

## BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA HİDROKARBON EMİSYON KAYNAKLARI

M. İhsan KARAMANGİL

Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

*Bu çalışmada, buji ateşlemeli motorlarda hidrokarbon (HC) emisyon kaynakları tek tek ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Hidrokarbon emisyon mekanizmaları izah edilmiş ve her kaynağın katkısı silindir içine giren taze karışımdan egzoz manifoldundan atılan yanmış gaz akışına kadar tüm emisyon süreci için yaklaşık olarak verilmiştir. Normal yanma işlemi esnasında yanmaya katılmayan yakıt kesrinin büyüklüğü verilmiş ve bundan dolayı meydana gelen iş ve verim kaybı tayin edilmiştir.*

**Anahtar sözcükler :** Buji ateşlemeli motorlar, hidrokarbon emisyon kaynakları

*In this study, individual hydrocarbon emission sources has been investigated in detail in SI engines. HC emission mechanisms have been described and contributions of individual sources have been approximately given for all emission progress from mixture induction to exhaust flow. The fraction of missed fuel in the combustion process has been given and energy and efficiency loss resulted from missed fuel have been calculated.*

**Keywords :** Spark ignition engines, hydrocarbon emission sources

### GİRİŞ

Buji ateşlemeli motorlarda hidrokarbon ve diğer kirletici emisyonları azaltma çabaları, kanuni zorlamalardan ötürü otomobil şirketlerinin ve üniversitelerin bilimsel araştırmalarının önemli bir araştırma konusu olmuştur. Hızlı ilerlemeler kaydedilerek emisyon seviyelerinde ciddi azalmalar sağlanmıştır. Bunun için yapılan birçok çalışmada HC emisyonlarına oluşum teşkil eden mekanizmalar belirlenmiştir [4, 6, 8, 9, 15]. Bu mekanizmaların karmaşık fiziğini anlayıp geliştirmede ise iki yaklaşım kullanılmıştır. Birincisi deneysel çalışmalar, ikincisi bilgisayar modellemeleridir. Eğer deneysel çalışmalar diğerlerinin etkisi ortadan kaldırılmak şartıyla tek bir fiziki olay üzerinde gerçekleştirilebilmişse oldukça faydalı olmaktadır. Birçok kabuller sonucunda elde edilen denklemlerden oluşan bilgisayar modelleri ise ilginç sonuçlara ve gelecekteki araştırmalara öncülük etmektedirler.

Hidrokarbonlar veya daha uygun ifadeyle organik emisyonlar yakıtın ya eksik yanması ya da direkt dışarı atılması sonucunda oluşan ürünlerdir. Bu ürünlerin yaklaşık yarısını oksijenle hiç reaksiyona girmeyen çığ yakıt, diğer yarısını ise yakıtın oksijenle kısmi reaksiyonu sonucu oluşan bileşenler oluşturur. Bunlar etan, eten, propan, metan, formaldehid, benzen, izobütan, toluen, ve 1.3 bütan gibi ürünlerdir. Bunların birçoğu insan sağlığına zararlı etkilere sahiptir [4].

Silindir içine alınan yakıtın bir kısmı alevin normal yayılma süreci esnasında hidrokarbon oluşum kaynakları tarafından saklanırlar. Yani yanma olayına iştirak etmezler. Bu yanmamış

hidrokarbonların bir kısmı sonraki yanma işleminde silindir içinde oksitlenirler. Oksitlenmeyip silindir içinde kalan hidrokarbonların bir kısmı silindiri terk ederler. Silindiri terk edemeyenler ise artık gazlarla birlikte silindir içinde kalarak bir sonraki taze karışım (yakıt+hava) ile karışırlar ve o çevrimin yanma olayına ve hidrokarbon emisyon işlemlerine katılırlar. Silindir terk edebilenlerin bir kısmı egzoz port ve manifoldunda oksitlenirler. Oksitlenmeyenler egzoz manifoldundan sonra ölçülen emisyonlar olup "motor çıkış hidrokarbon emisyonları" olarak isimlendirilirler. Motoru terkeden hidrokarbonlar daha sonra katalitik konvertöre girerler. Emisyon kontrol sisteminin son derece önemli bir elemanı olan katalitik konvertör, motor çıkış hidrokarbon emisyonlarının yaklaşık %90'nını veya daha fazlasını zararsız bileşenlere dönüştürür.

Normal yanma işlemi sonucu açığa çıkan yanmamış hidrokarbonların sıcak silindir gazları ile karışım oranı, karışımın yanması sonucu oluşan gaz sıcaklığı ve yapısı ve bunu takip eden sıcaklık-zaman ve kompozisyon-zaman ilişkisi karışımın seyrini belirleyerek silindir içi oksidasyon miktarını tayin eder. Egzoz port ve manifoldundaki oksidasyon ise gazın kompozisyonuna, sıcaklığına ve hidrokarbonun oluşan ortamda tutulma zamanına bağlıdır. Hidrokarbonlar yanma odası içinde zamanla değişen üniform olmayan bir dağılıma sahiptirler. Daha çok yanma odası cidarlarına yakın toplanırlar.

Yukarıda izah edilen bu mekanizmalar ayrıca büyük bir performans kaybına da sebep olurlar. Yanma olayına katılmayarak motordan üretilecek olan işi azalttıklarından dolayı yanma verimini düşürürler ve genelde tahmin dilenden daha büyük bir öneme sahiptirler.

## YANMAMIŞ HİDROKARBONLARIN KAYNAKLARI

Bu kaynakların şu alt başlıklar altında incelendiği görülür.

1. Yanma odası içerisindeki aralıklar veya boşluk bölgeleri (Crevice)
2. Yağ filmi
3. Tortular (birikintiler)
4. Sönüm tabakaları (Quench layers)
5. Sıvı yakıt
6. Egzoz supap sızıntısıdır.

Toplam hidrokarbon emisyon işlemlerinin birbirini takip eden iki büyük aşamada meydana geldiği düşünülür. Birincisi, alevin silindir içindeki yayılması esnasında silindire sevk edilen yakıtın bir kısmının yanmasını engelleyen oluşumlardır. Bunlar şu maddeler haline özetlenebilir:

1. Buharlaştan yakıt-hava karışımının yanma odasındaki boşluk hacimleri içerisinde emilmesi
2. Yakıt bileşenlerinin silindir cidarı üzerindeki yağ filmi içine emilmesi
3. Hidrokarbonların silindir kafası ve piston tablası üzerinde bulunan birikintiler tarafından emilmesi
4. Alev cephesinin silindir cidarına varmadan sönmesi sonucu oluşan hidrokarbonlar
5. Yeterli hava ile karışamayan ve buharlaşamayan silindir içindeki sıvı benzinin kısmi yanması sonucu oluşan hidrokarbonlar
6. Yanmamış karışımın kapalı olan egzoz supabından kaçması.

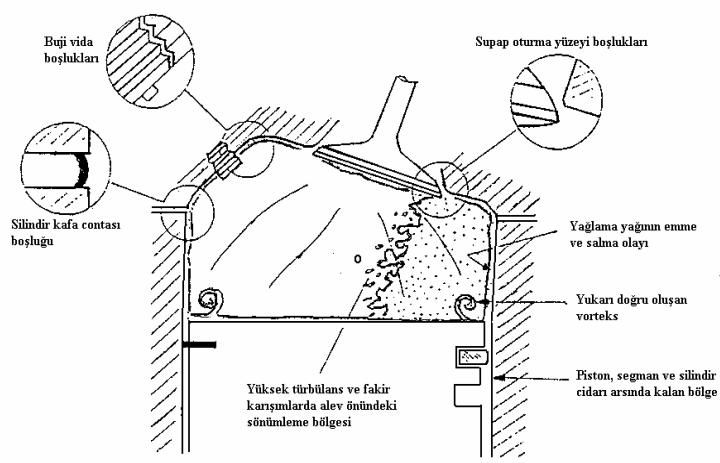
İkincisi, yanma işlemi sonrasıyla ilgili adımlar olup, yakıtın silindir içinde yanmadan kalabilmesini,

genişleme ve egzoz stroklarında kendisini muhafaza edebilmesini ve egzoz port ve manifolduna ulaşmasını ihtiva eder. Bunlar ise şu şekilde özetlenir:

1. Boşluk hacimleri içindeki yanmamış yakıt-hava karışımının dışarıya doğru akışı; yanmış gazlar ile karışması ve bir kısmının oksitlenmesi
2. Yağ filminden ve birikintilerden yanmış gazların içine doğru hidrokarbon buharının difüzyonu; bu bir kısım hidrokarbonun oksitlenmesi
3. Gerek cidar bölgesinde gerekse silindir merkezinde sönmüş gazların daha sonra yanmış gazlarla karışarak bir kısmının oksitlenmesi.
4. Egzoz stroku başlangıcında silindir içindeki yanmamış hidrokarbonun bir kısmının egzoz içine taşınması.
5. Egzoz stroku sırasında gazların piston tarafından yer değiştirmesiyle yanmamış HC oranına ilave hidrokarbonların da katılarak egzoz içine taşınması.
6. Silindiri terk eden yanmamış hidrokarbonlar sıcak egzoz gazları ile karışması ve bu hidrokarbonların bir kısmının egzoz port ve manifoldunda okside olması.

### Yanma Odası İçerisindeki Aralıklar veya Boşluk Bölgeleri (Crevice)

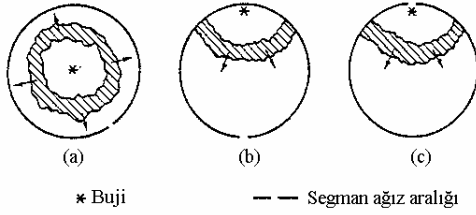
Normal yanma olayında yakıtın kaçmasına sebep olan en önemli mekanizmalardan biri olan aralıklar, içlerine yakıt-hava ve artık gaz karışımı girebilen fakat alev giremeyen yanma odasına dar bölgelerle bağlanmış içine ve dışına gaz akışı olan boşluklardır. Şekil 1'de farklı boşluk bölgeleri gösterilmiştir. Toplam boşluk hacmi sıcaklığa ve geometriye bağlı olarak kompresyon hacminin %1-2 si kadardır. En büyük boşluk hacmi üst segman boşluğu hacmi olmakla birlikte, silindir kafası contası, buji ve supap oturma yüzeyindeki boşluklar da önemlidir. Yakın zamanda yapılan çalışmalar göstermiştir ki yanma odası içindeki boşluk bölgelerinden kaynaklanan hidrokarbonlar motor çıkış hidrokarbon emisyonlarının yaklaşık %38'ini teşkil ederler [4].



Şekil 1. Farklı Boşluk Hacimlerinin Şematik Görünümü [4].

Silindir içi basınç arttığında, maksimum silindir basıncına ulaşılan dek gazlar boşluk bölgelerine sıkıştırılır. Daha sonra genişleme ve egzoz strokları süresince silindir içi basınç düşer ve gazlar yerlerinden çıkarak silindir içine yayılırlar. Boşluk bölgelerine akan gazların bileşimi şu şekildedir; yanmamış gaz (yakıt buharı, hava, artık gaz ve şayet varsa EGR gazları) ve yanmış gaz. Karışım içindeki her gazın oranı yanma boyunca boşluk bölgesinin aleve göre izafi konumuna bağlıdır. Eğer

alev boşluk bölgesine maksimum basınçtan önce ulaşırsa, boşluk bölgesine yanmış gazlar da girecektir. Alev geometrisi öncelikle buji konumuna bağlıdır. Örneğin, merkeze yerleştirilmiş bir buji için segman boşluğundaki gazların büyük bir kısmı (hemen hemen hepsi) yanmamış karışımdır. Eğer buji yanma odasının kenarına konumlandırılmış ise ve segman aralığı bujiden en uzak yerde ise segman boşluğu içine akan gazın yanmamış kısmının yüzdesi yaklaşık %60 dır; segman ağız aralığı buji ile kapatılmış durumda ise segman boşluğu içine akan gazın yaklaşık %50 si yanmamış karışımdır. Şekil 2 de değişik segman ağız aralığı-buji konumlarına göre yanmamış gaz oranları gösterilmiştir [13].



*Şekil 2. Segman Ağız Aralığı İle Buji Konumunun Yanmamış Segman Boşluğu Gazlarının Oranı Üzerindeki Etkisinin Şematik Gösterimi [13].*

Birçok motor çevrimi için segmanlardaki önemli basınç farklılıklarından dolayı, segman bölgeleri arasındaki akış oldukça komplekstir. Üstteki iki segman arasına hapsedilen maksimum kütle pistonun tepe noktası ile üst segman arasındaki hacme hapsedilen maksimum kütle için yaklaşık beşte biri kadardır. Motorun çevrimi sırasında kompresyon kaçağı meydana gelir. Gazın bir kısmı segmanlar arasından geçerek kartere akar. Kompresyon kaçağı silindir içine alınan yakıtın yaklaşık %1'ine karşılık gelir.

Piston-silindir-segman arası bölge içindeki toplam kütle bu bölgenin hacmine ve bu bölgedeki gazın yoğunluğuna bağlıdır. Piston-silindir-segman arası bölgedeki basınç genelde silindir içindeki basınca eşit kabul edilir (üst segmanın altındaki bölgeler hariç). Bir başka ifadeyle piston-silindir-segman arası bölge içindeki gaz sıcaklığı ile silindir içindeki gaz sıcaklığına eşit değildir. Çünkü bu bölgeye girişte hızlı bir şekilde soğurlar ve cidar sıcaklığına yakın olurlar. Örneğin piston-silindir-segman arası bölgedeki gazların sıcaklığı piston ve silindir gömleğinin sıcaklığına bağlıdır. Özellikle motorun soğuk çalışmasından ısınmasına kadar geçen sürede sıcaklıklar farklı olup, motor çalışma şartlarıyla da değişiklikler gösterir. Ayrıca motor ısındığında piston-silindir-segman arasındaki bölgenin hacmi azalır.

### Yağ Filmi (Oil Layer)

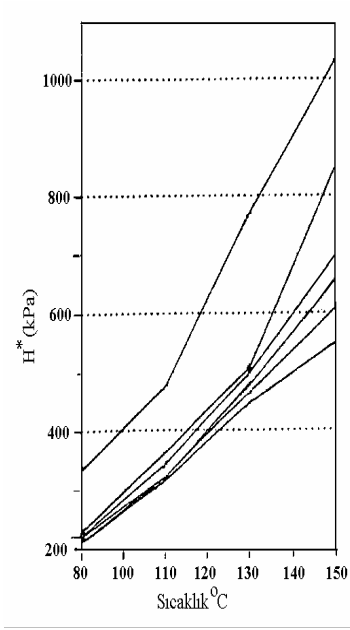
Silindir gömleği üzerinde bulunan yağlama yağı segmanları ve piston eteğini yağlar, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltır. Birkaç mikron kalınlığındaki bu yağ filmi, emme, sıkıştırma ve yanma işlemleri sırasında hidrokarbon emme (absorbtion), genişleme ve egzoz stroklarında ise hidrokarbon salma (desorbtion) yeteneğine sahiptir. Yakın zamanda yapılan çalışmalara göre motor çıkış hidrokarbon emisyonlarının %10-25'inin yağ filminden emilen ve salınan hidrokarbonlardan kaynaklandığı hesap edilmiştir [7].

Yağ filminin dış yüzeyinde, yağ filmi içinde çözülmüş yakıt buharı konsantrasyonu denge halindeki

seyreltik çözeltiler için Henry kanunu ile ifade edilir. Henry kanunu, buhar fazındaki yakıtın kısmi basıncı, yağ filmi içerisine emilen yakıtın mol kesri ve Henry sabiti arasında yazılan bir ifadedir.

$$x_{yak,yağ} = \frac{P_{yak,(g)}}{H} \quad (2)$$

DeneySEL sonuçlara göre, Henry sabiti (H) ile yağ sıcaklığı arasında exponansiyel bir ilişki vardır. Şekil 3'de Henry sabitinin yağ filmi sıcaklığına oldukça duyarlı olduğu görülmektedir.

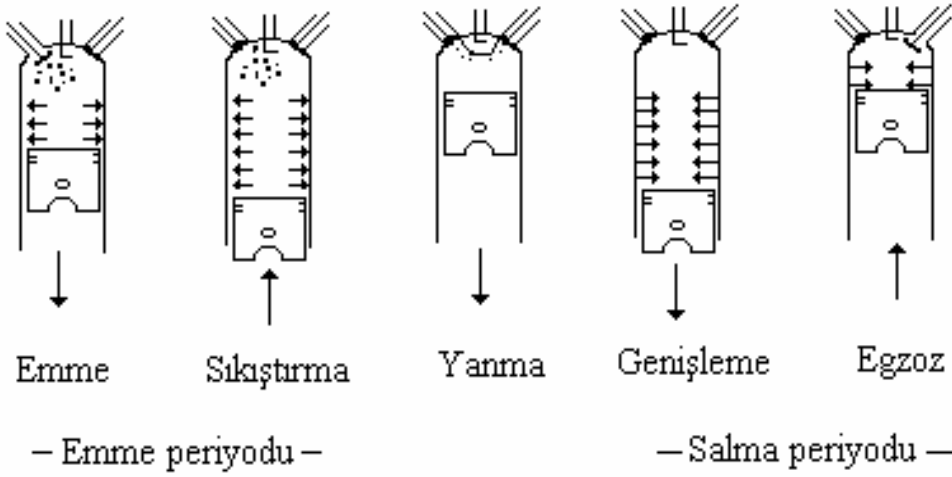


Şekil 3. Farklı Yağlar İçin Sıcaklığın Bir Fonksiyonu Olarak H\* Sabitinin Deneysel Verileri [6].

$H^* = H(M_{yağ} / M_{yak})$  şeklindedir.  $M_{yağ}$  : yağın mol kütlesi,  $M_{yak}$  : yakıtın mol kütlesi.

Yakıt buharının emilmesi basınç ve sıcaklıkla değişir. Yağ filmi içine emilen buharın miktarı, daha düşük yağ sıcaklıklarında ve daha yüksek gaz basınçlarında oldukça yüksektir. Yağ sıcaklığı Henry sabitini, silindir içi basınçta her bir bileşenin kısmi basıncını etkiler. Yağ filmi sıcaklığı özellikle silindir gömleği sıcaklığına bağlıdır ki, silindir gömleği sıcaklığı da sanki daimi motor çalışma şartları müddetince izafi olarak değişmeyip aynı kaldığı kabul edilebilir. Bununla birlikte gömlek sıcaklığı yükün artması ile artar ve yağ filmi sıcaklığını etkiler.

Bir buji ateşlemeli motorda yağ filmi (Şekil 4) çevrim boyunca basınç ve sıcaklıktaki değişimlere maruzdur. Emme zamanı boyunca yağ filmi çok düşük basınç ve sıcaklığa maruz kaldığından yağ filmi içine emilen yakıt miktarı çok azdır. Sıkıştırma stroku süresince gaz basıncı ve sıcaklığı artar ve yağ filmi pistonun bir kısmı tarafından örtülür. Yağ filminin pistonla örtülü olmayan kısımları ise hidrokarbon emmeye devam edecektir. Aynı şekilde yanma olayı sırasında basınç ve sıcaklık hızlı bir şekilde arttığından, yağ filmi içine hidrokarbon emilmesi devam eder (yağ filminin doyum sınırına ulaşması mümkündür). Emme işlemi alev yağ filmine ulaşana dek devam eder. Hidrokarbonlar yağ filmine emilişlerini tamamladıktan sonra bu sefer yağ filmi derinliğince nüfuz etmeye başlarlar.



*Şekil 4. İnce Yağ Filmi İçine Yakıtın Emilmesi ve Salınması [10].*

Genişleme ve egzoz strokları boyunca yağ filmi piston tarafından açılır. Yağ filmi azalan basınç ve sıcaklığa maruzdur ve yanmış gazlar içindeki hidrokarbon konsantrasyonu hemen hemen sıfırdır. Bundan dolayı, hidrokarbonlar yağ filminin dışına doğru salınırlar ve silindir gazları içine yayılırlar. Eğer oksidasyona uğramazlar ve silindirden de çıkabilirlerse yanmamış hidrokarbon emisyonlarına katılırlar.

### Silindir İçi Sıvı Yakıt

Silindir içindeki sıvı yakıtın miktarı enjektör tipine, püskürtme karakteristiğine ve bileşen sıcaklıklarına bağlıdır. Yakıt genellikle emme supabı ve port cidarları üzerine püskürtülür. Yakıtın küçük bir miktarı burada supap açılmadan önce buharlaşır. Emme supabının açılmasıyla, yanmış gazların hızlı bir şekilde geri akışı ile port içindeki sıvı yakıtın büyük bir miktarı buharlaşır. Bununla birlikte arta kalan ve silindire giren sıvı yakıt ya yanarak yanma gazlarının bir kısmını oluşturur ya da normal yanma işleminden kaçarak tortulara, yağ filmine veya segman boşluğuna dahil olur. Yakıt açık bir supabın arkasına püskürtüldüğü zaman daha büyük miktarda sıvı yakıt silindire girer ve daha fazla sıvı yakıt kaynaklarda depolanabilir, böylece HC emisyonları artar. Yapılan bir çalışmada ısınmış bir motorda dahi sıvı yakıtın motor çıkış hidrokarbon emisyonlarını %20 arttırdığı görülmüştür [6].

### Alev Sönümü

Silindire doğru ilerleyen alev soğutulmuş yanma odası yüzeylerine ulaştığında alev sönümü meydana gelir ve yüzeye bitişik yanmamış bir karışım tabakası ayrılır. Uzun yıllar HC emisyonlarının en önemli ana kaynağı olarak yanma odası yüzeyleri üzerindeki sönüm tabakaları düşünülmüştür. Soğutma yüzeyleriyle alev sönüm mesafesi arasındaki ilişkiye dair birçok geniş araştırmalar yapılmıştır. Bununla birlikte daha sonra yapılan tahminler, alev sönümü sonrası difüzyon ve oksitlenmeden dolayı sönüm tabakaları HC'lerin oksitlenmesinin tamamen gerçekleştiği üzerine olmuştur. Hızlı gaz örneklemeli motor deneyleri bu tahminleri desteklemektedir [13].

Alev sönümü etkisi fakir ve seyreltik karışimli (EGR ile) çalışma şartlarında da önemli olabilir. Yakın zamandaki çalışmalar alev sönümünün HC emisyonlarına yaklaşık %5 katkıda bulunduğunu göstermiştir [4].

## Tortular (Birikintiler)

Tortular, normal olarak bir motorun uzun süreli çalışmasından sonra oluşurlar. Tortular silindir kafasında, piston kafasında ve emme manifoldu üzerinde şekillenirler. Çalışma şartlarına bağlı olarak bir miktar yakıt bileşeni emdiklerine ve saldıklarına inanılır. Tortular emme supabının arkasında oluştukları takdirde, püskürtülen yakıt bunlar tarafından emilecektir. Bu durum motorun çalışması süresince silindirlere fakir bir dolgunun gitmesine sebebiyet verir. Emme supabı tortuları sanki daimi HC emisyonlarını çok fazla etkilemezler. Bununla birlikte, piston başı ve silindir kafası üzerindeki tortular HC emisyonları üzerinde etkiye sahiptirler. Sıkıştırma ve yanma olayları esnasında yakıt tortularca emilir. Böylece yakıt normal yanma işleminden kaçır ve daha sonra genişleme ve egzoz strokları boyunca da dışarı çıkarlar. Voltadoros ve ark. silindir içi tortuların HC emisyonlarını %50-100 kadar artırabileceğini göstermişlerdir. Yakın zamandaki yapılan bir çalışmada tortu etkilerinin toplam HC emisyonlarına katkısının %16 olduğu verilmektedir [4].

## Egzoz Supabı Sızıntısı

Daha öncede ifade edildiği gibi egzoz supabı sızıntısı, yanmamış karışımın egzoz supabı oturma yüzeyinden egzoz portuna doğru sızmasıdır. Hızlı cevap veren alev iyonizasyon HC detektörleri ile egzoz portunda yapılan deneylerde, supap kapandığında port içinde HC konsantrasyonlarının periyodik bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu fiziksel olay HC emisyonlarının oluşumuna etkisi çok yüksek olmasa da (toplam HC emisyonlarının %7 sinden daha az) ihmal edilmemelidir [7].

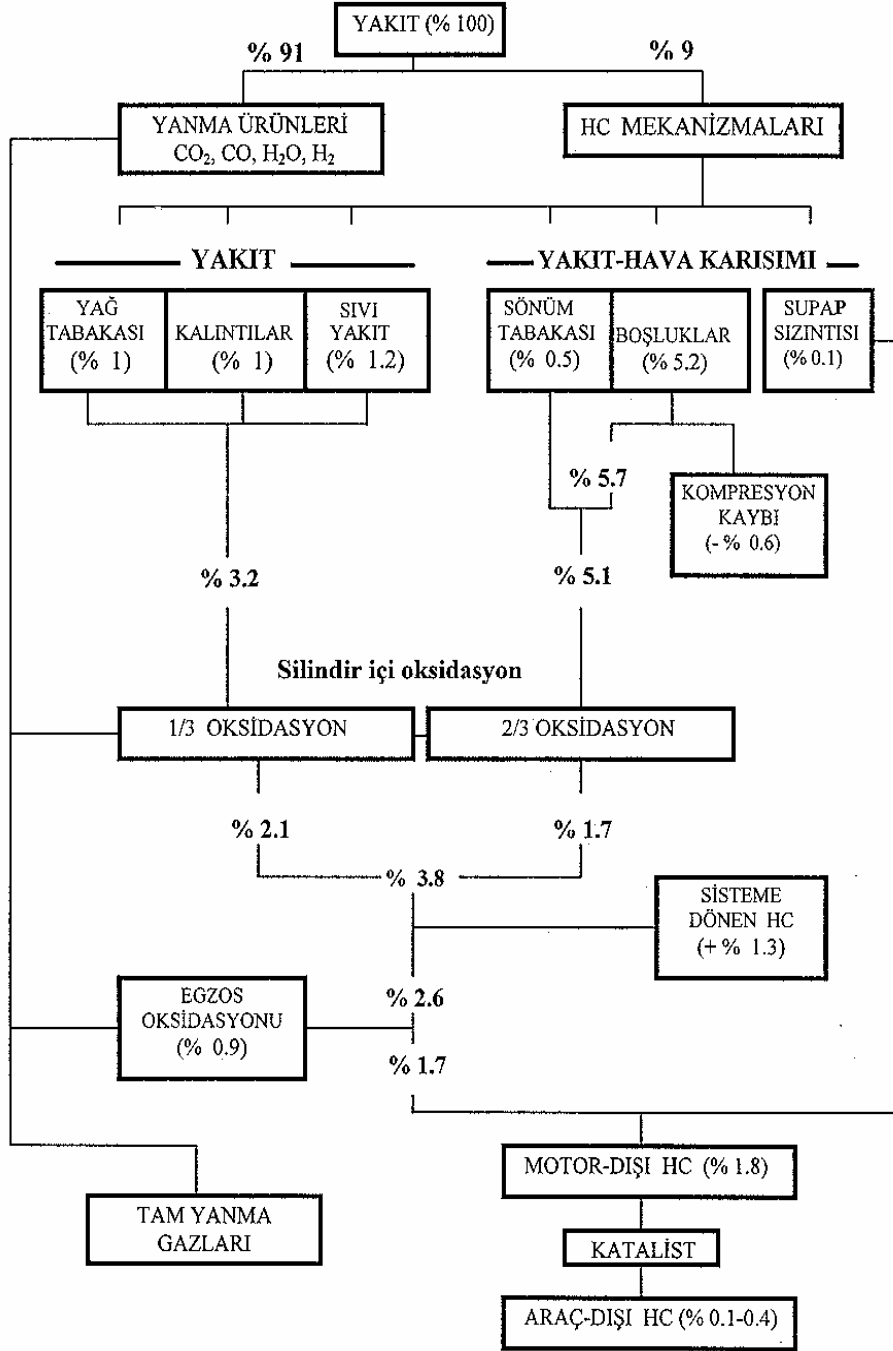
## HC MEKANİZMALARININ HER KADEMESİNİN İÇERDİĞİ HC ORANI (HİDROKARBON AKIŞ DİYAGRAMI)

Yukarıda izah edilen HC mekanizmalarının hepsi uygun bir şekilde birbirlerine ilişkilendirilerek Şekil 5'de gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında her bir çevrimde silindire giren yakıt iki kısma ayrılmaktadır. Bir kısmı normal yanma işlemi ile yanmakta diğer kısmı ise daha önce anlatılan mekanizmalar tarafından paylaşılmaktadır. Kaynaklarda kendi aralarında ayrılmışlardır. Kaynakların bir kısmı bünyelerinde tuttıkları hidrokarbonları silindir içine yakıt-hava karışımı şeklinde neşrederler. Diğer bir kısmı silindir içine oksijenden ayrılmış yakıt buharı bileşenleri neşrederler ve bunların oksitlenmesi için oksijene ihtiyaç duyulur. Bir de silindir içi süreçlerin hiçbirisine katılmayan egzoz supabı sızıntısı vardır. Parantez içindeki sayılar emilen yakıtın bir yüzdesi olarak HC miktarlarını belirtir [4].

Şekil 5 ile gösterilen en önemli olay yakıtın yaklaşık %9'unun normal yanma işlemine katılmaması ve motor çıkış HC emisyonlarının yakıtın yaklaşık %1.8'ine denk gelmesidir. Kompresyon kaybının (~%0.6) ve artık hidrokarbonların (~%1.3) yeniden çevrime dahil oldukları düşünülürse yanmamış yakıt miktarının %9'dan %7'ye düştüğü görülür. Tabiidir ki taşıt emisyonları daha düşük yüzdelere sahiptir.

Şeklin sağ tarafı yanmamış HC mekanizmalarını, sol tarafı ise normal yanma işlemi göstermektedir. Kaynaklar veya işlemler yoluyla normal yanma işleminden kaçan yakıtın bir kısmı, diyagramın üst kısmında kutularla gösterilmiştir. Silindir içinde oksitlenme, silindir içinde artık gazlarla alıkonulma, egzoz port ve manifoldunda oksitlenme ve katalizör sırasıyla şeklin alt

tarafında gösterilmiştir. Parantez içindeki sayılar toplam çevrim boyunca her adım için HC emisyon indeksini (her bir çevrimde silindire giren benzinin yüzdesi) göstermektedir.



*Şekil 5. Her Silindire Giren Benzin Yakıtı İçin Komple Akış Diyagramı [4].*

## SİLİNDİR İÇİNDE OKSİTLENME ve ALIKONULMA

Normal yanma işlemi bittikten sonra yanma olayından kaçan yanmamış hidrokarbonlar; i. saklandıkları bölgelerden çıkabilirler veya silindir içinde oksitlenirler, ii. artık gazlar içinde



tutulurlar, iii. egzoz port ve manifoldunda oksitlenirler. Bu üç mekanizmanın her biri motordan yayılan yanmamış hidrokarbon miktarını azaltır.

### Silindir İçinde Oksitlenme

Yanma olayından kaçan HC'lar yanma olayı bittikten sonra sıcak yanmış gazlar içinde oksitlenirler. Genişleme ve egzoz stroklarında yüksek sıcaklığa sahip yanmış gazlar, yeterli oksijenin olması durumunda hidrokarbonları oksitlerler. Silindir içerisindeki çok kısa zamandan dolayı 1000 K'in altındaki sıcaklıklarda, ortam HC'ların oksitlenmesi için müsait değildir. Deneysel bir çalışmada simüle edilmiş segman boşluğundan çıkan hidrokarbonun tam oksitlenmesinin sadece silindir içi gaz sıcaklığının 1400 K'nin üstünde olduğu durumda meydana geldiği görülmüştür. Egzoz supabı açıldıktan sonra, süpürme işlemi başlar, silindir içindeki gaz sıcaklığı ve basıncı azalır ve silindir içindeki oksitlenme önemli bir şekilde yavaşlar [6].

İki farklı tip kaynak düşünülmelidir. Bunlar yakıt-hava karışımı üretenler ve yalnızca yakıt üreten kaynaklardır. Boşluk bölgeleri ve alev sönümü yakıt-hava kaynaklarını temsil ederler. Çünkü onlar sıcak silindir gazları içine taze karışım sokarlar. Kaynağın bu tipi hidrokarbonu yakabilecek yeterli oksijene sahiptir. Diğer taraftan tortular, yağ filmi ve sıvı yakıt sadece yakıt üreten kaynaklardır. Çünkü sıcak silindir gazları içine sadece yanmamış yakıt sokarlar. Kaynağın bu tipi başlangıçta yakıt buharı ile karışan oksijenden ayrılır. Bu sebepten dolayı, yakıt kaynaklarının, yakıt-hava kaynaklarına göre çok düşük mertebelerde oksitlendiklerine inanılır. Silindir içerisindeki oksitlenme miktarı ayrıca hidrokarbonların kaynaklardan çıkış hızına, genişleme ve egzoz strokları boyunca yanmış gazlarla karışım zamanına ve kaynakların silindir içindeki konumuna bağlıdır. Yakın zamanda yapılan çalışmalarla yakıt-hava kaynaklı hidrokarbonların yaklaşık 2/3 ü, yakıt kaynaklı hidrokarbonların ise yaklaşık 1/3 ünün silindir içinde oksitlendikleri belirlenmiştir.

### Hidrokarbon Alıkoyma

Silindir içi oksidasyondan arta kalan hidrokarbonlar, ya egzoz gazları ile egzozu gönderilir ya da silindir içinde tutularak artık gazlar ile bir sonraki çevrimde taze dolguya katılırlar. Egzoz stroku boyunca pistonun gazları bir girdap şeklinde silindir cidarları boyunca topladığı bilinir. Girdabın segman boşluğundan ve yağ filminden arta kalan hidrokarbonların büyük bir kısmını içerdiği tahmin edilmektedir. Geometrik yapılardan ötürü hidrokarbonun bir kısmı artık gazlar içinde alıkonulur. Yakın zamandaki çalışmalardan, klasik yükleme için (1500 d/dak,  $p_{mi} = 3.8$  bar) silindir içi oksitlenmeden sonra geriye kalan hidrokarbonların yaklaşık 1/3'ünün silindir içinde kaldığı hesaplanmıştır [4].

## EGZUZ MANIFOLDUNDA OKSİDASYON

Isınmış bir motorda, egzoz gazları içinde alıkonulan HC, egzoz manifoldu girişi ve onun uzantısı olan egzoz manifoldunda oksitlenebilir. Egzoz stroku esnasında gaz fazındaki hidrokarbonları oksitlemek için yeterince yüksek sıcaklık ve şiddetli bir türbülans vardır. Analitik ve deneysel çalışmalar, kısmi yüklemede, stokyometrik çalışma şartlarında hidrokarbonların yaklaşık üçte birinin egzoz port ve manifoldunda oksitlendiğini göstermiştir [4].

## SONUÇ

Bu çalışmada yanmamış hidrokarbon emisyon kaynakları ve oluşum mekanizmaları özetlenmiştir. Her kaynak tarafından emilen miktarlar ve hidrokarbon emisyonundaki oranları belirlenmiştir. Bu durum Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Farklı Tip Hidrokarbon Kaynakları ve Motor Çıkış HC Emisyonlarına Katkıları

Yakıt-hava kaynaklı			Yakıt kaynaklı		
Kaynak	%HC	%Kaçan yakıt	Kaynak	%HC yakıt	%Kaçan
Boşluklar (crevices)	38	5.2*	Yağ filmi	16	1.0
Sönüm tabakaları	5	0.5	Tortular	16	1.0
Egzoz supap sızıntısı	5	0.1	Sıvı yakıt	20	1.2

\* Kompresyon kaybı (%0.6) çıkarılmıştır. %HC: Her bir kaynağın hidrokarbon emisyonlarına katkı yüzdesi, %Kaçan yakıt: Normal yanma işleminden her kaynağa giren yakıt üzerinden kaçan yakıt yüzdesi.

Her bir kaynak mekanizmasının HC emisyonlarına katkısı deneysel ölçüm ve modellerle tayin edilerek aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Rejim sıcaklığında ve kısmi yükte çalışan bir motorun motor çıkış HC emisyonları giren yakıtın yaklaşık %1.8'i olmasına rağmen, normal yanma işlemi esnasında yanma olayından kaçan miktar giren yakıtın %9'u kadar olmaktadır. Bununla birlikte, kompresyon kaybı hidrokarbonları ve silindir içinde tutulan hidrokarbonlar (ikisi birlikte yakıtın yaklaşık %2 sine tekabül ederler) bir sonraki çevrime dahil olduklarından gerçekte yanmamış net miktar yakıtın %7'si kadardır.
2. Normal yanma işleminden kaçan bu %9'luk yakıtın performansa ( $p_{mi}$ ) ve yakıt ekonomisi kaybına sebep olan miktarı yaklaşık %6'dır.
3. Rejim sıcaklığında ve kısmi yükte çalışan bir motorda çeşitli kaynakların motor çıkış HC emisyonlarına katkısı şu şekildedir; yanma odası içi boşluk bölgeleri yaklaşık %38, yağ filmi ve tortuların her biri yaklaşık %16, alev sönümü yaklaşık %5, silindir içi sıvı yakıt etkisi yaklaşık %20 ve egzoz supap sızıntısı yaklaşık %7'den biraz az.
4. Henüz yeterince ısınmamış bir motorda, normal yanma işleminden kaçan yakıtın miktarı daha yüksek olacaktır. Çünkü yanma odası içi boşluk bölgeleri ve yağ filmi daha soğuktur. Ayrıca silindir içine daha fazla sıvı yakıt alınır. Daha düşük cidar ve yanmış gaz sıcaklıklarından dolayı da normal yanma işlemi bittikten sonra meydana gelen oksidasyon miktarı daha düşük olacaktır [4].

## KAYNAKÇA

1. **Adamczyk, A.A., Rothschild, W.G. and Kaiser, E.W.** 1985. The Effect of Fuel and Oil Structure on Hydrocarbon Emissions from Oil Layers During Closed Vessel Combustion. *Combustion Science and Technology*, 44:113-124
2. **Bilgin, A. ve Durgun, O.** 1998. Taşıt Motorlarında Kirletici Emisyonların Oluşum Mekanizmaları ve Önlenmesi. Beşinci Yanma Sempozyum : 196-208.
3. **Borat, O., Sürmen, A. ve Balcı, M.** 1994. İçten Yanmalı Motorlar. Teknik Eğitim Vakfı Yayınları-2, Ankara, 500 s.
4. **Cheng, W.K., Hamrin, D. and Heywood, J.B.** 1993. An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark-Ignition Engines. SAE Paper No: 932708.
5. **Ergeneman, M., Arslan, H., Kutlar, O.A. ve Mutlu, M.** 1998. Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler. Birsen Yayınevi, İstanbul, 112 s.
6. **Hamrin, D.A.** 1994. Modeling of Engine-Out HC Emissions for Prototype Production. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology.
7. **Hamrin, D.A. and Heywood, J.B.** 1995. Modeling of Engine-Out Hydrocarbon Emissions for Prototype Production Engines. SAE Paper No: 950984.
8. **Heywood, J.B.** 1989. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill International Editions. Singapore, 930 s.
9. **Karamangil, M. İ.** 2000. Benzin Motorlarında HC Emisyonlarının Matematik Modellenmesi. Doktora tezi. U.Ü. Fen Bilimleri Ens. 30 Mart 2000. Bursa.
10. **Korematsu, K.** 1990. Effect of Fuel Absorbed in Oil Film on Unburnt Hydrocarbon Emissions from Spark Ignition Engines. *JSME International Journal Series II*, 33 (3)
11. **Lavoie, G.A., Lorusso, J.A. and Adamczyk, A.A.** 1978. Hydrocarbon Emissions Modeling For Spark Ignition Engines. Symp. On Combust. Modeling in Recipit. Engines.
12. **Min, K. Cheng, W.K. and Heywood, J.B.** 1994. The Effects of Crevices on the Engine-Out Hydrocarbon Emissions in SI Engines. SAE Paper No: 940306.
13. **Namazian, M. and Heywood, J.B.** 1983. Flow in the Piston-Cylinder-Ring Crevices of a Spark-Ignition Engine: Effect on Hydrocarbon Emissions, Efficiency and Power. SAE Paper No: 820088
14. **Norris, M.G. and Hochgreb, S.** 1996. Extent of Oxidation of Hydrocarbons Desorbing from the Lubricant Oil Layer in Spark-Ignition Engines. SAE Paper No: 960069.
15. **Schramm, J. and Sorenson, S.C.** 1990. A Model for Hydrocarbon Emissions From SI Engines. SAE Paper No: 902169.