



SERAMİK MALZEMELERİN İŞLENMESİNDE UYGULANAN ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ

¹İsmail Aykut KARAMANLI , ²Mustafa GÜNAY 

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun MYO, Motorlu Taşıt Teknolojileri Bölümü, Yozgat, TÜRKİYE

²Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE

¹i.aykut.karamanli@yobu.edu.tr, ²mgunay@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 22.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.09.2022)

ÖZ: Bu derleme çalışmada, seramiklerin talaşlı imalatında kullanılan alışılmamış imalat yöntemlerinin detaylı analizi yapılarak elde edilen kazanımlar ve eksiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemler arasında, aşındırıcı jet ile işleme ve aşındırıcı su jeti ile işleme, ultrasonik işleme ve döner ultrasonik işleme, elektro erozyon ve tel erozyon ile işleme en çok kullanılanlardır. Aşındırıcı jet ve aşındırıcı su jeti ile işleme diğer yöntemlere göre bazı üstün özelliklere sahip olması nedeni ile tercih sebebidir. Kesme bölgesinde çok az miktarda ısı üretmesi, metal, metal olmayan, kompozit, seramik gibi her türlü malzemenin kesilip işlenebilmesi, tel erozyon ile işleme işleminden daha yüksek bir malzeme çıkarma oranı ve lazer ile işleme işleminden daha iyi yüzey bütünlüğü sağlaması bu özelliklerden birkaçıdır. Ultrasonik ve döner ultrasonik işleme yöntemiyle, özellikle sert ve kırılğan malzemelerin hassas olarak işlenebilmesi ile diğer yöntemlere göre üstündür. Elektro erozyon ve tel erozyon ile işleme yönteminin tercih edilmesinin nedenleri, elektrik iletken her parça işlenebilmesi ve çok karmaşık şekillerde işleme sağlanabilmesi, takım ile iş parçası arasında temas olmadığı için fiziksel deformasyonun az olması, ısıl işlemde etkilenmiş bölgenin az olması olarak sıralanabilir. Gelecekteki araştırmalarda, talaş kaldırma hızı, yüzey kalitesi, enerji tüketimi ve işleme maliyetlerini içeren çok amaçlı optimizasyon çalışmalarına odaklanılması yüksek verimlilik ve sürdürülebilirlik noktasında önemli katkılar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Seramikler, Alışılmamış İmalat, Elektro Erozyonla İşleme, Abrasive Jet İşleme, Ultrasonik İşleme

Unconventional Manufacturing Methods Applied in Machining of Ceramic Materials

ABSTRACT: In this review study, it is aimed to determine the gains and deficiencies obtained by making a detailed analysis of the unconventional manufacturing methods used in the machining of ceramics. The most used of these methods can be listed as abrasive jet machining and abrasive water jet machining, ultrasonic machining and rotary ultrasonic machining, electro erosion and wire erosion machining. Machining with abrasive jet and abrasive water jet is preferred with some superior features. Some of these features are that it generates very little heat in the cutting zone, can be cut and machined of all kinds of materials such as metal, non-metal, composite, ceramic, a higher material removal rate than wire erosion machining and better surface integrity than laser machining. With the ultrasonic and rotary ultrasonic processing method, it is superior to other methods, especially with the precision processing of hard and brittle materials. The reasons for choosing the electrical discharge machining and wire electrical discharge machining can be listed as the fact that every piece that conducts electricity can be processed, very complex shapes can be formed, physical deformation is less and the area affected by heat treatment is less since there is no contact between the tool and the workpiece. In future research, focusing on multi-purpose optimization studies including metal removal rate, surface quality and energy

consumption and machining costs will make significant contributions to high productivity and sustainability.

Keywords: *Ceramics, Unconventional Manufacturing, Electrical Discharge Machining, Abrasive Jet Machining, Ultrasonic Machining*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel anlamda seramikler gevrek, sert, ısıya ve korozyona karşı dayanıklı, zor sıkıştırılabilir, erime sıcaklığı yüksek malzemelerdir. Seramiklerin basma mukavemetleri oldukça yüksek iken çekme mukavemetlerinden dolayı toklukları düşüktür. Özellikle erime sıcaklığının yüksek oluşu, ısıya ve korozyona karşı dayanım performansı ile imalat sanayinde tercih sebebidir (Okumuş, 2017). Gelişmiş seramikler, modern otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, enerji, çevre ve makine mühendisliğinde, elektronik ve tıbbi uygulamalarda çok ihtiyaç duyulan malzemeler arasında üst sıralarda yer almaktadır. Bunun nedeni, bu malzemelerin üstün kimyasal eylemsizlik, optik, elektriksel ve manyetik özellikler, korozyon ve oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda yüksek aşınma direnci ve sertlik gibi mekanik özellikler sergilemesidir (Gorin ve Reddy 2014). Kimyasal bileşime göre endüstriyel seramikler oksitler, karbürler, nitrürler, borürler, silikatlar ve cam seramikler olarak sınıflandırılır. Bunlardan, SiC, WC ve Al₂O₃, zımpara taşlarında aşındırıcı olarak kullanılır. Ateşe dayanıklı tuğlalarda şamot, alümina, zirkonya (ZrO₂), magnezya (MgO) vb. kullanılmaktadır. Pota yapmak için ultra yüksek sıcaklık seramiği olan zirkonyum diborid (ZrB₂) ve bor nitrür kullanılır. SiC ve silisyum nitrür yüksek aşınma direnci ve yük taşıma özelliklerine sahiptir, bu nedenle aşınmaya dayanıklı yüzeyler, yataklar, turbo şarj rotorları vb. yapımında kullanılır. Uranyum oksit nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılır. TiC, uzay mekiği için ısı kalkanı olarak kullanılır. Motor ve türbin parçalarında sialon gibi yüksek performanslı seramikler kullanılmaktadır. Kurşun titanat (PT), baryum titanat (BT) ve kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi piezo elektrik seramiklerinin ultrasonik testler, gerinim ölçerler ve mikro elektromekanik sistemler (MEMs) cihazlarında geniş uygulamaları vardır. Ayrıca, seramikler, kesici takımlar ve kalıplar (Rakshit ve Das, 2019), uzay araçlarında yakıt sistemleri ve valfler, otomobil motoru, askeri silah sistemleri, nükleer endüstriler, biyolojik endüstriler, ısı eşanjörü ve mikrodalga cihazı için elektronik altyapı elemanlarının yapımında kabul görmektedir (Liang ve Dutta, 2001).

Seramiklerin yukarıda belirtilen iyi özelliklerinin yanı sıra yine bu özelliklerinden kaynaklanan kullanımını ve şekillendirilmesini zorlaştıran veya sınırlayan bazı etmenler mevcuttur. Yüksek sertlik ve kırılma direnci nedeniyle bu malzemeler kırılmaya karşı daha hassastır. Gevrek oluşu, şekillendirme ve işleme sırasında çatlama, kırılma ya da şekil bozuklukları oluşma riskini arttırmaktadır (Sayar 2017). Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile hasarsız kesme veya işlemler yapılamaz ve dolayısıyla bu malzemelerin mukavemetini azaltan yüzeyde mikro çatlaklar, parça kenarlarında ufalanma ile birlikte yüzey bütünlüğünde bozulmalara yol açar. Ayrıca geleneksel yöntemlerle yapılan işlemlerde kesici takımlar ve işleme aparatları zarar görebilmekte ve ekonomik ömrünü daha kısa sürelerde tamamlayabilmektedir (Rakshit ve Das, 2019). Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak veya azaltmak için çeşitli işleme ve imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Geleneksel olmayan bu yöntemlerin tamamına alışılmamış imalat yöntemleri (UMM) denilmektedir. İmalatı yapılan malzeme türüne göre çok çeşitli UMM teknolojisi mevcuttur. Seramik malzemelerin talaşlı imalatında en sık kullanılan UMM yöntemleri; aşındırıcı jet ile işleme (AJM), aşındırıcı su jeti ile işleme (AWJM), elektrokimyasal işleme (ECM) (Chiles ve diğ., 1996), elektro erozyon ile işleme (EDM), ultrasonik işleme (UM), lazer ışını ile işleme (LBM) olarak sıralanabilir. Bu yöntemler dışında başka seramik işleme yöntemleri olduğu gibi birkaç yöntemin beraber kullanılmasıyla elde edilen hibrit yöntemler de mevcuttur (Samanta ve Chakraborty, 2011).

Seramiklerin işlenmesindeki bir başka konu ise işleme verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından en uygun yöntemin belirlenmesidir (Gupta ve Gupta 2019). En uygun işleme yöntemi, verime etki eden parametreler ve bunların etki oranlarının belirlenmesi, işlenebilirlik göstergelerinin tahmini için matematiksel modelleme üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Parmar ve James, 2018). Bu çalışmalarda,

genellikle Taguchi metodolojisi (Pramanick ve diğ., 2016), yüzey yanıt yöntemi (RSM) gibi deney tasarımı ve analiz yöntemleri kullanılmaktadır (Liu ve diğ., 2014). Bu yöntemler aynı zamanda doğruya çok yakın sonuçlara, daha az deney ile ulaşılmasını sağlamaktadır. Böylece hem işleme zamanı hem de ekonomisi açıdan sağlanan tasarruf artmaktadır (Rao ve Kalyankar, 2014). Diğer yandan, alışılmamış imalat yöntemlerinde malzeme kaldırmanın karmaşık mekanizması nedeniyle bireysel parametrelerdeki küçük bir değişiklik işleme performansını karmaşık bir şekilde etkilediğinden, bu yöntemlerin çok değişkenli optimizasyon süreçleri ile iyileştirilmesi büyük önem arz etmektedir (Bilal ve diğ., 2018). Bu bağlamda, Taguchi-Gri (Chaudhury ve Samantaray, 2020) ilişki analizi, RSM (Mohammed ve diğ., 2019), parçacık sürüsü optimizasyonu (Aich ve diğ., 2014) vb. teknikler kullanılarak işlenebilirlik göstergelerinin eş zamanlı optimizasyonu üzerine bazı çalışmaların yapıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada, öncelikle daha önce yapılan çalışmalar detayları ile açıklanmış, amaçları ve elde edilen sonuçlar belirtilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar değerlendirilerek çalışmalar arasındaki farklar belirlenmiş, UMM uygulamalarının eksik ve güçlü yönleri ifade edilmiştir. Çalışmanın temel amacı seramiklerin talaşlı imalatında kullanılan UMM ve özelliklerinin tüm yönleri ile ifade edilebilmesi, böylece daha sonra yapılacak çalışmalara yardımcı olabilmektir. Çalışmanın sonunda önerilerde bulunulmuş, yeni araştırma konuları ve alanları tavsiye edilmiştir.

SERAMİKLERİN ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİYLE İŞLENMESİ (MACHINING CERAMICS WITH UNCONVENTIONAL MANUFACTURING METHODS)

Seramikler ve seramik esaslı kompozitler devamlı geliştirilmekte olan mühendislik malzemeleridir. Özellikle endüstriyel açıdan gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde seramikler ve imalat yöntemlerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Seramiklerin geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirilmesinde zorluklar UMM'lerin geliştirilmesine ve yeni işleme yaklaşımların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu bölümde, endüstriyel olarak yaygın kullanım alanına sahip alışılmamış imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir.

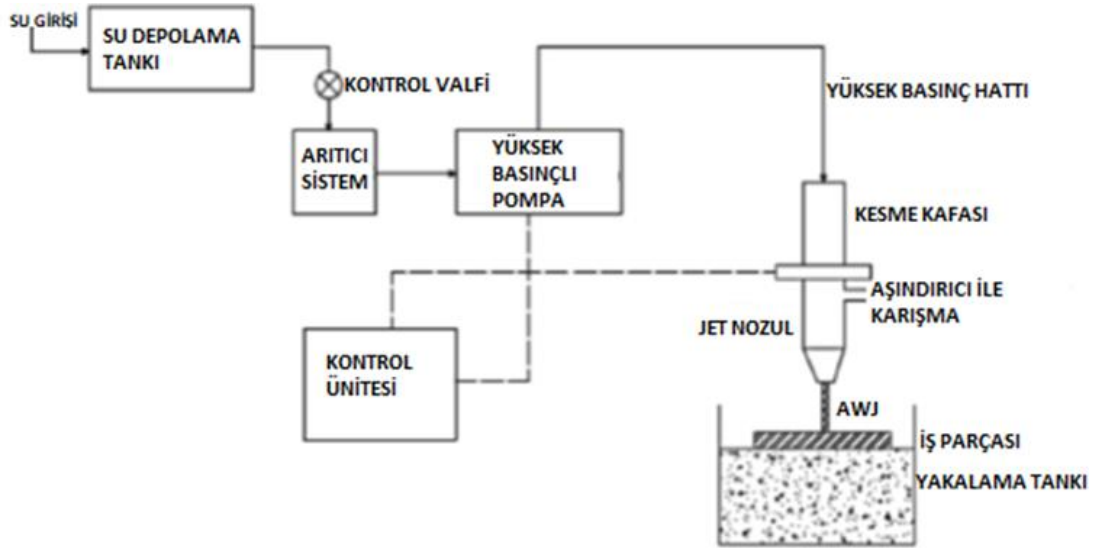
Aşındırıcı Su Jeti ve Aşındırıcı Jet ile İşleme (Machining with Abrasive Water Jet and Abrasive Jet)

Aşındırıcı su jeti (AWJ), imalat sanayilerinde metal ve metal olmayan birçok malzemelerin işlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. AWJ işleme yönteminin tercih edilmesinin nedenleri; kesme bölgesinde çok az miktarda ısı üretmesi, metal veya metal olmayan, kompozit, seramik gibi her türlü malzemenin kesilip işlenebilmesi, tel erozyon ile işleme (WEDM) yönteminden daha yüksek bir malzeme çıkarma oranı ve lazer ile işleme (LDM) yönteminden daha iyi yüzey bütünlüğü sağlama, 250 mm kalınlığa kadar malzemelerin kesilebilmesi, iş malzemelerinde ısıl bozulmanın olmaması olarak sıralanabilir. Bununla birlikte karmaşık geometrileri keserek şekillendirme yeteneği, iş parçası üzerinde minimum kesme kuvvetinin oluşması ve çok düşük deformasyonun olmasına bağlı olarak daha iyi boyutsal doğruluk sağlaması tercih nedenlerindedir (Natarajan ve diğ., 2020). Aşındırıcı su jeti sisteminin şematik gösterimi Şekil 1'de görülmektedir.

Bu yöntemde, yüksek basınçlı su ile karıştırılan aşındırıcı parçacıklar nozuldan iş parçasına doğru hareket eder. Karışımın kinetik enerjisi arttıkça iş parçasından çıkarılan malzeme miktarı da artar (Natarajan ve diğ., 2020). Aşındırıcı türü, işlenen malzemenin sertliğine göre değişmekle birlikte SiC (Shibin ve diğ., 2020), Al₂O₃ (Anjaneyulu ve diğ., 2019) gibi seramikler kullanılabilir. Aşındırıcı su jetinin kullanımının yaygınlaşmasından sonra, bu yönteme etki eden parametreler ve yöntemin verimini artırma yolları araştırılmıştır. Yeni bir teknoloji olan lazer destekli su jeti (LAWJ), kırılğan malzemelerin neredeyse hiç termal hasar bırakmadan mikro işlenmesini sağlar. Bu süreçte, lazer işleme yaparken su jeti anlık soğumayı sağlar. Lazerle yumuşatılan malzeme, su jeti ile kolayca ana parçadan ayrılabilir. Hibrit alışılmamış imalat yöntemi olarak değerlendirilebilecek bu teknoloji üzerine yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Liu ve diğ., aşındırıcı su jeti kullanılarak alüminyum seramiklerin tornalanmasında işleme parametrelerinin nüfuziyet derinliği ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Nüfuziyet derinliği ve Ra için işleme parametreleri, RSM ile eşzamanlı olarak optimize edilmiştir. Ayrıca, işleme çıktıları için ikinci dereceden regresyon modelleri geliştirilmiştir. Nüfuziyet derinliği için en önemli parametre ilerleme hızı iken, Ra için bu parametre kesme hızı olmuştur. Nüfuziyet derinliği ve Ra için optimum işleme parametrelerinde deneysel ve tahmini değerler arasındaki mutlak hata %5'in altında hesaplanmıştır. Böylece geliştirilen modelin alüminyum seramiklerinin AWJ ile tornalanmasında işleme çıktılarını tahmin etmek için etkin bir şekilde kullanılabilceği ortaya konulmuştur (Liu ve diğ., 2014).



Şekil 1. Aşındırıcı su jeti mekanizması (Natarajan ve diğ., 2020)

Figure 1. Abrasive water jet mechanism

Zhao ve diğ., nitrojen ve basınçlı hava destekli lazerli-su jeti (LWH) ile işlenmiş CBN/TiN ve CBN/AlN kompozitlerinde sertlik değişimini incelemişlerdir. Her iki malzemenin nitrojen gazı ile LWH işlemi sonucunda, mikro çatlakların oluşumu nedeniyle daha düşük mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Basınçlı hava ile yapılan deneylerde, LWH ile işlenmiş saf CBN'nin sertliği %23'e, %82 CBN-%18 AlN kompozitin sertliği %30 ve %55 CBN-%45 TiN kompozitin sertliğinin %21'e kadar yükseldiği belirlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan incelemeler, LWH uygulamasının kompozit mikroyapılarda, nano boyutlu tanelere sahip bölgelerin oluşumuyla tane sınırı güçlendirme mekanizmasına yol açtığını göstermiştir (Zhao ve diğ., 2017).

Kurşun zirkonat titanat (PZT) seramik ve karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit malzemeler aşınmaya karşı direnç, yüksek sertlik ve özgül mukavemet gibi özellikleriyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu iki malzemenin AWJ yöntemi ile işlenmesinde, işlenmiş yüzeylerde yüzey kalitesinin karşılaştırılması çok az çalışılmıştır. Bir çalışmada, PZT seramiği ile CFRP kompozit malzemesinin AWJ ile işlenmesinde oluşan yüzey pürüzlülükleri karşılaştırılmıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre PZT seramiğin işlenmesinde su basıncı, nozul-iş parçası arasındaki mesafe ve ilerleme hızının ve CFRP kompozit malzemenin işlenmesinde su basıncı ve dönüş hızının önemli parametreler olduğu görülmüştür. Seramik malzemenin işlenmesinde su basıncının artması ve durma mesafesinin azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlemlenmiştir. Kompozit malzemede ise su basıncının artması ve hareket hızının azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, seramik ve kompozit malzemelerin işlenmiş yüzeyleri, SEM cihazı kullanılarak incelenmiş ve yüzey pürüzlülüğünün üç farklı bölge oluşturduğu gözlemlenmiştir (Dhanawade ve diğ., 2021).

Wang ve diğ. lazer destekli su jeti (LAWJ) ile silisyum nitrür seramiklerin mikro frezelenmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Kanal derinliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde çapraz besleme, lazer darbe enerjisi, su jeti basıncı ve hareket hızı gibi ana parametrelerin etkileri varyans analizi

(ANOVA) aracılığıyla analiz edilmiştir. Analizler, derinlik ve Ra üzerinde tüm parametrelerin tekli etkilerinin ve lazer darbe enerjisi-su jeti basıncı etkileşimin önemli olduğunu göstermiştir. SEM ve enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) sonucunda, LAWJ'nin saf lazer ile işlemeye göre daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü ve termal değişimden minimum etkilenme alanı sağladığı belirlenmiştir (Wang ve diğ., 2018c).

Aşındırıcı jet işlemede (AJM) ise aşındırıcı su jeti ile işlemekten farklı olarak aşındırıcı parçacık taşıyıcı akışkan olarak su yerine hava kullanılmaktadır. Hava ile kinetik enerji kazanan parçacıklar, iş parçasının yüzeyine çarparak malzeme koparmaktadır (Natarajan ve diğ., 2020). Yine aşındırıcı su jetinde olduğu gibi sistemin verimini arttırmak ve süreci etkileyen parametreleri ve etki oranlarını hesaplamak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Srikantha ve Rao, seramik fayansların aşındırıcı jet ile işlenmesinde Taguchi yöntemi ve RSM kullanarak işleme parametrelerini optimize etmişlerdir. Aşındırıcı olarak farklı boyutlarda Al_2O_3 ve SiC kullanılmış olup, aşındırıcı akış oranı (AFR), basınç ve nozul uzaklığının malzeme kaldırma miktarı (MRR) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. RSM sonuçlarına göre optimum malzeme kaldırma oranı 8 kg/cm² basınç, 5.5 gm/min aşındırıcı akış oranı, 20 mm nozul uzaklığı ile elde edilmektedir. Ayrıca, işleme parametreleri önem sıralamasının basınç, nozul uzaklığı ve aşındırıcı akış oranı şeklinde olduğu belirtilmiştir (Srikanth ve Rao, 2015).

Aşındırıcı su jeti (AWJ) frezeleme, sert malzemeleri işlemek için uygun bir tekniktir, ancak uygulanması da karmaşıktır. Modern üretimde hem performansı hem de kaliteyi iyileştirmek için çok aşamalı işleme kullanılabilir. Fakat AWJ frezeleme hala gelişmekte olan bir yöntem olduğundan AWJ ile işleme süreç tasarımı hakkında çok az bilgi vardır. Schuler ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, itriyum ile stabilize edilmiş zirkonya (3YSZ) numunenin AWJ çok aşamalı işlenmesi için yenilikçi bir yaklaşım getirilmek istenmiştir. 3YSZ numunenin işlenmesinde aşındırıcı malzeme olarak Al_2O_3 kullanılmış olup, çok aşamalı işlemenin yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, farklı taneciklerin işleme sonucu üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Daha sonra Na_2CO_3 (sodyum bikarbonat) ile yüzey özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğünde iyileşme gözlenmiştir. Ayrıca Na_2CO_3 uygulaması ile yüzeydeki kontaminasyonlar giderilmiştir (Schuler ve diğ., 2022).

Chaitanya ve diğ., Al_2O_3 , SiC gibi aşındırıcı parçacıklar ile orta karbonlu çelik malzeme üzerinde AJM uygulamasında yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Aşındırıcı jet ile işlemekte, alüminyum oksit, normal sertlikte malzemelerde kesme, çapak alma ve yüzey temizleme işlemleri için uygun iken silisyum karbür ise sert malzemelerde kesme, çapak alma, yüzey temizleme işlemleri için elverişli olduğu bildirilmiştir. Sodyum bikarbonat ise yumuşak malzemelerin kesme, çapak alma ve yüzey temizleme işlemlerinde ve ayrıca 500 °C'nin altında hafif son işlemler için kullanılmıştır. Cam tanecikleri işlenen kısımların matlaştırılmasında ve dolomit ise dağlama ve parlatma işlemlerinde kullanılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak alüminyum oksitin silisyum karbürüne göre daha iyi yüzey kalitesi sağladığı bulunmuştur (Chaitanya ve diğ., 2020).

Cf/SiC kompozitlerin geleneksel yöntemlerle delinmesi zor olup, işlem sırasında katmanlara ayrılma, fiberlerde kırık oluşumu, çapaklanma ve ufalanma gibi hasarlar oluşabilmektedir. Bu hasarların en aza indirilmesi için AWJ yöntemi tercih edilebilmektedir. Bu bağlamda, Zhang ve diğ. tarafından yapılan çalışmada kompozit plakanın delinmesinde oluşan hasarların özellikleri ve oluşum mekanizmaları araştırılmıştır. Kompozit plaka üzerine ilerleme hızı, aşındırıcı akış oranı, su basıncı ve su jeti nozulu mesafesi değiştirilerek delikler delinmiştir. Ölçümler sonucunda, delik çaplarının bu değişkenlere bağlı olarak 2.1 mm ile 2.6 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Hasar oluşum mekanizmaları için bir matematiksel model geliştirilmiş olup, seramik matrisli kompozit malzeme için yüksek hassasiyetli ve düşük hasarlı delik işleminin gerçekleştirilmesinde rehberlik edebileceği vurgulanmıştır (Zhang ve diğ., 2022c).

Anjaneyulu ve diğ. Al_2O_3 levhaların aşındırıcı jet ile işlenmesinde basınç, AFR, nozul uzaklığı ve zaman parametrelerine göre MRR ve yüzey pürüzlülüğü değişimlerini incelemiştir. Taguchi L27 dikey dizine göre yapılan deneylerde aşındırıcı malzeme olarak silisyum dioksit (SiO_2) kullanılmıştır. %95

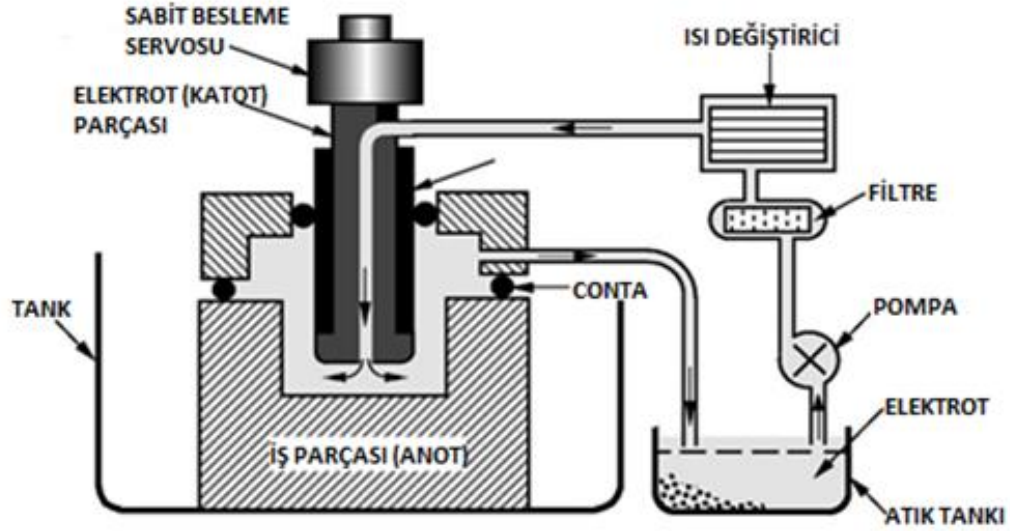
güven düzeyinde uygulanan ANOVA sonuçlarına göre MRR ve yüzey pürüzlülüğü için en önemli değişken, basınç olarak bulunmuştur. İkinci önemli değişken MRR için AFR olurken, yüzey pürüzlülüğü için ise nozul uzaklığıdır. Diğer yandan, MRR ve yüzey pürüzlülüğü için optimum işleme parametrelerinin farklı olduğu ortaya çıkmıştır (Anjaneyulu ve diğ., 2019).

Liu ve diğ., seramikler işlenmesinde tek noktalı elmas tornalama yöntemi kullanılabilir de bu yöntemin hem çok maliyetli hem de malzeme kaldırma hızının çok düşük olduğunu belirtmiştir. Diğer yandan, AWJ ile tornalama işleminde takım aşınması ile işleme süresi azalmakta ve AWJ ekipmanları kolay bir biçimde torna tezgahlarına entegre edilebilmektedir. Deney malzemesi olarak soğuk izostatik presleme ile üretilen halka şeklindeki Al_2O_3 silindirik parçaların kullanıldığı çalışmada, nozul açısı, aşındırıcı oranı, pompa basıncı, yüzey hızı, işleme mesafesi, dönme hızı değiştirilerek deneyler yapılmıştır. AWJ tornalamada talaş kaldırma mekanizması analiz edilmiş ve elde edilen verilerle dalma derinliği (DOP) tahmin modeli oluşturulmuştur. İşlenen yüzeylerin topografya analizleri, asıl talaş kaldırma mekanizmasının düşük nozul açısında plastik kesme, büyük açılarda gevrek kırılma şeklinde olduğunu göstermiştir. AWJ tornalama teknolojisinin özellikle havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan seramik matrisli kompozitlerin işlenmesi için uygun bir yöntem olabileceği belirtilmiştir (Liu ve diğ., 2021).

Elektrokimyasal İşleme (Electrochemical Machining)

Elektrokimyasal işleme yöntemi tüm elektrik iletken iş parçaları için kullanılabilir. Bu yöntem, elektrik akımı ile malzeme kaldırma prensibi ile çalışır. İş parçası anot görevi görürken, akım ile iş parçasından ayrılan metal iyonları katotta birikir. İşleme aralığında elektrolit sıvı uygulanarak katotta metal birikimi engellenir (Swift ve Booker, 2013). Elektrokimyasal işleme yöntemi seramik ve seramik matrisli kompozitlerin işlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Hinduja ve Kunieda, elektro-kimyasal işleme (ECM) ve elektro erozyonla işleme (EDM) yöntemlerinin modellenmesi, işleme sırasında ortaya çıkan farklı olguları simüle etmek için geliştirilen modelleri araştırmışlardır. ECM'deki akım yoğunluk dağılımını hesaplamak için potansiyel modeller, EDM'deki plazma arki için termal modeller, ECM'deki anodik çözünmeyi simüle etmek için hareketli sınır modelleri ve EDM'deki deşarj bölgesini belirlemek için olasılık modelleri geliştirilmiştir. ECM'nin temel prensipleri iyi bilinmesine rağmen süreci modellemek zordur, çünkü bazıları eşzamanlı olarak ortaya çıkan birkaç fiziksel ve kimyasal olay vardır. Bu olaylar kısaca açıklanacak olursa, anot ve katotta meydana gelen kimyasal reaksiyonlar iyonların, oksijenin ve hidrojenin elektrotlardan ve elektrolitten salınmasına neden olur. Diğer yandan, anot ve katottaki kimyasal reaksiyonlar, katotta hidrojen kabarcıklarının ve anotta oksijen kabarcıklarının salınmasına yol açar. Bu kabarcıkların varlığı elektrolit akışının iki fazlı olmasına sebep olur. Bu kabarcıklar elektrolitin iletkenliğini etkiler, böylece sürecin karmaşıklığı artar. Elektro-kimyasal reaksiyonlar, ısı üretilmesine neden olarak elektrolit sıcaklığının artmasına ve elektrolitin elektrik iletkenliğinde daha fazla değişikliğe yol açar. Ayrıca bu reaksiyonlar, iş parçasının çözünmesine neden olarak şeklinin zamanla değişmesine neden olur. İş parçasındaki bu geçici değişiklik, yavaş hareket eden bir sınır problemi olarak modellenmektedir (Hinduja ve Kunieda 2013). Şekil 2'de elektrokimyasal işleme mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrokimyasal işleme mekanizması (Swift ve Booker, 2013)

Figure 2. Electrochemical machining mechanism

Saravanan ve diğ., TiC takviyeli AA6603 matrisli kompozitin ECM ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü değişimini araştırmışlardır. RSM metodolojisi uygulanarak, yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde takviye oranı, voltaj miktarı ve elektrolit konsantrasyon yüzdesinin etkileri analiz edilmiştir. ANOVA ve RSM analizlerine göre, yüzey pürüzlülüğüne en fazla etki eden parametre takviye oranıdır. En iyi yüzey kalitesi ağırlıkça %6 takviye oranı, 13.31 V voltaj ve 34.05 g/litre elektrolit konsantrasyonu ile elde edilmiştir. Regresyon analizinde, deneysel ve öngörülen değerler arasındaki ortalama hata 0.23 mm³/min olarak hesaplanmış olup, geliştirilen Ra tahmin modelinin güvenle kullanılabileceği vurgulanmıştır (Saravanan ve diğ., 2020).

Miyoshi ve Kunieda, ECM teknolojisinin farklı bir uygulaması olan elektrolit jet tormalama sistemini tungsten karbür mikro çubukların işlenmesi için geliştirmişlerdir. Düz elektrolit jet, jetin iş parçası çubuğuna göre kolay konumlandırılmasını ve silindirik jetlerden daha fazla malzeme çıkarılmasını mümkün kılmıştır. İki kutuplu bir akım darbesi kullanılarak hem kobalt bağlayıcı hem de tungsten karbür eşit olarak çözülmüştür. Ayrıca, en uygun darbe koşullarını elde etmek için darbe koşullarının mevcut verimlilik ve işleme hassasiyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İnce taneli tungsten karbür çubuklarda daha fazla malzeme çıkarma miktarı ve daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Pozitif iş parçası polariteli uzun darbe süresi, $t_a = 10$ ms ve yüksek görev faktörü, $D = \%50$ ile işlenen çubuktan çapı 20 μm ve en boy oranı 20 olan bir mikro çubuk başarıyla çıkarılmıştır (Miyoshi ve Kunieda, 2016).

Daniel ve diğ., Al5059/SiC/MoS₂ kompozitlerin ECM parametrelerini malzeme çıkarma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü için Taguchi yöntemini kullanarak optimize etmişlerdir. Ayrıca, gerilim, besleme hızı, elektrolit konsantrasyonu ve takviye yüzdesi gibi çeşitli işleme parametrelerinin işleme çıktıları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlara göre MRR ve yüzey pürüzlülüğü için en iyi parametre seviyelerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür. (Daniel ve diğ., 2020).

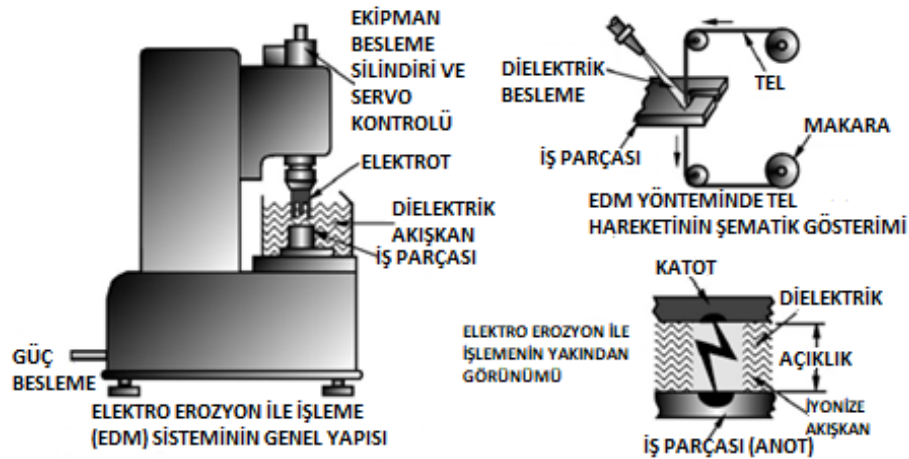
Kozak ve Zybura-Skrabalak, ECM yönteminde iş parçası malzemesinin heterojen yapısının etkisi ve anot sınır tabakasının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki hidrodinamik kararsızlığı gibi bazı özellikleri incelemişlerdir. Heterojen yapıya sahip alaşımların elektrokimyasal işlenmesi sırasında yüzey profillerinin değişimini simüle etmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Simülasyonlar ile ECM parametreleri ve iş parçası malzeme yapısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin analizi yapılmıştır. Deneysel araştırmalar, sınır tabakasının hidrodinamik kararsızlığının işlenen yüzeyin mikro topografyası üzerindeki etkisini doğrulamıştır (Kozak ve Zybura-Skrabalak, 2016).

Goto ve diğ., sinterlenmiş karbürün ECM ile işlenmesinde en büyük sorunlardan birinin malzemede bağlayıcı etki yapan Co ayrılması olduğu ve çok fazla Co çözünmesi meydana geldiğinde, malzemenin mukavemetinin düştüğünü belirtmişlerdir. Bu bağlamda, araştırmacılar, WC'nin ECM ile işlenmesinde

Co ayrılmasının önlenmesi için yöntemler geliştirmeye çalışmışlardır. WC, elektrolit (NaCl sulu solüsyon) içine daldırıldığında, Co seçici olarak ayrıştırılmıştır. Daldırma testinde, elektrolite $CoCl_2$ eklendiğinde ve Co^{+2} iyonunun konsantrasyonu artırıldığında, sinterlenmiş karbürdeki Co'un ayrışması önlenmiştir. Sinterlenmiş karbür, iki kutuplu darbe güç kaynağı kullanılarak NaCl sulu çözelti elektroliti ile işlendiğinde Co aşırı derecede ayrılmış, ancak NaCl+ $CoCl_2$ sulu çözelti elektroliti ile işlendiğinde Co ayrışması olmamıştır. Ayrıca, güç kaynağının frekansı ile işleme performansı arasındaki ilişki de araştırılmış ve frekans arttıkça işleme hızının düştüğü tespit edilmiştir (Goto ve diğ., 2016).

Elektro Erozyon ile İşleme (Electrical Discharge Machining Machining)

Elektro erozyon ile işleme (EDM), temel olarak elektrik kuvveti ile iyonlaşan metal atomlarının anoda doğru hareket etmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemin tercih sebepleri, elektrik iletken her parçanın işlenebilmesi ve çok karmaşık geometrilerin oluşturulabilmesi, takım-iş parçası arasında temas olmadığı için fiziksel deformasyonun az olması, ısıl işleminden etkilenmiş bölgenin az olması şeklinde sıralanabilir. Ayrıca daha az miktarda bitirme işlemine ihtiyaç duyulur. Fakat işleme hızı düşük ve ilk yatırım maliyeti fazladır (Swift ve Booker, 2013). Şekil 3'te bir elektro erozyon mekanizması gösterilmiştir. Tel erozyon ile işlemede ise tel takım (elektrot) olarak çalışmaktadır (Hanzel ve diğ., 2019). Elektro erozyon ile işlemenin başka bir uygulaması olan bu teknik, elektrik enerjisini kullanarak iki boyutlu kesme işlemleri için kullanılmaktadır. Yaygın kullanılan seramik malzemelerin EDM teknolojisiyle işlenmesi üzerine yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 3. Elektro erozyon işleme mekanizması (Swift ve Booker, 2013)

Figure 3. Electrical discharge machining mechanism

Jahan ve diğ. tarafından yapılan derleme çalışmada, EDM ve mikro-EDM yöntemleri tanıtılmış ve WC'nin işlenmesindeki performansları değerlendirilmiştir. Buna göre mikro-EDM'nin işleme hızı 0.005–0.006 mm³/min iken, EDM'de bu değer 0.4 mm³/min'dir. Bu rakamlar, mikro-EDM'nin işleme hızının EDM'ye göre çok düşük olduğunu göstermektedir. Mikro-EDM'nin yaygın bir sorunu, özellikle WC'de delik veya boşluk derinleştiğinde, dielektrik sirkülasyonu ve işlenmiş döküntülerin çıkarılmasının çok zor olmasıdır. WC'nin EDM veya mikro-EDM'sinin bir başka dezavantajı, işlemeden sonra nispeten daha zayıf ve kusurlu yüzeydir. Bu yöntemlerde karşılaşılan ortak sorunlardan birisi WC'nin erime noktasının çok yüksek oluşundan dolayı aşırı takım aşınmasıdır. Tungsten karbürün mikro-EDM'sinde karşılaşılan çeşitli eksikliklerin üstesinden gelmek için daha yeni hibrit mikro işleme teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Jahan ve diğ., 2011).

Rona ve diğ., zirkonya seramiğine uygulanan EDM işleminin, reçine ve zirkonya seramiği arasındaki bağın kayma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca, üç noktalı eğilme testi ile zirkonya seramiğin eğilme dayanımını incelemişlerdir. Bu amaçla, 4.8x4.8x3.2 mm boyutlarında

zirkonya seramiği imal edilmiş ve 4 farklı ikincil işleme (kumlanmış+silan, tribokimyasal silika kaplı+silan, YAG lazer ile işlenmiş+silan, EDM+silan) tabii tutularak eğilme deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, 4 test grubu içinde en yüksek bağlanma kuvvetleri EDM+silan numunede elde edilmiştir. En yüksek eğilme mukavemeti kumlanmış+silan uygulanan numunede elde edilmesine rağmen, EDM'nin zirkonya eğilme mukavemeti üzerinde önemli bir olumsuz etkisinin olmadığı belirtilmiştir (Rona ve diğ., 2017).

Parihar ve diğ., WC'nin tel erozyon ile işlenmesinde oluşan yüzey bütünlüğünü SEM ve EDS analizleriyle incelemişlerdir. WEDM işlenmiş numunenin SEM görüntüsü açıkça yüzey hasarını göstermiştir, ancak kıvılcım plazma sinterleme uygulanarak hazırlanan Co bağlayıcılı WC'nin mikro yapısı EDM işleme parametrelerinden etkilenmemiştir. Ayrıca, hasar görmüş katmanın iç yapısının, işlenmiş yüzeye kıyasla daha az WC taneciklerine sahip olduğu gözlenmiştir. Gözlenen hasarlı yüzey kalınlığı çok küçüktür ve parlatma işleminden sonra tamamen ortadan kaldırılabilir. Bu nedenle, WEDM'nin kıvılcım plazma sinterleme ile üretilen WC'nin işlenmesi için etkili bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Parihar ve diğ., 2018).

Gommeringer ve diğ., NbC içeren itriyum neodymi ile stabilize edilmiş zirkonya malzemenin EDM performansını araştırmışlardır. EDM deneylerinde, baskın malzeme çıkarma mekanizmasının ergime olduğu görülmüştür. 1,5 mm³/min'lik malzeme kaldırma oranları ile işlenmiş yüzeylerde düşük yüzey pürüzlülüğüne (Ra = 0,3 µm), ulaşılabilmektedir. Orta düzeyde enerji girdisi sağlayan işleme koşulları, yeterli işleme hızına, düşük yüzey pürüzlülüğüne ve işleme sürecinden etkilenen çok ince bölgelere sahip neredeyse hatasız yüzeylere yol açmıştır. Ancak, EDM'de aşırı yüksek enerji parametrelerinin seçimi yeniden katılaştırma sırasında çatlak oluşumuna, parçalanma ve faz birikmesine yol açabilmektedir (Gommeringer ve diğ., 2020).

Bhadoria ve diğ., derleme çalışmalarında tungsten karbür ve kompozitinin (WC-Co) EDM ile işlenebilirliğini değerlendirmişlerdir. Bu malzemeler, kalıp ve kesme endüstrileri için kullanılmakta olup, petrol, enerji, madencilik ve sağlık endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte, sadece sert değil aynı zamanda kırılğan olan bu malzemeleri geleneksel tekniklerle işlemek zordur. Araştırmacılar, sert malzemeyi EDM teknikleri ile işlemek için çeşitli yaklaşımlar (DED, WEDM, µ-EDM, PMEDM) geliştirdiğini ve bu uygulamalarda işleme parametrelerinin WC malzeme üzerindeki etkilerinin analiz edildiği belirtmişlerdir. Metalik bağlayıcısız nano-yapılı WC'nin EDM ile işlenebilirliğinin araştırılabileceğini önermişlerdir (Bhadoria ve diğ., 2018).

Biyoseramik hidroksiapatit (HA) kaplamalı titanyum, mükemmel mekanik özellikleri ve yüksek osteo iletkenliği nedeniyle biyomalzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak elektrokimyasal biriktirme (ED) ile hazırlanan Ti/HA'nın ara yüzey kuvveti nispeten düşüktür. Bu da mekanik özelliklerde istenilen kalitenin yakalanamamasına neden olmaktadır. Ju ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, ara yüzey mukavemetini geliştirmek için kalsiyumlu bir mikro ark oksidasyonu (MAO) işleminden yararlanılmıştır. Darbeli ED, ağırlıkça %6 H₂O₂ içeren bir elektrolit kullanarak MAO yüzeyi üzerindeki HA kaplamasını sentezlemek için kullanılmıştır. Örnekler, MAO kaplamanın Ca veya CaTiO₃ ile gözenekli TiO₂ (rutil ve anataz) içerdiğini ortaya çıkarmıştır. CaTiO₃ oluşumu, voltaja ek olarak akım yoğunluğuna, reaksiyon süresine ve Ca⁺² konsantrasyonuna bağlıdır. MAO kaplamaları, Ti içerenlerden daha yüksek bir korozyon direnci sergilemiştir. Nihai numunenin yapısı Ti/TiO₂(Ca)/HA şeklindedir ve yapışkan gücü Ti/HA numunesinin yaklaşık iki katıdır. Özellikle, yüksek bir Ca⁺² konsantrasyonunda sentezlenen MAO kaplaması, geliştirilmiş bir yapışma mukavemeti (2.326 MPa) sergilemiştir. Bir bağlantı ara tabakası olarak Ca içeren MAO kaplamanın, HA yapışma mukavemetini geliştirmek için kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Ju ve diğ., 2022).

Zhou ve diğ., WEDM ile üretilen düzenli ve kontrol edilebilir mikro-kanallı yapıya sahip Ti₃SiC₂ malzeme yüzeylerini analiz etmişlerdir. SEM ve EDS kullanılarak paralel ve dik temas açıları, mikro-kanallı yapıların derinlik-genişlik oranı ve yüzey dokusunun pürüzlülüğü arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, dokulu Ti₃SiC₂ yüzeyi üzerindeki paralel temas açısının, pürüzsüz yüzeydekine kıyasla yaklaşık %164 arttığını ve anizotropisi olan süperhidrofobik yüzeyin kabaca elde edildiğini göstermiştir. Deneysel paralel temas açıları, Cassie-Baxter formülü ile hesaplanan teorik temas

açlarına çok yakın sonuçlar vermiştir. Derinlik-genişlik oranının, %2.4'lük ortalama hatayla paralel temas açısını tahmin etmek için kullanılabilceği doğrulanmıştır. Dikey temas açılarının derinlik-genişlik oranı ve yüzey pürüzlülüğü ile iyi bir korelasyonu olduğu belirtilmiştir (Zhou ve diğ., 2018).

Selvarajan ve diğ., Si₃N₄-TiN ve Ni-Titanyum alaşımlarının EDM karakteristikleri, mikro yapıları ve sertlik değişimleri üzerine yapılan çalışmaları değerlendirmişlerdir. Numune olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik türbin kanatları kullanılmıştır. Buna göre, Si₃N₄-TiN iletken seramik kompozitin elektrik direncinin yüksek oluşunun, metal alaşımlara kıyasla elektriksel deşarj işlemede büyük bir dezavantaj olduğunu, vuruş süresi, vuruş bekleme süresi, voltaj ve akım gibi giriş parametrelerinin önemli olduğu görülmüştür. Si₃N₄-TiN iletken seramik kompozitin, türbin kanadı boyunca mekanik güç iletimli bileşenler için Ni-Titanyum alaşımlarından daha iyi olduğu bulunmuştur (Selvarajan ve diğ., 2020).

Zirkonyum diborid (ZrB₂), çok yüksek erime noktası, yüksek sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı, iyi termal ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklerin kombinasyonu nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyel bir seramiktir. Kullanıma en yakın şekiller üretim sırasında elde edilmeye çalışılsa da gerekli durumlarda işleme de gerekebilmektedir. Shanbhog ve diğ., ZrB₂ iş parçasının WEDM ile kesilebilirliğini araştırmışlardır. İşlemden sonra işlenen bölge enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Raman spektroskopisi ile eriyik katılaşmış tabakayı ve yeniden kristalize bölgeyi incelemek için kullanılmıştır. Eriyik katılaşmış tabakada mikro çatlaklar ve gözenekler ve çekirdeklenme gözlenmiştir. Gözlemler neticesinde, eriyik katılaşmış tabakanın altında, kütlelerin geri kalanına kıyasla azalan gözeneklilik ile yeniden kristalize edilmiş bir ince tane yapısı gözlenmiştir. Artan deşarj akımıyla birlikte MRR, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının arttığı belirlenmiştir. Ancak, darbe süresi arttığında yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve MRR artarken takım aşınmasının azaldığı görülmüştür (Shanbhog ve diğ., 2022).

Al-MMC'ler, yüksek mukavemet, sertlik ve termal özellikleri sayesinde çeşitli mühendislik uygulamaları için kullanılır. Praveen ve diğ., seramik takviyeli Al metal matrisli kompozitlerin (Al-MMC) tel erozyonla işleme üzerine yapılan çalışmaları incelemiştir. Bu derleme çalışmada, çeşitli takviyeli MMC'lerin malzemelerin WEDM sürecinin detaylı analizi ve işleme parametrelerinin optimize edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Araştırma makalelerinin çoğunda, sadece elektriksel parametrelere vurgu yapılmış, ancak elektriksel olmayan parametrelerin de işleme özelliklerini etkilediği ifade edilmiştir (Praveen ve diğ., 2020).

Prasanna ve diğ., AA7075-SiC kompozitlerin EDM yöntemiyle işlenmesinde parametrelerin MRR, takım aşınma hızı (TWR) ve Ra üzerindeki etkileri optimize edilmeye çalışılmıştır. Akım, vuruş süresi, vuruş bekleme süresi ve voltaj değiştirilerek kerese dielektrik sıvı ortamında Taguchi deney tasarımı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Boşalım akımı arttığında, MRR'nin arttığı ancak yüzey kalitesinde ciddi bir kötüleşme olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, AA7075-SiC kompozitlerin yüksek akımda işlenmesinde takım aşınma oranı artmıştır. Optimum parametreler, 12 A akım, 15 µs vuruş süresi, 1 µs vuruş bekleme süresi ve 35 V olarak belirlenmiştir. Deneyler sonrasında yapılan duyarlılık analizi akımın en etkili faktör olduğuna işaret etmiştir (Prasanna ve diğ., 2017).

Garg ve Sharma, ZrSiO₄/6063 Al esaslı kompozitin WEDM ile işlenmesinde vuruş süresi, vuruş bekleme süresi, gerilim ve akım parametrelerinin boyutsal sapma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneyler, RSM esaslı Box-Behnken deney tasarımı uygulanarak pirinç tel ile deiyonize su ortamında yapılmıştır. Vuruş süresi ve akım arttıkça boyutsal sapmanın arttığı, vuruş bekleme süresi ve servo voltajın ise boyutsal sapma üzerinde anlamlı bir etkisinin gözlenmediği bulunmuştur. Yüksek akımın, tel elektrotu gerekli yoldan saptıran tel üzerinde daha büyük itme kuvvetlerine ve basınç dalgasına yol açan boşalım enerjisini artırdığı ve böylece boyutsal sapmanın arttığı vurgulanmıştır. Optimum boyutsal sapma, 112 µs vuruş süresi, 59 µs vuruş bekleme süresi, 120 A akım ve 50 V servo voltajı kullanıldığında elde edilmiştir (Garg ve Sharma, 2017).

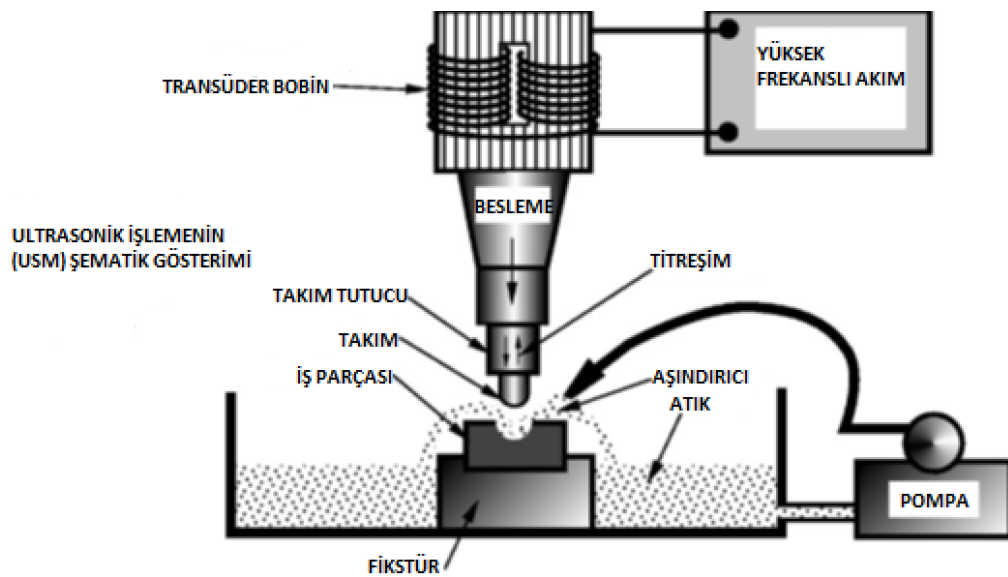
EDM, elektriksel deşarjların neden olduğu termal yükler, yüzeyde ve yüzey altı katmanlarında farklı değişikliklere neden olur. Isıdan etkilenen bölge (HAZ) içinde meydana gelen hasarların daha detaylı anlaşılması için bir alümina/zirkonya/tungsten karbür seramik üzerinde tek bir deşarj için bir ısı

transferi simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca, iş parçası malzemesindeki farklı mevcut fazların sıcaklık alanı üzerindeki etkisi de dikkate alınmıştır. Bu amaçla iki farklı simülasyon modelinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. İlk adımda, homojenleştirilmiş bir malzeme modeli ile tek bir deşarj simüle edilmiştir. Böylece yeni oluşturulan yüzeyde malzeme kaldırma ve oluşan ısı akısı belirlenmiştir. 2 boyutlu simülasyondan alınan ısı akışı, iki faz WC ve ZrO içeren bir 3 boyutlu modele uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; artan WC miktarı nedeniyle, kompozit seramiğin ısı iletkenliğinin arttığı ve HAZ içinde daha düşük sıcaklık gradyanlarına yol açtığı bulunmuştur. Düşük sıcaklık gradyanları, yüzey bütünlüğünün iyileştirilmesiyle sonuçlanabilecek alt yüzey katmanlarında daha az gerilime neden olmaktadır. Yazarlar, sunulan modelin deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanması gerektiğini ve sonrasında, yüzey bütünlüğü tahminleri yapılabileceğini vurgulamışlardır (Hess ve diğ., 2022).

Fard ve diğ., Al-SiC kompozitin kuru WEDM hakkında parametrik bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Deneyler, vurum süresi, vurum bekleme süresi, voltaj, boşalım akımı, tel gerilimi ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü (SR) ve kesme hızı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kesme hızı açısından en uygun gaz ve tel malzemesinin seçilmesi için yapılan ön deneylerde oksijen gazı ve pirinç tel öne çıkmıştır. Kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Daha sonra kesme hızını maksimuma çıkarmak ve SR'yi minimize etmek için bir yapay arı kolonisi algoritması, ANFIS modeli ile ilişkilendirilmiştir. Düşük vurum süresi, yüksek vurum bekleme süresi, yüksek voltaj, düşük akım, düşük tel ilerleme hızı ve gerilimi kombinasyonunda daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. (Fard ve diğ., 2013).

Ultrasonik İşleme ve Döner Ultrasonik İşleme (Ultrasonic Machining and Rotary Ultrasonic Machining)

Ultrasonik işleme (UM), elektrik enerjisini titreşime dönüştürerek işlemeyi gerçekleştiren bir alışılmamış imalat tekniğidir. İşleme takımı, iş parçası yüzeyinde bir aşındırıcı tane bulamacı içinde 0.013-0.1 mm arasında bir genlikle yaklaşık 20 kHz'de titreşir. Talaş kaldırma süreci çekiçleme etkisi, darbe etkisi, kimyasal etki ve kavitasyon etkisi altında gerçekleşir. Otomasyon imkânı ve hassasiyeti yüksek, fakat işleme hızı düşük bir yöntemdir (Hinduja ve Kunieda 2013). Şekil 4'te ultrasonik işleme mekanizması gösterilmiştir. Döner ultrasonik işleme (RUM) ise sistemsel olarak ultrasonik işlemeye (USM) benzemesine rağmen aşındırıcı madde kullanılmamasıyla USM'den ayrılır. RUM yönteminde işleme için dönen elmas kaplı bir takım kullanılır. Bu yöntem delme, frezeleme, delik açma vb. işlemler için uygulanmaktadır (Hinduja ve Kunieda 2013).



Şekil 4. Ultrasonik işleme mekanizması (Swift ve Booker, 2013)

Figure 4. Ultrasonic machining mechanism

Ultrasonik işleme, optik cam malzemelerden gelişmiş seramiklere ve seramik matris kompozitlere kadar bir dizi kırılğan malzemenin hassas olarak işlenmesinde başarıyla uygulanmaktadır. Farklı malzemelerin işlenmesi ve yöntemin daha verimli çalışabilmesi hakkında birçok derleme ve araştırma makalesi bulunmaktadır.

Wang ve diğ. tarafından yapılan derleme çalışmada, kırılğan malzemelerin RUM'da malzeme çıkarma mekanizması ve kesme kuvveti modellemesinin yanı sıra kenar ufalanması oluşum mekanizmaları, yırtılma kusurları, yüzey altı hasarları ve bunların etkileşimli etkileri araştırılmıştır. RUM'da işleme parametrelerinin belirlenmesinde sınırlayıcı bir koşul olan takım tezgâhlarının kritik işleme kapasitesi tanımlanmıştır. İşleme parametrelerinin optimizasyonu, düşük hasarlı takım tasarımı ve döner ultrasonik eliptik işleme gibi diğer yöntemler dâhil olmak üzere hasar azaltma yöntemlerindeki ilerlemeler açıklanmıştır. RUM'un işleme parametrelerinin belirlenmesinde öncelikle kesme kuvvetinin kritik kesme kuvvetini aşmaması sağlanmalıdır. Döner ultrasonik delmede (RUD) delik girişindeki kenar yontma veya yırtılma hatası, doğrudan bireysel elmas aşındırıcıların malzeme çıkarma işleminden kaynaklanır. Aksine, delik çıkışındaki kenar yontma veya yırtılma hatası, tüm elmas aşındırıcıların makro kuvvet etkisinden kaynaklanır. Benzer şekilde, döner ultrasonik yüzey frezelemede (RUFM) kenar yontulması yukarıda belirtilen oluşum mekanizmasını takip eder. İşleme parametreleri optimizasyonu, düşük hasarlı takım tasarımı ve ayrıca delik çıkışında destek ekleme gibi yöntemler sayesinde, işleme kaynaklı hasarlar etkili bir şekilde bastırılabilir (Wang ve diğ., 2018b).

Silisyum karbür (SiC) seramik matrisli kompozitlerin işlenmesi, malzeme kaldırma sırasında meydana gelebilecek ve kompozit parçaların hizmet ömrünü kısaltabilecek hasarlar nedeniyle önemli bir sorundur. Zhang ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, iki boyutlu bir karbon fiber takviyeli silisyum karbür matrisli kompozit (2D-Cf/SiC) modeli oluşturulmuştur. Farklı fiber oryantasyonları oluşturulup seramik matrisli kompozitlerin ultrasonik destekli parlatma işleminde, kuvvet, yüzey topografyası ve yüzey/yüzey altı mikromorfolojisi ile yüzey sertliği araştırılmıştır. Sonuçlar, ultrasonik destekli parlatma ile malzeme kaldırma işleminde en etkili olayın gevrek kırılma olduğunu göstermiştir. Malzeme kırılma biçimleri; matris çatlaması, fiber kırılması, fiber çekilmesi, arayüzey bağlarının ayrılması ve arayüzey kırılması olarak sıralanabilir. Geleneksel taşlama ile karşılaştırıldığında, ultrasonik destekli taşlamada; normal kuvvet, teğetsel kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü sırasıyla yaklaşık %20, %18 ve %9 oranında azalmıştır. Ultrasonik destekli taşlama, taşlama kuvvetini etkili bir şekilde azaltabilir ve yüzey bütünlüğünü iyileştirebilir. Bu çalışma bulgularının, 2D-Cf/SiC'nin taşlama kuvvetini ve yüzey kalitesini tahmin etmek için kullanılacağı belirtilmiştir. (Zhang ve diğ., 2022b).

Feng ve diğ., C/SiC kompozitlerin döner ultrasonik işleminde delme kaynaklı yırtılma kusurlarını araştırmıştır. Ayrıca yırtılma kusuru oluşum mekanizması, itme kuvvetinin ayrıntılı gözlemi yoluyla incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, yırtılma kusurunun itme kuvvetine pozitif bir bağımlılığını göstermektedir. Daha büyük bir itme kuvveti, yırtılma kusurunun oluşumu sürecinde daha büyük bir matkap yer değiştirmesine karşılık gelir ve bu da daha fazla yırtılma kusuruna neden olur. RUM ortalama olarak delik çıkışındaki yırtılma kusurunu %60'tan fazla azaltabilir. Yırtılma kusurları, iş mili hızını ve ultrasonik genliği artırarak veya ilerleme hızını azaltarak daha da azaltılabilir (Feng ve diğ., 2017).

Döner ultrasonik işleme, kesme kuvveti ve gelişmiş delik kalitesi ile seramik matris kompozitler (CMC) için üstün bir delik üretim yöntemidir. Çeşitli işleme parametreleri arasında, kesme kuvvetinin azaltılması açısından RUM etkinliğini garanti etmek için yeterli ve kararlı ultrasonik titreşim çok önemlidir. Wang ve diğ., seramik matrisli kompozitlerin döner ultrasonik işlenmesinde titreşim stabilitesi üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada, C/SiC, kuvars cam ve safirin RUM için delik girişinde kesme kuvveti ve ultrasonik güç değişiklikleri değerlendirilmiştir. Ultrasonik güç değişimi, C/SiC kompozitin RUM sırasında termo-mekanik yükün rezonans frekansı üzerindeki etkisini tanımlamak için de kullanılmıştır. Kompozit özelliğın termo-mekanik yükün ultrasonik titreşimin kararlılığı üzerindeki etki mekanizmasını etkilemediği ortaya çıkmıştır. Ayarlama frekansının önceden ayarlanmasıyla, takım aşınmasının kompozitin RUM işlemindeki kesme kuvveti artışı üzerindeki etkisinin zayıflatılabileceği belirtilmiştir (Wang ve diğ., 2018a).

Li ve diğ., SiC için ultrasonik titreşim destekli taşlamada (UVAG) malzeme kaldırma mekanizması ve taşlama kuvveti modellemesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Değişken derinlikli nano çizilme testi ve ultrasonik titreşim destekli taşlamaya (UVAG) dayalı olarak, birim zamanda malzeme çıkarılması kullanılarak normal taşlama kuvvetinin teorik bir modeli elde edilmiştir. Geleneksel taşlamada, malzemenin çıkarma şekli yığın kaldırmadır, UVAG ise sünek kaldırma elde etmek için faydalıdır. Taşlamada yüzey altı hasar derinliği, ana yüzey altı hasarı mikro çatlaklar olan UVAG'dan daha derin ve daha ciddidir. Tek değişkenli deneyler, taşlama derinliği, ilerleme hızı ve genliğinin artmasıyla taşlama kuvvetinin arttığını, iş mili hızının artmasıyla azaldığını göstermektedir. Deney sonuçları UVAG'ın, yüzey taşlama işlemine kıyasla yüzey kalitesini iyileştirmek ve yüzey altı hasar derinliğini azaltmak için faydalı olduğunu göstermiştir. SiC seramikleri için normal taşlama kuvvetinin teorik modeli genetik algoritma kullanılarak elde edilmiş olup, deneysel sonuçlar teorik modelin güvenilir olduğunu göstermiştir (Li ve diğ., 2017).

Kumar ve Singh, döner ultrasonik işleme sırasında girdi faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini inceleyerek BK7 cam malzemenin yüzey kalitesini iyileştirmeyi amaçlamıştır. İşleme değişkenlerinin (devir sayısı, ilerleme hızı ve ultrasonik güç) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini gözlemlemek için RSM metodolojisi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için geliştirilen kuadratik modelin uygunluğu ANOVA ile kontrol edilmiş ve ilerleme-hız etkileşimi hariç tüm faktörlerin model için önemli olduğu belirlenmiştir. İlerleme, güç ve devir sayısının ılımlı etkisiyle azalan yüzey pürüzlülüğü üzerinde maksimum etkiye sahiptir. SEM analizi, karışık malzeme akışı sağlayarak yüzey kalitesini düşüren düşük ilerleme hızı ile yüksek güç ve hız seviyelerinde işlenmiş yüzeylerde plastik olarak deforme olmuş bölgelerin olduğunu göstermiştir (Kumar ve Singh, 2018).

Du ve diğ., CFRP kompozitler ile karbon fiber takviyeli seramik (CFRC) kompozitlerin işlenme durumunu geleneksel ve geleneksel olmayan işleme yöntemleri açısından karşılaştırmışlardır. Geleneksel işleme yöntemleri, basit kullanım, daha az ekipman yatırımı vb. avantajlara sahiptir, ancak karbür takımlarda hızlı aşınma oluşur. PCD ve CBN kesiciler seramik matris kompozitlerin işlenmesi için daha uygundur. CFRP'lerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi sırasında dikey fiber dökme yönünde tabakalar arasındaki bağlanma mukavemetini aşan kesme kuvveti delaminasyon kusurlarına neden olur. Geleneksel olmayan işleme yöntemleri birçok işleme kusurlarını bir dereceye kadar azaltabilir. Su jeti ile işleme ve lazer ışını işleme kombinasyonu, su jetinin erozyonu ve soğutması sırasında HAZ'ı önemli ölçüde azaltabilir, bu da bazı yönlerden geleneksel lazer ışını işlemeden daha avantajlıdır. Ultrasonik destekli işleme ve döner ultrasonik işleme, CFRC'lerin işlenmesinde yalnızca kesme kuvvetlerini ve ufalanma, çapak, çatlak, fiber çekilmesi gibi işleme kusurlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda işleme verimliliğini ve yüzey kalitesini iyileştirebilir (Du ve diğ., 2019).

Günümüzde teknik verimliliğe ek olarak, çevre dostu işleme yöntemlerine olan talep artmıştır. Seramik matris kompozitler (CMC), özellikle sert ve ağır koşullar altında olağanüstü özellikler göstermekle birlikte CMC'lerin işlenmesinde, önemli işleme maliyetleri, yüksek takım aşınması, kötü yüzey kalitesi ve düşük malzeme çıkarma oranı gibi çeşitli dezavantajlar vardır. Bu bağlamda, CMC'lerin işlenmesi için etkin bir stratejinin geliştirilmesi çok önemlidir. Esmaili ve diğ., soğutma sıvısı-yağlayıcı tipleri arasında, ucuz ve çevreye uyumlu olarak bilinen minimum miktar yağlama (MQL) tekniğinin taşlama işleminde iyi sonuçlar verebileceğini göstermek için bir araştırma yapmıştır. Karbon fiber takviyeli SiC kompozitin taşlanması, MQL yönteminin kuru taşlama koşuluna göre kesme kuvvetinde %37.95 azalma, yüzey pürüzlülüğünde %75.93 azalma ve taşlama verimliliğinde %150 artış sağladığı belirlenmiştir. MQL destekli taşlamadan sonra iş parçası yüzeyinin SEM görüntüleri, C/SiC kompozitlerde gevrek kırılmanın baskın kesme mekanizması olduğunu göstermiştir (Esmaili ve diğ., 2019).

Singh ve diğ., Al/SiC kompozitinin döner ultrasonik işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü (SR), malzeme çıkarma oranı (MRR) ve talaş kalınlığı gibi ilgi tepkiler üzerinde farklı deneysel koşulların (devir sayısı, ilerleme hızı ve ultrasonik güç) etkilerini incelemiştir. İşlenmiş numunelerin mikro yapı incelemesinde, SEM analizi yoluyla takım uç kenarı üzerindeki talaşlanma boyutu ve kalınlığını göstermek için kullanılmıştır. Bununla birlikte, orta seviye ilerleme hızı, talaş kalınlığı açısından en

uygun sonuçları sunar. Deneysel sonuçlar, ilerleme hızının MRR ve SR için en önemli değişken olduğunu göstermiştir (Singh ve diğ., 2020).

Abdo ve diğ., RUM ile biolox-forte seramiklere mikro kanalların işlenmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. İş mili hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, titreşim genliği ve titreşim frekansının yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi ve takım aşınmasına etkileri değerlendirilmiştir. Elmas takım kesme hareketindeki farklılık nedeniyle kanal yan duvarına kıyasla kanal yatağında daha kırılğan kırılma ve derin çukurlar açığa çıkarmıştır. Ayrıca, kanal yan duvarlarının her zaman üst kenarın yakınında kaba işlenmiş bir bölge ve kanal yatağına kadar nispeten düz işlenmiş bir bölge gösterdiği gözlenmektedir. EDS analizi, biolox-forte bileşiminde herhangi bir değişikliğin meydana gelmediğini ve mikro kanallarda hiçbir takım malzemesi izinin gözlenmediğini ortaya koymuştur. SEM analizleri, plastik deformasyon, abrasiv aşınma, takım kenarı yuvarlanma ve talaşlanma gibi aşınma mekanizmalarının oluştuğunu göstermiştir. İdeal RUM parametreleri seçilerek, iyi yüzey kalitesi ($Ra=0.21 \mu m$) ve minimum kenar talaşlanması ($16.3 \mu m$) olan mikro kanallar oluşturulduğu belirtilmiştir (Abdo ve diğ., 2019).

Kuo ve Tsao, kendi kendine çalışabilen RUM mekanizması tasarlayarak bu işleme türünün uygulama alanını genişletmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, tasarlanan takım önce RUM takım tezgâhına adapte edilmiş ve deneylerde iş parçası olarak cam seçilmiştir. Sonuçlara göre, kesme derinliği ve ilerleme hızındaki artışlar, giriş alanındaki yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Zımpara taşı aşınması belirli bir seviyeye ulaştığında, kesme açısı ve taşların boyutu azalarak yüzey pürüzlülüğünde azalmaya sebep olur. Ultrasonik destekli frezeleme, frezeleme direncinin azalmasıyla sonuçlanır ve bu da daha yüksek bir işleme hızına yol açar. Ancak, uzunlamasına ultrasonik salınım, iş parçasına karşı mikro ezilme etkisi nedeniyle frezelenmiş yüzeye zarar verir. Dolayısıyla, ultrasonik frezelemenin yüzey kalitesi ultrasonik olmayan frezelemeden daha kötüdür. Ayrıca, taşlama taşları bu mikro ezilme etkisi nedeniyle daha fazla strese ve daha kolay yıpranmaya maruz kalır (Kuo ve Tsao, 2012).

Navas ve diğ., ZrO_2-TiN ve $Al_2O_3-TiC-SiC$ seramiklerinin RUM ile işlenmesinde nihai yüzey bütünlüğünü araştırmışlardır. Sonuçlara göre, $Al_2O_3-TiC-SiC$ seramiğinden talaş kaldırma davranışı sünek kırılma şeklinde olurken, ZrO_2-TiN 'de gevrek kırılma hali daha baskındır. Daha küçük tane boyutuna sahip elmas takımlar kullanıldığında, eksenel kesme derinliğinin azaltılması ve/veya ilerleme hızı artırılması durumunda daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilir. Döner ultrasonik işleme, her iki seramikte basma şeklinde yüzey kalıntı gerilmeleri üretmiştir. İşleme parametrelerinin ZrO_2-TiN 'deki nihai artık gerilmeler üzerinde hiçbir etkisi yoktur, ancak $Al_2O_3-TiC-SiC$ 'de ilerleme azaltıldığında ve/veya eksenel kesme derinliği arttığında daha fazla basma gerilimi oluşur. ZrO_2-TiN 'nin RUM'u, ZrO_2 'nin herhangi bir zararlı tetragonal fazdan monoklinik faza dönüşüme neden olmaz (Navas ve diğ., 2015).

Kuruc ve diğ., polikristalin kübik bor nitrürün (PCBN) işlenebilirliğini döner ultrasonik işleme yöntemini kullanarak araştırmıştır. Çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) için en uygun yüzey pürüzlülüğüne sahip bir takım üretilmesi hedeflenmiştir. Çünkü pürüzlülüğün özellikle yapıştırma kabiliyeti üzerinde kaynak işleminde önemli bir etkisi vardır. Takımın pürüzlülüğü çok yüksekse, kaynak malzemesi takıma yapışır ve kaynak oluşturulamaz. İşlemeden sonra oluşan yüzeyde çıkıntılar olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni, kesme derinliğinin takım titreşiminin genliğinden daha yüksek olmamasıdır. Deneysel sonuçlara göre, FSW'de kaynak takımı için RUM yöntemiyle PCBN'nin işlenmesi sırasında yeterli düşük pürüzlülük ($Ra=0.24 \mu m$) elde etmek mümkündür (Kuruc ve diğ., 2015).

Kompozit malzemelerdeki gelişmelerle birlikte, kompozit malzemelerin kullanım alanları da artmıştır. Özellikle CMC'lerden olan karbon fiber takviyeli silisyum karbür (C/SiC), ısıl dayanımlarının fazla olması ile uçak motorlarının ısıl dayanım isteyen parçalarında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Uçak motorlarındaki arızaların büyük bir çoğunluğu motordaki parçaların yorulması kaynaklı olduğu bilinmektedir (Ludwig ve diğ., 2020). Xue ve diğ. C/SiC kompozitlerin geleneksel frezeleme ve döner ultrasonik frezeleme yöntemiyle işlenmesi sonrası yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Farklı

ultrasonik genliklerde işlenen numunelere statik çekme, tam değişken yüklü yorulma ve artık çekme mukavemeti testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre RUM teknolojisinin C/SiC kompozitlerin işlenmesinde hem yüzey hem de yüzey altı kalitesini arttırabileceği bulunmuştur. RUM yüzeyi, artık basma gerilimi nedeniyle arayüzey çatlaklarının çoğunu ve daha iyi işlenmiş yüzey kalitesi için fiber çatlaklarının büyümesini engeller. Bundan dolayı, RUM ile C/SiC numunelerinin yorulma hasar oranının geleneksel frezelemeye oranla %31-%80 arasında azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca RUM ile işlenen numunelerin artık çekme mukavemetlerinde de iyileşme görülmüştür (Xue ve diğ., 2021).

Diğer Alışılmamış İmalat Yöntemleri (Other Unconventional Manufacturing Methods)

Açıklanan yöntemler dışında kullanılan malzeme ve istenilen özelliklere göre çok farklı alışılmamış imalat yöntemi mevcuttur. Her yöntemin bir diğerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Doğru yöntemin belirlenmesi malzeme türü ve özellikleri, istenilen boyut ve toleranslar gibi işleme çıktılarına bağlıdır. Seramiklerin talaşlı imalatında kullanılan diğer alışılmamış imalat yöntemleriyle ilgili araştırmalar aşağıda verilmiştir.

Çolpan, alüminyum seramiklerin CO₂ lazer ile işlenmesini araştırmıştır. Seramiklerin lazer ile işlenmesinde, işleme hızında ve boyutsal kalitede artış, sertliğin ve kırılabilirliğin oluşturduğu işleme zorluğunu en aza indirme gibi yararları olduğu belirtilmiştir. Deneylerde Al₂O₃ levhalar kullanılmış olup, numuneler farklı lazer hızı ve gücünde işlenmiş ve sonuçlar SEM yardımıyla incelenmiştir. Lazer çıkış gücünün hem işaret derinliğini hem de genişliğini belirlediği tespit edilmiştir. Daha yüksek güç, yüksek kontrast ile karakterize edilmiş, bu durum daha derin ve daha geniş işaretlerin oluşmasına neden olmuştur. İşleme hızı, üst üste binen izleri ve lazer-malzeme etkileşim süresini kontrol ettiği, böylece işaret derinliği ve kontrastı üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Buna göre, yüksek işleme hızlarında işaret derinliği düşmektedir (Çolpan, 2019).

Yu ve diğ.'ne göre, soğuk presleme, sıcak presleme ve enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel üretim süreçleri, karmaşık geometrilere sahip yüksek kaliteli ZrO₂ bazlı seramiklerin imalatına sınırlamalar getirmektedir. Sorunların çözümü için bağlayıcı jet ile imalat, fotopolimerizasyon ve malzeme ekstrüzyonu gibi eklemeli imalat (AM) yöntemleri geliştirilse de üstün mekanik özelliklere sahip hatasız parçalar üretilememiştir. Bu sorunu çözmek için itriyum-kısmen stabilize ZrO₂ seramiklerinin imal edilmesi için yeni bir ekstrüzyon esaslı AM işlemi uygulanmıştır. Bu yöntemde yağlayıcı ve bağlayıcılar zirkonyum oksit tozlarıyla karıştırılmış, daha sonra ekstrüzyon tabanlı 3D yazıcıyla katmanlar şeklinde üretilmiştir. Üretilen katmanlar yağlayıcı ve bağlayıcılardan ayrılması sağlanarak sinterlenmiştir. Katkı maddesi ile üretilen itriyum-kısmen stabilize ZrO₂ seramiklerinin eğilme, kırılma ve basma dayanımı, sertliği ve gözenekliliği gibi mekanik özellikler incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen ekstrüzyon esaslı AM işlemi ile üretilen parçaların bağlayıcı püskürtme ve SLS yöntemleriyle üretilen ZrO₂ parçalarına göre üstün mekanik özellikler sergilediğini göstermiştir (Yu ve diğ., 2020).

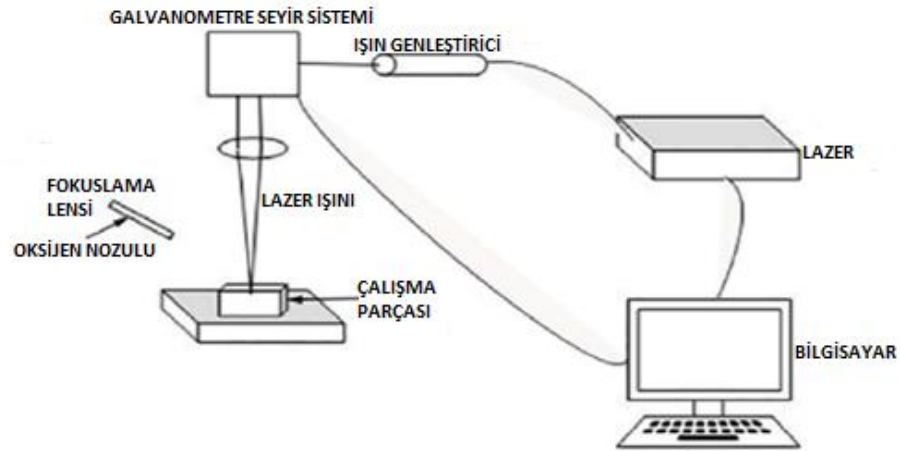
Xing ve diğ., Al₂O₃/TiC seramiği üzerinde mikro kanalların üretiminde lazer ile işleme (LBM) parametrelerinin (voltaj, tarama hızı, frekans ve overscan sayısı) yüzey kalitesi ve boyutlar üzerindeki etkisini incelemiştir. İşlenmiş yüzey morfolojisi, kanal genişliği ve derinliği ve yüzey bileşimi SEM, enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile ölçülmüştür. Sonuçlar, ısıdan etkilenen bölgenin oksidasyon reaksiyonları ile mikro kanalları çevrelediğini ve mikro kanalların yüzey morfolojisi ve boyutlarının LBM parametrelerine büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Yüksek voltaj, düşük tarama hızı, yüksek frekans ve fazla sayıda overscan, yüksek enerji birikimi nedeniyle belli bir eşik değerine kadar büyük kanal genişliği ve derinliği oluşumuna neden olmaktadır. Ancak aşırı enerji birikimi kanal genişliğinin ve derinliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Deneysel sonuçlara göre, mikro kanalları oluştururken daha iyi yüzey kalitesi elde edilebilmesi için LBM parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Optimizasyon ile yaklaşık 50 µm genişliğinde ve yaklaşık 43 µm derinliğinde istenen mikro kanallar üretilebilir (Xing, ve diğ., 2018).

Mükemmel biyoyoumluluk ve kimyasal dayanıklılık nedeniyle, Al₂O₃ seramikler diş hekimliği gibi biyomedikal alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak Al₂O₃ seramiğin yüksek sertliği ve kırılabilirliği, geleneksel işleme yöntemlerinin işleme kalitesinin sağlanmasında zorluklara neden olur.

Ultrasonik titreşim destekli parlatma (UVAP), yeni bir işleme yöntemi olarak sert ve kırılğan malzemelerin yüzey kalitesini etkili bir şekilde iyileştirebilir. Zhang ve diğ., Al₂O₃ seramiğin UVAP ile işlenmesinde yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Yüzey özelliklerinin değerlendirilmesi; mikroskobik topografi, sürtünme özelliği, yüzey sertliği ve mikroskobik gerinim değerlerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Yüzey sertliğinin, yüzey pürüzlülüğündeki azalmayla birlikte azaldığı görülmüştür. Gerinim değerlerinde ise en az değer 4 µm değerinde elde edilirken, en çok değer 8 µm değerinde elde edilmiştir. Ek olarak, UVAP işleme mekanizmasına dayalı olarak alümina seramiğin bir yüzey pürüzlülüğü matematiksel modeli oluşturulmuştur. Model, farklı tipteki aşındırıcı parçacıkların malzeme kaldırma mekanizması üzerindeki etkisini dikkate almaktadır. Deneysel sonuçlar, tahmin modeli hatalarının %20'den az olduğunu göstermektedir (Zhang ve diğ., 2022a).

Shaikh ve Jain, elektro-kimyasal honlama (ECH) işlemi ile 20MnCr₅ alaşımlı çelik konik dişlilerin finiş işlenmesinde MRR ve yüzey pürüzlülüğünün matematiksel modellerini oluşturmuşlardır. ECH, elektrokimyasal çözünme (ECD) ve mekanik honlamanın hibrit bir uygulaması olduğundan, ECD'nin MRR ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi Faraday'ın elektroliz yasası kullanılarak modellenmiştir. Mekanik honlamanın etkisi ve düzenli aşınma etkeni olan malzeme çıkarılması Archard'ın Aşınma Modellemesi kullanılarak oluşturulmuştur. Düzgün konik dişli diş yüzeylerinin geometrisine dayanarak elektrotlar arası boşluk boyunca bu iki modelin gerektirdiği yüzey alanının hesaplanması için formasyonlar önerilmiştir. Geliştirilen modeller, öngörülen yeni "ikiz tamamlayıcı katotlar" konseptine dayanan ECH ile konik dişlilerin bitirilmesi için geliştirilen bir deney düzeneği kullanılarak doğrulanmıştır. Katotlarda elektrolit olarak %25 NaCl + %75 NaNO₃ içeren sulu bir çözelti kullanılmıştır. ECH yöntemiyle üretilen dişliler için daha iyi çalışma performansı sağlayan yüzey pürüzlülüğü ve yüzey bütünlüğüne ulaşıldığı vurgulanmıştır. Ancak, ticari olarak bu yöntemi kullanarak form doğruluğu ve yüzey kalitesinde istenen iyileştirmeyi elde etmek için dişli imalatı sırasında finiş işleme miktarının tam olarak belirlenmesi gerekir (Shaikh ve Jain, 2014).

Wang ve diğ., spark plazma sinterlemesi ile işlenen TiB₂-SiC seramiğinin mikro işleme sürecinin kolaylaştırılabilmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yeni yöntemde göre mikro işleme işlemine lazer ile indüklenen oksidasyon işlemi yardımcı olmaktadır (Wang ve diğ., 2019). Spark plazma ile sinterleme mekanizması Şekil 5'te görülmektedir. Lazer ışınları uygulandıktan sonra malzemenin mikro yapısı ve faz bileşimi elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Buna göre lazer ışınımı uygulanan bölgelerde, seramik ve oksijen arasındaki oksidasyon reaksiyonuyla çıkarılması kolay gevşek ve gözenekli bir oksit tabakası oluştuğu görülmüştür. İşleme parametreleri; ortalama lazer gücü, tarama hızı ve reaksiyon ortamının TiB₂-SiC seramiğinin oksidasyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ortalama lazer gücünde bir artış ve tarama hızında bir azalma olduğunda oksit tabakasının kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Oksijen açısından zengin bir ortamda kalın ve stabil bir oksit tabakası oluşmaktadır. Optimum lazer parametrelerinde (5W güç ve 1 mm/s tarama hızı), oksijen yönünden zengin bir ortamda oksit katman kalınlığı 51 µm, oksit altı katman kalınlığı ise 15 µm'dir. Sonuç olarak, oksidasyon işlemi ile TiB₂-SiC seramiğinin işlenmesinin kolaylaştığı vurgulanmıştır (Wang ve diğ., 2019).



Şekil 5. Spark plazma ile sinterleme mekanizması (Wang ve diğ., 2019)

Figure 5. Spark plasma sintering mechanism

Zhang ve diğ., Ni içeriğinin $\text{Mo}_2\text{NiB}_2\text{-Ni}$ sermetlerinin mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve aşındırıcı aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı Ni içerikli dört grup $\text{Mo}_2\text{NiB}_2\text{-Ni}$ sermet reaksiyon borlama sinterlemesi ile üretilmiş ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Sonuçlar sermetlerin mikro-yapısının Ni/B oranının 0.9'dan 1.2'ye yükselmesiyle açıkça rafine edilebildiğini ve Ni/B oranı 1.1 olan sermetlerin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir (sertlik HRA 90.3 ve kırılma tokluğu 24.3 MPa). Ayrıca, yüksek hızlı bulamaç (SiO_2 kum ile karıştırılmış yapay deniz suyu) aşındırıcı ile aşınma altında, Ni/B 0.9 ve 1.0 oranlı sermetler yüksek aşınma oranı sergilemiştir. Bununla birlikte, Ni/B 1.1 oranlı sermetlerin, Mo_2NiB_2 sert fazı ve Ni bağlayıcı fazının iki fazın uygun oranda etkileşimiyle açıklanan nispeten tam aşınmış yüzey ile minimum aşınma oranı elde edilmiştir (Zhang ve diğ., 2019).

Kannan ve diğ., SiC takviyeli Al7475 kompozitinde gerilimin azaltılması amacıyla mikro boyutlu eliptik bir deliğin LBM yöntemiyle işlenmesini incelemişlerdir. Mikro delik profilinin boyut ve yüzey kalitesi yönünden daha iyi hale getirilebilmesi için lazer gücü, tarama hızı gibi parametreler değiştirilmiştir. Alüminyum bazlı kompozitten başarılı bir şekilde işlenen eliptik profil incelemeleri, LBM'nin uygun bir yöntem olduğunu göstermiştir. En iyi işlemenin minimum tarama hızı olan 50 mm/s ve maksimum lazer gücü 3 kW değerlerinde olduğu belirlenmiştir. SEM analizleri ile minimum tarama hızı ile maksimum lazer gücünde yüzey kalitesinin diğer kombinasyonlara göre çok daha iyi olduğu kanıtlanmıştır (Kannan ve diğ., 2020).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, günümüze kadar seramiklerin ve seramik esaslı kompozit malzemelerin alışılmamış imalat yöntemleri ile işlenmesi üzerine yapılan araştırmalar değerlendirilmiştir. Yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Seramiklerin işlenmesinde ortaya çıkan ölçü ve yüzey kalitesiyle ilgili temel sorunlar bu malzemelerin sert ve kırılğan olmalarından kaynaklanmaktadır. Geleneksel yöntemler ile yapılan işlemlerde takım ömrü ve işleme verimliliğinde azalmalar yaşanmaktadır. Alışılmamış imalat yöntemlerinin seramiklerin işlenmesinde uygulanmasıyla bu dezavantajlı durumlar en düşük seviyeye çekilmeye çalışılmıştır. Bu yöntemler ile takımın iş parçasına teması en düşük seviyeye indirilmiş veya tamamen ortadan kaldırılarak takım ömründe iyileşmeler sağlanmıştır. Ayrıca, alışılmamış imalat yöntemlerinde talaş kaldırma sürecinde kullanılan elektrik enerjisi, ısı enerjisi ve kimyasal çözünme gibi etkenler işleme kalitesini ve işlenebilirliği arttırmaktadır. Özellikle, seramik matrisli kompozitlerin

işlenmesinde oluşan takviye malzemesindeki kırılma ve bozunmalar geleneksel imalat yöntemlerine göre daha az olmaktadır. Böylece, hem kompozit malzemenin fiziksel ve mukavemet özellikleri korunmakta hem de işlenebilirlik göstergeleri iyileşmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmaların alışılmamış imalat yöntemlerinde kullanılan sistemlerin geliştirilmesi, hibrit tekniklerin uygulanması, işleme verimliliğini etkileyen parametrelerin optimize edilmesi ile yüzey pürüzlülüğü ve işleme hızı gibi işlenebilirlik göstergelerinin modellenmesi üzerine olduğu görülmektedir. Bu araştırmalarda, çoğunlukla Taguchi ve RSM gibi deney tasarım ve analiz tekniklerinin yaygın olarak kullanılmıştır ve işleme yönteminde etkin parametreler varyans analizi ile belirlenmiştir.

Alışılmamış imalat yöntemleri kullanılarak, kırılğan malzemelerin üzerine karmaşık ve/veya mikro ölçülerde kanal, delik vb. unsurlar oluşturulabilmektedir. Diğer yandan, geleneksel yöntemlere göre talaş kaldırma hızının oldukça düşük olması en önemli dezavantajıdır. Ayrıca, ısı enerjisi yardımıyla talaş kaldıran EDM ve LBM uygulamalarında işlenen parçalarda mikro seviyede ısıl etkilenmiş bölgelerin oluşması bir diğer olumsuzluktur. Lazer ışını ile işlemede oluşan bu bölgeyi en aza indirmek için LBM ile WJM beraber kullanılabilir. Diğer yandan, ilk yatırım maliyeti ve birim parça başına düşen işçilik maliyetinin yüksek olması, sürdürülebilirlik açısından sistemlerin doğru ve etkili bir biçimde kullanılabilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, özellikle malzeme kaldırmanın karmaşık mekanizması nedeniyle, süreci optimize etmek için matematiksel modeller ve algoritmalar içeren stokastik ve deterministik teknikler kullanılabilir. Gelecekteki araştırmaların çok amaçlı optimizasyon ve sanayi uygulamalarına yoğunlaşılması sürdürülebilirlik açısından fayda sağlayacaktır. Ayrıca, seri üretimde verimliliği artırmak amacıyla enerji tüketimi ve işleme maliyetleri konularında ilgili analizlerin yapılmaması literatürdeki temel eksiklikler olarak göze çarpmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdo, B. M. A., Anwar, S., El-Tamimi, A., 2019, "Machinability study of biolox forte ceramic by milling microchannels using rotary ultrasonic machining", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 43, ss. 175-191.
- Aich, U., Banerjee, S., Bandyopadhyay, A., Das, P. K., 2014, "Abrasive water jet cutting of borosilicate glass", *Procedia Materials Science*, Cilt 6, ss. 775-785.
- Anjaneyulu, B., Prahladharao, K., Nagamalleswararao, G., 2019, "Optimization of process parameters by using Taguchi Techniques in abrasive air jet machining of Al₂O₃ ceramic material", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 19, ss. 140-147.
- Bhadauria, G., Jha, S. K., Roy, B. N., Dhakry, N. S., 2018, "Electrical-Discharge Machining of Tungsten Carbide (WC) and its composites (WC-Co) –A Review", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 5, Sayı 11, ss. 24760-24769.
- Bilal, A., Jahan, M. P., Talamona, D., Perveen, A., 2018, "Electro-discharge machining of ceramics: A review", *Micromachines*, Cilt 10, Sayı 1, ss. 10.
- Chaitanya, A., Babu, D. K., Kumar, K. V. N. G., 2020, "Experimental study on surface roughness by using abrasive jet machine", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 23, ss. 453-457.
- Chaudhury, P., S. Samantaray, 2020, "Multi-optimization of process parameters for machining of a non-conductive SiC ceramic composite by non-conventional machining method", *Manufacturing Review*, Cilt 7, Sayı 32.
- Chiles, V., Black, S., Lissaman, A., Martin, S., 1996, *Principles of engineering manufacture*, Butterworth-Heinemann, Oxford, İngiltere.
- Çolpan, M. H., 2019, "Seramik Yüzeylerin Lazerle İşlenmesi Üzerine Bir Çalışma", *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, Cilt 45, Sayı 1, ss. 88-94.
- Daniel, S. A. A., Ananth, S. V., Parthiban, A., Sivaganesan, S., 2020, "Optimization of machining parameters in electro chemical machining of Al₅O₅/SiC/MoS₂ composites using taguchi method", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 738-743.

- Dhanawade, A., Bhosle, R., Jagtap, R., Sorate, K. A., 2021, "Comparative Study of Lead Zirconate Titanate Ceramic and Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Surfaces Machined by Abrasive Water Jet", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 44, ss. 4628-4632.
- Du, J., Zhang, H., Geng, Y., Ming, W., He, W., Ma, J., Cao, Y., Li, X., Liu, K., 2019, "A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 15, ss. 18155-18166.
- Esmaeili, H., Adibi, H., Rezaei, S. M., 2019, "An efficient strategy for grinding carbon fiber-reinforced silicon carbide composite using minimum quantity lubricant", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 8, ss. 10852-10864.
- Fard, R. K., Afza, R. A., Teimouri, R., 2013, "Experimental investigation, intelligent modeling and multi-characteristics optimization of dry WEDM process of Al-SiC metal matrix composite", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 15, Sayı 4, ss. 483-494.
- Feng, P., Wang, J., Zhang, J., Zheng, J., 2017, "Drilling induced tearing defects in rotary ultrasonic machining of C/SiC composites." *Ceramics International*, Cilt 43, Sayı 1, ss. 791-799.
- Garg, M. P., Sharma, A., 2017, "Examination of accuracy aspect in machining of ZrSiO₄/6063 aluminium MMC using CNC wire electrical discharge machining", *Composites Communications*, Cilt 6, ss. 6-10.
- Gommeringer, A., Schweizer, C., Kern, F., Gadow, R., 2020, "Electrical discharge machinable (Y, Nd) co-stabilized zirconia-Niobium carbide ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt 40, Sayı 11, ss. 3723-3732.
- Gorin, A., Reddy, M. M., 2014, "Advanced ceramics: Some challenges and solutions in machining by conventional methods", *Applied Mechanics and Materials*, Cilt 624, ss. 42-47.
- Goto, A., Nakata, A., Saito, N., 2016, "Study on Electrochemical Machining of Sintered Carbide", *Procedia CIRP*, Cilt 42, ss. 402-406.
- Gupta, K., Gupta M. K., 2019, "Developments in nonconventional machining for sustainable production: A state-of-the-art review", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Cilt 233, Sayı 12, ss. 4213-4232.
- Hanzel, O., Singh, M. A., Marla, D., Sedlák, R., Šajgalík, P., 2019, "Wire electrical discharge machinable SiC with GNPs and GO as the electrically conducting filler", *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt 39, Sayı 8, ss. 2626-2633.
- Hess, R., Olivier, M., Schneider, S., Heidemanns, L., Klink, A., Herrig, T., Bergs, T., 2022, "Numerical Investigation of the EDM Induced Temperature Field in a Composite Ceramic", *Procedia CIRP*, Cilt 108, Sayı 6, ss. 31-36.
- Hinduja, S., Kunieda, M., 2013, "Modelling of ECM and EDM processes", *CIRP Annals*, Cilt 62, Sayı 2, ss. 775-797.
- Jahan, M., Rahman, M., Wong, Y. S., 2011, "A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide", *International journal of machine tools and manufacture*, Cilt 51, Sayı 12, ss. 837-858.
- Ju, K., Chen, X., Zhao, Z., 2022, "Fabrication of Ti/TiO₂ (Ca)/Hydroxyapatite Bioceramic Material by Micro-Arc Oxidation and Electrochemical Deposition", *Ceramics International*, Cilt 48, Sayı 14, ss. 19937-19943.
- Kannan, V. S., Lenin, K., Navneethakrishnan, P., 2020, "Investigation in machining parameter of micro profile and surface characteristics of Al7475 with SiC alloy in LBM", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 701-707.
- Kozak, J., Zybura-Skrabalak, M., 2016, "Some problems of surface roughness in electrochemical machining (ECM)", *Procedia CIRP*, Cilt 42, ss. 101-106.
- Kumar, V., Singh, H., 2018, "Regression analysis of surface roughness and micro-structural study in rotary ultrasonic drilling of BK7", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 14, ss. 16819-16827.
- Kuo, K.-I., Tsao, C.-C., 2012, "Rotary ultrasonic-assisted milling of brittle materials", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Cilt 22, ss. 793-800.

- Kuruc, M., Vopát, T., Peterka, J., 2015, "Surface roughness of poly-crystalline cubic boron nitride after rotary ultrasonic machining", *Procedia Engineering*, Cilt 100, ss. 877-884.
- Li, C., Zhang, F., Meng, B., Liu, L., Rao, X., 2017, "Material removal mechanism and grinding force modelling of ultrasonic vibration assisted grinding for SiC ceramics", *Ceramics International*, Cilt 43, Sayı 3, ss. 2981-2993.
- Liang, Y., Dutta, S. P., 2001, "Application trend in advanced ceramic technologies", *Technovation*, Cilt 21, Sayı 1, ss. 61-65.
- Liu, D., Huang, C., Wang, J., Zhu, H., 2021, "Material removal mechanisms of ceramics turned by abrasive waterjet (AWJ) using a novel approach", *Ceramics International*, Cilt 47, Sayı 11, ss. 15165-15172.
- Liu, D., Huang, C., Wang, J., Zhu, H., Yao, P., Liu, Z., 2014, "Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box–Behnken design", *Ceramics International*, Cilt 40, Sayı 6, ss. 7899-7908.
- Ludwig, C., Rabold, F., Kuna, M., Schurig, M., Schlums, H., 2020, "Simulation of anisotropic crack growth behavior of nickel base alloys under thermomechanical fatigue", *Engineering Fracture Mechanics*, Cilt 224, 106800.
- Miyoshi, K., Kunieda, M., 2016, "Fabrication of micro rods of cemented carbide by electrolyte jet turning", *Procedia CIRP*, Cilt 42, ss. 373-378.
- Mohammed, M. K., Umer, U., Al-Ahmari, A., 2019, "Optimization of Nd: YAG laser for microchannels fabrication in alumina ceramic", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 41, ss. 148-158.
- Natarajan, Y., Murugesan, P. K., Mohan, M., Khan, S. A. L. A., 2020, "Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 49, ss. 271-322.
- Navas, V. G., Sandá, A., Sanz, C., Fernández, D., Vleugels, J., Vanmeensel, K., Fernández, A., 2015, "Surface integrity of rotary ultrasonic machined ZrO₂-TiN and Al₂O₃-TiC-SiC ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt 35, Sayı 14, ss. 3927-3941.
- Okumuş, H., 2017, "Geçmişte ve günümüzde seramiğin kullanım alanları", *Journal of Awareness (JoA)*, Cilt 2, Sayı 3, ss. 1-14.
- Parihar, R. S., Sahu, R. K., Srinivasu, G., 2018, "Effect of wire electrical discharge machining on the functionally graded cemented tungsten carbide surface integrity", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 5, Sayı 14, ss. 28164-28169.
- Parmar, M., James S., 2018, "Experimental and Modeling study of liquid-assisted—laser beam micromachining of smart ceramic materials", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Cilt 2, Sayı 2, ss. 28-39.
- Pramanick, A., Sarkar, S., Dey, P. P., Das, P. K., 2016, "Optimization of wire electrical discharge machining parameters for cutting electrically conductive boron carbide", *Ceramics International*, Cilt 42, Sayı 14, ss. 15671-15678.
- Prasanna, P., Sashank, T. V. S. S. P., Manikanta, B., Aluri, P., 2017, "Optimizing the process parameters of electrical discharge machining on AA7075-SiC alloys", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 4, Sayı 8, ss. 8517-8527.
- Praveen, D. V., Raju, D. R., Raju, M. V. J., 2020, "Optimization of machining parameters of wire-cut EDM on ceramic particles reinforced Al-metal matrix composites—A review", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 23, ss. 495-498.
- Rakshit, R., Das, A. K., 2019, "A review on cutting of industrial ceramic materials", *Precision Engineering*, Cilt 59, ss. 90-109.
- Rao, R. V., Kalyankar V., 2014, "Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt 73, Sayı 5, ss. 1159-1188.
- Rona, N., Yenisey, M., Kucukturk, G., Gurun, H., Cogun, C., Esen, Z., 2017, "Effect of electrical discharge machining on dental Y-TZP ceramic-resin bonding", *Journal of prosthodontic research*, Cilt 61, Sayı 2, ss. 158-167.

- Samanta, S., Chakraborty S., 2011, "Parametric optimization of some non-traditional machining processes using artificial bee colony algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Cilt 24, Sayı 6, ss. 946-957.
- Saravanan, S., Balan, A. V., Dinesh, S., Vijayan, V., 2020, "Electrochemical machining behaviour of AA6063-TiC composites by using response surface methodology", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 592-594.
- Sayar, İ., 2017, "Seramik Tarihçe & Teknoloji & Uygulama", 1. Baskı, Gazi Kitapevi, Ankara, Türkiye.
- Schüler, M., Herrig, T., Bergs T., 2022, "A Study on Abrasive Waterjet Multi-Stage Machining of Ceramics", *Procedia CIRP*, Cilt 108, Sayı 6, ss. 770-775.
- Selvarajan, L., Rajavel, R., Prakash, B., Mohan, D. G., Gopi, S., 2020, "Investigation on spark electrical discharge machining of Si₃N₄ based advanced conductive ceramic composites", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 27, ss. 2174-2178.
- Shaikh, J. H., Jain, N. K., 2014, "Modeling of material removal rate and surface roughness in finishing of bevel gears by electrochemical honing process", *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 214, Sayı 2, ss. 200-209.
- Shanbhog, N., Arunachalam N., Bakshi S R., 2022, "Surface Integrity Studies on ZrB₂ and Graphene Reinforced ZrB₂ Ceramic Matrix Composite in EDM Process", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Cilt 38, ss. 401-413.
- Shibin, R., Anandakrishnan, V., Sathish, S., Sujana, V. M., 2020, "Investigation on the abrasive water jet machinability of AA2014 using SiC as abrasive", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 519-522.
- Singh, R. P., Kataria, R., Kumar, J., Verma, K., Chaudhary, B., Singh, S., 2020, "Investigation of Process Responses in Rotary Ultrasonic Machining of Al/SiC Composite Through Designed Experiments", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 2043-2052.
- Srikanth, D., Rao M. S., 2015, "Application of Taguchi & response surface methodology in optimization for machining of ceramics with abrasive jet machining", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 2, Sayı 4-5, 3308-3317.
- Swift, K., Booker J., 2013, *Manufacturing process selection handbook*, Butterworth-Heinemann, Waltham, Massachusetts, USA.
- Wang, J., Feng, P., Zhang, J., Guo, P., 2018a, "Experimental study on vibration stability in rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: cutting force variation at hole entrance," *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 12, ss. 14386-14392.
- Wang, J., Zhang, J., Feng, P., Guo, P., 2018b, "Damage formation and suppression in rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials: a critical review", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 2, ss. 1227-1239.
- Wang, L., Huang, C., Wang, J., Zhu, H., Liang, X., 2018c, "An experimental investigation on laser assisted waterjet micro-milling of silicon nitride ceramics", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 5, ss. 5636-5645.
- Wang, M., Zhao, G., He, N., Ma, L., Li, L., 2019, "Study on oxidation behavior of spark plasma sintered TiB₂SiC ceramic under laser irradiation", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 7, ss. 8477-8485.
- Xing, Y., Liu, L., Wu, Z., Wang, X., Huang, P., Tang, L., 2018, "Fabrication and characterization of micro-channels on Al₂O₃/TiC ceramic produced by nanosecond laser", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 18, ss. 23035-23044.
- Xue, F., Zheng, K., Liao, W., Shu, J., Miao, D., 2021, "Experimental investigation on fatigue property at room temperature of C/SiC composites machined by rotary ultrasonic milling", *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt 41, Sayı 6, ss. 3341-3356.
- Yu, T., Zhang, Z., Liu, Q., Kuliiev, R., Orlovskaya, N., Wu, D., 2020, "Extrusion-based additive manufacturing of yttria-partially-stabilized zirconia ceramics", *Ceramics International*, Cilt 46, Sayı 4, ss. 5020-5027.

- Zhang, C., Liang, Y., Cui, Z., Meng, F., Zhao, J., Yu, T., 2022a, "Study on the Effect of Ultrasonic Vibration-Assisted Polishing on the Surface Properties of Alumina Ceramic", *Ceramics International*, Cilt 48, ss. 21389–21406.
- Zhang, L., Huang, Z., Liu, Y., Shen, Y., Li, K., Cao, Z., ..., Jian, Y., 2019, "Effect of Ni content on the microstructure, mechanical properties and erosive wear of Mo₂NiB₂-Ni cermets", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 16, ss. 19695-19703.
- Zhang, M., Pang, Z., Jia, Y., Shan, C., 2022b, "Understanding the Machining Characteristic of Plain Weave Ceramic Matrix Composite in Ultrasonic-Assisted Grinding", *Ceramics International*, Cilt 48 Sayı 4, ss. 5557–5573.
- Zhang, Y., Liu, D., Zhang, W., Zhu, H., Huang, C., 2022c, "Hole Characteristics and Surface Damage Formation Mechanisms of Cf/SiC Composites Machined by Abrasive Waterjet", *Ceramics International*, Cilt 48, Sayı 4, ss. 5488–5498.
- Zhao, J., Wong, K. S., Shrotriya, P., 2017, "Hybrid CO₂ laser waterjet heat (LWH) treatment of bindered boron nitride composites with hardness improvement", *Ceramics International*, Cilt 43, Sayı 11, ss. 8031-8039.
- Zhou, C., Wu, X., Lu, Y., Wu, W., Zhao, H., Li, L., 2018, "Fabrication of hydrophobic Ti₃SiC₂ surface with micro-grooved structures by wire electrical discharge machining", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 15, ss. 18227-18234.