

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BUJİLERDE KIVILCIM EROZYONU
ve
KIVILCIM EROZYONUNA KARŞI MALZEME SEÇİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Muhammed Tolga SÜTCÜ**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : İMALAT PROGRAMI

MAYIS 2002

**BUJİLERDE KIVILCIM EROZYONU
ve
KIVILCIM EROZYONUNA KARŞI MALZEME SEÇİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Muhammed Tolga SÜTCÜ
503001301**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hasan Oktay BODUR
Diğer Jüri Üyeleri Y.Doç.Dr. Şafak YILMAZ
Prof.Dr. Ertuğrul ARSLAN**

MAYIS 2002

ÖNSÖZ

Sunulan bu tez ile ilgili çalışmalarım süresince bilgi ve yardımlarından faydalandığım hocam Prof. Dr. H. Oktay BODUR 'a, Deneysel çalışmalarım sırasında yardımları dolayısı ile Mak.Yük.Müh. Lars Uwe Menken 'a, Dr. Klaus Peter Hrastnik 'e ve Sylvain Houy 'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarına ortam sağlayan **Robert Bosch GmbH** 'a ve Feuerbach-Stuttgart'ta ki tüm Buji Araştırma Geliştirme Bölümü'ne teşekkürlerimi borç bilirim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi yönden beni destekleyen aileme ve her an yanımda hissettiğim dostlarıma özellikle teşekkürlerimi sunarım.

MAYIS 2002

Muhammed Tolga SÜTCÜ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	IV
ŞEKİL LİSTESİ	V
TÜRKÇE ÖZET	VII
SUMMARY	IX
1. GİRİŞ	1
2. BUJİ TEKNOLOJİSİ	2
2.1 Kıvılcım Ateşlemeli Motorda Yanma	2
2.2 Kıvılcım Ateşlemeli Motorda Ateşleme	3
2.3 Bujilerde Çalışma Koşulları	5
2.4 Buji Konstrüksiyonu	7
2.5 Bujilerin Çalışma Karakteristikleri	13
3. KIVILCIM EROZYONU	15
3.1 Kıvılcım Erozyonu Temel Prensibi	15
3.2 Elektro Erozyon ve Kıvılcım Erozyonu Temel Prensipleri	16
3.3 Kıvılcım Erozyonundaki Bazı Parametreler	21
3.4 Kıvılcım Erozyonunun Malzeme Üzerine Etkisi	24
3.5 Elektro Erozyon ile Bujilerdeki Kıvılcım Erozyonunun Karşılaştırılması	27
4. KIVILCIM EROZYONU ile PARAMETRELER ARASI İLİŞKİ	31
4.1 Giriş	31
4.2 Kıvılcım Erozyonu Malzeme İlişkisi	32
4.3 Deney Metotları ve Dizayn	33

4.4	Deneylerin Yapılışları	35
4.5	Deney Sonuçları	37
5.	BUJİLERDE KIVILCIM EROZYONU DENEYİ	44
5.1	Deneylerin Amaçları	44
5.2	Bujilerde Kıvılcım Aşınmasının Önemi	45
5.3	Deneylerde Kullanılan Malzemeler	49
5.4	Deney Düzenegi	52
5.5	Deney Parçalarının Hazırlanması	56
5.6	Deneyin Yapılışı	58
5.7	Ölçümler	60
5.8	Sonuçlar ve Değerlendirmeler	64
5.9	Tartışma ve Öneriler	74
6.	GENEL SONUÇLAR	76
	KAYNAKLAR	77
	ÖZGEçMİş	79

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Dört zamanlı motorlarda bujilerin maruz kaldığı basınç ve sıcaklıklar.....	6
Tablo 5.1. Kıvılcım erozyonu deney malzemeleri.....	50
Tablo 5.2. Deneyde geçen çeşitli elementlerin ergime ve kaynama sıcaklıkları.....	51
Tablo 5.3. Tüm deneyler sonucu ortalama birim kıvılcım başına aşınma miktarları.....	67
Tablo 5.4. Malzemelerin aşınma dolayısı ile kıvılcım maliyetleri.....	67
Tablo 5.5. Nikel alaşımlarda ortalama birim kıvılcım başına aşınma miktarları.....	70
Tablo 5.6. Deney düzeneği ve motor sürüşü aşınma değerleri.....	73

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Dört zamanlı Otto motorunun çalışması.....	2
Şekil 2.2 : Elektronik ateşleme sistemi.....	3
Şekil 2.3 : Buji elektrotları arası gerilim.....	4
Şekil 2.4 : Buji konstrüksiyonu.....	7
Şekil 2.5 : Kompozit elektrotlu bujiler.....	10
Şekil 2.6 : Bujilerde elektrot düzeni.....	10
Şekil 2.7 : Bujilerde kıvılcım aralığı.....	10
Şekil 2.8 : Merkez elektrot malzemesine göre buji dizaynı.....	11
Şekil 2.9 : Bujilerin çalışma sıcaklıkları.....	12
Şekil 2.10 : Bujilerde elektrot aşınması.....	14
Şekil 3.1 : Basit elektro erozyon şeması.....	17
Şekil 3.2 : Kıvılcım erozyonu oluşumu ile gerilim ve akım değişimi.....	18
Şekil 3.3 : Kıvılcım altındaki elektrot yüzeyi.....	19
Şekil 3.4 : Kıvılcım erozyonu sonucu yüzey pürüzlülüğü.....	20
Şekil 3.5 : Akım, puls süresi, duraklama süresi ile elektrot aşınması.....	22
Şekil 3.6 : Boşalma enerjisi ile yüzey pürüzlülüğü değişimi.....	23
Şekil 3.7 : Ateşleme periyodu ile malzeme aşınması, karşıt elektrot aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değişimi.....	25
Şekil 3.8 : Kıvılcım erozyonuna maruz kalmış UHB Rigor, HRC 57.....	25
Şekil 3.9 : Elektro erozyonla işlenmiş bir parça iç yapısı.....	26
Şekil 3.10 : Elektro erozyonla işlenmiş bir takım çeliği yüzeyi. Ro=32 µm...	27
Şekil 4.1 : Deney parçaları solda 175 µm kıvılcım aralıklı sağda 2 mm kıvılcım aralıklı.....	34
Şekil 4.2 : 175 µm kıvılcım aralıklı deney parçası TEM fotoğrafı.....	39
Şekil 4.3 : 2 mm kıvılcım aralıklı deney parçası TEM fotoğrafı.....	39
Şekil 4.4 : Screen printing yöntemi ile hazırlanmış nikel numune deney öncesi TEM fotoğrafı.....	41
Şekil 4.5 : Malzemelere göre kıvılcım adedi ile hacimsel aşınma grafiği.....	41
Şekil 4.6 : TEM ile nikel elektrot fotoğrafları sol deney öncesi, sağ deney sonrası.....	43
Şekil 4.7 : TEM ile gümüş elektrot fotoğrafları sol deney öncesi, sağ deney sonrası.....	43
Şekil 4.8 : TEM ile platin elektrot fotoğrafları sol deney öncesi, sağ deney sonrası.....	43
Şekil 4.9 : TEM ile solda elektro kaplama nikel elektrot fotoğrafı, sağda elektrottan ayrılarak cam üzerinde yoğunlaşmış parçacıklar.....	43

Şekil 5.1	: Elektrot aralığı ile ateşleme gerilimi arası ilişki.....	46
Şekil 5.2	: Çeşitli malzemeler için kıvılcım erozyonu deneyi Uz ölçümleri..	48
Şekil 5.3	: Kıvılcım erozyonu deney düzeneği.....	52
Şekil 5.4	: Odanın yakın görünüşü üst resim önden, alt resim arkadan.....	54
Şekil 5.5	: Kızdırma bujisi üzerine kaynak edilmiş deney parçası.....	57
Şekil 5.6	: Güç-Sıcaklık bağıntısı grafiği ve sıcaklık ölçüm noktası.....	61
Şekil 5.7	: Deney parçaları renkli fotoğrafları.....	63
Şekil 5.8	: Deney parçaları aşınma ölçümü.....	64
Şekil 5.9	: Değerli metal grubu kıvılcım başına aşınma miktarları.....	65
Şekil 5.10	: Değerli metal grubu kıvılcım başına aşınma miktarları ortalama değerler.....	65
Şekil 5.11	: Nikel alaşımları grubu kıvılcım başına aşınma miktarları.....	69
Şekil 5.12	: Nikel alaşımları grubu kıvılcım başına aşınma miktarları ortalama değerler.....	69
Şekil 5.13	: Deney parçası uç sıcaklığı-Aşınma grafiği.....	72
Şekil 5.14	: Farklı deney malzemeleri deney sonu aşınma yüzeyi görünümleri.....	74

“BUJİLERDE KIVILCIM EROZYONU ve KIVILCIM EROZYONUNA KARŞI MALZEME SEÇİMİ”

ÖZET

Kıvılcım elektrot vazifesi gören iki eleman arasında oluşan gerilim farkı dolayısı ile oluşur. Gerilim farkı elektrotlar arasındaki yalıtkan ortamda bir elektriksel alan oluşturur. Bu elektriksel alanda elektrotlar arasında iletken bir köprü oluşturur ve bu köprü aracılığı ile elektrotlar arasından bir akım geçer. Boşalma olarak isimlendirilen bu akım geçişine kıvılcım denir. Doğada kıvılcımın en güzel örneği yıldırımdır. Kıvılcım 8000 °C ila 12000 °C arasında bir sıcaklığa sahiptir. İşte bu sıcaklık dolayısı ile kıvılcım oluşan elektrotların yüzeyinde her kıvılcım ile bir kratercik oluşur. Tekrar eden kıvılcımlarla birlikte bu kratercikler önemli ölçüde bir aşınma oluşturur. İşte bu aşınmaya kıvılcım erozyonu denir. Kıvılcım endüstride yaygın olarak elektro erozyon tekniğinde parça işlemek amacı ile kullanılırken ateşleme sistemlerindeki elektrotlarda meydana gelen aşınma ise sistemin fonksiyonlarını yerine getirmesini engellediği için ayrı bir inceleme konusudur.

Bujiler 1902 yılından beri Otto motorlarda ateşleme işlevini yerine getirmektedir. Bujinin iki elektrot grubundan merkez elektrota ateşleme bobini tarafından ateşleme gerilimi uygulanırken, ana elektrotlar motor bloğu aracılığı ile topraklanmıştır. Bujinin elektrotları arasında oluşan gerilim farkı kıvılcım oluşmasına ve bu kıvılcımda yanma odasındaki hava-yakıt karışımının ateşlenmesine sebep olur. Bujilerin çalışma ömrünü belirleyen etkenlerden birisi olması dolayısı ile kıvılcım erozyonu araştırma konusu olmuştur.

Bujilerde ateşleme için gerekli gerilim elektrotlar arası minimum mesafe ile orantılıdır ki bu mesafeye kıvılcım aralığı denir. Bujilerin kıvılcım aralıkları çeşitlerine göre 0,7 mm ile 1,2 mm arasında değişmektedir. Kıvılcım aralığı arttıkça kıvılcımın oluşması için gerekli gerilim de artar. İşte kıvılcım erozyonunun bujinin çalışma ömrü üzerindeki etkisi burada devreye girmektedir. Kıvılcım erozyonu ile birlikte kıvılcım aralığı genişlemekte dolayısı ile kıvılcım için gerekli gerilim artmaktadır. Ateşleme bobini bujiye gerekli gerilimi sağlayan ünitedir. Ateşleme bobini bujiye 30.000 volta kadar gerilim sağlayabilmektedir. Aynı zamanda artık gerilim denilen kıvılcım oluştuktan sonra ateşleme bobininde kalan gerilim de bir sonraki kıvılcım açısından önemlidir. Erozyon ile birlikte kıvılcım aralığının büyümesi gerekli gerilimi artırırken artık gerilimi de düşürmektedir. Bu da belirli bir aşınma miktarından sonra 30.000 voltun yetmemesine dolayısı ile ateşleme problemlerine sebep olur ki bu bujinin çalışma ömrünün dolması demektir.

Kıvılcım erozyonun parametrelerle değişimi için elektro erozyon teorisi ve daha önce yapılmış deneyler incelenmiştir. Kıvılcımları oluşturan pulsların özellikleri ile aşınma arasında direkt bir ilişki vardır. Puls süresi verilecek enerji ile bağlıdır dolayısı ile puls süresi arttıkça aşınma artar. Kıvılcım frekansı da diğer önemli bir

özelliğidir. Kıvılcım frekansı arttıkça aşınma artar. Bunlar elektro erozyondan varılan yargılardır. Kıvılcım erozyonuna karşı malzeme özelliklerinin etkisi incelenmiş ve malzemelerin ergime noktalarının, buharlaşma sıcaklıklarının, yanma odalarındaki pulverizasyon dirençlerinin ve oksidasyon karakteristiklerinin önemli olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarında kıvılcım erozyonunun kıvılcım aralığı ile arttığı, elektrot ebatları ile oranı sabit kalmakla birlikte karakteristiğinin değiştiği, kıvılcım enerjisi ile arttığı, güç kaynağının tipinden etkilenmediği, üretim yöntemi ile bağlı olduğu ve farklı malzemelerin farklı aşınma değerleri gösterdiği görülmüştür. Yapılan aşınma deneyleri ile aşınma oranları gümüş, nikel ve platin olarak en yüksekten en düşüğe doğru sıralanmıştır.

Teorik ve deneysel bilgiler toplandıktan sonra bu bilgiler ışığında kıvılcım erozyonu deneyleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Kıvılcım erozyonu deneyinde deney malzemeleri kızdırma bujileri üzerine 0.7, 0.8 ve 2.7 mm çaplarda yaklaşık 4 mm uzunluğunda lazer kaynak ile kaynak edilmişlerdir. 60 Hz frekansta ve maksimum 30.000 volt kıvılcım gerilimi ile 100 ve 50 saatlik 500°C, 700°C, 850°C sıcaklıklarda deneylere tabi tutulmuşlardır. Sonuçlar optik ölçüm yolu ile 216 deney parçasından 648 ölçüm sonucu elde edilmişlerdir.

Deney sonucunda değerli metal grubu malzemelerinden FKS 16Pt malzemesi hem aşınma açısından diğer malzemelere göre çok daha dirençli hem de kıvılcım başı maliyeti çok daha düşük olarak uzun ömürlü bujiler için kıvılcım erozyonuna karşı uygun elektrot malzemesi olarak seçilmiştir. Nikel alaşımları grubundan ise aşınma direnci olarak NiY malzemesi kıvılcım erozyonuna karşı en dirençli elektrot malzemesi seçilirken maliyet açısından ise saf nikel daha uygun olarak seçilmiştir. Deneyle birlikte sıcaklık erozyon ilişkisi ve bujilerin gerçek yanma odası aşınma miktarları ile deney düzeneği aşınma miktarları karşılaştırılmak istenmiştir. Sıcaklık aşınma ilişkisi için bu deney ile herhangi bir ilişki söylenememektedir. Bujilerin gerçek çalışma ortamlarındaki aşınma oranlarının ise bizim deney sonuçlarımızdan çok düşük çıkmasına rağmen aşınma sıralamasının aynı olması deney sonuçlarını doğrulamıştır.

“SPARK EROSION and MATERIAL SELECTION for SPARK EROSION in SPARK PLUGS”

SUMMARY

Spark occurs because of the voltage difference between two elements acting like electrodes. The voltage difference lets an electrical field occur in the gap between the electrodes. This electrical field makes conductive bridges in the insulator atmosphere of the spark gap. And a current occurs from this conductive bridge and this current is named as a discharge. This discharge between the electrodes is called a “Spark”. The best example for spark in nature is lightning. Lightning is a spark that occurs between earth and clouds because of the voltage difference. Spark has a temperature between 8000°C and 12000°C. Because of this high temperature every spark creates a small crater by melting and vaporizing tiny particles. With repeating sparks more craters occur and these craters becomes the wear on the electrodes. Spark erosion is used in Electrical Discharge Machining to form materials and is an important subject in ignition systems because it affects the service functions and life of the system.

Spark plugs operate in Otto motors to ignite the air-fuel mixture since 1902. Spark pulgs have two different types of electrodes. Center electrodes are feeded by the ignition coil with high voltage and ground electrodes are grounded by the engine block. The voltage difference between the electrodes causes the spark and spark ignites the air-fuel mixture in the combustion chamber. Spark erosion is an important subject matter for spark plugs because it determines the service life of spark plug.

The required voltage for spark to occur is directly releated with the length between the center electrode and the ground electrodes. This length is called the “spark gap”. Spark gap values for different types of spark plugs change between 0.7 mm and 1.2 mm. As the spark gap increases the voltage required for the spark to occur also increases. This is the point that makes the service life of the spark plug directly releated to the spark erosion. With the sparks there is always erosion and with erosion there is wear on the electrodes and with the electrode wear the spark gap gets wider. And as the spark gap gets wider the voltage required for spark to occur gets higher. Ignition coil is the unit that supports the spark plug with high voltage. Ignition coil can support a maximum voltage 30.000 V. And also the residual voltage that is the voltage left in the ignition coil after one spark is important for the next spark. When the ignition voltage increases the residual voltage decreases. And after certain amounts of wear the voltage given by the ignition coil to the spark plug is not enough to produce a spark. And that maens misfiring or the end of spark plugs service life.

For examination of the change in wear with some parameters we have studied on electrical discharge machining and some previous experiments. There is a direct releation between the properties of the pulses that makes spark with erosion. Puls time is releated with the energy that will be given to spark and that is called

“Spark energy” or “Ignition energy”. As the energy increases the wear also increases so when the pulse duration increases energy and wear also increases. Frequency for sparks is also important. As the frequency increases the wear also increases. These convictions are based on electrical discharge machining. The affects of material properties on erosion resistance are studied from literature. It’s seen that high melting and vaporizing points, the pulverization resistance in combustion chambers and oxidation charecteristics are important. Studying the previous experiments on spark erosion it is seen that wear increases with the spark gap, wear amount is equal with different electrode dimentions but characteristics is different, wear increases with increase in ignition energy, wear has no relation with the source of spark energy, wear amount is different for different manufacturing technics and ofcourse wear is different for different materials. Experiments give spark erosion resistances for nickel, platinum, silver with increasing order silver, nickel, platinum.

With the help of the theory and past experiments the experiment for spark erosion is done and results are studied. In spark erosion experiment the sample materials are prepared as bars with 0.7, 0.8 and 2.7 mm diameter and approximately 4 mm length. These samples are laser welded on glow plugs. The frequency of pulses is setted as 60 Hz and the maximum ignition voltage that can be supplied by the ignition coil is 30.000 V. All the experiments are done for 500°C, 700°C and 850°C tempratures with 50 and 100 hours experiment times. All the wear measurements are done with optical measurement technics using special makros written for Image Pro 4.1 software. Results are obtained from 216 different samples with 648 measurements.

With the experiment results for long life spark pulgs FKS 16Pt material is selected as the best electrode material for best erosion resistance. And also FKS 16Pt is found to have the minimum cost that the wear on electrode material produces (spark wear cost) among the experiment materials. And for standard life spark plugs NiY is selected as the material with best erosion resistance but pure nickel is found as the material with the minimum spark cost again among the experiment materials. With these experiments a sub aim was to define the relation between the temperature and erosion but it is found that this experiment is not enough to explain this relation if there is one. And the other sub aim was to compare the experiment results with erosion values that come from motor experiments in which spark plugs operate in normal operating conditions in combustion chamber. Great differences in wear values are seen. But when we make a ranking among the materials for erosion resistance both experiments give the same results. So this experiment is proved to be succesful for selecting a material for spark plugs according to spark erosion resistance.

1. GİRİŞ

Bu çalışma ile birlikte bujilerde çalışma fonksiyonlarını ve ömrünü etkileyen kıvılcım erozyonuna karşı malzeme seçimi amaçlanmıştır. Malzeme seçimi için deneysel çalışma yapılmıştır. 12 farklı malzemenin kıvılcım erozyonu deneyi ile aşınma oranları belirlenmiş ve aşınma miktarları ile maliyet hesaplamaları yardımı ile malzeme seçimi yapılmıştır.

Çalışmanın daha iyi anlaşılabilmesi için deney malzemelerinin kullanılacağı bujiler “Buji Teknolojisi” bölümünde, kıvılcım erozyonu teorisi “Kıvılcım Erozyonu” bölümünde verilmiştir. Kıvılcım erozyonu deneyinin hazırlanmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde teorik bilgiler kadar yararlanılan kıvılcım erozyonu ile parametrelerin ilişkisini açıklayan deneyler “Kıvılcım Erozyonu ile Parametreler Arası İlişki” bölümünde verilmiştir. Son bölümde “Bujilerde Kıvılcım Erozyonu Deneyi” ise malzeme seçimi için yapılmış kıvılcım erozyonu deneyi anlatılmış ve sonuçlar teorik bilgiler ve önceki araştırmalardan faydalanarak tartışılmıştır.

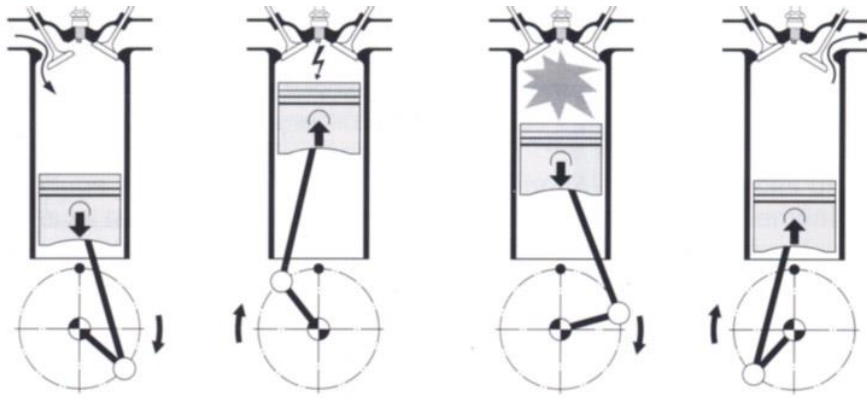
Sonuçlar bir açıdan bakıldığında zaman tatmin edici gözükmeyebilir ancak deneyin asıl amacının 12 deney malzemesi arasından kıvılcım erozyonuna karşı en dirençlisini seçmek olduğu düşünüldüğünde zaman deney sonuçları son derece tatmin edicidir. Ve bu sonuçlar doğrultusunda deneyin asıl amacına ulaştığı ve yeni araştırmaların önünü açtığını söylemek mümkündür.

2. BUJİ TEKNOLOJİSİ

2.1 Kıvılcım Ateşlemeli Motorda Yanma

Kıvılcım ateşlemeli veya diğer ismiyle “Otto motoru” dışarıdan yapılan bir ateşleme sonucu yakıtın sahip olduğu enerjiyi kinetik enerjiye çeviren içten yanmalı bir motor tipidir.

Otto motoru, yanma odası dışında bulunan bir aparat ile hazırlanan hava yakıt karışımını kullanır. Piston aşağıya doğru ilerledikçe hazırlanmış karışım emme supabının açılması ile yanma odasına girer. Pistonun yukarı ilerlemesi ile karışım sıkıştırılır. Yanma odası dışındaki belirli bir periyot ile tetiklenen ateşleme kaynağı yanma odasındaki buji aracılığı ile kıvılcım oluşturarak ateşlenmenin, dolayısı ile yanmanın gerçekleşmesini sağlar. Yanma ile ortaya çıkan ısı, silindirdeki basıncın artmasını ve pistonun ileri itilmesini, pistonda krank milini döndürerek asıl işin yapılmasını sağlar. Yanma sonrası pistonun yukarı hareketiyle egzoz gazları dışarı atılır ve yeni yakıt karışımı içeri alınır. Gazların silindire giriş ve çıkışları dört zamanlı olarak düzenlenmiştir. Şekil 2.1’de dört zamanlı kıvılcım ateşlemeli motorun çalışması görülmektedir.



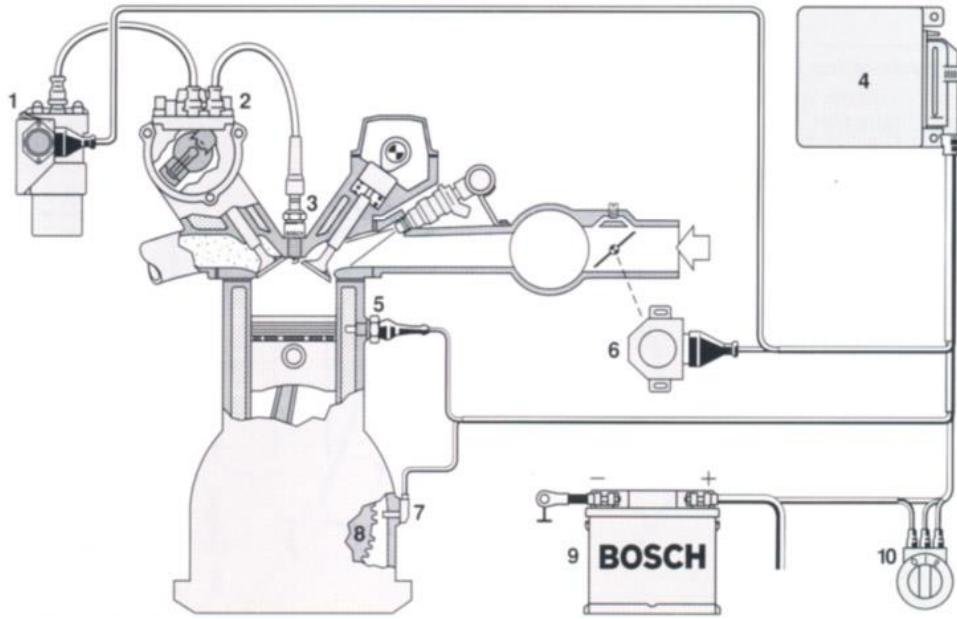
Şekil 2.1 : Dört zamanlı Otto motorunun çalışması [1]

2.2 Kıvılcım Ateşlemeli Motorda Ateşleme

Kıvılcım ateşlemeli motorda ateşleme elektrik ile gerçekleştirilir. Elektrik enerjisi aküden alınır. Ateşleme sistemi motorun kontrolünde periyodik olarak yüksek gerilim oluşturur. Bu yüksek gerilim yanma odasında bulunan bujinin elektrotları arasında bir elektrik boşalmasına, dolayısı ile kıvılcım oluşmasına sebep olur. Bujinin oluşturduğu kıvılcımın enerjisi yanma odasındaki hava-yakıt karışımını ateşler. Aküden alınan enerji periyodik olarak yüksek gerilim oluşturmak üzere ateşleme bobininde saklanır. Ateşleme sisteminin üreteceği yüksek gerilim bujide oluşacak aşınmaları karşılayabilecek değerde olmalıdır. Şekil 2.2’de elektronik bir ateşleme sistemini görebiliriz.

Elektronik ateşleme sistemi şeması

1-Ateşleme bobini ve ateşleme sürücü kartı, 2-Yüksek gerilim distribütörü, 3-Buji, 4-ECU (elektronik kontrol ünitesi), 5-Sıcaklık sensörü, 6-Gaz kısma supabı, 7-Motor hız sensörü, 8-Sensör diski, 9-Akü, 10-Ateşleme ve kontak anahtarı



Şekil 2.2 : Elektronik ateşleme sistemi [2]

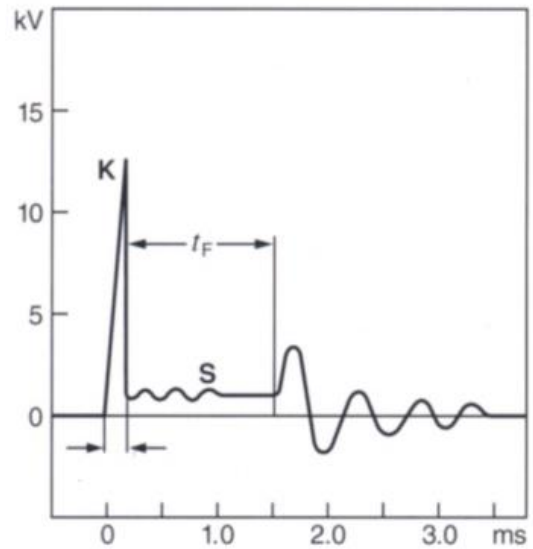
Yeterli gerilime erişildiği zaman bujinin elektrotları arasında kıvılcım oluşur. Ateşleme esnasında bujinin elektrotlarındaki gerilim çok hızlı bir şekilde artar ve ateşleme gerilimine ulaşıldığında elektrotlar arasında kıvılcım oluşur. Kıvılcım

oluşur oluşmaz elektrot gerilimi normal (kıvılcım) seviyesine düşer. Ateşleme esnasında hava yakıt karışımı ateşlenir. Şartlar elektrik boşalmasının devamını engelleyinceye kadar kıvılcım sürer ve daha sonra gerilim sifıra düşer. Şekil 2.3'te bujinin bir çakma esnasındaki gerilim-zaman grafiği görülmektedir. Burada önemli değerler kıvılcım başı diye adlandırılan maksimum gerilim değeri, gerilimin normal (kıvılcım) seviyesi ve kıvılcımın süresidir. Bujinin sıfır gerilimden kıvılcım başına ulaşması yaklaşık olarak 30 μ s'dir. Ancak şu önemlidir ki Şekil 2.3 ile tarif edilen durum yalnızca durağan gaz karışımı için geçerlidir. Buji elektrotları arasındaki gaz karışımının akış halinde olması durumunda kıvılcım karakteristiği farklı olmaktadır.

Kıvılcım süresi kıvılcım başına yani maksimum gerilim seviyesine ulaşıldıktan sonra tüm enerjinin kıvılcım ile boşalması için geçen süredir. Kıvılcım süresinin belirli bir uzunluğu olmalıdır ki yanıcı karışımın tam homojen olmaması durumunda dahi ateşleme tam olarak gerçekleşsin.

Ateşleme gerilimi teorik olarak buji elektrotları arasında kıvılcımı oluşturacak elektrik boşalmasının oluşması için gerekli maksimum gerilim değeridir. Yüksek gerilim elektrotlar arasında büyük bir elektriksel alana sebep olur, böylece bujideki elektrotlar arası boşluk iyonize olur ve iletkenleşir. Ateşleme sistemi tarafından üretilebilecek gerilim 30,000 Volt değerini aşabilir. Ateşleme sisteminin üretebileceği maksimum gerilim bujinin çalışma ömrünü de belirlemektedir.

Buji Elektrotları Arası Gerilim
K-Kıvılcım Başı, S-Kıvılcım Kuyruğu
 t_F -Kıvılcım Süresi



Şekil 2.3 : Buji elektrotları arası gerilim [2]

Kıvılcım oluşması için gerekli ateşleme geriliminin değerini belirleyen buji özellikleri şunlardır:

- Elektrot Aralığı : Bujilerdeki merkez ve ana elektrotlar arası mesafedir. Elektrot aralığı arttıkça kıvılcım için gerekli gerilim artar.
- Elektrot Boyutları : Bujilerin elektrotlarının küçük boyutlarda olması elektriksel alanın etkisini artırır bu da gerekli gerilimin düşmesine sebep olur.
- Elektrot malzemesi: Elektrot malzemesinin elektriksel özellikleri gerekli gerilimin malzemeye göre farklılık göstermesine sebep olur.
- Seramik yüzeyi : Kıvılcım kimi bujilerde kısmen, kimi buji tiplerinde ise tamamı ile seramik üzerinden bir yol takip ettiği için seramik yüzeyi önemlidir. Seramik yüzeyinden akması kıvılcım için gerekli gerilimi düşürür.

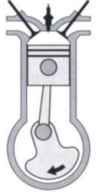
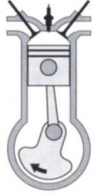

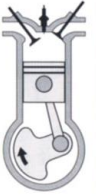
Bununla birlikte motorun dizayn özellikleri, sıkıştırma oranı ve kompresör kullanımı gibi, gerekli gerilim değerini değiştirmektedir.

2.3 Bujilerde Çalışma Koşulları

Bujiler, görevleri dolayısıyla diğer motor parçaları ve ateşleme sistemi elemanları ile birlikte motorun düzenli çalışması için çok önemlidirler. Soğuk çalışmaya müsaade etmeli, hızlanma esnasında kıvılcım kaçırmamalı, motorun maksimum güçte uzun süre çalışmasına dayanabilmelidirler. Bu gereksinimler bujinin tüm çalışma ömrüncü karşılanmalıdır. Bujiler yanma odası içinde ateşlemeyi en rahat sağlayabilecekleri konuma yerleştirilirler. Tüm koşullar altında herhangi bir kaçak veya aşırı ısınma olmadan hava yakıt karışımını ateşleyebilmelidirler.

Bujiler ağır şartlar altında çalışmak için dizayn edilirler. Yanma odası içinde gerek periyodik, dinamik yüklemelere gerekse ağır atmosfer şartlarına maruz kalırlar. Bujilerin maruz kaldığı ve dizayn aşamasında dikkate alınması gereken koşullar; elektriksel gereksinimler, mekanik gereksinimler, kimyasal gerilmeler, ısı gerilmelerdir. Bujinin dört zamanlı bir motorda maruz kaldığı basınç ve sıcaklık değerleri Tablo 2.1 de görülebilir.

Tablo 2.1 : Dört zamanlı motorlarda bujilerin maruz kaldığı basınç ve sıcaklıklar [1]

Strok	Sıkıştırma	Sıkıştırma/Güç	Egzos	Emme					
Gaz Sıcaklığı	300...600 °C	2000...3000 °C	1300...1600 °C	...120 °C					
Gaz Basıncı	8...15 bar	30...50 bar	1...5 bar	0.9 bar					
Piston Pozisyonu									
Krank Açısı	0°	90°	180°	270°	360°	90°	180°	270°	360°
	BDC	TDC	BDC	TDC	BDC	TDC	BDC	TDC	BDC
	1				2				

Bujiler elektronik ateşleme sistemleri ile kullanıldıkları zaman gerilim 30,000 V 'a kadar çıkmaktadır. Bu yüksek gerilim, bujilerde yalıtkan seramikte ark olmasına sebep olabilir, ayrıca yanma sonucu oluşan yağ ve yakıt atıkları da ortamı iletkenleştirdiği için bu tehlike daha da artmaktadır. Bujinin seramik yalıtkan kısmının yalıtkanlığının ve direncinin 1000 °C ye kadar sabit olması ve korunması gerekir.

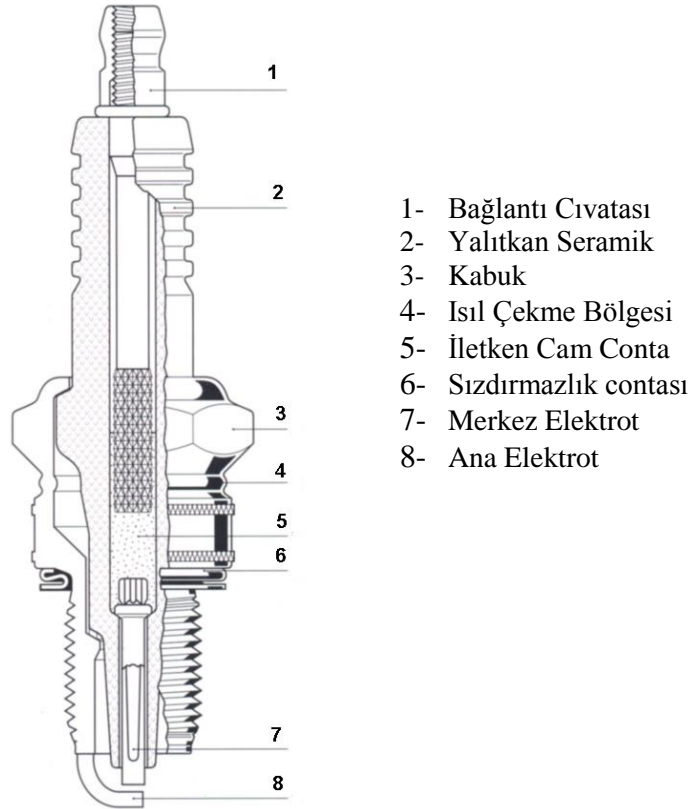
Bujiler yanma odası içinde oluşan basınçlara karşı koyacak dayanıma sahip olmalıdır. Yanma odası iç basıncı yaklaşık olarak 100 bar dır. Çok önemli bir nokta da bu basınç altında dahi bujilerin sızdırmazlığı korunmalıdır. Basınç dışında tek önemli unsur seramik kısmın bujinin montajı ve çalışması esnasında oluşan mekanik gerilmelere karşı koyabilmesidir.

Yanma odası içindeki buji zamanla kırmızı renge dönebilir. Bunun sebebi yanma odası içindeki yüksek sıcaklık ve kimyasal proseslerdir. Bu kimyasal prosesler aynı zamanda aşındırıcı atıklar oluşturarak bujinin çalışma şartlarını etkileyebilirler.

Buji yanma odası içinde yanma esnasında oluşan ısıyı alır ve daha sonra gelen soğuk hava-yakıt karışımı ile soğur. Bu sebep ile sürekli ve oldukça yüksek bir ısı değişimine maruz kalır. Dolayısı ile elektrotlar ve özellikle seramik, termal şoka karşı oldukça yüksek dirence sahip olmalıdır. Ayrıca şu da çok önemlidir ki buji aldığı bu ısıyı mümkün olan en optimum şekilde motor bloğuna aktarmalı ve bujinin ucuna bağlı elektrik kablosuna mümkün olduğunca düşük ısı ulaşmalıdır.

2.4 Buji Konstrüksiyonu

Bujiler metal, seramik ve camdan oluşmaktadır. Bu malzemelerin değişik özellikleri vardır. Uygun buji dizaynı bütün bu malzemelerinin pozitif özelliklerinin tam olarak kullanılmasını sağlar. Bağlantı civatası, yalıtkan seramik, kabuk ve elektrotlar bujinin en önemli parçalarıdır. Bağlantı civatası ile orta elektrot, özel iletken cam conta olarak adlandırılan toz ile birleştirilmiştir. Şekil 2.4'te buji yapısı görülmektedir.



Şekil 2.4 : Buji konstrüksiyonu [1]

Bağlantı civatası seramik içerisine orta elektrotla arasında iletken cam conta olacak şekilde tazyikli olarak yerleştirilir. Bağlantı civatasının bir ucunda yüksek gerilim ateşleme kablosunun takılacağı kısım vardır. Bu kısım ISO/DIN standartları ile belirlidir.

Yalıtkan özel bir seramik malzemeden yapılmıştır ve görevi bağlantı civatası ile merkez (orta) elektrotu kabuktan ayırmaktır. Seramiğin yoğun mikro yapısı bir kısa devre olmasını engellemektedir. Seramiğin dış yüzeyi cilalanmıştır böylelikle nem ve kir yüzeye yapışmaz, dolayısıyla kaçaklar engellenmiş olur. Seramik bağlantı civatasını ve merkez elektrotu içinde bulundurur. Bujinin çalışmasından doğan bir gereksinimde iyi termal iletkenliktir. Ancak termal iletkenlik ve elektriksel yalıtkanlık çakışan özelliklerdir. Buji üreticileri özel karışımlar ve fırınlama ile cilalama işlemi sonrası bu özellikleri sağlayabilmektedir. Örneğin Bosch firması Al_2O_3 içine düşük miktarlarda farklı malzemeler ekleyerek ve yine fırınlama ve cilalama ile bu özellikleri sağlamıştır [1].

Kabuk çelikten imal edilir ve görevi bujinin motora güvenli montajının sağlanmasıdır ve bir çeşit koruma unsurudur. Kabuğun üst kısmı anahtara uygun altıgen, uç kısmı ise motora montajı sağlamak için dişlidir. Kabuğun dış yüzeyi korozyona karşı kaplama yapılır. Bu kaplama genelde nikeldir. Kabuğun dizaynına bağlı olarak bir sızdırmazlık contası da kullanılabilir. Seramik, kabuk malzemesi içine sıkı geçirildikten sonra dövme ve ısıl çekme işlemlerinin aynı anda gerçekleştirilmesi ile seramik ile kabuk arasında sıkı bir bağlantı oluşur.

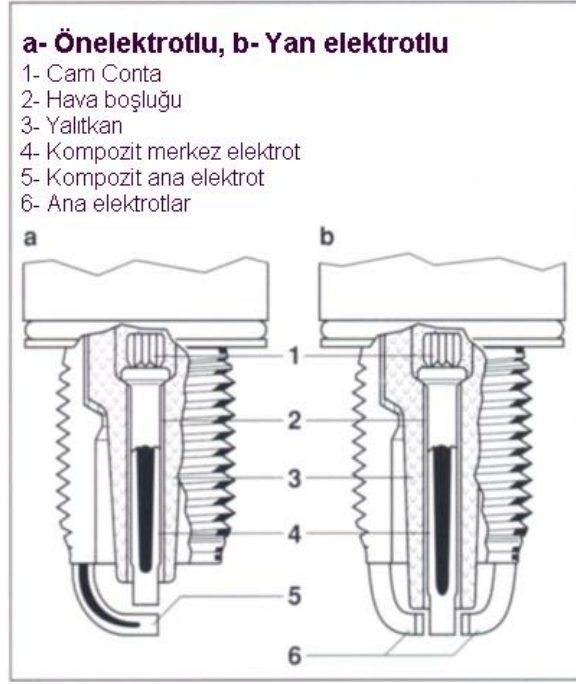
Ana (toprak) elektrot kabuk üzerine kaynak yapılır ve genellikle dikdörtgen kesitlidir. Bujideki ana elektrot sayısı ve ana elektrotla orta elektrot arası pozisyon değişik çeşit bujiler ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ana elektrotun ömrü ısıl iletkenliğine bağlıdır. Bujinin ömrünü arttırmak için kompozit elektrotlar geliştirilmiştir (Şekil 2.5). Örneğin nikel içine bakır yerleştirmek gibi, bu ısıl geçirgenliği arttırmakta dolayısı ile servis ömrü artmaktadır. Çalışma ömrünü etkileyen diğer önemli bir unsurda ısıya maruz kalan kesit alanı ile soğumanın gerçekleştiği kesit alanı oranıdır. Farklı sayıdaki ve farklı ebatlardaki ana elektrotlarla buji ömrü arttırılmaya çalışılmıştır (Şekil 2.6). Kabaca çok sayıda ana elektrot ve daha kalın elektrotlar çalışma ömrünü arttırır denilebilir.

Merkez elektrot konvansiyonel bujilerde yalıtkan seramik içerisine sıkı geçirilmiş ve bağlantı civatasına özel bir cam conta ile birleştirilmiştir. Merkez elektrotun seramik deliğine göre çok az daha küçük bir çapı vardır. Dolayısıyla seramik ve merkez elektrot arasında çok küçük bir hava boşluğu vardır. Bu, oluşabilecek genleşmeleri kompanse edebilmek içindir. Aynı zamanda hava boşluğu ısıl dağılım için çok önemli olduğundan toleransı çok düşüktür. Merkez elektrotun çapı ve uzunluğu kullanılan malzemenin değerine göre değişim göstermektedir.

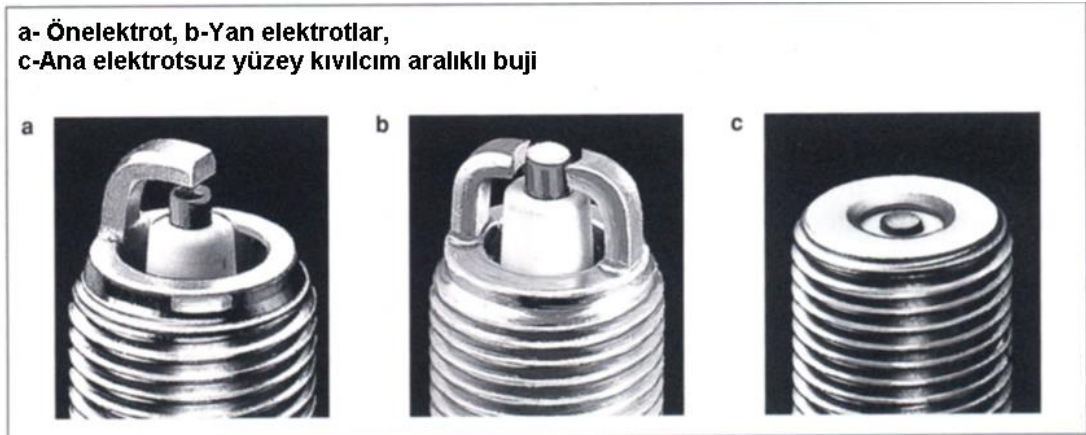
Buji için en önemli özelliklerden birisi elektrot mesafesidir. Elektrot mesafesi ana elektrot ile merkez elektrot arasındaki minimum mesafedir. Elektrot mesafesi ile kıvılcım oluşması için gerekli gerilim arasında lineer bir ilişki ve doğru orantı vardır. Dolayısıyla daha düşük bir elektrot mesafesi gerekli gerilimi düşürecektir. Ancak şu da çok önemlidir ki gerilimin düşmesi de hava yakıt karışımına verilecek enerji miktarını düşürmektedir. Bu da ateşlemenin gerçekleşmemesine sebep olabilir. Genel olarak bujilerde elektrot mesafesi 0.7 mm ile 1.2 mm arasındadır. Bunlar dışındaki özel bujiler motor üreticileri tarafından motor dizaynına bağlı olarak istenir veya buji üreticisinin özel dizaynıdır.

Elektrot şekli ısıl dağılımı, aşınmaya karşı direnci, gerilim gereksinimini etkiler. Elektrot şekli kıvılcım mesafesine ve kıvılcım pozisyonuna bağlıdır. Kıvılcım elektrotlar arasında üç değişik yolu takip ederek oluşabilir (Şekil 2.7). Kıvılcım direk iki elektrot arasındaki hava boşluğundan geçebilir, seramik üzerinden geçebilir veya bu iki tipin bir araya gelmesi ile oluşan yarı hava boşluğu yarı seramik üstü geçiş olabilir. Seramik üstü geçişlerde daha uzun kıvılcım boşluklarında ateşleme sağlanabilmektedir ancak bu durumda seramikteki erozyon da göz ardı edilmemelidir. Dizayn olarak kıvılcımın seramik-hava boşluğu geçişi yapması istenilen durumlarda ana elektrotlar merkez elektrottan daha alçakta dizayn edilir.

Kıvılcım pozisyonu kıvılcımın yanma odasındaki konumudur. Motor dizaynı ile yanma odasında kıvılcımın oluşması gereken yer bellidir. Dolayısı ile bujinin bulunacağı yer zaten belli olduğundan önemli olan mesafe kabuğun sonundan orta elektrotun ucuna kadar olan mesafedir ki bu konvansiyonel bujilerde 3-5 mm arasındadır. Ancak özel motorlar için üretilen özel bujilerde bu mesafe sıfır hatta kabuğun içinde bile olabilmektedir (Şekil 2.6-c).



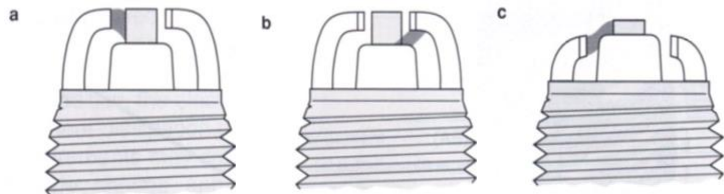
Şekil 2.5 : Kompozit elektrotlu bujiler [1]



Şekil 2.6 : Bujilerde elektrot düzeni [1]

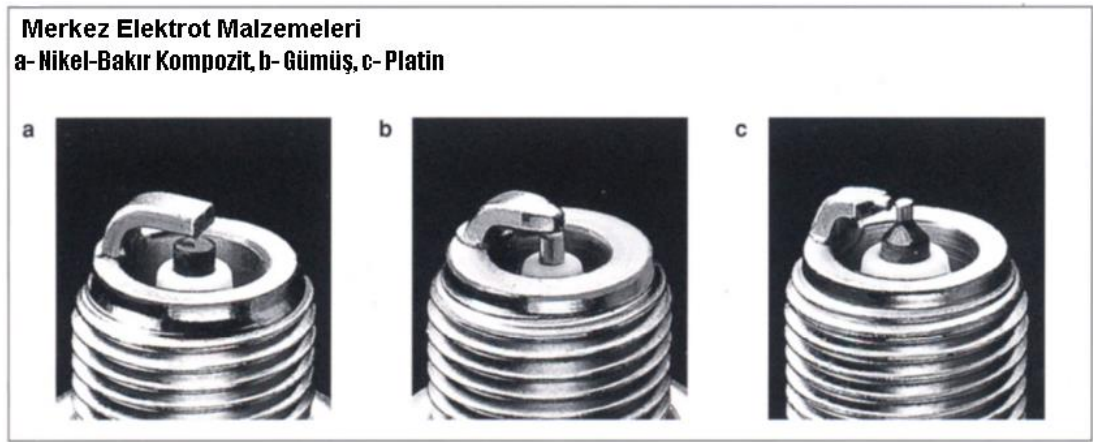
Kıvılcım aralığı

- a** – Hava kıvılcım aralığı
- b** – Yüzey kıvılcım aralığı
- c** – Hava-Yüzey kıvılcım aralığı



Şekil 2.7 : Bujilerde kıvılcım aralığı [1]

Bujilerin konstrüksiyonunda en önemli noktalardan birisi de elektrot malzemesi seçimidir. Genel elektrot malzemelerinin yanında her üreticinin kendine has kullandığı malzemeler vardır. Ama temelde bujilerde kullanılan malzemeler belirlidir. Genel olarak kullanılan malzemeler Nikel ve alaşımları, bakır, gümüş, altın, iridyum ve platindir. Kullanılan malzemeye göre buji konstrüksiyonunda elektrot şekilleri değişmektedir (Şekil 2.7). Bunda en önemli etkenler maliyet ve gerekli işlevleri yerine getirmek için yeterli boyutların malzemedan malzemeye farklı olmasıdır.



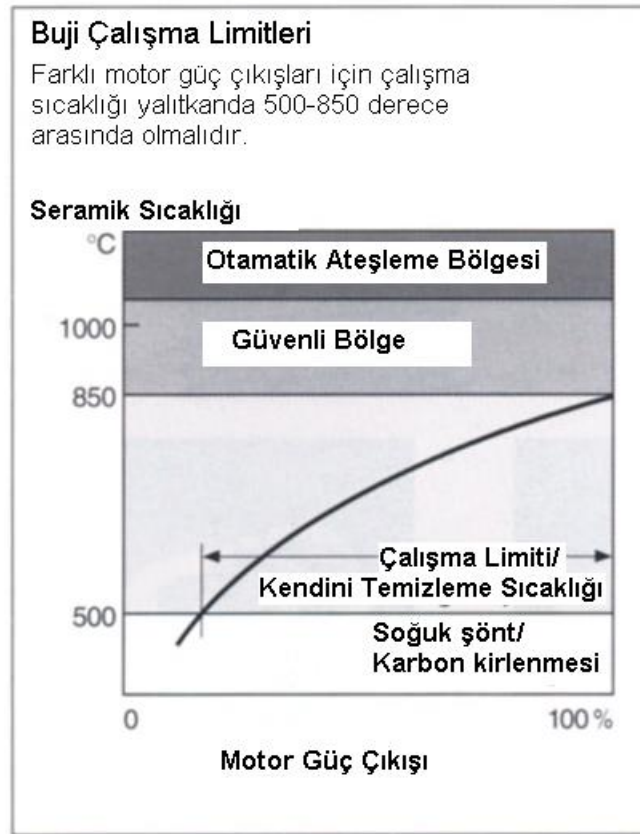
Şekil 2.8 : Merkez elektrot malzemesine göre buji dizaynı [1]

Bujilerin çalışma sıcaklıkları da konstrüksiyonu etkileyen önemli bir etkidir. Teknik olarak bütün bujilerin işlevi aynı olduğu için her motorda kullanılabilmeleri gerekmektedir. Ancak bujiler çalışma esnasında belli bir sıcaklık aralığında kalmalıdır. Bu sıcaklık aralığının üstüne çıktığı zaman buji işlevlerini tam olarak yerine getirememekte ve istem dışı ateşlemeler olmaktadır. Bu sebeple farklı motorlar için farklı ısı sınırlarına sahip bujiler dizayn edilir. Temel olarak bujiler için önemli iki sıcaklık değeri 500°C ve 850°C'dir ve bu sıcaklık seramik yalıtkanın uç noktasından okunur [2].

Yanma sonucu oluşan artıkların büyük çoğunluğu egzoz gazı ile birlikte dışarı atılmaktadır ancak bir kısım atık yanma odası içerisinde kalmakta ve yanma odası çeperleri ile buji üzerini örtmektedir. Bu artıklar bujinin seramiği üzerinde birikerek merkez elektrotla kabuk arasında iletken bir yüzey oluşturabilirler. Bu iletken yüzey

de kıvılcım için kullanılacak akımdan bir kısmını çeker ve bu sebepten dolayı kıvılcım oluşumunu engelleyebilir. Bu yüzeyin oluşmaması için bujinin çalışma esnasında sıcaklığının 500°C 'nin altına düşmemesi gerekir, 500°C 'ye bujinin kendi kendini temizleme sıcaklığı denir.

Bujiler için maksimum çalışma sıcaklığı da 850-900°C civarındır. Buji bu sıcaklığın üzerine çıktığı takdirde hava-yakıt karışımı bujinin kızarmış sıcak yüzeylerinde kendiliğinden ateşlenebilir. Buna otomatik ateşleme denir. İstem dışı oluşan bu ateşleme oldukça kısa süre içerisinde motorda ağır hasarlar oluşmasına sebep olur. Dolayısıyla güvenli çalışma sıcaklıkları bujiler için 500°C ile 850°C arasındır. Şekil 2.9 da bujilerin çalışma esnası sıcaklıkları görülebilir.



Şekil 2.9 : Bujilerin çalışma sıcaklıkları [2]

2.5 Bujilerin Çalışma Karakteristikleri

Çalışma esnasında bujiler aşınma ve kirlenmeye maruz kalmaktadırlar dolayısıyla belirli periyotlarla değiştirilmeleri gerekmektedir. Çalışma esnasında buji ateşleme yapmak için gerekli gerilimi arttıracak bazı değişimlere uğramaktadır. Ateşleme için gerekli gerilim, gerilim kaynağının sağlayabileceğinden daha fazla bir değere ulaşınca ateşleme gerçekleşemez.

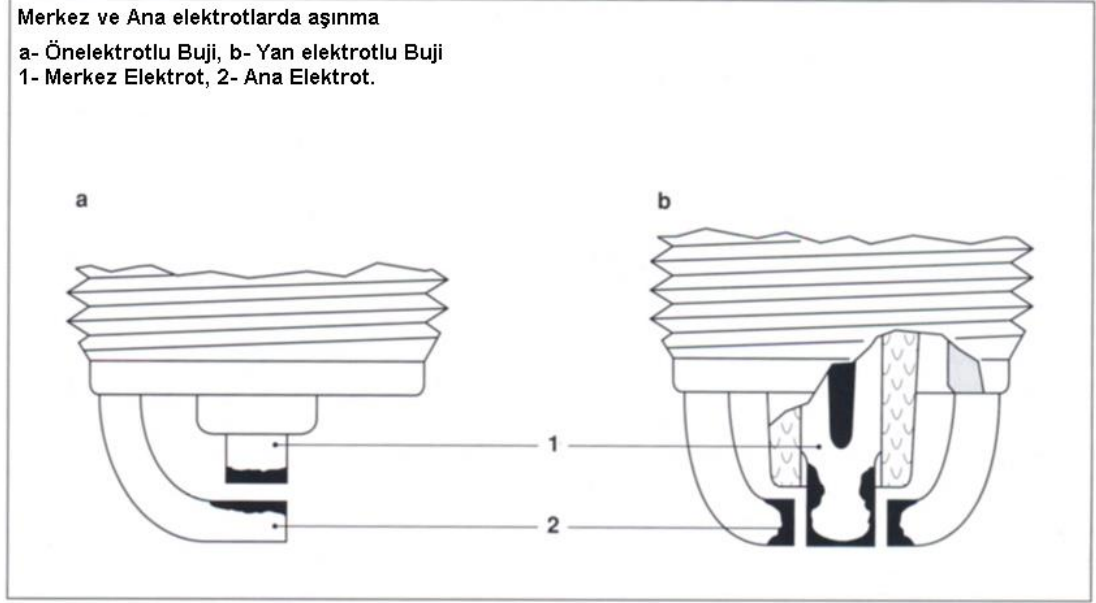
Kirlilikler yanma odası içi ateşleme alevine olumsuz etki yaparlar bu da ateşlemenin tam olarak gerçekleşmemesi ve ateşlemenin kaçırılması şeklinde olur. Böyle bir durumda ilk etki egzoz emisyonundaki artış ve katalitik konvektörün varlığı halinde direk zarar görmesidir.

Bujinin çalışması motorun yaşlanması ile de olumsuz olarak etkilenir. Motor yaşlandıkça sızıntı olabilir. Oluşacak bir sızıntı da yanma odasına fazla yağ gitmesine sebep olacaktır. Böyle bir ortamda oluşacak yanma ile fazla miktarda kül, kurum yanma odasında kalacak ve bunlar da bujinin üzerine yapışarak iletken hatlar oluşturacak ve ateşlemenin gerçekleşmemesine sebep olacaktır.

Bujilerin çalışması esnasında ortaya çıkan problemlerden birisi de elektrot aşınmasıdır. Elektrot aşınması çalışma esnasında buji elektrotlarından parça ayrılmasıdır. Elektrot aşınmasının önemi elektrot aşınması ile birlikte elektrot mesafesinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Elektrot aşınması doğru elektrot şekli, malzemesi ve boşluk tipi seçimi (hava, hava-seramik, seramik) ile minimize edilebilir. Elektrot aşınmasına sebep olan 2 proses vardır, bunlar kıvılcım erozyonu ve korozyondur [2].

Kıvılcım ile birlikte gelen elektrik boşalması elektrotların sıcaklığının yükselmesine sebep olur. Agresif yanma gazlarının bulunduğu ortamda yüksek sıcaklıklarda aşınma olması kesindir. Bujilerde bu sıcaklıktan dolayı oksidasyon, malzemenin yanma gazlarındaki bileşiklerle tepkimesi ile köşelerden başlayan ve elektrot mesafesinde artışa sebep olan bir aşınma, görülür.

Ancak Şu kesindir ki bujiler de ki kıvılcım aşınmasının temeli de temel kıvılcım aŐınmasında olduğu gibi malzemenin kıvılcımın oluşturduğu çok yŐksek sıcaklık dolayısı ile ergimesi ve buharlaŐmasıdır. Şekil 2.10 da bujilerdeki elektrot aşınması gŐrŐlebilir.



Şekil 2.10 : Bujilerde elektrot aşınması [1]

3. KIVILCIM EROZYONU

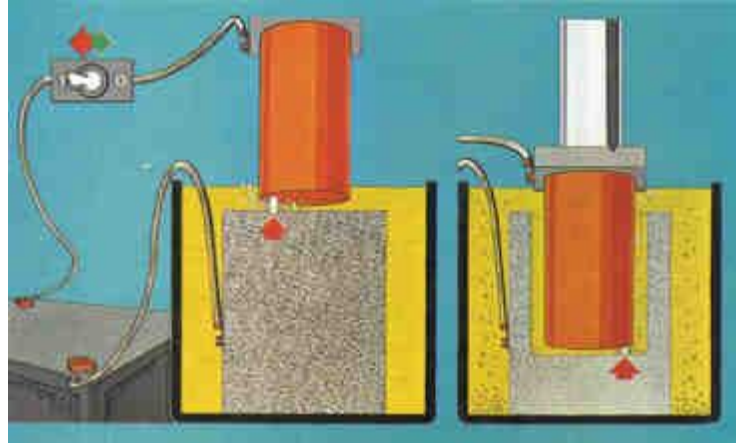
3.1 Kıvılcım Erozyonu Temel Prensibi

Temelde kıvılcım elektrot vazifesi gören iki eleman arasında ortaya çıkan gerilim farkından dolayı oluşur. İki elektrot yalıtkan bir ortamda belirli bir mesafe ile durmakta iken elektrotlardan bir tanesine gerilim uygulanır. Gerilim o mesafe için yeterli değere yükseltildiğinde veya mesafe o gerilim değeri için yeterli seviyeye düşürüldüğünde gerilim elektrotlar arasındaki aralıkta bir elektriksel alan oluşturur. Oluşan bu elektriksel alan elektrotların içinde bulunduğu ortamda iletken bir köprü oluşmasına sebep olur. İki elektrot arasında oluşan bu iletken köprüden akımın geçmesi ile de kıvılcım oluşur. Esasen kıvılcım olarak nitelendirdiğimiz olay elektrik akımının bir tel, kablo veya nesne üzerinden değil de göz ile görülebilecek şekilde bir ortamdan geçmesidir.

Kıvılcım erozyonu ise temel olarak bir yüzeye sürekli olarak çarpan kıvılcımların o yüzeyde bir erozyona sebebiyet vermesi yani malzeme uzaklaştırmasıdır. Kıvılcım erozyonunun bir imalat yöntemi olması dolayısıyla sanayide kullanımı yaygındır. Aynı zamanda ateşleme sistemlerinde ve elektrik kontaklarında elektrot aşınmasına neden olması sebebi ile elektrot ömrünü belirlemesi dolayısıyla incelenmektedir. Ancak iki durumda da temel prensipler neredeyse tamamı ile aynı olmakla birlikte belli ayrımlar vardır. Elbette ki bu ayrımların en önemlisi amaçtır. Elektro erozyon tezgahlarında kıvılcım erozyonunun amacı aşınma sağlamak diğer araştırmaların amacı ise aşınmayı minimumda tutmaktır. Temelde aynı olan ancak belli başlı farklılıkları olan bu sistemleri beraber incelemek doğru olacaktır.

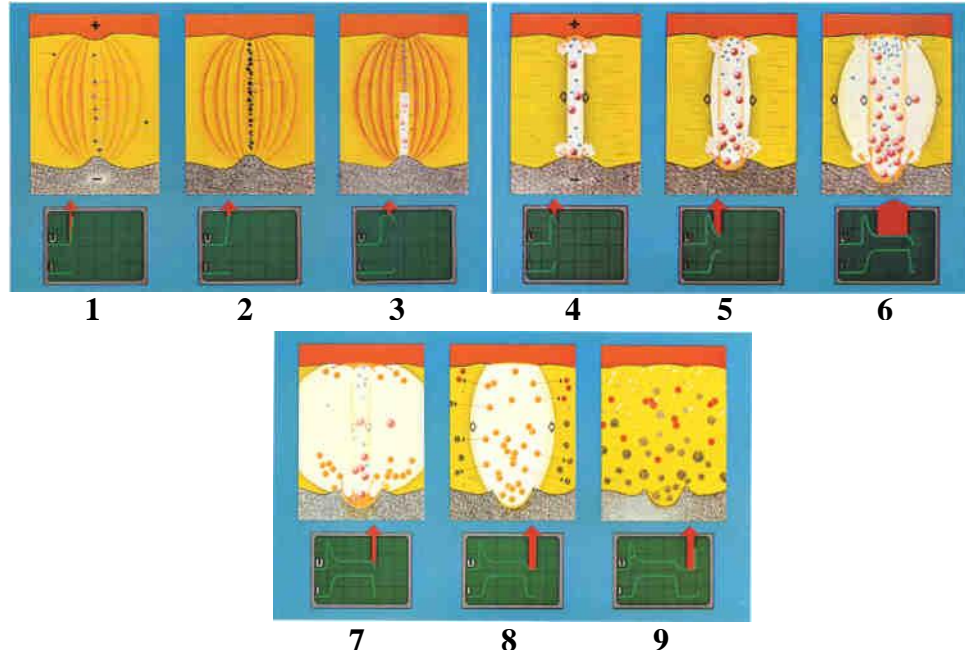
3.2 Elektro Erozyon ve Kıvılcım Erozyonu Temel Prensibi

Kıvılcım erozyonunun temel prensibi oldukça basittir. Elektro erozyonda işlenecek parça ve takım, ateşleme sistemlerinde ise karşılıklı elektrotlar, aralarında belirli bir mesafe ile yerleştirilirler. Elektrotlar arasına gerilim farkı periyodik olarak uygulanmakta ve dolayısıyla boşalma akımı periyodik olarak oluşmaktadır. Gerilim farkının elektrotlar arasına uygulanması ile hemen kıvılcım oluşmaz çünkü hem elektro erozyon işleminde hem diğer kıvılcım erozyonuna rastlanılan uygulamalarda elektrotlar arası yalıtkan bir ortamdır. Bu yalıtkan ortam elektro erozyon işleminde bir sıvı, ateşleme sistemlerinde hava-yakıt karışımıdır. Kıvılcım oluşması için belirli bir elektrot mesafesi için belirli bir gerilim farkına ulaşılması gerekmektedir. Şu da kesindir ki gerek duyulan gerilim farkına yalıtkan ortamın etkisi çok büyüktür. Elektro erozyon tezgahlarında dielektrik sıvı içerisinde maksimum birkaç yüz volt gerilim farklarında kıvılcım oluşurken ateşleme sistemlerinde arada hava karışımı olduğu için bu değer binlerce voltla ifade edilmektedir. Gerilim farkı ile birlikte yalıtkan ortamda bir elektriksel alan oluşur. Elektro erozyonda elektriksel alanla birlikte yalıtkan sıvı içerisindeki iletken parçacıklar bir köprü oluşturur ve iletken bir hat oluşur, böylelikle bu hat üzerinden akım geçer ve kıvılcım oluşur. Yalıtkan ortamın hava-yakıt karışımı veya yalnızca yalıtkan gazlardan oluşan uygulamalarda ise elektriksel alan ile birlikte elektrotlar arasındaki gaz iyonlaşır ve bu iyonların oluşturduğu köprü üzerinden akım geçer. Şu kesindir ki elektro erozyondaki gerekli gerilim farkının düşük olmasının en büyük sebebi elektrotlar arasında bulunan dielektrik sıvı içerisindeki iletken parçacıklardır. Bu boşalma ile elektrik enerjisi ısıya çevrilmiş olur. İşte bu enerji elektro erozyonda malzemeyi işlememizi sağlayan, Otto motorunda yakıtın ateşlenmesini sağlayan ve elektrotların aşınmasına sebep olan enerjidir. Kıvılcımın temas ettiği iş parçası veya elektrot yüzeyi çok yüksek sıcaklıklara çıkar. Bu yüksek sıcaklık elektrot malzemesinin erimesine ve buharlaşmasına sebep olur. Buharlaşan malzeme elektrotlar arasındaki yalıtkan ortam ile uzaklaştırılır. Bir kıvılcım küçük bir krater oluşturur. Sürekli tekrarlanan kıvılcımlar ile elektro erozyonda işleme yapılırken (Şekil 3.1) diğer uygulamalarda da aşınma gerçekleşir.



Şekil 3.1 : Basit elektro erozyon şeması [3]

Tüm elektrik boşalmalarında elektrotlara uygulanan gerilim farkının zamanla akışı aynı karakteristiktir. Şekil 3.2 de elektro erozyon için gerilim zaman grafiği işlem aşamalarıyla görülebilir. Soldan başlayarak gerilim farkı elektrotlar arası aralıkta bir elektriksel alan oluşturur. Bu elektriksel alan ve yüzey geometrisine bağlı olarak elektro erozyonda dielektrik sıvı içerisindeki iletken parçacıklar, elektrotlar arası aralıkta çöker. Çünkü elektriksel alan burada en güçlüdür. Sonuç olarak 2 numaralı resimde görüldüğü üzere elektrotlar arasında iletken parçacıklardan bir köprü oluşur. Aynı zamanda eksi kutuplu elektrottan eksi yüklü parçacıklar dışarı verilir. Bu eksi yüklü parçacıklar elektrotlar arası aralıkta bulunan nötr parçacıklarla çarpışır ve ayrılırlar. Pozitif ve negatif yüklü parçacıklar oluşur. Bu olay bir patlama hızı ile yayılır ve darbe iyonlaşması olarak adlandırılır. Pozitif yüklü parçacıklar negatif kutuplu elektrotta, negatif yüklü parçacıklar pozitif kutuplu elektrotta göç ederler, dolayısı ile akım oluşur. Bu akım gerilim ile birlikte bir maksimuma ulaşır. Oluşmuş gerilim farkı, akımı bu maksimumda tutmak için harcanır ve sonuçta hem gerilim hem akım sıfır değerine düşer. Kıvılcım başlangıcından akım sıfır değerine düşünceye kadar sıcaklık sürekli artmaktadır. Elektrik boşalmalarında gerilimin daha detaylı grafiğini Şekil 2.3'te görebiliriz.

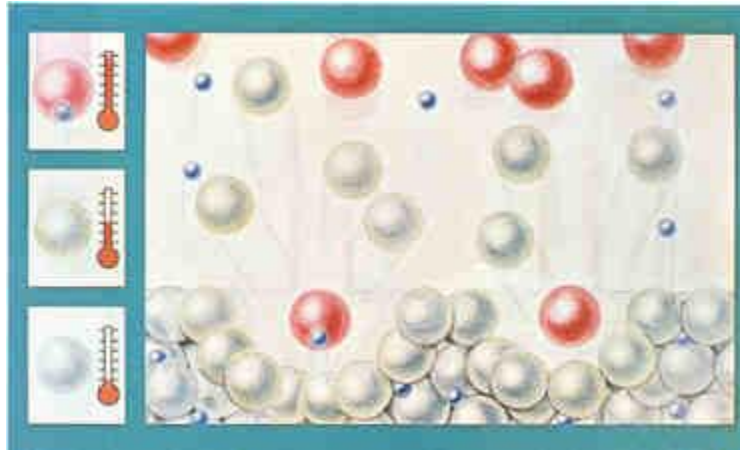


Şekil 3.2 : Kıvılcım erozyonu oluşumu ile gerilim ve akım değişimi [3]

Akımın kesilmesiyle birlikte tek ısı kaynağı akım olduğu için sıcaklık direkt düşmektedir, elektrik yüklü parçacıkların sayısı hızla düşer ve elektrik boşalmasının durmasıyla da basınç ortadan kalkar. Aşırı derecede ısınmış olan erimiş metal patlama şeklinde buharlaşır ve bu patlama etkisiyle kalan eriyik metali de elektrottan koparır. Elektrottan kopan bu malzemeler sıvı içerisinde parçalanmış iletken parçacıklar ile birlikte dururken dielektrik sıvının devir daimi ve filtre edilmesi sonucu ortamdan alınır. Yanma odalarındaki kıvılcım erozyonu sonucunda ortama karışan elektrot malzemesi egzoz gazları ile uzaklaştırılır. Şu da kesindir ki tüm artığı uzaklaştırmak mümkün olmamakta ve yanma odası içerisinde elektrot parçacıkları artık olarak kalabilmektedir.

Akım ile sıcaklık arasındaki ilişki ve aşınmanın nasıl gerçekleştiği daha detaylı olarak Şekil 3.3 ile incelenebilir. Şekil 3.3'te negatif kutuplu elektrot yüzeyinin detaylı bir kesiti ve boşalma kanalının bir kısmı görülmektedir. Pozitif yüklü parçacıklar (kırmızı) elektrot yüzeyine saldırırlar. Çarpmaları ile elektrot yüzeyindeki parçacıklara güçlü titreşimler verirler. Bu titreşimler de parça yüzeyinde sıcaklığın yükselmesine sebep olur. Yeterli hıza ulaştığı zaman şekilde sarı ve gri ile gösterilen elektrot parçacıkları koparılabilir. Kırmızı ile gösterilen pozitif yüklü parçacıklar ve mavi ile gösterilen negatif yüklü parçacıklar titreşimi artırır.

Dolayısıyla elektrottan kopan nötr parçacıkların sıcaklığı artar. Bu sıcaklık artışı da kopan parçacıkların veya direk elektrot yüzeyindeki parçacıkların buharlaşmasına veya erimesine sebep olur. Erimesi veya buharlaşması sıcaklığa bağlıdır. Eğer sıcaklık yeterli olur ve parçacıklar buharlaşırsa uzaklaştırılır. Ama özellikle ateşleme sistemlerindeki elektrotlarda sıcaklığın malzemeyi buharlaştıracak kadar yükselmediği durumlarda malzemenin eridiği ancak elektrottan kopmadığı durumlarda söz konusudur. Böyle durumlarda malzemedeki, elektrotta aşınma değil yalnızca şekil değişikliği söz konusu olur. Ama basit olarak şunu tekrarlayabiliriz elektrik boşalması ile elektrik enerjisi ısı enerjisine dönüşür, bu ısı dolayısı ile de elektrot malzemeleri üzerinde kraterler oluşur.

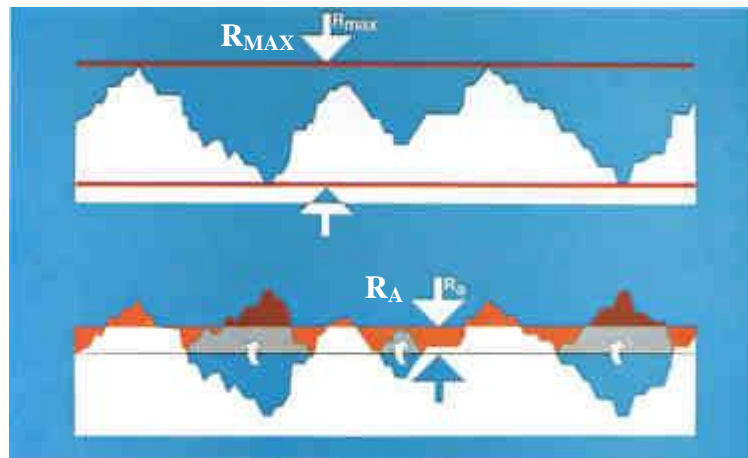


Şekil 3.3 : Kıvılcım altındaki elektrot yüzeyi [3]

Negatif ve pozitif yüklü parçacıkların değişimi, Şekil 3.3'te mavi ve kırmızı olarak gözükmemektedir, elektriksel boşalma kanalında akım oluşturmaktadır. Bu parçacıklarda bahsedilen şekilde metalin erimesini hatta buharlaşmasını sağlayan ıyıyı oluşturmaktadır. Hangi elektrotun üstüne daha fazla parçacık çarparsa o elektrot yüzeyi daha fazla ısınır. Şu da oldukça önemlidir ki pozitif yüklü parçacıklar daha büyük boyutlara sahip oldukları için aynı darbe adedi ve şiddeti ile daha fazla ısı oluştururlar. Elektro erozyon tezgahlarında takım elektrotta aşınmanın az olması, işlenecek malzemedeki ise aşınmanın mümkün olduğu kadar çok olması istenir dolayısı ile kutuplar buna göre seçilir. Genel olarak bu amaç doğrultusunda takım katot yani (-) kutup olarak bağlanır, iş parçası ise anot (+) olarak bağlanır. Ancak tam çözüm için şunu söyleyebiliriz; elektro erozyon işleminde minimum takım aşınması,

maksimum iş parçası aşınması için kısa darbe sürelerinde takım negatif kutup olarak, uzun darbe sürelerinde ise takım pozitif kutup olarak bağlanır. Bununla birlikte işlenecek malzeme türü takım malzemesi ve darbe süresini dolayısıyla kutuplamayı belirler.

Kıvılcım erozyonunda her kıvılcım bir kratercik oluşturur. Kıvılcım erozyonunda yüksek frekanslarda gerçekleşen, tekrar eden kıvılcımlardan dolayı oluşan kratercikler ile aşınma meydana gelir. Bu aşınma elektro erozyon işleminde istenilen parça işleme iken çoğu durumda elektrot aşınması gibi istenilmeyen bir sonuçtur. Kıvılcım erozyonu sonucu oluşan yüzey çok düzgün ve pürüzsüz bir yüzey değildir. Aksine hafif kaba ve girintili çıkıntılı bir yüzeydir. Kıvılcım erozyonu ile ortaya çıkan bu tipik yüzeyin standartlaştırılması için bir referans sistemi geliştirilmiştir. Bu referans sistemi özellikle elektro erozyon işlemi için kullanılmaktadır. Sıklıkla kullanılan ölçüm ve karakteristik değerleri R_{max} ve R_a 'dır. R_{max} yüzeydeki en büyük pürüzlülüğü ifade eder, daha doğrusu en çukur nokta ile en yüksek nokta arası mesafedir. Almanya ve Fransa'da R_t , ABD'de ise H_{max} olarak kullanılır. Ortalama pürüzlülük ise İsviçre'de R_a , ABD'de AA, İngiltere'de CLA olarak adlandırılır (Şekil 3.4). Çeşitli imalat yöntemleri gibi elektro erozyonda da bazı iyileştirmeler yapılarak çok daha kaliteli bir yüzey elde edilebilir. Genel olarak şunu söyleyebiliriz ki kıvılcım erozyonunun olduğu bir malzemede yüzey pürüzlülüğü yani R_{max} $1\mu m$ ile $500\mu m$ arasında değişebilir. Dolayısı ile kıvılcım erozyonu ile aşınmış bir yüzeyde $500\mu m$ ye kadar girinti ve çıkıntılara rastlanması olağan ve doğaldır.



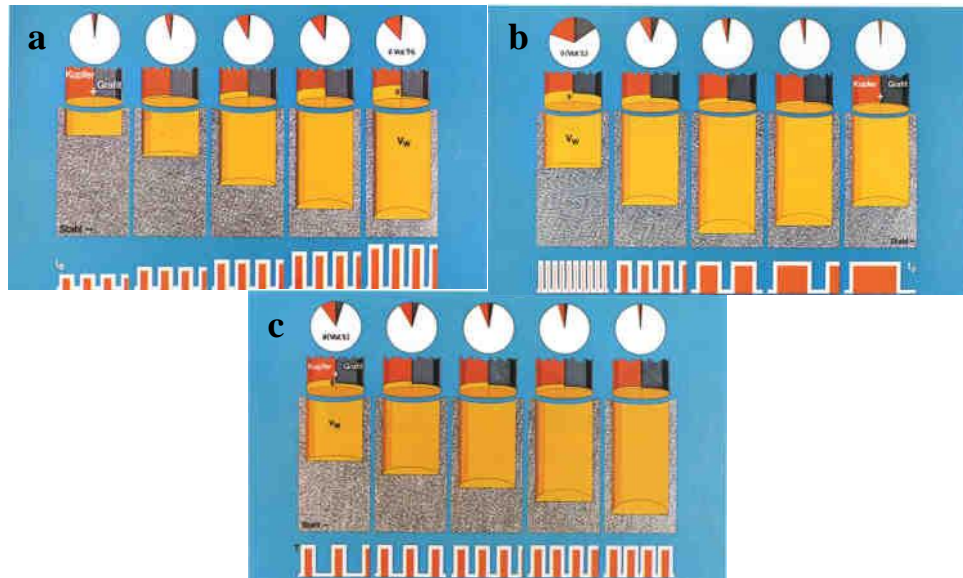
Şekil 3.4 : Kıvılcım erozyonu sonucu yüzey pürüzlülüğü [3]

3.3 Kıvılcım Erozyonundaki Bazı Parametreler

Farklı kıvılcım aralıkları, kıvılcım erozyonu görülen veya kullanılan alanlarda oldukça önemlidir. Farklı kıvılcım aralıkları ile kast edilen farklı yüzeylerde iki elektrotun karşı karşıya gelmesidir. Örnek olarak elektro erozyonla işlemede takım bir miktar iş parçası içine girince elektrotlar arası 3 farklı kıvılcım boşluğu oluşması veya bujilerde elektrotlar arası hem ön yüzde hem de yan yüzde kıvılcım boşluğunun olmasını verebiliriz. Elektro erozyonda kıvılcım ön yüzde başlar ve elektrotlar arası aralık kontrol sistemi tarafından belirlenir, yan yüzeyler arası aralık ise elektriksel pulsların süresine, yüksekliğine, malzemelere, gerilime ve farklı önceden belirlenmiş verilere bağlıdır. Bujilerde ise kıvılcımın sürekli oluşması istenilen elektrot boşluğu, diğerine göre oldukça küçüktür. Dolayısıyla kıvılcım bu yüzeyde dominanttır ancak şu da unutulmamalı ki istisnai şekilde diğer elektrot boşluğunda da nadir de olsa kıvılcım oluşabilir.

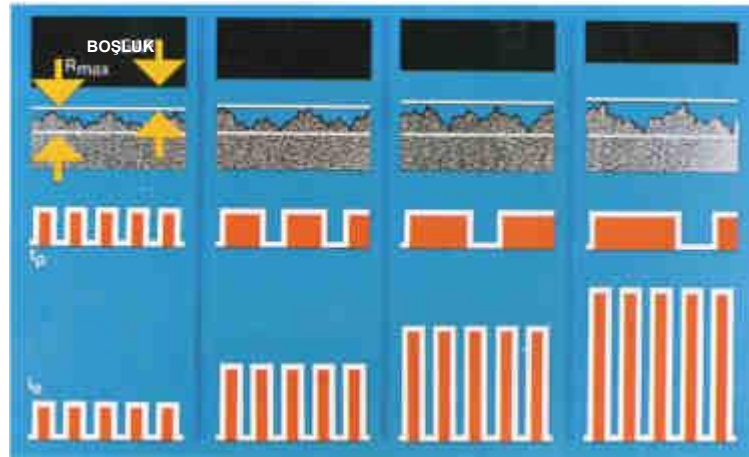
Kıvılcım erozyonu oluşan sistemlerde örneğin elektronik ateşleme sistemleri gibi veya elektro erozyon tezgahlarında en önemli ünitelerden biriside güç kaynağıdır. Güç kaynağı kaynaktan aldığı alternatif akımı kare dalgaya çevirir. Bu olayı gerilim zaman grafiği çizilerek görselleştirmek mümkündür. Çeşitli anahtarlama cihazları ile oluşturulan bu gerilim pulslarının genişliği, yüksekliği ve frekansı değiştirilebilir. Güç kaynağı içindeki anahtarların açılıp kapanması direk olarak boşalma zamanı ve durma için puls süresi, puls aralığı ve aynı zamanda kıvılcım boşluğundaki gerilim ve akımı belirler. Pulsların yüksekliği akımı, genişliği süreyi, dolayısı ile verilecek enerjiyi ifade eder. Puls süresi ile duraklama süresi ayrı ayrı verilebileceği gibi genellikle duraklama süresi puls süresinin bir yüzdesi olarak verilir. Kıvılcım erozyonunun görüldüğü ateşleme sistemlerinde ise otomobil aküsünden direkt doğru akım alınır. Ancak alınan gerilim çok düşüktür bu ateşleme bobini tarafından 30 kV'a kadar çıkartılmaktadır. Aracın ivme ve hızına göre de elektronik ateşleme beyni veya görevli kontrol ünitesi tarafından puls frekansı ve duraklama süresi kontrol edilmektedir (bkz. Şekil 2.2).

Kıvılcım erozyonunun kaçınılmaz sonucu elektrot aşınmasıdır. Düşük akım ile gerçekleşen kıvılcım erozyonunda aşınma miktarı düşük olur, akım yüksek olur ise aşınma miktarı da artar fakat elektrot aşınması arttığı gibi parça işleme hızıda artmaktadır ama önemli nokta yüzde cinsinden ifadedir ve akım arttıkça elektrot aşınması yüzde olarak artar (Şekil 3.5a). Elektrot aşınmasının istenmediği durumlarda akımı düşük tutmak bir çözüm olabilmektedir ancak elektro erozyon tezgahları gibi parça işlemek amaçlı işlemlerde aşınmayı belli bir hızda gerçekleştirmek gerekmektedir. Ancak parça işleme hızını arttırırken aynı zamanda da takım elektrot aşınması arttırılmaktadır dolayısıyla bu bir optimizasyon problemidir. Farklı malzemeler farklı aşınma miktarları ve farklı aşınma karakteristiği gösterir. Kısa süreli pulslar aşınmayı arttırır, aşınma uzun süreli pulslar ile oluşan kıvılcım erozyonunda daha düşüktür (Şekil 3.5b). İki puls arası duraklama zamanı da aşınmayı etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Duraklama zamanının düşük olması frekansın yüksek olması demektir. Farklı iki karşıt elektrot malzemesi kullanıldığı zaman örneğin elektro erozyonda olduğu gibi yüksek frekanslar ile çok düşük takım aşınması ile hızlı parça işleme gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 3.5c). Ancak kıvılcım erozyonu ile karşılaşılan çoğu uygulamada karşıt elektrot malzemeleri aynıdır. Karşıt elektrot malzemelerinin aynı olduğu kıvılcım erozyonunda ise yüksek frekans aşınmayı arttırır.



Şekil 3.5 : Akım, puls süresi, duraklama süresi ile elektrot aşınması [3]
Gri-Çelik iş parçası, Kırmızı-Bakır elektrot, Mavi-Grafit elektrot

Kıvılcım erozyonu ile oluşan yüzey ve kıvılcım oluşması için gerekli aralık direkt olarak boşalma enerjisine bağlıdır. Boşalma enerjisi akım grafiğinin altında kalan alan olarak ifade edilir. Şekil 3.6 da akım eğrisi altında kalan turuncu olarak görülen alanla ile boşalma enerjisi orantılıdır. En alt kısımda ki grafikte ise enerji düzeylerini aynı boşalma süresinde ve frekansta pulslar ile elde etseydik hangisinde akımın daha yüksek olacağı görülür. Dolayısıyla şu kesindir ki boşalma enerjisinin fazla olması aynı şartlar altında daha yüksek bir akım uygulanması gibidir. Şekilde açıkça görülmektedir ki düşük boşalma enerjisi ile daha düşük pürüzlülükte bir yüzey elde edilmekte ve gerekli kıvılcım aralığı düşük olmaktadır. Boşalma enerjisi yüksek olursa oluşan yüzey pürüzlülüğü de fazla olmakta yani R_{max} yüksek olmaktadır ve kıvılcımın aralığı yüksek olmaktadır. Sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünün çok önemli olduğu durumlarda elektrot aşınması ve diğer etkenler ile birlikte yüzey pürüzlülüğü de göz önünde bulundurularak akım, puls süresi, duraklama zamanı gibi büyüklükler ile boşalma enerjisi belirlenmelidir. Çünkü hassas yüzey elde edilmesi istendiği zaman uygulanan şartlar dolayısı ile karşıt elektrot aşınması çok fazla olmaktadır. Tabi ki bu elektro erozyon yöntemi için önemli bir özelliktir. Elektro erozyon ile işlemede eğer yüzey pürüzlülüğünün düşük olması çok önemli ise önce basit elektrotlarla kaba işleme yapıldıktan sonra özel elektrotlarla hassas işleme yapılır.



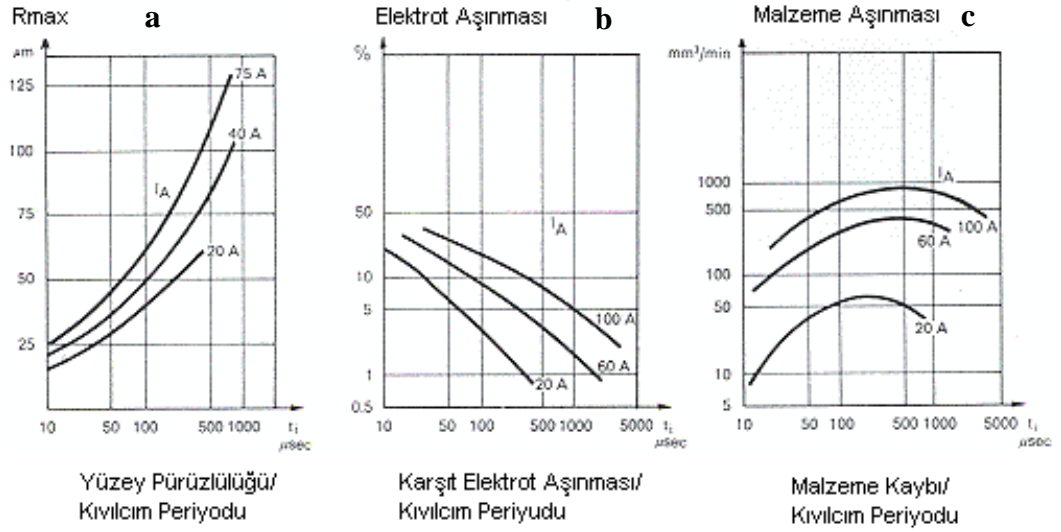
Şekil 3.6 : Boşalma enerjisi ile yüzey pürüzlülüğü değişimi [3]

3.4 Kıvılcım Erozyonunun Malzeme Üzerine Etkisi

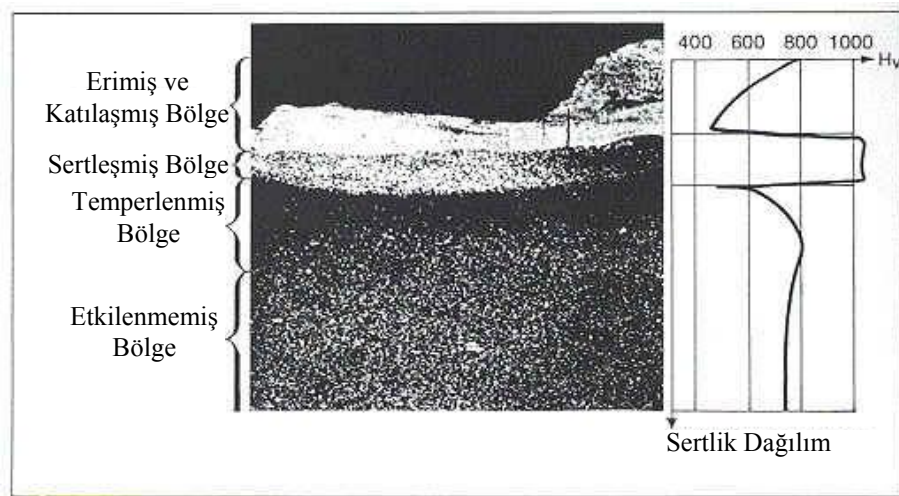
Kıvılcım erozyonunun maruz kalan veya işlenen malzeme üzerine etkisi diğer konvansiyonel proseslere göre çok daha farklıdır. Bu farkın sebebi elektrot malzemesi üzerine düşen kıvılcım elektrot yüzeyini o kadar ısıtır ki elektrot malzemesi buharlaşır. Kıvılcımın sıcaklığı 8000° C ila 12000° C arasındadır [3]. Oluşan metal buharı ortamdaki dielektrik sıvı veya hava içerisinde çöker veya akış ile birlikte sürüklenir veya tortu olarak kalırlar. Bu yüksek sıcaklık sonucu elektrot malzemelerinde aşınma ne miktarda ve ne şekilde gerçekleşecektir. Şekil 3.7'de dielektrik sıvı içerisinde, farklı elektrot malzemeleri ile gerçekleşen bir kıvılcım erozyonunda ateşleme periyodu ile R_{max} μm cinsinden yüzey pürüzlülüğü değişimi (Şekil 3.7a), yüzde olarak karşıt elektrot aşınması (Şekil 3.7b), mm^3/dk cinsinden uzaklaşan malzeme eğrileri verilmiştir (Şekil 3.7c). Akımın arttırılması ile aşınma değerlerindeki ve yüzey pürüzlülüğündeki artış görülmektedir. Bir önceki konuda geçen parametrelerden akım ve frekansın aşınmayı ve yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediği bu grafikler ile daha açık görülmektedir. Farklı ortamlarda gerçekleşmesine, farklı malzemeler işleme girmesine ve parametrelerde farklılıklar olmasına rağmen elektro erozyon ile ateşleme sistemlerinde gerçekleşen olay kıvılcım erozyonudur ve iki olayında fiziği aynıdır. Her ne kadar elektro erozyonda amaç malzeme işlemek dolayısıyla seçilecek malzeme ona göre ise de , kıvılcım erozyonunun aşınmaya sebep olduğu uygulamalarda amaç aşınma olmaması ve malzeme seçimi ona göre ise de sonuçta seçilen malzemeler üzerinde gerçekleşen olaylar aynıdır ve kıvılcım erozyonunun fiziğidir.

Elektrot yüzeyleri arasında oluşan kıvılcımın aşınma dışında da elektrot yüzeylerine çeşitli etkileri vardır. Kıvılcımın oluşturduğu çok yüksek sıcaklık yalnız malzemenin buharlaşarak uzaklaşmasına sebep olmaz, bunun yanında elektrot yüzeyinden içeriye doğru çeşitli ısıl işlemlerin gerçekleşmesini dolayısıyla malzeme özelliklerinde değişimler olmasına sebep olur. Bu malzeme özelliklerindeki değişim ateşleme sistemlerindeki gibi kıvılcım erozyonunun yalnızca aşınma açısından önemli olduğu uygulamalarda önemli değilken elektro erozyon gibi iş parçası üretilen uygulamalarında oldukça önemlidir. Elektro erozyonda çoğu uygulamada kıvılcımın oluşturduğu ısı, iş parçasının özelliklerini çalışmasını olumsuz etkileyecek şekilde

değiştirmemektedir. Hatta bazı durumlarda aşınmaya karşı direnç, örneğin kesme takımlarında, artmaktadır ancak elektro erozyonla üretilen farklı iş parçalarında ömründen önce kırılma görülmektedir. Kıvılcımın sıcaklığı malzemede sertlik değişimine, gerilme durumu değişimine ve çeliklerde karbon içeriğinin etkilenmesine sebep olur [3]. Şekil 3.8’de kıvılcım erozyonuna maruz kalmış 57 HRC’ye sertleştirilmiş UHB Rigor malzemesi ve yüzeyden itibaren sertlik değişimi görülmektedir.

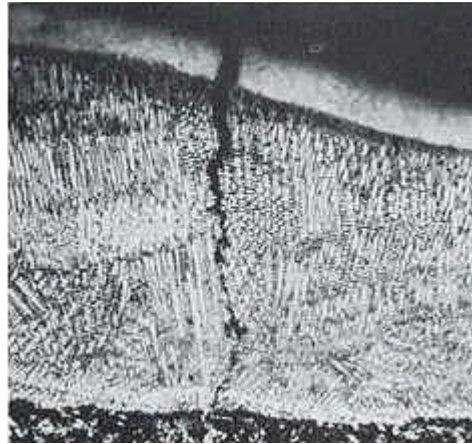


Şekil 3.7 : Ateşleme periyodu ile malzeme aşınması, karşıt elektrot aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değişimi [3]

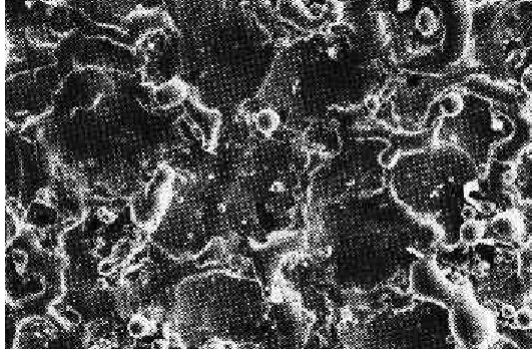


Şekil 3.8 : Kıvılcım erozyonuna maruz kalmış UHB Rigor, HRC 57 [3]

Şekil 3.9'da kıvılcım erozyonuna maruz kalmış bir iş parçasının büyütülmüş kesiti görülmektedir. Yüzeyin yani erimiş bölgenin tekrar çok hızlı katılaştığı açıkça görülmektedir. Bu sertleşme sırasında kristaller malzeme yüzeyine doğru dik olarak büyümüşlerdir. Bu katmanda oluşacak çatlak, taneler arası bir çatlak olacaktır. Erimiş katman yaklaşık 15-30 µm kalınlığındadır. Sertleşmiş bölgede sıcaklık malzemeyi sertleştirmeye yetecek seviyelere yükselmiştir. Bu katmanda sert ve kırılğan bir martenzit yapı oluşmuştur. Tavlanmış bölgede sıcaklık malzemeyi sertleştirecek seviyelere kadar yükselememiş dolayısıyla malzeme bu bölgede yalnızca temperlenmiştir. Temperlenmiş bölgenin altından itibaren etkilenmemiş bölge gelmektedir. Oluşan bu katmanların kalınlıkları malzemenin çeşidine bağlı değildir fakat özellikle malzeme üzerine uygulanan işlemlerin yarattığı açık farklılıklar vardır. Tavlanmış çeliklerde katmanlar daha incedir ve daha az çatlaklar görülmektedir, gevrek ve sertleşmiş katman nerdeyse yok gibidir. Elektro erozyonda kaba işleme ile hassas işlem arasında katman kalınlıkları açısından farklılıklar vardır. Ateşleme periyodu uzadıkça veya akım büyüdükçe erimiş ve sertleşmiş yüzeyler kalınlaşır. Oluşan çatlakların %20'si sertleşmiş katmana kadar ilerler çok azı etkilenmemiş iç bölgeye ulaşır. Çok nadir olarak iç bölgede 10 µm'yi aşan çatlaklar da görülebilir. Bu derinlikte çatlaklar özellikle kıvılcım erozyonunda yüksek alaşımli çelikler ve yüksek alaşımli hız çeliklerinde görülürler. Elektro erozyon ile işlemede bu çatlakları ortadan kaldırmak için çeşitli yöntemler vardır [3]. Şekil 3.10 da elektro erozyon ile işlenmiş bir takım çeliği yüzeyi görülmektedir.



Şekil 3.9 : Elektro erozyonla işlenmiş bir parça iç yapısı. [3]



Şekil 3.10 : Elektro erozyonla işlenmiş bir takım çeliği yüzeyi. $R_o=32 \mu m$ [3]

3.5 Elektro Erozyon ile Bujilerdeki Kıvılcım Erozyonunun Karşılaştırılması

Bujiler de ki elektrot aşınmasına sebep olan etken ile elektro erozyon tezgahlarında malzeme işlenmesini sağlayan etken aynı yani kıvılcım erozyonudur. Elektro erozyon ile bir karşılaştırmaya gidilmesinin sebebi kıvılcım erozyonu konusunda yapılan araştırmaların hemen hemen hepsi elektro erozyon üzerinedir. Aynı prensip olmasına rağmen çalışma koşulların da ki farklılıkların ortaya konulmasında fayda vardır.

Elektro erozyon ile bujilerde görülen kıvılcım erozyonu arasındaki en büyük fark amaçtır. İki sistemde de görülen olay kıvılcım erozyonu iken elektro erozyon da amaç kıvılcım erozyonu ile parça işlemek dolayısıyla aşınma oluşturmaktır. Buda şu anlama gelmektedir ki temel amaç minimum zamanda maksimum aşınmadır. Bujilerde ki kıvılcım erozyonu ise elektrotlarda oluşturduğu aşınma ile bujinin çalışma ömrünü belirlemektedir ve dolayısıyla bujiler de ki temel amaç maksimum sürede minimum aşınmadır. Bu amaçları sağlamak için elektro erozyon sistemlerinde değiştirilebilecek oldukça fazla parametre vardır ancak bujilerde durum oldukça farklıdır. Yapılabilecek değişiklikler oldukça sınırlıdır çünkü çoğu parametre bujinin çalıştığı ortamdan sabit olarak gelmektedir.

Elektro erozyon sistemleri ile bujiler arasındaki en büyük farklardan birisi ortamdır. Elektro erozyon tezgahlarının Rus bilim adamları B.R. Lazarenko ve N.J Lazarenko tarafından ilk geliştirildiği 1943 yılında [3] elektrotlar arasında yalıtkan olarak bildiğimiz hava kullanılmakta idi. Ancak daha sonra fark ettiler ki havaya karşın sıvı

mineral yağların oldukça fazla avantajı vardı. Daha sonra petrol ve beyaz ispirotodan (ör: Kristallol 60) üretilen dielektrikler kullanılmaya başlandı. Bu yeni dielektrikler ile kıvılcım aralıkları küçültülmüştür dolayısıyla daha hassa yüzeyler elde edilmiştir, daha hassas çalışılmıştır, kıvılcım frekansı arttırılmıştır, parçacıklar daha kolay uzaklaştırılmıştır. 1960'dan beri ise elektro erozyon tezgahları için gerekli dielektrik sıvı bir endüstri haline dönüşmüştür ve bir çok firma özel minerallerin üretimini gerçekleştirmektedir. Genelde kullanılan dielektrikler ise madeni yağ, gaz yağı, silikon yağı, deiyonize sudur. Elektro erozyon tezgahlarında işleme uygun farklı dielektrikler seçilebilmekte ve dielektrik sonuçta sistemde sabit olmaktadır. Ancak bujilerde ise böyle bir seçme şansı bulunmamaktadır. Sonuç olarak bujinin oluşturduğu kıvılcımın görevi yanma odasındaki hava-yakıt karışımını ateşlemek olduğu için bujinin kıvılcım erozyonuna maruz kaldığı ortam bu hava yakıt karışımıdır. Şu da önemlidir ki motorun çeşitli çalışma koşullarına göre bu hava-yakıt karışımının içeriği de değişmektedir. Dielektrik sıvının en önemli getirisi elektro erozyon tezgahları için çok daha düşük gerilim farklarında kıvılcımın oluşmasıdır. Bunun en önemli sebebi dielektrikler içerisindeki iletken parçacıklardır. Elektro erozyon tezgahlarında dielektrik sıvı içerisinde 40 V ila 400 V [5] arasına kıvılcım oluşmakta iken bujilerde hava-yakıt karışımında binlerce volt seviyesinde oluşması dielektrik sıvının bir avantajıdır. Ancak şu çok önemlidir ki bu çok yüksek gerilim farkı ile kıvılcımın oluşması, istenilen ve gerekli bir durumdur. Aksi taktirde bujilerde düşük gerilim farkı ile oluşacak bir kıvılcım ateşlenmeyi sağlamayacaktır.

Kıvılcım erozyonunda önemli parametrelerden ikisi puls frekansı ve bekleme zamanıdır. Elektro erozyon tezgahlarında puls frekansı, puls süresi ve duraklama süresinin aşınma miktarı ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi Şekil 3.5'te görülmektedir. Dolayısı ile frekans, puls süresi ve duraklama zamanının ayarlanması ile aşınma miktarı ve yüzey pürüzlülüğü değiştirilebilmektedir. Ancak bujilerde bu özellikler aracın hız ve ivmelenme durumuna bağlı olarak sürekli değişiklik göstermekte ve bu değerler üzerinde aşınmayı düşünerek herhangi bir değişikliğe gitmek bujinin asli görevini tam anlamıyla yerine getirmesi açısından mümkün değildir.

Yine kıvılcım erozyonundaki en önemli parametrelerden birisi hem gerekli gerilim farkını değiştirmesi hem de oluşan yüzey pürüzlülüğünü değiştirmesi açısından kıvılcım aralığıdır. Kıvılcım aralığı elektro erozyon tezgahlarında belirlenmiş işlem parametrelerine göre ayarlanır ve sabit tutularak işlem yapılır. Nümerik kontrollü bir cihaz tarafından sürekli iş parçası ile takım elektrotu arasındaki mesafe sabit tutulur. Aynı zamanda bir parametre olarak kıvılcım aralığını değiştirmek mümkündür. Bujilerde ise buji konstrüksiyonuna bağlı olarak elektrot mesafesi yani kıvılcım aralığı belirlidir. Bir parametre olarak değiştirilemez. Ancak konstrüksiyonunda ki temel düşünce kıvılcım aralığı o motor için ateşlemeyi sağlayacak maksimum enerjiyi oluşturacak kıvılcımın gerçekleşeceği genişlikte olmalıdır. Bujilerdeki kıvılcım aralığı motor modeline göre 0 ila 2mm arasında değişir [4]. Ama en önemli nokta elektro erozyon tezgahlarında nümerik kontrol cihazı ile kıvılcım aralığının sürekli sabit tutulmasıdır. Bujilerde bu mümkün olmadığı için aşınma ile elektrot mesafesi dolayısı ile kıvılcım aralığı giderek büyümekte ve bir süre sonra kıvılcım oluşmamaktadır. Bu sebep ile kıvılcım erozyonu bujilerde çok önemlidir.

Aşınma miktarlarına bakıldığı zaman elektro erozyon ile işleme ile bujiler arasında çok büyük bir uçurum olduğu görülür. Belki çok kesin olarak bir şey ifade etmeyecektir ancak aradaki uçurumun büyüklüğünü göstermek açısından yeterli bir örnek olacaktır. Şekil 3.7'yi incelersek burada 20A değeri için 100 µs (mikrosaniye) puls periyoduyla çalışan elektro erozyon işlemi sonucu gerçekleşen aşınma 50 mm³/dak, gerçekleşen karşıt elektrot aşınması da %4 dolayısıyla 2 mm³/dak 'dır. Periyot ile basit bir hesaplama yaptığımız takdirde aşınma değerlerini oluşan kıvılcım başına çelik iş parçası için 83.300 µm³; karşıt elektrot için, bu muhtemelen bakır veya grafit, kıvılcım başına aşınma 3300 µm³ olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak bujilerde yapılan deneyler sonucu en düşük kıvılcım erozyonu dayanımı çıkan NiCr25FeAlY için aşınma değeri ortalama kıvılcım başına 232,3 µm³ çıkmaktadır. Aradaki bu çok büyük fark amaç dolayısı ile oldukça doğaldır. Sebep ise öncelikle frekans farkı ve malzemedir. Malzemelerin kıvılcım erozyonuna karşı dayanımı çok fazla incelenmemekle birlikte elektro erozyonla işlenebilirliği için hazırlanmış tablolar bulunmaktadır. Malzemelerin kıvılcım erozyonuna karşı dayanımı ile ilgili araştırmalar ise yalnızca konuyla ilgili özel firmalar tarafından yapılmakta ve bu araştırmalar da genelde yalnızca firma içinde kalmaktadır. Elektro erozyonda iş parçası ile takım elektrotu arasındaki bu %96'lık aşınma farkının ise önemli

sebepleri malzeme ve elektrotların kutuplarının farklı olmasıdır. Pozitif kutuplu elektrotta ki aşınma negatif kutuplu elektrodun aşınmasına göre daha fazladır. Bujiler içinde aynısı geçerlidir. Merkez elektrot pozitif kutup, ana elektrot negatif kutuptur ve dizayn açısından bunun değişmesi mümkün değildir, dolayısıyla kritik olan aşınma her zaman orta elektrottadır. Elektro erozyonda iş parçası olarak genellikle çelik, bakır, alüminyum, nikel alaşımları işlenirken, elektrot malzemesi olarak bakır, pirinç, grafit başta olmak üzere çeşitli malzemeler kullanılır. İşlenecek parçanın ergime sıcaklığı ve ısı önemli olup diğer özelliklerin (örneğin sertliğin) bir önemi yoktur. Değişik malzemelerin kıvılcım erozyonu ile aşınmaları arasında yüzlerce kat fark olabilmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi aşınmalar arasındaki bu çok önemli farkın bir sebebi de elektro erozyon da kullanılan dielektrik sıvının işlemini kolaylaştırmasıdır.

4. KIVILCIM EROZYONU ile PARAMETRELER ARASI İLİŞKİ

4.1 Giriş

Kıvılcım aralıklarında oluşan kıvılcımın sebep olduğu aşınmayı incelemek için çeşitli deneyler yapılmış ve halen yapılmaktadır. Temel olarak bu deneylerin amacı çeşitli parametreler ile aşınma miktarının ne şekilde değiştiğini tespit etmektir. Esasen elektro erozyon üzerine yapılan çalışmalar temel olarak alınabilmekte ancak kıvılcım enerjisinin ateşleme işleminde kullanıldığı buji ve mikro ateşleyiciler için özel deneysel çalışmalara gerek duyulmaktadır. Aynı zamanda elektro erozyon sistemlerinde çoğu parametre değişken ve sistemin neredeyse bütün parametreleri kontrol edilebilirken ateşleme sistemlerinde bu parametreler sistemin kendi içerisinde beraber çalıştığı farklı organlar tarafından belirlenmektedir. Bu bölümde bahsi geçen deneyler daha önce Robert Bosch bünyesinde yapılmış makro boyuttaki ateşleme organları olan bujiler ve Georgia Teknoloji Enstitüsü tarafından mikro ateşleme organları üzerine gerçekleştirilmiş deneylerdir.

Temel olarak kıvılcım erozyonu ile elektrotlarda oluşacak aşınma incelenecekse, aşınmayı etkileyecek 6 parametreyi esas alarak çalışmalar buna göre yapılmıştır. Bu parametreler kıvılcım aralığı, elektrot yüksekliği ve genişliği, kıvılcım enerjisi, kıvılcımın enerji kaynağı, üretim yöntemi, elektrot malzemesidir. Bu parametrelerden yalnızca birisinin araştırılacağı deneylerde de diğer parametrelere önem verilmeli ve farklılıklara sebep olacak diğer parametre değişimlerine dikkat edilmelidir.

4.2 Kıvılcım Erozyonu ve Malzeme İlişkisi

Kıvılcım aralığını oluşturan elektrot malzemeleri çok dikkatli seçilir. Çünkü kıvılcım aralığının erozyon karakteristiği direkt olarak malzemenin özelliklerine bağlıdır. Ancak literatürde şu belirtilmiştir ki malzemelerin aşınma miktarını mekanik bir özelliğe direkt olarak bağlamak mümkün değildir [6]. Ancak şu da söylenmektedir ki sünek metallerin erozyon miktarı erozyona uğramış yüzeyin sertliği, sünekliği ve ısı kapasite, ısıl iletkenlik ve ergime noktası gibi termofiziksel özellikleri ile ilgilidir [6]. Yine çeşitli makalelerde [6-11] yüksek ısıl kapasitesi, yüksek ergime sıcaklığı ve iyi oksidasyon direnci olan malzemelerin erozyona karşı daha dirençli olduğu belirtilmiştir. Bundan öte malzemelerin erozyon direnci direkt olarak ergime ve buharlaşma sıcaklıklarına bu değerlerden de süblimleşme enerjilerine bağlıdır [11]. Engel'de [12] malzemenin erozyon karakteristiğini etkileyen diğer bir etkenin malzemenin iç yapısı olduğunu söylemektedir. Engel'in bu yaklaşımı özellikle kompozit malzemeler için doğrudur.

Bütün bunlardan ve literatürden şunu söyleyebiliriz ki kıvılcım elektrotu olarak kullanılacak malzemelerde dikkate alınacak özelliklerde ergime noktaları, buharlaşma sıcaklığı, yanma ortamındaki pulverizasyon direnci ve oksidasyon karakteristikleri önemlidir.

Genel olarak ateşleme elemanlarında tercih edilen malzemeler yani buji malzemeleri nikel, platin, gümüş, altın, iridyum ve bunların alaşımlarıdır. Bu bölümde incelenen malzemeler de bu yüzden nikel, platin ve gümüştür. Bu temel malzemelerin değişik alaşımları ile erozyon dayanımı daha da arttırılmaya çalışılmıştır. Ancak şu kesindir ki temel olarak özelliklerine baktığımız taktirde nikel 1452 °C ergime sıcaklığı [13] ile böyle bir uygulama için tercih edilen malzemedir ve zaten şu an dünyada en yaygın kullanılan buji malzemesidir. Aynı zamanda kolay işlenebilirliği de özellikle mikro ateşleyiciler için önemli bir tercih sebebidir [14]. Platin de yüksek ergime sıcaklığı ile bu konu için ilginç bir malzemedir, ergime sıcaklığı 1768,4 °C 'dir. Platin yeni geliştirilen uzun ömürlü bujilerde oldukça fazla kullanılan bir malzemedir.

Diğer önemli malzemelerden birisi de gümüşdür. Gümüşün ergime sıcaklığı düşük olmasına rağmen elektriksel özelliklerinin üstünlüğü dolayısı ile özel bujilerde, örneğin yarış otomobilleri için imal edilmiş özel bujiler gibi, kullanılmakla birlikte kaplama olarak da uygulamaları görülmektedir.

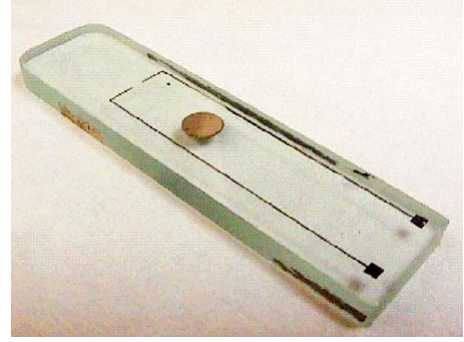
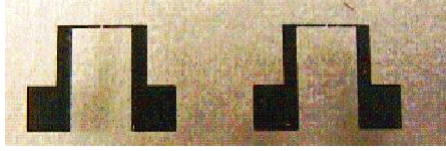
4.3 Deney Metotları ve Dizayn

Elektrotların ve ortamın bir çok özelliği kıvılcım aşınması karakteristiğinde farklılıklara sebep olmaktadır. Elektrot yüksekliği, elektrot genişliğinin kıvılcım erozyonu karakteristiği üzerine etkisini bilmemiz minimum aşınmayı sağlayacak optimum kıvılcım aralığının belirlenmesini sağlayacaktır. Elektrot malzemesi ile ve üretim yöntemi ile erozyon karakteristiğini bilmek uygun, optimum malzeme ve imalat yönteminin seçimini sağlayacaktır. Enerji kaynağının erozyon karakteristiği üzerindeki etkisi parametrelerin değiştirilebildiği uygulamalarda erozyonu optimize etmek için bilinmesi gereken bir özelliktir.

Altı temel parametrenin incelenmesi gerekliliğinden bahsetmiştik bu sebeple her parametre için yapılmış altı deneyi inceleyeceğiz. Tekrarlarsak bu parametreler elektrot yüksekliği ve genişliği, kıvılcım enerjisi, kıvılcım aralığı, güç kaynağı parametreleri, elektrot malzemesi ve üretim yöntemi.

Parametrelerden bir tanesi üretim yöntemi idi. Şu unutulmamalıdır ki çok değişik imalat yöntemleri olduğu için burada önemli olan üretim yönteminin erozyon miktarını değiştirip değiştirmediğidir. Veya fark önemsenecek boyutta mı, değil mi sorusuna cevap aranacaktır. Yapılmış olan deneylerde mikro elektrot mesafesi için 2 kaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerden birincisi elektro kaplama diğeri ise film baskıdır (screen printing). Elektro kaplama yöntemiyle yalnız nikel örnek hazırlanmış, film baskı yönteminde ise nikel, platin ve gümüş örnekler cam üzerinde hazırlanmıştır (Şekil 4.1). Şu önemlidir ki screen printing yönteminde boyut hassasiyeti tam olarak sağlanamamaktadır. Bunun sebebi malzemelerin özellikleridir.

Deneyleerde g¼c kaynağı olarak 1000 V girişli ve maksimum 10 kV çıkışlı bir y¼ksek gerilim amfisi kullanılmıştır. Aynı zamanda puls sinyallerinin ayarlanabilmesi için programlanabilir puls jenerat¼r¼ kullanılmıştır. Puls jenerat¼r¼ ile frekans 20 Hz, kapanma zamanı %6 yani açık kalma zamanı %94 seçilmiştir. Frekans değişimi ve puls için açma kapama s¼resi ile aşınma hızının ve y¼zey p¼r¼zl¼l¼đ¼n¼n nasıl değişeceği kıvılcım erozyonundaki bazı parametreler b¼l¼m¼nde incelenmiştir. Aslında y¼ksek gerilim amfisi yerine başka y¼ntemlerde s¼z konusu olabilir ancak en kullanışlı ve doğru olanı y¼ksek gerilim amfisidir.



şekil 4.1 : Deneyle parçaları solda 175 μm kıvılcım aralıklı sağda 2 mm kıvılcım aralıklı

Yapılan bu deneyle sonuçlarını elde etmek yani erozyon miktarını tayin etmek de ayrı bir ¼nem taşımaktadır. Georgia Teknoloji Enstit¼s¼ erozyon miktarı ¼l¼m¼nde iki b¼y¼kl¼đ¼n s¼z konusu olduğunu s¼yl¼yor. Bunlar erozyonun niceliğinin ¼l¼m¼ ve erozyonun niteliğinin ¼l¼m¼. Nicelik ¼l¼m¼ erozyon dolayısıyla elektrotta meydana gelen aşınmanın miktarının optik y¼ntemler ile ¼l¼lmesidir. Optik ¼l¼m belirli bir zaman geçimi veya kıvılcım adedinden sonra malzemede gerçekleşen kaybın bir kamera veya kameralı mikroskop yardımı ile ¼l¼lmesidir. ¼ncelikle deneyle ¼ncesi uzunluk ve genişlik ¼l¼mleri yapılır. Deneyle sonrası tekrar uzunluk ve genişlik ¼l¼mleri yapılarak aradaki kayıp alan ile 3. boyutun çarpımından kayıp hacim ortaya çıkar. Belirli kıvılcım sayıları için bu ¼l¼mler yapıldığı taktirde aşınma grafiği çıkar. Bu eğrinin eğimi de aşınma hızıdır. Genelde kullanılan birim k¼bik mikrometredir (μm^3). Ancak alandan hacim bulunması için yapılan çarpma işlemi bir miktar yanılma payı ortaya çıkarmaktadır.

Erozyon miktarı ve hızı ile ilgili sayısal değerleri elde etmek için bahsedilen kamera yöntemi yeterli iken erozyon mekanizması ile daha detaylı bilgi almak istenirse en iyi yöntem erozyona maruz kalmış bölgenin TEM (tarayıcı elektron mikroskobu) ile incelenmesidir. Amaç yalnızca erozyona maruz kalan yüzeyi incelemek olmamalı fakat aynı zamanda elektrottan erozyon aracılığı ile uzaklaştırılmış malzemeyi de incelemek olmalıdır. Bunun için cam üzeri kaplama örneği idealdir çünkü uzaklaşacak malzeme cam yüzeyinde kalacaktır.

4.4 Deneilerin Yapılışı

Kıvılcım aşınmasını etkilediği düşünülen altı parametre için altı değişik deney yapılarak bu parametrelerin erozyon üzerindeki etkisi hem nicelik hem de nitelik olarak incelenmiştir. Ölçümler ve incelemeler bir buçuk milyon kıvılcım adedi veya kıvılcım aralığındaki çakmalar düzensizleşinceye kadar sürdürülmüştür. Kıvılcım aralığındaki çakmaların düzensizleşmesi demek ateşleme elemanının arızalandığı veya ömrünü tamamladığı anlamına gelmektedir. Bu deney periyodu sonunda kamera ile aşınma ölçümleri yapılmış ve TEM morfolojik inceleme yapılmıştır. Tüm deneyler laboratuvar ortamındaki havada yapılmıştır.

Yapılan altı deneyden birincisi kıvılcım aralığının erozyon üzerindeki etkisini anlamak amacıyla yapılmıştır. Bu deneyde Şekil 4.1'de görülebilecek olan 175 μm ve 2 mm kıvılcım aralığına sahip deney parçaları kullanılmıştır. İkinci deneyde farklı elektron yükseklikleri ve genişliklerinin erozyona etkisi incelenmiştir. Bu deney için 2 adet farklı elektrot yüksekliklerine sahip 175 μm 'lik 2 deney parçası ve yine farklı genişlik ve yüksekliklere sahip 2 mm'lik iki deney parçası kullanılmıştır. Üçüncü deneyin amacı kıvılcım enerjisinin aşınmayı nasıl etkilediğini bulmaktır. Bu sebeple altı deney parçası 5 ve 10 mJ kıvılcım enerjileri için ayrı ayrı denenmiştir. Dördüncü deneyde dört adet deney parçası iki değişik güç kaynağı tipinde çalıştırılmıştır. Deney parçalarının 2 farklı imalat yöntemi ile hazırlandığı belirtilmiştir, bu iki tip deney parçası ile üretim yönteminin aşınma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son olarak altıncı deneyde 3 farklı elektrot malzemesinin nikel, platin ve gümüş erozyon karakteristiklerinin farkı incelenmiştir.

1.Deney : Bu deneyde kullanılan 175 μm ve 2 mm kıvılcım boşluğuna sahip parçaların tümü nikelden ve elektrokaplama yöntemi ile imal edilmiştir. Tüm deneylerde aynı güç kaynağı ve prensibi kullanılmıştır. Tüm deneylerde 20 Hz puls frekansı kullanılmıştır. Deney süresi 1,5 milyon kıvılcım olarak alınmıştır. 175 μm 'lik örneklerden 2 tane alınmış birisi 5 mJ kıvılcım enerjisi ile diğeri 10 mJ kıvılcım enerjisi ile 2 mm'lik örneklerden ise her enerji seviyesi için ikişer tane alınmıştır. Bunun sebebi boyutlar büyüdükçe arada oluşacak farklarda büyümektedir ve dolayısıyla bir ortalama yapılması gerekmektedir.

2.Deney : Bu deneyde farklı uzunluk ve genişliklere sahip elektrotlar kullanılmıştır. Tüm parametreler sabit tutulmuştur. Frekans 20 Hz, kıvılcım enerjisi 10 mJ olarak alınmıştır ve diğeri tüm parametreler bütün deneyler için aynı alınmıştır. 175 μm 'lik deney parçaları için 40 ve 160 μm uzunluklar seçilmiştir. 2mm lik deney parçalarından ikisi yaklaşık 250 μm genişliğinde ve 80 μm uzunluğundadır. Diğeri ikisi ise 100 μm genişliğinde ve 20 μm genişliğindedir.

3.Deney : Bu deneyin amacı kıvılcım enerjisinin erozyon üzerindeki etkisi olduğundan tüm diğeri parametreler aynı tutularak 175 μm ve 2 mm kıvılcım aralıklarına sahip deney parçaları 5 mJ ve 10 mJ enerjilerinde 1,5 milyon kıvılcım çakması ile deneye tabi tutulmuştur.

4.Deney : Literatürde ateşleme enerjisinin kaynağındaki değişimin erozyon karakteristiği ve aşınma miktarı üzerinde bir etkisi olabileceği belirtilmektedir [15]. Dolayısı ile tüm diğeri koşullar aynı kalacak şekilde 2 adet 2 mm kıvılcım aralığına sahip elektrotlar 10 mJ kıvılcım enerjisi ve 20 Hz frekans ile laboratuvar ortamındaki hava ile deneye tabi tutulmuştur. Bu deney parçalarından birisine ateşleme enerjisi yüksek gerilim kapasitörü yöntemi ile diğeri ise çift transformatör ile elde edilmiştir. Deney bir milyon kıvılcım adedi sürdürülmüştür.

5.Deney : 2 mm kıvılcım aralıklı deney parçalarından birisi elektro kaplama ile diğeri screen printing ile nikel malzemededen elde edilmiştir. Elektro kaplama ile üretilmiş deney parçası 100 μm genişliğinde ve 20 μm uzunluğundadır; screen printing ile elde edilmiş deney parçası ise 300-350 μm genişliğinde ve 35 μm yüksekliğindedir. Deney laboratuvar ortamında havada, 10 mJ kıvılcım enerjisi ile bir milyon kıvılcım adedi için gerçekleştirilmiştir.

6.Deney : Bu deneyde screen printing yöntemi ile nikel, platin ve gümüş elektrot malzemeleri ile farklı malzemelerin erozyon miktarı ve karakteristiğini incelemek üzere deney parçaları hazırlanmıştır. Elektrotlar 200-350 µm genişliğinde ve 5-35 µm uzunluğundadır. Elektrot genişlik ve uzunluklarındaki bu farklılıklar malzemelerin screen printing yöntemi özelliklerinden dolayı tam bir hassasiyet sağlanamamasından dolayıdır. Frekans 20 Hz, kıvılcım enerjisi 10 mJ, laboratuvar ortam havasında bir milyon kıvılcım ile gerçekleştirilmiştir.

4.5 Deney Sonuçları

1.Deney : Deneyde farklı kıvılcım aralıkları ile hazırlanmış elektrotlar 1,5 milyon kıvılcıma maruz bırakılmış ve çeşitli aralıklar ile ölçüm yapılmıştır. Çeşitli kıvılcım adetlerindeki kaybolan malzeme miktarları ortaya çıkartılmış ve grafik olarak ifade edilmiştir. Ve grafikte de ortaya çıkan eğrinin eğimi erozyon hızını vermektedir. Sonuçta elde edilen değerler 175 µm kıvılcım aralığına sahip deney parçalarında kıvılcım başına aşınma miktarı 5 mJ kıvılcım enerjisi için 0,04 µm³ ve 10 mJ kıvılcım enerjisi için 0,14 µm³ olarak bulunmuştur. 2 mm kıvılcım aralığına sahip deney parçalarında kıvılcım başına aşınma miktarı 5 mJ kıvılcım enerjisi için 0,05±0,01 µm³ ve 10 mJ kıvılcım enerjisi için 0,23 µm³ olarak bulunmuştur.

Deney sonucu kıvılcım adedi ile birlikte aşınma miktarının da arttığıdır ki buda zaten beklenen bir durumdur. Sonuçlar incelendiği zaman görülen şudur ki düşük kıvılcım enerjisinde 5mJ için aşınma miktarlarında iki kıvılcım aralığı içinde bir farklılık yoktur. Bu noktadan şunu diyebiliriz ki düşük kıvılcım enerjilerinde kıvılcım aralığının aşınma miktarına bir etkisi yoktur. 10 mJ kıvılcım enerjisi için de aşınma miktarları arasındaki fark çok büyük olmadığı için burada da kıvılcım aralığının aşınma miktarına bir etkisi olmadığı Georgia Teknoloji Enstitüsü tarafından belirtilmiştir. Ancak kıvılcım enerjisindeki artış ile farklı kıvılcım mesafelerindeki aşınma miktarları arasındaki farkın büyümesi düşündürücüdür. Dolayısı ile daha büyük kıvılcım enerjileri için kıvılcım aralığının aşınma miktarına etkisi olmadığını söylemek en azından bu aşamada doğru değildir.

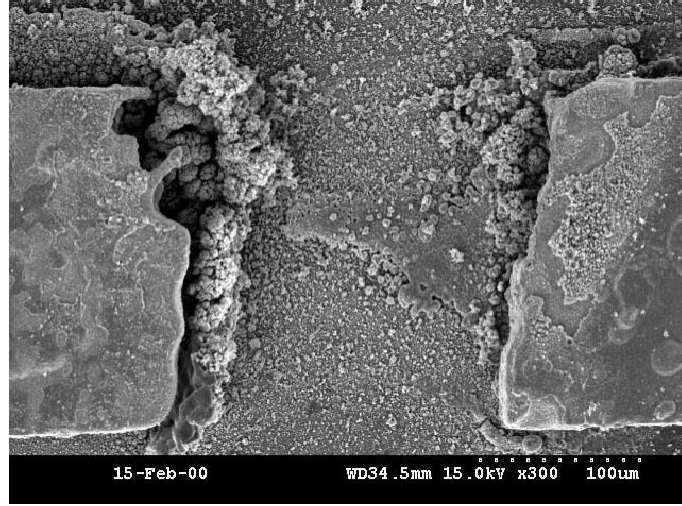
Deney parçalarının deney sonrası TEM incelemesi ile kıvılcım adedi arttıkça elektrot köşelerinin yuvarlandığı görülmüştür. Bunun sebebinin elektriksel alanın sivri köşelerde daha yoğun olması olduğunu belirtilmiştir. Bu sebeple kıvılcım bu noktalarda daha çok çakar. Şekil 4.2’de 175 μm ve Şekil 4.3’te 2 mm kıvılcım aralıklarına sahip elektrotların deney sonrası TEM fotoğrafları görülebilir. Köşelerin ortadan kalkması ve yuvarlanması bu fotoğraflarda daha da açık olarak görülmektedir. Elektrot uçlarına bakıldığı zaman aynı erime ile aşınmış görüntüsüne sahip yüzeyler görülmektedir. Bu fotoğraflar eşliğinde şunu söyleyebiliriz ki kıvılcım aralığı erozyonun mekanizmasını etkilememektedir.

2.Deney : Farklı elektrot yükseklikleri ve genişlikleri ile yapılan deney sonrası belli kıvılcım adetleri için ölçümler yapılmış ve hacimsel aşınma ile kıvılcım adedi arası grafik çıkartılmıştır. 175 μm kıvılcım aralıklı deney parçalarından kalın elektrotlu olan için aşınma kıvılcım başına 0,18 μm^3 , ince elektrotlu deney parçasında ise 0,14 μm^3 olarak ölçülmüştür. 2 mm kıvılcım aralığına sahip elektrotlarda kalın ve uzun elektrotlu deney parçasında aşınma 0,23 μm^3 , kısa ve ince olan elektrotlarda ise 0,6 \pm 0,1 μm^3 olarak ölçülmüştür.

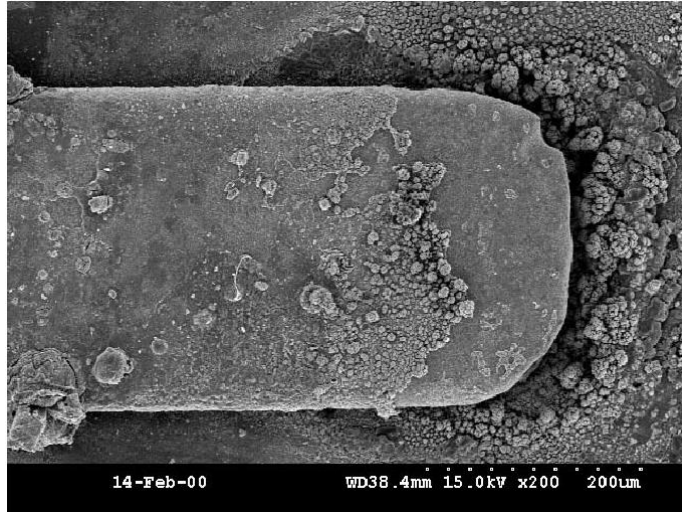
175 μm kıvılcım aralıklı deney parçalarında yapılan ölçümlere göre aşınma miktarlarında çok da önemli bir fark görülmemektedir. Dolayısı ile elektrot boyutlarının aşınma miktarını etkilemediğini söyleyebiliriz. Ancak bu aşınmanın eşitliği durumu ve TEM ile yapılan incelemede şu görülmüştür ki aşınmanın karakteristiği farklıdır. Aynı miktarda aşınma için kalın elektrotta aşınma uzunluğu düşük iken ince elektrotta aşınma uzunluğu fazladır ve elektrotun etrafında kalan kopmuş malzeme daha fazladır.

2 mm’lik kıvılcım aralığına sahip deney parçalarında ise farklı boyutlardaki elektrotlar ile yapılan deney sonucu oldukça farklı hacimsel aşınma oranları görülmüştür. Küçük boyutlara sahip olan elektrottaki aşınmanın büyük boyutlara sahip olana göre daha fazla olduğu ölçülmüştür. Bu sonuç teoriyi de doğrulamaktadır. Teoride elektrot boyutları ile aşınmanın ters orantılı olduğu belirtilmiştir [4,7,16]. Bunun sebebi küçük elektrotların yüzeyindeki kıvılcım enerjisi daha fazla yoğunlaşmasıdır. Yani birim alana düşen enerji daha fazla olmaktadır.

İki farklı kıvılcım aralığı için sonuçların farklılığı ilginçtir. Bunun sebebi olarak çeşitli ölçüm hataları düşünülebilir ancak çıkan sonuç doğrudan olabilir, yani 175 µm kıvılcım aralığında elektrot boyutları aşınma miktarı üzerinde etkili değilken 2 mm kıvılcım aralığında etkilidir.



Şekil 4.2 : 175 µm kıvılcım aralıklı deney parçası TEM fotoğrafı [26]



Şekil 4.3 : 2 mm kıvılcım aralıklı deney parçası TEM fotoğrafı [26]

3.Deney : Bu deneyde kıvılcım enerjisinin erozyon miktarı üzerine etkisini incelemek üzere 5 mJ ve 10 mJ enerjileri için ölçümler yapılmıştır. 5 mJ kıvılcım enerjisinde 175 µm kıvılcım aralığı olan deney parçası için kıvılcım başına $0,04 \mu\text{m}^3$ ve 2 mm kıvılcım aralığı olan deney parçası için $0,05 \pm 0,01 \mu\text{m}^3$ olarak elde

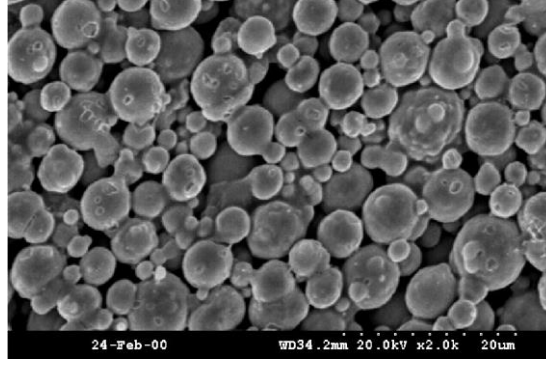
edilmiştir. 10mJ kıvılcım enerjisinde ise 175 µm kıvılcım aralığı olan deney parçası için kıvılcım başına 0,16±0,02 µm³ ve 2 mm kıvılcım aralığı olan deney parçası için 0,23 µm³ olarak elde edilmiştir.

İki kıvılcım enerjisi arasında ki fark oldukça açıktır. Bu deney sonucu göstermektedir ki kıvılcım enerjisi arttığı zaman aşınma hızı yani kıvılcım başına aşınma miktarı da artmaktadır. Bu oldukça önemli bir bilgidir. Çünkü erozyon hızının zamanla sabit olduğu düşünülmektedir. Ancak ilerde açıklanacağı şekilde bu doğru değildir. Deneyler de bunu ispatlamaktadır. Aynı zamanda bu deney sonucu aşınmanın kıvılcım aralığına bağlı olmadığı tezi ile çakışmaktadır. Çünkü ateşleme sistemlerinde kıvılcım enerjisi sabit değildir. Kıvılcım aralığı arttıkça gerekli gerilim, dolayısı ile kıvılcım enerjisi de artmaktadır dolayısı ile erozyon hızı da artmaktadır tezini ortaya atabiliriz.

4.Deney : Bu deney farklı güç kaynakları ile erozyonun ilişkisini açıklamak için yapılmıştı. Deney sonucunda kullanılan iki güç kaynağından yüksek gerilim kapasitörü için aşınma miktarı kıvılcım başına 0,6±0,07 µm³ , çift transformatör için 0,6±0,1 µm³ olarak ölçülmüştür. Deney parçalarının TEM ile incelemesinde de herhangi bir farklılığa rastlanmamıştır. Bu da açıkça göstermektedir ki güç kaynağının tipinin erozyon üzerine bir etkisi yoktur.

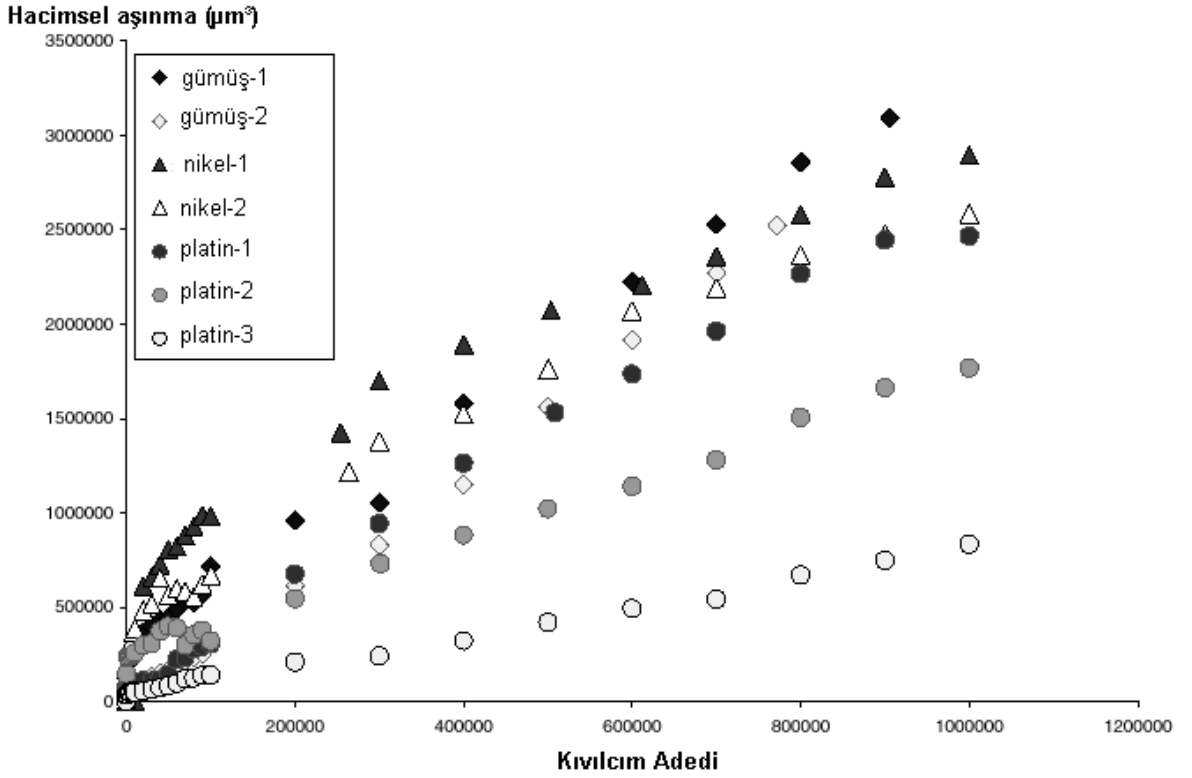
5.Deney : Üretim yönteminin erozyona etkisini anlamak üzere yapılmış bu deney sonucunda nikelden elektrot kaplama ile elde edilmiş deney parçalarındaki erozyon kıvılcım başına 0,6±0,1 µm³ olarak ölçülmüştür. Nikelden screen printing yöntemi ile üretilmiş deney parçalarında erozyon miktarı kıvılcım başına 2,7±0,15 µm³ olarak ölçülmüştür.

Deney sonuçları açıkça ortaya koymaktadır ki screen printing yöntemi ile üretilmiş deney parçalarında aşınma elektro kaplamaya göre daha fazladır. Aradaki bu farkın sebebi yüzeylerin TEM ile incelenmesi ile açıklanmaya çalışılmıştır. Şekil 4.4'te screen printing yöntemi ile hazırlanmış nikel deney parçasının orijinal (deney öncesi) yüzeyi görülmektedir ve yüzeyi oldukça gözeneklidir. Ancak elektro kaplama yöntemi ile hazırlanmış nikel deney parçasının yüzeyi gözenekli değildir. Bu gözenekli yüzey aşınmada ki farkın sebebi olarak düşünülebilir. Bunlar spesifik iki örnek gibi görünmekle birlikte önemli olan şudur ki farklı imalat yöntemleri aynı malzemelerde dahi farklı erozyon miktarlarına sebep olabilmektedir.



Şekil 4.4 : Screen printing yöntemi ile hazırlanmış nikel numune deney öncesi TEM fotoğrafı

6.Deney : Deney sonucu farklı malzemelerin kıvılcım adedi ile aşınma miktarları Şekil 4.5'te görülebilir. Bu şekilde görülen eğrilerin eğimi aşınma hızını dolayısı ile erozyon hızını verecektir. Hesaplanan aşınma değerleri sonucu ortaya çıkan erozyon hızı ortalama olarak nikel için kıvılcım başına $2,7 \pm 0,15 \mu\text{m}^3$, gümüş için $3,2 \pm 0,5 \mu\text{m}^3$ ve platin için $1,6 \pm 0,8 \mu\text{m}^3$ olarak ortaya çıkmıştır. Ortalama denmesinin sebebi eğim sürekli aynı gitmemekte ve eğri üzerindeki noktalara göre farklılık göstermektedir.

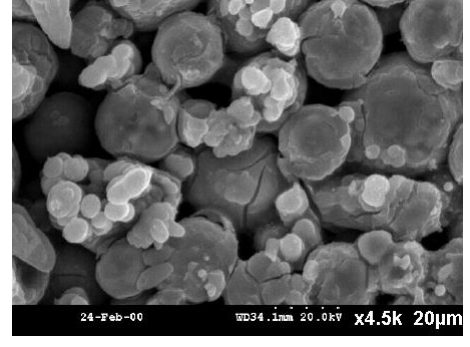
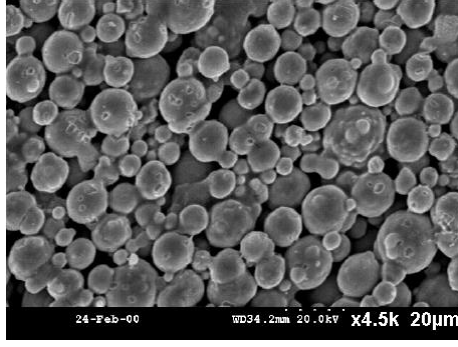


Şekil 4.5 : Malzemelere göre kıvılcım adedi ile hacimsel aşınma grafiği [26]

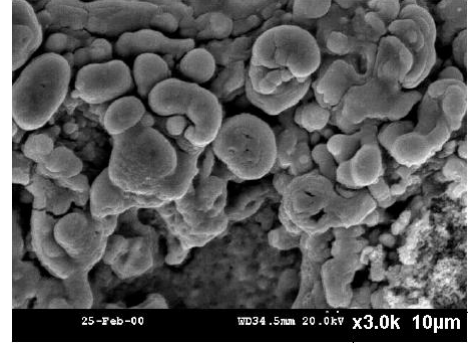
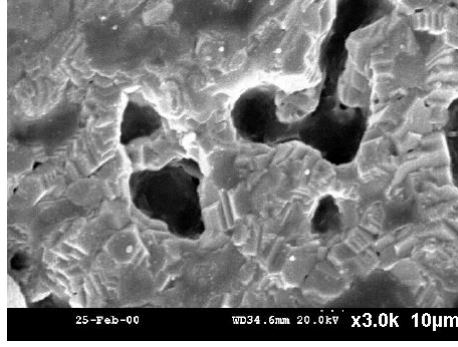
Deney sonuçları açık olarak platinin diğer malzemelere göre daha iyi bir erozyon direncine sahip olduğunu gösteriyor, daha sonra nikel en son olarak gümüş geliyor. Bu sonuçlar literatürdeki [7,17] ergime sıcaklığı yüksek olan malzemenin erozyon direnci fazla olur tezini desteklemektedir.

Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de TEM ile nikel,gümüş ve platin elektrotların deney öncesi ve deney sonrası çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Bu fotoğraflarda görülmektedir ki gümüş bu malzemeler içinde en gözenekli yüzeye sahip olan malzemedir. Gümüşün erozyon dayanımının en düşük olmasının sebebi olarak bu düşünülebilir. Nikel elektrot yüzeyinin platininkinden daha yoğun ve düzgün olmasına karşın platinin erozyon dayanımının daha yüksek olması erozyon dayanımının ergime noktasının yüksek olması ile güçlü şekilde bağlı olduğunun göstermektedir. Nikele göre fiyatının çok daha yüksek olmasına, erozyon dayanımının da düşük olmasına rağmen gümüşün bujilerde ve mikro ateşleme ünitelerinde kullanım bulmasının sebebi en iyi iletken olması ve üstün elektriksel özellikleridir bu nedenle performans istenilen uygulamalarda örneğin yarış otomobillerinin bujileri gibi kullanım bulurlar. Şekil 4.9’da ise solda elektro kaplama ile üretilmiş nikel elektrotun deney sonrası yüzeyi ve sağda ise elektrottan ayrılan parçacıklar görülmektedir.

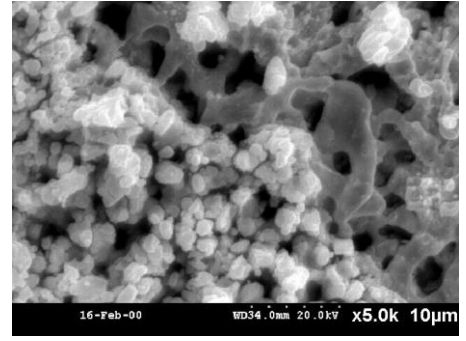
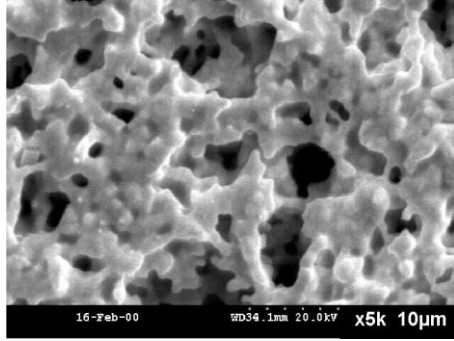
Bu deneyler hangi parametrelerle erozyon miktarının nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu sonuçlar yapılacak deney için bir temel teşkil etmekte ve deney esnasında hangi parametrelere özellikle dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir. Sonuçlar tekrarlanırsa: Düşük kıvılcım enerji seviyeleri için erozyon miktarı kıvılcım mesafesinden bağımsızdır, ancak yüksek kıvılcım enerjilerinde kıvılcım mesafesi ile erozyon arasında doğru orantı olduğu düşünülebilir. Kıvılcım mesafesi ile erozyon mekanizmasında herhangi bir değişim olmamaktadır. Elektrot boyutları incelendiği zaman küçük elektrotların büyüklere göre erozyon direncinin yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle bujiler için çok önemli bir bilgi olan kıvılcım enerjisi arttıkça erozyon miktarı da artar sonucuna enerji deneyi ile ulaşılmıştır. Ateşleme enerjisi için gerekli gerilimin alındığı kaynağın erozyon miktarı veya karakteristiğine bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Elektrotların üretim tekniğinin erozyon miktarını etkileyebileceği görülmüştür. Farklı elektrot malzemelerinin farklı aşınma miktarları verdiği ve malzemelerin kıvılcım erozyonu karakteristiğini belirleyen en önemli özelliğinin ergime sıcaklığı olduğu doğrulanmıştır.



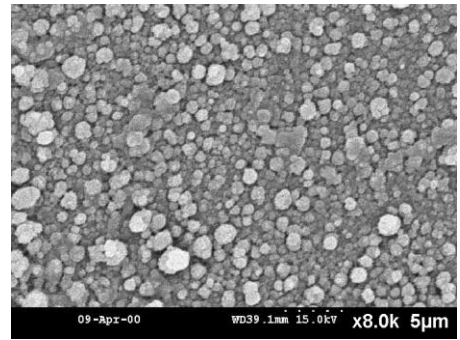
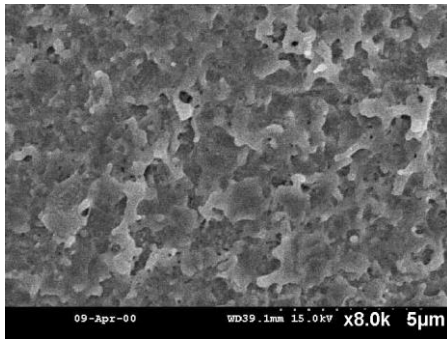
Şekil 4.6 : TEM ile nikel elektrot fotoğrafları sol deney öncesi, sağ deney sonrası [26]



Şekil 4.7 : TEM ile gümüş elektrot fotoğrafları sol deney öncesi, sağ deney sonrası [26]



Şekil 4.8 : TEM ile platin elektrot fotoğrafları sol deney öncesi, sağ deney sonrası [26]



Şekil 4.9 : TEM ile solda elektro kaplama nikel elektrot fotoğrafı, sağda elektrottan ayrılarak cam üzerinde yoğunlaşmış parçacıklar. [26]

5. Bujilerde Kıvılcım Erozyonu Deneyi

5.1 Deneylerin Amaçları

Bu deneyin temel amacı bujilerde şu anda halen üretimde olan ve üretilmesi planlanan elektrot malzemelerinin kıvılcım erozyonu ölçümlerinin yapılmasıdır. Böylece eski ve yeni malzemeler arasındaki erozyon direnci farklarının tespiti yapılabilecek ve maksimum dirence sahip malzeme üretimde yerini alacaktır. Ancak malzeme seçiminde burada yalnızca tek kriter erozyon dayanımı değildir. Bunun yanında maliyetin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Aynı zamanda bu deneyler ile temel amaç ile birlikte bazı yan amaçlarda belirlenmiştir. Bu yan amaçlar şunlardır:

- Erozyon sıcaklık ilişkisinin belirlenmesi.
- Laboratuvar test düzeneği ile motor içi yanma odası gerçek erozyon miktarlarının karşılaştırılması.

Deney düzeneği incelendiği zaman daha iyi görülecektir ki deney düzeneğindeki aşınma miktarları bujinin yanma odasındaki normal çalışma koşullarındaki aşınma miktarlarını tam olarak realize etmemektedir. Ancak deneyin amacı malzemelerin aşınma miktarlarını bulmak değil, farklı malzemeler arasındaki aşınma miktarları farkını ortaya çıkartmak olduğu için bu önemli bir nokta değildir.

Fakat gerçek çalışma ortamlarında aşınma miktarlarının ne kadar olduğu da bujilerin performansını belirlemek için ve seçim yapılması için önemlidir. Bu sebeple motor deneyleri denilen deneyler yapılmakta ve farklı malzemeler ile hazırlanmış bujiler aynı aracın motorunda farklı silindir boşluklarında çalıştırılarak erozyon ölçümleri yapılmaktadır. Bujiler direk yol sürüşlerinde çalıştırıldığı gibi aynı zamanda özel hazırlanmış deney düzeneklerinde yalnız motor ile de çalıştırılmaktadırlar.

Üçüncü bir örnek toplama yöntemi de servislerce bakım esnasında değiştirilen bujilerin gerekli kullanım dataları ile birlikte toplanmasıdır. Bu yöntem hem maliyeti çok düşük hem de çok fazla örnek toplanmasını sağlayarak istatistiksel veriler oluşturulmasını sağlayan önemli bir yöntemdir.

Bu çalışma ile yapılan kıvılcım erozyonu deneyleri sonuçları literatürden incelenen teori ve farklı deneylerin sonuçları ile karşılaştırılarak malzemelerin kıvılcım erozyonu dirençlerinin karşılaştırılması yanında kıvılcım erozyonunun daha iyi anlaşılması sağlanacaktır.

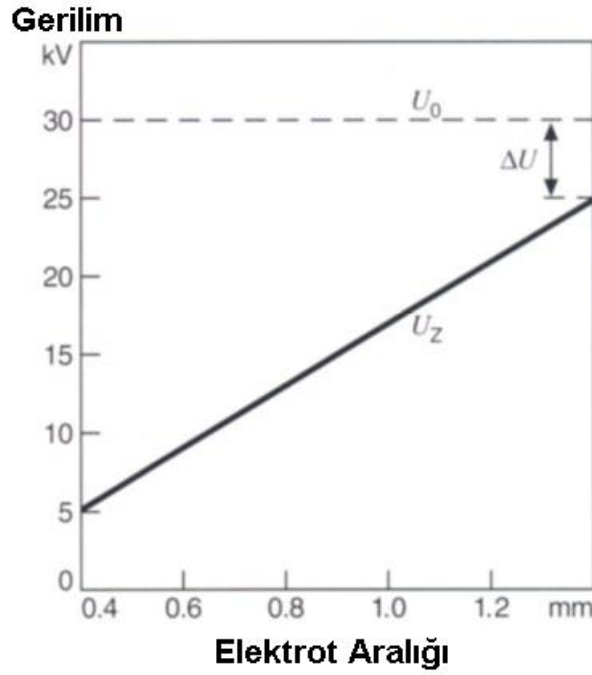
5.2 Bujilerde Kıvılcım Aşınmasının Önemi

Önemle altı çizilmesi gereken bir nokta şudur. Kıvılcım olan her yerde aşınma söz konusudur. Ancak aşınmanın miktarı ve etkisi kıvılcımın görüldüğü noktalara göre büyük farklılıklar göstermektedir. Mutfaktaki gaz ocağının manyetolu çakmağından çıkan kıvılcımda erozyona sebep olmaktadır, bujilerde ki kıvılcımda. Ancak manyetolu çakmakta günde maksimum 20-30 kıvılcım oluşmakla birlikte bujilerde bu oran saniyede 100 defayı aşabilmektedir. Her kıvılcımın mikron mertebesinde küçük bir kraterciğe sebep olduğunu söylemiştik dolayısıyla saniyede 100 kıvılcım ile aşınma miktarının bujide çok daha fazla olacağı ortadadır.

Peki bujinin elektrotlarında oluşan aşınmanın önemi nedir. Merkez ve ana elektrotta meydana gelen malzeme kaybı bujinin çalışmasını ne şekilde etkilemektedir ve neden kıvılcım erozyonu direkt bujinin çalışma ömrü ile ilgili olmaktadır. Bu sorunun cevabını daha önceki bölümlerdeki teori ve deneyler ile incelersek aslında aşınmanın öneminin malzeme kaybı ile ortaya çıkan elektrot aralığındaki değişim olduğu görülür.

Elektrot aralığı merkez elektrot ile ana elektrot arasındaki minimum mesafedir. Elektrot mesafesi ile kıvılcım oluşması için gerekli gerilim arasında direk bir orantı vardır. Elektrot aralığı ne kadar kısa ise gerekli gerilim o kadar düşüktür. Yalnız daha öncede belirtildiği gibi bujilerde önemli olan yanma odası içerisindeki yakıt-hava karışımını ateşleyebilmektir ve bu da ancak belirli bir kıvılcım enerjisi ile

gerçekleşebilir. Bu sebeple elektrot aralığı belirli bir mesafenin altına düşürülemez. Genellikle motor özelliklerine bağlı olarak elektrot mesafesi 0,7 mm ile 1,2 mm arasında değişir. Dolayısı ile elektrot aralığı arttıkça kıvılcımın oluşması için gerekli gerilim artacaktır. İşte kıvılcım erozyonunun bujinin çalışma ömrünü belirlediği nokta burasıdır.



Şekil 5.1 : Elektrot aralığı ile ateşleme gerilimi arası ilişki

Şekil 5.1’de elektrot aralığı ile ateşleme gerilimi arası ilişki görülmektedir. Şekilde U_Z kıvılcım oluşması için gerekli gerilim (bu gerilimin sürekli olarak ateşlemeyi sağladığını kabul ettiğimiz için ateşleme gerilimi diye de adlandırıyoruz), U_0 sistemin sağlayabileceği maksimum gerilim, dolayısı ile ilk gerilim de diyebiliriz, ΔU kalan ateşleme gerilimi rezervidir. Bu grafik şunu göstermektedir ki elektrot aralığındaki değişimler direkt olarak kıvılcım oluşması için gerekli gerilimi arttırmaktadır.

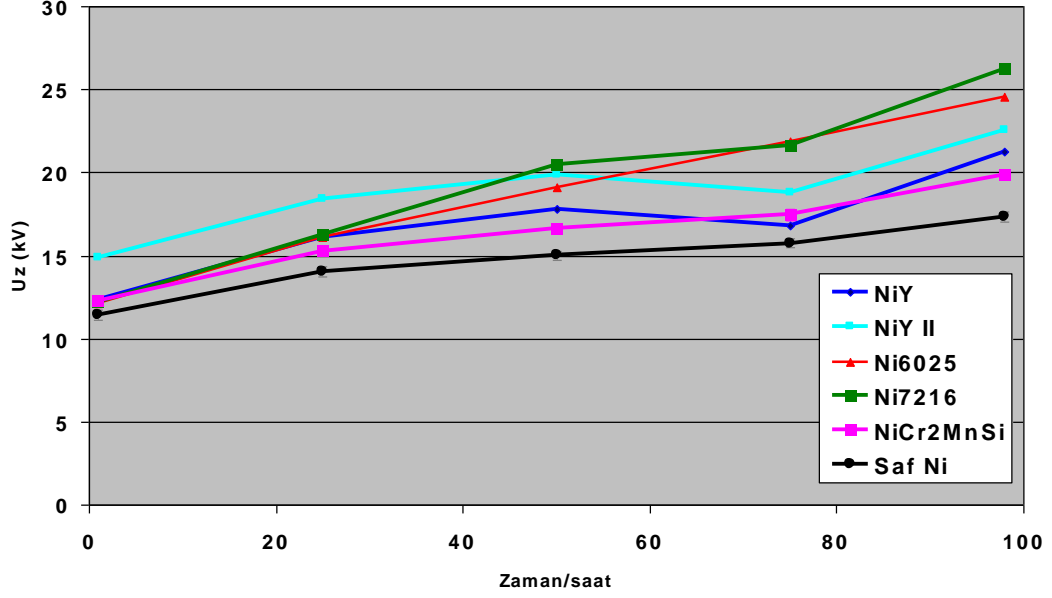
Ateşleme geriliminin artması ise bujinin çalışma ömrünü belirleyen önemli bir etkidir. Çünkü daha önce de bahsettiğimiz gibi ateşleme sistemleri maksimum 30 kV’ kadar yüksek gerilim sağlayabilmektedirler. Elektrot aralığı fazla büyük olursa örneğin 1,4 mm’ye kadar çıkarsa U_Z ’de 28 kV’a kadar çıkar. Kalan gerilim rezervi 2 kV olmaktadır ve bu düşük bir artık gerilim seviyesidir. Düşük artık gerilim bir

sonraki kıvılcımda hava-yakıt karışımına ateşlemeye yetecek enerji verilememesine ve dolayısıyla ateşlemenin kaçırılmasına sebep olacaktır. Daha da büyük elektrot aralıklarında gerekli gerilim 30 kV'uda aşabilecektir. İşte bu iki nota bujinin çalışma ömrünün sonu demektir.

Kıvılcım erozyonu ile elektrot aralığı arası ilişkiyi ise Şekil 2.10 da inceleyebiliriz. Kıvılcım erozyonu ile birlikte hem merkez elektrotta hem de ana elektrot veya elektrotlarda meydana gelen aşınma direkt olarak köşelerden başlayarak elektrot yüzeyinden parça uzaklaşmasına ve dolayısı ile direkt olarak elektrot aralığının genişlemesine sebep olmaktadır. İşte kıvılcım erozyonunun kritikliği ve önemi buradadır. Kıvılcım erozyonu elektrot aralığının genişlemesine dolayısı ile kıvılcım oluşması ve ateşleme için gerekli gerilimin artmasına neden olmaktadır. Bu gerilim artışı belli bir aşamaya kadar sistem tarafından tolere edilebilmekte ancak daha sonra ateşlemede kaçırılmalara sebep olmakta ve tam işlev kaybına kadar gidebilmektedir.

Yapılan kıvılcım erozyonu deneyleri sırasında kontrol amaçlı olarak sürekli olarak U_z yani kıvılcım oluşması için gerekli gerilim değerleri ölçülmüştür. Bu yapılan ölçümler aslında bir açıdan kıvılcım erozyonu ile birlikte gerekli gerilim artışını çok açıkça ortaya koymaktadır. Çeşitli zaman aralıklarında yapılan ölçümler ile gerekli gerilim değerindeki artışlar açıkça görülebilir. Bu zaman aralıklarındaki tek fark erozyon dolayısı ile elektrot malzemelerinin aşınmış olması ve elektrot aralığının büyümüş olmasıdır.

Şekil 5.2 de deney malzemelerinden olan Nikel Alaşımları grubu malzemelerinin 98 saatlik bir çalışma esnasında belirli zamanlarda ölçülmüş U_z değerleri görülmektedir. Bu değerlere bakıldığı zaman 98 saatlik bir zaman dilimi deney düzeneğinin frekansının 60 Hz olduğu düşünülürse 21 milyon kıvılcım yapmaktadır. Burada maksimum olarak Ni7216 malzemesinde 14,68 kV'luk bir artış ve minimum olarak saf nikelde 5,8 kV'luk bir artış görülmektedir. Kıvılcım erozyonu ile elektrot mesafesi, elektrot mesafesi ile de gerekli gerilim değeri artmaktadır.



Şekil 5.2 : Çeşitli malzemeler için kıvılcım erozyonu deneyi Uz ölçümleri

Kıvılcım erozyonunun bujinin çalışma ömrüne diğer bir etkisi ise merkez elektrotta veya ana elektrotlarda aşınma sonucu oluşabilecek ciddi şekil bozukluklarının ve yıpranmanın ateşleme işlemini etkilemesidir. Önemli noktalardan biriside bujinin ömrünü tamamlamasına sebep olan merkez elektrottaki aşınmadır. Her zaman merkez elektrottaki aşınma ana elektrottaki aşınmadan daha fazladır. Normalde birden fazla ana elektrot olan bujilerde bu doğal algılanabilir. Çünkü ana elektrotlar aşınmayı paylaşırlar. Ancak tek bir merkez elektrot ve tek bir ana elektrot olan bujilerde de merkez elektrottaki aşınma her zaman ana elektrottan daha fazladır. Bunun sebebi teoride incelediğimiz sebepler içerisinde kutuplar olarak düşünülebilir.

Bujilerde her zaman merkez elektrot anot yani (+) kutuptur. Ana elektrotlar ise katot yani (-) kutuplardır. Bugünkü buji dizaynında bunun tersi bir kutuplama mümkün değildir çünkü ana elektrotlar bujinin kabuk dediğimiz motor bloğu ile temas halindeki vidalı yüzeyine kaynak yolu ile tutturulmuştur dolayısı ile gerilimi ana elektrotta vererek onu katot olarak kutuplamak istersek motor bloğu ile kabuk arasında bir kısa devre olacak ve kıvılcım bu bölgede çakacaktır. Dolayısı ile ana elektrotu katot olarak kutuplamak birden çok ana elektrot kullanılan bujilerde belki de çalışma ömrünü çok arttıracaktır ancak şu aşamada böyle bir dizayn bulunmamakta ve düşünülmemektedir.

Eğer ana elektrotlarda ciddi şekilde aşınma meydana gelmiş ise bunun sebebi saldırgan yakıt ve yağ katkıları, yanma atıkları yüzünden yanma odası içerisindeki akış koşullarının iyi olmaması, motorda vuruntu, ısıtmada problem olarak düşünülür.

5.3 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Kullanılan temel buji malzemeleri bakır, nikel, platin, gümüş, altın, iridyum ve bunların alaşımlarıdır. Ancak saf metaller alaşımlara oranla daha iyi bir ısı iletkenlik sağlarlar. Saf metallerin bu yararlı özelliğine karşın nikel gibi saf metaller yanma gazlarındaki saldırgan kimyasal maddelere ve katı atıklara karşı alaşımlara göre daha hassastırlar. Bu sebepten dolayı saf metaller çeşitli metaller ile alaşımlanarak özellikleri arttırılmaya çalışılmıştır.

Nikel özellikle krom, mangan, silisyum, demir ve itriyum ile alaşımlanarak özellikleri arttırılmaya çalışılmıştır. Her alaşım malzemesinin gerçekleştirdiği bir görevi vardır. Silisyum ve mangan takviyesi yakıt ve yağdan gelen çok saldırgan sülfür dioksitine karşı kimyasal direnci arttırmaktadır. Silisyum, alüminyum ve itriyum takviyesi oksitlenmeye ve pullanmaya karşı direnci arttırmaktadır.

Bujileri üretildikleri malzemelere göre 3 ana grupta toplayabiliriz. Standart bujiler, uzun ömürlü bujiler ve özel bujiler olarak. Bu gruplar kullanım amaçları, kullanım özellikleri ile ayrıldığı gibi kullanılan elektrot malzemeleri de farklılık göstermektedir.

Standart bujiler en yaygın biçimde kullanılan, fiyatları nispeten düşük ve ömürleri de fiyatlarıyla orantılı olan bujilerdir. Bu bujilerin temel elektrot malzemesi nikel ve iridyum alaşımlarıdır. Ömürleri ortalama 20.000-30.000 km'dir.

Uzun ömürlü bujiler ortalama ömrü 100.000 km'yi bulan bujilerdir. Bu tip bujilerin performansları da standart bujilere göre oldukça üstündür. Elektrot malzemesi olarak değerli metaller altın, platin veya alaşımları kullanılır.

Özel bujiler ise yarış araçları gibi özel kullanıma sahip motorlar için geliştirilmiş ömrün bir önemi olmadığı performansa dayalı bujilerdir. Bu tip bujilere en iyi örnek merkez elektrotun tamamının gümüş olduğu bujilerdir.

Bizim deneyimizin amacı ise daha önce diğer araştırmalar sonucu bujinin çalışma özelliklerini sağladığı ispatlanan 12 malzemenin kıvılcım erozyonu aşınma miktarlarının ölçülmesi ve bu yol ile kıvılcım erozyonu için uygun malzemenin seçilmesidir. Kıvılcım erozyonu aşınmaları ölçülecek malzemeleri iki grup altında toplayacağız. Nikel alaşımları ve değerli metaller olarak. nikel alaşımları grubu adından anlaşılacağı üzere nikel ve alaşımlarından ibarettir ve standart bujiler dediğimiz buji grubu için düşünülen malzemelerdir. İkinci grup olan değerli metaller grubu ise platin alaşımlarından oluşmaktadır ve uzun ömürlü bujiler için düşünülen malzemelerdir. Bu malzemeler grupları ile birlikte Tablo 5.1’de görülebilir.

Tablo 5.1 : Kıvılcım erozyonu deney malzemeleri

Deney Malzemeleri	
<i>Değerli Metaller</i>	<i>Nikel Alaşımları</i>
FKS 16-Pt	Ni-Saf
Pt20Ir	NiCrFe-7216
PtNi10	NiCrFe-6025
IrRh10	NiCrMnSi 13738
PtIr22Ni5	NiY-1
PtRh30	NiY-2

Bu malzemeler halen Robert Bosch firmasının buji üretiminde kullandığı ve araştırma sürecinde olduğu malzemeler olduğu için yalnızca bu malzemelerin kaba özellikleri ile ilgili bir miktar bilgi verilecektir.

Saf nikel ve nikelin Cr, Fe, Mn, Si ile yaptığı alaşımlar elektrik dirençli metaller ve alaşımlar sınıfına girmektedirler. Bu grup malzemelerin genel özellikleri uniform ve kararlı direnç, bakıra oranla düşük termoelektrik potansiyel, kaynak yolu ile diğer metallere kolaylıkla bağlanabilmesi, ısıya karşı direnci yüksek, oksitlenmeye ve sürünmeye karşı direnci yüksek, termal genişleme katsayıları düşük ve termal yorulmaya karşı dayanıklıdırlar. Aynı zamanda ergime noktaları ve elektrik dirençleri de yüksektir. Ayrıca tekrarlırsak silisyum ve mangan takviyesi saldırgan sülfür dioksitine karşı kimyasal direnci arttırmakta; silisyum, alüminyum ve itriyum takviyesi oksitlenmeye ve pullanmaya karşı direnci arttırmaktadır.

Platin ve platin alaşımlarının korozyona, oksitlenmeye karşı yüksek dirençleri ve yüksek ergime noktaları ile uzun ömürlü bujilerin malzemesi olduğunu söylemiştik. Platin, ısıl dayanımı ve kimyasal dayanımı dolayısı ile elektrik kontaklarında ve direnç kablolarında, termokapıllarda, laboratuvar ekipmanlarında kullanılır. Platin-İridyum alaşımları enstrümanlarda, manyetik kontaklarda ve kuyumculukta kullanılırlar. Bu alaşımlar sert, tok ve korozyona karşı son derece dayanıklıdırlar. Platin-Nikel alaşımları yüksek mukavemetleri ile bilinirler. Örneğin %5 nikel içeren alaşımın çekme mukavemeti 621 MPa iken %15 nikel içeren alaşımın çekme mukavemeti 896 MPa'dır. Platin-Rodyum alaşımları 1100°C'de çalışan termokapıllar'da kullanılmaktadırlar. Rodyum platinin yüksek sıcaklık dayanımını arttırırken oksitlenmeye karşı direncini düşürmektedir.

Dünyanın en büyük buji üreticilerinden birisi olan Japon NGK firması ise Bosch 'tan farklı olarak bujilerinde iridyumu ana malzeme olarak kullanmaktadır. Bu nedenle deney malzemelerinden birisi de iridyum temellidir. İridyum 172 HB sertliğe sahip ergime noktası 2447°C olan ve hiçbir asit tarafından zlemeyen bir malzemedir. İridyum-Rodyum alaşımları yüksek sıcaklık termokapıllarında kullanılırlar.

Tablo 5.2 : Deneyde geçen çeşitli elementlerin ergime ve kaynama sıcaklıkları

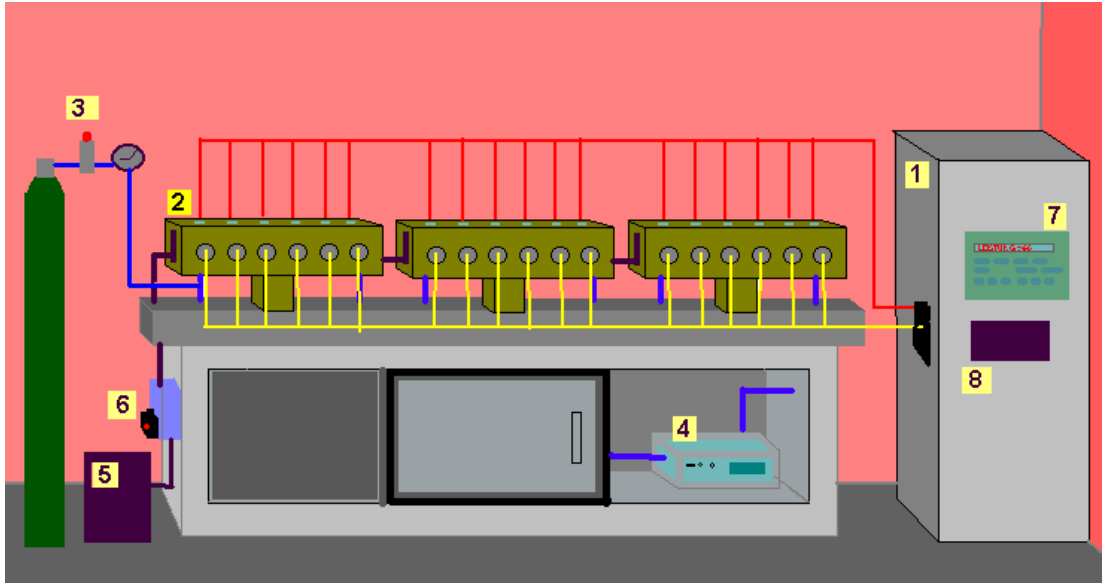
Malzeme	Sembol	Ergime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)
Nikel	Ni	1452	2900
Platin	Pt	1769	4300
Gümüş	Ag	960,8	1950
Demir	Fe	1525	2450
Mangan	Mn	1260	1900
İridyum	Ir	2454	4806
Rodyum	Rh	1985	2500
İtriyum	Y	1490	2500
Silisyum	Si	1420	2600

Bu bilgiler ışığında şunları söyleyebiliriz ki platin alaşımlarında iridyum korozyon dayanımını arttırmak , nikel mukavemeti arttırmak, rodyum yüksek sıcaklık dayanımını arttırmak üzere kullanılmışlardır. Malzemelerin kıvılcım erozyonu

dayanımını belirleyen en önemli özelliğinin ergime noktası olduğunu söylemiştik. Dolayısı ile malzemelerin ergime noktaları ve kaynama noktalarını bilmemiz değerlendirme açısından faydalı olacaktır. Tablo 5.2’de bu değerler görülebilir.

5.4 Deney Düzenegi

Kıvılcım erozyonu deney düzenegi 1996’da Bosch tarafından özel bir firmaya yaptırılmış amacı yalnızca kıvılcım erozyonu ölçümlerini yapmak olmayan aynı zamanda farklı uygulamalarda da kullanılabilen bir deney düzenegidir. Şekil 5.3’te deney düzeneginin bir şeması görülmektedir.



Şekil 5.3 : Kıvılcım erozyonu deney düzenegi

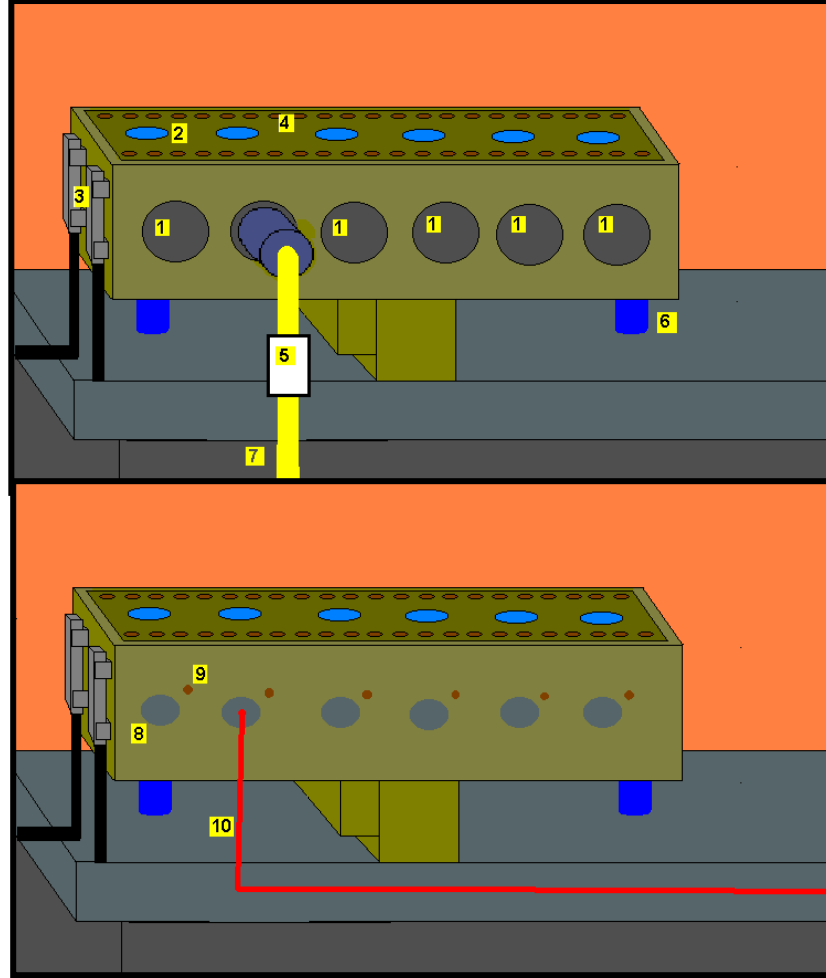
Şekilde kıvılcım erozyonu deney düzenegi komple hali ile görülmektedir. Deney düzeneginde aynı anda 18 farklı deney parçasının çalıştırılması mümkündür. Tek tek elemanları tanımlamadan önce deney düzeneginin genel özelliklerinden bahsedelim. Bu deney düzeneginde 3 farklı odada 18 ayrı deney parçası aynı anda çalıştırılabilmektedir. Odalar çalıştırılmaları açısından bağımsız olmakla birlikte şu noktalar önemlidir ki bütün odalarda ki dolayısıyla bütün deney parçaları için basınç aynı olacaktır. Dolayısıyla tüm deney parçaları için farklı odalarda olmalarına rağmen aynı basınç söz konusudur. Ancak deney düzeneginin pnömatisindeki

değişiklikler ile odaların basınçlarının ayrı değerlere ayarlanabilmesi projesi yürütülmektedir. Diğer önemli bir noktada deney parçası sıcaklıklarının yalnızca odalar için değişik şekilde ayarlanabilmesidir. Yani aynı anda ancak 3 farklı oda için 3 farklı sıcaklık değeri ile çalışılabilmektedir. Bu özellikleri negatif birer unsur olarak gözükmeyle birlikte kıvılcım erozyonu deneyi için herhangi şekilde bir engel teşkil etmemektedir. Ancak sıcaklık ayarlamalarında her deney parçasının sıcaklığının ayrı ayarlanamaması olumsuz bir özelliktir. Deney düzeneği elemanları Şekil 5.3'te görülen numaraları ile 1-Kontrol ünitesi, 2-Odalar, 3-Basınçlı gaz tertibatı, 4-Boşaltma şalteri, 5-Soğutma ünitesi, 6-Yön valfleri, 7-Sistem Kontrol paneli, 8-Ateşleme bobinleri kontrol panelidir. Bununla birlikte şekildeki siyah çizgiler soğutma hattını, mavi çizgiler basınçlı gaz hattını, sarı çizgiler ateşleme gerilimi hattını, kırmızı çizgiler ise ısıtıcı gerilim hattını göstermektedir..

Kontrol ünitesi deney düzeneğinin güç kaynağı ve kontrol elemanlarını üzerinde bulunduran elektronik bölümdür. Deney düzeneğine giden ateşlemede ve ısıtmada kullanılan güç bu ünite ile sağlanmaktadır. Sistem kontrol paneli ve ateşleme bobinleri kontrol panelini üzerinde barındırmaktadır. Kontrol işlemi bir PLC aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Deney düzeneğinin kontrol edilebilir parametreleri deney parçası sıcaklığı, elektrot kutuplaması, deney süresi ve kıvılcım frekansıdır. Deney düzeneğinde deney parçalarına bağlanan ısıtıcı gerilimi elektrik hatları ve karşıt elektrotlara bağlanan ateşleme gerilimi hatları kontrol panelinden gelmektedir. Şekilde gözükmemekle birlikte her yuvaya giden sarı ateşleme gerilimi hattından önce bir ateşleme bobini bulunmaktadır.

Odalar deney parçalarını içerisinde bulunduran ve kıvılcımların gerçekleştiği kısımlardır. Deney düzeneğinde 3 oda bulunmaktadır ve her oda 6 adet deney parçası almaktadır. Şekil 5.4'te üstte odanın önden görünüşü ve altta ise arkadan görünüşü görülmektedir. 1 numara ile gösterilmiş 6 adet delik karşıt elektrotların takılacağı haznelerdir. 8 numara ile gösterilmiş olan delikler ise karşıt elektrotun tam karşısına gelecek olan deney parçalarının yerleşeceği yuvalardır. Oda içerisinde deney parçası ile karşıt elektrot tam karşı karşıya gelmektedir. Bu iki elemanın uçlarının tam üzerinde ise her grup için bir adet olacak şekilde 6 adet gözlem penceresi vardır ve bu pencereler şekilde 2 numara ile gösterilmiştir. Odanın içerisindeki sıcaklık deney esnasında 1000°C'ye kadar çıkabilmektedir dolayısıyla deney düzeneğindeki kablo ve contaların erimemesi için ayrıca elektrot olarak kullanılan bujilerin de belirli

sıcaklığın üstüne çıkmaması gerektiği için odalar soğutulmuştur. Soğutma boruları ve bağlantıları 3 ile gösterilmiştir. Tüm odalar ayrı hatlar üzerinden soğutma suyunu almaktadır. Soğutma suyu 3 odaya da ayrı ayrı gelmektedir.



Şekil 5.4 : Odanın yakın görünüşü üst resim önden, alt resim arkadan.

Sıcaklık ölçümlerinin yapılması için ve aynı zamanda temizlik imkanının olması için üst gözlem camlarının sökülebilir yapılmıştır. Şekil 5.4'te 4 numara ile gösterilenler üst parçanın sabitleme vidalarıdır. 7 numara ile gösterilen kablo karşıt elektrotun gerilim bağlantısıdır. Bu kablo güç kaynağından ateşleme bobinine oradan da elektrota gelmektedir. 5 numaralı parça ise üzerinde bulunan tek giriş ve iki çıkış aracılığı ile kıvılcım esnasında gerilim ölçümlerinin yapılmasına imkan veren adaptördür. 6 numara ile gösterilen basınçlı gaz geliş ve tahliye borularıdır. Basınçlı gaz odalara seri olarak dağıtılmaktadır. Yani birinci odanın basınçlı gaz çıkışı ikinci odanın basınçlı gaz girişine ve bu odanın çıkışında 3. odanın girişine bağlıdır. Bu sebeple odaların basıncı farklı ayrılamaz tüm odaların basıncı aynıdır. 9 numara ile

gösterilmiş olan parçalar topraklama vidalarıdır. Birer kablo ile bu vidalar aracılığı ile topraklama gerçekleştirilir. 10 numara ile gösterilmiş olan kablo deney parçasına güç kaynağından gelen ve ısıtma gerilimini getiren kablodur. Odaların imal edildiği malzeme bronzdur. Bunun sebebi korozyona dayanım gereksinimidir. Odaların maksimum basınç dayanımı 10 bar'dır bunun sebebi ise odaların basınçlı gaz bağlantılarında kullanılan alüminyum parçalardır.

Basınçlı gaz tertibatı deney düzeneğindeki odalarda istenilen gazı istenilen basınç ile sağlamak amacı ile düzenlenmiştir. Şekil 5.3'te 3 numara ile gösterilmiştir. İstenilen gaz bir gaz tüpü aracılığı ile sisteme iletilmektedir. Gaz tüpü çıkışında bir basınç ayar valfi, debi göstergesi, bir ana manometre ve her oda için ayrı ayrı birer tane manometre bulunmaktadır (bunun amacı sızıntı kontrolüdür).

Boşaltma şalteri Şekil 5.3'te 4 numara ile gösterilmiştir. Deney gereği odalardaki gaz sürekli akış halinde değildir. Gazın odalar içerisinde belli bir basınçta beklemesi ve belirli aralıklarla gazın boşaltılarak yeni gazın odalara alınmasını sağlamaktadır. Boşaltma periyodu ayarlanabilmektedir. Üzerinde bir sayaç ve saat bulunmaktadır. Aynı zamanda deney süresinin tutulmasını da sağlamaktadır. Deneyle birlikte başlayan zaman gazın kesilmesi durumunda otomatik olarak durur. Ancak gaz basıncını kontrol eden kontrol ünitesidir. Bir basınç sensörü aracılığı ile kontrol ünitesi basıncı kontrol eder. Örneğin gaz tüpü boşaldığı zaman kontrol ünitesi direkt deney düzeneğini kapatır.

Şekil 5.3'te 5 numara ile gösterilen soğutma ünitesidir. Bu ünite odalar içerisindeki soğutma kanallarından geçecek suyu soğutma işlevini gerçekleştirmektedir. Bu üniteye soğutulan su 6 numara ile gösterilmiştir. Yön valfleri aracılığı ile odalara gönderilmektedir.

Sistem kontrol paneli, kontrol ünitesi üzerinde bulunmaktadır ve Şekil 5.3'te 7 numara ile gösterilmiştir. Bu panel ile kontrol ünitesi içerisindeki PLC kontrol edilmektedir. Bu kontrol panelinde 3 oda için ayrı ayrı birer menü bulunmaktadır. Dolayısı ile buradan yapılan işlemler 3 oda için de ayrı ayrı gerçekleştirilebilmektedir. Ancak ayarlanan özellikler bir oda içindeki bütün deney parçaları için aynıdır. Kontrol panelinde 3 ayar ekranı vardır. Bunlar süre, kutup ve güçtür. Süre deney süresinin belirlendiği menüdür. Yani kıvılcım geriliminin kaç saat süreyle verileceğinin ayarlandığı menüdür. Bu süre sonunda sistem otomatik olarak

kapanır. Kutup menüsünde ise karşıt elektrotun (-) mi yoksa (+) kutupmu olacağı ayarlanabilir ancak bir işlevi yoktur çünkü kıvılcım erozyonu deneyinde (+) olmak zorundadır. Üçüncü menü ise güçtür. Güç menüsü deney parçalarının sıcaklığının ayarlanmasını sağlayan menüdür. Isıtıcı elemana verilecek güç yüzde olarak bu menüye girilir. Isıtıcı elemanın direnç özelliğine göre verilen güç ile sıcaklık arası oran farklıdır. Aynı zamanda bu panel üzerinde açma kapama butonları ve emniyet şalteri de bulunmaktadır.

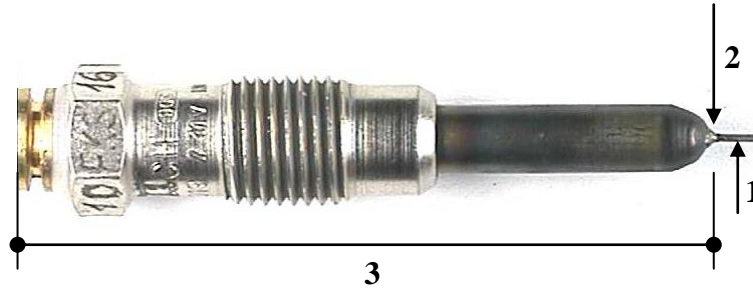
Şekil 5.3'te 8 numara ile gösterilen ateşleme bobinleri kontrol panelidir. Bu kontrol paneli ile kıvılcımı sağlayan pulsların frekansı ve açık kalma süresi ayarlanmaktadır. Ancak bu panel yalnızca rölelerden oluştuğu için ayarlama yapılırken bir osiloskop ile frekansın ölçülmesi gerekmektedir. Odaların frekansları ayrı değerlere ayarlanabilmektedirler.

5.5 Deney Parçalarının Hazırlanması

Deney parçalarında kullanılacak malzemeler tel halinde temin edilmişlerdir. Malzemeler tel çekme yöntemi ile üretilmişlerdir. Tel halindeki bu malzemeler bujilerde kullanılacak çaplarına uygun olacak şekilde ve birden fazla deneyin yapılmasına imkan verecek uzunlukta kesilerek kızdırma bujileri üzerine lazer kaynak yöntemi ile kaynak edilmişlerdir.

Deney parçalarının çaplarının bujilerde kullanılacak çaplarına eşit olması önemlidir. Çünkü teoride incelediğimizde elektrot büyüklüklerinin erozyon miktarını değiştirdiği ve küçük ebatlı elektrotlarda aşınmanın daha fazla olduğu deney sonucu görülmüştür. Deney parçalarının uzunluğu ise birden fazla defa aynı deney parçasının deneye sokulmasına izin vermek amacıyla uzun tutulmuştur. Birinci deney sonunda belirli bir uzunluktan deney parçası kesilmekte ve ikinci deneye sokulmaktadır. Deney malzemelerinden FKS, Pt20Ir, PtNi10, IrRh10, PtIr22Ni5 0,8 milimetre çap ile hazırlanmış PtRh30 ise 0,7 milimetre çap ile hazırlanmıştır tüm nikel alaşımları ise 2,7 milimetre çap ile hazırlanmıştır.

Deney parçalarının kızdırma bujileri üzerine kaynak edilmesinin sebebi kızdırma bujilerinin ısıtıcı olarak kullanılmasıdır. Kızdırma bujileri dizel motorlarda hava yakıt karışımını ısıtmak amacı ile kullanılan elemanlardır. Kızdırma bujileri içlerindeki direnç ile elektrik enerjisini ısı enerjisine çevirmektedirler. Deney düzeneğinde kontrol ünitesinden gelen elektrik akımı ile ısıtma işlemini gerçekleştirmektedirler. Sistem kontrol panelindeki güç menüsü ile kızdırma bujilerine gelen güç ayarlanmakta bu da sıcaklığı değiştirmektedir. Şu yanlış anlaşılmalıdır ki deneydeki ısıtma işleminin amacı oda iç ortamını ısıtmak değil yalnızca deney parçasını ısıtmaktır. Bunun amacı da deney parçasını bujinin ortalama çalışma sıcaklıklarında test etmektir. Şekil 5.5'te hazırlanmış bir deney parçası (malzeme FKS 16-Pt) görülebilir. Burada 1 deney malzemesi, 2 kaynak noktası, 3 ise kızdırma bujisidir. Aynı tip kızdırma bujisi kullanılması önemlidir çünkü verilen güç yüzdesi ile elde edilen sıcaklık değeri farklı tip kızdırma bujilerine göre değişir.



Şekil 5.5 : Kızdırma bujisi üzerine kaynatılmış deney parçası

Deneyde önem teşkil eden diğer bir eleman da karşıt elektrottur. Karşıt elektrotlar ana elektrotları koparılmış standart bujilerin merkez elektrotuna kalın dairesel bir nikel parçanın kaynak yapılması ile elde edilmişlerdir. Bunun amacı bu elektrotta aşınmanın fazla olmamasıdır. Buna rağmen belirli periyotlarla yine de değiştirilmektedirler. Bu bujilerin seçiminde özellikle kıvılcım mesafesi büyük olan bujiler tercih edilir. Bunun sebebi nikel plaka ile kabuk arası mesafe bu tip bujilerde fazladır bu da kabuk ile bu plaka arası kıvılcım oluşumunu engeller.

5.6 Deneyin Yapılışı

Kıvılcım erozyonu deney parçaları hazırlandıktan sonra deney düzeneğinin sabit parametreleri ayarlanmıştır. Deney düzeneğinin sağlayabileceği maksimum kıvılcım gerilimi 30 kV'tur. Bu değerin 30 kV olarak seçilmesinin sebebi otomobillerdeki ateşleme sistemlerine bir paralellik sağlanmasıdır. Kıvılcım frekansı 60 Hz olarak ayarlanmıştır. Kapanma zamanı açma zamanının %50'si olarak ayarlanmıştır. Tüm deneyler bu parametreler sabit tutularak yapılmıştır.

Deney düzeneği içinde gaz olarak azot kullanılmaktadır. Bunun sebebi azot gazının yanıcı olmayan diğer gazlara oranla motor yanma odasındaki hava-yakıt karışımını daha iyi modellemesidir.. Tablo 2.1'de görüldüğü üzere buji yanma odası içerisinde 0.9 bar ile 50 bar arasında değişik basınçlara maruz kalmaktadır. Buji deneylerinde basınç ortalama olarak genellikle 7 bar alınır. Kıvılcım erozyonu deneyinde de basınç 7 bar olarak ayarlanmıştır. Daha önce de söylediğimiz gibi sürekli bir gaz akışı yoktur ve odalar içine alınan gaz bir süre sabit tutulduktan sonra boşaltma şalteri ile tahliye edilir ve yerine yeniden gaz doluşu sağlanır. Kıvılcım erozyonu deneyinde boşaltma şalteri 10 dakikaya ayarlanmıştır. Tüm deneyler için 7 bar ve 10 dakika sabit değerlerdir.

Deney öncesinde yapılması gereken hazırlıklar vardır. Deney öncesi deney parçalarının uzunluk ölçümleri yapılır. Uzunluk ölçümü yapılan parçaların kızdırma bujisinin alt kısmındaki altıgen parçanın üç yüzüne I, II, III şeklinde isimlendirme yapılır. Bu yüzeylerin ölçüm kamerasıyla birer siyah beyaz fotoğrafı alınır. Aynı zamanda büyütücü kamerayla normal renkli birer görüntüleri alınır. Bu fotoğraflar ile ilgili detaylı bilgi ölçüm bölümünde anlatılacaktır. Aşınma ölçümü bu fotoğraflar aracılığı ile yapılmaktadır. Önce uzunluk ölçümünün yapılması çok önemlidir çünkü uzunluk ölçümü sırasında özellikle platin malzemelerin ucunda temas dolayısı ile deformasyon olabilmektedir. Fotoğrafların bu nedenle uzunluk ölçümü sonrası eğer deformasyon olmuşsa o şekilde alınması aşınma ölçümlerinin doğruluğu için önemlidir.

Uzunluk ölçümleri ve fotoğraflama işlemleri yapılan deney parçaları odalardaki yerlerine monte edilirler. Aynı malzemeden deney parçaları aynı odalara yerleştirilirler. 6 adet değerli metal grubu, 6 adet nikel alaşımları grubu 12 adet deney malzemesi ile kıvılcım erozyonu deneyi yapılmıştır. Değerli metaller ve nikel grupları ayrı ayrı yapılmıştır. Dolayısı ile bir deney esnasında 6 adet değerli metal malzemenin her birinden 3 adet olmak üzere 18 adet deney parçası çalıştırılmıştır. İlk olarak bütün sıcaklık değerleri için değerli metal deneyleri yapılmış daha sonra yine tüm sıcaklık değerleri için nikel alaşımları deneyleri yapılmıştır. Aynı malzemeden deney parçaları farklı deneylerde aynı konumlara yerleştirilmişlerdir.

Deney parçalarından sonra karşıt elektrotlar da yerleştirilmişlerdir. Karşıt elektrotlar yerleştirildikten sonra kıvılcım aralığı ölçümleri yapılmıştır (ölçümler). Kıvılcım aralığı ölçümlerinden sonra bütün elektrik bağlantı kabloları takılmıştır. Sistem kontrol panelinden arzu edilen sıcaklık değeri için gerekli güç seçilmiş sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Deneyler 3 farklı sıcaklık değeri için yapılmıştır. Bu sıcaklıklar bujilerin motor içi çalışma sıcaklık limitleri olan 500°C ve 850°C dereceleri ve bu iki sıcaklığın ortası olan 700°C'dir. Bu üç farklı sıcaklık değeri ile aynı zamanda sıcaklık ile erozyon miktarındaki değişimin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri yapıldıktan sonra (ölçümler) odaların üst muhafazaları kapatılıp deney çalıştırılmaya hazır hale getirilmiştir.

Deney düzeneği kapatıldıktan sonra sistem kontrol panelinden deney süresi ayarlanmıştır. İlk deneyler hariç değerli metal grubu deney parçaları için deney süresi 100 saat, nikel alaşımları için 50 saat olarak alınmıştır. Boşaltma şalteri sıfırlandıktan sonra deney düzeneği çalıştırılarak deney başlatılmıştır.

Deney çalışması esnasında yapılan tek ölçüm Uz yani kıvılcım gerilimi ölçümleridir. İlk ölçüm deney çalıştırıldıktan 1 saat sonra olmak kaydı ile çeşitli aralıklar ile kıvılcım gerilimleri ölçülmüştür (ölçümler). Aynı zamanda belirli periyotlar ile deney düzeneğinin çalışması gözlemlenerek düzgün çalışma sağlanmıştır. Özellikle gaz tüpünün doluluk oranı sürekli kontrol edilerek gerekli halde değiştirilmiştir.

Deney süresi sonunda deney düzeneği otomatik olarak kapanmaktadır. Deney sonrası deney parçalarının deney öncesi ile aynı kesitlerinden ölçüm kamerası ile fotoğrafları alınmıştır. Daha sonra büyütücü kamera ile renkli resimleri alınmıştır. Fotoğraflama

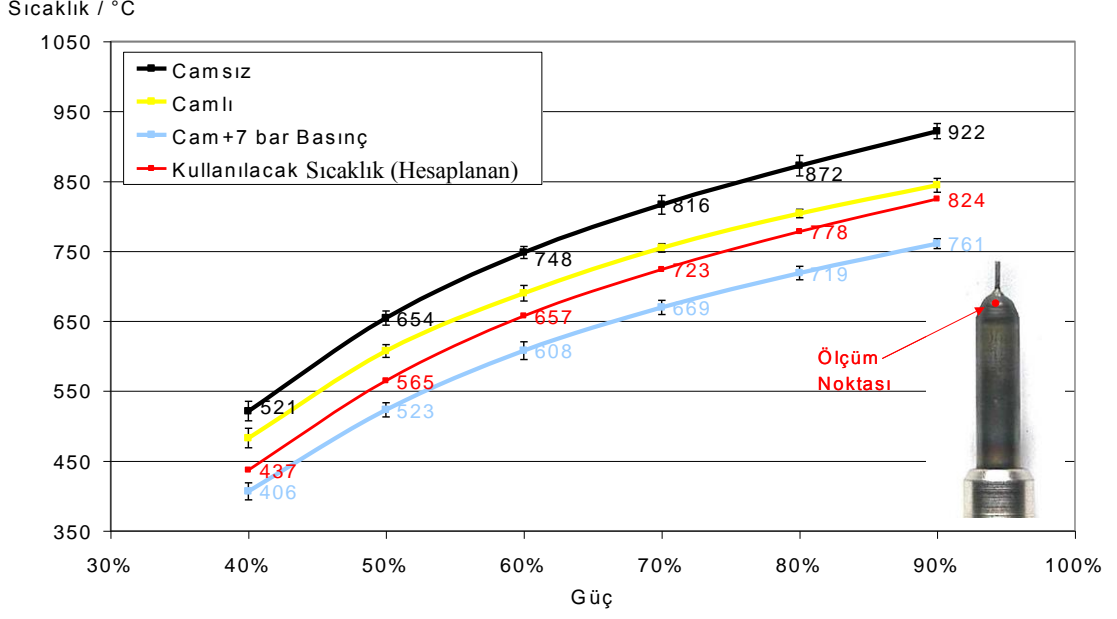
işleminin sonra uzunluk ölçümleri yapmıştır. Burada da önce fotoğraflama işleminin daha sonra ise uzunluk ölçümünün yapılması önemlidir.

Tüm fotoğraflama ve ölçüm işlemleri bittikten sonra deney parçaları uçları atölyede kesilerek kısaltılarak yeni deney parçaları oluşturulmuştur. Aynı zamanda deney parçaları ve karşıt elektrotların temizlikleri tel fırça ve karşıt elektrotlar için özel banyo kullanılarak yapılmıştır.

Her malzemedan 3 deney parçası 3 sıcaklık değeri için 500°C, 700°C ve 850°C ikişer defa deneye tabi tutulmuşlardır. Dolayısı ile bir malzeme ve bir sıcaklık için elde edilen sonuçlar altı deney parçasının ortalaması olarak çıkmıştır. Kıvılcım erozyonu deneyi 4 aylık süre içerisinde 12 defa çalıştırılmış ve toplamda yaklaşık 1000 saat çalışmıştır.

5.7 Ölçümler

Sıcaklık Ölçümleri : Sistem kontrol panelinden sıcaklık için ayarlanabilen değer kızdırma bujisine verilen güçtür. Bu güce bağlı olarak sıcaklık değişmektedir. Güç, sistem kontrol paneline yüzde olarak girilmektedir. Bu sebeple yüzde güce karşılık gelen sıcaklık değerleri daha önceden belirlenmiştir. Aynı zamanda deney düzeneğinde gözlem pencerelerindeki cam olmadan, cam varken, cam+basınç varken ölçümler yapılmış ve Şekil 5.6'da görülen grafik elde edilmiştir. Ancak yine de çoğu zaman deneme yanılma yöntemi ile uygun güç bulunmuştur. Tüm sıcaklık ölçümleri ışınli sıcaklık ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihazın kızıl ışını sıcaklık ölçülmek istenen nokta üzerine getirilmelidir. Işının parça üzerindeki yansımalarının çapı mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır. Deney parçalarının sıcaklık ölçümleri Şekil 5.6'da grafiğin sağ alt köşesinde görüldüğü üzere kaynak noktasının biraz altından yapılmıştır.



Şekil 5.6 : Güç-Sıcaklık bağıntısı grafiği ve sıcaklık ölçüm noktası

Uzunluk Ölçümleri : Şekil 5.5’te görülen kızdırma bujisi üzerine kaynatılmış deney malzemesinin oluşturduğu deney parçasının uzunluğu dijital bir uzunluk ölçer yardımı ile ölçülmüştür. Uzunluk ölçümleri ile amaç deney öncesi ve deney sonrası uzunluklar arası farktan kaybolan malzemeyi uzunluk olarak ifade etmektir.

Kıvılcım Aralığı Ölçümleri : Kıvılcım aralığının tüm deney parçaları için aynı tutmak kıvılcım aralığı aşınmayı etkilediği için önemlidir. Kıvılcım aralığı 1mm olarak seçilmiştir. Yalnız kıvılcım aralığı ayarlanırken malzemelerin termal genleşmelerinin de hesaba katılması gerektiğinden 500°C sıcaklık için kıvılcım aralığı 1.2 mm, 700°C için 1.5 mm, 850°C için 1.7 mm olarak alınmıştır. Odalar içerisindeki konumlarında deney parçaları sabit iken karşıt elektrotlar vida aracılığı ile yatay olarak hareket edebilmektedir. Multimetre yardımı ile deney parçası ve karşıt elektrot hassas olarak temas ettirildikten sonra karşıt elektrot vidası üzerinde bulunan ölçek yardımı ile kıvılcım aralığı ayarlanmıştır.

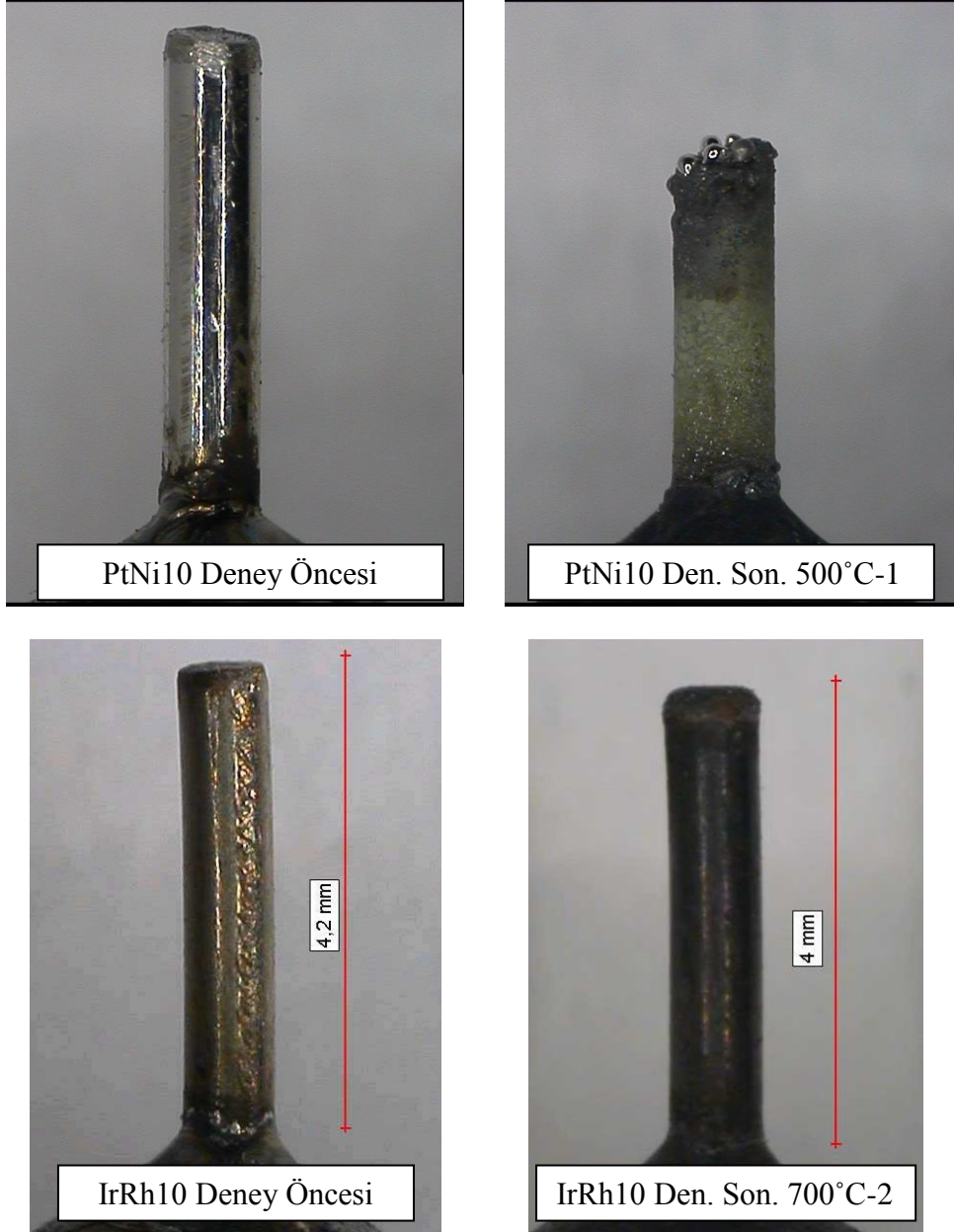
Fotoğraflama ve Aşınma Ölçümleri : Kıvılcım erozyonu deneyinin sonuçlarının elde edilmesi için üç yöntem denenmiştir. İlk olarak hassas terazi ile ağırlık ölçümü, sonra uzunluk ölçümü ve en son olarak kamera ile optik ölçüm yoluna gidilmiştir. Ağırlık ölçümü deney parçasının deney öncesi ve sonrası ağırlık farkından aşınma miktarının elde edilmesi düşüncesiyle denenmiştir. Ancak aşınma ile ağırlık kaybının

çok düşük olması kir, tufal, toz gibi dış etkenlerin ölçümlerin tutarlı olmamasına sebep olması ve temizleme banyosunun da sonuç vermemesi dolayısı ile ağırlık ölçümünden vazgeçilmiştir. İkinci olarak düşünülen uzunluk ölçümü ise tam anlamıyla tam aşınma değerini ifade etmemektedir örnek resimlerde bu daha açık olarak görülecektir.

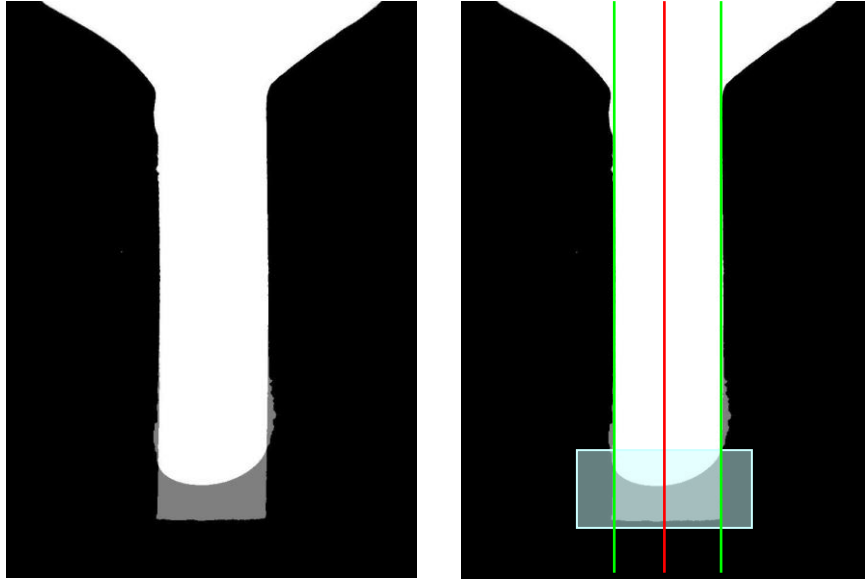
Kıvılcım erozyonu deney sonuçlarının hesaplanmasında optik ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem diğer yöntemlere göre çok daha tutarlı olmakla birlikte aşınma miktarının kesit alanı ve hacim olarak bulunması ise en büyük artısıdır. Optik ölçüm düşük frekanslı (yani yalnızca sabit görüntü alabilen hareketli çekim yapamayan) bir kamera, çeşitli büyütme oranlarına sahip objektif ve ölçümler için bir bilgisayardan oluşmaktadır. Diğer bir renkli kamera ise renkli fotoğrafların çekilmesi için kullanılmaktadır. Şekil 5.7’de çeşitli deney malzemelerinin deney öncesi ve sonrası renkli fotoğrafları görülebilir.

Aşınma ölçümleri temel olarak deney öncesi kamera tarafından direkt dijital olarak alınan deney parçası fotoğrafının deney sonrası hali ile üst üste yapıştırılması sonucu aradaki piksel cinsinden farkın mm^3 cinsine çevrilmesine dayanmaktadır. Bu işlem Image Pro adlı yazılım kullanılarak yapılmaktadır. Ancak hesaplamayı yapan makrolar yazılımın parçası değil özel olarak bu işlem için yazılmışlardır. Makrolar deney parçasının kenarlarından aldıkları hiza çizgileri ile merkez çizgisini bulmakta ve merkez çizgisi etrafında döndürme gerçekleştirerek hacim hesaplamaktadır. Makro sadece kullanıcı tarafından belirlenen hesap alanı içerisinde işlem yapmaktadır. Elbette bu işlem tam olarak doğru hacmi vermemektedir. İşte bu yüzden bir deney parçasının üç farklı kesitinden hacimler hesaplanarak ortalaması alınma yoluna gidilmiştir. Aşınma ölçümleri yalnızca uç bölümle sınırlı alanda yapılmıştır. Şekil 5.8’de Ölçüm kamerası ile alınmış resimlerin Image Pro yazılımının da üst üste yapıştırılmış hali solda, sağda ise hesaplama yapılmış hali görülmektedir. Bu resimlerde deney parçaları siyah zemin üzerine beyaz olarak görülmektedir. Ancak iki deney parçası resmi üst üste yapıştırıldığı zaman fark gri olarak görülmektedir. Dolayısı ile resimlerde görülen beyaz deney parçası deney sonu fotoğrafı, alttaki gri ise deney öncesi fotoğrafıdır. Deney öncesi ile deney sonrası arası fark gri bölgedir. Yalnız uç kısımdaki gri bölge aşınmadır. Turkuvaz alan hesap alanı, yeşil çizgiler kenar referans çizgileri, kırmızı çizgi ise döndürme merkezi çizgisidir. Makronun yaptığı işlem daha önce kamera ile deney parçası arası mesafe

ve büyültme faktörüne göre yapılmış kalibrasyonu kullanarak aşınmayı mm^3 cinsinden hesaplamaktır. Kalibrasyon ile bir pikselin kaç mm^3 ye karşılık geldiği bulunmuştur. Makro bu değerle gri piksel sayısını çarparak aşınmayı hesaplamaktadır. Makro'nun hacim hesaplarken kullandığı referans çizgileri ve döndürme merkezide Şekil 5.8'de görülmektedir.



Şekil 5.7 : Deney parçaları renkli fotoğrafları

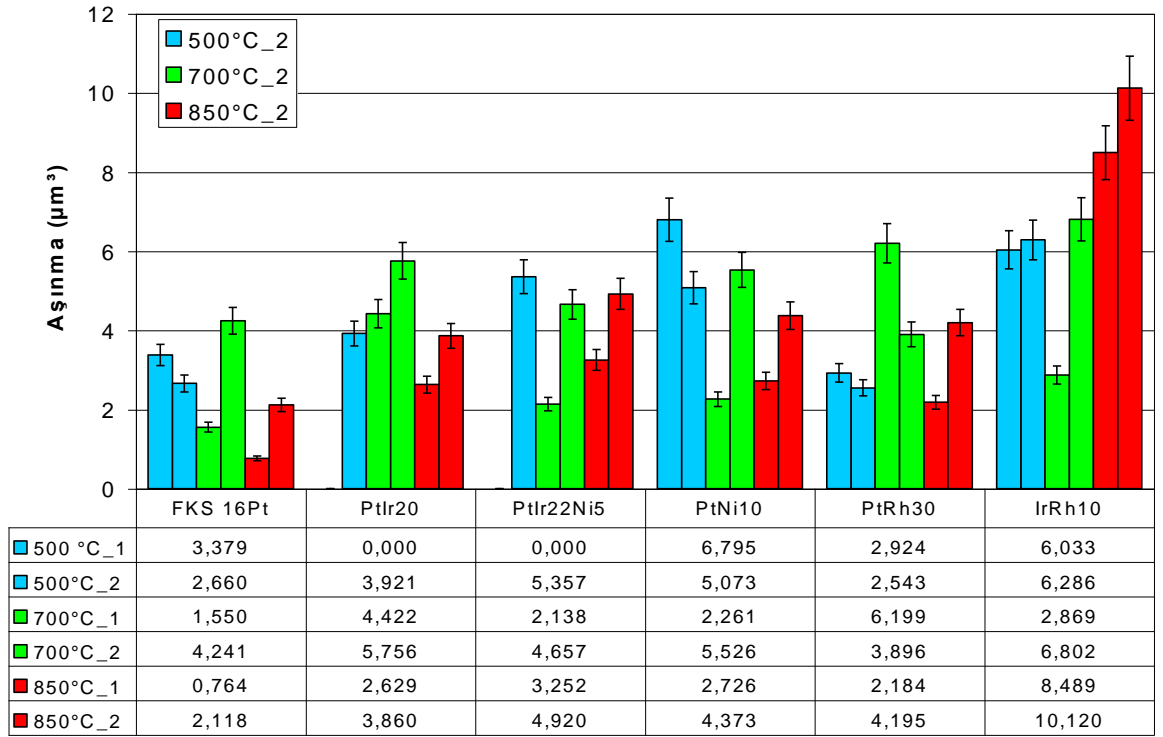


Şekil 5.8 : Deney parçaları aşınma hesaplaması

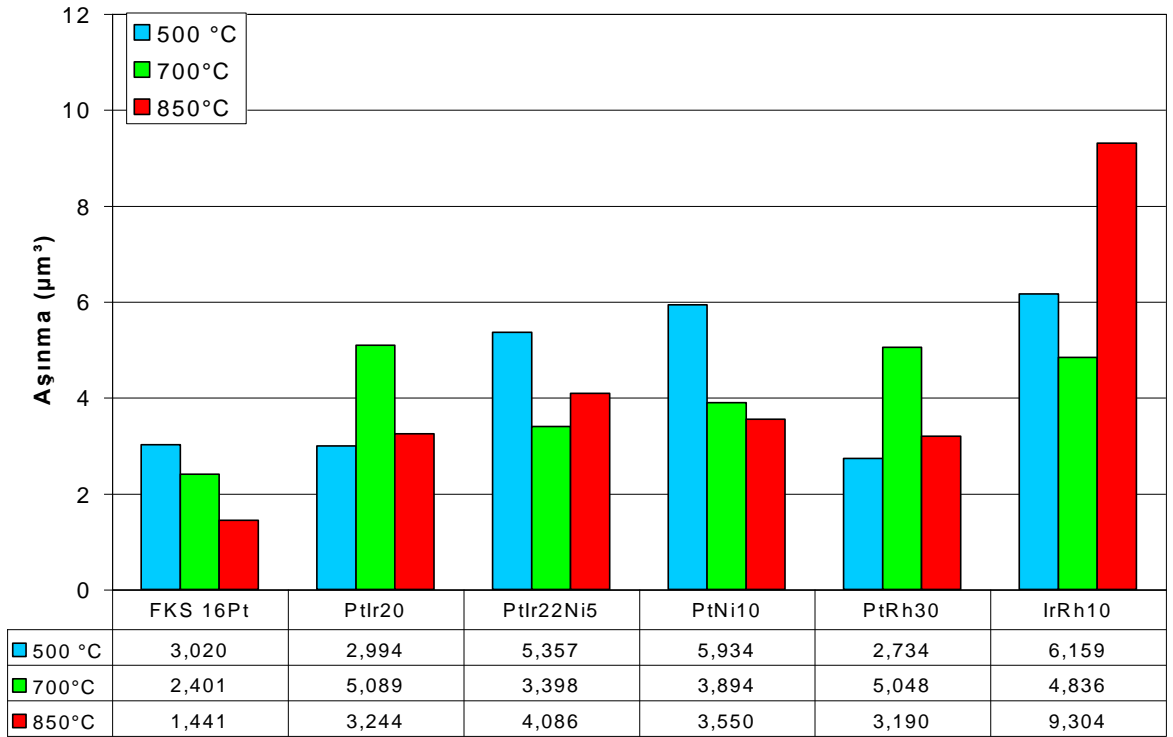
U_z Ölçümleri : Deney süresince ilk ölçüm deneyin çalıştırılmasından 1 saat sonra olmak üzere osiloskop aracılığı ile gerilim ölçümleri yapılmıştır. Gerilim ölçümleri sırasında deney düzeneği çalışması durdurulmamıştır. Gerilim ölçümlerinin amacı deney esnasında doğacak herhangi bir aksilikte veya sonuçlarda çıkacak bir sorunda ek kaynak olarak baş vurulmak üzeredir. Ölçümlerin sonuçları Şekil 5.2'deki gibi grafiklere dönüştürülmüştür.

5.8 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Kıvılcım erozyonu deneyi ile 2 grupta 12 farklı malzeme 3 farklı sıcaklıkta her malzemeden 3 örnek ve her örnekten 3 farklı kesitten ölçüm yapılarak toplam 624 ölçüm ile sonuçlandırılmıştır. Deneyde malzemeleri iki gruba ayırarak incelediğimiz gibi sonuçları da değerli metaller ve nikel alaşımları için ayrı ayrı incelemek doğrudur. Çünkü değerli metal alaşımlarının aşınma miktarlarının nikel alaşımlarından çok daha düşük olacağı bellidir ve farklı ürünler için araştırmalar yapılmaktadır. Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de sonuçlar görülmektedir.



Şekil 5.9 : Değerli metal grubu kıvılcım başına aşınma miktarları



Şekil 5.10 : Değerli metal grubu kıvılcım başına aşınma miktarları ortalama değerler

Genelde yalnız bu deney için düşünöldüğü zaman malzeme seçimi yapmak için aşınmaların birim zaman başına karşılaştırılmaları yeterlidir ancak farklı deney sonuçları ile kıyaslama için en iyi yöntem kıvılcım başına aşınma grafiğinin oluşturulmasıdır. Deney düzeneğinin frekansı 60 Hz olduğundan saatteki kıvılcım adedi 216.000 olarak hesaplanır. Toplam aşınmayı deney süresi ile bu değerin çarpımına bölmek bizi kıvılcım başı aşınma değerlerine ulaştırır. Böylelikle aynı zamanda deneyler arası 2-3 saatlik süre farklarının etkisini de ortadan kaldırmış oluyoruz.

Şekil 5.9'da değerli metal grubu malzemelerin kıvılcım erozyonu deney sonuçları görölmektedir. Grafikte görölen değerler kıvılcım başına aşınma miktarı yani bir kıvılcımın meydana getirdiği aşınmadır. PtIr20 ve PtIr22Ni5 malzemelerinin 500°C ilk deneyi deney parçaları deney sonrası düşüröldüğü için fotoğraflanmaları ve ölçüm yapılması mümkün olmamıştır. Diğer bütün deney parçaları aşınma miktarları ölçölmüştür.

Aynı sıcaklık için yapılan ikişer deney arasındaki sonuçların farklı olması deney düzeneğinin ve ölçüm sonuçlarının tekrar gözden geçirilmesine sebep olmuştur. Ancak ölçümler tekrarlanmış ve U_z diyagramları gözden geçirilmiştir sonuç olarak elde edilen değerler doğrudur. Ortalama değerler alınarak malzemelerin değerlendirilmesi amaçlanmışır. Şekil 5.10'da ortalama kıvılcım başına aşınma grafiği verilmiştir. Sonuçlardan açıkça görölmektedir ki FKS 16Pt malzemesinin aşınma açısından diğer malzemelere göre büyük bir üstünlüğü vardır. Ancak diğer malzemeleri karşılaştırmak istersek farklı sıcaklıklarda birbirlerine göre değişik aşınma oranları vardır. Ancak bütün malzemeler aynı sıcaklıkta aynı şartlarda deneye tabi tutulduğuna göre ve normal bir bujinin çalışma ortamında bu sıcaklık değerleri ile sürekli karşılaştığı için bu aşınma değerlerinin aritmetik ortalamasını alarak sıcaklık gözetmeksizin tek bir aşınma değeri olarak ifade edilerek karşılaştırılması yanlış olmayacaktır. Dolayısı ile tam bir karşılaştırma için aşınma değerlerini Tablo 5.3'deki gibi ifade edebiliriz.

Bu sonuçlar doğrultusunda değerli metalleri aşınma dayanımına göre en dayanıklıdan zayıfa doğru FKS 16Pt, PtRh30, PtIr20, PtIr22Ni5, PtNi10, IrRh10 olarak sıralayabiliriz. Ancak gözden kaçırılmaması gereken bir noktada bu malzemelerin fiyatlarıdır. Çünkü bu elementler çok pahalı oldukları için içeriklerine göre bu

malzemelerin fiyatları önemli farklılıklar göstermektedir. Bu sebeple fiyatları da malzeme seçimine katmak önemlidir çünkü birim kıvılcım başına aşınma miktarı fazla olmasına rağmen malzemenin fiyatı düşük olursa daha büyük boyutlardaki bir elektrotla buji için aynı çalışma ömrüne ulaşmak mümkün olacaktır. Bu aşamada malzeme fiyatını seçim içine dahil etmenin en iyi yolu kıvılcım başına aşınmanın maliyetinin hesaplanmasıdır. Kıvılcım başına düşen maliyetin hesabı milimetreküp cinsinden fiyatın hesaplanması ve kıvılcım başına aşınmanın bu fiyat ile çarpılmasıdır. Malzemelerin birim hacim fiyatları Dr. Klaus Peter Hrastnik tarafından hesaplanmıştır.

Tablo 5.3 : Tüm deneyler sonucu ortalama birim kıvılcım başına aşınma miktarları

Malzeme	Ort. Aşınma
FKS 16Pt	2,28 μm^3
PtRh30	3,65 μm^3
PtIr20	3,77 μm^3
PtIr22Ni5	4,28 μm^3
PtNi10	4,45 μm^3
IrRh10	6,76 μm^3

Tablo 5.4 : Malzemelerin aşınma dolayısı ile kıvılcım maliyetleri

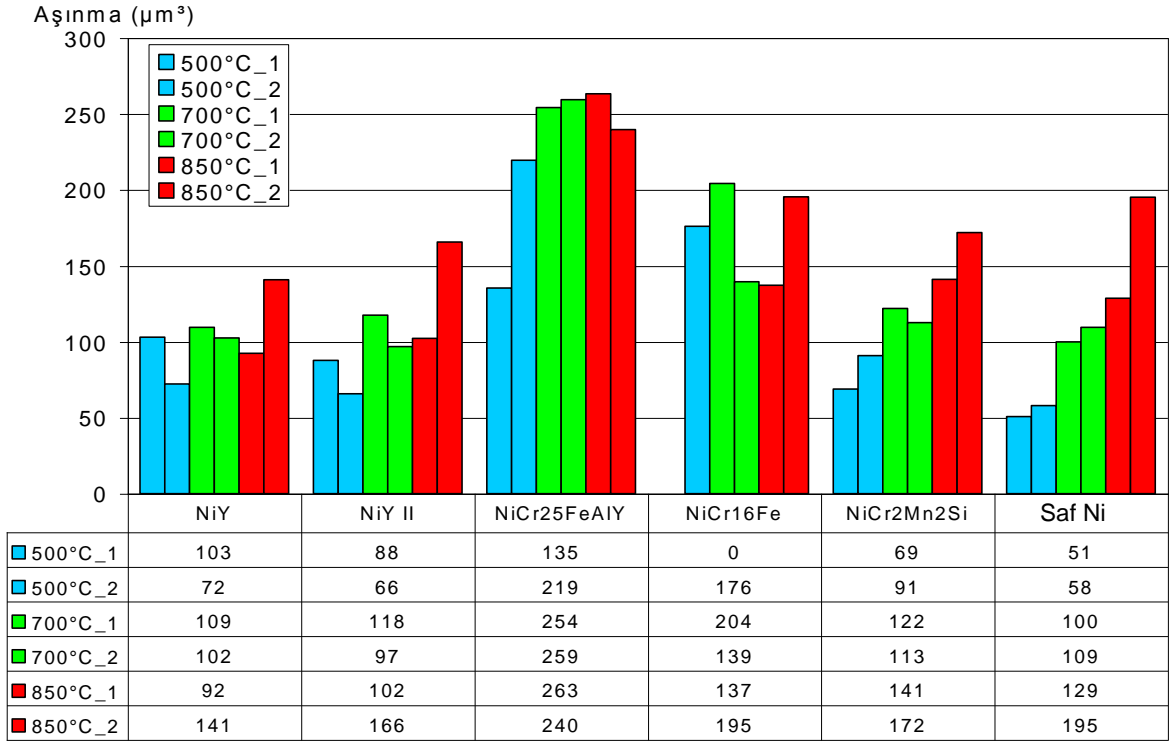
Malzeme	Ort. Aşınma	Fiyat (Euro/mm ³)	Kıvılcım Maliyeti (Euro)
FKS 16Pt	2,280	0,420	9,58E-10
PtRh30	3,650	0,310	1,13E-09
PtIr20	3,770	0,400	1,51E-09
PtIr22Ni5	4,280	0,390	1,67E-09
PtNi10	4,450	0,360	1,60E-09
IrRh10	6,760	0,710	4,80E-09

Tablo 5.4 incelendiği takdirde sıralamada önemli bir değişim olmadığı ve FKS 16Pt malzemesinin diğerlerine göre hem aşınma dayanımı hem de maliyet açısından önemli bir üstünlüğü olduğu görülmektedir. Ancak maliyetlerin hesaba dahil edilmesi şöyle bir fark ortaya çıkarmıştır. PtIr22Ni5 malzemesinin kıvılcım başına ortalama aşınma miktarı PtNi10 malzemesine göre daha düşükken kıvılcım başına maliyeti daha yüksektir bunun sebebi malzemenin %22 oranında iridyum içermesi ve iridyumun platinden oldukça pahalı bir malzeme olmasıdır.

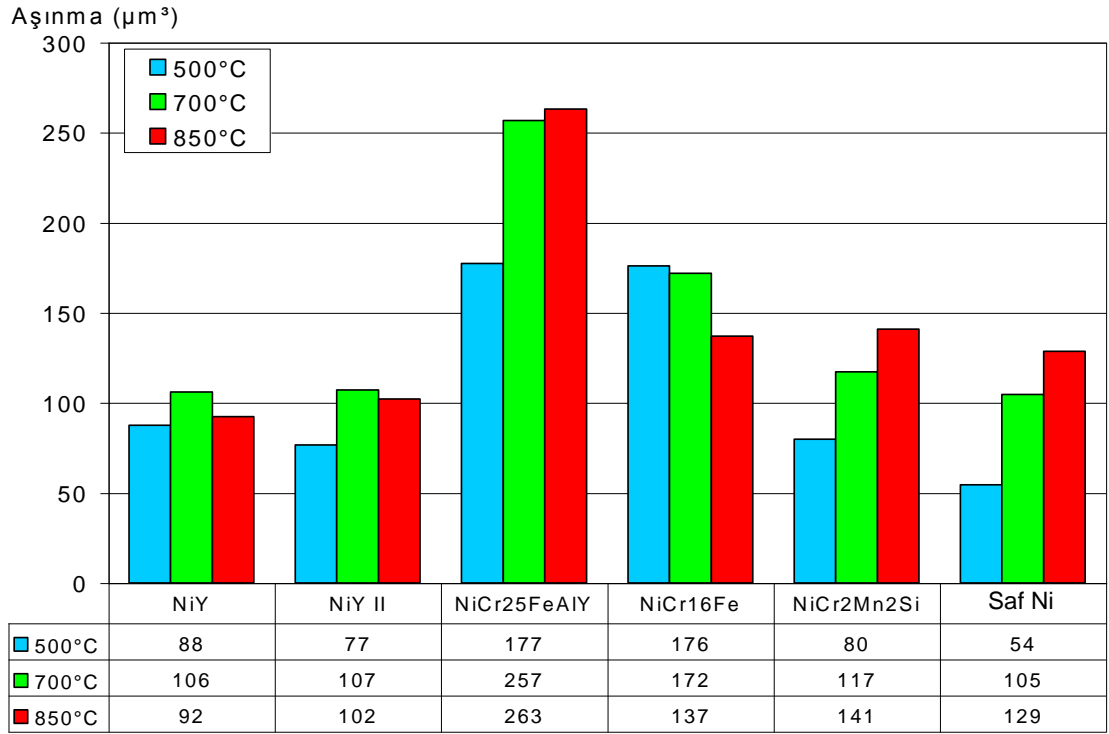
Deney sonuçlarında dikkat çekici bir nokta IrRh10 malzemesinin aşınma oranının çok yüksek olmasıdır. Ergime ve kaynama noktalarının platine göre daha yüksek olmasına rağmen iridyumun kıvılcım erozyonu direnci oldukça düşüktür. Daha önce yine Bosch tarafından yapılmış olan bir kıvılcım erozyonu deneyinde saf iridyumun aşınma miktarı 500°C için 4,16 μm^3 ve 700°C için 16,7 μm^3 olarak ölçülmüştür. Bu değerlerde ortalama olarak kıvılcım başına 10,43 gibi bir aşınma verir ki buda değerli metal grubu için oldukça yüksek bir orandır. Ancak yine bu sonuçlara bakarak rodyumun hem platin hem de iridyum ile alaşımlarındaki aşınmayı düşürücü etkisi göze çarpmaktadır.

Diğer malzeme grubu olan nikel alaşımları grubunun deney sonuçları ise Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de görülebilir. Şekil 5.11 iki deney için ayrı ayrı aşınma değerlerini, Şekil 5.12 ise ortalama kıvılcım başına aşınma değerlerini göstermektedir. NiCr16Fe malzemesinin 500°C ilk deneyindeki deney parçalarının deney düzeneğinden sökme işlemi sırasında hasar görmesi dolayısı ile ölçüm yapılamamıştır. Ayrıca deney düzeneğinde 850°C sıcaklık için yapılan deneyin yedinci saatinde sızdırmazlık problemi ile karşılaşılmış ve bu problemin tamir edilmesi sırasında deney düzeneğindeki karşıt elektrot haznesine takılan ve karşıt elektrotu taşıyan parçalar fırlamıştır. İnceleme sonucu bu parçaların vidalarının korozyon sonucu aşındığı anlaşılmış ve deney düzeneği kullanılamaz hale gelmiş dolayısıyla deney yedinci saat sonunda bırakılmıştır. Yüz saat ile yedi saat arasında çok önemli bir fark vardır ve kıvılcım başına aşınma miktarı zamanla değişmektedir.. Bu sebeple ortalama grafikte 850°C için yalnız ilk deneyin sonuçları alınmıştır.

Sonuçlara bakıldığı zaman NiY, NiYII ve saf Ni aşınma değerleri birbirine çok yakın gözükmektedir diğer malzemelerden krom oranı yüksek olanların aşınma değerleri yüksek çıkmıştır. Tam bir değerlendirme için değerli metallerde olduğu gibi nikel alaşımlarında da sıcaklıklara göre aşınmaların aritmetik ortalamasını alarak kıvılcım başına ortalama aşınma değerlerini bulabiliriz. Bu değerler Tablo 5.5'te görülebilmektedir.



Şekil 5.11 : Nikel alaşımları grubu kıvılcım başına aşınma miktarları



Şekil 5.12 : Nikel alaşımları grubu kıvılcım başına aşınma miktarları ortalama değerler

Tablo 5.5 : Nikel alaşımlarda ortalama birim kıvılcım başına aşınma miktarları

Malzeme	Ort. Aşınma
Saf-Ni	95 μm^3
NiY	95,33 μm^3
NiYII	95,33 μm^3
NiCr25FeAlY	232,3 μm^3
NiCr16Fe	161,6 μm^3
NiCrMn2Si	112,6 μm^3

Bu sonuçlar göstermektedir ki NiY, NiYII ve saf Ni aşınma değerleri eşitir. Ancak daha detaylı bir sonuç için 850°C ikinci deneyleri de hesaba katılırsa o taktirde aşınma değerleri NiY için 103,16 μm^3 iken NiYII için 106,16 μm^3 ve saf Ni için 107 μm^3 olarak elde edilir. Buradan NiY'un aşınma miktarının en düşük NiYII ve saf Ni malzemelerinin ise ikinci ve nc sırada olduğunu söyleyebiliriz. Fakat maliyet hesabı yapılacak olursa saf nikelin maliyeti NiY alaşımlarına göre çok daha düşüktür. NiY bileşiğinin içeriğinin Bosch firması tarafından gizli tutulması sebebi ile fiyatları açık olarak bildirememekle birlikte itriyumun nikelden pahalı olduğu, dolayısı ile NiY alaşımlarının fiyatlarının saf nikelden yüksek olduğu kesindir. Aşınmalar arasındaki oranın düşüklüğü nedeniyle saf nikelin kıvılcım başı maliyeti NiY alaşımlarından düşük olacaktır.

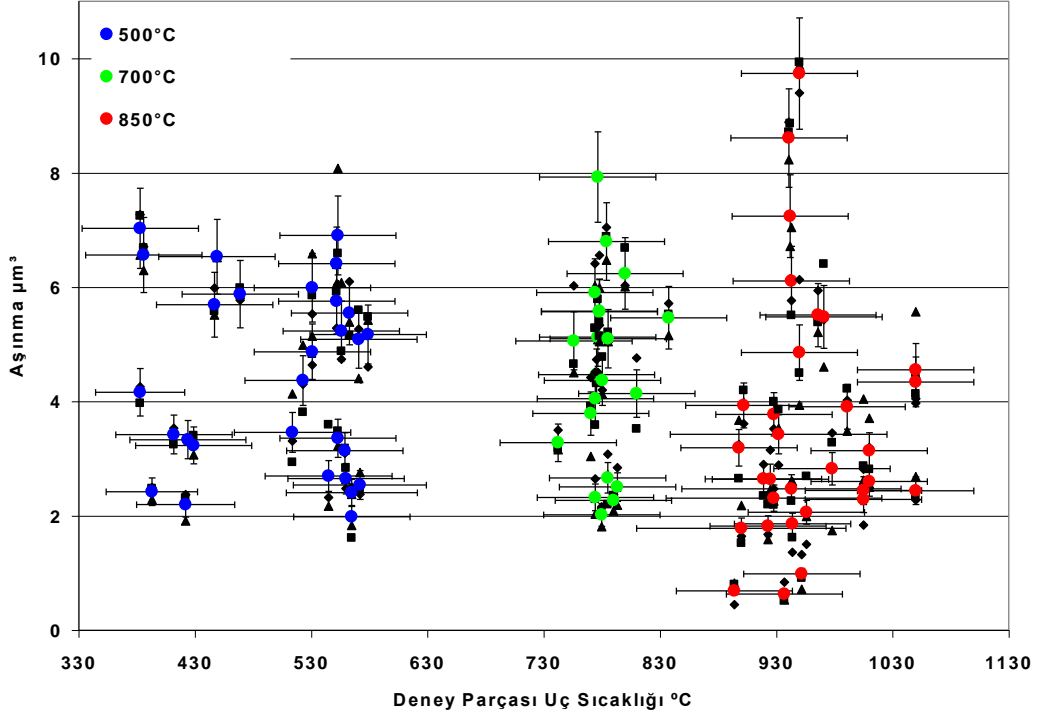
Saf nikel ile değerli metal grubundan FKS 16Pt'yi aşınma miktarı olarak karşılaştırsak aradaki müthiş fark şaşırtıcıdır. FKS malzemesinin aşınma miktarı 2,28 μm^3 iken saf nikelin aşınma oranı 95 μm^3 'tür. Ancak aradaki fiyat farkını göz önünde bulundurarak kıvılcım başı maliyetlerini karşılaştırsak sonuç ilginçtir. FKS malzemesinin kıvılcım başına aşınma maliyeti $9,58E10^{-10}$ Euro iken Saf nikelin kıvılcım başına aşınma maliyeti $8,455E10^{-12}$ Euro'dur. Bu önemlidir çünkü konstrüksiyon ve çalışma özellikleri izin verdiği sürece nikel malzeme kullanmak kıvılcım erozyonu açısından daha düşük bir maliyete sahiptir. Ve nikel elektrot ile belki değerli metal malzemenin performansı değil fakat çalışma ömrü karşılanabilir. Tabi konstrüksiyon açısından bu bujiler için pek mümkün değildir çünkü boyutlar açısından platin elektrotun 46 katı büyük bir nikel elektrot mümkün değildir.

Unutulmaması gereken çok önemli nokta bu çalışma ile malzemeler sadece kıvılcım erozyonu için incelenmiş ve elektriksel özellikleri veya çalışma koşulları için gerekli diğer özellikler tamamı ile göz ardı edilmiştir. Deneyin temel amacı olan Kıvılcım

erozyonu için malzeme seçimi gerçekleştirilmiş ve uzun ömürlü bujiler için değerli metal grubundan FKS 16Pt malzemesi ve standart bujiler için ise nikel alaşımlarından saf Nikel ancak yeterli elektriksel özellikleri sağlamaması durumunda NiY seçilmiştir.

Deneyin temel amacının kıvılcım erozyonu için malzeme seçimi olması yanında deney sonuçları ile üzerinde değerlendirme yapabileceğimiz diğer konuları yan amaçlar olarak belirlemiştik. Bunlar erozyon sıcaklık ilişkisinin belirlenmesi, laboratuvar test düzeneği ile motor içi yanma odası gerçek aşınma değerlerinin karşılaştırılması ve erozyon hızının zamanla değişiminin araştırılması idi.

Kıvılcım erozyonu ile çalışma sıcaklığı arasındaki ilişki için Şekil 5.13'te tüm deney parçalarının deney parçası uç sıcaklığı ile kıvılcım başı aşınma miktarı grafiği çıkarılmıştır. Deney öncesi düşünce sıcaklık artışı ile birlikte aşınma miktarının da artacağı yönündeydi. Ancak deney sonuçları deney sıcaklığı ile aşınma miktarı arasında herhangi bir ilişki olmadığını gösteriyor. Şekil 5.10 ve 5.12'de de görüldüğü gibi değerli metallerde tam bir düzensizlik görülürken nikel alaşımlarında da bazı malzemelerde (örneğin NiCr25FeAlY, NiCr2Mn2Si) sıcaklık artışı ile aşınma artarken bazı malzemelerde de (örneğin NiYII, NiCr16Fe) sıcaklık artışı ile aşınma azalmaktadır. Dolayısıyla bu deney sonucu söylenebilecek tek şey çalışma sıcaklığı ile aşınma arasında düzenli herhangi bir ilişki olmadığıdır. Bu sonucu kıvılcım erozyonuna kıvılcım uç sıcaklığının sebep olduğu ve kıvılcım uç sıcaklığının 8000°C ila 12000°C arası değiştiği için ortam sıcaklığındaki 300-400°C'lik bir değişimin direkt bir etkisi olmaması doğaldır şeklinde yorumlayabiliriz. Ancak sıcaklığın erozyon miktarını etkilemediğini söylememiz de kesin olarak mümkün değildir. Sıcaklık ile birlikte erozyon miktarları da farklılaşmaktadır. Buna sebep olarak sıcaklığın malzemenin erozyonla bağlantılı başka özelliklerini değiştirmesini öne sürebiliriz (kıvılcım erozyonu ve malzeme ilişkisi 3.2 numaralı konuda incelenmiştir). Kesin olarak söylenecek olan, bu deneyin erozyon sıcaklık ilişkisini eğer varsa açıklamak için yeterli olmadığıdır.



Şekil 5.13 : Deney parçası uç sıcaklığı-Aşınma grafiği

Deneyin yan amaçlarından biriside deney düzeneği sonuçları ile motor içi yanma odasında gerçekleşen aşınma miktarlarını karşılaştırmaktı. Bu amaçla daha önce yine Bosch tarafından motor sürüşü deneyleri sonucu elde edilen verilerle bir karşılaştırma yapacağız. Bu motor sürüşleri için denenecek malzeme atölyede başka bir bujinin merkez elektrotu kesilerek ucuna istenilen malzemenin lazer kaynağı ve ana elektrota ise yine malzemenin direnç kaynağı ile kaynak edilmesi ile hazırlanmaktadır. Buji belli bir araç içerisinde normal yollarda çalıştırılmakta belirli periyotlarla bujinin fotoğraflama ve ölçüm işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bujinin gerçek çalışma koşulları ile kıvılcım erozyonu deney düzeneğinde ki aşınma miktarlarını karşılaştırmak için 3 malzemenin motor sürüş verileri kullanılmıştır. Tablo 5.6'da bu malzemelerin kıvılcım erozyonu deneyi aşınma değerleri ve motor sürüşü sonucu ortaya çıkan kıvılcım erozyonu değerleri görülmektedir.

Tablodan da görüleceği üzere deney düzeneği ve motor sürüşü aşınma değerleri arasında oldukça büyük bir fark vardır. Bu çok doğaldır çünkü aşınmayı etkileyen faktörlerden birisinin kıvılcım frekansı olduğunu söylemiştik. Deney düzeneğimizin frekansı sabit 60 Hz iken bujinin motordaki çalışmasında sabit bir frekans yoktur. Deney düzeneğimizde dakikada sabit 3600 kıvılcım olmakta iken motordaki bujinin

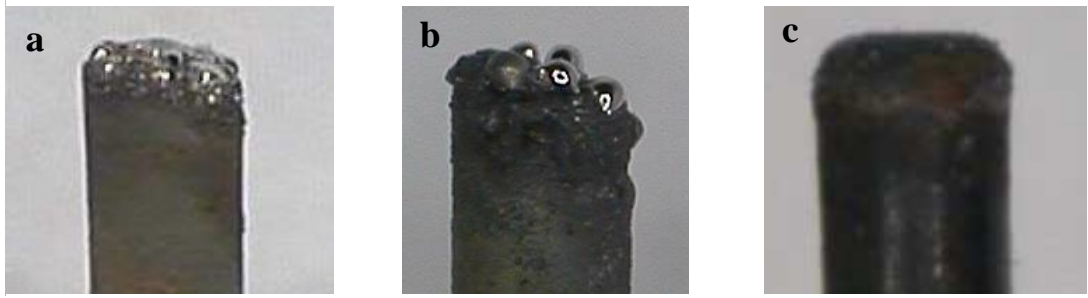
dakikadaki kıvılcım sayısı motorun silindir adedinin motor devri ile çarpımının yarısı olarak verilir [18]. Motor sürüşlerinde ise motorun modeline göre hesap yapılırken ortalama sabit bir kıvılcım adedi alınır. Bu verileri aldığımız motor sürüşündeki motor için bu değer dakikada 2310 kıvılcım olarak belirlenmiştir. Dolayısı ile aradaki bu 10-15 katlık farkın sebeplerinden birisi motor frekansının hesabındaki yaklaşım ve ikincisi ise deney düzeneği ile motor sürüşündeki frekans farkı olarak görülebilir. Ancak olaya fiziksel olarak bakıldığı zaman motor içerisinde kıvılcım enerjisini hava-yakıt karışımını ateşlemek için harcamaktadır, deney düzeneğinde ise bu enerjinin harcanacağı ateşlenecek bir hava-yakıt karışımı olmadığından kıvılcım bu enerjiyi taşıyarak elektrot yüzeyine çarpmaktadır. Bu aşınmanın deney düzeneğinde farklı olması için bir teori olarak ortaya atılabilir. Ama bence esas önemli nokta motor sürüşündeki merkez elektrotla deney düzeneğindeki deney parçası arasındaki en önemli fark yani kutuplamadır. Bujilerde merkez elektrot konstrüksiyon gereği (+) kutuplu yani anot olmak zorundadır fakat kıvılcım erozyonu deney düzeneğinde deney parçaları (-) yani katot olarak kutuplanmıştır. Çalışma düzeni dolayısıyla bu kutupların değiştirilmesi mümkün değildir. Çok önemli bir nokta her ne kadar değerler farklı olsa bile deney düzeneğindeki erozyon direnci sıralaması da motor sürüşündeki erozyon direnci sıralaması da aynıdır. Buda kıvılcım erozyonu deneyinin malzeme seçimi için doğru bir yöntem olduğunun göstergesidir. Ancak şu da kesindir ki aşınma karşılaştırılması yapılması doğru olduğu kadar aşınma değerlerinin karşılaştırılması veya herhangi bir değer başka bir sistem için referans olarak düşünülmesi kesinlikle yanlıştır. Farklı frekans değerleri, farklı ortamlar ve farklı kutuplar, yani tüm farklılıklar aşınma değerini çok büyük oranda etkilemektedir.

Tablo 5.6 : Deney düzeneği ve motor sürüşü aşınma değerleri

Malzeme	Deney Düzeneğinde Aşınma	Motor Sürüşü Aşınma
IrRh10	6,76 μm^3	0,48 μm^3
PtNi10	4,45 μm^3	0,468 μm^3
PtIr22Ni5	4,28 μm^3	0,429 μm^3

Sonuçlarla ilgili dikkat çekici bir nokta da aşınmış yüzeylerin karakteristiğidir. Deney sonrası yapılan fotoğraflamalar ile çok ilginç şu sonuca varılmıştır ki aşınmanın düşük olduğu malzemelerin deney sonucu yüzeyi kabarcıklar ile doludur. En düşük aşınmaya sahip FKS malzemesinin yüzeyi küçük ebatlarda ve çok sayıda

kabarcık ile doluyken aşınmanın daha çok görüldüğü diğer platin alaşım malzemelerde Kabarcıkların ebatları büyük ancak sayıları düşüktür. Ancak aşınmanın platin alaşımlarına göre çok fazla olduğu iridyum ve nikel alaşımlarında aşınma yüzeyinde her hangi bir kabarcık veya girinti çıkıntı bulunmamakla birlikte oldukça düzdür. Pürüzlü yüzeylerde aşınmanın daha düşük olduğunu mikro ateşleyici deneylerinde görmüştük. Kıvılcım erozyonu deneyinde de özellikle FKS ve diğer platin alaşımlarındaki aşınmanın homojen olmaması ve bu sebeple kabarcıklı bir yüzeyin oluşması hem yüzey alanını arttırmakta hem de yüzey pürüzlülüğü artmaktadır ki bunların ikisi de aşınma miktarını düşürücü etkenlerdir. Yalnız ilginç nokta buradan yola çıkılarak buji tasarımında da merkez elektrotun yüzeyinin kabarcıklı imalatı düşünülebilir. Elbette ki daha detaylı bir araştırma ile sonuçların tekrar incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 5.14 : Farklı deney malzemeleri deney sonu aşınma yüzeyi görüntüleri
a- FKS 16Pt, **b-** PtNi10, **c-** IrRh10

5.9 Tartışma ve Öneriler

Kıvılcım erozyonu deney sonuçları malzeme seçimi açısından değerlendirildiğinde son derece tatmin edici olmuştur. Aynı parametreler ile yapılan deneylerde farklı sonuçlar alınmış olması çalışılan ve ölçüm yapılan boyutların büyüklüğü ve hassasiyet göz önünde bulundurulduğunda çok önemli değil aksine sonuçlar tatmin edicidir. Yalnız yapılan deneyler sonucunda bazı noktalar deneyin tekrarlanması halinde hem daha rahat çalışılmasına hem de sonuçlardaki kararlılığın artmasını sağlayacaktır.

Nikel alaşım deney parçaları ile değerli metal deney parçaları arasında başta da söylediğimiz gibi çap farkı bulunmaktaydı. Değerli metal grubu deney parçaları 0.7-0.8 mm apındayken nikel alaşımları grubu deney parçaları 2.7 mm çapına sahipti. Bunun iki sebebi vardı. Bunlardan birincisi bujilerdeki kullanım ebatlarına paralellik sağlamak ikincisi ise maliyetti. Ancak deneyler sırasında çalışma kolaylığı açısından ve deney sonunda sonuç yönünden incelendiği zaman nikel alaşımı grubu deney parçaları kıvılcım erozyonu için çok daha uygundu. Deney düzeneğinin hazırlanmasında 0.7-0.8 mm çaplı değerli metal grubu deney parçaları kolaylıkla deforme olabilmekte ve ölüm imkansızlaşmaktadır. Aynı zamanda deney parçalarının uçları kolaylıkla eğilebilmekte bu da ölüm işlemini zorlaştırmaktadır. Deney sonuçlarının daha hassas olması için değerli metal grubu deney parçalarının çaplarının daha büyük tutulması faydalı olacaktır.

Deney düzeneğinin gözlem pencerelerinin teknik camla değiştirilmesi ve sıcaklık ölümlerinin direk basınç verilmiş oda gözlem pencerelerinden yapılması çok daha doğru olacaktır. Çünkü sıcaklık ölümlerindeki kalibrasyonlar sıcaklık ölümündeki hata paylarını arttırmaktadır.

Kıvılcım erozyonu sıcaklık ilişkisini açıklamak için bu deney yeterli değildir. Daha detaylı bir deney için çok farklı sıcaklık değerlerinde malzemelerin aşınma miktarları ölümlere bu ilişki araştırılabilir.

Bu çalışmadan yola çıkarak bence yapılması gereken en önemli çalışma zamanla kıvılcım aşınma hızının değişimini ortaya çıkartmaktır. Bu amaçla aynı deney prosedürü tekrarlanmalı ancak her 10 saatte bir aşınma ölümleri alınarak kıvılcım başına aşınma miktarları karşılaştırılmalıdır. Böylelikle zamanla hızdaki değişim ve farklı malzemeler için bu karakteristiğin aynı olup olmadığı anlaşılabilecektir.

6. GENEL SONUÇLAR

1- Uzun ömürlü bujiler için yapılan araştırma sonucunda, değerli metal grubu malzemelerden FKS 16Pt elektrot malzemesi olarak seçilmiştir. Bu malzemenin hem aşınma oranı hem de kıvılcım başına aşınma maliyeti minimum olarak bulunmuştur.

2- Standart ömürlü bujiler için yapılan araştırma sonucunda, Nikel alaşımları grubundan saf Nikel elektrot malzemesi olarak seçilmiştir. Bu malzemenin hem aşınma oranı hem de kıvılcım başına aşınma maliyeti minimum olarak bulunmuştur.

3- Yapılan deneyler sonucu sıcaklık ile aşınma miktarı arasında bir ilişki ortaya konamamıştır. Deney sonuçlarına göre sıcaklık ile aşınma miktarı arasında bir ilişkinin olmadığı düşünülebilir.

4- Yol sürüş deneyleri ile bujilerin gerçek çalışma koşullarındaki aşınma değerleri ve deney düzeneğindeki aşınma değerleri karşılaştırılmıştır. Deney düzeneğinin aşınma değerlerinin saptanmasında yeterli değil iken malzemeler arası seçim yapılması için yeterli olduğu görülmüştür.

5- Aşınmanın karakteristiğinde köşelerden başladığı gözlemlenmiştir. Geniş elektrot yüzeyinde aşınmanın daha düşük olduğu görülmüştür. Aşınmanın düşük olduğu malzemelerde yüzeyde küçük ve çok sayıda kürecik, aşınmanın fazla olduğu yüzeyde ise büyük az sayıda kürecik, en yüksek aşınma görülen malzemelerde ise pürüzsüz ve kürecik olmayan bir yüzey gözlemlenmiştir.

6- Yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin aşınma oranlarının düşük olacağı nikel, platin ve gümüş için görülmüştür ancak iridyum bir istisna olarak saptanmıştır. Malzemelerin ısı iletkenlikleri ile aşınma miktarları arasında bir ilişki olmadığı deneyler sonucunda görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Robert Bosch GmbH**, 1998. Spark Plug-Technical Instructions, Stuttgart.
- [2] **Meyer F.**, 1988. Bosch-Automotive Electric/Electronic Systems, Stuttgart.
- [4] **Robert Bosch GmbH**, 1997. Zündkerzen , Karlsruhe.
- [3] **www.edmtechnics.com**, Technology of Spark Erosion and The use of dielectrics.
- [5] **ASM.**, ASM Metals Handbook Volume 16.
- [6] **Goretta K. C., Arroyo R. C., Wu C. T. and Routbort J. L.**, 1991 *Wear* 147 145
- [7] **Nishio K., Oshima T. and Ogura H.**, 1994 *Int. J. Vehicle Design* 15 119
- [8] **Reddy R. M., Cupschalk S. G., Molen G. M. and Kuhlman J. M.**, 1985 *Digest of Technical Papers, 5th IEEE Conf. on Pulsed Power* pp 461–4
- [9] **Donaldson A. L., Kristiansen M., Krompholz H. and Hagler M. O.**, 1985 *Digest of Technical Papers, 5th IEEE Conf. on PulsedPower* pp 457–60
- [10] **Felsner P., Stetter M., Hartmann W., Linsenmeyer A., Christiansen J. and Frank K.**, 1994 *J. Appl. Phys.* 76 5661
- [11] **Gortler A, Schwandner A, Christiansen J. and Frank K.**, 1993 *IEEE Trans. Plasma Sci.* 21 516
- [12] **Engel T. G., Wester S. L. and Kristiansen M.**, 1995 *IEEE Trans. Magn.*31 709
- [13] **Weast R. C. and Selby S. M.**, 2000 *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (Cleveland, OH: Chemical Rubber Company)
- [14] **Lowenheim F. A.**, 1974. *Modern Electroplating* (New York:Wiley).
- [15] **Prucker U.**, 1998 *Proc. 18th Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum* vol 1,p 398
- [16] **Osamura H.**, 1999 *SAE Technical Paper Series* 1999-01-0796
- [17] **Wang B-J, Saka N and Rabinowicz E.**, 1992 *Wear* 157 31.

- [18] **Robert Bosch GmbH**, 2001. Kraftfahr Technisches Taschenbuch, Stuttgart
- [19] **Çapa M., Güleç Ş.** ,1995. Metallerin Yüzey İşlemleri ve Özel İmalat Yöntemleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [20] **Brady G. S., Clauser H. R., Vaccari J. A.**, McGrawHill 1997. Materials Handbook 14Th Edition.
- [21] **Wang B-J and Saka N.**, 1996 Wear 195 133.
- [22] **Rohwein G. J., Babcock S. R. and Buttram M. T.**, 1995. Digest of Technical Papers, 10th IEEE Conf. on Pulsed Power vol 1,p 40.
- [23] **Donaldson A. L., Kristiansen M., Watson A, Zinsmeyer K. And Kristiansen E.**, 1986. IEEE Trans. Magn. MAG-22 1441.
- [24] **Lars Uwe Menken**, Mak. Yük. Müh., Robert Bosch GmbH ,Feuerbach-Stuttgart.
- [25] **Dr.Klaus Peter Hrastnik**,Kıvılcım Erozyonu Deney Danışmanı, Robert Bosch GmbH ,Feuerbach-Stuttgart.
- [26] **Pahnit Seriburi, Dan Kercher and Mark G. Allen**, 2000. An experimental study of microfabricated spark gaps: wear and erosion characteristics., Journal of Micromechanics and microengineering May. 2000.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Tolga SÜTCÜ, 1979 yılında Bursa'da doğdu. Orta ve lise öğrenimini Kültür Koleji 'nde tamamladıktan sonra 1996 yılında İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümüne girdi. 2000 yılında İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı.