



Dört Silindirli İçten Yanmalı Bir Motorun Düşey Titreşimine Sebep Olan Kuvvetlerin Analizi

Analysis of the Forces Causing Vertical Vibration of a Four-Cylinder Internal Combustion Engine

Fatih Celtek*¹, Hakan Arslan¹

¹Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 71451 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru / Received: 01/07/2019

Kabul / Accepted: 27/10/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/11/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Motor bloğunda, motorun çalışması esnasında üç eksen de titreşimler oluşmaktadır. En yüksek titreşim genlikleri, pistonun hareketinden dolayı düşey eksen de ölçülmektedir. Bu çalışmada, 4 silindirli benzinli bir motorun düşey eksen de titreşimine sebep olan kuvvetler incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle; piston, krank ve biyel için kütle indirgemeleri yapılmıştır. Pistonun ve krank milinin; konum, hız ve ivmeleri krank açısının fonksiyonu olacak şekilde tanımlanmışlardır. Elde edilen bu verilerle sistem üzerinde oluşan atalet ve sürtünme kuvvetleri belirlenmiştir. Piston, krank ve biyel için ayrı ayrı serbest cisim diyagramları çizilmiş ve dinamik kuvvet analizleri yapılmıştır. Analiz sonucu belirlenen kuvvetlerin, motor bloğu titreşimine etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Dört Silindirli Motor, Dinamik Kuvvet Analizi, Motor Titreşimleri”

Abstract

On the engine block, vibrations occur in three axes during the operation. The highest vibration amplitude is measured in the vertical axis because of the motion of the piston. In this study, forces causing vibration in the vertical axis of the four-cylinder gasoline engine were investigated. For this purpose, firstly mass reduction has been done for piston, crankshaft and connection rod. Position, velocity and acceleration of piston and piston rod have been defined as the function of the angle of the crankshaft. By the obtained these data, inertia and friction forces that occur on the system has been determined. For the piston, crankshaft and connecting rod, free body diagrams were drawn respectively and dynamic forces analysis were carried out. The determined forces as a result of the analysis were investigated for the effects on engine block vibrations.

Key Words

“Four-Cylinder Engine, Dynamic Force Analysis, Engine Vibrations”

1. Giriş

Teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler ve otomotiv sektöründe artan yüksek verimlilik, performans ve konfor isteği; özellikle de motor konusu üzerinde birçok araştırmaya ve tasarıma zemin hazırlamıştır. Bu araştırma konularından en önemlilerinden biri de motorun çalışması esnasında şasi üzerinde oluşturacağı titreşimin ve kaynaklarının incelenmesi ve azaltılması çalışmalarıdır. Motor titreşimi iki temel sebepten dolayı incelenmesi gereken bir konudur. İlki, motor bloğu üzerinde oluşan titreşimin tüm araç üzerine iletilmesiyle, mekanik olarak araçta oluşturabileceği olumsuzluklardır. İkincisi ise, yolcu konforudur.

Motorunda oluşan titreşimin kaynağı, silindir içerisindeki yanma işlemi ve bu işlem sonucunda piston – krank ve biyel mekanizması üzerinde oluşan kuvvetler ve momentlerdir. Yanma sonrasında oluşan ısı enerjisi, silindir içerisindeki gazların sıcaklık ve basıncını artırmakta ve bu gaz basıncı, silindir yüzeyinde gaz kuvveti olarak etki etmektedir. Gaz kuvveti, piston hareketinin ana kaynağı olan kuvvettir. Bu sebeple, içten yanmalı motorlarda, motor yükü ve yanma frekansı ile bağlantılı olarak, en güçlü titreşim sinyallerinin ateşleme sırasında oluşan yüksek basınçtan kaynaklandığı ve silindirler üzerinden ölçülebildiği tespit edilmiştir (Barelli, Bidini, Buratti, & Mariani, 2009; Erkaya, Su, & Uzmay, 2007; Manieniyan & Sivaprakasam, 2013; Pulkrabek, 2001). Ayrıca pistonun hareketi esnasında, piston yüzeyine silindir içerisinden bir sürtünme kuvveti de etki eder. Bu kuvvet, motorun ilk hareketi esnasında yüzeyler arasında değme basıncı ile orantılı olarak kuru sürtünmedir. Daha sonraki hareketlerde yağlama yağının da etkisiyle sürtünme kuvveti hidrodinamik sürtünme kuvveti halini alır (Guzzomi, Hesterman, & Stone, 2007). Pistona etkiyen hidrodinamik sürtünme kuvveti, piston hızının bir fonksiyonu olarak belirlendiği için, bu kuvveti incelerken aynı zamanda piston hızının yönü de belirlenmelidir.

Piston sürekli doğrusal hareket yaparken, krank mili dairesel ve biyel kolu genel düzlemsel hareket yapmaktadır. Bu sebeple krank-biyel-piston üçlüsü ve dolayısıyla tüm sistem üzerine, değişken atalet kuvvetleri / momentleri ve merkezci kuvvetler etki etmektedir. Bu kuvvetler ve gaz kuvvetlerinin bileşkesi olarak, krank mili yataklarında oluşan yatak kuvvetleri blok titreşiminde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca krank-biyel mekanizmasına etki eden kuvvetler ve bunların momentleri krank açısına bağlı sürekli değişim gösterirler. Kuvvetler ve momentler dengelenmedikleri sürece, motor gövdesinde titreşime ve motorun devrilmesine neden olabilirler. Titreşim, bağlantı noktalarından motorun bloğunu taşıyan aksama geçerken aynı zamanda enerji kaybına ve gürültü oluşumuna da neden olur (Çetinkaya, 1999; Uicker, Pennock, & Shigley, 2003).

Motorun alt kısmında, motor kaynaklı titreşimleri sönmek ve şasiye aktarımını en aza indirmek amacıyla motor takozları veya motor kulağı olarak isimlendirilen parçalar yer almaktadır. Geneli kauçuk esaslı takozlar olmakla birlikte hidrolik elemanlar da kullanılmaktadır. Bu elemanlar taşıtın geneli üzerinde, malzeme yorulması ile bazı parçaların hasarı, vidalı bağlantıların gevşemesi ve diğer mekanik ve elektronik aksamaların bozulmasının önüne geçilmesi açısından gereklidir. Ayrıca yolcu ve sürücü konforu sağlanması bakımından önemlidir (Karabulut, Öztürk, & Çınar, 2011). Takozlar, motor bloğunun her iki yanında yay ve sönmü kuvveti oluşturarak sisteme etki ederler. Düşey eksen ve krank eksenini etrafında oluşan burulma titreşimlerinin hareket denklemlerinin belirlenmesinde gereklidirler.

Bunların yanı sıra krank milinin balanssızlığından da kaynaklı kuvvetler düşey ve yatay eksenlerde titreşime sebep olabilirler. Uygun balans ağırlıkları kullanılması ve bu ağırlıkların krank ekseninden ideal uzaklıkta olması düşey eksen üzerinde oluşan titreşimi azaltabilir. Fakat bu hususla birlikte yatay eksen üzerinde oluşabilecek titreşimin de dikkate alınması gerekmektedir (Öztürk & Karabulut, 2012).

Motorlarda piston, krank ve biyel kütlelerinin dinamik olarak eşdeğer kütlelerle değiştirilmesi dinamik kuvvet analizi yapılırken büyük kolaylık sağlayacaktır. Piston kütlesi, piston üzerinde yer alan segmanların kütlesi ve biyel ile piston arasındaki bağlantı elemanlarının toplam kütlesi; piston pimi üzerinde yer alan noktasal bir kütle indirgenebilir. Genel düzlemsel hareket yapan biyel kütlesinin, karmaşık ve göreceli olarak daha zor dinamik analizini basitleştirmek adına, yaklaşık üçte ikisi krank pimi üzerine geriye kalan üçte birlik kısmı ise piston pimi üzerine paylaştırılmalıdır. (Söylemez, 2017; Uicker et al., 2003). Böylelikle, biyel krank üzerine dağıtılan kütlesi sadece dairesel, piston üzerine dağıtılan kütlesi ise sadece öteleme hareketi yapacaktır. Dinamik eşdeğerliliği sağlamak için toplam kütle, ağırlık merkezinin konumu ve toplam eylemsizlik momentinin değişmemesi gerekir (Metallidis & Natsiavas, 2003; Pasricha & Hashim, 2006; Zweiri, Whidborne, & Seneviratne, 2001). Krank mili ise, statik ve dinamik olarak dengede olması için biyel koluna ters yönde bulunan denge ağırlıkları ile üretilir. Böylece krank milinin ağırlık merkezi, ana yatak muylusu üzerinden geçen eksen üzerinde yer almaktadır.

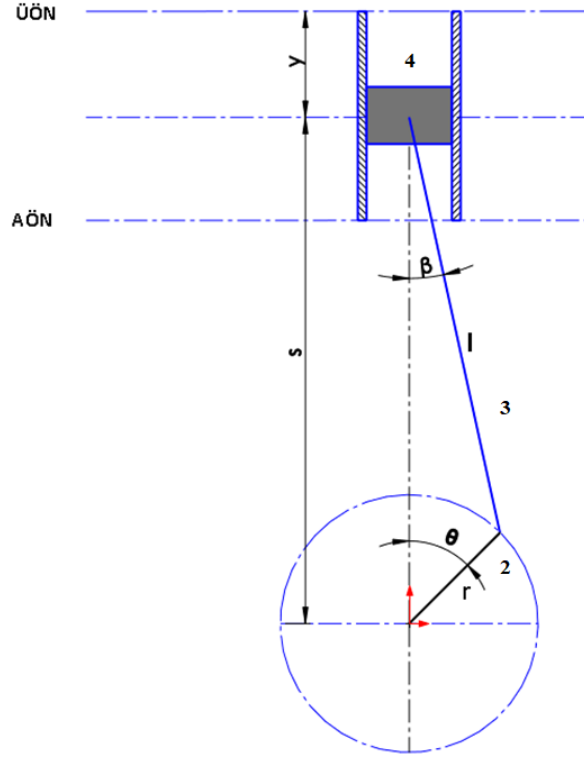
Bu çalışmada dört silindireli içten yanmalı motorlarda, düşey eksen üzerinde oluşabilecek titreşimlerin kaynağı olan kuvvetler incelenmiştir. Öncelikle motorun en önemli elemanlarından olan pistonun kinematik analizi yapılmış ve krank açısının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Ardından piston, krank ve biyel üzerine etki eden tüm kuvvetler ve bu kuvvetlerin yön değişimleri irdelenmiş, D’Alembert prensibine göre vektörel olarak ortaya konmuştur. Motor bloğuna etki eden gaz basıncı kuvvetleri ve yatak kuvvetleri ve motor takozundan kaynaklanan yay ve sönmü kuvvetleri de belirlenerek, blok üzerine etki eden tüm kuvvetler tespit edilmiştir. Düşey eksen üzerinde oluşan titreşimin, hangi krank açısı aralıklarında incelenmesi gerektiği belirlenmiştir.

2. Dinamik Kuvvet Analizi

2.1. Pistonun ve Krank Milinin Pozisyonlarının Belirlenmesi

Motorun her bir çevriminde etki eden tüm kuvvetler, yön ve büyüklük bakımından sürekli değişmektedirler. Bu nedenle, bütün kuvvetlerin ve yer değiştirme ifadelerinin krank açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmeleri büyük avantaj sağlayacaktır.

Sistem üzerindeki kuvvetlerin analizinden önce, krank milinin ve pistonun konumlarının belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada tüm hareket ve kuvvet ifadeleri krank milinin θ açısının fonksiyonu olarak ifade edileceğinden dolayı, aşağıda elde edilen eşitliklerde ana değişken θ olacaktır. β açısı, biyelin düşey eksenle yaptığı açığı temsil etmektedir. Tüm gösterimlerde ve işlemlerde motora ait elemanlardan; 1 no'lu uzuv motor bloğunu, 2 no'lu uzuv krank milini, 3 no'lu uzuv biyel kolunu, 4 no'lu uzuv pistonu ifade etmektedir. Krank milinin saat yönünde döndüğü ve piston hareketinin başlangıç noktası, üst ölü nokta olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1. Pistonun ve Krank Milinin Pozisyonları

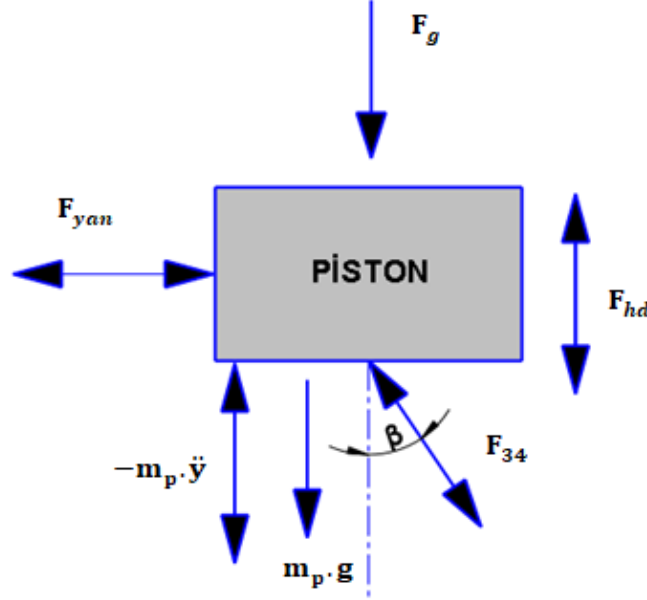
Şekil-1'e göre, geometrik ve trigonometrik eşitlikler kullanılarak pistonun ÜÖN'ya göre herhangi bir andaki konumu; krank milinin düşey eksenle yaptığı açının bir fonksiyonu olarak eşitlik 1'de belirlenmiştir.

$$y = l + r - \sqrt{l^2 - r^2} \cdot \sin^2 \theta - r \cdot \cos \theta \quad (1)$$

2.2. Piston Üzerine Etki Eden Kuvvetler ve Kütle İndirgenmesi

Pistonun ağırlık merkezi, biyel-piston bağlantısının gerçekleştiği nokta olarak işlemlerde kabul edilmiştir. Ayrıca, piston kütesinin değeri; pistonun gerçek kütesi, biyel ile piston arasındaki bağlantı elemanlarının toplam kütesi m_p , piston üzerindeki segmanların kütesi ve biyelın pistona indirgenen kütesinin toplamını ifade etmektedir. Piston kütesi belirlendikten sonra, pistona etkiyen kuvvetler incelenebilir.

Piston üzerine düşey eksende; gaz kuvveti, hidrodinamik sürtünme kuvveti, biyel kolunun piston üzerine uyguladığı kuvvet, atalet kuvveti ve ağırlık kuvveti etki etmektedir. Piston üzerine etki eden F_{34} , F_{hd} , F_{yan} , $-m_p \cdot \ddot{y}$ kuvvetlerinin yönleri ve büyüklükleri sürekli değiştiğinden, kuvvet vektörleri çift yönlü oklar ile Şekil-2'de gösterilmiş ve D'alembert ilkesine göre, toplam kuvvet eşitliği vektörel toplam şeklinde yazılmıştır.



Şekil 2. Piston Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Düşey ekseninde toplam kuvvet eşitliği ifadesi yazıldığında;

$$\Sigma \vec{F}_y = 0 \Rightarrow \vec{F}_g - \overline{m_p \cdot \ddot{y}} + \vec{F}_{hd} + \vec{F}_{34} \cdot \cos\beta + \overline{m_p \cdot g} = 0 \quad (2)$$

2 denkleminde bulunan \vec{F}_g kuvveti, silindir içerisindeki gazların basıncından kaynaklanan kuvvetlerin genel ifadesidir. Silindirdeki gaz basınçları, tüm yüzeylerde etkin olduğundan, hem piston üzerine hem de motor bloğu üzerine gaz kuvveti tesir etmektedir. Bu kuvvet, pistonun hareketine sebep olduğu gibi, blok üzerinde de titreşime sebebiyet vermektedir. Silindir içerisinde her bir strok için farklı basınç seviyelerine ulaşıldığından, gaz kuvveti de stroka göre değişiklik göstermektedir. En genel haliyle gaz kuvveti,

$$\vec{F}_g = P_y \cdot A_{piston} \quad (3)$$

Burada P_y pistonu etkileyen basınç, A_{piston} da basıncın etki ettiği piston kesit alanıdır.

Motorun ilk çalışması sırasında, piston ile silindir yüzeyleri arasında kuru sürtünme kuvvetleri oluşmaktadır. İlk hareketin ardından, piston-silindir arasındaki yüzeyde yağlama yağının devreye girer ve hidrodinamik sürtünme başlar. Hidrodinamik sürtünme kuvveti, pistonun hareketine ters yönde etki eden ve piston hızıyla ve dinamik viskozite ile doğru orantılı olan bir kuvvettir. Aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$\vec{F}_{hd} = \mu \cdot A_p \cdot \vec{y} \quad (4)$$

Hidrodinamik sürtünme kuvvetini belirlemek için, piston hızının belirlenmesi gerekir. Bunun için de piston konum denkleminin (1 numaralı denklem) zamana göre birinci türevi alınır; pistonun hızı \dot{y} ifadesini θ 'nın fonksiyonu olarak yazabilmek mümkün olacaktır.

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \dot{\theta} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2\theta}} + r \cdot \sin\theta \right) \quad (5)$$

Hız ifadesinin belirlenmesiyle, krank açısının bir fonksiyonu olarak hidrodinamik sürtünme kuvveti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\vec{F}_{hd} = \mu \cdot A_p \cdot \dot{\theta} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2\theta}} + r \cdot \sin\theta \right) \quad (6)$$

Piston üzerindeki atalet kuvvetinin yönü ve büyüklüğü ise piston ivmesine göre değişir. Bu sebeple önce piston ivmesi tespit edilmelidir. Bunun için de denklem 1'in zamana göre ikinci türevi alınır; piston ivmesi \ddot{y} , θ 'nın fonksiyonu olarak elde edilir.

$$\ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2} = \ddot{\theta} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot \cos^2 \theta - r^2 \cdot \sin^2 \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta}} + \frac{r^4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\sqrt{(l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta)^3}} + r \cdot \cos \theta \right) \quad (7)$$

D'alembert prensibine göre, atalet kuvveti;

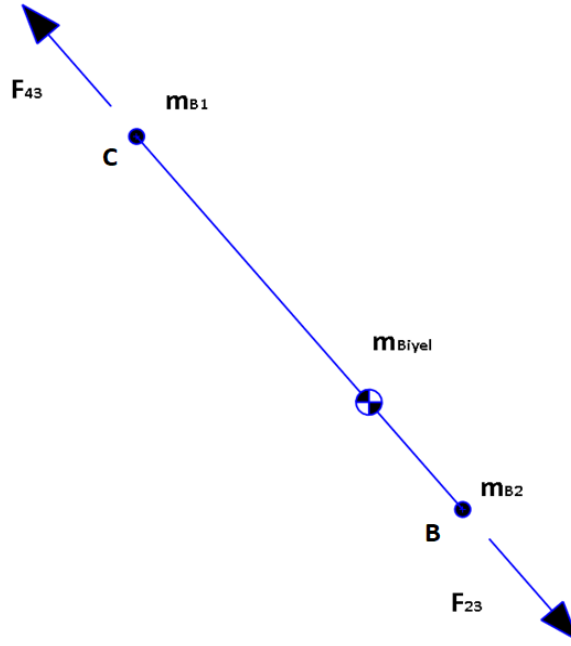
$$\overrightarrow{F_{\text{atalet}}} = -\overrightarrow{m_p \cdot \ddot{y}} = -m_p \cdot \ddot{\theta} \cdot \left(\frac{r^2 \cdot \cos^2 \theta - r^2 \cdot \sin^2 \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta}} + \frac{r^4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\sqrt{(l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta)^3}} + r \cdot \cos \theta \right) \quad (8)$$

Pistonun serbest cisim diyagramında gösterilen F_{34} kuvveti, biyel kolunun piston üzerindeki tepki kuvvetidir ve yönü biyel doğrultusundadır. Yani β açısıyla, pistonu etkiler. F_{yan} ise, biyel tepki kuvvetinin yani F_{34} kuvvetinin yatay bileşenine eşittir. Silindirin yan yüzeyinden piston üzerine gelen yatay tepki kuvvetidir.

2.3. Biyel Kolu Üzerine Etki Eden Kuvvetler ve Kütle İndirgenmesi

Biyel kolu, hem öteleme hem de dönme hareketi yapan bir uzundur. Bu özelliği sebebiyle hareketini incelemek pek kolay değildir. Yapılacak işlemleri kolaylaştırmak amacıyla kütle indirgenmesi yolu seçilmiş ve işlem yükü bu şekilde hafifletilmiştir. Biyelin piston üzerine indirgenmiş kütlesi, pistonla birlikte doğrusal hareket yaparken; krank üzerindeki kısmı ise, krank miliyle beraber dairesel hareket yapacaktır. Bu şekilde biyelin hareketi diğer iki uzvun yaptığı hareket üzerinden incelenmiştir. Biyelin piston pimi eksenine üzerine dağıtılmış olan kısmının kütlesi (m_{B1}), toplam biyel kütesinin yaklaşık olarak %30'una tekabül etmektedir (Çetinkaya, 1999; Söylemez, 2017).

m_{B1} kütlesi, toplam piston kütlesi hesaplanırken hesaplamalara dahil edilmiş ve etkisi piston hareketiyle birlikte incelenmiştir. m_{B2} kütlesi ise biyel kolunun, krank muylusu üzerine B noktasına indirgenen, noktasal bir kütle olarak değerlendirilmiştir. Hesaplamalarda, biyel kolunun kütlesi diğer uzuvlara dağıtıldığından, kütsüz bir uzuvmuş gibi işlemler yapılmıştır.



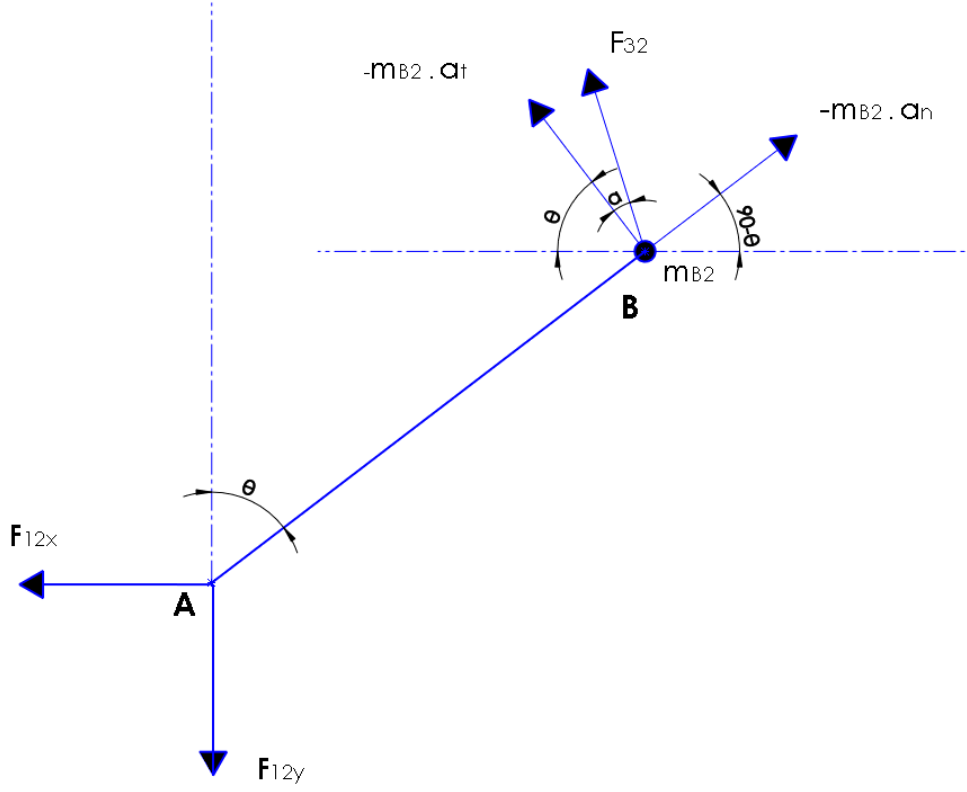
Şekil 3. Biyel Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Biyel bir tarafta pistonu diğer tarafta ise krank mili üzerine, bağlantı elemanlarıyla monte edilmiştir. Üzerine etkiyen kuvvetler, diğer uzuvlardan kaynaklı tepki kuvvetleridir.

$$\Sigma \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{F}_{43} + \vec{F}_{23} = 0 \quad (9)$$

2.4. Krank Mili Üzerine Etki Eden Kuvvetler ve Kütle İndirgenmesi

Krank mili, dengelemeyi sağlamak için krank-biyel muylusuna ters yönde denge ağırlıklarıyla birlikte üretilir. Krank kütlesi ve dönme eksenine göre simetrik olan dengeleme kütlelerinin ağırlık merkezinin konumu, krank dönme merkezi olan A noktası olarak kabul edilebilir (Uicker et al., 2003). Bu kütlelerden kaynaklı herhangi bir atalet kuvveti veya ağırlık kuvveti krank miline etki etmez. Yapılacak diğer işlemlerde ise krank üzerinde simetrik olmayan kütle olmadığı varsayılmıştır. Bu kabulden yola çıkarak, krank mili üzerinde kütle olarak, sadece biyel kolunun kranka indirgenmiş kütlesi olan (m_{B2}) kütle kalır. Krank mili üzerine etki eden kuvvetler, temsili olarak Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Krank Mili Üzerine Etki Eden Kuvvetler

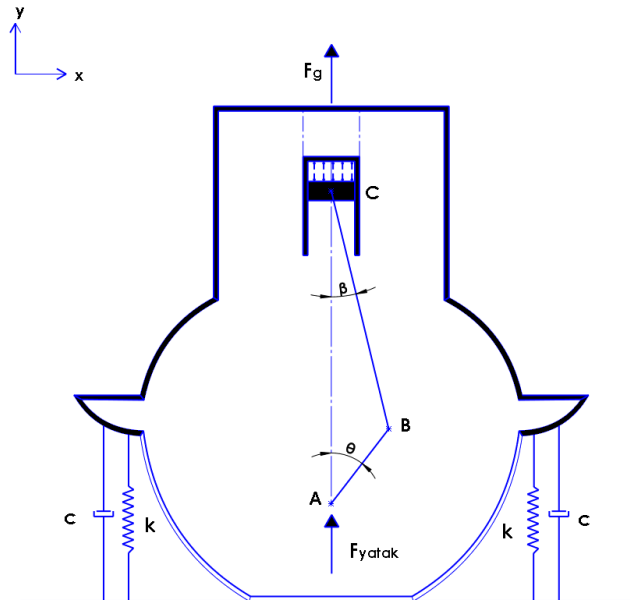
Şekil 4'e göre krank mili üzerine A noktasında; yatak tepki kuvvetleri, B de ise; m_{B2} kütlelerinin normal ve teğetsel atalet kuvvetleri ile biyel kolunun krank üzerindeki tepki kuvveti etki etmektedir.

y ekseninde D'alembert prensibine göre toplam kuvvet eşitliği yazılarak aşağıdaki vektörel toplam ifadesi elde edilir.

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow \vec{F}_{12}^y + (-m_{B2} \cdot \vec{a}_n) \cdot \sin(90 - \theta) + \vec{F}_{32} \cdot \sin(\alpha + \theta) + (-m_{B2} \cdot \vec{a}_t) \cdot \sin(\theta) = 0 \quad (10)$$

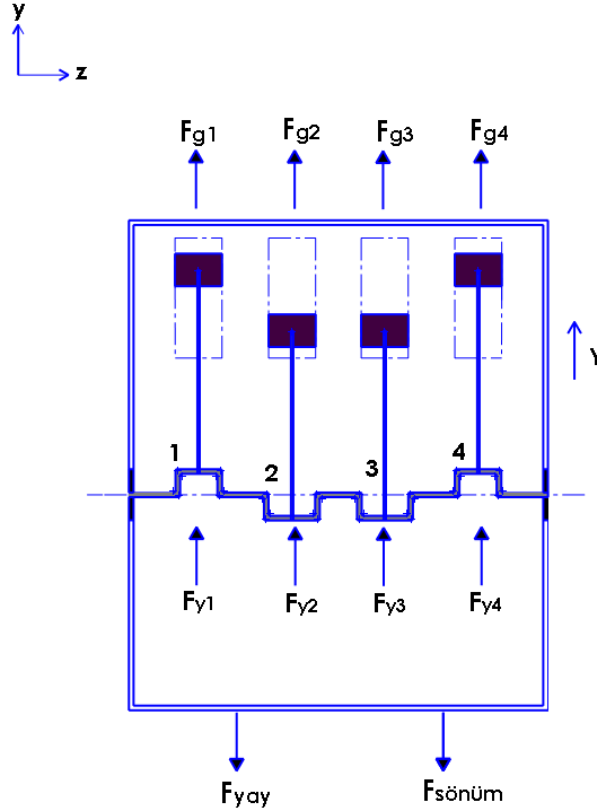
3. Motor Bloğuna Etki Eden Kuvvetler ve Hareket Denklemi

Motor bloğunun önden görünüşü Şekil 5'te verilmiştir. Blok üzerine etki eden temel kuvvetler, silindirler içerisinde oluşan bileşke gaz kuvveti ve buna bağlı olarak oluşan krank yataklarına etki eden bileşke yatak kuvvetidir. Bu kuvvetlerin yanında; bloğu şasiye bağlayan motor kulaklarından kaynaklı yay kuvveti, sönüm kuvveti de bloğa etki eden diğer kuvvetlerdir.



Şekil 5. Motor Bloğunun Önden Görünümü

Şekil 6' da motor bloğunun yandan görünüşü verilmiştir. Blok üzerine y ekseninde etki eden ve yönleri temsili olarak verilmiş kuvvet vektörleri görülmektedir.



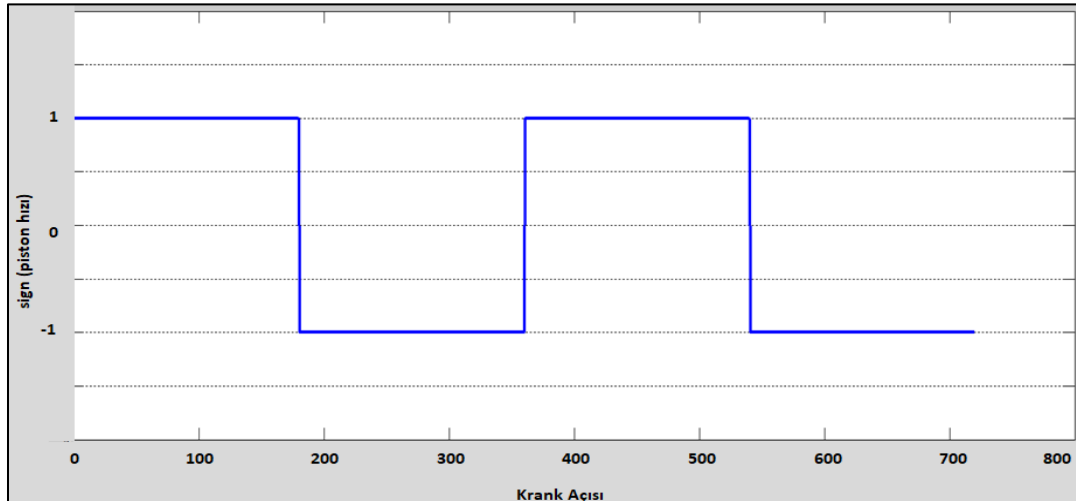
Şekil 6. Motor Bloğunun Yandan Görünüşü ve Blok Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Motor bloğunun üst kapağına, silindirler içerisindeki gaz basınçları sebebiyle oluşan gaz basınç kuvvetleri etki etmektedir. Motorun çalışması esnasında herhangi bir anda, 4 piston da farklı stroklarda bulunurlar. İlk piston genişleme strokundaydı, ikincisi egzoz, üçüncüsü sıkıştırma ve dördüncü piston emme strokundaydı. Bu sebeple, bloğa etkiyen bileşke gaz kuvveti, her zaman bu 4 gaz kuvvetinin vektörel toplamı şeklinde ifade edilir. Bu bileşke kuvvet, bloğu harekete zorlamaktadır.

$$\vec{F}_{gaz} = \sum \vec{F}_g = \vec{F}_{g1} + \vec{F}_{g2} + \vec{F}_{g3} + \vec{F}_{g4} \quad (11)$$

\vec{F}_g kuvvetlerinin analitik olarak bulunabilmesi için 2 no'lu eşitlikten faydalanmak gerekir. Ancak, öncelikle bu ifadede yer alan hidrodinamik sürtünme ve atalet kuvvetlerinin yönlerinin belirlenmesine ihtiyaç duyulur. Pistona etki eden hidrodinamik sürtünme kuvvetinin yönünün belirlenmesi için, piston hızının işaretinin incelenmesi gerekir.

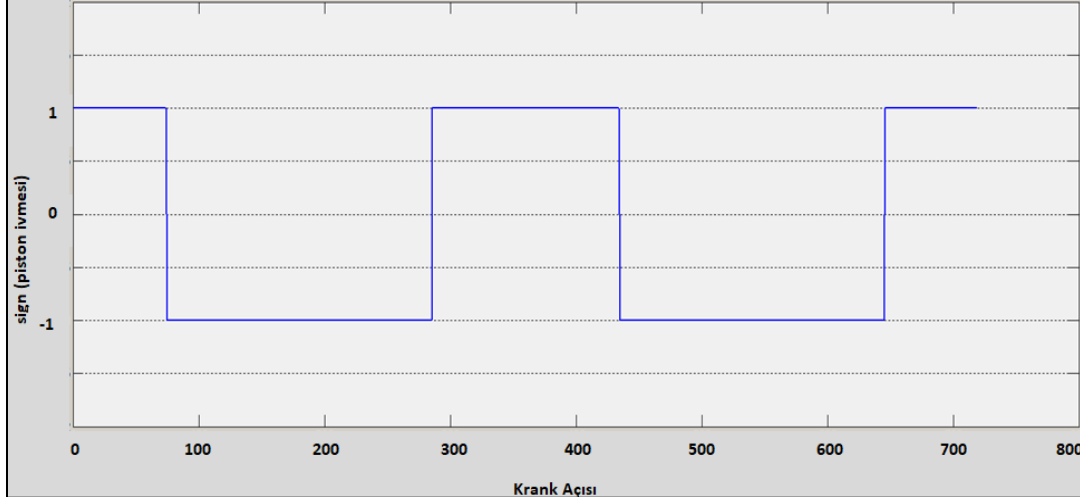
Denklemin 5'te yer alan, θ krank hızının sabit bir değerde olduğu varsayılırsa ve 5 no'lu denklemin işaret fonksiyonunun grafiği (sign(piston hızı) – krank açısı) çizilirse, hidrodinamik sürtünme kuvvetinin yönündeki değişim de incelenmiş olur.



Şekil 7. Sign (Piston Hızı) - Krank Açısı

Grafiğe göre, krank açısı $0^\circ - 180^\circ$ ve $360^\circ - 540^\circ$ aralıklarında iken hız vektörü pozitif, $180^\circ - 360^\circ$ ve $540^\circ - 720^\circ$ aralıklarında negatif yöndedir.

Piston üzerinde, yönü sürekli değişkenlik gösteren diğer bir kuvvet de atalet kuvvetidir. Atalet kuvveti piston ivmesine bağlı olduğundan, piston ivmesinin yönünün belirlenmesi atalet kuvvetinin de yönünün belirlenmesi anlamı taşımaktadır. Eğer krank ivmesi sabit bir değer kabul edilip, 7 no'lu denklemin işaret fonksiyonu çizilirse, atalet kuvvetinin yön değişimi de kolaylıkla görülebilir.



Şekil 8. Sign (Piston İvmesi) - Krank Açısı

Krank açısı $0^\circ - 75^\circ$, $285^\circ - 435^\circ$ ve $640^\circ - 720^\circ$ aralıklarında iken; ivme ifadeleri pozitif, diğer bölgelerde ise negatiftir.

Krank mili üzerine, muylulardan dört kuvvet etki etmektedir. Bu kuvvetlerin bileşkesi, krank ana yataklarına iletilmekte ve blok titreşimine neden olmaktadır.

$$\Sigma \vec{F}_{yatak} = F_{21}^{y1} + F_{21}^{y2} + F_{21}^{y3} + F_{21}^{y4} \quad (12)$$

Bloğu şasiye bağlayan iki adet motor takozu sebebiyle, blok iki adet paralel bağlı yay ve iki adet paralel bağlı sönümleyici etkisindeymiş gibi davranacaktır. Bu sebeple de iki adet yay kuvveti ve iki adet sönümleme kuvveti sistem üzerinde etkindir.

Yaylar için eşdeğer yay katsayısı $k_{eş}$ ve bloğun Y kadar hareket ettiği kabul edilirse oluşacak yay kuvveti;

$$\vec{F}_{yay} = k_{eş} \cdot Y \quad (13)$$

Paralel bağlı sönümleyiciler için eşdeğer sönümleme katsayısı $c_{eş}$ olursa sönüm kuvveti;

$$\vec{F}_{sönüm} = c_{eş} \cdot \dot{Y} \quad (14)$$

Motor bloğu düşey eksen doğrultusunda, herhangi bir \ddot{Y} ivmesi ile hareket ediyorsa, oluşan atalet kuvveti;

$$\vec{F}_{atalet} = m \cdot \ddot{Y} \quad (15)$$

Motor bloğunun üst kapağına etki eden gaz kuvveti ve krank ana yataklarına etki eden yatak kuvvetlerinin bileşkesi, sistemin düşey ekseninde titreşimine sebep olan $F(\theta)$ dış kuvvetini oluşturur. Krank açısı θ 'nın, zamana bağlı olduğu göz önüne alınırsa bileşke kuvvet $F\{\theta(t)\}$ olarak gösterilebilir. Bu bileşke kuvvet sebebiyle oluşan blok hareket denklemi;

$$m \cdot \ddot{Y} + c_{eş} \cdot \dot{Y} + k_{eş} \cdot Y = F(\theta(t)) \quad (16)$$

4. Sonuç ve Tartışma

Motorun temel parçaları olan piston, biyel ve krank milinin üzerinde oluşan kuvvetlerin yönlerinin kesin olarak belirlenmesinde en kritik eleman pistondur. Piston üzerinde oluşan kuvvetler ve yönleri belirlenebilirse, diğer parçaların ve motor bloğunun üzerindeki kuvvetler de belirlenmiş olacaktır. Bu sebeple öncelikle piston üzerinde, yönleri sürekli değişen hidrodinamik sürtünme kuvvetinin ve atalet kuvvetinin yönlerinin belirlenmesi gerekir. Bunun için piston hız ve ivme ifadelerinin, işaret fonksiyonu grafikleri incelenmiştir.

Hidrodinamik sürtünme kuvveti vektörünün, krank açısı 0° - 180° ve 360° - 540° aralıklarında iken pozitif, 180° - 360° ve 540° - 720° aralıklarında negatif yönde olduğu belirlenmiştir.

Piston üzerine etki eden atalet kuvvet vektörünün ise; krank açısı 0° - 75° , 285° - 435° ve 640° - 720° aralıklarında iken pozitif, diğer bölgelerde ise negatif yönde olduğu tespit edilmiştir.

Kuvvetler üzerindeki tüm işaret değişimleri göz önüne alındığında, kuvvet analizi için sistemin; 0° - 75° , 75° - 180° , 180° - 285° , 285° - 360° krank açısı aralıklarında incelenmesinin gerekli olacağı sonucu çıkarılmıştır. 360° ile 720° arası ise, ilk çevrimin simetrisi olduğundan yine aynı sonuçlar elde edilecektir. Tek fark, değişen stroklardan kaynaklı gaz kuvveti farklılığı olacaktır.

Piston hareketinin temel kuvvetleri olan gaz kuvvetleri, değişen stroklara göre termodinamik bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir. Piston üzerindeki kuvvetler belirlendikten sonra, diğer hareketli parçalar üzerindeki kuvvetler ve yönleri de tespit edilebilir. Hareketli parçalara etki eden kuvvetler Newton'un 3.yasası gereği bloğa da tesir edeceğinden, blok üzerine etki eden bütün kuvvetler belirlenebilir. Blok üzerinde etki eden kuvvetlerle D'alembert prensibine göre kuvvet eşitliği yazılırsa, motor bloğunun hareket denklemi de elde edilebilir.

Referanslar

Barelli, L., Bidini, G., Buratti, C., & Mariani, R. (2009). Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements. *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9), 1707-1713.

Çetinkaya, S. (1999). *Motor Dinamiği*. Ankara - Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım.

Erkaya, S., Su, Ş., & Uzmay, I. (2007). Dynamic analysis of a slider-crank mechanism with eccentric connector and planetary gears. *Mechanism and machine theory*, 42(4), 393-408.

Guzzomi, A. L., Hesterman, D. C., & Stone, B. J. (2007). The effect of piston friction on engine block dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 221(2), 277-289.

Karabulut, H., Öztürk, E., & Çınar, C. (2011). TEK SİLİNDİRLİ DÖRT ZAMANLI BİR DİZEL MOTORUNUN DİNAMİK MODELİ VE TİTREŞİMLERİNİN İNCELENMESİ. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1), 173-183.

Manienyan, V., & Sivaprakasam, S. (2013). Vibration Analysis in DI Diesel Engine Using Diesel and Biodiesel. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 1(4), 3586-3589.

Metallidis, P., & Natsiavas, S. (2003). Linear and nonlinear dynamics of reciprocating engines. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 38(5), 723-738.

Öztürk, E., & Karabulut, H. (2012). TEK SİLİNDİRLİ BİR DİZEL MOTORUNUN DİNAMİK VE TİTREŞİM ANALİZLERİ. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3), 491-500.

Pasricha, M. S., & Hashim, F. M. (2006). Effect of the reciprocating mass of slider-crank mechanism on torsional vibrations of diesel engine systems. *Asean Journal on Science and Technology for Development*, 23(1&2), 71-81.

Pulkrabek, W. (2001). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New York - ABD: John Wiley&Sons.

Söylemez, E. (2017). *Makine Teorisi-II Makina Dinamiği*. İstanbul - Türkiye: Birsen Yayınevi.

Uicker, J. J., Pennock, G. R., & Shigley, J. E. (2003). *Theory of Machines and Mechanisms*. New York-ABD: Oxford University Press.

Zweiri, Y. H., Whidborne, J. F., & Seneviratne, L. D. (2001). Detailed analytical model of a single-cylinder diesel engine in the crank angle domain. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 215(11), 1197-1216.