



METAL EKLEMELİ İMALAT: TEL ARK YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI

Yusuf Ayan^{a*}, Nizamettin Kahraman^a

^aKarabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: yusufayan@karabuk.edu.tr

ÖZET

İsteğe özel, karmaşık şekilli ve geleneksel yöntemlerle üretimi zor olan parçaların üretimi eklemeli imalat (Eİ) yöntemleriyle mümkündür. Eİ yöntemi günümüzde birçok sektörün uygulama alanına girmiş önemli ve geliştirilmeye açık bir çalışma konusu durumuna gelmiştir. Bu yöntemle çoğunlukla polimer malzemelerin üretilmesinin yanı sıra metal ve seramiklerin de üretimi sağlanabilmektedir. Metallerin Eİ işlemlerinde farklı birçok yöntem geliştirilmiştir. Tel ark eklemeli imalat (TAEİ) işlemi bu yöntemlerden birisidir. Kaynak işlemi esasına dayanan bu yöntemle farklı kaynak prensipleriyle üretim gerçekleştirilebilmekte, yüksek miktarlarda malzeme biriktirilerek büyük metal parçalar üretilebilmektedir. Sunulan bu çalışmada TAEİ yönteminin tanıtılarak, avantajlarına değinilmiş ve bazı uygulamaları gösterilmiştir. Konuyla ilgili önceden yapılan çalışmaların bir kısmı değerlendirilerek, yöntemin uygulandığı malzemeler ve üretim yaklaşımları gibi konulara değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat. Tel Ark Eklemeli İmalat. Kaynak İşlemi.

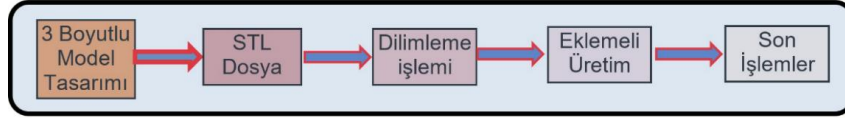
ABSTRACT

The parts customized, complexed and difficult to produce by traditional manufacturing methods can be fabricated via additive manufacturing methods. The methods have been practiced in many industry sectors and become an important and developable research topic. Generally, polymers are produced with this method, but metals and ceramics also can be manufactured. Various methods have been developed for additive manufacturing of metals. Wire arc additive manufacturing is a process of these. With this method based on welding process, various welding process can be carried out and larger metal parts can be manufactured by depositing high amounts of materials. In this study, the process of wire arc additive manufacturing, some advantages and applications of this technique were presented. Assessing some of the previous related studies, materials and manufacturing approaches implemented by this method were described.

Keywords: Additive Manufacturing. Wire Arc Additive Manufacturing. Welding Process.

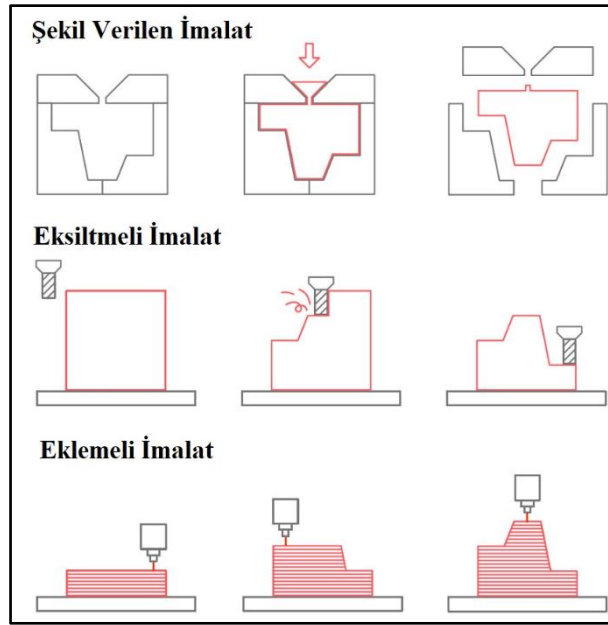
1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemi bir nesnenin katman katman birbiri üzerine eklenerek üretilmesi işlemine dayanmaktadır [1, 2]. Son zamanlarda bu yöntemin kullanımı artan bir şekilde yaygınlaşmıştır. [3]. Bu imalat yöntemi üç boyutlu üretim, hızlı prototipleme veya katmanlı imalat olarak da adlandırılır [4]. Eİ yöntemi medikal, mimari, havacılık ve otomotiv sektörlerinin endüstriyel uygulamalarında önemli araştırma konusu olmuştur [5]. Yöntemin şematik akış prensibi Şekil 1' de gösterilmektedir.



Şekil 1. Eklemeli imalat yönteminin şematik akışı [6].

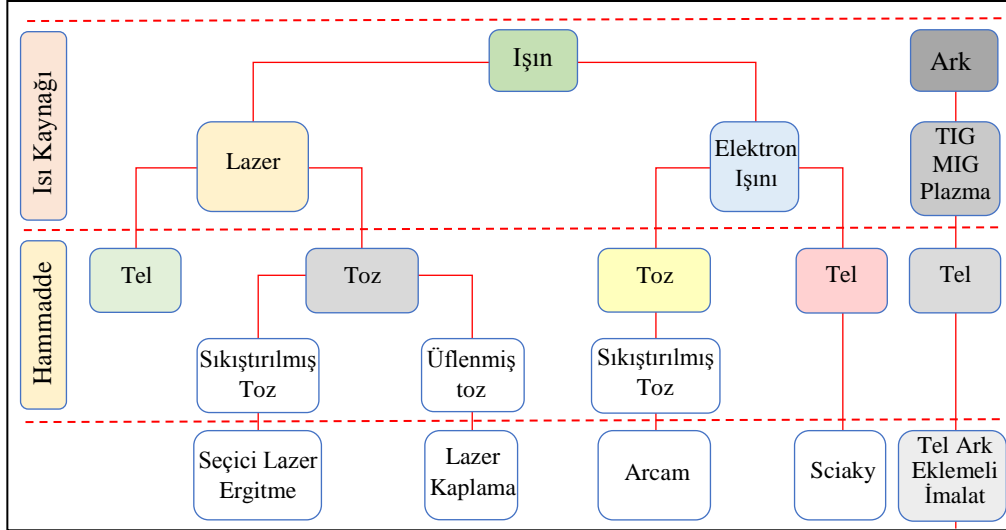
Eİ yöntemi özellikle yüksek maliyetli parçaların isteğe özel imalatında umut veren bir yöntem olmuştur [7]. Düşük ağırlığa sahip yapıların, karmaşık parçaların üretilebilmesi, kısa süre içerisinde pazara sunulması ve kaynakların büyük ölçüde tasarrufu Eİ teknolojisinin bazı avantajları arasında yer almaktadır [8]. Eİ yöntemiyle üç boyutlu karmaşık parçalar geleneksel eksiltmeli ve şekil verme yöntemlerine göre daha yüksek birikim hızlarında üretilebilirler [9]. Bunun yanı sıra karmaşık şekle sahip herhangi bir parça bu yöntemle üretilebilir [3]. Geleneksel yöntemlerle bir parçanın üretimi malzeme eksiltme veya şekil verme işlemiyle sağlanırken, eklemeli imalat yönteminde ise malzeme birbiri üzerinde biriktirilerek üretilir. Şekil 2’de imalat yöntemlerinin genel uygulama türlerini göstermektedir.



Şekil 2. Geleneksel imalat yöntemleri ve eklemeli imalat [10].

Eİ yönteminde polimer malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Polimerlerin yanı sıra metal ve seramik gibi çeşitli malzemeler de bu yöntemle üretilebilir [11]. Polimer ürünlerin Eİ yöntemiyle üretilmesi işleminde dikkate değer ilerleme gösterilmiş, farklı çeşit polimerler geliştirilmiştir [12]. Polimer parçaların fonksiyonel metalik parçalara dönüşümü konusunda ise son yirmi yılda Eİ alanında önemli çalışmalar yapılmaktadır. Sanayide imalat döngüsü ve ürün geliştirmedeki zorlayıcı talepler bu dönüşüme sürüklemiştir [4]. Eİ teknolojisi geçmişte özellikle küçük serili ve prototip üretimler için kullanılmaktaydı [13]. Son zamanlarda ise havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerinde artan taleple, birçok efor Eİ alanında yüksek geometrik karmaşıklığa sahip ve geleneksel eksiltmeli yöntemlerle üretilmesi zor ve maliyetli olan fonksiyonel metalik parçaların üretimine odaklanmıştır [14]. Özellikle havacılık sektöründe hafif ve özelleştirilmiş bileşenlere olan talep Eİ için tamamen yeni pazar açmaktadır [13].

Metal parçaların Eİ yöntemiyle üretiminde birçok teknik geliştirilmiştir. Bu teknikler seçici lazer sintereleme, direk metal biriktirme, elektron ışını ile ergitme, şekil biriktirme ile üretim ve tel ark eklemeli imalat (TAEİ) işlemi olarak sıralanabilir [15]. Eİ teknikleri malzeme besleme yöntemi ve ısı kaynağına göre kategorize edilebilir [16]. Hammadde kullanımı metaller için tel veya toz şeklinde ayrılabilir [17]. Isı kaynağına göre ise lazer, elektron ışını ve elektrik arkı olarak sınıflandırılabilir [18]. Şekil 3’de ısı kaynağı ve hammadde türü kullanımına göre metal eklemeli imalat işlemlerinin şematik sınıflandırılması gösterilmiştir.

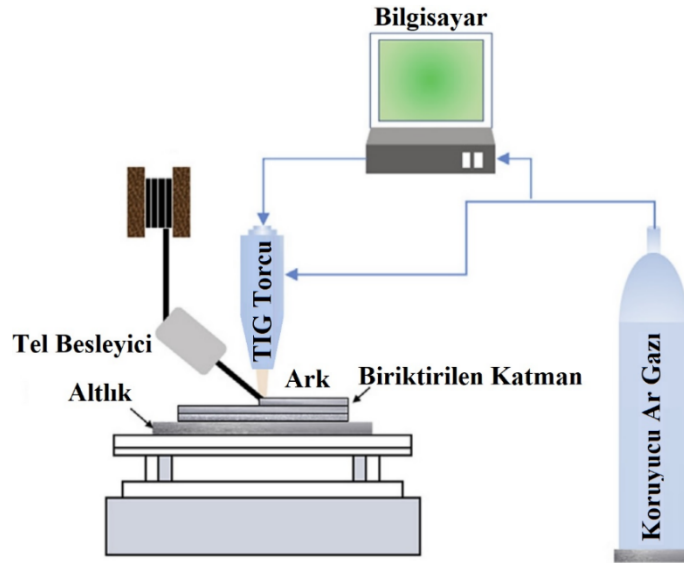


Şekil 3. Metal eklemeli imalat işlemleri [19].

Yukarıda da bahsedildiği gibi bu çalışmada Eİ yöntemi anlatılarak metal Eİ konusunda bilgiler verilmiştir. Çalışmanın ileriki kısımlarında ise metal Eİ tekniklerinden biri olan TAEİ yöntemi tanıtılmış ve yonteme dair yapılan bir kısım çalışmalar değerlendirilerek aktarılmıştır. TAEİ yönteminin uygulandığı malzemeler, farklı tür üretim teknikleri ve TAEİ ile farklı imalat yöntemlerinin birlikte gerçekleştirildiği hibrit üretim yaklaşımları gibi konularda yapılmış çalışmalara değinilmiştir. TAEİ yöntemiyle ilgili ulusal nitelikte yapılmış çalışmaların nispeten az oluşu ve TAEİ konusuyula ilgili çalışma sürdürenler veya sürdüreceklere katkı sağlaması amacıyla bu derleme çalışması hazırlanmıştır.

2. TEL ARK EKLEMELİ İMALAT (TAEİ) YÖNTEMİ

TAEİ ısı kaynağı olarak ark, besleme malzemesi olarak ise tel kullanan bir Eİ yöntemidir [17]. Bu yöntem çok pasolu kaynak işleminden oluşur [20]. Gaz metal ark kaynağı (MIG-MAG) [21], gaz tungsten ark kaynağı (TIG) [16, 20] ve plazma ark kaynağı [13] kullanılarak TAEİ işlemi yapılabilmektedir. TAEİ işleminde metal biriktirme bu kaynak yöntemlerinin torçları tarafından sağlanır [1]. TAEİ tipik ark kaynak ekipmanıyla uygulanarak büyük ölçekli parçaları ve yapıları üretmek için çok kaynak pasolu katmansal biçim biriktirir [22]. TIG kaynak yöntemiyle uygulanan TAEİ işleminin örnek bir şeması Şekil 4'de gösterilmektedir. Şekil 5'de ise TAEİ yöntemiyle gerçekleştirilen örnek bir işlem gösterilmektedir. TAEİ teçhizatları; kaynak ünitesi, torçlar ve tel besleme gibi mevcut halihazırda bulunan standart kaynak ekipmanlarından oluşur [23].

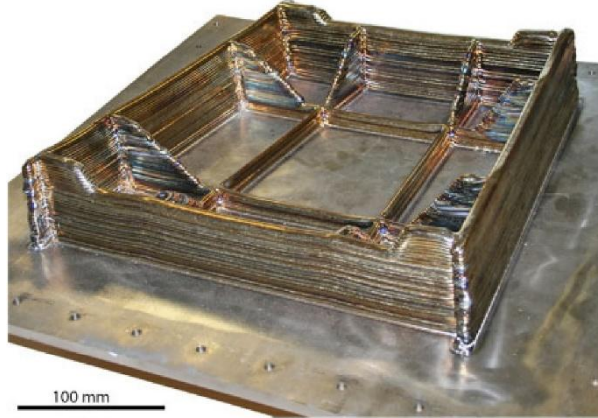


Şekil 4. TAEİ örnek şeması [16].



Şekil 5. TAEİ ile yapılan örnek bir işlem [24].

TAEİ malzemeleri genellikle yapılmış olan benzerlerinden daha iyi mekanik özellikler gösterir ve aynı zamanda toz yataklı ergitme yönteminde olduğu gibi yorulma ömrünü azaltan yüksek seviyeli gözeneklilik sorunu sergilemez. Bunlardan dolayı TAEİ imalat işlemi orta-büyük ölçekli parçaların ve yapıların hızlı üretiminde ilgi çekici ve düşük maliyetli bir yöntemdir [22]. Geleneksel imalat yöntemlerine göre TAEİ yönteminde kalıp kullanılmaması başka bir avantajdır [21]. Örneğin denizcilik uygulamalarında büyük kalıp parçalarının yaygın olarak kullanılmakta olduğuna, bu durumun da takım ve kalıp elemanlarının boyutlarının tasarım ve üretim süresi gibi sorunlara yol açtığına ve bahsedilen sorunların çözümü için TAEİ yönteminin alternatif olabileceğine değinilmiştir [25]. TAEİ yöntemi Eİ tekniklerinin arasında yüksek biriktirme oranı, düşük ekipman yatırımı ve düşük işletme maliyetlerinden dolayı büyük ölçekli titanyum alaşımlarını en fazla üretebilme potansiyeline sahiptir [26]. Şekil 6'da TAEİ yöntemiyle üretilmiş 24 kg Ti6Al4V alaşımına sahip dış iniş takımı bileşeni gösterilmektedir.



Şekil 6. 24 kg dış iniş takımı bileşeni [23].

Malzeme biriktirme oranı lazer veya elektron ışını esaslı yöntemlerde 2-10 g/dk iken TAEİ yönteminde malzeme biriktirme oranı 50-130 g/dk'ya ulaşır [14]. TAEİ yöntemleri daha yüksek biriktirme oranına sahip olmakla beraber lazer, elektron ışını ve toz esaslı Eİ tekniklerine göre daha düşük maliyetlidir [27]. Malzeme kullanma verimliliği parçada biriktirilen tel malzemesi açısından %100'e ulaşır [28].

TAEİ yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir [29].

- TAEİ yöntemi toz esaslı eklemeli imalat yöntemlerine göre daha büyük ölçekte metalik parçalar üretebilme kabiliyetine sahiptir. Kısıtlı alanda üretim yapan toz esaslı yöntemlerin aksine TAEİ yönteminde kullanılan bir robot kol, ulaşabileceği ölçüde daha fazla hareket etme serbestliğine sahiptir. Bu durum toz esaslı yöntemlerle mümkün olmayan büyük parçaların üretilmesine imkan verir.

- Malzeme maliyeti bakımından; TAEİ yönteminde kullanılan tel, toz esaslı Eİ yöntemlerinde kullanılan metalik tozlara göre önemli derecede daha ucuzdur.
- TAEİ yöntemi kaynak esastır. Bu yöntem genellikle piyasada bulunan birçok üç boyutlu metal yazıcılardan daha ucuz hazırda bulunan kaynak ekipmanlarından oluşur.
- Eksiltmeli yöntemlerin aksine TAEİ katman katman parça üretimi yaklaşımını kullanır. Bunun anlamı malzemenin sadece ihtiyaç olan yerde biriktirilmesidir. Bu durum malzeme maliyetinin azalması ve önemli malzeme tasarrufu sağlaması açısından katkı sağlar.
- TAEİ teknolojisi yüzey bitirme işlemlerini azaltarak, parçaların tam şeklinde üretimini sağlayabilir. TAEİ yöntemiyle üretilen parçalar geleneksel yöntemlerle üretilenlere göre dikkate değer yüksek yoğunlukta ve güçlü mekanik özelliklere sahiptir.
- TAEİ yöntemi türbin kanatları, kalıplar gibi özel parçaların tamir ve onarım işlemlerinde iyi bir seçenektir. Bu yöntemle eskimiş kısımlı ve hasarlanmış parçaların yüzeyine yeni malzeme birikimi yapılarak parçalar tamir edilebilir. Böylelikle yeni bir parça üretimi gerektirmeden önemli ekonomik tasarruf sağlanmış olur.

3. TAEİ ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

TAEİ yöntemleri hakkında daha önceden yapılan çalışmalarda bu yöntem kullanılarak farklı tür malzemelerle çeşitli parçaların üretimine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin Ti-6Al-4V [23, 30, 31], alüminyum alaşımı [16, 32, 33], paslanmaz çelik [22, 34, 35] gibi malzemelerin üretimi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Guo vd. tamamıyla sıkı AZ31 magnezyum alaşımı bileşenlerinin TAEİ yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilebileceğini göstermişlerdir [2]. Ding vd. farklı kaynak parametrelerinde Ni-Al bronz alaşımını TAEİ yöntemiyle üretmişlerdir [36]. Xu vd. TAEİ yöntemiyle INCONEL 718 süper alaşımının üretimi üzerine çalışmışlardır [37].

Çeşitli malzemelerle üretilen parçalar üzerinde farklı tür mekanik özellikler ve mikro yapıları inceleme gibi konularda da yapılmış çalışmalar mevcuttur. Chen vd. TAEİ yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çeliğin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir [35]. Gordon vd. TAEİ ile üretilmiş paslanmaz çelik parça üzerinde yorulma çatlağı ilerlemesinin değerlendirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [22]. Benzer şekilde Xie vd. TAEİ yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V malzemesinin yorulma çatlağı ilerlemesinin üzerine bir çalışmada bulunmuşlardır [26]. Queguineur vd. döküm hataları ve geç teslim sürelerine sebep olan döküm ürünlerine bir alternatif olabileceğine değinerek büyük parçaların üretilebileceğini göstermek için 316L paslanmaz çelik ve Cu-Al alaşımı malzemelerine TAEİ işlemi uygulamıştır. Çalışmalarında TAEİ yönteminin çatlak ya da içten oksitlenme gibi önemli hatalardan arındırılmış büyük parçalar üretilebileceğini belirtmişlerdir. [25]. Wu vd. Ti6Al4V malzemesiyle uygulanan TAEİ işlemi süresince ısı birikiminin dikiş formasyonu, ark stabilitesi ve metal transfer davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Isı birikiminin ölçümünde kızılötesi pirometre, ark stabilitesi ve metal transfer davranışını izlenmesinde ise yüksek hızlı kamera kullanmışlardır. Çalışmalarının ileri işlem uygunluğu ve kontrolü için yarar sağlayabileceğini belirtmişlerdir [38]. Wu vd. yüksek açılı tel besleme ve farklı besleme yönlerinde TIG kaynak esaslı Eİ işlemi uygulayarak birikim kalitesi (geometrik biçim, makroyapı, mikroyapı ve mekanik dayanım) üzerine çalışmışlardır [39]. Bai vd. CMT (Soğuk Metal Transfer) yöntemiyle alüminyum malzeme üzerinde uyguladıkları TAEİ işleminde gözeneklilik durumunun değerlendirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [32]. Cong vd. CMT yönteminde dört farklı ark modu kullanımının TAEİ işlemi süresince üretilen Al-%6.3Cu alaşımının gözeneklilik karakteristiğini araştırmışlardır [40]. Yang vd. TAEİ yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının korozyon davranışını incelemişlerdir [41]. Posch vd. çalışmalarında CMT yöntemini kullanarak TAEİ işlemiyle üretilen dupleks paslanmaz çeliğe sahip Şekil 7'de gösterilen kanat şekilli parçaların malzeme özelliklerini incelemişlerdir [12].



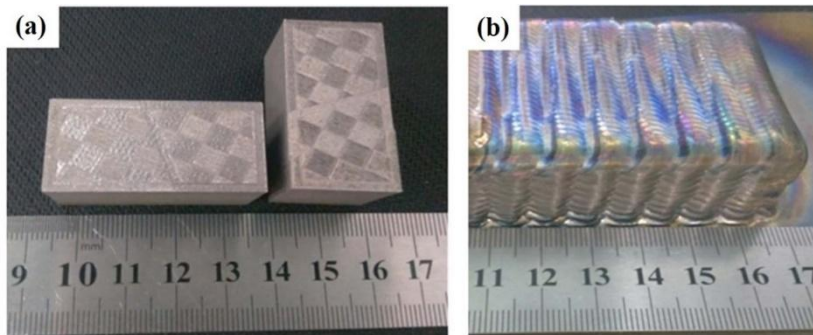
Şekil 7. TAEİ yöntemiyle üretilen kanat şekilli parça [12].

TAEİ yöntemi ve farklı tür imalat işlemleriyle birlikte uygulanan hibrit üretim üzerine yapılmış çalışmalarda bulunmaktadır. Li vd. TAEİ yöntemi ve frezeleme yöntemini beraber kullanarak hibrit imalat üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında TAEİ işlemi ve frezeleme yapan iki farklı robot kullanıp hibrit imalat yöntemiyle Şekil 8’de gösterilen takviye panelini üretmişlerdir. Bu yöntemin var olan birleştirme ve işleme tekniklerine karşın yeni bir metod olabileceğini belirtmişlerdir [11].



Şekil 8. Hibrit yöntemle üretilen takviye paneli [11].

Fu vd. TAEİ yöntemi ve mikro haddeme işlemiyle TAEİ yöntemini içeren hibrit imalat yöntemini uygulayarak mikroyapı ve mekanik özellikleri inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hibrit yaklaşımla üretilen numunelerde sadece TAEİ yöntemiyle uygulananlara göre daha iyi çekme dayanımı ve yaklaşık üç katı kadar daha büyük tokluk değerleri elde etmişlerdir. Ayrıca hibrit yaklaşımla elde edilen numunelerde sadece TAEİ işlemi uygulananlara göre daha homojen dağılmış eş eksenli taneler gözlemlenmiştir [42]. Shi vd. seçici lazer ergitme (SLE) ve TAEİ yöntemleriyle Ti6Al4V malzemesinin hibrit üretimi üzerine bir çalışmada bulunmuşlardır. Öncelikle SLE yöntemiyle toz halinde temin ettikleri Ti6Al4V malzemesini 30x30x30 mm boyutlarında üretmişlerdir. Üretilen malzemeyi daha sonra TAEİ işleminde altlık olarak kullanmak üzere TAEİ yöntemiyle 30x30x20 mm boyutlarında üretim gerçekleştirmişlerdir. Her iki yöntemle imal edilen ürünler Şekil 9’da gösterilmektedir. Bu işlemlerin sonucunda yüksek yoğunlukta ve iyi mekanik özellikli üretim sağlamışlardır [30].



Şekil 9. SLE ve TAEİ üretilen parçalar a) SLE ile üretilen parça, b) TAEİ üretilen parça [30].

Önceden yapılan çalışmaların bazılarında TAEİ işlemiyle birden fazla tel malzemesinin birikimi sağlanmıştır. Qi vd. farklı çift teller kullanarak TIG kaynak yöntemiyle TAEİ işlemi uygulamışlardır. Çalışmalarında ER2319 ve ER5087 telleriyle farklı bileşenlerde Al-Cu-Mg biriktirmişlerdir [43]. Dong vd. TAEİ yöntemiyle Cu-Al alaşımı üretimi üzerine bir çalışmada bulunmuşlardır. TIG kaynak işlemiyle Cu ve Al tellerinin ayrı ayrı farklı tel besleme hızlarında birikimini sağlayarak Cu-Al alaşımli Eİ işlemi uygulamışlardır [20]. Somashekara ve Suryakumar benzer olmayan ikili tel ile malzeme birikimi yaparak TAEİ işlemi uygulamışlardır. Malzeme biriktirme işlemlerinde farklı kimyasal içeriğe sahip ER70S-6 ve ER110S-G tellerini kullanarak aynı teller kendi aralarında ve farklı teller olmak üzere üç ayrı ürün grubu oluşturmuşlardır [4]. Shen vd. TAEİ yöntemiyle işlevselliğe yönelik Fe-FeAl malzemesinin üretimi üzerine bir çalışmada bulunmuşlardır. TIG kaynak yöntemi ve ayrı ayrı beslenen Al ve Fe tellerini aynı zamanda kullanarak demir alüminid malzemesi üretmişlerdir [44]. Abe ve Sasahara paslanmaz çelik ve nikel esaslı farklı iki tür tel kullanarak TAEİ işlemi uygulamışlar ara yüzeyde meydana gelen mekanik özellikleri incelemişlerdir [24]. Ma vd. TIG kaynak yöntemiyle Ti ve Al tellerini kullanarak titanyum alüminidin TAEİ yöntemiyle üretilmesi üzerine çalışmışlardır [45].

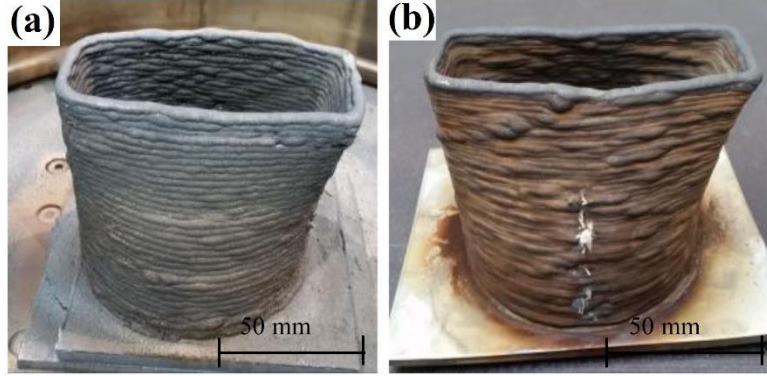
Bahsedilenlerin yanı sıra TAEİ işlemlerinde uygulanan farklı yaklaşımlarla gerçekleştirilen çalışmalar da bulunmaktadır. Sun vd. TAEİ işlemi ile TIG yöntemini kullanarak 2319 alüminyum alaşımı üretmiş ve lazer şok bilyalama işlemini uygulamıştır. Bu işlemler ile numunelere uygulanan mikroyapı çalışmaları sonucu ortalama tane boyutunun azaldığını akma dayanımının ise %72 kadar arttığını görmüşlerdir. Birleştirilmiş TAEİ ve lazer şok bilyalama imalat tekniği kullanımının pratik uygulamalar için üretilen parçalarda mikroyapı ve kalite kontrolünün sağlanabileceğine değinmişlerdir [16]. Yili vd. gaz altı ark kaynak yöntemini kullanarak Şekil 10'da gösterilen çok yönlü karmaşık yapı metal boru bağlantısı üretmişlerdir. Bu boru bağlantısı genel olarak 10 adet farklı yönlendirilmiş, değişen çaplarda ve değişen uzunluklarda borulardan oluşarak tek parça halinde TAEİ yöntemiyle üretilmiştir [21]. Çalışma geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan karmaşık şekilli metal bir parçanın TAEİ imalat yöntemiyle üretilmesine güzel bir örnek olmuştur.



Şekil 10. 10 yönlü boru bağlantısı [21].

Li vd. karmaşık şekilli parçaların TAEİ yöntemiyle üretiminde karşılaşılan zayıf köşe doğruluğunun çözümüne yönelik bir çalışmada bulunmuşlardır. Bahsedilen sorunun çözümü için uyumlu işlem kontrol şeması adı altında bir yöntem kullanmışlardır. Bu yöntemle köşelerde meydana gelen metal yığılmalarının azaltılmasını hareket hızı ve tel besleme oranının en uygun hale getirilmesiyle sağlamışlardır. Bu şekilde geleneksel kontrol şemasına göre yatay ve dikey yönlerde meydana gelen ölçü hatalarını sırasıyla %55 ve %75 olarak azaltmışlardır [14]. Geng vd. TAEİ işleminde ürünlerde meydana gelen yüzey dalgalanmalarını azaltmak için yöntem geliştirilmesine yönelik bir çalışmada bulunmuşlardır [46]. Lockett vd. TAEİ işleminde tasarım kuralları ve inşa yönelim seçimi üzerine bir çalışma gerçekleştirerek TAEİ işleminde tasarımcılara yardımcı olabilecek değerlendirmelerde bulunmuşlardır [47]. Hofer vd. aynı parçayı plazma ark-toz ve CMT-tel esaslı iki farklı Eİ yöntemiyle üretirek her iki farklı yöntem ve malzeme biçimiyle üretilen parçaları kıyaslamışlardır. CMT-tel yönteminde plazma ark-toz yöntemine göre ısı girdisinin ve nüfuziyet derecesinin daha yüksek, yüzey yapısının ise daha az homojen olduğunu, plazma ark-toz esaslı yönteminin bir dezavantajının ise daha

düşük dereceli malzeme kullanımı olduğunu belirtmişlerdir [13]. Şekil 11’de plazma ark-toz ve CMT-tel yöntemleriyle üretilen parçalar gösterilmektedir.



Şekil 11. (a) Plazma ark-toz ve (b) CMT-tel ile üretilen parçalar [13].

4. SONUÇ

Metal eklemeli imalat işlemlerinden biri olan tel ark yönteminin tanıtıldığı ve konuyla ilgili önceden yapılan bir kısım çalışmaların değerlendirildiği bu çalışmada;

- TAEİ yönteminin kaynak işlemi uygulamalarına esas olarak bağlı olduğu,
- Yöntem kullanılarak birçok farklı metal türünden ürünlerin imal edilebileceği,
- Şekil 10’da gösterilen boru örneğinde olduğu gibi değişken ve karmaşık şekilli parçaların TAEİ yöntemiyle üretilebileceği,
- Uygun işlem ekipmanlarının kullanılması durumunda yüksek ağırlık ve uzunluklarda metalik bileşenlerin üretilebileceği,
- TAEİ işlemi esnasında kaynak parametreleri ve torç hareketi gibi parametrelerin elde edilen ürünlerin mekanik ve metalürjik yapısını doğrudan etkilediği,
- Geleneksel üretim ve TAEİ yöntemiyle yapılan hibrit imalat işlemleriyle nitelikli ürünler elde edilebileceği,
- Birden fazla benzer veya farklı ilave metal kullanılarak biriktirme (depozito) oranının artırılabilirliği,

sonuçlarına varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Hascoët, J. Y., Parrot, J., Mognol, P. and Willmann, E., “Induction Heating in a Wire Additive Manufacturing Approach”, *Welding in the World*, Vol. 62, Pages 249-257, 2018.
2. Guo, J., Zhou, Y., Liu, C., Wu, Q., Chen, X. and Lu, J., “Wire Arc Additive Manufacturing of AZ31 Magnesium Alloy: Grain Refinement by Adjusting Pulse Frequency”, *Materials*, Vol. 9, Issue 10, 823, 2016.
3. Hu, Z., Qin, X., Shao, T. and Liu, H., “Understanding and Overcoming of Abnormity at Start and End of the Weld Bead in Additive Manufacturing with GMAW”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 95, Pages 2357-2368, 2018.
4. Somashekara, M. A. and Suryakumar, S., “Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications”, *Trans Indian Inst. Met.*, Vol. 70, Issue 8, Pages 2123-2135, 2017.
5. Ding, D., Pan, Z. S., Cuiuri, D. and Li, H., “A Tool-Path Generation Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, Pages 173-183, 2014.
6. Turhan, S. ve Özsoy, A., “DMLS Yöntemiyle İmal Edilen Ti6Al4V Alaşım Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi”, *SDU International Journal of Technological Science*, Cilt 8, Sayı 2, Sayfa 15-27, 2016.

7. Bermingham, M. J., Nicastro, L., Kent, D., Chen, Y. and Dargusch, M. S., "Optimising the Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Components Produced by Wire + Arc Additive Manufacturing with Post-Process Heat Treatments", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 753, Pages 247-255, 2018.
8. Fuchs, J., Schneider, C. and Enzinger, N., "Wire-Based Additive Manufacturing Using an Electron Beam as Heat Source", *Welding in the World*, Vol. 62, Pages 267-275, 2018.
9. Ge, J., Lin, J., Chen, Y., Lei, Y. and Fu, H., "Characterization of Wire Arc Additive Manufacturing 2Cr13 Part: Process Stability, Microstructural Evolution, and Tensile Properties", *Journal Alloys and Compounds*, Vol. 748, Pages 911-921, 2018.
10. Internet: "Choosing Between 3D Printing & CNC Machining", <https://www.core77.com/posts/71171/Choosing-Between-3D-Printing-n-CNC-Machining>, November 16, 2018.
11. Li, F., Chen, S., Shi, J., Tian, H. and Zhao, Y., "Evaluation and Optimization of a Hybrid Manufacturing Process Combining Wire Arc Additive Manufacturing with Milling for the Fabrication of Stiffened Panels", *Applied Sciences*, Vol. 7, 1233, 2017.
12. Posch, G., Chladil, K. and Chladil, H., "Material Properties of CMT—Metal Additive Manufactured Duplex Stainless Steel Blade-Like Geometries", *Weld World*, Vol. 61, Pages 873-882, 2017.
13. Hoefler, K., Haelsig, A. and Mayr, P., "Arc-Based Additive Manufacturing of Steel Components—Comparison of Wire- and Powder-Based Variants", *Welding in the World*, Vol. 62, Pages 243-247, 2018.
14. Li, F., Chen, S., Wu, Z. and Yan, Z., "Adaptive Process Control of Wire and Arc Additive Manufacturing For Fabricating Complex-Shaped Components", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96, Pages 871-879, 2018.
15. Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevicchi, F., Venturini, G., Durante, M., Boccarusso, L., Memola, F., Minutolo, C. and Squillace, A., "Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing", *10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16*, Vol. 62, Pages 470-474, 2017.
16. Sun, R., Li, L., Zhu, Y., Guo, W., Peng, P., Cong, B., Sun, J., Che Z., Li, B., Guo, C. and Liu, L., "Microstructure, Residual Stress and Tensile Properties Control of Wire-Arc Additive Manufactured 2319 Aluminum Alloy with Laser Shock Peening", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 747, Pages 255-265, 2018.
17. Fang, X., Zhang, L., Li, H., Li, C., Huang, K. and Lu, B., "Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of 2219 Aluminum Alloys Additively Fabricated by the Cold Metal Transfer Process", *Materials*, Vol. 11, 812, 2018.
18. Ge., J, Lin, J., Lei, Y. and Fu, H., "Location-Related Thermal History, Microstructure, and Mechanical Properties of Arc Additively Manufactured 2Cr13 Steel Using Cold Metal Transfer Welding", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 715, Pages 144-153, 2018.
19. Martina, F., Internet: "Wire + Arc Additive Manufacturing: Properties, Cost, Parts", https://www.researchgate.net/profile/Filomeno_Martina/publication/278017889_Wire_Arc_Additive_Manufacturing_properties_cost_parts/links/557866a308aeacff200282e0/Wire-Arc-Additive-Manufacturing-properties-cost-parts, February 25, 2018.
20. Dong, B., Pan, Z., Shen, C, Ma, Y. and Li, H., "Fabrication of Copper-Rich Cu-Al Alloy Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 48B, Pages 3143-3151, 2017.
21. Yili, D., Shengfu, Y., Yusheng, S., Tianying, H. and Lichao, Z., "Wire and Arc Additive Manufacture of High-Building Multi-Directional Pipe Joint", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96, Pages 2389-2396, 2018.

22. Gordon, J. V., Haden C. V., Nied, H. F., Vinci, R. P. and Harlow, D. G., "Fatigue Crack Growth Anisotropy, Texture and Residual Stress in Austenitic Steel Made by Wire and Arc Additive Manufacturing", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 724, Pages 431-438, 2018.
23. Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G. and Colegrove, P., "Wire+Arc Additive Manufacturing", *Materials Science and Technology*, Vol. 32, Issue 7, Pages 641-647, 2016.
24. Abe, T. and Sasahara, H., "Dissimilar Metal Deposition with a Stainless Steel and Nickel-Based Alloy Using Wire and Arc-Based Additive Manufacturing", *Precision Engineering*, Vol. 45, Pages 387-395, 2016.
25. Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F. and Hascoët, J. Y., "Evaluation of Wire Arc Additive Manufacturing for Large-Sized Components in Naval Applications", *Welding in the World*, Vol. 62, Pages 259-266, 2018.
26. Xie, Y., Gao, M., Wang, F., Zhang, C., Hao, K., Wang, H. and Zeng, X., "Anisotropy of Fatigue Crack Growth in Wire Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 709, Pages 265-269, 2018.
27. Wang, F., Williams S. and Rush, M., "Morphology Investigation on Direct Current Pulsed Gas Tungsten Arc Welded Additive Layer Manufactured Ti6Al4V Alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 57, Pages 597-603, 2011.
28. Zhang, C., Li, Y., Gao, M. and Zeng, X., "Wire Arc Additive Manufacturing of Al-6Mg Alloy Using Variable Polarity Cold Metal Transfer Arc as Power Source", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 711, Pages 415-423, 2018.
29. Internet: "An Introduction to Wire Arc Additive Manufacturing", <https://amfg.ai/2018/05/17/an-introduction-to-wire-arc-additive-manufacturing/>, November 16, 2018.
30. Shi, X., Ma, S., Liu, C., Wu, Q., Lu, J., Liu, Y. and Shi, W., "Selective Laser Melting-Wire Arc Additive Manufacturing Hybrid Fabrication of Ti-6Al-4V Alloy: Microstructure and Mechanical Properties", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 684, Pages 196-204, 2017.
31. Wang, F., Williams, S., Colegrove, P. and Antonysamy, A. A., "Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 44A, Pages 968-977, 2013.
32. Bai, J., Ding, H. L., Gu, J. L., Wang, X. S. and Qiu, H., "Porosity Evolution in Additively Manufactured Aluminium Alloy During High Temperature Exposure", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 167, 012045, 2017.
33. Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M. and Akselsen, O. M., "Additive Manufacturing Using WAAM with AA5183 Wire", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 259, Pages 68-74, 2018.
34. Ji, L., Lu, J., Liu, C., Jing, C., Fan, H. and Ma, S., "Microstructure and Mechanical Properties of 304L Steel Fabricated by Arc Additive Manufacturing", *MATEC Web of Conferences*, Vol. 128, 03006, 2017.
35. Chen, X., Li, J., Cheng, X., He, B., Wang, H. and Huang, Z., "Microstructure and Mechanical Properties of the Austenitic Stainless Steel 316L Fabricated by Gas Metal Arc Additive Manufacturing", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 703, Pages 567-577, 2017.
36. Ding, D., Pan, Z., van Duin, S., Li, H. and Shen, C., "Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing", *Materials*, Vol. 9, 652, 2016.
37. Xu, X., Ding, J., Ganguly, S., Williams, S., "Investigation of Process Factors Affecting Mechanical Properties of INCONEL 718 Superalloy in Wire + Arc Additive Manufacture Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 265, Pages 201-209 2019.

38. Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J. and Fei, Z., "Effects of Heat Accumulation on The Arc Characteristics and Metal Transfer Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V", *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 250, Pages 304-312, 2017.
39. Wu., Q., Lu, J., Liu, C., Shi, X., Ma, Q., Tang, S, Fan, H. and Ma, S, "Obtaining Uniform Deposition with Variable Wire Feeding Direction During Wire-Feed Additive Manufacturing", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32, Issue 16, Pages 1881-1886, 2017.
40. Cong, B., Ding, J. and Williams, S., "Effect of Arc Mode in Cold Metal Transfer Process on Porosity of Additively Manufactured Al-6.3%Cu Alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, Pages 1593-1606, 2015.
41. Yang, J., Yang, H., Yu, H., Wang, Z. and Zeng, X., "Corrosion Behavior of Additive Manufactured Ti-6Al-4V Alloy in NaCl Solution", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 48A, Pages 3583-3593, 2017.
42. Fu, Y., Zhang, H., Wang, G. and Wang, H., "Investigation of Mechanical Properties for Hybrid Deposition and Micro-Rolling of Bainite Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 250, Pages 220-227, 2017.
43. Qi, Z., Cong, B., Qi, B., Sun, H., Zhao, G. and Ding, J., "Microstructure and Mechanical Properties of Double-Wire +Arc Additively Manufactured Al-Cu-Mg Alloys", *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 255, Pages 347-353, 2018.
44. Shen, C., Pan, Z., Cuiuri, D., Roberts, J. and Li, H., "Fabrication of Fe-FeAl Functionally Graded Material Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 47B, Pages 763-772, 2016.
45. Ma, Y., Cuiuri, D., Hoye, N., Li, H. and Pan, Z., "The Effect of Location on The Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Aluminides Produced by Additive Layer Manufacturing Using In-Situ Alloying and Gas Tungsten Arc Welding", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 631, Pages 230-240, 2015.
46. Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., Huang, D., and Zhang, F., "Formation and Improvement Of Surface Waviness for Additive Manufacturing 5A06 Aluminium Alloy Component with GTAW System", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24, Issue 2, Pages 342-350, 2018.
47. Lockett, H., Ding, J., Williams, S. and Martina, F., "Design for Wire + Arc Additive Manufacture: Design Rules and Build Orientation Selection", *Journal of Engineering Design*, Vol. 28, Issue 7-9, Pages 568-598, 2017.