

# Hibrid elektrikli araçların modellenmesi ve kural tabanlı kontrolü

Ali BOYALI\*, Levent GÜVENÇ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

*Hibrid elektrikli araçlar, atmosferi kirletmeyen taşıtların geliştirilmesinde ara çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Global ısınmaya neden olduğu ve insan sağlığına zarar veren kirletici gazlar açığa çıkartmaları nedeniyle içten yanmalı motorlar ile çalışan yol taşıtlarında emisyonlara sıkı sınırlamalar getirilmekte, yenilenebilir ve temiz enerji üzerine yapılan çalışmalar giderek yoğunlaşmaktadır. Yakıt hücresi ve hidrojen enerjisi ile çalışan araç teknolojilerinde, hidrojen yakıtının doğada saf halde elde edilememesi ve bu nedenle hidrojen elde ediminde fosil yakıtlar ile çalışan santrallerin kullanılması, daha az ya da hiç karbon içermeyen yakıtların yol taşıtlarında kullanılmasında engel teşkil etmektedir. Bataryaların fosil yakıtlara göre enerji kapasitelerinin ve sağladıkları menzil miktarının çok düşük olması nedeniyle, hibrid elektrikli araçlarda, içten yanmalı motorların düşük verim ile çalıştığı bölgelerde bataryalar yardımcı güç kaynağı olarak kullanılmakta, dolayısı ile araç seyahati süresince içten yanmalı motorların ortalama verimleri daha yüksek tutularak yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Hibrid elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmalar, sıfır emisyonlu araç teknolojilerinin alt yapısını da güçlendirmektedir. Hibrid elektrikli araçlarda ana problem, bir araya getirilen bileşenler arasındaki güç dağılımının, araç seyahati esnasında gerçek zamanlı olarak hesaplanabilmesi problemidir. Ticari hibrid elektrikli araçlarda, kural tabanlı kontrol yöntemleri ve mekanizmaları kullanılmaktadır. Hibrid elektrikli araçlarda bu kısıtlamaların giderilebilmesi için, gerçek zamanlı kullanılacak optimizasyon yöntemleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Hibrid elektrikli araçlar, modellenmesi, kural tabanlı kontrol.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ali BOYALI. boyali@itu.edu.tr; Tel: (212) 235 18 73.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Hibrid elektrikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 24.07.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 15.09.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Modeling and rule based control of hybrid electric vehicles

### Extended abstract

*The increase in temperature of atmosphere is mostly attributed to human activity due to the combustion products of excessively used fossil fuels. These products create greenhouse effect whereby the planet's surface temperature increases. Use of renewable and clean energy sources is the best solution to reduce increase rate of warming, to mitigate the results of climate change and not to go beyond the irreversible point for the sustainability of life on the planet.*

*The second major source of green house gases comes after electricity generation is transportation sector due to increasing traveling demand as well as its fastest growing rate. There are stringent emission limits stipulated by governors. The proposed emission limits for near future can no longer be satisfied by Internal Combustion Engines (ICE) despite the good advancements in engine technologies.*

*There are numerous studies to adapt clean energy sources on road vehicles. Hydrogen and pure electric energy is seen as an excellent solution for zero emission vehicles. But there are some obstacles for both power sources. The use of hydrogen as common fuel in internal combustion is seen to be unfeasible in immediate future, due to storage, production and availability problems. Hydrogen is not an energy source but it is an energy carrier. Besides this its well-to-wheel efficiency is low with respect to fossil fuels. As to batteries, their poor energy density and long charging time hampers the use of batteries as main power source in on road vehicles. The best solution is to use less or carbon intensive fuels or increasing average efficiency of ICE by using secondary power source in the vehicle.*

*Hybrid vehicles which combine at least two power sources are temporary solution on the way of zero emission vehicles. Hybridization provides means of fuel consumption and emission reduction. Using secondary power source allows down-sizing the engine. Smaller engines operate more efficiently than bigger ones since internal combustion engines are designed to operate efficiently at high loads. Recuperation of the thrown energy and engine stop operation are another advantages of hybrid vehicles in*

*fuel economy. Power distribution strategy between energy sources and wheels is of great importance to exploit hybrid vehicles' features and this may give satisfactory results even in the situations where engine down-sizing and idle stop cannot be implemented.*

*Power management is a complicated global optimum problem since it involves too many objectives such as fuel consumption and emission reductions as well as drive-ability and acceleration performance of hybrid vehicle.*

*Dynamic Programming (DP) technique generally is used to solve global optimum problems with non-linear constraints. Due to the computational burden and uncertainty in driver's power demand, dynamic programming technique cannot be handled real-time with available computation technologies. Optimum power split strategy is determined off-line for a given drive cycle and control rules are extracted at the end of DP solution.*

*There are alternative techniques developed that give sub-optimal solutions approaching global optimum results and can be implemented real-time. These methods are based on finding optimum power split ratio in a time interval by applying predictive control or finding instantaneous optimum power split by using equivalent fuel consumption methods.*

*The vehicle speed profile in shorter time intervals is estimated and DP solution is computed for optimum power split in model predictive control methods. Equivalent fuel quantity of battery energy is converted by using mean efficiencies for a defined cycle and then best power split ratio is chosen.*

*Modeling and rule based control methodology of a converted vehicle is explained in this study. The Ford Transit light commercial vehicle is converted to a hybrid electric vehicle. Since it has front and rear wheel drive versions are available in the market, mounting an electric motor to rear axle of front wheel drive version resulted in a parallel hybrid electric vehicle. The construction of longitudinal hybrid electric vehicle models is given. The use of these models to develop rule based control and simulation results are given.*

**Keywords:** Hybrid electric vehicles, rule based control.

## **Giriş**

Dünya nüfusundaki artış, sanayi kollarının giderek büyümesi, üretim ihtiyacını dolayısıyla enerji gereksinimini de artırmaktadır. Günümüzde elektrik ihtiyacının büyük bir kısmı fosil yakıtlar ile karşılanmaktadır. Elektrik üretiminden sonra, fosil yakıtların en çok kullanıldığı sektör, enerji kullanımı artış hızı en yüksek olan ulaşım ve ulaştırma sektörüdür (EPA, 2005 ).

Fosil yakıtların yakılması sonucunda insan sağlığına zarar veren kirletici gazlar açığa çıkmakta ve karbon dioksit gibi atık gazlar atmosferde sera etkisi yaratmaktadır. Küresel ısınma tehdidi, hava kirliliği ve fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle araştırma ve geliştirme faaliyetleri yenilenebilir ve doğaya zarar veremeyecek temiz enerji kaynakları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Şubat (2007) ayında hükümetler arası iklim değişikliği üzerine yapılan panelde, karbon içeren yakıtların dünya üzerindeki yaşamı tehdit etmesi nedeniyle, küresel ısınma ve atmosfer kirliliğinin azaltılması için enerji üretiminde daha az ya da hiç karbon içermeyen yakıtların kullanılması ve enerji dönüşümlerinde verimliliğin artırılması gibi önlemlerin alınması vurgulanmaktadır (Alley vd., 2007). Bu gerçekler nedeniyle, ulaşımın büyük bir bölümü yol araçları ile gerçekleştirildiğinden, ülke yönetimleri, kara yolu araçlarının egzoz emisyonlarına giderek daralan sınırlar getirmekte, taşıt üreticileri mevcut teknolojilerini geliştirmek için araştırma kurumları ile çeşitli çözüm projeleri üzerinde çalışmalarını artırmaktadır.

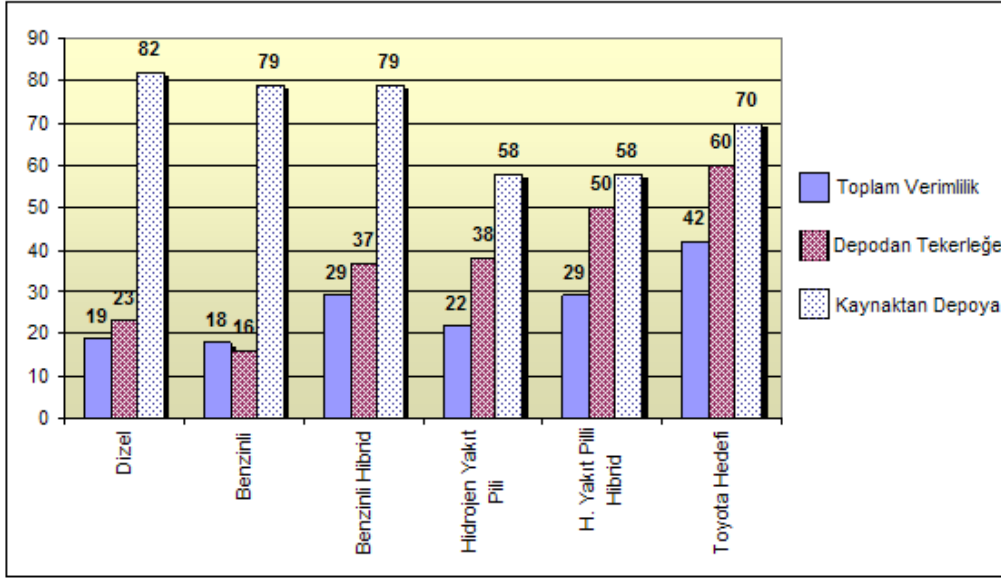
Petrol türevi yakıtlar ile çalışan içten yanmalı motorlar, motor teknolojilerinin gelişmesine rağmen bugünkü durumda en yüksek %40 verim civarında çalışabilmektedirler (Boyalı vd., 2006). Yakıtın yanması ile açığa çıkan enerjinin büyük bir bölümü ısı olarak dışarı atılmaktadır. Temiz ve daha verimli yol taşıtları için önerilen alternatiflerden biri de hidrojenin yakıt olarak kullanılmasıdır. Yanması sonucunda yalnızca su buharı açığa çıktığından hidrojen ile çalışan taşıtlar sıfır emisyonlu taşıtlar olacaktır. Ancak, hidrojenin doğada saf olarak bulunmaması ve elde edilmesinde fosil yakıtların kullanılması, hidrojenin kaynağından elde edilip, taşıtta kat edi-

len yola dönüştürülünceye kadar olan enerji verimlerinin düşük ve bu genel çevrimde emisyonlarının yüksek olması yakıt pili çalışmalarının önündeki en büyük engellerdendir (Guzella ve Sciarreta, 2005).

Taşıtlarda yalnızca elektrik enerjisinin kullanılması da sıfır emisyonlu araçlar için önerilen çözümlerden biridir. Batarya enerji kapasitesinin, petrol türevli yakıtlara göre çok düşük olması nedeniyle elektrikli araçlar konvansiyonel araçlara göre üstünlük kuramamıştır. Sıfır emisyonlu araç hedefinde ara çözüm olarak, hem konvansiyonel motorların hem de elektrik enerjisinin üstünlüklerini bir araya getiren Hibrid Elektrikli Araçlar (HEA) ortaya çıkmıştır. İçten yanmalı motorların tasarımı, yüksek güç ve tork gereksinimine göre yapılmakta, şehir içi sürüşlerde, düşük yüklerde düşük verimler ve yüksek emisyonlar ile çalışmaktadır (Boyalı vd., 2006). Hibrid elektrikli araçlarda, batarya, içten yanmalı motorların düşük verim ve yüksek emisyonlar ile çalıştığı güç gereksinimi bölgelerinde bir tampon olarak kullanılmakta, içten yanmalı motorun sürüş çevrimi boyunca gerçekleşen ortalama veriminin artırılması sağlanmaktadır. Taşıt sisteminde elektrik motoru gibi ek bir güç kaynağının kullanılması, taşıttaki içten yanmalı motorun küçültülmesi olanağını da sağlamaktadır. Küçük hacimli motorlar, hem sürtünme ve pompalama kayıplarının azalması hem de büyük motorlara oranla daha fazla yüklenmesi nedeniyle daha verimli bölgelerde çalışmaktadır.

Hibridleştirilmenin fren enerjisinin geri kazanımı, içten yanmalı motorların durdurulması, güç yönetimi gibi getirdiği yenilikler, yol taşıtlarında enerjinin daha verimli kullanılmasına ve daha düşük emisyonlar ile seyahate olanak vermektedir. Toyota tarafından hesaplanan çeşitli enerji sistemleri ile çalışan taşıtların enerji kaynağından hareket enerjisine kadar dönüşümündeki enerji verimlilikleri Şekil 1'de gösterilmiştir (Toyota Motor Corporation, 2003).

Şekil 1'den de görülebileceği gibi, enerjinin kaynağından taşıt üzerindeki enerji deposuna kadar olan dönüşümlerde en yüksek verime sahip yakıtlar petrol türevi yakıtlardır. Hibrid



Şekil 1. Çeşitli enerji kaynakları ile çalışan taşıtların kaynaktan tekerleğe verimlilikleri

elektrikli ve yakıt pilli araçlarda araç üzerindeki verimlilikler daha yüksek gerçekleşmekte ve dolayısı ile bu araçların toplam verimlilikleri petrol bazlı yakıtlar ile çalışan taşıtlara göre daha yüksek oranlarda gerçekleşmektedir. HEA verimliliklerinin daha yüksek olması, düşük emisyon yüksek yakıt ekonomisi, sürüş konforu ve seyir emniyeti için taşıtlarda artan elektrik enerjisi ihtiyacı hibrid elektrikli araçları günümüzde önemli bir ihtiyaç durumuna getirmiştir.

### HEA modellerinin oluşturulması

Hibrid elektrikli araçlar, motor küçültme, seyir esnasında motor durdurma, fren enerjisinin geri kazanımı ve enerji yönetimi gibi sağladığı avantajlar ile konvansiyonel araçlara göre yakıt tüketiminde ve egzoz gazı emisyonlarında azalma sağlamaktadır. Hibrid elektrikli araçlarda güç bileşenlerinin ve bunların birbirleri ile olan ilişkisinin belirlenmesinden sonra karşılaşılan en büyük problem, ortaya çıkan bu karmaşık sistemin en iyi şekilde kontrol edilebilmesidir. HEA kontrol algoritmalarının geliştirilebilmesi için öncelikle, tasarlanan sistemin matematiksel modelinin yapılacak hesaplara uygun bir şekilde kurulması gerekmektedir. HEA sistemlerinde güç sistemleri arasındaki dağılım hesaplarının yapılabilmesi için boyuna araç dinamiği modellerinin kurulması gerekmektedir. Bu çalışmada,

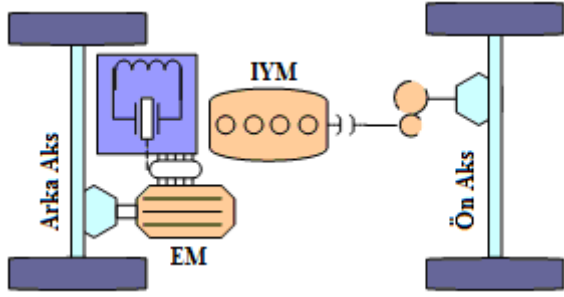
yakıt tüketimi ve egzoz gazı emisyonlarının en iyi şekilde azaltılabilmesi için optimizasyon ve araç dinamiğinin incelenmesini sağlayacak iki farklı yöntemle araç modelleri geliştirilmiştir. Tüm modelleme çalışmaları, FOHEV – I (Ford Otosan Hibrid Elektrikli Araç) projesi kapsamında Ford Transit Van hafif ticari araç üzerine kurulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2. Ford Transit Van konsept araç (Boyalı vd., 2006)

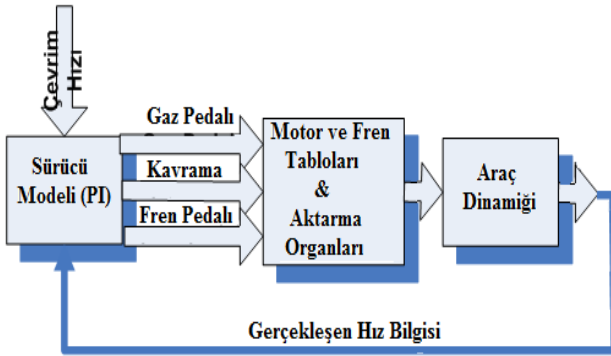
Mevcut aracın hem önden hem de arkadan tahrikli sürümlerinin olması nedeniyle geliştirme aracı olarak Ford Transit Van modeli seçilmiştir. Önden çekişli aracın arka aksına, batarya ile beslenen bir elektrik motoru bağlayarak (Şekil 3) mevcut araç paralel hibrid elektrikli araca dönüştürülmüş ve kontrol algoritmaları ve araç

seyir dinamiği için kullanılmak üzere iki farklı yöntem ile hibrid elektrikli araç modelleri oluşturulmuştur.



Şekil 3. Geri akışlı HEA modeli

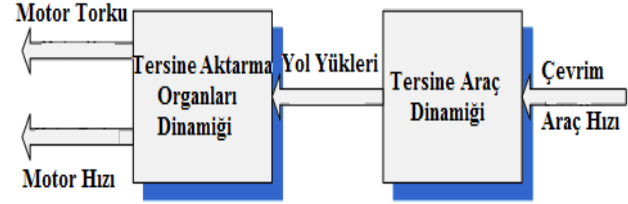
Bu modeller neden-sonuç ilişkisine göre sınıflandırılmaktadır. Hibrid elektrikli taşıt dinamik davranışlarının ayrıntılı ve gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanması için içerisinde sürücü modelinin de oluşturulduğu ileri akışlı HEA modeli kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmaları için oluşturulan geri akışlı model ilk bahsedilen modele göre daha basit olmakla birlikte, yapılan kabuller nedeniyle daha hızlı çalıştığından zaman gerektiren hesaplamalar için daha uygundur. İleri akışlı HEA modelinin blok diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



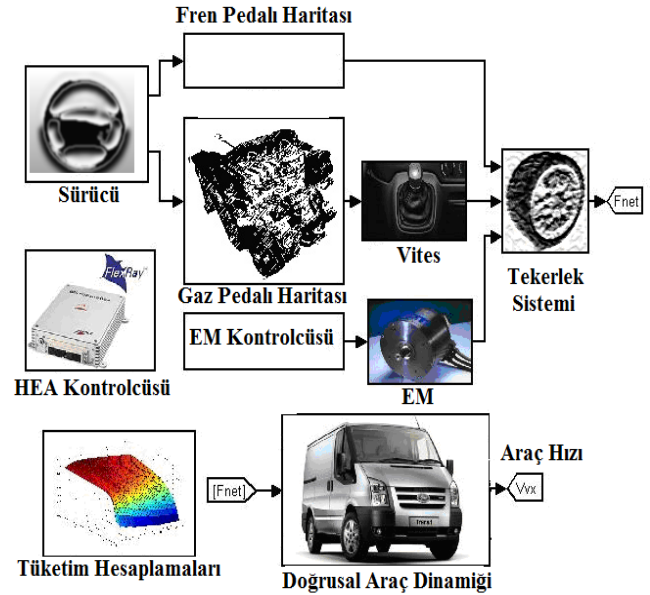
Şekil 4. İleri akışlı HEA modeli

Bu modelde, sürücünün takip etmesi gereken hız profili, PI (oransal-integral) ile modellenen sürücüye verilmekte, sürücü modeli, gerçekleşen araç hızına göre, gaz, fren ve kavrama sinyallerini üreterek, gerçekleşen hız ile belirlenen hız profilleri arasındaki hatayı azaltmaya çalışmaktadır. Geri akışlı araç modelinde sürücü modeli kullanılmamaktadır. Verilen herhangi bir çevrim için araç hızına denk gelen yol kuvvetle-

ri hesaplanmakta, tekerleklere gelen yükler ile hız değerleri aktarma organları üzerinden geriye doğru hesaplanarak motorların dönme hızları ile vermesi gereken tork değerleri belirlenmektedir (Şekil 5). Oluşturulan tüm araç modelleri, MATLAB/Simulink ortamında hazırlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 5. Geri akışlı HEA modeli



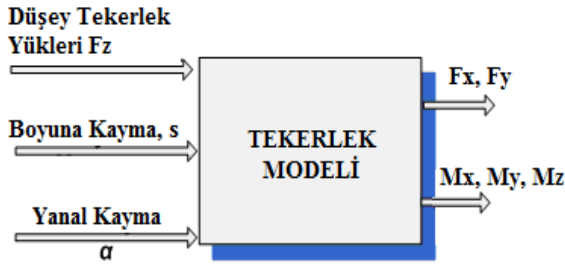
Şekil 6. HEA Matlab araç modeli blok diyagramı

İleri akışlı HEA modelinde, araç dinamiği hesaplamalarının gerçeğe daha yakın olması için Pacejka modeli kullanılmıştır (Pacejka H.B., 2002). Tekerlek modelinde boyuna ve yanal kuvvetlerin hesabı için kullanılan denklem aşağıda verilmiştir.

$$Y(x) = D \cdot \cos[C \cdot \text{atan}(B_{x(y)} - E(B_{x(y)} - \text{atan}(B_{x(y)})))] \quad (1)$$

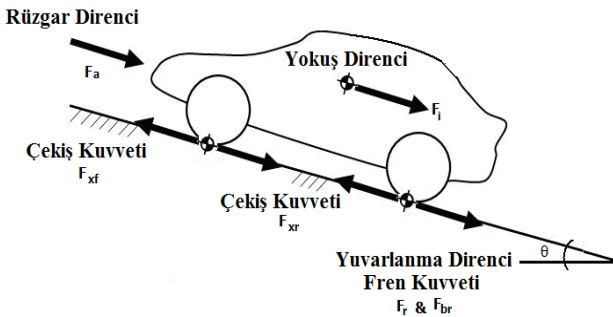
Denklemden verilen,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  katsayıları deneysel yöntemler ile elde edilmiş katsayılardır. Pacejka 2002 tekerlek modeli, boyuna ve yanal

tekerlek kuvvet ve momentlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Tekerlek modelinde giriş olarak tekerlek üzerine gelen kuvvetler, tekerlek boyuna ve yanal kayma miktarları kullanılmaktadır. Bu giriş değerleri kullanılarak tekerlek yol temas yüzeyinde gerçekleşen tekerlek kuvvetleri ve momentleri hesaplanabilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Tekerlek modeli blok diyagramı

Her iki tip araç modelinde de araca etkiyen seyir yükleri hesaplanmaktadır. Bu seyir yükleri, rüzgâr direnci, tekerleklerdeki yuvarlanma dirençleri, fren ve ivmelenme dirençleri ile yokuş direncinden oluşmaktadır. Araç üzerine etkiyen seyir dirençleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Araca etkiyen kuvvetler

### Yuvarlanma direnci

Araç seyir halinde iken, elastik yapısı nedeniyle tekerlek yol temas düzleminin biraz önünde tekerleklere yuvarlanma direnci etki etmektedir. Yapılan çalışmalarda yuvarlanma direncinin hesaplanabilmesi için SAE J2452 standardında kullanılan formülasyondan yararlanılmıştır. Buna göre, her bir tekerlekte gerçekleşen yuvarlanma direnci aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir.

$$F_r = P^\alpha W^\beta (a + bV + cV^2) \quad (2)$$

Burada;

$P$  : Tekerlek basıncı [kPa]

$W$  : Tekerlekler üzerindeki yük [N]

$V$  : Araç hızını [m/s] temsil etmektedir.

$a, b, c, \alpha$  ve  $\beta$  deneysel yöntemler ile elde edilmiş katsayılardır.

### Yokuş direnci

Araca etkiyen yokuş direncinin hesabında basit trigonometrik hesaplar kullanılmaktadır.

$$F_g = W \sin(\theta) \quad (3)$$

Burada  $\theta, W$  sırasıyla yokuş eğimini ve tekerlek üzerindeki düşey yükü temsil etmektedir.

### Rüzgâr direnci

Rüzgâr direnci hesaplamalarında relatif rüzgâr hızı kullanılmaktadır. Rüzgâr hızının hesabı için kullanılan denklem aşağıda verilmiştir.

$$F_a = \frac{1}{2} A \rho C_D V_{ref}^2 \quad (4)$$

Burada;

$F_a$  : Rüzgâr direnci [N]

$A$  : Araç ön cephe alanı [m<sup>2</sup>]

$\rho$  : Hava yoğunluğu [kg/m<sup>3</sup>]

$C_D$  : Aerodinamik direnç katsayısı

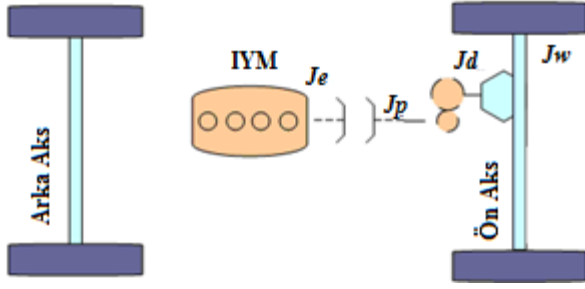
$V_{ref}$  : Rüzgâr bağıl hızı [m/s] büyüklerini temsil etmektedir.

Araç hız ve ivme değerleri Newton’un ikinci yasasına göre hesaplanmaktadır. Araca yol dirençlerinden başka, tekerleklere iletilen motor çeki kuvvetleri ile frenleme kuvvetleri de etki etmektedir.  $F_{xf}$  ve  $F_{xr}$  araca etkiyen toplam çeki ya da fren kuvvetleri olmak üzere, aracın boyuna ivmesi  $a_x$  aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = \lambda m a_x = F_{xf} + F_{xr} - F_a - F_g - F_r \quad (5)$$

Araç üzerinde seyahat sırasında aracın dönen kütleleri de olduğundan, toplam araç ataleti dönen kütle faktörü  $\lambda$  ile çarpılmaktadır.

Döner kütle faktörünün hesaplanmasında, motor, vites kutusu, diferansiyel atalet momentleri ve çevrim oranları kullanılmaktadır (Şekil 9).



Şekil 9. Dönen kütle faktörü

Kinetik enerji analizinden dönen kütlelerin ataleti tekerleklere indirgendiğinde, denk atalet aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$m_{denk} = m + \frac{\left( \frac{J_e}{(i_g i_d)^2} + \frac{J_p}{(i_d)^2} + J_t \right)}{R_e^2} = \lambda m \quad (6)$$

Burada  $J_e$ ,  $J_d$ ,  $J_t$  ve  $J_w$  sırasıyla motor, diferansiyel, vites kutusu ve tekerlek atalet momentlerini,  $i_g$  ve  $i_d$  ise vites kutusu ve diferansiyel çevrim oranlarını temsil etmektedir.

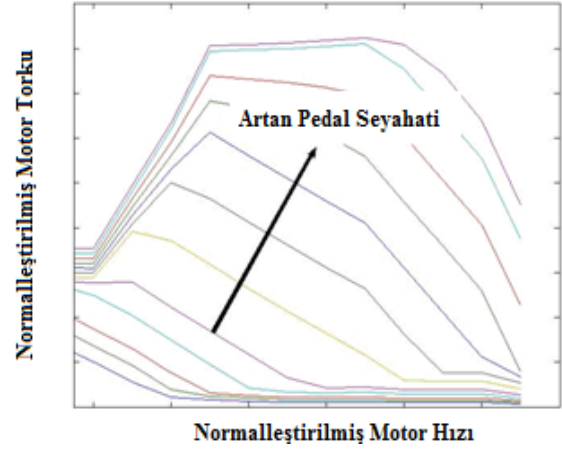
Araç bilgilerine göre her bir vites çevrim oranı için hesaplanan dönen kütle faktörleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Viteslere göre dönen kütle faktörleri

Vites	Dönen Kütle Faktörü
1	1.2281
2	1.1184
3	1.0877
4	1.0769
5	1.0725

### Motor modeli

Çalışmada boyuna araç dinamiğinin incelenmesi nedeniyle, içten yanmalı motor yakıt tüketimi, pedal haritası gibi tablolar yardımı ile modellenmiştir. Statik tablolar motorun rejim halindeki yakıt tüketimi, tork çıkışlarını ifade ettiklerinden hesaplamalarda, motorun dinamik davranışları ile silindirler içerisindeki çevrimsel farklılıklar da ihmal edilmektedir. Belirli bir gaz pedalı açıklığı ve motor devrine karşı motorun vereceği tork değeri pedal haritası yardımı ile elde edilmektedir (Şekil 10).



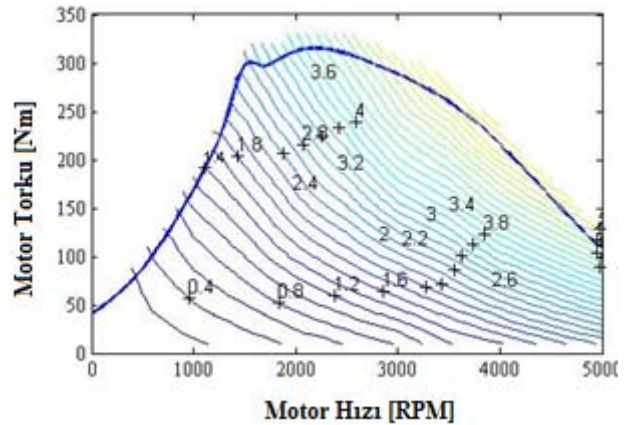
Şekil 10. Pedal haritası (Boyalı A. vd. 2006)

Pedal haritasında, belirli gaz pedalı açıklığı ve devirlerin altında, içten yanmalı motorun iç sürtünmeleri nedeniyle negatif tork verdiği görülmektedir.

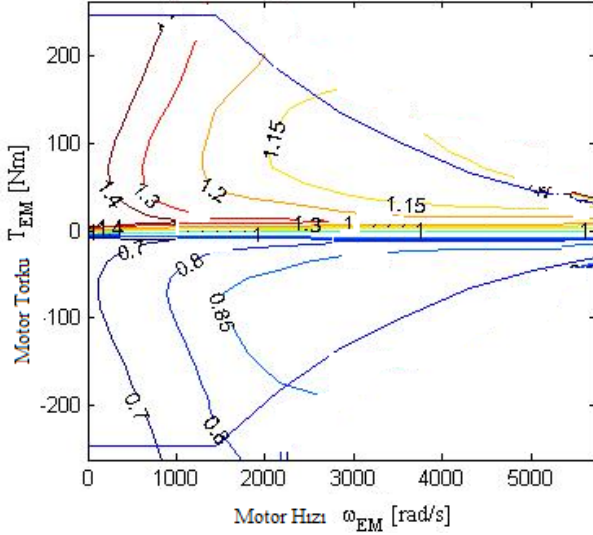
Verilen bir sürüş çevrimi için yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin hesabında yakıt tüketimi (Şekil 11) ve emisyon haritalarından yararlanılmaktadır. Bu haritalarda motor hızı ve motorun verdiği tork değerine göre harcadığı yakıt miktarı ile açığa çıkardığı emisyon miktarları elde edilmektedir.

### Elektrik motoru ve batarya modelleri

Hibrid elektrikli araçların kontrol uygulamalarında enerji verimliliği ve güç bileşenleri arasındaki verimleri en yüksek yapacak enerji dağılımının hesaplanması istenildiğinden, elektrik motoru verim haritaları kullanılarak modellenmiştir (Şekil 12).



Şekil 11. Yakıt tüketimi



Şekil 12. Elektrik motoru verim haritası  
(Qss toolbox)

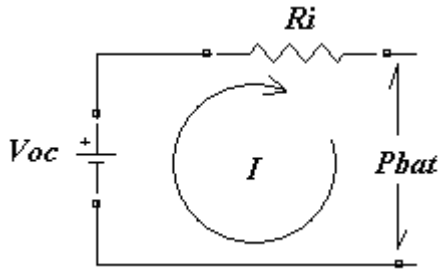
Şekil 12’de verim kontör eğrileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, şarj için verim değerleri 0-1 arasında değişirken deşarj durumunda birden büyük olmaktadır. Bunun nedeni, tek yönlü verim ifadesinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

$$Verim = \frac{T\omega}{VI} \quad (7)$$

Burada;

- $V$  : Gerilim [Volt]
- $I$  : Akım [Amper]
- $T$  : Tork [Nm]
- $\omega$  : Açısal hız [rad/s] ifade etmektedir.

Benzer şekilde batarya, iç dirençleri belirli olduğundan eşdeğer devre diyagramı kullanılarak modellenmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Eşdeğer devre diyagramı

Batarya iç direnci, batarya şarj seviyesi (SOC) ve batarya iç ısısının bir fonksiyonudur. Batarya katalogundan alınan bu değerler yardımı ile şarj ve deşarj durumlarında bataryadan çekilen akım değerleri aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$I_{chg} = \frac{-V_{oc} + \sqrt{V_{oc}^2 + 4.R_i.P_{chg}(t)}}{2R_i} \quad (8)$$

$$I_{dischg} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4.R_i.P_{dischg}(t)}}{2R_i} \quad (9)$$

Burada,  $P_{chg}$ ,  $P_{dischg}$  batarya terminalinde, şarj ve deşarj sırasındaki yükleri,  $V_{oc}$ , açık devre gerilimini ve  $R_i$  ise batarya iç dirençlerini temsil etmektedir.

HEA modeli oluşturulduktan sonra yapılan tüm benzetimlerde ECE-R15 çevrimi kullanılmıştır.

### HEA kontrolü

Hibrid elektrikli araç probleminde karşılaşılan en büyük sorun, güç bileşenleri arasındaki güç dağılımının en iyi sonucu alacak şekilde belirlenmesidir. Belirlenen amaç fonksiyonlarının en iyi-optimum değeri verebilmesi için aracın seyahati süresince hız profillerinin ve dolayısıyla güç profilinin önceden biliniyor olması gerekmektedir. Bununla birlikte, yol eğimi, yol şartları ile araç kütleindeki değişikliklerde hesaplamalarda önemli bir yere sahiptir. Tam bilgi mevcut olduğunda, optimum güç dağılımının hesaplanması için optimum kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Hibrid araç bileşenlerinin ve çalıştığı durumların çokluğu nedeniyle, optimum kontrol probleminin analitik çözümü güçleşmekte bu nedenle dinamik programlama gibi sayısal yöntemler kullanılmaktadır (Boyalı vd., 2006).

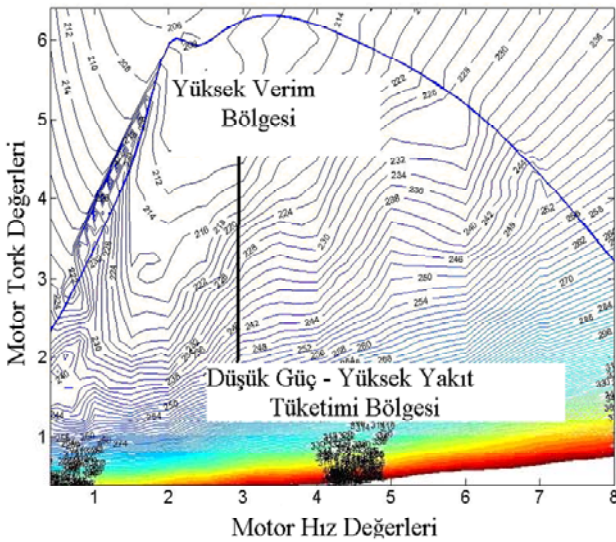
Araç hız profilinin bilinmemesi nedeniyle optimizasyon hesapları önceden belirlenen hız profillerine göre yapılmakta, bu hesapların incelenmesi ile HEA kontrolü için farklı hız çevrimlerinde kullanılmak üzere kurallar belirlenmek-



tedir. Açık literatürde, eşdeğer yakıt tüketimi (Delprat vd., 2003, Paganelli vd., 2001, Sciarretta vd., 2004), bulanık mantık denetimi (Schouten vd., 2002) ve öğrenmeye dayalı yöntemler gibi global optimum çözümlerine yaklaşacak yöntemler önerilmiştir. Bu çalışmada, FOHEV – I aracı için kural tabanlı kontrol yöntemi kullanılmış ve araç üzerinde başarılı bir şekilde denenmiştir.

Kural tabanlı kontrol, aracın seyahati esnasında, araç hızı, gaz, fren ve kavrama pedalı konumlarının tespit edilip önceden belirlenen kuralların uygulanması esasına dayanmaktadır. Kurallar, araç bileşenlerinin verim haritaları ile araç sürüş ve ivmelenme performansları üzerinden belirlenmektedir. Motor ve araç bilgileri araç üzerinde bulunan elektronik kontrol ünitesi aracılığıyla elde ediliyorken, taşıta eklenen batarya ve elektrik motoru verileri de kendi üzerlerinde bulunan kontrolcülerinden sağlanmaktadır.

Kural tabanlı kontrolde, elektrik motoru içten yanmalı motorların düşük verim ile çalıştığı yüklerde devreye girmekte, içten yanmalı motor yalnızca yüksek hız ya da güç gereksinimlerinde ya da bataryanın şarj edilmesi durumunda çalıştırılmaktadır (Şekil 14).



Şekil 14. Motor yakıt tüketimi haritası [g/kWh]

Buna göre araç 40 km/h hızların altında yalnızca elektrik motoru ile tahrik edilirken bu hız değeri-

rinin üzerinde yalnızca içten yanmalı motor ile sürülmektedir. Yüksek güç gereksinimlerinde, gaz pedalı konumu belirlenen bir sınırı geçtiğinde elektrik motoru içten yanmalı motora destek vermekte, frenleme durumlarında jeneratör olarak çalıştırılarak fren enerjisi ile batarya şarj edilmektedir.

HEA'nın bulunabileceği durumlar MATLAB/Stateflow araç kutusu yardımı ile modellenmiştir.

Araç için;

- Aracın duruyor hareketsiz olması
- Yalnızca elektrik motoru ile tahrik
- Yalnızca içten yanmalı motor ile tahrik
- Rejeneratif frenleme
- Her iki motorun da aktif olduğu durumlar söz konusudur.

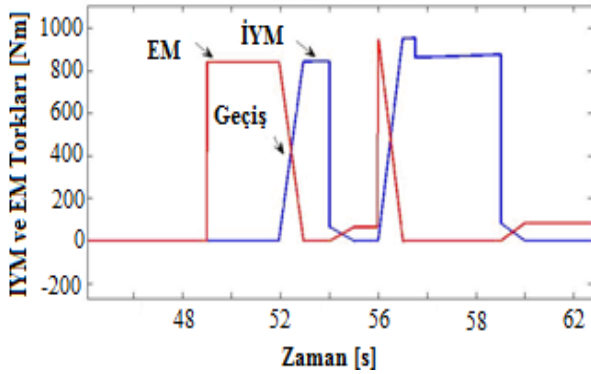
Her iki motorun aktif olduğu durumlarda, elektrik motoru ya jeneratör olarak kullanılmakta ya da içten yanmalı motora itici güç olarak destek vermektedir.

Araç belirli bir hız değerinin, örneğin 5 km/h hızın altında bir hızda ise aracın durduğu kabul edilmektedir. Bu durumda içten yanmalı motor rölantide çalışmaktadır. Aracın hareketsiz olduğu durumlarda motor kapatma seçeneğinin de olduğu HEA tasarımları mevcuttur. Motor kapatıldığında, araç aksesuar yüklerinin elektrik donanımı ile desteklenmesi gerektiğinden bu projede motor kapatma seçeneği kullanılmamıştır.

Araç hızı 40 km/h hızın altında ise araç yalnızca elektrik motoru ile sürülmektedir. Prototip araçlarda manüel vites kutusu kullanılmıştır. Aracın yalnızca Elektrik Motoru (EM) ile tahrik edildiği durumlarda sürücü, hibrid aracı, sanki konvansiyonel aracı sürüyormuş gibi kullanabilmektedir. Sürüş konforunun değişmemesi hedeflendiğinden, bu sorun, elektrik motorunun dinamik davranışı, İçten Yanmalı Motorun (İYM) farklı viteslerdeki dinamik davranışlarına benzetilerek çözülmüştür. Yalnız EM ile tahrik durumunda, gaz pedalı konumu kullanılarak pedal haritasından sürücünün güç isteği, motor hızı ve taşıt hızı oranından elde edilen vites çevrim ora-

nı ile de tekerleklerde istenen tork miktarı hesaplanmaktadır. Sürücünün güç ve tork isteğinin belirlenmesi ile elektrik motorunun bu isteği karşılayacağı güç ve tork değerleri kendi üzerindeki kontrolcü vasıtasıyla temin edilebilmektedir.

Araç 40 km/h değerinin üzerinde yalnızca İYM ile tahrik edilmektedir. EM ve İYM durumları arasında fark edilmeyen yumuşak geçişler olması amacıyla durumlar arasında geçiş durumları oluşturulmuştur. Bu ara durumlarda, mesela EM durumundan İYM ile tahrik durumuna geçiliyorken, EM gücü doğrusal olarak azaltılıyorken, İYM gücü belirli bir zaman aralığında doğrusal olarak artırılmaktadır (Şekil 15). Aynı zamanda durumlar arasında histeri oluşmaması için hız sınırlarına geçiş bölgeleri oluşturulmuştur. Böylelikle araç EM ile çalıştırılıyorken araç hızı 40 km/h değerini aştığında taşıt yalnızca İYM ile tahrik durumuna geçiyorken, bu durumda araç hızı 37 km/h hızın altına düştüğünde taşıt yalnızca EM ile tahrik durumuna geçmektedir.



Şekil 15. Araç geçiş durumu

Araçta frenleme durumlarında, eğer batarya şarjı belirlenen üst sınırın altında ise rejeneratif frenleme yapılmaktadır. Elektrik motorlarının yapması gereken frenleme miktarı, frenleme regülasyonlarına uygun olarak belirlenmiştir. Eğer batarya şarj seviyesi tam ise, frenleme araç üzerinde bulunan konvansiyonel fren sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Sürücünün fren gücü talebi fren pedalı üzerine yerleştirilen bir kuvvet sensörü ile hesaplanmaktadır.

Hibrid araç durumunda, araç iki farklı durumda olabilmektedir. Bunlardan ilki şarj durumudur.

Eğer batarya şarj seviyesi belirlenen bir seviyenin altında ise HEA şarj durumuna geçmektedir. Bu durumda, elektrik motoru jeneratör olarak kullanılmakta, İYM yol yüklerini karşılayorken, yol yükü gereksiniminin %10'u kadar fazladan yüklenmekte, elde edilen bu yük ile de batarya şarj edilmektedir. Hibrid çalışma durumlarının diğeri ise elektrik motorunun sürücünün aşırı güç taleplerinde İYM'a destek verdiği durumdur. Bu durumda gaz pedalı konumu %90'ı aştığında elektrik motoru kademeli olarak devreye girmekte ve taşıta ek itme gücü sağlamaktadır.

### Simülasyon sonuçları

Araç modeli ve kural tabanlı kontrol ile yapılan simülasyon sonuçlarında yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları miktarları ve konvansiyonel araca göre gerçekleşen iyileştirme oranları Tablo 2'de verilmiştir.

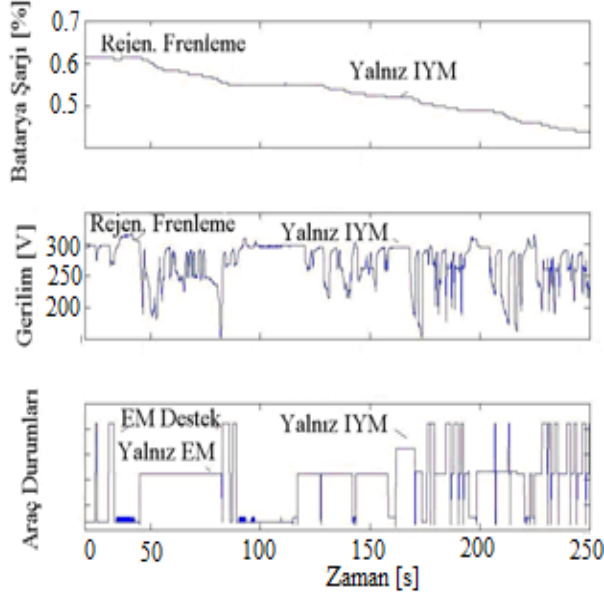
Tablo 2. Simülasyon sonuçları

m=3300 kg	Konv.	Hibrid	İyileşme
	I/100km	I/100km	%
Yakıt Tük.	11.33	8.92	%21.3
SOC Değişimi	Konv.	Hibrid	İyileşme
	-	% 0	--
	Konv.	Hibrid	İyileşme
	gr/km	gr/km	%
NO <sub>x</sub>	0.91	0.84	% 18.7
CO <sub>2</sub>	2.85	2.17	% 23.9

Araç üzerinde kullanılan kural tabanlı kontrol hız değerlerine göre düzenlenirken, simülasyonlarda güç değerleri esas alınmıştır. Bu durumda 6 kW güç gereksinimlerinin altında yalnızca EM durumu, bu güç sınırının üzerinde ise yalnızca İYM etkin durumdadır. Güç kriteri ile yapılan simülasyonlarda, ECE R15 çevrimi süresince araç kütlesi 3300 kg olarak kabul edildiğinde batarya şarj seviyesi aynı kalmakta, yakıt tüketiminde %21.3 civarında iyileşme gerçekleşmektedir. ECE R15 çevrimi kullanılarak yapılan simülasyonlarda EM ve İYM'un tork grafikleri Şekil 16'da verilmiştir.

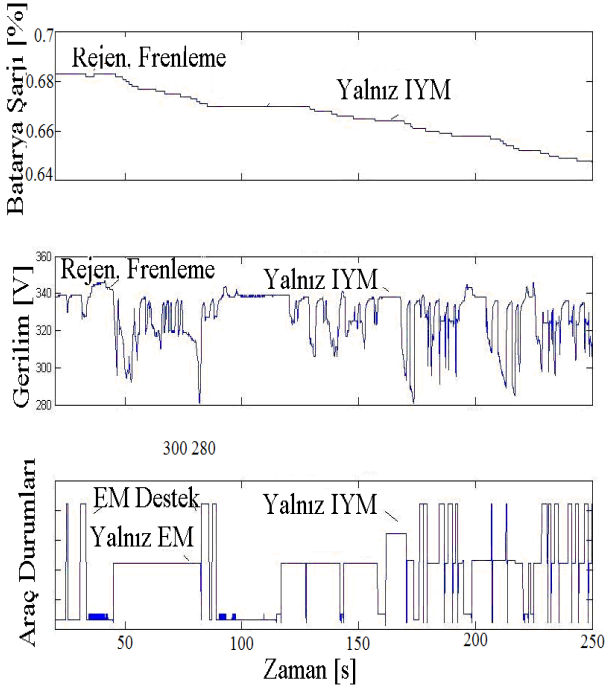
Şekil incelenildiğinde, İYM güç kriteri uygulandığından ilk kalkışlarda devreye girmektedir. Frenleme durumlarında, İYM, EM ile birlikte motor frenleri nedeniyle negatif tork uygula-

maktadır. Düşük güç gerektiren sabit hızlarda araç EM ile tahrik edilmektedir. Kontrol algoritması ile yol testi yapılan HEA'nın girdiği durumlar Şekil 17'de verilmiştir.



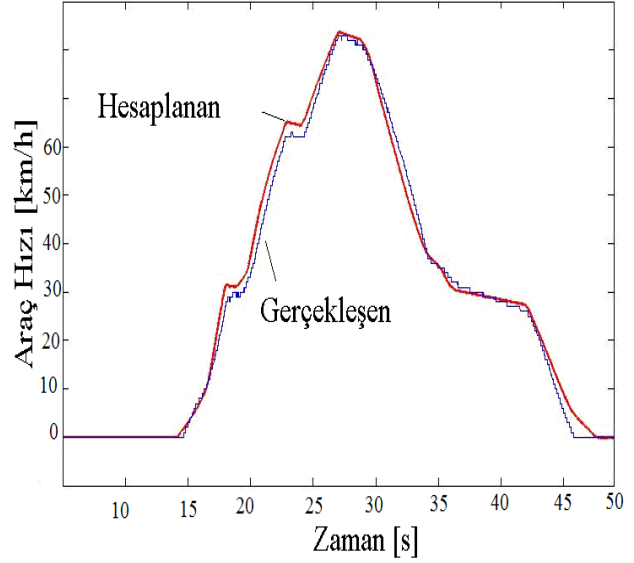
Şekil 16. HEA EM ve İYM tork dağılımları

Yol testlerinde HEA'nın kontrol algoritmasında belirlenen tüm durumlara girdiği Şekil 17'den görülmektedir.



Şekil 17. HEA durumları

Yapılan yol testlerinde sürücünün pedal komutları, araç ve tekerlek hızları, vites konumları incelenmek üzere kaydedilmiştir. Bu komutlar, oluşturulan HEA modelinde giriş olarak kullanılmış, gerçek araç hızı ile hesaplanan araç hızı karşılaştırılarak Şekil 18'de verilmiştir. Karşılaştırmada hesaplanan araç hızı ile gerçek araç hızlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 18. Gerçekleşen ve hesaplanan hız profilleri

## Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında, boyuna ve yanal HEA modelleri oluşturularak, çeşitli kontrol uygulamaları bu modeller yardımı ile incelenmiştir. Bu çalışmalardan HEA modelleri ile HEA kural tabanlı kontrol uygulaması makalede anlatılmıştır. Hibrid araçların modellenmesi ve kontrolü, sistemlerin ve araç durumlarının fazla olması nedeniyle, sürücü davranışları ve trafik şartları da ele alındığında oldukça geniş ve güç bir mühendislik problemidir. Bu makalede yalnızca, boyuna araç dinamiği modelleri incelenmiştir. Hibrid elektrikli araçlarda, diğer konvansiyonel araçlarda olduğu gibi yanal dinamiklerin de hesaplara dâhil edilmesi gerekmektedir. Optimizasyon uygulamaları için günümüz hesaplama teknikleri yeteri kadar verimli olmadığından, yeteri kadar hassas sonuçlar verecek basit araç modellerinin kurulması gerekmektedir.

## Kaynaklar

- Alley R., Berntsen T., Bindoff N. L., Chen Z., Chidthaisong A., Friedlingstein P., Gregory J., Hegerl G., Heimann M., Hewitson B., Hoskins B., Joos F., Jouzel J., Kattsov V., Lohmann U., Manning M., Matsuno T., Molina M., Nicholls N., Overpeck J., Qin D., Raga G., Ramaswamy V., Ren J., Rusticucci M., Solomon S., Somerville R., Stocker T. F., Stott P., Stouffer R. J., Whetton P., Wood R. A., Wratt D., (2007). Working Group III Report, Climate Change 2007, Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, France.
- Baalen J.V., (2006). Optimal Energy Management Strategy for Honda Civic IMA, *Yüksek Lisans Tezi*, Eindhoven Technical University, Eindhoven.
- Boyalı A., Acarman T., Güvenç L., Kiray B. Özatay E., (2006). *Proceedings*, Modeling and Control of a Four Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Vehicle, IEEE Conference on Control Applications, 155-162 Munich.
- Boyalı A., Demirci M., Acarman T., Güvenç L., Kiray B., Yıldırım M., (2006). A Simulation Program for a Four Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Vehicle and its Use in Rule Based Controller Development and Implementation, Workshop on Hybrid and Solar Vehicles, Salerno, Italy.
- Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Research Council, National Academy of Engineering. (2004). The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs, National Academies Press, USA.
- Delprat S., Guerra T.M, Rimaux J., (2003). Control Strategies for Hybrid Vehicles: Synthesis & Evaluation, *Proceedings*, IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 5, 3946-3950, Orlando, USA.
- Ehsani M., (2004). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicle Fundamentals, Theory, and Design*, CRC Press, 102-108, NewYork.
- Guzzella L., Sciarreta A., (2005). *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization*, Springer Verlag, Berlin.
- Johnson V. H., Wipke K.B., Rausen D.J., (2000). *Proceedings*, HEV Control Strategy for Real-Time Optimization of Fuel Economy and Emissions, Future Car Congress, SAE 2000-01-1543, Crystal City, U.S.A.
- Paganelli G., Ercole G., Brahma A., Guezennec Y., Rizzoni G., (2001). General Supervisory Control Policy for the Energy Optimization of Charge-Sustaining Hybrid Electric Vehicles, *JSAE Review*, 22, 511-518
- Pacejka H. B., (2002), *Tyre and Vehicle Dynamics*, Butterworth – Heinemann, U.K.
- QSS Toolbox for Matlab, (2008). ETH Zurich, [www.imrt.ethz.ch/research/qss.html](http://www.imrt.ethz.ch/research/qss.html) (20.04.2008)
- SAE J2452, 1999. Stepwise Coast down Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance, SAE, USA.
- Schouten N. J., Salman V., Kheir N.A., (2002). Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10, 3, 460-468.
- Sciarreta A., Back M., and Guzzella L., (2004). Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12-3, 352-363.
- Toyota Motor Corporation, 2003. Toyota's Global Strategy Report.
- U.S. Environmental Protection Agency, (2005). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2005.