

Araç Dinamiği Modellenmesi, Simülasyonu ve Görselleştirilmesi

Engin FIRAT¹ Vahap Oğuz TOKMAK² Veysi İŞLER³

Öz

Bu bildiri de tekerlekli araçların fiziksel olarak modellenmesi, simülasyonu ve görselleştirilmesi amacıyla geliştirilen yazılım sunulmaktadır. Fiziksel modelleme, bir aracın sürüş dinamiğine etki eden bütün alt sistemlerin modellenmesini kapsar. Buna göre, sürüş hattındaki motor, debriyaj, dişli kutusu, diferansiyel gibi alt sistemlerin birer kapalı kutu şeklinde fiziksel modellenmesi yapılmaktadır. Bunlara ek olarak, aracın lastik ve tekerlek modelleri, direksiyon kutusu modeli, fren modelleri ve aerodinamik özellikleri sisteme bulunmaktadır. Kullanıcılar, sisteme girecekleri parametre değerleriyle modellemek istedikleri araçları şekillendirebileceklerdir. Örneğin, kullanıcı araç boyutlarını belirleyip, gövde üzerinde istediği yerlere farklı lastiklere sahip tekerlekleri yerleştirip, istenilen tekerlekleri güç tekerleği olarak işaretleyip, sürüş hattındaki bileşenlere uygun değerleri verip, farklı direksiyon kutusu modelleri ve fren modelleri seçerek kendi amaçlarına uygun aracı oluşturabilecektir. Özet olarak kullanıcı tak çıkar mantığı ile farklı bileşenleri şekillendirerek kendi aracını oluşturacaktır. Bu çalışmada, modellenen sistemin incelenmesi, doğrulanması ve geçerlenmesi amacıyla simülasyon anında parametre değerlerinin aldığı değerler etkileşimli bir arayüz üzerinde görselleştirilmektedir. Sistem içerisinde fizik kütüphanesi olarak Nvidia PhysX, görselleştirme ve arayüz için ise OpenGL ve QT kütüphanelerinin kullanılması öngörülmüştür. Yazılımın gelecekte simülasyon sistemlerine entegre edilebilmesi, simülasyon sistemlerinin fiziksel araç dinamiği hesaplarını üstlenebilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: araç dinamiği, araç sürüş hattı, lastik modelleri, modelleme ve simülasyon.

Modelling, Simulation and Visualization of Vehicle Dynamics

Abstract

In this paper, a software which is aimed for physical modeling, simulation and visualization of a vehicle is presented. A physical modeling of a vehicle consists of modeling all the components of a vehicle which affects vehicle dynamics. Hence components called engine, clutch, gear-box, differential is modelled in the system. Moreover, tire and wheel models, steering wheel box models, brake models and aerodynamic models of vehicle are implemented in the system. Users of the system can give the required parameters as inputs to the system to form the vehicle that they want to use. For example, user can set the dimensions of the body of the vehicle, put wheels that have different tire models to the pre-determined positions, and sign desired wheels as tractive wheels. Moreover they can give parameters to the components of the driveline, set different models for steering wheel box and brakes in order to form the vehicle that is in the frame of user requests. In summary, users can create their own vehicles with shaping different components by the logic of plug-and-pop. In the system, to examine, verify and validate the system a graphical user interface is prepared. In the

¹ Yazışma adresi: SİMSOFT Bilgisayar Teknolojileri Ltd.Ş., ODTÜ Teknokent SATGEB Bölge Ortak Bina, engin.firat@simsoft.com.tr

² SİMSOFT Bilgisayar Teknolojileri Ltd.Ş., ODTÜ Teknokent SATGEB Bölge Ortak Bina.

³ Doç.Dr., ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği, ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.

system some third party libraries are used to develop some features. In the system, Nvidia PhysX is used as physics engine, QT is used to implement graphical user interfaces and OpenGL is used to render the physical scene. In the future, it is thought that, the software can be built into the simulator systems and can handle the physical calculations of vehicles.

Keywords: modelling and simulation, tire models, vehicle driveline, vehicle dynamics.

Giriş

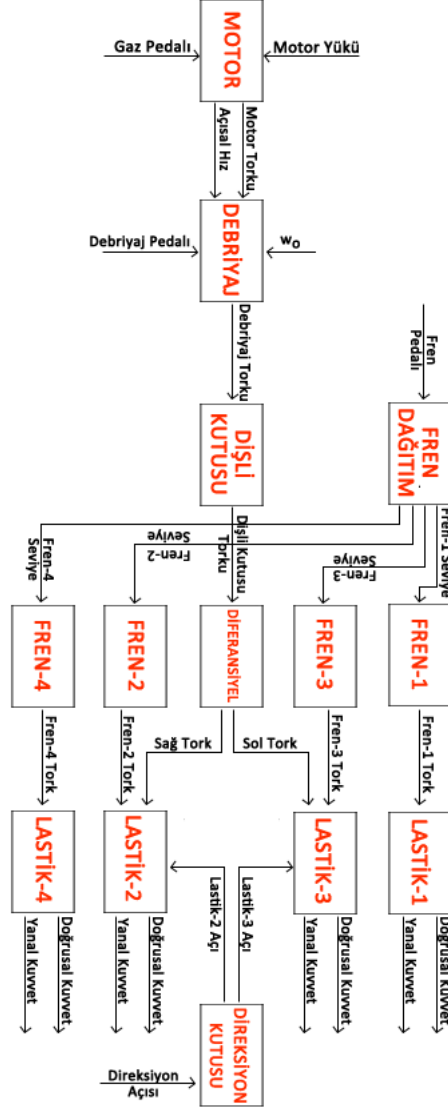
Günümüzde simülatörler hayatın hemen hemen her noktasında karşımıza çıkmaktadır. Özellikle çeşitli araçları, kendi amaçları doğrultusunda çokça kullanan kurum ve kuruluşlar, personelinin eğitimlerini artık simülatörler yardımıyla yapmaktadır. Simülatör kullanımı, kurumların maddi açıdan büyük tasarruflar yapabilmelerini sağlamaktadır. Ayrıca eğitimlerde ve tatbikatlarda hatalara bağlı kayıpların önüne geçilebilmektedir.

Hayatımızda tekerlekli araçların yeri çok büyüktür. Endüstride, askerî alanda ve gündelik yaşamda tekerlekli araçların kullanım alanlarına çokça rastlamaktayız. Dolayısıyla günümüzde kullanılan veya kullanılması amaçlanan simülatörlerin çoğunda araç dinamiği modellenmesi ve simülasyonu yapılması ihtiyacı duyulmaktadır. Bu nedenle simülatörlerde araç dinamiği hesaplarını yapabilen ve kullanıcıya araçları dilediği gibi şekillendirebilme imkânı verebilen üçüncü parti bir yazılım kütüphanesine ihtiyaç bulunmaktadır.

Sistem modüler şekilde yapılacaktır. Yani fiziksel modeller, modüller şeklinde tak-çıkart mantığı çerçevesinde araç modeline eklenip çıkarılabilecektir. Böylece kullanıcı kullanmak veya testini yapmak istediği aracı oluşturup gerçek zamanlı sürebilecektir.

Aracın Fiziksel Modellenmesi

Aracın fiziksel modellenmesi ile anlatılmak istenen araç dinamiğine etki edecek bütün bileşenlerin modellenmesidir. Literatürde araç fiziksel modelleriyle ilgili çok daha ayrıntılı ve karmaşık bilgiler olsa da bu sistemde tüm bu fiziksel modeller olabildiğince basitleştirilmiştir. Çünkü sistem gerçek zamanlı çalışmak zorundadır ve günümüz teknolojisi karmaşık araç fiziği modellerinin gerçek zamanlı gerçekleştirilmesine izin vermemektedir.



Şekil 1. Sistem Akış Diyagramı

Daha öncede bahsedildiği gibi araçtaki parçaların fiziksel modelleri, parçalar sanki birer kara kutuymuş gibi modellenecektir. Bundan dolayı, her bir modülün birbiriyle olan iletişimi ve bağlantıları önem taşımaktadır. Kullanıcının bu parçalar arasındaki bilgi akışını görebilmesi sistemin incelenmesi, doğrulanması ve geçerlenmesi adına önem arz etmektedir. Sistemde farklı parçaların birbirlerine bağlantıları, parçaların sahip olduğu girdi çıktı değerleri ve sistem akış hattı Şekil 1'de görülebilir.

Araç modeli oluşturulmasında araca etki edecek kuvvetler ile aracın çeşitli parçalarının fiziksel modelleri, modüller hâlinde oluşturulacaktır. Sistemde şu parçaların modellenmesi yapılacaktır: Motor, Debriyaj, Vites Kutusu, Diferansiyel, Tekerlek, Fren Dağıtım Sistemi, Fren, Direksiyon Kutusu.

Motor

Motor modellenmesi için iki tane yol bulunmaktadır. Birinci model parametrik denklemleri kullanarak motor çıkış torkunun hesaplanmasıdır. İkinci yol ise veri dizileri (look-up table) ile gaz pedalı ve motor açılma hızı argümanları ile motorun çıkış torkunun tablodan okunmasıdır (Rajamani, 2006).

Sistemde motorun çıkış torklarının bulunabilmesi için iki tane veri dizisi kullanılmıştır. Birinci veri dizisinde gaz pedalı pozisyonuna karşılık gelen kelebek açıklığı (throttle opening) değeri bulunabilir. İkinci veri dizisinde ise motor açılma hızı ve kelebek açıklığı değerlerine karşılık gelen, motor çıkış torku bulunmaktadır. Modelimizde, her bir simülasyon karesinde, önce birinci veri dizisinden gaz pedalı pozisyonuna karşılık gelen kelebek açıklığı bulunup, daha sonra ikinci veri dizisine kelebek açıklığı ve motor açılma hızı girdi olarak verilerek motorun çıkış torku hesaplanır.

Motorun net çıkış torku bulunduğundan sonra aşağıdaki birinci dereceden diferansiyel denklem çözülerek her bir simülasyon karesinde motorun açılma hızındaki artış hesaplanır (2.1.1) (Rajamani, 2006).

$$I_g \dot{w}_g = \tau_{net} - \tau_{load} \quad (2.1.1)$$

$$w_t = w_{t-1} + \dot{w}_g dt \quad (2.1.2)$$

Yukarıda da bahsedildiği gibi bu denklem her bir simülasyon diliminde çözülerek bir sonraki dilimde motorun hangi açılma hızı değerine sahip olacağı bulunur. Bu değere göre bir sonraki simülasyon diliminde motorun sağlayabileceği net tork veri dizileri üzerinde uygun operasyonlarla elde edilebilir.

Debriyaj

Yukarıda da bahsedildiği gibi, içten yanmalı motorlar belirli bir açılma hızının altında çalışamazlar. Bundan dolayı araçları durdurma ve kaldırma manevraları için ek bir sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Sistemde bu durum için debriyaj sistemi kullanılmıştır (Rajamani, 2006).

Debriyaj basitçe motorla vites kutusu arasına konumlanmış iki tane diskten oluşan bir sistem olarak düşünülebilir. Debriyaj pedalı seviyesine göre bu sistem, motordan gelen hareketi vites kutusuna doğru belirli bir

oranda aktarır veya aktarmaz. Bu sayede araç durduğu zaman debriyaj ile motor hareketi aktarma organlarına iletilmez, böylelikle motorun çalışamayacağı açısal hızlara düşmesi engellenir.

Debriyajın çıkış torqlarını bulabilmek için veri dizilerinden faydalanılmıştır (Genta, 1997). Veri dizisine ω_{slip} girdi olarak verilir ve çıktı olarak da debriyajın aktaracağı tork alınır. ω_{slip} şu şekilde hesaplanır:

$$\omega_{slip} = \omega_{engine} - \omega_0 \quad (2.2.1)$$

Burada, ω_0 debriyajın ikinci diskindeki açısal hızı, ω_{engine} ise motordan gelen açısal hızı yani debriyajın ilk diskinin açısal hızıdır.

Vites Kutusu

İçten yanmalı motorlar, belirli bir maksimum açısal hıza kadar çıkabilmektedir, bu da araç hızına bir üst limit konulması demektir. Bu durumu aşabilmek için vites kutusu mekanizması geliştirilmiştir. Vites kutusu mekanizması, bizim farklı dişli oranları seçerek, araç hareketine uygun motor açısal hızlarında aracı sürebilmemizi sağlar.

Vites kutusuna gelen tork değeri ve açısal hız, vites kutusunda şekillendirilerek diferansiyele doğru gönderilir. Bu aktarım sırasında aşağıdaki matematiksel modeller kullanılır (Jazar, 2008):

$$\tau_{out} = \tau_{in} \cdot \rho_i \cdot \eta_{gear-box(i)} \quad (2.3.1)$$

$$\omega_{out} = \omega_{in} \cdot 1/\rho_i \quad (2.3.2)$$

Bu matematiksel modele göre sistemimizde vites kutusunun simülasyonu yapılmıştır. Farklı araç tiplerine göre farklı vites kutuları, uygun dişli oranları ve verimlilik değerleriyle, sisteme entegre edilebilir.

Diferansiyel

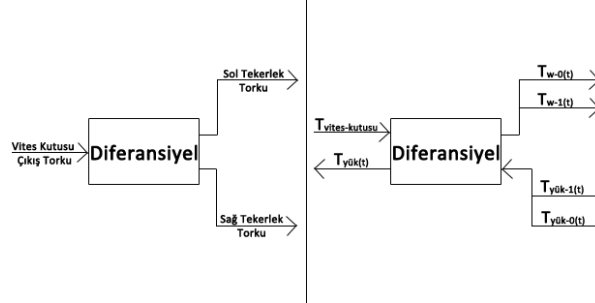
Diferansiyel aktarma organlarının sonucusudur. Buradan geçen dönme hareketi direkt olarak tekerleklere aktarılır. Diferansiyel sabit bir dişli oranına sahiptir. Diferansiyel araç tekerleklerinin farklı hızlarda dönebilmesine izin verirken, araç lastiklerinde eşit çekiş kuvvetlerinin oluşmasını sağlar.

Diferansiyel aşağıdaki matematiksel modellere göre modellenebilir:

$$\tau_{wheel-i} = \tau_{in} \cdot \rho_{differential} \cdot \eta_{differential} \cdot 1/2 \quad (2.4.1)$$

$$\omega_{in} = \rho_{differential} \frac{(\omega_{left} + \omega_{right})}{2} \quad (2.4.2)$$

Diferansiyel modeli ve onun zamana bağlı akışı Şekil-2'de görülebilir.

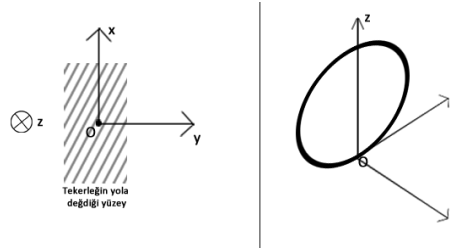


Şekil 2. Diferansiyel Modeli ve Zamana Bağlı Değişimi

Tekerlek

Tekerlekler aslında sistemin en önemli unsurlarıdır. Tekerlekler üzerinde tanımlanmış lastik modelleri, motordan gelen torkun etkisiyle, çekiş için gerekli kuvvetleri üretir. Bununla birlikte direksiyon hareketleri ile de dönüş için gerekli olan yan kuvvetler elde edilir.

Lastiklerin ürettiği kuvvetlerle ilgili anlatımlardan önce tekerlekler için bir koordinat sistemi geliştirmek uygun olacaktır. Şekil-3'te farklı açılardan tekerlek, lastik ve koordinat sistemi görülebilir. Buna göre x-ekseni üzerinde oluşan kuvvetler çekiş kuvvetleri (\vec{F}_x) ve y-ekseni üzerinde oluşan kuvvetler yan kuvvetler (\vec{F}_y) olarak adlandırılır. Bununla birlikte z-ekseni etrafında oluşan moment ise (M_z) olarak adlandırılır.



Şekil 3. Tekerlek Koordinat Sistemi

Lastiklerin deforme olma büyüklüklerine göre lastiğin üreteceği çekiş veya yan kuvvetler değişmektedir. Lastiklerin deformasyonlarına göre ne kadar kuvvet üretecekleri çeşitli modeller yardımıyla bulunabilir. Sistemimizde, hem gerçek zamanlı kullanımlara uygun olması hem de net sonuçlar verebilmesi nedeniyle (Rajamani, 2006) Hans B. Pacejka'nın geliştirdiği Magic Formula isimli lastik modelleri kullanılmıştır. Bu modelin kullanılma nedenlerinden biri de bu lastik modeli içinde gerekli sabitler

değiştirilerek lastiklerin farklı zeminlerde ne kadar kuvvet üreteceklerinin bulunabilmesidir.

Magic Formula çıktısı Y, modele giren X girdisi ile şu şekilde hesaplanabilir (Genta, 1997):

$$Y_{(x)} = y_{(x)} + S_v \quad (2.5.1)$$

bu denklemde

$$x = X - S_h \quad (2.5.2)$$

$$y_{(x)} = D \sin[C \tan^{-1}\{Bx - (Bx - \tan^{-1} Bx)\}] \quad (2.5.3)$$

olarak tanımlanır.

Bu modelde Y çıktıları F_x , F_y veya M_z olabilir. Girdiler ise kayma açısı (slip angle - α) veya kayma yüzdesi (slip percentage - σ) olabilir.

Çekiş kuvvetlerinin oluşmasına neden tekerleğin boylamsal yönde deforme olmasıdır. Tekerleğin boylamsal yönde deformasını boylamsal kayma (longitudinal slip) denilen bir nicelikte ölçeriz. Bu nicelik şu şekilde hesaplanabilir:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{\omega_0} - 1 \quad (2.5.4)$$

Burada ε tekerleğin yola değen noktasının kayma oranıdır. Magic Formula'da bu değeri rahatlıkla kullanabilmek kayma yüzdesine ihtiyaç vardır. Kayma yüzdesi de Denklem (2.5.5)'de belirtildiği gibi bulunur.

$$\sigma = \varepsilon * 100 \quad (2.5.5)$$

Kayma yüzdesi Magic Formula'ya girdi olarak verilerek çekiş kuvveti bulunur.

Çekiş kuvveti motor üzerinde yük torkunu oluşturan kuvvettir. Çekiş kuvveti, araç tekerleğinin dönüşünü yavaşlatacak bir biçimde tork üretir. Bu tork,

$$\vec{\tau}_{load} = \vec{R} \times \vec{F}_x \quad (2.5.6)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Elde edilen tork aktarma organları üzerinden aktarılarak motora etki edecek yük torku hesaplanmış olur.

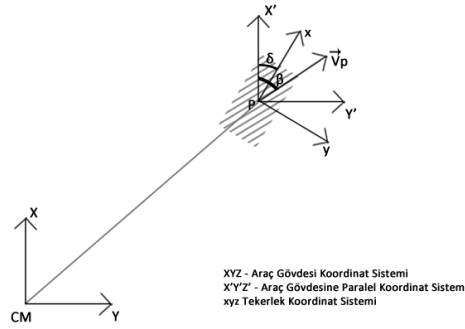
Lastiklerin oluşturduğu yanal kuvvetleri bulabilmek için kayma açısını hesaplamamız gerekmektedir. Kayma açısını bulmak için lastiğin yol ile temas eden alanının vektörel hızını bulmamız gerekir. Bu hesaplama geçmeden önce araç koordinat sistemi ve tekerlek koordinat sisteminin

Şekil-4 üzerinde incelenmesi denklemleri anlamayı kolaylaştıracaktır (Genta, 1997).

Bu hız vektörü şu denklem yardımıyla bulunur:

$$\vec{V}_p = \vec{V}_{cm} + \psi \times (\vec{P} - \vec{CM}) \quad (2.5.7)$$

Bu denklemde araç kütle merkezinin hızına aracın sapma hareketinden gelen dairesel hızın eklenmesiyle, tekerlek yüzeyinin toplam vektörel hızı bulunur.



Şekil 4. Araç ve Tekerlek Koordinat Sistemleri

Hız vektörü bulunduktan sonra, hız vektörünün araç koordinat sisteminin x-ekseni ile yaptığı açı şu şekilde bulunur:

$$\beta = \tan^{-1}(V_{py}/V_{px}) \quad (2.5.8)$$

Bununla birlikte tekerleğin araç koordinat sistemine göre açısı da önemlidir. Bu açı sistem içinde uygun yapılarda tutulmaktadır. Tekerlek açısı δ ile gösterilmektedir.

Son olarak kayma açısı her bir lastik için

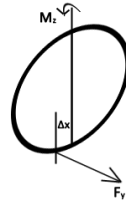
$$\alpha = \beta - \delta \quad (2.5.9)$$

ile bulunur. Bu elde edilen veri Magic Formula'ya girdi olarak verildiğinde tekerlek koordinat sisteminde tekerleğin üreteceği yanal kuvveti, \vec{F}_y , verir.

Magic Formula'nın çıktısı olan yanal ve çekiş kuvvetler, sanki sadece çekiş kuvveti veya yanal kuvvet varmış gibi çalışırlar (Pacejka, 2010). Fakat gerçekte durum böyle değildir. Tekerlekler $\mu \cdot F_z$ değerinden daha fazla kuvvet üretemezler. Bundan dolayı bu iki kuvvet kombine edilir. Bu işlem şu şekilde yapılır:

$$F_y = F_{y0} \cdot \sqrt{1 - (F_x/F_{x0})^2} \quad (2.5.10)$$

Tekerlek üzerinde self-aligning torque (SAT) denilen, z-tekerlek koordinat sistemi etrafında oluşan bir moment oluşmaktadır. Bu moment viraj dönerken direksiyon sistemine verilen bir geri besleme gibidir. Bu momentin en somut örneği araçlarla köşeler dönülürken, direksiyonun bırakıldığında kendi kendini toparlamasıdır. Bu momentin kaynağı Şekil-5 incelendiğinde rahatlıkla anlaşılabilir. Görüldüğü üzere tekerlek tarafından oluşturulan yan kuvvetler Δx kadar kaymıştır. Bundan dolayı bu kuvvetin z etrafında tork etkisi görülür. Aslında direksiyon sistemine verilen tek geri besleme bu değildir. SAT yanında kastor açısı, kamber açısı, döndürme-aksı eğimi (steering-axis inclination) gibi direksiyon sistemine etki eden etmenler vardır. Fakat bunların modellenmesi gerçek zamanlı çalışan bir sistem için uygun değildir. Dolayısıyla SAT modellemesiyle gelen etki belirli bir parametreyle yükseltilecek direksiyondan uygun geri besleme alınmaya çalışılacaktır.



Şekil 5. SAT Oluşması

Fren Dağıtım Sistemi

Fren dağıtım sistemi, fren pedalına basıldığında, farklı tekerleklerdeki fren balatalarını farklı oranlarda sıkıştırarak, farklı tekerleklerde farklı fren torklarının oluşmasını sağlar. Sisteme eklenecek farklı fren dağıtım modelleri ile araç frenlerinin modellenmesi sağlanmaktadır.

Fren dağıtım sistemine ilişkin Şekil-6'da görülebilir.



Şekil 6. Fren Dağıtım Sistemi Modeli

Fren

Fren sistemi, sürtünen parçalar yardımıyla (fren diskleri, fren balataları, tamburlar) tekerleklerin dönüş yönüne ters yönde tork uygularlar. Böylece tekerleğin serbest açılma dönüş hızı, gerçek dönüş hızından daha az olarak aracın hareket yönüne ters yönde çekiş kuvveti oluşur.

Fren sistemi basitçe, fren pedalı seviyesine göre, sağlanabilecek maksimum torka göre doğrusal bir modelle tekerleklere uygulanacak fren torkları hesaplanır. Matematiksel model şu şekildedir:

$$\vec{\tau}_{brake} = \vec{\tau}_{max} \cdot K_{brake-pedal} \quad (2.7.1)$$

Daha sonra bu tork tekerlek modülüne giriş olarak gönderilir.

Direksiyon Kutusu

Direksiyonun ne kadar döndüğüne bağlı olarak, tekerleklerin ne kadar döndürüleceği bu birim üzerinde hesaplanır. Model tekerleklerin hangi açıda döneceği bilgisini hesaplar ve bu bilgi daha sonra tekerleklere girdi olarak verilir.

Bununla birlikte, direksiyon hareketlerinden dolayı SAT oluşur. Her iki tekerlekten gelen SAT değerleri Direksiyon Kutusunda işlenerek, direksiyon donanımına geri besleme olarak geri döndürülür.

Sistem Modelinin Özeti

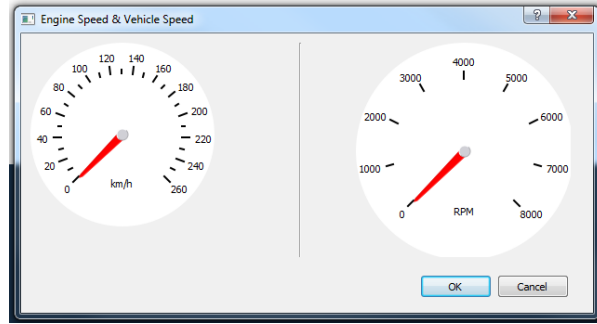
Şekil 1'deki sistem akış diyagramından da görülebileceği gibi, motordan başlayarak araç dinamiğine etki eden bütün bileşenlerin modellenmesi yapılmıştır. Motordan tekerleklere kadar fiziksel modellerin çalıştırılmasıyla en son tekerleklerin yatay ve dikey yönde ne kadar kuvvet oluşturulacakları hesaplanır. Bu hesaplanan kuvvetler motordan tekerleklere kadar her parçanın ayrı ayrı etkileri ile oluşmaktadır. Sonrasında bu kuvvetler Nvidia PhysX'te tanımlanmış olan araç gövdesine eklenerek geriye kalan fiziksel simülasyonun PhysX tarafından yapılması sağlanır. PhysX kütüphanesinde araç gövdesinin tanımlanması, kütlelerinin, atalet momentinin, hava sürtünmesi katsayılarının tanımlanması ile yapılır. PhysX her bir gövde için kendine sağlanan kuvvetlerin yardımı ile kendi içerisinde "Forward Dynamics" tekniği ile yani bir diferansiyel zaman içerisinde kuvvetten ivme, ivmeden hız, hızdan pozisyon hesaplayarak fiziksel dünyanın simülasyonunu yapmaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi, fiziksel bir ortam içerisinde, aracın hareketi büyük ölçüde bizim hesapladığımız kuvvetler ile şekillenirken, aracın doğrusal ve dairesel hareketlerinin hesabı, fiziksel çevre ile olan etkileşimi - çarpışmalar ve çarpışmalara verilen tepki, hava sürtünmesinden kaynaklı harekete karşı kuvvetler ve araç gövdesine uygulanması - PhysX kütüphanesi tarafından sağlanmaktadır.

Simülasyon Görselleştirmesi

Daha önceden de bahsedildiği gibi kullanıcıya, modüller arasında akan veriyi göstermek adına bir kullanıcı arayüzü bulunduğundan bahsetmiştik. Böyle bir arayüz sağlanması önemlidir, çünkü önceki

deneyimlerimiz bize böyle bir arayüz olmadan sistemi geliştirmenin zor olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte değişik parametreler vererek hazırlanan aracın incelenmesi, doğrulanması ve geçerlenmesi arayüzler üzerinden okunan değerlerle mümkün olabilmektedir.

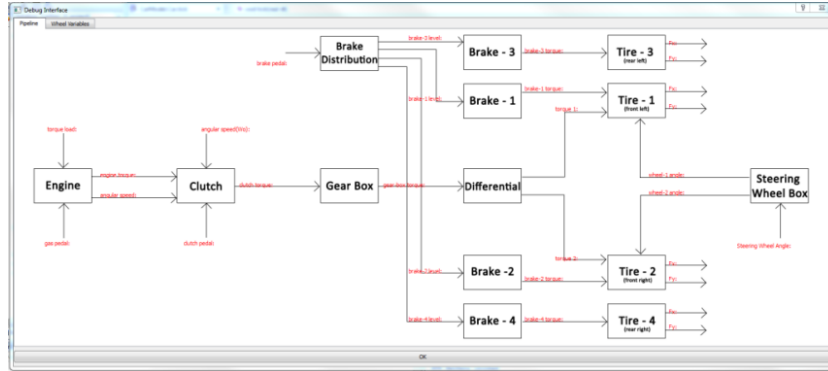
Sistemde, kullanıcıya üç tane arayüz sağlanacaktır. Birinci arayüz, aracın motor hızını ve aracın kendi hızını gösterir. Bu arayüzle kullanıcı araç motor hızını ve araç hızını takip edebilmektedir. Şekil-7'de bu arayüze ilişkin görsel görülebilir. Bu arayüz sayesinde kullanıcı araç hızını ve motor hızını takip ederek aracın fren ve gaz girdilerine karşın uygun davranıp davranmadığını kontrol edebilir.



Şekil 7. Arayüz -1 (Araç Hızı ve Motor Hızı)

İkinci arayüz, birinci arayüze göre çok daha önemli bir arayüzdür. Bu arayüz iki tane sekme içinde araçla ilgili farklı bilgileri kullanıcıya göstermektedir. "Pipeline" başlıklı sekmede, kullanıcıya araç dinamiğini etkileyen bütün parçalar arasındaki veri akışı gösterilmektedir. Bu arayüz kullanıcılara parça, sistem akış hatta üzerinde, verileri kontrol etme olanağı sağlamaktadır. Böylelikle kullanıcı veri akışındaki herhangi bir problem gördüğünde ilgili model üzerinde hangi değişiklikleri yapacağını bilebilir. Şekil-8'de bu arayüzün detayları görülebilir. İkinci sekme iste "Wheel Variables" adına sahiptir. Bu sekmede tek tek dört tekerlek için önemli araç dinamiğini etkileyen önemli değişkenler görülebilir.

Sistem çalışırken, farklı değişkenlerin yanlarındaki kutular işaretlenerek istenilen değişkene uygun bilgiler grafik olarak görülebilmektedir. Deneyimlerimiz sonucu, araç dinamiğini en çok etkileyen etmenlerin lastiklerin ürettiği kuvvetler olduğunu öğrenmiş bulunmaktayız. Bundan dolayı bu arayüzün de kullanıcıya sistemi kullanma esnasında büyük avantaj verdiğini söyleyebiliriz.

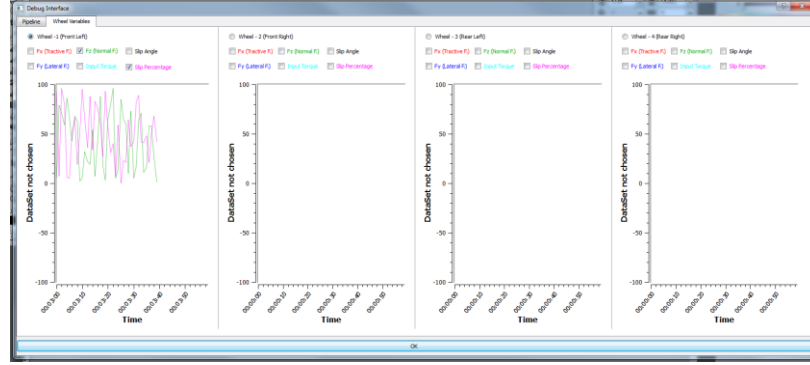


Şekil 8. Arayüz - 2 (Sistem Akışı)

Bu arayüzde her bir tekerin girdisi veya çıktısı olan bilgi gösterilebilmektedir. Örneğin, lastiklerin çıktısı olarak çekici ve yanal kuvvetler aracın hareketini etkileyen baş etmenlerdir. Bunlar arayüz aracılığıyla gerçek zamanlı incelenerek sistemle ilgili problemin nerede olabileceği bulunabilir. Bununla birlikte bu kuvvetlerin anlamsız olmasına sebep olan etkenler yine buradaki değerler incelenerek görülebilir. Örnek vermek gerekirse, eğer bir tekerlek için anlamsız yanal kuvvetler elde ediyorsak, kayma açısına bağlı değerleri incelemek yerinde olacaktır. Başka bir örnek olarak da, çekiş kuvvetinin anlamsız çıktığı zamanlarda veya çekiş kuvveti ile araç hızı artışı arasında anlamlı bir ilişki kurulamıyorsa, kayma yüzdesine bağlı değerlerin incelenmesi yerinde olacaktır. Bu şekilde verilerdeki tutarsızlıklar incelenerek sistem dengesi sağlanabilecektir. Şekil-9 üzerinde bahsedilen arayüz rahatlıkla görülebilir.

Arayüzler hazırlanırken QT isimli üçüncü parti yazılım kütüphanesi kullanılmıştır. QT hem dokümantasyonları iyi hazırlanmış bir kütüphane olduğu için hem de internet üzerinde büyük tartışma topluluklarına sahip olduğu için tercih edilmiştir. Bununla birlikte, gerçek zamanlı grafik çizdirmek için ise QT'ye bir eklenti olarak geliştirilmiş Qwt kütüphanesi kullanılmıştır. Qwt sunduğu arayüz sayesinde, sistem içerisinde grafik çizimlerinin hızlıca ve kolayca yapılmasına olanak sağlamıştır.

Bununla birlikte fiziksel sahnenin basılması için basit OpenGL rutinleri yazılmıştır. Bu rutinler her sistem tükünde, fizik sahnesindeki bütün parçaların alınarak ekrana basılmasını sağlar. Fiziksel sahnenin ekrana basılması ile kullanıcı, aracı bir direksiyon veya diğer girdi aracı sayesinde rahatlıkla kontrol edebilir ve yukarıda bahsedilen arayüzler aracılığıyla sistem incelemesi ve yorumlaması yapabilmektedir.



Şekil 9. Arayüz - 3 (Tekerlek Verileri)

Sonuç

Hazırlanan sistem, araç simülörlerinde araç dinamiği hesaplarını üstlenebilecek ve sağladığı gerçek zamanlı simülasyonlara uygun fiziksel modellerle istikrarlı araç simülasyonları elde edilebilecektir.

Sistem zaman içerisinde gelişmeye devam edip arayüzler daha da geliştirilecektir. Arayüzler kullanıcılara sistemi kullanırken yaşadığı deneyimle sorularak geliştirilecektir. Bununla birlikte fiziksel model de teknolojinin önümüze koyduğu limitler dâhilinde gelişmeye devam edecektir.

Sistem ilk denemelerinde, gerçek zamanlı olması gerekliliğini yerine getirerek, yüksek FPS'lerde çalışabilmektedir. Bunda kullanılan fiziksel sahnenin çizdirilirken en basit rutinler kullanılarak yapılmasının katkısı çok büyüktür. Bundan dolayı, ağır grafik çizdirme işlemlerinin olduğu simülör sistemlerinde, araç dinamiği sistemi, ana sisteme çok az bir yük getirerek çalışabilecektir.

Kaynakça

- Genta, G. (1997). *Motor Vehicle Dynamics - Modeling and Simulation*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: Suite 1B, 1060 Main Street, River Edge, New Jersey, USA.
- Jazar, R.N. (2008). *Vehicle Dynamics-Theory and Application*, Springer Science + Business Media: Spring Street, New York, USA.
- Rajamani, R. (2006). *Vehicle Dynamics and Control*, Springer Science + Business Media: Spring Street, New York, USA.

Pacejka, H.B. (2010). Pacejka's Magic Formula, 14 Ocak 2011 tarihinde <http://www.racer.nl/reference/pacejka.htm> adresinden alınmıştır.