

GÜNEŞ ENERJİLİ YARIŞ ARACININ ELEKTRİK TASARIM ÖLÇÜTLERİNİN, YOL PERFORMANS SİMÜLASYONUNUN ve ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Özgür ÜSTÜN** Murat YILMAZ* Arda TÜYSÜZ* F. Kaan TİTİZ* Anıl ŞAHİN*
ustun@elk.itu.edu.tr mryilmaz@elk.itu.edu.tr atuysuz@yahoo.com furkankaan@yahoo.com sahinani83@yahoo.com

*İstanbul Teknik Üniversitesi, Ayazağa Kampüsü Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Müh. Bölümü, Maslak, 34469, İstanbul TÜRKİYE

R. Nejat TUNCAI** Can GÖKÇE** Utku KARAKAYA** Ali YILDIRIM**
ntuncay@mekatro.com cgokce@mekatro.com ukarakaya@mekatro.com ayildirim@mekatro.com

**Mekatro Araştırma Geliştirme ve Tic. A.Ş., Teknoloji Serbest Bölgesi TÜBİTAK MAM Kampüsü, Kısım B N.18 Gebze, 41470, Kocaeli TÜRKİYE

ÖZET

Bu çalışmada, 2006 yılında Tübitak Bilim Teknik Dergisi'nin düzenlediği Formula G yarışmasının her iki ayağında da birincilik kazanan İstanbul Teknik Üniversitesi Güneş Arabası Ekibi'ne ait ARİba isimli güneş arabasının elektrik-elektronik elektromekanik düzeneklerinin tasarım metodolojisi ve bu düzeneklerin bilgisayar benzetim çalışmaları sunulmaktadır. Bu tasarımda güneş gözeleri, elektrik besleme ve akü devreleri, doğrudan sürürlü fırçasız doğru akım motoru, motor sürüş ve kontrol devreleri, veri haberleşme sistemi, yol sürüş senaryoları ve benzetimleri ile aracın yarış performansını optimize eden enerji yönetim sistemi ile ilgili geliştirmeler açıklanmaktadır. Bu çalışma ile İTÜ ARİba ekibi yarış jürisi tarafından TÜBİTAK "2006 En Yüksek Yerli Katkılı Özgün Tasarım Ödülü" ne layık bulunmuştur.

Anahtar sözcükler: Elektrikli araba, güneş enerjili araba, fırçasız doğru akım motoru, doğrudan tahrik, araç modelleme ve benzetimi, enerji yönetim algoritması.

1. GİRİŞ

TÜBİTAK tarafından düzenlenen üniversiteler arası FORMULA-G güneş enerjili elektrikli araba yarışının bu yıl ikincisi yapılmıştır. Bilindiği gibi bu yarışa katılan araçlar elektrik enerjisi ile çalışmakta ve bu enerji güneş gözeleri yardımıyla güneşten alınarak akülerde depolanmaktadır. Bu araçlar üniversite öğrencileri ve onlara destek veren öğretim üye ve yardımcıları tarafından geliştirilmekte, bunun yanında aracın geliştirilmesine çeşitli firmalar da katkı sağlamaktadır. Bu yıl yarışa 40 a yakın takım katılmış ve yarış 2 kısımdan oluşmuştur. İlk yarış Ege kupası adı altında İzmirde, büyük ödüllü final yarışı ise İstanbul Park pistinde yapılmıştır. Bu yarışların her

ikisini de İstanbul Teknik Üniversitesi'nin ARİba isimli aracı kazanmıştır (Şekil 1). Bunun yanında TÜBİTAK tarafından genç tasarımcıları teşvik etmek üzere verilen, en yüksek özgün yerli katkılı araç ödülü de ARİba projesine verilmiştir.



Şekil 1. ARİba Güneş Enerjili Yarış Aracı

Bu bildiri ARİba'nın elektrik-elektronik ve elektromekanik düzeneklerinin geliştirilmesiyle ilgili tasarım, donanım ve yazılım çalışmalarıyla, sürüş performansı için geliştirilen enerji yönetim sistemini sunmaktadır.

Aracın tasarım metodolojisinin tam olarak anlaşılabilmesi için yarış kuralları hakkında kısa bir bilgi vermek yararlı olacaktır. Jüri tarafından bu yarış en çok 90 dakika içerisinde 2.2 km lik parkuru 30 tur dönerek parkuru en önce bitiren araç tarafından kazanılacak biçimde düzenlenmiştir. Bu başarısızlığı takdirde, 90 dakikalık sürenin sonunda en çok yol kat edebilmiş olan aracın birinci olarak kabul edileceği belirlenmiştir. Yarışın her araç için olabildiğince adil ve güvenli koşullarda geçmesi için aşağıdaki sınırlamalar konmuştur.

- Güneş gözelerinin gücü en çok 800 W dir.
- Akü gücü en çok 2000 Wh dir.

- Aracın eni, boyu ve yüksekliği sınırlandırılmıştır. Gövde ve pilot kabini koruma içine alınmıştır.
- Aracın ağırlığı en az 150 kg, en çok 300 kg dır.

Türkiyenin 30 u aşkın üniversitesinde oluşan tasarım ekipleri bu koşulları sağlayan en üstün aracı yapıp bunu yarış sırasında en verimli bir şekilde sürebilmek için çalışmalar yapmışlardır. Benzer biçimde 2005 senesinden itibaren İTÜ ARİBa ekibi, birçok fakülte öğrencisinin katılımıyla aracın gövde ve diğer mekanik tasarımları ile elektrik ve elektromekanik donanımı üzerinde çalışmıştır.

Bu bildiri o tarihlerden itibaren 2006 yarışına kadar ve yarış sırasında İTÜ aracının en üstün yarış performansını sağlaması için yapılan çalışmaları içermektedir. ELECO konferansına sunulmak üzere hazırlandığı için, ARİBa'nın yalnızca elektrik-elektronik ve bilgisayar mühendisliğini kapsayan konularıyla yetinilmiş, aracın aerodinamik yapısı, gövde, tekerlekler, direksiyon ve fren gibi parçalar bu çalışmada ele alınmamıştır. Aşağıda çalışmanın evreleri özet halinde sunulmuş daha sonra ise ilgili başlıklar altında ayrıntılı olarak incelenmiştir.

İlk olarak ARİBa'nın elektrik-elektronik ve elektromekanik ön tasarım değerleri ve bu tasarıma ilişkin ön ölçütler geliştirilmiştir. Örneğin maksimum hız, maksimum moment gibi ön değerler saptanmış, daha sonra Ansoft FEM programı ve Rmxprt yazılımları kullanılarak hedeflenen ön performans değerlerini sağlayan doğrudan tahrikli fırçasız doğru akım motoru ile elektronik kontrol ve sürüş sistemlerinin tasarımı yapılmıştır.

Daha sonra aracın Matlab/SIMULINK ortamında benzetimi geliştirilmiş, elektrik, elektronik, elektromekanik ve mekanik büyüklükler hesaplanmıştır. Bunu takiben aracın yol performansının bilgisayar benzetimi her türlü yol koşulunu kapsayacak biçimde yine Matlab/SIMULINK ortamında geliştirilmiş ve çeşitli hız, ivme, yol eğimi için performans değerleri bilgisayar ile hesaplanmıştır. Bu değerlere dayanarak fırçasız doğru akım makinası tasarımı optimize edilmiştir.

Daha sonra motor, güç elektroniği besleme ve kontrol elektroniği devreleri imal edilerek araca takılmıştır.

Bunu takiben aracın çeşitli bölgelerindeki elektriksel büyüklükleri ölçen ve işleyen bir veri toplama sistemi geliştirilmiş, bu sistem yardımıyla aracın seyir halindeyken harcadığı enerji, bu enerjinin güneş panellerinden ve aküden çekilen kısımlarının ölçümü sağlanmıştır.

Yarıştaki en üstün performansın, yarış sonunda o günkü güneş durumuna göre akü enerjisinin tamamının kullanılmasıyla gerçekleşeceği göz önüne alınarak, akünün nonlineer boşalma karakteristiği ve aküde kalan enerji, geliştirilen yeni bir algoritmayla kapsama alınmıştır.

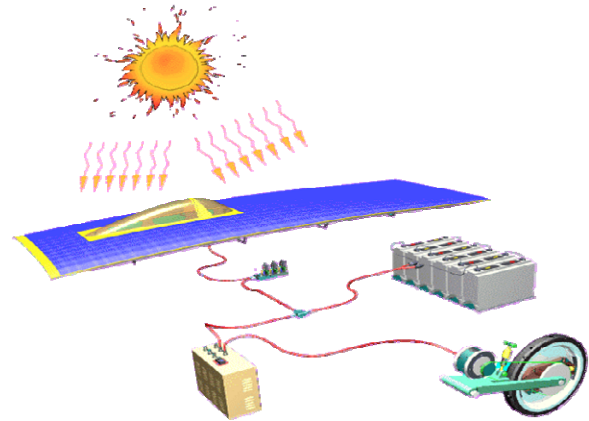
Yarışın yapılacağı pistlerin eğim ve güzergah durumlarını yansıtan grafikler yardımıyla her iki pistin de Matlab/SIMULINK ortamında modelleri kurulmuştur. Bu pist modelleri kullanılarak, güneş paneli ve batarya gücünün tamamını en verimli şekilde kullanıp yarışı en kısa sürede tamamlayacak sürüş senaryoları geliştirilmiştir.

Yarış sırasında aracın ne kadar ani güç çektiği, bir turu kaç Wh ile tamamladığı, o ana kadar toplam kaç Wh enerji harcadığı, bunun kaçta kaçının aküden karşılandığı ve aküde kalan enerji miktarı ile bunun mevcut sürüş senaryosuyla yarış sonuna kadar yetip yetmeyeceği gibi hususlar daha önce açıklanan veri toplama sistemi ve Visual Basic ortamında geliştirilen yeni bir yazılım yardımıyla elde edilmiş ve, sürücünün önündeki LCD li bir ekrana taşınmıştır.

Yarışın gidişatını dışarıdan takip etmek üzere bir telsiz haberleşme sistemi oluşturulmuş ve araçta bulunan veri toplama sistemiyle ölçülen değerler pit alanındaki yarış bilgisayarına aktarılmıştır. Bu bilgisayar üzerinde, yarışın geri kalan kısmı için her türlü senaryo benzetimleri koşturulmaya hazır hale getirilmiştir.

Yukarıda açıklanan sürüş senaryoları yardımı ile aracın pist performansı bilgisayarda simüle edilmiş, aracın pistin hangi bölgelerini ne kadar bir ivme ve hız ile geçeceği hesaplanmış ve sonuç olarak her pist durumunu, her hava koşulunu kapsayan bir enerji yönetim algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma yarış öncesi gerçekleştirilen deneylerle doğrulanmış ve rakiplerinden hayli ağır olan ARİBa'nın yarış sırasında kendisinin başarabileceği en iyi performansı vermesi sağlanmıştır. Bu performans ile ARİBa, İzmir ve İstanbul Park pistlerinde yapılan yarışlarda birinci olmuş, yukarıda açıklanan tasarım çalışmaları nedeniyle TÜBİTAK Jürisi tarafından en yüksek yerli katkılı özgün tasarım ödülüne de layık bulunmuştur.

2. GÜNEŞ ENERJİLİ ARACIN ELEKTRİK SİSTEMİNİN TASARIMI



Şekil 2. Genel Elektrik Devresi

Güneş enerjili otomobillerde genel mekanik aksam bilinen taşıtlardan farklı olmamakla birlikte elektriksel açıdan ise bir elektrikli otomobilin genel prensiplerini

İçermektedir. Aynen bir elektrikli araçtaki gibi güneş enerjili araçlarda da tahrik bir elektrik motorundan sağlanır ve enerji akülerde depolanır. Farklı olarak ise güneş pilleri ve bunlarla alakalı elektronik devreler güneş enerjili otomobillerde bulunmaktadır. Şekil 2 de görüldüğü gibi, bu araçlar genel olarak enerji kaynağı olan güneş pilleri, güneş pillerinden alınan gücü optimize eden ve enerji akışını kontrol eden devre, depo görevi gören aküler ve ana tahriki sağlayan motor ve sürücü devresinden oluşmaktadır.

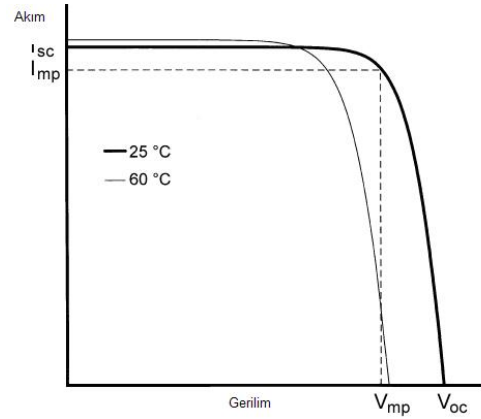
Güneş pillerinin akım gerilim karakteristiği sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3. deki grafikten de görülebileceği gibi güneş pilinden çekilebilecek akım değeri belirli bir gerilim seviyesinden itibaren hızlı bir düşüşe geçmekte ve dolayısıyla alınabilecek güç de akım ve gerilimin bir fonksiyonu olduğu için hızla azalmaktadır [1]. ARIBA projesi çerçevesinde tasarlanan araç için güneş pili gücü yarışma kurallarıyla 800 Watt'a sınırlandırılmıştır. Bu çerçevede, hücre gücü 3.1 Watt olan güneş pillerinden 258 adet kullanılıp gerekli güç değeri sağlanmıştır. Kullanılan güneş pillerinin karakteristik değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu hücreler 129 tanesi aracın sağında, diğer 129 tanesi solunda olmak üzere gruplandırılmış, böylece sağ veya sol tarafa güneşin gelme açısına göre diğer taraftaki pillerin etkilenmemesi amaçlanmıştır. Sistemde güneş pili gerilimi 72.2 V maksimum güçteki akım değeri de 2 seri koldan toplam 10.7 A olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Sunpower A300 Güneş pili değerleri

| | |
|-----------------------|---------|
| Açık devre gerilimi | 0.665 V |
| Kısa devre akımı | 5.75 A |
| Maksimum güç gerilimi | 0.560 V |
| Maksimum güç akımı | 5.35 A |
| Güç | 3.1 W |
| Verim | %20 |

Güneş pillerinden maksimum verimi almak için çeşitli devreler üretilmektedir. Genel adı MPPT (Maximum Power Point Tracker) olan bu devreler yardımıyla alınan güç sürekli maksimum seviyede tutulmaktadır. Devre temel olarak sürekli akım ve gerilim örnekleri olarak bunları çarpımını yani gücü sürekli maksimum seviyede tutacak şekilde giriş akımını ayarlamaktadır. Ayrıca bu devrelere eklenen özellikler sayesinde araç içindeki ölçme, haberleşme ve kontrol gibi ek işlemler de tek bir devre üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. ARIBA projesi kapsamında her güneş pili serisi için bir adet olmak üzere toplamda 2 adet MPPT devresi kullanılmıştır. Kullanılan devrelerin verimi %99'a kadar çıkabilmekte, akü ve motor sistemini korumak için maksimum ve minimum çıkış gerilimi seviyeleri ayarlanabilmektedir. Ayrıca devrelerde can bus protokolüyle haberleşmeyi sağlayan bir sistemde mevcuttur. Bu sistem sayesinde sisteme bağlı bulunan güneş piline ait akım, gerilim gibi değerler

öğrenilebilmekte ayrıca ortam sıcaklığı gibi ek bilgilerde gözlenebilmektedir.



Şekil 3. Güneş Pili Akım-Gerilim Eğrisi

Tablo 2'de kullanılan MPPT devresine ait değerler görülebilmektedir. Devre, 72.2 V olan güneş pili çıkış gerilimini, yarışın İzmir'de koşulan Ege Kupası ayağında kullanılan kurşun-asit akü grubu nominal gerilimi olan 132 V'a yükseltilmektedir. İstanbul etabı olan Formula G Türkiye Şampiyonasında kullanılan lityum-polimer akü grubunun nominal gerilimi 148 V olup, MPPT devresinin çıkış gerilimi ayarı bu etap için değiştirilmiştir. Mikroişlemci tabanlı kontrol yapısı sayesinde MPPT devrelerine ait giriş ve çıkış değerleri yazılımsal olarak değiştirilebilmekte, herhangi bir donanımsal müdahaleye gerek kalmamaktadır.

Tablo 2. New Generation MPPT Karakteristikleri

| | | |
|----------------|----------|--------|
| Verim | | %98.9 |
| Giriş gücü | Anma | 800 W |
| | Maksimum | 1100 W |
| Çıkış gerilimi | Minimum | 60 V |
| | Maksimum | 200 V |
| Giriş akımı | Anma | 7.3 A |
| | Maksimum | 10 A |

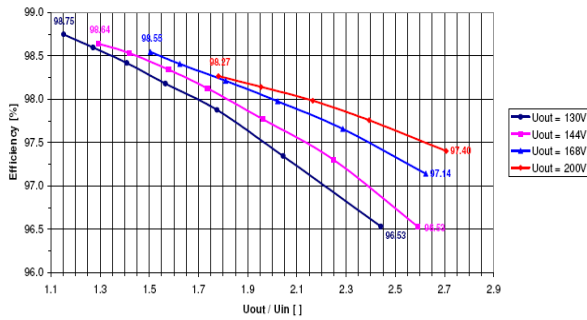
Tablo 3. MPPT Can-Bus değerleri

| | | |
|---|-------|-------------|
| Besleme Gerilimi | Min. | 6 V |
| | Maks. | 18 V |
| Besleme Akımı | | |
| TX=V _{INH} , U _{CAN} =5.5V, R _L =60 Ohm, | | 50 mA |
| çekinik | | |
| TX=V _{INH} , U _{CAN} =5.5V, R _L =60 ohm, | | 100 mA |
| baskın | | |
| İletim Oranı | | 125 Kbits/s |
| Hat Uzunluğu | | 500 m |
| Standart | | ISO 11898 |

MPPT devreleri genel olarak DC-DC çevirici olarak çalıştığı için değişik çevirme oranlarına göre verim

değişmektedir. Kullanılan MPPT devresine ait çevirme oranıyla verim değişimi grafiği Şekil 4'de verilmiştir. Araç içi haberleşme ve veri toplama sistemi MPPT devreleri tarafından desteklenen Can-Bus protokolü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Devre üzerindeki Can-Hi, Can-Low çıkışları ile MPPT üzerindeki giriş akımı, gerilimi, çıkış akımı, gerilimi ve devreye ait sıcaklık bilgilerini sisteme iletmektedir. MPPT devresine ait Can-Bus değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Elektrikli otomobil çalışmalarının tıkandığı en büyük noktalardan biri enerji depolanmasıdır. Enerji depolamak için kullanılan akü sistemleri hakkındaki araştırmalar hızla devam etmekte, araçlara getirdiği eksiler azaltılmaya çalışılmaktadır. Bir güneş enerjili otomobil için ise bu çok daha önemlidir. Kısıtlı bir enerji kaynağı olduğu için bu enerjiyi en verimli şekilde kullanmak gerekmektedir ve araçların minimum ağırlıkta olması istenmektedir. Burada karşımıza çıkan en büyük etmen aküler olmaktadır. Değişik akü çeşitleri bulunmasına karşı boyut ve ağırlık azaldıkça fiyatların çok fazla artması negatif bir unsurdur. [2, 3]



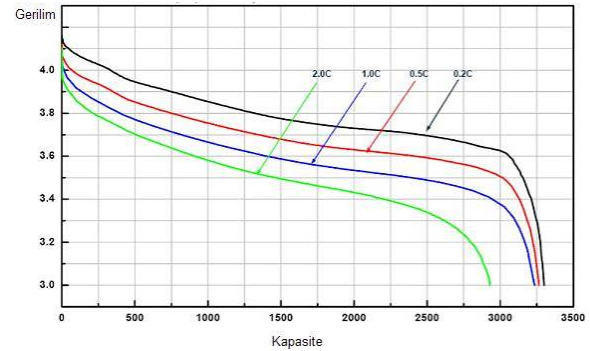
Şekil 4. MPPT Çevirme oranı-Verim Grafiği

Genel olarak güneş enerjili araçlarda kullanılan akü sistemleri 3 ana grupta toplanabilir. Bunlardan en ekonomik olanı ve aynı zamanda ağırlık/güç oranı en yüksek olanı kurşun-asit akülerdir. Bu tip aküler piyasada istenilen gerilim ve akım değerlerinde çok rahat bulunabilmektedir. Ayrıca enerji verimlerinin yüksek olması birçok zaman bir üst sınıf olarak görülen nikel-kadmiyum tipi akülere göre tercih edilmesine sebep olmaktadır. Nikel-Kadmiyum tip akülerin ağırlık/güç oranı kurşun-asitlere göre yüksek olmakla birlikte bir avantajları da gerilim değerlerinin doluluk oranıyla çok fazla değişmemesidir. Bu aracın çıkabileceği maksimum hız sınırını gerilim değeri belirlediği durumlarda daha büyük önem kazanmaktadır. Günümüzde en çok tercih edilen akü tipi lityum-iyon ya da lityum-polimer akü tipleridir. Bu tip akülerin fiyatları göreceli olarak pahalı olsa da aynı kapasitedeki kurşun-asit aküye göre yaklaşık %75 daha hafiftir. Ayrıca enerji verimleri de yüksek olup güneş enerjili otomobiller için ideal görülmektedir [4]. Formula G güneş enerjili otomobil yarışları çerçevesinde akü kapasitesi 2 kWh ile sınırlandırılmış, kullanılacak akü tipi ise serbest bırakılmıştır. ARİba, yarışın Ege Kupası ayağına

kurşun-asit akü sistemiyle katılmıştır. Nominal bara gerilimi 132 V olacak şekilde ayarlanmış ve bu amaçla 12 V nominal gerilimindeki 11 adet akü seri bağlanmıştır. Yarış kurallarının belirlediği enerji sınırlarını geçmemek için kullanılan aküler 15 Ah olarak seçilmiştir. MPPT devrelerinin çıkış gerilimi yazılım değişikliği ile bu gerilim seviyesine göre ayarlanmıştır. Yarışın Türkiye Şampiyonası ayağına ise lityum-polimer aküler kullanılmış, bu sistemin nominal çalışma gerilimi yarış kuralları içerisinde kalmak ve araç performansını korumak için 148 V olarak belirlenmiştir. Oluşturulan sistemde akü grubu Ah değeri 13.35 Ah şeklinde oluşmuştur. Tablo 4 de kullanılan lityum-polimer akülerin tek bir hücre için değerleri verilmiştir. Bu hücreler 4'erli paralel olmak üzere 40 seri grup bağlanarak akü sistemi oluşturulmuştur. Şekil 5'de ARİba projesi kapsamında kullanılan akü sisteminde bir lityum-polimer akü hücresinin değişik şarj-deşarj akımları için kapasite değişimi görülebilmektedir [5].

Tablo 4. Lityum-polimer akü karakteristikleri

| | |
|--|----------------------------|
| Kapasite | 3350 mAh |
| Nominal Gerilim | 3.7 V |
| Şarj Durumunda Maks. Akım Gerilim | 1.0CmA 4.2 V |
| Deşarj Durumunda Maks. Akım Kesim Gerilimi | 2.0CmA 3 V |
| Çalışma Sıcaklığı Şarj Deşarj | 0°C ~ 45°C -20°C ~ 60°C |



Şekil 5. Akü Şarj-Deşarj Grafiği

Araçta ayrıca akü grubu ve motor kontrol ünitesi arasına bir DC-DC çevirici konularak nominal 132 ya da 148 V olarak kullanılan akü gruplarının gerilimini elektrik motoru anma gerilimi olan 300 V'a çıkarılmıştır. Bu çevirici sisteme ağırlık ve kayıp olarak yansıdığı gibi birçok önemli avantajı da beraberinde getirmiştir. Bu çevirici sayesinde değişik gerilim seviyelerindeki akü gruplarını sistemin geneline dokunmadan sadece aküleri değiştirerek kullanma imkanı doğmuştur. Ayrıca kullanılan çeviricinin çıkış gerilimi ayarlanabilir olduğundan elektrik motorunun hız kontrolü bu çevirici ile yapılmış, böylece motor sürücü üzerinde PWM

yüzünden oluşabilecek ek stres azaltılmış ve daha güvenilir bir devre sistemi oluşturulmuştur. Çeviricide bulunan akım koruması sayesinde ise motor akımının maksimum değeri kontrol edilmiş ve herhangi bir istenmeyen duruma karşı motor ve kontrol devreleri korunmuştur.

Güneş enerjili otomobillerin en önemli parçalarından biri de tahrik görevini üstlenen elektrik motorudur. Çok değişik motor tipleri kullanma imkânı olsa da kullanılan sistemin bir doğru gerilim sistemi olması ve yüksek verim oranları gerektirmesi, uygulamada bu araçlarda doğru akım motorlarının kullanılmasına sebep olmuştur. Elektrik motorunun en büyük avantajlarından biri de uygun tipte bir motor seçildiği takdirde doğrudan sürüş yapılabilmesi, yani herhangi bir aktarma organı kullanmadan aracın hareket ettirebilmesidir. Bu sayede aktarma organı üzerindeki verim kaybından da kaçınılmış olur. Fırçalı doğru akım motorları çoğu, uygulamada kullanılmaya devam edilse de gelişen teknoloji sayesinde fırçasız tip doğru akım motorları hızla fırçalı motorların yerini almaktadır. Enerji verimliliği açısından önemli bir ayrıntı da enerji geri kazanımlı yani rejenaratif frenlemedir. Rejenaratif frenleme sayesinde elektrik motoru generatör olarak çalıştırılmakta ve oluşturulan frenleme momentindeki mekanik enerji de akülere elektrik enerjisi olarak depolanabilmektedir. Rejenaratif frenleme özelliğini uygun olarak gerçekleştirebilecek bir motor seçimi bu tür uygulamalar için zorunlu görülmektedir. ARİba için motor türü belirlenirken bu özellikler göz önüne alınmış ve bir fırçasız doğru akım motorunun kullanılmasına karar verilmiştir. Motor proje için özel olarak tasarlanmış ve doğrudan sürüş için tekerleğe monte edilebilecek yapıda imal edilmiştir. Motor sürücü devreler motora göre özel olarak imal edilmekle birlikte, çoğu uygulama için hız kontrolünün yanında akım koruması, rejenaratif frenleme desteği gibi birçok ek özelliği barındırması istenir. Güneş enerjili otomobil gibi uygulamalarda motor sürücü devrenin güvenilirliği ön plana çıkmaktadır. Bu makalenin ilerleyen bölümlerinde fırçasız doğru akım makinesi ve sürücü devresine tasarımı daha detaylı anlatılmıştır [6, 7].

3. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU VE KONTROL ELEKTRONİĞİNİN TASARIMI

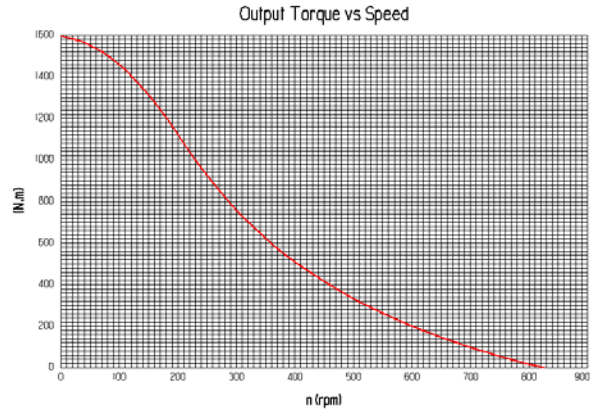
ARİba'da kullanılacak elektrik motorunun güç/ağırlık oranı, verimi, moment karakteristikleri ve kontrol edilebilirliği göz önünde bulundurularak doğrudan sürüşlü bir fırçasız doğru akım motoru olmasına karar verilmiştir.

Tasarlanan motor dış rotorlu olup tekeleğin içerisine yerleştirilmiştir. Mıknatis olarak yüksek kaliteli NdFeB mıknatislar kullanılmıştır. Motorun sonlu elemanlar analizi Ansoft'un programlarıyla yapılmıştır. Öncelikle, Rmxprt programında motorun geometrik yapısı ve sargı şeması düzenlenmiştir. Maxwell programında ise manyetik devre incelenmiş,

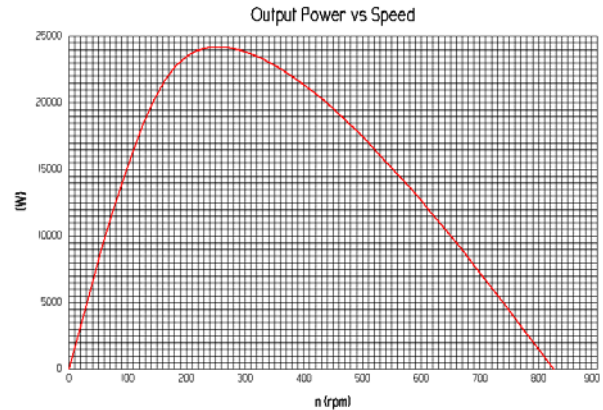
malzeme doymalar vb. incelenerek tam yeter malzeme kullanılarak en hafif motorun üretimi için çalışılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri neticesinde motora ait moment-hız (T-n), güç-hız (P-n) ve verim hız karakteristikleri elde edilmiştir (Bkz. Şekil 6, 7. ve 8). Bu karakteristiklerden yararlanılarak Bölüm 5'te anlatılan araç simülasyonları kurulmuş, bu simülasyonların sonucunda motor üzerinde değişiklik yapılmış ve motor son halini almıştır. Motorun analizler sonucunda elde edilen değerleri Tablo 5'de görülmektedir.

Tablo 5. Analiz Sonucunda Elde Edilen Motor Özellikleri

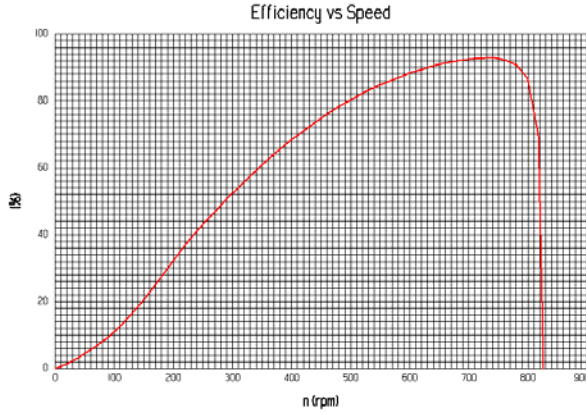
| Motor Özelliği | Açıklama |
|----------------|-------------|
| Anma Gücü | 2.5kW |
| Anma Gerilimi | 300V |
| Rotor Tipi | Dış Rotorlu |
| Moment Sabiti | 3,01Nm/A |
| Gerilim Sabiti | 3.01V.s/rad |
| Boşta Hız | 985Rpm |
| Anma Hızı | 783Rpm |
| Verim | %90.5 |



Şekil 6. Sonlu Elemanlar Analizi – Moment – Hız Grafiği



Şekil 7. Sonlu Elemanlar Analizi – Güç – Hız Grafiği



Şekil 8. Sonlu Elemanlar Analizi – Verim – Hız Grafiği

Motor sürücü sistem, donanımsal olarak ‘Integrated Power Module’ (IPM) ile elektronik kontrol ve sürücü kartından oluşmaktadır. Şekil 9’da sürücü sistemin kutusu hariç tüm bileşenleri monte edilmiş halde görülmektedir. IPM, Mitsubishi’nin ürettiği tek paket içinde altı adet IGBT ve bunları sürmek üzere tasarlanmış elektronik devrelerden oluşmaktadır. Bu devreler, dışardan takılan sürücülerde olduğu gibi izole kaynakla beslenmeli ve kontrol sinyalleri optokuplör ile izole edilmelidir. IGBT sürme devrelerine ek olarak IPM içinde her bir IGBT’yi aşırı akım, aşırı sıcaklık gibi durumlardan korumak üzere devrelerde içermektedir.

Elektronik devre kartı ise, başlıca şu birimlerden oluşur:

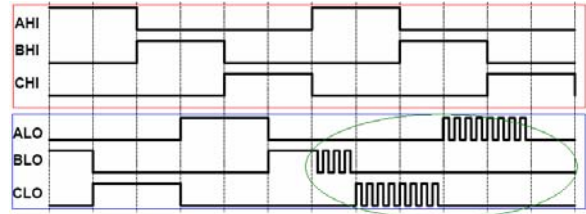
1. IPM besleme ve kontrol arayüzü
2. FDAM sürücü yonga
3. 8 bit mikrodenetleyici
4. CAN ve RS232 arayüz sürücülere
5. Akım, gerilim ve hız duyargaları



Şekil 9. Motor Sürücü Sistemi

IPM besleme ve kontrol arayüzü, yukarıda da sözü edilen izole kaynak ve optokuplörlerden oluşur. Ve motor sürücü yonga ile IPM arasında bir izole bir arayüz oluşturur.

FDAM sürücü yonga, üç adet hall duyurga girişleri, üç adet alt IGBT ve üç adet üst IGBT’leri süren çıkışları, motor kontrol girişleri (yön, fren, çalıtır vs.), PWM girişi, analog akım girişi ve hız çıkışı gibi temel unsurları içermektedir. PWM girişi, alt IGBT’lerin iletim durumundayken hangi çalışma oranıyla PWM yapacağını ayarlamaya yarayan analog giriştir. Buraya uygulanacak gerilim ile çalışma oranı %0 ile %100 arasında analog olarak ayarlanabilir. Şekil 10’da üst ve alt IGBT’lerin kapı kontrol sinyalleri gösterilmiştir. İlk başlangıç durumunda hiçbir kapı PWM durumunda çalışmazken, daha sonra yuvarlak içine alınmış kısımda %50 çalışma oranı ile PWM durumunda çalışan alt IGBT’leri gösterilmektedir.



Şekil 10. Alt ve Üst IGBT Kapı Sinyalleri

FDAM sürücüdeki kontroller ve çıkışlar, uygun arayüzler ile ADC ve DAC’leri de içinde bulunan 8 bitlik mikrodenetleyiciye bağlanmıştır. Böylelikle motor sürücünün ve dolayısıyla motorun kontrolü mikrodenetleyici tarafından yapılmaktadır. Örneğin, PWM girişi için mikrodenetleyici üzerindeki 8 bitlik DAC(dijital-analog çevirici) kullanılmış ve PWM çevrim oranı %0.5 çözünürlükle kullanılmıştır ki bu da bu uygulama için gayet yeterli bir orandır. Mikrodenetleyicinin görevi, RS232 hattı ile kullanıcıdan gelen kontrol emirlerini almak ve bu emirlere göre motoru sürücü yongayı yani motoru kontrol etmektir. Bunları yaparken aynı zamanda motoru hatalı bir veri transferinden oluşabilecek yanlış kullanımdan korumak için de gerekli yazılım da eklenmiştir. Transfer edilen baytların oluşabilecek bir gürültü yüzünden bozulup bozulmadığı denetleyen bu yazılım, aynı zaman da şoförden kaynaklanabilecek hatalı bir kumandayı sinyalini de göz ardı edecek şekilde tasarlanmıştır. Örneğin, araç tam yol ileri giderken şoförün yanlışlıkla kumanda panelinde geri gitme düğmesine basması durumunda mikrodenetleyici gelen geri komutunu dikkate almamakta ve motoru korumaktadır [8].

Mikrodenetleyici, çevre birimlerden gelen bara akımı, bara gerilimi ve motor hızı gibi çeşitli analog bilgileri de toplayıp istendiğinde RS232 üzerinden kullanıcıya da gönderebilmektedir. Ayrıca, bu kontrol kartına ek olarak bağlanabilen bir CAN arayüzü, toplanan bu bilgilerin aynı şekilde CAN hattına aktarılabilmesini sağlamaktadır.

Kontrol paneli ve motor arasında haberleşmeyi düzenlemek üzere belli bir iletişim protokolu belirlenmiş ve kontrol bu şekilde sağlanmıştır. Protokol tasarlanırken başlıca hedef hatalı bilgi transferini engellemek olmuştur. Kontrol panelinden motora giden bilgiler temel olarak motor çalıştır-boşa al bilgisi, motor hızı, motor dönüş yönüdür.

Motor sürücü sistem tasarlanırken, uygulamanın bir yarış olduğu göz önünde bulundurularak güvenlik payı büyük tutulmuştur. Bu yüzden, endüstriyel bir uygulamadan farklı olarak IPM sınır değerleri, motor akım ve gerilimlerinin oldukça üstünde seçilmiştir. Söz konusu sistem, 400 V- 200 A değerlerine kadar motorları sürekli besleyebilecek durumdadır. Bunun yanı sıra, 1200 V ve 400 A'e kadar anlık tepe değerlerine karşı dayanıklıdır. Yine Şekil 9 da görüldüğü üzere güç kapasitörleri için sandviç bara tipi kullanılmış ve kapasitörler bu bara üzerine yerleştirilmiştir.

4. ARAÇ İÇİ VERİ TOPLAMA SİSTEMİ

Veri toplama sistemi güneş arabalarında çok büyük bir öneme sahiptir. Bu sistem aracın koruma amaçlı izlenmesi ve enerji yönetimi şeklinde ayrılıp incelenecektir.

En temel şekliyle, akü gerilim ve akımı sürekli izlenmeli, akülerin güvenli çalışma bölgelerinin içinde tutulduklarından emin olunmalıdır. Bunun yanı sıra güneş pillerinin akım ve gerilimi izlenerek güneş panelinin sorunsuz çalışıp çalışmadığı da takip edilmelidir. Benzer biçimde motor akımı ölçülmeli ve motorun aşırı yüklenmesine engel olunmalıdır. Bu temel ölçümler, veri toplama sisteminin tüm elektriksel donanımı korumak için kullanılır. Koruma amaçlı izlemenin ötesinde, iyi tasarlanmış bir veri toplama sistemi yarış kazandıran bir sürüş stratejisinin hazırlanması için gereklidir. ARİba üzerindeki araç içi veri toplama sistemi, yarış öncesinde bilgisayar ortamında gerçekleştirilen simülasyonların doğrulanmasında ve simülasyonlar için gerekli bazı parametrelerin belirlenmesinde, yarış esnasında ise gerçek zamanlı bilgi toplama ve işleme işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır.

ARİba üzerindeki veri toplama sisteminin temelinde, kritik öneme sahip fiziksel büyüklükleri (akü akımı, bara gerilimi, motor akımı vb.) ölçen, söz konusu ölçüm bilgilerini depolayan, bu bilginin istenilen kısmını sürücüye yansıtan, istenen kısmını ise radyo frekansı (RF) ile aracın durumunun izlendiği yer istasyonuna aktaran devreler ve bu devreleri birbirine bağlayan Controller Area Network (CAN) hattı bulunmaktadır. Söz konusu devrelerin birbirine bağlanmasında hızlı çalışabilmesi, az kabloya ihtiyaç duyması, protokolün içerisinde hataya karşı korumaların olması ve hattaki bilginin hatta bağlı tüm devreler tarafından okunabiliyor olması özellikleri nedeniyle CAN protokolü kullanılmıştır. ARİba üzerindeki bilgi toplama sistemi birbirine CAN hattı ile bağlı yedi devreden oluşmaktadır. Bu

çalışmada bu devreler N1,N2...N7 şeklinde isimlendirilecektir. Bu devrelerin her birinin yapısı ve sistem içerisindeki görevi aşağıda açıklanmıştır.

N1 ve N7: Veri toplama sisteminin N1 ve N7 adlı iki ünitesi bu çalışmada daha önce açıklanmış olan MPPT devreleridir. ARİba üzerinde kullanılan iki MPPT devresi CAN hattının başında ve sonunda yer almaktadır. ARİba'daki CAN hattının özellikleri proje için özel olarak temin edilen MPPT devrelerinin özelliklerine göre tasarlanmıştır. Güneş pillerinden gelen akım, gerilim, akü tarafındaki gerilim (MPPT çıkış gerilimi) ve MPPT'lerin hangi çalışma modunda olduğu bilgileri CAN hattına N1 ve N7 tarafından bildirilmektedir. Bu bilgiler sayesinde güneşten gelen enerji takip edilebilmektedir.

N2: Veri toplama sisteminin iki numaralı devresi CAN hattındaki bilgileri depolayan bir bilgi depolama ünitesi olan N2'dir. Çıkarılabilir bir EEPROM hafıza kartı ve CAN hattına bağlanan iki ayrı parçadan oluşan N2, CAN hattındaki bilgileri EEPROM hafıza kartına uygun biçimde depolar. Bu hafıza kartı istenildiğinde araç üzerinden çıkarılarak bir bilgisayara bağlanır ve böylece sistemin araç üzerinde ölçtüğü değerlere ulaşılabilir. Bu sayede RF haberleşmesinin mümkün olmadığı durumlarda dahi araç test sürüşleri yapabilmiş ve kaydedilen bilgiler test sürüşünden sonra bilgisayarda değerlendirilebilmiştir.

N2'nin çıkarılabilir hafıza kartı 68 dakikalık bir test sürüşü esnasında ölçülecek motor akımı, akü akımı ve gerilimi, güneşten gelen güç değerlerini saklayabilecek kapasiteye sahiptir.

N3: ARİba üzerindeki veri toplama sisteminin üçüncü ünitesi aracın motor sürücüsüdür. Tasarlanan Fırçasız Doğru Akım Motor (FDAM) sürücüsünün üzerinde CAN hattına bağlanmasını sağlayan bir ek vardır. Bu ek sayesinde motor sürücüsü, motorun 4 bölgeli kontrolü için ölçmekte olduğu motor akımı bilgisini CAN hattına aktarabilmektedir. Motor akımının yanı sıra IGBT'lerin çalışma durumu, motor sıcaklığı, IGBT modülünün sıcaklığı ve motorun hızı da veri toplama sistemine N3 tarafından aktarılır.

N4: Veri toplama sisteminin dördüncü ünitesi, CAN hattındaki bilgiyi pilota göstermekle yükümlüdür. CAN hattındaki akım ve gerilim bilgileri kullanarak, N4 üzerindeki mikrodenetleyici tarafından hesaplanan güç ve enerji, pilota bir LCD ekran aracılığı ile yansıtılır. Söz konusu mikrodenetleyicinin yazılımı, aracın deneme sürüşlerinden alınan bilgiler göz önüne alınarak sürekli güncellenir ve takip edilmek istenen fiziksel büyüklüğü gösterecek şekilde programlanıp LCD ekrana yansıtılır. Bu sayede yarış öncesinde yapılan testlerde araç üzerinde ek bir ölçme aletine gerek duyulmadan aracın veri toplama sistemi sadece istenilen büyüklüğün izlenmesinde kullanılabilir. Yarış esnasında ise LCD ekranda sadece sürücünün

süresince, F_{ac} ise hızlanma süresince talep edilecek gücü hesaplamada kullanılır.

$$F_{tot} = F_w + F_s + F_a + F_{ac} \quad (5)$$

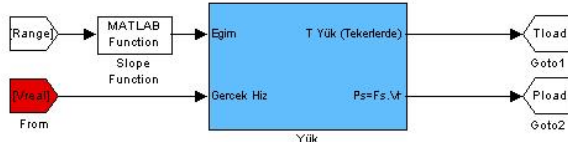
$$P_{mot} = F_{tot} \cdot v \quad (6)$$

$$T_m = P_{mot} / \omega_m \quad (7)$$

Motorun tekerleğe aktarması için gereken güç (P_{mot}), toplam kuvvetin (F_{tot}) araç hızı (v) ile çarpılması sonucunda elde edilir. Aracın tasarımında tahrik unsuru tek tekerlek üzerinden doğrudan sürüş şeklinde olduğu için, motor momenti aynı zamanda aracı ivmelendiren moment olacaktır. Bu nedenle motor çıkış gücü aynı zamanda motor momenti (T_m) ile tekerlek devir hızının (ω_m) çarpımına eşit olacaktır. Buradan motor momenti hesaplanır. Bu formüllerle kurulan model bloğu ise Şekil 14'de görülebilir.

Tablo 6. Yük parametrelerinin açıklaması

| Değişken | Açıklama | Birim |
|------------|-----------------------------|----------|
| m | Toplam kütle | kg |
| C_t | Tekerlek sürtünme katsayısı | - |
| g | Yerçekimi ivmesi 9.81 | m/s^2 |
| α | Yol eğimi | $^\circ$ |
| C_r | Hava sürtünme katsayısı | - |
| δ | Hava yoğunluğu | kg/m^3 |
| v | Araç hızı | m/s |
| ω_m | Tekerlek devir hızı | rad/s |



Şekil 14. Yük Bloğu

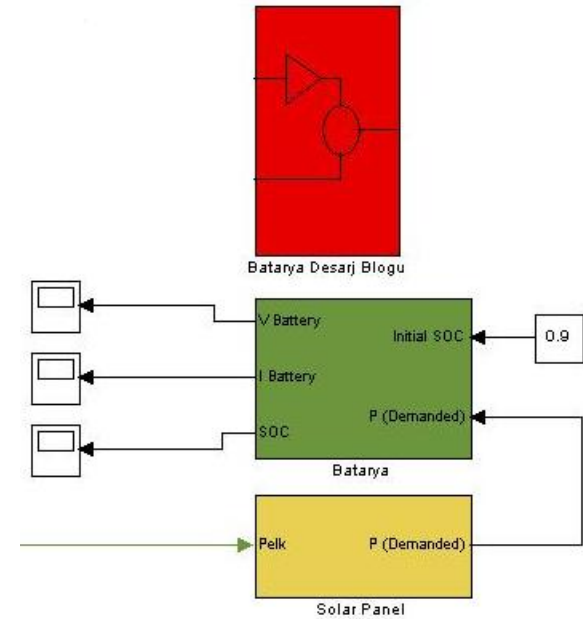
ii. Güneş Panelleri ve Bataryaların Modellenmesi:

Araçta elektrik motorunun sürücü devresinin yanısıra, bir de DC/DC çevirici bulunmaktadır. Bu sayede motora gidecek akımı ve gerilimi sürekli olarak ayarlamak mümkündür. Benzer biçimde, matematik model de sistemin güç gereksinimleri göz önüne alınarak kurulmuş, bu sayede elektriksel gerilim ve akım parametreleri yalnızca güç parametresi üzerinden, moment ve hız ihtiyacı göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Motor konumunda çalışan elektrik makinasının her durumda talep ettiği elektriksel güç, sistemin toplam güç talebidir. Güneş panellerinden alınan güç ve buna ek olarak bataryalardan çekilen güç, sistemin elektrik güç girişini oluşturmaktadır. Elektrik motoru tarafından talep edilen güç, güneş panellerinden elde edilenin altında ise bataryalar şarj olmaktadır.

Bu modelde, yarış tarihinde, öğlen saatlerinde güneş panellerine gelmesi muhtemel güneş ışığı miktarı ve

güneş gözelerinin verimi göz önüne alınarak, panellerden ortalama 500W'lık güç elde edildiği varsayılmıştır. Güneş panellerinin güç çıkışını bir MPPT (Maximum Power Point Tracker) cihazının denetlemekte olduğu göz önüne alındığında sabit güç kaynağı modelinin oldukça gerçekçi olduğu görülür. Makinanın talep ettiği güç öncelikle bu panellerden karşılanmaya çalışılır, panellerin yetemediği durumlarda bataryalar devreye girer. Batarya modeli, bataryaların açık devre gerilimleri ve iç dirençlerinin çeşitli şarj durumları için modellenmesi ile oluşturulmuştur. Çeşitli şarj durumları için açık devre gerilimleri ve iç dirençler batarya üreticilerinin kataloglarından okunmuş, deneylerle de doğrulanmıştır. Simülasyonlar boyunca bataryaların farklı yük akımları altında nasıl deşarj olduğu ve buna ilişkin şarj durumlarının modellenmesi için ayrı bir blok hazırlanmıştır. Kurulan güneş paneli ve batarya modeli Şekil 15'de gösterilmiştir.

Bataryaların her şarj durumu için uç gerilimi ile bataryalardan talep edilecek güç belli olduğu için $P=V.I$ formülünden, bataryalardan talep edilecek akım değerleri de hesaplanmaktadır. Yarış süresince sürekli değişen bu akım, simülasyonda çeşitli zaman aralıkları için hesaplanmış ve belirli dilimler halinde ayrıca kurulan batarya deşarj modeli üzerinden bataryanın şarj durumunun hesaplanmasında kullanılmıştır.



Şekil 15. Güneş Panelleri, Batarya ve Batarya Deşarj Bloğu

iii. Araç Tahrik ve Aktarma Sisteminin Modellenmesi:

Araç tahrik sistemi, tekerleği doğrudan çeviren bir fırçasız doğru akım makinası ile onu süren güç ve kontrol elektroniği devrelerinden oluşmaktadır. Modeli kurulan elektrik makinasının elektriksel katsayıları (K_e ve K_t) ile endüvi direncinin (R_a) ve endüktansının (L_a) değerleri, makinanın sonlu elemanlar manyetik analizi esnasında elde edilen verilerdir. Bu veriler motorun üretiminden sonra da

deneylerle de doğrulanmıştır. Elektrik makinasının modeli kurulurken aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır. Tablo 7’de formüllerde kullanılan parametreler ve nihai tasarımda kullanılan değerler görülebilir.

$$V_a = I_a \cdot R_a + L_a \cdot dI_a/dt + E_a \quad (8)$$

$$E_a = \omega_m \cdot K_e \quad (9)$$

$$T_m = I_a \cdot K_t \quad (10)$$

$$d\omega_m/dt = (T_m - T_y)/m \cdot r^2 \quad (11)$$

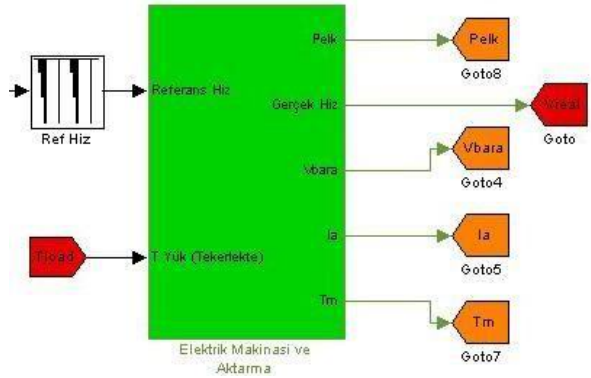
$$v = \omega_m \cdot r \quad (12)$$

$$P_{elk} = V_{bara} \cdot I_a \quad (13)$$

Tablo 7. Motor ve aktarma parametreleri

| | Açıklama | Değeri |
|-------|---------------------|---|
| R_a | Endüvi Direnci | 0.387 Ω |
| L_a | Endüvi Endüktansı | İhmal |
| K_e | Ters EMK katsayısı | 3V/rad/s |
| K_t | Moment Katsayısı | 3Nm/A |
| m | Araç Toplam Kütlesi | 270kg (Pb-A Akü) 230kg (Lityum-Pol. Akü) |
| r | Tekerlek Yarıçapı | 0,242m |

Oluşturulan tahrik ve aktarma modeli Şekil 4’te gösterilmiş olup, bu bloğun çıkışında aşağıdaki değerler okunmaktadır: DC/DC çeviriciden talep edilen elektriksel güç (P_{elk}), aracın gerçek hızı (v), ters EMK (E_a) ve motor uç gerilimi (V_a), endüvi akımı (I_a) ve elektrik makinasının ürettiği moment (T_m).



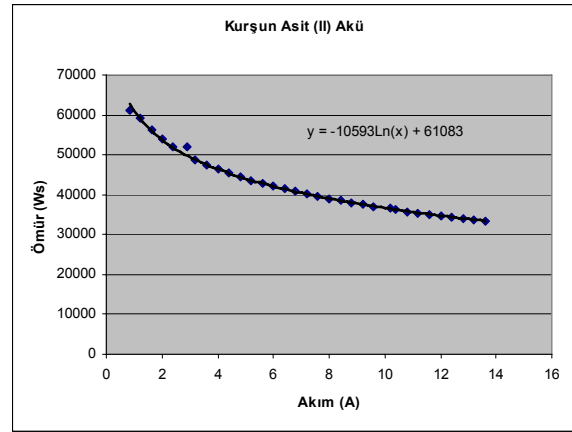
Şekil 16. Elektrik Makinası ve Aktarma Bloğu

Yarış sırasında aracın hızı pilot tarafından bir potansiyometre üzerinden ayarlanmaktadır. Simülasyonda da pilotun ulaşmak istediği hız değerleri bir referans hız bloğundan elde edilir. Bu bloğun çıkışı ile aracın o anki hızı karşılaştırılarak bir kontrolörden geçirilmiştir. Bu kontrolörün çıkışı gerçekte pilotun potansiyometrede yaptığı ayardır. Araçta bulunan DC/DC çeviricinin çıkışı bu potansiyometre ile ayarlanır. Burada önemli unsur, yük momenti (T_y) ile elektrik makinasının o an için ürettiği momentlerin tekerleğe indirgenmiş halde karşılaştırılmasıdır. Buna göre tekerleğin üzerindeki net momentin aracı ne şekilde hızlandıracakının hesaplanmaktadır. Bu işlem Şekil 16 da görülen bloğun içinde tümleşik haldedir. Çıkışta görülen

gerçek hız değeri aynı zamanda kontrolörün geri beslemesini oluşturur.

iv. Batarya Deşarj Performansı Bloğu: Batarya deşarj performansı modellenirken karşılaşılan sorun her tip batarya için çok değişik şekilde ve non-linear batarya deşarj karakteristiklerinin olmasıdır. Üzerinde çalışılan Lityum-Polimer ve Pb-A bataryalar için de, ayrı ayrı non-linear karakteristiklerin modellenmesi gerekmektedir. Öncelikle denenen lineerleştirilmiş karakteristiklerin istenen doğrulukta sonuçlar vermemesi nedeniyle, non-linear modelin kurulmasına karar verilmiştir.

Non-linear karakteristik, kataloglarda bulunan ve deneylerle de sağlaması yapılan çeşitli C değerlerindeki batarya kapasitelerinden faydalanarak, eğri uydurma yöntemi ile, talep edilen her akım değerinde Ah cinsinden kapasiteyi elde edebileceğimiz bir fonksiyon olarak geliştirilmiştir. Şekil 17’de, Pb-A bataryaların, ömür-çekilen akım grafiği görülmektedir.



Şekil 17. Batarya Deşarj Grafiği Eğri Uydurma

Yüzde cinsinden şarj durumunu elde etmek için, simülasyon yoluyla hesaplanan ve sürekli olan talep akımları, çeşitli akım aralıklarında doğrusallaştırılmıştır. Şekil 17’de görülen karakteristik üzerinde bu akım aralıkları işlenerek akımın o anki değeri (ya da aralığı) için Wh cinsinden ömür hesaplanır. Bu akım değeri ile akımın çekildiği süre çarpılarak Wh cinsinden tüketim bulunur. O akım aralığı için bilinen, Wh cinsinden ömür ile Wh cinsinden tüketilen akım oranlandığında, o zaman aralığı için yüzde cinsinden şarj durumundaki değişim hesaplanabilir. Tüm aralıklar için hesaplanan bu oranlar toplandığında ise yüzde cinsinden toplam tüketim bulunur. Yarış performansları, aracın, bataryaları %90 dolu iken yarışa başladığı varsayılarak hesaplanmıştır. Modellerde, bataryanın uç geriliminin tehlikeli seviye düştüğü an, şarj oranının %10 olduğu an olarak kabul edilmiştir.

Batarya deşarj performansı modellenirken, yukarıda anlatıldığı üzere, talep akımı 60 akım aralığına bölünmüştür. Özellikle uzun süreler boyunca talep edilen akım aralıkları 0.1A çözünürlükte, diğer akım değerleri 0.5A çözünürlükte okunmuştur. Her akım

aralığı boyunca çekilen akımı ve süreleri hesaplamak üzere bir mantıksal ilişkilendirme modeli kurulmuş ve bu aralıklar boyunca akımların zaman integralleri alınarak Wh cinsinden tüketimlere ulaşılmıştır. En son o aralıklardaki ömür ile orantılanan değerler % cinsinden bir sayaç yardımıyla başta öngörülen %90 doluluk oranından çıkartılarak o andaki sonuç doluluk oranı hesaplanmıştır.

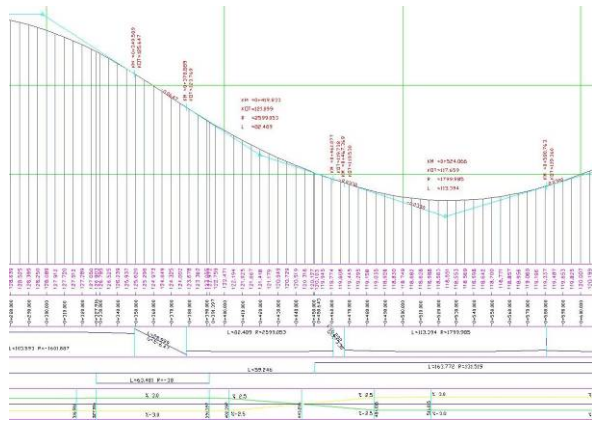
Bu yöntemle hesaplanan batarya şarj durumunun, katalog verilen deşarj değerlerinden en çok %0.1 farklı olduğu görülmüştür.

6. YOL MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ ve YOL SÜRÜŞ PERFORMANSININ HESAPLANMASI

5. Bölüm'de bahsedilen araç modeli kurulduktan sonra, aracın performansını incelemek için çeşitli yol modelleri üzerinde sürüş simülasyonları yapılmıştır. Bu sayede optimum performans ve enerji tüketimi dengesi kurulmaya çalışılmıştır. Yapılan simülasyonlar neticesinde geri dönülüp motor imalat edilmeden tasarım değişikliğine olanak da sağlanmıştır.



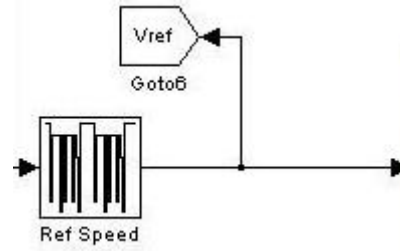
Şekil 18. Formula G İstanbul Park Pist Kuşbakışı Görüntüsü



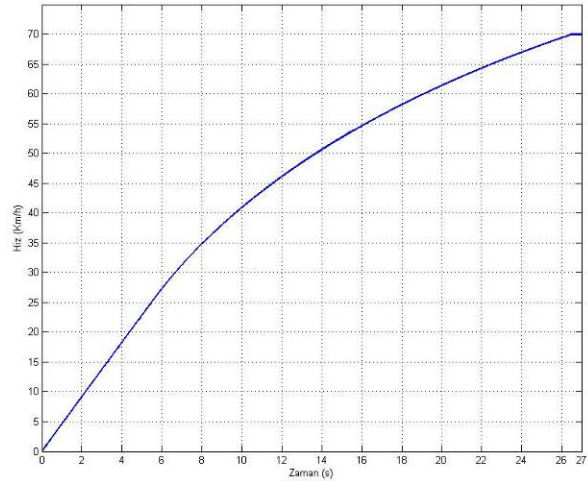
Şekil 19. Formula G İstanbul Park Pist Yükselti ve Viraj Açıkları

Öncelikle pistin topolojik çizimlerinden faydalanarak yarışın yapılacağı kısım için pistin yükselti ve viraj açıları lineerleştirilerek modellenmiş ve ana modelin içerisine eklenmiştir. Bu eğim değerleri 5. Bölüm'de bahsedilen eğim yüküne pozitif ya da negatif etki edecek, aracın yokuş tırmandığını ya da yokuş aşağı indiğini bilgisayar modelinde temsil etmek için kullanılacaktır.

İkincil olarak yine topolojik çizimlerden ve kuşbakışı görüntülerden (Şekil 18 ve Şekil 19) yararlanılarak yarış yapılacak bölümdeki virajlar belirlenmiş, aracın virajlara gireceği hızlar ve en az frenlemeyi yaparak, kendi kinetik enerjisini en verimli kullanacağı gaz kesme ve fren yapma noktaları belirlenmiştir. Gaz ve fren komutlarının tümü pilot tarafından kontrol edileceği için, bu belirlenen değerlerden bir referans hız tablosu hazırlanmış ve modelde motor bloğunun girişine hız referansı tablosu olarak eklenmiştir. Şekil 20'de görülen referans hız tablosunun girişi pistin metre cinsinden konum bilgisini, çıkışı ise km/h cinsinden o konumda olunması istenen hızı gösterir. Çıkış elektrik makinası modelinin hız referans girişine bağlanmıştır.



Şekil 20. Referans Hız Bloğu



Şekil 21. 0-70km/h Arası Hızlanma (Hız-Zaman) Grafiği

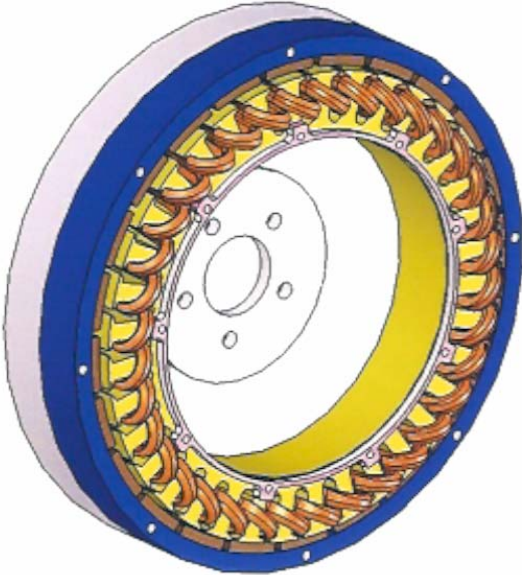
Fırçasız Doğru Akım motorunun tasarımı için yapılan sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen motor verileri, simülasyon içerisindeki motor modellerinde kullanılmıştır. Sürecin bir parçası olarak, kurulan pist modellerinde bu simülasyon çalıştırılmış ve akü kullanımı ile aracın performansı arasında bir optimizasyon yapılmıştır. Aracın pistteki hareketini yansıtan bilgisayar simülasyonları sonucunda, öngörülen motor performansına uygun olarak motorun tasarım kriterleri güncellenmiş ve optimize edilmiştir. Bu optimizasyon esnasında özellikle pistteki yokuşları aracın nasıl tımanacağı ve düz yolda giderken hangi değerlere kadar hızlanabileceği gözlemlenmiştir.

Nihayette elde edilen ve imalata karar verilen motorun aracı 0-70 km/h arasında hızlandırma performansı Şekil 21’de görülebilir.

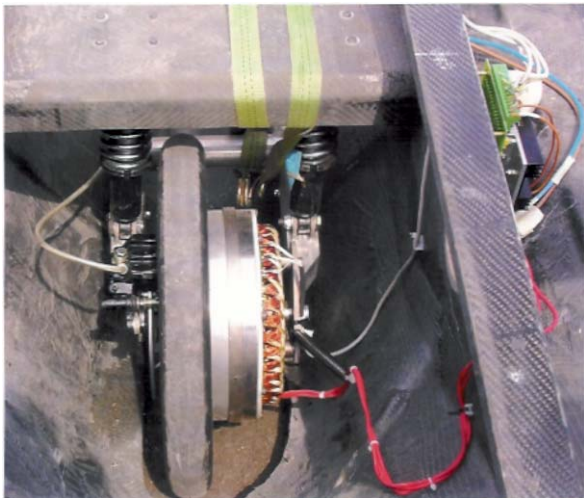
Bu bölümde anlatılan yol modelleri ve güncellenmiş motor modeli kullanılarak 9. Bölüm’de anlatılacak sürüş senaryoları geliştirilmiş, her bir senaryo için aracın enerji yönetimi belirlenmiş ve sonuçta aracın enerjisini yarış süresince en verimli kullanan sürüş yöntemi oluşturulmuştur [12].

7. ELEKTRİK MOTOR TASARIMININ OPTİMİZASYONU VE İMALAT

ARİba’da kullanılan fırçasız doğru akım motorunun tasarım değerleri, sonlu elemanlar analizi verilerinden ve Matlab/SIMULINK benzetimlerinden yararlanılarak güncellenmiştir. Analiz programından alınan verilerle Solidworks çizim programında motorun öncelikle 3 boyutlu montaj resmi çizilmiş, bundan alınan teknik çizimler yardımı ile motorun imalatına geçilmiştir [13, 14, 15]. Şekil 22’de motorun Solidworks çizimi görülmektedir.



Şekil 22. Arıba Motorunun Tasarım Resmi



Şekil 23. Motorun Araç Üzerindeki Görünümü

Motor gücünün en verimli şekilde tekerleklere iletilmesi için herhangi bir aktarma organı olmadan tekerleğe montajı yapılmıştır. Motor sürücü devreleri hem dc/dc çeviriciyle dc bara gerilimini hem de PWM ile motor giriş gerilimini ayarlayabildiği için araç, sürekli değiştirilebilen bir elektronik vitese sahiptir. Motorun bitmiş ve araca monte edilmiş hali Şekil 23’de görülmektedir.

8. RF HABERLEŞMESİ VE ENERJİ YÖNETİM YAZILIMI

Araç içi haberleşme sistemi ile CAN hattı üzerinden akan bilgiler, dinleyici durumunda çalışan bir CAN düğüm tarafından toplanıp kendisine bağlı bir RF verici tarafından pit bilgisayarına aktarılmıştır. 2.4 GHz ISM (Industrial-Scientific-Medical) bandında çalışan alıcı-vericiler, üzerlerinde bulunan güvenlik ayarları ile başka RF cihazlarla etkileşime girmeden çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Zira, ISM bandı lisans gerektirmeyen bir frekans olduğu için bu frekansta çalışan başka cihazlar bulunabilmektedir. İletişim mesafesi açık alanda 10 km’ye kadar çıkabilmektedir. RF verici üzerinden pit bilgisayarına aktarılan başlıca bilgiler akü gerilimleri, akü şarj-deşarj akımları, motor akımı, toplam harcanan enerji’dir. Bu CAN düğümünde toplanan bilgiler, alıcı - verici arasında tanımlanan belli bir iletişim protokolüne ve bilgi çerçevesine göre düzenlenerek saniyede bir defa gönderilmektedir. Örnek bir bilgi çerçevesi Şekil 24’de gösterilmiştir. Ortamdaki diğer RF alıcı-vericilerle herhangi bir girişim gözlenmediği için herhangi bir iletişim denetimine gerek duyulmamıştır. Ancak gerekmesi halinde kullanılmak üzere gönderilen çerçeve baştan uzun olarak düşünülmüş ve ihtiyaç halinde kullanılmak üzere boş alanlar bırakılmıştır. Tüm CAN düğümlerinden gelen ve bus hattı üzerinde saniye de bir kez yenilenen ölçüm değerleri, yine saniyede bir kez RF üzerinden yayınlanmaktadır. Böylelikle pit bilgisayarındaki bilgiler her bir saniyede güncellenmektedir.

| | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| Byte #1. Çerçeve başlangıç kodu #1 | Byte #2. Çerçeve başlangıç kodu #1 | Byte #3. Akü gerilimi | Byte #4. Akü şarj akımı | Byte #5. Motor akımı | Byte #6. Harcanan enerji | Byte #7. | Byte #8. |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|---------------|

Şekil 24. Örnek Bilgi Çerçevesi

Araçtan gelen bu bilgileri düzgün bir şekilde gösterebilmek için Visual Basic 6.0 ile hazırlanan bir arayüz ile pit alanındakilerin şoför ile aynı bilgileri görebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca gelen bilgileri kullanarak aracın kattığı yol, geçilen tur sayısı, kalan tur sayısı, akü şarj durumu, harcanan enerji, aküden çekilen enerji, panelden çekilen güç gibi çeşitli bilgiler hesaplanmak ve gösterilmek üzere hazırlanmıştır. Tasarlanan programın arayüzü şekil 25’de

gösterilmiştir. Bunların yanı sıra ARİba'nın akü, motor, güneş paneli bilgilerine kolayca ulaşabilmek için her birinin parametreleri arayüze ayrı bir kısım olarak eklenmiştir.



Şekil 25. Bilgisayar Arayüzü

9. SÜRÜŞ SENARYOLARI ve ENERJİ YÖNETİM UYGULAMASI

Daha önce belirtildiği üzere, Formula G 2006 yarışında batarya kapasitesi 2000Wh ile sınırlanmıştır. Ayrıca, güneş gözelerinden alınabilecek güç maksimum 800W olabilmektedir. Güneşin durumu ve gözelerin verimi göz önüne alındığında bu değer 500W seviyesini geçmediği gözlemlenmiştir. Yarışın süre sınırı ise 90 dakikadır.

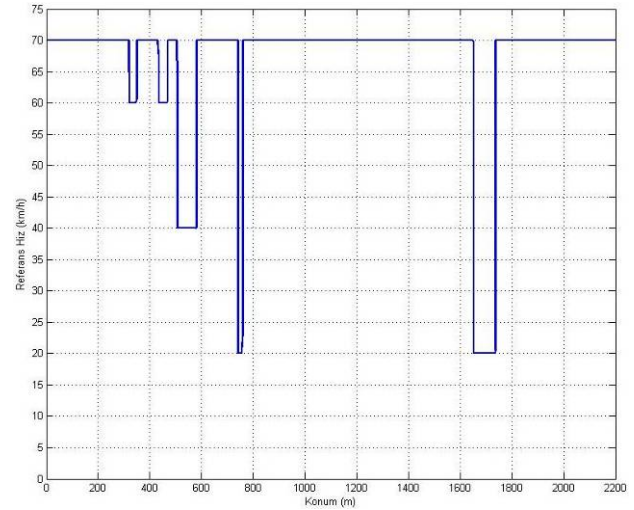
Bu verilerden yola çıkarak, iyi bir güneş altında aracın tüm yarış süresince harcayabileceği elektriksel enerji yaklaşık 2750Wh olarak hesaplanmıştır. Aracın en hızlı, ancak enerjisini tüketmeden yarış ne şekilde bitirebileceği üzerine sürüş senaryoları geliştirilmiş, yapılan simülasyonlardan elde edilen verilerle de enerji yönetimi uygulaması ve yarış stratejisi geliştirilmiştir.

Yarışlar 30 tur ve tur başına 2200m olarak düzenlenmiştir. 90 dakika içerisinde 30 turu bitiren 1. olacak, diğer yarışmacılar tur sayılarına ve zamanlarına göre sıralanacaktır. 90 dakika içerisinde 30 turu bitiren olmazsa yarışmacılar tur sayılarına göre sıralanacaktır. Bu kurallardan yola çıkarak aracın ya toplam 66km'lik yolu gitmesi, ya da 90 dakika boyunca maksimum performansta ilerlemesi gerekmektedir.

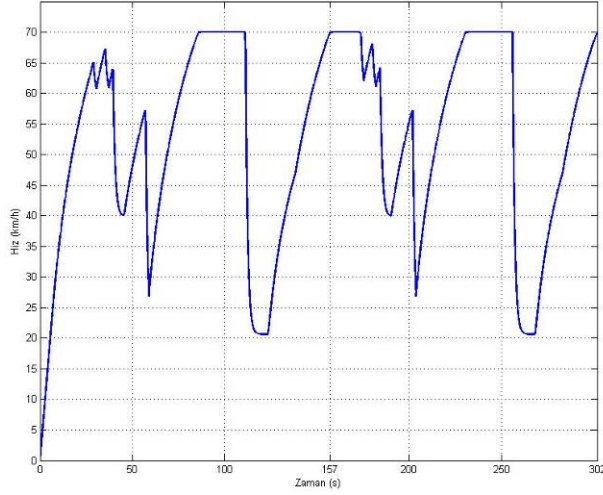
Aracın yarış süresince harcayabileceği maksimum enerji yaklaşık 2750Wh olduğu için, tur başına yaklaşık 90Wh'i geçmemek gerekir. Ayrıca, yine bir turun 180 saniyeden fazla sürmemesine çalışılmalıdır. Sürüş senaryoları üzerinde çalışılırken, yarışma kriterlerinin yanı sıra, aracın bir dur-kalk sırasında ne kadar enerji harcayacağı, maksimum hızdaki değişimlere göre aracın enerji tüketiminin ne kadar

değişeceği ya da öngörülemez yavaşlamalar (sarı bayrak, trafik vb.) neticesinde istenenden çok düşük hızlara düşme durumunda neler yapılabileceği ve havanın bulutlu olması gibi beklenmeyen durumlar için de çeşitli simülasyonlar yapılmıştır. Tüm bu simülasyonların sonucunda bir yarış stratejisi kurulmuştur. Birçok simülasyon denemesi sonucunda havanın bulutlu olduğu İstanbul Park yarışında geliştirilen yarış stratejisine göre, tur başına 80Wh (30 turda yaklaşık 2400 Wh) enerji kullanan ve bir turu yaklaşık 145 saniyede (30 turda yaklaşık 73 dakika) tamamlayan bir sürüş senaryosunun takip edilmesine karar verilmiştir. Enerji ve sürede verilen toleranslar bahsedilen beklenmeyen durumları karşılayabilmek içindir. Zaten her iki yarışta da ARİba diğer araçlardan ağır olmasına rağmen, yarışı öngörüldüğü üzere 90 dakikalık süre içerisinde, batarya enerjisi sonuna kadar kullanarak ve de birinci sırada bitirilmiştir. Araç, daha yokuşlu ve zorlu olan İstanbul Park Yarışı'nı tamamlayıp pite geldiğinde, akülerde en çok 1 tur daha atmaya yetecek kadar enerji kaldığı hesaplanmıştır.

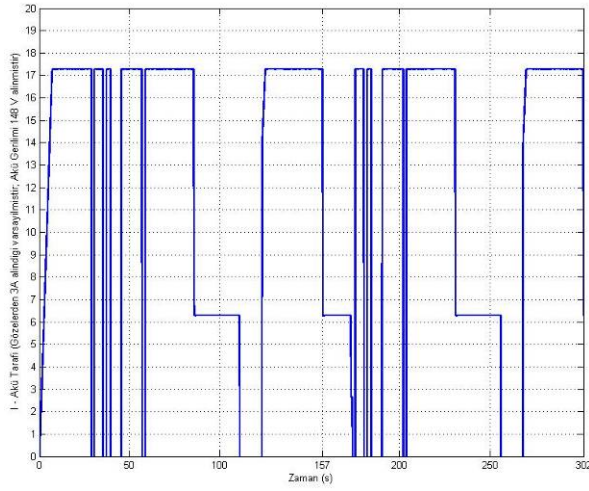
Geliştirilen yarış stratejisine göre aracın bir tur için referans hız-zaman ile ilk iki tur için hız-zaman (v-t), motor akımı-zaman (I_a -t), batarya akımı-zaman (I_b -t), tüketilen enerji-zaman grafikleri Şekil 26 ile Şekil 30 arasında görülebilir [16].



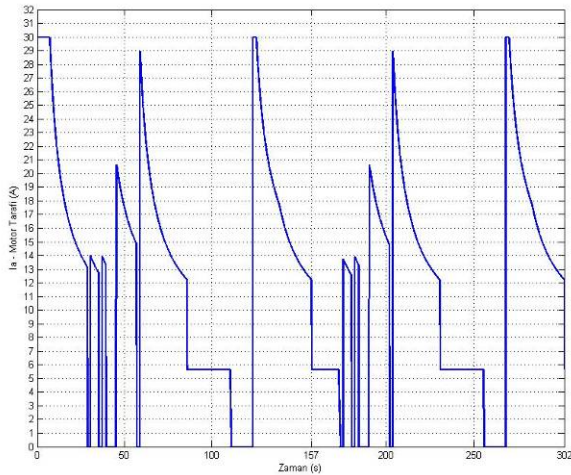
Şekil 26. Konum – Referans Hız Grafiği



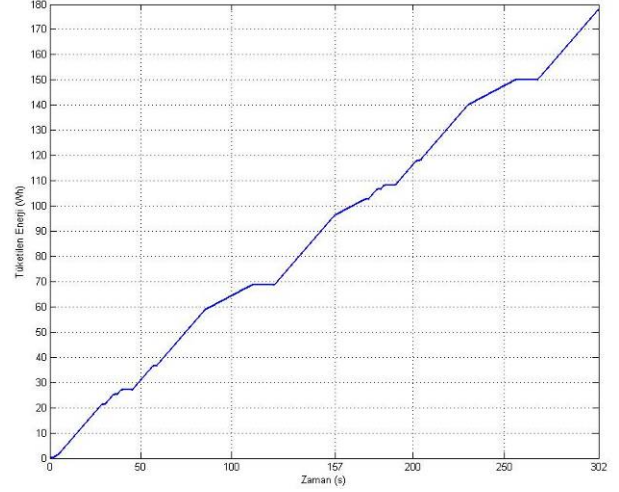
Şekil 27. Aracın 2 Tur için Zaman-Hız Grafığı



Şekil 28. 2 Tur için Akü Akımının Zamana Göre Değişimi



Şekil 29. 2 Tur için Motor Akımının Zamana Göre Değişimi



Şekil 30. 2 Tur için Tüketilen Enerjinin Zamana Göre Değişimi

10. SONUÇLAR

Güneşten alınabilecek ve araçta depolanabilecek enerjilerin sınırlandırıldığı bir elektrikli araç yarışmasında elektrik-elektronik ve elektromekanik tasarımda aşağıdaki ölçütler ve yarış yönteminin uygulanması ARİba'yı başarıya götürmüştür.

Tasarım Ölçütleri :

- Güneş gözeleri** araç üzerine uygun bir biçimde yerleştirilmeli, güneşin her konumunda en yüksek enerji dönüşümü sağlanmalı, paralel ve seri bağlama yoluyla göze arzısı halinde en az eksiklik ile yarışa devam edilebilmelidir.
- Güneş gözelerinin çıkış gerilimi- dc bara gerilimi ve akü gerilimi birbiriyle uyumlu olmalıdır.** Bu uyum en bulutlu havada bile yeterli akü şarj özelliğini sağlamalıdır.
- Aracın aerodinamik yapısına** uygun bilgisayar modeli kurulmalı ve her yol eğiminde, her hız ve ivmede araç için gerekli moment, güç vs değerler hesaplanmalıdır.
- Elektrik motoru** yüksek verimli olmalı, her bara geriliminde istenen momenti verebilmeli, tercihan doğrudan tahrikli olmalıdır.
- Motor sürücü devresi** kalkıştan en yüksek hıza kadar güvenli olmalı ve yüksek verimle çalışmalıdır.
- Aracın elektrik sisteminin bilgisayar modeli oluşturulmalı** ve her güneş ve akü doluluk durumunda giriş-çıkış gücü, kayıplar vs hesaplanabilmelidir.
- Akünün bilgisayar modeli** oluşturulmalı ve dolma ve boşalma karakteristiği ile kalan enerji hesaplanabilmelidir.
- Yarış pistinin matematik modeli** oluşturulmalı ve aracın bu pistte çeşitli hızlarda harcadığı enerji, turu tamamlama süresi vs değerler yarış öncesinde hesaplanmalı ve bunlar bir **yarış senaryosu** haline getirilmelidir.
- Araç içinde tercihan CAN bus ile uyumlu bir **veri toplama sistemi** oluşturulmalı ve bu sistem ile yarış

sırasında okunan akım, gerilim, güç vs değerler bir RF sistemiyle **yarışı dışarıdan yöneten bilgisayara** gönderilebilmelidir.

10. **Araç Yönetim Yazılımı** geliştirilerek aracın yarış sırasındaki akım, gerilim, hız, moment ve güç gibi anlık büyüklüklerinin ölçümü ve bunların pilot önündeki göstergeye taşınması sağlanmalıdır.

11. **Araç Yönetim Yazılımı** aynı zamanda o ana kadar harcanan enerji değerlerini hesaplamalı, mevcut güneş durumuna göre yarışın kalan kısmı için enerjinin tam olarak yetebileceği yarış senaryosunu **yarışı dışarıdan yöneten bilgisayar** aracılığıyla hesaplayabilmelidir. Yarışın geri kalan kısmı için bu senaryo kontrolleri belirli aralıklarla tekrar edilmeli ve yarış bu çerçevede sürdürülmelidir.

Özetle bu çalışma, ön tasarım - modelleme ve simülasyon - tasarım, gerçekleştirme ve, deneylerle tasarım ve modellenmenin doğrulanması evrelerinden oluşmuştur. Tam ölçekli deney sonuçlarının, simülasyon sonuçlarıyla tam bir uyum içerisinde olduğu, optimumlaştırılmış tasarım değerlerinin istenen performans değerlerini başarıyla sağladığı görülmüştür.

Araç, İzmir yarışında rakiplerinden yaklaşık 100 kg, İstanbul yarışında ise yaklaşık 50 kg daha ağır olmasına karşın, yukarıda açıklanan teknik özellikleri ve doğru sürüş senaryosuyla her iki yarışta da birinci olarak başarıyla tamamlamıştır. Bunun yanında Bu çalışma ile İTÜ ARİBa ekibi, yarış jürisi tarafından TÜBİTAK “2006 En Yüksek Yerli Katkı Özgün Tasarım Ödülü”ne layık bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] SunPower Corporation, A-300 Single-Crystal Silicon Solar Cell, California, 2003.
- [2] Tuncay R.N., Üstün Ö., “Otomotiv Elektroniğindeki Gelişmeler-2005”, Çağrılı Bildiri,, IX Otomotiv ve Yan Sanayii sempozyumu, Bursa, 27-28 Mayıs 2005
- [3] Tuncay R.N., Üstün Ö., “Otomotiv Elektroniğindeki Son Gelişmeler” ELECO 2004, Bursa 8-12 Aralık 2004.
- [4] Cotter J., Roche, D., Stroyer, J., “Speed of Light 2, The Centre for Photovoltaic Engineering” University of New South Wales Press, Wales, 1999.
- [5] Worleyparsons Energy Cells, Lithium Polymer Cell Performance, SLPB526495, Nisan 2005.
- [6] Carroll, D.R., “The Winning Solar Car: A Design Guide for Solar Race Car Teams”, SAE Press, 2003.
- [7] Thacher, E.F., “A Solar Car Primer”, Nova Science Publishers, 2005.
- [8] Yıldırım, A., “ARİBa Projesi Kapsamında 4 Bölge FDAM Sürücüsü Tasarımı”, Lisans Bitirme Çalışması, İTÜ, 2006.
- [9] Tüysüz, A. “Design of a CAN Based Data Acquisition and Communication System For

ARİBa Project” Lisans Bitirme Çalışması, İTÜ, 2006.

- [10] Tür, O., “Hibrit Elektrikli Araç Güç Sisteminin Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık 2003.
- [11] Gökçe, C., “Modeling and Simulation of a Series-Parallel Hybrid Electrical Vehicle”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2005.
- [12] Titiz, F.K., “Bir Güneş Arabasının Enerji Yönetimi” Lisans Bitirme Çalışması, İTÜ, 2006.
- [13] Yılmaz M., Tuncay R.N., Üstün, Ö., ‘Fırçasız Doğru Akım Makinasının (BLDC) MATLAB/Simulink Ortamında Modellenmesi ve Algılayıcısız Kontrolü’, Conference for Computer-Aided Engineering and System Modeling with Exhibition, 9-10 Aralık 2004, İstanbul.
- [14] Üstün, Ö., Tuncay, R.N., “Design, Analysis and Control of a Novel Linear Actuator” IEEE Trans. On Industry Applications, Vol.42, July/August 2006.
- [15] Üstün, Ö., Tuncay, R.N., “Determination of Optimum Design Criteria of Coreless-Linear Brushless D.C. Machines”, ISEF’99, Pavia-Italy, 1999
- [16] Tuncay R.N., Üstün, Ö., Yılmaz M., Gökçe C., Berberoğlu Ö., “ELIT-2 Paralel Karma Elektrikli Aracın Enerji Yönetim Sisteminin Modellenmesi ve Simülasyonu”, Proje Raporu, MEKATRO & TÜBİTAK/MAM Enerji Enstitüsü, Gebze, Kasım 2004