

Sürüş simülatorü uygulamaları için bir tüm-taşıt modeli geliştirilmesi

Orhan ATABAY*, Ali Güvenç GÖKTAN

İTÜ Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34437, Gümüşsuyu, İstanbul

Özet

İlk olarak bir sürüş simülatorüne baz olacak şekilde dört tekerlekli bir karayolu taşıtının dinamiği belirli kabuller eşliğinde modellenmiş, denklemlerle ve haritalarla ifade edilmiştir. Taşıt modeli, pnömatik lastik tekerlek, direksiyon sistemi, tekerlek asılış sistemi, fren sistemi, motor ve aktarma organları sistemleri ve gövde alt modellerinden oluşmaktadır. Denklemlerle vücut bulan sanal taşıt, yol deneyleri yapılarak çeşitli seyir durumları için doğrulanmıştır. Taşıt modeli bir sürüş simülatoründe hizmet edecek olduğundan, bir yandan "gerçek zaman"da çalışması sağlanmış, diğer taraftan da çok geniş bir seyir durumları uzayı için test edilerek kabul edilebilir sonuçlar üretip üretmediği sorgulanmıştır. Taşıt modelinin sürüş simülatoründen bağımsız olarak yalnız çalışabilmesini temin etmek üzere, modelin veri tahrikli olarak çalışabilen bir modu da oluşturulmuştur. Bu durumda herhangi sürücü giriş verileri ile sistem, gerçek bir sürücü olmadan da çalışabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürüş simülatorü, taşıt dinamiği simülasyonu.

Development of a full-vehicle model for driving simulator applications

Abstract

The dynamics of a road vehicle with four wheels is modelled according to the assumptions, which were made. The sub-systems called pneumatic tire, suspension, steering and brake systems, engine and transmission and body are expressed as equations and maps. The HSRI tire model is used to calculate tire forces and moments. Real road test measurements are used to verify the derived equations that are forming the virtual vehicle. The vehicle dynamics model must run in "real-time" because of the requirements of "driving simulation". Another important necessity arise from the wide operation space of the simulator in which the driver can reach almost every operating point of every subsystem. The vehicle model and all sub-models are checked for plausible reactions for almost every driver input combination. An extra off-line operation mode of the vehicle model is also made ready to obtain a "stand-alone" vehicle simulation. The full-vehicle model is able to run on a PC as a driving simulator module in real-time with up to 65 channel virtual data acquisition at 10 Hz. Since all modelling and programming work done by the authors, the full-vehicle model does not contain any unpredictable effects and is running fast and reliable. The modular structure achieved in the programming code guarantees easy development in the future.

Keywords: Driving simulator, vehicle dynamics simulation.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Orhan ATABAY. atabay@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 34 44.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Makina Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Sürücü – taşıt – çevre etkileşim etütlerine yönelik bir sürüş simülatorü geliştirilmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 01.06.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 07.07.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Otomotiv araştırmalarında bilgisayar destekli modelleme ve simülasyon çok uzun yıllardır kullanılan ve üzerinde önemle durulan bir yöntemler grubudur. Bunlardan kara taşıtlarında seyir dinamiğini incelemek üzere olanlar üniversitelerde, araştırma enstitülerinde ve endüstride çalışan mühendis ve bilim adamlarının gayretleri sonucu yıllar içinde giderek gelişme göstermiştir. Amaç, araştırma ve geliştirmeye harcanan zamanın kısaltılması ve maliyetlerin azaltılmasıdır. Otomotiv endüstrisi teknikteki tüm gelişmelerden payını ciddi şekilde almaktadır. Motorlu bir kara taşıtı son derece karmaşık teknik bir sistem haline gelmiş olup, geliştirilmesi yolundaki her adım çok büyük gayretler sonucu aşılabilmektedir.

Sürüş simülatörleri, bir deney standı üzerinde gerçek sürücülere taşıt sürme imkanı tanımak üzere tasarlanmış tesislerdir. Nispeten basit eğitim simülatörlerinden, çok karmaşık hareketli araştırma simülatörlerine kadar değişik amaçlarla tasarlanmış ve tasarlanmakta olan pek çok simülatör mevcuttur. Sürüş simülatörleri ve özellikle de detaylı ve gelişmiş olanları, taşıt üretici firmaların gözbebeği durumunda olup, dünyada son derece sınırlı sayıda bulunan pahalı ve karmaşık yapılardır. Bir sürüş simülatörü ile taşıt seyir performansına, iz tutuşuna ve "sürücü olarak insana" dair her türlü etüd bilgisayar yardımı ile can ve mal riski olmaksızın, hızlı ve ucuz olarak yapılabilir.

"Taşıtın sanal hale getirilmesi" kavramı, gerçek bir taşıt yapısının ve içerisinde hareket ettiği çevrenin virtüel olarak nitelendirilebilecek olan bilgisayarın sayısal ortamına aktarılmasıdır. Bu esnada yine sanal ya da gerçek bir sürücü ile taşıt kumanda ve kontrol edilir.

Seyir dinamiği ve simülasyonu

Seyir dinamiği kavramından anlaşılan, sürücü-taşıt-çevre kapalı kontrol çevriminin beraberce davranışıdır (Dragon, 1998). Bu çevrimde frekansı en fazla 5Hz'e kadar olan değişimler rol oynar. Bu frekansların üzerinde kabaca 20 Hz'e kadar, direksiyon sistemi darbe davranışı, Shimmy hareketleri gibi efektler ortaya çıkar. Bu çalışma,

sözü geçen (5Hz'e kadar olan) dinamik olaylarla ilgilenmektedir. Motorlu karayolu taşıtlarının dinamiği, literatürde sıkça rastlandığı ve temel kaynaklarda da (Mitschke, 1995) önerildiği üzere üç ana bölüme ayrılabilir:

1- Doğrusal Dinamik: Motor gaz kelebeği, aktarma organlarında seçilen çevrim oranı, varsa kavrama kumandası (veya hidrodinamik dönüştürücü) ve fren pedal kuvveti neticesinde taşıtın seyir yönündeki ivmelerini inceler.

2- Yanal Dinamik: Seçilen doğrusal seyir özellikleri eşliğinde (hızlar, ivmeler) direksiyon sapması cevabını, yani taşıt gövdesi ve akslarının yan yöndeki ivmelerini, gövde yalpasını, düşey eksen etrafında dönmesini ve yüzmesini inceler.

3- Düşey Dinamik: Yol zemininin düşey yöndeki profilinin etkisi altında (uyarı profili) cadde normali yönündeki gövde ve aks ivmelerini, dinamik tekerlek yüklerini ve kafa vurma hareketini inceler.

Bir taşıt dinamiği simülasyonunun temeli, taşıt bileşenlerine (parçalar, komponentler) etkiyen kuvvetlerin ve momentlerin tasvir edildiği denklemler ve bu dış kuvvetlere karşı taşıtın ve alt-sistemlerinin (ataletleri, esneklikleri ve sönümleri ile) gösterdiği cevaptır. Bir simülasyon modeli, uygulama amacına bağlı olarak yeterince ayrıntılı olmalı, ancak amacı aşacak şekilde de karmaşık yapılandırılmamalıdır. Model detaylandırılması yapılırken, taşıtın iç dinamiğini temsil eden matematik ile dış kuvvetleri geliştiren formülasyonlar arasında karmaşıklık bakımından bir denge kurulması önerilebilir. (Allen ve Rosenthal, 1994) Basit modeller özellikle taşıt tasarımının konsept aşamasında tüm taşıt veri setinin detaylı olarak mevcut olmadığı ve bilinmediği durumlarda, kullanılabilir fikirlerin ön elemelerini yapmak için çok faydalı olarak görülebilirler.

Hedeflenen bir sürüş simülatörü olduğuna göre, (maddi kaynakların ve insan kaynaklarının azlığı sebebiyle doğru sonuçlar ürettiği her çalışma bölgesi için doğrulanamayacak olmakla birlikte)

simülasyon modeli tüm işletme bölgesinde kabul edilebilir sonuçlar üretmelidir.

Genellikle simülasyonların uygulandığı alana da bağlı olarak, gerçekler ile simülasyon sonuçları arasında çok büyük bir yakınlık ve uyum olması arzulanır. Zamow (1994)'te de belirtildiği gibi aslında pek çok simülasyon modeli özel seyir manevralarını temsil etmek üzere onlar için kalibre edilir. Ancak doğal olarak ana hedef; durağan olmayan her türlü manevra kombinasyonunda da modelin doğru sonuçlar üretmesidir. Taşıt fiziğini bu derece geniş bir perpektifte taklit etmek de (simüle etmek) son derece zor bir mühendislik problemidir.

Bir karayolu taşıtını dinamik olarak tümünden modellemenin temel zorlukları sıralanacak olursa ;

1- Taşıt özellikleri lineer olmayan pek çok etki tarafından şekillendirilir. Lastik tekerlekler, tekerlek askı kollarındaki elastik burçlar bunlar arasında en fazla öne çıkanlardır.

2- Taşıt davranışlarından beklentiler çok çeşitli ve genellikle de çelişkilidir. Örneğin pek çok alt sistemin tasarımı için tipik çelişkiler konfor ile emniyet arasında yaşanır. Gerek sürücünün insan olmasından kaynaklanan belirsizlikler gerekse taşıtın içerisinde hareket ettiği çevreden kaynaklanan pek çok etken doğal değişim bantlarındaki sisteme etkileri ile sistem davranışı üzerinde ciddi belirsizlikler yaratmaktadırlar.

3- Bahsi geçen bu geniş beklentiler yelpazesi neticesinde, taşıtlar giderek daha karmaşık bir hal almakta ve davranışlarını mekanik elemanlardan çok, gün geçtikçe de artmak üzere, elektronik, elektrik, hidrolik ve pnömatik elemanlar belirlemektedir.

4- Taşıt kullanımı esnasında taşıta ait pek çok parametre ciddi değişikliklere uğramakta (yükleme durumu, lastiklerin durumu, amortisörlerin durumu gibi), bu da gerçek sistem davranışının simülasyonlarda kendisini belli etmesini engellemektedir.

Taşıt geliştirme sürecinde hesapsal yöntemler ve simülasyonlar her zamankinden çok aranır ve

kullanılır hale gelmişlerdir. Bu duruma birkaç sebep gösterilebilir :

- Gerçek sistem, geliştirme aşamasında henüz daha hayata geçirilmemiştir daha doğrudan bir anlatımla "yoktur", mevcut değildir.

- Gerçek sistemin meydana getirilmesi ve onunla deneyler yapılması çok pahalı ve zaman alıcıdır.

- Simülasyonlarda bozucu etkiler yok edilebilir ve ilgilenilen parametrelerin etkileri izole edilerek incelenebilir. Simülasyonlarda tekrarlanabilirlik özellikleri çok iyidir.

- Gerçek sistemdeki iç olayları anlamak ve büyüklükleri ölçmek, hatta alt sistemlerin ve tüm sistemin giriş ve çıkış büyüklüklerini ölçmek genelde çok zor ya da imkansızdır. Simülasyonlarda bu sayılan büyüklüklere her zaman ulaşılabilir.

En genel halde mekanik sistemlerin simülasyonunda 3 temel adım yer alır:

1- Gerçek fiziksel sistemin mekanik modelinin kurulması

2- Bulunan mekanik modeli ikame eden bir matematik modelin bulunması (eldesi)

3- Matematik modelin çözülmesi ve sonuçların yorumlanması (ve kullanılması)

"Simülasyon sonuçları, gerçek sistemin davranışına dair ancak bir yaklaşımdır." Bu yaklaşımın kalitesi ve başarısı ise temelde 2 etkenden etkilenir (Schnelle, 1990):

1-Mekanik modellemenin kalitesi,

2-Gerçek fiziksel sisteme ait parametrelerin doğru şekilde temini.

Taşıt dinamiğinde düşük frekanslı, büyük genlikli, doğrusal karakterli olmayan hareketler söz konusu olup, denklemlerin çözümü için izin verilen süreler de fazla uzun değildir. Karayolu taşıtlarının dinamiği araştırmalarında sistemin analitik olarak incelenmesi; doğrusal (lineer) olmayan sistem davranışları ve çok sayıdaki serbestlik derecesi gibi sebeplerle, çoğu zaman neredeyse imkansız hale gelir. Uygulamaların

önemli bir çoğunluğu için “Zaman Simülasyonu” yani hareket denklemlerinin zaman boyutunda nümerik integrasyonu tek kullanılabilecek metod olarak belirir.

Gerçek zamanda işletilecek bilgisayar destekli simülasyonlarda diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılacak integrasyon algoritmasının seçiminde Sailer (1996)'ya göre aşağıda sıralanan 4 hususa dikkat etmek gerekir:

- 1- Adım kontrollü metotlar uygun değildir.
- 2- İmpilisit yöntemler uygun değildir.
- 3- Çok adımlı yöntemler uygun değildir.
- 4-Mümkün olduğunca düşük mertebe yöntemler uygundur.

Dijital simülasyonun nüvesini dijital integrasyon olgusu teşkil eder. "Off-line" tipteki (herhangi gerçek bir sisteme bağlı olmayan tipteki) simülasyon çevrimlerinde otomatik adım kontrollü integrasyon algoritmaları çok popüler olmuştur. Ancak HiL uygulaması tipindeki bir simülasyon niyeti ile oluşturulan bir programda böyle değişken hesaplama adımı kullanılamaz. Bu çalışmada da bu sebeple hesap adımları sabit seçilecektir. Aksi takdirde her bir hesap adımı daha önceden kestirilemeyecek bir süre alır ve “katı” gerçek zaman şartlarının yaralanması riski artar. Sabit zaman adımları sayesinde simülasyonun önceden ne kadar süreceği de deterministik olur yani biliniyor. Özetle HiL uygulamalarında, ki geliştirilen sürüş simülasyonunun de ileri aşamaları böyle uygulamalar olacaktır, sabit adımlı integrasyon algoritmaları kullanılır. Bu algoritmalar kendi aralarında tek kademeli, çok kademeli, tek adımlı, çok adımlı gibi kategorize edilirler. Bunların kombinasyonları da mümkündür. Örneğin Heun algoritması çok kademeli tek adımlı bir yöntemdir. Pek çok taşıt tekniği uygulaması için en basit algoritma olan Euler algoritması (ya da Geliştirilmiş Euler Algoritması) günümüz hesaplayıcıları ile tatmin edici sonuçlar üretmektedir. Euler algoritması tek kademeli tek adımlı bir yöntemdir ve kendi doğası gereği aslında gerçek zaman uygulamalarına yatkındır. Bu çalışmada kullanılan geliştirilmiş euler algoritmasında verilmiş bir zaman adımı için, diferansiyel denklemdeki fiziksel

parametrelerin doğaları gereği çok fazla değişmemesi gerekir. Taşıt hareket büyüklüklerinin hemen hemen hepsi bu çalışmada seçilen 1ms'lik integrasyon adımı boyunca çok ciddi değişimler gösterecek karakterde değildir. Sadece tekerlek hareket denkleminin yüksek momentlerle zorlandığı durumlar için bir rahatsızlık beklenebilir.

Modelin temel özellikleri

Sürüş simülasyonuna baz olan tüm-taşıtlı model toplam 11 serbestlik derecesine sahip, içten yanmalı motoru, otomatik vites kutusu, arka aks indirgeme grubu ve diferansiyeli, direksiyon ve fren sistemleri olan, sanal binek taşıta ait doğrusal ve yanal dinamik başlıklı hareketlerin hesaplandığı, aerodinamik ve elastokinematik etkilerin hesaba katılabildiği bir yapıya sahiptir. Fiziksel modelin oluşturulması, denklemlerin yazılması gibi aşamalardan geçilerek kodundaki her satır ayrı ayrı tasarlanarak yazıldığından, tüm sistem, kontrol edilebilir, bilinmeyen etkiler içermeyen, modüler, geliştirilmeye açık ve hızlı işleyen bir yapıya sahiptir.

Taşıtlı modelinin serbestlik dereceleri :

- Taşıtlı gövdesi ağırlık merkezinin birincil hareketleri olan doğrusal ve yan yöndeki ötelenme ve düşey eksen etrafındaki dönme hareketleri (3 s.d.),
- Gövdenin ikincil hareketleri olan (ilgili eksenler etrafında) yalpa ve kafa vurma (2 s.d.)
- Taşıtlı tekerleklerinin yuvarlandıkları eksenleri etrafındaki dönme serbestlikleri (4 s.d.)
- İçten yanmalı motorun iş milinin dönmesi (1 s.d.)
- Saptırılabilen tekerleklerin king-pin eksenleri etrafındaki dönmesi (normalde 2 s.d.-ancak bu çalışmada sağ ve sol tekerlekler aynı miktarda saptırılmıştır (1 s.d.).

Taşıtlı modelinde yapılan önemli kabuller ve dikkate alınmayan (ve etkileri tahminen hayli az olan) bazı hususlar önem sırasına sokulmadan aşağıda sıralanmıştır:

- Motor ürettiği moment ve tükettiği yakıt itibarı ile sadece iki adet harita ile temsil edilmektedir.
- Aktarma organları elemanlarında herhangi bir esneklik ya da sönüm özelliği dikkate alınmamıştır.

- Taşıt tekerlek fren sistemi, tekerlek momentlerini fren pedalı kuvvetine lineer olarak bağlayan basit bir sistem olarak modellenmiştir. Tekerlek momentlerine ait salınımlar (toz, kir, yağ, sıcaklık, bağıl hız, farklı aşınma) gibi karmaşık etkiler de tabii olarak ihmal edilmiştir.

- Aks aralığı, "I" ve iz genişliği s_v ve s_H değerleri tekerleklerin yukarı-aşağı hareketlerinden dolayı değişmemektedir. Asılış sistemindeki kinematik ve elastokinematik etkiler, (süspansiyona ait ani dönme merkezlerinin değişiminden başlamak üzere) bu aşamada hesaplanmış ama simülasyon içine ithal edilmemiştir.

- Hava kuvvetleri sebebiyle akslardaki kaldırma kuvvetleri dikkate alınmamıştır.

- Yalpa ve kafa vurma modelleri karmaşık askı sistemi etkilerinden büyük ölçüde arındırılmış sadece temsili yay ve sönüm katsayılarını barındıran ikinci derece diferansiyel denklemlerle temsil edilmiştir.

- Saptırılan tekerlekler (ön tekerlekler) farklı değil aynı miktarda saptırılmaktadır.

- Taşıtın üzerinde seyrettiği yol pürüzsüzdür ve yol pürüzlülüğünden doğan zorlanmış bir titreşim mevcut değildir.

- Zemindeki küçük tutunma katsayısı değişiklikleri (heterojen tutunma özellikleri) dikkate alınmamıştır.

- Taşıt üzerinde herhangi bir elektronik kontrol simüle edilmemiştir.

Pnömatik lastik tekerlek modeli

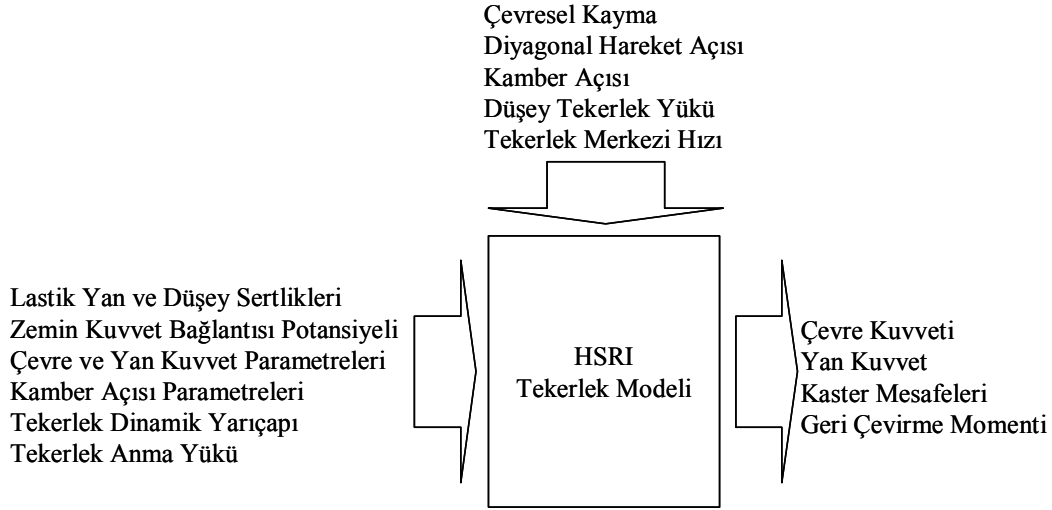
Cadde ya da diğer bir deyişle zemin ile, taşıt arasındaki bağlantının en önemli ve ilk ögesi olan tekerlek için, tahrik kuvvetlerini, fren kuvvetlerini, yan kuvvetleri ve düşey yükleri (tekerlek yüklerini) taşıdığı söylenebilir. Tekereğin davranışını hesap ortamına aktarmak, daha direkt bir anlatımla, tekereğin mekanik davranışını simüle etmek maksadı ile pek çok model ortaya konmuşsa da, bunların hiç biri konuyu analitik olarak tam çözememiş, netice olarak tekerleğe ait teorik araştırmalar ve deneysel çalışmalar bir türlü rafa kalkmamışlardır.

Günümüz seyir dinamiği modelleri lastik tekerlek ve zemin arasında gelişen kuvvetlerin ve momentlerin, çeşitli "işletme" ve "yapısal" parametreler etkisinde oldukça doğru olarak bilinmesine ihtiyaç duymaktadır. Lastik tekerleğin yapısı çok karmaşık olduğundan ve oluştuğu bileşenlerin özellikleri doğrusal olmayacak (nonlinear) şekilde pek çok parametreye bağlı olduğundan, lastik tekerleğin "konstrüksiyonundan ve kullanılan malzemelerden hareket edilerek" tekerlek anma haritalarının çıkarımı bugüne kadar mümkün olamamıştır. Bunun yerine bu haritalar ölçme teknikleri kullanılarak hazırlanmakta ya da bu haritalara benzer özellikler gösteren karakteristikleri elde etmek üzere analitik modeller ortaya atılmaktadır.

Bir sürüş simülöründe tekerlek modelinin, doğrusal ve yan yöndeki kaymaların kombinasyonunda, lastik düşey yüklerinin başta olmak üzere seyir hızının da dikkate değer etkisi altında ve karayolu tarafından sunulan tutunmanın limitine yakın şartlarda doğru cevaplar üretmesi gerekmektedir. Sıralanan bu şartlar dikkat edilirse "neredeyse lastiğin tüm işletme şartlarıdır."

Aslında lastik modeli kavramını özetleyen husus, tekerlek diyagonal hareket sertliklerinin, çevre kuvvetlerinin ve geri çevirme momentinin işletme noktasına bağlı olarak hesaplanması gerektiği hususudur. Bu çalışmada geliştirilen taşıt dinamiği simülasyon modelinde taşıtın sıfır hızından itibaren harekete başlaması ya da benzer şekilde sıfır hıza kadar yavaşlaması yani durması da baştan öngörölmüş bir hedef olduğundan (Frik, 1994)'te de belirtildiği gibi pek çok tekerlek modeli uygun olmayacak ve kullanılabilecek tekerlek modellerinin sayısı düşecektir. Tekerelek modellerindeki cebirsel denklemler genellikle ABS ya da ASR uygulamalarındaki hassas kalkış ve duruş kontrolleri hariç gayet stabil sonuçlar üretebilmektedirler. Bu çalışmada kullanılan HSRI tekerlek modeli lastik tekerlek modellerinin en iyi temsilcilerinden biridir.

Şekil 1'de model giriş ve çıkış büyüklükleri ile temsili olarak gösterilmiştir. Sol taraftaki giriş değerleri herhangi bir pnömatik lastik tekerlek



Şekil 1. Lastik modeli kara kutu gösterimi

için (iç basınç ve aşınma durumu sabit iken) sabit olan ve ölçümlerden elde edilebilecek olan parametreler ile bir takım zemin durumu parametreleridir. Üstteki parametreler taşıtın seyir durumuna ve dolayısı ile lastiğin o anki işletme şartlarına bağlı parametrelerdir. Sağ tarafta ise modelin hesapladığı parametreler (diğer lastik tekerlek modellerinde de olduğu gibi) görülmektedir. Şekilde geri çevirme momenti gösterilmemiştir.

Sürücü-taşıt-çevre kontrol çevriminin kritik seyir durumlarındaki davranışını temsil edebilmek üzere lastik tekerleklerin doğrusal olmayan özelliklerini simülasyona ithal etmek gerekmektedir (Risse 1991). Bu husus özellikle kuru zemin harici tutunma durumlarında, lastiğin lineer davranış bölgesi dışına çok hızlı çıkılacağından oldukça önemlidir (Çalışmanın bu aşamasında yol kaplaması kuru olarak incelenmiş olup, simülasyonda ilgili parametreler değiştirilerek diğer zemin şartlarına geçilebilmektedir). Yan kuvvetin yavaş gelişimi de bu çalışma kapsamında dikkate alınmamıştır.

$$\ddot{\phi}_T = \frac{(M_{Tahrik} - M_{Fren}) - F_x \cdot r - F_R \cdot r}{J_{T,indir}} \quad (1)$$

(1) denklemi ile verilen "tekerlek hareket denklemi" tekerlek tahrik miline gelen ve motordan kaynak bulan (pozitif ya da negatif) moment, tekerlek fren sistemi üzerinde bulunan ve fren

sisteminden kaynaklanan moment, zeminde belirli bir çevresel kayma, diyagonal hareket, düşey yük ve zemin şartları neticesi gelişme imkanı bulan çevre kuvveti ve tekerleğe etkiyen yuvarlanma direnci arasındaki hassas dengeler üzerine kurulmuş, fevkalade önem arz eden, bu simülasyonun omurgasını oluşturan iki ana denklemden biridir. Doğrusal dinamik bilgisayar ortamında bu denklem ile hayat bulmaktadır (İkinci omurga denklem ise diyagonal hareket açısı - tekerlek sapması - tekerlek merkezi hızları arasındaki denklem olup, yanal dinamiğin çıkış noktası da bu denklemdir).

Tekerlek askı sistemi modeli

Taşıt yürüyen aksamında temel hesaplama ve simülasyon alanları, elastokinematik, seyir dinamiği, yapı dinamiği ve mukavemettir (Willumeit, 1991). Bu çalışma kapsamında modellenen binek taşıtın askı sisteminin modeli ADAMS /Car bilgisayar yazılımında yapılmış ve sisteme ait (kinematik) çalışma haritaları çıkarılmıştır.

Seyir dinamiği modellenmesi ve simülasyonunda asılış sistemlerinin hareketlerinden doğan karmaşık kinematik ve elastokinematik hareketlerin çözülmesi için temelde 3 seçenek mevcuttur:

- 1- Simülasyondan önce çözümlenerek hazırlanmış asılış haritaları,
- 2- Simülasyon esnasında çözümleme,
- 3- "Deney standı ölçümleri" ile hazırlanan haritalar.

ADAMS/Car süspansiyon modellemesindeki kabuller ise:

- Mc Pherson asılış sisteminde alışılmış olan alt salıncağın üçgen bir tabladan oluşmasıdır. Oysa model doğrulama çalışmalarına konu olan gerçek deney taşıtında ön aks asılışının alt salıncağı iki ayrı koldan oluşmaktadır. Simülasyonda bu husus dikkate alınmamıştır.

- Gövde yayları için kuvvet-uzama, sönümleyiciler için kuvvet-hız haritaları tahmin edilmişlerdir.

- Direksiyon sistemi elektronik kontrollü, seyir hızına bağlı servo destekli bir direksiyon sistemidir (ZF Servotronic). Kuvvet karakteristiği tam olarak bilinmemektedir. Bilinse dahi bu çalışmada muayyen bazı noktalar hariç direksiyon simidi momenti üzerine detaylı etüd yapılmamıştır.

- Arka aks tasarımında bazı konstrüktif ayrıntılar hiç dikkate alınmamıştır. Bu da uzaysal hareketlerde tabii olarak kendini göstermektedir.

- Gerek ön gerekse arka aksta aks taşıyıcılarının gövdeye bağlantı bölgelerindeki burç sertlikleri tahmin edilmiştir.

- Arka akstaki asılış sistemi seviye kontrollü olup, bu husus dikkate alınmamıştır.

- Tüm yukarıda sayılan hususların da ötesinde süspansiyon sisteminin boyutları bir takım fotoğraf ve şekillerden türetilmiştir.

Direksiyon ve fren sistemi modeli

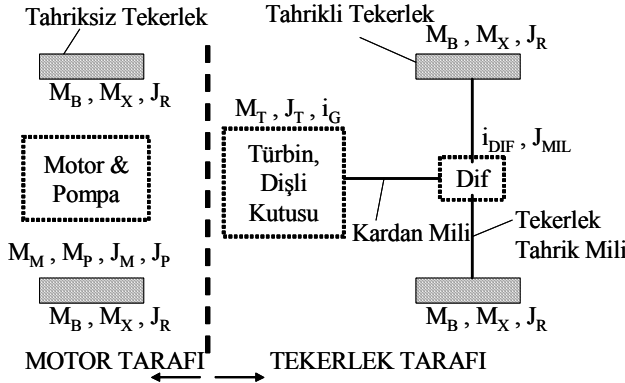
Direksiyon sisteminin temel görevi direksiyon sapma açısını mümkün olduğunca tanımlanabilir bir ilişki ile saptırılan tekerleklere aktarmak ve ters yönde de taşıtın seyir durumu hakkında gelecek uyarıları da sürücüye aktarmaktır. Bu çalışmadaki söz konusu simülasyonlarda direksiyon saptırma açıları çok küçük olduğundan sağ ve sol tekerleğin farklı sapmaları dikkate alınmamıştır. Oysa yapılan ADAMS/Car modelinde bu tablo hemen elde edilip kullanılabilir. Direksiyon sistemine ait toplam bir elastiklik

ayrı bir katsayı ile dikkate alınmıştır. Sağ ve sol ön tekerlek sapmalarının aynı kabul edilmesi küçük hızlar hariç, diğer hızlarda tekerleklerin gerçekte çok yakın ve küçük açılarda sapmasından dolayı önemli bir hata getirmeyecektir. Bu denklemlerde ayrıca sürtünme (histerezis) ve boşluklar da ihmal edilmiştir. Hızlı seyir esnasında direksiyon momentine, ön aks tekerleklerine etkiyen tahrik ve fren momentlerinin etkisi hesaplanabilir. Bu çalışmadaki taşıtta ön aksta tahrik momenti mevcut değildir. Fren kuvvetlerinin etkileri ise ihmal edilmiştir. Fren pedalından itibaren, tekerlek frenlerine ulaşılan dek sistemin lineer bir davranış gösterdiği ve bu davranışın da temel olarak sistemin geometrik boyutlarından kaynaklandığı kabulü yapılmıştır. Çalışmanın özü fren sisteminde olmadığından fren sistemi konstrüksiyonuna bağlı tüm ilişkiler tek bir katsayı bünyesinde toplanmıştır. Bu durumda fren sistemi kırık karakter dahi içermeyecek şekilde tekerlek fren kuvvetlerini, fren pedalı kuvvetine "lineer" olarak bağlamaktadır.

İçten yanmalı motorun temsili ve aktarma organları modeli

Aktarma organları bir hidrodinamik dönüştürücü, mekanik çevrim oranlarını sağlayan planet mekanizmaları ve arka akstan ibarettir. Hidrodinamik dönüştürücü ve vites değiştirme algoritmasının doğru programlanması burada oldukça kritik noktalardır. Dönüştürücü pompa ve türbin çarkı arasındaki bağlama kavraması bu aşamada ihmal edilmiştir. Aktarma organlarındaki tüm elemanlar için rijit cisim kabulü yapılmış, burulma esneklik ve sönümleri ihmal edilmiştir. Bu model kapsamındaki çözümler bir sebep-sonuç zinciri şeklinde ele alınmaktadır. Model elemanlarının kendilerine ait temel hareket büyüklükleri olan momentler ve devir sayıları sırası ile bir sebep-sonuç ilişkisi şeklinde hesaplanmaktadır (örnek Brendecke, 2002). Otomatik vites kutusu bünyesinde bulunan hidrodinamik dönüştürücü sebebi ile aktarma organları iki ayrı kısma ayrılmaktadır. (Şekil 2). Bu amaçla "motor tarafı" ve "tekerlek tarafı" terimlerini ileri sürmek yerinde olabilir. Ayrıca tahriksiz ön tekerleklerin her birini de ayrı ayrı bir kısmi sistem olarak ele almak uygun görülmüştür. Otomatik bir vites kutusundaki trilok dönüştürücüde

pompa çarkı motor çıkış mili ile direkt bağlıdır. Bunun anlamı pompa çarkı devir sayısının motor devir sayısı ile eşit olmasıdır. Türbin çarkı ile pompa çarkı arasında kaymalı çalışmaya imkan veren bir yağ bulunur. Bu durumda tüm aktarma organları kendi içinde katı bağlı olan iki kısma ayrılmış olur. Bu durumda ivmelenme esnasında gerekli türbin momenti, taşıt dirençlerini içeren denklemden, pompa momenti ise dönüştürücü karakteristiklerinden elde edilir.



Şekil 2. Aktarma organları prensip şeması

Motor, literatürde de bu tip çalışmalarda sıkça rastlandığı üzere bir interpolasyon tablosu şeklinde motor momentinin devir sayısı ve gaz keleşliği açıklığı ile değiştiği üç boyutlu bir karakteristiktir. Çalışmaya konu olan taşıt standart tahrikli olduğundan, ön aks tekerleklerinde sadece fren momentleri gelişebilir. Arka aks tekerleklerinde ise hem tahrik hem de fren momentleri vardır. Tahrik ya da fren momentleri aynı aks üzerinde her iki tekerleğe eşit olarak dağılmaktadır. Tek taraflı çeken frenler ya da tekerleklere momenti farklı dağıtabilen bir tahrik aksı hesaplara dahil edilmemiştir, ancak istenirse edilebilir. Bu çalışmada, (Jauch, 1989)'dakine benzer şekilde, çok fazla sayıda vites kutusu iç parametresini dikkate almamak ve simülasyonu çok detaylandırmamak için, "lineer bir çevrim oranı değişimi" kabul edilmiştir. Örneğin 1. vitesten 2. vitesine geçişte o vites geçişi için bağımsız bir parametre olarak ele alınan gecikme süresi boyunca çevrim oranının 1. vitesinkinden 2. vitesinkine lineer olarak değişmesi sağlanmaktadır. Ayrıca otomatik vites kutu kumandalarında alışıldığı üzere taşıt içi kumanda kulvarı da modellenmiş olup, vites

kademesi için 1, 2, 3 ya da D konumlarını seçmek mümkündür. Örneğin 2 konumu seçildiğinde vites kutusu kademeyi 2. kademedan fazla büyütmeyecektir.

Seyir dirençleri

Tekerlek direnci

Kalkış da dahil tüm seyir hızı bölgesinde, düz, kuru ve iyi sıkıştırılmış asfalt zeminlerde tekerlek direnci iyi bir yaklaşıklıkla sadece yuvarlanma direncinden ibarettir ve seyir hızının artması ile artar. Bu çalışma kapsamında tekerlek yükleri hesaplanırken, ilgili program modülü içinde, yol eğimi ya da hava kaldırma kuvvetleri gibi tekerlek yüküne etki yapabilecek her türlü bileşen dikkate alınmaktadır. Temel ifade, herhangi bir seyir anı için, uygun şekilde hesaplanmış tekerlek yükünü kullanan ifadedir. Herhangi bir tekerlek göbeğinin taşıt uzunlaşmasına eksenine paralel yöndeki hızı 0.5 m/s'nin altında ise yuvarlanma direnci hesaplanmamakta ve sıfıra eşitlenmektedir.

Dönemeç direnci

Dönemeç hareketinde her bir tekerlekte ihtiyaca göre yan kuvvetler gelişmektedir. Bu yan kuvvetlerin seyir yönünün aksi yöndeki bileşenlerinin tüm-taşıtlı ilgili kuvvet denklemlerinde dikkate alınması ile dönemeç direnci hesaba katılmaktadır.

Hava direnci

Kara taşıtları gibi yere yakın ve karmaşık şekilleri olan cisimler için aerodinamik tanımlayıcı parametrelerin "hesaplanması" bugüne dek mümkün olamamıştır. Bu bakımdan taşıt aerodinamiğinde sözü geçen tüm aerodinamik katsayılar deneysel olarak tayin edilir. (Mitschke, 1995) Bu çalışmaya konu olan taşıtın, hücum açılarına bağlı aerodinamik katsayı haritaları bilinmediğinden hava direnci dışında kalan diğer aerodinamik kuvvetlerin gelişimi hakkında çok detaylı hesaplara girilememiştir. Bu hususlara ilaveten 15 m/s'nin altındaki taşıt seyir hızlarında yan rüzgarların taşıt dinamiğini pek rahatsız etmediğini de belirtmek yerinde olur.

Yokuş direnci

Çalışma kapsamındaki virtüel yolun geometrisinde yokuşlar ve inişler mevzu bahis olmama-

sına rağmen denklemlerde yine de (Mitschke, 1995) yokuş direnci kullanılmıştır.

İvme direnci

Burada (Mitschke, 1995)'te ve (Atabay, 1996)'da detayları ile verilen ivme direncinin hesabı ve detayları üzerinde fazla durulmayacaktır. Ancak aktarma organları toplam çevrim oranına göre her bir vites kademesi için seçilen dönen kütle faktörleri ivme direnci ifadesi içine yerleştirilecektir. Bu çalışmadaki gibi hidrodinamik değiştiricili otomatik vites kutusuna sahip bir taşıt için dönen kütleler faktörü (Mitschke, 1995)'te verilmiş ilgili diyagramdaki değerlerden oldukça farklı değerler arz edecektir. Aktarma organları motordan tekerleklere dek tek bir dönen kütle sistemi olmayıp arada bir sıvı bağlantısı mevcuttur. Bu durumda dönen kütleler faktörlerinin değerleri her bir vites kademesi için çok daha küçük değerler arz edecektir.

Gövde modeli

Tüm taşıt için Şekil 3'e göre doğrusal ve yan yönde ve düşey eksen etrafında kuvvet dengesi denklemleri yazılırsa, taşıt için düzlemsel dinamiğin denklemleri belirir. Burada ayrı ayrı tekerlek dönme miktarları ile çarpılarak kullanılan çevre kuvvetleri ve yan kuvvetler, aslında kodun içinde daha pratik ve net bir yaklaşımla tekerlek modülünün birer çıktısı olarak karoseriye indirgenmektedirler.

(Mitschke, 1990)'da verilen doğrusal ve yanal yöndeki ivmeler etkisinde tekerlek yüklerinin basitleştirilmiş hesabı, (Daiss, 1996)'da yapılan deneylere göre gerçek yük değişimleri ile son derece iyi uyum göstermektedir. Aslında yürüyen aksam mühendislerinin de temel amacı gerek kafa vurma gerekse yalpa titreşimlerini engellemek olduğundan, normal şartlarda bu hareketlerin sadece atalet kuvvetlerine bağlı olarak titreşimsiz olarak hesabı (bu çalışmada da izlenen yöntem bu olmuştur) çok büyük bir hataya neden olmaz. Tekerlek yükleri statik ve dinamik bileşenlerden oluşur. Duran taşıttaki denge denkleminde statik aks yükleri hesaplanabilir. Taşıt dinamik aks yükü bileşenleri, bu çalışma kapsamında yol pürüzlülüğü ve yol eğimleri dikkate alınmadığından sadece, doğru-

sal ivmeler (hızlanma ve yavaşlama) ve yanal ivmeler (dönemeç hareketi) sebebi ile gelişir.

Tüm-taşıt modeli

Modellemede kullanılan modüler yapının (Şekil 4) getirdiği avantajlar aşağıda sıralanmıştır :

- Tüm alt modellerin hesaplama çekirdeğine kolay ve diğerlerinden bağımsız olarak ulaşılmaktadır. Bir alt modeli geliştirecek olan kimse diğer alt modellere erişme ihtiyacı duymayacaktır. Alt model ara birim parametreleri (interface) rahatlıkla değiştirilebilmekte ve genişletilebilmektedir. Bu arabirimler ayrıca kesin olarak tanımlıdır.

- Alt modeller -ara-birimleri uyum gösterdiği sürece- rahatlıkla yenileri ile (daha karmaşık ya da daha basit olanları ile) değiştirilebilecektir.

- Alt-modeller tüm taşıt modelinden bağımsız olarak da çalıştırılabilir ve alt sistem incelemeleri yapılabilir.

- Alt sistemler ihtiyaç duyulursa uygun ve daha yüksek integrasyon adımları ile çalıştırılabilir ve bu sayede hesap zamanı kazanılabilir. Uygun metotlarla alt sistemler paralel hesaplayıcılara dağıtılabilir.

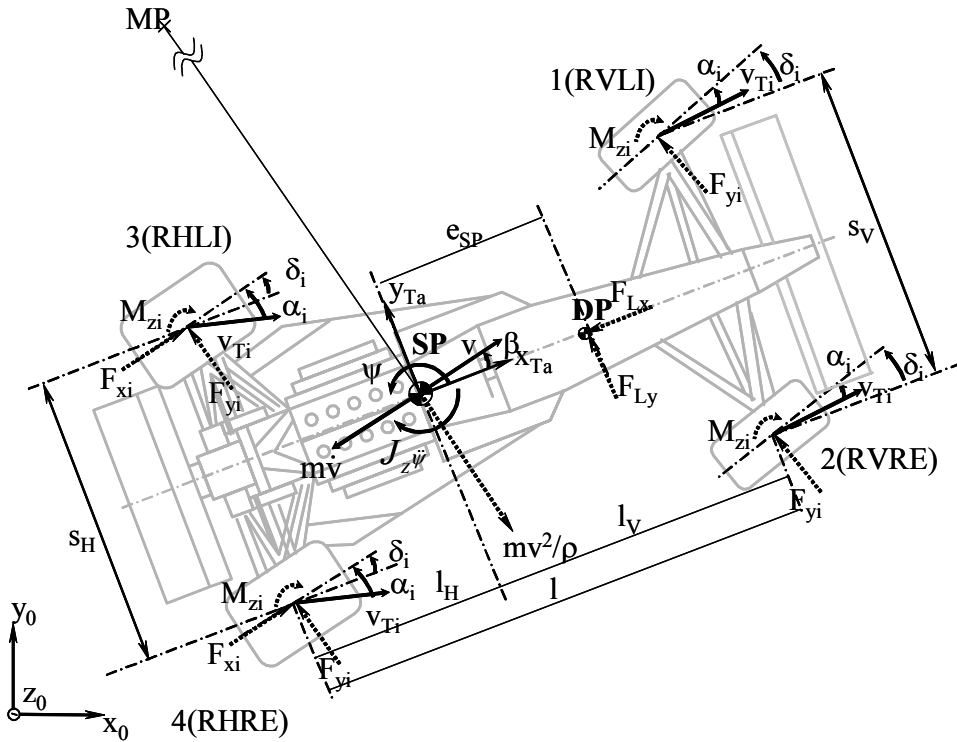
Taşıt modeli için çalışma modları olarak simülatör Çalışması (On-line çalışma) ve veri tahrikli çalışma (Off-line çalışma) sayılabilir. Veri tahrikli çalışmada "sanal bir sürücü robotu" tarafından taşıt modeli kumanda edilmektedir. Bu tip çalışmada taşıt modeline giriş değişkenleri olarak, zaman, gaz pedalı konumu, fren pedalı kuvveti, direksiyon simidi sapması ve vites kolu pozisyonu [1,2,3 ya da D] beslenmektedir.

Tüm-taşıt modeli doğrulama çalışmaları

Öncelikle taşıt modeli veri tahrikli çalışma modunda doğrusal dinamiğe ait bazı köşe değerler oluşturmak üzere çalıştırılmıştır. Bu çalışmalar kavramsal olarak sanal ortamda "sanal sürücü robotu" tarafından sürülmüş açık çevrim testleri de sayılabilirler. (Tablo 1) Sanal sürücü robotu

ile veri tahrikli çalıştırmada çok daha karmaşık manevraları da taşıt modeline kolayca koşturmak mümkündür. Bu amaçla bazı yol deneyleri yapılmış ve bu deneylerden bazı pasajlar, doğrulama maksatlı olarak ölçüm verilerinden ayıklanmıştır. Büyük yarıçaplı yüksek hızlı bir oto-yol dönemeç hareketi yapılan gerçek yol deneylerine bir örnek olarak buraya ithal edilmiştir. Sanal ve gerçek taşıt için ağırlık merkezi yörünge koordinatları Şekil 5'te görülmektedir. Ölçülen koordinatlar ile (koordinatlar kayde-

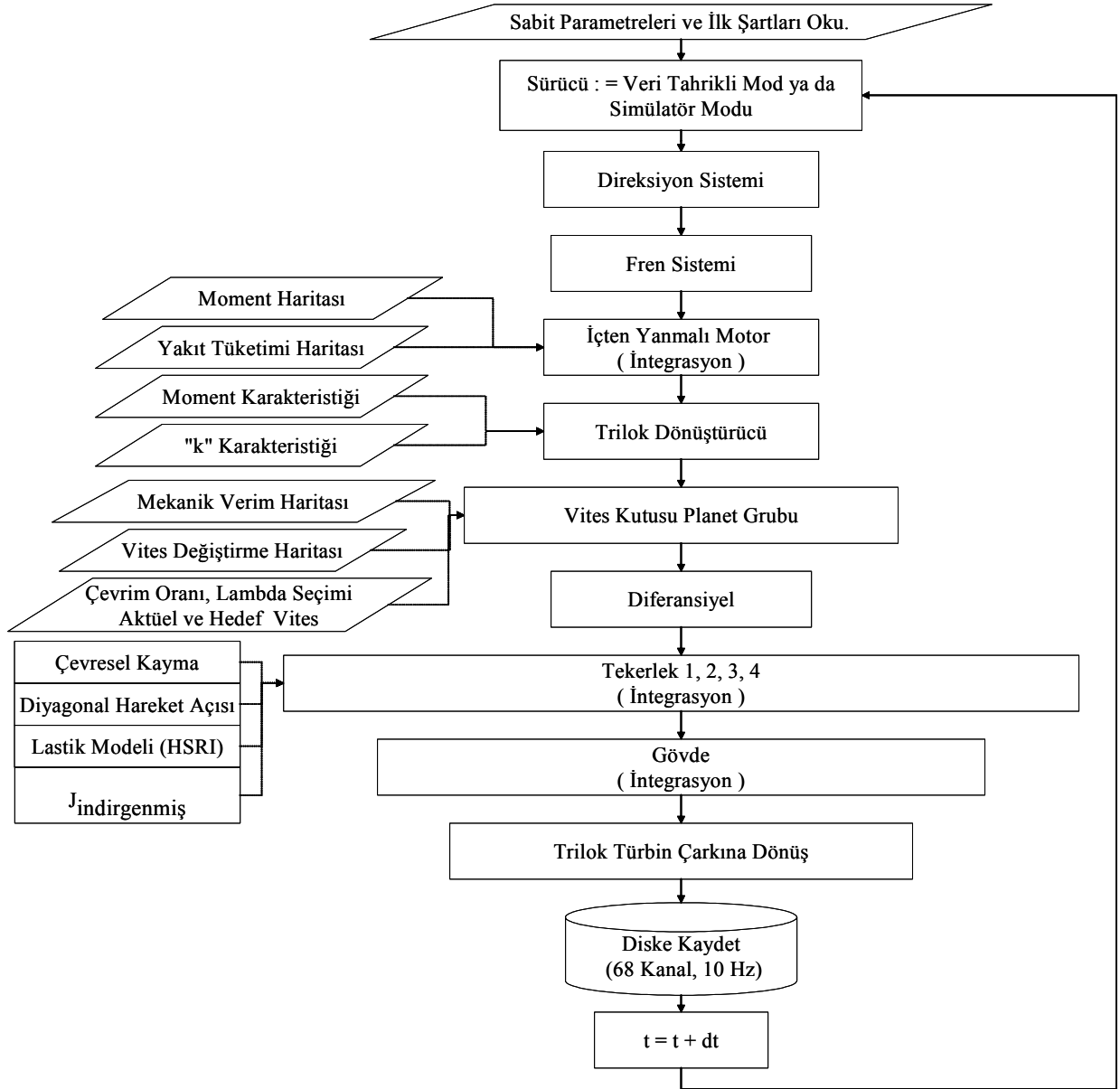
dilen verilerden hesaplanmıştır) simüle edilenler arasında iyi bir uyum olduğu ifade edilebilir. Doğrulama çalışmaları, burada ayrıca gösterilmemiş olmakla birlikte, quasistasyonel dairesel hareket (hızın yavaşça artırıldığı, dönme yarıçapının sabit tutulduğu dairesel hareket) ve sinüs direksiyon simidi sapma manevrası için de yapılmıştır. Şekil 6'da ise tüm-taşıt modelinin kullanıldığı ve doktora tez çalışması kapsamında diğer öğeleri de geliştirilen SürTak sürüş simülasyonu görülmektedir.



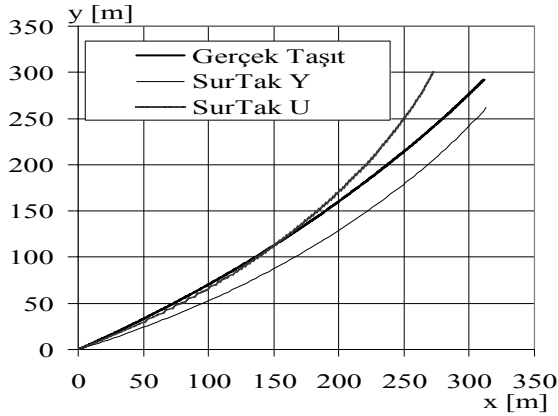
Şekil 3. Karayolu taşıtı düzlemsel hareketi

Tablo 1. Sanal ve gerçek taşıt doğrusal dinamik cevapları

	Sanal Taşıt	Gerçek Taşıt
Azami Hız [km/h]	239	243
İvmelenme Performansı [s] (0-50 km/h)	2.9	3.2
İvmelenme Performansı [s] (0-80 km/h)	5.3	5.3
İvmelenme Performansı [s] (0-100 km/h)	7.5	7.4
İvmelenme Performansı [s] (0-120 km/h)	10.0	9.8
İvmelenme Performansı [s] (0-200 km/h)	29.5	-
Duruştan Kalkış Performansı [s] (0-1000 m)	27.7	27.3
Frenleme Performansı [m] (100-0 km/h)	51	-
Yakıt tüketimi [l / 100 km] (Tam yükte sürekli)	36	-
Yakıt tüketimi [l / 100 km] (90 km/h sürekli)	10	-
Yakıt tüketimi [l / 100 km] (120 km/h sürekli)	13	-



Şekil 4. Tüm-taşıtlı modeli hesap akışı



Şekil 5. Yol deneyi - büyük yarıçaplı dönemeç hareketi - taşıtlı ağırlık merkezi koordinatları



Şekil 6. SürTak sürüş simülörleri

Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada, tekerlek hareket denkleminin kullanılması lastik modeline özel bir vurgu yapılmış ve tekerlek kuvvetlerinin herhangi şekilde simülatör işletmesinde istenmeyen değerler alması önlenmiştir. Ayrıca tekerleğin sıfır olan bir ilk hızdan hareketinde kabul edilebilir bir integrasyon adımı için nümerik stabilite sağlanmıştır. Programlama yapısındaki azami netlik ve açıklık modüllerin yenileri ile değiştirilmesine imkan vermektedir. Modüller arası arabirimler tam ve kesin olarak tanımlıdır. Tüm-taşıtlı modeli çok rahat bir şekilde diğer kara taşıtlı tiplerine adapte edilebilir. Tüm-Taşıtlı modelinin kullanıldığı sürüş simülatörü, seri imalattan çok önce, taşıtlı dinamiği ile ilgili hemen her türlü deneyin, sanal bir ortamda, tehlikesiz, tekrarlanabilirlik özellikleri mükemmel deneylerle araştırılmasına olanak sağlayacaktır.

Semboller

$\ddot{\phi}$:tekerlek açısal ivmesi (rad/s^2)
HiL	:hardware in-the-loop(çevrim içi donanım)
F_x	:tekerlek çevre kuvveti [N]
F_R	:tekerlek direnci [N]
$J_{T,indir}$:tekerlek miline indirgenmiş motora, aktarma organlarına ve tahrik aksamı kapsamında dönen tüm elemanlara ait toplam (indirgenmiş) atalet momenti [kgm^2]
M	:moment [Nm]
r	:tekerlek statik yarıçapı [m]

Kaynaklar

- Allen, R.W., Rosenthal T. J., (1994). Requirements for vehicle dynamics simulation models., *SAE Technical Paper 940175*.
- Atabay, O., (1996). Taşıtlarda aktarma organlarındaki dönen kütlelerin toplam ataletin ve toplam verimin deneysel olarak bulunması. *Yüksek Lisans Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*.

- Brendecke, T., (2002). Virtuelle echtzeitumgebung für getriebesteuergeraete mit hardware-in-the-loop. *Schriftenreihe des IfF, TU Braunschweig. Nr. 1*.
- Daiss, A., (1996). Beobachtung fahrdynamischer Zustände und Verbesserung einer ABS- und Fahrdynamikregelung. *VDI Fortschrittberichte. Reihe 12. Nr. 283*.
- Dragon, L., (1998). Das Fahrwerk aus Sicht der Fahrdynamiksimulation, 7. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*.
- Frik, S., (1994). Untersuchungen zur erforderlichen Modellkomplexität bei der Fahrdynamiksimulation. *VDI Fortschritt-Berichte. Reihe 12 Nr. 208*.
- Jauch,F., (1989). Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation, *Dissertation, Universitaet Stuttgart, Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik*.
- Mitschke, M., (1990). Dynamik der Kraftfahrzeuge Band C Fahrverhalten, *Springer-Verlag*.
- Mitschke, M., (1995). Dynamik der Kraftfahrzeuge Band A, Antrieb und Bremsung, *Springer*.
- Risse, H.-J., (1991). Das Fahrerverhalten bei normaler Fahrzeugführung. *VDI Fortschrittberichte. Reihe 12. Nr. 160*.
- Sailer, U., (1996). Nutzfahrzeug-Echtzeitsimulation auf Parallelrechnern mit Hardware-in-the-Loop, *Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen Uni Stuttgart, Band 1, Expert Verlag*.
- Schnelle, K-P., (1990). Simulationsmodelle für die Fahrdynamik von Personenwagen unter Berücksichtigung der nichtlinearen Fahrwerkskinematik, *VDI Fortschrittberichte Reihe 12 Nr. 146*.
- Willumeit H-P., (1991). Computergestützte Berechnungsverfahren in der Fahrzeugdynamik, *VDI Verlag, Düsseldorf*.
- Zamow, J., (1994). Beitrag zur Identifizierung unbekannter Parameter für fahrdynamische Simulationsmodelle. *VDI Fortschrittberichte. Reihe 12 Nr. 217*.