

Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerinin Uygulama Temelli Karşılaştırılması

Hakan Çandar¹

Özet

Bu çalışmada, modern imalat süreçlerinde önemli bir yere sahip olan geleneksel olmayan kesme yöntemleri kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Lazer kesim, tel erezyon (EDM), plazma kesim ve aşındırıcı su jeti (ASJ) teknolojileri; temel çalışma prensipleri, uygulama alanları, avantajları, dezavantajları ve sınırlamaları açısından sistematik olarak incelenmiştir. Her bir yöntemin teknik özellikleri; iş parçası malzemesi, kalınlık aralığı, geometrik karmaşıklık, yüzey kalitesi gereksinimi, işlem süresi ve maliyet gibi parametrelere göre değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, söz konusu yöntemlerin farklı endüstriyel uygulamalardaki etkinliği karşılaştırmalı örneklerle analiz edilmiştir. Lazer kesim, yüksek hassasiyet ve ince kesim gerektiren uygulamalarda; tel erezyon, iletken ve karmaşık geometrili parçalarda; plazma kesim, kalın ve büyük çelik yapıların hızlı işlenmesinde; su jeti ise ısıl etkiden kaçınılması gereken kırılğan malzemelerde öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, üretim sürecine özgü gereksinimlere uygun yöntemin doğru seçilmesinin önemini vurgulamakta; söz konusu teknolojilerin modern ve sürdürülebilir imalat süreçlerindeki stratejik rolünü ortaya koymaktadır.

1. Giriş

İmalat sanayii, insanlık tarihinin en köklü mühendislik alanlarından biridir ve teknolojik gelişmelere paralel olarak sürekli bir evrim içerisinde. Özellikle 20. yüzyılda yaşanan endüstriyel dönüşüm, üretim yöntemlerinin çeşitlenmesini beraberinde getirmiş; farklı malzemeler, daha karmaşık geometriler ve artan kalite beklentileri imalat süreçlerine yeni yaklaşımların dahil edilmesini zorunlu kılmıştır. Bu dönüşümün merkezinde yer alan

1 Dr. Öğr. Üyesi, Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Şhitkamil, 27310 Gaziantep, candar@gantep.edu.tr, ORCID ID:0000-0002-3697-1584

geleneksel imalat yöntemleri başta talaşlı imalat olmak üzere dövme, haddeleme, ekstrüzyon ve kaynak gibi işlemler bugün hâlâ üretim sektörünün büyük bölümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle seri üretime uygunlukları, göreceli düşük maliyetleri ve geniş uygulama alanlarıyla birçok mühendislik problemi geleneksel yöntemlerle etkili biçimde çözülebilmektedir. Ancak, gelişen teknolojiyle birlikte mühendislik parçalarının yalnızca üretilmesi değil, aynı zamanda yüksek hassasiyetle, karmaşık geometrilerle ve özel malzeme sınırlamalarıyla üretilmesi gerekliliği doğmuştur. Bu da geleneksel yöntemlerin sınırlarını zorlayan yeni üretim ihtiyaçlarını ortaya çıkarmıştır. Örneğin, 50 mm boyutlarında kompakt bir parçaya 1 mm çapında, yüksek derinlikte ve hassas toleransta bir delik delmek ve bu deliğin iç yüzeyini pürüzsüz bir şekilde parlatmak, klasik tezgâh sistemleriyle hem zor hem de maliyetli bir süreçtir. Yine, optik cihazlar için kullanılan cam yüzeylerde keskin köşelere sahip, detaylı geometrik kesimlerin yapılması gerektiğinde, malzemenin kırılgan yapısı nedeniyle geleneksel yöntemler ciddi deformasyon ve çatlama riskleri taşır. Aynı şekilde, çok katmanlı kompozit malzemelerde geleneksel mekanik kesme sırasında oluşan tabaka ayrışmaları, çapaklanma veya ısıl hasarlar ürün kalitesini olumsuz etkileyebilir. Mikron düzeyinde detay içeren mikro parçaların üretiminde de konvansiyonel yöntemler, gerekli hassasiyeti ve kontrolü sağlamakta yetersiz kalır. Bu tür örnekler, geleneksel yöntemlerin yalnızca belirli sınırlar içinde etkin olduğunu; bu sınırların ötesine geçildiğinde farklı fiziksel prensiplere dayanan, daha karmaşık üretim teknolojilerine ihtiyaç duyulduğunu açıkça ortaya koymaktadır. İşte bu noktada devreye geleneksel olmayan imalat yöntemleri girmektedir. Bu yöntemler, yaklaşık 80 yıllık bir geçmişe sahip olup ilk olarak nükleer enerji, havacılık ve savunma sanayii gibi ileri teknoloji uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Zamanla gelişerek daha yaygın hâle gelen bu yöntemler, günümüzde tıbbi cihaz üretiminden elektronik ve otomotive kadar birçok sektörde önemli bir yer edinmiştir.

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri, temelde iki yönden geleneksel yöntemlerden ayrılır. Birincisi, kullanılan enerji türüdür. Geleneksel imalat işlemleri büyük oranda mekanik enerjiye dayanırken, bu yeni nesil yöntemler termal, kimyasal, elektriksel, elektro-kimyasal veya hidrodinamik enerji türlerini kullanır. İkinci temel fark ise, takım ile iş parçası arasında doğrudan mekanik temasın bulunmamasıdır. Bu temas eksikliği sayesinde takım aşınması en aza indirgenir, iş parçasında deformasyon oluşmaz ve çok daha yüksek yüzey kalitesi elde edilebilir. Ayrıca, temas olmadan gerçekleşen bu işlemler sayesinde kırılgan, ince ya da karmaşık yapıları malzemeler zarar görmeden işlenebilir. Bu teknoloji ailesine elektriksel boşalma ile işleme (EDM), lazer işleme, elektron ışını ile işleme, ultrasonik işleme, kimyasal

aşındırma, elektro-kimyasal işleme ve aşındırıcı su jeti gibi çeşitli yöntemler dâhildir. Her biri farklı enerji prensiplerine ve uygulama alanlarına sahip olan bu teknikler, üretim süreçlerinde yüksek hassasiyet, malzeme esnekliği ve düşük deformasyon avantajları sağlar.

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri içinde, kesme işlemleri özel bir yer tutmaktadır. Çünkü üretimin temel adımlarından biri olan kesme, yalnızca biçimlendirme değil, montaj öncesi hazırlık ve son işlem süreçlerinde de kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda lazer kesim, plazma kesim, tel erozyon (Wire-EDM) ve aşındırıcı su jeti kesim gibi yöntemler, geleneksel kesme tekniklerinin yetersiz kaldığı alanlarda devreye girerek yüksek hassasiyet, karmaşık şekil işleme ve termal deformasyon kontrolü gibi avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemlerin her üretim senaryosunda en uygun çözüm olduğunu söylemek mümkün değildir. Geleneksel olmayan kesme teknikleri genellikle yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetleri, özel operatör bilgi ve donanım gereksinimleri gibi sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, hangi yöntemin kullanılacağına karar verirken; malzeme türü, parça geometrisi, üretim hacmi, tolerans gereksinimi ve yüzey kalitesi gibi faktörlerin bir arada değerlendirilmesi gerekir.

Bu bölümde, söz konusu dört geleneksel olmayan kesme yöntemi; lazer kesim, plazma kesim, tel erozyon ve aşındırıcı su jeti kesim ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Her bir yöntemin teknik çalışma prensipleri, avantajları, dezavantajları ve uygulama alanları incelenecek; ardından karşılaştırmalı analizlerle hangi koşullarda hangi yöntemin tercih edilmesinin daha uygun olacağına dair yol gösterici bilgiler sunulacaktır.

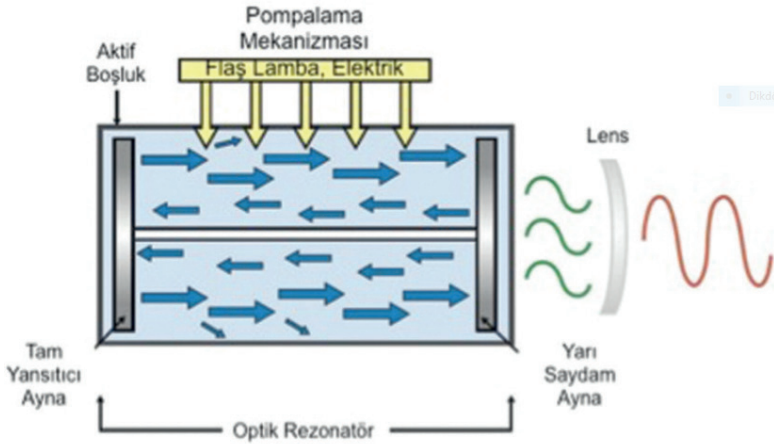
2. Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerine Genel Bakış

2.1. Lazer Kesim Yöntemi

Lazer kesim teknolojisi, 1960'lerden itibaren endüstriyel imalatta yerini almış ve özellikle son yıllarda ileri teknoloji üretim süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Lazer kelimesi, İngilizce “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ifadesinin kısaltmasıdır ve bu teknoloji, yüksek yoğunluklu ve koherent (uyumlu) ışık demetlerinin kullanılmasıyla malzeme üzerinde son derece hassas ve kontrollü kesim yapılmasını sağlar [1].

Lazer ışınının oluşumu, atom veya moleküllere dışarıdan enerji verilmesiyle başlar. Bu enerji; ısı, elektriksel akım veya kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla sağlanabilir. Enerji verilmesi sonucunda, atomun elektronları alt enerji seviyelerinden üst enerji seviyelerine çıkar. Enerji kaynağı kesildiğinde,

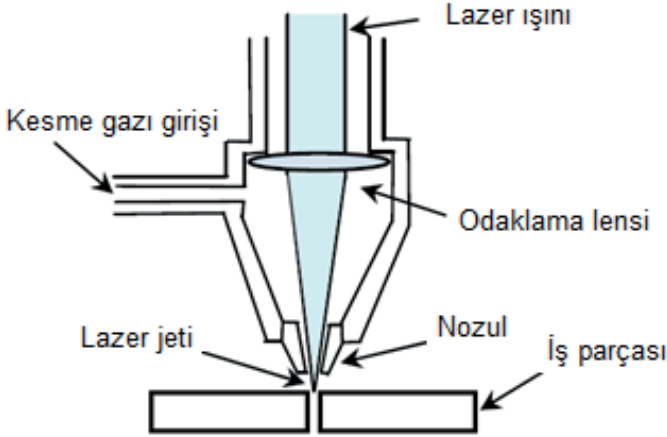
elektronlar daha kararlı olan alt seviyeye döner ve bu esnada elektromanyetik dalga, yani foton yayımlarlar. Albert Einstein, 1917 yılında yaptığı çalışmada, uygun koşullar sağlandığında yayılan bu fotonların başka atomları da aynı şekilde uyarabileceğini ifade etmiştir. Bu sürece “uyarılmış emisyon” denir ve lazer ışığının temel fiziksel prensibini oluşturur. Uygun ortamdan kasıt, yeterli enerji kaynağı ve fotonların çoğalmasını sağlayan bir geri besleme (feedback) mekanizmasının varlığıdır. Bu mekanizma Şekil 1 de gösterildiği gibi genellikle iki aynadan oluşan optik rezonatör ile sağlanır; biri tam yansıtıcı, diğeri yarı saydamdır. Bu yapı içinde fotonlar defalarca yansır, uyarılmış emisyonla çoğalır ve sonunda yarı saydam aynadan odaklanmış, koherent, tek dalga boyuna sahip ve yüksek yoğunluklu bir lazer ışını çıkar [2].



Şekil 1 Tipik bir lazer rezonatörünün şematik gösterimi [3]

Lazer kesim işlemi Şekil 2’de gösterildiği üzere temel olarak lazer ışını, odaklama lensi, basınçlı gaz girişi ve nozul gibi ana bileşenlerden oluşur. Kesim sırasında, nozuldaki basınçlı gaz, lazer ışını ile hizalanarak ya da belirli bir açıyla püskürtülür. Bu gazlar aktif (örneğin oksijen, azot) veya soygazlar (helyum, argon) olabilir ve seçimi, kesim yapılan malzemenin türü ile istenen kesim kalitesine bağlıdır [4], [5]. Özellikle oksijen kullanımı, oksidasyon reaksiyonu sayesinde kesim sıcaklığını artırarak işlemin hız ve verimliliğini yükseltir; ancak bu yanma reaksiyonu, kesim bölgesinde daha pürüzlü bir yüzey oluşmasına yol açabilir. Buna karşılık, soygazlardan olan azot gazı daha temiz ve pürüzsüz kesim sağlar [6]. Lazer ışınları ise darbe modunda (pulsed) veya sürekli dalga (continuous wave - CW) olarak uygulanabilir. Endüstride lazer kesim, odaklanmış ve yüksek enerjili ışın demetinin CNC

kontrollü bir sistemle iş parçasının yüzeyine yönlendirilmesiyle gerçekleşir. Lazer ışını, malzemenin yüzeyinde yoğun bir ısı kaynağı görevi görerek, malzemenin erime noktasına ulaştırılmasını, eritilmesini, buharlaştırılmasını veya kontrollü oksidasyon yoluyla kesilmesini sağlar. Kesim esnasında eritilen malzemenin kesim bölgesinden uzaklaştırılması ise nozuldan püskürtülen yardımcı gazlar sayesinde gerçekleşir. Bu parametrelerin doğru seçimi, hem kesim verimliliğini hem de ürün kalitesini doğrudan etkiler.



Şekil 2 Lazer Işını ile Kesim Prensipleri [4]

Lazer kesim teknolojisinde farklı lazer türleri kullanılmakta olup, her biri belirli malzeme türleri ve uygulamalar için farklı avantajlar sunar. Temel olarak katı, sıvı ve gaz halindeki aktif ortamlara göre sınıflandırılan lazerler arasında en yaygın olanları CO₂ lazer, fiber lazer ve Nd:YAG lazerlerdir. CO₂ lazerler genellikle 10600 nm dalga boyunda çalışır ve metal olmayan malzemelerde (ahşap, plastik, deri, tekstil gibi) yüksek kesim kalitesi ve hız sağlar. Fiber lazerler 1060–1080 nm dalga boyunda olup, özellikle metal kesiminde yüksek enerji verimliliği, düşük bakım gereksinimi ve hızlı kesim kabiliyeti ile öne çıkar. Nd:YAG lazerler ise 1064 nm dalga boyunda olup, mikro ve hassas kesim işlemlerinde tercih edilir ancak genellikle diğerlerine kıyasla daha düşük enerji verimliliğine sahiptir. Lazerin kesim performansı, güç, dalga boyu, odaklama hassasiyeti ve kullanılan yardımcı gaz gibi parametrelere bağlıdır. Yardımcı gaz seçimi (örneğin azot, oksijen, argon) kesim kalitesini, hızı ve malzemenin kimyasal yapısını doğrudan etkiler. Endüstriyel uygulamalarda malzeme türü ve üretim gereksinimlerine uygun lazer türü ve parametrelerin seçimi kritik öneme sahiptir. Tablo 1’de farklı

lazer türlerinin temel özellikleri, avantajları, dezavantajları ve tipik uygulama alanları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur [7], [8].

Lazer kesimin en önemli avantajlarından biri, yüksek hızda kesim yapabilme yeteneğidir. Ayrıca, parça üzerinde birbirinden bağımsız ve karmaşık geometriler arasında hızlı geçişler sağlanması da lazer kesimin öne çıkan özelliklerindendir. Çok ince kesimler ve delik açma işlemlerinde yüksek hassasiyet sunması, ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) oldukça dar olması ve çok çeşitli malzeme türlerinde uygulanabilirliği, lazer kesim teknolojisinin temel avantajları arasında yer alır. Metal, plastik, seramik, cam ve kompozit gibi farklı malzemelerin lazerle kesilmesi mümkündür. CNC tabanlı kontrol sistemleri sayesinde karmaşık, tekrarlanabilir ve hızlı kesimler gerçekleştirilir. Bu avantajlar sayesinde lazer kesim, otomotiv endüstrisinde şasi parçalarının üretiminde, havacılıkta titanyum alaşımlarından türbin kanatlarının imalatında, elektronik sektöründe devre kartı kesimlerinde ve medikal alanda implant ile cerrahi alet üretiminde tercih edilmektedir [4].

Tablo 1. Farklı Lazer Türlerinin Temel Özellikleri ve Endüstriyel Kullanım Alanları [4]

Lazer Türü	Dalga Boyu (nm)	Maksimum Güç (kW)	Verimlilik (%)	Uygulama Alanları	Avantajlar	Dezavantajlar
CO ₂ Lazer	10600	100	%10 - %20	Metal olmayan malzemeler, metal kesim (ince metaller)	Yüksek güç çıkışı, iyi kesim kalitesi, yaygın kullanım	Düşük verimlilik, büyük sistem boyutu
Fiber Lazer	1070	20	%25 - %30	Metal kesimi, hassas kesim	Yüksek verimlilik, küçük sistem, düşük bakım ihtiyacı	Sınırlı güç aralığı, maliyet yüksek olabilir
Nd:YAG Lazer	1064	6	%5 - %15	Mikro kesim, hassas işlemler	Yüksek yoğunluklu ışın, kompakt yapı	Düşük verimlilik, sınırlı güç çıkışı

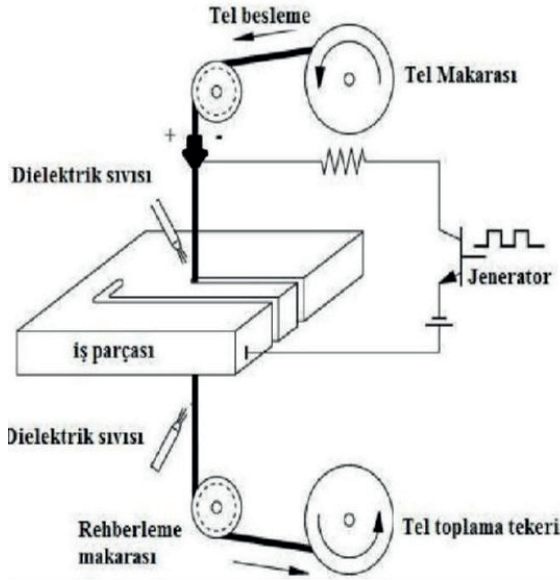
Lazer kesim teknolojisi birçok avantaja rağmen bazı dezavantajlar ve sınırlamalara da sahiptir. Öncelikle, sistemlerin bakım gereksinimleri ve yüksek enerji tüketimi, işletme maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle kalın ve yüksek yansıtıcı özelliklere sahip malzemelerde, örneğin kalın alüminyum plakalar gibi, lazerin kesim etkinliği belirgin şekilde azalır. Bu nedenle lazer kesim genellikle en fazla 20-30 mm kalınlığa kadar olan malzemelerde kullanılabilir. Kesim sırasında malzeme yüzeyinde oluşan yüksek ısı, mikroyapısal değişikliklere, sertleşmeye veya mikroçatlaklara yol açabilir; bu da hassas mekanik özelliklerin korunmasının

kritik olduğu uygulamalarda önemli bir sorun oluşturur. Ayrıca, lazer ışınlarının odaklama lensinden geçtikten sonra kesim bölgesine açılı olarak gelmesi, kesme kalınlığını sınırlamanın yanı sıra kerf açılanmasına neden olur. Lazer ışınının kesim bölgesinde belirli bir hacme yayılması nedeniyle kesim hattı beklenenden daha geniş olur ve bu durum, çok hassas toleransların gerektiğı durumlarda dezavantaj yaratır. Tüm bu nedenlerle, lazer kesim yüksek hassasiyet ve malzeme özelliklerinin korunmasının kritik olduğı parçalarda dikkatle uygulanmalı, özellikle kalın ve yüksek yansıtıcılı malzemelerde alternatif yöntemler tercih edilmelidir.

2.2. Tel Erezyonla Kesme Yöntemi

Tel erezyonla kesme, elektriksel deşarj prensibine dayanan, yüksek hassasiyet ve karmaşık geometrilerin işlenmesine olanak sağlayan bir kesme teknolojisidir. Tel erezyon yöntemi, genellikle elektriksel olarak iletken malzemelerin işlenmesinde tercih edilir ve özellikle sert, sertleştirilmiş metallerin veya karmaşık şekilli parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır [9]. Bu yönüyle sert parçaların işlem öncesi ısıl işlem ile yumuşatılması gerekliliğini ortadan kaldırır.

Tel erezyonla kesimin temel çalışma prensibi, iş parçası ile sürekli hareket eden ince bir tel elektrot arasında kontrollü elektrik boşalmaları oluşturarak malzemenin küçük parçacıklar halinde eritilmesi ve buharlaştırılmasıdır (Şekil 3). Elektriksel boşalmalar (kıvılcımlar), iş parçası yüzeyi ile tel arasında oluşan çok yüksek sıcaklıklar (10,000 °C'ye kadar) sayesinde lokal erime ve buharlaşma meydana getirir. Bu süreç, temas gerektirmeden malzemenin kesilmesini sağlar ve mekanik stres yaratmaz [10]. Kesim esnasında, tel sürekli olarak makineden beslenir ve telin kesim hattı boyunca hareketi sağlanır; bu sayede tel aşınması minimize edilir ve istenilen kesim geometrisi elde edilir.



Şekil 3 Tel erzyon mekanizması

Tel elektrot, tel erzyon işleminin en kritik bileşenlerinden biridir. Genellikle bakır, pirinç veya tungsten alaşımları gibi yüksek iletkenliğe sahip malzemeler kullanılır. Tel elektrottan beklenen temel özellikler; yüksek elektriksel iletkenlik, aşınma ve erimeye karşı dayanıklılık, mekanik sağlamlık ve düşük termal genleşme katsayısıdır. Bu özellikler, özellikle yüksek sıcaklıklarda kararlı kıvılcım oluşumu ve hassas kesim için büyük önem taşır [11]. Tel çapı genellikle 0.02 mm ile 0.3 mm arasında değişir; daha ince tellerle daha hassas kesimler yapılabilirken, kopma riski de artmaktadır.

Kesim işlemi sırasında tel ve iş parçası arasındaki boşluk, çoğunlukla deiyonize su olmak üzere bir dielektrik sıvı ile doldurulur. Bu sıvı, üç temel işleve sahiptir: kıvılcım oluşumunu kontrol altına almak, tel ile iş parçası arasında yalıtkanlık sağlamak ve işlem sırasında oluşan eriyik parçacıkları sistemden uzaklaştırmak. Dielektrik sıvının özellikleri (iletkenlik, sıcaklık, viskozite) kesim kalitesini ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkiler [12]. En yaygın kullanılan sıvı olan deiyonize su; düşük iletkenliği, yüksek soğutma kapasitesi ve çevresel güvenliği sayesinde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, sıvının iletkenliği zamanla artabileceği için filtrasyon sistemiyle sürekli yenilenmesi ve izlenmesi gereklidir [13].

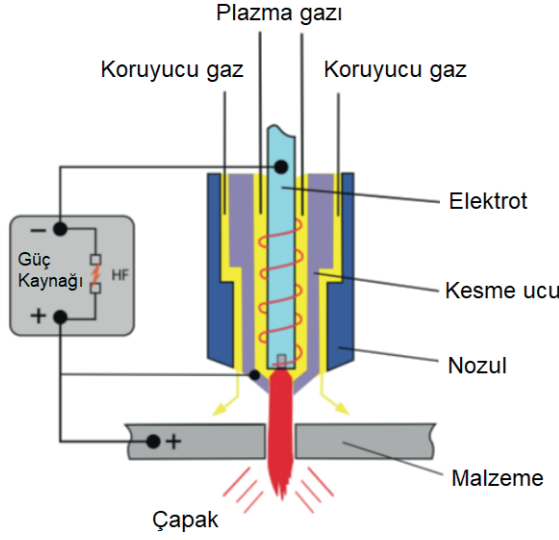
Tel erzyon yöntemi, çok ince kesim hattı (kerf) ve yüksek yüzey kalitesi sunar. Kerf açılmasının minimal olmasının temel sebebi, kullanılan telin çok ince olması ve elektriksel boşalmaların kontrollü oluşmasıdır.

Bu sayede mikron seviyesinde hassas kesimler mümkündür. Tel erzyonla kesim, özellikle karmaşık şekilli kalıpların, ince dişlilerin ve hassas parçaların üretiminde tercih edilir [14]. Bununla birlikte, tel erzyon yöntemi sadece elektriksel olarak iletken malzemelerle sınırlıdır. Ayrıca, kesim hızı lazer kesime kıyasla genellikle daha düşüktür ve telin aşınması nedeniyle malzeme ve tel maliyeti artabilir. Enerji tüketimi ve dielektrik sıvının yönetimi de dikkate alınması gereken diğer faktörlerdir. Ancak yüksek hassasiyet, yüzey kalitesi ve karmaşık geometrilerin üretilebilmesi, tel erzyonu birçok yüksek teknoloji uygulamasında vazgeçilmez kılar.

2.3. Plazma Ark ile Kesme

Plazma ark kesme (Plasma Arc Cutting – PAC), yüksek sıcaklıktaki iyonize gaz (plazma) kullanılarak elektriksel olarak iletken metallerin kesilmesini sağlayan termal bir kesme yöntemidir. Bu teknoloji, özellikle kalın ve yüksek iletkenliğe sahip metallerin hızlı ve verimli şekilde kesilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Plazma ark kesme yöntemi, hem manuel hem de CNC kontrollü sistemlerde uygulanabilir olmasıyla üretim endüstrisinde geniş kullanım alanı bulmuştur.

Plazma ark kesimin temel prensibi, yüksek hızlı bir gazın (genellikle hava, azot, argon veya hidrojen) dar bir nozül içerisinden geçirilerek elektrik arkıyla iyonlaştırılması sonucu plazma haline getirilmesi ve bu yüksek enerjili plazmanın iş parçası yüzeyine yönlendirilerek malzemenin ergitilerek kesilmesidir (Şekil 4). Elde edilen plazma arkı, 20.000 °C'ye kadar ulaşabilen sıcaklığı ile metali hızla ergitirken, yüksek hızla çıkan gaz eriyen malzemeyi kesim bölgesinden uzaklaştırır. Bu işlem sonucunda, temiz ve hızlı bir kesim sağlanır [16].



Şekil 4 Plazma ark kesme mekanizması

Plazma kesme sistemleri genellikle güç kaynağı, plazma torcu, gaz besleme ünitesi ve kontrol sisteminden oluşur. Torç içinde yer alan elektrot genellikle tungsten gibi yüksek erime noktasına sahip malzemelerden yapılır. Kesim işlemi sırasında elektrot ile nozul arasında oluşan pilot ark, plazma gazını iyonize ederek yüksek sıcaklıkta bir plazma jetine dönüştürür. Torç ucundaki nozul, plazma jetini daraltarak kesim hattında yüksek yoğunlukta ısı enerjisi oluşturur. Bu sayede hızlı ve düzgün kesim sağlanırken, termal etki bölgesi (Heat Affected Zone - HAZ) sınırlı kalır [17].

Plazma kesme işleminde kullanılan gazın türü ve basıncı, kesim kalitesini, hızını ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkiler. Örneğin; ince levhaların kesiminde sıkça kullanılan hava, uygun maliyetli ve çevre dostu bir seçenek sunarken, paslanmaz çelik ve alüminyum gibi metallerin kesiminde argon-hidrojen gibi özel gaz karışımları tercih edilerek daha temiz kesim yüzeyleri elde edilebilir [18].

PAC yöntemi, yüksek kesim hızı, düşük işletme maliyeti ve geniş malzeme uyumluluğu sayesinde endüstride sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca, otomasyon sistemlerine kolay entegrasyonu, seri üretim süreçlerinde zaman ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Kesim kalınlığı açısından oldukça geniş bir aralık sunar; 0.5 mm'den başlayarak 150 mm'ye kadar çeşitli kalınlıklardaki metalleri kesmek mümkündür.

Ancak, plazma kesme yönteminin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle ince ve hassas parçaların kesiminde, kesim aralığı (kerf) tel erezyon

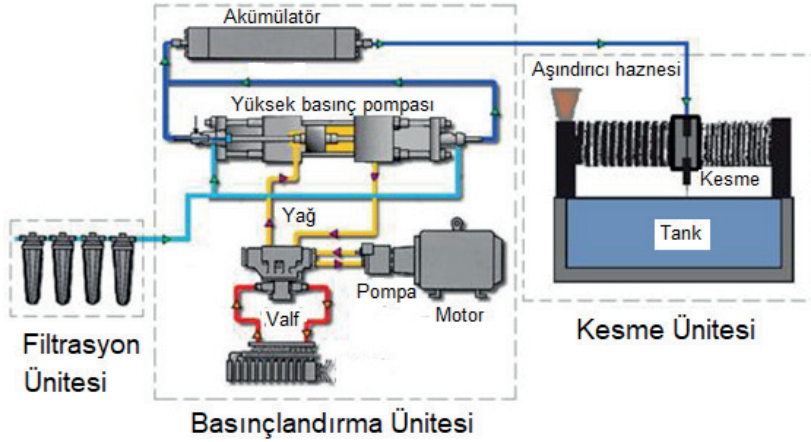
veya lazer kesime göre daha geniştir. Ayrıca, ısı girdisi nedeniyle oluşabilecek çapakanma ve termal deformasyon, bazı hassas uygulamalar için olumsuz etki yaratabilir. Bu nedenle kesim sonrası temizleme veya ikincil işlemler gerekebilir [19]. Bununla birlikte, plazma ark kesme, özellikle inşaat, gemi yapımı, otomotiv ve metal işleme sektörlerinde, hızlı ve ekonomik kesim çözümü sunması nedeniyle yaygın bir uygulama alanına sahiptir.

2.4. Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesme

Aşındırıcılı su jeti ile kesim (Abrasive Water Jet Machining - AWJM), yüksek basınçlı suyun içerisine aşındırıcı partiküller eklenerek yönlendirilmesiyle gerçekleştirilen, temassız ve termal etkisiz bir kesme yöntemidir. Bu yöntem, özellikle ısıya duyarlı, yanıcı ya da konvansiyonel yöntemlerle kesilmesi güç malzemelerin hassas işlenmesinde etkin bir çözüm sunar. Aşındırıcılı su jeti, seramik, cam, taş, kompozitler, metaller ve çeşitli polimerik malzemeler gibi geniş bir malzeme yelpazesinde kullanılabilir [20].

ASJ teknolojisinin tarihçesi 1950'li yıllara dayanmaktadır. İlk olarak 1956 yılında Dr. Norman Franz, yüksek basınçlı su jeti kullanarak kereste parçalarını kesmeye yönelik bir sistem geliştirmiştir. Bu ilk uygulama, sadece yumuşak ve lifli malzemelerle sınırlı kalmış, sanayide yaygın bir etki yaratmamıştır. Ancak 1980'li yıllarda Dr. Mohamed Hashish tarafından gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda su jeti içerisine aşındırıcı partiküllerin eklenmesiyle daha sert ve karmaşık yapıdaki malzemelerin de kesilebilmesi sağlanmış ve böylece günümüzde bilinen anlamıyla aşındırıcılı su jeti kesim teknolojisi doğmuştur [21].

Aşındırıcılı su jeti kesimin temel prensibi, yaklaşık 4000–6000 bar arasında basınçlandırılmış suyun dar çaplı bir nozül aracılığıyla iş parçasına yönlendirilmesi ve bu su jeti içerisine garnet, alümina veya silisyum karbür gibi aşındırıcı partiküllerin eklenmesidir (Şekil 5). Oluşan yüksek hızlı (yaklaşık 800–1000 m/s) ve yüksek enerjili aşındırıcı akış, iş parçası yüzeyinde mikroskobik aşındırma etkisi yaratarak malzemenin yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlar. Bu süreç, termal enerji kullanılmadan gerçekleştiği için, kesim sırasında Isıl Etki Bölgesi (HAZ) oluşmaz, malzemenin mikro yapısında değişim meydana gelmez [22].



Şekil 5 Aşındırıcı su jeti kesme mekanizması [23]

ASJ sistemi, temel olarak üç ana ünitelerden oluşur: filtrasyon, basınçlandırma ve kesme ünitesi. Filtrasyon ünitesi, kullanılan suyun içindeki partikülleri arındırarak sistem bileşenlerinin zarar görmesini engeller ve nozülün tıkanmasını önler. Basınçlandırma ünitesi, sistemin en kritik bileşenlerinden biridir. Bu üniteye yer alan yüksek basınç pompası (intensifier), düşük basınçlı hidrolik enerjiyi 4000 bar seviyesine kadar yüksek basınçlı suya dönüştürür. Intensifier'lar, ASJ'nin süreklilik ve stabilite açısından güvenilir çalışmasını sağlayan temel aktörlerdir [23].

Aşındırıcı su jeti ile kesme işlemi, düşük basınçlı şebeke suyunun filtrasyon ünitesine giriş yapmasıyla başlar. Su, daha sonra yüksek basınç pompasına iletilir. Elektrik motoru tarafından çalışan yağ pompası, yüksek basınç pompasına yağ basar ve pompadaki seramik pistonu hareket ettirir. Piston, ileri ve geri hareket ederek yüksek basınç silindirindeki suyun basıncını kesit alan oranında artırır. Bu oran genellikle 1/20'dir; yani 200 barlık yağ basıncı, suyun basıncını 20 kat artırarak yaklaşık 4000 bar seviyesine çıkarır. Basınçlandırılan su, basınç dalgalanmalarını azaltmak amacıyla önce akümülatöre, ardından kesme ünitesine gönderilir. Kesme ünitesi, yüksek basınçlı suyun aşındırıcı partiküllerle karıştırılarak nozül aracılığıyla dışarı atıldığı bölümdür. Bu karışım venturi prensibi ile sağlanır; su jeti negatif basınç oluşturarak aşındırıcı partikülleri kendine çeker ve bu karışımı kesim yüzeyine yönlendirir. Kesme kafasından çıkışta suyun basıncı yaklaşık 4000 bar, hızı ise ses hızının yaklaşık üç katıdır (3 mach) [23].

ASJ yönteminde kesim kalitesini etkileyen başlıca parametreler; su basıncı, nozül çapı, aşındırıcı partikül tipi, tane boyutu, debisi, nozül-malzeme mesafesi ve kesim hızı gibi değişkenlerdir. Aşındırıcı olarak en

yaygın kullanılan malzeme garnet olup, bu partikül hem maliyet etkin hem de yüksek aşındırma kapasitesine sahiptir. Uygun parametrelerle kesim hattı genişliği (kerf) 0.8 mm'ye kadar indirilebilir ve yüzey pürüzlülüğü oldukça düşük seviyelerde tutulabilir [24].

ASJ'nin en büyük avantajı, malzemeye herhangi bir termal, mekanik ya da kimyasal zarar vermeden kesim gerçekleştirmesidir. Bu nedenle, diğer kesme yöntemleriyle işlenmesi zor olan çok katmanlı kompozit yapılar, ısıya duyarlı alaşımlar veya cam gibi kırılğan malzemeler bu yöntemle yüksek hassasiyetle işlenebilir. Ayrıca, işlem sırasında çapak oluşumu minimaldir ve çoğu zaman ikincil yüzey işleme gerekmez. CNC kontrollü sistemlerle entegre edilerek otomatik, tekrarlanabilir ve karmaşık kesim işlemleri de kolaylıkla yapılabilir.

Bununla birlikte ASJ'nin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle sistemin ilk yatırım maliyeti yüksektir ve işlem sırasında kullanılan aşındırıcı miktarının sarfıyatı işletme maliyetlerini artırabilir. Ayrıca, kesim sırasında oluşan yüksek ses seviyesi ve atık sıvının çevreye duyarlı şekilde yönetilmesi gereklidir. Aşındırıcı partiküller, geri dönüşüm sistemleriyle kısmen yeniden kullanılabilir, ancak bu da sistemin bakım maliyetine ek yük getirebilir.

ASJ, sahip olduğu bu üstün özellikleri sayesinde havacılık, uzay, otomotiv, savunma sanayi, elektronik ve mimari dekorasyon gibi hassas ve yüksek kaliteli kesim gerektiren sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3. Uygulama Alanlarına Göre Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi

Geleneksel olmayan kesme yöntemlerinden, Aşındırıcı Su Jeti (ASJ), Plazma, Lazer ve Tel Erozyon ile kesme yöntemleri, malzeme sertliği, geometrik karmaşıklık veya ısıl hassasiyet gibi nedenlerle geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı veya uygulamanın maliyetli olduğu modern üretim ortamlarında kritik öneme sahiptirler. Bu yöntemlerin bireysel olarak değerlendirilmesinden ziyade, gerçek uygulama senaryoları üzerinden değerlendirilmesi daha öğreticidir. Her yöntemin etkinliği; malzeme tipi ve kalınlığı, istenen toleranslar, yüzey kalitesi, termal etkiler ve ekonomik faktörlere göre önemli ölçüde değişir. Bu bölümde, çeşitli endüstrilerdeki pratik uygulamalar üzerinden, her yöntemin en verimli olduğu çalışma alanları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Lazer kesim, özellikle ince ve orta kalınlıktaki metalik malzemelerde yüksek hassasiyet ve temiz kenar kalitesi gerektiren durumlarda uygundur. Örneğin, 2 mm kalınlığında paslanmaz çelik sac üzerinde dar iç konturlara sahip bir kontrol braketinin kesiminde lazer, minimum çapak ve ısı etkisi olmadan yüksek kaliteli sonuç verir. Fiber lazerler, kısa dalga boyları ve

yüksek odaklama kabiliyetleri sayesinde kesim çözünürlüğünü artırmakta ve enerji kaybını azaltmaktadır [25]. Benzer şekilde, elektronik üretiminde elektromanyetik koruma ve baskılı devre kartları için kullanılan 0.5 mm kalınlığındaki bakır levhaların mikro işlemede lazerler tercih edilmektedir. 100 μm 'nin altındaki mikro ölçekli detayları işleyebilme yeteneği, lazerleri yüksek hassasiyet gerektiren bu alanlarda vazgeçilmez kılar. Ayrıca, medikal cihaz sektöründe lazer kesim, nikel alaşımları ve titanyum gibi malzemelerden cerrahi alet ve damar stendi üretiminde kullanılır. Bu parçalar, boyutsal hassasiyetin yanı sıra mekanik gerilim içermemeli; lazer kesimin temassız doğası bu gereksinimleri karşılamaktadır.

Tel Erozyon, yüksek hassasiyet ve çok düşük tolerans gerektiren uygulamalarda, elektrik iletkeni malzemelerin işlenmesinde tercih edilen kritik bir yöntemdir. Özellikle dik ve karmaşık konturların oluşturulmasında üstün performans sağlar; geleneksel yöntemlerle mümkün olmayan keskin iç köşeler ve mikro detaylar Tel erzyon ile hassas şekilde işlenebilir. Örneğin, 8-15 mm kalınlığındaki sertleştirilmiş takım çeliklerinde, kalıpcılık sektöründe çok düşük toleranslarda ve yüksek yüzey kalitesinde oyuklar, yuvalar ve keskin köşeler tel erzyon kullanılarak başarılı şekilde elde edilir. Havacılık mühendisliğinde, aşırı termal ve mekanik yüklere maruz kalan Inconel türbin disklerindeki fir-tree yuvalarının üretiminde bu yöntem vazgeçilmezdir [27]. Tel erzyon, gerilmesiz ve mikro çatlak içermeyen yüzeyler sunarak parçaların uzun ömürlü ve güvenilir performans göstermesini sağlar. Ayrıca mikro üretim ve medikal cihaz sektörlerinde sub-milimetre ölçekli mikro iğne, sensör gövdesi ve cerrahi mikro aletlerin imalatında kullanılır. Yüksek hassasiyet ve kaliteli yüzey elde edilmesine rağmen, tel erezyon işlemi yavaş ilerler ve sadece elektrik iletkeni malzemelerle sınırlıdır.

Plazma kesim, yüksek hassasiyetten ziyade üretkenlik ve ekonomikliği ön planda tutan ağır sanayide öne çıkar. Gemi yapımı ve çelik konstrüksiyon üretiminde, 12 mm kalınlığındaki yumuşak çelik plakalar plazma ile hızlı kesilir ve gövde plakaları, destek elemanları gibi parçalar üretilir [26]. Bu yöntem, hızlı malzeme kaldırma kapasitesi, kaynak öncesi kabul edilebilir kenar kalitesi ve düşük işletme maliyetleri sunar. Plazma sistemleri, karbon çeliğinden alüminyum alaşımlarına kadar çeşitli malzemeleri, özellikle 6 mm üzerindeki kalınlıklarda işleyebilir. Lazer kesimin sınırlandığı, çok kalın ve ağır profillerde ise plazma kesim sıklıkla bir alternatif olarak tercih edilir. Özellikle su altı plazma kesim uygulamalarında, gemi gövdelerinin ve deniz yapılarının kalın çelik bileşenleri güvenli ve etkili bir şekilde işlenebilir. Bu sayede, lazerin fiziksel olarak erişemediği veya verimsiz olduğu kalınlıklar üzerinde yüksek verimle kesim sağlanır. Tarım makineleri ve madencilik ekipmanı üretiminde de 20–30 mm kalınlıklarındaki çelik parçaların hızlı

ve sağlam kesiminde plazma kullanılır. Ancak, plazma kesimde oluşan geniş HAZ ve çapak nedeniyle çapak giderme ve taşlama gibi işlemler gerekebilir.

Aşındırıcı Su Jeti, özellikle mermer, granit gibi doğal taşların kesiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Otel ve lüks mekanlarda dekorasyon amaçlı uygulamalarda ASJ, malzemede çatlama, kırılma veya ısıl deformasyon riski olmadan karmaşık ve estetik tasarımların gerçekleştirilmesini sağlar. Örneğin, 15-30 mm kalınlığındaki granit plakaların hassas ve detaylı kesimlerinde ASJ tercih edilmekte olup, hem sert hem de kırılğan yapısı nedeniyle diğer yöntemlere göre üstünlük sağlamaktadır [20]. Ayrıca, bu yöntemle doğal taşların yanı sıra kompozitler, seramik ve cam gibi termal olarak hassas malzemeler de zarar görmeden işlenebilmektedir. Soğuk kesim olmasından ötürü, ısıl etkilene bölgesi (HAZ) oluşmaz ve malzemenin mekanik özellikleri korunur. Havacılık sektöründe, 25 mm kalınlığındaki karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) paneller ASJ ile kesilerek delaminasyon ve matris hasarları önlenmektedir. Bu tür kompozit malzemelerde ısıl kaynaklı deformasyon ve çatlak riskleri diğer yöntemlere göre daha azdır [20]. Ayrıca, gıda sektöründe aşındırıcı içermeyen saf su jetleri, donmuş ürünlerin hijyenik şekilde kesilmesini sağlar.

Tablo 2 Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Öne Çıkan Özellikleri

Kesme Yöntemi	Başlıca Avantajları	Malzeme Uyumluluğu	Yüzey Kalitesi	Maliyet Etkinliği	İdeal Uygulama Alanları
ASJ Kesim	- Soğuk kesim, ısısal zarar yok	Doğal taşlar (mermer, granit), kompozitler, seramik, cam, gıda	İyi	Orta-yüksek (abrasiv ve bakım maliyetleri)	- Otel ve lüks dekorasyonlarda doğal taş
	- Çok yönlü malzeme uyumu				- Kalın CFRP paneller
					- Gıda kesimi
Lazer	- Yüksek hassasiyet	İnce metal levhalar (≤ 10 mm), bazı polimerler	Mükemmel	Orta-yüksek (yüksek ekipman maliyeti, hızlı kesim)	- İnce paslanmaz saclar
	- Minimal ısı etkisi				- Mikroelektronik
	- Otomasyona uygun				- Medikal cihazlar
Plazma	- Kalın metallerde hızlı	İletken metaller (çelik, alüminyum, bakır)	Orta	Düşük-orta (hızlı ama ek işlem gerekebilir)	- Yapısal çelikler (6–25 mm)
	- Düşük işletme maliyeti				- Gemi ve ağır makine imalatı

Tel Erezyon	- Çok yüksek hassasiyet	Elektrik iletkeni malzemeler (çelik, alaşımlar)	Mükemmel	Yüksek (yavaş işlem, sarf malzeme maliyeti)	- Sert takım çelikleri
	- Stressiz ve çapaksız kesim				- Türbin yuvaları
					- Mikro araçlar ve kalıplar

4. Sonuç

Geleneksel olmayan kesme yöntemleri, modern imalat teknolojilerinde artan malzeme çeşitliliği, hassasiyet gereksinimi ve üretim verimliliği talepleri doğrultusunda kritik bir rol üstlenmektedir. Aşındırıcılı su jeti, lazer, plazma ve tel erozyon gibi yöntemler; özellikle karmaşık geometrilere, dar toleranslara ve özel yüzey kalitelerine ihtiyaç duyulan uygulamalarda, konvansiyonel yöntemlere alternatif hatta çoğu durumda tercih edilen çözümler haline gelmiştir.

Bu yöntemlerin her biri; malzeme tipi, kalınlık aralığı, istenen yüzey kalitesi, üretim hızı, işlem maliyeti ve termal etkiler gibi birçok teknik parametreye göre avantaj ve sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, tek bir yöntemin tüm üretim ihtiyaçlarına cevap vermesi mümkün değildir. Bunun yerine, her bir uygulama için optimum performansı sağlayacak yöntemin dikkatle seçilmesi gerekir. Bu seçim sürecinde; üretim ölçeği, malzeme özellikleri, tolerans aralıkları, işletme maliyetleri ve çevresel etki gibi kriterler dikkate alınmalıdır.

Günümüzde bu teknolojilerin gelişimi yalnızca ekipman düzeyinde değil, aynı zamanda yazılım, sensör tabanlı kontrol sistemleri ve veri odaklı üretim stratejileri ile de desteklenmektedir. Bu gelişmeler, işlem sürelerini kısaltmakta, kaliteyi artırmakta ve üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini mümkün kılmaktadır. Ayrıca hibrit sistemlerin geliştirilmesiyle, birden fazla yöntemin avantajlarını bir arada sunan yeni çözümler ortaya çıkmakta, üretim esnekliği ve verimliliği daha üst seviyelere taşınmaktadır.

Sonuç olarak, geleneksel olmayan kesme teknolojileri, yüksek hassasiyet ve esneklik gerektiren imalat süreçlerinde stratejik bir konuma sahiptir. Bu yöntemlerin doğru bir şekilde analiz edilmesi, malzeme ve uygulama özelinde optimize edilmesi, rekabetçi ve sürdürülebilir bir üretim altyapısının temel taşlarından biri olacaktır.

Kaynakça

- [1] P. Naresh and P. Khatak, “Laser cutting technique: A literature review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 2484–2489, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.250.
- [2] A. Einstein, “Zur Quantentheorie der Strahlung,” *Physikalische Zeitschrift*, vol. 18, pp. 121–128, 1917.
- [3] G. Kasnak and E. Firath, “Lazer fiziği ve lazer uygulamalarında temel kavramlar,” *Türkiye Klinikleri Journal of Periodontology - Special Topics*, vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2016.
- [4] S. S. R. Depuru, S. S. R. Depuru, and S. S. R. Depuru, “Reviews on Laser Cutting Technology for Industrial Applications,” *ResearchGate*, 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/323567559_Reviews_on_Laser_Cutting_Technology_for_Industrial_Applications
- [5] A. Gusarov and M. Smurov, “Laser cutting of metals: High quality and productivity,” *Physics Procedia*, vol. 5, pp. 429–438, 2010. doi:10.1016/j.phpro.2010.08.075
- [6] M. J. Matthews, J. A. Guss ve P. J. Martin, “Role of assist gases in laser cutting,” *Applied Surface Science*, cilt. 254, sayı. 6, ss. 1477–1481, 2007.
- [7] A. El-Taweel, M. A. Abou-Ali, and S. A. Mahmoud, “Reviews on laser cutting technology for industrial applications,” *Optik*, vol. 127, no. 20, pp. 9937–9946, 2016.
- [8] M. Malina, J. Petru, and J. M. Krug, “Laser cutting of metals: Experimental research and optimization,” *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1074–1082, 2015.
- [9] H. T. Yang and Y. S. Tarng, “Design optimization of wire electrical discharge machining process,” *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, vol. 38, no. 4, pp. 479–497, 1998.
- [10] S. R. Shanmugam et al., “Machining characteristics of micro WEDM process,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 170, no. 1–2, pp. 135–144, 2005.
- [11] K. P. Rajurkar, W. M. Wang, and M. Hu, “Wire electro-discharge machining,” in *Nontraditional Machining Processes*, Springer, 2016, pp. 123–160.
- [12] M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, and B. Schumacher, “Advancing EDM through fundamental insight into the process,” *CIRP Annals*, vol. 54, no. 2, pp. 64–87, 2005.
- [13] M. S. Hewidy, T. A. El-Taweel, and M. El-Safty, “Modeling the machining parameters of WEDM of Inconel 601 using RSM,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 169, no. 2, pp. 328–336, 2005.

- [14] G. Boothroyd, W. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3rd ed., CRC Press, 2005.
- [15] J. F. Lancaster, *The Physics of Welding*, 2nd ed., Pergamon Press, 1986.
- [16] B. E. Paton and I. B. Frolov, "Plasma arc cutting of metals," *Welding International*, vol. 4, no. 12, pp. 970–977, 1990.
- [17] M. Kouadri, "Thermal effects and HAZ in plasma arc cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 195, pp. 292–298, 2008.
- [18] K. P. Rajurkar et al., "Review of advanced hybrid micro-machining processes," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 1–17, 2012.
- [19] G. Boothroyd, W. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3rd ed., CRC Press, 2005.
- [20] A. K. Tiwari and S. Kumar, "Abrasive water jet cutting of natural stones: An overview," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 2218–2225, 2020.
- [21] M. Hashish, "Development of the abrasive water jet cutting process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 109, no. 3, pp. 267–271, 1987.
- [22] L. R. Ananthapadmanabhan et al., "Thermal effects in abrasive water jet machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 10, pp. 1017–1025, 2004.
- [23] H. Çandar, "Experimental study on optimisation of cutting parameters in abrasive waterjet machine," *Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep*, 2012.
- [24] K. Y. Choi and T. T. Lim, "Optimization of process parameters in abrasive water jet cutting of composite materials," *Composite Structures*, vol. 102, pp. 36–41, 2013.
- [25] T. J. S. Lee, "Laser cutting of engineering materials," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 118, no. 1–3, pp. 1–13, 2001.
- [26] J. H. S. Lee, "Plasma arc cutting process and its industrial applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, no. 1–3, pp. 1–10, 1997.
- [27] W. B. Rowe, "Wire electrical discharge machining: principles and practices," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Engineering Manufacture*, vol. 213, no. 5, pp. 411–420, 1999.