırlanmıştır.



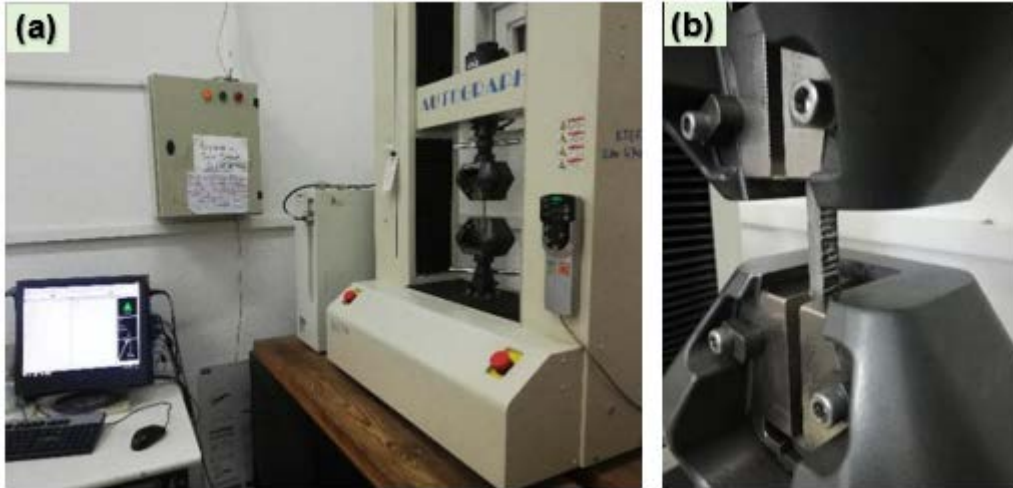
Şekil 2. Üretimi gerçekleştirilen parçalar (a) Üretildiği haliyle, (b) Dış yüzeyin tornalanması ve (c, d ve e) Tornalanmış numuneler

Test numuneleri Şekil 3'te de görüldüğü gibi bir kısmı pasolu halde kalırken (alındığı haliyle), diğer kısmı deney numunesi çıkarılabilmesi için ön ve arka kısımlarında yer alan geniş bölgeler frezeleme işlemine (sadece frezelenmiş) tabi tutulmuştur. Frezelenmiş numunelerin bir kısmı CNC freze ile çekme numunesi (frezeleme+standart çekme numunesi) haline getirilmiştir.



Şekil 3. Üretimi gerçekleştirilen parçalar (a) Üretildiği haliyle, (b) Dış yüzeyin tormalanması ve (c, d ve e) Tormalanmış numuneler

Şekil 3'te verilen 3 grup numuneye çekme testi yapılmış ve sonuçlar kendi aralarında kıyaslanmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında ve 2 mm/dk çekme hızında yapılmıştır. Şekil 4'te çekme test cihazı ile çekme testi esnasından (alındığı hali ile test yapılan numune) bir görüntü paylaşılmıştır.



Şekil 4. Çekme testi (a) Çekme cihazı ve (b) Test işlemi esnası

Mikroyapı ve sertlik numunesi direkt olarak üretilen silindirik parça boyunca kesilerek alınmış, metalografik işlemler için 3D yazıcı ile kalıp oluşturulmuş ve bakalit içine alınarak Şekil 5'te görüldüğü gibi numune sabitlenmiştir.



Şekil 5. Bakalit içine alınan mikroyapı numunesi

Mikroyapı incelemeleri için kullanılan numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler sırasıyla 80, 180, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 sulu kum zımparalara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Daha sonra parlatma işlemi için parlatma keçesi ile sırasıyla 6 μ ve 1 μ boyutunda elmas pastalar kullanılarak parlatılmıştır. Hazırlanan numune %2 nital çözeltisiyle 10 sn boyunca dağlama işlemine tabi tutulmuş ve optik mikroskopla (Nikon Epiphot 200) mikroyapıları incelenmiştir. Sertlik ölçümleri tabandan başlayarak 100 μ m aralıklar ile 10 adet, devamında 4 mm aralıklar ile 28 adet ve üst kısımda ise yine 100 μ m aralıklar ile 10 adet olmak üzere toplamda 48 ölçüm yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Shimadzu marka Vickers sertlik ölçüm cihazında, 500 g yük altında ve 10 sn. bekleme süresinde gerçekleştirilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Gözle Muayene

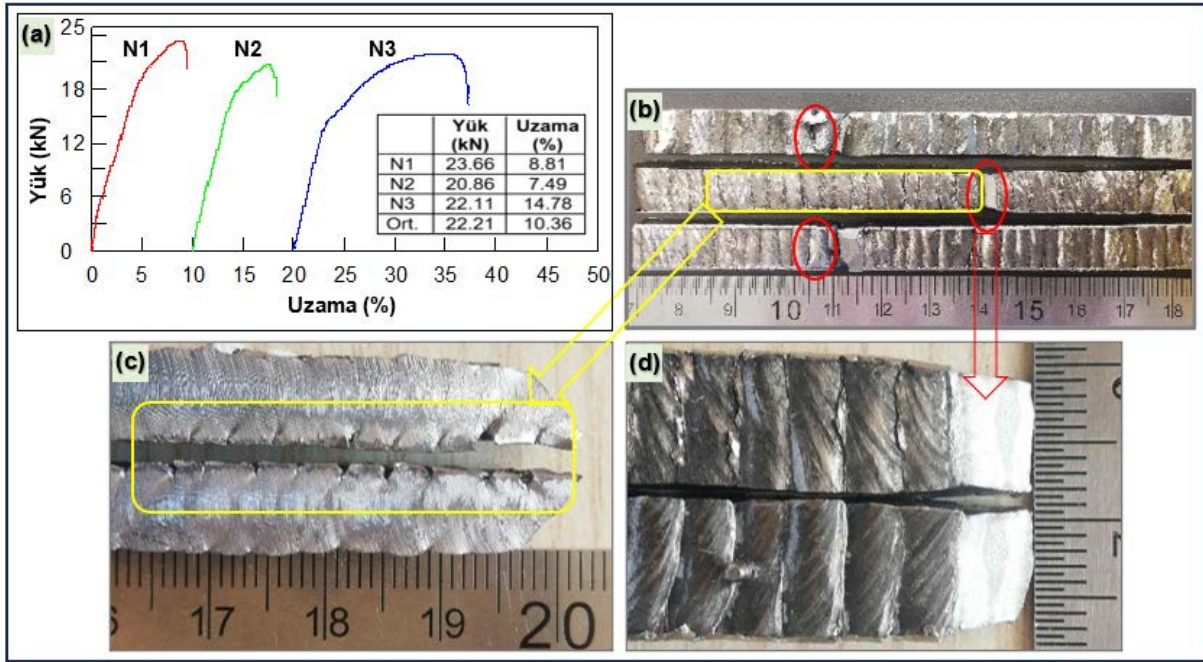
Üretim esnasında yapılan gözlemlerde TAEİ yöntemiyle üretilen parçanın başlama ve bitiş yerlerinde kısmi dikiş bozulmalarının (başlangıçta yüksek, bitişte ise düşük) olduğu ancak bir sonraki pasonun bu bozuklukları giderdiği görülmüştür. Ayrıca üretilen parçada TAEİ ile üretimde sık karşılaşılan parça duvarından sarkma, ark sapması ve merkezden kaçıklık hatalarının oluşmadığı tespit edilmiştir. Tüm bunların yanında Şekil 2 a'da görüldüğü gibi her bir pasonun yaklaşık aynı yüksekliğe sahip olması, pasolar arasında ani girinti ve çıkıntıların oluşmaması biriktirme işlemlerinin gayet başarılı olduğu sonucunu göstermiştir. Ayrıca üretimi gerçekleştirilen numunelerin iç ve dış yüzeylerinin işlenerek son şeklinin verildiği çalışmalar sonucunda üretilen numunelerde herhangi bir kaynak kusurunun (boşluk, gözenek, makro çatlak vb.) bulunmadığı belirlenmiştir (Şekil 2 c-e).

3.2 Çekme Testi

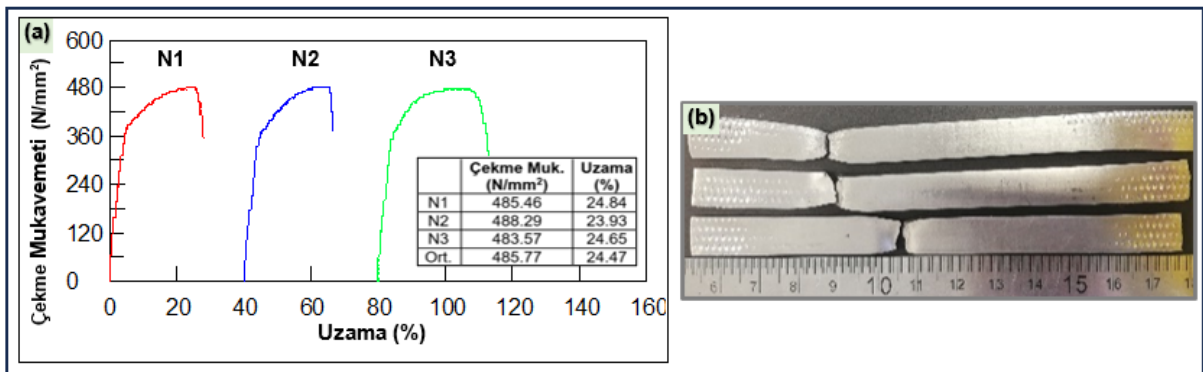
TAEİ yöntemi ile üretilen silindirik parçanın statik yük altındaki davranışlarının belirlenmesi için numunelere çekme testi yapılmıştır. Yapılan testler Şekil 6'da görüldüğü gibi direkt üretildiği haliyle olan kaynak pasolu numunelere, Şekil 7'de sadece yüzeyleri frezelenmiş numunelere ve Şekil 8'de görülen yüzeyleri frezelenmiş+standart çekme numunelerine olmak üzere 3 farklı grup halinde yapılmış ve çekme grafikleri Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 6'da gösterildiği gibi çekme testleri sonucunda kaynak pasolu numuneler (alındığı haliyle) çekme testi sonunda ortalama 22.21 kN yük etlisi altında ortalama 10.36 mm uzama göstermişlerdir. Şekil 7'de gösterildiği gibi çekme testleri sonucunda sadece frezelenmiş numunelerin dayanımları ortalama 485.77 N/mm², uzamaları ise %24.47 olarak ölçülmüştür. Son olarak Şekil 8'de gösterildiği gibi frezeleme+standart çekme numunelerine yapılan çekme testi sonucunda ortalama çekme dayanımı ortalamaları 495.96 N/mm², uzamaları ise %24.52 olarak

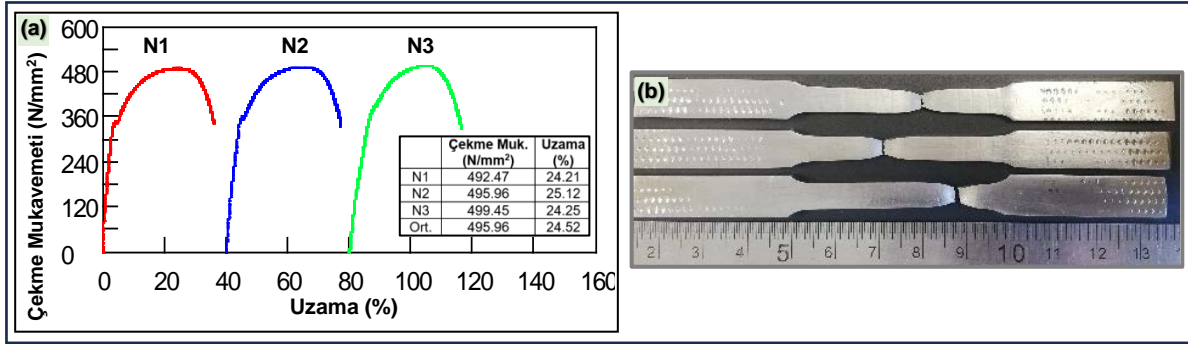
ölçülmüştür. Bilindiği gibi çekme testi esnasında test cihazına çekme testi yapılan numunenin genişliği ile kalınlığı girilerek test sonucunda birim alana düşen yük N/mm^2 cinsinden bulunmaktadır. Yapılan çalışmada elde edilen üç farklı yüzey özellikleri benzer olmadığından üretimden alındığı hali ile çekme testi yapılan numunelerde bu çekme test makinasına malzeme boyutlarını girmek mümkün olmamıştır. Çünkü üretimden çıkan numunede genişlik sabit olmasına karşın (9 mm) standart bir kalınlık yoktur. Burada her bir pasonun ortası en yüksek ölçüye sahipken (ortalama 7,4 mm) pasolar arası geçiş ölçüsü ise en düşük ölçüye (ortalama 6,1 mm) sahiptir. Ayrıca bu tür üretimlerde her bir paso ölçüsünün farklı olduğu düşünüldüğünde standart bir boyut girmek çok zordur. Bu numune için alınan en küçük ölçümler doğrultusunda çekme dayanımı ortalama $22.21 \times 1000 / 6.1 \times 9 = 404.6 N/mm^2$ hesaplanmıştır. Bu üretimdeki uzamanın da ortalama %10.36 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Alındığı haliyle kaynak pasolu numunelerin (a) Çekme grafikleri, (b-d) Test sonrası makro resimleri



Şekil 7. Frezelenmiş numunelerin (a) Çekme grafikleri ve (b) Test sonrası makro resimleri



Şekil 8. Frezelenmiş+standart çekme numunelerin (a) Çekme grafikleri ve (b) Test sonrası makro resimleri

Diğer iki işleme yöntemi ile üretilmiş (sadece frezelenmiş ve frezelenmiş+standart çekme numunesi) numunelerden elde edilen çekme mukavemetleri ile % uzamaların birbirlerine çok yakın olduğu ve bu da numunelerde çentik etkisi yapacak herhangi bir düzensizliğin olmadığı sonucunu çıkarmaktadır. Ham hali ile çekme testi yapılan numunede ise üretimin en dar bölgesi çekme testi esnasında deformasyona uğramakta dolayısıyla % uzama değerleri işlenmiş numunelere göre ciddi kayıplar verirken, çekme dayanımları % uzamalara göre daha yakın sonuçlar sergilemektedir. Ham hali ile yapılan çekme testinden elde edilen sonuçları diğer ikisinden ayıran bir diğer farkın da yapılan 3 adet çekme testinden elde edilen sonuçların birbirlerine uzaklığıdır. Bir başka ifade ile ham hali ile yapılan çekme testlerinde mukavemet değerlerinde %15'e yakın bir kayıp görülürken, diğer iki numune türünde bu değer %1'in bile altındadır. Benzer şekilde uzamalara bakıldığında ham hali ile yapılan testte %100'e yakın bir kayıp ölçülürken diğer iki numune türünde bu değer %1'in altında kalmaktadır.

TAEİ yöntemiyle üretilen numunelerin kopma morfolojileri incelendiğinde ham hali ile yapılan testlerdeki N1 ve N2 kodlu numunelerde (Şekil 6b) ani çentik etkisinden dolayı dik bir kırılma biçimi ve büzülme gözlenmez iken N3 kodlu numunede yaklaşık 45°'lik bir eğik kırılma yüzeyi ve belirgin bir büzülme (Şekil 6b,d) görülmektedir. Ayrıca N3 kodlu numunede (Şekil 6c) çekme testi esnasında numunenin deformasyona maruz kalan bölgesindeki pasolar arasında belirgin çatlakların oluştuğu görülmektedir. Çekme test numunesinde oluşan bu çok sayıda çatlak üretimin tekrarlanabilirliklerinin yüksek olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Aksi durumda pasolardan herhangi birisinde hata olması durumunda bu çoklu çatlak oluşumu yerine sadece çentik etkisi yapacak olan kısımdan çatlak başlayıp çatlak oluşturabileceği ve bu kısımdan kopabileceği düşünülmektedir.

TAEİ yöntemi ile üretilen numunelerin kopma yüzeyleri gözle muayene edildiğinde tüm numunelerin sünek kopma gerçekleştikleri belirlenmiştir. Üretimlerde kullanılan SG2 kaynak telinin mekanik özelliklerine bakıldığında uzama miktarı minimum %22 olarak verilmiştir. Alındığı hali ile yapılan testler dışında üretilen numunelerin % uzama ortalamaları yaklaşık olarak sadece frezelenmiş numunelerde %24.4, frezelenmiş+çekme numunelerinde ise %24.5 olarak ölçülmüştür. Bu iki numuneden elde edilen değerlerin orijinal tel dayanımından yüksek çıkmasının sebebi üretim esnasından pasoların sürekli olarak ısı işleme maruz kalması dolayısıyla ısı işlem görmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dağıykan ve arkadaşları [20] SG2 gazaltı kaynak teli kullanarak TAEİ yöntemi ile ürettikleri duvar şeklindeki parçadan numune olarak çekme testine tabi tutmuşlar, çekme dayanımını ortalama 504 ± 4 N/mm² ve uzama miktarını ortalama 27.6 ± 0.7 olarak bulmuşlardır. Shukla

ve arkadaşları [21] SG2 tel ile ürettikleri parçanın çekme testi sonuçlarında çekme dayanımını 482 N/mm^2 , uzama miktarını %24.5 olarak bulmuşlardır. Literatürde bulunan bu değerler çalışmada bulunan frezeleme+ standart numune değerleriyle kıyaslandığında (dayanım: 495.96 N/mm^2 , uzama: %24.52) birbirine yakın değerler elde edildiği görülmüştür. Bunun sebebinin kullanılan telin ve kullanılan kaynak yönteminin benzer olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu tür üretimlerde benzer yöntem ve ilave tel kullanılarak farklı sonuçlar da elde edilebilir. Bu farklılığın üretimin yapıldığı ortamdan kaynaklanabileceği gibi pasolar arası geçiş sıcaklığı ve kaynak esnasındaki farklı ısı girdilerinden etkilenebileceği bir gerçektir.

SG2 telin kimyasal bileşimi piyasadan temin edilebilen St37 malzemesine oldukça benzerdir. St37 malzemesinin dayanımı, kalınlığı 3 mm-100 mm arasında değişen malzemeler için $340-470 \text{ N/mm}^2$ aralığında olduğu belirtilmiştir [22]. Üretilen SG2 malzemeli yapının frezelenmiş+standart numunesinde 495.96 N/mm^2 dayanıma sahip olduğu göz önüne alındığında üretilen yapıda St37 malzemesinin belirtilen referans değerinden daha yüksek dayanım elde edildiği söylenebilir.

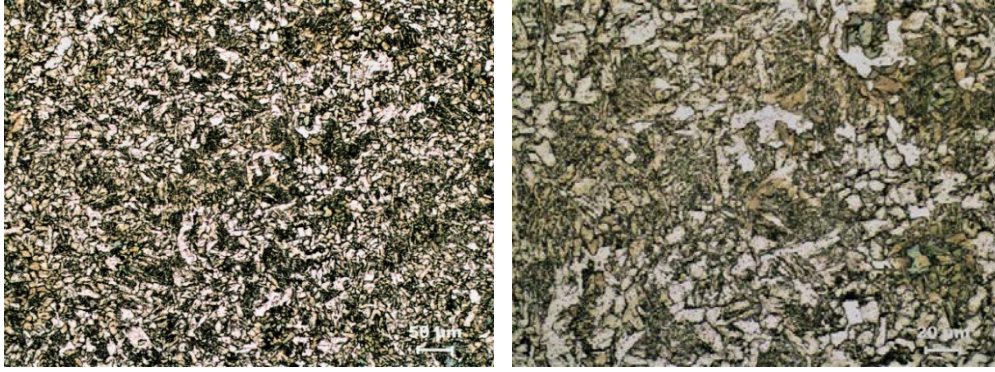
3.3. Mikroyapı Çalışmaları

Numunenin mikroyapı çalışmaları için inşa yönüne göre alt, orta ve üst kısımlarından mikroyapı örnekleri alınmıştır. Mikroyapı değerlendirmeleri Şekil 5'te gösterilen bölgelere göre yapılmıştır. Numunenin alt, orta ve üst kısmından farklı büyütme oranlarında alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir.

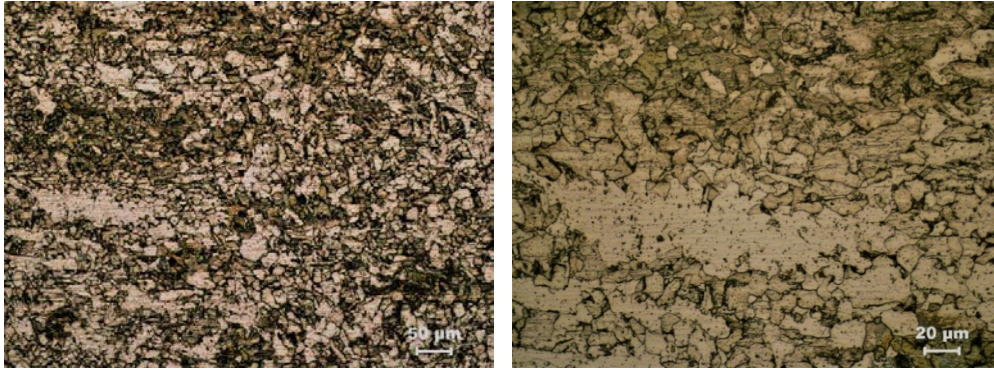
TAEİ yöntemi ile üretilmiş numuneden elde edilen mikroyapı görüntülerinde tane sınırlarında küçük perlit bölgelerinin olduğu tipik bir ferritik yapı görülmektedir. Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde yapıların ağırlıklı olarak poligonal ferritik olduğu bunların aksine Şekil 11'in ise daha çok Widmanstatten ferritik yapıda olduğu görülmektedir. SG2 telinden üretilen yapıda tekrarlı katmanların yeniden kristalleşmesinden dolayı yapıda tane sınırı ferrit bulunabilmektedir [20]. Tane sınırı ferritin çatlağın kolay ilerlemesine etkisi bulunmaktadır [13]. Burada ilk iki görüntünün üretimin alt ve orta kısmına ait olduğu düşünüldüğünde bir sonraki pasonun ve daha sonraki pasoların sıcaklığının etkisi ile tek pasolu kaynak işlemlerinde elde edilen asiküler ve Widmanstatten ferritik yapılarını ısı etkisi ile poligonal morfolojiye dönüştürdüğü belirlenmiştir. Bilindiği gibi ısı işlem süreçlerinde malzemeler farklı sıcaklıklarda farklı tane morfolojilerine sahip olmaktadır. Ayrıca çok pasolu kaynak ve biriktirme işlemlerinde her bir pasonun maruz kaldığı ısının homojen olmayışı mikroyapılarda farklılaşmaya neden olmaktadır. Hatta bu ısı girdisinin farklı olması aynı katman içerisinde tane büyüklüğünü bile etkilemektedir. Bir başka ifade ile bir katmanın yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgesinde tane irileşmesi meydana gelirken daha düşük sıcaklık bölgesinde ince taneli eş eksenel ve poligonal yapılar oluşabilmektedir. Bu nedenle TAEİ yöntemi ile üretilen malzemelere homojen olmayan bir ısı dağılımı nedeniyle homojen bir mikroyapının olması beklenmemelidir.

Mikroyapı sonuçları genel olarak (alt, orta ve üst) değerlendirildiğinde bazı bölgelerde tane irileşmesi gözlemlendiği biriktirme işleminde üst üste uygulanan pasolarda ya da çok pasolu kaynak uygulamalarında her bir pasonun önceki paso üzerinde ısı işlem yaptığı dolayısıyla da biriktirme işlemi sırasında homojen olmayan ısı dağılımı sebebiyle farklı mikroyapısal dönüşümler olduğu tespit edilmiştir. Literatür araştırmalarına bakıldığında çalışmalar ağırlıklı olarak düz duvar biçiminde olup benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ayan [23] TAEİ yöntemiyle ve SG2 gazaltı kaynak teli ile yaptıkları çalışmanın mikroyapısında ağırlıklı olarak poligonal ferrit

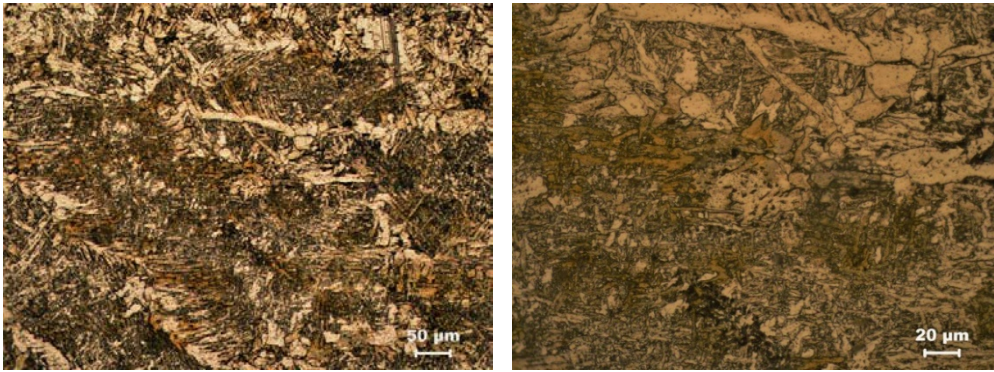
fazına rastlamışlardır. Benzer şekilde Dağyikan ve arkadaşları [20], ve Ayan ve Kahraman [24] da TAEİ yöntemi ile ürettikleri numunelerde benzer sonuçların yanında ilk üretilen alt katmanların orta ve üst kısımlara göre daha fazla sıcaklık çevrimlerine maruz kaldığı bu nedenle TAEİ yöntemi ile üretilen malzemelerde homojen bir mikroyapının olmadığını belirtmişlerdir. Fang ve arkadaşları [25] düşük alaşımlı çelik malzeme kullanarak düz duvar biçiminde üretim yapmışlar ve numunelerin mekanik özellikleri ile mikroyapılarını incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda alt, orta ve üst kısımlarda farklı mikroyapılara rastlamışlar ve bunun sebebinin artan ısı girdisi ile mikroyapının değiştiği olarak açıklamışlardır.



Şekil 9. Taban (alt) kısmı mikroyapı görüntüleri



Şekil 10. Orta kısım mikroyapısı görüntüleri

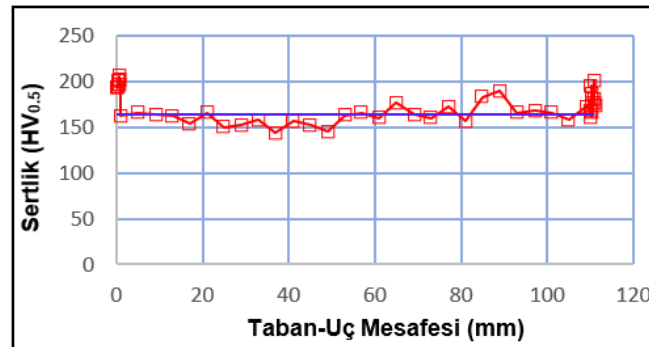


Şekil 11. Üst kısım mikroyapı görüntüleri

3.4. Mikrosertlik Çalışmaları

TAEİ yöntemi ile üretilen numune kesitinden kaynak inşa yönüne doğru kesit boyunca ölçümler alınmış ve sonuçlar grafik olarak Şekil 12’de verilmiştir.

Şekil 12’de verilen sertlik grafiği incelendiğinde grafiğin üç belirgin bölgeden oluştuğu görülmektedir. Bu bölgeler altlık malzemenin üretim işlemlerine dahil olduğu alt kısım, pasolar arası sıcaklığın sabit olduğu ve aynı ısıl işlemlere (temperleme) maruz kalan ve oldukça geniş bir alanı kapsayan orta kısım ve son olarak üzerine başka bir pasonun uygulanmadığı dolayısıyla ısıl işleme maruz kalmayan son pasodur. Burada başlangıç kısımdaki yüksek sertliğin sebebi genellikle altlık malzemeden üretim katmanlarına dahil olan altlık malzemedeki alaşım elementlerinin yüksekliği ve ayrıca ilk pasoda oda sıcaklığında olan altlık malzemenin kaynak soğuma hızını yükselterek sertliği arttırmasıdır. Benzer şekilde son pasoda sertliğin orta kısımlara göre bir miktar yüksek olmasının sebebi ise bu pasonun temperleme ısıl işlemine maruz kalmaması olarak gösterilebilir. Bir başka ifade ile son paso oda sıcaklığına normal atmosferik şartlarda soğumakta dolayısıyla bir sonraki paso bu pasoya temperleme ısıl işlemi yapamayacağından bu paso daha sert olabilmektedir. Bu iki kısımdaki sertlik bölgelerinin yükseklik farkı mikroyapılarının farklarından kaynaklanmaktadır. Orta bölgede ise az bir fark olmakla birlikte sertliğin kırılmalar göstererek değiştiği sabit ve geniş bir alan mevcuttur. TAEİ işlemi ile üretilen konstrüksiyonlarda genellikle ilk ve son pasolar tıraşlanarak kullanıldıklarından orta bölgedeki sertliğin birbirine yakın olması homojenlik açısından önemlidir. Ancak orta bölgedeki herhangi bir pasonun bir miktarı bir sonraki paso tarafından yeniden ergitilip katlaşırsa bu ergimiş katlanmış bölgeye bitişik olan kısım sadece ısı tesiri altına maruz kalmaktadır. Bir başka ifade ile orta kısımdaki her bir pasoda hem ergiyip katlanmış ve sonrasında temperlenmiş bir bölüm hem de bir ITAB mevcuttur. Dolayısıyla sertlikte meydana gelen bu kırılmaların başlıca sebebi ölçümün yapıldığı bölgenin mikroyapısıdır. Üretilen numunenin orta bölgesinden elde edilen ortalama sertlik değeri 166 HV olarak hesaplanmıştır. Benzer çalışmalara bakıldığında SG2 tel kullanarak bir duvar tipi parça üretilen çalışmada ortalama sertliğin 165 HV olduğu hesaplanmıştır [24]. Rafieazad ve arkadaşları [26] da düşük alaşımlı çelik ile ortalama 160 ± 7 HV değerini, Waqas ve arkadaşları [27], TAEİ yöntemi ile ürettikleri ve SG2 gazaltı kaynak teli kullandıkları çalışmalarında benzer şekilde sertlik değerini ortalama 170 HV olarak hesaplamışlardır. Ayan ve Kahraman [24] SG2 ilave tel kullanarak çok pasolu bir duvar tipi parça üretmişler ve mikroyapı çalışmaları sonucunda TAEİ işlemi sırasında üretilen katmanların, üst katmanın erimesi nedeniyle sürekli olarak ısıya maruz kaldığını bu nedenle ilk oluşturulan katmanların sıcaklık gradyanları orta ve üst bölgelere göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ergiyik havuzunun dışındaki ısıdan etkilenen bölgenin altındaki alanların sürekli ısıl çevrimlere maruz kaldığını bu nedenle üretilen parçaların bölgesel olarak farklı mikro yapılar içermesinin kaçınılmaz olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 12. Sertlik grafiği

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma TAEİ yöntemi kullanılarak piyasada hali hazırda standart boyutlarda üretimi olmayan istenilen boyutlarda silindirik parça üretimi yapabilmek amacı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar neticesinde elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- TAEİ yöntemiyle üretilen silindirik parçaların gözle yapılan muayenelerinde bu tür üretimlerde sıklıkla meydana gelen hatalara (eksenel sapma, dikiş sarkması, yetersiz nüfuziyet vb.) rastlanmamıştır. Düzgün bir dikiş formu ve dikiş kalitesi ile düzenli katmanlı yapılar elde edilmiştir.
- Çekme testlerinde en yüksek çekme dayanımları sadece frezelenmiş ve frezelenmiş+ standart çekme numunesi haline getirilmiş numunelerden elde edilmiştir. Alındığı hali ile yapılan çekme testlerinden ise yaklaşık SG2 telin katalog verisindeki dayanıma göre %82 verim elde edilmiştir. Çekme testinden elde edilen % uzama değerlerinde ise uzama miktarı işlenmiş numunelere göre yaklaşık %42 azalmıştır. Sonuç olarak yüzeyi işlenmemiş numunede % uzama miktarının çekme mukavemetine göre daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir.
- Yapılan mikroyapı çalışmalarında alt ve orta bölgelerde yoğun olarak poligonal ferrit fazı görülürken üst kısımlarda daha çok Widmanstatten ve asiküler ferrit fazına rastlanılmıştır. Ayrıca üretimlerin farklı bölgelerinin farklı sıcaklık çevrimlerine maruz kaldığı bu nedenle TAEİ yöntemi ile üretilen malzemelerde homojen bir mikroyapının oluşmadığı belirlenmiştir.
- İnşa yönünde kesit boyunca sertlik değerleri ölçülmüş ve üretimin üç bölgeden oluştuğu görülmüştür. Genel olarak en geniş bölge olan orta bölgeden birbirine yakın değerler ölçülürken, çok dar bir alana sahip alt ve üst bölgelerden daha yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür.
- Çalışma sonucunda TAEİ yöntemi ile piyasada hali hazırda seri üretimi olmayan, standart ölçülerin dışında, istenilen çap ve et kalınlığında isteğe özel silindirik malzemeler ile makine parçalarının üretilebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Bakdemir S.A, Bozkurt Y, Salman S (2021) Metal dust explosion risk in additive manufacturing and prevention methods. J Innovative Eng Nat Sci 1(1):41-60. <http://dx.doi.org/10.29228/JIENS.51849>
- [2] Yıldız A (2020) Tel beslemeli ark ergitmeli eklemeli imalat yöntemiyle üretilen parçaların ısıl davranış geometrik mekanik ve metalürjik özelliklerinin araştırılması. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] Dedeakayoğulları H, Kaçal A (2020) Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. İmalat teknolojileri ve uygulamaları 1(1):1-12.
- [4] Ayan Y, Sarı E, Kahraman, N (2018) 3B Metal Yazıcı Kullanarak MIG-MAG Kaynak Yöntemi İle Tamir-Onarım Kaynak Uygulamasına Bir Örnek, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 6:1190-1199
- [5] Kahraman N, Gülenç B (2020) Modern Kaynak Teknolojisi, 4. baskı. Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti, Ankara, ss 102-119.
- [6] Huang L, Chen X, Konovalov S, Su C, Fan P, Wang Y, Xiaoming P, Panchenko I (2022) A review of challenges for wire and arc additive manufacturing (TAEI). Transactions of the Indian Institute of Metals <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02823-y>
- [7] Turgut B, Gürol U, Önler R (2023) Düşük karbonlu düşük alaşımlı çelik bileşenlerin tel ark katkılı üretiminde katmanlar arası bekleme süresinin çıktı kalitesine etkisi. Uluslararası İleri Üretim Teknolojisi Dergisi (126):5277-5288. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11481-3>
- [8] Reisgen U, Sharma R, Mann S, Oster L (2020) Increasing the manufacturing efficiency of TAEİ by advanced cooling strategies. Welding in the World (64):1409–1416 <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00930-2>.

- [9] Hölscher L V, Hassel T, Maier H J (2022) Detection of the contact tube to working distance in wire and arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (120):989–999. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08805-0>
- [10] Taşdemir A, Nohut S (2021) An overview of wire arc additive manufacturing (TAEİ) in shipbuilding industry. *Ships and Offshore Structures* (16)7: 797–814. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1786232>
- [11] Prado J L, Dieguez J L, Camacho A M (2017) Preliminary development of a wire and arc additive manufacturing system (TAEİ). *Procedia Manufacturing* (13):895–902.
- [12] Sydow B, Jhanji A, Hälsig A, Buhl J, Härtel S (2022) The benefit of the process combination of wire arc additive manufacturing (TAEI) and forming-a numerical and experimental study. *Metals* (12):988. <https://doi.org/10.3390/met12060988>
- [13] Dirisu P, Ganguly S, Mehmanparast A, Martina F, Williams S (2019) Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components. *Materials Science & Engineering A* (765):138285. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138285>
- [14] Li Y, Dong Z, Miao J (2022) Forming accuracy improvement in wire arc additive manufacturing (TAEİ): a review. Emerald Publishing Limited 1355-2546. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2022-0154>
- [15] Jahns H, Unglaub J, Müller J, Hensel J, Thiele K (2023) Material behavior of high-strength low-alloy steel (HSLA) WAAM walls in construction. *Metals* 13(3):589. <https://doi.org/10.3390/met13030589>
- [16] Rodrigues T A, Duarve V R, Tomas D, Avila J A, Escobar J D, Rossinyol E, Schell N, Santos T G, Oliveira J P (2020) In-situ strengthening of a high strength low alloy steel during Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Additive Manufacturing* (34) 101200. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101200>
- [17] Nagasai B, Malarvizhi S, Balasubramanian V (2022) A study on tensile properties and microstructural characteristics of wire arc additive manufactured low carbon steel cylindrical components. *Welding International* (8)36:443–454. <https://doi.org/10.1080/09507116.2022.2097897>
- [18] Yıldız A S, Davut K, Koç B, Yılmaz O (2020) Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (108):3391–3404. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9>
- [19] He T, Yu S, Shi Y, Dai Y (2019) High-accuracy and high-performance TAEİ propeller manufacture by cylindrical surface slicing method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (105):4773–4782. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04558-5>
- [20] Dağyikan K, Gürol U, Koçak M (2023) Characterization and fracture toughness evaluation of the thick walled wire arc additively manufactured low alloy steels. *Welding in the World* 67:1009–1019. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01424-z>
- [21] Shukla V, Kumar V, Dixit A (2023) Microstructural characteristics and tensile properties of ER70S-6 manufactured by Robotic CMT wire-and-arc additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.011> (Article in press).
- [22] The World Material (2023) 1.0037 Material St37-2 Steel Equivalent, Properties, Composition, DIN 17100. <https://www.theworldmaterial.com/1-0037-material-st37-steel-din-17100/>
- [23] Ayan Y, Kahraman N (2021) Wire arc additive manufacturing of low-carbon mild steel using two different 3D printers. *Physics Of Metals and Metallography* 122:1521-1529. <https://doi.org/10.1134/S0031918X21140039>
- [24] Ayan Y, Kahraman N (2022) Bending fatigue properties of structural steel fabricated through wire arc additive manufacturing (WAAM). *Engineering Science and Technology an International Journal* 35:101247. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101247>
- [25] Fang Q, Zhao L, Chen C, Zhu Y, Peng Y, Yin F (2023) Effect of heat input on microstructural and mechanical properties of high strength low alloy steel block parts fabricated by wire arc additive manufacturing. *Materials Today Communications* (34):105146. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105146>
- [26] Rafieezad M, Ghaffari M, Vahedi Nemani A, Nasiri A (2019) Microstructural evolution and mechanical properties of a low-carbon low-alloy steel produced by wire arc additive manufacturing. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology* 105:2121–2134. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04393-8>
- [27] Waqas A, Qin X, Xiong J, Wang H, Zheng C (2019) Optimization of process parameters to improve the effective area of deposition in GMAW-based additive manufacturing and its mechanical and microstructural analysis. *Metals*, (9)7:775. <https://doi.org/10.3390/met9070775>