

MOTORLARDA YANMA

3.1 Temel Tanımlar

Yanma olayı , oksijenle veya oksijen ihtiva eden hava gibi bir maddeyle bir yakıtın eksotermik reaksiyonunu gerektirir. Yanma olayı , genellikle , kimyasal bir olaydır. Yanma sırasında , madde ve enerjinin taşınması gibi , fiziksel olaylarda meydana gelir. Eksotermik reaksiyonda kimyasal enerji, ısı enerjisine dönüştükten sonra ; ısı enerjisi iletimi olur, kimyasal bileşenler dağılır ve genişleyen bir gaz akışı meydana gelir. Bu olayların birbirlerine etki etmesi , yanma olayına yol açar.

Yakıt ve oksitleyiciye (oksijen veya oksijen ihtiva eden bir madde), **reaktanlar** (reaksiyona giren maddeler) denir. Yanma olayı sonucunda ortaya çıkan maddelere, **ürünler** denir.

Yanabilir bir karışım, belirli bir basınca ve sıcaklığa kadar ısıtıldığı zaman, belirli bir süre sonra bu karışım alevlenebilir. Bu olayda ortaya çıkan enerji, çevreye kaybolan enerjiden çok daha fazladır. Eğer sıcaklık artarsa; hem reaksiyonun hızı artacak ve hemde açığa çıkan enerji debisi artacaktır. Bu olaya **kendi kendine tutuşma** denir.

Kendi kendine tutuşma olayı; kıvılcım, kızgın cıdarlar ve küçük alevler gibi dış kaynakların sebep olduğu tutuşma olayından farklıdır. Kendiliğinden tutuşmanın meydana geldiği sıcaklığa, **kendi kendine tutuşma sıcaklığı** denir.

Eğer yanabilir bir karışım, uzun bir tüpün içine doldurulup, bir ucundan reaksiyon başlatılırsa; yanma dalgası tüp boyunca ilerleyecektir. Yanma dalgasına **alev** denir. Fakat, genellikle, reaksiyon bölgesinin parlak olduğu yerdeki yanma dalgaları için, alev kelimesi kullanılır.

Eğer reaktan gazları, yanma başlamadan önce karıştırılırsa; böyle yanmaya **ön-karışimli yanma** denir. Kıvılcımla ateşlemeli motorlardaki yanma, böyledir. İki gaz akışı başlangıçta ayrı ise ve bu iki gaz akışı karşılaşınca , reaksiyon meydana geliyorsa ; böyle yanmaya, **difüzyon yanma** denir. Gaz türbinlerindeki ve dizel motorlarındaki yanma, difüzyon yanmadır.

3.2 Yanma Denklemleri

Yanma olayı , aşağıdaki basit yanma denklemleriyle ifade edilir;



Karbon ve oksijeni yakmak için gereken oksijen, havanın içindeki oksijenden sağlanır. Yanmada kullanılan havanın kompozisyonu aşağıdaki gibidir;

	Hacim(%)	Kütle(%)
Azot (N ₂)	78.09	75.3
Oksijen (O ₂)	20.95	23.14
Argon (Ar)	0.93	1.28
Karbon dioksit (CO ₂)	0.03	0.05

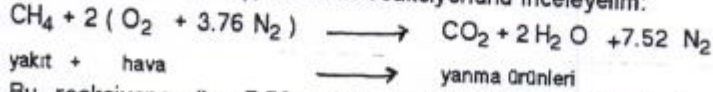
Fakat , pratik hesaplarda, havanın; oksijen ve azottan meydana gelen bir karışım olduğu düşünülür. Buna göre ,havadaki gazların yüzdeleri şöyle olur;

	Hacim(%)	Kütle(%)
Azot (N ₂)	79	76.7
Oksijen (O ₂)	21	23.3
N ₂ / O ₂ oranı	3.76	3.29

Bu yüzdelerle göre,havanın mol kütlesi yaklaşık 29' dur. $M_h = \sum (n_i / n) M_i$ bağıntısına göre ; $M_h = 0.79 \cdot 28 + 0.21 \cdot 32 = 28.84$ olur. ($n_i / n = V_i / V$)

Yukarıdaki orana göre, havanın içinde ; 1 mol O₂ ile birlikte , 3.76 mol N₂ bulunur.

Şimdi , Metan'ın (CH₄) hava ile reaksiyonunu inceleyelim:



Bu reaksiyona göre; 7.52 mol N₂ , 2 mol O₂ ile birlikte bulunur.O halde, bir mol CH₄ 'ün tam yanması için, 9.52 mol havaya ihtiyaç vardır.

Yakıtlardaki başlıca yanabilen iki element ; hidrojen ve karbondur.Bazı yakıtlarda, çok az miktarda bulunan kükürtte yanabilen bir elementtir.Petrol türevi olan sıvı yakıtlar, karbon oranı yüksek olan hidrokarbonlardan meydana gelen bir karışımdır.Pratik yanma hesaplarında, benzin ve dizel yakıtının (motorin) ; C₈H₁₇ şeklinde bir sıvı yakıt olduğu düşünülebilir.

Şimdi de metil alkolün hava ile yanmasını inceleyelim :



Buradaki n₁ , mol sayısıdır.

Karbon atomu eşitlenirse , n₂ = 1

Hidrojen atomu eşitlenirse , n₃ = 2

Oksijen atomu eşitlenirse, 1+ 2 n₁ =2 n₂ + n₃ ile 2 n₁ = 2 x 1+2 -1 ve n₁ =

1.5

Azot atomu eşitlenirse , n₄ = 3.76 n₁ ile n₄ = 1.5 x 3.76 = 5.64 bulunur.

O halde, tam yanma denklemi aşağıdaki gibi olur ;



Buradaki havanın miktarı, yakıtın tamamen yanması için gereken tam hava miktarıdır. Havanın bu miktarına , teorik hava miktarı veya stokiyometrik hava miktarı denir.

Yanmaya katılan havanın kütlesinin,yakıtın kütlesine oranına ; hava-yakıt oranı denir.Bu oran, (H / Y) ile gösterilir. Bu tanıma göre, hava-yakıt oranı ;

$$\frac{H}{Y} = \frac{\text{havanın kütlesi}}{\text{yakıtın kütlesi}} = \frac{m_h}{m_y} \text{ olur.}$$

Gerçek hava-yakıt oranının, stokiyometrik hava-yakıt oranına oranına; **hava fazlalık katsayısı** denir ve λ ile gösterilir. Bu tanıma göre;

$$\lambda = \frac{(H/Y)_{\text{ger}}}{(H/Y)_{\text{sto}}} = \frac{(m_h/m_y)_{\text{ger}}}{(m_h/m_y)_{\text{sto}}}$$

Yakıt-hava karışımlarında denklik (eşdeğerlik) oranı, $\phi = \frac{1}{\lambda}$ şeklinde tanımlanır.

$\phi = 1$ ise yakıt-hava karışımına, stokiyometrik karışım ;

$\phi < 1$ ise yakıt-hava karışımına, fakir karışım ;

$\phi > 1$ ise yakıt-hava karışımına, zengin karışım denir.

Örnek 3.1

Metil alkol (CH_3OH), hava ile yanarsa stokiyometrik (teorik)hava-yakıt oranı ne olur?

Çözümü : Kimyasal reaksiyon denklemi , şu şekildeydi ;



Bir kmol yakıtın (CH_3OH) kütlesi, $m_y = 1 \times 12 + 4 \times 1 + 1 \times 16 = 32 \text{ kg}$

Yanmaya katılan havanın kütlesi, $m_h = 1.5 \times (32 + 3.76 \times 28) = 205.92 \text{ kg}$

Hava yakıt oranı, $(\frac{H}{Y})_{\text{sto}} = (\frac{m_h}{m_y})_{\text{sto}} = (205.92 / 32) = 6.435$ olur. Buna göre, 1 kg

metil alkolün yanması için, 6.435 kg havaya ihtiyaç vardır.

Örnek 3.2

1 kg izo-oktan (C_8H_{18}), 18.81 kg hava ile yanmaktadır. Yanmayı, tam yanma kabul ederek;

a) Stokiyometrik hava-yakıt oranını b) gerçek hava-yakıt oranını

c) Hava fazlalık katsayısını ve denklik oranını hesaplayınız.

Çözümü :

a) Stokiyometrik karışım için, kimyasal reaksiyon denklemi yazılırsa;



Bir kmol yakıtın (C_8H_{18}) kütlesi, $m_y = 8 \times 12 + 18 \times 1 = 114 \text{ kg}$

Yanmaya katılan havanın kütlesi, $m_h = 12.5 \times (32 + 3.76 \times 28) = 1716 \text{ kg}$

Stokiyometrik hava yakıt oranı, $(\frac{H}{Y})_{\text{sto}} = (\frac{m_h}{m_y})_{\text{sto}} = (1716 / 114) = 15.05$ olur.

b) Gerçek hava-yakıt oranı $(\frac{H}{Y})_{\text{ger}} = (\frac{m_h}{m_y})_{\text{ger}} = (18.81 / 1) = 18.81$ olur.

c) Hava fazlalık katsayısı, $\lambda = \frac{(H/Y)_{\text{ger}}}{(H/Y)_{\text{sto}}} = \frac{18.81}{15.05} = 1.25$ olur. Yanmada %25 fazla

kullanılmaktadır. Yakıt-hava denklik oranı, $\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1.25} = 0.8 < 1$ olduğundan ; yakıt-hava

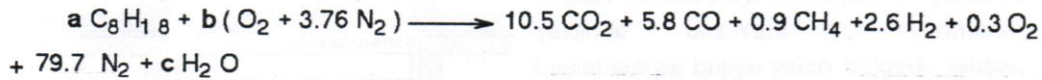
karışımı, fakir karışımdır.

Örnek 3) Bir kıvılcımla ateşlemeli motor, $C_8 H_{18}$ ' den meydana gelen benzinle çalışmaktadır. Su buharı hariç, eksoz gazlarının hacimsel analizi şöyledir; 22

	Hacim (%)
$C O_2$	10.5
$C O$	5.8
$C H_4$	0.9
H_2	2.6
O_2	0.3
N_2	79.7

Eksik yanmadan dolayı enerji kaybını, hava-yakıt oranını ve denklik oranını hesaplayınız.

Çözümü : Su buharı hariç , eksoz gazlarının 100^k mol olduğunu düşünelim. Buna göre ; reaksiyon denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

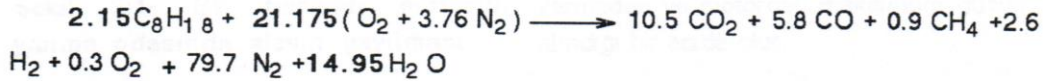


Karbon atomları eşitlenirse; $8 a = 10.5 + 5.8 + 0.9$ ile $a = 17.2 / 8 = 2.15$,

Hidrojen atomları eşitlenirse; $18 a = 3.6 + 5.2 + 2 c$ ile $c = (18 \times 2.15 - 8.8) / 2 = 14.95$

ve Oksijen atomları eşitlenirse; $2 b = 21 + 5.8 + 0.6 + c$ ile $b = (42.35 / 2) = 21.175$ olur.

O halde , reaksiyon denklemi şöyle olur;



2.15 kmol ($C_8 H_{18}$) yakıt için , eksik yanmadan dolayı toplam enerji kaybı ; $E_{kt} = \sum (E_k)_i = \sum (n_i \cdot M_i \cdot AID_i)$ ' dir.

$$(E_k)_{CO} = (5.8 \times 28 \times 10097) = 1639.75 \text{ MJ}$$

$$(E_k)_{CH_4} = (0.9 \times 16 \times 49980) = 719.71 \text{ MJ}$$

$$(E_k)_{H_2} = (2.6 \times 2 \times 119874) = 623.34 \text{ MJ}$$

bulunur. O halde , $E_{kt} = 1639.75 + 719.71 + 623.34 = 2982.8 \text{ kJ}$ olur.

$$\text{Enerji kayıp yüzdesi , } \frac{E_{kt}}{(n_y \cdot M_y \cdot AID_y)} = \frac{2982.8 \text{ MJ}}{(2.15 \times 114 \times 44397)} = \% 27.4 \text{ ' dir.}$$

$$\text{Gerçek hava-yakıt oranı , } \left(\frac{H}{Y} \right)_{ger} = \left(\frac{m_h}{m_y} \right)_{ger} = \frac{n_h M_h}{n_y M_y} = \frac{100.8}{2.15} \frac{29}{114} = 11.92 \text{ olur.}$$

Stokiyometrik hava-yakıt oranı , önceki örnekte , $\left(\frac{H}{Y} \right)_{sto} = 15.05$ bulunmuştu. O halde

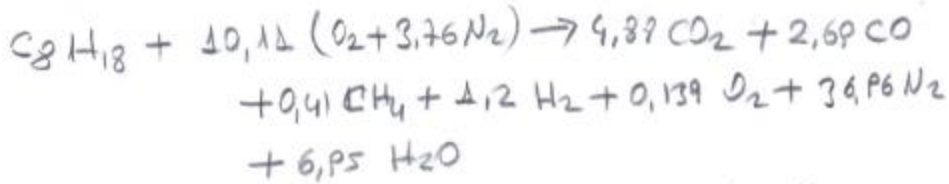
$$\text{denklik oranı , } \phi = \frac{(H/Y)_{sto}}{(H/Y)_{ger}} = \frac{15.05}{11.92} = 1.26 \text{ bulunur ve karışım zengindir.}$$

$$M_y = 8 \times 12 + 18 = 114$$

$$m_h = n_h \cdot n_h = 21.175 (2.16 + 3.76 \times 28) = 2906.9$$

Örnek 3 teki analizde yanma ürünlerin kütsel ve hacimsel oranlarını bulunuz.

— Yanma denklemini kolaylık olsun diye 2,15 bitersek denklemin



elde edilir.

Yanma ürünlerin kütsel oranı

$$K_{\text{O}_2} = \frac{4,89 \cdot 44}{4,89 \cdot 44 + 2,69 \cdot 28 + 0,41 \cdot 16 + 1,2 \cdot 2 + 0,139 \cdot 32 \\ + 36,96 \cdot 28 + 6,95 \cdot 18}$$

Toplam = 1464,512

$$K_{\text{O}_2} = \% 14,6727$$

$$K_{\text{CO}} = \% 5,1576$$

$$K_{\text{CH}_4} = \% 0,4573$$

$$K_{\text{H}_2} = \% 0,1651$$

$$K_{\text{O}_2} = \% 0,3048$$

$$K_{\text{N}_2} = \% 70,6958$$

$$K_{\text{H}_2\text{O}} = \% 8,5463$$

% 100

Yanma ürünlerin Toplam Mol sayısı = 53,27907

$$H_{\text{O}_2} = \% 9,1663$$

$$H_{\text{CO}} = \% 5,0632$$

$$H_{\text{CH}_4} = \% 0,7956$$

$$H_{\text{H}_2} = \% 2,2697$$

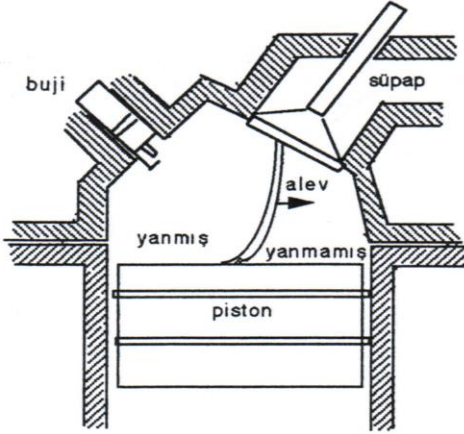
$$H_{\text{O}_2} = \% 0,2618$$

$$H_{\text{N}_2} = \% 69,4020$$

$$H_{\text{H}_2\text{O}} = \% 13,0510$$

$$H_{\text{CO}_2} = \frac{4,48}{53,27907} \times 100$$

3.3-Buji ile ateşlemeli (benzinli) motorlarda yanma



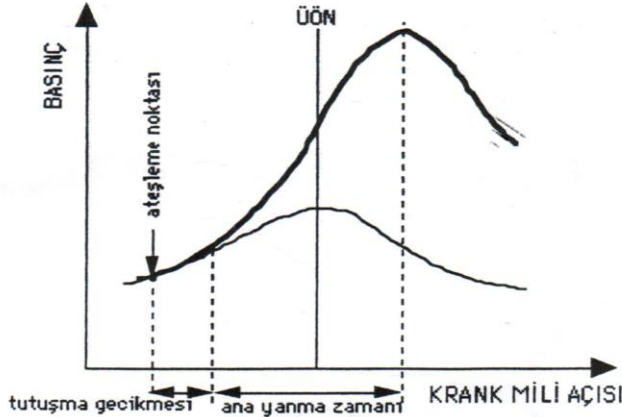
Şekil 3.1- Bir benzinli motorun yanma odasında alevin yayılması.

Benzinli motorlarda yanma olayı ; daha önce karbüratörde oranı ayarlanan ve emme strokunda silindire emilen yakıt-hava karışımının , sıkıştırma strokunun sonuna doğru bir buji ile ateşlenmesiyle başlar. Yanma olayı , ilerleyen bir patlama şeklinde olur. Yani ; yanmanın başlamasıyla bujiye yakın bölgede oluşan alev , yanma odası içinde yayılarak , yanma odasının içindeki karışımın tamamen yanmasını sağlar. Yakıt-hava karışımının ateşlenmesi, piston ÜÖN ' ya varmadan ve motordan maksimum gücün alındığı bir açıda olur.

Yanma odasında alevin yayılma hızı, 50-60 m/s' ye ulaşabilir. Ancak bu sayede, alev, 30° - 50°' lik krank mili dönme açısında bujiden, yanma odasının en uzak noktasına ulaşabilir.

3.3.1-Buji ile ateşlemeli (benzinli) motorlarda normal yanma

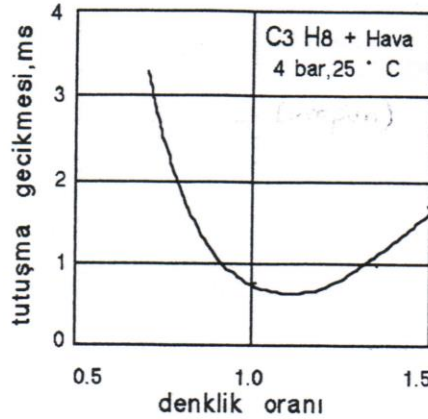
Kıvılcımla ateşlemeli motorlarda normal yanmayı , gerçek bir motorun basınç-krank mili açısı diyagramı (Şekil 3.2) yardımıyla inceleyeceğiz.



Şekil 3.2 Bir kıvılcımla ateşlemeli motorda , basınç-krank mili açısı diyagramı

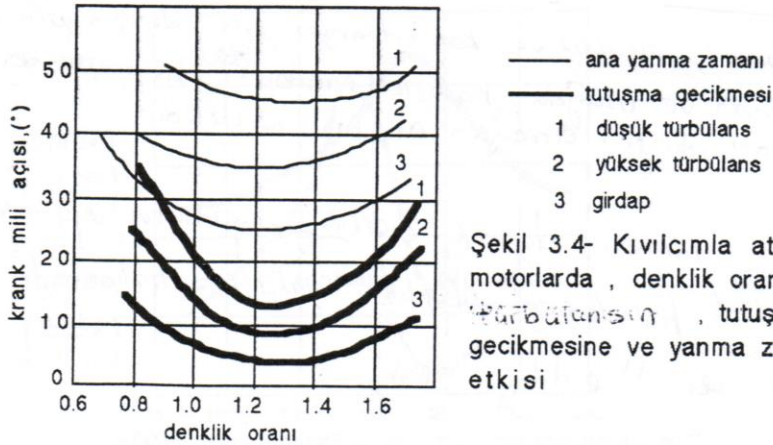
Bu diyagramdaki ince çizgiyle çizilen basınç -krank mili açısı diyagramı , motorda yanma olmadığı (motorun marş motoruyla tahrik edildiği) zamanki diyagramı gösterir.

Kalın çizgiyle çizilen diyagram ise ; normal yanmanın olduğu bir motordaki diyagramı gösterir. Bu diyagrama göre; buji ateşledikten sonra belirli bir krank mili açısında , yanmasız duruma göre bir basınç değişmesi olmaz. Bunun sebebi; bujiye yakın bölgede, yanma hızının normal yanma hızından oldukça küçük olması ve yanan karışım miktarının (% 1) çok az olmasıdır. Ateşleme anından, yanmasız duruma göre basıncın değişmeye başladığı an arasında geçen zamana , tutuşma gecikmesi denir. Bu gecikme, krank mili dönme açısına (°) bağlı olarak veya ms (mili saniye) olarak ifade edilir.



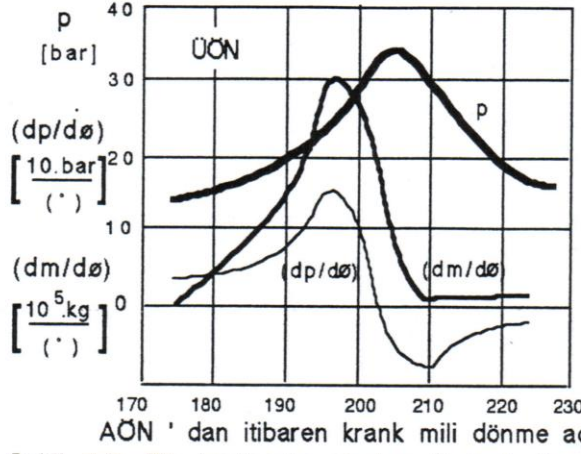
Şekil 3.3 - Denklik oranının tutuşma gecikmesine etkisi

Tutuşma gecikmesi, alev hızının maksimum olduğu denklik oranında minimum olur. Şekil 3.3 'de denklik oranının, tutuşma gecikmesine etkisi gösterilmiştir. Bu şekilde, tutuşma gecikmesinin minimum olduğu denklik oranı, 1' den biraz büyüktür. Karışım zenginleştikçe veya fakirleşikçe, tutuşma gecikmesi artmaktadır. Önceki çevrimden silindirde kalan yanmış (artık) gazların yüzdesi arttıkça, tutuşma gecikmesi artacaktır. Çünkü, karışımın içindeki yanmış gazların miktarı artması, karışımın fakirleşmesine sebep olur.



Şekil 3.4- Kıvılcımla ateşlemeli motorlarda, denklik oranı ve tutuşma gecikmesine ve yanma zamanına etkisi

Yanmasız duruma göre, basınçta yükselmenin meydana geldiği ana yanma zamanı ; tutuşma gecikmesi kadar denklik oranındaki değişmelere duyarlı değildir. Bu durum, Şekil 3.4 ' de gösterilmiştir. Ana yanma zamanı, büyük ölçüde, türbülans durumuna, yanma odasının boyutlarına (şekline) ve ^{buji'nin} yerine bağlıdır. Ana yanma zamanı, motordan maksimum güç ve verimi elde etmek için büyük öneme sahiptir. Ana yanma zamanı, ÜÖN'nin öncesine ve sonrasına, eşit olarak yayılmalıdır. Bu, ateşleme anı uygun bir şekilde ayarlanarak sağlanabilir. Ateşleme anından, ÜÖN' ya kadar olan krank mili dönme açısına, **ateşleme avansı** denir. Bu avans, derece (°) olarak belirtilir.



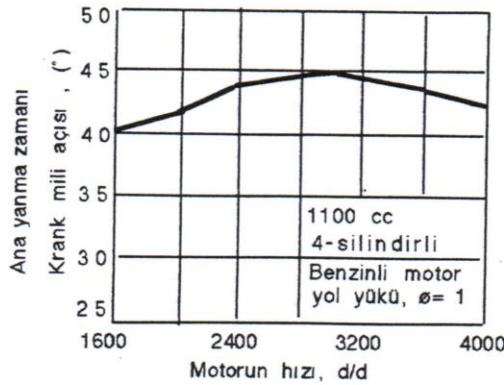
Şekil 3.5- Bir kıvılcımla ateşlemeli motorda; basınç, basınç artış hızı ve yanan yakıt debisi

Yanma hızını, dolayısıyla, ana yanma zamanında ortaya çıkan enerji debisini; basınç artış hızı ($dp/d\theta$) belirler. Bilhassa tam yüke yakın yüklerde, motorun düzgün çalışabilmesi için, silindirde üniform ve yeterli basınç artışı istenir. Yüksek sıkıştırma oranlı (8 - 10) motorların düzgün çalışabilmesi için, basınç artış hızı ($dp/d\theta$) = 1.5 - 2.0 [bar / (°)] arasında tutulmalıdır (sınırlandırılmalıdır). Basınç artış hızı, düşük sıkıştırma oranlı (7 - 8) motorlarda, 1.0 - 1.2 [bar / (°)] arasındadır.

Şekil 3.5' de, tek silindirli bir (araştırma) motorda krank mili dönme açısının (θ) fonksiyonu olarak; silindirdeki basınç (p), basınç artış hızı ($dp/d\theta$) ve yanan yakıtın kütle debisi ($dm/d\theta$) gösterilmiştir.

3.3.2 Yanma hızına çeşitli parametrelerin etkileri

1. Türbülans : Kıvılcımla ateşlemeli motorlarda motorun hızı değiştirildiği zaman ; ana yanma periyodundaki krank mili dönme açısı, hemen hemen sabit kalır. Bu durum, kıvılcımla ateşlemeli motorların en önemli özelliklerinden biridir ve Şekil 3.6' da gösterilmiştir. Fakat, krank mili açısı yaklaşık olarak aynı kalmasına rağmen ; motorun hızı arttıkça, yanma için gereken bu zaman azalır. Motorun hızıyla birlikte yanma hızının artmasının sebebi türbülansın artmasıdır. Türbülansın şiddeti (derecesi), motorun hızı arttıkça, önemli derecede artar.



Şekil 3.6 - Krank mili açısı cinsinden yanma zamanının motorun hızıyla değişmesi

Yanma odasının şeklide, türbülansın seviyesine etki eder. Çıkıntılı veya oyuk pistonlu yanma odaları türbülansı artırır. Bu çıkıntılar ve oyuklar; alev buralara ulaştığı zaman kuvvetli bir girdap meydana gelecek şekilde düzenlenir.

Türbülansın seviyesi, karışımın emme portundan yüksek hızla girmesi sağlanarak artırılabilir.

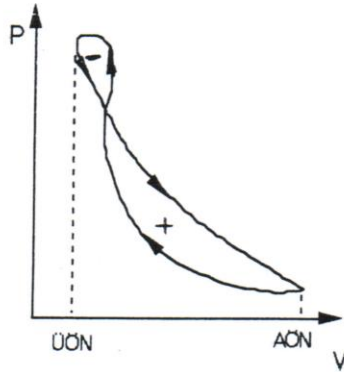
Denklik oranı : Yanma hızına denklik oranının etkisi, Şekil 3.4 ' de gösterilmiştir. Alevin yayılma hızı ; denklik oranı 1.1 - 1.2 arasında maksimumdur. Bu sahada , yanma zamanı minumdur. Aynı zamanda, bu sahada basınç artış hızı da , maksimumdur. Dolayısıyla, en büyük motor gücünü sağlayacak şekilde enerji , ortaya çıkacaktır.

Artık (yanmış) gazlar : Bir önceki çevrimde silindirde kalan artık gazlar, karışımı fakirleştirir ve denklik oranını küçültür. Artık gazların miktarı , motorun çalışma şartlarına bağlıdır. Gaz keleşinin açılması (gaz pedalına basılması) ile artan motor yükü, artık gazların miktarını azaltır. Eksoz manifoldu basıncının emme manifoldu basıncına oranı arttıkça ; karışım (dolgu) daki artık gazların miktarı artar. Daha büyük sıkıştırma oranı, karışımın basıncını attırdığı gibi, karışım daki artık gazların konsantrasyonunu azaltır.

3.3.3 - Erken Tutuşma ve Detanasyon

Erken Tutuşma : Erken tutuşma, buji ateşlemeden karışımın yanmaya başlamasıdır. Bu duruma, (700-800°) sıcaklığında çok sıcak kaynaklar sebep olur. Bu kaynaklar ; silindirdeki karbon birikintileri, aşırı ısınmış eksoz süapları, yanma odası içine çıkıntısı olan bozuk silindir kapağı contaları ve kızgın buji elektrotları olabilir.

Sıcak kaynaklar tarafından karışımın ateşlenmesiyle ortaya çıkan alevin yayılması, bujilerinkine çok benzerdir. Bu iki ateşleme arasındaki temel fark şudur : Erken tutuşma anı , rasgeledir ve kontrolsuzdur. Erken tutuşma olduğu zaman, motorun hızı ve gücü düşecektir. Bu durum , Şekil 3.7 ' de gösterilmiştir. Bu selute göre, silindirdeki basınç, piston üON' ya vermeden maksimum olmaktadır. Bu durum, silindirdeki elde edilen net pın azalmasına sebep olur.

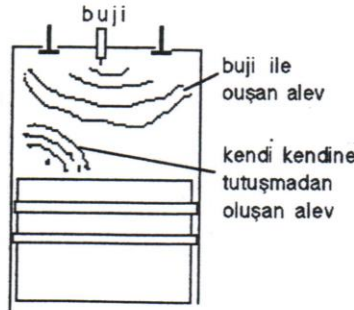


Şekil 3.7-Erken tutuşma olan bir benzinli motorda basınç-hacim diyagramı

Erken tutuşma, silindirdeki basıncın ve sıcaklığın aşırı derecede yükselmesine sebep olur. Aşırı ısınmadan dolayı, pistonlar hasara uğrayabilir. Erken tutuşma olunca, motorda şiddetli bir sarsıntı olur. Bu sarsıntı, erken tutuşmanın göstergesidir. Bazı durumlarda erken tutuşma, karışım silindire girerken meydana gelebilir ve geri tepmeye yol açabilir.

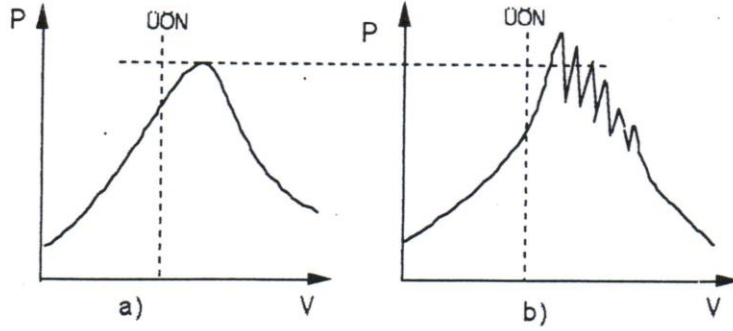
Bazende, buji ateşledikten sonra sıcak bir kaynak, yanmamış karışımın bulunduğu bir noktada ateşleme yapabilir. Bu durumda yanma hızı ve basınç aniden yükselir. Erken tutuşma ile aynı etkilere sahiptir. Bu olaya, **geç tutuşma** denir. Eğer erken tutuşmanın sayısı artarsa; motor, normal sesinden farklı ve gürültülü olarak çalışır.

Detenasyon : Detenasyon, yanmamış karışımın kendi kendine tutuşarak ani bir şekilde (şiddetli patlama) yanmasıdır. Bu olayda ortaya çıkan alev, yanmamış karışım göre ses üstü hızda yayılır.



Şekil 3.8 - Vuruntulu yanma

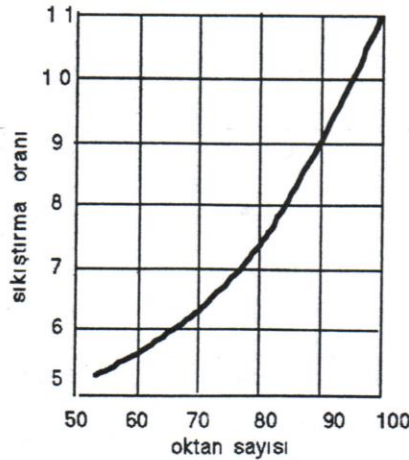
Benzinli motorlarda detenasyon olayı kendisini, vuruntulu (darbeli) yanma şeklinde gösterir. Şekil 3.8 görüldüğü gibi, bir silindirde detenasyon meydana geldiği zaman ; karışımın yanan kısmının genişlemesiyle , yanmamış karışım sıkıştırılır. Bu sıkıştırma sonucunda , yanmamış karışımın sıcaklığı ve basıncı kendi kendine tutuşacak noktaya yükselir. Bu olayda , ani ve yüksek basınç artışı yüzünden şiddetli basınç dalgaları meydana gelir. Bu basınç dalgaları , yanma odasının cidarına çarparak yansır. Bu esnada şiddetli sesler duyulur. Benzinli motorlarda normal ve vuruntulu yanmada basıncın değişmesi, Şekil 3.9 ' da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 - Benzinli motorlarda a) normal ve b) vuruntulu yanmada P-V diyagramı

Benzinli motorlarda vuruntu, motorun gücünü ve verimini düşürür. Silindir cidarlarından transfer edilen ısıнын aşırı bir şekilde artması, motorun gücünü düşürür. Şiddetli ve arka arkaya meydana gelen vuruntular, motorda mekanik hasara yol açar.

Vuruntu, büyük ölçüde yakıtın kompozisyonuna bağlıdır. Reaktivitesi (raksiyona girme kabiliyeti) yüksek olan yakıtlar, düşük olan yakıtlara göre vuruntuya daha meyillidir. Vuruntu için uygun bir kriter, yakıtın oktan sayısıdır. Oktan (C_8H_{18}), vuruntuya karşı direnci yüksek olan bir yakıttır. Yüksek sıkıştırma oranlı motorlarda, yüksek oktan sayılı yakıtların kullanılması gerekir. Sıkıştırma oranına göre, kullanılacak yakıtın oktan sayısı, Şekil 10'da gösterilmiştir.



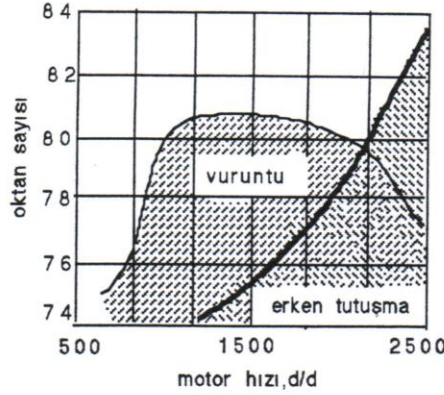
Şekil 3.10- Benzinli motorlarda müsaade edilebilir (vuruntunun sınırladığı) sıkıştırma oranı ile yakıtların oktan sayısı arasındaki bağıntı

Sıkıştırma oranının ve emme basıncının artması, yanmış gazların basıncının ve sıcaklığının artmasına sebep olur. Dolayısıyla, vuruntuya meyil artacaktır. Motora giren havanın sıcaklığının artması da aynı etkiyi gösterecektir.

Aslında, detenasyon ve erken tutuşmanın her ikisinde kendi kendine tutuşma olayıdır.

n-heptan (C_7H_{16}) (0)
n-oktan (C_8H_{18}) (100)

Kendi kendine tutuşma sonucu meydana gelen vuruntu, birinci derecede karışımın sıcaklığına ve basıncına bağlıdır. Bu yüzden, vuruntu, soğuk bir motorda da meydana gelebilir. Fakat, erken tutuşma çok sıcak bir kaynak gerektirir. Bu yüzden, erken tutuşma, motor sıcakken meydana gelir. Bir benzinli motor için erken tutuşma ve vuruntu sahaları, Şekil 11' de gösterilmiştir.



Şekil 11- Motorun vuruntulu ve erken tutuşmalı çalışma sahaları

3.4 Kompresyonlu Ateşlemeli Motorlarda Yanma

Dizel motorlarında (kompresyonlu ateşlemeli) yanma sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, kıvılcımla ateşlemeli motorlarınkine çok benzer olmasına rağmen; bu iki yanma olayındaki fiziksel safhalar tamamen farklıdır. Dizel motorlarında, önceki çevrimden kalan az miktardaki artık gazlarla karışmış olan hava, motorun tipine bağlı olarak sıkıştırma oranı 12 - 24 arasında olacak şekilde sıkıştırılır. Bundan sonra, piston ÜÖN' ya yakinken; sıvı yakıt, sprey şeklinde yanma odasının içine püskürtülür.

Yakıt damlacıkları, yanma odasındaki sıcak gazlardan ısı alır ve buharlaşır. Buharlaşan yakıt, havayla karışarak reaksiyona girer. Başlangıçta, buharlaşma hızı ve kimyasal reaksiyonlar yavaştır. Ancak, yakıt damlacıkları ısındıkça; buharlaşma hızı ve kimyasal reaksiyonlar artar.

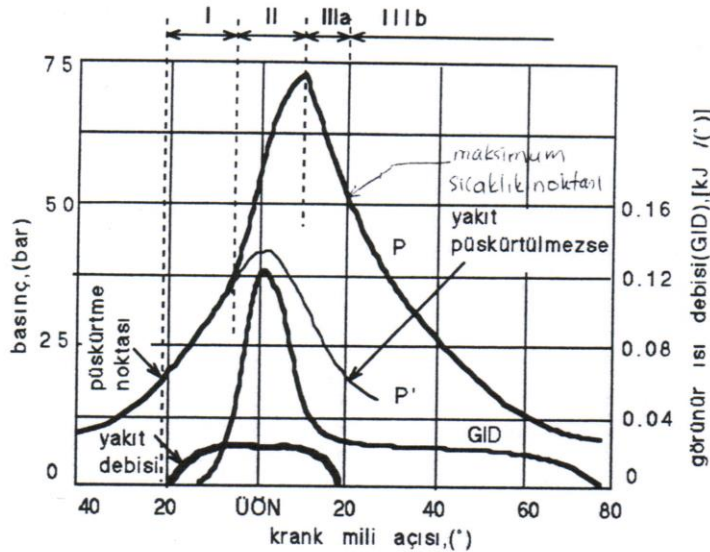
3.4.1 Yanmanın üç safhası

Tipik bir dizel motorunda, basınç-krank mili açısı diyagramı, Şekil 12- de gösterilmiştir. Bu diyagramda görüldüğü gibi yanma olayı, farklı üç safhaya ayrılabilir:

I. **Tutuşma gecikmesi** : Piston ÜÖN' ya varmadan, yakıtın püskürtülmesiyle başlar. Yakıtın püskürtülmeye başladığı nokta ile ÜÖN arasındaki krank mili dönme açısına püskürtme avansı denir. Bu safhada, püskürtülen yakıt ısıtarak buharlaşır ve hava ile karışır. Bu safhadaki basınç artışı, piston sıkıştırması yüzünden olur.

II. **Hızlı yanma** : Bu safhada, I. safhada hazırlanan yakıt, ani (patlamalı) bir şekilde yanar. Bu hızlı, $(dp/d\theta) = 2-5 \text{ bar/}^\circ$, yanmanın sebebi, yakıtın I. safhada buharlaşmış ve hava ile karışmış olmasıdır. Hızlı yanma safhasının süresi, tutuşma gecikmesiyle yaklaşıktır. Bu safhanın sonunda silindirin içindeki basınç, maksimum olur.

III. Yavaş yanma : Bu safhada , II. safhada yanmayan ve püskürtülmekte olan yakıt , önceki safhaya göre daha yavaş yanar. Yavaş yanma safhası, iki kısma ayrılabilir :



Şekil 12-Kompresyonla ateşlemeli(dizel) motorlarda yanma safhaları

III_a . Bu safhada yakıtın püskürtülmesi devam etmektedir. Dolayısıyla , bu safhadaki basınç diyagramı, direk olarak püskürtme karakteristiklerine bağlıdır. Bu safha sonunda silindirdaki sıcaklık , maksimum olur. Bu safha , hemen hemen püskürtmenin sonunda sona erer.

III_b . Bu safhaya , art yanma safhası denir. Yakıtın püskürtülmesi bitmesine rağmen, yanma devam eder. E kisik yanma ürünleri (CO gibi) ve yanmamış yakıtlar, bu safhada yanarlar.

+ Dizel motorlarında tutuşma gecikmesine sebep olan olaylar; fiziksel ve kimyasal olaylar olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Fiziksel olaylar şunlardır :

- 1- Püskürtülen yakıtın parçalanması ve damlacık teşekkülü
- 2- Sıvı yakıtın ısınması ve buharlaşması
- 3- Buharın, yanabilecek bir karışım oluşturacak şekilde havanın içine yayılması

Kimyasal olaylar ise şunlardır :

- 1- Zor buharlaşabilen (ağır) hidrokarbonların, kolay buharlaşabilen (hafif) hidrokarbonlara ayrılması

- 2- Ayrılmış hidrokarbonlar ile oksijen arasındaki kimyasal reaksiyonlar

Buna göre, toplam gecikme süresi ; fiziksel ve kimyasal gecikmelerden meydana gelir. Fiziksel gecikme; farkedilebilir gaz fazı reaksiyonlarının başlaması için, damlacığın yeteri kadar ısınması kadar geçen süredir.

Kimyasal gecikme ; fiziksel olayların sonundan, yakıt ile oksijen arasındaki kimyasal reaksiyon , sonucunda alevin oluşmasına kadar geçen süredir .

Tutuşma gecikmesi süresine etki eden faktörler ve etkileri, şunlardır :

1- Yakıtın kimyasal özellikleri; yani , yakıtın tutuşabilme kabiliyetini gösteren setan sayısı (Setan , $C_{16}H_{34}$ (setan sayısı=100) ; α -metil naftalin, $C_{10}H_7CH_3$ (s.s=0))

Kullanılan yakıtın setan sayısı artarsa, bu süre azalır. Dizel motorlarında setan sayısı, genellikle, 25 - 65 arasında değişir.

2- Yakıtın püskürtüldüğü anda, silindirdeki sıkıştırılmış havanın basıncı ve sıcaklığı. Bu iki değer, büyük ölçüde sıkıştırma oranına bağlıdır. Sıkıştırılmış havanın basıncı ve sıcaklığının artması, tutuşma gecikmesi süresini azaltır.

3- Damlacıkların çevresindeki hava-yakıt oranı.

Silindire giren ilk damlacığın çapı , ne kadar küçük olursa ; dahaiyi hava ile temas ederek buharlaşacak ve daha kısa sürede yanmaya başlayacaktır.

4- Silindirdeki havanın hızı ve türbülans derecesi arttıkça , tutuşma gecikmesi süresi kısılacaktır. Bu iki faktör, yanma odasının şekline ve motorun hızına bağlıdır.

Genellikle, tutuşma gecikmesi süresi uzun olan yakıtların kullanıldığı motorlarda , enjeksiyon sisteminde değişiklikler yaparak yanmayı hızlandırmak; tutuşma gecikmesi süresi kısa olan yakıt kullanarak yanmayı hızlandırmaya göre çok daha zordur. Çünkü , Yanma başladıktan sonra püskürtülen yakıtın bir kısmı , derhal buharlaşır ve enjeksiyon sistemindeki değişiklikler, bundan sonra yanma süresini belirler.

3.4.2 Dizel Motorlarında Detanasyon ve Gürültü

Dizel ve benzinli motorlarda detanasyon (vuruntu), aynı temel özelliğe sahiptir. Yakıtın kendi kendine tutuşmasından sonra, ani bir basınç artışı meydana gelir. Benzinli motorlarda vuruntuya yol açan reaksiyonlar, yanmanın sonuna doğru (karışımın son kısmında) meydana gelir. Halbuki dizel motorlarında vuruntu, yanmanın başında (karışımın ilk kısmında ve bazende tamamında) meydana gelir. Dizel motorlarında , sıkıştırılmış havanın içine yakıtın püskürtülmesinden dolayı, yakıt ile hava tam homojen bir şekilde karışmaz. Bu sebeple, normal şartlarda dizel motorlarındaki basınç artış hızı, benzinli motorlarda vuruntuya yol açan basınç artış hızından daha küçüktür.

Tutuşma gecikmesi açısı, püskürtme avansı açısına eşit veya daha büyük olduğu zaman ; yakıt damlacıkları buharlaşmak ve hava ile iyi bir şekilde karışmak için yeterli zamanı bulacaktır. Sonra , yakıtın hemen hemen tamamı, benzinli motorlarınkine yakın bir hızda yanacaktır. Başka bir deyişle, yakıtın tamamı çok kısa bir sürede patlamalı olarak yanacaktır. Bu patlamalı (hızlı) yanma safhasındaki basınç artış hızı, yeteri kadar yüksekse ; normal çalışma şartlarındaki gibi duyulabilir bir gürültü (ses) ortaya çıkaracaktır. Gürültü aşırı olduğu zaman , motorun vuruntulu çalıştığı anlaşılır. Patlamalı (hızlı) yanma safhasında yanan yakıtın yüzdesi arttıkça ; basınç artış hızı ve dolayısıyla gürültünün seviyesi artar.

Bu açıklamalara göre; tutuşma gecikmesi süresinin artması , vuruntu ihtimalini artırır. Diğer bütün şartlar aynı kalırken, tutuşma gecikmesi süresinin azalması ; yanma sırasında ^{basıncı} daha düzgün bir değişme sağlayacaktır. Tutuşma gecikmesi süresinin belirli bir seviyenin altına inmesi , eksik yanmaya yol açabilir. Çünkü bu durumda yakıt, hava ile iyi bir şekilde karışmamış olacak ve yakıtın çoğu , yanma ürünlerinin içine püskürtülecektir. Böyle bir karışım, vuruntuyu önlemesine rağmen, eksik yanmadan dolayı motorun performansını düşürecekler.

Dizel motorlarında kullanılan yakıtın (motorin) setan sayısı küçüldükçe, tutuşma gecikmesi süresi artar. Dolayısıyla , motorun gürültüsünde artar.

TABLO 1. HİDROKARBONLARIN ISIL DEĞERLERİ (25°C, 1 Atm)

Bileşik	Formül	M	faz	Üst Isıl Değer (kJ/kg)	Alt Isıl Değer (kJ/kg)
Hydrogen	H ₂	2.02	Gaz	141 693	119 874
Carbon	C	12.01	Katı (Grafit)		32 744
Carbon monoxide	CO	28.01	Gaz		10 097
Methane	CH ₄	16.04	Gaz	55 464	49 980
Ethane	C ₂ H ₆	30.07	Gaz	51 844	47 456
Propane	C ₃ H ₈	44.10	Gaz	50 315	46 324
Propane	C ₃ H ₈	44.10	Sıvı	49 952	45 964
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.12	Gaz	49 471	45 687
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.12	Sıvı	49 102	45 317
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72.15	Gaz	48 981	45 324
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72.15	Sıvı	48 613	44 955
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.18	Gaz	48 646	45 073
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.18	Sıvı	48 281	44 706
n-Heptane	C ₇ H ₁₆	100.21	Gaz	48 407	44 894
n-Heptane	C ₇ H ₁₆	100.21	Sıvı	48 042	44 529
n-Octane	C ₈ H ₁₈	114.23	Gaz	48 225	44 760
n-Octane	C ₈ H ₁₈	114.23	Sıvı	47 863	44 397
2,2,4-Trimethylpentane	C ₈ H ₁₈	114.23	Gaz	48 088	44 622
2,2,4-Trimethylpentane	C ₈ H ₁₈	114.23	Sıvı	47 781	44 316
n-Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.29	Gaz	47 972	44 571
n-Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.29	Sıvı	47 612	44 211
n-Dodecane	C ₁₂ H ₂₆	170.34	Gaz	47 800	44 443
n-Dodecane	C ₁₂ H ₂₆	170.34	Sıvı	47 442	44 085
Ethene (ethylene)	C ₂ H ₄	28.05	Gaz	50 266	47 130
Propene (propylene)	C ₃ H ₆	42.08	Gaz	48 888	45 752
Ethyne (acetylene)	C ₂ H ₂	26.04	Gaz	49 883	48 195
Benzene	C ₆ H ₆	78.12	Gaz	42 240	40 552
Benzene	C ₆ H ₆	78.12	Sıvı	41 807	40 118
Methanol	CH ₃ OH	32.04	Gaz	23 867	21 122
Methanol	CH ₃ OH	32.04	Sıvı	22 698	19 953
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	46.07	Gaz	30 626	27 762
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	46.07	Sıvı	29 706	26 842
Propanol	C ₃ H ₇ OH	60.10	Gaz	34 360	31 431
Propanol	C ₃ H ₇ OH	60.10	Sıvı	33 588	30 659
Butanol	C ₄ H ₉ OH	74.12	Gaz	36 580	33 612
Butanol	C ₄ H ₉ OH	74.12	Sıvı	35 913	32 945