

## 2. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ÜRETİLEN KİRLETİCİ MADDELER

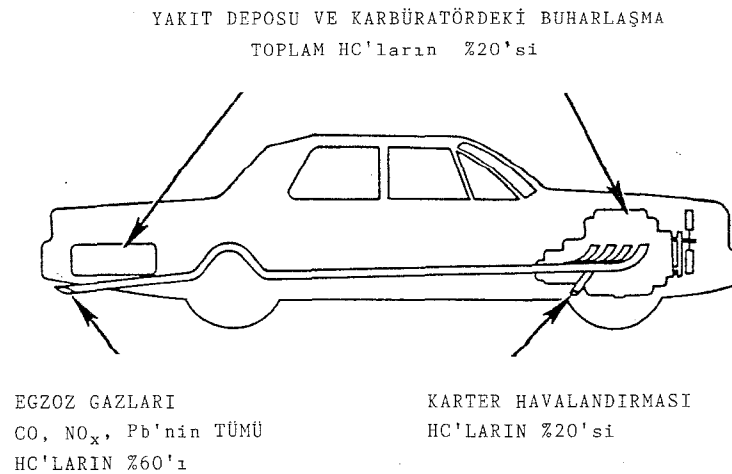
### 2.1 Motorlu Taşıtlarda Kirletici Maddelerin Oluşumu

Motorlu taşıtlar tarafından üretilen kirletici maddelerin kaynakları üç ana grupta toplanabilir :

- egzoz gazları,
- karter havalandırması,
- yakıt deposu ve karbüratördeki buharlaşmalar.

Önlem alınmamış taşıtlarda, egzoz gazları içerisindeki kirletici bileşenler tüm emisyonun önemli bölümünü oluşturmaktadır.

Karter havalandırmasından atmosfere kirletici maddelerin atılmasını önlemek amacıyla havalandırma bağlantısı karbüratöre yapılmaktadır. Böylece karterden gelen bileşenler yanma odasına gönderilerek yakılmaktadır (pozitif havalandırma yöntemi). Kaliforniya'da 1961 yılında başlatılan bu uygulama, 1964 yılından itibaren tüm dünyada geçerli olmuştur. Yanmamış yakıt, buharlaşan yağlama yağı ve kısmen yanmış HC'lerden oluşan bu gazlar içerisinde ayrıca  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  ve  $NO$  da bulunmaktadır. Emisyon önlemleri alınmamış taşıtlarda bu kaynak tüm HC emisyonunun % 20 kadarını oluşturmaktadır.



Şekil 2.1 Motorlu taşıtlar tarafından üretilen kirletici maddelerin kaynakları.

Yakıt deposu ve karbüratörden buharlaşan yakıtın oluşturduğu hava kirliliğinin önlenmesi amacıyla 1970 yılında yine Kaliforniya'da başlatılan önlemler, 1971 yılından sonra başka yerlerde de uygulanmaya başlanmıştır. Bu sistemlerde, buharlaşan yakıt motora gönderilerek yakılmaktadır. Motorun çalıştırılmadığı durumlarda buharlaşan yakıt ise, depolanarak daha sonra yanma odasına gönderilmektedir. Depolama işlemi için kömüre HC'ların emdirilmesi yöntemi kullanılmaktadır. Diğer bir yöntem de bu yakıt buharının karterde depolanmasıdır. Önlem alınmamış taşıtlarda bu kaynak da tüm HC emisyonunun %20 kadarını oluşturmaktadır.

Son yıllarda, yakıt deposu ve karbüratörden buharlaşan yakıt ile karter havalandırmasından atmosfere atılan kirletici bileşenlerin pozitif havalandırma sistemi ile önlenmesi sonucunda motorlu taşıtların ürettiği kirletici maddelerin asıl kaynağını yakıt-hava karışımının yanması sonucu elde edilen egzoz gazları oluşturmaktadır.

## 2.2 Egzoz Gazları İçerisindeki Kirletici Maddelerin Oluşumu

Motorlarda ideal yanma durumunda, yanmanın tam olması sonucunda yanma ürünleri arasında zehirli etkileri olmayan  $CO_2$  ve  $H_2O$  bileşenleri ile havadaki  $N_2$  bulunacaktır. Ancak uygulamada yanmanın tam olmaması ve disosiyasyon nedeniyle oluşan ara ürünler egzoz gazları içerisinde ek olarak HC,  $NO_x$ , CO gibi zararlı maddelerin oluşmasına neden olur. Ayrıca yakıtın içinde bulunan kükürt ve katkı maddeleri nedeniyle  $SO_2$ , Pb bileşenleri gibi zararlı maddeler de yanma ürünleri arasında yer almaktadır (Tablo 2.1).

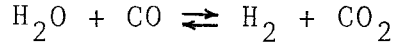
### (a) Karbon monoksit

Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının ana nedeni oksijenin yetersiz olmasıdır. Yanma odasının tümü ele alındığında oksijen genel olarak yetersiz olabileceği gibi, karışımın tam homojen olmaması durumunda yanma odasının belirli bir konumunda yerel olarak da yetersiz olabilir. Temel olarak CO oluşumu hava fazlalık katsayısının (HFK) kuvvetli bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

Tablo 2.1 Taşıtlar Tarafından Üretilen Kirletici Bileşenler

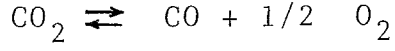
	HC ppm	CO %	NO <sub>x</sub> ppm	H <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> O %
Boşta çalışma	750	5.2	30	1.7	9.5	13.0
Ekonomi	300	0.8	1500	0.2	12.5	13.1
İvmelenme	400	5.2	3000	1.2	10.2	13.1
Hız kesme	4000	4.2	60	1.7	9.5	13.0

Yanma sırasında CO oluşumu su gazı dengesi olarak adlandırılan,

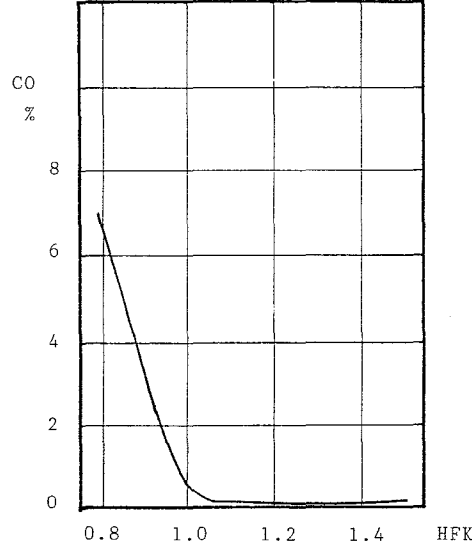


denklemini ile belirlenmektedir. Yüksek alev sıcaklıklarında bu denge reaksiyonundan CO<sub>2</sub> miktarına oranla daha fazla CO elde edilir. Ancak sıcaklık düştükçe CO'nun CO<sub>2</sub> şekline oksidasyonu söz konusudur. Bu bakımdan fakir veya stokiometrik karışımlarda egzoz gazları içerisindeki CO miktarı daha az olurken, zengin karışımlarda soğuk egzoz gazları içerisinde bile O<sub>2</sub> yetersizliği nedeniyle yüksek miktarda CO bulunmaktadır.

Yanma sırasında, alev cephesinin iç tarafında ulaşılan yüksek sıcaklık bölgesinde çok miktarda CO oluşmaktadır. Ancak gazların daha sonra genişlemesi ve soğuması sırasında, oksidasyon sonucu CO CO<sub>2</sub>'ye dönüşmektedir. Sıcaklıkların genişleme zamanında daha da düşmesi halinde, denge reaksiyonu sıcaklıktaki düşüşü takip edemediğinden egzoz gazları içerisindeki CO miktarı beklenilenden daha fazla olacaktır (Şekil 2.3).



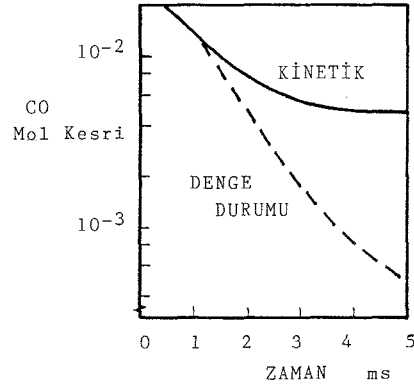
şeklilde tanımlanan bu denge reaksiyonu sıcaklığa bağlı olarak oluşmaktadır. Bu nedenle yanma odası sıcaklığının düşürülmesi CO emisyonunu azaltmaktadır.



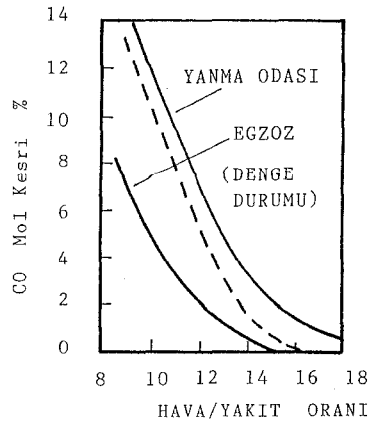
Şekil 2.2 CO emisyonunun hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

Hava-yakıt oranının CO emisyonu üzerindeki etkisi benzin motorlarında oldukça büyüktür. Şekil 2.4'de deney sonucunda egzozda ölçülen CO miktarının, maksimum sıcaklıktaki değerler ile egzozdaki düşük sıcaklıklarda denge durumundaki değerlerin arasında bir konumda bulunduğu görülmektedir. Bu durum CO'nun CO<sub>2</sub>'ye okside olmasını sağlayan reaksiyon hızlarının oldukça düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Dizel motorları ise genellikle fakir karışım oranları ile çalıştığından, CO emisyonu düşük olmaktadır. Yakıt demetinin



Şekil 2.3 Yanma sonrasında CO konsantrasyonunun zamana bağlı olarak değişimi.

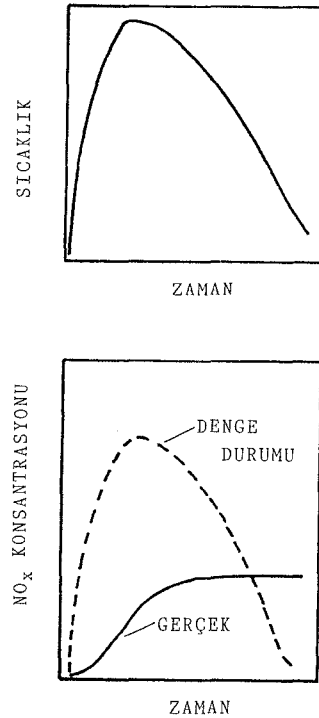


Şekil 2.4 CO emisyonunun yanma odasındaki ve egzoz sistemindeki değerlerinin hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

civarında, yanmanın gerçekleştiği bölgede karışım yerel olarak zengindir. Ancak genelde karışımın fakir olması, CO emisyonunun düşük düzeylerde kalmasını sağlamaktadır.

#### (b) Azot Oksitler

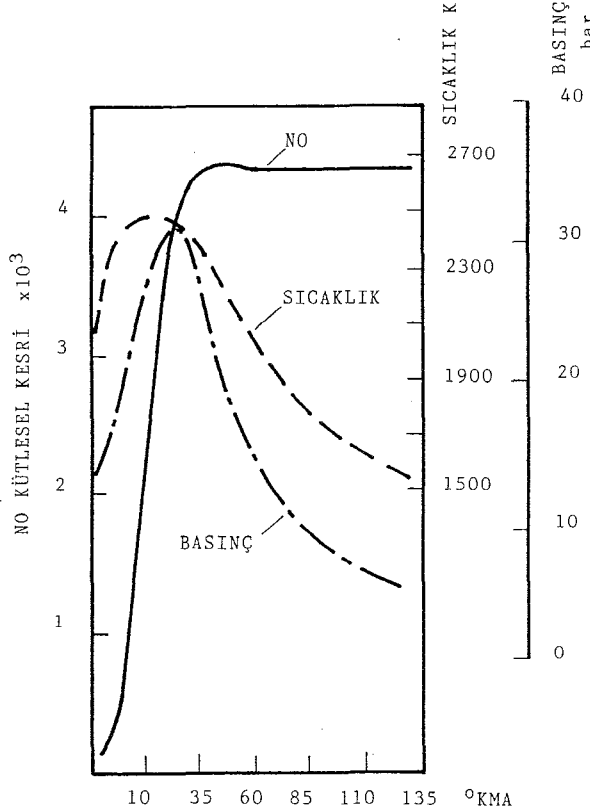
Yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda, havanın içerisindeki azotun oksijen ile birleşmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir.  $NO_x$  içerisinde ana eleman olarak genellikle NO bulunmaktadır. Egzoz gazlarının daha sonra atmosfere atılması sonucu oksijenle temasında NO'nun bir kısmı  $NO_2$  ve öteki  $NO_x$ 'lere dönüşmektedir. Bu bakımdan  $NO_x$  oluşumunu etkileyen iki önemli parametre yanma odası sıcaklığı ve hava/yakıt oranıdır. Ayrıca kimyasal reaksiyon hızları da etkili olmaktadır. Ancak bu hızlar da sıcaklığa bağlıdır.



Şekil 2.5 Yanma olayında sıcaklığın ve azot oksit konsantrasyonunun zamanla değişimi.

Kimyasal denge hesapları sonucu saptanan  $\text{NO}_x$  miktarı, motordaki yanma koşullarında elde edilen miktar ile uyuşmamaktadır, çünkü motor koşullarında yanma ürünlerinin kimyasal dengeye ulaşması için yeterli zaman bulunmamaktadır. Reaksiyon hızları sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle erişilen en yüksek sıcaklık değerinde  $\text{NO}_x$  için kimyasal denge sağlanamadan yanmış gazların sıcaklıkları düşüş gösterir.

Kimyasal denge durumundan diğer bir sapma da yanmış gazların soğuması sırasında gerçekleşir. Sıcaklığın düşmesi ile  $\text{NO}_x$ 'lerin tekrar  $\text{N}_2$  ve  $\text{O}_2$ 'ye ayrışması beklenirken, reaksiyon hızının düşük sıcaklıklarda çok düşük olması nedeniyle bu reaksiyonlar da yavaşlar. Böylece daha yüksek sıcaklıklarda elde edilmiş olan  $\text{NO}_x$  miktarları dondurulmuş olur (Şekil 2.5 ve 2.6). Başlangıçta,  $\text{NO}_x$  miktarı reaksiyon hızlarının denge durumundaki koşulları sağlayacak kadar fazla olmaması (reaksiyon hızının sonlu olması) nedeniyle denge durumuna göre düşük olmaktadır. Belli bir zaman

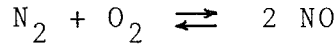


Şekil 2.6 Azot oksit konsantrasyonunun değişimi.

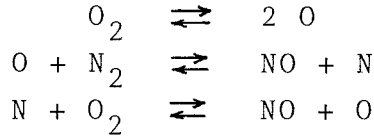
aralığından sonra ise, sıcaklıkların düşmesi sonucunda reaksiyonlar donar ve egzoz gazları içerisindeki miktar daha önce erişilen maksimum sıcaklık miktarına orantılı bir seviyede kalır. Çünkü azot oksitlerin oluşumu ayrıca reaksiyon hızına ve reaksiyonların tamamlanması için mevcut zamana bağlıdır.

NO<sub>x</sub> oluşumu aynı zamanda oksijen miktarına da bağlıdır. Bu nedenle zengin karışımlarda NO seviyesi düşmektedir. Maksimum değere ise %10 fakir karışımlarda ulaşılmaktadır. Karışımın hava miktarı daha da artırıldığı zaman yanma sıcaklıkları da düşeceği için NO miktarı da birlikte azalacaktır.

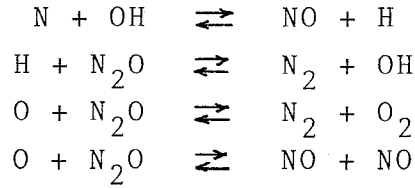
Azot oksit oluşumunu tanımlayan ana denklem,



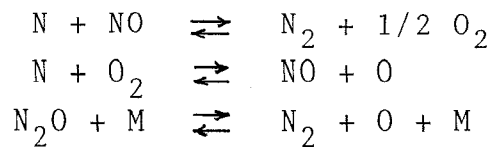
şeklinde Eyzat ve Guibet tarafından tanımlanmıştır. Ancak bu reaksiyon, olayı tam olarak tanımlamadığından Newhall ve Starkman tarafından NO oluşumu Zeldovich zincir reaksiyonları ile tanımlanmıştır :



Lavoie ise değiştirmiş Zeldovich reaksiyonlarını kullanmıştır :

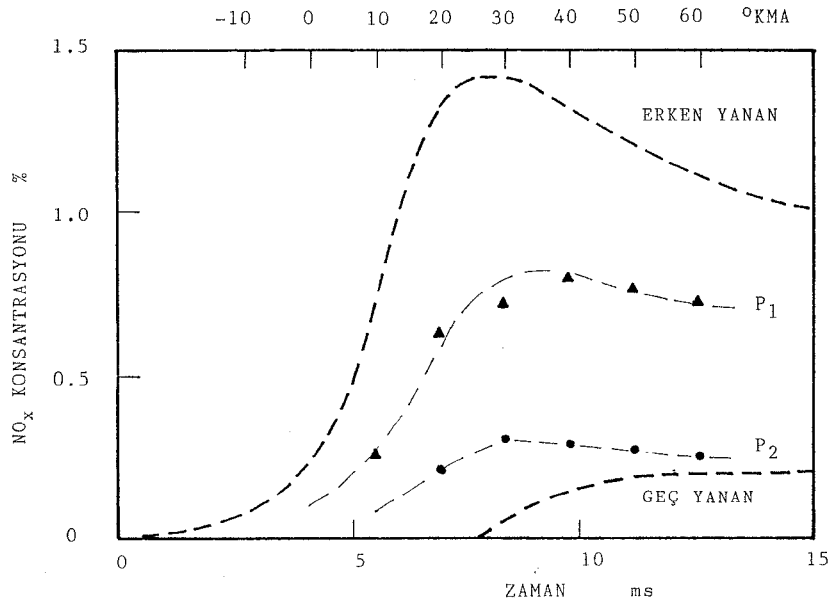


Annand da bu reaksiyonlara eklemeye bulunmuştur :



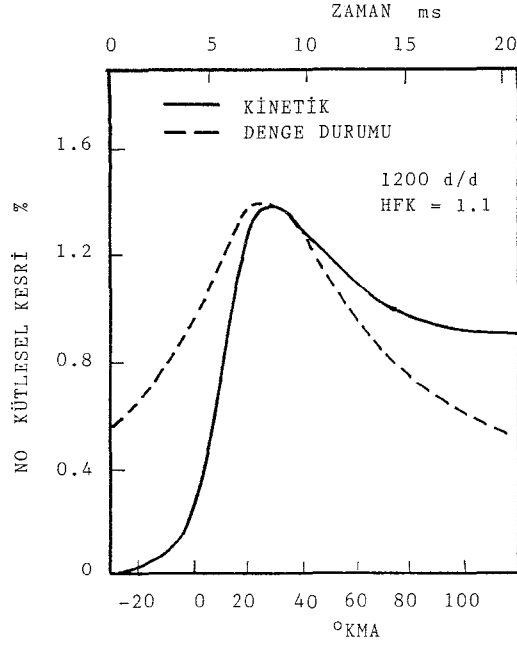


Benzin motorlarında NO oluşumu temel prensiplere uygun olarak gerçekleşmektedir. Alev cephesinin ilerlemesi ile yanan karışımın bulunduğu bölgede NO oluşumu da başlamaktadır. Yanma tamamlanıp, pistonun AÖN'ya doğru hareketi ile yanmış gazlar genişlemeye ve soğumaya başladığında ise NO oluşumu durmaktadır. Bujiye daha yakın bölgelerde yanma daha erken başladığından, NO oluşumu için tanınan zaman da daha fazla olmaktadır. Sonuç olarak bu bölgelerdeki NO miktarı daha fazla olmakta ve yanma odası içerisinde farklı NO konsantrasyonu meydana gelmektedir. Şekil 2.7'de bir CFR deney motorunda spektroskopik teknik ile açılan iki pencereden ölçülen NO konsantrasyonları görülmektedir. Burada  $P_1$  penceresi, bujiye  $P_2$  penceresinden daha yakın bir konumda bulunduğundan buradaki NO miktarı da daha fazladır. Ayrıca



Şekil 2.7 Yanma odasında farklı konumlardaki NO konsantrasyonlarının değişimi.

şekilde erken ve geç yanan karışımlar için konsantrasyonun zamana göre değişimi ve "donma" konumları gösterilmektedir. Hesap yolu ile elde edilen bu eğrilerde, reaksiyon hızının zaman içinde değişimi dikkate alınmıştır. Denge durumu kabul edildiğinde buradaki konsantrasyon eğrileri sıcaklıklarla birlikte düşüş gösterecektir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Azot oksit konsantrasyonunun zamana göre değişimi.

Dizel motorlarındaki heterojen yanmada, önceden hazırlanmış bir karışım bulunmamakta, yakıt ile havanın karışımı ve yanma olayları iç içe olarak gerçekleşmektedir. Bu durumda, NO oluşumunu belirleyen kimyasal reaksiyonlar değişmediği halde ortamın fiziksel şartları farklılık göstermektedir. Yakıt damlasının buharlaşması ve yanması sonucu damlacık etrafında oluşan alev bölgesinde yüksek sıcaklıklar mevcuttur. Damlacıktan uzaklaştıkça sıcaklık düşerken, oksijen (ve hava) konsantrasyonu artmaktadır. Bu nedenle benzin motorlarındaki homojen karışıma oranla burada daha karmaşık bir durum mevcuttur. Burada toplam NO oluşumu sıcaklığa ve damlacık etrafındaki akış alanını etkileyen birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2.9). Ayrıca dizel motorlarında karışım oranı (HFK) motorun yük durumuna göre değiştirildiğinden, artan yükte birlikte  $NO_x$  miktarı da artmaktadır. Ancak bu durum ön yanma odalı dizel motorlarında daha farklıdır (Şekil 2.10).

### (c) Hidrokarbonlar

Egzoz gazları içerisinde HC'lerin bulunuş nedeni, CO ve  $NO_x$ 'lerin aksine yüksek sıcaklıkların mevcudiyeti değildir. Yanma ürünleri

arasında HC'ların bulunmasına neden, sıcaklıkların veya oksijenin yetersiz olması gibi etkiler sonucunda yanmanın tamamlanamamasıdır. Bu durum,

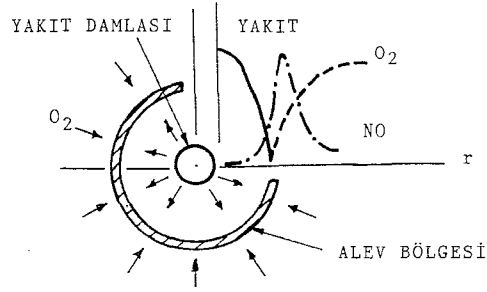
- yerel karışım oranının çok fakir veya çok zengin olması sonucu oksidasyon reaksiyonlarının yavaş oluşması ve alevin ısı kayıpları nedeniyle sönmesi,
- yanma odasının çeşitli bölümlerinde bulunan karışım için yüzey/hacim oranının büyük olması nedeniyle ısı kayıplarının buradaki karışımın tutuşmasını önleyecek kadar büyük olması,
- yanma odasının soğuk cidarlarına olan ısı kayıpları nedeniyle bu bölgeye ulaşan alevin anında sönmesi,

nedeniyle oluşmaktadır.

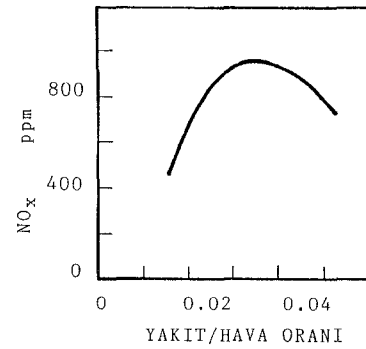
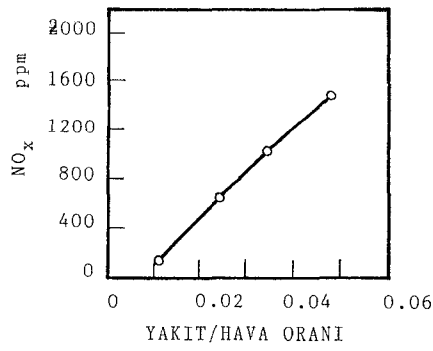
Ayrıca çok zengin ve çok fakir karışımlarda buji ile ateşleme işlemi de bazı durumlarda gerçekleşemediğinden, yanmamış HC'lar egzoz gazları ile birlikte atılmaktadır. Yağlama yağının yanma odası cidarlarında oluşturduğu ince filmin yanması sonucunda da HC oluşmaktadır. İki zamanlı motorlarda ise süpürme sırasında bir kısım yakıt daha yanmadan egzoz penceresinden veya supabından atılmaktadır.

Genelde, dört zamanlı taşıt motorlarında HC emisyonunun ana kaynağı cidarlardaki alev sönmesi sonucu oluşan HC'lardır. Motorda yanma olayının fotoğraflarının çekilmesi sonucu, cidarlara yakın, yaklaşık 0.008 - 0.038 cm'lik bir bölgede hiç yanma olmadığı görülmektedir (Şekil 2.11). "Alev sönme bölgesi" olarak adlandırılan bu soğuk cidar bölgesindeki ısı kayıpları, karışım sıcaklığının tutuşma sıcaklığının altına düşmesine neden olmakta ve ayrıca zincir reaksiyonları kırarak da yanma olayını engellemektedir. Alev sönme bölgesi kalınlığı karışım sıcaklığı, basınç, karışım oranı, cidar sıcaklığı, cidar malzemesi ve cidar üzerindeki birikimlerin etkisi ile değişmektedir.

Karışımın zengin veya fakir olması da HC emisyonunu etkilemektedir. HFK'nın 1.1 değeri civarında HC'lar minimumdan geçerek, bu değer her iki yanında da artış göstermektedir. HFK'nın büyük olması durumunda yanma odası sıcaklığı düşeceği için



Şekil 2.9 Yakıt damlası etrafında difüzyon alevi ve NO konsantrasyonu.

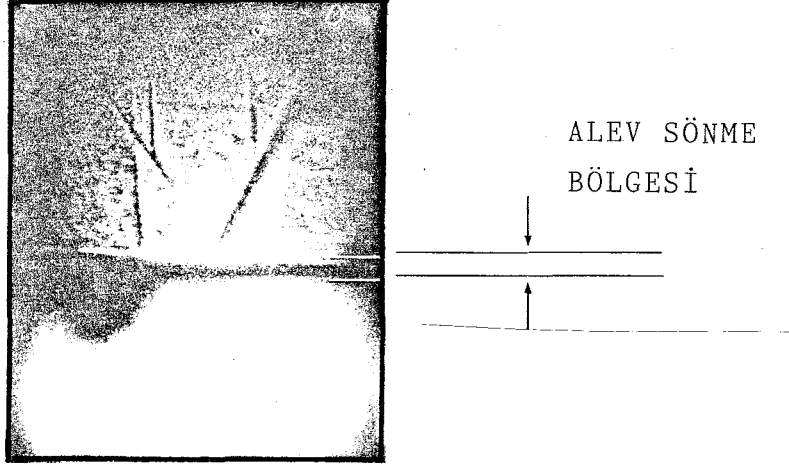


a) Direkt püskürtmeli dizel motoru.

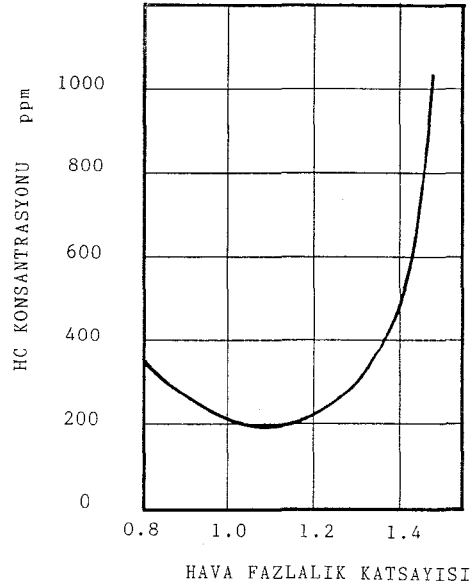
b) Bölünmüş yanma odalı dizel motoru.

Şekil 2.10 Direkt püskürtmeli ve ön yanma odalı dizel motorlarında NO<sub>x</sub> emisyonu.

tam yanma olmaz ve HC'lar artar. Karışımın zengin olması durumunda ise yeterli oksijen bulunmadığı için yakıtın tümü yanamaz ve tekrar HC'lar artış gösterir (Şekil 2.12).



Şekil 2.11 Yanma odasında alev sönme bölgesi.



Şekil 2.12 HC emisyonunun hava fazlalık katsayısına göre değişimi.

#### (d) Partiküller

Dizel motorlarında meydana gelen difüzyon alevinde, genel olarak hidrojenin karbona oranla oksijene karşı daha aktif olması nedeniyle yanmanın tamamlanması için zaman ve özellikle oksijen bulunmadığı durumlarda is oluşacaktır. İis bu durumda oluşan katı karbon tanecikleridir. Motorun yük durumuna göre değişen HFK'nın bir fonksiyonu olarak is miktarı değiştiğinden motorun gücünü de sınırlayan bir etkidir. Genelde is oluşumu dizel yanmasının bir safhasıdır. Bu nedenle başlangıçta oluşan karbonun büyük bir kısmı tekrar yanar. Ancak gücü artırmak amacıyla yanma odasına fazla miktarda yakıt gönderildiğinde, yeterli oksijen bulunmadığı için egzoz gazları içerisinde bir miktar is bulunacaktır.

İis oluşumu silindirin aşınmasına, segman yuvalarının karbonla dolarak zarar görmesine neden olmaktadır.

Aşırı zengin karışımla çalışma koşulları dışında benzin motorlarında is oluşmaz. Ancak yakıtın ve yağlama yağının yanması sonucu yanma odası cidarlarında karbon birikimleri oluşabilmektedir.

#### (e) Kükürt Dioksit

Yakıt içerisinde bulunan kükürt miktarına bağlı olarak, özellikle dizel motorlarında, yanma sonucu kükürtün hava ile birleşmesi ile SO<sub>2</sub> oluşmaktadır. Daha sonra egzoz gazları içindeki su buharı ile SO<sub>2</sub>'nin birleşmesi sonucunda da silindir içerisinde ve atmosfere atıldıktan sonra H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> oluşmaktadır. Oluşan sülfürik asit motor elemanlarının korozyonuna neden olmaktadır.

#### (f) Kurşun ve Kurşunlu Bileşenler

Benzin motorlarında yakıtın oktan sayısını artırmak için katkı maddesi olarak benzine eklenen kurşun tetraetil , Pb (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub> yanma sonucunda egzoz gazları içerisinde kurşun ve kurşun bromür gibi bileşenlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu bileşenler, egzoz sisteminde hava kirliliğini önlemek amacıyla bulunan katalitik reaktörlerin yüzeylerini kaplayarak tıkanıklığa neden olmakta ve etkilerini azaltmaktadır. Bu nedenle katalitik reaktörlerin

kullanıldığı taşıtlarda kurşunsuz benzin kullanılması zorunludur.

Ayrıca atmosfere atılan kurşun bileşenleri insan sağlığı açısından da zararlı olmaktadır.

#### KAYNAKLAR

1. Patterson, D.J. ve N.A. Henein, Emissions From Combustion Engines and Their Control, Ann Arbor Science Pub. Inc., Michigan, 1979.
2. Springer, G.S. ve D.J. Patterson, Engine Emissions - Pollutant Formation and Measurement, Plenum Press, New York, 1974.
3. Benson, R.S. ve N.D. Whitehouse, Internal Combustion Engines, Vol. 1, Pergamon Press, Oxford, 1979.
4. Crouse, W.H. ve D.L. Anglin, Automotive Emission Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1977.
5. Küper, P.F. ve D.O. Gruden, State of Development of a Simple Procedure to Control the Exhaust Emission of Vehicles in Use, Int. J. of Vehicle Design, Vol. 4, No. 1, 3, 1983.
6. Perkins, H.C., Air Pollution, McGraw-Hill Book Comp., New York, 1974.