

PLAZMA İLE KESİM SİSTEMİ

Harun KILIÇ¹, Orhan ÇAKIR²

¹kilich@tpao.gov.tr TPAO Batman Bölge Üretim Müdürlüğü, 72100 Batman

²ocakir@dicle.edu.tr Dicle Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 2100 Diyarbakır

ÖZET

Normalde yalıtkan olan gazlara belli koşullar altında enerji verilirse bir süre sonra söz konusu gazlar iletken duruma geçip ciddi oranda enerji taşıyabilecek hale gelirler. Bu durum maddenin dördüncü hali olan plazma adı verilir. Altmış yıla aşkın süredir plazma ile kesim imalat sanayinde özellikle iletken malzemelerin kesiminde temel termal kesme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada günümüze kadar plazma kesme yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında geniş bir literatür çalışması yapılarak en önemli olanları detaylı bir biçimde irdelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Plazma , Plazma ile Kesim, Kesim

ABSTRACT

If adequate energy is given under some certain circumstances, nonconductive gases can be turned into conductive gases and therefore they can carry high amount of energy. This 4th state of matter is called plasma. For more than 60 years, plasma cutting technique has been the primary thermal cutting technique, especially for conductive materials, in manufacturing industry. In this study, detail literature survey was conducted and important conclusions have been underlined.

Keywords: Plasma , Plasma Arc Cutting, Cutting

1. GİRİŞ

Maddenin doğada bulunan katı, sıvı ve gaz hallerinin yanı sıra dördüncü hali plazma olarak adlandırılır. Gaz haline enerji verilmesi durumunda normalde yalıtkan olan gaz fazı enerjinin etkisiyle iletkenleşip plazma haline geçer. Enerji kaynağı ısı, ışık ya da elektrik olabilir. Günümüzde plazmalar değişik teknolojiler geliştirilerek imalatta, tıpta, ışıklandırma, televizyonda, enerji üretimde ve benzer alanlarda kullanılmaktadır. [1-3]. Plazma halinin en önemli özelliği çok yüksek sıcaklıkta olması ve ışık yaymasıdır. Kaynak sırasında görülen mavi ışık, yıldırım ve şimşek plazmaya birer örnektir (Şekil 1).



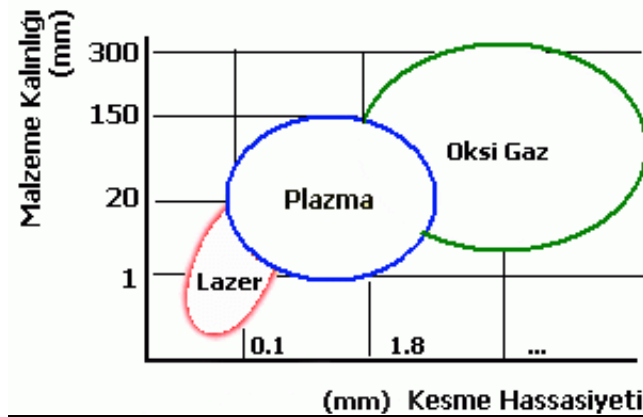
Şekil 1. Plazmanın doğadaki hali şimşek çakması [1]

İmalat teknolojilerinde metallerin temel kesme metotları; kimyasal, termal ve mekanik yöntemler olarak üç gruba ayrılabilir [1]. Her bir metodun diğerleriyle karşılaştırıldığında avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Plazma ile kesme iletken metallerin (özel hallerde yalıtkanlar da kesilebilir) kesiminde kullanılan geleneksel olmayan bir ısıl yöntemdir. Son zamanlarda plazma ark ile kesim bilgisayarlı sistemlerle entegre edilerek (CNC) yüksek kesme hassasiyeti ve kesme hızlarında istenilen parça kesimi yapılabilmektedir [4].

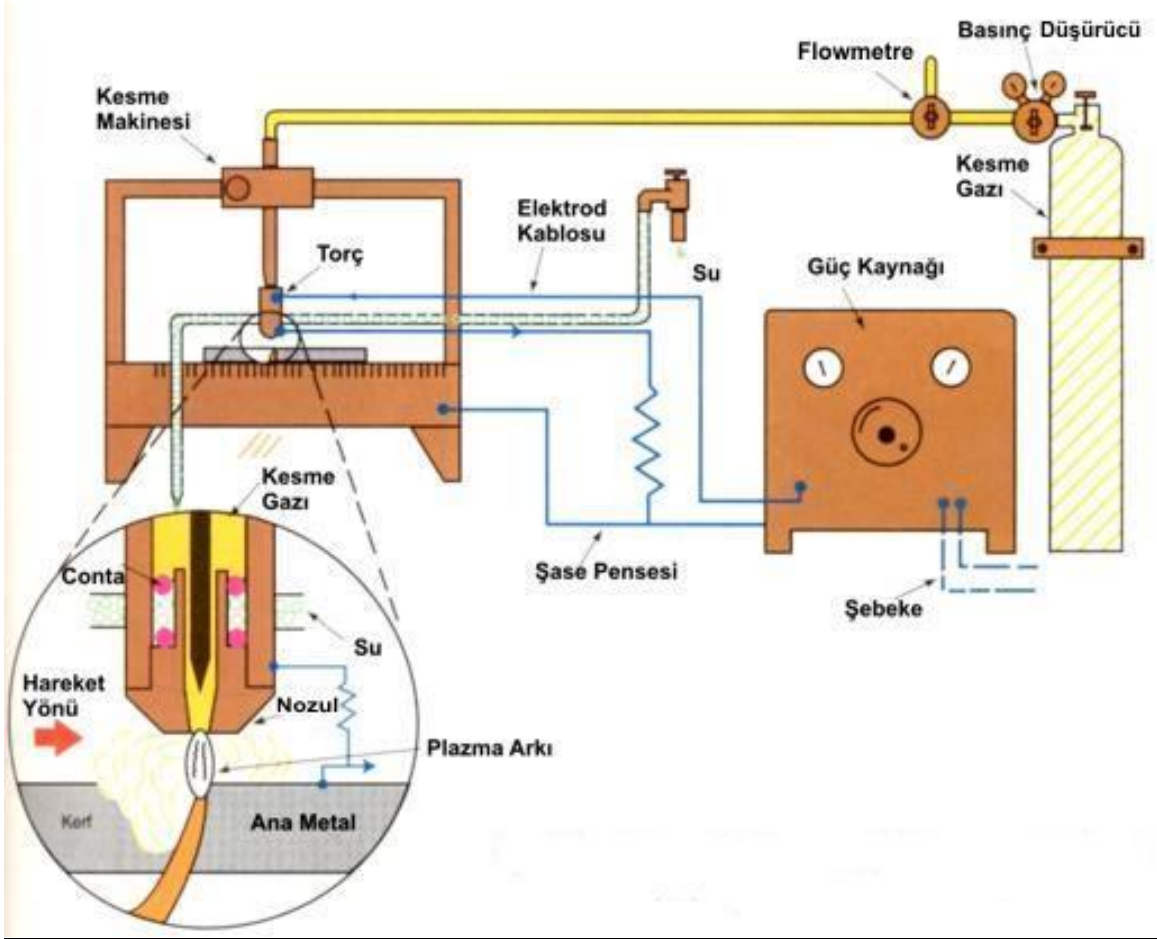
Geleneksel plazma sistemleri 20-150 mm kalınlık aralığında olan malzemelerin kesiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüz hassas plazma sistemleri ise lazer kesme sistemlerinin çalıştığı 1-12 mm malzeme kalınlığı arasında ve lazer sistemlerine yakın hassasiyette kesme yapabilmek yönünde geliştirilmektedirler. Şekil 2'de günümüz termal kesme teknolojileri kesme hassasiyeti ve malzeme kalınlığına göre karşılaştırılmıştır [2] Plazma kesme yönteminde dar bir ağızdan çıkan "yüksek hızlı iyonize gaz jeti" kullanılır. Plazma olarak da adlandırılan "yüksek hızlı iyonize gaz" elektrik akımını kesme torcundan iş parçasına iletir. Oluşan plazma iş parçasını ısıtarak ergimesini sağlar. İyonize gazın sahip olduğu yüksek akış hızı eriyik malzemeyi üfleyerek uzaklaştırır ve kesim gerçekleşir.

Plazma kesme yönteminde dar bir ağızdan çıkan "yüksek hızlı iyonize gaz jeti" kullanılır. Plazma olarak da adlandırılan "yüksek hızlı iyonize gaz" elektrik akımını kesme torcundan iş parçasına iletir. Oluşan plazma iş parçasını ısıtarak ergimesini sağlar. İyonize gazın sahip olduğu yüksek akış hızı eriyik malzemeyi üfleyerek uzaklaştırır ve kesim gerçekleşir.



Şekil 2. Termal kesme metotları [2]

Otomasyona yönelik bir plazma kesme yöntemi genel olarak doğru akım üreten *güç kaynağı*, yüksek frekansta alternatif akım üreten *yüksek frekans ateşleme devresi*, plazma ve koruyucu gazın hızlarını ve karışım oranlarını ayarlayan *gaz konsolu*, içinde plazma gazı ve koruma gazının aktığı, nozul, elektrod, lüle, nozul dış kapağı, koruyucu kafa ve kapağını bir Aradan tutan parçalardan oluşan *torç* dan oluşur [2] (Şekil 3).



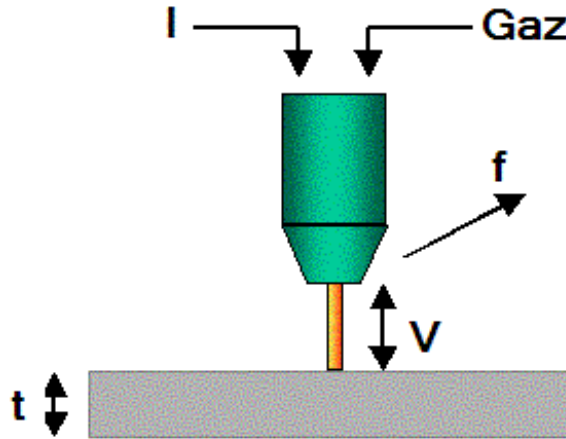
Şekil 3. Plazma kesme sistemi elemanlarının şematik gösterimi [5]

2. PLAZMA İLE KESİM YÖNTEMİ VE İŞLEME PARAMETRELERİ

Plazma kesme sistemindeki temel parametreler gaz, güç kaynağı ve kesme olarak olarak sınıflandırılabilir (Şekil 4). Plazma kesme sisteminde işletme gazı ve koruyucu gaz olmak üzere iki çeşit gaz kullanılır. Bu gazlar kesilen metalin özelliğine göre aynı ya da farklı çeşit gazlar olarak kullanılır. Çeliklerin kesiminde plazma gazı olarak oksijenin kullanımı kesme bölgesinde eriyen malzeme miktarı oksijenin ekzotermik reaksiyonundan dolayı artar. Aynı zaman da oksijen gazı yüzey gerilim kuvvetini düşürerek eriyen metalin kolayca uzaklaşmasına yardımcı olur [6]. Tablo 1 'de Hypertherm HD6070 sisteminde malzeme cinsine göre kullanılan gazlar örnek olarak sunulmuştur.

Tablo 1. HD3070 sistemi gaz tablosu [1,2]

| Malzeme | Plazma Gazı | Koruyucu Gaz |
|--------------------|-------------|--------------------------|
| Karbon Çelikleri | Oksijen | Oksijen ve Azot karışımı |
| Paslanmaz Çelikler | Hava | Hava |
| | H35& Azot | Azot |
| | Hava | Hava & Metan Karışımı |
| Alüminyum | Hava | Metan |
| | H35& Azot | Azot |
| Bakır | Oksijen | Oksijen ve Azot karışımı |



Şekil 4. Plazma ile kesme parametreleri [2]

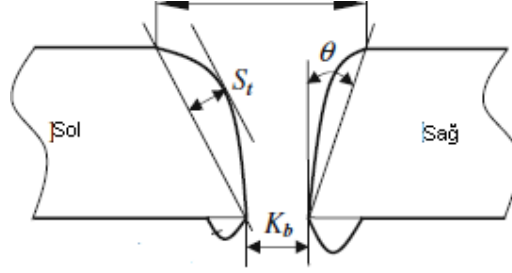
Plazmada gazın debisinin artışı ark kararlılığını olumlu yönde etkileyen en önemli parametrelerden biridir [2]. Güç kaynağı parametreleri ise torç yüksekliği, V ve akım şiddeti, I 'dir. Torç yüksekliği otomasyonlu olan sistemlerde malzeme cinsine ve yapısına göre otomatik belirlenir. Plazma sisteminin gücünü belirleyen parametre akım şiddetidir. Akım şiddetini artırarak daha kalın malzemeler kolaylıkla kesilebilir. Diğer önemli parametrelerden biri olan kesme hızı, f malzeme kesme yüzey kalitesini ve kesim maliyetini etkiler. Plazma hakkında daha geniş bilgi almak için bu konuda yayınlanmış kaynaklara bakmak yararlı olacaktır [7-13].

Son yıllarda lazer kesme ile rekabet edebilmek için üreticiler plazma kesme sistemlerini normalde kaba ve basit olan kesme yüzey kalitesini daha hassas ve karmaşık yapıya dönüştürmek için çok ciddi bir çaba içine girmişlerdir. Geliştirilen teknolojilerin yüksek kesme hassasiyetleri sayesinde, plazma kesmede neredeyse kesim sonrası işçiliği sona erdirecek başarılarla imza atmışlardır [14]. Bu yeni teknoloji "yüksek toleranslı plazma ark sistemleri (HTPAC)" olarak adlandırılır. HTPAC sistemleri torç ekseninde yüksek yoğunluklu enerji meydana getirerek çok dar ve düzgün (karesel) bir kesme yarığı oluşturur [15]. HTPAC üzerindeki araştırmaların temel amacı sistemdeki enerji yoğunluğunu artırıp böylece kaliteden ödün vermeden daha yüksek kesme hızlarına ulaşabilmektir [14-16]. Plazma kesme konusunda çok sayıda araştırma olmasına rağmen sadece birkaç araştırmada kaliteli kesme parametreleri üzerine yoğunlaşmıştır [14]. Bini ve arkadaşları da yüksek güçlü HTPAC torç (200 A DC, max kesme kapasitesi 25 mm) konusunda deneysel bir çalışma

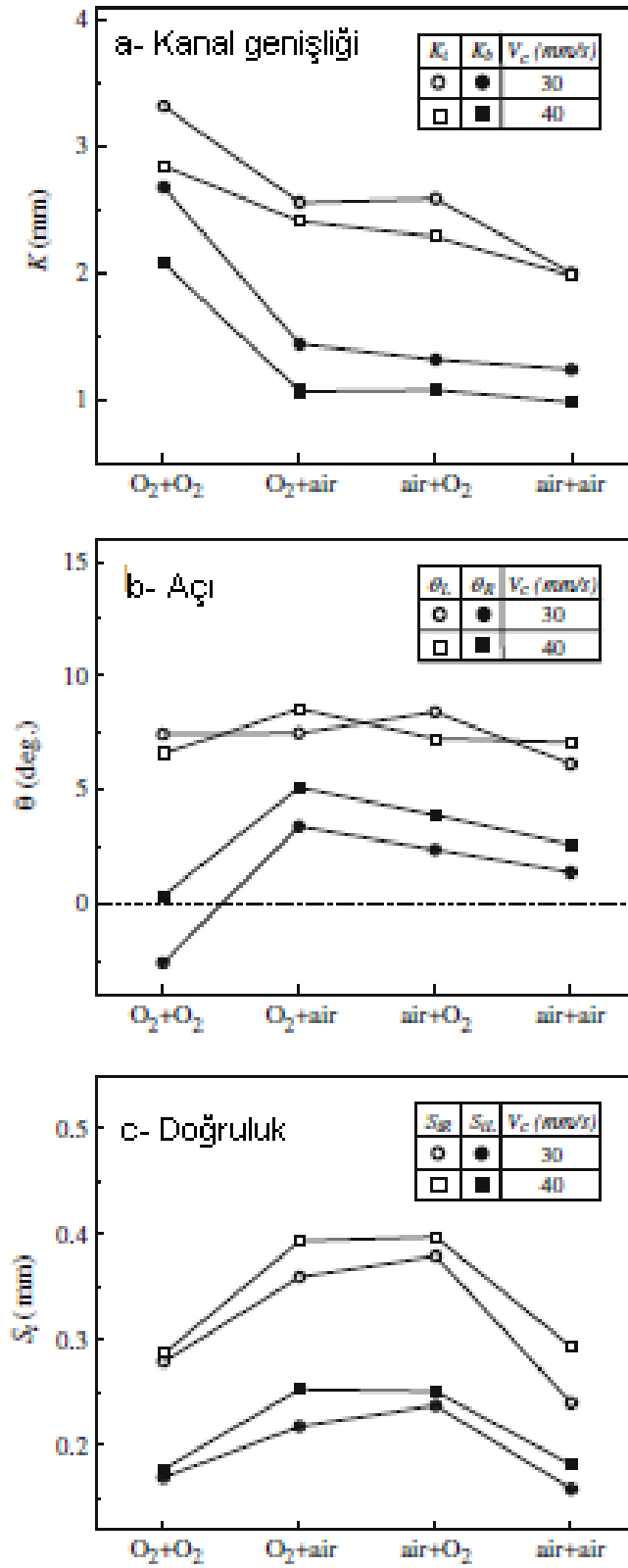
yaparak kesme performansını etkileyen en önemli parametrelerini belirlemeye çalışmıştır. Özellikle endüstride kesme yüzey kalitesine olan ihtiyacın artması (dişli çarklar gibi fonksiyonel yüzeylerin eldesi.) söz konusu parametrelerin önemi bir kat daha artırmıştır.

Bini ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada deney parçası olarak 15 mm kalınlığındaki karbon çelik plakayı kullanarak kestikleri yüzeyin düzgünlüğünü ölçerek buna etki eden faktörleri bulamaya çalışmıştır. Yaptıkları çalışmaya göre ark voltajını kesme yüzey kalitesini etkileyen en önemli parametre olarak tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra kesme hızının da yüzey kalitesi üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişler. Yapılan deneyin sonucuna kesme hızı azaltılarak göre kesme yüzey kalitesi artırılabilir. Kesme hızı ve ark voltajının optimizasyonu ile çok kaliteli yüzeyler elde edilebilir [14].

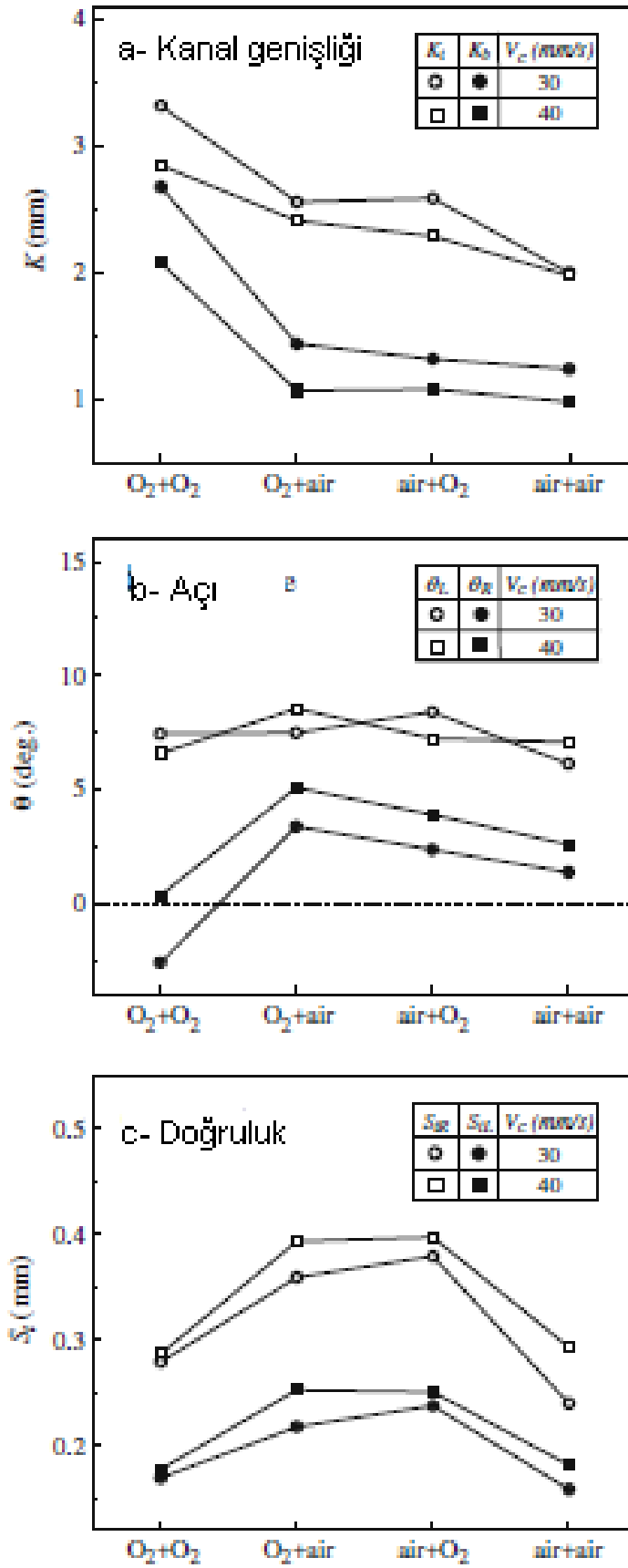
Wang ve arkadaşları [17] yaptıkları çalışmada çift girdaplı (dual swirling) bir plazma kesme sistemi için üç boyutlu nümerik kontrollü bir sistem oluşturarak kesme enerji parametrelerini ve işletme gazlarının kesme kalitesi üzerindeki etkisini deneysel olarak tespit etmeye çalışmıştır. Buna göre kesme hızının artması ve ark akımının azalmasıyla; kesme genişliğinin azaldığı, eğim ve yüzey düzgünlüğünün arttığı deneysel sonuçlar olarak elde edilmiştir. Ayrıca deneyde kesme hızı, ark akımı ve plazma gazlarının değişik kombinasyonlarının kesme parametreleri üzerindeki etkisi araştırılarak sonuçlar grafiklerle detaylı bir biçimde açıklanmıştır (Şekil 5-8).



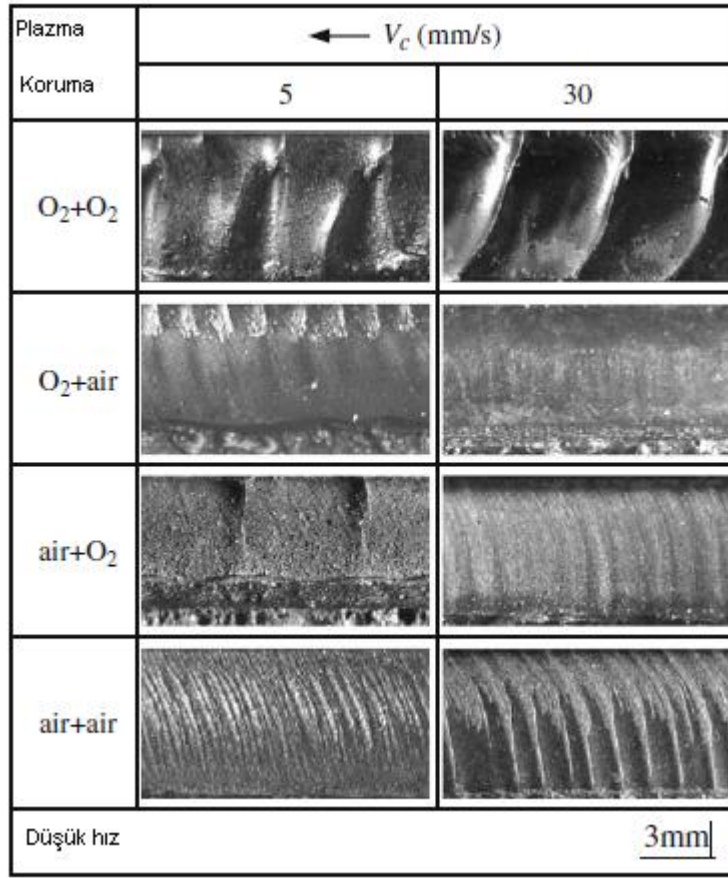
Şekil 5. Şekil kesme faktörleri [17]



Şekil 6. Kesme enerjinin kanal üzerindeki etkisi (h=3mm) [17]



Şekil 7. İşletme gazların kerf üzerindeki etkisi ($I_a=60$ A ve $h= 2$ mm) [17]

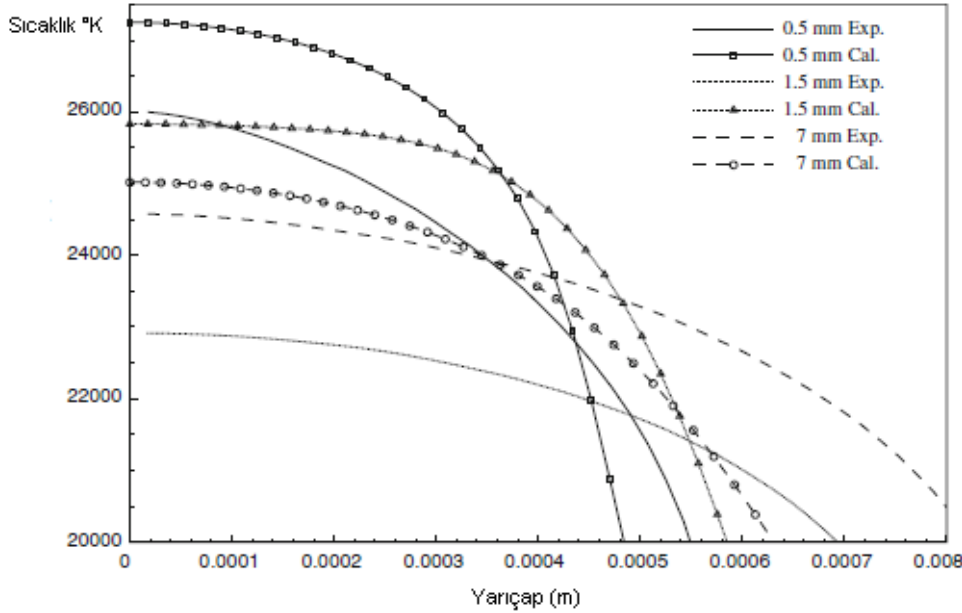


Şekil 8. Farklı İşletme Gazlarının Kesme Yüzey Üzerindeki Etkisi ($I_a=60$ A ve $h= 2$ mm) [17]

Peters ve arkadaşarı [25] plazma özellikleriyle kesme performansı arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilmek adına bir deneysel çalışma yaparak plazma sıcaklığı ve gaz kompozisyonun etkilerini spektroskopik teknik kullanılarak 200 amp oksijen plazma sistemi için ölçmüşler. Bunların yanında ark simetriği ve kesme yüzey kalitesi de aynı teknik kullanılarak ölçülmüş ve sonuçlar irdelenmiştir. Elde edilen datalar göre ark simetrisinin torç ve diğer aparatların pozisyonuna bağlı olarak değiştiği ve söz konusu simetrisinin kesme yüzey kalitesini ciddi şekilde etkilediği ortaya konmuştur.

Plazma kesme sisteminde kesme parametrelerinin sonucu nasıl etkilediği uzun yıllar süren uzun uğraşlar sonucunda yapılan deneysel çalışmalarla tespit edilemeye çalışılmıştır. Yeni yapılacak bir sistemde olası sonuçları imalata başlamadan ön görmek ancak bu konuda uzman kişilerin tecrübelerine bağlı kalmalarına neden olmuştur. Bu nedene özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişimiyle birlikte plazma kesme sisteminde de değişik modelleme ve simülasyonlar yapılarak olası sonuçlar çok az bir hatayla tahmin edilmeye çalışılmıştır [10,18-24]. Bu kapsamda Zhaou ve arkadaşarı [18] daha önce hiç çalışılmamış nozul boyu, ark akımı ve gaz debisinin kesme karakteristiği üzerindeki etkisini anlamak için momentum ve enerji korunumu ilkesini kullanarak matematiksel bir modelleme yapmışlardır. Yaptıkları modellemeyi daha önce aynı konuda yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırarak güvenilirliğini test etmişlerdir (Şekil 9). Zhaou ve arkadaşarının yaptıkları çalışmaya göre nozul boyunun uzaması torç içindeki sıcaklığı azaltırken buna karşılık nozul çıkış ağzından daha uzak bir noktada daha güçlü şok dalgası meydana gelir. Daha güçlü şok dalgası eksen etrafında daha yoğun bir enerji meydana getirir. Böylece nozul boyu; ark voltajının ve dolayısıyla ark enerjisinin artmasına neden olarak kesme hızı ve kesme kalitesi olumlu yönde etkileyecektir. Aynı şekilde ark akımının da kesme hızını ve ısı tesiri altındaki alanı ciddi şekilde etkilediği vurgulanmıştır. Diğer bir ifade ile ark akımının artması kesme hızı ve plazmanın sıcaklığını

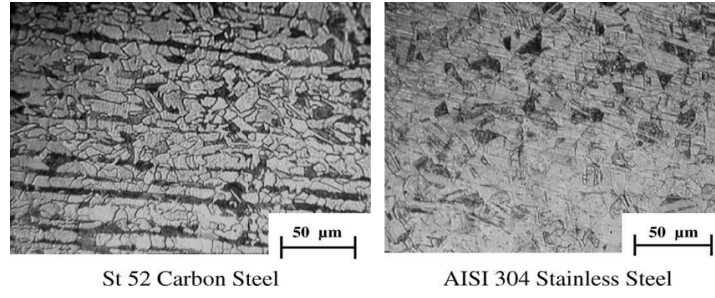
artırarak daha fazla enerjinin kesme parçasına transfer edilmesini sağlayacaktır. Zhou ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmanın üçüncü ayağını oluşturan gaz debisinin; şok dalgasının uzamasına, sıcaklık ve hızın artmasına neden olarak enerjinin torç eksenine etrafında yoğunlaşarak kesme hızı ve kesme kalitesine olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir.



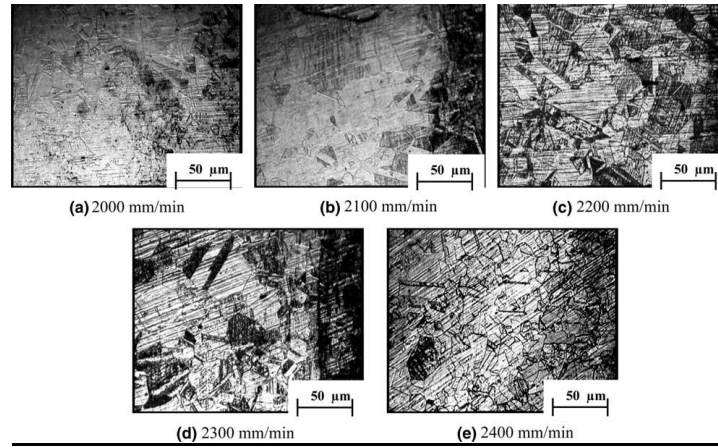
Şekil 9. Nozul çıkışındaki sıcaklık dağılım profiline hesaplanan ve deneysel sonuçların karşılaştırılması [18]

Plasma kesme işlemindeki önemli problemlerden biri, ortaya çıkan ısı transferinden dolayı malzemenin kesim esnasında ısınması ve daha sonra soğumadan dolayı malzemede oluşan deformasyondur. Bu deformasyondan dolayı kesilen yüzey tam dikdörtgen değil de yuvarlak bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu durum, ileride metalde yapılacak işlemler için ciddi zorluklara yol açmaktadır. Narimanyan [26] de plasma kesme sisteminde bir çalışma parçasının plasma kesme esnasındaki sıcaklık dağılımı ve kesilen yüzey geometrisi konusunda matematiksel modelleme geliştirerek bu modellemeyi sonlu elemanlar metoduyla karşılaştırarak sonucu teyit etmiştir. Yapılan modelleme, kesim esnasında meydana gelebilecek fiziksel değişimleri örneğin ısının taşınımı, iletimi ve radyasyon etkisi, mekanik deformasyonlar ve faz değişimleri gibi konularda sayısal simülasyonlar kullanılarak sonuçlar sonlu elemanlar ve yapılmış deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur.

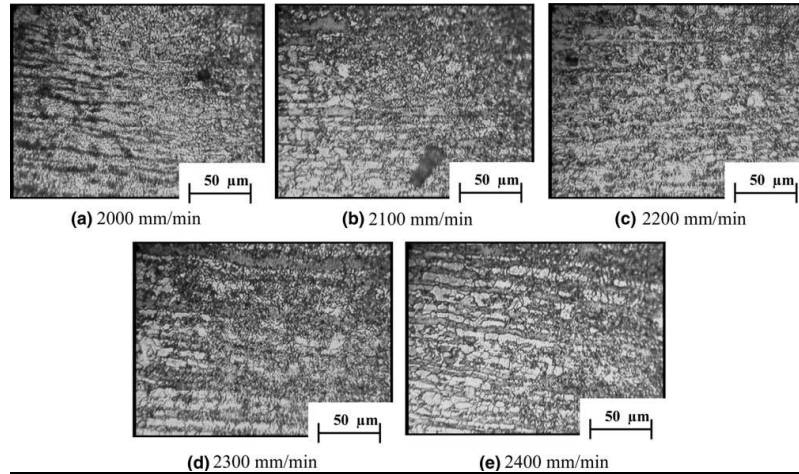
Plasma kesme sistemi termal bir yöntem olduğundan kesilen malzemelerin ısının tesiri altında kalan kısımlarında tane yapısında bir değişime neden olur. Bu değişim malzemenin fiziksel özelliklerini etkiler. Gullu ve arkadaşı [27] plasma kesmenin kesilen parçada oluşan yapısal değişikliği ve sertliği belirlemek amacıyla 304 paslanmaz çelik ve St52 karbon çelik malzemelerle plazma deneyi yapmıştır. Kesilen parçaların kesme yüzeylerin mikro yapısını incelemek için mikro yapı fotoğrafı çekilmiş ve aynı yüzeyde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler kesimden önce ve sonra yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 10-12).



Şekil 10. Örneklerin orijinal mikro yapıları [27]



Şekil 11. 304 paslanmaz çeliğin kesimden sonraki mikro yapısı [27]



Şekil 12. Karbon çeliğinin kesimden sonraki mikro yapısı [27]

Yapılan deney sonuçlarına göre kesme hızının mikro yapı üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Farklı kesme hızları malzeme mikro yapı üzerinde aynı etkiye sahiptir ancak kesme hızının artışı ısının tesiri altındaki bölgenin genişlemesine neden olduğu tespit edilmiştir (bkz tablo 1). Bunun yanında kesme hızının malzeme sertliğine olan etkisi araştırılmış sonuçta kesimden sonra kesme yüzeyinde sertlik artmıştır. Ayrıca paslanmaz çeliği karbon çeliği göre ısıdan daha çok etkilendiğin kesme yüzeyi sertliği paslanmaz çelikte daha çok görülmüştür.

Plazma kesme normalde iletken malzemelerin kullanılır. Ancak gelişen teknolojiler sayesinde birkaç düzenlemeyle yalıtkan malzemeler de örneğin kompozit malzemelerin plazma ile kesimi mümkün hale gelmektedir. Iosub ve arkadaşları [28] plazma kesimin laminar kompozit bir malzeme üzerindeki etkisini (erime sıcaklığı, kompozit yapıdaki bozulmalar, ısının tesiri altındaki bölgeler...) belirlemek için bir deney yapmışlardır. Deney alt ve üst plakası 0.3 mm Al ile orta tabası polietilen olan bir sandviç panel üzerinde yapılmış.

Yapılan deneysel çalışmada CNC plazma makinasının giriş parametreleriyle oynayarak (güç, kesme hızı, ark voltajı...) kesilen malzemenin yüzey kalitesini ölçmüşlerdir. Elde edilen deney sonuçlarına göre plazma ile kesimde erime noktası Al'ye göre daha düşük olana polietilenin düşük plazma kesme hızında akma yaptığı ve kesilen yüzey kalitesinin düştüğü görülmüştür. Eğer plazma kesme yöntemi söz konusu malzeme için kullanılacaksa kesme yüzey kalitesini artırmak için yüksek kesme hızı ve optimum besleme voltajında çalışmak gereklidir [28]. Ancak bu tür kompozit plakanın kesiminde ısı tesirinin olması su jeti gibi kesme sisteminin tercih edilmesi daha faydalı olacaktır.

Tablo 1. Kesme hızının ITAB'a etkisi [27]

| Malzeme cinsi | Örnek numarası | Kesme hızı (mm/dk) | Isıdan etkilenen bölge (mm) |
|---------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|
| 304 paslanmaz çelik | 1 | 2400 | 0.428 |
| | 2 | 2300 | 0.403 |
| | 3 | 2200 | 0.397 |
| | 4 | 2100 | 0.413 |
| | 5 | 2000 | 0.429 |
| St52 karbon çelik | 1 | 2400 | 0.374 |
| | 2 | 2300 | 0.356 |
| | 3 | 2200 | 0.341 |
| | 4 | 2100 | 0.373 |
| | 5 | 2000 | 0.482 |

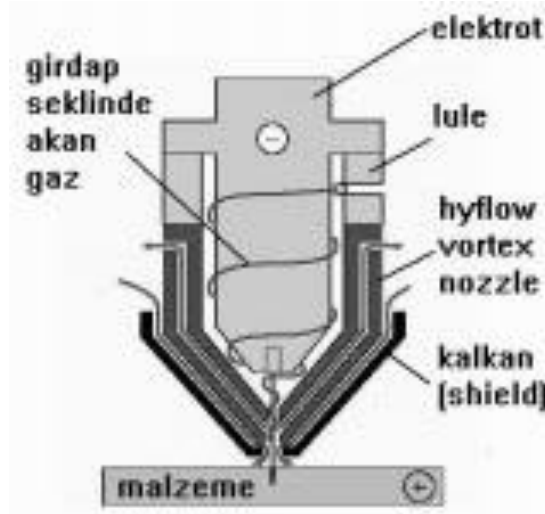
Plazma kesme sistemi 1940 yılından bu güne kadar çok büyük değişimler kaydetmiş ve bu alanda çeşitli firmaların yaptıkları araştırma ve gelişme sonucu bir sürü patentlik çalışmalar yapılmıştır. Thermal Dynamic firması ilk düşük akım şiddetli hava plazma ile çalışan ve "Zip Cut" diye adlandırılan SAF sistemlerini 1980 yıllarında Avrupa'ya sunmuş ve bu gelişme plazma kesme sistemlerinde ciddi gelişmelerin önünü açmıştır [2].

Plazma ile kesimde kalite ve verimliliği artırmak adına yapılan faaliyet sonucunda "high density plasma cutting", yüksek yoğunluklu plazma teknolojisi ortaya çıktı [1,2]. Bu teknoloji ile yüksek enerji yoğunluğu sayesinde daha ufak çaplı, konsantre ve kararlı bir plazma ark elde edilir [2]. Böylece hem kesme kalitesinde hem kesme hızında çok iyi sonuçlar elde edilebilir.

Komatsu-Cutting Technologies Division firması tarafından 1989 yılında patenti alınan ve "Razor-Fine Plasma Cutting" diye adlandırılan sistem, bilinen girdap şeklindeki gaz akışına ek olarak mıknatıslama ile yaratılan Lorentz kuvvetleriyle (manyetik alan oluşumu ile) plazma arkını kararlı halde ve konsantre halde tutar [2]. Bu sistem 1990 yılında Hypertherm firması tarafından geliştirilerek Lorentz kuvvetleri yerine nozul ve seramik lüle tasarımlarıyla elektrot etrafında daha güçlü akımlar oluşturup ark kararlılığı ve sürekliliği artırılmıştır (Şekil 11) [2].

Kalkan teknolojisi olarak adlandırılan seramik kaplı izole dış kapak teknolojisi ise nozul ve malzeme arasında bir kalkan oluşturarak kesim esnasında oluşan ve sıçrayan ergimiş malzemenin nozula yapışmasına engel olduğu gibi seramik kaplama nedeni ile nozul ve malzeme arasında oluşabilecek

olası ikinci bir ark etkisini engeller [2]. Böylece daha yakın standoff değerinde çalışılabilir ve nozul ömrü de uzatılmış olur.



Şekil 11. HyDefinition teknolojisi[1]

3. SONUÇ

Plazma ile kesim diğer temel termal kesme yöntemleri olan Oksi gaz ve lazer ile karşılaştırıldığında düşük işletme ve yatırım maliyetleri, otomasyona uygunluğu malzeme kalınlığına göre optimum kesme performansına sahiptir. Plazma kesme parametreleri olan gaz, güç kaynağı ve kesme hızı düzgün ayarlandığında çok düzgün kesme yüzey kalitesi elde edilebilir. Gelişen teknolojik sanayi sisteminde plazma ile kesimin daha önce olduğu gibi bundan sonra da vazgeçilmez bir kesme yöntemi olarak kalmaya devam edecektir.

4. KAYNAKÇA

- [1] www.hyperthem.com
- [2] KUTLU A.E., MONNO M., BINI R., Plazma ile kesme metoduna genel bir bakış, **Mühendis ve Makine** Cilt 46, Sayı: 541, (2005)
- [3] www.plazmas.org
- [4] ILII S.M., COTEATA M., Plazma arc cutting cost, **Int J Mater Form**, Vol. 2 Suppl 1:689-692 (2009)
- [5] www.yildizkaynak.com.tr
- [6] RAMAKRISHNAN, S., SHRINET, V., POLIVKA, F.B., KEARNEY, T.N., KOTLUN P., Influence of gas composition on plasma cutting of mild steel, **J. Phys. D: Appl. Phys.** 33,2288-2299 (2000)
- [7] FFRETON, P., GONZALEZ, J.J., GLEIZES A., PEYRET, F.C., CAILLIBOTTE, G., DELZENNE, M., Numerical and experimental study of a plasma cutting torch, **J Phys D: Appl Phys** 35:115 (2002)

- [8] PETERS, J., HEBERLINE, J., LINDSAY, J., Spectroscopic diagnostics in a highly constricted oxygen arc, **J Phys D: Appl Phys** 40:3960 (2007)
- [9] FRETON, P., GONZALEZ, J.J., PEYRET, F.C., GLEIZES, A., Complementary experimental and theoretical approaches to the determination of the plasma characteristics in a cutting plasma torch. **J Phys D: Appl Phys** 36:1269 (2003)
- [10] RAMAKRISHNAN, S., ROGOZINSKI, M.W. , Properties of electric arc for metal cutting. **J Phys D: Appl Phys** 30:636 (1997)
- [11] PARDO C., GONZALEZ-AGUILAR J., RODRIGUEZ-YUNTA A., CALDERON M.A.G, Spectroscopic analysis of an air plasma cutting torch, **J Phys D: Appl Phys** 32:2181 (1999)
- [12] FRETON, P., GONZALEZ, J.J., GLEIZES, A., PEYRET, F.C., CAILLIBOTTE, G., DELZENNE M., Numerical and experimental study of a plasma cutting torch, **J Phys D: Appl Phys** 35:115 (2002)
- [13] GIRARD, L., TEULET, P., RAZAFINIMANANA, M., GLEIZES, A., CAMY-PEYRET F., BALLOT, E., RICHARD, F., Experimental study of an oxygen plasma cutting torch, I. Spectroscopic analysis of the plasma jet, **J Phys D: Appl Phys** 39:1543 (2006)
- [14] BINI, R., COLOSIMO, B.M., KUTLU, A.E., MONNO, M., Experimental study of the features of the kerf generated by a 200 A high tolerance plazma arc cutting system, **Journal of Materials Processing Technology** 196 345-355 (2008)
- [15] HARIS D., LOWERY J., High tolerance plasma arc cutting, **Weld. World** 37 (6), 283-287 (1996)
- [16] MATSUYAMA, K., Current status of high tolerance plasma arc cutting in Japan, **Weld. World** 39 (4), 165-171 (1997)
- [17] JIAYOU, W., ZHENGYU, Z., CONGHUI, H., FENG, Y., Effect of dual swirling plasma arc cutting parameters on kerf charactersitics. **Int J Mater Form** 4:39-43 (2011)
- [18] QIANHONG, Z., HUI, L., FENG, L., SHAOFENG, G., WENKANG, G., PING, X., Effects of nozzle lenth and parameters on higly consricted oxygen plasma cutting arc, **Plasma Chem Plasma Proces** 28:729-747 (2008)
- [19] FRETON P., GONZALEZ J.J., PEYRET F.C., GLEIZES A., Complementary experimental and theoretical approaches to the determination of the plasma characteristics in a cutting plasma torch. **J Phys D: Appl Phys** 36:1269 (2003)
- [20] FRETON P., GONZALEZ J.J., GLEIZES A., PEYRET F.C., CAILLIBOTTE G., DELZENNE M., (2002) Numerical and experimental study of a plasma cutting torch, **J Phys D: Appl Phys** 35:115
- [21] GONZALEZ-AGUILAR, J., PARDO, C., RODRIGUEZ-YUNITA, A., CALDERON, M.A.G., A theoretical study of a cutting air plasma torch, **IEEE Trans Plasma Sci** 27:264 (1999)
- [22] GHORUI, S., HEBERLEIN, J.V.R., PFENDER, E., Non-equilibrium modelling of an oxygen-plasma cutting torch. **J Phys D: Appl Phys** 40:1966 (2007)
- [23] COLOMBO, V, CONCETTI, A., GHEDINI, E., DALLVALLE, S., VANCINI, M., Understanding plasma fluid dynamics inside plasma torches through advanced modeling, **IEEE Trans Plasma Sci** 36:389 (2008)

- [24] PATANKAR S.V., **Numerical heat transfer and fluid flow**, New York, McGraw-Hill (1980)
- [25] PETERS, J., BARLETT, B., LINDSAY, J., HEBERLEIN, J., Relating spectroscopic measurement in a plasma cutting torch to cutting performance, **Plasma Chem Plasma Process**, 28:331-352 (2008)
- [26] NARIMANYAN, A., Unilateral conditions modelling the cut front during plasma cutting: FEM solution, **Applied Mathematical Modelling** 33, 176-197 (2009)
- [27] GULLU, A., ATICI, U., Investigation of the effect of plasma arc parameters on the structure variation of AISI 304 and St 52 steels, **Materials and Design** 27, 1157-1162 (2006)
- [28] IOSUB, A., NAGIT, Gh., NEGOESCU, F., Plasma cutting of composite materials, **Int J Mater Form Suppl** 1:1347-1350 (2008)